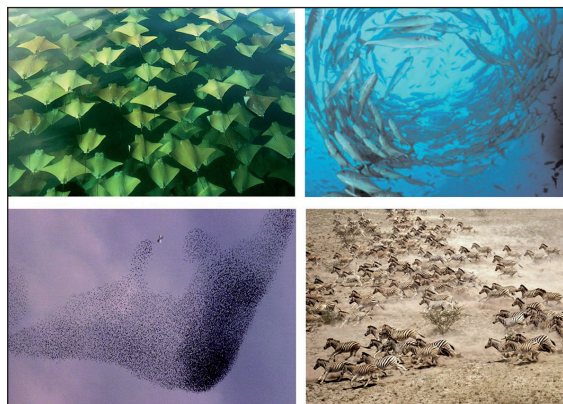


VIRÁGH CSABA–VÁSÁRHELYI GÁBOR–VICSEK TAMÁS

# Csoportos mozgás drónokkal

Az ELTE TTK Biológiai Fizika Tanszékén, az EU ERC COLLMOT projekt keretében folyó kutatásunk az élőlények és robotok csoportos mozgásáról szól. Az élőlényeket megfigyeljük, viselkedésüket modellezzük, modelleinket pedig csoportosan mozgó, de önálló, nem központilag irányított robotok vezérlésére használjuk. Célunk olyan vezérlőalgoritmusok és robotok fejlesztése, amelyek különféle csoportos repülési feladatok önszerveződő megoldására alkalmasak. Hasonló robotsapat még nem készült a világon, ezért a fejlesztést 2014 februárjában honlapján a Nature is bemutatta.

Az élőlények együttműködésének látványos megnyilvánulása az a mintázat, ami a csoportos mozgás során létrejön. Legtöbbünk látott már az égen sűrű rajban, esetleg V-alakban vonuló madarakat, a víz alatt sűrű rajokban úszó halakat, amelyek lélegzetelállító precizitással hangolják össze gyors irányváltásaikat. A szavannákon vonuló emlősök kollektív mozgásán madártávlatból megint csak látszik a madarak mozgásához hasonló rend.



1. ábra. A csoportos mozgás során kialakuló mintázat különféle élőlények esetén hasonló

A madarakat szemlélve szinte eszünkbe sem jut, hogy a csapat tagjai között fennállna az ütközés veszélye, ezek a jelenségek tehát ösztönösen a biztonság érzetét keltik. Emiatt feltételezzük, hogy egy bármilyen sok egyedből álló csapat biztonságos dinamikusan együttműködésének előfeltétele az a képesség, hogy ezeket a mintázatokat kialakítsa.

A csoportos mozgás jelensége sokrétű, sokféle élőlény produkálja, valamint különböző méretskálákon előfordul, a statisztikus mechanikában szokásos szóhasználattal élve: univerzális. Ez az univerzalizáció készíti a fizikusokat arra, hogy a mintázat létrejöttét általánosított matematikai formában, egyszerű modellek segítségével

magyarázzák. A modellek egyik legfontosabb alapfeltevése a kölcsönhatások lokális jellege: ahhoz, hogy egy adott egyed eldöntse, merre mozdul tovább, elegendő a környékén lévő néhány egyed állapotát figyelembe venni. Másik fontos jellemző az, hogy a modellek ágens-alapúak, vagyis az élőlénycsapat statisztikus tulajdonságait az egyedek pályáját egyenként megadó egyszerű szabályok következményeként reprodukálják, nem pedig a teljes rendszer állapotterére vonatkozó makroszkopikus összefüggésekkel, mint például a hőtanban.

Az ilyen kölcsönhatásokon alapuló leírás sikeres: az élőlények mozgásáról számos területen számszerűsített, pontos képet kaphatunk a fizika segítségével [1] [2].

A fizikai modellek sikeressége jó esetben magával vonzza az ipari alkalmazások lehetőségét. Miután a csoportos mozgás matematikai háttere kidolgozásra került, a területen született eredményeket fel lehet használni például autonóm robotsapatok irányítására. Ennek demonstrálása az EL-

TE TTK Biológiai Fizika Tanszékén folyó EU ERC COLLMOT projekt egyik célja.

## Mit jelent, hogy egy drón autonóm?

Ahhoz, hogy megértsük, miben tudnak segíteni egy robotsapat fejlesztőinek az állatoktól tanultak, össze kell szednünk azokat a tulajdonságokat, amelyek hasonlóak egy önmagát vezérlő robot és például egy csapatban repülő madár esetén. Mint említettük, a madarak csak lokálisan, szomszédait észlelve és azokkal kölcsönhatva, vagyis önszerveződő módon alakítják ki a jellegzetes mintázatot. Ez a tulajdonság hasznos lehet olyan

robotok vezérlőalgoritmusának tervezésekor, amelyek csak véges hatótávolságú érzékelőkkel rendelkeznek (például ultrahangos vagy infravörös távolság-érzékelőkkel), vagy társaikkal csak véges hatótávolságú kommunikációt képesek biztosítani (például rádiófrekvenciás adó-vevőkkel).

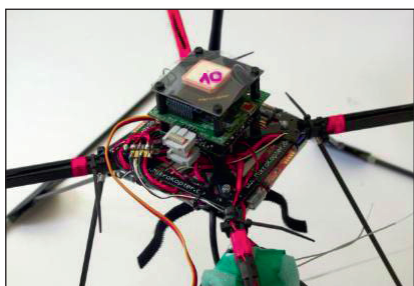
A modellek másik fontos jellemzője az ágens-alapú jelleg, ami annak felel meg, hogy a madarak nincsenek egy globális felsőbb irányításnak kitéve, döntéseiket önmaguk hozzák meg annak függvényében, hogy mit érzékelnek a külvilágból. Ez olyan robotok esetén hasznos, amelyek nem kommunikálnak például egy központi vezérlőállomással, hanem saját fedélzeti számítógéppel és érzékelőkkel vannak felszerelve.

Az említett két tulajdonság vezet arra a munkahipotézisre (és egyben az autonóm jelleg definíciójára), melyre a csoportos mozgás megvalósítása felé vezető rögzített úton végig tekintettel vagyunk: a drónok rajzását leíró matematikai modellek alapjai lehetnek egy autonóm robotokra szánt decentralizált vezérlőalgoritmusnak.

## Tervezzünk robotot!

Ahhoz, hogy a leírtak alapján fejlesztett tetszőleges algoritmust kipróbáljunk, megfelelő technikai háttérre van szükség. A technológia fejlődése épp az elmúlt években jutott el arra a szintre, hogy elérhető áron kellően jól használható eszközöket lehessen vásárolni repülő robotokhoz.

Kereskedelmi forgalomban kaphatóak például az ún. kvadkopterek (négy rotorral rendelkező repülő egységek). Ezek könnyen programozható és fejleszthető hardverrel és szoftverrel ideális alapként szolgálhatnak egy robot fejlesztéséhez. Egy ilyen eszköz a merev szárnyú repülőgépekhez képest mechanikailag egyszerű, robusztus és széles sebességtartományon tud



**2. ábra. Autonóm drón részlete, tetején a GPS vevővel, alatta pedig az általunk tervezett illesztőhardverrel, fedélzeti számítógéppel és XBee kommunikációs modullal**

mozogni, például a levegőben egy helyben is meg tud állni, ami számos alkalmazás során hasznos lehet.

Ahhoz, hogy egy lehetséges feladatmegoldáshoz egy kvadrokopter elegendő ideig tudjon repülni, könnyű, de mégis nagy kapacitású akkumulátorokra van szükség. Ez szintén az elmúlt években vált olcsón elérhetővé. Kaphatóak miniatűr számítógépek, amelyek egy szokásos számítógéphez hasonlóan könnyen programozhatóak, de nem nagyobbak, mint a hüvelykujjunk. Nagy hatótávolságú, elegendően gyors adatátvitelt biztosító rádiófrekvenciás kommunikációs eszközök kerültek forgalomba, amelyekkel minden szükséges adatot elegendően gyorsan továbbíthatunk az egyedek között.

Munkánkhoz egy Mikrokoopter típusú kvadrokoptert választottunk, amit felszereltünk egy Gumstix Overo Water típusú miniszámítógéppel, XBee rádiófrekvenciás kommunikációs modullal és GPS vevőkkel. Az eszközök integrálására saját illesztőhardvert fejlesztettünk.

Az így kialakított rendszer teljesen decentralizált, központi irányítást nélkülöző, azaz minden egyed a fedélzetén lévő számítógép segítségével végzi el a szükséges számításokat.

### Alakzatrepülés

Az előzőekben leírt roboton a repülés automata vezérlése a következőképpen zajlik: a robot megkapja a saját pozícióját és sebességét a GPS vevő segítségével, XBee vevőn keresztül pedig a többi, kommunikációs hatótávolságon belül lévő egyed pozíció- és sebességadatait. Az adatokból a csoportos mozgás matematikai modelljein alapuló algoritmus kiszámol egy kívánt sebességet. Mindezek mellett saját pozícióját és sebességét elküldi a környező többi robotnak.

A következőkben áttekintjük az alap algoritmusok elemeit. Ezek közül kettő

az egymáshoz közeli egyedek viselkedését befolyásoló kölcsönhatási tag. Az első egy szokásos taszító párkölcsönhatás, ami az ütközések elkerülése miatt fontos:

$$v_{ij}^{pot} = \begin{cases} D(|d_{ij}| - r_0) \frac{d_{ij}}{|d_{ij}|}, & \text{ha } |d_{ij}| < r_0 \\ 0, & \text{egyébként} \end{cases}$$

A képletben  $D$  egy rugóállandóhoz hasonló együttható,  $d_{ij} = r_i - r_j$  az egyedek helyvektorának különbsége,  $r_0$  pedig a kölcsönhatás hatótávolsága.

A másik kölcsönhatási tag az egymáshoz közeli egyedek sebességét közelíti, hasonlóan a szokásos viszkózus súrlódáshoz:

$$v_{ij}^{frict} = C_{frict} \begin{cases} \frac{v_j - v_i}{|d_{ij}|^2}, & \text{ha } |d_{ij}| > 1m \\ v_j - v_i, & \text{egyébként} \end{cases}$$

Itt  $C_{frict}$  a súrlódás együtthatója,  $v_i$  az  $i$ -edik egyed sebességvektora. Szükséges a tagot levágni kis távolságoknál, elkerülve ezzel a keletkező végtelen járulékokat. Lényegében ez a tag a felelős a csoportos mozgás szokásos mintázatának kialakításáért.

Ha a fenti két taghoz hozzáadunk még egyet, aminek hatására az adott robot a legutóbbi mért sebességével párhuzamosan,  $v_{flock}$  sebességgel szeretne mozogni és az egyedeket bezárjuk például egy négyzet alakú aréna (ezt megtehetjük úgy, hogy az aréna „virtuális” falait, mint taszító elemeket vezetjük be), akkor egy minimális algoritmust kapunk ütközésmentes csoportos mozgásra. Az egyed preferált sebessége ( $v_i^{pref}$ ) a fentiek alapján az alábbi alakot ölti:

$$v_i^{pref} = \sum_{j=1, j \neq i}^N (v_{ij}^{pot} + v_{ij}^{frict}) + \frac{v_i}{|v_i|} v_{flock}$$

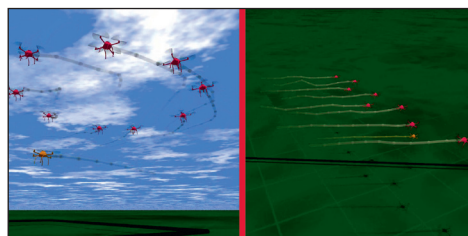
**3. ábra. Nappali és éjszakai fényképek a rácsszerű formációt felvett dróncsapatról**



Ha ez utóbbi tag helyett bonyolultabb kifejezéseket írunk fel, különféle (akár dinamikusan változó) alakzatok kialakulását biztosíthatjuk, úgymint rácsszerű struktúra, kör vagy egyenes.

Egyik implementált algoritmusunk olyan állapotot eredményez, amelyben az egyedek a tömegközéppontjuk körül körkörös mozgást végeznek. A mozgás iránya azonban nem adott: önszerveződő módon alakul ki, azaz egy adott egyed a szomszédos egyedek mozgási irányából „találja ki”, hogy milyen irányba fog körözni.

Egy másik fejlesztett algoritmus akadályelkerülésre való: a drónraj tagjai a GPS koordináták alapján megadott objektumokat mint virtuális, az objektumtól távolodó egyedeket érzékelik, és ezekkel a virtuális egyedekkel kölcsönhatva kerülnek el az ütközést. Az algoritmus segítségével megvalósítottunk egy olyan szituációt, aminek során az egyedeknek egy szűk folyosón kell keresztülmenniük. A folyosó kapujánál az egyedek szokásosan feltorlódnak, minden egyed kivárja a sorát és ily módon egyesével haladnak át a szűk helyen.



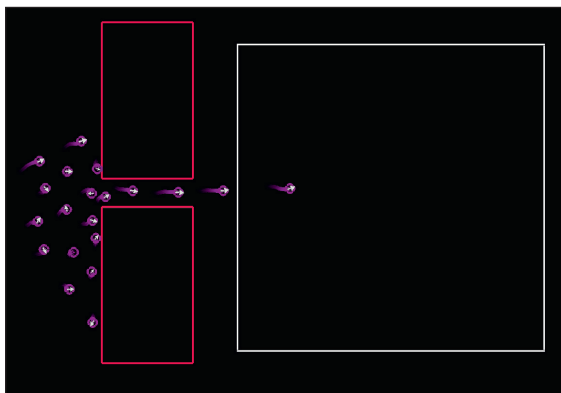
**4. ábra. GPS-adatokból rekonstruált pályák vizualizációja. Egy mozgó célpont felett kör (balra) és egyenes (jobbra) formációban repülő csapat**

Fontos megjegyezni, hogy a fejlesztett algoritmusok függetlenek attól, hogy a robot hogyan szerzi meg a szomszédai koordinátáit, vagyis nem kell feltétlenül a GPS rendszerre támaszkodnunk. Későbbi terveink közt szerepel, hogy az egyedeket kamerákkal vértesszük fel, és az egyedek ezek segítségével lássák egymást repülés közben.

Az algoritmusok működőképessége azt bizonyítja, hogy a szokásos egyszerű fizikai modellekből származó kölcsönhatási tagok sokféle alkalmazásba beültethetők.

### A valóság zajos és késik

Az egyed a saját vezérlőalgoritmusának kimenetét, a kívánt sebességet nem tudja egyből elérni. A robotoknak van tehetetlenségük, fújja őket a szél, a GPS vevők által biztosított pozíció-adat pontatlan le-



5. ábra. A folyosón áthaladás szimulációja. A piros téglalapok az akadályokat, a fehér négyzet a célterületet mutatja. Az egyedek a folyosó bejáratánál megállnak, kivárják a sorukat, hogy átjuthassanak a célterülethez

het, a számításokhoz pedig idő szükséges. Mindezen tényezők figyelembevételéhez realisztikus szimulációs környezetet fejlesztettünk. A szimuláció segítségével a robotokon futó algoritmus egyes tagjait még a valódi robotokon végzett tesztek előtt optimalizálni lehet.

Az egyik legjelentősebb nehezítő tényező a számításához szükséges idő és a kommunikáció sajátosságai miatt fellépő időkéstelletés. Egyszerűen fogalmazva: az adott időpillanatban a szomszéd egyedektől kapott pozíció- és sebességadatok valójában korábbi időpontra vonatkozó adatok.

Legegyszerűbb szimulációbeli közelítésünk szerint ez az időkéstelletés nem függ attól, hogy a két kommunikáló egyed milyen messze van egymástól, és időben sem változik, vagyis az adott egyed a szomszédaitól kapott  $t_{del}$ -el korábbi időpillanatbeli pozíciókkal és sebességekkel dolgozik. A szimulációs környezet segítségével azt láttuk, hogy nagy időkéstelletés esetén például egy rácsba rendeződést megvalósító algoritmus esetén öngerjesztő oszcillációk keletkeznek, amelyek ütközésekhez vezethetnek. A jelenségre megoldást szolgáltatott a sűrűdásszerű kölcsönhatási tag együtthatójának növelése.

Számos ehhez hasonló optimalizációs lépés előzi meg az algoritmusok „élesben” való tesztelését. Kiderült, hogy a késleltetés és egyéb hátráltató tényezők okozta instabilitások mértéke csökkenthető az algoritmus együtthatóinak (elsősorban a sűrűdási együtthatónak) jó megválasztásával. A bemutatott algoritmusok megfelelő paraméter-beállítással az

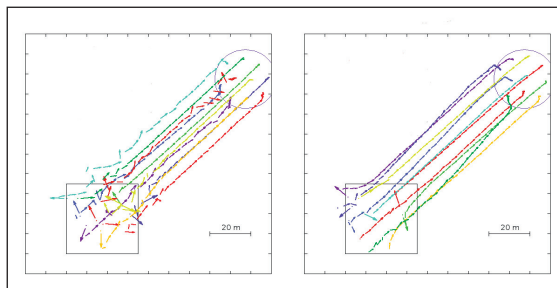
említett hatások ellenére is stabilak tudnak maradni.

Vezérlőalgoritmusaink további fontos tulajdonsága, hogy elméletben nagyméretű csapatok esetén is működnek, még akkor is, ha az így kapott csapat mérete (vagy például a kialakítandó alakzat mérete) sokkal nagyobb, mint a kommunikáció hatótávolsága. Ilyen esetben ugyan nem garantálható, hogy minden egyed minden más egyedet figyelembe tudjon venni, de a kölcsönhatások lokális jellege elegendő a mintázatok kialakulásához.

### Drónok hajnala

A csoportosan mozgó drónok ipari alkalmazása, bár elméletileg sokrétű, még nem kiforrott. Ennek oka a téma újszerűsége, és az igazán hatékony konkrét rendszerre írt algoritmusok hiánya. Az egyes specifikus alkalmazások hardverfejlesztést is igényelhetnek, például felszerelhetünk az egyedekre hőkamerát, és erdőben, éjszaka kereshetünk a robotcsapattal eltűnt embereket.

A lehetséges kiépítendő alkalmazások között szerepel még a kommunikációs lánc megalkotása: ha két pont között nem tudunk rádióüzenetet továbbítani, akkor a robotokat egyenesbe állíthatjuk a két pont közötti szakaszon, hogy rajtuk keresztül vezesse el az üzenetet. A dróncsapatot felhasználhatjuk állatsapatok videózására, területfedezésre, menekülő egy-

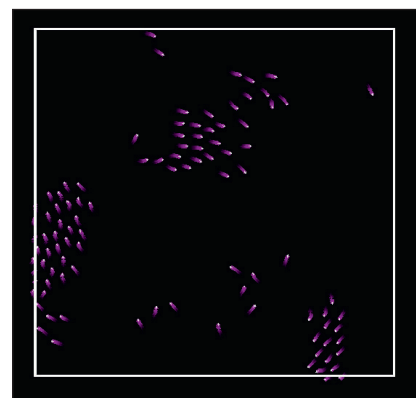


6. ábra. Az egyedek pályája egy rácsszerű alakzatrepülését megvalósító algoritmus szimulációs tesztje során. Bal oldalon látható, hogy ( $C_{fric}$  értékét nullára csökkentve) a késleltetés oszcillációkat okoz. Jobb oldalon  $C_{fric} = 10m^2$  érték esetén az oszcillációk hamar lecsengenek. A négyzet jelzi a kezdeti területet, a kör pedig egy megközelítendő célpontot mutat. A nyilak az egyedek sebességét jelképezik

ség elfogására, járőrözésre, erőforrások keresésére, de felmerült a robotok mezőgazdasági alkalmazásának lehetősége is, amennyiben tápanyagokat, növényvédő szert intelligens

módon lehet velük minimális mennyiségben, csak a kívánt helyre juttatni, egyéb terepi károsítás nélkül.

Megállapítható tehát, hogy a madaraktól és egyéb állatoktól tanultak remekül beültethetők különféle csoportos robotikai feladat megoldásába. A kapott eredmények azonban jóval többet jelentenek, mint egy tudományterület alkalmazhatóságának a bemutatása: azt láttuk, hogy a különféle pontatlanságok, amelyek egy robot esetén fennállnak (szenzorok pontatlansága, késleltetés, tehetetlenség), gyökeresen megváltoztathatják a csapat viselkedését, a felmerülő problémák megoldása pedig



7. ábra. Az legegyszerűbb csoportos mozgást megvalósító algoritmus 100 egyeddel futtatott szimulációja. Az egyedek kicsi csapatokban mozogtak, amelyek önszerveződően jöttek létre. A kialakult csapatok mérete az egyedek közötti kommunikáció hatótávolságánál legalább kétszer nagyobb

nehéz optimalizációs problémát jelenthet. Az élőlények mozgása viszont szinte tökéletesen összehangolt, ami azt jelenti, hogy például az egyedek reakcióideje (ami az időkéstelletésnek felel meg) nagyon alacsony kell, hogy legyen.

A kutatás célja tehát nem csupán az, hogy alkalmazzuk, amit az állatok esetén megfigyeltünk és modelleztünk – az állatokra vonatkozó értékes megfigyeléseket is tehetünk, ha viselkedésüket összevetjük a robotok viselkedésével. ☞

A kutatás az EU ERC COLLMOT 227878 pályázat támogatásával valósult meg. A VG-t részben támogatta a TÁMOP 4.2.4.A/1-11-1-2012-0001 Nemzeti Kiválóság Program

### Irodalom

- [1] Czirik A., Csahók Z., Derényi I. és Vicsek T.: „Biológiai mozgások statisztikus fizikai modelljei” Fizikai Szemle 6, (1996) 189
- [2] Vicsek T.: „Biológiai Rendszerek Modellezése.” Természet Világa I. különszám. A Fizika százada, (2006) 96