

vasarhelyi.gabor\_286\_24

# Intelligens drónrajok vezérlése és alkalmazása

Az MTA Doktora cím elnyeréséhez készített disszertáció

Vásárhelyi Gábor, PhD



ELTE Biológiai Fizika Tanszék

2024. november 5.

## A dolgozat online elérése

- Tézisfüzet:  
<https://hal.elte.hu/~vasarhelyi/doc/vasarhelyi2024MTAteziszfuzet.pdf>
- Disszertáció:  
<https://hal.elte.hu/~vasarhelyi/doc/vasarhelyi2024MTAdisszertacio.pdf>

## Kapcsolat

- Honlap: <https://hal.elte.hu/~vasarhelyi>
- E-mail: <mailto:vasarhelyi@hal.elte.hu>



# Tartalomjegyzék

<b>Köszönetnyilvánítás</b>	<b>vii</b>
<b>Előszó</b>	<b>ix</b>
Technikai információk . . . . .	x
<b>1. Bevezetés</b>	<b>1</b>
1.1. Csoportos mozgás leírása nemegyensúlyi statisztikus fizikával . . . . .	2
1.1.1. Vonzás és peremfeltételek . . . . .	3
1.1.2. Sebességillesztés . . . . .	4
1.1.3. Taszítás . . . . .	5
1.1.4. Zaj és komplexitás . . . . .	6
1.1.5. Tehetetlenség, késleltetés . . . . .	7
1.2. Csoportos mozgás a természetben . . . . .	8
1.2.1. Univerzalitás . . . . .	8
1.2.2. Reakcióidő . . . . .	10
1.2.3. Predikció . . . . .	11
1.2.4. Heterogenitás, hierarchia . . . . .	12
1.2.5. Csoportos intelligencia . . . . .	14
1.2.6. Evolúciós optimalizálás . . . . .	17
1.3. Csoportos robotikai alapok . . . . .	18
1.3.1. Történeti áttekintés . . . . .	19
1.3.2. Technológiai szükségletek . . . . .	20
1.4. A dolgozatban tárgyalt kérdések . . . . .	23
1.4.1. A dolgozat felépítése . . . . .	24
<b>2. A csoportos repülés szimulációja</b>	<b>27</b>
2.1. A repülő robotok valóság-hű modellje . . . . .	28
2.2. Rajrepülés algoritmusa zárt térben . . . . .	30
2.2.1. Önhajtás . . . . .	30
2.2.2. Rövid hatótávolságú taszítás . . . . .	30
2.2.3. Sebességillesztés . . . . .	31
2.2.4. Kölcsönhatás a falakkal . . . . .	31

2.2.5.	Összegzés	32
2.3.	Csoportos célpont követés algoritmus	32
2.4.	Szimulációs eredmények	33
2.4.1.	Rajrepülés szimulációja zárt térben	34
2.4.2.	Csoportos célpontkövetés szimulációja	35
2.5.	A fejezethez kapcsolódó tézispont	36
<b>3.</b>	<b>Csoportos repülés kültéri drónokkal</b>	<b>39</b>
3.1.	A repülő robotok szerkezeti felépítése	40
3.2.	Egyéni drónvezérlés	43
3.3.	Csoportos repülési kísérletek	44
3.3.1.	Rajrepülés gyűrű alakú arénában	44
3.3.2.	Csoportos célpontkövetés formációrepülésben	45
3.4.	A fejezethez kapcsolódó tézispont	47
<b>4.</b>	<b>Csoportos üldözés-menekülés</b>	<b>49</b>
4.1.	Csoportos vadászat a természetben	49
4.2.	A csoportos üldözés-menekülés modellje	50
4.2.1.	Az üldözők modellje	51
4.2.2.	A menekülők modellje	51
4.3.	Szimulációs eredmények	52
4.4.	A fejezethez kapcsolódó tézispont	55
<b>5.</b>	<b>Optimalizált rajrepülés zárt térben</b>	<b>57</b>
5.1.	Vissza a valósághoz	58
5.2.	Rajrepülő modell dinamikai korlátokkal	60
5.2.1.	Taszítás	60
5.2.2.	Sebességillesztés	60
5.2.3.	Kölcsönhatás falakkal, akadályokkal	62
5.2.4.	Önhajtás	63
5.2.5.	A kívánt sebesség végső formája	63
5.3.	Evolúciós drónraj optimalizálás	63
5.3.1.	Rendparaméterek	65
5.3.2.	Fitnessz függvény	66
5.3.3.	Optimalizációs eredmények	67
5.4.	Rajrepülés harminc drónnal	69
5.5.	A fejezethez kapcsolódó tézispont	71
<b>6.</b>	<b>A drón forgalom alapmodellje</b>	<b>73</b>
6.1.	Drón forgalmi szituációk	74
6.1.1.	Véletlenszerű mozgás a síkon és térben	74
6.1.2.	Két célpont közötti váltakozó mozgás	75
6.1.3.	Csillag alakú radiális mozgás	76

6.1.4.	Kereszteződés . . . . .	76
6.1.5.	Zebra . . . . .	76
6.2.	A drónforgalom vezérlő modelljei . . . . .	76
6.2.1.	Anizotróp taszítás . . . . .	77
6.2.2.	Szituációfüggő sebességillesztés . . . . .	78
6.2.3.	Agilis önhajtás . . . . .	79
6.2.4.	Türelmes sorban állás . . . . .	79
6.3.	Eredmények . . . . .	81
6.3.1.	Forgalmi modell optimalizálás . . . . .	81
6.3.2.	A forgalmi modell hatékonysága . . . . .	81
6.3.3.	Valós drónforgalom . . . . .	82
6.4.	A fejezethez kapcsolódó tézispont . . . . .	83
<b>7.</b>	<b>Reaktív és stabil rajrepülés adaptív vezetőkkel</b>	<b>85</b>
7.1.	Csoportos döntéshozatali struktúrák a társadalomban . . . . .	86
7.2.	Csoportos mozgás és a fluktuáció-disszipáció tétel . . . . .	90
7.3.	Az adaptív hierarchikus irányítás modellje . . . . .	91
7.3.1.	Couzin modell . . . . .	91
7.3.2.	Cavagna modell . . . . .	92
7.3.3.	Adaptív szándék alapú modellek . . . . .	92
7.4.	Eredmények . . . . .	94
7.4.1.	Megnövekedett rezponzivitás . . . . .	95
7.4.2.	Kilépés a perzisztencia-rezponzivitás kompromisszumból . . . . .	95
7.4.3.	Kísérleti eredmények . . . . .	96
7.5.	A fejezethez kapcsolódó tézispont . . . . .	97
<b>8.</b>	<b>Drónforgalom prediktív útvonaltervezéssel</b>	<b>99</b>
8.1.	Decentralizált prediktív forgalmi modell . . . . .	100
8.1.1.	Az önhajtás döntési kritériumrendszere . . . . .	101
8.2.	Eredmények . . . . .	103
8.2.1.	Skálázható, hatékony forgalmi szimulációk . . . . .	103
8.2.2.	Hierarchikus elsőbbségi viszonyok szimulálása . . . . .	104
8.2.3.	Réteges háromdimenziós drón forgalom . . . . .	104
8.2.4.	Sűrű drónforgalom 100 drónnal . . . . .	105
8.3.	A fejezethez kapcsolódó tézispont . . . . .	106
<b>9.</b>	<b>Összefoglaló gondolatok</b>	<b>107</b>
9.1.	Összefoglalás . . . . .	107
9.2.	Nagy baj van . . . . .	108
9.2.1.	Késleltetés . . . . .	108
9.2.2.	Egyedszám skálázás, emergens jelenségek . . . . .	109
9.2.3.	A változatosság csökkenése . . . . .	111
9.2.4.	A hatalom csomósodása . . . . .	114

9.3. Sok kicsi sokra megy . . . . .	115
<b>A tézispontok alapjául szolgáló publikációk</b>	<b>117</b>
<b>A dolgozathoz kapcsolódó további saját publikációk</b>	<b>119</b>
<b>Irodalomjegyzék</b>	<b>121</b>

## Köszönetnyilvánítás

Ez a munka nem jöhetett volna létre Vicsek Tamás és az általa létrehozott sokszínű kutatócsoport elképesztő szellemi inspirációja, pezsgése és példamutató teljesítőképességű csoportos együttműködése nélkül. Köszönöm Tamásnak a másfél évtizedes, szinte apai szintű gondoskodást, mentorálást, támogatást, kritikát, humort és kivételes szellemi inputot! Az ELTE Biológiai Fizika Tanszéken a csoportos jelenségek és bonyolult rendszerek tanulmányozásával töltött évek minden nagyszerű eredmény mellett alapvető életfilozófiámat és személyiségemet is erőteljesen alakították és érlelték. Köszönöm a tanszék vezetőinek, Kürti Jenőnek és Derényi Imrénének, és a tanszék működtető adminisztratív és pályázatos kollégáknak, köztük kifejezetten Farkas Anikónak, Kolozsvári Marcsinak és Botos Krisztának, hogy a tanszék profi működtetésével lehetővé tették az alkotást számunkra.

Kifejezetten hálás vagyok az ELTE Biológiai Fizika Tanszék összes munkatársának és az általuk létrehozott szellemiségnek, melyben a közös munkát és a tanszék hírnevének öregbítését mindenkor és elsősorban az értékteremtés és az élvonalbeli szellemi alkotás vezérelte, töretlenül minőségi szakmai alapokon, mentesen politikától, korrupciótól, megalkuvástól, szakmai érdekeket anyagiaknak alárendelő hatásoktól, és kiállva a gondolkodás, véleményformálás, dicséret és kritika szabadsága és a tudás alapú demokratikus társadalmi berendezkedés alapvető fontossága mellett.

Köszönöm az izgalmas együttműködést minden társszerzőmnek, akikkel a fárasztó de gyönyörködtető szellemi munka egyben sokrétű és mély barátságokat is érlelt. Köztük is elsősorban köszönet illeti a hardcore drónos csapatot, Somorjai Gergőt és Nepusz Tamást, akikkel a tudományos munka mellett társtulajdonosként közel tíz éve napi szintű inspiratív szimbiózisban élünk, sok izgalmas és összességében jövőbe mutató közös döntést meghozva. Köszönet társszerző doktoranduszaimnak, Virágh Csabának és Balázs Boldizsárnak, akikkel talán a legtöbb időt töltöttem az évek során izgalmas szellemi kihívások fölött töprengve, mindezt humorral és jókedvvel fűszerezve. Hasonló köszönet társszerző MSc és BSc diákjaimnak, Tarcai Norbinak, Janosov Milánnak és Szörényi Tamásnak hasonlóan kitartó munkájukért. Köszönet további „drónos” diákjaimnak is, Jónás Tamásnak és Hegyi Gáspár Andrásnak, a témavezetésembe vetett bizalmukért, és kiemelten Kalocsai Botondnak a legtagabb kontextusú izgalmas beszélgetésekért és az őszinte és kritikus hangvételért.

Irtó hálás vagyok Ákos Zsuzsinak, hogy megismertetett Vicsek Tamással és bevezetett a tanszéki közös, repülés által inspirált munkába. Kiemelten hálás vagyok Nagy Máténak is, akivel a legtöbb szálon folytattunk szoros együttműködést a csoportos viselkedés kapcsán, és aki Vicsek Tamás közösségépítő és szellemi hagyományát példamutatóan viszi tovább jelenleg is a tanszéken. Köszönöm Palla Gergőnek a tanszéki inspiratív munkát és e dolgozat írásához nyújtott támogatását.

Nagyon hálás vagyok félig magyar, félig külföldi társszerző kollégáimnak, nevezetesen Bíró Dórának és Gusz Eibennek, akik színt, szakértelmet és kiemelkedő nemzetközi minőséget hoztak a közös munkánkba – Dóra a csoportos viselkedés terén, Gusz a mesterséges evolúció vonatkozásában. A külsős társszerzők közül szeretném hálám kifejezni még Miklósi Ádámnak és Kubinyi Enikőnek az etológiai együttműködésért és egyáltalán az élővilággal szemben mutatott példaértékű empátiájukért.

Köszönet a CollMot kitartó csapatának, Vadász Gergőnek, Donkó Istinek és Vítályos Csillának, akik szakértelmükön túl inspiratív személyiségükkel is segítik a közös ügyet és ezáltal a tudományos eredmények elérését is. Külön köszönet Előd Áginak CollMot-hoz hűségese drón show tervező munkájáért. Ági a hazai drón show előadásokat művészi szintre emelte egy egész ország számára és személyiségével, gondolataival és óriási tudásával igen sok ponton inspirálta tudományos munkánkat.

Szeretném hálám kifejezni mindenkori pedagógusaimnak, akik inspirációjukkal, példamutatásukkal, szakértelmükkel és gondoskodásukkal alapvetően határozták meg életem irányát. A rendkívül hosszú listából kiemelten: Borbély Judit (matematika), Éder Marian (angol), Gajdos Zsuzsa (spanyol), Láday Miklós† (biológia), Jenes Béla (testnevelés), Jäger Csaba (elektronika), Iván László (fizika), Molnár Gábor (fizika), Hraskó Péter (relativitáselmélet), Kálmán Péter (kvantummechanika), Roska Tamás† (doktori témavezetés) és Vicsek Tamás (poszt-doc témavezetés).

Végül, de nem utolsósorban, köszönöm a megértést, támogatást és türelmet népes kis családocskámnak. Mindenekelőtt gyerekeimnek, Matyinak, Miskának, Momónak és Rózinak, akiknek sok papa-időt kellett nélkülözniük a munkám miatt és sokszor láttak munkaügyben stresszesnek, idegesnek és/vagy gondolataimba merülve a családi idő rovására is. Külön köszönet Rékának és Almának, hogy az elveszett papa-időt mama-idővel tudták pótolni, és sok hülyeségem ellenére kitartottak mellett az elmúlt évtizedek során. Köszönöm tesóimnak, Krisztának és Zsókának, és szüleimnek Annának és Tamásnak, csak úgy általában, úgy is értitek.

Ezt a művet legszívesebben megboldogult nagyapáimnak, Imrének† és Atyának†, nagymamáimnak, Surának† és Maminak†, nagynénémnek, Zsókának† és Juditnak†, és kedvenc nagybácsikámnak, Lacinak† mutatnám meg, akik a családunk szellemi és kulturális örökségét egész életük során méltó és példamutató módon képviselték, támogatták és adták tovább.

A dolgozatot jórészt a Bács-hegyen♥ írtam. Éljen a természet, az örök forrás!

## Előszó

Dolgozatom és a kapcsolódó tézisfüzet csoportos robotikáról szól. Csoportos robotika alatt egynél több mesterséges egyedből álló önálló robot valamilyen szintű együttműködését értjük, melynek során a több egyed együttes viselkedése tipikusan emergens tulajdonságokat mutat, azaz a rendszer olyan képességekkel és jellegzetességekkel bír, melyek az egyedi robot szintjén nem, csak a csoport szintjén értelmezhetők.

A csoportos robotika inter- és multidiszciplináris tudományterület, melynek művelése az elméleti és gyakorlati tudás rendkívül széles spektrumát igényli az alapkutatástól a rendszerszintű innovációkig. A csoportos robotika emellett XXI. századi innováció is, mivel a csírázásához, növekedéséhez, és mostanra virágzásához szükséges háttérrel és táptalajt az utóbbi évtizedek szédületes ütemű és sokrétű technológiai fejlődése tudta csak biztosítani.

A csoportos robotika néhány évtized alatt a semmiből tág tudományterületté nőtte ki magát, melynek alterületeit a robotok típusa (pl. szárazföldi, vízi, légi), számsága (kettőtől felfelé, határ a csillagos ég), együttműködésének szintje (koordináció, kooperáció, kollaboráció), valamint az egyes robotok sokszínű képességei határozzák meg.

Ebben a dolgozatban elsősorban repülő robotok (drónok) minél nagyobb számosságú, decentralizált, önszerveződésre képes rajainak bio-inspirált koordinációjáról és kooperációjáról van szó. Ugyanakkor a dolgozatban kifejezett szándékkal törekszem arra, hogy a csoportos robotika eszköztárán és farvizén létrehozott eredményeket a minket körülvevő komplex rendszerek esettanulmányaként kezeljem, hogy változatos világunk univerzális működési mintázatait analógiákkal bemutatva eredményeim tanulságait minél tágabb kontextusba, minél általánosabb szintre tudjam emelni.

## Technikai információk

- A dolgozatban ismertetett tudományos újdonságok örömteli csapatmunka eredményei, ezért a dolgozatban – a társszerzők által aláírt lemondó nyilatkozatok ellenére – mindenhol (a tézisekben is) ragaszkodom a többes szám első személy használatához.
- A dolgozatban háromféle sorszámozott irodalmi hivatkozás típus található:
  1. A tézispontokat megalapozó hivatkozások „*T*” előtaggal szerepelnek (pl. [T1]), sorszámuk megegyezik a téziszüzetben található sorszámokkal.
  2. A tézispontokhoz közvetlenül nem felhasznált saját publikációk „*S*” előtaggal szerepelnek (pl. [S1]).
  3. Minden egyéb (külső) hivatkozás egyszerű sorszámmal szerepel (pl. [1]).
- A dolgozat a tudományos közlemények mellett esetenként külső honlapokra is hivatkozik. A szövegben elhelyezett hivatkozások lábjegyzetben vannak feltüntetve, de a disszertáció .pdf változatában kattinthatók is.
- A dolgozat a saját szellemi termékem, de előállításához emberekkel és gépekkel is konzultáltam, a saját cikkek bizonyos beillesztendő szövegrészleteinek előfordításához és általános tanácsadáshoz esetenként mesterséges intelligenciát ([Google Translate](https://translate.google.com/)<sup>1</sup> és [ChatGPT](https://chat.openai.com/)<sup>2</sup>) is használtam. A dolgozatban található ábrák valódiak, nem mesterséges intelligencia által lettek előállítva. A szöveg végső változatát minden külső segítség igénybevétele után magam állítottam elő. A dolgozat szövege [LaTeX](https://www.latex-project.org/)<sup>3</sup> forrású, szerkesztése [VSCode](https://code.visualstudio.com/)<sup>4</sup> környezetben történt, verziókövetésére az ELTE Biológiai Fizika Tanszék által fenntartott [Gitea](https://hal.elte.hu/git ea)<sup>5</sup> rendszert használtam.

---

<sup>1</sup> <https://translate.google.com/>

<sup>2</sup> <https://chat.openai.com/>

<sup>3</sup> <https://www.latex-project.org/>

<sup>4</sup> <https://code.visualstudio.com/>

<sup>5</sup> <https://hal.elte.hu/git ea>

## 1. fejezet

# Bevezetés

A csoportos robotikát ebben a dolgozatban a csoportosan mozgó élőlények egyedi és csoportos tulajdonságainak és képességeinek analitikus modellezése és mérnöki utánzása mentén közelítjük meg, lehetőség szerint tudatos tervezéssel meghaladva a természetben előforduló csoportos rendszerek megismert korlátait.

A dolgozat multidiszciplináris jellege miatt a bevezetésben három különböző tudományág irányából közelítem meg a bemutatandó tudományos újdonságokat: a nemegyensúlyi statisztikus fizika, a természetben előforduló csoportos viselkedés és a mérnöki robotika szemszögéből. A csoportos mozgás statisztikus fizikájára azért lesz szükségünk, mert ennek a tudományágnak az eszköztárával tudjuk modellezni, megérteni, szimulálni, validálni és optimalizálni a tervezendő nagy egyedszámú robotrendszerünket. A természetes csoportos mozgás alapos megfigyelése kimeríthetetlen inspirációt és ötletforrást adhat nekünk a csoportos rendszerek lehetséges képességeiről, struktúrájáról, dinamikájáról, működési mechanizmusairól, optimális hangolásáról, emergens tulajdonságairól. A robotika pedig mérnöki eszköztárunk lesz a valódi robotrajunk elkészítéséhez és működtetéséhez.

Mindhárom tudományterület bemutatásánál elsősorban arra törekszem, hogy az olvasó el tudja sajátítani azt a gondolkodásmódot és „mindset”-et, amire a nagy egyedszámú önszerveződő drónok viselkedésének megértéséhez és csoport szintű vezérlésének stabil kézben tartásához készség szinten szükség van.

Fontos előljáróban megjegyezni, hogy a drónrajok irányíthatóságának és irányításának vizsgálatához mi a tanszéki hagyományoknak megfelelően a hagyományos mérnöki gondolkodás, azaz az analitikus irányításelméleti megközelítés *helyett* a biológiai rendszerek minél egyszerűbb ágens-alapú modellezését és a modellek hatására létrejövő dinamikának közelítő számítógépes szimulációban történő validálását választottuk. E kétféle koncepcionálisan különböző irány közti legszembetűnőbb különbségeket, kölcsönös előnyöket és hátrányokat az 1.1. táblázat foglalja össze.

1.1. Csoportos mozgás leírása nemegyensúlyi statisztikus fizikával

Tulajdonság	Írányításelméleti megközelítés	Ágens alapú modellezés
Egzakt, determinisztikus	igen	nem
Validálás	analitikus	valószínűségi
Minimálisan szükséges matematikai komplexitás	magas	alacsony
Idealizálási, modell egyszerűsítési kényszer	magas	alacsony
Csoportos csatolt dinamika kezelhetősége	nehéz	könnyű
Könnyen bővíthető	nem	igen
Könnyen skálázható	nem	igen

1.1. táblázat. A drónrajok irányításelméleti és ágens-alapú szimulációs megközelítésének összehasonlítása.

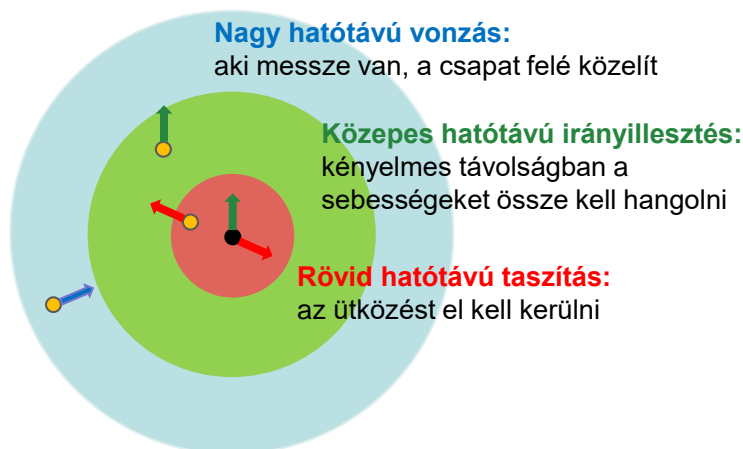
## 1.1. Csoportos mozgás leírása nemegyensúlyi statisztikus fizikával

Mostanra nagy biztonsággal lehet állítani, hogy a csoportos mozgás statisztikus fizikai leírásának egyik első mérföldköve Vicsek Tamás és kutatótársainak 1995-ös cikke, mely bevezette a köztudatba az *önhajtott részecske* (angolul *self-driven particle* vagy *self-propelled particle*, azaz SPP) definícióját, azaz a csoportos mozgás leírására használt nemegyensúlyi statisztikus fizika elemi egységét [1]. A cikkben bemutatott, azóta „Vicsek modell” néven elhíresült algoritmus a statisztikus fizikában megszokott passzív részecskékhez egy belső hajtóerő által generált aktív sebességet rendelt, melynek nagysága állandó, irányát pedig minden (diszkrét, szimulált) időpillanatban a szomszédos részecskék sebességének átlag iránya és véletlenszerű zaj összege határozza meg.

Ezzel a lenyűgözően egyszerű modellel a zaj függvényében a sebességek átlagában kinetikus másodrendű fázisátalakulást lehetett megfigyelni: nagy zaj esetén a rendszer egyedeinek vektoriális átlagsebessége zéró, azaz a mozgás rendezetlen, korrelálatlan, míg kis zaj esetén a pillanatnyi sebességátlagolás a részecskéket egy irányba fordítja, így az átlagsebességük, mint rendparaméter megnő, és kialakul a koherens csoportos mozgás.

A Vicsek modellt picit megelőzve, de attól teljesen függetlenül és némileg más motivációval jelent meg a csoportos mozgás szimulációs vizsgálatának másik történelmi cikke, a Reynolds féle „boid algoritmus”, mely részecskék csapatának számítógépes vizualizációjához definiált három egyszerű lokális párkölsönhatást: i) rövid hatótávú tasztítás; ii) közepes hatóságú sebességillesztés; iii) és nagy hatótávú vonzás (lásd 1.1. ábra), melyek összessége koherens mozgást végző egyedek (boid-ok) látványos

áramlását eredményezte [2].



1.1. ábra. A Reynolds féle boid algoritmus alapján a csoportos mozgás kialakításához szükséges három legfontosabb idealizált lokális párkölcsönhatás.

E két rendkívül egyszerű, de annál látványosabb dinamikát és mintázatokat eredményező modell ugyanannak a jelenségnek kétféle leírását adta, és számos fizikus és biológus figyelmét ráirányította a csoportos mozgás lenyűgöző világára. Megindulhatott a csoportos mozgás és csoportos viselkedés tudományának máig bontakozó kutatása.

A csoportos mozgás tudományágának eddigi leghivatkozottabb összefoglaló cikkét Vicsek Tamás és Zafeiris Anna írta 2012-ben [3], azaz pont a csoportos robotikai kutatásaink hajnalán (ugyanazon EU-s pályázati forrás keretében). Az alábbiakban elsősorban ebből a review cikkből szemlélve emeljük ki a csoportos robotikához fontos gondolatokat és eredményeket, az alapvető párkölcsönhatások és fontos csoportszintű jellemzők mentén.

### 1.1.1. Vonzás és peremfeltételek

A nagy hatótávolságú vonzásra, azaz valamiféle kohéziós erőre implicit vagy explicit módon azért van szükség, hogy az egyedek ne széledjenek szét nagy térben, mint gyorsulva táguló világegyetemünkben az anyag, mert akkor a csoport minőség értelmét veszti.

A Vicsek modell a kohéziót implicit módon a kényelmesen és egyszerűen használható periodikus határfeltétellel biztosította, azaz úgy tartotta a részecskéket véges térrészben, hogy amikor azok kimentek az egyik oldalról, visszatértek a másikra, mintha zsupszkuksot fogtak volna meg Harry Potter világában. Ez a „varázslatos” megoldás az egyszerűsített modellezés szintjén hasznos lehet, de értelemszerűen valódi robotokra értelmezhetetlen, ráadásul véges méretben erősen torzíthatja a szimulációs eredményeket, sőt, akár a megfigyelt fázisátalakulás rendjét is befolyá-

solhatja [4].

Ha valódi vonzó párkölcsönhatást szeretnénk bevezetni az egyedek között, akkor – ha már említettük a világegyetem anyagának szétszéledését, adjunk hangot az ezt ellensúlyozni próbáló összetartó erőknek is – például a gravitációhoz hasonló, közeledéssel erősödő erőkkel óvatosan szabad csak bánni, mert semmiképpen nem szeretnénk az egyedeink csoportját ütközésekre hajlamos sűrű magokban (vö. fekete lyuk), vagy – ha már tág analógiáknál tartunk, pl. a borderline személyiség személyes kötődési terében hasonló analóg erők által létrejövő [5] – vonzó-taszító kölcsönhatások öngerjesztett lüktető-oszcilláló örületében látni.

A vonzó párkölcsönhatást tarthatjuk egyszerűen enyhén, de lemondva ezáltal a skálázhatóságról, vagy korlátozhatjuk biológiai inspirációból egy bizonyos szomszéd-távolságon túlra, ahogy Reynolds is tette első szimulációjában [6, 7]. Kezelhetjük ezen kívül topológiai alapokon, pl. Voronoi cellákra osztva a teret és csak a szomszédos cellák egyedei felé értelmezve [8, 9, 10] stb.

A lokális vonzás, mint kohéziós erő alternatívája a mozgás zárt térbe korlátozása, ahol a zárt tér falaival történő kölcsönhatás biztosítja, hogy az egyedek ne széledjenek szét (lásd halak az akváriumban). Ezt a kölcsönhatást tipikusan reflektív falakkal, illetve a reflektív falakat képviselő virtuális egyedekkel, ún. *shell agent*-ekkel történő taszító és sebességillesztő kölcsönhatásokkal lehet modellezni [11]. Ugyanakkor, mint minden új ötlet, ez is csak odázza a problémákat és valójában további kihívásokat generál, mert a zárt határfeltétel ismét meghatározó emergens jelenségeknek lehet kiváltó oka. Az aréna alakjától függően más és más mozgási mintázatok jöhetnek létre [12], pl. kör alakú aréna tipikusan örvényszerű csoportos mozgást indukál [13], de a falak akár áldozatokat is kívánó lokális egyedsűrűség növekedésnek is okai lehetnek [14].

Mindezekkel a példákkal már most azt szerettem volna illusztrálni, hogy egyáltalán nem mindegy, hogy az ember milyen módon választja meg egy decentralizált rendszerben a kölcsönhatási tagokat. A körütekintéssel és előrelátással soha nem lehetünk elég óvatosak, mivel a csoportos rendszerekben a sok kis elemi hatás tipikusan nemlineáris vagy akár kaotikus dinamikában összegződik. Nem mindegy tehát, hogy az elemi erővektoraink merre mutatnak!

### 1.1.2. Sebességillesztés

A csoportos mozgás kialakulásának esszenciája valamiféle sebességillesztő párkölcsönhatás, mely az egyes egyedek kívánt pillanatnyi sebességét a szomszédos egyedek észlelt sebességének vektoriális átlaga mentén határozza meg.

A decentralizált szomszédosági viszonyok meghatározása a sebességillesztő kölcsönhatáshoz lehet egyszerű távolság alapú [1], mechanikai érintkezés alapú [13], topológikus [15, 16], bio-inspirált módon észlelés alapú, azaz pl. irányfüggő [17, 18] stb.

A sebességek illesztése lehet egyszerű sebesség/irány átlagolás, ahogy az eredeti ősmo-  
dellekben [1, 2], történhet pusztán mechanikai alapokon [13],[S1], lehet súlyozott  
[18], netán hierarchikus [19], de akár csatolhatjuk a gyorsulásokat is [20] a sebesség  
mellett.

A sebességillesztő kölcsönhatásnak – tipikusan a zajos, késleltetett, sztochasztikus,  
azaz valódi – csoportosan mozgó rendszerekben a koherens mozgás megteremtésén  
túl van egy második, egyáltalán nem elhanyagolható hatása. A lokális sebesség-  
különbségek csökkentése ugyanis egyfajta viszkózus súrlódási tagként is működik,  
ami az egymással szemben haladó közeli részecskék sebességkülönbségét segít csök-  
kenteni, ezáltal segít megelőzni a részecskék frontális ütközését (tipikusan még a  
rövid hatótávolságú taszító kölcsönhatás keretein kívüli tartományon), illetve segít-  
het csillapítani a vonzás-taszítás kölcsönhatások és reakcióidők hatására tipikusan  
létrejövő kaotikus öngerjesztett oszcillációkat [21, 22]. Ez utóbbi tulajdonság élet-  
bevágóan fontos lesz saját drónrajunk vezérlésének tervezésénél, ahol – sok egyéb  
szimulációs megközelítéssel ellentétben – már a realiztikus szimulációs környezet-  
ben számolunk az effajta kaotikus dinamikát okozó, kártékony, ám kíméletlenül  
megjelenő fizikai jelenségekkel, és azok lehetséges körütekintő kezelésével.

### 1.1.3. Taszítás

Az eredeti Vicsek modell [1] nem tartalmazott taszító kölcsönhatást – a csoport-  
tos mozgás alapvető szinkronizált mintázata enélkül is létrejöhet. Azonban amikor  
realisztikus modellezéssel, neadjisten valódi rendszerek tervezésével foglalkozunk,  
feltétlenül be kell vezetnünk valamiféle – tipikusan rövid hatótávolságú – ütközés-  
elkerülő mechanizmust, mint egyfajta vészmegoldást arra az esetre, ha az egyedek  
kritikusan közel kerülnének egymáshoz.

A csoportos mozgás statisztikus fizikai modellezésében ezt a taszító kölcsönhatást  
tipikusan valamilyen távolságfüggő potenciálfüggvény írja le. Használható szélső-  
ségként a bizonyos távolság alatt végtelen taszítást eredményező egységugrás függ-  
vény [7], kicsit kevésbé erőszakos módon az atomfizikából ismert Lennard-Jones  
potenciál, ami nulla távolságnál még mindig szingularitást tartalmaz (azaz kemény-  
magú), de máshol már véges [23], vagy az immáron mindenhol véges értékű, azaz  
puha-magú Morse potenciál [24]. Végezetül, tovább „puhítva” a sort, akár egy egy-  
szerű véges egységugrás, vagy lineáris potenciál függvény is alkalmas lehet bizonyos  
helyzetekben [25].

A potenciálfüggvény alapú megközelítésben a nagy hatótávolságú vonzó, és kis ható-  
távolságú taszító kölcsönhatás párhuzamos jelenléte két egyed közt tulajdonképpen  
nem más, mint egy egyszerű rugó modellje. Ha a két egyed szét húzzuk, a von-  
zóerők közelíteni fogják őket egymáshoz, ha összenyomjuk, a taszítóerők távolítják  
őket. Ennek pedig már két egyed esetében is oszcilláció a következménye, ami a  
stabil csoportos mozgás kialakítása szempontjából nemkívánatos jelenség [26]. Ha  
a rendszert egy picit realiztikusabbá tesszük, és késleltetést/reakcióidőt is beve-

1.1. Csoportos mozgás leírása nemegyensúlyi statisztikus fizikával

---

zetünk, akkor már kaotikus oszcillátort kapunk, ha pedig a két-test problémánkat kiterjesztjük csoport szintű csatolt sok-test problémává, akkor végleg elszabadul a pokol a biztonságkritikus működés szempontjából [27]. Ezen a ponton érkezünk el a valóság küszöbéhez...

**1.1.4. Zaj és komplexitás**

Ahogy azt már a korábbiakban sugalltuk, a való világ sztochasztikus, zajos, késleltetett, összességében „tökéletlen” mivolta (`git blame: god`) jelentősen megnehezíti az idealizált csoportos mozgás modellek és szimulációk átültetését valódi robotokra. Ezen valós korlátok közül első körben a zajt vesszük górcső alá.

Ahogy a Vicsek modellben már láttuk, a zajnak alapvető szerepe van a csoportos mozgás kialakulásában. Ha a zajsztint (a Vicsek-féle alapmodellben az irányválasztás zaja, ami tulajdonképpen az önhajtott rendszer egyfajta hőmérsékletének megfelelő mennyiség, valós drónrendszereknél pl. a kommunikációs, észlelési, pozicionálási, navigációs zaj, tágabb analógiában akár a konkrét fizikai ricsaj egy iskolai osztályteremben, a vélemények zaja a hiteles információk körül az online szociális térben, vagy a demagóg politikai propaganda zaja a valóság körül) túl magas, összehangolt csoportos mozgás, tágabb értelemben véve csoportos együttműködés nem tud létrejönni.

Érdekes módon a túl magas zajsztint mellett a teljesen zajmentes állapot ugyanúgy egy kerülendő szélsőség. Ha egy csoportos rendszer teljesen mentes a zajtól, akkor könnyen „befagyhat”, azaz belekerülhet olyan (akár instabil) egyensúlyi helyzetbe, amiben mozdulatlanságba dermed. Ilyenek bizonyos értelemben a diktatúrák is, ahol a nép véleménye el van hallgattatva, a párbeszéd hiányában pedig a fejlődés leállhat. De képzeljünk el inkább két tökéletes robotot, amik tökéletesen egymással szembe mennek és csak izotróp tasztító kölcsönhatás segítségével tudják elkerülni egymást. Matematikailag ideális körülmények között, ha tökéletesen szembe mennek, akkor egymáshoz közeledve meg fognak állni, vagy kettejük hossz tengelye mentén oszcillálni fognak az idők végezetéig. Zaj jelenlétében azonban ez a speciális – instabil egyensúlyi – állapot csak átmenetileg jöhet létre, utána automatikusan feloldódik. Némileg hasonló ez a jelenség ahhoz, ahogy a rádióra rácsapunk, amikor nem működik és attól néha tényleg megjavul, vagy amikor kis zajjal megindítunk egy lavinát (megpöckölünk egy homokórát, ami beakadt, vagy kiabálunk egyet a magashegy oldalában). De az evolúció fejlődését lehetővé tévő mutáció is egyfajta enyhe zaj, ami a lokális optimum helyzetből való kimozdulást segítheti és ezáltal a fejlődés záloga. Végül, egy kis lazaság néha magának az embernek is jót tesz!

Mezoszkopikus (nagy, de nem statisztikusan nagy egyedszámú) önhajtott rendszereknél egy további érdekes csavart jelent a zajsztint és a csoportos viselkedés összefüggésében a „freezing by heating” jelenség, melynek során pont a megemelkedett közepes zajsztint okozhatja egy folyadékszerű állapot befagyását [28].

Végül, a zaj kapcsán nem mehetünk el szó nélkül a „self-organized criticality” jelensége mellett sem [29], ami tulajdonképpen nem más, mint a világban fellelhető komplexitás kialakulásának egy lehetséges magyarázata, azaz, ha úgy tetszik maga az isteni teremtő erő (legalábbis egy bizonyos fizikus-vallásban). Miért bonyolult a világ? Mert a világ csoportos rendszereinek részegységei/egyedei a rendszert lokális kölcsönhatások során spontán módon, önszerveződően juttathatják a stabil fázisai között megbúvó kritikus állapotba, a kritikus pont körül a rendszer pedig elkezd skálafüggetlen fraktál tulajdonságokat mutatni, azaz „bonyolulttá válik”. Ez a kritikus pont pedig – ahogy a Vicsek modellben is láttuk – önhajtott rendszerek esetében éppen a zajszinttel hangolható a rendezett és a rendezetlen fázisok határvidékére.

Csoportos döntéshozatalt igénylő biológiai rendszerekben ennek a kritikus, fázis-határon lévő állapotnak kitüntetett fontos szerepe van, mert a csoporton belüli információáramlás lehetősége, illetve a rendszer külső perturbációkra adott reakció-készsége, érzékenysége itt lesz maximális. Mindez persze a stabilitás rovására megy, a kritikus ponttól mért távolság ezért mindig egyfajta kompromisszum. Ám ha egy csoportos rendszer képes a kritikus pontjától való távolságának modulálására (például a zajszint tudatos változtatásával), akkor eldöntheti, hogy épp szub-kritikus, stabil, de érzéketlen, vagy kritikus, kockázatos, de reaktív és gyors információáramú állapotba vigye-e önmagát [30, 31, 32, 33]. A zajszintnek ilyen módon történő tudatos modulálása jelenik meg a politikai választási kampányokban és általában a demagóg politikai retorika során is, a közvélemény hatékony befolyásolásának önző érdeke és stratégiája mentén.

### 1.1.5. Tehetetlenség, késleltetés

Ahogy korábban is említettük, a véges gyorsulású, azaz tömeggel rendelkező rendszerek rugószerű taszító-vonzó kölcsönhatások közepette tehetetlenségük okán oszcillációra hajlamosak (lásd a harmonikus oszcillátor másodrendű differenciálegyenletét), míg a késleltetett oszcillátorok (amik ehhez képest csak végtelen dimenziós differenciálegyenlettel írhatók le) már kaotikus dinamikát, és a kaotikus dinamikaiban tipikusan megjelenő öngerjesztett oszcillációt, illetve rezonanciajelenséget is produkálhatnak.

A késleltetés okozta kaotikus öngerjesztett rezgések a mérnökök és orvosok mumusai, legyen szó szerszámgépek nemkívánatos rezgéseiről [34], rezonáns agyhullámokról (vö. epilepszia) [35], Parkinson-kóros betegek remegő kezeiről [36], „magától” rezgő, sőt, akár összeomló hidakról [37, 38] vagy akár a drónok kontextusához egészen közel álló szellem-dugókról („ghost traffic jam”) [27].

A késleltetett dinamika állítja jelenleg az emberiséget eddigi történelmének legnagyobb kihívása elé: már évtizedek óta látjuk a klíma felmelegedését, a műanyag szemét térhódítását, a természetes élőhelyek mennyiségének és minőségének drasztikus csökkenését, végül, de nem utolsósorban, hanem elsősorban a fajok kihalási ütemének ijesztő gyorsulását, de még mindig csak a múlt adataira, vagy legjobb

## 1.2. Csoportos mozgás a természetben

esetben is a jelen észleléseire reagálunk, és nem a jósolt jövőre, ezáltal pedig folyamatos lemaradásban vagyunk ezen ember-indukálta, apokalipszishez vezető folyamatok megfékezésében, megállításában, visszafordításában.

Végül, a drónok csoportos mozgásának kontextusában könnyen látható, hogy a tehetetlenséggel, véges gyorsulással, kommunikációs késleltetéssel, véges adatfeldolgozási sebességből fakadó reakcióidővel terhelt járművek esetében a rajszinten emergensen megjelenő csatolt kaotikus öngerjesztett-rezgések és adott esetben rezonanciajelenségek megismerése és megelőzése elemi szükséglet a biztonságos repülés feltételeinek megteremtése érdekében.

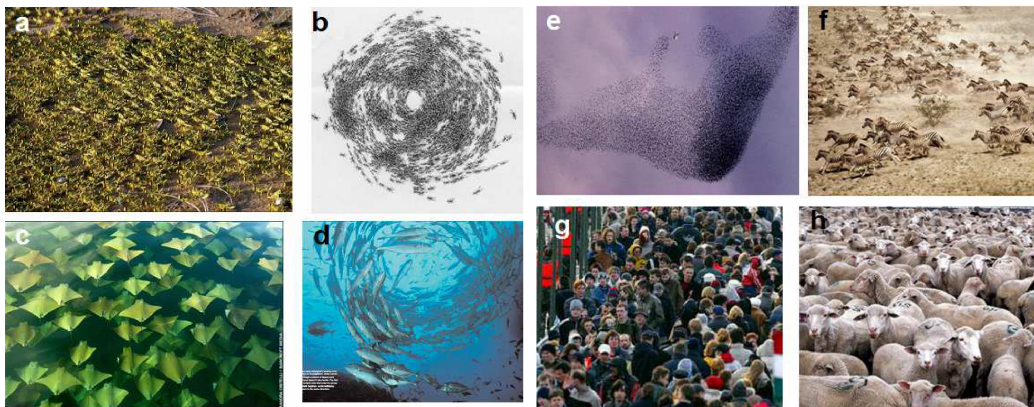
A késleltetett dinamika témakörében való további tájékozódáshoz büszkén ajánlom „Késleltetett dinamika – a COVID-járvány, az ökológiai válság és a zuhanyszáz összefüggései” című ismeretterjesztő cikkem [S2].

## 1.2. Csoportos mozgás a természetben

Ebben a fejezetben sorra vesszük a természetes csoportos mozgás és döntéshozatal jelenségkörének azon aspektusait, melyek valamilyen módon bio-inspiratív hatással voltak a csoportos drónrendszerünk kialakításához. Ez a hatás nem mindig volt direkt, néha csupán implicit, és esetenként egy adott jelenség csak az általános mindset-ünket alakította lenyűgöző szépségével, érdekességével vagy funkcionális optimalizáltságával. Mert a természet ezeket mind egyszerre tudja.

### 1.2.1. Univerzalitás

A csoportos mozgás kutatásának egyik legérdekesebb, és mérnöki szempontból is a jelenség alapos megértésére okot adó aspektusa, hogy az élőlények rajszintű viselkedésük során az egyedek fajától, fejlettségi fokától, szellemi és fizikai képességétől függetlenül nagyon hasonló mintázatokba rendeződnek. Másszóval a csoportos mozgás mintázatai *univerzálisak* (1.2. ábra).



1.2. ábra. Univerzális mintázatok élőlények csoportos mozgása során. a) sáskák; b) hangyák; c) ráják; d) halak; e) seregélyek f) zebrák; g) emberek; h) juhok. Forrás: [3]

Ha összehasonlítjuk élettelen rázott pálcikák [39], sejtek [40], baktériumok [41], rovarok [42], halak [43], madarak [44], emlősök [45], emberek [46], autók [27] csoportos mozgásának mintázatait, az egyedek küllemétől eltekintve szinte ugyanazokat a jellegzetességeket látjuk. Sőt, ezek a mintázatok az élőlényeknél maguknál nagyságrendekkel egyszerűbb matematikai modellel is létrehozhatók!

Ebből a megfigyelésből az következik, hogy a csoportos mozgás emergens jelenségei elsősorban nem az egyes egyedek – a különböző rendszerekben igen különböző – jellemzőitől és képességeitől, hanem az egyedek – univerzálisan, egyszerűen modellezhető – *interakcióitól* függenek. Első sejtjeink a proliferáció során pontosan úgy állnak sorba egymás mögött távolságot tartva és a sebességüket illetve, lassan vándorolva a kialakulásban lévő szöveteink, szerveink végső helye felé, mint ahogy már kialakult felnőtt testünk áll sorba az aluljáró mozgólépcsője vagy az Azariah koncert jegyárúsító bódéja előtt, tudatos mozgási szándékkal, érett komplex agyunk által vezérelve. A háttérben mindkét rendszert a korábban említett vonzás, sebességillesztés, taszítás interakciók egyszerű együttese vezérli hömpölygő de rendezett sorokba.

A csoportos mozgás legfontosabb univerzalitási osztályai, azaz univerzális mozgási mintázatai az alábbiak:

- **Rendezetlen mozgás**, melynek során az egyedek egyéni, másokkal nem szinkronizált irányba haladnak.
- **Teljesen rendezett mozgás**, melynek során minden egyed azonos irányba halad, azonos sebességgel, jellemzően állandó, egységes távolságot tartva egymástól.
- **Rendezett, körkörösén örvénylő mozgás**, tipikusan zárt (akár négyzetes, akár kör alakú) térben, melynek során az örvény közepe egyhelyben áll, a sugár növekedésével az egyedek sebessége picit növekszik és egy idő után állandósul, így a radiális szomszédsági kapcsolatok folyamatosan változnak, de az egyedek közti átlag távolságok állandók.
- A rendezettség és a rendezetlenség alapvető fázisai határán létrejövő **kritikus állapot**, melyben a legkülönbözőbb méretű **alrajok** mozognak önmagukban koherensen valamerre, skálafüggetlen tulajdonságokkal, de a távolabbi alrajoktól független irányban. A rendszer ilyenkor igen érzékeny a perturbációkra, a teljes rend vagy rendezetlenség spontán kialakulhat.
- Kvázi nagy hatótávolságú, **hosszú, koherens, sebességkorrelált sávok**, akár egymás mellett több sávon ellenkező irányba haladó egyedekkel.
- Stabil vagy instabil egyensúlyi helyzetbe **befagyott állapot**, avagy forgalmi dugó.

Mindez a drónrajok mérnöki tervezésére vonatkozóan egyrészt lehetőség, hogy bi-

## 1.2. Csoportos mozgás a természetben

---

zonyos csoportos mintázatokat egyszerű szabályok mentén egy drónrajjal is nagy valószínűséggel elő lehet állítani. Másrészt erős biztonsági korlát is, mert ezek a mintázatok és jelenségek várhatóan akkor is elő fognak bukkanni, ha azt nem mi terveztük! Erre pedig előre készülnünk kell, és ez az a pont, ahol a bio-inspirált mindset jelentős előnybe kerülhet azzal a naiv és téves szemlélettel szemben, hogy ha az egyedi drónokat tökéletesen megépítjük, akkor azokból sokat csinálva a raj is tökéletesen az elvárásaink szerint fog működni. Aki nem hiszi, szüljön három gyereket.

### 1.2.2. Reakcióidő

Annak ellenére, hogy a csoportos mozgás mintázatai, mint láttuk, univerzálisak, mérnöki szemmel nagyon nem mindegy, hogy egy csapat milyen sűrűségben és milyen sebességgel mozog, azaz a csoport egyedeinek milyen időskálán kell tudnia reagálni a rendszert ért külső perturbációkra, illetve a szomszédok döntéseire.

A Tour de France biciklistáinak szédítő sebességű rajaiban nem csak maga a sebesség a lenyűgöző, hanem a rajok sűrűsége és szinkronitása is. Aki kerékpárversenyzőnek adja a fejét, annak a sebesség küzdelmes növelésével egyidőben a reakcióidejének csökkentésén (és környezetérzékelési sebességének és komplexitásának növelésén) is ugyanúgy dolgoznia kell, ha nem akar az első verseny első kanyarában halálos balesetet szenvedni. Sajnos minden igyekezet ellenére előfordulnak súlyos balesetek, bringaversenyen tipikusan tömegesek, pont azért, mert a versenyzők egymástól mért távolsága a kiélezett helyzetben kisebb, mint a sebességkülönbségük és a reakcióidejük szorzata.

De a közutakon történő balesetek túlnyomó többsége is megelőzhető lenne pusztán azzal, hogy az ember vagánykodás és túlzott hamis önbizalom vagy a drágán vásárolt autóba vetett vak hit helyett valóban betartja az adott sebességhez, lelkiállapothoz, fáradtsági szinthez és útviszonyokhoz szükséges féktávolságot. Azaz a csoportos mozgás során a többi egyedtől mért távolságot a sebességhez és a reakcióidőhöz illeszti.

Ha az élőlények csoportos mozgásának mintázatait figyeljük, akkor hasonló módon a raj sebességének és sűrűségének függvényében implicit következtetést vonhatunk le arra vonatkozóan, hogy a rajmozgásban részt vevő egyedeknek milyen reakcióidőre és gyorsulásra van feltétlenül szüksége ahhoz, hogy azt a rajt egyáltalán stabilan mozogni lássuk.

A sejtosztódás során ez a megkövetelt felső korlát a reakcióidőn nyilván akár perces, órás vagy napos időskála, nyugalomban legelésző birkák esetében lehet akár jónéhány másodperc, de pl. a szédületesen nagy egyedszámú, sűrű rajokban repülő seregélyek esetén, akik 10-12 m/s sebességgel repülnek és akár 1-2 m-es szomszéd-sági távolságokat is tartanak [47], a reakcióidőnek tizedmásodperc alattinak kellene lennie, nem beszélve az őszi gyümölcsöstál felett keringő muslicák rajairól, akik

láthatóan még ennél is egy nagyságrenddel gyorsabb reakcióra képesek [48].

Az élőlények képességeiről alkotott képünket ezen a ponton alaposan górcső alá kell vennünk, mert úgy tűnik, hogy gyorsabb reakcióra képesek, mint amit akár a hagyományosan számolt idegi ingerületvezetés lehetővé tehet számukra.

### 1.2.3. Predikció

Ezt a felfoghatatlan gyorsaságot, sűrűséget és precizitást, amit a sűrű rajokban repülő élőlények mutatnak (itt már elsősorban rovarokról és madarokról beszélünk, azaz az élettelen rudacskáknál és sejtszintű élőlényeknél feltétlenül magasabb bonyolultsággal rendelkező fejlett lényekről), a reakcióidő csökkentésén túl egyéb hiperoptimalizáló trükkökkel lehet csak elérni, amikkel egy kis időt nyerhetünk a külső hatásokkal szemben.

Ilyen trükk a már korábban említett kritikus pont köré navigálás, hogy a sebesség-korreláció nagy hatótávolságú, skálafüggetlen lehessen, azaz egész nagy rajokat is lehessen azonos reakcióidővel szinkronban tartani (erre utaló jeleket pl. seregélyek rajai esetében is megfigyeltek [32]).

További optimalizálást jelenthet az önmagunkra vonatkoztatott prediktív, előre tervező dinamika, azaz az a fajta tudatos vagy tudattalan hozzáállás, melynek során egy egyed a mozgásmintázatait nem pillanatnyi állapotok egymásutánjában, hanem koreográfia-szerűen képes véghez vinni, melyben bizonyos mozdulatoknak időbeli és térbeli kiterjedése van, amivel előre lehet számolni, pontosan úgy, ahogy a táncosok és zenészek is teszik ezt koreografikus előadásaikban. Sőt, az improvizatív zene és tánc, de még az ember általános külső hatásokra kiváltott reakciója is ilyesmi rövidebb vagy hosszabb betanult egységek egymásutáni lejátszásából tevődik össze. Gondoljunk csak arra, hogy vakarjuk meg magunkat, ha viszket valamink (elemi hatás  $\rightarrow$  komplex koreográfia), hogy tesszük fejünk elé önkéntelenül a kezünket, ha megbotlunk, hogy csukjuk be a szemünket egy „szempillantás” alatt, ha egy légy belerepül stb.

Érdekes módon ez a fajta prediktív időnyerés már szenzoriális szinten is megjelenhet a fejlett élőlényeknél. A szemünk például mozgásában és a pupilla méret szabályozásában soha nem a jelenre, hanem az általa jósolt rövidtávú jövőre tervez feed-forward körökkel, a szemmozgásnál lassabb agykéreg pedig egyenesen a jövőt képezi elénk „látott” információnak, pont azért, hogy mindig lehessen egy kis haladékunk, mire feldolgozzuk az információt és reagálni tudunk rá [49, 50]. Ilyenformán a „Carpe diem” elve bizonyos szempontból halálos fenyegetés, mert aki a jelenben él, már szenzoriális szinten lemarad a jövőre való reagálás lehetőségéről...

Ennek a prediktív előre tervezésnek a másik oldala a környezet mozgásának a hasonló predikciója, azaz amikor egy élőlény felismeri, hogy a környezet entitásai is hasonló koreografikus mozgáselemekből építik fel a mozgásukat, ezért észlelésében nem csak a jelent, hanem már a környezetének a jövőjét is jósolni tudja, így né-

## 1.2. Csoportos mozgás a természetben

---

mi előnyt szerezhet a véges reakcióidejével szemben, mivel hamarabb tud elkezdni reagálni arra, ami még meg se történt, de várhatóan meg fog. Hogy ez mennyire így működik a mindennapokban, akkor derül csak ki, amikor valami nem a jóslatunknak megfelelően történik, és hirtelen szembesülnünk kell a reakcióidőnk alatti féktávolságunkkal (például az előttünk menő autó, amiről azt gondoltuk, hogy tartani fogja a sebességét, hirtelen fékez egy nagyot; vagy a gyalogos – akit bringán ülve ugyan átengedünk a zebrán, de nem állunk meg, mert mire odaérünk úgymint a járdán lesz már – megijed attól, hogy nem állunk meg és ijedtében megtorpan, mi meg beleszaladunk).

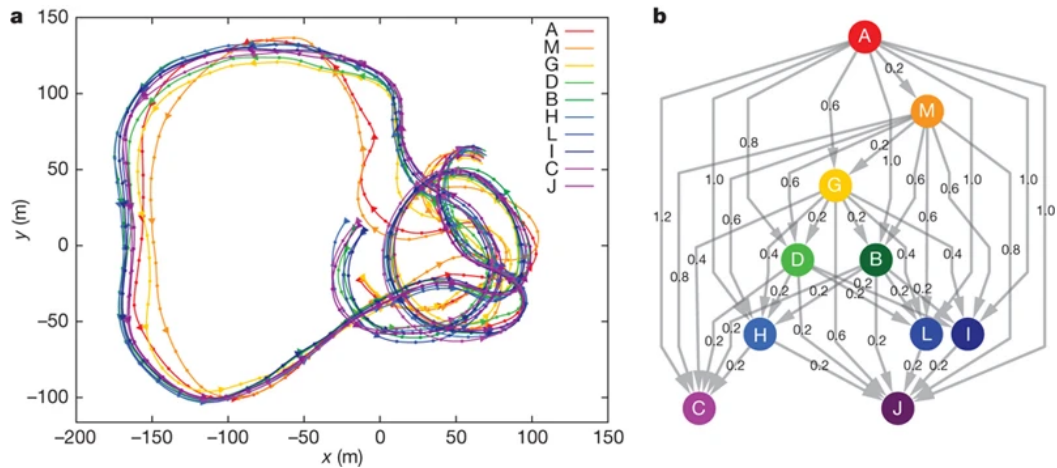
Rajrepülés, illetve intelligens élőlények csoportos viselkedése során ezt a fajta prediktív optimalizálást még egy szinttel fokozhatjuk, ha a passzív de intelligens információfeldolgozás helyett aktív információközléssel segítjük a saját mozgási ko-reográfiánk mások általi felismerését. Pontosan ez történik az irányjelző, illetve féklámpa használatakor, az aktuális politikai hatalom elleni tüntetések, illetve civil szakértői állásfoglalások véleménynyilvánításakor, és minden bizonnyal ilyen aktív egymás közti kommunikációt folytat az élővilágnak sokkal nagyobb százaléka, mint amit az ember – alapvetően felsőbbrendű gondolkodásával – valaha el tudott képzelni (lásd pl. fák aktív kommunikációja [51]).

Ezen a ponton hadd jegyezzem meg, hogy dolgozatomban egyik személyes célja, hogy az olvasót közelebb tudjam vinni a természet hasonló csodálatos titkainak feltárásához és ezzel párhuzamosan felsőbbrendűségünkből eredő korlátaink lebontásához, azaz annak a világnézetnek a könnyebb elfogadásához, amiben az élő anyag bármilyen formája legalább egyenrangú tiszteletet kell, hogy kapjon saját fajunkkal.

### 1.2.4. Heterogenitás, hierarchia

Az eddigiekben az egyszerűség kedvéért azonos fajú, azonos tulajdonságú és viselkedésű egyedekről volt csak szó. Ám a való világ ebben a kérdésben is „természetesen” jóval bonyolultabb.

A drónos kutatásokat megelőző egyik biológiai kutatási szál volt a tanszéken a galambok csoportos repülésének vizsgálata [52], [S3, S4]. A galambok 10 és 30 fős csapataira saját fejlesztésű GPS követőket raktunk, és utólagos adatfeldolgozással az egyedi irányváltások korrelációja és egymáshoz viszonyított időbeli eltolódása alapján mértük, hogy a csoportos repülés során vannak-e a galambcsapatban heterogén vezető-követő viszonyok. A kutatások eredménye szerint a galambok jól ismerik egymást, tudatában vannak egymás navigációs képességeinek, és csoportos navigációjuk során hierarchikus vezető-követő viszonyt ápolnak, azaz irányváltáskor bizonyos egyedeket sokan és gyakran utánoznak, másokra pedig kevésbé hallgatnak (1.3. ábra).



1.3. ábra. a) Tíz galamb két perces repülési trajektóriáinak rekonstrukciója. Az útvonalakon lévő körök és háromszögek a repülés 1, illetve 5 másodperces szakaszait jelölik. b) Hierarchikus vezető-követő hálózat az egyedek korrelált irányváltásai közti időkülönbség alapján rekonstruálva. Az irányított gráf élein lévő számok mutatják az átlagos időkülönbséget két egyed közt, a csúcsok elnevezései egyeznek az a) ábra elnevezéseivel. Forrás: [52]

Ráadásul, ezek a hierarchikus viszonyok függetlennek bizonyultak a földi csipkedési sorrendtől, azaz a dominancia alapvető meghatározó indikátorától. Bizonyítottuk tehát, hogy galambcsapatok is képesek kontextusfüggő hierarchiákban működni, csak úgy, mint az ember a saját különféle kontextusaiban (család, munkahely, foci-csapat stb.).

Ez a fajta hierarchikusság, illetve általában a vezető-követő viszonyok a csoportos rendszerek általános jellegzetességei közé tartoznak [53]. A vezető követő viszonyok lehetnek állandóak vagy lassan változóak, amikor az egyedi képességek mentén alakulnak (például a vezetőknek nagyobb tapasztalati tudása van, ismernek egy jó táplálékforrást vagy vándorlási útvonalat stb.), és lehetnek pillanatnyi, amikor például kitüntetett – ha úgy tetszik pillanatnyi vezető – szerepet kap egy adott egyed, ha először pillant meg egy támadót, vagy valamilyen objektumot, amit el kell kerülni [54, 55].

Csoportos döntéshozatali szinten a vezető követő rendszereket a heterogén rajok egyenletes sebességátlagolása helyett egyfajta súlyozott átlaggal lehet modellezni, ahol a vezetők választott sebességirányának kitüntetett szerep jut. Egy igen fontos kérdés, hogy miként lehet ezt a súlyozott átlagolást úgy véghez vinni, hogy a vezetők iránymutatásai gyorsan propagálhassanak végig a csapaton és a nagy egyedszámú csapat gyorsan és hatékonyan lekövesse a kis egyedszámú vezetők utasításait, de közben a rendszer mégse legyen túl érzékeny például a hamis információkra. Egy tipikus példa a túlreagálásra a „birkaszellem”, (amit én inkább „daruszellem”-nek neveznék, mert a darvak még a birkáknál is ijedősebbek), amikor az egész nyáj gondolkodás nélkül útra kel vagy elmenekül az első egyed valamilyen vészjelzésére.

A heterogenitás és hierarchikusság témakörébe tartoznak még a többrétegű hierar-

## 1.2. Csoportos mozgás a természetben

---

chiák [56], illetve a faj szinten is heterogén rajok, amikre szintén szép számmal találunk példát a természetben, pl. szavannai állatok közös migrációja vagy lelegele során, vagy víz alatti világok kápráztató sok-fajú kavalkádjában. Az olvasó figyelmébe ajánlom ezen a ponton a BBC [A kék bolygó](#)<sup>1</sup> című sorozatát David Attenborough-val, amit sok egyéb indok mellett a heterogén rajok szemszögéből is érdemes elmélyülten végignézni.

### 1.2.5. Csoportos intelligencia

A csoportos viselkedésnek számos előnye van a csoport egyedeire nézve. Egy csoport biztonságosabb, mert nagyobbak, egységesebbnek hat, közös erővel könnyebb a támadókat, ragadozókat észrevenni, elkergetni, megzavarni. Emellett a csoport csupán számosságának köszönhetően, a „több szem többet lát” elv alapján is hatékonyabb erőforrás-keresési (táplálék, ivóvíz, járható útvonalak stb.) feladatokban. Ugyanakkor a csoport szintű viselkedésnek épp az a különlegessége, hogy egy csoport jelentősen több, mint csupán az egyedeinek összessége.

Ez az elv valahol Ken Wilber holarchikus szerveződésű intergálelméletének leképeződése a komplexitás egy adott szintjére [57]. Ken Wilber filozófus (számomra igen meggyőző) világnézetében a dolgok a legegyszerűbbtől a legbonyolultabbig hierarchikus rendben épülnek egymásra (pl. elemi részecskék → atomok → molekulák → fehérjék → örökítőanyag → sejtek → szövetek → szervek → egyedek → csoportok → népek → faj → ökoszisztéma → élő bolygó → ... → Isten). Egy adott szinten hasonló bonyolultságú részek állnak össze, és hoznak létre interakcióik által egy magasabb szintű szerveződést, mely a részegységek szintjén nem értelmezhető, új emergens tulajdonságokat és képességeket mutat. Az egyszerű szintek alapvetőbbek abban az értelemben, hogy rájuk minden magasabb szintnek szüksége van. A magasabb szintek pedig bár nélkülözhetőbbek (mert tőlük nem függenek az alacsonyabb szintek), mégis nagyszerűbbek abban az értelemben, hogy bonyolultságok, ezáltal képességeik összetettebbek.

Ez az elv egyrészt nagyszerű önkritika lehet a más fajokhoz képest magát felsőbbrendűnek tartó ember számára. Az ember valóban nagyszerű, de teljességgel nélkülözhető a többi „alacsonyabb rendű” élőlény számára. Fordítva viszont nem így van: a nálunk „alacsonyabb rendűbb” élőlények egy jelentős része nélkülözhetetlen számunkra. Ezt fontos lenne mindenkinek alaposan végiggondolnia mondjuk legkésőbb 2030-ig.

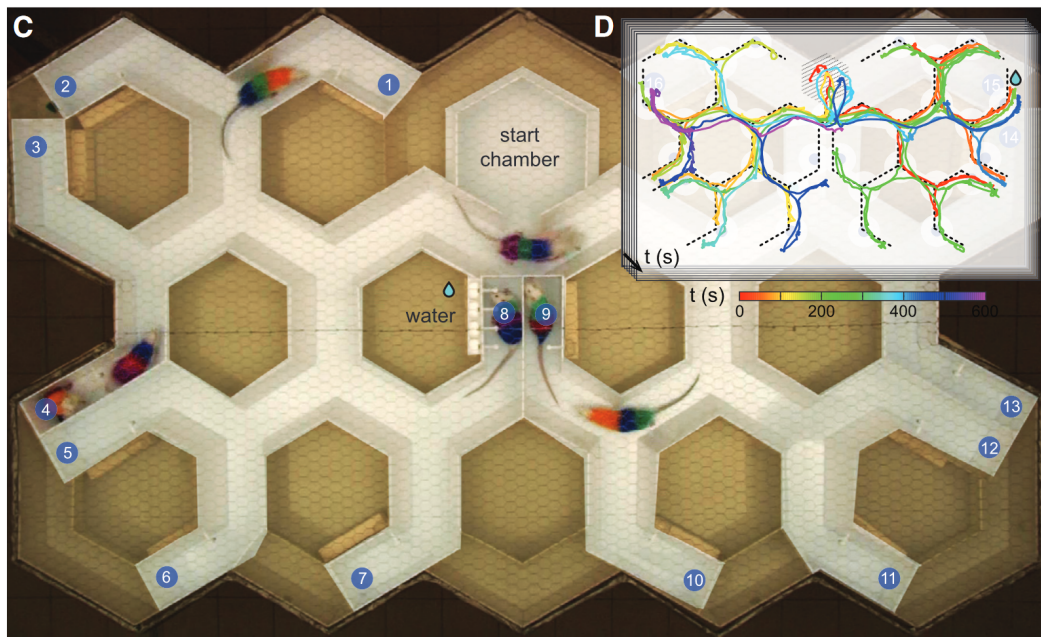
Emellett pedig Ken Wilber holarchikus szerveződés modellje nagyszerűen illeszkedik mindahhoz, amit én személy szerint a csoportos viselkedés kutatása során tapasztaltam az elmúlt 15 évben. Ebben az alfejezetben ennek az állításnak az alátámasztására mutatok be szemelvényként néhány – többnyire a tanszéken is kutatót – példát, az egyed feletti szinten emergensen megjelenő csoportos intelligenciáról.

---

<sup>1</sup> <https://www.bbc.co.uk/programmes/b008044n>

### Patkányok a labirintusban

A tanszéken 11 hónapig vizsgáltuk 28 patkány csoportos és szociális viselkedését egy a közös arénájuk fölé szerelt kamera folyamatos videójelének automatikus elemzésén át [S5]. A patkányokra színes hajfestékkel egyedi vonalkódokat festettünk, a kameraképeken ezeket a vonalkódokat saját fejlesztésű algoritmussal felismertük és trajektóriákká fűztük. Az így előállt (több TB-nyi) trajektória adatból az egyéni és csoportos viselkedést jellemző információt próbáltunk kigyűjteni. Nem véletlen, hogy a 2013-ban kezdődött kísérletekből csupán jó tíz évvel később született átfogó publikáció. A mérési adatok alapján ugyanis olyan összetett és bonyolult szociális viselkedés tanúi voltunk, amiből igen nehéz volt egyszerű üzeneteket kihámozni. Ám az feltétlenül kiderült, hogy az egyes egyedek egyéni viselkedése egészen más lehet csoportos kontextusban, sőt, csoportról csoportra változhat. Az egyedi patkányokon végzett gyógyszerkísérletek következtetései tehát sokszor nincsenek korrelációban a valódi környezetben mutatott viselkedéssel. Később, az elkészült kísérleti módszerrel sikerült dedikáltan azt is vizsgálni, hogy a patkányok egyéni és csoportos hatékonysága hogyan viszonyul egymáshoz egy labirintusos táplálékkereső feladatban [S6] (1.4. ábra).



1.4. ábra. Kísérleti elrendezés patkánycsoportok labirintusban történő forráskereséséhez. Forrás: [S6]

Azt találtuk, hogy a csoport hatékonysága jelentősen megnő az egyén hatékonyságához képest, az optimális keresési stratégiát pedig az egyéni keresés és a szociális ingerek követésének megfelelő kombinációja eredményezi. Ha tehát a patkányok nem individualista módon állnak neki a keresésnek, hanem összefognak, egymással kommunikálnak és közösen keresnek, akkor lesznek a leghatékonyabbak.

### Gólyák közös termikélése és vándorlása

Szintén tanszéki kutatók vizsgálták gólyák csoportos termikelését és vándorlását [58, 59]. A gólyák a feláramló meleg levegőbuborékokban igyekeznek egy irányba körözni az ütközések elkerülése érdekében, irányukat egymáshoz szinkronizálják, termikeléskor egymást figyelik és segítik. Emellett vezető-követő hierarchiában is vannak. A vezetők ügyesebben termikelnek, kevesebb szárnycsapással közlekednek és messzebbre is jutnak a vándorlás során. A követők termikeléskor a vezetőket követik, több szárnycsapást igényelnek és rövidebb migrációs útvonalon közlekednek.

Siklóernyős pilótaként ezeket a tudományos eredményeket saját nem tudományos megfigyeléseimmel is alá tudom támasztani. A dél-spanyolországi keselyű populációk például már nem csak saját fajtársaikkal, de a siklóernyős társadalommal is rutinszerűen működnek együtt. Figyelik egymást is és az ernyősöket is, ahol termikélést, emelkedést látnak, odarepülnek és besorolnak, a termikelés irányát igazítják akár a siklóernyősök irányához is, és láthatóan pontosan ismerik a terepviszonyokat, az adott szélviszonyoknak megfelelő lejtőszöveget (ahol az akadály miatt feláramlás található), turbulens területeket, az ernyők dinamikáját stb. Repülésük érezhetően csoportos szociális tevékenység, sokszor órákig lejtőznek egy adott sziklaperem felett ide-oda, láthatóan nem utazási céllal, hanem pusztán a közös repülés örömeért.

### Ragadozók csoportos vadászata

Csoportszintű intelligenciát mutat számos nagytestű élőlény összehangolt vadászata. A delfineknek számos ötletes csoport szintű stratégiáját figyelték meg:

- Egyszerre, egymás mellett úsznak ki a partig, nagy hullámokat keltve és kisorsolva a kishalakat a partra, amiket utána könnyebb összeszedgetni (lásd [videó<sup>2</sup>](#)).
- Csapatokban bekerítik a halrajokat, körülöttük úsznak, összesűrítik őket és úgy kapkodják össze őket [60]
- a sekély vízben az egyikük felveri az iszapot kör alakban, hogy a halak ne lássanak, a többiek a sár-fal felé terelik a halrajt, akik pánikszerűen ugrálnak ki a vízből, a delfinek meg elkapkodják őket (lásd [videó<sup>3</sup>](#))

De figyelemreméltó az oroszlánok [61], főemlősök [62], vagy a hollók és farkasok közös csoportos vadászataiban [63] is a csoport szintű együttműködés, bekerítés, különböző szerepek kiosztása és koordinálása, adaptív kommunikáció stb.

Mindezen példákkal csupán annyit szerettem volna illusztrálni, hogy i) a csoportos műveletek jelentősen hatékonyabbak lehetnek az egyéni próbálkozásoknál ii) soha ne becsüljük le az élőlényeket, jelentősen többet tudnak, mint gondolnánk! A témát részletesebben a 4.1. szakasz fejti ki.

---

<sup>2</sup> <https://youtu.be/OLOWJOEYYuw>

<sup>3</sup> <https://youtu.be/-xm9PjKdf00>

### 1.2.6. Evolúciós optimalizálás

Amikor az ember elmélyül a természet ezer csodájában, hamar felmerülhet benne a kérdés, hogy hogyan tett szert ez a sokféle élőlény erre a számtalan mérnöki precizitással behangolt és tökéletesre csiszolt megoldásra, amik segítségével egyéni és csoportos életük során ilyen hatékonyan tudnak működni és együttműködni? A válasz erre a kérdésre Darwin munkássága óta nem Isten, hanem Evolúció, ami figyelemreméltó elismerés lehet magának az Evolúció megteremtőjének – azaz némi vigasz Istennek, ha ő volt az, és Isteni (vagy ördögi) rekurzió magának az Evolúciónak, ha ez is neki köszönhető.

Mindenesetre a számítógépek megjelenésével mi magunk is istent játszhatunk kicsiben a mesterséges rendszereinken futtatott mesterséges evolúcióval [64]. Ezúttal tehát a természetnek nem valamelyik csodálatos végtermékét lopjuk el, hanem magát a gyártási elvet, amivel az összes (értsd, az összes) kifinomult mérnöki csodáját létrehozza (micsoda öröm lehet az ilyesmi siker egy nemzet titkosszolgálatának!).

A mesterséges evolúcióra azt szokták mondani, hogy ez a világ bármilyen problémájára a második legjobb optimalizáló eljárás. Az evolúció elemi erőssége valóban abban rejlik, hogy tényleg bármilyen problémára alkalmazható, ha kellő precizitással meg tudjuk fogalmazni, hogy mit tekintünk előnyös és jó megoldásnak. Ugyanakkor kimenetele nem determinisztikus és soha nem garantáltan globálisan optimális, ezért egy adott problémára elvileg mindig találhatunk olyan egyedi eljárást, ami az adott kérdést globálisan optimálisan, azaz garantáltan jobban megoldja. De a mi ágens-alapú, eleve nem determinisztikus, hanem valószínűségi szemléletű hozzáállásunkhoz az evolúciós optimalizálás tökéletesen illeszkedik, a módszerünk értékéből már nem tud elvenni, csak hozzátenni, ha működik...

A mesterséges evolúció valójában négy nagyon egyszerű alaplépésből áll, melyek körkörös egymásutánban (iterációban) egy rendszer bemenő paramétereinek garantáltan mindig monoton növekvően előnyösebb hangolását eredményezik. Ezek a lépések a következők:

1. **Mutáció**, azaz „zaj” hozzáadása az eddigi legjobb megoldás(ok)hoz, sokféle új, változatos bemenő paraméterhangolás (azaz az új populáció) legyártása
2. **Futtatás**, azaz az előállított változatos bemenő paraméterszettekhez tartozó megoldások párhuzamos, független végrehajtása (pl. szimulációk futtatása)
3. **Kiértékelés**, azaz valamilyen „fitnessz függvény” alapján az egyes futtatások összehasonlítása és sorba rendezése (melyik teljesített jól, melyik kevésbé jól)
4. **Szelekció**, azaz a legjobban teljesítő megoldás(ok) kiválasztása

A mesterséges evolúciónk hatékonyságát két alapvető dolog befolyásolja. Egyrészt jól meg kell választanunk, hogy milyen evolúciós algoritmust futtatunk, ami a fenti négy alaplépés bizonyos részleteiben előnyös lehet számunkra. Mi univerzálisan a

## 1.3. Csoportos robotikai alapok

---

Kovariancia Mátrix Adaptációs Evolúciós Stratégia (CMA-ES) mellett kötöttünk ki [65], egyrészt mert ez egy adaptív, modern és figyelemreméltóan hatékony evolúciós stratégia, másrészt mert [Python adaptációja](#)<sup>4</sup> jó minőségű és könnyen használható.

A másik alapvető fontosságú dolog az a bizonyos fitnessz függvény, amivel a szimulált populációnk egyedeit összehasonlítjuk, és eldöntjük, melyik mennyire jó. Ennek a fitnessz függvénynek a bemenete bármi lehet, ami alapján ítéletet tudunk hozni egy adott szimuláció futásának hatékonyságáról (csoportos mozgás szimulációja esetén például ilyen lehet az egyedek sebességkorrelációja, legkisebb szomszéd távolsága, sebessége stb.), kimenete pedig egy vagy több szám. Amennyiben egy számra tudjuk a jóságot redukálni, úgy az egyes szimulációkat egyszerűen sorba rendezhetjük, hogy a legjobbat kiválasszuk. Amennyiben több számmal, több dimenzióban tudjuk csak leírni a jósági kritériumokat, úgy ún. Pareto-frontok jönnek létre, azaz több azonosan jó megoldás közül kell valamilyen kompromisszum mentén választanunk (pl. a csoki csúnya de finom, vagy szép de ehetetlen).

A fitnessz függvény megválasztása sokszor önmagában egy meta-evolúciós folyamat. Azaz először létrehozunk egy fitnessz függvényt, azzal elvégezzük az evolúciónkat, aztán a végső megoldást látva rájövünk, hogy az evolúció kicselezett minket, mert arra nem gondoltunk, hogy ilyen megoldás is teljesíti a kritériumainkat, úgyhogy felveszünk egy új kritériumot, ami bünteti ezt a fajta rossz megoldást, és futtatunk újra egy teljes evolúciót. Tapasztalat szerint jónéhány ilyen meta-evolúciós körön kell ahhoz túllenni, hogy az eredeti problémánk jóságát valóban kellően pontosan tudjuk analitikusan definiálni, és ezáltal maga az evolúciós folyamat is hatékonyan tudjon optimalizálni.

### 1.3. Csoportos robotikai alapok

A *robot* szláv eredetű szó, mely munkát, szolgámmunkát jelent. A robot szót Karel Čapek cseh író vezette be a köztudatba 1921-ben megjelent R.U.R. című science-fiction drámájában. A robotok kezdetben „emberszabású” mesterséges szolgákat jelentettek, mára rendkívül változatos formájú elektromechanikus szerkezeteket értünk alattuk, melyek megtartották eredeti rendeltetésüket: automatizációval szolgálni az emberiséget. A csoportos robotikához – bárhonnan is közelítsük meg – elengedhetetlen az egyedi robotok magas fokú önállósága. Ez magában foglalja a robotok bizonyos fokú önálló környezetérzékelését, saját állapotuknak ismeretét, a társaikkal és feletteseikkel történő kommunikációt, valamint mozgásszervi és egyéb aktuátoros vezérlésüket.

A *drón* szó eredeti jelentése szerint hím méhet jelent, amit először távirányítású katonai robotokra kezdtek használni egyrészt zümmögése, másrészt analóg szerepe miatt (önállóan nem tud megélni, feltétel nélkül szolgálja a felettesét, ami az eredeti jelentés szerint a méhkirálynő, katonai jelentésben pedig a drónt irányító személy-

---

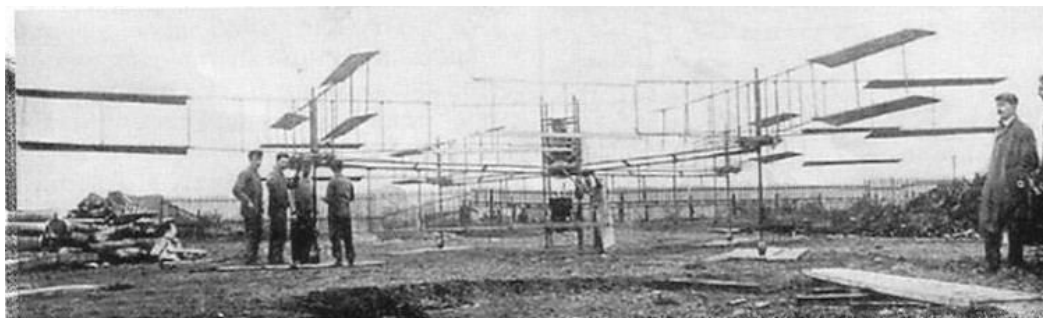
<sup>4</sup> <https://github.com/CMA-ES>

zet). A drón szó mára átkerült a katonai zsargonból a köznyelvi használatba is, és ilyenformán elsősorban a pilóta nélküli légitáncműveket értjük alattuk, legyenek akár milyen picik vagy nagyok.

Az alábbiakban áttekintjük a drónok és a csoportos robotika (a dolgozat téziseihez felhasznált publikációk előtti) viszonylag rövid történelmét, majd részegységekre bontva bemutatjuk a repülő robotok stabil működéséhez szükséges elengedhetetlen technológiai vívmányokat.

### 1.3.1. Történeti áttekintés

Kevesen tudják, hogy az első négy propelleres forgórótoros légitáncmű (kvadrokopter), a [Breguet-Richet Gyroplane](#)<sup>5</sup> csupán négy évvel a Wright fivérek első repülőgépe után, 1907-ben már megjelent. Ez a gép még teljesen irányíthatatlan volt, összesen 1-2 m magasságba tudott csak néhány alkalommal felemelkedni, de a mai forgórótoros drónok alap strukturális koncepcióját lefektette, nevezetesen a jármű középpontjából a szélrózsa négy irányába álló karokon rögzített függőleges tengely körül forgó rotorokat [66] (1.5. ábra). Koncepcionális alapvetés továbbá, hogy a rotorok mindegyike ellenkező irányba forog, mint a szomszédai, hogy össz forgatónyomatékuk nulla legyen (ezért van az, hogy a drónokon lévő propellerek száma minden esetben páros).



1.5. ábra. A világ első „kvadrokoptere”, a Breguet-Richet Gyroplane. Forrás: [alchetron.com](#)

A forgórótoros légitáncművek első igazi repülési rekordját a szintén francia [Étienne Oehmichen](#)<sup>6</sup> állította be 1924-ben, amikor a – továbbra is óriás méretű – négy propelleres gépével 360 métert repült.

Hasonló további kezdeti próbálkozások után a négy propelleres forgórótoros gépeket az emberiség majd egy évszázadra a fiókba rakta, ugyanis ezek a gépek konstrukciójukból adódóan alapvetően instabilak, stabilizálni őket csak a négy rotor forgási sebességének (vagy állásszögének) folyamatos szabályozásával lehet, és ez a korai mechanikai szerkezetekben nem igazán volt kivitelezhető.

Az automatizált repülőgépeket a két világháború időszakában a forgórótoros esz-

<sup>5</sup> <https://alchetron.com/Breguet-Richet-Gyroplane>

<sup>6</sup> <https://www.thisdayinaviation.com/tag/etienne-edmond-oehmichen/>

### 1.3. Csoportos robotikai alapok

---

közök helyett jóval inkább a merevszárnyú modellek képviselték. Ezek a gépek (pl. a Kettering Bug (1918), a DH.82B Queen Bee (1935) vagy a B-17 Flying Fortress (1946)) tulajdonképpen jórészt hagyományos merevszárnyú gépek voltak olyan módon átalakítva, hogy pilóta helyett jó minőségű és nagy hatótávolságú távirányító eszközt szereltek beléjük és így önállóan, a gépen ülő pilóta nélkül tudták ellátni kísérleti bombázási és felderítési feladataikat.

A miniatürizált robotok megszületése nagyjából az ezredfordulóra tehető, mert a korai elképzeléseket ekkorra érte utol a technológia (hardware) és a számítástechnika (software) párhuzamos fejlődése. A kisméretű automatizált robotok és drónok fejlődése inentől megállíthatatlan lett, a drónok mára igazi diszruptív technológiává váltak, és a szó szoros értelmében új dimenziót hoztak az életünkbe, mivel madártávlatból engednek betekintést világunkba, lényegében egy bárki számára elérhető kihelyezett, könnyen irányítható külső szem által.

Az első csoportos robotikai rendszerek jellemzően két dimenzióban mozgó, földi robotok voltak, melyeket vagy speciális feladatok megoldására terveztek (pl. tárgyak közös cipelése [67]), vagy pusztán az önszerveződést kívánták bemutatni velük kisebb egyedszámú, de nagyobb tudású rendszerben [68], vagy jóval egyszerűbb egyedekkel, de egész nagy, akár ezres számban [69].

Ezzel párhuzamosan három dimenzióban mozgó (itt elsősorban repülő) robotcsapatot építeni jelentősen nagyobb kihívás volt, mert három dimenzióban tájékozódni, mozgást stabilizálni és tervezni nagyságrendekkel nehezebb, illetve legalább olyan nehéz a levegőben „semmit nem csinálni” bármilyen hibás működés esetén. Az első, minket megelőző repülő robotcsapatok ezért vagy nagyon kevés, maximum 2-3 egyedből álltak [70, 71, 72], és/vagy különböző magasságon repültek, kijátszva az ütközésselkerülés és valós idejű interakciók súlyos problematikáját [73, 72]. Több, maximum 20 egyedes kísérletet tudtak ezzel szemben felmutatni kutatók beltéren, nem elosztott módon, hanem központi vezérléssel irányítva, illetve olyan – számunkra amúgy a mai napig elérhetetlenül drága – beltéri pozícionálórendszerrel, melynek mm-es precizitása és többszáz Hz-es időfelbontása lehetővé tette, hogy a kültéri zajos és időjárásnak kitett viszonyok valódi nehézségeit figyelmen kívül lehessen hagyni [74].

A valódi csoportos robotkísérletek helyett a bio-inspirált, nagy egyedszámú csoportosan repülő robotrendszerekről természetesen sokkal előbb és sokkal nagyobb számban jelentek meg (és jelennek meg a mai napig) szimulációs és elméleti eredmények [75]. Ezek igen látványosak és hangzatosak lehetnek, de a valódi terepi nehézségeket (például a késleltetés okozta oszcillációkat és kaotikus dinamikát [76]) a legtöbbször minél inkább leegyszerűsítve kezelik.

### 1.3.2. Technológiai szükségletek

Ahhoz, hogy létrejöhessenek a fentebb is említett egyéni vagy csoportos robotrendszerek, számos nélkülözhetetlen anyagtudományi, technológiai és számítástechnikai vívmánynak kellett megszületnie. Ezeket az alábbiakban a teljesség igénye nélkül, de részletezzük kicsit, hogy átérezhető legyen, hogy egy robotraj reptetéséhez hányféle eszköznek és megoldásnak kell tökéletes harmóniában együttműködnie.

#### GNSS pozicionálás

A kültéri autonóm robotok elsősorban globális pozicionálási lehetőségét a föld körüli pályán keringő GNSS műholdak hálózata biztosítja. Manapság minden valamirevaló kültéri robot el van látva legalább egy GNSS vevővel, ami folyamatosan veszi a felette keringő műholdak sokaságának párhuzamos adását, és ezen szinkronizált jelek időkülönbségei alapján következteti ki saját pozícióját háromszögeléssel.

A polgári GNSS rendszer pozicionálási pontatlansága néhány méter is lehet. Amennyiben robotunk centiméteres pontosságot igényel, úgy – amennyiben a vevőnk erre alkalmas –, el lehet látni egy közeli földi bázisállomásból származó további RTK korrekciós jelfolyammal, melynek segítségével a GNSS vevő kompenzálni tudja az ionoszféra számára ismeretlen jelkésleltető hatását és ezáltal a háromszögelési adatai pontosabbá válhatnak, azaz a pozicionálási pontosságát növelni tudja.

A robotok abszolút koordináta-rendszerbeli pozíció adatai azért nagyon hasznosak egy csoportos robotrendszerben, mert a robotok autonóm relatív távolságérzékelése máig csak korlátozottan megoldott feladat, a globális pozíció adatok különbségéből viszont a robotok közti távolság könnyen számolható.

#### Kefe nélküli motorok

A drónok elterjedését valójában az elektronikusan, gyorsan szabályozható, súrlódásmentes és nagy hatékonyságú kefe nélküli elektromos motorok megjelenése tette lehetővé. Ahogy azt korábban említettem, a forgórotoros drónok alapvetően instabil szerkezetek. A kefe nélküli elektromos motorok váltak az első olyan eszközzé, melyeknek a fordulatszámát kellően gyorsan lehetett szabályozni ahhoz, hogy a drónokat stabilan lehessen tartani (ehhez nagyságrendileg 1 KHz-es motor fordulatszám szabályozási körre van szükség).

A kefe nélküli motorok külső burkolóját váltott polaritású, erős, kicsi ferromágnesek sora szegélyezi. A belső felén pedig elektromágnesek találhatók, amiknek a gyors váltott ütemű szabályozása folyamatosan arrébb húzza-taszítja a külső burkot. Ezek a motorok így teljességgel súrlódásmentesek, szabályozásuk pedig kellően gyors, pontos és dinamikus lehet.

### **Érzékelő miniatürizáció**

A repülő tömeg és méret jelentős csökkentésének és a sokrétű környezetérzékelés megvalósításának alapvető feltétele az érzékelő eszközök miniatürizáltsága. Egy átlagos drónon több parányi giroszkóp, gyorsulásmérő, magnetométer, hőmérséklet érzékelő és nyomásmérő található, sőt mára szintén elengedhetetlen kellékek a parányi infra távolságérzékelők, ultrahangos szenzorok, különböző irányba néző kamerácskák, radarok, lidarok és egyéb környezetérzékelő eszközök.

### **Vezeték nélküli kommunikáció**

A drónok általában több független vezeték nélküli kommunikációs eszközzel vannak ellátva. Egyrészt hagyományosan folyamatos kapcsolat van egy földi pilóta és a drón között egy RC távirányítón keresztül. Emellett mostanra minden drón fenntart valamiféle vezeték nélküli kétirányú kapcsolatot a földi bázisállomásával. Amennyiben videójeleket sugároz a drón a földre, az esetenként egy harmadik független vezeték nélküli sávon érkezik.

Csoportos robotrendszer esetén a robotok közti direkt ad-hoc kommunikáció, vagy mesh hálózat létrehozása javasolt, hogy a drónok egymásról is tudjanak interakcióik létrehozásához.

### **Áramellátás**

A kefe nélküli motorok nagyon nagy áramot vesznek fel. Az első akkumulátor típusok, amik ki tudták szolgálni a drónok energiaigényét, a Lítium-Polymer (LiPo) akkumulátorok voltak. Mára a kisebb méretű drónok esetében lassan teret hódítanak a jóval biztonságosabb, magasabb energiasűrűségű, de egyelőre korlátozott áramleadású Lítium-Ion (LiIon) akkumulátorok, és nagyobb drónok esetén a hidrogén hajtás is fejlődő opció.

### **Számítási kapacitás**

A drónok szenzorainak gyors kiolvasásához, a többnyire bonyolult és számításigényes Kálmán szűrőt használó állapotbecsléséhez és a motorok gyors szabályozásához kis méretű, kis energiafelhasználású, de gyors vezérlő chip-ekre van szüksége. Ezek a modern mikroprocesszorok tulajdonképpen a mobiltelefonok térhódításával lettek hétköznapi halandók számára is elérhetőek véges méretben és árszinten.

### **Grafikus processzorok**

A dolgozatban taglalt csoportos mozgás megvalósításához még nem volt szükségünk GPU vezérlésre, de a drónok teljes (GNSS mentes) autonómiájához feltétlenül szükség van az önálló vizuális tájékozódáshoz, ami pedig a grafikus processzorok számítási kapacitását igényli. A jelen drónjai is egyre jobban látnak, de a jövő drónjainak a látás alapú információfeldolgozás ugyanolyan elemi része lesz, mint az embernek a szeme és vizuális tájékozódása.

## Karbonszálás anyagok

Mindenfajta repülés nagy energiaigényű, ezért a repülő tömeg csökkentése folyamatos optimalizációs szükséglet. A modern könnyű anyagok közül a karbonszálás csövek és lemezek lettek a drónok esetében a befutó konstrukciós elemek, mert szakítószilárdságuk és rugalmasságuk megfelelően nagy, sűrűségük viszont alacsony. Az első drónok megjelenésekor még komoly problémát jelentett a karbonszálás anyagok nehéz megmunkálhatósága, de mára ez is rutinszerű műveletté vált számos ezzel foglalkozó specialista szolgáltatóval.

## Nyílt forráskódú szoftverek

Végezetül nagyon fontos megemlíteni, hogy a drónok rohamos fejlődése messze nem lenne ilyen ütemű, ha a világ nincs tele nagyvonalú, közösségi szemléletű kutatóval és fejlesztővel, akik hisznek a nyílt forráskódú szoftverek közösségi víziójában és mérhetetlen erejében. A robotika talán az a terület, ahol a nyílt forráskódú szoftverek mára a leginkább alapvetéseivé és közös nyelvivé váltak a globális fejlesztéseknek. A teljesség igénye nélkül az alábbi komoly és komplex, nyílt forráskódú szoftver rendszerek minden drónos vagy robotikai rendszernek alapvető építőkövei lehetnek:

- [ROS](#)<sup>7</sup> - Robot Operációs Rendszer
- [MAVLink](#)<sup>8</sup>, [Cyphal](#)<sup>9</sup> - Drónos kommunikációs protokollok
- [ArduPilot](#)<sup>10</sup>, [PX4](#)<sup>11</sup> - Autopilóta rendszerek
- [Mission Planner](#)<sup>12</sup>, [QGroundControl](#)<sup>13</sup> - Bázisállomás szoftverek
- [AirSim](#)<sup>14</sup>, [Gazebo](#)<sup>15</sup> - Repülőgép szimulátorok

Legvégül, büszkén akasztjuk ennek a listának a végére a [Skybrush](#)<sup>16</sup> rendszerét, ami a mi drónrendszerünk (CollMot Kft.) saját fejlesztésű, nyílt forráskódúvá tett drónraj vezérlő bázisállomás szoftvere.

## 1.4. A dolgozatban tárgyalt kérdések

A dolgozatban bemutatom az elmúlt 10 évben (2014-2024) a csoportos robotikai kutatásainkból származó nemzetközileg publikált alapkutatási, szimulációs és kísérleti eredményeket. Ennek mentén végig vezetem az olvasót azon az elméleti és

---

<sup>7</sup> <https://www.ros.org/>

<sup>8</sup> <https://mavlink.io/en/>

<sup>9</sup> <https://opencyphal.org/>

<sup>10</sup> <https://ardupilot.org/>

<sup>11</sup> <https://px4.io/>

<sup>12</sup> <https://ardupilot.org/planner/>

<sup>13</sup> <https://qgroundcontrol.com/>

<sup>14</sup> <https://microsoft.github.io/AirSim/>

<sup>15</sup> <https://gazebo.org/>

<sup>16</sup> <https://skybrush.io>

## 1.4. A dolgozatban tárgyalt kérdések

---

gyakorlati íven, amin eljutottunk a bio-inspirált csoportos robotika koncepciójától a száz egyedes önszerveződő autonóm repülő robotrajunkig.

A nagy egyedszámú csoportos drónozásnak az évek során két alapvető építőkövét azonosítottuk: *flocking* és *traffic*, azaz *szinkronizált rajrepülés* és *koordinált drónforgalom*. Ez a két irány a közös térben repülésnek a két szélsőségét, ha úgy tetszik, ortogonális dimenzióját jelenti, amik kombinációjából bármilyen csoportosan koordinált vagy kooperatív feladat vezérlése kikeverhető. A rajrepülés esetén a közös cél a mozgás szinkronizálása. Itt az egyedek teljes halmazából egy együtt repülő csoport jön létre, ami ezáltal a teljes csoporton értelmezett meta-egyednek tekinthető. A drónforgalom esetében a cél az egyéni, egymástól teljesen független útvonalak lerepülése, de közös légtérben. Itt az egyedek összessége nem hoz létre csoportot, a közös cél majdnem, hogy implicit: olyan közösen elfogadott szabályok biztosítása a csoport számára, melyben az egyéni célok a lehető leghatékonyabban és legbiztonságosabban valósulhatnak meg. Annak ellenére, hogy ez utóbbi egyfajta individualista, egyéni érdekeket szem előtt tartó látásmód, mégis fontos az egyéni célok összességét csoportcélnak, csoportérdeknek definiálni, és összefogás mentén gondolkodni ez esetben is, mert ahogy Milo is fogalmazta Joseph Heller *22-es csapdjá*-ban: „Ami jó a szindikátusnak, az jó neked is”, azaz a hatékony csoport egyedei összességében maguk is hatékonyabbak lesznek (reményeink szerint nagyobb határfokkal, mint Milo szindikátusa esetében).

A rajrepülés és a drónforgalom optimális modelljei mellett bemutatom még alkalmazott példaként a formációrepülés és a csoportos keresés eseteit is, részben annak demonstrálására, hogy az alapvetően kidolgozott párkölcsönhatások, csoportos repülési koncepció és metodológia milyen hatékonyan alkalmazható tetszőleges célfeladat megvalósítására.

Az összes ismerttetett példát ugyanazzal a módszertannal vizsgáljuk. Bio-inspirált, ágens alapú gondolkodásmódban határozzuk meg az egyedek pillanatnyi kívánt sebességét, melyet mozgást harmonizáló és biztonságot növelő párkölcsönhatási tagok és célfeladatot ellátó önhajtó komponensek vektoriális eredőjeként keverünk ki. Mindezt egymással kommunikáló, teljesen decentralizált, azaz központi irányított vezérlés nélkül működtetett, autonóm, önszerveződő egyedek realiztikus szimulációjában teszteljük és optimalizáljuk. Végül, ugyanilyen egyedek fizikai implementációján, azaz kültéri intelligens drónok nagy egyedszámú raján, terepi kísérletekben is bemutatjuk az eredményeket.

### 1.4.1. A dolgozat felépítése

A dolgozat további fejezetei publikációs mérföldkövek szerint vannak időrendben felépítve és a fejezeteknek megfelelően 1-1 tézispontba rendezve. A 2. fejezetben bemutatom a csoportos drónrepülés alapmodelljét és azt a realiztikus szimulációs keretrendszert, amiben a modellünket fejlesztettük. A 3. fejezetben az első csoportos repülési kísérleti eredményeinket mutatom meg. A 4. fejezetben az alapmodell

egy speciális bio-inspirált alkalmazását ismertetem, a csoportos üldözés menekülés esetét. A 5. fejezetben a csoportos rajrepülés továbbfejlesztett, skálázhatóbb és evolúciósan optimalizált változatát mutatom be. A 6. fejezetben drónok közös térben történő kooperatív, de egyéni útvonalkövetéséről, azaz a drónforgalomról lesz szó. A 7. fejezet a csoportos rajrepülésünk legfejlettebb modelljét mutatja be, mellyel elérhető, hogy a raj egyszerre legyen képes gyorsan reagálni külső hatásokra és közben stabil maradni. A 8. fejezet a legfejlettebb drón forgalmi modellünket mutatja be, melyben optimálisan van ötvözve az egyéni prediktív útvonaltervezés és az önszerveződő ütközésselkerülés.



## 2. fejezet

# A csoportos repülés szimulációja

A csoportos mozgás statisztikus fizikai modellezése mentén elsősorú célunk ezen modelleket felhasználva, azaz bio-inspirált *autonóm* repülő robotraj létrehozása volt. Autonóm alatt azt értjük, hogy minden egyed fedélzeti érzékelőket használ állapotának mérésére, és minden vezérlő számítást fedélzeti számítógéppel hajt végre, azaz a vezérlőrendszer elosztott, ahogy értelemszerűen a természetben repülő rajok is azok. Ez a definíció a robotjaink esetében tiltja a csoportdinamika külső számítógép általi központi feldolgozását, de megengedi pl. fedélzeti GPS-eszközök használatát a globális pozíció mérésére. Vizsgálatunk minden olyan járműre érvényes, amely ésszerű sebességtartományon belül képes tetszőleges irányban mozogni a tájolásától függetlenül (beleértve a nulla sebességű lebegést is). A tipikus repülő robotok, avagy drónok, amelyek megfelelnek ennek a kritériumnak, az úgynevezett forgórotoros multikopterek (propellerszám szerinti nevezéktanban kvadro-, hexa-, okto- és dodekakopterek).

A robotokat vezérlő fedélzeti algoritmust a bevezetőben taglalt Reynolds féle boid algoritmus [2] kölcsönhatási tagjainak megfelelő megválasztásával kívántuk megvalósítani. Ezen kölcsönhatási tagok fontos jellemzője a rajrepülési modellekben a lokalitásuk: az egyedek csak korlátozott tartományon belüli szomszédok állapotát veszik figyelembe a kívánt sebességük meghatározásakor. Az autonóm robotok csapataiban ez a kritérium nem feltétlenül jelent korlátozást, hiszen a robotok közötti közvetlen kommunikáció (pl. az általunk a későbbiekben használt ad-hoc WiFi hálózat) általában szintén véges hatótávolságú, azaz a drónok a jelterjedés fizikai korlátai miatt is csupán a közeli szomszédoknak képesek üzeneteket küldeni (például helyzetükről és sebességükről).

Mint láthattuk, a csoportos mozgás egyszerű dinamikai modellekkel szimulálható, nem szabad azonban alábecsülnünk az állatok képességét a koherens csoportos mozgás fenntartására látszólagos könnyedségük ellenére sem. A zökkenőmentes csoportos mozgás előfeltételei közé tartozik a robusztusság a reakcióidővel, a kommunikáció esetleges késleltetésével, a zajos érzékelő bemenetekkel vagy az előre nem

## 2.1. A repülő robotok valóság-hű modellje

---

látható környezeti zavarokkal, például a széllel szemben.

Ezen fejezet egyik fő célja egy általános autonóm repülő robot modelljének bemutatása, melyet egy valóság-hű szimulációs keretrendszerbe integrálhatunk. Ezzel a modellel a csoportos repülési algoritmusok stabilitását vizsgálhatjuk a realisztikus rendszer hiányosságainak szemszögéből. A modellnek annyi rendszerspecifikus jellemzőt kell tartalmaznia, amennyit csak figyelembe tudunk venni, de sokféle robotra is alkalmazhatónak kell lennie. Ez sok dimenziós paraméterteret fog eredményezni, amit minden egyes kísérleti alkalmazásnál finomhangolnunk kell majd.

Az első modellel azt is demonstrálni fogjuk, hogy egy valós robotikai rendszerben nem lehet akárhogy megválasztani a szimulációban kényelmes kölcsönhatási tagokat, ezeknek mindenkor figyelembe kell vennie a sztochasztikus környezet emergensen nehezítő hatásait.

Az első szimulációkkal első körben két valóság-hű, biológiailag inspirált szituáció stabilitását tanulmányozzuk: i) egy általános önszerveződő csoportos repülési feladatot egy körbehatárolt területen belül, és ii) egy csoportos célpontkövetési feladatot egy előre meghatározott célpont oszcillációmentes megközelítéséhez.

## 2.1. A repülő robotok valóság-hű modellje

Csoportos repülés során az  $i$ -dik robot kívánt (desired) sebességének időfüggése ( $\mathbf{v}_i^d(t)$ ) a többi robot helyvektorának ( $\mathbf{x}_j$ ) és sebességvektorának ( $\mathbf{v}_j$ ) függvénye lehet:

$$\mathbf{v}_i^d(t) = \mathbf{f}_i \left( \{\mathbf{x}_j(t)\}_{j=1}^N, \{\mathbf{v}_j(t)\}_{j=1}^N \right), \quad (2.1)$$

ahol  $N$  a robotok száma és az  $\mathbf{f}_i$  függvény tartalmazza a vezérlő dinamika tetszőleges jellemzőit, amibe az alábbi tökéletlenségeket vezetjük be:

- **Tehetlenség** - az általánosított robotmodellünkben egy alacsony szintű, sebesség alapú **PID szabályzót**<sup>1</sup> feltételezünk, ami exponenciális konvergenciával,  $\tau_{\text{ctrl}}$  karakterisztikus idővel képes beállítani a kívánt sebességet. Emellett az egyedek sebességét és gyorsulását is korlátozzuk  $v_{\text{max}}$  és  $a_{\text{max}}$  értékkel.
- **Belső zaj** - a valódi robotok pozícióját és sebességét GNSS vevőkkel mérjük. A mérések belső zaját a  $\sigma_s$  szórással jellemezhető  $\boldsymbol{\eta}_i^s(t)$  sztochasztikus függvénnyel modellezzük.
- **Véges szenzor frissítési idő** - az érzékelők frissítési frekvenciája alapvetően meghatározza a robotok reakcióidejét és mozgékonyágát. A modellben minden egység véges és állandó  $t_s^{-1}$  frekvenciával frissíti az érzékelő adatokat.
- **Véges kommunikációs hatótávolság** - a robotok közötti kommunikáció

---

<sup>1</sup> [https://hu.wikipedia.org/wiki/PID\\_szab%C3%A1lyoz%C3%B3](https://hu.wikipedia.org/wiki/PID_szab%C3%A1lyoz%C3%B3)

véges  $r_c$  hatótávolságú, tehát ha két egyed távolsága nagyobb, mint  $r_c$ , akkor nem tudnak egymással kölcsönhatásba lépni az  $\mathbf{f}_i$  függvényen keresztül.

- **Késleltetés** - Mire egy egyed egy szomszédja hely- és sebességadatait befo-gadja és feldolgozza, az adatfeldolgozási és átviteli késések miatt az adatok elavultak lesznek. A legegyszerűbb megközelítésben ezt az időkésleltetést  $t_{\text{del}}$  konstans értékűnek vesszük.
- **Általános zaj** - Az egységek gyorsulásához hozzáadunk egy delta-korrelált (Gauss-eloszlású) külső  $\boldsymbol{\eta}_i(t)$  zajtagot  $\sigma$  szórással. Ez a kifejezés olyan előre nem látható környezeti hatások modellje, mint például az alacsony szintű szabályozóköri szél-kompenzációjának ingadozása.

A modell végső formája a fenti definíciók bevezetésével az  $i$ -dik egyed gyorsulását ( $\mathbf{a}_i(t)$ ) az alábbi módon határozza meg:

$$\mathbf{a}_i(t) = \boldsymbol{\eta}_i(t) + \frac{\mathbf{v}_i^{\text{d}}(t) - \mathbf{v}_i(t) - \mathbf{v}_i^{\text{s}}(t)}{|\mathbf{v}_i^{\text{d}}(t) - \mathbf{v}_i(t) - \mathbf{v}_i^{\text{s}}(t)|} \cdot \min\left(\frac{\mathbf{v}_i^{\text{d}}(t) - \mathbf{v}_i(t) - \mathbf{v}_i^{\text{s}}(t)}{\tau_{\text{ctrl}}}, a_{\text{max}}\right), \quad (2.2)$$

ahol a kívánt sebesség a késleltetések és sztochasztikus szenzor zajok figyelembevételével az alábbi alakú:

$$\mathbf{v}_i^{\text{d}}(t) = \mathbf{f}_i\left(\{\mathbf{x}_j(\hat{t}) + \mathbf{x}_j^{\text{s}}(\hat{t})\}_{j=1}^{N_i}, \{\mathbf{v}_j(\hat{t}) + \mathbf{v}_j^{\text{s}}(\hat{t})\}_{j=1}^{N_i}\right), \quad (2.3)$$

ahol  $\mathbf{x}_j^{\text{s}}(\hat{t})$  és  $\mathbf{v}_j^{\text{s}}(\hat{t})$  adja meg az integrált pozíció- és sebességzaj mértékét a  $\boldsymbol{\eta}_i^{\text{s}}(t)$  random változó alapján a  $\boldsymbol{\eta}_i^{\text{s}}(t) = \dot{\mathbf{x}}_i^{\text{s}}(t) = \ddot{\mathbf{v}}_i^{\text{s}}(t)$  másodrendű sztochasztikus differenciálegyenlet megoldásából,  $\hat{t} = t - t_{\text{del}}$  ha  $i \neq j$ , és  $t$  ha  $i = j$  és  $N_i$  csupán azokat a  $j$  egyedeket tartalmazza, amikre  $|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j| < r_c$ .

A  $\mathbf{f}_i$  függvény tehát az  $i$ -dik ágens aktuális helyzetétől és sebességétől, valamint a többi ágens késleltetett helyzetétől és sebességétől függ, csak a közeli egyedeket veszi figyelembe és – ez a fenti egyenletekből nem derül ki, de jó emlékezni rá – csak  $t_s^{-1}$  gyakorisággal változik.

A fenti egyenleteket az Euler<sup>2</sup> vagy Euler-Maruyama<sup>3</sup> módszerekkel lehet numerikusan megoldani. A valósághű szimulációk futtatásakor tipikusan használt paraméter tartományokat foglalja össze a 2.1. táblázat.

<sup>2</sup> [https://en.wikipedia.org/wiki/Euler\\_method](https://en.wikipedia.org/wiki/Euler_method)

<sup>3</sup> [https://en.wikipedia.org/wiki/Euler%E2%80%93Maruyama\\_method](https://en.wikipedia.org/wiki/Euler%E2%80%93Maruyama_method)

2.2. Rajrepülés algoritmus a zárt térben

Paraméter	Definíció	Érték
$\tau_{ctrl}$	Az alacsony szintű PID szabályzó relaxációs ideje	1 s
$t_s$	Az érzékelők frissítési ideje	0.2 s
$v_{max}$	Maximális sebesség	4 m/s
$a_{max}$	Maximális gyorsulás	6 m/s <sup>2</sup>
$\sigma_s$	Belső zaj fluktuációjának mértéke	0.005 m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>
$r_c$	Kommunikációs hatótávolság	30-80 m
$t_{del}$	Kommunikációs késleltetés	0-2 s
$\sigma$	Külső zaj fluktuációjának mértéke	0-0.2 m <sup>2</sup> /s <sup>3</sup>

2.1. táblázat. Az első szimulációk során használt realiztikus modell paraméterek és tipikus értékeik.

## 2.2. Rajrepülés algoritmus a zárt térben

Az alábbiakban bemutatjuk a legegyszerűbb kiinduló algoritmust, amivel az első szimulált robotcsapatunkat a fent ismertetett realiztikus keretrendszerben stabil önszerveződő működésre tudtuk bírni. Önszerveződés alatt a továbbiakban azt értjük, hogy az egyedek a mozgás csoportszinten kialakuló mintázatait csupán saját egyéni lokális döntéseik segítségével érik el.

A realiztikus keretrendszerben egy csoportos repülési algoritmus megalkotásához nincs más dolgunk, mint minden időpillanatra meghatározni az  $i$ -dik egyed kívánt sebességét,  $v_i^d$ -t. Ezt pedig a Reynolds féle bio-inspirált csoportos mozgás modellek kölcsönhatási tagjainak eredőjeként fogjuk előállítani.

### 2.2.1. Önhajtás

Az első és legfontosabb kívánt sebességtag az önhajtás, ami a legegyszerűbb csoportos repülés esetén nem más, mint az aktuális irány tartása egy megadott  $v_{flock}$  közlekedési sebességgel:

$$v_i^{SPP} = v_{flock} \frac{v_i}{|v_i|} \tag{2.4}$$

### 2.2.2. Rövid hatótávolságú taszítás

A taszító tagot puha magú, egyszerű lineáris taszításként hozzuk létre, hogy a kölcsönhatási sugáron belül se ugorjon hirtelen nagyot a függvény kimeneti értéke, és zaj hatására se változzon a kölcsönhatási sugár környékén drasztikusan. Ha az egyedek a zaj vagy a valódi közelség hatására túl nagy taszító impulzust kapnak, az nem kívánt oszcillációkhoz és túl nagy és veszélyes „menekülési” sebességhez vezetne:

$$\mathbf{v}_{ij}^{\text{rep}} = C_{\text{rep}} \frac{(|\mathbf{d}_{ij}| - r_{\text{rep}})}{|\mathbf{d}_{ij}|} \mathbf{d}_{ij} \Theta(r_{\text{rep}} - |\mathbf{d}_{ij}|), \quad (2.5)$$

ahol  $\mathbf{d}_{ij} = \mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j$ ,  $C_{\text{rep}}$  a taszítás együtthatója,  $r_{\text{rep}}$  pedig a taszító kölcsönhatás hatósugara,  $\Theta(\cdot)$  pedig a [Heavyside függvény](#)<sup>4</sup> a kölcsönhatási sugárnál történő levágáshoz.

### 2.2.3. Sebességillesztés

A sebességillesztő kölcsönhatásnak kezdetben még csak három feltételt kellett teljesítenie: i) csökkentenie kellett a közeli egyedek közti sebességkülönbséget; ii) lokálisnak kellett lennie; iii) túl közeli egyedek esetén a taszításhoz hasonlóan ez sem lehetett túl nagy értékű. Az első szimulációban a sebességillesztő tagot a viszkózus súrlódás szerű kölcsönhatásként modelleztük, hasonlóan, mint [11] és [14]:

$$\mathbf{v}_{ij}^{\text{frict}} = C_{\text{frict}} \frac{\mathbf{v}_j - \mathbf{v}_i}{(\max(r_{\text{min}}, |\mathbf{d}_{ij}|))^2}, \quad (2.6)$$

ahol  $C_{\text{frict}}$  a sebességillesztő kölcsönhatás együtthatója,  $r_{\text{min}}$  pedig egy kicsi küszöbérték a nullával való osztás elkerülése érdekében közeli egyedek esetén. Ez a kölcsönhatási tag a fenti három elvárás közül a lokalitást nem teljesíti szigorú értelemben, de az inverz négyzetes távolságfüggés elhanyagolhatóan kicsivé csökkenti a távolhatást amennyiben  $C_{\text{frict}}$  és a sebességek viszonya megfelelő. Ez a gyakorlatban nem jelentett különösebb problémát, illetve mondjuk úgy, hogy nem ez jelentette a fő problémát, de ezt majd csak a következő fejezetekben fejtem ki részletesebben... Azt mindenesetre fontos megjegyezni, hogy viszkózus súrlódás szerű tagot azért választottunk, hogy elkerüljük az általunk is használt potenciálfüggvény alapú (lásd taszító kölcsönhatás) vezérlési megoldásokban már tipikusan kis reakcióidőnél is előjövő öngerjesztett oszcillációkat [26].

### 2.2.4. Kölcsönhatás a falakkal

Az egyedeinknek zárt térrészben történő mozgáskor nem csak egymással, hanem az őket körbevevő falakkal is kölcsönhatásba kell kerülniük. Ez tipikusan egy olyan pont, amit az idealizált szimulációk pl. periodikus határfeltétellel elhanyagolhatnak, ám ezt a gyakorlatban nyilvánvalóan nem tehetjük meg. Sőt, mint látni fogjuk, pont a falak előtti fékezési kényszer és a csoport haladási kényszere közötti konfliktus lesz az egyik legnehezebben orvosolható kérdésünk.

A falakat az egyszerűség kedvéért virtuális (ún. *shell*) egyedekként modellezzük, hasonlóan, mint [77]. Ezek a virtuális ágensek a négyzetes arénánk falain kívül az egyedek sebességét az aréna belseje felé igyekeznek téríteni:

<sup>4</sup> <https://hu.wikipedia.org/wiki/Heaviside-f%C3%BCggv%C3%A9ny>

2.3. Csoportos célpont követés algoritmus

---

$$\mathbf{v}_i^{\text{shill}} = C_{\text{shill}} \left( v_{\text{flock}} \frac{\mathbf{x}_a - \mathbf{x}_i}{|\mathbf{x}_a - \mathbf{x}_i|} - \mathbf{v}_i \right) s(|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_a|, d), \quad (2.7)$$

ahol  $C_{\text{shill}}$  az arénával való kölcsönhatás együtthatója,  $\mathbf{x}_a$  az arénának minden pillanatban az a pontja, ami az adott egyedhez a legközelebb van (tehát az egyed így mindig merőlegesen a legközelebbi pont felé igyekszik vissza), az  $s(x, d)$  függvény egy  $[0, 1]$  kimeneti tartományú, tetszőleges alakú szigmoid függvény lehet, ami a kölcsönhatást a falon kívüli maximális érték és a falon belüli nulla érték között finoman vezeti át a faltól való  $x$  távolság függvényében egy karakterisztikus  $d$  távolsághoz viszonyítva. Ennek a függvénynek a korai változatában szinuszos lecsengést használtunk, de ez később elavulttá vált, így itt most a konkrét alakot nem részletezem. Akit érdekel, megnézheti a historikus változatot a korai [T1] publikációban.

**2.2.5. Összegzés**

A kívánt pillanatnyi sebességünk a fenti kölcsönhatási tagok egyszerű szuperpozíciójából áll össze, az alábbi alakban:

$$\mathbf{v}_i^{\text{d}} = \mathbf{v}_i^{\text{SPP}} + \mathbf{v}_i^{\text{shill}} + \sum_{i \neq j} \left( \mathbf{v}_{ij}^{\text{rep}} + \mathbf{v}_{ij}^{\text{frict}} \right) \Theta(r_c - |\mathbf{d}_{ij}|) \quad (2.8)$$

**2.3. Csoportos célpont követés algoritmus**

A csoportos célpontkövetés algoritmust egy egyszerű de látványos gyakorlati alkalmazásnak szántuk a korai időben, amin keresztül demonstrálni tudtuk, hogy a korábban bevezetett párkölcsönhatási tagok felhasználhatók az alapvető rajrepülésen túl célfeladatok ellátására is. Így ezeket (nevezetesen a taszítást és a sebességillesztést) megtartva csak a falakkal való kölcsönhatást kellett eltávolítanunk és az önhajtó tagot lecserélni célpontkövető taggá.

A célpontkövető tagot trükkösen úgy alakítottuk ki, hogy a drónrajt meta egyedként kezelve annak tömegközéppontját a célpont felé közelítettük, miközben e meta egyeden belül az egyedeket egymástól stabil távolságban, oszcillációmentesen tartottuk. Fontos megjegyezni, hogy a raj tömegközéppontja nem egy globális érték, azt az egyedek a számukra elérhető információ alapján számolják pillanatról pillanatra. Ha a rajunk két részre szakadva két távoli irányból érkezik, akkor először minden egyed csak a saját alrajához fogja természetes módon igazítani magát, amikor pedig a két alraj kommunikációs hálózata összeér, akkor önszerveződően egyesülnek. A modellt leíró célpontkövetési tag ezek alapján a következőképpen alakul:

$$\mathbf{v}_i^{\text{track}} = \mathbf{v}_i^{\text{shp}} + \mathbf{v}_i^{\text{trg}}, \quad (2.9)$$

ahol  $\mathbf{v}_i^{\text{shp}}$  írja le a tömegközépponthez képesti igazodás alakját,  $\mathbf{v}_i^{\text{trg}}$  pedig a tömeg-

középpont célpont felé tartását. Továbbá:

$$\mathbf{v}_i^{\text{shp}} = v_{\text{flock}} \frac{\mathbf{x}_i^{\text{CoM}} - \mathbf{x}_i}{|\mathbf{x}_i^{\text{CoM}} - \mathbf{x}_i|} s(|\mathbf{x}_i^{\text{CoM}} - \mathbf{x}_i|, r_i^{\text{CoM}}) \quad (2.10)$$

és

$$\mathbf{v}_i^{\text{trg}} = v_{\text{flock}} \frac{\mathbf{x}^{\text{trg}} - \mathbf{x}_i^{\text{CoM}}}{|\mathbf{x}^{\text{trg}} - \mathbf{x}_i^{\text{CoM}}|} s(|\mathbf{x}^{\text{trg}} - \mathbf{x}_i^{\text{CoM}}|, d), \quad (2.11)$$

ahol  $\mathbf{x}_i^{\text{CoM}}$  az  $i$ -dik egyed által mért raj tömegközéppont aktuális pozíciója,  $r_i^{\text{CoM}}$  a raj, mint meta entitás  $i$ -dik egyed által számolt sugara,  $\mathbf{x}^{\text{trg}}$  a célpont koordinátája (ami lehet statikus vagy dinamikus, de ezt kivételesen látnia/ismernie kell az egyedeknek, különben nem tudnák követni). Fontos látni, hogy a szigmoid függvényünk karakterisztikus távolságát a tömegközépponthez való igazodásnál  $r_i^{\text{CoM}}$ -nak vettük. A sebesség lecsengést most úgy kell tehát kialakítanunk, hogy amikor az egyedek ezen a távolságon belülre érnek a tömegközépponttól, akkor már ne akarjanak sehova menni önhajtottan, különben tülekedés állna elő. Ezt a távolságot ismét kellően nagyra kell venni, hogy mindenki, akit látunk, elérjen a távolság által definiált körön belül (egyébként önmagában ez egy bonyolult matematikai feladat, hogy  $N$  db pontot legalább  $d$  távolságra tartva egymástól mekkora körülírt körbe lehet bezárni; nem triviális a feladat megoldása, kis egyedszámra heurisztikus függvénnyel kezelhetjük a megoldást, [előre kiszámolt értékekkel](#)<sup>5</sup>  $N$  függvényében).

Utolsó lépésként a célpontkövetési tagot egyszerűen és nyersen szaturáljuk  $v_{\text{flock}}$  értéknél:

$$\tilde{\mathbf{v}}_i^{\text{track}} = \frac{\mathbf{v}_i^{\text{track}}}{|\mathbf{v}_i^{\text{track}}|} \min(v_{\text{flock}}, |\mathbf{v}_i^{\text{track}}|) \quad (2.12)$$

A kívánt sebességünk pedig végül így alakul:

$$\mathbf{v}_i^{\text{d}} = \tilde{\mathbf{v}}_i^{\text{track}} + \sum_{i \neq j} \left( \mathbf{v}_{ij}^{\text{rep}} + \mathbf{v}_{ij}^{\text{frict}} \right) \Theta(r_c - |\mathbf{d}_{ij}|) \quad (2.13)$$

## 2.4. Szimulációs eredmények

A 2.1. szakaszban bemutatott valóság-hű modelltől C nyelven íródott robotraj szimulációs keretrendszert írtunk (a szimulációs keretrendszer megalkotását elsősorban Vicsek Tamással közös doktoranduszunknak, Virágh Csabának köszönhetjük, aki azóta meg is védte doktoriját ebből a témából). A keretrendszer moduláris felépítésének köszönhetően tetszőlegesen megalkotott rajrepülési algoritmust képes futtatni. Tartozik hozzá egy vizuális megjelenítő modul, ahol valós időben lehet

<sup>5</sup> <http://hydra.nat.uni-magdeburg.de/packing/cci/cci.html#cci1>

## 2.4. Szimulációs eredmények

---

az adott algoritmus és a környezeti modell paramétereit hangolni, és megfigyelni, hogy melyik paraméterváltoztatásnak mi a hatása a kialakuló viselkedésre (ez óriási segítség az algoritmusok fejlesztésekor és tesztelésekor). A szimulációs környezet emellett tetszőlegesen definiált kimeneti adatot tud folyamatosan logolni akár egyed szinten, ami a futtatások utólagos kiértékeléséhez elengedhetetlen segítség. Az egész realiztikus szimulációs keretrendszert néhány évvel az első nemzetközi publikációnk után nyílt forráskódúvá tettük, azóta is [elérhető és használható](#)<sup>6</sup> bárki által.

### 2.4.1. Rajrepülés szimulációja zárt térben

Ahhoz, hogy ki tudjuk értékelni az algoritmusunk adott paraméterbeállítású minőségét, az alábbi rendparamétert definiáltuk a rajszintű koherencia (sebességkorreláció) mérésére:

$$\Psi_{\text{scal}}(t) = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i=1}^N \sum_{j \neq i} \frac{\mathbf{v}_i(t) \cdot \mathbf{v}_j(t)}{|\mathbf{v}_i(t)| |\mathbf{v}_j(t)|}, \quad (2.14)$$

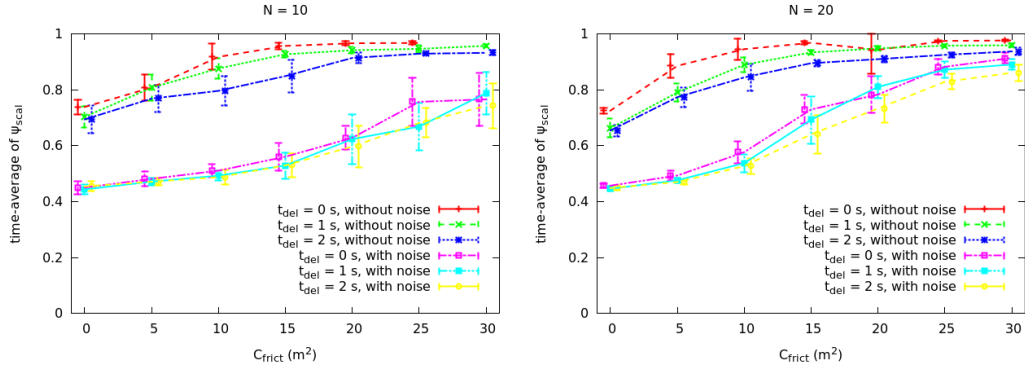
ahol  $N$  az egyedek száma,  $\mathbf{v}_i(t) \cdot \mathbf{v}_j(t)$  pedig két egyed sebességvektorának skalárszorzata. Ha a raj tökéletesen rendezett csoportos mozgást végez,  $\Psi_{\text{scal}}(t) = 1$ , ha tökéletesen rendezetlen, akkor  $\Psi_{\text{scal}}(t) = 0$ .

Az alábbi, eredeti cikkünkben vett ábra alapján a rendezett csoportos mozgás a bemutatott modellel elérhető megfelelő paraméterhangolás mellett (2.1. ábra), de a késleltetés növelése és a külső és belső zaj szimulálása minden esetben ront a rendszer hatékonyságán.

A csatolt ábrából nem derül ki, de a szimulációs futtatásokból egyértelműen látszik, hogy az alacsony sebességkorreláció fő okozója az egyedek számára ellentmondó igények párhuzamos fennállása a falak közelében. Ilyenkor ugyanis az egyedek együtt is akarnak maradni (azaz közösen mennek a fal felé), de a falat is el akarják kerülni (aki elől van, annak mégiscsak meg kell állnia, korábban, mint a csapat végén lévők). A rendszer ugyan hangolható úgy, hogy ez a dilemma ne okozzon ütközést, de a jelenlegi modellben egyértelmű oszcillációkat eredményez, és emiatt időbe telik, amíg a csoport meg nem találja a falnak ütközve az új járható közös irányát. A probléma orvoslását a 5. fejezetben taglaljuk.

---

<sup>6</sup> <https://github.com/csviragh/robotsim>

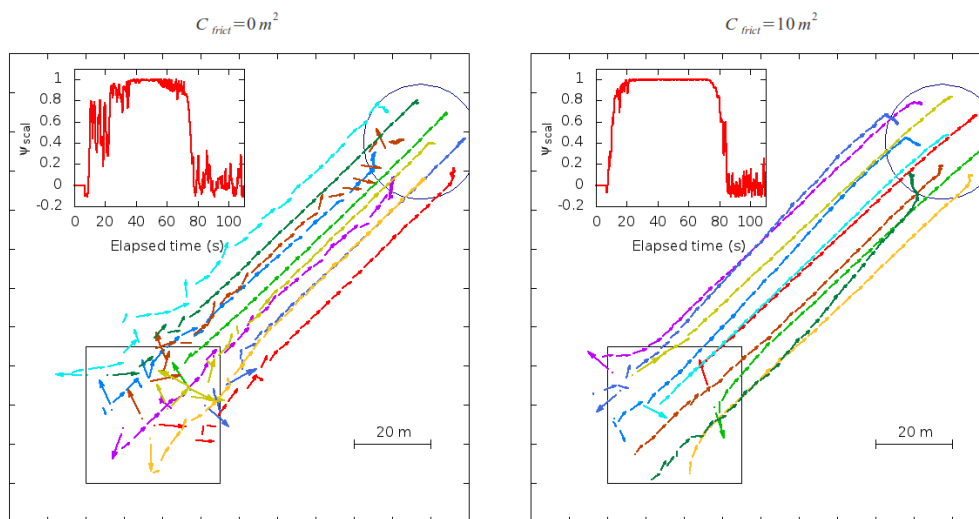


2.1. ábra. A zárt terű csoportos repülés szimulációjának kiértékelése 10 és 20 egyedre, különböző késleltetés ( $t_{del}$ ) és sebességillesztési együttható ( $C_{frict}$ ) értékre. Minden mérési pont 10 perces szimuláció átlagából van számolva. További paraméterbeállítások tekintetében az eredeti cikk forrása az irányadó [T1].

#### 2.4.2. Csoportos célpontkövetés szimulációja

A 2.2. ábra demonstrálja a csoportos célpont követés algoritmus szimulált hatékonyságát sebességillesztő kölcsönhatás nélkül (bal oldal) és sebességillesztő kölcsönhatással (jobb oldal). Mind a sebességkorrelációs rendparaméterben, mind a trajektóriákon magukon szépen látszik a sebességillesztés simító, zajszűrő, oszcilláció csökkentő hatása, ami kulcsfontosságú szerep a késleltetéssel, tehetetlenséggel és zajokkal terhelt szimulációs környezetben. Ugyanakkor fontos megjegyezni, hogy túl nagy sebességillesztés lassítja a raj általános mozgását, így mint mindenhol az életben, itt is megfelelő kompromisszumot kell hoznunk a stabilitás és a dinamizmus egymásnak feszülő konfliktusában.

2.5. A fejezethez kapcsolódó tézispont



2.2. ábra. A csoportos célpont követő algoritmus szimulációja. Az ábrákon 10 egyed trajektóriái láthatók sebességillesztés nélküli (bal oldal) és sebességillesztéses (jobb oldal) kölcsönhatás esetén. Az egyedek a téglalap területből indulnak és a kör területbe érkeznek. Pontos paraméterbeállítások tekintetében az eredeti cikk forrása az irányadó [T1].

2.5. A fejezethez kapcsolódó tézispont

Kidolgoztunk egy ágens alapú, bio-inspirált matematikai modell rendszert és az ennek tesztelésére alkalmas realiztikus, de gyors szimulációs környezetet repülő robotok csoportjainak önszerveződő, decentralizált irányításához. A keretrendszer egyik része a repülő robotok absztrakt matematikai modellje, ami számos vezérlést nehezítő valósághű tulajdonságot magában foglal, úgy, mint a rendszerben lévő reakcióidők és késleltetések, a kommunikáció véges hatótávolsága, a fedélzeti érzékelők zaja és pontatlansága, valamint a robotok tehetetlensége, véges gyorsulása. A keretrendszer másik része a környezet realiztikus modellezése, mely magában foglalja a pozícionálási rendszer pontatlanságát és egyéb külső sztochaszticitást.

A bemutatott modellezési keretben két decentralizált algoritmust építettünk fel és vizsgáltunk: i) bio-inspirált, szinkronizált csoportos mozgás; ii) csoportos célpontkövetés. Mindkét algoritmusban felhasználtuk ugyanazt a rövid hatótávolságú tasztító párkölcsönhatást, ami segített az egyedek közti ütközéseket elkerülni, és egy viszkozus súrlódás szerű sebességillesztő párkölcsönhatási tagot, ami a szomszédos egyedek sebességkorrelációját növelte.

Szimulációkkal elemeztük a létrejövő önhajtott rendszer stabilitását, és megmutattuk, hogy a viszkozus súrlódás szerű sebességillesztő kölcsönhatás alapvető fontosságú a realiztikus rendszerben a késleltetések és zajok hatására emergensen létrejövő öngerjesztett oszcillációk és inherens instabilitás mérsékléséhez.

Eredményeinkkel demonstráltuk, hogy egyedek csoportjának vezérléséhez az interakciókra fókuszáló egyszerű ágens alapú realiztikus szimulációs modellezés valós

alternatívája lehet a matematikailag jóval bonyolultabb, és ezért a csoportszintű dinamikára nézve kényszerűen hátrányos egyszerűsítésekkel élő irányításelméleti megközelítésnek.

Kapcsolódó publikációk: [T1, T2] (2014).



### 3. fejezet

## Csoportos repülés kültéri drónokkal

A Vicsek Tamás által elnyert [EU ERC COLLMOT](#)<sup>1</sup> pályázatban (2009-2016) a csoportos mozgás elveinek megértésével párhuzamosan egyértelmű célkitűzés volt a csoportos robotikai modellek szimulációs szintjéről való továbblépés a valódi csoportos robotikai kísérletek irányába. Szimulációban ugyanis nagyon könnyű „csalni” még lelkiismeretes kutatóknak is. A szimulált világot az ember maga építi fel, és ilyen módon értelemszerűen az egyszerűből halad a bonyolult felé, azaz első nekifutásra alapértelmezés szerint el fog hanyagolni számos olyan szempontot és nehezítést, amikre akár nem is gondol, vagy ha gondol is, véges energiája, ideje és lehetősége (pl. számítási kapacitása) van foglalkozni vele.

A valóság a szimulációkkal ellentétben épp, hogy rendkívül bonyolult, kiszámíthatatlan, pontatlan, hibás, zajos, mérhetetlen – a „vádaskodó” jelzők sorát a végtelenségig lehetne fokozni... Ezek a tökéletlenségek pedig egy terepi robotikai rendszer stabil működtetését nem várt pillanatokban és rendkívüli módon tudják megnehezíteni a naív, szimulációk világához szokott kutató számára.

Ezt az eltérést a szimulációs világ és a valódi kísérletek között úgy hívjuk, hogy „reality gap”, amit szó szerint „valóság rés”-re fordíthatnánk, de a valóság rés fordítás valóság résének csökkentése érdekében praktikusán inkább a „valóság szakadék” szóösszetételt használni. A „valóság szakadék” általános kifejezés, bármilyen rendszerre vonatkozhat, de néhány tulajdonsága univerzális: mindig jelen van, bármi is legyen a mértékegysége, értéke soha nem zérus, sőt, mindig nagyobb, mint amire számítunk!

Mivel a csoportos mozgás modelljeinket a természet inspirálta, és a természet a valódi világban látszik működni, ezért annak demonstrálását, hogy ezen rendszereket megértettük és utánozni is tudjuk, nem bízhattuk szimulációkra, hanem gya-

---

<sup>1</sup> <https://hal.elte.hu/flocking/>

### 3.1. A repülő robotok szerkezeti felépítése

---

korlatias terepi kísérletekkel is alá kellett támasztanunk. Ez jórészt nem annyira tudományos, mint inkább mérnöki, technológiai és informatikai megoldások hosszú sorozatát igénylő, lépésről lépésre elvégzett fegyelmezett munka, ugyanakkor egyben elengedhetetlen szükséglet is az alapkutatói szintből a valódi innováció felé vezető úton.

### 3.1. A repülő robotok szerkezeti felépítése

Amikor a csoportos mozgásos kutatásnak nekikezdtünk, forgórotoros drónok még nemigen léteztek. Az első robotikai kísérleteinket a robotikai laborunk megalapításakor nem is három dimenzióban repülő, hanem a víz tetején, két dimenzióban úszó távirányítású játékajókkal végeztük [S1]. Menet közben azonban a technológia fejlődött és földi halandók számára is elérhetővé váltak a miniatúr (ezalatt akkor a néhány kilogramm alatti kategóriát értettük, ma már néhányszor tíz grammra inflálódott ez a szó) forgórotoros távirányítású repülőeszközök, azaz a drónok.

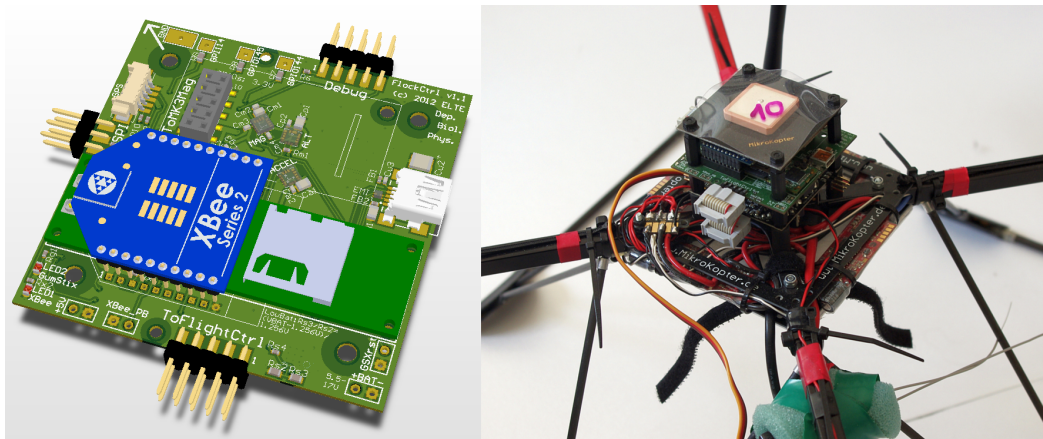
Az első félig nyílt forráskódú drónrendszer, amivel kísérletezgetni kezdtünk, a német MikroKopter<sup>2</sup> cég „MK Basicset L4-ME” elnevezésű kvadrokopter szettje volt. Ez akkoriban (2012-2014 környékén) instabilitása és jelentős korlátai ellenére lényegében az egyetlen valódi lehetőség volt számunkra, amihez nyílt forráskódú alaplapjának köszönhetően hozzá tudtuk rakni a saját fejlesztésű csoportos ön-navigációs igényeinket. A MikroKopter drónok alapvető stabilitását végző „FlightCtrl” modulja nyílt forráskódú volt, a limitált navigációt (kézi vezérlés melletti magasság- és pozíció stabilizálás) lehetővé tevő „NaviCtrl” elnevezésű modulja pedig zárt rendszer volt. Ez utóbbit a drónról eltávolítottuk, hardver és szoftver tekintetében is visszafejtettük, és újraírva és kibővítve létrehoztuk és a rendszerbe illesztettük a saját „FlockCtrl” elnevezésű navigációs lapkánkat, ami amellet, hogy az eredeti drón minden tulajdonságát le kellett, hogy utánozza, képes volt a kézi vezérlés helyetti autonóm működést is megvalósítani, a drónok egymás közti direkt kommunikációját is támogatni, valamint erre építve a korábbiakban bemutatott csoportos repülési algoritmusainkat is futtatni (lásd 3.1. ábra).

Összességében tehát nekünk *azalatt* és nem *azután* kellett a drónok autonómiáját egyedi és csoportos szinten is létrehozni, amíg a világ csupán az egyedi drónok autonómiájának megszületésénél tartott. Ráadásul egy csoportos rendszerben az egyedi szintű autonómiával kapcsolatban is sokkal magasabbak az elvárások, mint ténylegesen egy darab eszköz esetében, hiszen egyrészt az 1-1 arányú emberi felügyelet hiányában a hibakezelést is önállóan kell megoldani (és nem lehet igénybevenni az ember látás és távirányítás alapú intelligens észlelési, navigációs és beavatkozási képességeit, mint failsafe mechanizmust), illetve a navigációs pontosságnak abszolútnak és nem relatívnak kell lennie. Amíg csak egy drónunk van, ami azt állítja, hogy egy adott GPS pozíción van, földtől 3 m magasságban, senkit nem érdekel,

---

<sup>2</sup> <https://www.mikrokoetter.de/en/home>

hogy ez mennyire igaz, hiszen pontatlansága nem okoz fennakadást, nem is észleljük, és folyamatos humán kontrol alatti vezérlésébe implicit módon az emberi korrekció is be van építve. Amint két drónunk van, rájövünk, hogy a robotok állításai pontatlanabbak, mint gondoltuk, két 3 m magasságban lévő drón szinte soha nincs a valóságban egy magasságban, a GPS adatok alapján egymástól 5 m távolságra lévő drónok akár összeütközhetnek anélkül, hogy ők azt gondolnák, hogy közel vannak egymáshoz.



3.1. ábra. **Bal oldal:** Az általunk fejlesztett csoportos navigációs vezérlő áramkör (FlockCtrl) 3D vizualizációja. **Jobb oldal:** MikroKopter MK Basicset L4-ME típusú – mostanra muzeális értékű és kinézetű – drón, melyben az eredeti navigációs lapka (NavCtrl) le lett cserélve az általunk fejlesztett csoportos navigációs lapkára (FlockCtrl). A kereskedelmi forgalomban kapható rendszer látható alul, az egyedileg készített (zöld) bővítőpanel közepén, a GPS a tetején. A drón felszálló tömege körülbelül 1 kg, a propellervégek közötti átmérő 80 cm. 3000 mAh-s, négycellás LiPo akkumulátorok használatával maximum 20 perc repülési időt értünk el.

Visszatérbe a drónok szerkezeti felépítéséhez, a csoportos autonómia létrehozása érdekében az általunk fejlesztett drónraj vezérlő lapka az alábbi hardver összetevőket tartalmazta:

- GumStix Overo Water miniszámítógép, Linux operációs rendszerrel
- 2.4GHz XBee modul drón-drón és drón-föld kommunikációhoz
- 3D gyorsulásmérő
- 3D szögsebességmérő (giroszkóp)
- 3D magnetométer (mágneses iránytű)
- Nyomásmérő (magasságmérő, barométer)

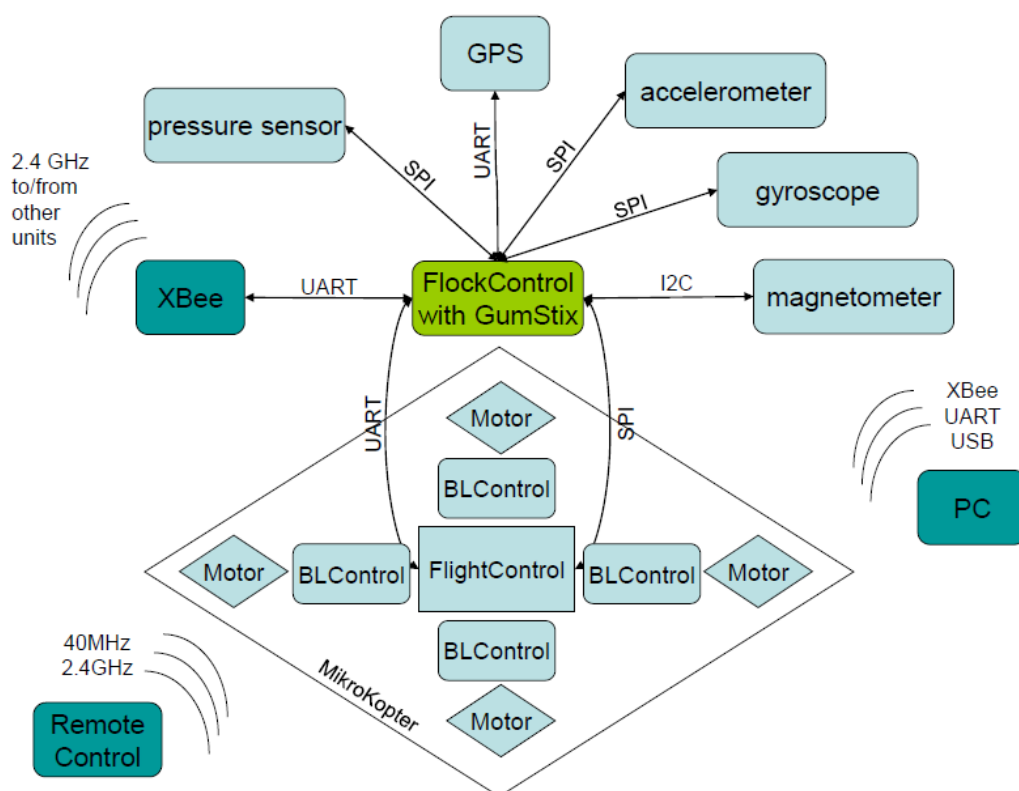
A FlockCtrl lapka SPI, UART és I2C kommunikációs protokollokon kommunikált az érzékelőkkel, kommunikációs eszközökkel és a FlightCtrl alaplappal. Az információ alapvető áramlása a következő volt:

3.1. A repülő robotok szerkezeti felépítése

- a FlockCtrl panel SPI buszon folyamatos frissítést kapott a FlightCtrl alaplaptól a hibaállapotokról és a belső állapotváltozókról (állásszög, irány, akkumulátor szint, távirányító jelei), valamint begyűjtötte a hozzá csatolt érzékelők jeleit is;
- a FlockCtrl panel XBee-n keresztül kommunikált a raj többi tagjával broadcast típusú digitális státusz üzenetekben (azonosító, pozíció, sebesség, állásszög és általános állapot);
- a FlockCtrl panel a többi drónból érkező bemeneteket a rajszintű algoritmusba táplálta, és az algoritmus által számított virtuális vezérlő jeleket elküldte az alacsony szintű vezérlőpanelnek.

A drón állásszög vezérlése 40 Hz-en futott, a GPS pozíció frissítési frekvenciája 5 Hz volt, az XBee modul státusz üzenetei 10 Hz-en frissültek. Az XBee hatótávolsága 50-100 m körül mozgott, az esetleges távolabbi egyedek a valódi madárrajokhoz hasonlóan nem vettek tudomást távolabbi szomszédaikról, csak azokkal egyezkedtek, akik a közelben voltak. A kommunikációnak ez a direkt (központi router nélküli) és lokális mivolta biztosította a rendszer elméleti skálázhatóságát egyedszámban.

A drón alegységeit és a köztük lévő kommunikációs infrastruktúrát a 3.2. ábra mutatja be.



3.2. ábra. Az első csoportosan repülő drónunk fedélzeti eszközeinek szerkezeti felépítése (szövegdobozok) és kommunikációs infrastruktúrája (nyilak). Forrás: [T2]

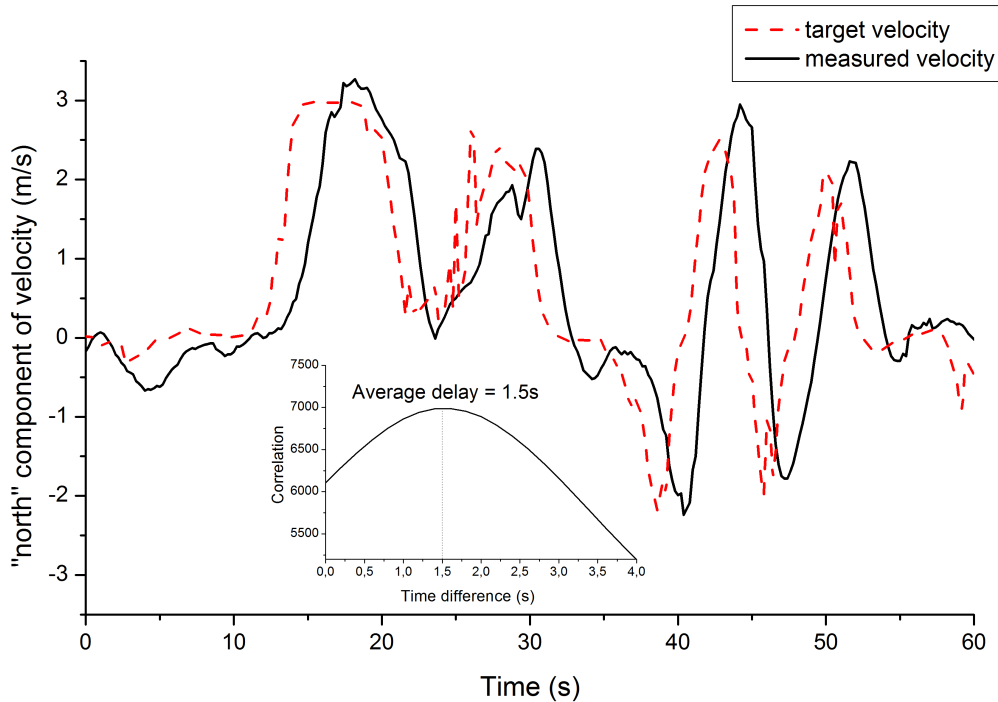
### 3.2. Egyéni drónvezérlés

Ebben a korai rendszerben a drón kétdimenziós, vízszintes vezérlését virtuális távirányítójel generálásával kellett megoldanunk (ami alapvetően állásszög vezérlést jelentett a drón saját testhez rögzített koordinátarendszerében). Függőleges irányban a drónok az alacsonyszintű rendszer által vezérelve tartották – biztonsági okokból eleinte némileg különböző, később azonos – magasságukat. A drónok onboard miniszámítógépére felprogramoztuk a 2. fejezetben tárgyalt csoportos repülési modellt, melynek bemeneteit a drón a fedélzeti érzékelőkből és a többi egyedtől az XBee hálózaton keresztül kapta meg. Az algoritmus kimenete kívánt sebességjel volt. A kívánt globális koordinátarendszerbeli sebesség és a drónhoz rögzített koordinátarendszerű virtuális távirányítójel közötti kapcsolatot az általunk a szenzorok jeléből számolt irányszög kompenzációja után irányonként egy egyszerű PID szabályzó segítségével oldottuk meg. A reakcióidő csökkentését ebben a kezdetleges egyszerű szabályzó körben egy kísérletek által kimért lineáris feed-forward taggal igyekeztünk csökkenteni. Ezáltal a PID szabályzó integrál tagjának működési tartománya leszűkült, ami a reakcióidő csökkentésén túl a stabilitást is növelte. A PID szabályzót emellett viszont inkább lassabb, szelídebb, túlkompenzáció, azaz oszcilláció nélküli tartományba hangoltuk a stabil működés érdekében.

Mára (2024) egyértelmű, hogy itt egy igen kezdetleges vezérlési kör lett megvalósítva (Kálmán-filteres szenzorfüzióról például még szó nem volt), de a technológia evolúciós folyamatában tíz évvel ezelőtt ez az egyszerű megoldás kielégítő volt az alapkutatói eredményeink „publikációhoz éppen elegendően sikeres” világelső kísérleti demonstrálásához.

A 3.3. ábra egyszerre tanúskodik arról, hogy a megvalósított szabályzó kör ellátta feladatát (az elkészült PID szabályzó kb. 5 m/s szélsősebességig képes volt a drónokat maximum 2-3 m/s sebességű stabil vezérléssel ellátni), illetve arról, hogy a vezérlésben bizony összességében egy jó másfél másodperces késleltetés volt a kívánt sebesség és a megvalósuló sebesség között. És ez az a pont, ahol fontos szerep jut a szimulációink realisztikus, zajokat és késleltetéseket is modellező mivoltának, mert a valósághű szimulációkon keresztül tudtuk a csoportos repülési algoritmusokat úgy fejleszteni és hangolni, hogy a korábban említett „valóság szakadék” minél kisebb lehessen és a valós zajokra, késleltetésekre és jelentős pozicionálási pontatlanságokra már előre tudjunk készülni.

3.3. Csoportos repülési kísérletek



3.3. ábra. Általános célpontkövetési repülési feladat kívánt és megvalósuló sebessége az egyik fő tengely mentén PID sebességszabályozással. A fő ábra az időbeli mérést mutatja, a kis beágyazott ábra pedig a kívánt sebesség (a PID szabályozó bemenete) és a mért sebesség (a rendszer végső kimenete) közötti korrelációt az időeltérés függvényében. A jól beállított szabályozórendszerben is körülbelül 1.5 másodperces átlagos késés van jelen a PID relaxációs idő, az alapegység reakcióideje és a tehetetlenség által korlátozott gyorsulás miatt. Forrás: [T2]

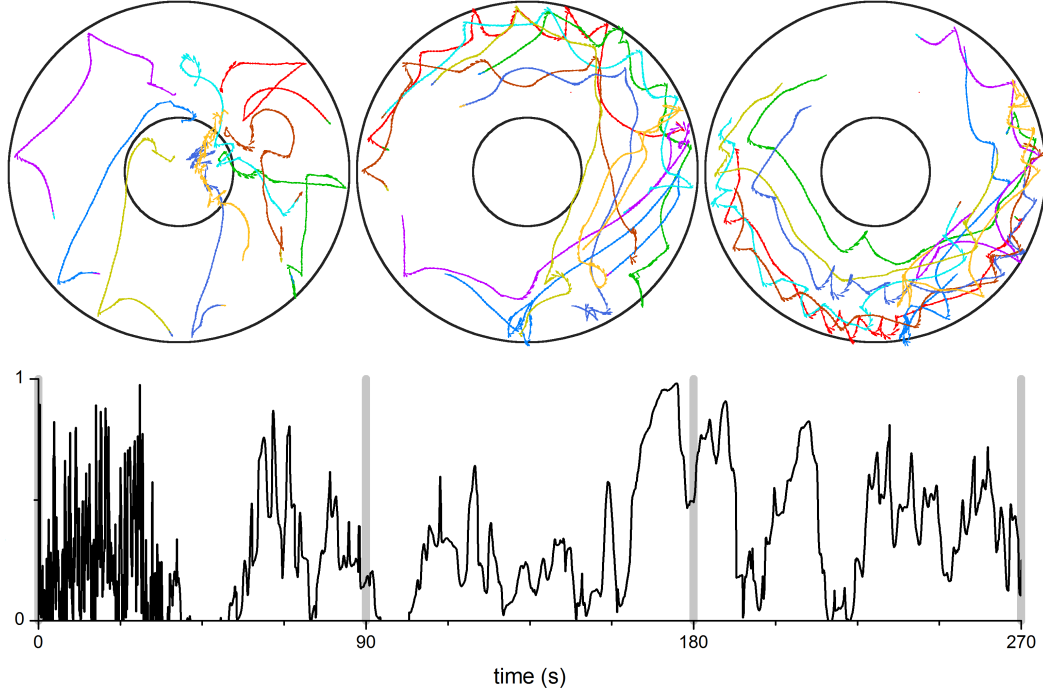
### 3.3. Csoportos repülési kísérletek

#### 3.3.1. Rajrepülés gyűrű alakú arénában

Az első terepi kísérletünk a 2.4.1. szakaszban ismertetett falakkal körülvett rajrepülési megoldást implementálta, de a valós nehézségek mentén azzal a könnyítéssel, hogy nem négyzetes, hanem gyűrű alakú arénát definiáltunk a drónok köré. Ezáltal kívülről is eltávolítottuk a beszorulásnak lehetőségét adó sarkokat, valamint az aréna közepére is helyeztünk virtuális kör alakú taszító falakat, ami az aréna belsejében létrejövő kétdimenziós mozgást segített kvázi egy dimenzióba terelni, körkörösén valamelyik irányba. Összességben tehát az aréna valójában nem kör, hanem gyűrű alakú lett, kívül 45 m, belül 15 m sugárral.

Ezt a kísérletet maximum 9 drónnal sikerült lerepülni. Egy kísérleti repülés tracklogjait mutatja be a 3.4. ábra. Utólag azt kell, hogy mondjam konklúzióknak, hogy a repülést mi is és a drónok is túléltek, és ennek nagyon örültünk! Valóban demonstráltuk, hogy a rajrepülési modellekkel 9 egyed létrehozhat időnként koherens mozgást egy gyűrű alakú térben, hasonlóan a repülést inspiráló sáskás [31] és já-

tékhajós [S1] kísérletekhez. Ugyanakkor a logokból egyértelműen látszik, hogy a rendszerben bizonyos oszcillációk lépnek fel a fal- és szomszédkölcsonhatások konfliktusai mentén, illetve nem véletlen, hogy ezt a kísérletet az eredeti modellel csak 2 m/s sebességgel mutattuk be. Valamint a 10 helyetti 9-es egyedszám is árulkodó: a 10 épített drónunkból eggyel mindig volt valami baj, a 10/10 arány sosem jött össze, ez is mutatja heroikus küzdelmünket és a korai rendszer korlátait. De elsőre legyen ennyi is elég, ez is jelentősen több volt akkor, mint a semmi...



3.4. ábra. **Felül:** Kilenc egyedű rajrepülés GPS logjai három egymást követő 90 másodperces periódusból egy gyűrű alakú területen. **Alul:** a három fenti pályaábrának megfelelő sebességkorreláció. A korreláció hosszú ideig nem lehet magas a kör alakú terület korlátai miatt, de a raj hajlamos önmagát egy koherens örvénylő mozgássá szervezni az arénán belül. Taszítási sugár: 10 m, utazósebesség: 2 m/s. Forrás: [T2]

### 3.3.2. Csoportos célpontkövetés formációrepülésben

A második kísérletben a 2.4.2. szakasz csoportos célpontkövetési megoldását alkalmaztuk 9+1 drónra (1 vezető, 9 követő), laza rács, vonal, és forgó kör alakú formációrepüléssel egybekötve. Ehhez a 2.10 egyenlet  $\mathbf{v}_i^{\text{shp}}$  tömegközépponthez képesti mozgást definiáló tagját kell általánosítanunk és a kívánt formáció függvényében módosítanunk az alábbiak szerint:

$$\mathbf{v}_i^{\text{shp}} = v_{\text{flock}} \frac{\mathbf{x}_i^{\text{shp}} - \mathbf{x}_i}{|\mathbf{x}_i^{\text{shp}} - \mathbf{x}_i|} s(|\mathbf{x}_i^{\text{shp}} - \mathbf{x}_i|, R_{\text{shp}}) \quad (3.1)$$

A laza rácsszerkezet kialakulását a  $\mathbf{x}_i^{\text{shp}} = \mathbf{x}_i^{\text{CoM}}$  azonossággal értük el, amivel

### 3.3. Csoportos repülési kísérletek

---

az új egyenletünk eredeti 2.10 egyenlet formáját ölti. Ebben az esetben  $R_{\text{shp}} = \frac{r_0}{2} [g(N) - 1]$ , ahol  $g(N)$  a korábban említett heurisztikus függvény, ami azt határozza meg, hogy mekkora a legkisebb kör, amibe  $N$  db egységsugarú kör belefér<sup>3</sup>,  $r_0$  pedig egy kényelmesen választott kívánt egyensúlyi távolság a drónok közt.

A *forgó kör* kialakításához  $\mathbf{v}_i^{\text{shp}}$ -et úgy kell megválasztani, hogy az egy  $N$  db drónt egymástól  $r_0$  távolságra befogadó körvonal és a két legközelebbi szomszéd tömegközéppontból mért szögfelezőjének metszéspontja legyen.  $R_{\text{shp}}$  ebben az esetben lehet nulla vagy egy kicsi szám, mert itt az egyedek egyéni pozíciókat vesznek fel egymástól jól definiált távolságra. A kör forgásához  $\mathbf{v}_i^{\text{shp}}$ -hez az egyedek átlag tömegközéppont körüli tangenciális sebességének önszerveződő mérése irányába eső konstans sebességkomponenst adhatunk még hozzá, aminek hatására egy irányban fognak az egyedek forogni azonos sebességgel.

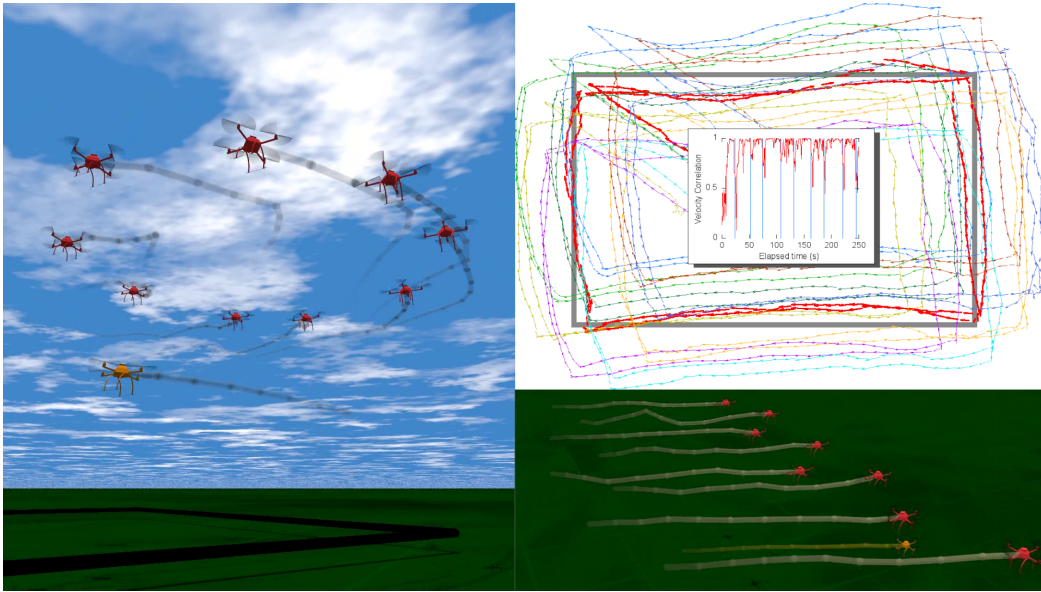
Az *egyenes vonal* formációhoz az egyedeknek sorba kell rendezniük magukat egy globális egyenes irány menti tömegközéppontból számolt projektív távolság szerint, és a sorrend alapján elfoglalniuk az  $k$ -dik helyet  $r_0$  távolságot tartva egymástól. Megjegyzendő, hogy ez a legnehezebben skálázható feladat, mert a vonal alakú drónok raja éri el leghamarabb a kommunikációs hatósugár feletti rajméretet, ezért ezt a megoldást még azzal is kiegészítettük, hogy az egyedek a globális sorszámaikat egymás közt lokálisan és relatív helyzetük alapján lebeszélve, a kommunikációs hálózaton propagálva határozták meg, hogy az egyenes egyik végén lévő drónnak akár ne is kelljen tudnia közvetlenül az egyenes másik végén lévő drónról. A globális infó így tehát lokálisan terjedt, azaz lassan, késleltetve ért el a raj egyik felétől a másikig. Az egyenes vonal tartása emiatt az elv miatt nem könnyű, de ezt a V alakban repülő madaraknál is láthatjuk, ahol ugyanez a jelenség érvényesül: a madarak csak lokális szomszédaikhoz igazodnak a globális V rendben, ezért a V szárjai mentén hullámok indulnak el, a V szétszakadhat, stb. Ilyen műfaj ez a decentralizáció, de valahol pont ez az „organikusság” adja a szépségét is!

Fontos megjegyezni, hogy a formációrepülés kialakításához a robotoknak immáron szükségük van globális információra, mégpedig az  $N$  egyedszámra (illetve a vonal alakzat esetén a vonal irányára), mert ez alapján számolják a formációban elfoglalt helyüket. Ez tehát a korábbi értelemben nem teljesen decentralizált megoldás, mert lokális kommunikációval nem skálázható (hiszen akik messze vannak, azokat nem látom, tehát nem tudom őket  $N$ -be beleszámolni).

A három említett formációrepüléssel egybekötött célpontkövetési kísérlet eredményét a 3.5. ábra foglalja össze.

---

<sup>3</sup> <http://hydra.nat.uni-magdeburg.de/packing/cci/cci.html#cci1>



3.5. ábra. **Bal:** kör alakú formációrepüléssel egybekötött célpontkövetés pillanatképének vizualizációja valódi GPS logok alapján. A 9 felső piros drón követi a sárga alsó drónt. **Jobb felül:** Rács alakú formációrepülés célpontkövetéssel, felülnézetben, valódi GPS log vizualizációval. A vezérdrón a szürke téglalap elein ment körbe, a követők valós idejű kommunikációban követték őt laza rácsszerkezetben. Inset: követők sebességkorrelációja az idő függvényében. **Jobb alul:** egyenes alakú formációrepülés vizualizációja. Mindhárom kísérlet 2 m/s célpontsebességgel lett végrehajtva. Forrás: [T2]

A statikus ábránál talán látványosabbak a korai repülésről készült videók, köztük a nemzetközi publikációk alkalmából készített [hivatalos dokumentumfilmünk](#)<sup>4</sup>, valamint annak lazábbra vett, és ennek megfelelően sokkal többek által megnézett [Monty Python-os változata](#)<sup>5</sup>.

### 3.4. A fejezethez kapcsolódó tézispont

Bemutattuk a világ első legalább 10 egyedből álló decentralizált kvadrokopter flottáját, ami stabil önszerveződő repülést végzett kültéri terepi körülmények között, központi irányítás nélkül, önálló csoport szintű ütközésselkerüléssel és feladatmegoldással. A repülő robotok autonómok voltak abban a tekintetben, hogy navigációs döntéseiket önállóan hozták meg a környezetből nyert információk és a szomszédos egyedek pillanatnyi pozíciójának és sebességének figyelembevételével. A drónok egymással lokális vezeték nélküli hálózaton kommunikáltak, navigációhoz szükséges számításukat fedélzeti számítógépük segítségével végezték. Az egyetlen globális eszköz, ami rendelkezésükre állt, az a kültéri pozicionáláshoz szükséges, egyéni fedélzeti GNSS vevők által lokálisan észlelt GNSS műholdhálózat.

A robotok csoportos viselkedését decentralizált, bio-inspirált algoritmus vezérelte, mely az élőlények csoportos mozgásának statisztikus fizikai modellezése alapján ké-

<sup>4</sup> [https://youtu.be/W7yJx\\_IY9Mg](https://youtu.be/W7yJx_IY9Mg)

<sup>5</sup> <https://youtu.be/qRPuXtIZjuU>

## 3.4. A fejezethez kapcsolódó tézispont

---

szült (lásd első tézispont). A mozgásvezérlő algoritmus optimalizálva volt arra, hogy kültéri, zajos, késleltetésekkel tarkított sztochasztikus környezetben is ütközésmentes csoportos mozgást hozzon létre.

Az ismertett rendszerrel az alábbi kültéri repülési feladatokat tudtuk elvégezni 10 kvadrokopterrel: i) önszerveződő rajrepülés virtuális GPS falak között, decentralizált ütközésselkerüléssel; ii) csoportos célpont követés formációrepülésben, önszerveződő rács, kör és vonal alakzatban.

Kísérleteinkkel demonstráltuk, hogy az ágens alapú modellezés és vezérlési metodika alkalmas egyedek csoportjának igényeknek megfelelő irányítására.

Kapcsolódó publikációk: [T2], [T1] (2014).

## 4. fejezet

# Csoportos üldözés-menekülés

Az előző fejezetekben bemutatott, 2014-ben publikált első nemzetközi drónrajos eredményeink sikerén felbuzdulva elkezdtünk azon gondolkodni, hogy az alapvető bio-inspirált rajmozgás adta koncepcionális lehetőségekre és rajvezérlési struktúrára milyen drónrajos alkalmazást lehetne építeni. Kézenfekvő volt a természetben a szociális élőlények körében sokszor megfigyelhető csoportos együttműködő vadászat alaposabb vizsgálata és első körben realiztikus szimulációs rendszerünkbe integrálása. Kutatóként a csoportos üldözés-menekülés jelenségére ekkor nem, mint katonai alkalmazás, hanem mint bio-inspirált alapkutatási feladat tekintettünk.

### 4.1. Csoportos vadászat a természetben

A csoportos vadászat az a fajta szociális együttműködési viselkedésminta, ami talán mindenki számára a legegyszerűbben bizonyítja, hogy egyedek tudatos együttműködése csoportos és egyéni hatékonyságukat is jelentősen növelheti. A „magányos farkas” sosem lesz olyan hatékony vadász, mint a (fel)falka, de a „különc” szó is „magáért beszél”.

A csoportos vadászatról elsőre a nagytestű emlősök jutnak az ember eszébe, mint a Serengeti oroszlánjai [78], az őserdő csimpánzai [79], a mérsékelt égövi Yellowstone prérifarkasai [80] vagy az óceánok intelligens delfinjei [81], de csoportos vadászokat találunk a madarak körében is (pl. a Harris-ölyvek [82]), és még kevesebben tudnak például a Magyarországon is elterjedt rabszolgatartó Amazonhangyákról, akik egész kolóniákat fosztogatnak csapatostul portyázva [83], vagy a szociális pókokról, akik minél többen vannak, annál nagyobb zsákmányt képesek közösen elfogni [84].

A nagyszámú – elsősorban biológiai indíttatású – kutatások a csoportosan vadászó állatok körében sokszínű, egyedi csoportos vadászati stratégiákat tártak fel, melyekre mind jellemző az evolúciós nyomás általi kiélezett optimalizáltság (hiszen csoportos vadászat esetén nem másról, mint a táplálékszerzésről, azaz direkt túlélésről van szó). A vadászók *ideális csoportlétszáma* például tipikusan környezeti

## 4.2. A csoportos üldözés-menekülés modellje

---

faktorok eredőjeként adódik és a természetben széles skálán változik, de mindig egy feltehetően az adott rendszerre jellemző optimum értékre áll be [85, 86].

Figyelemreméltó, hogy a csoportosan vadászó állatok sokszor nem csupán hatékonyabbak, hanem nálunk alapvetően gyorsabb prédát is el tudnak kapni. Ilyenek a zebrára vagy antilopra vadászó oroszlánok [61], vagy a fürge halakat összefogva össze fogó palackorrú delfinek [81].

A megfigyelhető csoportos vadászati stratégiák valóban sokszínűek. A teljesség igénye nélkül néhány ötletes innovációt az állatvilágból a 1.2.5. szakaszban felsoroltam, de ezen speciális eseteken túl számunkra érdekes lehet még általánosságban a bekerítés, mint stratégia, illetve ehhez szorosan kapcsolódva a természeti akadályok intenzív használata a bekerítéshez.

A másik oldalról is vizsgálva a csoportos vadászatot, szintén erős evolúciós nyomás hatására alakultak a figyelemreméltóan ötletes menekülési stratégiák is. Megkülönböztethetünk direkt menekülést és erraticus, azaz cikk-cakkos, körkörös, vagy egyéb hirtelen irányváltásokat tartalmazó menekülési pályákat [87, 88], de menekülési stratégiának számít a lefagyás (akár a magukat halottnak tettető rovarok, akár a kutyák előtt menekülő macskák, vagy úton megálló őzek esetében), az álcázás vagy a figyelemelterelés is (ez utóbbit tavasszal a kertben a kirepülő rigófiókákra gondosan ügyelő szülők viselkedése jól példázza). Ráadásul ezeket a lehetőségeket az élőlények rendszerint kombinálva, kevert stratégiaként alkalmazzák.

A részletekbe történő túl mélyre merülés nélkül most csak annyit állapítunk meg, hogy az üldözés-menekülés témaköre egy rendkívül változatos csoportos viselkedési stratégiákat mutató terület, ahol még rengeteget tanulhatunk a saját bőrükön tapasztalatot szerzett élőlényektől.

## 4.2. A csoportos üldözés-menekülés modellje

Az általunk létrehozott csoportos üldözés és menekülés modelljeit a realiztikus szimulációs keretrendszerünkbe ültettük. Ezzel a jó száz évvel ezelőtti analitikus (Lotka–Volterra [89]), illetve az azóta elterjedt, tipikusan térben diszkrét rácsos/cellás modellezési megközelítés [90, 91, 92] helyett egy térben folytonos, időben diszkrét megvalósítást hoztunk létre. A mi megközelítésünk természetesen ismét ágens alapú és alapvetően a Vicsek-modell interakcióra épít, hasonlóan, mint [87]. Ám míg a korábbi munkák szinte kivétel nélkül vagy nyílt terepet [93], vagy a valóságtól elrugaszkodva periodikus határfeltételt feltételeztek [91, 92, 87], a mi modellünk a természeti akadályokat tekintve a valósághoz közelítően térben körülhatárolt, a mozgás egy egyszerű kör alakú arénában jön létre.

Több hasonló korábbi munkához hasonlóan mi is a több üldöző együttes vadászatiának esetét vizsgáltuk [91, 86], az üldözőknél gyorsabb menekülőknél esetében [93], de kevésbé érzékeny megoldással a kezdeti feltételekre.

A realiztikus keretrendszerben az üldözés-menekülés vizsgálatokor is figyelembe volt vége az egyedek tehetetlensége, azaz véges gyorsulása, valamint a szokásos késleltetés és zaj tagok. Az azonos típusú (üldöző vagy menekülő) egyedek között a szokásos párkölcsönhatásokat használtuk (rövid távú taszítás, viszkózus-súrlódás szerű sebességillesztés), és a fallal való kölcsönhatás is a megszokott módon, virtuális egyedek segítségével történt.

#### 4.2.1. Az üldözők modellje

A rendszerben  $N_c$  üldözőt definiáltunk. Minden üldöző minden pillanatban a hozzá legközelebbi menekültöt üldözte. Egy menekültöt akkor tekintettük elkapottnak, ha egy bizonyos kritikus távolságon belül került hozzá legalább egy üldöző (ilyenkor kivettük a szimulációból).

Az  $i$ -dik üldöző önhajtott kívánt sebességét ( $\mathbf{v}_{c,i}^d$ ) a menekülő felé mutató vonzás és a menekülővel való sebességillesztés kölcsönhatásai határozták meg:

$$\mathbf{v}_{c,i}^d = v_c \left( \frac{\mathbf{r}_{c,i} - \mathbf{r}'_e}{|\mathbf{r}_{c,i} - \mathbf{r}'_e|} - C_f \frac{\mathbf{v}_{c,i} - \mathbf{v}_e}{|\mathbf{r}_{c,i} - \mathbf{r}'_e|^2} \right), \quad (4.1)$$

ahol az  $\mathbf{r}$  és  $\mathbf{v}$  tagok a szokásos pozíció és sebesség vektorok,  $c$  index jelöli az üldözőt (chaser),  $e$  a menekültöt (evader),  $C_f$  a viszkózus sebességillesztés együtthatója,  $v_c$  és  $v_e$  az üldözők és menekülők maximális sebessége.

Igen fontos kiegészítés, hogy az üldözők nem az általuk észlelt  $\mathbf{r}_e$  pozíció felé mennek a modellben, hanem az  $\mathbf{r}'_e$  lineárisan extrapolált pozícióra, ahova a menekülő maximum  $\tau_{\text{pred}}$  idő múlva feltételezhetően érkezni fog.  $\mathbf{r}'_e$ -t az alábbi lineáris egyenlet megoldásaként kapjuk:

$$\mathbf{r}'_e = \mathbf{r}_e + \frac{\mathbf{v}_e}{|\mathbf{v}_e|} v_e \min\left(\frac{\mathbf{r}'_e - \mathbf{r}_c}{v_e}, \tau_{\text{pred}}\right) \quad (4.2)$$

További fontos összetevő az üldözők *együttműködése*, amit mi egy  $[0, 1]$  folytonos tartományon mozgó  $C_{\text{inter}}$  paraméterrel hangolható taszító kölcsönhatásként modelleztünk, amennyiben két üldöző ugyanazt a menekültöt üldözi. A  $C_{\text{inter}}$  paraméter a taszító kölcsönhatás erősségét állítja. Ha értéke 0, az üldözők közt egyáltalán nincs kölcsönhatás, a menekültöt „individualista módon” üldözik. Ha értéke 1, az üldöző kölcsönhatás maximális, ami üldözés közben  $r_{\text{inter}}$  távolságra fogja taszítani az üldözőket egymástól, ami a menekülő vonzásával együtt önszerveződő módon többnyire közös bekerítésbe torkollik. A matematikai részleteket itt most nem közlöm, akit érdekel, a vonatkozó cikkünkben [T3] utána olvashat.

#### 4.2.2. A menekülők modellje

A modellünkben a menekülők az alábbi általános szabályok szerint menekülnek üldözőik elől:

### 4.3. Szimulációs eredmények

---

- A menekülő olyan irányt választ mozgásához, ami a közeli üldözőktől leginkább távolodó irány
- Ha a menekülő a falhoz ér, mozgását a fal mentén folytatja
- Ha a menekülő a fal mentén haladva lehetőséget lát két üldöző közt a szabad tér felé szökni, akkor ezt meg is teszi.

A menekülők a menekülés irányát direkt menekülés esetén az üldözők távolsága szerinti súlyozott átlag szerint határozzák meg, az alábbi formula szerint:

$$\mathbf{v}_{e,i}^d = v_e \sum_j \left( \frac{\mathbf{r}_{e,i} - \mathbf{r}_{c,j}}{|\mathbf{r}_{e,i} - \mathbf{r}_{c,j}|^2} - C_f \frac{\mathbf{v}_{e,i} - \mathbf{v}_{c,j}}{|\mathbf{r}_{e,i} - \mathbf{r}_{c,j}|^2} \right) \Theta(r_{\text{sens}} - |\mathbf{r}_{e,i} - \mathbf{r}_{c,j}|), \quad (4.3)$$

ahol  $r_{\text{sens}}$  egy karakterisztikus távolság amin belül a menekülő egy adott üldözőt figyelembe vesz.

A modellben a direkt menekülést kiegészítettük egy pánik paraméter által triggertelt cikk-cakkos mozgással. A pánik paraméter a legközelebbi üldöző távolságának exponenciális függvénye. Ha a pánik paraméter egy bizonyos értéket átlép, a menekülő választ egy véletlenszerű irányt a legközelebbi üldözőtől távolodó félsíkon (vagy 3D esetben félgömbön) és egy -2 exponensú hatványfüggvény eloszlás szerinti időkeretet, amíg az új irányát tartja. Ha az idő leteltével a pánikhelyzet továbbra is fennáll, hasonló módon új irányt választ.

A precíz matematikai részletek a menekülési modell esetében is a vonatkozó cikkben érhetők el [T3], itt most megelégszünk ezzel a koncepció szintű leírással.

### 4.3. Szimulációs eredmények

Tíz perces szimulációk sokaságát futtatuk sok lassabb üldöző ( $v_c = 6$  m/s) és egy gyorsabb menekülő ( $v_e = 8$  m/s) esetére, különböző paraméterbeállításokkal. Azt vizsgáltuk, hogy melyik paraméter milyen hatással van az elkapási hatékonyságra.

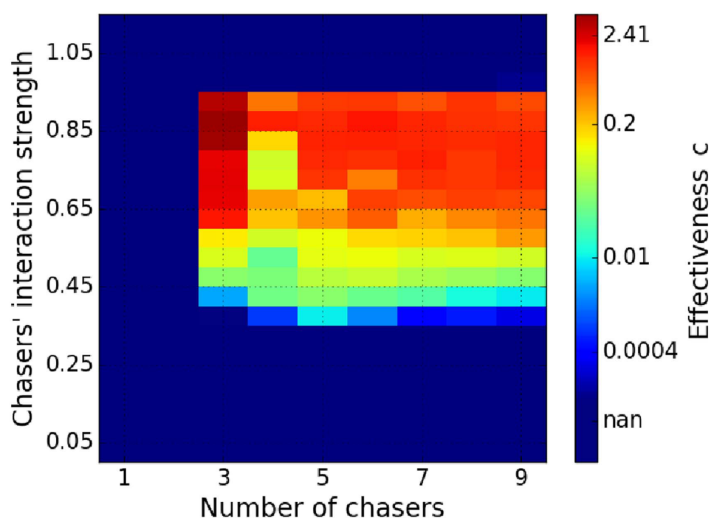
Az elkapási hatékonyságba három dolog számított bele: i) a hatékonyság egyenesen arányos azzal, hogy a párhuzamosan futtatott szimulációk hány százalékában lett a menekülő a rendelkezésre álló idő alatt elkapva; ii) a hatékonyság fordítottan arányos az átlagos relatív elkapási idővel; iii) a hatékonyság fordítottan arányos az üldözők számával. A hatékonyság nincs normálva, a fordított elkapási időtől való függés miatt értéke elméletileg végtelen is lehet. De a gyakorlatban a hatékonyságot úgymint csak arra használjuk, hogy a különböző paraméterbeállításokat egymáshoz tudjuk viszonyítani.

Az üldözőket és a menekülőket többféle kiindulási helyzetből indítottuk, de a legrealisztikusabb eset az volt, amikor az üldözők az aréna egyik felében csoportosultak laza rácsszerkezetben, a menekülő tőlük viszonylag nagy távolságról indult, aho-

gyan például egy oroszláncapat is nekiindul a gazellavadászatnak. A továbbiakban ezt a kezdeti feltételt alkalmaztuk.

A teljes modellünknek rendkívül sok hangolható paramétere lett, ezek közül igyekeztünk a legtöbbet valósághű értékre állítani és csak azt változtatni, aminek jelentős hatása volt az elkapási hatékonyságra.

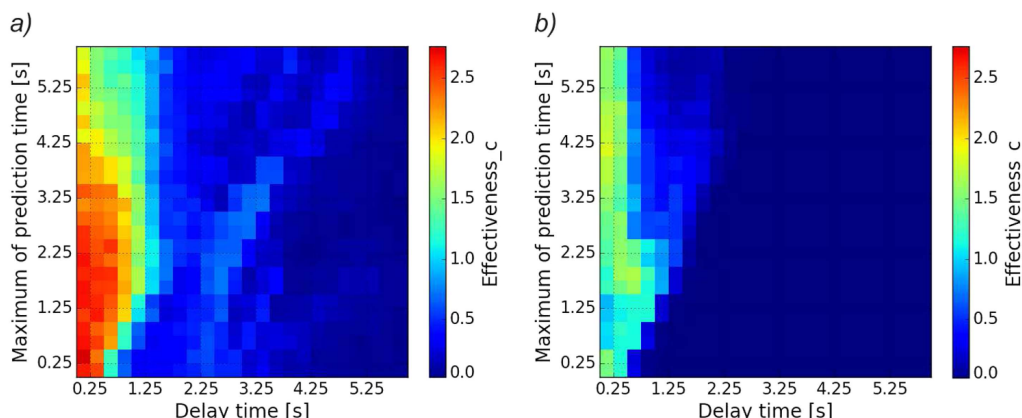
Az első eredményt a 4.1. ábra mutatja be 2D üldözés esetére. Eszerint az üldözők együttműködése egyértelműen javította a hatékonyságukat a számuktól függetlenül, ugyanakkor kétdimenzióban legalább három (és 3D-ben legalább 5) lassú üldözőre volt szükség ahhoz, hogy a 33%-kal gyorsabb menekülőt a zárt arénában elkapják. Érdekes módon 4 üldöző hatékonysága lecsökkent (feltehetően páros szimmetria okok miatt), öt üldöző felett pedig az elkapási hatékonyságnövekedést jórészt kompenzálta az üldözőszám növekedés.



4.1. ábra. Átlagos elkapási hatékonyság eloszlása szimulációk sokaságán. A két változó paraméter az üldözők együttműködési rátája és az üldözők száma volt. A sötétkék régióban a menekülő megmenekült. Forrás: [T3]

Két dimenzióban három, három dimenzióban öt (egyéb paramétereiben optimalizált) üldözőt választva szintén vizsgáltuk az elkapási hatékonyságot a realisztikus késleltetés és az üldözési stratégia predikciós idejének függvényében (4.2. ábra). Ebből az eredményből az látszik, hogy minél nagyobb a környezeti modell késleltetése, annál nagyobb predikciós időre van szükség akár 2D akár 3D esetben, ugyanakkor túl nagyra választott maximális predikciós idő kontraproduktív lehet (túl előre jósolják az üldözők a menekülő pozícióját), illetve egy bizonyos késleltetési idő felett az elkapás reménytelen.

4.3. Szimulációs eredmények



4.2. ábra. Átlagos elkapási hatékonyság eloszlása szimulációk sokaságán. A két változó paraméter a realisztikus modell általános késleltetése, illetve az ezt kompenzáló időbeli predikció mértéke az üldözési stratégiában. A bal oldali ábra a három-üldözős 2D, a jobb oldali ábra az öt-üldözős 3D esetet mutatja. Forrás: [T3]

Utolsó méréseink a cikk-cakkos menekülés hatékonyságát vizsgálták a direkt meneküléshez képest. A teljesség igénye nélkül azt találtuk, hogy mind két, mind három dimenzióban van a pánikparaméternek egy ideális küszöbértéke, aminek használatával a menekülő a legnagyobb hatékonyságát tudja elérni, azaz érdemes jól behangolt cikk-cakkos menekülést alkalmaznia a menekülőknél (részletekért lásd [T3]).

Összességében az üldözés-menekülés szimulációs vizsgálata az alábbi általános csoportos dinamikai tapasztalatok megértéséhez vitt közelebb minket:

- Mind sok egyéb csoportos viselkedéses vizsgálatban, itt is azt láttuk, hogy az együttműködés növelheti az együttműködők hatékonyságát. Összefogással az üldözőnél jelentősen gyorsabb menekülőket is el lehet csípni!
- Érdekes megfigyelés, hogy bizonyos üldözési stratégiák (pl. a bekerítés) létrejöhetnek emergens tulajdonságként is, csupán az üldözők közti távolság tartásából. Ez itt pozitívum, de a csoportos viselkedés emergens jelenségeit a lehetséges negatív hatások miatt rendkívül elővigyázatosan kell kezelni.
- A kétdimenziós sík sokkal „sűrűbb”, mint a háromdimenziós tér. Két dimenzióban könnyebb bekeríteni és elkapni egy menekülőt, mert sokkal kevesebb lehetősége van az üldözők közötti elszökésre. Ennek következménye lesz a későbbiekben, hogy a kétdimenziós koordinált mozgást viszont sokkal több ütközési konfliktussal jár. Három dimenzióban menekülőt bekeríteni sokkal nehezebb feladat. Ennek megfelelően azt is látni fogjuk a továbbiakban, hogy a háromdimenziós térben az ütközési konfliktusok jóval ritkábbak lesznek.

#### 4.4. A fejezethez kapcsolódó tézispont

Az első két tézispontban ismertetett ágens-alapú alapmodell felhasználásával bioinspirált csoportos üldöző-menekülő modell párost alakítottunk ki. Az üldözési stratégiánk arra a szituációra volt optimalizálva, amikor több lassabb, de potenciálisan együttműködő üldözőnek kell elkapnia náluk gyorsabb, a természetben is megfigyelhető, hirtelen irányváltásokkal is közlekedő prédákat.

A modell realiztikus (folytonos térbeli, diszkrét időbeli, sztochasztikus környezetet, zajt, késleltetést tartalmazó) szimulációjával megmutattuk, hogy a lassú üldözők együttműködése drasztikusan növeli az elkapási valószínűséget.

A modellt puha falakkal körbevett zárt térben vizsgáltuk, ami a legtöbb korábbi irodalmi modell periodikus határfeltételéhez képest realiztikus előrelépés (hasonlóan, ahogy egy erdősáv, hegy, folyó vagy emberi infrastruktúra határol egy természetes vadászterületet).

A szimulációkban előre explicit módon nem programozott, emergens tulajdonságként jelenik meg a természetes csoportos üldözési stratégiák közt szereplő bekerítési módszer.

Kapcsolódó publikáció: [T3] (2017).



## 5. fejezet

# Optimalizált rajrepülés zárt térben

Az előző fejezetekben bemutatott, első nekifutásra és tapasztalat nélkül megalkotott drónraj vezérlő koncepciónak a korlátai egyértelműen látszottak már a 2014-es publikációk eredményeiben. A drónraj ugyan felszállt és többé-kevésbé elvégezte ütközések nélkül a feladatát „proof-of-concept”-ként, de egyértelmű volt, hogy messze van hova fejlődni működési stabilitásban, oszcillációmentességben, sebességben, egyedek közti távolság csökkentésében, reakcióidőben, egyedszámban stb.

A belső fejlődési igény mellett a világ is fejlődött, szédítő ütemben... A MikroKopter rendszer felett elszállt az idő, ráadásul a német srácok nem voltak nyitottak megkeresésünk ellenére a közös fejlesztésre, így új, immáron teljesen nyílt forráskódú autopilóta rendszer után kellett néznünk. Így esett a választásunk az addigra párhuzamosan beérő többféle lehetőség közül az [ArduPilot](https://ardupilot.org/)<sup>1</sup> rendszerre, ami utólag nézve meghatározóan jó bázisdöntésnek bizonyult (egy évtized után még mindig ezt a rendszert használjuk, és rajtunk kívül azóta nagyon sokan mások is).

Mielőtt tehát nekikezdhattünk volna a rajvezérlési koncepciónk újragondolásának, egyrészt a kínkeservesen megalkotott 10 egyedes rajunkat kukázva teljesen új drónokat kellett építenünk, másrészt alapjaiban kellett újraírunk a drónraj vezérlő szoftver struktúráját. Az új drónok önmagukban jelentősen stabilabb repülésre voltak képesek, magasabb szintű bázis-autonómiával. A nyílt forráskódú szoftver mellé azzal kompatibilis nyílt forráskódú autopilóta hardver-t választottunk, a [PixHawk](https://pixhawk.org/)<sup>2</sup> rendszert. A PixHawk önmagában tartalmazta már az összes repüléshez szükséges érzékelőt, az ArduCopter kódbázis pedig egy nagyszerű [Kiterjesztett Kálmán-szűrő \(EKF\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Extended_Kalman_filter)<sup>3</sup> megvalósításon keresztül tőlünk függetlenül és helyettünk kezelte az állapotbecsléshez szükséges szenzor fúziót. Így nagy teher esett le a vállunkról, nem

---

<sup>1</sup> <https://ardupilot.org/>

<sup>2</sup> <https://pixhawk.org/>

<sup>3</sup> [https://en.wikipedia.org/wiki/Extended\\_Kalman\\_filter](https://en.wikipedia.org/wiki/Extended_Kalman_filter)

## 5.1. Vissza a valósághoz

---

kellett a FlockCtrl érzékelő és számító boardunk és fúziós szoftverünk megújításával bíbelődnünk, elég volt egy addigra szintén népszerűvé váló mini-számítógépet (Single Board Computer-t, azaz SBC-t) levinnünk a polcra és összekötni az autopilótával (egész pontosan az azóta már nem gyártott, de akkor lenyűgözően hatékony és olcsó [Odroid C1+<sup>4</sup>](#) típust választottuk). Emellett az autopilóta a jól definiált [MAVLink<sup>5</sup>](#) protokolon keresztül várta immáron direktben a kívánt sebességvezérlő jeleket, így az egyszerű PID szabályzónkat se kellett tovább szűni-tuningolnunk, az algoritmusaink natív sebesség kimenetét direktben közölhettük az autopilótával, ami a kéréseinket szépen végrehajtotta.

Ez a koncepció, hogy a repülésstabilitást az autopilóta modul végzi, és azt egy kiegészítő fedélzeti számítógépről (companion computer) irányítjuk a saját kényünk-kedvünk szerint, azóta is tartja magát. Így a drónok vezérlését tökéletesen flexibilisen saját kézben tudjuk tartani, az alaprendszert pedig tőlünk függetlenül tudjuk modulárisan frissíteni, de a mások által fejlesztett kód és a mi kódunk nem fonódik össze, nem függenek mélyen egymástól, nem keverednek verziókövetési konfliktusba. Ez a fajta modularitás a komplex rendszerek és valahol a csoportos mozgás alapja is, ebben a kontextusban is visszajutottunk oda, hogy a bonyolultságot különálló, önmagukban komplex rendszerek és az azok közti egyszerű interakciók mentén tudjuk felépíteni.

Egy másik igen fontos fejlemény lett a továbblépéshez, hogy 2015-ben megalapítottuk a [CollMot Robotikai Kutató-fejlesztő Kft<sup>6</sup>](#)-t, és friss cégünkkel a világon az elsők között (az Intel és az Ehang gigacégekkel vívott nevetségesen egyenlőtlen de igen büszke versenyben) kezdtünk el első drónraj alkalmazásként drón show szolgáltatással foglalkozni. Ehhez pedig sok drón kellett és ipari szintű stabil működés. Úgyhogy a céges piaci bevételeket sok éven át kizárólag flotta bővítésbe és szoftverfejlesztésbe forgattuk vissza, és a valódi drónrajos műveletekben stabilan és biztonságosan szolgáltató céges flottát természetesen a kutatási célokhoz is felhasználtuk. Ezzel az alapkutatási és kereskedelmi innovációs szinergiával a 2014-es 10 drónos világelsőségünket az autonóm, önszerveződő repülés terén a következő mérföldkőnek számító, 2018-as 30 egyedes flottával továbbra is tartani tudtuk. És akkor ezen a ponton térjünk most már rá erre a bizonyos 2018-as repülésre, ami ennek a fejezetnek a fő témája.

## 5.1. Vissza a valósághoz

Akármennyire is készültünk a korábbi fejezetekben a realisztikus szimulációs keretrendszerünkön keresztül a valóság szakadékra, a 2014-es publikációk során az összesítő konklúziónk az lett, hogy messze alábecsültük a valóság kihívásait. Ugyanakkor a reményt a továbblépés lehetőségéhez továbbra is megadta, hogy a körülöttünk ví-

---

<sup>4</sup> <https://www.hardkernel.com/shop/odroid-c1/>

<sup>5</sup> <https://mavlink.io/en/>

<sup>6</sup> <https://collmot.com/>

gan repkedő madárrajok látszólag mit sem törődtek a nehézségekkel. Amiktől mi szenvedtünk, azt ők játszói-könnyedséggel tudták teljesíteni, tehát a fejlődés lehetségesnek tűnt. Ez a jelenség amúgy jól ismert univerzális élmény az emberekre vonatkozóan is: minél profibb valaki a saját szakmájában, legyen szó akár világklasszis zenésztől, élsportolótól, táncosról vagy akár tudósról, előadásai annál játékosabbak, könnyedebbek, természetesebbek, látszólag erőfeszítés-nélkülibbek és így valahol annál inkább utánozhatónak tűnnek – amíg meg nem próbáljuk valóban leutánozni... Ennek az érzetnek a hátterében pedig a bonyolultság kezeléséhez szükséges tökéletes optimalizáltság áll.

A drónrajos kísérleteink esetlegessége és a valós rendszerek könnyed áramlása közti hatékonyságkülönbségből jónéhány dolgot meg kellett értenünk és be kellett építenünk a rendszerünkbe a továbblépéshez. Egyrészt meg kellett emésztelnünk és el kellett fogadnunk, hogy a valóságot nem lehet egyszerűsített módon kezelni. A valódi kihívásokat csak bonyolult modellel tudjuk pontosan leírni, és ha a bonyolult valóságra reagálni akarunk, akkor ehhez igazodva bonyolult belső vezérlő modellt kell alkotnunk. Egy „fidget spinner” egyszerű szerkezet, és bár tud örömet okozni, csak egyszerűt, rövidet. Egy drónraj bonyolult szerkezet, vele bonyolult feladatokat lehet elvégezni ami kitartó örömet tud okozni, cserébe a drónrajnak is bonyolultnak kell lennie.

Ennek a kényszerű bonyolultságnövekedésnek az első direkt következménye az lett, hogy a vezérlő modellünk paramétereinek száma drasztikusan megemelkedett. Ha egy rendszer paramétertere sokdimenzióssá válik, akkor a működési tartománya is emergensen kitágul, és ezzel párhuzamosan egyre nehezebb lesz megtalálni az optimális kívánt viselkedéshez tartozó speciális hangolást. Másképp fogalmazva: minél összetettebb egy rendszer, annál inkább előtérbe kerül a rendszer stabil működtetéséhez szükséges paraméter optimalizáció, és annál inkább igaz az, hogy a rendszer (hardver + szoftver) önmagában nem, csak a megfelelő optimális hangolással (szoftver konfiguráció) *együtt* értelmezhető! Emellett természetesen maga az optimalizáció folyamata is annál bonyolultabb, minél több paramétert kell kezelnie, tehát az sem lesz mindegy, hogy milyen optimalizációs eljárást használunk majd a feladat végrehajtásához. Tehát a bonyolultság ezen a ponton is öngerjesztő bonyolultságnövekedést okoz.

A bonyolultság ezen tulajdonságát mi sem mintázza jobban, mint a saját lényünk. Az ember agya bonyolult szerkezet, az egyik legbonyolultabb létező az ismert világegyetemben. Hangolására, szoftveres optimalizálására legalább egy egész gyerekkort, azaz évtizedeket kell szánnunk, de igazából a legjobb hozzáállás az „életen át tartó tanulás”. Mindemelllett látjuk gyönyörködtető sokféleségünkben, hogy a hangolás kis eltérései ugyanazt a hardvert és bázis-szoftvert milyen lenyűgözően diverz képességrepertoárral és viselkedési térrel látják el össztársadalmi szinten. Sőt, az elhangolódás jelensége egy adott egyed (személy) esetében is szembeűnő: egészen másként viselkedünk, amikor szerelmesek, dühösek, részegek, depressziósak

## 5.2. Rajrepülő modell dinamikai korlátokkal

---

stb. vagyunk, pedig pontosan ugyanaz a hardverünk futtatja pontosan ugyanazt a szoftvert, csak a hormonok és egyéb adalékanyagok által kicsit más paraméterhangelással.

De hogy mennyire nehéz feladat és rögzös út a valóság bonyolultságának figyelembevétele, azt jól példázza az alábbi, Fine és Shell több, mint 100 ágens alapú flocking modellt összehasonlító, 2013-as review cikkéből vett idézet [94]:

There is no consensus on the precise details of the motions needed to produce rich flocking motions under realistic sensing models, actuation, and dynamics constraints

Az általuk vizsgált modellek sokaságából mindössze néhány vett figyelembe dinamikai korlátokat és ütközésselkerülést [2, 68, 95], és összesen egy (saját tanszéki) tanulmány foglalkozott zárt terű rajrepüléssel akadályok jelenlétében [14].

Ebben a fejezetben mi ennek a hiányosságnak a pótlására azt a kérdést tárgyaljuk, hogy miként lehet minél több és minél gyorsabb egyeddel zárt térben, akadályok jelenlétében a valóság tökéletlenségeire minél jobban felkészült, optimalizált rajrepülési megoldást adni.

## 5.2. Rajrepülő modell dinamikai korlátokkal

### 5.2.1. Taszítás

A rövid hatótávolságú taszító párkölsönhatást a korábbiakhoz hasonlóan lineáris formában, fél-rugó modellként hagytuk meg:

$$\mathbf{v}_{ij}^{\text{rep}} = \begin{cases} p^{\text{rep}} \cdot (r_0^{\text{rep}} - r_{ij}) \cdot \frac{\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j}{r_{ij}} & \text{ha } r_{ij} < r_0^{\text{rep}}, \\ 0 & \text{egyébként,} \end{cases} \quad (5.1)$$

ahol  $p^{\text{rep}}$  a taszítás lineáris együtthatója,  $r_{ij} = |\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|$  pedig a két egyed távolsága. A párkölsönhatások eredőjeként előálló végső kívánt sebességtag így:

$$\mathbf{v}_i^{\text{rep}} = \sum_{j \neq i} \mathbf{v}_{ij}^{\text{rep}}. \quad (5.2)$$

### 5.2.2. Sebességillesztés

Az új modellünk egyik esszenciája az az új sebességillesztő kölcsönhatás, ami a vizkózus súrlódás modellel felhagyva immáron nem fix hatósugárral rendelkezik, hanem egy valóság-hű, az egyedek valódi véges gyorsulását figyelembe vevő fékezési görbe menti jósolt dinamikus sebességprofil mentén határozza meg, hogy sebességtől és távolságtól függően melyik egyedhez közeledve mikor és milyen erővel kell elkezdni a sebességek illesztését. Ez a megoldás tehát a kölcsönhatási sugarát a

sebességkülönbség függvényében állítja, és így tetszőlegesen nagy sebességre működőképes (vö. két utasszállító repülőnek jóval nagyobb távolságban kell elkezdenie elkerülni egymást, mint két rollernek – kivéve a hiperúr-rollereket, de azt még nem találtuk fel –, még ha az elkerülés formája hasonló is).

A fékezési görbét konkrétan a PixHawk autopilóta kódjában is használt modell-egyenlet írja le [96]:

$$D(r, a, p) = \begin{cases} 0 & \text{ha } r \leq 0, \\ rp & \text{ha } 0 < rp < a/p, \\ \sqrt{2ar - a^2/p^2} & \text{egyébként,} \end{cases} \quad (5.3)$$

ahol  $r$  a megállási ponttól mért távolság,  $a$  a maximális elérhető gyorsulás és  $p$  egy paraméter, amivel hangolható az a távolság, amin belül a maximális gyorsulásnál kisebb, a  $v$ - $x$  síkon lineáris, azaz időben exponenciális sebességcsökkentés mentén zajlik a fékezés (ahogy a piros lámpához közeledve az ember is szép óvatosan egyre inkább leveszi a lábát a fékpedálról, folyamatosan csökkentve a fékerőt, azaz a lassulást).

Az új sebességillesztő kölcsönhatás lényege, hogy egy adott távolságban legfeljebb annyi sebességkülönbséget enged meg, amennyi a fékezési görbe mentén egymáshoz közeledve tartható összeütközés nélkül. Azaz a sebességillesztés egyfajta jövőre vonatkozó mozgástervezést is már magába foglal (csak sokkal szebben, mint ahogy pl. a 4. fejezetben közelítettük meg a kérdést):

$$\mathbf{v}_{ij}^{\text{frict}} = \begin{cases} C^{\text{frict}}(v_{ij} - v_{ij}^{\text{frictmax}}) \cdot \frac{\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_j}{v_{ij}} & \text{ha } v_{ij} > v_{ij}^{\text{frictmax}}, \\ 0 & \text{egyébként,} \end{cases} \quad (5.4)$$

$$v_{ij}^{\text{frictmax}} = \max(v^{\text{frict}}, D(r_{ij} - r_0^{\text{frict}}, a^{\text{frict}}, p^{\text{frict}})), \quad (5.5)$$

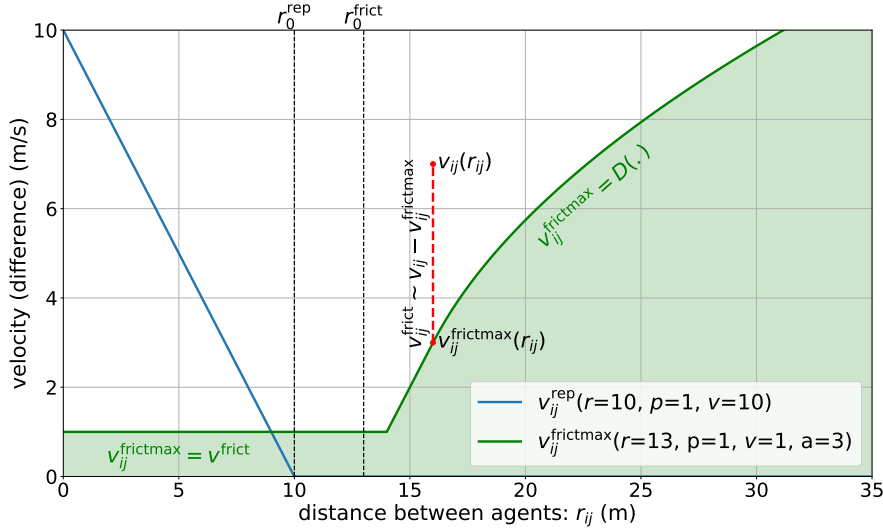
ahol  $C^{\text{frict}}$  a sebességillesztő kölcsönhatás lineáris együtthatója,  $v^{\text{frict}}$  egy kis sebességkülönbség, amit távolságtól függetlenül minden esetben meghagyunk az egyedek között a befagyó dugók elkerülése érdekében,  $r_0^{\text{frict}}$  az a távolság egy másik egyedtől, ahova ideális esetben a sebességillesztés beállítja azonos sebességre az adott egyedünket, végül  $v_{ij} = |\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_j|$  a két adott egyed közti sebességkülönbség nagysága.

A sebességillesztés párkölcsönhatása is természetesen minden szomszédos egyedre összegezve jelenik meg a végső kívánt egyenletben:

$$\mathbf{v}_i^{\text{frict}} = \sum_{j \neq i} \mathbf{v}_{ij}^{\text{frict}}. \quad (5.6)$$

Az új taszító és sebességillesztő kölcsönhatásokat illusztrálja a 5.1. ábra.

## 5.2. Rajrepülő modell dinamikai korlátokkal



5.1. ábra. Az új taszító kölcsönhatás távolságfüggése (kék), és a sebességillesztő kölcsönhatás megengedett maximális távolságfüggő sebességkülönbsége két egyed között (zöld). A sebességillesztő kívánt sebességcsökkentés mértékét a piros szaggatott vonal mutatja egy adott  $v_{ij}$  sebességkülönbségre. Forrás: [T4]

## 5.2.3. Kölcsönhatás falakkal, akadályokkal

Nagy hatótávú vonzás helyett a rajrepülést mi zárt falakkal körülvevett, akadályokkal ellátott térrészben kívántuk megvalósítani, mert ez a nehezebb feladat. A falakkal való kölcsönhatáshoz továbbra is virtuális „shill” ágenseket használtunk [77], de a virtuális egyedekkel történő sebességillesztéshez az előző szakaszban megismert új kölcsönhatást használtuk itt is:

$$\mathbf{v}_{is}^{\text{wall}} = \mathbf{v}_{is}^{\text{frict}} (C = 1) = \begin{cases} (v_{is} - v_{is}^{\text{shillmax}}) \cdot \frac{\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_s}{v_{is}} & \text{ha } v_{is} > v_{is}^{\text{shillmax}}, \\ 0 & \text{egyébként,} \end{cases} \quad (5.7)$$

$$v_{is}^{\text{shillmax}} = D(r_{is} - r_0^{\text{shill}}, a^{\text{shill}}, p^{\text{shill}}). \quad (5.8)$$

Ez a két egyenlet kísértetiesen hasonlít a korábbi sebességillesztő egyenletekhez, két egyszerűsítéssel: i) a lineáris  $C$  együtthatót 1-re vettük, hogy a lehető legerősebb legyen a falak sebességcsökkentése; ii)  $v^{\text{frict}}$  értékét 0-nak vettük, hogy ne engedjünk meg fal felé menő sebességet kis távolságban egyáltalán. A fenti két egyenletben az  $s$  együttható a „shill” elnevezésre utal, a korábbiakhoz hasonlóan  $r_{is} = |\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_s|$  és  $v_{is} = |\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_s|$ , ahol  $\mathbf{r}_s$  a fal adott szegmensének az adott egyedhez legközelebbi pontja,  $\mathbf{v}_s$  pedig ebből a pontból merőlegesen befelé mutat  $v^{\text{shill}}$  nagysággal.

Az aréna belsejében elhelyezett (konvex) objektumok taszítása ( $\mathbf{v}_{is}^{\text{obstacle}}$ ) hasonlóképpen definiálható, csak ott nem a sokszögbe befelé mutató, hanem abból kifelé

mutató sebessége lesz a virtuális egyedeknek, és nem a sokszöget határoló szakaszokként egy, hanem összesen egy virtuális egyed reprezentálja az akadályt.

#### 5.2.4. Önhajtás

Az önhajtás a korábbiakhoz képest nem változott, az egyedek minden pillanatban az aktuális sebességük irányába kívánnak menni  $v_{\text{flock}}$  sebességgel. Rajrepülés esetén a feladat nem a *valahova* repülés, hanem pusztán az *együtt*repülés.

#### 5.2.5. A kívánt sebesség végső formája

A kívánt sebesség a korábban bevezetett kölcsönhatási és önhajtó tagok szuperpozíciója, nevezetesen:

$$\tilde{\mathbf{v}}_i^{\text{d}} = \frac{\mathbf{v}_i}{|\mathbf{v}_i|} v^{\text{flock}} + \mathbf{v}_i^{\text{rep}} + \mathbf{v}_i^{\text{frict}} + \sum_s \mathbf{v}_{is}^{\text{wall}} + \sum_s \mathbf{v}_{is}^{\text{obstacle}}, \quad (5.9)$$

ahol egy  $v^{\text{max}}$  sebességlimitet bevezetve a kívánt rajrepülési sebességünk végső alakja:

$$\mathbf{v}_i^{\text{d}} = \frac{\tilde{\mathbf{v}}_i^{\text{d}}}{|\tilde{\mathbf{v}}_i^{\text{d}}|} \cdot \min\{|\tilde{\mathbf{v}}_i^{\text{d}}|, v^{\text{max}}\}. \quad (5.10)$$

Összességében a modellünk 11 változtatható paramétert tartalmaz ( $r_0^{\text{rep}}, p^{\text{rep}}, r_0^{\text{frict}}, C^{\text{frict}}, v^{\text{frict}}, p^{\text{frict}}, a^{\text{frict}}, r_0^{\text{shill}}, v^{\text{shill}}, p^{\text{shill}}, a^{\text{shill}}$ ), amit négy kísérleti elrendezést leíró, választható paraméter függvényében kell behangolnunk optimális működésre. Ezek a leíró paraméterek az  $N$  drónszám,  $v^{\text{flock}}$  utazósebesség, a  $v^{\text{max}}$  maximális sebesség és a  $L^{\text{arena}}$  karakterisztikus arénaméret.

Amíg az embernek egy-két paramétere van csak, addig nekiállhat a paraméterteret szkennelni és minden beállításra lefuttatni egy szimulációt, hogy megtalálja az optimális működési tartományt, de ha csak 10 különböző értéken vizsgálunk minden paramétert, egy 11 dimenziós paramétertér már  $10^{11}$ , azaz száz-milliárd szimulációt igényel, ami fizikailag igen nehezen kivitelezhető.

Ez az a pont, ahol ismét vissza kell (de legalábbis érdemes) térnünk a természethez, és megnézni, hogy a 11-nél jelentősen több paraméterű organikus rendszerek optimalizálására a természet milyen módszert használ. Ez a módszer pedig nem más, mint maga az evolúció.

### 5.3. Evolúciós drónraj optimalizálás

Az evolúciós optimalizációra azt mondják, hogy az minden létező problémára a második legjobb optimalizációs eljárás. A legjobb minden esetben lehet egyfajta globális optimalizáció, amit viszont bonyolult rendszerek esetében igen nehéz előteremteni, megalkotni. Az evolúció viszont egyrészt teljesen univerzális, bármilyen

## 5.3. Evolúciós drónraj optimalizálás

---

problémára alkalmazható, és ami még ennél is lenyűgözőbb, hogy számításigénye nem nő a paramétertér dimenziószámával. Így minél bonyolultabb egy rendszerünk, annál inkább esélyes, hogy evolúcióval véges időn belül kellően jó (de legalábbis kellően izgalmas, mert az evolúció mindig tartogat meglepetéseket is) megoldással áll elő.

Az evolúció maga lenyűgöző folyamat, létezése számomra maga isten létezése, a semmiből a valamibe történő átmenet csodálatos megalkotója, a világ bonyolultságnövekedésének hajtóereje, ami az istenkép megteremtését, isten percepciójának lehetőségét és bonyolultságának növekedését is magában foglalja. Amint az első pici szikra, ami valamilyen módon létezni akart, létrejött, az evolúcióra lehetett bízni rugalmas és adaptálódó fejlődését, bonyolódását, komplexitásának növekedését. Így az élet keletkezését és formálódását is. Ha nem lenne evolúció, isten nagy bajban lenne. A továbbiakban pedig mi fogunk egy kicsit istent játszani, leszakítani a paradicsomból a tudás tiltott rekurzív gyümölcsét, azaz magát a tudás forrását és megalkotóját, az örök optimalizációs eljárást, a változás és fejlődés szövetét és mozgatórugóját. Leutánozzuk az evolúciót.

A tizenegy dimenziós modellünket a Kovariancia Mátrix Adaptációs Evolúciós Stratégiával (CMA-ES) [65] optimalizáltuk. Ennek az elméleti síkon is izgalmas és bizonyítottan hatékony optimalizációs eljárásnak egy további előnye, hogy hozzá könnyen használható Python felület is van írva, ami gondoskodik a mesterséges evolúció minden belső folyamatának pontos levezényléséről (azaz mutáció, rekombináció, szelekció, replikáció). Ugyanakkor bármilyen mesterséges evolúciós optimalizáció használatakor az alábbi szükséges kellékeket magunknak kell előteremtteni:

- Az optimalizálandó rendszer futtatása, lehetőleg egymástól független, több párhuzamos szálon. Jelen esetünkben „rendszer futtatás” alatt a realizstikus szimulációs keretrendszerben történő, adott paraméterhangolású, adott ideig tartó szimulációk futtatását értjük. Ezek a szimulációk lesznek az optimalizálandó populációnk különböző tulajdonságokkal ellátott egyedei.
- A rendszer futtatásakor kellő mennyiségű információ begyűjtése és eltárolása (a mi esetünkben rendparaméterek formájában), ami alapján a rendszerpopuláció egyedei jellemezhetők lesznek.
- Egy fitnessz függvény, ami a rendparaméterek értékeinek függvényében megadja egy futtatott rendszer objektív minőségi/jósági szintjét. Ez a kimenet lehet bináris (jó vagy rossz), lehet folytonos (mennyire jó vagy rossz), és lehet sok dimenziós (különböző tulajdonságai mennyire jók vagy rosszak).
- Egy nagy párhuzamos számítási kapacitással bíró környezet, amiben nagyságrendileg tízezer vagy akár százezer szimulációs futtatás elvégezhető. Ez a mi esetünkben az ELTE [Atlasz](https://hpc.iig.elte.hu/dokuwiki/doku.php)<sup>7</sup> szuperszámítógép klasztere és az erre írt saját

---

<sup>7</sup> <https://hpc.iig.elte.hu/dokuwiki/doku.php>

fejlesztésű Python-os futtató környezet lett.

### 5.3.1. Rendparaméterek

Össességében négyféle rendparamétert vezettünk be a szimulációink jóságának jellemzésére. Ezek a koherencia, az ütközésselkerülés, az akadályelkerülés és a kívánt sebesség tartásának mértékét jellemezték.

A koherencia jellemzésére a szokásos egyszerű globális sebességkorreláció helyett megengedtük jó megoldásnak az egymástól független kisebb rajok önmagukban koherens mozgását is, hiszen akadályok jelenlétében nem elvárható, hogy a teljes raj minden esetben együtt maradjon. A kisebb rajok egy klaszterét úgy definiáltuk, hogy az az összes olyan egyed tartalmazza, amelyik legalább egy másiktól a klaszteren belül nem több, mint  $r^{\text{cluster}}$  távolságra van, ahol:

$$r^{\text{cluster}} = \max\left(r_0^{\text{rep}}, r_0^{\text{frict}} + \tilde{D}(v^{\text{flock}}, a^{\text{frict}}, p^{\text{frict}})\right), \quad (5.11)$$

és  $\tilde{D}(v, a, p)$  az az  $r$  fékezési távolság, amire  $D(r, a, p) = v$ .

A korrelációs rendparaméterünk  $r^{\text{cluster}}$  felhasználásával így alakul:

$$\phi^{\text{corr}} = \frac{1}{T} \frac{1}{N} \int_0^T \sum_{i=1}^N \frac{1}{N_i - 1} \sum_{j \in J_i} \frac{\mathbf{v}_i \cdot \mathbf{v}_j}{|\mathbf{v}_i| |\mathbf{v}_j|} dt, \quad (5.12)$$

ahol  $T$  a szimuláció futtatási ideje, az összes  $N$  egyedünk egy adott klasztere pedig  $J_i$ ,  $N_i$  egyeddel. Ezt a rendparamétert nyilvánvalóan maximalizálnunk kell majd. A lehetséges klaszterezettségből emellett további hasznos paraméterek is adódnak, mint például a klaszteren kívüli (disconnected) egyedek száma ( $N^{\text{disc}}$ ). Ehhez a minimális elfogadott klaszter méretet  $N^{\text{min}} = N/5$ -nek választottuk gyakorlatias szempontok alapján.

A második fontos összetevőt, az ütközésselkerülés rendparaméterét, azaz az ütközési kockázatot az alábbi egyenlettel határoztuk meg:

$$\phi^{\text{coll}} = \frac{1}{T} \frac{1}{N(N-1)} \int_0^T \sum_{i=1}^N \sum_{j \neq i} \Theta\left(r_{ij}(t) - r^{\text{coll}}\right) dt, \quad (5.13)$$

ahol  $r^{\text{coll}} = 3m$  az egyedek közti veszélyes zóna sugara. Ezt a rendparamétert minimalizálni kell.

A harmadik összetevő a fallal való összeütközés kockázata, amit az alábbi rendparaméter jellemez:

5.3. Evolúciós drónraj optimalizálás

---

$$\phi^{\text{wall}} = \frac{\int_0^T \sum_{i=1}^N \Theta(\tilde{r}_{is}(t)) \tilde{r}_{is}(t) dt}{\int_0^T \sum_{i=1}^N \Theta(\tilde{r}_{is}(t)) dt}, \quad (5.14)$$

ahol  $\tilde{r}_{is}$  az  $r_{is}$  faltól való távolság előjellel ellátott változata, ami pozitív, ha az arénán kívül (vagy objektumon belül) vagyunk, és negatív, ha biztonságos zónában (arénán belül, objektumon kívül). Nyilvánvalóan ezt a rendparamétert is minimalizálnunk kell.

Az utolsó rendparaméter a sebességet jellemzi raj szinten:

$$\phi^{\text{vel}} := \frac{1}{T} \frac{1}{N} \int_0^T \sum_{i=1}^N |\mathbf{v}_i(t)| dt, \quad (5.15)$$

aminek  $v^{\text{flock}}$ -hoz kell tartania.

### 5.3.2. Fitnessz függvény

Az optimalizációt mi egydimenziós fitnessz függvénnyel vezényeltük le, azaz az összes rendparaméterből gyúrtunk egy közös számot, ami önmagában jellemezte egy szimulációs futtatás jóságát. Nemrég jelent meg egy cikk, ami a mi modellünket vizsgálja többdimenziós fitnessz függvény ún. Pareto-frontján (azaz egyenrangúan jó megoldások sokaságán valamilyen paraméterek közti kompromisszumok mentén) [97], de nekünk erre nem volt akkoriban se szükségünk első körben, se kapacitásunk.

A végső fitnessz függvény megalkotásához első körben három általános transzfer függvényt vezetünk be  $[0, 1]$  tartományú kimenettel:

Az első transzfer függvényünk egy egyszerű monoton növekvő függvény:

$$F_1(\phi, \phi_0, d) = 1 - S(\phi, \phi_0, d), \quad (5.16)$$

ahol  $S(x, x_0, d)$  az alábbi szinuszos szigmoid függvény:

$$S(x, x_0, d) = \begin{cases} 1 & \text{ha } x < x_0 - d, \\ \frac{1}{2} (1 - \cos(\frac{\pi}{d}(x - x_0))) & \text{ha } x_0 - d < x < x_0, \\ 0 & \text{egyébként.} \end{cases} \quad (5.17)$$

A második transzfer függvény a normál eloszlás sűrűségfüggvényével analóg, maximumértékét  $\phi = 0$ -ban veszi fel, körülötte finom lefutással:

$$F_2(\phi, s) = \exp\left(-\frac{\phi^2}{s^2}\right) \quad (5.18)$$

A harmadik függvény egy éles csúcs  $\phi = 0$  körül, ami szigorú feltételeket szab a

fitnesszre:

$$F_3(\phi, a) = \frac{a^2}{(\phi + a)^2} \quad (5.19)$$

E három transzfer függvénnyel végre megalkothatjuk a végső fitnessz függvényünket:

$$F = F^{\text{speed}} \cdot F^{\text{coll}} \cdot F^{\text{disc}} \cdot F^{\text{cluster}} \cdot F^{\text{wall}} \cdot F^{\text{corr}}, \quad (5.20)$$

ahol

$$\begin{cases} F^{\text{speed}} = F_1(\phi^{\text{vel}}, v^{\text{flock}}, v^{\text{tol}}), \\ F^{\text{coll}} = F_3(\phi^{\text{coll}}, a^{\text{tol}}), \\ F^{\text{disc}} = F_3(N^{\text{disc}}, N/5), \\ F^{\text{cluster}} = F_1(N^{\text{min}}, N/5, N/5), \\ F^{\text{wall}} = F_2(\phi^{\text{wall}}, r^{\text{tol}}), \\ F^{\text{corr}} = \Theta(\phi^{\text{corr}})\phi^{\text{corr}}, \end{cases} \quad (5.21)$$

valamint  $v^{\text{tol}}$ ,  $a^{\text{tol}}$  és  $r^{\text{tol}}$  sebességre, ütközési kockázatra és fallal való ütközési kockázatra vetített tolerancia értékek. Ezek értéke tetszőlegesen változtatható, mi az evolúciós folyamat evolúciójában az alábbi értékekre álltunk be:  $v^{\text{tol}} = \frac{1.5}{4}v^{\text{flock}}$  m/s,  $a^{\text{tol}} = 0.00003$  és  $r^{\text{tol}} = 2$  m, ami megfelelő egyensúlyt biztosított az egyes elvárt tulajdonságok között a sikerhez. Ezzel a paraméterválasztással tehát tulajdonképpen a sokdimenziós Pareto-frontról történő kompromisszumos pont kiválasztását oldottuk meg intuitív alapon, egyszerűsítve a helyzetünkön (és utólag visszatekintve viszonylag jól eltalálva a kompromisszum egyensúlyát).

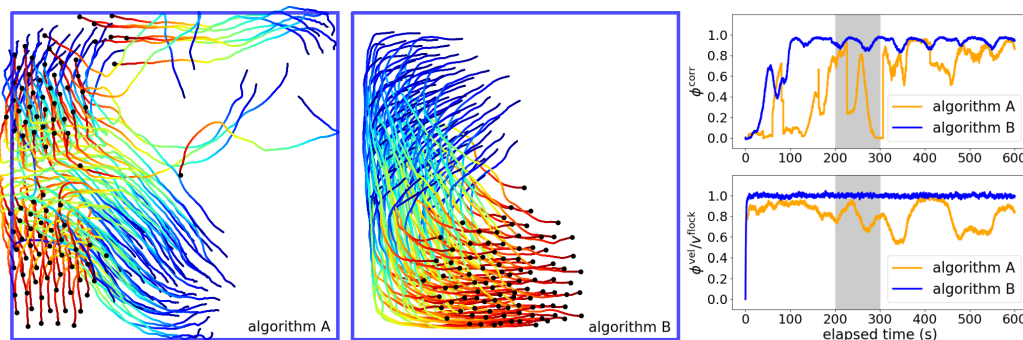
### 5.3.3. Optimalizációs eredmények

A szimulációt 4, 6 és 8 m/s utazósebesség mellett optimalizáltuk 250 m oldalhosszúságú négyzetes arénában, 100 drónra. A megengedett maximális sebesség rendre 6, 8 és 10 m/s volt. A szimulációkat 10 percig futtattuk, egy populációban 100 szimuláció futott párhuzamosan, az evolúciós folyamatot 150 generáció futtatásakor leállítottuk. Minden esetben legalább 3 evolúciós optimalizációt végeztünk. Egy evolúciós optimalizálási feladat (15 000 db 10 perces, azaz kb. 104 napnyi szimulációval) kb. 2-6 nap alatt futott le terheltségtől függően az Atlasz rendszeren (ez tehát a valóságnál 20-50x gyorsabb futtatás). Az összes evolúciónk összesen körülbelül 2.5 évnyi szimulációnak és az egyéni drónok szintjén több, mint kétmillió óranyi repült időnek felel meg (vö. Magyarországon helikopter pilóta *oktató*nak 500 repült óránál lehet jelentkezni, a tapasztalat oktatók 4-6 ezer repült órával rendelkeznek)!

A legjobb evolúciós optimumok 0.92, 0.87 és 0.8 végső fitnessz értéket értek el 4, 6

5.3. Evolúciós drónraj optimalizálás

és 8 m/s sebességre, ami lényegében csillagos ötöst jelent minden tantárgyból (azaz fitnessz függvény összetevőből). A legjobb paraméterbeállításokat 100-szor újrafuttattuk, az átlag fitnessz ebből  $0.812 \pm 0.101$ ,  $0.776 \pm 0.086$ , and  $0.728 \pm 0.075$ -nek adódott a három sebességre, ami nyilván valamivel alacsonyabb, de még mindig nagyon magas (ha mind a hat fitnessz összetevő 95%-on teljesít, akkor szorzatuk nagyjából 73.5% lesz). A 2014-es eredményekhez képesti jelentős fejlődést a 5.2. ábra demonstrálja.

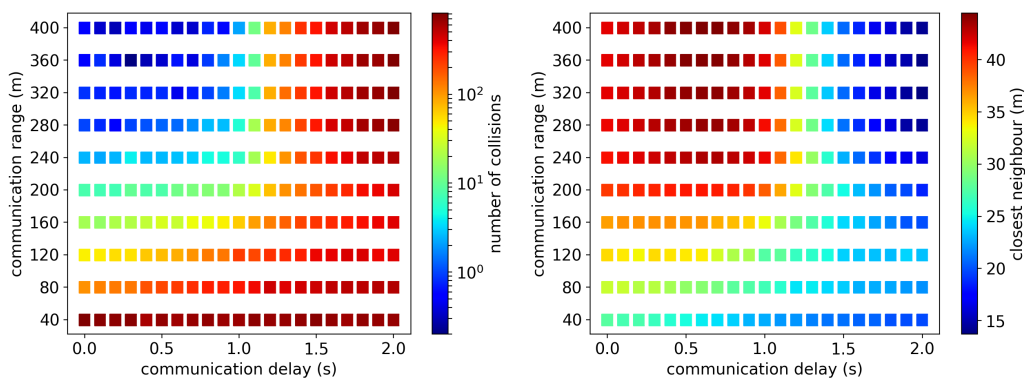


5.2. ábra. A 2014-es (algorithm A) és 2018-as (algorithm B) zárt terű rajrepülési megoldás összehasonlítása. Az ábra bal oldalán 100 egyed trajektóriái láthatók egy rövid szakaszra (színezés a sebesség iránya szerint). A jobb oldalon két kiválasztott rendparaméter értékét látjuk. Ez alapján az új algoritmus instabilitása megszűnt, koherenciája megnőtt, sebességben könnyedén tudta tartani a kívánt értéket. Forrás: [T4]

Emellett, ahogy azt korábban is említettem, az evolúció mindig tartogat meglepetéseket. A teljesség igénye nélkül az alábbi tapasztalatok az evolúciós optimalizáció megoldásaiból keletkeztek:

- A megadott fitnessz függvény szerint az evolúciónak jobban tetszik egy lapos, nagyobb hatótávolságú taszító kölcsönhatás, mint az eredetileg koncepcióban kitalált rövid hatótávolságú, de ott nagyon erős változat.
- A sebességillesztésnek közeli egyedek között maximálisan erősnek kell lennie és jórészt távolságfüggetlennek, és csak nagyon kicsi szabad relatív mozgás engedélyezett, az is többnyire a négyzet alakú aréna sarkaiban történő forduló beviteléhez.

Ahogy említettük, egy további erőssége az új modellnek a sebességben való skálázhatóság. Ennek demonstrálására 32 m/s-ig növeltük a szimulációk sebességét, és vizsgáltuk az ütközések számát és a legkisebb szomszédsági távolságokat a kommunikációs hatósugár és a realiztikus paraméterként bevezetett késleltetés függvényében. Az eredményeket a 5.3. ábra mutatja. Eszerint nagy sebességű stabil repülés is megvalósítható, de ehhez kis kommunikációs késleltetés ( $< 1$  s) és nagy kommunikációs hatósugár ( $> 240$  m) szükséges.

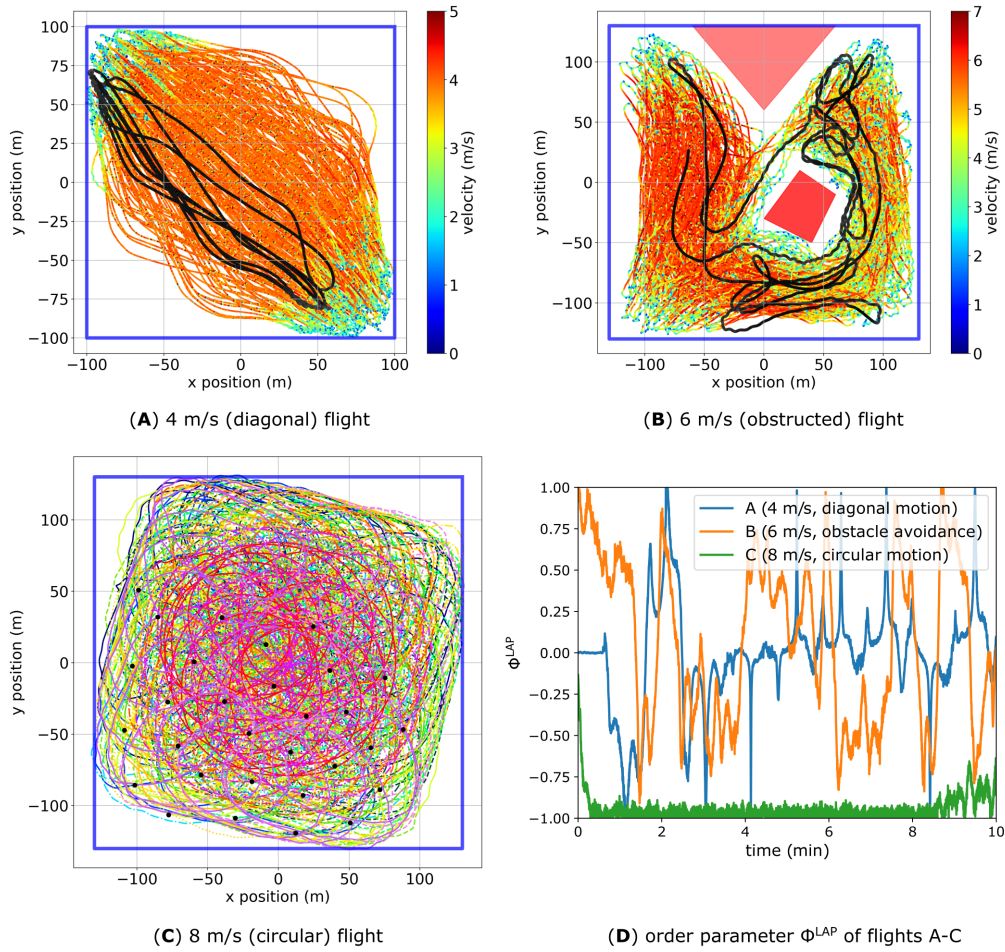


5.3. ábra. Az ütközési kockázat és a legkisebb szomszéd távolság a kommunikációs hatósugár és késleltetés függvényében, 32 m/s utazósebességgel, 100 egyedű raj esetében. Minden cella 20 szimuláció átlagát mutatja. Forrás: [T4]

### 5.4. Rajrepülés harminc drónnal

Az optimalizált szimulációs modellt a drónjaink agyába is felprogramoztuk és többféle kísérletet végeztünk velük 4, 6 és 8 m/s utazósebességgel, akadályok nélkül és virtuális akadályokkal. Az eredmények jelentősen kisebb valóság szakadékról árulkodnak, mint a korábbi esetben, ez egyrészt a jóval bonyolultabb, dinamikai korlátokat is figyelembe vevő modellezésnek, másrészt a jóval fejlettebb és jobban behangolt drónfelépítésnek, harmadrészt az immáron ad-hoc vezeték nélküli WiFi hálózatra cserélt, a korábbi XBee moduloknál jelentősen stabilabb kommunikációs infrastruktúrának volt köszönhető. A repülések eredményét a 5.4. ábra szemlélteti, a repülésről pedig egy pillanatképet mutat be a 5.5. ábra.

5.4. Rajrepülés harminc drónnal



5.4. ábra. Különböző emergens repülési mintázatok 4, 6 és 8 m/s-os utazósebességnél, 30 drón valódi 2D repülésének 10 perces trajektóriáiból akadályokkal (B) és akadályok nélkül (A, C). A és B esetben egy adott drón trajektóriája fekete vonallal ki van emelve, a többi sebesség alapon van színezve. A C ábrán az egyes drónok más és más színű trajektóriával vannak ábrázolva és fekete pötty jelöli a végső pozíciójukat. A D ábra egy polárkoordináta-rendszerben értelmezett koherencia típusú rendparaméter időfüggését mutatja az A, B és C repülésre, demonstrálva a különböző kialakult emergens repülési mintázatok eltérését. Forrás: [T4]



5.5. ábra. Harminc drón rajrepülése az evolúciósan optimalizált modell alapján. Hosszú expozíciós felvétel. Fotó: Bézsényi Zsolt. Forrás: [T4]

A statikus anyagok helyett ezúttal is érdemes inkább a kapcsolódó publikáció [T4] kiegészítő videó dokumentációját böngészni:

- A 2014-es modell szimulációja 100 drónra:  
<https://youtu.be/viEfowBXzho>
- A 2018-as evolúciósan optimalizált modell szimulációja 100 drónra:  
<https://youtu.be/t8kr79k3DUQ>
- Rajrepülés szimulációja 4-32 m/s sebességtartományban, 30-1000 egyeddel, különböző akadályokkal:  
<https://youtu.be/KPVfi9Pwuq8>
- Harminc drón 4 m/s repülésének vizualizációja átlós repülési mintázatban:  
<https://youtu.be/JMMGIQm7Ris>
- Harminc drón 6 m/s repülésének vizualizációja akadályokkal:  
<https://youtu.be/YW5zDD70x8o>
- Harminc drón 8 m/s repülésének vizualizációja körökrös repülési mintázatban:  
<https://youtu.be/GoiunzowSG4>
- A rajrepülési megoldást összefoglaló dokumentumfilm:  
<https://youtu.be/loemTAEGWfg>

### 5.5. A fejezethez kapcsolódó tézispont

Az első két tézispontban ismertetett alapmodell korlátain túllépve és azt továbbfejlesztve kidolgoztunk egy mind utazósebességben, mind egyedszámban lényegesen jobban skálázható rajrepülési modellt és algoritmust, mely határolt térben, virtuális

## 5.5. A fejezethez kapcsolódó tézispont

---

akadályok jelenlétében is képes volt a korábbiaknál jelentősen több, 100 szimulált, illetve – megjelenésekor ismét világrekordnak számító – 30 valódi drón stabil, koherens önszerveződő rajrepülését megvalósítani.

A modell az egyedek dinamikájának és a környezetnek a pontosabb figyelembevételére épül. Legfontosabb új eleme egy olyan általunk bevezetett sebességillesztő párkölsönhatás, mely paraméterezhető véges gyorsuláson alapuló fékezési görbe figyelembevételével tervezi az egyedek egymáshoz való közeledését, megelőzve így a valós forgalmi helyzetekben tipikusan emergensen kialakuló oszcillációk jelentős részét.

Az új, precízebb modell tizenegy dimenziósra hízott paraméterterének hangolásához evolúciós algoritmuson alapuló optimalizációs eljárást implementáltunk a realisztikus szimulációs keretrendszerünkben, a mozgást leíró új rendparaméterek és az azokra épülő, a rajrepülést sokoldalúan minősítő fitnessz függvény bevezetésével. Az automatizált optimalizációs eljárással – nagyságrendileg optimalizációként 15 000 szimuláció futtatásával – a kézi hangolási kísérleteinknél jelentősen hatékonyabb és stabilabb rajrepülési megoldásokat kaptunk.

Megoldásunkkal demonstráltuk, hogy minél komplexebb egy rendszer, tervezésekor annál nagyobb szükség van a rendszert definiáló hardver és szoftver megfelelő megválasztásán túl a rendszer paramétereinek alapos hangolására, ami segít a rendszerkomplexitással párhuzamosan nemlineárisan bonyolódó viselkedési komplexitást az igényeknek megfelelő stabil működési tartományra szűkíteni.

Kapcsolódó publikáció: [T4] (2018).

## 6. fejezet

# A drón forgalom alapmodellje

Drónrajunkkal az idők során igyekeztünk továbblépni az alapkutatói eredményekből a valódi kereskedelmi innováció irányába. Ebben a folyamatban sok szálon és hamar felmerült az igény, hogy a drónokat – az elosztott koordináció magas szintjét megtartva – ne csak közös rajban, tökéletesen szinkronizált mozgással tudjuk vezérelni, hanem ennél gyakorlatiasabb, univerzálisabb módon. A rajrepülés ugyan lenyűgöző látványt nyújt, nagyon sokat lehet belőle tanulni tudományos szempontból, érdekes, izgalmas, de praktikusán az alkalmazások töredékében hasznos csak.

Így jutottunk el a tökéletesen szinkronizált rajmozgásból – szokás szerint a kihívásokat keresve – a másik végletbe, a tökéletesen szinkronizálatlan, de koordinált repüléshez, azaz a véletlenszerű, szabad, független drón forgalomhoz. Míg az autonóm robotok forgalomirányítási megoldásai az irodalomban jórészt centralizált útvonatervezésen alapultak [98, 99, 100], nekünk ismét az volt a sejtésünk, hogy az a fajta decentralizált, önszerveződő mindset, ami a rajrepülés (és a csoportos üldözés menekülés) mentén a korábbiakban megfelelő alapot biztosított a koordinációhoz, ha kicsit más kölcsönhatási tagokkal, de koncepcióban a drón forgalom esetére is alkalmazható lesz.

Drón forgalom alatt a továbbiakban azt értjük, hogy az egyedeinknek nem célja a közös mozgás, az összehangolódás másokkal; ehelyett minden drónnak tetszőleges, egyedi úticélja lehet, és ehhez a célhoz úgy kell eljutnia, hogy i) a lehető leghamarabb és leghatékonyabban oda tudjon érni; ii) ne ütközzön össze másokkal, akik ugyanabban a légtérben a saját alternatív céljaik felé mennek; iii) ne akadályozza a többieket se feleslegesen a céljuk elérésében. Ez utóbbi kitétel igen fontos szempont, mert noha a közös mozgás nem cél, ez biztosítja mindenki számára mégis az együttműködést és a *csoportérdek* előtérbe helyezését, ami végső soron és átlagosan természetesen az egyéni érdek menti hatékonyságot is növeli.

A drón forgalmat elsősorban két dimenzióban vizsgáljuk, egyszerűen azért, mert ez jelentősen nehezebb feladat, mint kihasználni a háromdimenziós tér ritkaságát. Emellett a drónok hiába tudnak három dimenzióban szabadon mozogni, a gyakor-

## 6.1. Drón forgalmi szituációk

---

lati drónmozgás igazából tekinthető csupán két és fél dimenziósnek. Egyrészt a légtér szerkezet is vízszintesen rétegzett általában, másrészt a magasság változtatása a függőleges irányban ható gravitáció miatt mindig energiaigényesebb feladat (főleg felfelé, de fékezéskor lefelé jövet is), mint vízszintesen mozogni. Emellett, ha találunk jó sűrű 2D helyzeteket is kezelő megoldást, akkor abból könnyen lehet 3D-re általánosítani, akár rétegzett légtérszerkezettel, akár a 2D kölcsönhatásokat általánosítva 3D formára.

A másik koncepcionális hozzáállásunk, hogy a forgalmat a forgalmi szituációk és az egyedsűrűség széles skáláján vizsgáljuk. Ugyanis tisztában vagyunk vele, hogy a csoportos viselkedés emergens jelenségei ezen tényezők függvényében váratlan helyeken üthetik fel a fejüket, mint például a pánik jelenségek [14] vagy szellem dugók [27] esetében. A drón forgalom modellezése esetében különösképpen igaz az az elv, hogy ha az ember az egyéni megoldásokat próbálja sok egyedre alkalmazni, sokkal nehezebb dolga lesz az emergens csoportszintű jelenségek következtében, mint ha eleve csoportszinten áll hozzá a feladat megoldásához.

### 6.1. Drón forgalmi szituációk

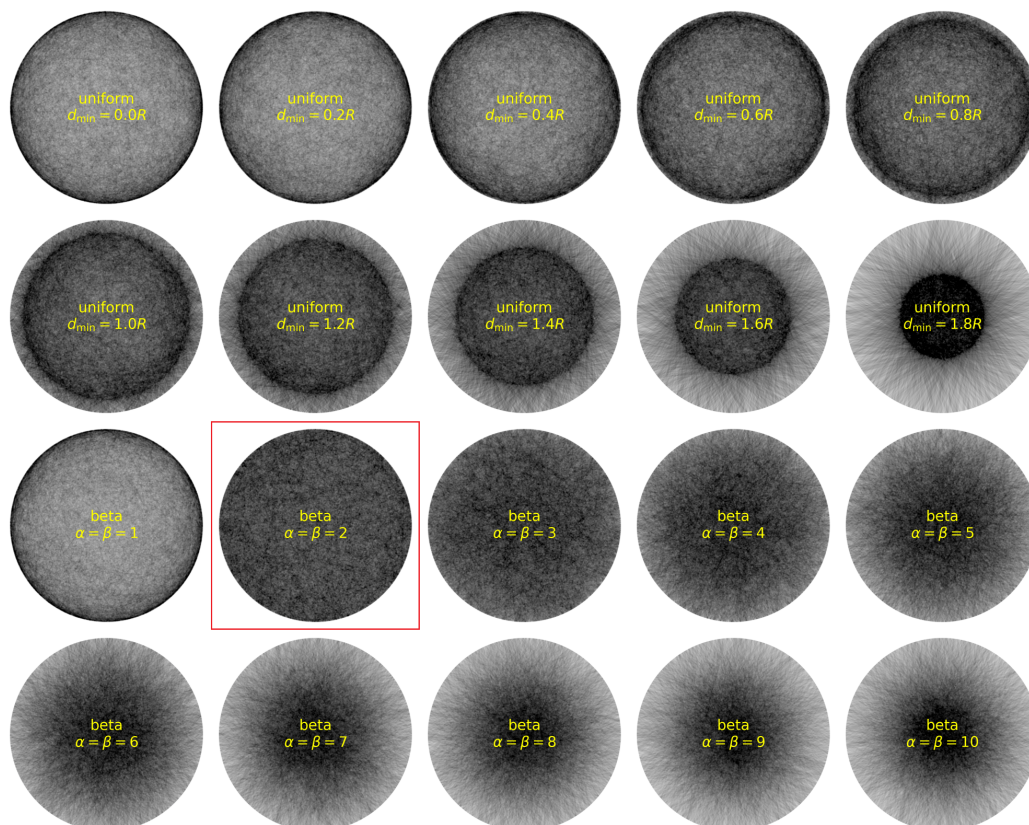
Ahhoz, hogy univerzális drónvezérlési modellt tudjunk kidolgozni a decentralizált forgalomirányításhoz, első körben – a programozói gyakorlatból ismert „unit test”-ek koncepciójához hasonlóan – összegyűjtöttünk egy sor olyan forgalmi helyzetet, amik valamilyen speciális tulajdonság mentén egyedi kihívást jelenthetnek. Ezeket a teszteseteket mutatjuk be az alábbiakban.

#### 6.1.1. Véletlenszerű mozgás a síkon és térben

A legáltalánosabb teszteset, amikor a drónok egy adott térrészen valamilyen elv szerint véletlenszerűen választanak célpontot, majd, ha azt elérték, hasonló elv szerint kiválasztják a következő véletlenszerű célpontot, amíg csak a mozgás tart. Ez a mozgásforma hasonló egy nagy téren keresztbe-kasul sétáló gyalogosokhoz, illetve a légiforgalom szerveződéséhez is (attól eltekintve, hogy a jelenlegi forgalomirányítás centralizált és lehetőség szerint előre tervezett pályákat követ). A kiválasztott célpontok eshetnek a térrész belsejébe, vagy annak határoló felületére. A véletlenszerű választás lehet egyenletes vagy valamilyen bonyolultabb eloszlás szerinti (pl. távolabbi célpontok preferálása).

Az ember nem is gondolná, de önmagában az a feladat, hogy úgy válasszunk célpontot, hogy az a lehető legkevésbé befolyásolja peremfeltételként a kísérlet lefolyását, azaz, hogy például a forgalomsűrűség a térrészben a lehető legegyszerűsebb eloszlású legyen, egy – számunkra ezeddig univerzálisan megoldatlan – igen bonyolultan kezelhető matematikai probléma. A 6.1. ábra szimulált forgalomsűrűség valószínűségi eloszlást jellemez különböző útvonalpont választási szabályok és paraméterek függvényében, egyenletes drónsebességet feltételezve. Kör alakú arénára empirikus

alapon a  $\alpha = \beta = 2$  paraméterezésű Béta-eloszlás egész egyenletes sűrűséget ad, de ugyanez pl. négyzetes arénára már más megoldást kíván. Ezzel a problémával ebben a fejezetben nem foglalkozunk behatóbban, de fontosnak éreztem megemlíteni, mint a forgalmat befolyásoló fontos peremfeltétel.



6.1. ábra. Forgalmi útvonalak szimulációjából adódó valószínűségi sűrűségeloszlás vizualizáció 20 000 egyenletes sebességű útvonalszakasz különböző szabály szerinti megválasztásával. A „uniform” az útvonalpontok egyenletes eloszlását jelöli a körvonalon, ahol  $d_{\min}$  explicit alsó korlátot határoz meg a kiválasztott útvonalszakaszok hosszában a kör alakú aréna  $R$  sugarához viszonyítva (azaz minél nagyobb  $d_{\min}$ , annál szűkebb két egymásutáni útvonalszakasz közötti szög). A „beta” Béta-eloszlást jelöl a kiválasztandó új irány szögében a megadott paraméterek szerint. A szimulációk alapján kör alakú arénára az  $\alpha = \beta = 2$  paraméterezésű Béta-eloszlás adja empirikusan a legegyszerűbb előfordulási valószínűséget a teljes arénában a forgalom során.

### 6.1.2. Két célpont közötti váltakozó mozgás

Ez a teszt eset a csomagszállítás legegyszerűbb esetét hivatott modellezni, amikor egy A pontból B pontba kell menni minden drónnak, és vissza. A teszt eset nehézsége, hogy egyrészt nagy valószínűség szerint sorba kell állni a végpontok eléréséhez, másrészt érdemes valamiféle sávokat kialakítani, hogy az egymással szembe menő drónok a lehető legkevésbé zavarják egymást. Érdekes módon ez a fajta sávosság, azaz *lane formation* az egyszerű flocking modellekben önszerveződő módon ki tud alakulni.

## 6.2. A drónforgalom vezérlő modelljei

---

### 6.1.3. Csillag alakú radiális mozgás

Ebben a tesztelésben a drónok egy középpont és egy körvonal véletlenszerű pontja között végeznek váltakozó mozgást (mindig új körvonalpontot választva). Ez a csomagszállítás egy másik egyszerűsített formája, illetve például a méhek virágpör és nektárgyűjtésének egyszerű modellje, amikor egy központból kell adott távolságra (vagy onnan haza) valamit kihordani. Ennek az elrendezésnek a kihívása egyértelműen a középpont körüli óriási tumultusban van, hasonlóan, mint ahogyan a hőségől kába zarándokok jutnak Mekkába, a (szintén, csak más okból) Kába kőhöz.

### 6.1.4. Kereszteződés

A kereszteződés elrendezésben a drónok két egymásra merőleges, egymást a középpontjukban metsző egyenes két-két végpontja között váltakoznak. A feladat kihívása a kereszteződésben valamiféle megoldást találni a négy irányból érkező drónok ügyes forgalomterelésére (lásd pl. körforgalom, jelzőlámpa, aluljáró stb.).

### 6.1.5. Zebra

A zebra elrendezésben a drónok a gyalogos zebrához hasonlóan egy széles sávon próbálnak egymással szemben elhaladni, elkerülve a direkt ütközéseket a szembejövővel és az azonos irányba haladókkal is.

## 6.2. A drónforgalom vezérlő modelljei

A decentralizált forgalomirányítás kapcsán két jelentős cikket is publikáltunk az évek során. Első nekifutásra két kiinduló algoritmust vizsgáltunk a forgalmi konfliktusok kezelésére (egyelőre kizárólag szimulációban). Az egyik a sebesség tartása melletti elkerülést preferálta (Constant Velocity, azaz CV), a másik az irány tartása melletti lassítást-gyorsítást pillanatnyi érkezési sorrend alapján történő elsőbbségadással (First In First Out, azaz FIFO) [T5]. A CV algoritmus egyszerűen a korábban már ismertetett taszító és sebességillesztő kölcsönhatásokat használta a konfliktusok kezelésére, miközben az utazósebességet tartotta. A FIFO algoritmus a szomszédos egyedek mozgásviszonyainak ismeretében kiszámolta, hogy egy predikált konfliktushelyzethez ki fog először odaérni, és amennyiben ez a másik egyed volt, akkor lelassított annyira, hogy a másik egyed elsőbbséget kapva lassítás nélkül el tudja hagyni a konfliktuszónát. Az algoritmusokat szokás szerint a realiztikus szimulációs keretrendszerben teszteltük és evolúciós optimalizálással hangoltuk.

A szimulációk kiértékelése azt mutatta, hogy mindkét releváns megközelítés hasznos lehet, más és más szituációban. Nyílt terű forgalmi helyzetben általánosságban a FIFO algoritmus bizonyult hatékonyabbnak, míg közös elérendő célpont esetén az örökmozgó CV, mert a FIFO hajlamosabb volt a bedugulásra. A szimulációk a várakozásnak megfelelően emergens jelenségeket is mutattak, nevezetesen az egyenes és kereszt alakú közös célpontú szituációkban a hangyákhoz [42] és emberekhez

[101] hasonlóan sávosodást, bizonyos sűrű, közös célpont körül várakozó helyzetekben öngerjesztett oszcillációt, míg leginkább a csillag alakú szituációban teljesen beálló forgalmi dugót.

Ez az első nekifutás a témának igen hasznos volt abban a tekintetben, hogy a szimulációkon keresztül megismerhettük a probléma méretét, jellegzetességeit és a kiinduló nullmodelljeink korlátait. Világossá vált, hogy olyan modellt kell alkotnunk, melyben az eredeti rajrepüléshez tartozó kölcsönhatási tagok a helyzethez optimalizáltan jelennek meg és feleslegesen nem taszítják és lassítják a független, más irányba tartó egyedek mozgását az alapvetően mozgásszinkronizációra létrehozott kölcsönhatások által. Azt is megértettük, hogy a közös célpont előtti várakozást dedikált viselkedésmintával, türelmes sorban állással kell valahogy kezelni a bedugulás, tülekedés és oszcillációk elkerülése érdekében. Ezzel szoros összefüggésben ismét megállapítottuk, hogy a forgalmi helyzetekben is a késleltetés és magas reakcióidő a stabil működés legnagyobb ellenségei. Végül, az is a koncepciónk része lett, hogy az alapvetően ütközéssel létrehozott párkölcsönhatásokat amennyire lehet, tehermentesíteni kell valamiféle valós idejű útvonaltervezéssel, hogy a forgalmi konfliktusok számát eleve minimalizálni tudjuk. Ezen megfontolások alapján jött létre a második forgalmi modellünk [T6], amit az alábbiakban részletesebben is bemutatok.

### 6.2.1. Anizotróp taszítás

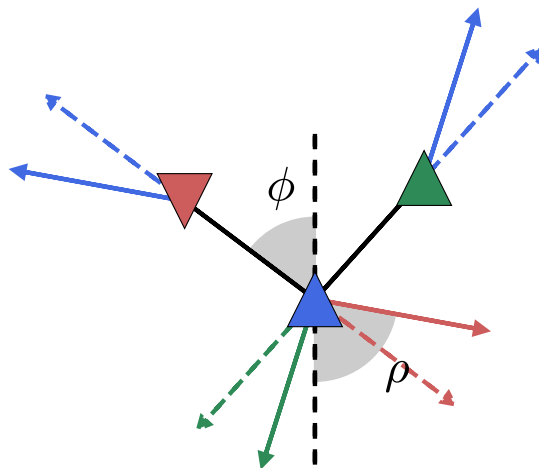
Idealizált esetben két egymással tökéletesen szemben haladó egyed a taszító kölcsönhatás mentén egymással szemben beragad, késleltetés és/vagy tehetetlenség bevezetése esetén öngerjesztett oszcillációba kezd, de egymást elkerülni nem tudják. Ahhoz, hogy a taszító kölcsönhatás segítse az egyedek közelkörzeti elkerülését, a taszítás irányát az egyedek irányához képest szituációfüggően elforgattuk úgy, hogy a szembe menő egyedek jobb- vagy balkézszabálynak megfelelően automatikusan „elcsúszzanak” egymás *mellett*, míg az egyirányba menők inkább sávokat alkothassanak egymás *mögött*.

Mindehhez először két szöget kell definiálnunk. Jelölje  $\phi$  az  $i$ -dik egyed  $j$ -dik egyed felé mutató vektora ( $\mathbf{r}_{ij}$ ) és célpontja (target) felé mutató vektora ( $\mathbf{r}_{it}$ ) közti szöget, és jelölje  $\rho$  a kívánt taszítási irány és a célpontból az egyed felé mutató vektor ( $-\mathbf{r}_{it}$ ) közti szöget. Izotróp taszítás esetén  $\phi = \rho$ . De a taszítást most anizotróppá tesszük egy  $A$   $[0, 1]$  tartományú anizotrópia erősség paraméter segítségével ( $A = 0$  visszaadja az izotróp esetet), az alábbi összefüggés szerint:

$$\rho = \begin{cases} (1 - A) \cdot \phi & \text{ha } \phi \leq \frac{\pi}{2} \text{ és } \mathbf{v}_j \uparrow \uparrow \mathbf{r}_{it} \\ \pi + (1 - A) \cdot (\phi - \pi) & \text{ha } \phi > \frac{\pi}{2} \text{ és } \mathbf{v}_j \uparrow \uparrow \mathbf{r}_{it} \\ (1 - \frac{A}{2})(\phi - \pi) + \pi & \text{ha } \mathbf{v}_j \uparrow \downarrow \mathbf{r}_{it}, \end{cases} \quad (6.1)$$

6.2. A drónforgalom vezérlő modelljei

ahol  $\mathbf{v}_j \uparrow\uparrow \mathbf{r}_{it}$  azt jelenti, hogy a két vektor közti szög kisebb, mint  $\pi/3$ ,  $\mathbf{v}_j \uparrow\downarrow \mathbf{r}_{it}$  pedig azt, hogy nagyobb. Az anizotróp taszítás szituációfüggő forgató hatását a 6.2. ábra mutatja be.



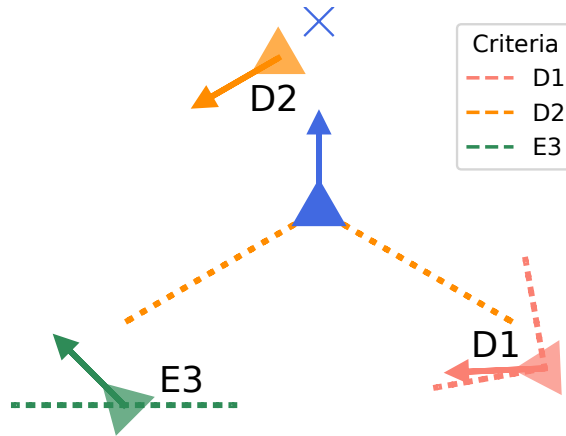
6.2. ábra. Az anizotróp taszítás vizuális jellemzése a kék egyed szempontjából. Szaggatott vonalak jelzik az izotróp taszítás irányát, folytonos vonalak az anizotrópét. A szembe haladó piros egyed oldalirányban inkább eltávolodik a kéktől, míg az azonos irányba haladó zölddel inkább egymás mögé állnak be. Forrás: [T6]

6.2.2. Szituációfüggő sebességillesztés

A sebességillesztő kölcsönhatás alakját nem változtatjuk meg a 5. fejezetben bemutatotthoz képest, de csak akkor alkalmazzuk két egyed között, ha arra valóban szükség van, vagy biztonsági (danger), vagy hatékonysági (efficiency) okból. Ennek megállapításához két biztonsági és egy hatékonysági kritériumot definiálunk, és csak abban az esetben használunk sebességillesztést, ha a három kritériumból legalább kettő fennáll:

- D1 akkor áll fenn, ha a másik egyed felénk jön, azaz ha  $\mathbf{r}_{ij}$  és  $\mathbf{v}_j$  iránya között maximum  $\pm\pi/4$  eltérés van
- D2 akkor áll fenn, ha a másik egyed a célunk irányába esik, azaz ha  $\mathbf{r}_{ij}$  és  $\mathbf{r}_{it}$  iránya között maximum  $\pm 2\pi/3$  eltérés van
- E3 akkor áll fenn, ha a szomszéd sebessége a célunk irányába mutat, azaz ha  $\mathbf{r}_{it}$  és  $\mathbf{v}_j$  iránya közt maximum  $\pm\pi/2$  eltérés van

A fenti kritériumokat a 6.3. ábra szemlélteti.



6.3. ábra. A szelektív sebességillesztés kritériumrendszerének illusztrálása példával. A kék egyed a körülötte lévő jelölt egyedekkel szemben nem használ sebességillesztést, mert mindhárom eset legfejlebb egy biztonsági vagy hatékonysági kritériumot sért meg: A piros egyed a kék felé megy (D1); a sárga egyed az úticél irányában van (D2); a zöld egyed a kék céljának irányába mozog (E3). Megfelelő színű szaggatott vonalak jelzik az egyes kritériumok irány-tartományát, a folytonos nyilak az egyedek haladási irányát, X pedig a kék egyed célpontját jelöli, az egyszerűség kedvéért most pont a kék egyed előtt. Forrás: [T6]

### 6.2.3. Agilis önhajtás

Az önhajtó, cél felé mutató sebességtagot iteratív módon határozzuk meg. Ha nincs előttünk másik egyed, akkor egyszerűen a cél felé tartunk utazósebességünkkel. Ha vannak előttünk egy bizonyos  $R_S$  biztonsági (safety) zónán belül, akkor a sebességet a szokásos fékezési görbe mentén lecsökkentjük, hogy a szomszédos egyednek ne ütközzünk neki, és a [T6] implementációjában el is forgatjuk egy távolságfüggő szöggel. Ezután megnézzük, hogy az így kialakuló sebességtagot veszélyezteteti-e további szomszédos egyed, egészen addig, amíg minden veszély el nem múlt (tehát az iterációk során a sebesség nagyságát monoton módon csökkentjük, ami garantálja a veszély fokozatos csökkentését is).

Ennek a megoldásnak a matematikai részleteibe azért nem szeretnék itt belemenni, mert a későbbi publikációkban ezt a megoldást jelentősen meghaladtuk [T8]. Ezen a ponton annyi fontos, hogy ez a megoldás az agilis (azért hívjuk így, mert az ütközéseket preventív módon igyekszik elkerülni) önhajtó taghoz a szomszédos egyedek pozícióját a legegyszerűbb nulladrendű közelítésben, csupán statikus módon használja fel.

### 6.2.4. Türelmes sorban állás

A korábbi szimulációs eredmények alapján egyértelművé vált, hogy a közös célpont előtti várakozást kitüntetett módon kell kezelni. El kell érni, hogy az egyedek ne tülekedjenek annyira az alapvető „ösztoneik” (azaz alapegyenleteik) hatására, hogy egymást akadályozzák, mert ezzel befagyasztják a haladást. Ehelyett lehetőleg – a

6.2. A drónforgalom vezérlő modelljei

---

COVID óta mindenki számára jól ismert módon – türelmesen, biztonsági távolságot tartva kell várakozniuk egymás mögött. Ez a fajta kölcsönös türelem az emberiség hasznára is vállhatna számos szituációban, nem csak hatékonyságunkat, de emberi mivoltunkat is emelve, akármilyen sorban állásnál, pánikhelyzetnél, forgalmi dugók esetén, általánosságban minden olyan helyzetben, ahol a rendelkezésre álló tér a csoport haladása irányában valamilyen módon beszűkül. A türelem jótékony hatása nemsokára bizonyított tény lesz, aki nem hiszi, olvasson tovább türelmesen...

A célpontok megközelítése immáron minden más egyed vagy objektum megközelítéséhez hasonlóan az 5.3 egyenlet szerinti  $D(r, a, p)$  fékezési görbe mentén zajlik, azaz a célpontunk felé tartva az utazósebességünket nyilvánvalóan csökkentjük a célhoz közeledve. A türelmes sorban állás egyszerűen annyit jelent, hogy a saját helyünket felmérve a sorban egyszerűen nem a célponthoz kötjük a megállás pozícióját, hanem a sorban előttünk álló mögé. Mivel drónok esetében közlekedési infrastruktúra hiányában a mozgás nem korlátozott utakra, így a sorban állást is általánosan, radiális irányban definiáljuk, az előttünk állót a célpontunkhoz mért nálunk kisebb, de mindenki másnál nagyobb radiális távolság alapján azonosítjuk, lokálisan, önszerveződő módon.

Természetesen csak akkor használjuk a sorban állást, ha az előttünk álló nagyjából ugyanahhoz a célponthoz tart (célpontjaik távolsága kisebb, mint egy adott  $R_S$  biztonsági távolság), és egymástól nem vagyunk egy bizonyos  $R_{inter}^Q$  sorban állási interakciós távolságnál messzebb. Ehhez viszont a korábbi rajrepülési bázismodellhez képest a szomszédos egyedekkel a pozíciókon és sebességünkön túl a célpontjainkat is kommunikálnunk kell egymással, ami adatmennyiségben nem jelent túl sok változást, koncepcionálisan viszont annál inkább, ahogy azt a 7. fejezetben látni fogjuk.

Sorban állásnál tehát az egyedek közeli célpontjaikhoz a tér különböző irányából érkezhetnek, létrehoznak egy önszerveződő sorrend-hierarchiát a célpontjaiktól mért távolság alapján, és radiális irányban egy adott  $R_Q$  sorban állási távolságot tartanak egymástól, *előrelátóan* megelőzve ezáltal a közös célpont körüli bedugulást és az egymás taszítási közelkörzetében létrejövő öngerjesztett oszcillációkat.

Ahogy azt jól érezzük, élettelen egyedeink ezen egyszerű szabályrendszere szinte antropomorfizálható, ismét megerősítve bennünk a csoportos mozgás azon univerzális megfigyelését, hogy az egyedek belső bonyolultsága sokszor kevésbé számít, mint a köztük létrejövő interakciók minősége.

A sorban állás általunk használt pontos matematikai definícióját a [T6] cikk tartalmazza, részleteiben további „józan paraszti eszes” megfontolások alapján tökéletesítve a fenti leírt koncepciót.

### 6.3. Eredmények

#### 6.3.1. Forgalmi modell optimalizálás

A forgalmi modell paramétereinek optimalizálását a korábbiakhoz hasonlóan evolúciós optimalizációval végeztük, ám az optimalizáláshoz a rajrepüléstől eltérő, ezúttal a forgalmi hatékonyságot mérő új fitnessz függvényt kellett definiálnunk. Ennek három egyszerű komponensét azonosítottuk: i) ne legyen ütközés az egyedek között; ii) az egyedek menjenek minél gyorsabban a céljuk felé; iii) ne kelljen sokat fékezniük, gyorsulniuk, kanyarodniuk. A fitnessz függvény matematikai formában a következő alakot ölti:

$$F = F^{\text{coll}} \cdot \frac{\langle v^{\text{eff}} \rangle_t}{v^{\text{SPP}}} \cdot \frac{a_{\text{max}} - \langle |a| \rangle_t}{a_{\text{max}}}, \quad (6.2)$$

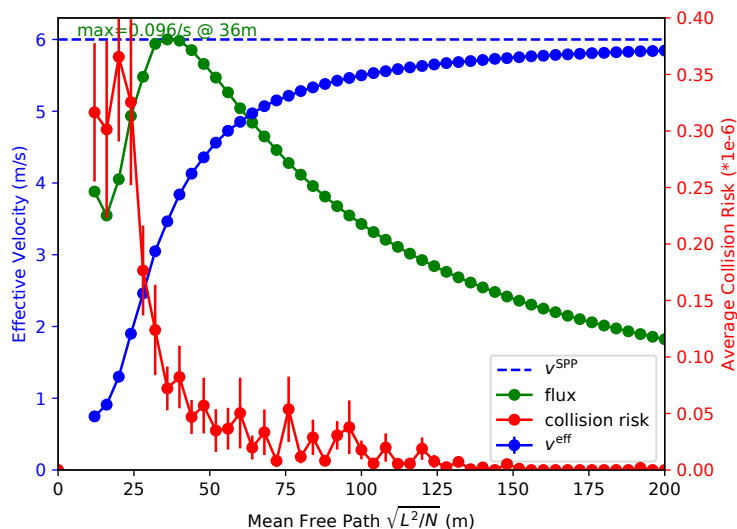
ahol  $F^{\text{coll}}$  a 5.21 egyenletben definiált normalizált ütközési kockázat (jelen esetben szigorúbban, 3 helyett 5 m küszöbtávolságot és 3E-5 helyett 2E-6  $a^{\text{tol}}$  tolerancia-szintet használva),  $v_i^{\text{eff}}$  az  $i$ -dik egyed effektív sebessége, azaz a sebességének az a komponense, ami az előző célja felől az új célja irányába mutat,  $a_i$  az  $i$ -dik egyed gyorsulása. Az  $\langle x \rangle_t$  kifejezés időbeli, míg  $\bar{x}$  egyedek közti átlagolást jelent.

Az evolúciós optimalizálást többféle forgalmi helyzetre is elvégeztük, 100 egyeddel,  $L = 250$  m oldalhosszúságú, négyzetes arénát feltételezve. Az evolúció a szokásos 100-150 generáció után tűrhető, és az egyes szituációkban elég hasonló kiinduló paraméterhangolást adott a főbb paraméterek tekintetében (kb. 10 m taszítási sugár, 25 m sorban állási sugár, enyhén a taszítási sugár feletti megállási távolság, nagyságrendileg 0.5-ös anizotrópia érték). Ezeket az értékeket ezután a biztonság, hatékonyság és a létrejövő forgalom „szépségének” együttes növelése érdekében a szimulációk és a valós kísérletek vizuális megfigyelése mellett finoman tovább hangoltuk. Minderre két okból volt szükség. Egyrészt az evolúció itt is Pareto-frontokon hozza csak létre a megoldásait, bizonyos párhuzamos igények mentén a kompromisszum irányáról nekünk kell döntést hozni. Másrészt azért az emberi szem – főleg jó sok forgalmi helyzet elemzése után – olyan apró különbségek megfigyelésére is képes, amiket nehéz és bonyolult elvárásként matematikai formába önteni, ugyanakkor intuitívan egyértelmű irányát adhatják a megoldásnak. A végső szimulációban és valós kísérletekben használt paraméterbeállításokat [T6] tartalmazza.

#### 6.3.2. A forgalmi modell hatékonysága

A behangolt forgalmi modellt a legtöbb frontális pályakonfliktust okozó zebra szituációban vizsgáltuk tovább, 100 egyed részvételével, különböző aréna méretekkel. Elemeztük az effektív sebesség, az ütközési kockázat és a forgalmi fluxus ( $v^{\text{eff}}/l$ , ahol  $l = \sqrt{L^2/N}$  a szabad úthossz) alakulását a forgalmi sűrűség függvényében. A szimulációs eredményeket a 6.4. ábra mutatja be.

6.3. Eredmények



6.4. ábra. A forgalom alapábrája (fundamental diagram), azaz forgalmi statisztika az átlagos szabad út (sűrűség) függvényében. Minden mérési ponton húsz 10 perces szimulációt átlagoltunk. A standard eltérések hibasávokkal jelennek meg, de a hiba a fluxus és az átlagos szabad úthossz esetében túl kicsi ahhoz, hogy látható legyen. A teljes fluxus maximuma 36 m átlagos szabad út, ami egy viszonylag sűrű forgalmi helyzet. Forrás: [T6]

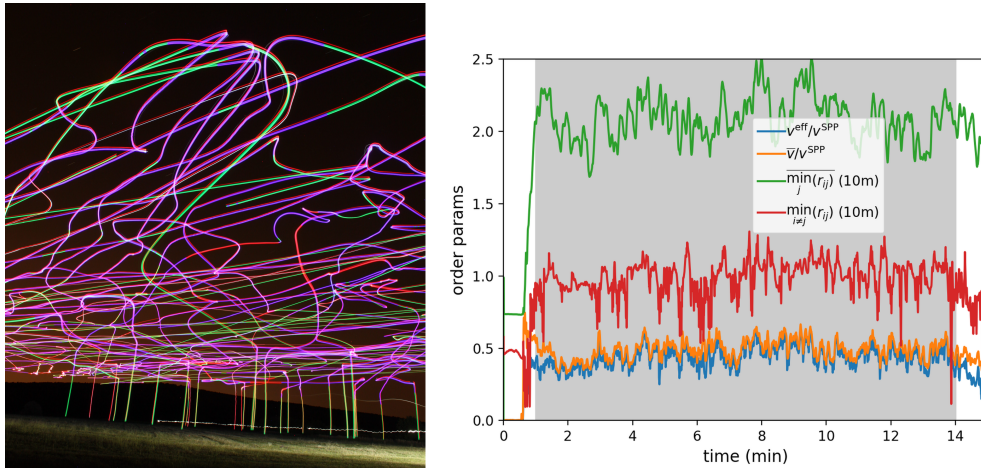
A 6.4. ábra szerint a sűrűség növekedésével (az ábrán balra haladva) az effektív sebesség csökken, az ütközési kockázat nő, de érdekes módon a csoport szintű forgalmi fluxusnak középúton van maximuma. Azaz egy ideig az átlagsebesség csökkentésének árán is van értelme sűrűbb forgalmat generálni, amíg az ütközési kockázat elfogadható szinten tartható, illetve nem lesz annyira sűrű a forgalom, hogy beduguljon, és a fluxus hirtelen leessen. Ez a jelenség a „slower is faster” alapelv [102] egy egyértelmű megnyilvánulása a mi drónrajaink esetében is.

Az ábrából az is látszik, hogy a jelenlegi modellben a biztonsági kockázat hangolható egyszerűen a sűrűség megfelelő megválasztásával, ami a jövő okosvárosainak légi forgalmában vagy általánosságban a decentralizált repülésirányításban egy hasznos tervezési szempont lehet.

Végezetül, azt is leolvashatjuk az ábráról, hogy az optimális forgalmi fluxushoz tartozó szabad úthossz csupán 36 m, azaz végeredményben sikerült egy olyan modellt létrehozni, ami az elvárt fitnessz kritériumainkat relatív nagy drónsűrűség mellett is képes biztosítani.

### 6.3.3. Valós drónforgalom

A forgalmi modellt a 2018-ban rendelkezésünkre álló 30 db drónunkra is ráprogramoztuk és sikerrel bemutattuk önszerveződő forgalmukat 6 m/s utazási sebesség mellett. A repülésről készült hosszú expozíciós felvételt és a mért rendparaméterek alakulását a 6.5. ábra ábra mutatja be.



6.5. ábra. **Bal oldal:** 30 drón sűrű önszerveződő forgalmáról készült hosszú expozíciós felvétel. **Jobb oldal:** A repülés közben mért rendparaméterek alakulása. Forrás: [T6]

A szimulációk és a terepi demonstráció megnézhető [ezen a videón](#)<sup>1</sup>.

## 6.4. A fejezethez kapcsolódó tézispont

Az első, második és negyedik tézispont módszertanát és eredményeit felhasználva egyéni célponttal rendelkező drónok sokaságára decentralizált repülésirányításra alkalmas vezérlési algoritmusokat dolgoztunk ki. Az algoritmusainkat szimulációban, különböző forgalmi szituációk, egyedszám és egyedsűrűség mellett hasonlítottuk össze. A legjobbnak ítélt modellel 30 valódi drónnal terepi kísérletben is bemutattuk autonóm drónjaink önszerveződő, decentralizált irányítású sűrű forgalmát.

A megoldásainkat két és három dimenzióban gyakran előforduló, sokféle kihívást rejtő sűrű forgalmi szituációban vizsgáltuk: mozgás véletlenszerű célpontokba a közös síkon, térben, mozgás két fix célpont között, kétirányú kereszteződés, azonos célpont megközelítése különböző irányokból, gyalogos zebra átkelés. Az algoritmusok összehasonlítását a teljes forgalmi fluxus és az ütközések kockázataának vizsgálatával végeztük, és megállapítottuk, hogy különböző forgalmi szituációkban és különböző egyedsűrűség esetén másfajta viselkedés lehet optimális.

A végső algoritmusban egyrészt a célnak megfelelő módon alakítottuk át a rajmozgást generáló párkölcsönhatási tagokat: taszító kölcsönhatást anizotróppá tettük, a sebességillesztést szituációfüggővé. Emellett úgy alakítottuk ki az önajtást biztosító útvonaltervező tagot, hogy lehetőség szerint megelőzze és elkerülje a keresztező útvonalak konfliktusait, illetve figyelembe vegye az azonos célpontokra igyekvők között az udvarias sorban állás szabályait.

Megoldásunkkal demonstráltuk, hogy a bio-inspirált, ágens alapú vezérlés alkalmas decentralizált repülésirányítás megvalósítására, és hogy a decentralizált forgalom-

<sup>1</sup> <https://youtu.be/v26Ohw9UpE0>

6.4. A fejezethez kapcsolódó tézispont

---

ban az udvariasság és előzékenység, illetve a „slower is faster”, avagy „lassan járj, tovább élsz” elv csoportszintű előnyt biztosít.

Kapcsolódó publikációk: [T5, T6] (2016, 2018).

## 7. fejezet

# Reaktív és stabil rajrepülés adaptív vezetőkkel

A 5. fejezet evolúciósan optimalizált rajrepüléséről a [Science Robotics](#)<sup>1</sup> címlapjára kerülő hosszú expozíciós fotóval sikerült publikációt készítenünk (7.1. ábra, bal oldal). A sors íróniája, hogy pont az a fotó, ami az akkori új megoldás nagyszerűségét hivatott látványosan bemutatni, éppen azért lett érdekes, mert nem tökéletes (azaz kvázi unalmas) trajektóriákat mutatott, hanem éppen hogy továbbra is oszcillációktól hemzsegett. A képen egy felszállás utáni pillanat látható, és a pályákon jól látszik, hogy a drónoknak jelentős időbe telik megtalálni a közös „demokratikus” irányt, és amíg ez nem megy, addig bizony tolakodnak, lökdösődnek.



7.1. ábra. **Bal oldal:** A 2018-as címlapfotós publikációnk [T4], hosszú expozíciós fényképpel a felszállás után még kicsit oszcilláló drónraj trajektóriákról (lásd 5. fejezet). **Jobb oldal:** A 2020-as címlapfotós publikációnk [T7], hosszú expozíciós fényképpel az ebben a fejezetben tárgyalt adaptív hierarchiákon alapuló drónraj modell általi repülésről, immáron sima trajektóriákkal.

<sup>1</sup> <https://www.science.org/doi/10.1126/scirobotics.aat3536>

## 7.1. Csoportos döntéshozatali struktúrák a társadalomban

---

Vegyük ismét alaposan górcső alá a rendszernek e leggyengébb pontját, a csoportos döntések lassúságát. Vezessük a drónokat egy sarokba úgy, hogy a raj elején lévő, falhoz közeledő egyedek döntési konfliktusba kerüljenek: a szomszédok sebességét tartsák és ezáltal a falnak száguldjanak, vagy megálljanak a fal előtt és ezáltal kitegyék magukat annak a veszélynek, hogy a hátsó szomszédok beléjük ütköznek. Az ilyen konfliktushelyzeteket a 3. fejezet még csak veszélyes oszcillációkkal tudta megoldani maximum 10-es egyedszámra, a 5. fejezetben optimalizált megoldás oszcillációi ahogy láttuk már 30-as egyedszámra is tolerálhatók, még jól is néz ki, hogy látszik a döntési helyzetekben a csoportdinamika, és figyelemmel kísérhetjük az új döntés kialakulását az egyéni ellenkező vélemények (mozgásirányok) finom összehangolódásával. Ám ha a drónok egyedszámát tovább növeljük (és hát növeljük, mert a célunk, hogy minél skálázhatóbb vezérlési megoldást tudjunk találni), a kis csoportra jellemző hatékony, demokratikus, egyenrangú, azaz mindenkinek a véleményét egységnyi súllyal figyelembe vevő csoportos döntéshozatal szokás szerint újabb emergens jelenségeket kezd mutatni. Sűrűségingadozások jelennek meg, az akadályokhoz érve a sűrűség a perem felé növekszik, mint egy puha labda pontjai közti távolság falnak ütközéskor. A döntéshozatal lelassul, hatékonysága romlik, a csoport átlagolt döntései a periférián lévő egyedek számára veszélyessé válnak, a rendszer mérete olyan nagyvá válik, amit nem lehet már közösen átlagolt döntés mellett kellően jól irányítani, a „mindenki egyenlő” nullmodell a méret növekedésével tehát egy ponton (és nem is olyan sokára, nagyságrendileg 30-100 egyed között) eléri teljesítőképességének határát.

### 7.1. Csoportos döntéshozatali struktúrák a társadalomban

A fenti bevezető mondatok ugyan a drónrendszerünkre vonatkoznak, de érezzük, hogy igen könnyen antropomorfizálhatók, mert a társadalmi hálózatokban és döntéshozatali mechanizmusokban ezek az emergens jelenségek a csoportméret növekedésével nagyon hasonló módon megjelennek. Egy kis kitérővel ezt a szálát kibontjuk egy kicsit, egyszerűen azért, mert a mindenki számára ismert hétköznapi példákkal vont analógiák oda-vissza segíthetnek minket megérteni mindkét rendszerünk működését. Fontos megjegyezni, hogy ez a kitérő elsősorban deskriptív, azaz objektív leíró próbál lenni és kevésbé foglalkozom a normatív etikai és elvi megfontolásokkal, nehogy túlságosan belebonyolódjunk a témába.

Amit tehát a korábbi rajrepülés fejezetekben a drónokra programoztunk, az valahol a *demokrácia*, a nép irányításának alapelve, a teljes egyenjogúság a közösségi döntéshozatalban. Teljes demokratikus egyenjogúságban élő kisközösségek (pl. gyűjtögető törzsek, alulról szerveződő civil szervezetek stb.) csak hasonlóan kis létszámban létezhetnek. A teljes egyenjogúság kiegészítő szabályok nélkül nagy méretben nem működőképes, mert nagyon sok vélemény egyenrangú szintetizálása költséges, lassú, bürokratikus, és a többségi erő még valódi egyenrangúság esetén is durván el tudja

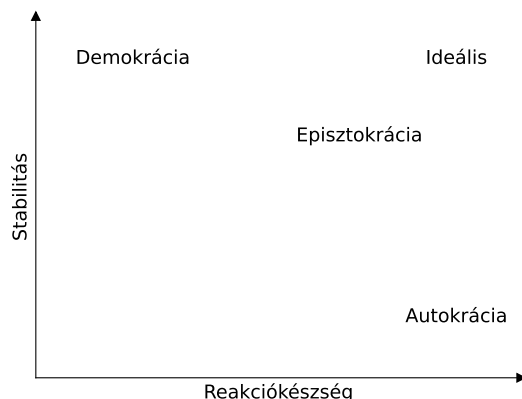
nyomni bizonyos kisebb alcsoportok (például egyenlő szavazati joggal rendelkező, de kisebbségi létszámban lévő nemzetiségi, vallási, ideológiai csoportok, neadjisen környezet- és természetvédők, jövőt modellező szociológusok, politológusok, meteorológusok, klímakutatók, geológusok, – urambocsá! – fizikusok) esetleg fontos véleményét arról, hogy hogyan ne rohanjunk a falnak egy közelgő veszély esetén.

A demokratikus egyenjogúság egy szélsőségesen lapos hierarchia, az erre „ortogonális” berendezkedés az *autokrácia*, a személyi irányítás, ahol a döntéshozatal matematikailag egy teljesen hierarchikus fa struktúra, ami a legfelsőbb szinten egyetlen vezető által irányított, de alsóbb szinteken is a hierarchikus viszonyoknak megfelelő. Ennek a rendszernek is érezzük és – különösen Kelet-Európában – jól ismerjük az előnyeit és veszélyeit egyaránt. A teljesen hierarchikus döntéshozatal ugyan rendkívül gyors tud lenni meghatározó döntésekben, ami veszély esetén jól jöhet, de egyrészt lelassul (túlterhelődik), ha az alacsonyabb szintű döntésekhez is felső vezetői utasítás kell, másrészt a döntések iránya teljesen ki van szolgáltatva a vezető szeszélyeinek. Magyar aktuális személyi vezetői preferencia mentén például egy ideje feltűnően sok stadion, akkumulátorgyár, luxus szálló épül, és szintén feltűnően alulfinanszírozottak a kórházak, egyetemek, a független sajtó, a független kulturális intézmények, a valódi civil szervezetek. Ez más vezetővel lehetne éppenséggel pont fordítva is, de a csoport által visszacsatolt és integrált információ hiányában – vagy azok egyre szélsőségesebb szándékos elhallgattatásával – a döntések iránya időben egyre jobban távolodik a valódi szükségletektől, ami középtávon nyilvánvaló társadalmi katasztrófához és összeomláshoz vezet. Ugyanez a visszacsatolás hiány vagy tagadás persze hierarchikus berendezkedés esetén a hierarchia alsóbb szintjein is ugyanígy megjelenhet és meg is jelenik. Szigorú hierarchiánkban sokszor nem halljuk meg vagy nem vesszük figyelembe például kisebbségek, alacsonyabb státuszú vagy vagyonú társadalmi rétegek, nők, férfiak, gyerekek, állatok, vagy akár növények és más életformák halk, de annál fontosabb véleményét arról, hogy mik a csoportjaik valódi szükségletei.

E két egymásra bizonyos szempontból merőleges berendezkedésnek a legfontosabb társadalmi előnye demokrácia esetén a *stabilitás* (nem a vezetők pozíciójának stabilitása, hanem a döntések stabilitása, aminek társadalmi és gazdasági stabilitás a következménye), autokrácia esetén a *reakciókészség*, és érezzük, hogy ez a két dolog egymással alapvetően kompromisszumkényszerben van. Ha nagyobb stabilitást akarunk, megfontoltabb döntésekre van szükségünk, ami a társadalom nagyobb arányának véleményét szintetizálja. Ekkor a döntéshozatal lelassul. Ha gyors döntést szeretnénk, akkor nincs idő meghallgatni mindenkit, tehát a gyorsaság a stabilitás rovására megy. A végső célunk az, hogy olyan kombinált döntéshozatali mechanizmust és struktúrát találjunk, ami úgy ötvözi e két rendszer építőköveit, hogy a kettő előnyös tulajdonságai együttesen domborodjanak ki (7.2. ábra). Tehát összességben demokratikus stabilitást és igazságos egyenlőséget keresünk, de a döntéshozást például egy nagy közös választás helyett (amiben előfordulhat, hogy csupán ar-

7.1. Csoportos döntéshozatali struktúrák a társadalomban

ra korlátozódik a demokrácia ereje, hogy pár évente újraválassza saját autokrata vezetőit) közügyek mentén lokalizáljuk és csomósan hierarchikussá egyszerűsítjük. Másképp fogalmazva, elfogadjuk, hogy bizonyos döntéseket a legjobban nem a teljes nép átlaga, és nem is az egy szem vezető, hanem csak szűkebb szakértői, vagy hiteles friss információval ellátott helyi csoportok véleményátlaga tud optimálisan meghozni, gyorsan, lokálisan, adaptívan, az adott problémára fókuszáltan.



7.2. ábra. Politikai döntéshozó rendszerek egyszerű ábrázolása döntési stabilitásuk és reakciókészségük mentén

Efféle „szakértői kormányzás” koncepció a politológiában talán először [Platón](#)<sup>2</sup> Törvények című dialógusában jelenik meg, *szofokrácia* néven, ami a filozófusok politikai hatalmát hirdeti. [John Stuart Mill](#)<sup>3</sup> hozta létre a „plural voting” fogalmát 1865-ben, aminek értelmében azok, akik több tudással vagy szakértelemmel rendelkeznek egy adott területen, több szavazati joggal bírhatnának, így jobban képviselhetnék az értelmes döntéseket [103]. A a kollektív tudományos és intellektuális tudás és erkölcsi bölcsesség alapú társadalmi vezetés és döntéshozatal koncepcióját [Vlagyimir Ivanovics Vernadszkij](#)<sup>4</sup> geokémikus és filozófus fejtette ki a XX. század közepén *nookrácia* néven. Ezt a vonalat vitte tovább [Jason F. Brennan](#)<sup>5</sup> *Against Democracy* című művében, amiben a demokrácia kritikája mellett *episztokrácia* néven vezet be a nookráciához hasonló rendszerét, amelyben a hatalom vagy a döntéshozatal a tudáson, szakértelmen vagy hozzáértésen alapul [104]. Az episztokrácia egyfajta szakértői uralmat jelent, ahol az állampolgári vagy politikai jogok, például a szavazás vagy a kormányzásban való részvétel, részben vagy egészben azon alapulnak, hogy az egyének milyen mértékben tájékozottak vagy kompetensek bizonyos területeken.

A fentebb taglalt ideális csoportos döntéshozatali megoldásunkhoz szükséges beren-

<sup>2</sup> <https://en.wikipedia.org/wiki/Plato>

<sup>3</sup> [https://en.wikipedia.org/wiki/John\\_Stuart\\_Mill](https://en.wikipedia.org/wiki/John_Stuart_Mill)

<sup>4</sup> [https://en.wikipedia.org/wiki/Vladimir\\_Vernadsky](https://en.wikipedia.org/wiki/Vladimir_Vernadsky)

<sup>5</sup> [https://en.wikipedia.org/wiki/Jason\\_Brennan](https://en.wikipedia.org/wiki/Jason_Brennan)

dezkedést valahol az episztokrácia ideája közelíti meg talán a legjobban, de kizárólag abban a tekintetben, hogy egy átlagos döntésnél – amint a későbbiekben látni fogjuk pl. a csoportos mozgás esetére – előnyös, ha szakértői súlyozás van figyelembe véve az egyenrangú átlagoláshoz képest. Az már egy egészen más kérdés, hogy pusztán a demokratikus választás lecserélése episztokratikus választássá bármilyen problémánkat meg tudná-e oldani társadalmi szinten. A saját véleményem az, hogy nem, mert ez a megoldás egyrészt evolúciós szempontból lecsökkenti a „mutáció” lehetőségét, azaz sérülékennyé teszi a rendszert a lokális optimumban ragadásra, másrészt önmagában ez a változtatás nem aprózza fel a hatalmi struktúrát, csak az autokrata vezetők helyett technokrata vezetők kezébe helyezi, de nem teszi adaptívvá, úgy, ahogy az mint látni fogjuk, kívánatos lenne. Azaz nem állítja meg a hatalom skálafüggetlen csomósodását, ami mai – egyre globalizáltabb és nagyobb egyedszámú, tehát egyre több nem kívánatos emergens jelenséget mutató – világunkban valahol a legtöbb probléma forrása, hasonlóan a szintén csomósodó, erőforrást pazarló, öncélú rákos daganatokhoz.

A 7.1. táblázatban igyekeztem összefoglalni néhány számunkra fontos összehasonlítható tulajdonságot a fenti politikai döntéshozó rendszerek alapvető működése szerint, amit felhasználhatunk a továbbiakban, immáron visszatérve a csoportos mozgás témájához.

7.2. Csoportos mozgás és a fluktuáció-disszipáció tétel

Tulajdonság	Demo-	Auto-	Episzto-	Igényelt
Döntési mechanizmus	egyenrangú	rögzített hierarchikus	tudás alapú hierarchikus	adaptív hierarchikus
Döntési súlyozás	átlag	vezető dönt	súlyozott átlag	lokális súlyozott átlag
Döntések alapja	kollektív bölcsesség	vezetői bölcsesség	szakértői bölcsesség	lokális bölcsesség
Döntési sebesség	lassú	vezetői prioritástól függ	közepes	párhuzamosan gyors
Döntési irány	képviseleti	top-down	top-down	bottom-up
Ideális döntési stabilitás	magas, kollektív bölcsesség	alacsony, vezetőnek kiszolgáltatott	közepes, szakértői	magas, optimális
Döntési sérülékenység	magas, befolyásolható	alacsony, mert erőszakos	közepes, szakértői	alacsony, decentralizált
Cél érdek	társadalmi átlag	vezető	szakértők	helyi csoportok, hierarchikusan
Döntéshozó	társadalom	vezető	szakértői csoport	helyi csoport, hierarchikusan
Döntési tér	képviselet	teljeskörű	szakértői	diverzifikált
Fékek és ellen-súlyok	erős	gyenge	közepes	erős

7.1. táblázat. A csoportos döntéshozatali mechanizmusok szerinti idealizált társadalmi struktúrák („-kráciák”) összehasonlítása. Az „Igényelt” oszlop a saját elképzelésem az ideális döntéshozásra, a csoportos mozgás kontextusának analógiájából.

7.2. Csoportos mozgás és a fluktuáció-disszipáció tétel

A társadalmi problémákból a csoportos mozgáshoz visszatérve igen hasonló analóg jelenséggel találjuk magunkat szemben, viszont a modern társadalomtudományoknál nagyságrendekkel nagyobb időtávban tesztelt és optimalizált, evolúció által biztosított hatékony megoldásokkal. Ha nyitott szemmel járunk a természetben, megfigyelhetjük, hogy a halrajok vagy madárrajok egyedei mindenféle zavaró hatás ellenére is képesek fenntartani globális irányukat, ugyanakkor képesek hirtelen, közös irányváltásokra is, ha például egy külső veszélyforrás néhány egyed állapotát megváltoztatja [105, 106]. A helyi ingadozások kizárása a globális mozgásból stabilitást eredményez, és ehhez túldisszipált interakciós dinamikára van szükség, míg a gyors irányváltások átvétele az egész csoport által reakcióképeséget biztosít, amihez aluldisszipált interakciós dinamikára van szükség.

Ez az ellentmondás valahol gyökereiben az egyensúlyi statisztikus fizikából ismert, de nemegyensúlyi rendszerekre is általánosított fluktuáció-disszipáció tétellel (FDT) analóg jelenség [107, 108]. A FDT kimondja, hogy egy dinamikus egyensúlyi rendszerben a természetes ingadozások (fluktuációk) mértéke és a rendszernek külső

hatásra adott reakciója (disszipáció) összefüggésben áll. Egyszerűen fogalmazva: minél nagyobb egy rendszer természetes belső ingadozása, annál intenzívebben reagál, ha valamilyen külső erő éri.

Ez az igen mély alapelv minden egyensúlyi statisztikus fizikai rendszert a reakcióképesség növelése és a belső fluktuációk csökkentése menti párhuzamos igények egymást kizáró kompromisszumára készíti. Egy példával illusztrálva: ha egy áramkörben nagy impedanciájú zajszűrést alkalmazunk, akkor gyors jeleket nem fogunk tudni rajta átfolyatni.

Az FDT alapelvét a csoportos mozgásra is vonatkoztathatjuk mély analógiában: ha azt szeretnénk, hogy a rendszer belső sebességátlagolása hatékony legyen, azaz a belső fluktuációk csökkenjenek, az egyedek ne pánikoljanak, hanem rendezetten, stabilan tudjanak haladni, akkor a rendszer reakcióképessége és reagálási sebessége az erőteljes átlagolásnak köszönhetően szintén kicsi lesz például egy ragadozó megjelenésekor. Másképp fogalmazva, egy részecske mozgásállapotának megváltozása a többiek számára első közelítésben ugyanaz a folyamat ha a változást belső fluktuáció vagy külső hatás okozta.

Ha ki akarunk lépni az FDT adta korlátokból, akkor tehát arra van szükségünk, hogy az egyensúlyi statisztikus fizikai kereteket meghaladva valamilyen módon ellássuk az egyedeinket azzal a képességgel, hogy meg tudják különböztetni a belső önkéntelen fluktuációkat a külső inger adta tudatos választól, hogy az elsőre tudjanak disszipatívan, míg a másodikkra gyorsan és határozottan reagálni. Azaz az egyedeknek ismerniük kell a szomszédaik *szándékát*.

### 7.3. Az adaptív hierarchikus irányítás modellje

Ahhoz, hogy a saját, információ vezérelte szándék alapú csoportos repülési modellünket definiálni tudjuk, először meg kell ismernünk a csoportos döntéshozatal korábbi state-of-the-art modelljeit, mert a mi megoldásunk ezek felhasználásával készült.

A standard Vicsek modellben szándék ugye nem jelenik meg, ott az egyedek a szomszédaik pillanatnyi sebességét ismerik csak, és ezen információ alapján átlagolják ki saját kívánt haladási irányukat (legyen ez az átlagolt alapsebesség mostantól  $\hat{v}_i^{\text{vis}}$  minden  $i$  egyedre vonatkozóan, a „Vicsek Standard model” elnevezésből rövidítve). Az első vezető-követő modell, amiben előre kiosztott, fix szándék megjelent, a 2005-ben megjelent Couzin modell volt [53].

#### 7.3.1. Couzin modell

A Couzin-féle vezető (*leader*) modell a Vicsek modell egyszerű általánosítása, melyben minden egyed kap egy  $[0, 1]$  tartományon értelmezett  $w_i$  szándék faktort, ami előre definiált vezetők esetére fixen 1 értékű, mindenki másra pedig 0 értékű. A Couzin modell azt hivatott vizsgálni, hogy informált egyedek milyen hatékonyan

### 7.3. Az adaptív hierarchikus irányítás modellje

tudják nem informált társaikat a megfelelő kívánt irányba ( $\hat{\mathbf{d}}$ ) terelni a csoportátlag helyett, az alábbi modell szerint:

$$\hat{\mathbf{v}}_i^{\text{CoLd}}(t + \delta t) = \mathcal{N} \left( (1 - w_i) \hat{\mathbf{v}}_i^{\text{ViSt}} + w_i \hat{\mathbf{d}}_i \right), \quad (7.1)$$

ahol  $\mathcal{N}(\mathbf{v}) = \mathbf{v}/|\mathbf{v}|$  a  $\mathbf{v}$  vektor normálvektorát adja vissza.

Megjegyzendő, hogy a Couzin modellben az egyedek a többiek szándékát nem, csak a sajátjukat veszik figyelembe.

#### 7.3.2. Cavagna modell

Egy másik általunk felhasznált alapmodell a Cavagna és társai által 2015-ben létrehozott inerciális spin modell [109]. Ez a részecskefizikai alapokon nyugvó modell konstans sebességnagyságot, és egy sajátperdület, azaz spin, mint generátor által meghatározott sebesség irányt feltételez, ami a konstans sebességnagyság miatt szuperfolyékony tulajdonsággal írható le az alábbiak szerint:

$$\hat{\mathbf{v}}_i^{\text{CaSp}}(t + \delta t) = \mathcal{N} \left( \mathcal{R} [\mathbf{v}_i(t), s_i^{\text{ViSt}}(t) \delta t] \right), \quad (7.2)$$

ahol  $\mathcal{R}[\mathbf{v}; \theta]$  a  $\mathbf{v}$  vektort az  $x$ - $y$  síkon  $\theta$  szöggel forgató operátor. A spin  $s_i^{\text{ViSt}}$  az aktuális sebességet a  $\hat{\mathbf{v}}_i^{\text{ViSt}}$  sebesség felé igyekszik forgatni az alábbi dinamikai egyenlet szerint:

$$s_i^{\text{ViSt}}(t + \delta t) = s_i^{\text{ViSt}}(t) e^{-\frac{\delta t}{\tau}} + J \left[ \frac{\mathbf{v}_i(t)}{v_{\text{flock}}} \times \hat{\mathbf{v}}_i^{\text{ViSt}} \right] \cdot \hat{\mathbf{e}}_z \delta t, \quad (7.3)$$

ahol  $\hat{\mathbf{e}}_z$   $z$  irányú egységvektort jelöl,  $J$  egy csatolási erősség a sebességkülönbségek és a spin között,  $\tau$  pedig a spin karakterisztikus ideje ( $\tau \rightarrow 0$  visszaadja a ViSt modellt, míg nagy értékek esetén spin hullámok söpörnek végig a rajon egyenlő sugarú forgást eredményezve az egyedek között).

#### 7.3.3. Adaptív szándék alapú modellek

A mi új modelljeink feltételezése tehát az, hogy az egyedek felismerik társaik *szándékát*, ami vagy a mozgásformájuk és apró rezdüléseik alapos ismerete és folyamatos figyelése útján lehetséges, vagy passzív jelzéssel vagy aktív kommunikációval. Megjegyzendő, hogy a féklámpa vagy az irányjelző a közutakon pontosan ezt a szándék jelző célt szolgálja, nélkülük sokkal magasabb lenne a követők reakcióideje és jelen-tősen több a forgalmi baleset.

A modellekben minden egyed szándékát továbbra is a  $w_i$  változó határozza meg, de ez most nem állandó és rögzített, mint a Couzin modellben, hanem információ vezérelt (ha új hiteles információt kap az egyed, például meglát egy közeledő falat, 1-re nő a szándék, és idővel szépen lecsökken). Azaz a mi modellekben bárki lehet

vezető (szakértő), akinek új hiteles információ jut a birtokába, hasonlóan a korábban ismertetett episztokráciához. Emellett az új modellekben az egyedek a Couzin modellt meghaladva immáron nem csak a saját, hanem a szomszédaik szándékát is figyelembe veszik, súlyozott átlaggal.

Három új szándék alapú modell változatot készítettünk. Az első kettő a korábbi Couzin és Cavagna modellek kiegészítése adaptív folytonos szándékkal, a harmadik egy kombinált végső modell minden eddig felmerülő előnyös új tulajdonságot összegyúrva.

### WiSt modell

Az első új modell a Vicsek/Couzin modellek kiterjesztése:

$$\hat{\mathbf{v}}_i^{\text{WiSt}}(t + \delta t) = \mathcal{N} \left( \hat{\mathbf{v}}_i^{\text{CoLd}} + \sum_{j \in N_i} w_j \frac{\mathbf{v}_j(t)}{v_{\text{flock}}} \right), \quad (7.4)$$

ahol a „Wi” elnevezés részlet a szándékra (*will*), a „St” pedig a kiterjesztett Vicsek/Couzin standard modellre utal. Ebben az új modellben a korábbihoz képest egyszerűen megjelenik a szomszédok szándékának súlyozott összegét adó sebességkomponens.

### WiSp modell

A másik új modell a Cavagna spin modell kiterjesztése:

$$\hat{\mathbf{v}}_i^{\text{WiSp}}(t + \delta t) = \mathcal{N} \left( \mathcal{R} \left[ \mathbf{v}_i(t), s_i^{\text{WiSp}}(t) \delta t \right] \right), \quad (7.5)$$

ahol a 7.3 egyenlettel analóg módon a spin időbeli evolúciója az immáron *szándék*-kal súlyozott sebességhez az alábbi:

$$s_i^{\text{WiSp}}(t + \delta t) = s_i^{\text{WiSp}}(t) e^{-\frac{\delta t}{\tau}} + J \left[ \frac{\mathbf{v}_i(t)}{v_{\text{flock}}} \times \hat{\mathbf{v}}_i^{\text{WiSt}} \right] \cdot \hat{\mathbf{e}}_z \delta t. \quad (7.6)$$

### WillFull modell

Végül ezek egyfajta kombinációjával, az egyes modellek előnyös tulajdonságait ötvözve készítettük el végső szándék alapú adaptív vezetői modellünket. Ebben a végső modellben a szándékot előjeles mennyiségként kezeltük, ahol a + irány jelentette a balra fordulás, a – pedig a jobbra fordulás szándékát. Az egyedek egyrészt súlyozzák a szomszédos egyedek szándékának abszolút értékét, másrészt figyelembe veszik azok döntési *irányát* is, hogy egy falhoz érve értelemszerűen azt az irányt válasszák, amerre társaik is fordulnak, hogy a csapat együtt maradjon. Ha még egyik szomszédnak sincs szándéka, az egyed a kisebb fordulást igénylő irányt vá-

#### 7.4. Eredmények

lasztja a sima szomszédátlagból adódó kívánt sebességirány „szociális kontextusa” alapján.

A falat megpillantva az egyedek saját szándék értéküket tehát maximális +1 vagy -1 értékre növelik a kívánt fordulási irány függvényében, ez az érték pedig idővel lecsökken, ahogy az információ újdonságereje elenyészik. A gyors csoportos döntést és nagy csoportos fordulási hatékonyságot a végső modellben ennek az irányfüggő szándék értéknek a mozgásnál jelentősen gyorsabb kommunikációs hálózaton történő decentralizált terjedése biztosítja, hasonlóan pl. a COVID-ról hallott első hírek utáni fegyelmezett és azonnali otthonmaradáshoz, ami időben megelőzte a vírus fizikai terjedését (csak ott – ha már előkerült ez az analógia – a szándék karakterisztikus időbeli lecsengését meghatározó paramétert túl kicsire „választottuk” és hamarabb előmerészkedtünk otthonunkból, mint szabadott volna, pedig egy COVID-hoz hasonló járvány teljesen eltüntethető a világjárvány időskálájához képesti relatív rövid idejű, de tényleg szigorúan teljes izolációval! Nem baj, majd legközelebb...).

Visszatérve a modellünkhöz, mindez matematikai formában a következő alakot ölti:

$$\hat{\mathbf{v}}_i^{\text{WillFull}}(t + \delta t) = \mathcal{N} \left[ (1 - \Omega_i) \mathcal{R} \left[ \mathbf{v}_i(t); s_i^{\text{WiSt}}(t) \delta t \right] + \Omega_i v_0 \hat{\mathbf{v}}_i^{\text{WiSt}} \right], \quad (7.7)$$

ahol

$$\Omega_i = \max \left( |w_i|, \sum_{j \in N_i} |w_j| / (1 + \sum_{j \in N_i} |w_j|) \right). \quad (7.8)$$

Ez a modell tehát azt a célt tűzte ki, hogy ötvözze az eddig bemutatott modellek előnyeit. A CoLd modell sémáját használja a (ritka) szándékkal rendelkező és a (túlnyomórészt) szándék nélküli egyedek megkülönböztetésére. A többség számára az információ a CaSp modell alulcsillapított spin alapú hullámterjedésével propagálódik indirekt módon. A spin hullámok kezdeményezői azonban a „kiválasztott”, szándékkal rendelkező egyedek, akik megbízhatóan találnak konszenzust egymás között a túlcsillapított dinamika és a ViSt modell közvetlen sebességillesztésének alkalmazásával. A szándék nélküli egyedek, akiknek épp jelentős szándék „akarat” van a környezetükben, nem foglalkoznak a spinnel, hanem közvetlenül a látható vezetőket követik. A szándék felismerése felerősíti az új információt, ha az jelen van, így a csoport összességében anélkül lesz igen reaktív, hogy elveszítené a stabil tartós mozgás fenntartásának képességét.

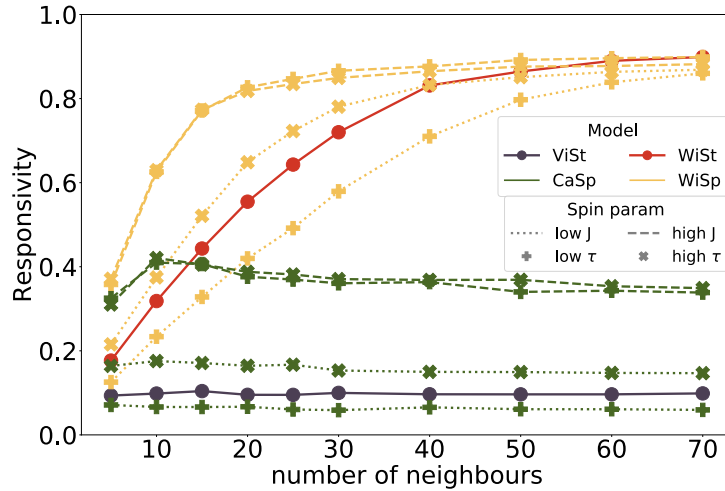
#### 7.4. Eredmények

A különböző modellek stabilitását (perzisztenciáját) és reakciókészségét (reszponzivitását) a szokásos módon első körben realiztikus szimulációban vizsgáltuk. A rezonanzivitás méréséhez az egyedeket egy adott irányban indítottuk, majd egy

kiválasztott egyedek egy adott időpillanatban elforgattunk 90 fokkal, és azt mértük, hogy egy bizonyos idő után a rendszer összessége mennyire vette fel ezt az új irányt. A perzisztencia méréséhez egyszerűen elengedtük egy irányba az egyedeket, és hosszú távon vizsgáltuk, hogy a csapat sebessége mennyire kalandozik el az eredeti sebességtől a realiztikus szimulációban jelen lévő zaj tagok hatására. A pontos mérési leírást [T7] tartalmazza.

### 7.4.1. Megnövekedett rezponzivitás

A modellek egyszerű és igazságos összehasonlításához első körben taszító kölcsönhatás nélküli, topológiai szomszédsági alapokon nyugvó szimulációkat futtattunk 100 egyedben. A 7.3. ábra alapján a várakozásnak megfelelően a Vicsek/Couzin modell rezponzivitása a legalacsonyabb, mivel az átlagolás elmosza az egyéni igényeket, a Cavanga modell rezponzivitása egy bizonyos szintig növelhető a  $J$  és  $\tau$  paramétereinek hangolásával, de a legjobb rezponzivitást egyértelműen az új szándék alapú modellek adják, ráadásul ezekben a rezponzivitás messze a többi modell teljesítőképessége fölé növelhető a topológiai szomszédok számának emelésével.



7.3. ábra. Különböző vezető-követő modellek rezponzivitásának összehasonlítása realiztikus szimulációban a topológiai szomszédok számának függvényében. Forrás: [T7]

További eredményünk lett, hogy az új szándék alapú modellekben a rezponzivitás az egyedszámok skálázásával is megmarad, és ahhoz, hogy egy adott rezponzivitás értéket megtartsunk, a  $k$  szomszédszámot csak  $\sqrt{N}$  egyedszámfüggés szerint szükséges növelni. Részletek: [T7].

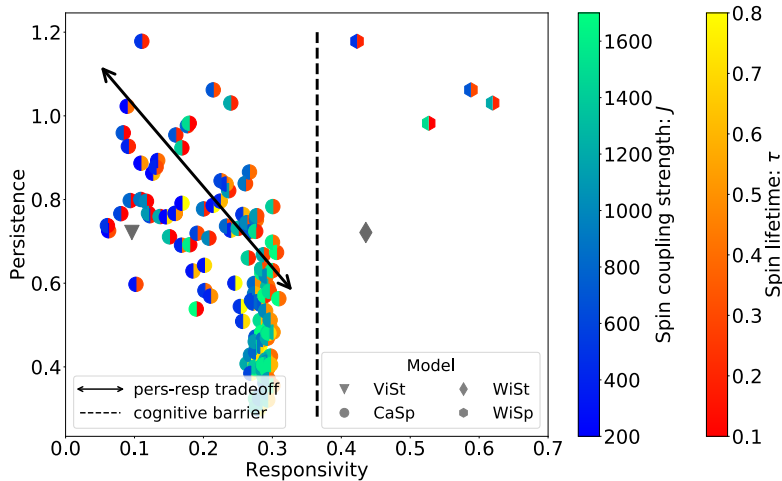
### 7.4.2. Kilépés a perzisztencia-rezponzivitás kompromisszumból

Az új modellek figyelemreméltó tulajdonsága, hogy a rezponzivitásukat úgy tudták növelni, hogy közben a perzisztencia értékük nem romlott. Amikor nincs új információ a rendszerben, akkor a szándék alapú modellek pontosan úgy viselkednek,

7.4. Eredmények

mint a szándék nélküli elődeik és tartják stabil irányukat belső fluktuációktól mentesen. Amikor viszont megjelenik valami hatás, amire reagálni kell, azt az elől lévő egyedek azonnal jelzik a megváltozó sebességirányuk erőteljes szándék jelzésével, és így a raj ezt a szándékot magas súlyozással tudja végig propagálni magán, sűrűség-ingadozások nélküli, lényegében instant, vagy legalábbis jelentősen megemelkedett terjedési sebességű, csoport szintű irányváltásokat létrehozva.

E két legfontosabb minőségi dimenzió együttes mérését mutatja a 7.4. ábra.

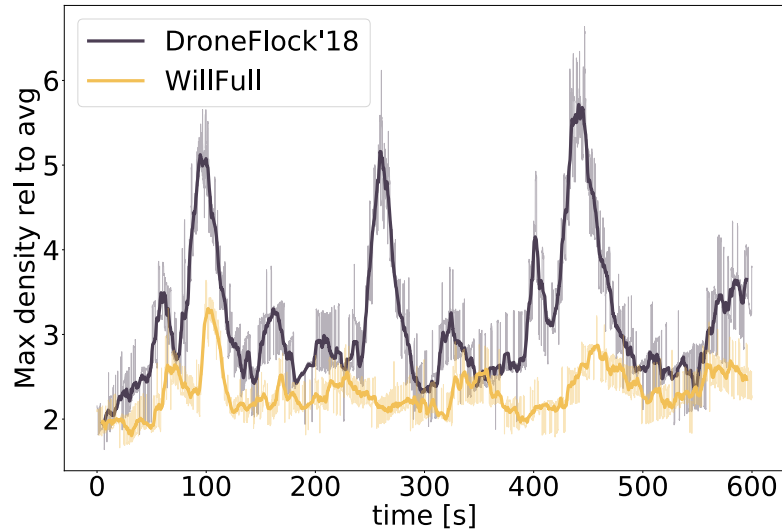


7.4. ábra. Különböző vezető-követő modellek együttes perzisztenciájának és rezponzivitásának összehasonlítása realisztikus szimulációban. Forrás: [T7]

A fenti ábrán láthatóan a Vicsek/Couzin modell hozza az elvárható relatív magas perzisztencia és alacsony rezponzivitás értéket, míg a spin alapú Cavagna modellek paraméterhangolással állíthatók a perzisztencia és rezponzivitás Pareto-frontján, kompromisszumban (fekete ferde nyíl). Az új adaptív szándék alapú modellek képesek egyedül egyszerre kielégíteni a stabilitás és reakciókészség együttes elvárásait, átlépve a kognitív határon (szaggatott függőleges vonaltól jobbra, jobb felső sarok).

7.4.3. Kísérleti eredmények

A modellekkel természetesen teljes értékű, immáron ütközéssel ellátott realisztikus szimulációkat is futtattunk (többezres egyedszámig), valamint a szokásos módon a valódi drónjainkra is ráprogramoztuk (2020-ban 50 db drón állt rendelkezésünkre ehhez a kísérlethez). A szimulációs eredmények alapján a négyzetes arénába zárt raj immáron a korábbiaknál jelentősen kisebb sűrűség-ingadozással tudott közlekedni (7.5. ábra).



7.5. ábra. A 5. fejezet rajrepülési modelljén (*DroneFlock'18*) és az új adaptív szándék alapú hierarchikus modellen (*WillFull*) futtatott realisztikus szimulációk összehasonlítása. Az egyedsűrűség az új modellben sokkal állandóbb, mint a korábbi modellben, a falhoz érve az egyedek nem tömörülnek össze, hanem gyors irányváltással közlekednek tovább. Forrás: [T7]

Végül, de nem utolsósorban, az új modellel jött létre a fejezet elején bemutatott második címlapfotós publikációnk (7.1. ábra, jobb oldal), valamint az azt támogató alábbi kiegészítő videók:

- Reszponzivitás mérés a különböző modellek vizuális összehasonlításával:  
<https://youtu.be/6rbA-kmyADs>
- 500 egyedes rajszimulációk zárt térben (modell: Science Robotics, 2018):  
<https://youtu.be/QyYUEOOWf9E>
- 500 egyedes rajszimulációk zárt térben (modell: Interface, 2020):  
<https://youtu.be/12Xp0eig6Uk>
- 52 drónos valódi rajrepülés a WillFull modellel (érdeemes megfigyelni a felszállás utáni első csoportos döntést, ahogy a drónok immáron lényegében azonnal megtalálják a közös haladási irányt):  
<https://youtu.be/87y3AsUOCaQ>

## 7.5. A fejezethez kapcsolódó tézispont

Megállapítottuk, hogy a csoportosan mozgó, sok edegyes önhajtott rendszerek inherensen rendelkeznek a fluktuáció-disszipáció tétellel analóg belső korláttal, mely szerint a rendszer reakciókészsége (vö. fluktuáció) és stabilitása (vö. disszipáció) egymással direkt kompromisszumkényszerben állnak, azaz párhuzamos teljesülésüknek alapvető elvi akadálya van. Megmutattuk, hogy ez a kompromisszumkényszer megkerülhető, ha az egyedek aktív információátadással segítik egymást, illetve ké-

## 7.5. A fejezethez kapcsolódó tézispon

---

pesek a környezetükből származó indirekt információ intelligens feldolgozására és értelmezésére.

Ezt demonstrálandó, az ágens alapú modellünkbe bevezettünk egy információtartalom alapú, pillanatnyi vezető-követő hierarchiát, és az egyedek lokális, decentralizált döntéseit az egyenrangú szomszédhatások helyett ezen – jövőre vonatkozó, egyedi környezetérzékelés alapján kialakított mozgási szándék jelzésére szolgáló – információtartalom mentén súlyozva kevertük ki. Az új modellünkkel minden korábbi eredményünket meghaladó hatékonysággal tudtuk virtuális zárt térben demonstrálni a nagy egyedszámú rajok stabil és egyben reakciókész csoportos mozgását: szimulációban 250 egyeddel, terepi kísérletekben 50 autonóm drónnal.

Eredményeink indirekt módon sugallják, hogy a természetben megfigyelt egyszerre stabil és reakciókész állatcsoportok intelligens környezetérzékeléssel és/vagy aktív, csoportos navigációra vonatkozó kommunikációval rendelkeznek, valamint erős visszacsatolást adnak az emberi társadalmak számára is a szintén lokális információtartalom alapú, lokális szakértői civil munka és/vagy szakértői kormányzás jelentőségéről és potenciális hatékonyságáról.

Kapcsolódó publikáció: [T7] (2020).

## 8. fejezet

# Drónforgalom prediktív útvonaltervezéssel

Ebben az utolsó fejezetben jórészt már csak a babérijait aratjuk le az előző fejezetben bemutatott megoldásoknak, koncepcióknak és elkészült rendszereknek, azáltal, hogy minden eddigi tudásunkat egy olyan általános drón forgalmi megoldásba szintetizáljuk, mely tetszőlegesen skálázható mind sebességben, mind egyedszámban, és képes kezelni heterogén ágenseket és ágensek közti páronként hierarchikus prioritási viszonyokat is.

Mindehhez az 6. fejezet forgalmi modelljét vesszük alapul, megtartjuk a 7. fejezet fő általános üzenete alapján az egyedek *szándékának*, azaz sebességének és célpontjának aktív megosztását, és ezen információk alapján a modellt decentralizált, sebesség alapú prediktív útvonaltervezéssel egészítjük ki.

A csoportos prediktív útvonaltervezésről tudni érdemes, hogy az az eredeti utazóügynök problémához nagyon hasonló NP-teljes probléma, azaz a centralizált megoldása az egyedszám és/vagy a predikciós időtáv növekedésével rendkívül számításigényessé válik. Ennek ellenére számos centralizált numerikus megközelítést találunk a szakirodalomban, amivel egy adott szituációra rajok útvonalai előre tervezhetők, például GPU-ra optimalizált gradiens módszerrel [110], gráfelméleti alapokon [111], hangya kolónia optimalizálással [112], vagy egyéb módokon [113, 114].

Az ismereteim szerinti eddigi legnagyobb drónszámú centralizált, valós idejű, ún. „Distributed Model Predictive Control” alapokon nyugvó útvonaltervező 20 miniatűr beltéri drón irányítására volt képes [115], amiknek pozíciója a tervező bemenekeként egy kamerarendszeren át milliméter pontossággal és nagy időbeli felbontással ismert. Ilyen akkurátus bemenet a sztochasztikus kültéri gyakorlatban nem igazán áll rendelkezésünkre.

Decentralizált útvonaltervező megoldások szintén születtek drónrajokra, de ezek a „swarm” szó valódi jelentését abuzálva maximum néhány, két-három drónra lettek

## 8.1. Decentralizált prediktív forgalmi modell

---

demonstrálva [116, 117]. 2024-ig a drónrajos decentralizált útvonaltervezés egyed-szám rekordját még mindig a mi 2018-as korábbi cikkünk tartotta 30 drónnal [T6], amit most az ebben a fejezetben tárgyalt megoldással 100 drónosra fogunk bővíteni kísérletben, és 5 000 drónosra realiztikus szimulációban.

### 8.1. Decentralizált prediktív forgalmi modell

Az új modellünket három fő komponensből építjük fel. Az egyik komponens a már korábban bevezetett anizotróp taszításból és szelektív sebességillesztésből összeálló „ösztönös” és jól bevált ütközésselkerülő (sense-and-avoid) tag, pontosan abban a formában, ahogy azt a 6. fejezetben bemutattuk. A második komponens a szintén korábban bemutatott sorban állási kölcsönhatás, szintén változatlan formában.

A harmadik komponens a prediktív útvonaltervezés, ami a szokásos önhajtó sebes-ségtagunknak egy olyan intelligens változata, amely minimalizálja a jövőben fellépő közlekedési konfliktusok számát, tehermentesítve az ütközésselkerülési eljárásokat és megelőzve ezzel a bajt. Fontos ugyanakkor megjegyezni, hogy az útvonaltervező-nek nem kell szükségszerűen ütközésmentes trajektóriát előállítania, mert számíthat az ütközésselkerülő komponens és a többi drón együttműködésére is a gyakorlati problémák megoldásában. Ez óriási könnyebbség, mert így nem kell az NP-teljes problémát kínkeservesen megoldani, elég egy kellően jó, de egyszerű megoldást találnunk, ami cserébe valós időben biztonsággal futtatható kis teljesítményű onboard számítógépeken is, gyors iterációban.

Az általunk készített útvonaltervező nem csupán a pillanatnyi ismert szomszéd pozíciók alapján, hanem a szomszédok *sebességének* figyelembevételével térképezi fel az akadályokat, és ilyenformán a „velocity obstacle” (VO) eljárások csoportjába tartozik [118]. Már itt megjegyezzük, hogy ezen a vonalon továbbmenve még pontosabb tervezőt lehetne kidolgozni a gyorsulások, vagy a gyorsulások deriváltjának (jerk) figyelembevételével, de ehhez ezeket a mennyiségeket is nagy pontossággal ismerni kellene valós időben vagy szándék szerint, és ez a jelenlegi kültéri és pontatlan drón architektúrákban nem igazán áll még rendelkezésre megbízhatóan, így most maradjunk a sebességeknél, mint legmagasabb derivált, és ennek is örülünk, mert ez is előrelépés a korábbiakhoz képest.

Az útvonaltervező csoportérdek szerint tervez, altruista és együttműködő módon. Azaz azzal együtt, hogy a drón saját pályáját is optimalizálja, egyben olyan pályát generál, ami másoknak is könnyebbség, és ahol kell, ott udvarias, türelmes, megadja az elsőbbséget annak, akinek értelemszerűen jár. Mivel ugyanaz a tervező van a többi drónon is, ezzel a kölcsönös udvariassággal és együttműködéssel ki lehet törni a közlekedési problémájának, a foglydilemmának és egyéb játékelméleti börtönöknek a fogságából és valódi csoportérdek szerinti optimalizációt lehet elvégezni, ami nem csak az eredmények hatékonyságát növeli, de a léleknek is gyönyörködtető – bárcsak így tudna működni az emberi világunk is minél több szintéren...

### 8.1.1. Az önhajtás döntési kritériumrendszere

Az aktuálisan kívánt önhajtó sebességtagot a drónok a modellünkben minden pillanatban iteratív módon határozzák meg. Legyen  $\mathbf{v}_i^{(s)}$  az  $i$ -dik egyed  $s$ -dik iterációban meghatározott ajánlott önhajtó sebessége, és  $t_{\text{plan}}^{(s)}$  az idő, amennyire az  $s$ -dik iterációban előre tervezzük a jövőbe. Az első iterációban mutasson  $\mathbf{v}_i^{(0)}$  az egyed aktuális célpontja felé  $v_{\text{flock}}$  nagysággal,  $t_{\text{plan}}^{(0)}$  pedig legyen a célponthoz érés ideje.

Egy adott iterációban akkor kezelünk egy szomszédot *veszélyesként*, ha az alábbi négy veszélyességi kritérium (D=danger) közül *mindegyik egyszerre* teljesül:

D1. A szomszéd az utamban áll egy bizonyos  $R^{\text{avoid}}$  sugáron belül, azaz a sebességkülönbségünk  $\Delta\mathbf{v}_{ij}^{(s)} \equiv \mathbf{v}_i^{(s)} - \mathbf{v}_j$  és a pozíció különbségünk  $\mathbf{r}_{ji} \equiv \mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i \equiv d_{ji}\hat{\mathbf{n}}_{ji}$  (ahol  $\hat{\mathbf{n}}_{ji}$  egy  $\mathbf{r}_i$ -ből  $\mathbf{r}_j$ -be mutató egységvektor,  $d_{ji}$  a  $j$  szomszédomtól való távolság) kisebb, mint  $\text{asin}(\min(R^{\text{avoid}}/d_{ji}, 1))$  (lásd 8.1. ábra,  $\theta$  mennyiség).

D2. A sebességkülönbségünk nagyobb, mint az optimális fékezési görbe (5.3 egyenlet) szerinti megengedett maximális sebesség, azaz:

$$\Delta\mathbf{v}_{ij}^{(s)} \cdot \hat{\mathbf{n}}_{ji} > D(d_{ji}, R^{\text{avoid}}, p^{\text{avoid}}, a^{\text{avoid}}).$$

D3. A másik egyedhez saját szándékom szerint közeledem és nem távolodok tőle, azaz  $\mathbf{v}_i^{(s)} \cdot \hat{\mathbf{n}}_{ji} > 0$ .

D4. Hamar érünk veszélyesen közel egymáshoz, azaz  $(d_{ji} - r^{\text{avoid}}) / |\Delta\mathbf{v}_{ij}| < t_{\text{plan}}^{(s)}$ .

Amennyiben egy adott iterációban nincsenek veszélyesnek ítélt szomszédok a közelenben, a ciklusból kilépünk és a legutóbbi ajánlott sebesség lesz a végső önhajtó sebességtag. Ha van legalább egy veszélyes szomszéd, akkor kiválasztjuk azt, amelyik a leghamarabb jutna veszélyesen közel hozzánk – legyen ez a  $k$ -dik egyed (lásd 8.1. ábra, narancssárga szomszéd). Ezután az alábbi geometriai megfontolások alapján hozott kritériumok (C) szerint határozzuk meg a következő iteráció ajánlott sebességét,  $\mathbf{v}_i^{(s+1)}$ -t:

C1. A *relatív* sebesség nem mutathat a szomszéd irányába, azaz  $\Delta\mathbf{v}_{ik}^{(s+1)}$ -t ki kell forgatni az  $\mathbf{r}_k$  köré emelt  $R^{\text{avoid}}$  sugarú kör látószögéből.

C2.  $\Delta\mathbf{v}_{ik}^{(s+1)}$ -nek az  $\hat{\mathbf{n}}_{ki}$  által meghatározott egyenes ugyanazon oldalára kell esnie, mint  $\Delta\mathbf{v}_{ik}^{(s)}$ , hogy megtartsuk a jobb- vagy balkékszabályt az iterációk között, azaz ugyanazon az oldalon kerüljük a  $k$  egyedet mint a korábbi iterációban.

C3.  $|\mathbf{v}_i^{(s+1)}| \leq |\mathbf{v}_i^{(s)}|$ , hogy ne gyorsulhassunk fel az iterációk között.

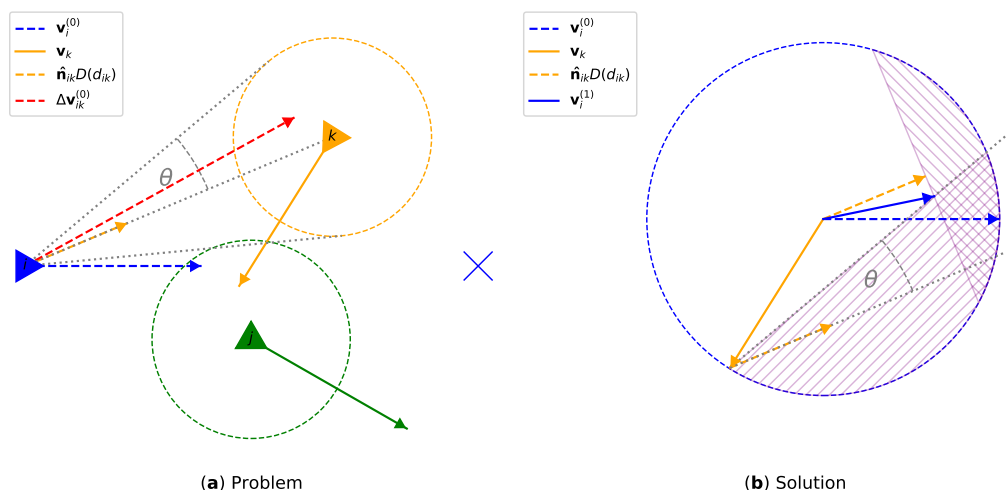
C4.  $\mathbf{v}_i^{(s+1)} \cdot \hat{\mathbf{n}}_{ki} \leq D(d_{ki}, R^{\text{avoid}}, p^{\text{avoid}}, a^{\text{avoid}})$ , hogy meg tudjunk állni a szomszédal való ütközés előtt.

C5.  $\mathbf{v}_i^{(s+1)} \cdot \mathbf{v}_i^{(s)}$  maximumára kell törekedni, hogy minél magasabb legyen az effektív sebességünk a célpontunk felé haladva.

8.1. Decentralizált prediktív forgalmi modell

Az új  $\Delta \mathbf{v}_{ik}^{(s+1)}$  ajánlott sebességet ezután a következő iterációban ismét végigfuttatjuk a  $D$  veszélyességi kritériumainkon, és így tovább, amíg a ciklusunk be nem zárul.

A veszélyességi és geometrikus kritériumrendszerek vizuális megjelenítését a 8.1. ábra tartalmazza egy példa szituációra.



8.1. ábra. A prediktív útvonaltervező modell önhajtó tagjának meghatározása. A bal oldali szituációban a két egyed kíván haladni a két  $X$  jelű célpontja felé. A zöld egyed nem áll a  $D$  kritériumok szerint az útjában, de a narancssárga igen, rá mind a négy  $D$  kritérium teljesül. Az ábra jobb oldala az eredeti sebességvektort (kék szaggatott nyíl) és a narancssárga egyedet elkerülő végső sebességvektort (kék nyíl) mutatja a  $C$  geometriai kritériumok alapján. A sebességnek  $C3$  szerint a kék szaggatott körön belül kell lennie, hogy ne gyorsuljon fel az egyed.  $C1$ - $C2$  és  $C4$  miatt nem lehet a lila sátozott területeken.  $C5$  szerint a megmaradó lehetőségek közül a legnagyobb sebességet kell választania a célja irányába. Forrás: [T8]

Megjegyzendő, hogy ez az iteratív algoritmus első körben forgatja, de ha az nem elég, akkor lassítja is az ajánlott sebességet, ilyenmódon a 6. fejezetben először bemutatott FIFO és CV algoritmusoknak valamilyen fajta evolválts keverékét adja. Emellett míg a korábbi megoldásban a szomszédok statikus objektumként voltak kezelve egy adott pillanatban (tehát aszerint a 8.1. ábra bal oldalán a zöld szomszéd látszott volna konfliktusosnak és nem a sárga), most mozgó objektumokként vesszük figyelembe őket a pályatervezéshez.

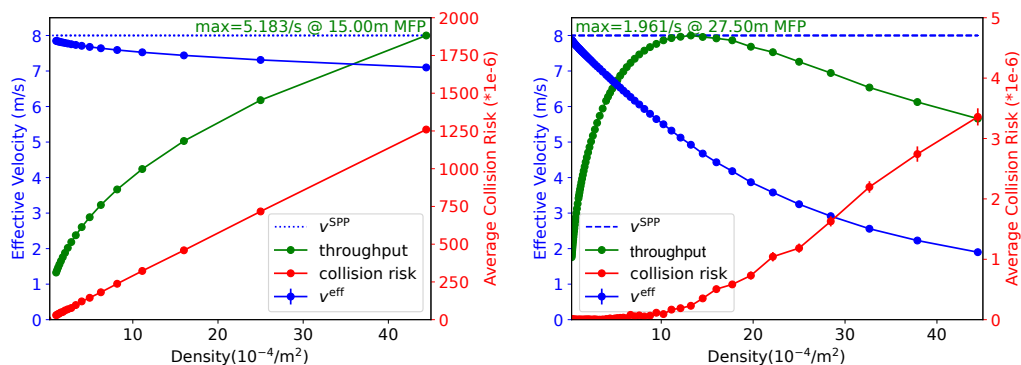
Végül, fontos kiemelni, hogy a mi modellünk nem tervez a szó szoros értelmében előre teljes 4D útvonalat, hanem csak annak minden pillanatban minimálisan szükséges részét adja meg, azaz az optimálisan meghatározott haladási irányhoz tartozó aktuális pillanatnyi kiinduló sebességvektort, ami ugyanakkor figyelembe veszi a közelgő veszélyek aktuális és jövőbeli állapotát is. De mivel az algoritmus gyors és folyamatosan frissül, végeredményben ez az eljárás is többnyire folytonos és szép elkerülő trajektóriákat eredményez. Természetesen vannak helyzetek, amit ez a tervező nem tud ebben a formában optimálisan kezelni (pl. konkáv objektumok közötti

haladás), de a drónok koordinált közös forgalmára nagy hatásfokú megoldást ad.

## 8.2. Eredmények

### 8.2.1. Skálázható, hatékony forgalmi szimulációk

A modell realiztikus szimulációs vizsgálatához ezúttal  $L \times L$  méretű négyzetes arénát használtunk, a célpontok az aréna peremén voltak véletlenszerűen generálva, egy adott egyedre mindig legalább  $L/3$  távolságra az előző célponttól, hogy az útvonalak többnyire keresztezzék egymást. A 6. fejezethez hasonlóan az evolúciósan optimalizált paraméterhangolás utáni első szimulációkból a forgalom alapábráját készítettük el, 100 egyedre, 8 m/s utazósebességgel (8.2. ábra).



(a) Interakció nélküli null-modell

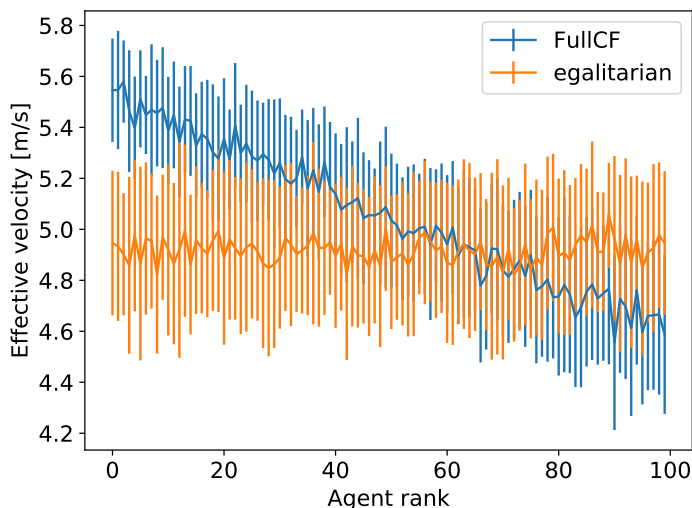
(b) Optimalizált forgalmi modell

8.2. ábra. Forgalmi statisztika 100 egyedre a sűrűség függvényében. **Bal oldal:** párkölcsönhatások nélküli nullmodell teljesítménye annak illusztrálására, hogy milyen sok forgalmi konfliktus van eredendően a szimulációs elrendezésben, és mennyi lehetne az elméleti maximális forgalmi fluxus. **Jobb oldal** Az prediktív útvonaltervezéssel ellátott forgalmi modell teljesítménye. Minden pont 100 db 10 perces szimuláció átlaga. A standard hiba olyan kicsi bizonyos mennyiségekre, hogy nem látszik az ábrán. A maximális forgalmi fluxus nagyságrendileg csak fele az elméleti maximumnak, ám a hozzá tartozó ütközési kockázat minimális (a nullmodellhez képest 1 : 2500 arányú). Az ideális pont sűrűséghez tartozó szabad úthossz csupán 27.5 m. Az ábrát az előző forgalmi modell hasonló ábrájával is érdemes összevetni (6.4. ábra), a maximális fluxus a korábbinak körülbelül kétszerese, a szabad úthossz pedig körülbelül 2/3-a, mindez megemelkedett ütközési kockázat nélkül. Forrás: [T8]

Az új modell az előzőhöz képest nagyságrendileg 2/3-nyi szabad úthossz mellett kétszeres forgalmi fluxust képes elérni megemelkedett ütközési kockázat nélkül. Emellett az új modellel 100 helyett immáron 5000 egyed hasonlóan stabil forgalmát tudtuk szimulálni, és sebességben is fel tudtunk menni 16 m/s-ig, ami forgórotoros drónok esetében a legtöbb igényt kielégíti. További képessége ennek a modellnek, hogy nincs benne a priori feltételezés a szomszédok sebességét illetően, azaz ugyanolyan hatékonysággal tudja megoldani a heterogén sebességeloszlású igényeket.

### 8.2.2. Hierarchikus elsőbbségi viszonyok szimulálása

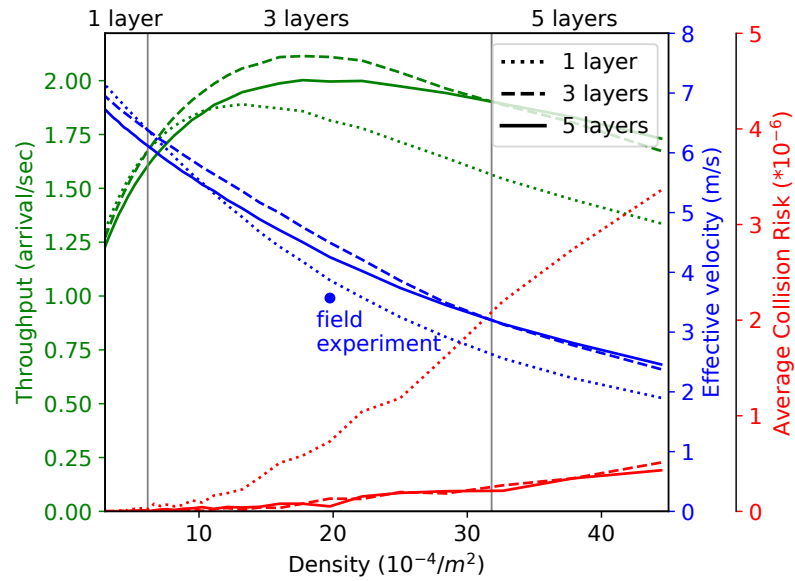
A modellbe bevezethetünk páronkénti hierarchikus prioritás viszonyokat is (mint pl. egy mentőautó és egy személyautó esetében), egyszerűen az elkerülési sugár megváltoztatásával. Két egyenrangú egyed esetében az elkerülési sugár szimmetrikus, alá-fölé rendeltség esetén a prioritással rendelkező egyed egyszerűen kisebb sugáron igyekszik kerülni társait, mint a társai őt. Mivel az elkerülés kölcsönös, az továbbra is a nagyobb sugáron fog végbe menni, de az alárendelt egyed fog nagyobbat kerülni, míg a prioritást élvező egyed egyenesebben haladhat a célja felé. A megoldás teszteléséhez egyenrangú és teljesen vertikális hierarchia modelleket hasonlítottunk össze. A szimulációk alapján a prioritást élvező egyedek effektív sebessége valóban növekszik, míg a hierarchia alján lévőké csökken (8.3. ábra).



8.3. ábra. Egyenrangú és hierarchikus prioritás viszonyok melletti forgalmi szimulációk. Az effektív sebesség a hierarchiában elfoglalt hellyel változik. Forrás: [T8]

### 8.2.3. Réteges háromdimenziós drón forgalom

Az utolsó szimulációs elrendezésben a forgalmat az eddigi kétdimenziós elrendezésből rétegesen három dimenzióssá alakítottuk úgy, hogy az elérendő célpontok mindig a bázis magasságon voltak, de az egyedek a kívánt haladási irányuk szerint osztályozva egy vagy több (praktikusan páratlan számú) rétegbe szerveződtek, elkerülve ezzel a frontális ütközési konfliktusokat (pl. 3 réteg esetén a 360 fokos vízszintes haladási iránytér három 120 fokos globális rétegre bomlik, egy adott egyed abban a rétegben halad mindig, amelyikbe a kívánt sebessége esik, a célpontok pedig a középső bázisrétegen vannak, a vízszintes haladás előtt ebből kell adott esetben kiemelkedni/lesüllyedni, a végén ebbe visszaereszkedni/felemelkedni). Az eredményeket a 8.4. ábra mutatja be.



8.4. ábra. Réteges háromdimenziós forgalmi szimulációk és valódi kísérleti repülés összehasonlítása. A sűrűség növekedésével a 3, illetve 5 réteg használata indokolttá válik a forgalmi fluxus maximalizálásához (az ábra függőleges szürke vonalakkal régiókra van bontva aszerint, hogy melyik rétegszám a leghatékonyabb épp). Az ábrán kék pötty jelzi egy 100 drónos kísérleti repülés log analiziséből származó adatot, ami jól illeszkedik a szimulációkra (a valóság szakadék relatív kicsi). Forrás: [T8]

#### 8.2.4. Sűrű drónforgalom 100 drónnal

Természetesen most se maradt el a modell kísérleti tesztelése, amit ezúttal a rendelkezésünkre álló 100 drónnal tudtunk bemutatni, két rétegű forgalmat létrehozva egy 125 m sugarú körön belül, mindig a kör éléből véve a véletlenszerű célpontokat. A repülés ütközés és érdemi probléma nélkül zajlott, a létrejövő raj olyat valósított meg, amelynek humán pilótákkal a közelébe se lehet érni (8.5. ábra).



8.5. ábra. 100 drónos sűrű autonóm forgalmi szimulációról készült videóból kivonatolt utófeldolgozott kép az egymás utáni képkockák összeolvasztásával, hogy a drónok haladási iránya is láthatóvá váljon egy képen. Forrás: [T8]

Az eredmények vizuális élményének átéléséhez szokás szerint az alábbi videókat

## 8.3. A fejezethez kapcsolódó tézispont

---

ajánlom:

- A forgalmi modell skálázhatóságának bemutatása 5, 50, 500 és 5 000 szimulált drónnal:  
<https://youtu.be/wIsKGkHs2Po>
- Heterogén sebességgel haladó drónok sűrű forgalmának szimulációja:  
[https://youtu.be/0Ms\\_wkeKxzU](https://youtu.be/0Ms_wkeKxzU)
- Réteges háromdimenziós drónforgalom szimulációja 500 drónnal, 1-4 rétegben:  
<https://youtu.be/CgcgccwPm4M>
- Nyers videó 100 kültéri drón valódi autonóm, decentralizált sűrű forgalmáról:  
<https://youtu.be/v0OJxjIp-HU>
- A drónforgalmi megoldást összefoglaló dokumentumfilm:  
<https://youtu.be/VOtu6Vmkp88>

### 8.3. A fejezethez kapcsolódó tézispont

Az ötödik tézispont drónforgalmi megoldását továbbfejlesztve, valamint bizonyos mértékig kombinálva a hatodik tézispont aktív információküldésével, általánosítottuk a decentralizált drónforgalmat irányító algoritmusunkat skálázhatóbb sebességtartományra, heterogén dinamikájú egyedek kezelésére, hierarchikus prioritásviszonyok kezelésére, valamint két dimenzió mellett réteges háromdimenziós forgalom kezelésére is.

Az új drónforgalmi algoritmus alapegyenletében alapvetően csak az önhajtó tagban különbözik lényegesen a korábbi megoldástól, annyiban, hogy a szomszédos mozgó egyedeknek nem csak a pillanatnyi helyét, de a pillanatnyi sebességét és célját is figyelembevéve tervez optimális elkerülő útvonalat, komplex új döntési heurisztika alapján.

Az új modell a korábbi eredményeket mind forgalmi fluxusban, mind biztonsági szintben messze meghaladja, emellett nagyobb sebességekre is működik és egyedszámban is jobban skálázható. Ezt demonstrálandó, eredményeinket 5 000 drónos szimuláción és 100 drónos autonóm flottán is bemutattuk, ami ezúttal is a valaha volt legnagyobb valóban önszerveződő repülő robotraj lett az emberiség eddigi történelmében.

Kapcsolódó publikáció: [T8] (2024)

## 9. fejezet

# Összefoglaló gondolatok

### 9.1. Összefoglalás

Ez a dolgozat központi tudományos anyagát tekintve elméleti és gyakorlati megoldást kínál a csoportos robot mozgás, a rajrepülés, az üldözés-menekülési helyzetek és a drón forgalmi szituációk stabil, skálázható kezelésére. Ezeknek a megoldásoknak a kulcsa tulajdonképpen a csoportos döntéshozás bonyolult és sokszínű helyzeteinek alapos megértése és megfelelő kezelése. Ebben a dolgozatban a csoportos döntéshozást decentralizált, elosztott módon közelítettük meg, megoldásaink mindegyike az *önszerveződés* alapvető bottom-up folyamataira épül. Rendszereinket az önszerveződés fogalmi irányelveinek és megközelítéseinek figyelembevételével terveztük, az alapján, ahogyan azt Gershenson a vonatkozó, önszerveződő cyber-fizikai rendszerekről szóló 2020-as review cikkében összefoglalja [119]:

- rendszereinkben megjelenik a *komplexitás*, amit realiztikus *számítógépes szimulációkkal* elemzünk és alakítunk;
- szimulációink *agens alapúak*, azaz alulról szerveződők, önszerveződők, bottom-up természetűek;
- megoldásaink *bio-inspiráltak*, ötleteinkhez a természet megoldásait vettük alapul;
- elosztott, decentralizált természetük miatt megoldásaink magától értetődően *adaptívak és robusztusak*;
- a beragadó helyzetekben a zaj és a sztochaszticitás segíti a döntések tovább lendülését, azaz a rendszerek az *antifragilitás* jeleit mutatják;
- az altruista hozzáállású konfliktuskezelő és ütközésselkerülő megoldások *mediátor* szerepet töltenek be a döntési helyzetekben;
- a forgalmi helyzetek udvarias és türelmes kezelésével a *slower is faster* effektust használva érünk el az önző hozzáállásnál hatékonyabb megoldásokat;

## 9.2. Nagy baj van

---

- rendszereink kellően általánosítottak a *heterogenitás* megfelelő kezeléséhez, ami szilárd alapot biztosít a jövőbeli emergensen komplex robot rendszerek számára.

A dolgozatban demonstrált gyakorlati eredmények egyértelműen és direktben hasznosíthatók (és vannak hasznosítva általunk is, az e célra létrehozott spinoff cégben, a CollMot Kft-ben) tetszőleges autonóm drónrendszer irányításához, az alkalmazási területek széles palettáján.

A dolgozat a drónos kontextuson túllépve olyan csoportos döntéshozatali dilemmákat és megoldásokat mutat be, melyek általános érvényűek lehetnek és sokrétűen felhasználhatók a minket körülvevő világ folyamatos döntési kényszereinek kezeléséhez.

A továbbiakban a tudományos eredmények ismételt, részletes összefoglalása helyett – amit az egyes fejezetekhez kapcsolódóan, tézispontok szerint részekre bontva már olvashattunk – inkább szabad gondolataimat szeretném leírni ezen általánosabb érvényű analógiák mentén, kitekintésként. Az alábbi gondolatok a csoportos robotikához szükséges „mindset” kivételései, melyek az elmúlt 10 év munkájából inspirálódva keringenek bennem.

## 9.2. Nagy baj van

Ventilálással kezdem, ez a XXI. század közepe felé haladva sajnos érthető szükséglet.

Aki manapság híreket olvas bármilyen fórumon a kutya-cica Facebook csoportokon kívül, az szembesülhetett valamilyen formában azzal, hogy globálisan nagyon nagy bajban vagyunk. Mindenki egy kicsit más aspektusát, okát, eredendőjét és következményét emeli ki a nagyon nagy bajnak, de az általános jövőtől való szorongás sokakban jelen van. Ezennel én is szeretnék egy  $N + 1$ -dik elemzést adni a nagyon nagy bajok okairól, ezúttal a dolgozat elméleti megfontolásainak kontextusából, elemezve azt, hogy az egész bolygót elfoglaló, sokmilliárdnyi ember problémamegoldási eszköztárában milyen – a csoportos robotikához használt statisztikus fizikával leírható – tényezők nincsenek kellő mértékben figyelembevételre.

### 9.2.1. Késleltetés

Ahogy a dolgozatban sokat elemeztük, a komplex rendszerekben már kis késleltetés is kaotikus dinamikát okoz, azaz olyan folyamatokat indukál, amiknek hosszú-, de akár közép- vagy rövidtávú kimenetele sem megjósolható, mert az aktuális állapot piciny változásainak függvényében a későbbi állapot egészen távoli értékeket vehet fel. A késleltetés tipikus velejárója a kaotikus oszcilláció, ami a körülöttünk lévő rendszerek mindenféle időskáláján megfigyelhető.

Az emberiség több évtizedes késéssel kezdte sejteni, mérni, megérteni, publikálni, szélesebb körben megismerni, megvitatni és talán mostanra még szélesebb körben

belátni, hogy az ipari forradalom, a technológiai civilizáció és általában a népesség növekedése és az emberiség térhódítása olyan mértékű változásokat okozott a bolygónkon, ami a Földi életet a jelenlegi dinamikusan stabil egyensúlyából már kizökkentette és a pusztulás irreverzibilis pályájára állította.

Mivel erre a felismerésre sok évtizedes késéssel kezdegetünk csak válaszolgatni, egyértelműen túl későn és túl enyhén reagálunk a káros folyamatokra, azokat még csak lassítanunk is nagyon nehéz, ha egyáltalán sikerül. Ha majd igazán kitör a pánik, mert már a szakadék szélén fogunk táncolni például a bőrünkön is érezhető felmelegedés mentén, akkor pedig előfordulhat, hogy olyan erős technológia által vezérelt ellenreakciót hozunk létre, ami elindítja a kaotikus oszcillációt és esetleg akár túl is lendíti a bolygót a felmelegedésből egy drasztikus lehűlésbe, vagy ezek váltakozó hullámzásába. Kaotikus dinamikában a késleltetett válasz optimális mértékét eltalálni nagyon nehéz, az oszcillációk hullámhosszával összemérhető mértékű türelmet igénylő feladat, de az biztos, hogy most még egyértelműen az alulcsillapított tartományban vagyunk, a légkör forrósodik, az óceánok melegednek és savasodnak, a jégsapkák olvadnak, az élet gyorsuló ütemben pusztul, tehát egyelőre semmi okunk nincs óvatoskodni a világ megmentésével.

Az emberiség késleltetett dinamikájához a megismerési folyamatok természetesen nagy időskáláján túl hozzájárul a komplex társadalmi rendszereink inherens nagy tehetetlensége és lassú reakcióideje, amit sem a demokráciák bürokratikus ügyintézése, sem a diktatúrák struccpolitikája nem képes egyelőre csökkenteni. Episztokratikus vagy neadjusten adaptív hierarchikus rendszert pedig még sajnos nem próbált ki senki nagyban, alternatívaként.

### 9.2.2. Egyedszám skálázás, emergens jelenségek

A föld jelenlegi (2024) lakossága 8.2 milliárd fő. Kétezer évvel ezelőtt, Jézus születésekor, hozzávetőlegesen akkor, amikor a mostani társadalmi struktúrák alapvető szabályrendszereit írni kezdtük, még csak 300 millióan voltunk a Földön. Az akkor kialakított szabályrendszerek nyilvánvalóan nem lehetnek teljes értékűen érvényesek 1-2 nagyságrenddel nagyobb és jelentősen összehuzalozottabb populációra, mert a számosság változásával minden nagyságrendnél számolnunk kell az addig nem létező, de megjelenésükkor mindent gyökeresen átforgató emergens jelenségek felbukkanásával.

Ahogy azt a dolgozat fejezeteiben is láttuk, már 1, 3, 10, 30, 50, 100 egyed igényeinek és közös működésének összehangolása során is igen különböző emergens jelenségekkel kell szembesülnünk, és ez a sor nyilvánvalóan nem áll meg 100 egyednél, hanem folytatódik 1 000, 10 000, 100 000, 1 000 000 (igen, végig fogom írni, mutatva ezzel is a nagyságrendek jelentőségét, mert a nagy számok közti különbségeket soha nem érezzük kellő súllyal), 10 000 000, 100 000 000, 1 000 000 000 és 10 000 000 000 egyedre is.

## 9.2. Nagy baj van

---

A mostani populációban más dinamikája van a világválságoknak, mint akár száz évvel ezelőtt. A demokratikus választások sokkal nagyobb számú véleményt átlagolnak, mint amikor a demokráciákat kitalálták, ami a hatalmi rendszer társadalmi szükségletekhez képesti túlegyszerűsítéséhez vezet. A mai globalizált világban az invazív fajok megjelenésének valószínűsége a korábbi szinte nulláról a folyamatos növekvő terhelés szintjére lépett. A hagyományos karácsonyfa állítási szokásunk a mostani 2 milliárd keresztény körében évente sokszáz millió fa kivágását igényli. A nagy létszámú emberiség mikroműanyag terhelése a Föld minden pórusába beitta már magát az óceánfenéktől a sztratoszféráig, egyelőre jórészt ismeretlen hosszú távú következményekkel.

A népelemszámmal lineárisan skálázódó változások mellett fontos kiemelni a nagy számok esetén hangsúlyt kapó sokadrendű effektusokat, illetve a létszámmal növekvő belső fluktuációk megnövekedését is. Egy pohár vízben ugyanaz az anyag van, mint egy óceánban, a pohárban mégsem keletkezik cunami.

A fluktuációk és sokadrendű jelenségek előtörése mentén a mostani létszámnál és összekötöttségi szinten minden korábbinál nagyobb méretű, valódi értékteremtés nélküli, öncélú csomópontok (vö. rákos daganatok) jöhettek létre pusztán azért, mert például nagyon sokan tudnak egyszerre ugyanarra a gombra kattintani (lásd celeb és influenszer kultúra). Az internet megjelenésével a nyolcmilliárd ember összekötöttsége drasztikusan megemelkedett, az egyes emberek láthatóságának súlyozása megváltozott, *a hiteles információ felhígult, zajos lett, sőt, súlyosan összekeveredett a véleménnyel, ahogy a forma a tartalommal, a felszín a mélyvel, globális tudás- és információválságot okozva*. Az interneten a globális összekötöttség ilyen fokán a fluktuációk (azaz pl. álhírek) terjedése lényegében kontrollálhatatlanná vált, illetve kizárólag csomósodott hatalmi erők által kontrollálható elárasztásos vagy eltiltós technikákkal (és ne legyenek kétségeink, a hatalom ki is használja ezt az erőfölényt).

A hiteles információ és a populista vélemény, a tartalom és a forma, a racionalitás és az ideológiák, a tények és az álhírek, az objektív és szubjektív valóság egyenrangú keveredésének, illetve ezt a hullámot meglovagolva a valóság hatalmi befolyáshatóságának egyik szomorú és tipikus friss példája az alábbi ellenpáros. A hazai vezető klímaszakértők [A klímatudomány 10 üzenete az élhető jövőért](#)<sup>1</sup> elnevezéssel nyilvános nyilatkozatot adtak ki, mely tudományos eredmények alapján igyekszik összefoglalni a folyamatban lévő, sokszorosán bizonyítottan ember által is okozott felmelegedési és kihalási hullám, tehát vészhelyzet legfontosabb tudnivalóit, összefogásra és cselekvésre buzdítva a társadalmat. Erre ellenvéleményként jelent meg egy politikai ideológia mentén szerveződő tudományos kör (!) által kiadott, és számos MTA tag által is aláírt iromány [Tíz javaslat a jövőért](#)<sup>2</sup> címmel, ami lényegében még most, 2024-ben is tagadja a gazdasági növekedés korlátait, az ember globális káros

---

<sup>1</sup> <https://www.aklimatudomany10uzenete.hu/>

<sup>2</sup> <https://pbk.info.hu/energia-munkacsoportunk-nyilatkozata/>

hatását a természeti folyamatokra, a klímavész helyzetet, a globális felmelegedést, a változtatás és cselekvés szükségességét, emellett a megállapításait emberi felsőbbrendűséggel, politikai ideológia által vezérelve, indoklás és tudományos módszertan nélkül beágyazott populista szövegekkel, gyűlöletkeltő és polarizáló beszéddel vegyíti. Szólásszabadság persze van, mindenki azt hisz és azt nyilatkozik, amit csak akar, lelke rajta. De e két, a felszínen ugyanazt a témát boncolgató, hasonló című, hasonló megjelenésű, de a részletekbe menve tartalmi színvonalban és hitelességben jelentősen eltérő írás egyenrangú súllyal és kontextussal jelenhetett meg például az ELTE TTK oktatóinak belső levelezőlistáján.

Az egyedszám növekedésből fakadó sötét emergens következmények sora a végtelenségig folytatható. A világunk mostanra olyan populációméretű és összekötöttségű, amiben a nem várt emergens jelenségek egyik pillanatról a másikra fenekestül felforgathatják az addigi rendet, és ezt csak durván túlcillapított dinamikával lehet megelőzni, amit viszont senki nem szeret, mert az nem más, mint a szabadság korlátozása.

Ezzel együtt a nép szintén emergens módon óriásira nőtt hatalmát nem igazán tudtuk még értelmes célokra felhasználni tudatos és szervezett összefogásban (pl. egyszer s mindenkorra globálisan bojkotálni a leghazugabb marketing kampánnyal rendelkező cégeket, a leginkább természetpusztító nagyvállalatokat, elűzni az elnyomó diktatúrákat stb.), de a hatalom koncentráció véletlenszerű kicsapongásainak már látható jelei vannak (lásd pl. Deák téri influenzaszörp pénzszozás).

Micsoda elképzelhetetlen, kiaknázatlan közösségi erő rejlik nyolcmilliárd emberben!

### **9.2.3. A változatosság csökkenése**

Ahogy azt a mesterséges evolúcióval is bizonyítottuk, a változatosság, a normáktól való eltérés, bizonyos mértékű jótékony zaj, belső fluktuáció vagy külső zavar elengedhetetlen kellékei a fejlődésnek és a lokális optimumba ragadt állapotokból való kilábalásnak.

Sajnos a globalizálódó világban a változatosság általános csökkenésének tendenciáját számos kontextusban megfigyelhetjük. A legégetőbb probléma az élővilág változatosságának csökkenése. Mostanra egyértelműen bizonyítottan egy globális kihálási hullámba kormányoztuk magunkat (illetve másokat), emberi eredetű okokból a velünk egy bolygón élő fajok túlnyomó része annyira elvesztette életterét, életlehetőségeit vagy életkedvét, hogy örökre eltűnt vagy épp tűnik el a Föld színéről. Ez egy rendkívül szomorú folyamat, és megint csak annál is nagyobb baj, mint gondolnánk, ugyanis a változatosság eltűnése a megmaradó élet stabilitását, robusztusságát, ellenállóképességét is veszélyezteti.

Sajnos ugyanis a bioszféra pusztulása a perkoláció elméletével leírható jelenség. Ennek értelmében pedig a mostani drasztikusan szűkülő természetes életterek aprózódása, méretcsökkenése és hálózatának lebomlása egyik pillanatról a másikra

## 9.2. Nagy baj van

---

tolja át hirtelen fázisátalakulással az életet a nemlét állapotába, ahonnan a visszaúthoz százmillió évek kellene. Ezt nem kellene megvárunk, hanem meg kellene előzünk. Már csak pár évünk maradt.

Az ember ugyan történelmi távlatban jó úton halad saját felsőbbrendű érzéseinek megfelelő kontextusba helyezésével, például már nem geo- vagy heliocentrikus világképben élünk, már vannak a kisebbségeknek, szegényeknek, nőknek, gyerekeknek, sőt, bizonyos állatoknak is jogaik stb., de még mindig nagyon sokszor többet gondolunk magunkról, mint amennyi jár, egyfajta társadalmi nárcizmusban. Azt hisszük, mi uraljuk a földet, pedig ugyanezt gondolhatják a növények, a rovarok, a gombák, az archeák, a baktériumok stb., amik mind nagyobb számban és elterjedtebben élnek ugyanezen a bolygón. Azt hisszük, urai vagyunk bizonyos helyzeteknek, amiknek dinamikáját még csak meg sem próbáltuk soha igazán megérteni. Úgy hívjuk magunkat a teremtés Urainak, hogy a bennünk és körülöttünk végbemenő folyamatokról kislábujj-köröm-piszoknyit se tudunk a teljes képhez viszonyítva.

És ehhez a felsőbbrendű érzéshez különös módon legtöbbször a változatosságtól, ismeretlentől és másságtól való iszony társul. A vizeink változatosságát megszüntetjük, folyóinkat lecsapoljuk, medrüket egységessé, egyenessé, betonozottá és hajózhatóvá tesszük. Az ártereleinkről és földterületeinkről a változatosságot elűzzük és monokultúrás mezőgazdaságban aknázzuk ki a talaj ilyenformán nem megújuló megmaradt értékeit. A szúnyogok csípését és a kukacos almát kellemetlennek tartjuk, ezért válogatás nélkül ölő idegmérget eresztünk környezetünkben mindenre, ami él és mozog, aminek hatására a rovar, ízeltlábú, kételtű stb. fajaink változatossága drasztikusan lecsökken. A hosszú füvet és tarka útszelt nem szeretjük, ezért kertjeink változatosságát lecsökkentjük nyírt gyeppe alakítva a lakóhelyek körüli vidám természeti közeget. A természetes erdeink változatosságát megszüntetjük, jó esetben is telepített gazdasági erdőket hozunk csak létre, rossz esetben még egy stadiont vagy szennyező gyárat.

Összességében ezt a természeti változatosság pusztító attitűdöt egyszer s mindenkorra ki kell irtanunk magunkból, de a legjobb, amit tehetünk, ha hagyunk megfelelő méretű teret az élet számára (pl. EU biodiverzitás stratégia elve alapján 30%-nyi szárazföldi és vízi területet) úgy, hogy abba tényleg nem nyúlunk bele, hanem hagyjuk a természetes változatosságot burjánzani annak kénye és kedve szerint. Csakis a természetes élőhelyek drasztikusan nagy arányú rehabilitációjával tudjuk az életközösségeket újra stabilizálni és ezzel párhuzamosan – okként és okozatként egyaránt – a változatosságot bennük szó szerint újra „felvirágoztatni”.

A változatosság csökkenését látjuk a globalizált kultúrában is. A globális divathulámok sok környezeti terhelést és megfelelésből adódó egyéni frusztrációt okoznak. A turistaparadicsomok egymáshoz egyre hasonlóbba, helyi egyedi értékeiket és ezáltal vonzerejüket pont a globális trendhez való igazodás során veszítik el. A változatosságtól rettenetesen pánikszerűen álmlában és ébren minden diktátor és autokrata

vezető, mert a változatosság – ideértve a szólás szabadságát, a szabad sajtót, a szabad oktatást, tudományt, kultúrát, a civil szervezeteket, az értelmiségi réteget, a szabad droghasználatot stb. – a szabadság és az új gondolatok, az alternatívák megjelenésének bűnös fészke, ami a hatalmi pozíciók szemszögéből ijesztő támadás a regnáló rendszer ellen.

Az emberi változatosság megtűrése és elfogadása a népesség növekedésével és a környezeti problémák erősödésével nem csak erkölcsi, de jól felfogott elemi érdekünk is. A túlnépesedésnek például természetes velejárója ösztönös programozott kompenzáló viselkedésként a homoszexualitás arányának növekedése, illetve a hagyományos nemi szerepek megtagadása, mert ezek az egyéni tudatos, tudattalan vagy stressz-indukálta biológiai döntések a népességnövekedést ellensúlyozzák. A környezeti erőforrások kimerülése mentén pedig a jövőben várhatóan emelkedni fognak a migrációs hullámok is. A másság megtűrése és elfogadása helyett választhatjuk alternatív „gyógymód”-ként a gyűlölködést és tagadást is, de ezen stratégiák elemi erővektora a pusztító háborúk és sok szenvedés irányába mutat.

Egy igen izgalmas, példamutató kontextus, ami a modern társadalmunkban a változatosság csökkenése helyett annak növekedése irányába mutat, a nyílt forráskódú szoftverek világa. A nyílt forráskódú szoftverek alulról szerveződő szoftverek, melyek minden egyes betűje megismerhető bárki számára, akit a szoftver részletei érdekelnek. Ez a teljes bizalom és nyitottság inspiratíván hat mások számára is, akik *fork*-olhatják az adott kódot, azaz létrehozhatnak belőle egy olyan leágazást, amit saját igényeik szerint fejleszthetnek tovább. Ez nem más, mint a technológiai evolúcióban a mutáció, a változatosság szabadjára engedése! A nyílt forráskódú (verziókövetett) szoftver evolúcióban a fitnessz függvény kiértékelést a közösség hajtja végre teszteléssel és közösségi visszajelzéssel, a jó megoldások gyorsan terjednek, visszakerülnek a fő ágakba (lásd *pull request*), a közösségi erő igazi XXI. századi, szövevényes online kooperációt hozhat létre egészen bonyolult rendszerek átlátható közös fejlesztésére is. A nyílt forráskódú szoftverfejlesztés igen hasonló az adaptív vezetői döntéshozatali modellünkhöz abban a tekintetben is, hogy egy vezető „hatalma” csak addig marad meg, amíg ő képviseli a legjobban és leghatékonyabban az adott szoftver fejlődését és víziójának megvalósulását. A pálya a „hatalomátvételre” mindenkinek mindenkor adott, de propagandisztikus választások és üres szavak helyett egyszerűen kód szintjén, szakmai hozzáértéssel, valódi cselekedettel kell bizonyítani a rátermettséget, ráadásul jóval egészségesebb ok-okozati viszonyban: nem azután kell cselekedni, hogy valaki a hatalmat megszerezte, hanem először kell cselekedni és abból automatikusan alakul a rálátás, szakértelem, hozzáértés, és ezáltal a tudás hatalma. Ez a folyamat pedig elejét veszi a hatalom öncélú féktelen csomósodásának is (lásd [Benevolent dictatorship](https://en.wikipedia.org/wiki/Benevolent_dictatorship)<sup>3</sup>).

---

<sup>3</sup> [https://en.wikipedia.org/wiki/Benevolent\\_dictatorship](https://en.wikipedia.org/wiki/Benevolent_dictatorship)

### 9.2.4. A hatalom csomósodása

A nagy méretű döntési és szervezeti struktúrák mentén az egyik legnehezebben kezelhető jelenség a hatalom és ezáltal a pénz és az erőforrások skálafüggetlen, mérték nélküli csomósodása a társadalmaink alapvetően hierarchikus rendszerében. A csomósodó hatalmi struktúrák a rákos daganatokhoz hasonlóan jellemzően semmi másra nem törekednek, csak a saját hatalmuk megtartására, ezáltal erőforrást szívnak el a csomón kívülről, és végső soron a szervezet (társadalom, bioszféra) halálához vezetnek.

Érdekes megfigyelni, hogy a létszámunk növekedésével a hatalmi csomók sokkal nagyobb számban és sokkal nagyobb méretben is megjelentek. Tehát egyrészt olyanok is hatalomhoz jutottak pusztán azért, mert sokan vagyunk, akik korábban sohasem (lásd pl. spinoffból nőtt óriás tech cégek megjelenése, vagy celebek, influenzazerek), illetve a legnagyobb hatalmak olyan erőforrást birtokoltak, ami példa nélküli a történelemben (pl. Amazon most nyit saját atomerőművet a szervereihez szükséges energia biztosítására, a SpaceX saját űrutakat szervez stb.).

Véleményem szerint a politológusoknak és szociológusoknak a mai világban nagyon intenzíven kellene vizsgálni az élőlények immunrendszerét, ahol a rákos daganatok leküzdésére egy sor brilliáns mérnöki innováció optimalizálva lett már, és esetleg ezek a megoldások átültethetők lennének a társadalmi rendszereinkbe is, fékként és ellensúlyként a csomósodással szemben.

Az mindenesetre biztosan elmondható, hogy globális önkorlátozó szabályrendszer kialakítása és szigorú betartatása, illetve fékek és ellensúlyok bevezetése nélkül a hatalmi csomósodás nem megállítható. A globális szabályokkal viszont óvatosan kell bánni, mert a globális szabályok nem mások, mint egy mesterséges társadalmi-evolúció fitnessz függvényei, amik nagy valószínűséggel olyan megoldásokat fognak kihozni a társadalomból, amire korábban nem számítottunk. Akárhogy is, az út ezen a meta-evolúción keresztül vezet, ahogy a drónok csoportos mozgása esetében is, jó sok türelemmel, méréssel, visszajelzéssel, elemzéssel, a fitnessz függvény folyamatos adaptív állításával, amíg a kívánt társadalmi működésmódot meg nem közelítjük.

A hatalmi csomósodás megtörésének másik egyértelmű eszköze a decentralizáció és a bottom-up folyamatok támogatása. Egy társadalom stabil működéséhez elképesztően fontos a dolgozó hangyákhoz hasonló civil szféra támogatása, a szakértelmük becsatornázása a helyi döntéshozatalba. A bottom-up civil szféra segít a társadalmi folyamatokban visszajelzést adni a hatalom magasabb szintjei felé a valódi lokális szükségletekről. A visszajelzés pedig nélkülözhetetlen a hatalmi döntések és a valódi szükségletek közti valóság szakadék csökkentéséhez.

### 9.3. Sok kicsi sokra megy

Nem tagadom, hogy az ebben a fejezetben felhalmozott vészjósló gondolatokat nehéz befogadni, mert igen sötét és reménytelennek tűnő realitást vetítenek elénk. De a helyzetünket mégsem tartom teljesen reménytelennek. A reményt pedig a sötét gondolatok okához hasonlóan, szintén a csoportos dinamika jellegzetességeiből merítjük.

Talán a legfontosabb gondolat, ami a dolgozat témája kapcsán szinte napi szintű inspirációt tud adni a mindennapokhoz is és a stratégiai gondolkodásmódhoz is, az a világ struktúrájának inherens alulról szerveződése. Minden, a világban jelen lévő fizikai és átvitt értelemben vett globális erő sok pici elemi erővektorból tevődik össze, és ezen elemi erővektorok iránya határozza meg a nagy és a legnagyobb folyamatok pillanatnyi, és hosszú távú irányát is. A „sok kicsi sokra megy” elvet nem szabad alábecsülnünk, sőt, az egekig kell magasztalnunk, mert ez az elv önmagában a világ hajtóereje, a komplexitás létrejöttének essenciája, az önszerveződés, a hierarchiák, a holarchiák és minden magasabb szintű szerveződés és csoportos jelenség alapja. Nem elég, hogy sok kicsi sokra megy, de ahogy a dolgozatban több ízben láttuk, sok kicsi még annál is sokkal többre megy, mint a sok kicsi összessége!

A világ nehéz helyzeteit gyakran hártjuk könnyedén azzal, hogy amit egyéni szinten teszünk, az nem számít. Minek szavazzak, úgysem változik semmi. Minek gyűjtsem szelektíven a szemetet, a nagy cégek úgyis többet szennyeznek. Minek jelentsem a biciklilopást vagy a szemétegetést a rendőrségen, úgysem történik semmi. Minek ültessék fát, úgyis kivágja majd valaki. Minek mentsük meg a bioszféránkat, úgyis jön a kihalás, és majd úgyis minden rendeződik százmillió év alatt. Vagy mindezeket összefoglalva: minek éljek, úgyis meghalok. Amikor az ember hasonló, örjítően önbecsapó hártó mechanizmusokat aktivál, akkor tulajdonképpen nem csinál mást, mint összekeveri a *nullát az epszilonnal*. Kétségtelenül tényleg hasonlóak, a különbség köztük végtelenül kicsi, csupán epszilom. Ám a hatásuk közti különbség tetszőlegesen nagy. Ugyanis sokszor nulla az nulla marad (ez a hártó mechanizmusok tragikus önbeteljesítő jóslata), de sokszor epszilonnak a határa a csillagos ég. Ez az epszilom pedig nem más, mint az egyéni hatásunk, az elemi erővektorunk. És csakis ez az elemi erővektor számít, semmi más, ez az elemi erő, aminek minden egyes pillanatunkban olyan irányba kell mutatni, ami a hosszú távú céljainkat és vízióinkat szolgálja. Ez a fajta kristálytisza iránymutatás és hit a szükséges és elégséges feltétele annak, hogy az életünk, a környezetünk vagy a társadalmunk helytelen irányba haladó dolgait meg tudjuk változtatni.

A hatalmi rendszerek (autoriter politikusok, nárcisztikus párkapcsolatok, vadkapitalista vállalatok stb.) szándéka az egyéni szándékok és víziók letörése, és ezáltal a bizonytalanságban tartás, mert szándék hiányában és bizonytalanságban a rendszer irányíthatóbb, kihasználhatóbb. A Magyar Természettudományi Múzeumot például sok éve tartja a kormány bizonytalanságban sorsát illetően (Debrecenbe kéne

9.3. Sok kicsi sokra megy

---

menni...), letörve ezzel mindenféle víziót és jó energiát, ami egy múzeum működtetéséhez amúgy elengedhetetlen. De az elemi szándék-irányú erővektorok bottom-up folyamatban állnak össze nagy rendszerekké, és ez az összegzett erő hozza létre emergensen a top-down folyamatokat, nem fordítva. Ken Wilber-t idézve ismét, a bottom-up az alapvető, a top-down a nagyszerű, a top-down-nak szüksége van a bottom-up-ra, de a bottom-up-nak nincs szüksége a top-downra! Ha van víziónk, ha van szándékunk, akkor az elemi erővektorunkat a helyes irányba tudjuk állítani, és azt sem belső fluktuációk, sem külső rosszindulatú hatások nem tudják eltéríteni. Ha van víziónk és van szándék-erővektorunk, azt megoszthatjuk másokkal, és az új irányok menti kristályosodási pontokból teljes fázisátalakulás indulhat, csoport vagy akár társadalmi szintű új döntések, új irányok és ezáltal új működésmódok születhetnek, társadalmi evolúcióvá fejlődve, meghaladva korábbi egyéni és csoportos önmagunkat, amíg csak világ a világ.

## A tézispontok alapjául szolgáló publikációk

- [T1] C. Virágh, G. Vásárhelyi, N. Tarcai, T. Szörényi, G. Somorjai, T. Nepusz és T. Vicsek, „Flocking algorithm for autonomous flying robots”, *Bioinspiration & Biomimetics*, 9. évf., 2. sz., 25012. old., 2014.
- [T2] G. Vásárhelyi, C. Virágh, N. Tarcai, T. Szörényi, G. Somorjai, T. Nepusz és T. Vicsek, „Outdoor flocking and formation flight with autonomous aerial robots”, *Intelligent Robots and Systems (IROS 2014), 2014 IEEE/RSJ International Conference on*, arXiv preprint arxiv:1402.3588, 2014. szept., 3866–3873. old.
- [T3] M. Janosov, C. Virágh, G. Vásárhelyi és T. Vicsek, „Group chasing tactics: how to catch a faster prey”, *New Journal of Physics*, 19. évf., 5. sz., 53003. old., 2017.
- [T4] G. Vásárhelyi, C. Virágh, G. Somorjai, T. Nepusz, A. E. Eiben és T. Vicsek, „Optimized flocking of autonomous drones in confined environments”, *Science Robotics*, 3. évf., eaat3536. sz., 20 2018. júl. 18.
- [T5] C. Virágh, M. Nagy, C. Gershenson és G. Vásárhelyi, „Self-organized UAV Traffic in Realistic Environments”, *Intelligent Robots and Systems (IROS 2016), 2016 IEEE/RSJ International Conference on*, 2016. okt., 1645–1652. old.
- [T6] B. Balázs és G. Vásárhelyi, „Coordinated dense aerial traffic with self-driving drones”, *Robotics and Automation (ICRA 2018), International Conference on*, 2018. máj., 6365–6372. old.
- [T7] B. Balázs, G. Vásárhelyi és T. Vicsek, „Adaptive leadership overcomes persistence-responsivity tradeoff in flocking”, *Journal of The Royal Society Interface*, 7. évf., 20190853. sz., 167 2020.
- [T8] B. Balázs, T. Vicsek, G. Somorjai, T. Nepusz és G. Vásárhelyi, „Decentralized traffic management of autonomous drones”, *Swarm Intelligence*, 1–25. old., 2024. júl.



## A dolgozathoz kapcsolódó további saját publikációk

- [S1] N. Tárcai, C. Virágh, D. Ábel, M. Nagy, P. L. Várkonyi, G. Vásárhelyi és T. Vicsek, „Patterns, transitions and the role of leaders in the collective dynamics of a simple robotic flock”, *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, 2011. évf., 4. sz., P04010., 2011. ápr.
- [S2] G. Vásárhelyi, „Késleltetett dinamika - a COVID-járvány, az ökológiai válság és a zuhanyzás összefüggései”, *Qubit*, 2021. márc. 28.
- [S3] M. Nagy, G. Vásárhelyi, B. Petit, I. Roberts-Mariani, T. Vicsek és D. Biro, „Context-dependent hierarchies in pigeons”, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110. évf., 32. sz., 13049–13054. old., 2013. júl.
- [S4] M. Yomosa, T. Mizuguchi, G. Vásárhelyi és M. Nagy, „Coordinated Behaviour in Pigeon Flocks”, *PLoS ONE*, 10. évf., 10. sz., e0140558., 2015. okt.
- [S5] M. Nagy, J. D. Davidson, G. Vásárhelyi, D. Ábel, E. Kubinyi, A. E. Hady és T. Vicsek, „Long-term tracking of social structure in groups of rats”, *Scientific Reports*, 14. évf., 22857. sz., 1–15. old., 2024. okt.
- [S6] M. Nagy, A. Horicsányi, E. Kubinyi, I. D. Couzin, G. Vásárhelyi, A. Flack és T. Vicsek, „Synergistic Benefits of Group Search in Rats”, *Current Biology*, 30. évf., 23. sz., 4733–4738.e4., 2020. szept. 24.

vasarhelyi.gabor\_286\_24

A dolgozathoz kapcsolódó további saját publikációk

---

## Irodalomjegyzék

- [1] T. Vicsek, A. Czirók, E. Ben-Jacob, I. Cohen és O. Shochet, „Novel type of phase transition in a system of self-driven particles”, *Physical review letters*, 75. évf., 6. sz., 1226. old., 1995.
- [2] C. W. Reynolds, „Flocks, herds and schools: A distributed behavioral model”, *Proceedings of the 14th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, 1987, 25–34. old.
- [3] T. Vicsek és A. Zafeiris, „Collective motion”, *Physics reports*, 517. évf., 3-4. sz., 71–140. old., 2012.
- [4] G. Baglietto és E. V. Albano, „Nature of the order-disorder transition in the Vicsek model for the collective motion of self-propelled particles”, *Physical Review E*, 80. évf., 5. sz., 50103. old., 2009.
- [5] F. T. Melges és M. S. Swartz, „Oscillations of attachment in borderline personality disorder.”, *The American journal of psychiatry*, 146. évf., 9. sz., 1115–1120. old., 1989.
- [6] I. D. Couzin, J. Krause, R. James, G. D. Ruxton és N. R. Franks, „Collective memory and spatial sorting in animal groups”, *Journal of theoretical biology*, 218. évf., 1. sz., 1–11. old., 2002.
- [7] H. Chaté, F. Ginelli, G. Grégoire, F. Peruani és F. Raynaud, „Modeling collective motion: variations on the Vicsek model”, *The European Physical Journal B*, 64. évf., 451–456. old., 2008.
- [8] G. Grégoire, H. Chaté és Y. Tu, „Moving and staying together without a leader”, *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 181. évf., 3-4. sz., 157–170. old., 2003.
- [9] M. Lindhé, P. Ogren és K. H. Johansson, „Flocking with obstacle avoidance: A new distributed coordination algorithm based on voronoi partitions”, *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, IEEE, 2005, 1785–1790. old.
- [10] M. Ballerini és tsai, „Interaction ruling animal collective behavior depends on topological rather than metric distance: Evidence from a field study”, *Proceedings of the national academy of sciences*, 105. évf., 4. sz., 1232–1237. old., 2008.

- [11] F. Cucker és S. Smale, „Emergent behavior in flocks”, *IEEE Transactions on automatic control*, 52. évf., 5. sz., 852–862. old., 2007.
- [12] M. Theillard, R. Alonso-Matilla és D. Saintillan, „Geometric control of active collective motion”, *Soft Matter*, 13. évf., 2. sz., 363–375. old., 2017.
- [13] D. Grossman, I. Aranson és E. B. Jacob, „Emergence of agent swarm migration and vortex formation through inelastic collisions”, *New Journal of Physics*, 10. évf., 2. sz., 23036. old., 2008.
- [14] D. Helbing, I. Farkas és T. Vicsek, „Simulating dynamical features of escape panic”, *Nature*, 407. évf., 6803. sz., 487–490. old., 2000.
- [15] F. Ginelli és H. Chaté, „Relevance of metric-free interactions in flocking phenomena”, *Physical review letters*, 105. évf., 16. sz., 168103. old., 2010.
- [16] P. Rahmani, F. Peruani és P. Romanczuk, „Topological flocking models in spatially heterogeneous environments”, *Communications Physics*, 4. évf., 1. sz., 206. old., 2021.
- [17] M. Durve és A. Sayeed, „First-order phase transition in a model of self-propelled particles with variable angular range of interaction”, *Physical Review E*, 93. évf., 5. sz., 52115. old., 2016.
- [18] X.-G. Wang, C.-P. Zhu, C.-Y. Yin, D.-S. Hu és Z.-J. Yan, „A modified Vicsek model for self-propelled agents with exponential neighbor weight and restricted visual field”, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 392. évf., 10. sz., 2398–2405. old., 2013.
- [19] X. Liu, C. Yan, H. Zhou, Y. Chang, X. Xiang és D. Tang, „Towards flocking navigation and obstacle avoidance for multi-UAV systems through hierarchical weighting Vicsek model”, *Aerospace*, 8. évf., 10. sz., 286. old., 2021.
- [20] P. Szabó, M. Nagy és T. Vicsek, „Transitions in a self-propelled-particles model with coupling of accelerations”, *Physical Review E*, 79. évf., 2. sz., 21908. old., 2009.
- [21] S. Dixit és M. D. Shrimali, „Static and dynamic attractive–repulsive interactions in two coupled nonlinear oscillators”, *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, 30. évf., 3. sz., 2020.
- [22] G. Orosz, B. Krauskopf és R. E. Wilson, „Bifurcations and multiple traffic jams in a car-following model with reaction-time delay”, *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 211. évf., 3-4. sz., 277–293. old., 2005.
- [23] R. Olfati-Saber, „Flocking for multi-agent dynamic systems: Algorithms and theory”, *IEEE Transactions on automatic control*, 51. évf., 3. sz., 401–420. old., 2006.
- [24] J. Smith és A. Martin, „Comparison of hard-core and soft-core potentials for modelling flocking in free space”, *arXiv preprint arXiv:0905.2260*, 2009.
- [25] V. Gazi és K. M. Passino, „A class of attractions/repulsion functions for stable swarm aggregations”, *International Journal of Control*, 77. évf., 18. sz., 1567–1579. old., 2004.

- 
- [26] Y. Koren, J. Borenstein és tsai., „Potential field methods and their inherent limitations for mobile robot navigation.”, *Icra*, 2. köt., 1991, 1398–1404. old.
- [27] G. Orosz, R. E. Wilson és G. Stépán, *Traffic jams: dynamics and control*, 2010.
- [28] D. Helbing, I. J. Farkas és T. Vicsek, „Freezing by heating in a driven mesoscopic system”, *Physical review letters*, 84. évf., 6. sz., 1240. old., 2000.
- [29] P. Bak, C. Tang és K. Wiesenfeld, „Self-organized criticality”, *Physical review A*, 38. évf., 1. sz., 364. old., 1988.
- [30] J. Buhl, D. J. Sumpter, I. D. Couzin, J. J. Hale, E. Despland, E. R. Miller és S. J. Simpson, „From disorder to order in marching locusts”, *Science*, 312. évf., 5778. sz., 1402–1406. old., 2006.
- [31] C. A. Yates és tsai., „Inherent noise can facilitate coherence in collective swarm motion”, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106. évf., 14. sz., 5464–5469. old., 2009.
- [32] A. Cavagna, A. Cimarelli, I. Giardina, G. Parisi, R. Santagati, F. Stefanini és M. Viale, „Scale-free correlations in starling flocks”, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107. évf., 26. sz., 11865–11870. old., 2010.
- [33] W. Poel, B. C. Daniels, M. M. Sosna, C. R. Twomey, S. P. Leblanc, I. D. Couzin és P. Romanczuk, „Subcritical escape waves in schooling fish”, *Science Advances*, 8. évf., 25. sz., eabm6385., 2022.
- [34] J. Munoa, X. Beudaert, Z. Dombovari, Y. Altintas, E. Budak, C. Brecher és G. Stepan, „Chatter suppression techniques in metal cutting”, *CIRP annals*, 65. évf., 2. sz., 785–808. old., 2016.
- [35] G. Buzsáki és A. Draguhn, „Neuronal oscillations in cortical networks”, *science*, 304. évf., 5679. sz., 1926–1929. old., 2004.
- [36] Z. Wang, B. Hu, W. Zhou, M. Xu és D. Wang, „Hopf bifurcation mechanism analysis in an improved cortex-basal ganglia network with distributed delays: An application to Parkinson’s disease”, *Chaos, Solitons & Fractals*, 166. évf., 113022. old., 2023.
- [37] J.-h. Li, J. Li, D.-f. Zhou és P.-c. Yu, „Self-excited vibration problems of maglev vehicle-bridge interaction system”, *Journal of Central South University*, 21. évf., 11. sz., 4184–4192. old., 2014.
- [38] K. Y. Billah és R. H. Scanlan, „Resonance, Tacoma Narrows bridge failure, and undergraduate physics textbooks”, *American Journal of Physics*, 59. évf., 2. sz., 118–124. old., 1991.
- [39] A. Kudrolli, G. Lumay, D. Volfson és L. S. Tsimring, „Swarming and swirling in self-propelled polar granular rods”, *Physical review letters*, 100. évf., 5. sz., 58001. old., 2008.
- [40] B. Szabo, G. Szöllösi, B. Gönci, Z. Jurányi, D. Selmeczi és T. Vicsek, „Phase transition in the collective migration of tissue cells: experiment and model”, *Physical Review E*, 74. évf., 6. sz., 61908. old., 2006.

- [41] A. Czirók, E. Ben-Jacob, I. Cohen és T. Vicsek, „Formation of complex bacterial colonies via self-generated vortices”, *Physical Review E*, 54. évf., 2. sz., 1791. old., 1996.
- [42] I. D. Couzin és N. R. Franks, „Self-organized lane formation and optimized traffic flow in army ants”, *Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, 270. évf., 1511. sz., 139–146. old., 2003.
- [43] C. K. Hemelrijk és H. Kunz, „Density distribution and size sorting in fish schools: an individual-based model”, *Behavioral Ecology*, 16. évf., 1. sz., 178–187. old., 2005.
- [44] F. Heppner, „Three-dimensional structure and dynamics of bird flocks”, *Animal groups in three dimensions*, 68–89. old., 1997.
- [45] I. R. Fischhoff, S. R. Sundaresan, J. Cordingley, H. M. Larkin, M.-J. Sellier és D. I. Rubenstein, „Social relationships and reproductive state influence leadership roles in movements of plains zebra, *Equus burchellii*”, *Animal Behaviour*, 73. évf., 5. sz., 825–831. old., 2007.
- [46] D. Helbing, F. Schweitzer, J. Keltsch és P. Molnar, „Active walker model for the formation of human and animal trail systems”, *Physical review E*, 56. évf., 3. sz., 2527. old., 1997.
- [47] M. Ballerini és tsai., „Empirical investigation of starling flocks: a benchmark study in collective animal behaviour”, *Animal behaviour*, 76. évf., 1. sz., 201–215. old., 2008.
- [48] S. N. Fry, N. Rohrseitz, A. D. Straw és M. H. Dickinson, „Visual control of flight speed in *Drosophila melanogaster*”, *Journal of Experimental Biology*, 212. évf., 8. sz., 1120–1130. old., 2009.
- [49] G. Edwards, P. Vetter, F. McGruer, L. S. Petro és L. Muckli, „Predictive feedback to V1 dynamically updates with sensory input”, *Scientific reports*, 7. évf., 1. sz., 16538. old., 2017.
- [50] B. Laeng, S. Nabil és A. Kitaoka, „The eye pupil adjusts to illusorily expanding holes”, *Frontiers in Human Neuroscience*, 16. évf., 877249. old., 2022.
- [51] P. Wohlleben, *The hidden life of trees: What they feel, how they communicate—Discoveries from a secret world*. Greystone Books, 2016, 1. köt.
- [52] M. Nagy, Z. Ákos, D. Biro és T. Vicsek, „Hierarchical group dynamics in pigeon flocks”, *Nature*, 464. évf., 7290. sz., 890–893. old., 2010.
- [53] I. D. Couzin, J. Krause, N. R. Franks és S. A. Levin, „Effective leadership and decision-making in animal groups on the move”, *Nature*, 433. évf., 7025. sz., 513–516. old., 2005.
- [54] T. Caraco, S. Martindale és H. R. Pulliam, „Avian flocking in the presence of a predator”, *Nature*, 285. évf., 5764. sz., 400–401. old., 1980.
- [55] Z. Young és H. M. La, „Consensus, cooperative learning, and flocking for multiagent predator avoidance”, *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 17. évf., 5. sz., 1729881420960342. old., 2020.

- 
- [56] K. Ozogány és T. Vicsek, „Modeling the emergence of modular leadership hierarchy during the collective motion of herds made of harems”, *Journal of Statistical Physics*, 158. évf., 628–646. old., 2015.
- [57] K. Wilber, *A brief history of everything*. Shambhala Publications, 2017.
- [58] A. Flack, M. Nagy, W. Fiedler, I. D. Couzin és M. Wikelski, „From local collective behavior to global migratory patterns in white storks”, *Science*, 360. évf., 6391. sz., 911–914. old., 2018.
- [59] M. Nagy, I. D. Couzin, W. Fiedler, M. Wikelski és A. Flack, „Synchronization, coordination and collective sensing during thermalling flight of freely migrating white storks”, *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 373. évf., 1746. sz., 20170011. old., 2018.
- [60] K. J. Benoit-Bird és W. W. Au, „Cooperative prey herding by the pelagic dolphin, *Stenella longirostris*”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 125. évf., 1. sz., 125–137. old., 2009.
- [61] D. Scheel és C. Packer, „Group hunting behaviour of lions: a search for cooperation”, *Animal behaviour*, 41. évf., 4. sz., 697–709. old., 1991.
- [62] M. Tomasello, „The ultra-social animal”, *European journal of social psychology*, 44. évf., 3. sz., 187–194. old., 2014.
- [63] J. A. Vucetich, R. O. Peterson és T. A. Waite, „Raven scavenging favours group foraging in wolves”, *Animal behaviour*, 67. évf., 6. sz., 1117–1126. old., 2004.
- [64] A. E. Eiben és J. E. Smith, *Introduction to evolutionary computing*. Springer, 2015.
- [65] N. Hansen, S. D. Müller és P. Koumoutsakos, „Reducing the time complexity of the derandomized evolution strategy with covariance matrix adaptation (CMA-ES)”, *Evolutionary computation*, 11. évf., 1. sz., 1–18. old., 2003.
- [66] J. G. Leishman, „The breguet-richet quad-rotor helicopter of 1907”, *Vertiflite*, 47. évf., 3. sz., 58–60. old., 2002.
- [67] I. Mas és C. Kitts, „Object manipulation using cooperative mobile multi-robot systems”, *Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science*, 1. köt., 2012, 1–6. old.
- [68] A. E. Turgut, H. Çelikkanat, F. Gökçe és E. Şahin, „Self-organized flocking in mobile robot swarms”, *Swarm Intelligence*, 2. évf., 97–120. old., 2008.
- [69] M. Rubenstein, C. Ahler és R. Nagpal, „Kilobot: A low cost scalable robot system for collective behaviors”, *2012 IEEE international conference on robotics and automation*, IEEE, 2012, 3293–3298. old.
- [70] R. De Nardi, O. Holland, J. Woods és A. Clark, „Swarmav: A swarm of miniature aerial vehicles”, *Proceedings of the 21st Bristol International UAV Systems Conference*, Citeseer, 2006.
- [71] G. M. Hoffmann, H. Huang, S. L. Waslander és C. J. Tomlin, „Precision flight control for a multi-vehicle quadrotor helicopter testbed”, *Control engineering practice*, 19. évf., 9. sz., 1023–1036. old., 2011.

- [72] S. A. Quintero, G. E. Collins és J. P. Hespanha, „Flocking with fixed-wing UAVs for distributed sensing: A stochastic optimal control approach”, *2013 American Control Conference*, IEEE, 2013, 2025–2031. old.
- [73] S. Hauert, S. Leven, M. Varga, F. Ruini, A. Cangelosi, J.-C. Zufferey és D. Floreano, „Reynolds flocking in reality with fixed-wing robots: communication range vs. maximum turning rate”, *2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, IEEE, 2011, 5015–5020. old.
- [74] A. Kushleyev, D. Mellinger, C. Powers és V. Kumar, „Towards a swarm of agile micro quadrotors”, *Autonomous Robots*, 35. évf., 4. sz., 287–300. old., 2013.
- [75] P. Ogren, E. Fiorelli és N. E. Leonard, „Formations with a mission: Stable coordination of vehicle group maneuvers”, *Symposium on mathematical theory of networks and systems*, 2002, 15. old.
- [76] E. Forgoston és I. B. Schwartz, „Delay-induced instabilities in self-propelling swarms”, *Physical Review E*, 77. évf., 3. sz., 35203. old., 2008.
- [77] J. Han, M. Li és L. Guo, „Soft control on collective behavior of a group of autonomous agents by a skill agent”, *Journal of Systems Science and Complexity*, 19. évf., 1. sz., 54–62. old., 2006.
- [78] G. B. Schaller, „Serengeti: a kingdom of predators”, 1972.
- [79] C. Boesch és H. Boesch, „Hunting behavior of wild chimpanzees in the Tai National Park”, *American journal of physical anthropology*, 78. évf., 4. sz., 547–573. old., 1989.
- [80] E. M. Gese, „Territorial defense by coyotes (*Canis latrans*) in Yellowstone National Park, Wyoming: who, how, where, when, and why”, *Canadian Journal of Zoology*, 79. évf., 6. sz., 980–987. old., 2001.
- [81] S. K. Gazda, R. C. Connor, R. K. Edgar és F. Cox, „A division of labour with role specialization in group-hunting bottlenose dolphins (*Tursiops truncatus*) off Cedar Key, Florida”, *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 272. évf., 1559. sz., 135–140. old., 2005.
- [82] J. C. Bednarz, „Cooperative hunting Harris’ hawks (*Parabuteo unicinctus*)”, *Science*, 239. évf., 4847. sz., 1525–1527. old., 1988.
- [83] A. Mori, P. D’Ettorre és F. Le Moli, „Host nest usurpation and colony foundation in the European amazon ant, *Polyergus rufescens* Latr. (Hymenoptera: Formicidae)”, *Insectes Sociaux*, 42. évf., 279–286. old., 1995.
- [84] Z. Vásárhelyi, I. Scheuring és L. Avilés, „The ecology of spider sociality: A spatial model”, *The American Naturalist*, 199. évf., 6. sz., 776–788. old., 2022.
- [85] C. Packer és L. Ruttan, „The evolution of cooperative hunting”, *The American Naturalist*, 132. évf., 2. sz., 159–198. old., 1988.
- [86] T. Vicsek, „Closing in on evaders”, *Nature*, 466. évf., 7302. sz., 43–44. old., 2010.

- 
- [87] L. Angelani, „Collective predation and escape strategies”, *Physical review letters*, 109. évf., 11. sz., 118104. old., 2012.
- [88] P. Domenici, J. M. Blagburn és J. P. Bacon, „Animal escapology I: theoretical issues and emerging trends in escape trajectories”, *Journal of Experimental Biology*, 214. évf., 15. sz., 2463–2473. old., 2011.
- [89] A. J. Lotka, „Analytical note on certain rhythmic relations in organic systems”, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 6. évf., 7. sz., 410–415. old., 1920.
- [90] A. Pekalski, „A short guide to predator-prey lattice models”, *Computing in Science & Engineering*, 6. évf., 1. sz., 62–66. old., 2004.
- [91] G. Oshanin, O. Vasilyev, P. Krapivsky és J. Klafter, „Survival of an evasive prey”, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106. évf., 33. sz., 13696–13701. old., 2009.
- [92] A. Kamimura és T. Ohira, „Group chase and escape”, *New Journal of Physics*, 12. évf., 5. sz., 53013. old., 2010.
- [93] S. Jin és Z. Qu, „Pursuit-evasion games with multi-pursuer vs. one fast evader”, *2010 8th World Congress on Intelligent Control and Automation*, IEEE, 2010, 3184–3189. old.
- [94] B. T. Fine és D. A. Shell, „Unifying microscopic flocking motion models for virtual, robotic, and biological flock members”, *Autonomous Robots*, 35. évf., 195–219. old., 2013.
- [95] F. Gökçe, „To flock or not to flock: pros and cons of flocking in long-range" migration" of mobile robot swarms”, dipl., Middle East Technical University, 2008.
- [96] L. Meier, P. Tanskanen, F. Fraundorfer és M. Pollefeys, „Pixhawk: A system for autonomous flight using onboard computer vision”, *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, IEEE, 2011, 2992–2997. old.
- [97] J. C. Bansal, N. Sethi, O. Anicho és A. Nagar, „Drone flocking optimization using NSGA-II and principal component analysis”, *Swarm Intelligence*, 17. évf., 1. sz., 63–87. old., 2023.
- [98] C. Tomlin, G. J. Pappas és S. Sastry, „Conflict resolution for air traffic management: A study in multiagent hybrid systems”, *IEEE Transactions on automatic control*, 43. évf., 4. sz., 509–521. old., 1998.
- [99] M. Turpin, K. Mohta, N. Michael és V. Kumar, „Goal assignment and trajectory planning for large teams of interchangeable robots”, *Autonomous Robots*, 37. évf., 4. sz., 401–415. old., 2014.
- [100] M. Hehn és R. D’Andrea, „Real-time trajectory generation for quadcopters”, *IEEE Transactions on Robotics*, 31. évf., 4. sz., 877–892. old., 2015.
- [101] D. Helbing, P. Molnár, I. J. Farkas és K. Bolay, „Self-organizing pedestrian movement”, *Environment and planning B: planning and design*, 28. évf., 3. sz., 361–383. old., 2001.

- [102] C. Gershenson és D. Helbing, „When slower is faster”, *Complexity*, 21. évf., 2. sz., 9–15. old., 2015.
- [103] J. S. Mill, *Considerations on representative government by John Stuart Mill*. Longman, Green, Longman, Roberts, és Green, 1865.
- [104] J. Brennan, „Against democracy”, 2017.
- [105] H. Hildenbrandt, C. Carere és C. K. Hemelrijk, „Self-organized aerial displays of thousands of starlings: a model”, *Behavioral Ecology*, 21. évf., 6. sz., 1349–1359. old., 2010.
- [106] R. S. Olson, P. B. Haley, F. C. Dyer és C. Adami, „Exploring the evolution of a trade-off between vigilance and foraging in group-living organisms”, *Royal Society open science*, 2. évf., 9. sz., 150135. old., 2015.
- [107] R. Kubo, „The fluctuation-dissipation theorem”, *Reports on progress in physics*, 29. évf., 1. sz., 255. old., 1966.
- [108] U. Seifert és T. Speck, „Fluctuation-dissipation theorem in nonequilibrium steady states”, *Europhysics Letters*, 89. évf., 1. sz., 10007. old., 2010.
- [109] A. Cavagna és tsai., „Flocking and turning: a new model for self-organized collective motion”, *Journal of Statistical Physics*, 158. évf., 601–627. old., 2015.
- [110] M. Hamer, L. Widmer és R. D’andrea, „Fast generation of collision-free trajectories for robot swarms using GPU acceleration”, *IEEE Access*, 7. évf., 6679–6690. old., 2018.
- [111] K. Jose és D. K. Pratihari, „Task allocation and collision-free path planning of centralized multi-robots system for industrial plant inspection using heuristic methods”, *Robotics and Autonomous Systems*, 80. évf., 34–42. old., 2016.
- [112] Y. Wu, K. H. Low, B. Pang és Q. Tan, „Swarm-based 4D path planning for drone operations in urban environments”, *IEEE transactions on vehicular technology*, 70. évf., 8. sz., 7464–7479. old., 2021.
- [113] D. Mellinger és V. Kumar, „Minimum snap trajectory generation and control for quadrotors”, *2011 IEEE international conference on robotics and automation*, IEEE, 2011, 2520–2525. old.
- [114] R. Maity, R. Mishra és P. K. Pattnaik, „Flying robot path planning techniques and its trends”, *Materials Today: Proceedings*, 80. évf., 2187–2192. old., 2023.
- [115] C. E. Luis, M. Vukosavljev és A. P. Schoellig, „Online trajectory generation with distributed model predictive control for multi-robot motion planning”, *IEEE Robotics and Automation Letters*, 5. évf., 2. sz., 604–611. old., 2020.
- [116] A. Dmytruk, T. Nascimento, A. Ahmad, T. Báča és M. Saska, „Safe tightly-constrained uav swarming in gnss-denied environments”, *2021 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, IEEE, 2021, 1391–1399. old.
- [117] X. Zhou, J. Zhu, H. Zhou, C. Xu és F. Gao, „Ego-swarm: A fully autonomous and decentralized quadrotor swarm system in cluttered environments”, *2021*

- IEEE international conference on robotics and automation (ICRA)*, IEEE, 2021, 4101–4107. old.
- [118] J. Van Den Berg, S. J. Guy, M. Lin és D. Manocha, „Reciprocal n-body collision avoidance”, *Robotics Research: The 14th International Symposium ISRR*, Springer, 2011, 3–19. old.
- [119] C. Gershenson, „Guiding the self-organization of cyber-physical systems”, *Frontiers in Robotics and AI*, 7. évf., 41. old., 2020.