

# BÍRÁLAT

## Vásárhelyi Gábor

### *Intelligens drónrajok vezérlése és alkalmazása*

című MTA doktori értekezéséről

Vásárhelyi Gábor az MTA doktora cím elnyerésére benyújtott értekezésében a csoportos robotika, ezen belül a nagy egyedszámú autonóm drónrajok vezérlésének és alkalmazásának kérdéskörében foglalja össze kutatásait. Munkája a nemegyensúlyi statisztikus fizika, a bioinspirált modellezés és a robotikai megvalósítás határterületén helyezkedik el: az elméleti modellek kidolgozásától a valósághű szimulációkon és optimalizálási eljárásokon át a kültéri drónrendszereken végzett demonstrációkig terjed. Az értekezés középpontjában a decentralizált, önszerveződő rajrepülés, a drónforgalom irányítása, valamint ezek stabilitási, skálázhatósági és gyakorlati alkalmazási kérdései állnak.

#### **A dolgozat szerkezete és felépítése**

A dolgozat szerkezete világos, átgondolt és didaktikusan felépített. A bevezető fejezet széles körű elméleti és módszertani alapozást ad, majd ezt követik a szimulációs, kísérleti és alkalmazási fejezetek; a művet egy összegző rész, továbbá a tézispontok alapjául szolgáló publikációk és az irodalomjegyzék zárja.

A fejezetek egy jól követhető kutatási ívet rajzolnak ki: a szerző a legegyszerűbb modellektől halad a mind összetettebb, skálázhatóbb és gyakorlatban is demonstrált megoldások felé. Ennek köszönhetően az olvasó nem csupán az egyes eredményekkel ismerkedik meg, hanem azzal a gondolkodási és fejlesztési folyamattal is, amely a kezdeti modellektől a nagy egyedszámú autonóm drónrendszerekig vezetett.

Külön pozitívum, hogy a dolgozat nem izolált részproblémák halmazaként jelenik meg, hanem egységes kutatási programmá szervezi a statisztikus fizikai szemléletet, a bioinspirált megközelítést és a mérnöki implementációt. Ez a fajta szerkesztés mód az értekezés egyik fontos erénye.

#### **A dolgozat nyelvezete és formai jellemzői**

A dolgozat nyelvezete összességében világos, gördülékeny és olvasmányos. A szerző jó érzékkel magyarázza a technikailag összetett kérdéseket, a hivatkozások jól áttekinthetők, a referenciák pedig bőségesen és megfelelő mélységben mutatják be a kutatás hátterét, a nemzetközi előzményeket és a saját eredmények szakirodalmi beágyazottságát.

Megfogalmazásbeli szempontból ugyanakkor megjelennek vitatható elemek is. A társadalmi, politikai vagy általános világmagyarázó analógiák száma helyenként nagyobb a

szükségese, így ezek nem minden esetben segítik közvetlenül a tudományos mondanivaló megértését, időnként pedig kifejezetten félre viszik a gondolatmenetet. Egy doktori értekezésben a hangsúlyt célszerűbb lett volna következetesebben a szigorúan szakmai érvelésen tartani.

Stiláris kifogásként említem meg az „emergens” szó igen gyakori használatát is. A fogalom a szakirodalomban széleskörben használt, ugyanakkor magyar tudományos szövegben ennek ilyen sűrű alkalmazása idegenszerűen hat, az „emergensen létrejövő” fordulat pedig különösen nehézkes megfogalmazás. Több helyen természetesebb lett volna magyar kifejezéseket használni. Hasonló a helyzet a mindset angol szóval is, amit majdnem hasonló gyakorisággal használt a szerző bár egyszerűen kiváltható lett volna magyar megfelelőjével. Elírás és kisebb pontatlanság viszonylag kevés található a szövegben; ezek az összképet lényegesen nem rontják.

## **Tartalmi áttekintés**

A bevezető fejezet széles és igényes alapozást ad a dolgozat tárgyához. A szerző a csoportos robotikát a nemegyensúlyi statisztikus fizika, a természetben megfigyelhető csoportos viselkedés és a mérnöki robotika hármas nézőpontjából vezeti be, és világosan kijelöli az ágensalapú, bioinspirált megközelítés helyét a hagyományos irányításelméleti szemlélettel szemben. Tartalmilag ez a fejezet kifejezetten informatív, ugyanakkor itt jelennek meg a legnagyobb számban azok a már említett társadalmi és világnézeti kitérők, amelyek időnként eltávolítják a szöveget a szigorúan tudományos tárgyalásmódtól.

A 2. fejezet a csoportos repülés szimulációs alapjait tárgyalja, és egy olyan valóság-hű modellt vezet be, amely a zajt, késleltetést, kommunikációs korlátokat és dinamikai megszorításokat is figyelembe veszi. Különösen fontos eredmény annak bemutatása, hogy a sebességillesztés kulcsszerepet játszik a késleltetésekből és zajokból fakadó instabilitások csökkentésében. Módszertanilag ez a rész a dolgozat egészének egyik fontos alappillére.

A 3. fejezetben a szerző a kültéri drónkísérletek hardveres és szoftveres megvalósítását, majd az első decentralizált kültéri rajrepülési és formációrepülési demonstrációkat ismerteti. A fejezet nagy erénye, hogy világosan mutatja meg a szimuláció és a valós rendszer közötti „valóság-szakadékot”, vagyis azt, hogy a terepi megvalósítás mennyivel szigorúbb követelményeket támaszt. A korai rendszer korlátait a szerző korrekten feltárja.

A 4. fejezet egy speciális bioinspirált alkalmazást, az üldöző–menekülő dinamika problémáját vizsgálja. Meggyőzően mutatja be, hogy a korábban bevezetett ágensalapú modelltől kiindulva hogyan hozható létre olyan kollektív stratégia, amelyben több üldöző összehangolt működése lényegesen növeli a sikerességet. Tudományos szempontból kifejezetten érdekes, hogy a bekerítéses viselkedés explicit programozás nélkül jelenik meg.

Az 5. fejezet a korábbi rajrepülési modell továbbfejlesztett, dinamikailag realiztikusabb és evolúciós optimalizálással javított változatát mutatja be. A szerző itt a stabilitás, a sebesség, a sűrűség szabályozás és a skálázhatóság egyidejű javítására törekszik, és eljut a 30 valódi drónból álló autonóm raj stabil repüléséig. A fejezet jól szemlélteti az elméleti felismerések és a kísérleti megvalósítás magas szintű összekapcsolását.

A 6. fejezet a közös légtérben végrehajtott egyéni útvonalkövetés problémáját elemzi különböző forgalmi helyzeteken keresztül. A bemutatott vezérlési elemek – például az anizotróp taszítás, a szituációfüggő sebességillesztés vagy a türelmes sorban állás – jól mutatják, hogy a kollektív intelligencia elvei nemcsak rajrepülésre, hanem koordinált forgalomszervezésre is hatékonyan alkalmazhatók. A fejezet szemléletileg érdekes, bár néhány analógia itt is a szükségesnél publicisztikusabb.

A 7. fejezet a perzisztencia és a rezponzivitás közötti klasszikus kompromisszumot elemzi, és egy adaptív vezetői mechanizmust javasol annak feloldására. A bemutatott modell azt mutatja meg, hogy a gyors reakciókészség úgy növelhető, hogy közben a rendszer stabilitása megmarad. Ez valódi minőségi előrelépés a korábbi modellekhez képest.

A 8. fejezet a drónforgalom prediktív, decentralizált változatát fejti ki, ahol a rendszer már nem csupán helyi ütközéselkerülésre, hanem előrelátó döntési mechanizmusokra is épít. A hierarchikus elsőbbségi viszonyok, a réteges háromdimenziós forgalom és a nagy sűrűségű rendszerek vizsgálata, valamint a 100 drónos demonstráció a dolgozat egyik nagyon szép gyakorlati eredménye. E fejezet különösen jól mutatja a szerző kutatásainak közvetlen alkalmazhatóságát.

A záró 9. fejezet első része röviden összefoglalja a dolgozat módszertani alapelveit és általános tanulságait, különös tekintettel az önszerveződésre, a robusztusságra és a heterogenitás kezelésére. A fejezet második része azonban tudatosan eltávolodik a szoros tudományos összegzéstől, és általános társadalomelméleti elképzeléseket mutat be. Ezek a gondolatok önmagukban érdekesek lehetnek, de nem gondolom, hogy az MTA doktora címre benyújtott dolgozatban kellene helyet kapniuk. Szerencsésebb lett volna, ha a dolgozat a végén hangsúlyosabban tér ki a szakterület jövőjére, a módszer korlátaira és a szerző további kutatási terveire, társadalomelméleti elképzeléseit pedig valahol máshol teszi közzé.

## **A tudományos eredmények értékelése**

A szerző kutatói teljesítményének értékelésekor hangsúlyozni kell, hogy munkáját olyan kutatócsoportban végezte, amely a vizsgált terület nemzetközi élvonalához tartozott, és több alapvető fontosságú felismeréshez a szakirodalomban az elsők között, egyes esetekben pedig elsőként jutott el. A csoport korai eredményeihez kötődik a világ első decentralizált, stabil autonóm kültéri drónrajának bemutatása, ami önmagában is jól jelzi a kutatási program úttörő jellegét.

A dolgozatban ismertetett eredmények nemcsak technológiai demonstrációk, hanem mély módszertani és tudományos hozzájárulások is. A szerző munkájának egyik legnagyobb érdeme, hogy az elméleti modellek, a szimulációs validáció, az evolúciós optimalizálás és a valós kísérleti megvalósítás egymást erősítő egységbe rendeződnek. Ez a komplexitás és következetesség teszi a munkát leginkább értékessé az MTA doktora cím szempontjából.

A szerző a dolgozatban bemutatott eredményeit hét tézispontban foglalta össze, amelyek összesen 8 publikációra támaszkodnak. Ez a publikáció darabszám nem kiemelkedő, ugyanakkor, ami a publikációs teljesítményt erőssé teszi az az, hogy az eredmények rangos nemzetközi fórumokon jelentek meg, többek között a Bioinspiration & Biomimetics, a New Journal of Physics, a Science Robotics, a Journal of The Royal Society Interface és a Swarm

Intelligence folyóiratokban, valamint vezető robotikai konferenciákon. Különösen kiemelendő a Science Robotics-ben megjelent közlemény, amely a 30 drónból álló autonóm, központi irányítás nélküli rajrepülés eredményeit foglalta össze, és a megjelenése idején a terület egyik legnagyobb nemzetközi visszhangot kiváltó eredményének számított.

A kutatás nemzetközi láthatóságát jól mutatja, hogy legalább két közlemény folyóirat-címlapra került: a Science Robotics 2018. júliusi címlapján az optimalizált rajrepülésről szóló munka szerepelt, míg a Journal of The Royal Society Interface 2020. júniusi számának címlapja az adaptív vezetésről szóló cikkhez kapcsolódott. Ezek nem pusztán reprezentatív sikerek: azt jelzik, hogy a kutatócsoport eredményei a nemzetközi tudományos közösség számára is újszerűek, látványosak és nagy jelentőségűek voltak.

A cikkek hatását jól mutatja kiemelkedő hivatkozottságuk, még a konferenciákon megjelent tanulmányok is jelentős számú hivatkozással büszkélkedhetnek.

Fontos kiemelni a kutatások alkalmazási és innovációs oldalát is. A dolgozatban bemutatott eredmények nem maradtak meg az alapkutatás szintjén, hanem közvetlen technológiai hasznosuláshoz is vezettek: a szerző és munkatársai által létrehozott CollMot Kft. a drónrajok vezérlésével kapcsolatos tudományos felismerésekre építve fejlesztett olyan rendszereket, amelyek valós környezetben is megbízható, nagy egyedszámú koordinációt tesznek lehetővé. Az értekezésben tárgyalt elvek a látványtechnikai drónshow-k vezérlésétől a többdrónos rendszerek gyakorlati irányításáig széles körben hasznosíthatók. Ez a közvetlen hasznosulás a munka értékét tovább növeli, mert ritka az olyan alapkutatási program, amely ilyen szerves módon vezet át valódi innovációba és piaci alkalmazásokba.

Úgy gondolom, az értekezés a tudományos eredmények súlya, eredetisége, nemzetközi visszhangja és gyakorlati jelentősége alapján méltó az MTA doktora cím által megkövetelt szinthez.

## **Összegzés**

Összességében az értekezés jelentős tudományos és alkalmazási értékű munka. A szerző a csoportos mozgás fizikáját, a bioinspirált modellezést és a nagy egyedszámú autonóm drónrajok kísérleti megvalósítását egységes kutatási programmá szervezte, és e program keretében nemzetközileg is számottevő, több ponton úttörő eredményeket ért el egy kutatócsoport tagjaként.

Kritikai megjegyzéseim elsősorban a nyelvezet egyes elemeire, a társadalmi analógiák arányára és a záró fejezet műfaji hangsúlyaira vonatkoznak. Ezek azonban a dolgozat tudományos értékét érdemben nem csökkentik. Egy gazdag és sokrétű munkáról van szó, amelynek lényegi értékei a kritikai észrevételekkel együtt is egyértelműen megmutatkoznak.

A bemutatott eredmények eredetisége, nemzetközi visszhangja, publikációs súlya és gyakorlati jelentősége alapján az értekezést az MTA doktora cím elnyerésére alkalmasnak tartom, és nyilvános vitára bocsátását támogatom.

## Kérdések

1. A dolgozat és a tézisfüzet hangsúlyozza, hogy a bemutatott eredmények egy sikeres kutatócsoport közös munkájának keretében születtek, amit a többes szám első személy következetes használata is jelez. Az MTA doktora cím megítélésekor azonban lényeges szempont a pályázó önálló tudományos teljesítményének pontos ismerete. Kérem, foglalja össze, hogy a dolgozatban szereplő főbb eredményekhez milyen személyes, egyéni hozzájárulást adott.
2. Mely tényezők korlátozzák ma leginkább a nagy egyedszámú decentralizált drónrendszerek további skálázását: a kommunikáció, a pozicionálás pontossága, a késleltetés, vagy a fedélzeti számítási kapacitás?
3. Mennyire általánosíthatók a dolgozatban bemutatott eredmények heterogén drónrajokra, vagyis olyan rendszerekre, ahol az egyedek érzékelési, dinamikai vagy kommunikációs képességei eltérőek?
4. A 100 drónos autonóm forgalmi demonstráció alapján milyen további lépések szükségesek ahhoz, hogy az ilyen rendszerek valós, városi légtérben is biztonságosan alkalmazhatók legyenek?
5. Melyek a következő 5–10 év legfontosabb nyitott kérdései az intelligens drónrajok vezérlése és alkalmazása területén?

Debrecen, 2026. március 31.



Kun Ferenc  
az MTA rendes tagja  
Debreceni Egyetem  
Elméleti Fizikai Tanszék