

Intelligens drónrajok vezérlése és alkalmazása

Az MTA Doktora cím elnyeréséhez készített disszertáció
tézisfüzete

Vásárhelyi Gábor, PhD



ELTE Biológiai Fizika Tanszék

2024. november 5.

A dolgozat online elérése

- Tézisfüzet:
<https://hal.elte.hu/~vasarhelyi/doc/vasarhelyi2024MTAtezisfuzet.pdf>
- Disszertáció:
<https://hal.elte.hu/~vasarhelyi/doc/vasarhelyi2024MTAdisszertacio.pdf>

Kapcsolat

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



A kutatások előzménye

Bevezetés

Dolgozatom és a kapcsolódó téziszfüzet 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), számossága (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.

FONTOS: 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.

Kutatóhelyi előzmények

Az [ELTE Biológiai Fizika Tanszék](#)¹ víziója 1998-as alapítása óta biológiai relevanciájú komplex rendszerek fizikusi szemmel és módszerekkel történő vizsgálata. A tanszék alapítása és ezt követő több évtizedes kutatásvezetése [Vicsek Tamás](#)² (azóta Lars Onsager díjas Prof. Emer.) nevéhez kötődik. Vicsek Tamás kutatótársaival 1995-ben publikálta azt az azóta több, mint 8500 hivatkozást elérő, és e dolgozatot is alapjaiban meghatározó közleményét, mely együtt mozgó biológiai egyedek csoportját statisztikus fizikai módszertannal, önhajtott, interakcióban lévő részecskék sokaságaként írta le [1]. Ez a publikáció utólag alapkötetételnek is tekinthető, mert segítette az aktív anyagok, a csoportos mozgás, a csoportos viselkedés, és a jelen dolgozatban taglalt csoportos robotika tudományterületeinek kialakulását is.

Jómagam 2009-ben csatlakoztam Vicsek Tamás kutatócsoportjához, az általa akkor frissen elnyert nagyszabású [EU ERC COLLBOT](#)³ kutatási projekt keretében, mely a csoportos mozgás dinamikájának és hálózatainak mélyebb megértését és erre épülő csoportos robotikai alkalmazását tűzte ki célul.

A biológiai rendszerek csoportos mozgásának vizsgálatához a tanszéken technológiai eszközöket (pl. miniatűr nyomkövetőket [2, 3], mozgásérzékelőket [4], mozgáskövető földi [5] és légi [6] kamerarendszereket stb.) hoztunk létre, és az ezekből származó nagy mennyiségű adaton, statisztikus fizikai alapokon nyugvó adatfeldolgozási módszerekkel vizsgáltuk csoportos rendszerek univerzális mintázatait, dinamikájának és interakciós hálózatának jellegzetességeit. A tanszéken – az [Etológia Tanszékkel](#)⁴, illetve nemzetközi kutatóhelyekkel és etológusokkal közös kutatásban – vizsgált, szociális fajok közé tartoznak a galambok [2, 3], kutyák [4, 7], patkányok [5], gólyák [8], vadlovak [6], de akár sejtek [9, 10] és természetesen az emberek is [11, 8].

A csoportos mozgás dinamikájának megértése tehát alapvető fontosságú előfeltétel volt számunkra a csoportos robotikai rendszereink bio-inspirált tervezéséhez. Ehhez a felsorolt kutatásokon túlmenően a csoportos mozgás világszinten egyik leg-hivatkozottabb összefoglaló cikke szintén meghatározó jelentőségű volt, szintén a tanszékről, Vicsek Tamás és Zafeiris Anna tollából [12].

Érdemes végezetül megemlíteni kutatóhelyi előzményként az általunk fejlesztett első robotcsapatunkat, ami a laborba ideiglenesen telepített – de annál nagyobb érdeklődést kiváltó – medencében úszó játékhajók vezérelt és nem vezérelt egyedeiből állt. Játékhajóinkkal először tudtuk kísérletben demonstrálni, hogy a csoportos mozgáshoz elég néhány (tipikusan 5-10%-nyi) vezéregyed, a többiek őket bizonyos körülmények között még akkor is követni tudják, ha a köztük lévő interakciók pusztán fizikai jellegűek és mentesek bármilyen intelligenciától vagy tudatosságtól [13].

¹ https://physics.elte.hu/BIO_home

² <https://hal.elte.hu/~vicsek>

³ <https://hal.elte.hu/flocking>

⁴ <https://ethology.elte.hu/>

Független irodalmi előzmények

A jelen dolgozathoz felhasznált saját közlemények a 2014-2024 közötti időszakot ölelik fel. A világ az utóbbi tíz évben szédületes iramban fejlődött, de az előzmények tekintetében most mintegy időutazásként csupán a 2014 előtti irodalomból válogattam, hogy az olvasót a dolgozat eredményeinek megszületése előtti kontextusba tudjam helyezni. A dolgozathoz inspirációként szolgáló irodalom elsősorban az alábbi fő témakörök köré csoportosul: i) csoportos mozgás a természetben; ii) csoportos mozgás statisztikus fizikája; iii) korai csoportos robotikai rendszerek.

A csoportos viselkedést az ismertett erős tanszéki vonalon túl természetesen a világ számos egyéb magas rangú kutatóhelyén vizsgálták biológiai szempontból. A csoportos viselkedés számos előnyt biztosít az egyedek számára: i) növeli a hatékonyságot forráskeresési vagy tájékozódási feladatokban [14]; ii) robusztus, stabil működést eredményez az egyedek redundanciája, párhuzamos számítási kapacitása és interaktív döntéshozatala mentén [15, 16]; iii) növeli a biztonságot, ellenállóbbá teszi a csoportot külső támadókkal és potenciális veszélyforrásokkal szemben [17].

A csoportos mozgás kutatásának mintegy vezérfonala lett a korábban említett, úgynevezett Vicsek modell [1], illetve Reynolds számítógépes szimulációs/vizualizációs célú korai, 1987-es publikációja együtt mozgó egyedekről, mely mára szintén óriási, 14 000 feletti hivatkozásszámmal rendelkezik [18]. E két alapmodell a csoportos mozgást ágens alapú leírással egyszerű decentralizált párkölcsönhatásokra építi: i) közeli egyedek taszítása; ii) megfelelő távolságban lévő egyedek sebességillesztése; iii) távoli egyedek összetartása. A Vicsek modell mindezt statisztikus fizikai módszerekkel vizsgálja, ahol a környezeti zaj mértékének függvényében a hagyományos fázisátalakulással analóg jelenség jön létre az önhajtott részecskék dinamikus kontextusában, azaz nem egyensúlyi környezetben, sebességkorreláció alapú rendparaméterrel. Ha túl nagy a zaj (vö. hőmérséklet), a részecskék véletlenszerűen mozognak (vö. gáz halmazállapot), ha kicsi, rendeződnek és létrejön a csoportos mozgás (vö. folyadék halmazállapot).

A Vicsek modellnek az évek során számtalan variációja jelent meg rangos szerzők tollából, részben annak a hatalmas, elhúzódó („tipikus fizikus”) tudományos vitának az energiájából töltkezve, hogy a Vicsek modell fázisátalakulása első vagy másodrendű-e [19, 20]. De a vitán túlmenően nyilván sokakat inspirált valahol a fraktálok világához hasonlóan a Vicsek modell egyszerű szabályaival létrehozható lenyűgöző komplexitás. A modellben ugyanis a párkölcsönhatások, peremfeltételek és környezeti vagy dinamikus változók apró változtatásával a mozgásmintázatok és dinamikák rendkívül változatos világát lehet megteremteni [21, 22, 23, 24].

A csoportos mozgás jelensége nem csak a biológusokat és a fizikusokat inspirálta, hanem a mérnököket is. A csoportos mozgásnak, csoportos viselkedésnek a mai napig erős bio-inspiratív hatása van a csoportos robotikai kutatásokra is [25].

Az első csoportos robotikai rendszerek jellemzően két dimenzióban mozgó, földi robotok voltak, melyeket vagy speciális feladatok megoldására tervezték (pl. tárgyak közös cipelése [26]), vagy pusztán az önszerveződést kívánták bemutatni velük kisebb egyedszámú, de nagyobb tudású rendszerben [27], vagy jóval egyszerűbb egyedekkel, de egész nagy, akár ezres számban [28].

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 [29, 30, 31], és/vagy különböző magasságon repültek, kijátszva az ütközésselkerülés és valós idejű interakciók súlyos problematikáját [32, 31]. 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 [33].

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 [34]. Ezek igen látványosak és hangzatosak lehetnek, de a valódi terepi nehézségeket (például a késleltetés okozta oszcillációkat és kaotikus dinamikát [35]) a legtöbbször minél inkább leegyszerűsítve kezelik.

Összességében azt a trendet figyeltük meg, hogy míg a világ kutatóhelyeinek többsége a csoportos robotikát mérnöki tudományként, többnyire a bonyolult egyedi robotok egyszerű párhuzamosítása mentén közelítette meg (egyed fókusz, centralizált vezérlés, interakciók és csoportszintű emergens hatások elhanyagolása), addig Vicssek Tamás statisztikus fizikai múltjának, korábbi csoportos mozgásos kutatásának és a Biológiai Fizika Tanszék bio-inspirált látásmódjának köszönhetően mi a csoportosan viselkedő mesterséges rendszereket a természetben és a statisztikus fizikában egyaránt jellemző nagy egyedszámok és kaotikus dinamika világából érkező vizsgálattal, azaz bonyolult csoportok egyszerűsített egyedeinek meghatározó interakcióit helyeztük a középpontba (csoport fókusz, decentralizált vezérlés, kölcsönhatások vizsgálata). A párkölcsönhatások eredőjeként kialakuló izgalmas csatolt dinamika és rendszerszintű jelenségek mélyebb megértése és megfelelő kezelése jelentős előnyt biztosított számunkra a későbbiekben a mesterséges rendszerek egyedszámainak másokat túlszárnyaló növeléséhez.

Célkitűzések

A megoldandó feladat ismertetése

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 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 építőkockáját 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 csapdája*-ban: „Ami jó a szindikátusnak, az jó neked is”, azaz a hatékony csoport egyedei összességében maguk is hatékonyabbak lesznek (reményeink szerint nagyobb hatásfokkal, 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 ismertetett példát ugyanazzal a módszertannal vizsgáljuk. Bio-inspirált,

agens 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 realisztikus szimulációjában teszteljük és optimalizáljuk. Végül, ugyanilyen egyedek fizikai implementációján, azaz kültéri intelligens drónok nagy egyedszámú raján, terepi kísérletekben is bemutatjuk az eredményeket.

A megoldandó feladat jelentősége, aktualitása

Kevesen tudják, hogy az első négy propelleres forgórotoros légi jármű (kvadrokopter), a Breguet-Richet Gyroplane csupán négy évvel a Wright fivérek első repülőgépe után, 1907-ben már megjelent. A köztudatban a kvadrokopterek megjelenése nagyjából száz évvel későbbi, és ez nem véletlen, hiszen ennyi idő kellett, míg a bravúros koncepciót finom részleteiben utolérte a technológia fejlettsége. Nagyjából az ezredfordulótól viszont a miniatűr repülő robotok fejlődése megállíthatatlan lett, a drónok igazi diszruptív technológiává váltak, és a szó szoros értelmében új dimenziót hoztak az életünkbe, mivel madártávlatból engedtek betekintést világunkba, lényegében egy bárki számára elérhető kihelyezett, könnyen irányítható külső szem által.

A drónok rohamos fejlődésével lényegében egyidőben az önállóan feladatot teljesítő drónrajok víziója is azonnal berobbant az emberiség tudatába, amit mi sem jelez jobban, mint hogy az önműködő repülő robotrajok mára szinte minden science fiction (vagy akár gyerek animációs) filmnek elengedhetetlen közhelyes kellékei. Az első, 2014-es, 10 egyedes önszerveződő drónrajos publikációnkat – mivel azelőtt senki nem tudott hasonlót bemutatni – óriási nemzetközi érdeklődés, de vegyes érzelmek fogadták (lásd a [cikk honlapjának](#)⁵ Media Coverage részét). Az emberek érthető okokból félni és aggódni kezdtek, hogy az emberiségnek ez lesz a következő olyan technológiája, amit majd pusztításra fog felhasználni. Ez a félelem mára lényegében be is igazolódott, hiszen az azóta zajló „embertelenül brutális” háborúkat teljesen egyértelműen alapjaiban alakította át a drónos légi, szárazföldi és vízi hadviselés. Ugyanakkor, mint minden technológiai újítást, a drónokat is lehet és tudja is az emberiség rossz és jó célokra egyaránt használni (sajnos általában ilyen sorrendben).

Érdekes módon az egyedi drónok elképesztő elterjedése ellenére a drónrajok piaca a mai napig csak indulgat és nem érett be igazán. Szinte minden nap látni manapság drónokat az égen, de csak keveseknek adatott meg, hogy önműködő drónrajokat lássanak. Ilyenformán a dolgozatban is bemutatott kísérleti eredmények korukat megelőző újításnak számítanak.

A kísérleti eredmények mellett fontos kiemelni, hogy a drónrajos kutatásaink a

⁵ <https://hal.elte.hu/drones/iros2014.html>

bio-inspirációt „viszonozva” igen sokat segítettek az élőlények és az egyéb komplex csoportos dinamikai rendszerek működésének megértésében is. Mélyebben feltártuk például, hogy milyen alapvető szerepe van egy komplex rendszer működésénél nem csak a komplexitást biztosító hardware megfelelő szoftverrel való ellátásának, hanem a tipikusan sokdimenziós paraméterter optimális behangolásának is („mindenkinek van agya, de keveseknek van esze”). Emellett számomra legkedvesebb elméleti eredményünk azt taglalja, hogy miként tud egy aktív információközlésen alapuló csoportos rendszer kitörni a stabilitás és a gyors reakciókészség tulajdonságok egymásnak alapvetően ellentmondó kompromisszumából.

Mivel a világ egyértelműen a globalizáció, a hálózatosodás, az összekapcsolódás és az interakciók számának drasztikus növekedése felé halad, a komplex rendszerek belső interakcióinak a rendszer alapvető dinamikájára tett hatásának kutatása és megismerése alapvető fontosságú lehet a drónrajok mozgásán túl analógikusan számos minket körülvevő komplex rendszer esetében.

vasarhelyi.gabor_286_24

A megoldandó feladat jelentősége, aktualitása

Vizsgálati módszerek

A dolgozatban bemutatott csoportos robotikai kutatások minden szálát ugyanazzal a vizsgálati módszertannal vizsgáltuk, melyet az alábbiakban röviden, de lépésről lépésre ismertetek.

1. Első lépésben definiáltuk az adott elméleti kutatási célt, majd irodalmazás és saját ötletek alapján kidolgoztuk az elgondolt megoldás matematikai koncepcióját.
2. A megfelelő ötleteket számítógépes algoritmus formájában implementáltuk a speciálisan erre a célra fejlesztett, részben open-source, ágens alapú, realisztikus [szimulációs keretrendszerünkben](#)⁶.
3. A szimulációs keretrendszer által biztosított vizuális visszajelzés és a logolt kimeneti adatok kézi elemzése segítségével az algoritmusokat iteratívan addig fejlesztettük, amíg ránézésre olyasmi megoldást nem adtak, ami az elvárásunk volt. Ebben a folyamatban minden esetben kiemelt szerepet kapott az algoritmus paraméterterének minél inkább letisztult és dimenzióban lehetőség szerint végletekig redukált definiálása. Koncepcióban számunkra a kevés fontos paraméter sokkal többet ért, mint a sok sokféleképpen hangolható (ilyenformán végletesen szembemenve a manapság rendkívül divatos és hatékony deep learning AI irányzattal), mert utóbbi optimalizálása jelentősen bonyolultabb és átláthatatlanabb feladat, és a repülésben nekünk a teljes kiszámíthatóságra és kontrollra kell törekednünk.
4. Az érett(nek gondolt) algoritmusokhoz úgynevezett fitnessz függvényt definiáltuk, azaz megfelelő rendparaméterek alapos kidolgozásával meghatároztuk, hogy mit értünk pontosan azon, hogy egy adott szimuláció jól teljesít.
5. Az algoritmust az ELTE [Atlasz](#)⁷ szuperszámítógépén az általunk erre a célra kidolgozott CMA-ES evolúciós optimalizációt [36] használó eljárással finomhangoltuk. Az eredményeket alaposan ellenőriztük és újranéztük a szimulációs keretrendszerben. Mivel maga az optimalizáció is tipikusan optimalizációt igénylő feladat, ezért általában még néhányszor végig kellett iterálnunk

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

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

az „algoritmusfejlesztés $\rightarrow$ fitness definiálás $\rightarrow$ evolúció” meta-optimalizációs körön, mire a megoldással elégedettek lettünk.

6. Az immáron kidolgozott és behangolt algoritmust az ELTE szuperszámítógépén párhuzamosan sokszor lefuttattuk az összes vizsgálni kívánt kísérleti elrendezésben, a kimenetekből statisztikát és eredményt gyártottunk.
7. A szimulációban szépen működő algoritmust átültettük a saját fejlesztésű intelligens drónrajunk onboard vezérlőegységébe.
8. A valódi drónraj teljes szoftver környezetén software-in-the-loop szimulációban (azaz a valódi szoftver futtatásával, realisztikusan szimulált szenzor adatokkal) a saját fejlesztésű open-source [bázisállomás szoftver](#)⁸ vizuális megjelenítőjén és a logolt adatok segítségével újra ellenőriztük az algoritmusok eredményességét és biztonságát.
9. Az ellenőrzött kódbázissal ellátott drónokat terepi tesztek során reptettük, a kis létszám felől a lehető legnagyobb egyedszám felé fokozatosan haladva, és közben a paraméterbeállításokat a szimuláció és a valóság közti elkerülhetetlen különbségek mentén a látványnak megfelelően kézzel finomhangoltuk.
10. A nagy mennyiségű repülési adatot egyedi script-ek segítségével automatizáltan dolgoztuk fel és jelenítettük meg a kutatási eredmények bemutatásához.

⁸ <https://skybrush.io>

Új tudományos eredmények

1. tézispont - szimulációs modell

Kidolgoztunk egy ágens alapú, bio-inspirált matematikai modell rendszert és az ennek tesztelésére alkalmas realisztikus, 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 realisztikus modellezése, mely magában foglalja a pozicionálási 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 taszító párkölcsönhatást, ami segített az egyedek közti ütközéseket elkerülni, és egy viszkózus sűrűlódás szerű sebességillesztő párkölcsönhatási tagot, ami a szomszédos egyedek sebességkorrelációját növelte.

Szimulációkkal elemeztük a létrejövő ön-hajtott rendszer stabilitását, és megmutattuk, hogy a viszkózus sűrűlódás szerű sebességillesztő kölcsönhatás alapvető fontosságú a realisztikus 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 realisztikus 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).

2. tézispont - rajrepülés

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 számításait 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 készült (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).

3. tézispont - csoportos üldözés-menekülés

Az első két tézispontban ismertett ágens-alapú alapmodell felhasználásával bio-inspirált 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 realisztikus (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 realisztikus előrelépés (hasonlóan, ahogy egy erdősáv, hegy, folyó vagy emberi infrastruktúra határol egy természetes vadászterületet).

A szimulációkban előre explicit módon nem programozott, emergens tulajdonság-

ként jelenik meg a természetes csoportos üldözési stratégiák közt szereplő bekerítési módszer.

Kapcsolódó publikáció: [T3] (2017).

4. tézispont - optimalizált rajrepülés

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 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 párkölcsönhatás, 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 reálisztikus szimulációs keretrendszerünkben, a mozgást leíró új rendparaméterek és az azokra épülő, a rajrepülést sokoldalúan minősítő fitnessz függvény bevezetésével. Az automatizált optimalizációs eljárással – nagyságrendileg optimalizációnként 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).

5. tézispont - drón forgalom

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 rej-

tő 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 kockázatának 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 önhajtást biztosító útvonaltervező tagot, hogy lehetőség szerint megelőzze és elkerülje a keresztező útvonalak konfliktusait, illetve figyelembe vegye az azonos célpontra igyekvők között az udvarias sorban állás szabályait.

Megoldásunkkal demonstráltuk, hogy a bio-inspirált, ágens alapú vezérlés alkalmas decentralizált repülésirányítás megvalósítására, és hogy a decentralizált forgalomban az udvariasság és előzékenység, illetve a „slower is faster”, avagy „lassan járj, tovább élsz” elv csoportszintű előnyt biztosít.

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

6. tézispont - rajrepülés adaptív vezetéssel

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 akadály van. Megmutattuk, hogy ez a kompromisszumkényszer megkerülhető, ha az egyedek aktív információátadással segítik egymást, illetve képesek 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 informá-

ciótartalom alapú, lokális szakértői civil munka és/vagy szakértői kormányzás jelentőségéről és potenciális hatékonyságáról.

Kapcsolódó publikáció: [T7] (2020).

7. tézispont - drón forgalom predikcióval

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)

Az eredmények hasznosítása

A első, 2014-es robotrajos publikációink [T1, T2] sikerén felbuzdulva a kutatásban részt vevő munkatársakkal 2015-ben megalapítottuk a CollMot Robotikai Kutató Fejlesztő Kft-t, azzal az általános kezdeti spin-off céllal, hogy az akkor még csak tudományos kísérletekben prototípusként létező drónrajunknak lehessen a későbbiekben üzleti jellegű, de társadalmilag hasznos kifutása is.

A CollMot Kft. az alapítás óta fennálló ügyvezetésemmel azóta is sikeresen növekszik, miközben kezdeti vízióját a mai napig megőrizte. A cég az első spin-offok között volt, akik az ELTÉ-vel találmányhasznosítási szerződést kötöttek. A cégnek ez biztosította a kutatási eredmények kizárólagos hasznosításának lehetőségét, az egyetem számára pedig azóta is éves jutalékot jelent a találmányhasznosítással összefüggésben lévő piaci bevételeinkből.

Az ELTÉ-vel szimbiotikusan összefonódó, gyümölcsöző együttműködésünk azonban messze túlmutat a találmányhasznosítási szerződésen. Az ELTE és a CollMot többek között közös K+F tevékenységet folytat; eddig három ELTÉ-s doktorandusznak lett KDP ösztöndíj keretén belül CollMot-os vállalati szakértője. Továbbá, míg az ELTE laborbérleti szerződés keretében infrastruktúrával és kapcsolatokkal segíti a céges K+F+I tevékenységet, addig a cég lehetővé tette az üzleti bevételeinek visszaforgatásából épített 100+ egyedes drónflottájának, valamint a céges munkában fejlesztett drónraj vezérlő szoftver rendszereknek a kutatási célú hasznosítását. Ezen kölcsönös együttműködési szálak nélkül a tézispontokban részletezett szimulációs és kísérleti eredményeink nem is valósulhattak volna meg!

A CollMot Kft. tevékenysége mára sokrétű, de a legtöbb esetben még mindig a drónrajokhoz kapcsolódik. Világszinten pionírként, 2015 óta foglalkozunk [drónshow szolgáltatással](#)⁹, bemutatóinkkal bejártuk a világot, Taiwan-tól és Kínától kezdve Dánián és az angol királynő kertjén át a hazai porondig, amibe olyan presztízs események is beletartoztak, mint a FINA megnyitó, vagy a budapesti augusztus 20-i Szent István Ünnepi tűzijátékok. Emellett esetenként autonóm művészeti projekteket is támogatunk (1. ábra). A cég néhány éve [drónshow tervező és vezérlő szoftver keretrendszer](#)¹⁰ is árul nyílt forráskódra épülő üzleti modellben, nemzetközi érté-

⁹ <https://collmot.com>

¹⁰ <https://skybrush.io>

kesítésben. Skybrush szoftverünket a világ minden táján használják mára nagy felölősséggel járó drón show-khoz és egyéb flotta szintű műveletekhez. Emellett hazai kooperációban [autonóm permetező drón](#)¹¹ szoftverét fejlesztjük, valamint dual-use felderítő drónraj fejlesztési céllal konzorciumi tagjai vagyunk a [Kooperatív Technológiák Nemzeti Laboratóriumának](#)¹² is és több kutatás-fejlesztési szálon működünk együtt a SZTAKI, BME és az NKE drónos érdekeltségű kutatócsoportjaival.

A fent részletezett innovációs tevékenységért 2021-ben a drónrajos kutatócsoportunk bázistagjai (név szerint Vicsek Tamás, Vásárhelyi Gábor, Balázs Boldizsár, Somorjai Gergő, Nepusz Tamás, Virágh Csaba és Tarcai Norbert Richárd) elnyerték az [ELTE Innovatív Kutatója Díjat](#)¹³.

A publikációink nemzetközi elismertségét és ezáltal áttételesen hasznosításának mértékét a hivatkozások száma fémjelzi a legkézenfekvőbb módon. A három jelenleg leghivatkozottabb drónos cikkünkre ([[T1](#), [T2](#), [T4](#)]) a Google Scholar szerint mostanra összesen több, mint 1000 tudományos hivatkozás érkezett.



1. ábra. Előd Ágnes: *Őszikék* (Arany János sorozat), 2018. Fotó: Labancz István. Hosszú expozíciós fotó egy drónok által rajzolt teljesen térbeli alakzatról, amiben a drónok pályája és színe is animálva van.

¹¹ <https://www.wohnderdrone.hu/a10/>

¹² <https://nkfih.gov.hu/kooperativ-technologiak-nemzeti-laboratoriuma/>

¹³ <https://www.elte.hu/content/dronrajok-letrehozoi-kaptak-az-elte-innovativ-kutatoja-dijat.t.23755>

A tézispontokhoz kapcsolódó tudományos közlemények

- [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.

Irodalmi hivatkozások listája

- [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] M. Nagy, Z. Ákos, D. Biro és T. Vicsek, „Hierarchical group dynamics in pigeon flocks”, *Nature*, 464. évf., 7290. sz., 890–893. old., 2010.
- [3] 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.
- [4] L. Gerencsér, G. Vásárhelyi, M. Nagy, T. Vicsek és A. Miklósi, „Identification of Behaviour in Freely Moving Dogs (*Canis familiaris*) Using Inertial Sensors”, *PLoS ONE*, 8. évf., 10. sz., e77814., 2013.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] Z. Ákos, R. Beck, M. Nagy, T. Vicsek és E. Kubinyi, „Leadership and path characteristics during walks are linked to dominance order and individual traits in dogs”, *PLoS computational biology*, 10. évf., 1. sz., e1003446., 2014.
- [8] Z. Ákos, M. Nagy és T. Vicsek, „Comparing bird and human soaring strategies”, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105. évf., 11. sz., 4139–4143. old., 2008.
- [9] 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.
- [10] E. Méhes és T. Vicsek, „Collective motion of cells: from experiments to models”, *Integrative biology*, 6. évf., 9. sz., 831–854. old., 2014.
- [11] D. Helbing, I. Farkas és T. Vicsek, „Simulating dynamical features of escape panic”, *Nature*, 407. évf., 6803. sz., 487–490. old., 2000.
- [12] T. Vicsek és A. Zafeiris, „Collective motion”, *Physics reports*, 517. évf., 3-4. sz., 71–140. old., 2012.

- [13] N. Tarcai, 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.
- [14] G. Dell’Ariccia, G. Dell’Omo, D. P. Wolfer és H.-P. Lipp, „Flock flying improves pigeons’ homing: GPS track analysis of individual flyers versus small groups”, *Animal Behaviour*, 76. évf., 4. sz., 1165–1172. old., 2008.
- [15] D. J. Hoare, I. D. Couzin, J.-G. Godin és J. Krause, „Context-dependent group size choice in fish”, *Animal Behaviour*, 67. évf., 1. sz., 155–164. old., 2004.
- [16] 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.
- [17] S. Bazazi, C. C. Ioannou, S. J. Simpson, G. A. Sword, C. J. Torney, P. D. Lorch és I. D. Couzin, „The social context of cannibalism in migratory bands of the mormon cricket”, *PLoS One*, 5. évf., 12. sz., e15118., 2010.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] F. Peruani, A. Deutsch és M. Bär, „A mean-field theory for self-propelled particles interacting by velocity alignment mechanisms”, *The European Physical Journal Special Topics*, 157. évf., 111–122. old., 2008.
- [23] V. Schaller, C. Weber, C. Semmrich, E. Frey és A. R. Bausch, „Polar patterns of driven filaments”, *Nature*, 467. évf., 7311. sz., 73–77. old., 2010.
- [24] D. Strömbom, „Collective motion from local attraction”, *Journal of theoretical biology*, 283. évf., 1. sz., 145–151. old., 2011.
- [25] M. Brambilla, E. Ferrante, M. Birattari és M. Dorigo, „Swarm robotics: a review from the swarm engineering perspective”, *Swarm Intelligence*, 7. évf., 1–41. old., 2013.
- [26] 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.

- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] 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.
- [32] 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.
- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] E. Forgoston és I. B. Schwartz, „Delay-induced instabilities in self-propelling swarms”, *Physical Review E*, 77. évf., 3. sz., 35203. old., 2008.
- [36] 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.