

# Opponensi véleményre adott válasz #1

Intelligens drónrajok vezérlése és alkalmazása

MTA doktori értekezés

Vásárhelyi Gábor, PhD

## Tisztelt Rohács Dániel!

*Köszönöm a dolgozatom megismerésébe és bírálatába fektetett energiát és az értékes észrevételeket, kritikát, kérdéseket. Mindezekre az alábbiakban igyekszem tételesen válaszolni. Az opponensi véleményből idézett szó szerinti szövegrészeket **szürke háttérrel**, míg az azokra adott válaszaimat normál szöveggel jelenítem meg.*

A témalehatárolás egyértelmű, tudományos vonatkozásban azonban izgalmas lett volna kitekintést adni – a megfelelő adaptálás után - egyéb felhasználási lehetőségekbe, például az autonóm közúti járművek területén.

Az autonóm járművekre való adaptáció valóban nem volt része a dolgozatnak. Ennek fő oka, hogy a földi autonóm közlekedés nem is mint jövőbeli alkalmazási terület, hanem mint mintapélda és inspiráció jelenik meg a gondolkodásomban és implicit módon a dolgozatban is, ahogy arról picit részletesebben a 2020-as „Decentralized traffic management of autonomous drones” című cikkünk bevezetőjében is írtunk.

A földi fix infrastruktúrán vezetett közlekedés (és az autonóm közlekedés is) alapvetően jóval egyszerűbb és ennél fogva kiforrottabb is, mint a légi (több embernek is van autója, mint repülője). Az úton egyrészt energiabefektetés nélkül lehet megállni és állva maradni, nem úgy, mint a levegőben. Másrészt a kvázi-1D közlekedés jelentősen leegyszerűsített dinamikai helyzetet a 2D/3D légi közlekedéshez képest, épp a csökkentett dimenziószám miatt. Egydimenzióban a szinkron csoportos mozgás lényegében távolságtartó követéssé egyszerűsödik. Az egyéni célok eléréséhez pedig az úthálózaton minden esetben saját sáv tartozik, amin normál esetben – tehát például az éjszakai Árpád-hídat kivéve – csak egy irányban halad a forgalom. Így a forgalom fő konfliktusai lényegében az előre definiált kereszteződésekbe lokalizálódnak és ott optimálisabban kezelhetők, pl. felüljáróval, körforgalommal, lámpával, azaz helyi infrastrukturális rásegítéssel, ami a levegőben szintén nem adott. Emellett az egyéb objektumok és környezeti kontextus felismerését lehetővé tevő gépi látásnak is nagyobb tere van, mert erősebb és ezáltal nehezebb számítógépeket is könnyebb a földön hordozni, mint a levegőben. Mindezek miatt az egyszerűbb földi forgalom autonóm kezelését jórészt megoldotta mára a tudomány és az ipar: az átlagembernél megbízhatóbb önvezető autók mostanra az átlagember számára is elérhetőek (bár még nem az átlagember pénztárcájához mérten).

Ebben a realitásban adaptáció helyett *inspirációként* nagyon sokat foglalkoztunk a földi járművek autonóm forgalmával és dinamikai kihívásaival, elsősorban Stépán Gábor és Orosz Gábor kiváló munkássága mentén, akiknek ezúton is köszönöm az érdekes és izgalmas beszélgetéseket és szakmai tanácsokat az elmúlt évtizedből! A 2D/3D térben közlekedő drónok esetében is létrejövő, késleltetésből fakadó oszcillációk megértéséhez például épp az 1D földi forgalom fantom dugóinak elemzése vezetett, de általánosságban is nagyon sokszor kezdtük a dinamikai egyenleteink, fékezési görbék, sebességillesztések és egyéb algoritmikus részletek kidolgozását egydimenzióban.

A dolgozatomban szemléletbeli végkövetkeztetései között viszont bőven akadnak olyanok, amik azonnal átültethetők a hétköznapi sofőrök és önvezető robotok gondolkodásába is, nem is, mint nagy újdonság, hanem mint más modalitásban is megerősítést nyerő alapelvek. Ilyenek a nagyfokú türelem szükségessége az utakon, a gyorsulás minimalizálására való törekvés, a megfelelő féktávolság betartása, amik egyszerre vezetnek a közös forgalom áteresztőképességének növekedéséhez és egyben a biztonság jelentős javulásához.

A Szerző a választott tudományterületre vonatkozó ismereteket jelentősen gyarapította, a kidolgozott módszerek általános érvényűek lehetnek és sokrétűen felhasználhatók, ugyanakkor nem jelenteti meg egyértelműen a jövőbeli kutatási területeket, továbbfejlesztési lehetőségeket, valamint hogy milyen egzakt területeken és hogyan lehetne az eredményeket átültetni más közlekedési vagy egyéb releváns rendszerekbe.

Az észrevétel jogos, és az ok mögött személyes ügyek is húzódnak. Az MTA doktori dolgozatomban elsősorban kedvtelésből, az ELTÉ-n végzett évtizedes kutatásaim összefoglalásaként és tiszteletadó lezárásaként írtam meg, a mainstream kutatásból kifelé ívelő karrierpályán. Az ELTÉ-n ebben a témában azt gondolom, hogy egy kerek egész történetet sikerült leírunk, aminek a végére büszkén tehetem ki a „Q.E.D.” végszót. Ami a csoportos mozgás kutatásával kapcsolatban engem nagyon mozgatott és foglalkoztatott, azokra a kérdésekre kaptunk válaszokat és találtunk megoldásokat, és nincs bennem hiányérzet, hogy mi felé kellene ezeket a szálakat még tovább vinni tudományos vonalon. Ezzel párhuzamosan a kutatott eredményeket a mai napig igyekszünk folyamatos TRL szint növelés mentén átültetni a tanszéken alapított cégünk, a CollMot Kft. drónrajos megoldásaiba és amikor a piac érett lesz rá, hogy valódi sokdrónos autonóm megoldásokat igényeljen a drónos látványrepüléseken túl is, akkor ránk biztosan lehet majd számítani. Ha újra alaputatási témába kezdenék, akkor folytatásként igény esetén esetleg megpróbálnám merevszárnyú gépekre is átültetni a főbb megoldásainkat, amit egyszerű kimondani, de okozhat sok fejtörést és meglepetést az alapvetően más dinamikai peremfeltételek miatt (merevszárnyú géppel például nem lehet megállni vagy bármikor bármerre fordulni), és nagy valószínűséggel általánosságban a komplexitás, a komplex kaotikus csoportos dinamika témakörében próbálnék általánosabb, akár társadalomtudományi, politikatudományi analógiákat is feszegetni a drónok csoportos mozgásának megértése közben elsajátított gondolkodásmóddal.

Az értekezés szerkezeti felépítése logikus, és jól illusztrálja a problémára készített modellek és eljárások folyamatos és fokozatos evolúcióját, azonban az egyes fejezetek mennyiségében aránytalanságok vannak. Ez megfigyelhető az alfejezetek mennyiségében is, célszerűbb lehetett volna kevesebb, de komplexebb fejezetekbe tagolni az értekezést. A tézisek megfogalmazása egyértelmű, bár a nyomon követést és a hivatkozást elősegíthette volna a tézisek és azok altéziseinek számozása. A nyelvezet többes szám első személyben adott, melyre külön felhívja a jelölt a figyelmet – a csapatmunkára való hivatkozással – mégis a tudományos értekezésekben jellemzően a csoportmunkában elvégzett egyéni munka újdonság tartalmát szokás ismertetni. Az elért eredmények összefüggnek az ökoszisztémában elért egyéb kutatások eredményeivel, ami egyben illusztrálja a kutatási feladatok közötti koordinációt, kommunikációt, és a fejlesztések hasznosíthatóságát.

A fejezetek tagolásában mindenképpen szerettem volna megtartani a publikációkhoz való igazodást. Általánosságban elmondható, hogy nálunk viszonylag kevés számú publikáció született az elmúlt évtizedben, de azok impaktját lehetőség szerint igyekeztünk maximalizálni, és minden egyes cikkért évekig küzdöttünk kemény munkával. A dolgozat felépítésében ezt a publikációkkal mérföldkövezett munkát szerettem volna leképezni, annak saját természetes aránytalanságaival együtt. És itt jegyezném meg, hogy manapság nagyon nehéz ellenállni a mennyiségi publikációs elvárásoknak, és külön köszönetet szeretnék mondani Vicsek Tamás kutatásvezetőnek, aki a magas minőséget mindig is

többre tartotta a külső kényszer hatására növekvő mennyiségnél, és ezzel lehetővé tette, hogy igazán mély és nagy ívű dolgokról tudjunk gondolkodni, megfelelő időkeretben.

A tézispontok számozása a dolgozat egyes fejezeteinek végén valóban hiányzik, a hiányosságért elnézést kérek, a tézispontok számozásához a téziszfüzet az irányadó. Talán javít a helyzeten, hogy a tézisekhez tartozó publikációk külön „T” előtagot kaptak (T1, T2, stb.). Altéziseket szándékosan nem definiáltam külön egy adott tézisponton belül, az egyes téziseket inkább saját ívükben igyekeztem egységsnyi gondolatként megfogalmazni.

A dolgozatban ismertetett eredményekben a saját hozzáadott érték kiemelése a csoportmunka kontextusában valóban hiányos. Ezzel kapcsolatban még a habitusvizsgálat során kaptam hiánypótlási kérést az MTA titkárságától, és kérem tisztelettel a titkárságot, hogy az ott leadott anyagot küldjék meg az opponens számára is, tájékoztatásul. Szerencsére a nevesebb folyóiratokban egyre inkább trend és elvárás a cikkekben feltüntetni az egyes szerzők hozzáadott értékét, így a főbb mérföldköveinkben a csoportmunka egyéni összetevőiről az egyes cikkekben is sokszor lehet információt találni. Ugyanakkor ezen a ponton is szeretném kiemelni, hogy a jó csoportmunka minden esetben több, mint az egyéni hozzáadott értékek összessége, és ezért a mi csoportunkra és a közösen végzett évtizedes kutatásra igen büszkén és hálával tekintek vissza.

**1. Kérdés (2. fejezet): a bio-inspirált modellezési koncepciónál milyen összegző tapasztalatokat sikerült szerezni, milyen fajoktól, milyen mozgást érdemes / lehet adaptálni, és milyen peremfeltételek mellett?**

Számomra a bio-inspirált csoportos dinamika összegző tapasztalata és lenyűgöző csodája éppen az a kettősség, hogy miközben számos kutatott jelenség *univerzális*, azaz egészen különböző fajok (baktériumoktól az emlősökig) egészen más környezetben (földön, vízben, levegőben, vagy akár az emberi testen belül) ugyanolyan vagy nagyon hasonló modellekkel írhatók le és nagyon hasonló általános mintázatokat mutatnak, a természet sokszínűsége egészen elképesztő részletgazdagságot rejt csupán az egyéni vagy csoportos dinamika megjelenési formáiban is. Gondoljunk csak arra, hogy hányféle zseniális, hasonló elveken működő, de mégis egyedi „repülőgép modell” van például a hazai, átlagos környezetben is könnyen megfigyelhető rovarfajok között...

Mennyire máshogy van hangolva a maga sok paraméterével egy öngerjesztett oszcillációkkal túlvezérelt darázs, egy tökéletes mozdulatlanságban legyező, elképesztő gyorsulással bíró, akár hátrafelé is navigáló szitakötő, egy éppen csak elemelkedni képes és egyenes vonalban az első akadályig repülő vérrel teleszívott szúnyog vagy kövér cserebogár, a képtelenül nagy szárnyakkal a déli lejtőszélben szinte papírlapként fújt, szárnyaikkal látszólag esetlenül és lassan csapkodó lepkék, akik ezalatt mégis egymás körül cikáznak és pontosan tudják, hogy hol vannak és mit csinálnak, a sokszázazres tömegben együtt repülő (és ezt percek alatt megtanuló, sőt, repülés közben szerelmeskedő) kérészek, a gyümölcstál felett örületes sebességgel egymást kergető, cikázó, játszadozó parányi muslicák, a tökéletes precizitással fel- és leszálló, takarítási feladatokra nagy csapatokba gyűlő döglegyek, és a sort a végtelenségig folytathatnánk. Meggyőződésem, hogy minden egyes fajtól életünk végéig tanulhatunk, ha eleget figyeljük őket kellő alapossággal és közben természetes módon vigyázunk rájuk, hogy ők is élhessék jól megérdemelt életüket!

De néhányukat talán mégis ki tudom emelni, mint példakép rekordert:

- „flocking”: A legnagyobb létszámú szinkron mozgást létrehozó madárfaj legjobb tudomásom szerint a *seregély*. Mondhatjuk, hogy a seregélyek minden útja Rómába vezet, arrafelé szoktak ugyanis sokszázazres tömegben összegyűlni minden évben. Giorgio Parisi olasz fizikus többek között ennek a fajnak a vizsgálatával kapta 2021-ben fizikai Nobel díját (nagyon

hasonló statisztikus fizikai kutatási témával és eredményekkel, mint Vicsek Tamás, csak jelentősen több rendelkezésre álló erőforrással, nagyobb infrastrukturális támogatással és csapatmérettel házon belül is, nem csak a levegőben).

- „traffic”: A világon talán a legnagyobb létszámú, többnyire egyedi repülési célokat nagy sűrű tömegben megvalósító madárfaj a kékvércse. A kékvércsek legnagyobb gyülekezőhelyét Angolában (Afrika) épp a Magyar Madártani Egyesület kutatói fedezték fel Palatitz Péter vezetésével, aki az ELTE Biológiai Fizika Tanszékkal is több szalon folytat jelenleg is együttműködést, elsősorban Nagy Máté tanszéki kutatótársamon keresztül.
- „chase and escape”: az üldözés-menekülés világából és a reakcióidő rekordokat tekintve is talán a seregiek ragadozókra adott válaszreakciói az egyik leglátványosabbak, de nagyon izgalmas – főként a mai drónos hadviselés gyors ütemű fejlődésének kontextusában – a hazai fajokat is figyelni, ahogy például a rigók vagy varjak csapatai elüldöznek egy betolakodó héját vagy ölyvet, vagy ahogy egy karvaly utánaered akár a bokrok között is egy énekesmadárnak, valódi élet-halál harcot vívó, szédítő sebességű 3D acro-repülés bemutatóval.

2. Kérdés (2. fejezet): A 2.1 ábrán összegzi a felhasznált modell paramétereit. Készült-e elemzés arra, hogy milyen paraméterek mellett (pl. gyorsulás, kommunikációs késleltetés) tartható vagy adaptálható-e a javasolt modell

Feltételezem, hogy a 2.1. táblázatról van szó, nem a 2.1. ábráról. Ez a táblázat még a 2014-es cikkeink idejéből származik, amikor éppen csak elkészült a szimulációs keretrendszerünk, elsősorban kézi próbálgatással és némi szimulációs statisztikával igyekeztünk azt hangolni, illetve realisztikus paramétereket ültettünk a modellbe, tehát átfogó stabilitás elemzés a paraméterekről még nem igazán született és gépi optimalizációt sem használtunk ekkor még. Az akkori cikkekben a kommunikációs hatótávolság szerepét vizsgáltuk dedikált szimulációs statisztikákkal, és azzal kapcsolatban az lett a megállapítás, hogy  $r_0$  tasztási sugár esetén akkor kapunk legalább  $5r_0$  méretű stabil csoportokat, ha a kommunikációs sugár legalább  $3r_0$ . (tehát lokálisabb kommunikáció is képes nagyobb csoportokat összetartani).

A két konkrétan említett paraméter tekintetében elmondható, hogy mind a gyorsulás, mind a kommunikációs késleltetés kritikus paraméterek, amiknek bizonyos minőségi szintet el kell érni ahhoz, hogy az ember megszabadulhasson a kaotikus oszcillációktól. A túl kicsi gyorsulás egyfajta tehetetlenségként jelentkezik, ami túllendüléseket és közeli ágensek esetén ütközésveszélyt jelent, a túl nagy késleltetés értelemszerűen biztonságot veszélyeztető kritikus állapot, hiszen az egyedek nem a jelenre, hanem a múltra reagálnak és így környezeti állapotbecslésük pontatlanná válik.

A gyakorlatban mi körülbelül egy másodperces késleltetést találtunk még nagyságrendileg tolerálhatónak és egyéb módszerekkel kiküszöbölhetőnek a mi rendszereinkben (erről a későbbi, 2018-as, „Optimized flocking of autonomous drones in confined environments” cikkben van részletes szimulációs elemzés). A szimulációk másodperc feletti késleltetéssel általában már szétesnek, oszcillálnak, beragadnak stb.

Gyorsulásban a 4-6 m/s/s érték lett ökölszabályként egy elérendő cél a kb. másfél kilós drónjainkkal, ha ez alattira hangolunk egy drónt, akkor ugyan kellemes kézzel vezetni, mert nem reagál esetleges kapkodásunkra se hirtelen, de csoportos kontextusban nagyon könnyen szalad túl a kívánt megállási pontokon.

Mindez természetesen a jármű maximális sebességének és a kívánt minimális szomszéd távolságnak egyértelmű függvénye, tehát egy adaptált másik rendszerben minden esetben egy előzetes tervezési folyamatban kell az összes hangolható és adott, de egymástól függő paraméter kívánt vagy elérhető értékét meghatározni, az adott rendszerre jellemzően!

3. Kérdés (3. fejezet): Adott légtéregységen belül, készült-e elemzés arra, hány drónt / egyedszámot tud a kidolgozott eljárás kezelni?

A harmadik fejezetben taglalt 2014-es cikkben ilyen elemzés még nem készült, örültünk, hogy a világon elsőként tudtunk legalább 10 drónt egyszerre önműködően reptetni. De mivel ez a fejezet elsősorban szinkron repülésről szólt, az  $r_0 = 8\text{m}$  tasztási távolságból kiszámolható, hogy milyen sűrűségű rajt tudtunk elvileg létrehozni. Az más kérdés, hogy az akkori modell stabilitásának határa nem volt nagyon messze az elért eredménytől, 100 egyednél feljebb szimulációban se tudtunk biztonságos rendszert kialakítani akkor még.

A forgalomra vonatkozóan a későbbiekben készült tipikus forgalmi áramlás / áteresztőképesség diagram sok-sok szimuláció kiértékeléséből, ilyen pl. a 2024-es „Decentralized traffic management of autonomous drones” című cikkünk 2. ábrája, amin az optimális forgalmi áteresztőképesség 100 drón 8 m/s-os forgalmát vizsgálva 27.5m-es szabad úthossz esetén valósul meg, ráadásul elfogadható ütközési kockázat mellett. Ez kb. 13 drónt jelent 100x100 méteren, két dimenzióban, és lokalitásának köszönhetően lényegében tetszőlegesen skálázható egyedszámban. Szimulációban ezt a modellt 5000 drónig vizsgáltuk erőforrásaink mentén.

4. Kérdés (3. fejezet): A hagyományos kereskedelmi légiközlekedéshez köthető kapacitásnövelő kutatásokban szintén megjelenik a formációban történő repülés. A jelölt szerint átültethetőek / adaptálhatóak a kidolgozott eljárások a hagyományos légiközlekedésre?

Nagyon szeretném hinni, hogy sok olyan eredményünk van, amit idővel a hagyományos légiközlekedés is fel tud használni, akár koncepcióban és gondolatvilágban, akár sűrű forgalom gyors útvonaltervezésére, akár az UTM részeként az autonóm járművek légtérbe integrálásának időszakában, akár vészhelyzeti javaslatlételre egy adott jármű optimális útvonalának meghatározásához, akár valóban, a csoportos formációrepülési koncepciók integrálásában. A kapacitásnövelésnek legjobb tudomásom szerint (de ezt HungaroControl-os múlttal Rohács Dániel biztosan jobban tudja) két fő akadályja biztosan van: az egyik a korlátozott emberi erőforrás és képesség a repülésirányító tornyokban. Az ő munkájuk hatékonysága biztosan javítható olyan beépített gépi algoritmusokkal, amik számukra lehetővé teszik egy adott szektorban akár nagyságrendileg több légi jármű egyidejű kezelését, egyfajta gépi tanácsadással, rásegítéssel. A másik a dolgozatban is elemzett, szűkített dimenziójú részei a repülési útvonalaknak, azaz a repülőterek. A repterek és a körülöttük lévő forgalom tervezéséhez szintén segítség lehet talán az a fajta koncepcionális hozzáállás, ami a dolgozatom vonatkozó elemző részeiben is megjelenik.

Ugyanakkor nagyon fontos hozzátenni, hogy mi kizárólag forgórótoros járművek dinamikájához illeszkedő algoritmusokat fejlesztettünk, amiknek speciális képessége, hogy a levegőben tetszőleges mértékben le tudnak lassítani és tetszőleges irányba tudnak haladni. Ezeket a megoldásokat először adaptálni kell merevszárnyú repülésre is, mielőtt alkalmazhatók lennének a hagyományos légiközlekedés számára.

5. Kérdés (4. fejezet): Az új precízebb modell 11 dimenziósra hízott paraméterteret használ. Készült-e a paraméterek vonatkozásában érzékenységi vizsgálat, ha nem, akkor mely paraméterekre a legérzékenyebb a modell?

Nem vagyok teljesen meggyőződve róla, hogy valóban a III. tézispontra (4. fejezetre) vonatkozik ez a kérdés, mert a „11 dimenziós új modell” a IV. tézispontra (5. fejezet) utal, míg a III. tézispontban tárgyalt csoportos üldözés-menekülés modellel kapcsolatos 4.1. és 4.2. ábrái pont az érzékeny paraméterek vizsgálatának eredményét mutatják abban a modellben. Úgyhogy igyekszem a kérdést a

2018-as „Optimized flocking of autonomous drones in confined environments” cikkre vonatkozóan megválaszolni.

Ez a modell evolúciós optimalizációval lett hangolva, és mivel 11 dimenziós paramétertere van, nem tudunk teljes 11 dimenziós „brute-force” stabilitásvizsgálatot futtatni rajta. Viszont, ahogy egy korábbi kérdésre adott válaszban már említettem, ebben a cikkben külön fejezet foglalkozik a kommunikációs hatótávolság és a kommunikációs késleltetés hatásával (2. ábra), sokezer szimulációs futtatás statisztikai átlagának elemzésével. A mi realisztikus szimulációinkban a hatótávnak nagyságrendileg legalább 200m-nek, a késleltetésnek maximum 1s-nek kell lennie a stabilitás teljes megtartásához, amik a mai drónrendszerekben könnyen teljesíthető peremfeltételek.

Emellett ennek a cikknek a kiegészítő információi között az S1. táblázatban minden modell paraméterhez adtunk egy becsült stabilitási / működési tartományt, amit az evolúciós futtatások során generált hozzávetőlegesen 150 000 realisztikus szimuláció eredményeiből nyertünk ki oly módon, hogy megnéztük, hogy milyen paraméterértékek mentén kapunk egy bizonyos fitnessz értéket meghaladó össz jósgot. Ebben a táblázatban vannak érdekességek, viszonylag érzékeny paraméternek mondanám a vizsgálat alapján a taszító kölcsönhatás sugarát és a kölcsönhatás erősségének távolságfüggő meredekségét, valamint a sebességillesztő kölcsönhatások konstans együtthatóit és sebesség dimenziójú komponensét. Ezzel szemben a sebességillesztő kölcsönhatások gyorsulási és erősségének távolságfüggő meredekségi tagjaira viszont nem érzékeny a rendszer.

További kapcsolódó anyag lehet a kérdés megválaszolásához az alábbi, külső szerzők által írt cikk, ami a mi cikkünk modelljének stabilitását elemzi ún. „multi-objective” optimalizációval, és igyekszik ún. Pareto-frontokat megjeleníteni paraméterösszefüggésekkel, melyek mentén bizonyos paraméterérték-párokkal hasonlóan jó megoldások adhatók (mint pl. az egér és az elefánt egyaránt sikeres szaporodási stratégiája más paraméterkapcsolással: sok utód kevés gondozással, illetve kevés utód sok gondozással):

Drone Flocking Optimization using NSGA-II and Principal Component Analysis  
Jagdish Chand Bansal, Nikhil Sethi, Ogbonnaya Anicho, Atulya Nagar  
<https://arxiv.org/pdf/2205.00432>

*Az elismerő szavakat és a gondos, alapos elemzést még egyszer köszönöm, remélem válaszaimat az opponens kielégítőnek találja.*

Verőce, 2026.05.10.



Vásárhelyi Gábor