

Drónrajok fizikája, technológiája és alkalmazásai

Vásárhelyi Gábor, PhD

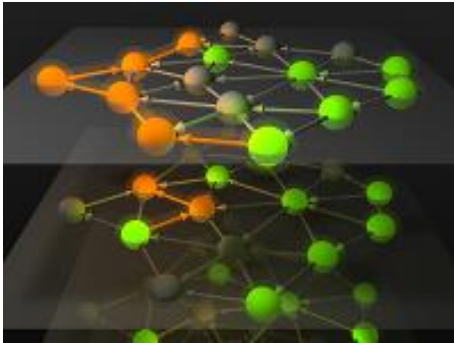
ELTE Biológiai Fizika Tanszék

Folyamatban lévő kutatási támogatások:
MTA-ELTE Statisztikus és Biológiai Fizika Kutatócsoport
Bolyai János Kutatási Ösztöndíj

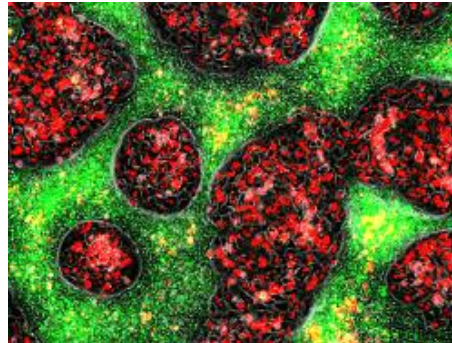
ATOMCSILL
2016. március 17.
ELTE Lágymányos 1/A, 0.83

EU ERG COLLMOT project

complex structure and dynamics of collective motion



hálózatok: irányíthatóság,
hierarchia, adathalászat



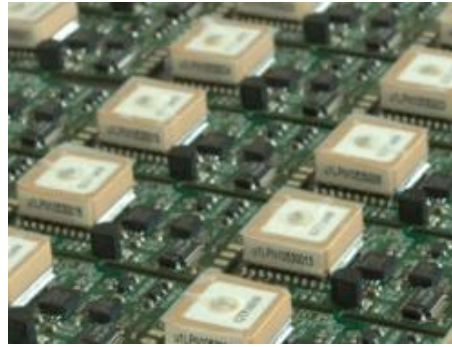
sejtek, szövetek: mintázat,
szegregáció, perkoláció



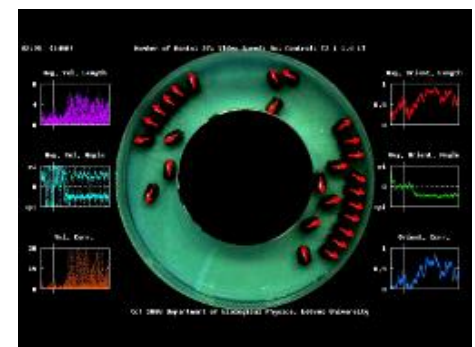
madarak, emlősök:
szociális dinamika, vezetés



szimulációk: csoportos
döntés, optimális hierarchia



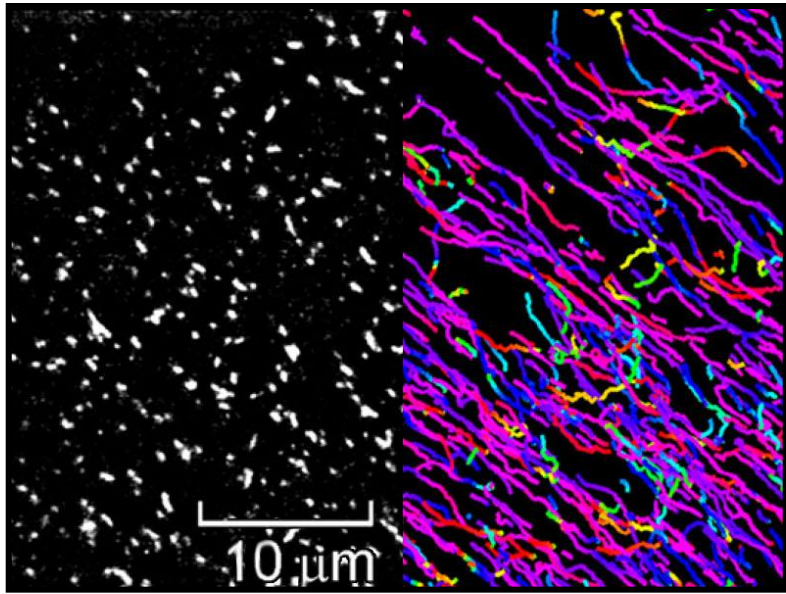
hardver, szoftver:
GPS, INS, videó



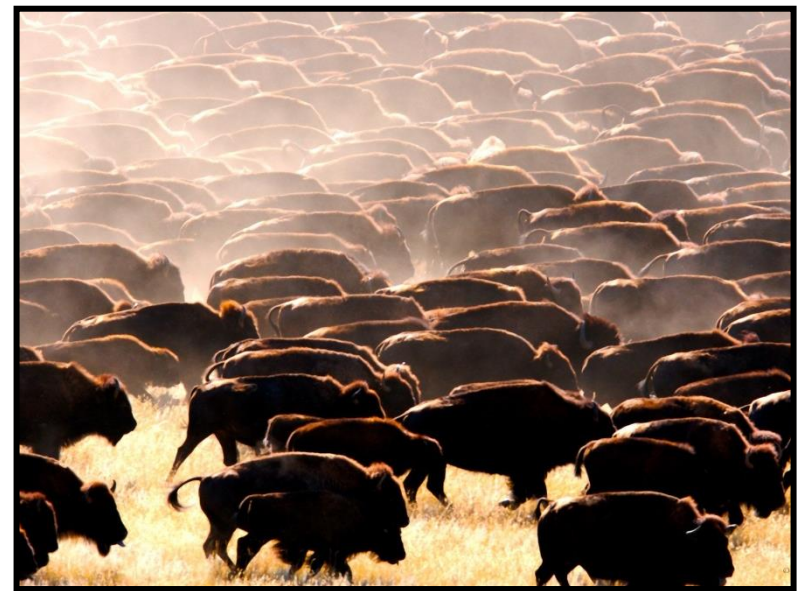
robotok, drónok:
vezéregyedek, autonómia

Milyen a csoportos mozgás?





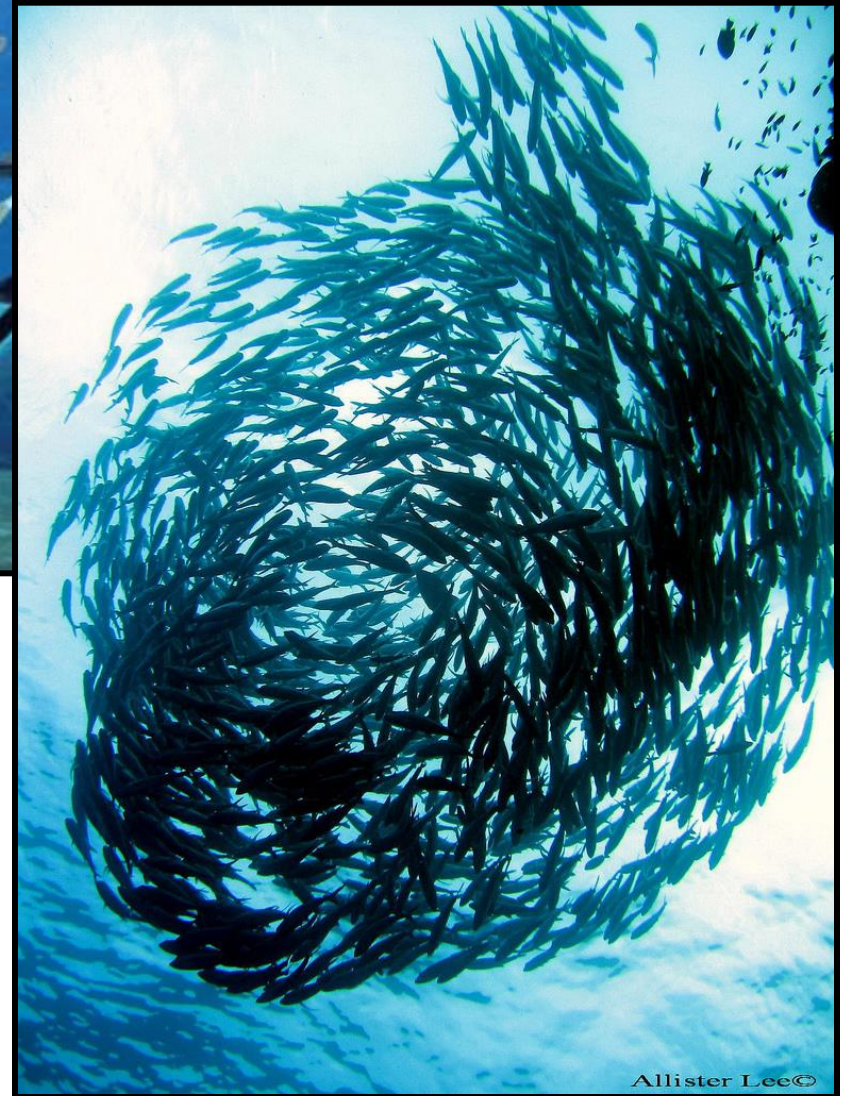
U
n
i
v
e
r
z
á
l
i
s



Hatékony



Önhajtott,
nem egyensúlyi



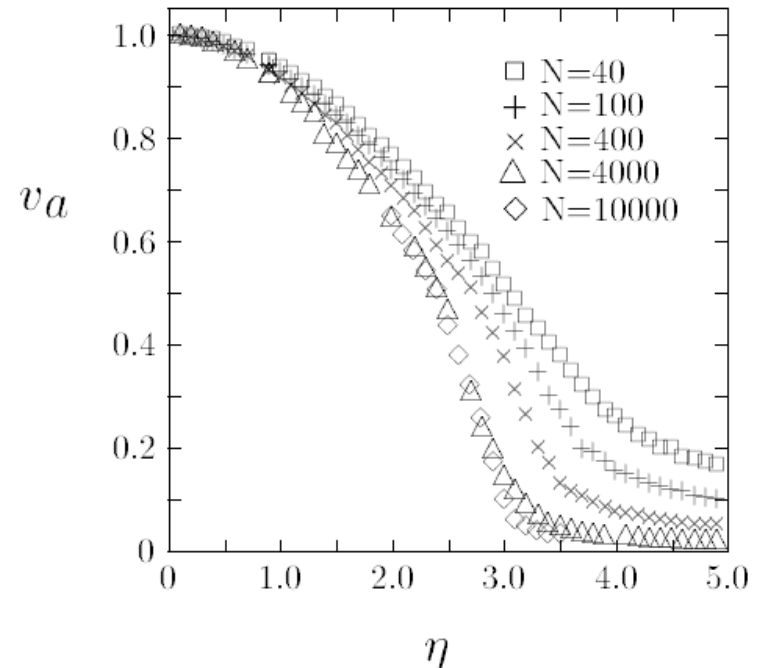


Egyszerűen
modellezhető,
mégis bonyolult...



Vicsek-modell

- Állandó sebességű, **önhajtott** részecskék
- Sebesség irányát befolyásolja:
 - **Szomszédos** részecskék sebességének iránya
 - **Zaj**



Vicsek, T.; Czirok, A.; Ben-Jacob, E.; Cohen, I.; Shochet, O. (1995). "Novel type of phase transition in a system of self-driven particles". Physical Review Letters

Kutatási irányok, kérdések

- Csoportos mozgás miképpen hatékony?
(gyors, biztonságos, robusztus, redundáns)
- Információterjedés a csoportban/hálózatban
- Optimális csoportos döntéshozatal,
csoportos viselkedés
- Közösségek felépítése:
egyforma egyedek → vezetők → hierarchia
- Mesterséges csoportok (robotok), csoportos
intelligencia

Modern technológiák az etológia szolgálatában

- Kamerák (jó felbontás térben és időben, automatikus képfeldolgozás, sztereo/3D)
- Mozgásérzékelők (VICON, gyorsulásmérő, giroszkóp, magnetométer, nyomásérzékelő)
- Helymeghatározók (GPS/GNSS, GSM, rádió lokátorok, RFID)
- Adatfeldolgozási kapacitás és sebesség

Ember és állat

- **Emberek:** hierarchiák sokasága (fizikai erő, vallások, vállalatok, intézmények, sportok, stb.)
- **Állatok:** dominancia, „erősebb kutya eszik”

Galambok:
dominancia
vs.
navigáció



Automata dominancia mérés



© 2012 M. Nagy^{1,2}, G. Vásárhelyi¹, B. Pettit², I. Roberts-Mariani², T. Vicsek¹ and D. Biro²
¹COLLMOT Research Project, Department of Biological Physics, Eötvös University
²OxNav Research Group, Department of Zoology, University of Oxford

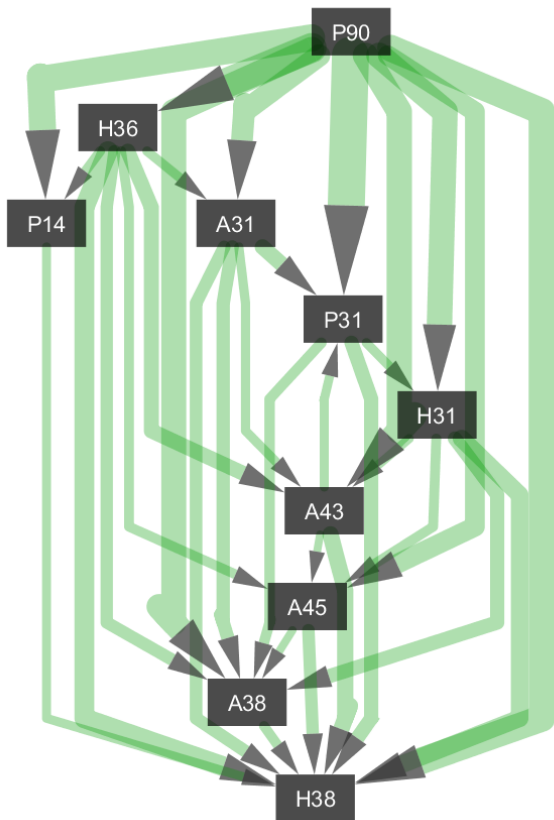
FQ Feeding-Queuing
Automatically identified interactions
Feeding
Queuing

- G. Vásárhelyi, Zs. Ákos, M. Nagy, D. Ábel, B. Petit, D. Biro, T. Vicsek, "Novel methods for high-throughput automated ethology," *Abstracts of Animal Swarms Conference*, Kfar Blum, Izrael, 2013, 9-9
- M. Nagy, G. Vásárhelyi, B. Pettit, I. Roberts-Mariani, D. Ábel, D. Biro, T. Vicsek, "Computer vision aided quantitative analysis of the social dominance hierarchy of homing pigeons," *Collective dynamics and pattern formation in active matter systems – International Workshop*, Drezden, 2011

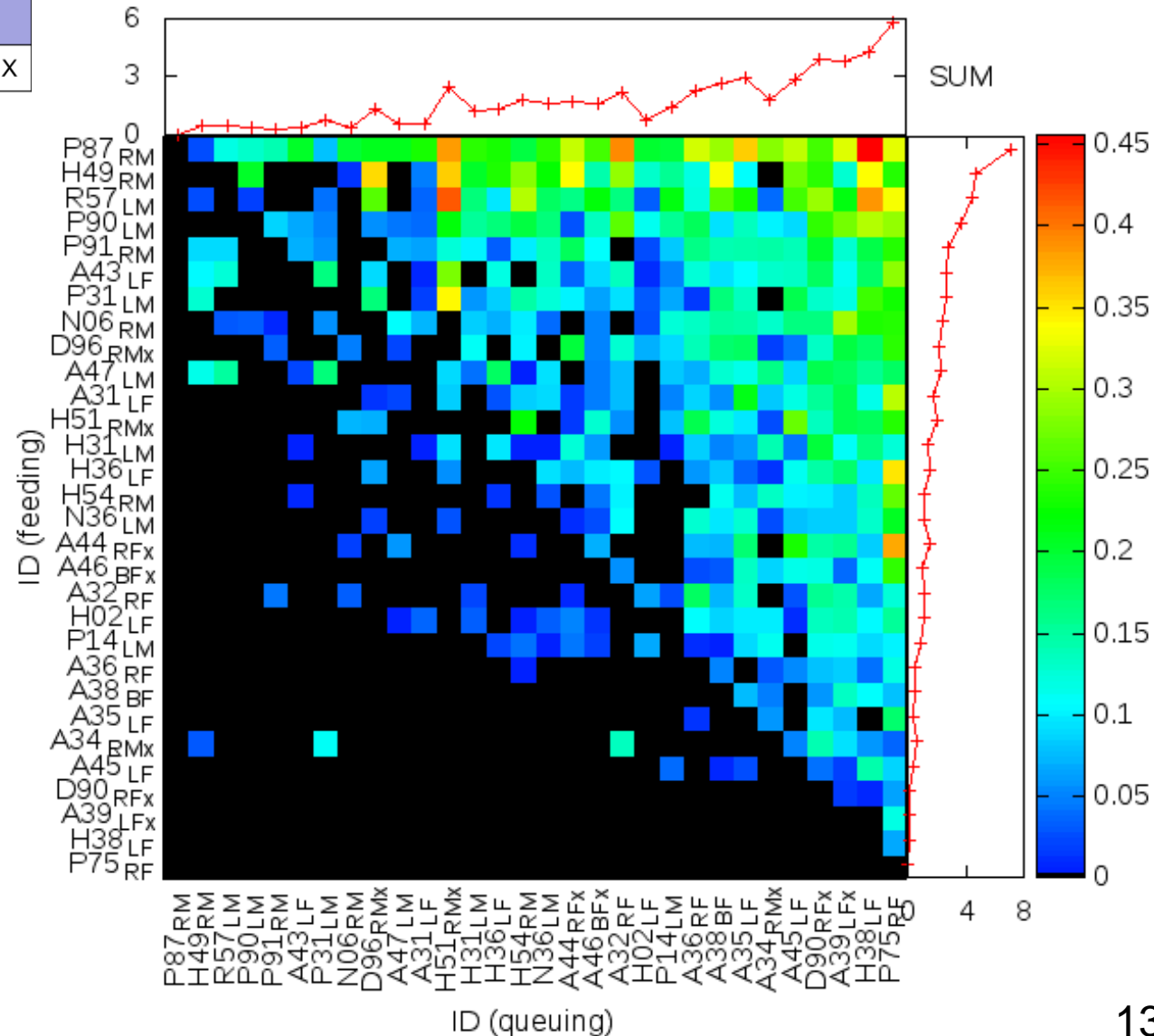
Hierarchikus tulajdonságok



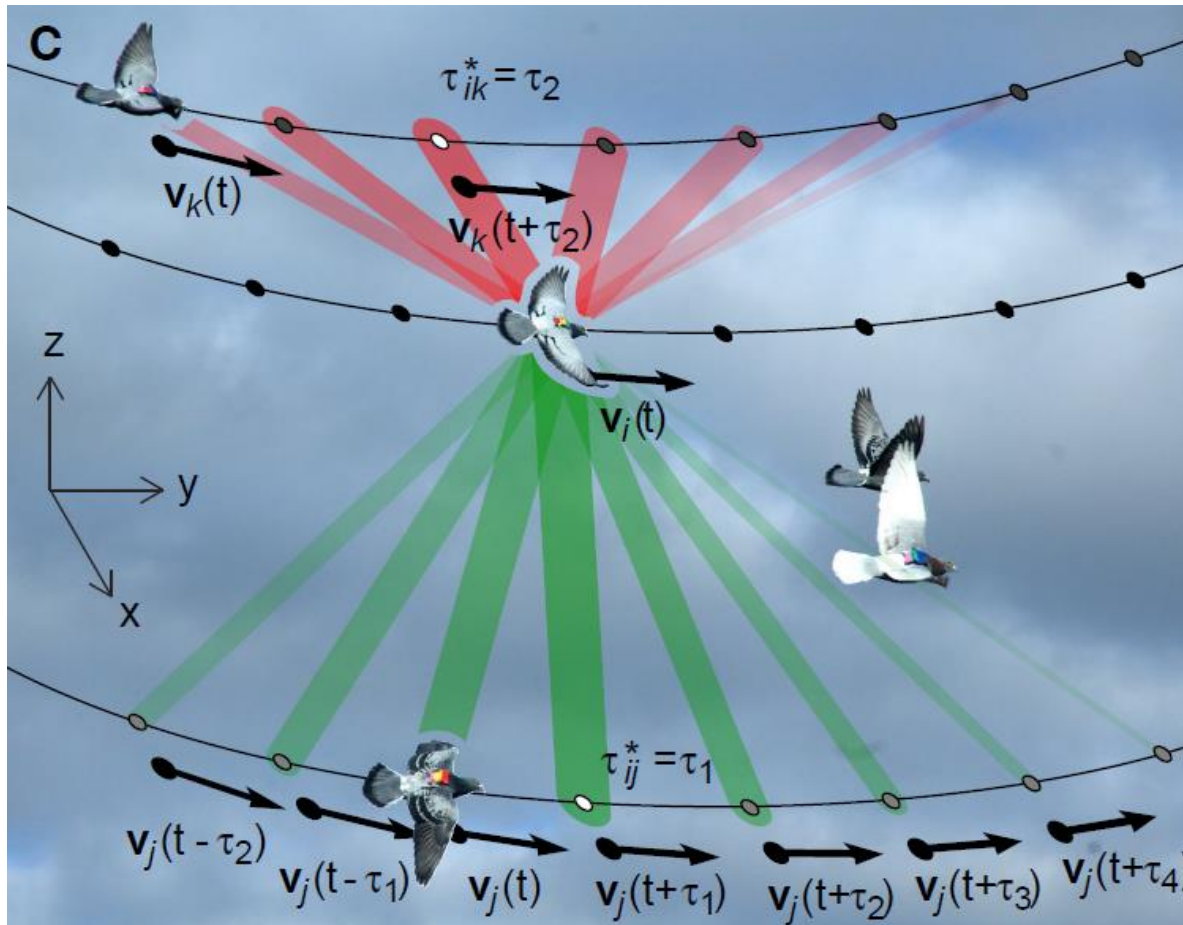
10-es csoport



30-as csoport



Navigációs kompetencia mérés



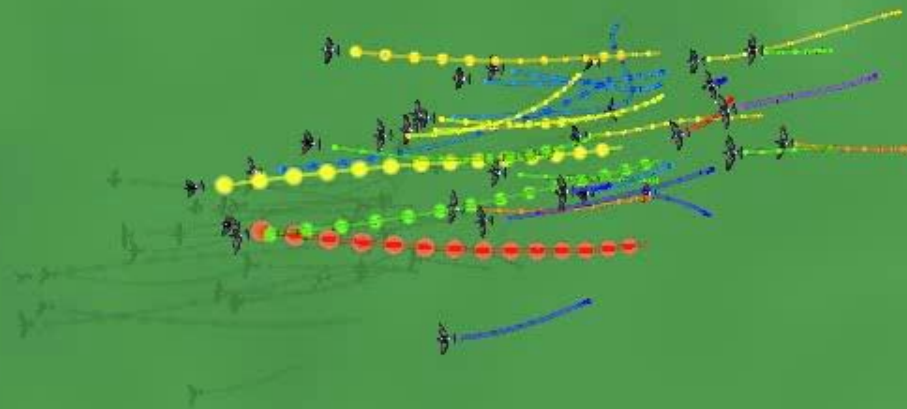
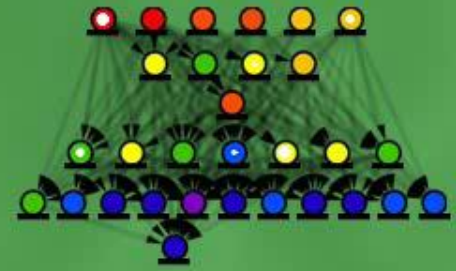
$$Corr_{ij}(\tau, t) = \left\langle v_i(t') \cdot v_j(t'+\tau) \right\rangle_{t' \in [t-3s; t+3s]}$$

$$\tau_{ij}^*(t) = \max(Corr_{ij}(\tau, t))$$

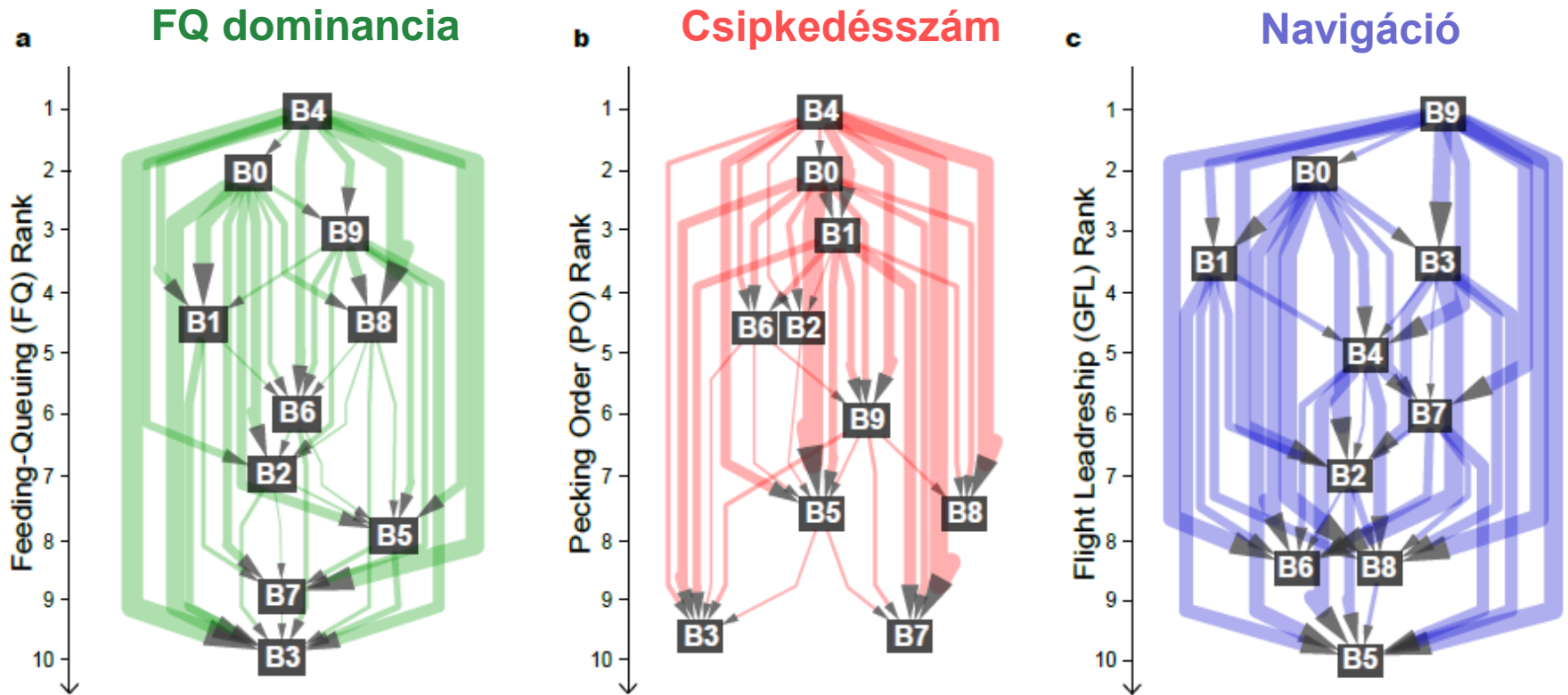


Nagy, M., Ákos, Z., Biro, D., & Vicsek, T., „Hierarchical group dynamics in pigeon flocks,” 2010 *Nature*

Stabil hierarchia 30 fős galambcsapat csoportos repülésében



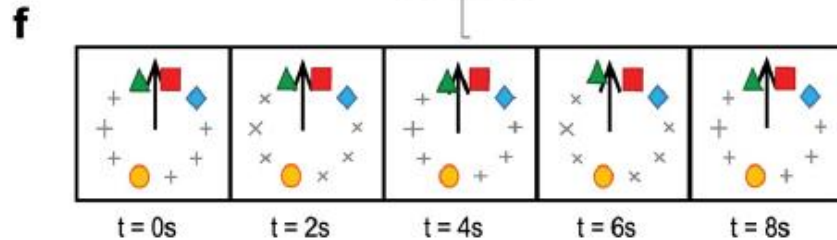
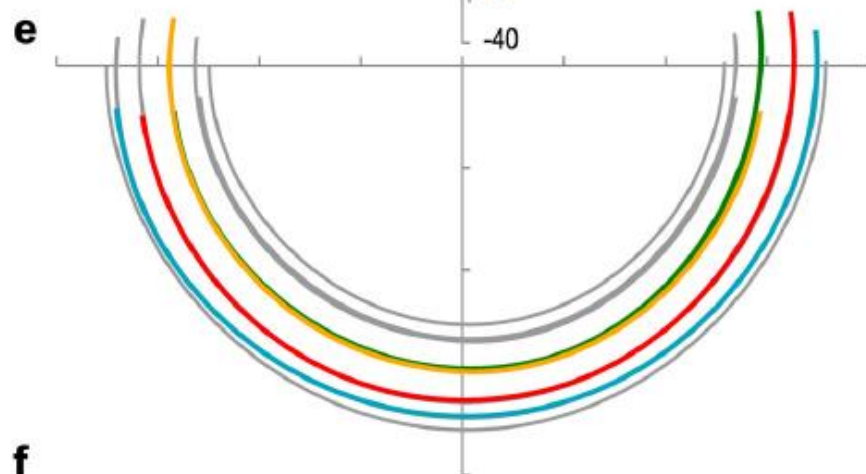
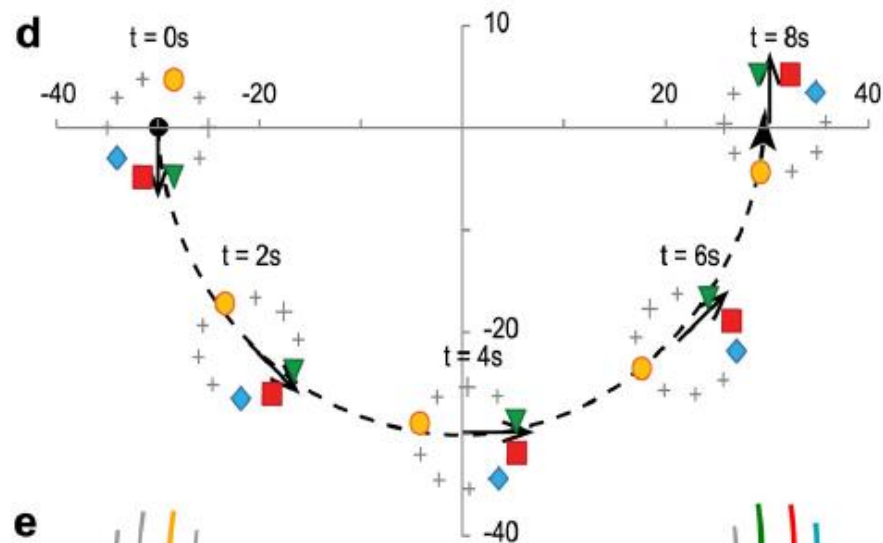
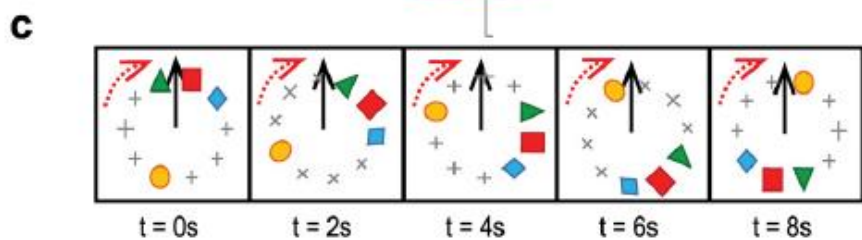
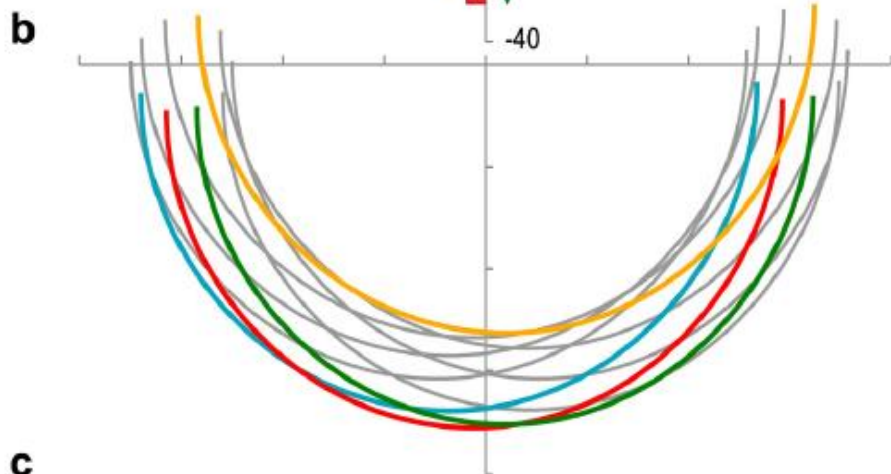
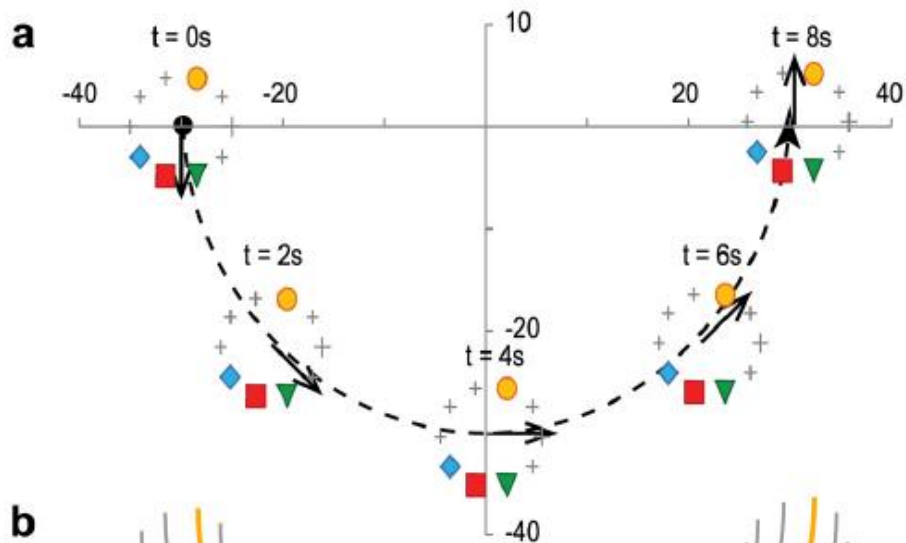
Kontextusfüggő stabil hierarchiák



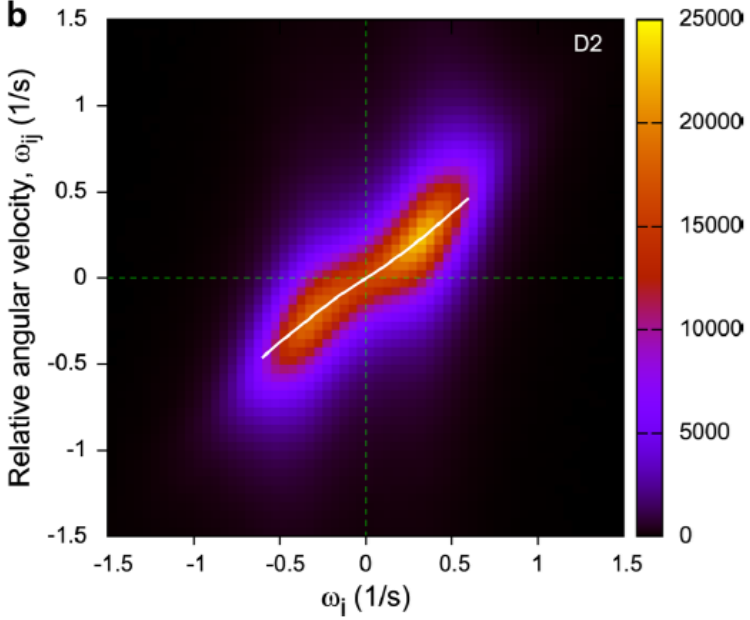
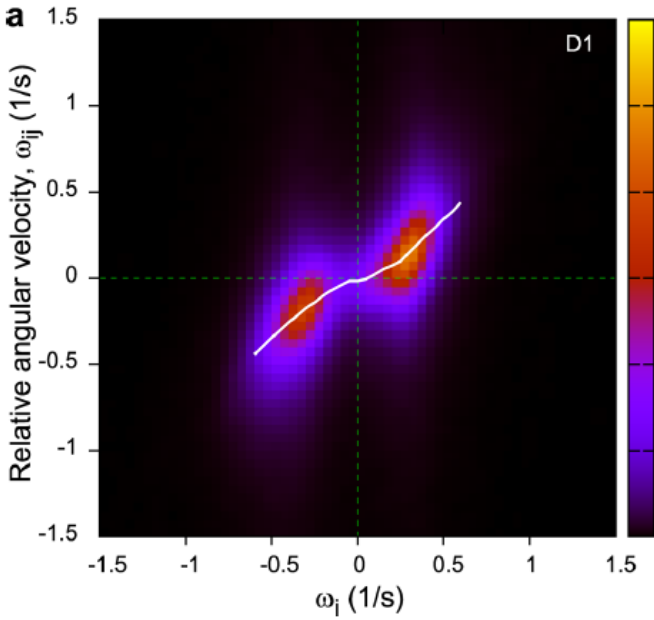
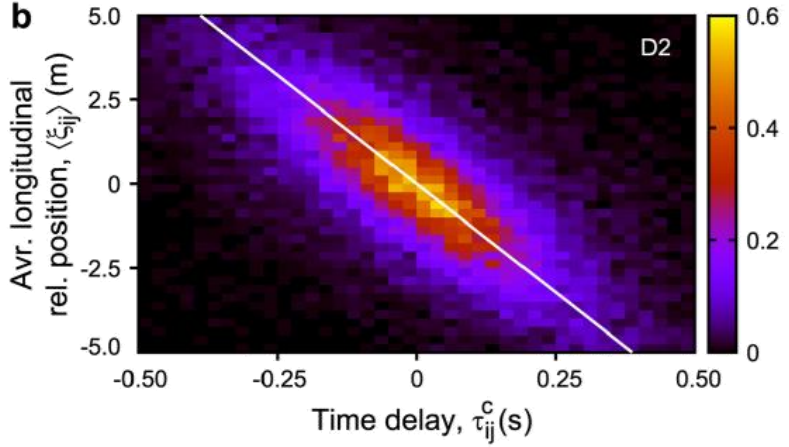
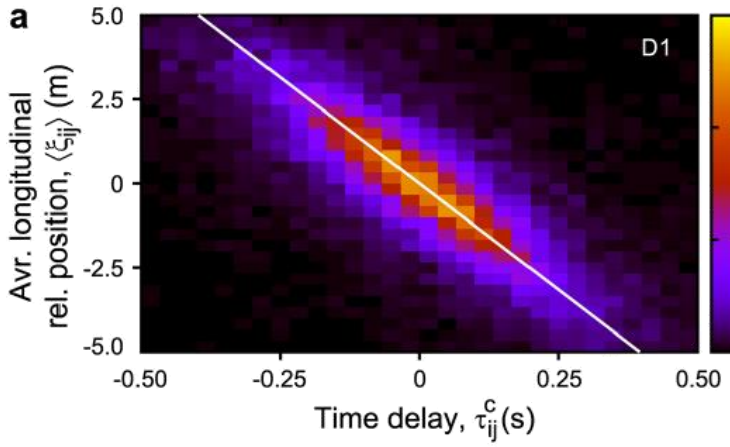
M. Nagy, G. Vásárhelyi, B. Pettit, I. Roberts-Mariani, T. Vicsek, D. Biro, "Context-dependent hierarchies in pigeons," *PNAS*, 110 (32): 13049-13054. (2013)

(E)qual radius

(P)arallel path



$$\langle \xi_{ij} \rangle = -V \tau_{ij}^c$$

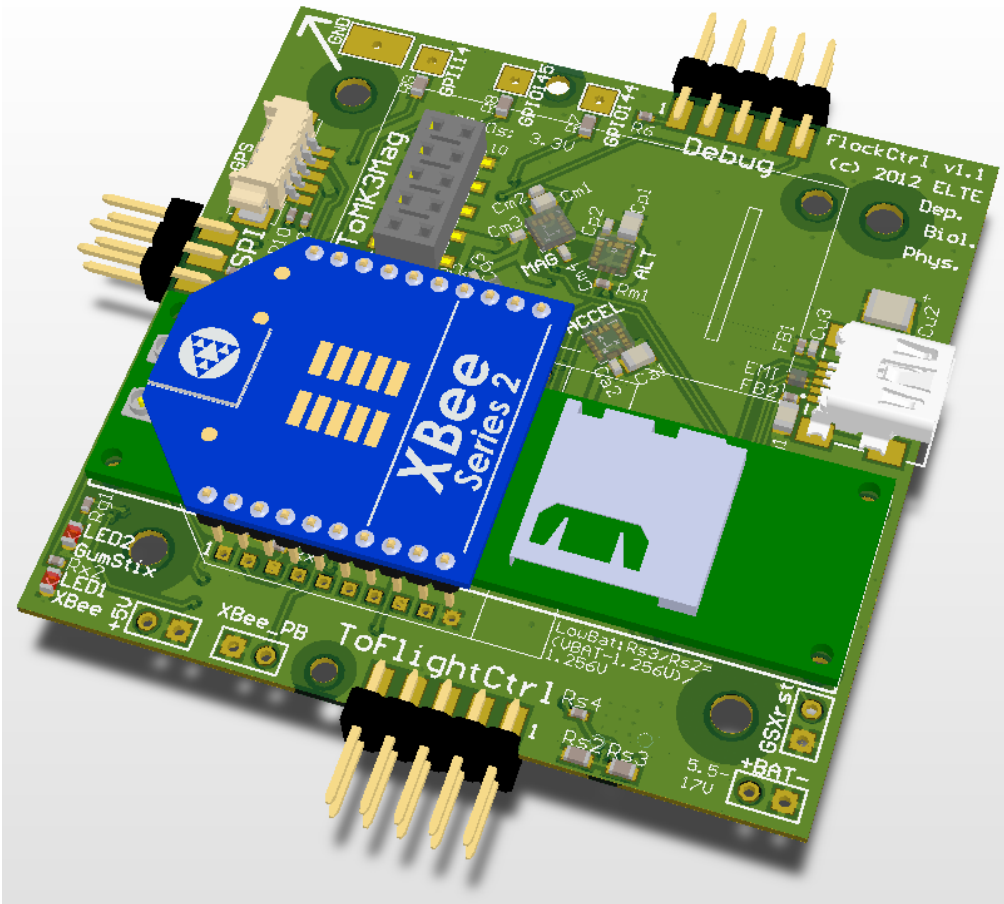


Equal radius:
 $m=1$ (/)

Parallel path:
 $m=0$ (-)

M. Yomosa, T. Mizuguchi, G. Vásárhelyi and M. Nagy, "Coordinated Behaviour in Pigeon Flocks," *PLoS ONE, Public Library of Science*, 10, Paper e0140558 (2015)

Új logger = drón autopilóta



- GPS, gyorsulásmérő, giroszkóp, mágneses iránytű, nyomásmérő, hőmérő
- Vezetéknélküli kommunikáció
- Onboard miniszámítógép, Linux, **valós idejű** adatelemzés
- 6x6 cm, 100 g

Építsünk drón csapatot, ami...

- **autonóm** (központi irányítás nélkül repül)
- **skálázható, meta egyedként** irányítható, feladatokat **önszerveződően** old meg
- **bio-inspirált**: Mit vehetünk át az állatvilág csoportos mozgásából?
- **minket is inspirál**: Mit tanítanak nekünk a drónok az állatok mozgásáról?



GPS, XBee (szem, fül+hang)

ESC

ESC

FlockCtrl (agykéreg)

AutoPilot
(agytörzs)

ESC

ESC (kisagy)

RC (kéz)

Flocking algoritmus alapok

Nagy hatótávú vonzás: aki messze van, a csapat felé megy

Közepes hatótávú irányillesztés: egyensúlyi távolságban sebességeket össze kell hangolni

Rövid hatótávú taszítás: ütközést el kell kerülni, túl közel taszítják egymást

hibakezelés:
Késleltetések, zajok,
vészhelyzetek

Késleltetett infó terjedés

half speed



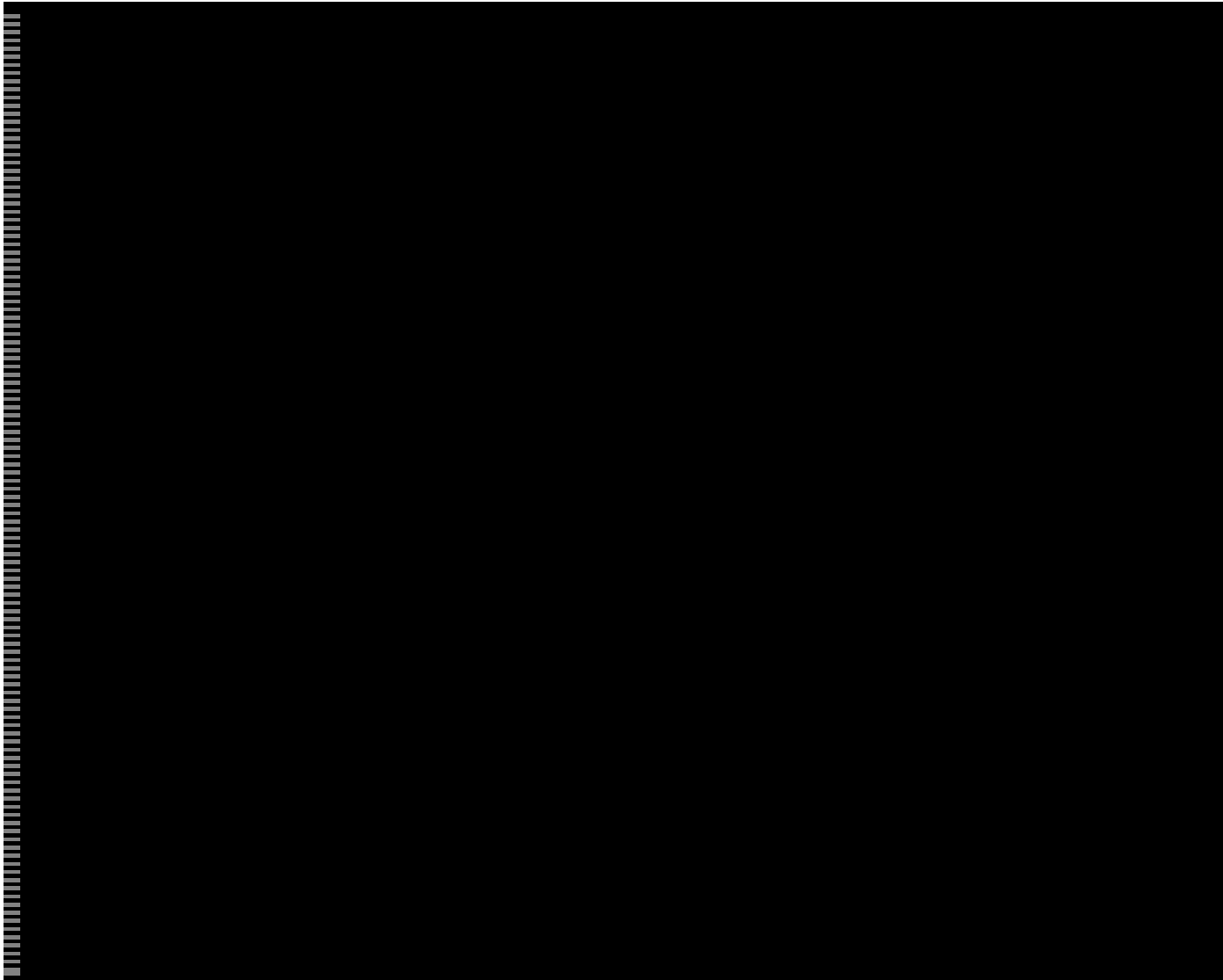
source: http://www.youtube.com/watch?v=Cj_NeOtehqM

Lokális késleltetés = 13s / 16 egyed \approx **0.8 sec/egyed!!!**

Késleltetés + hajtás =

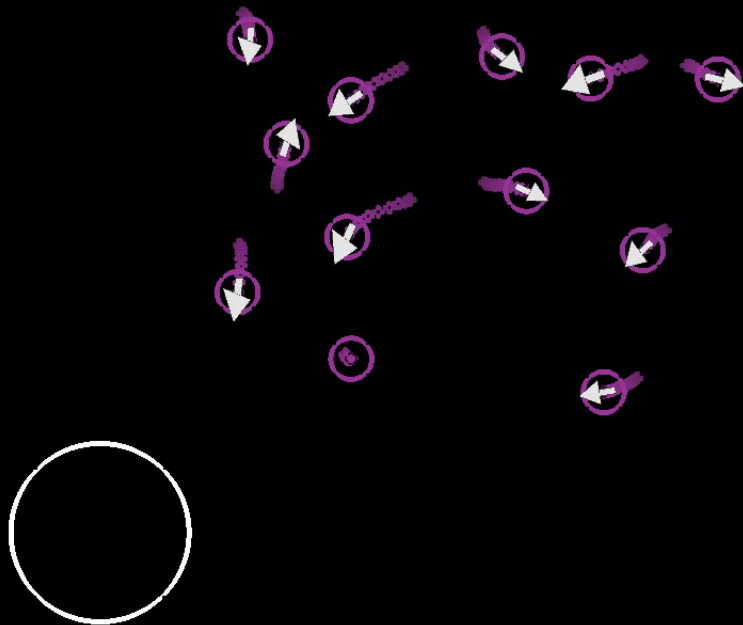
öngerjesztett rezgés

Forgalmi dugók ok nélkül?



Késleltetés okozta oszcillációk

(c) 2014 Department of Biological Physics, Eötvös University
EU ERC COLLMOT



Elapsed Time : 2.0 sec
Average Velocity: (2.2 +- 0.82) m/s
Distance between units: (19.48 +- 8.12) m

16.8 m
Model: Target tracking

(key: 'v') Velocity limit	On
(key: 'a') Acceleration limit	On
(key: 'q') Delay Time	1.7 sec
(key: '1') Eq distance of potential	8.00 m
(key: '2') Spring Constant	8.0 1 / sec
(key: '3') C_slip	0.0 m ²
(key: '4') Target Area Radius	6.5 m
(key: '5') Gamma	2.00 m
(key: '6') Outside Speed (V_0)	2.00 m / sec
(key: '7') Relaxation Time of PID	1.00 sec
(key: '8') Noise Level (Eta)	0.30 m ² / sec ³
(key: '9') GPS xy Accuracy	0.000 m ² / sec ²

(key: 'r') GPS Refresh Rate	0.20 sec
(key: 'j') Sensor Range	100.0 m

(key: 's') Visualization Speed	50
--------------------------------	----

Probléma #2: minden zajos

Belső zajok

- GPS hiba: ~2-3 m pozíció, ~0.3 m/s sebesség
- Zajos érzékelők (magasság, gyorsulás, szögsebesség)
- Irány/állásszög hiba (GPS + INS fúzióból)

Külső zajok

- Szél, termikek
- Légnyomás, hőmérséklet
- Napkitörések

Az egyetlen egyenlet dia

$$\vec{a}_{pot}^i = \begin{cases} -D \sum_{j \neq i} (|\vec{x}^j - \vec{x}^i| - r_0) \frac{\vec{x}^j - \vec{x}^i}{|\vec{x}^j - \vec{x}^i|}, & \text{if } |\vec{x}^j - \vec{x}^i| < r_0 \\ 0 & \text{otherwise,} \end{cases}$$

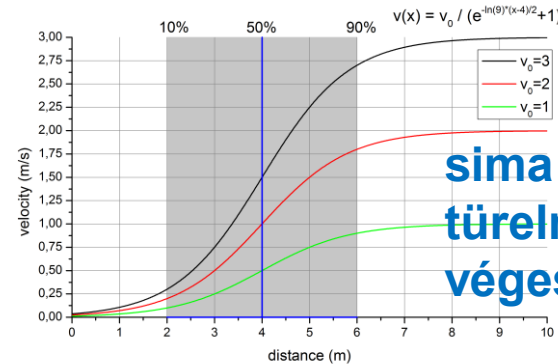
taszítás (gerjesztő)

if $|\vec{x}^j - \vec{x}^i| < r_0$



$$\vec{a}_{damp}^i = C \sum_{j \neq i} \frac{\vec{v}^j - \vec{v}^i}{(|\vec{x}^j - \vec{x}^i|)^2}$$

illeszkedés (csillapító)



**sima függvény +
türelmi zóna +
véges gyorsulás**

$$\vec{v}_{COM}^i = \beta v_0 f(|\vec{x}_{COM} - \vec{x}^i|) \frac{\vec{x}_{COM} - \vec{x}^i}{|\vec{x}_{COM} - \vec{x}^i|}$$

vonzás

$$\vec{v}_{trg}^i = \alpha v_0 f(|\vec{x}_{trg} - \vec{x}_{COM}|) \frac{\vec{x}_{trg} - \vec{x}_{COM}}{|\vec{x}_{trg} - \vec{x}_{COM}|}$$

$$\vec{v}_{track}^i = \begin{cases} v_0 \frac{\vec{v}_{COM}^i + \vec{v}_{trg}^i}{|\vec{v}_{COM}^i + \vec{v}_{trg}^i|} & \text{if } |\vec{v}_{COM}^i + \vec{v}_{trg}^i| > v_0 \\ \vec{v}_{COM}^i + \vec{v}_{trg}^i & \text{otherwise} \end{cases}$$

formáció + célpont követés

$$\vec{v}^i(t + \Delta t) = \vec{v}^i(t) + \frac{1}{\tau} (\vec{v}_{track}^i - \vec{v}^i(t)) \Delta t + \vec{a}_{pot}^i \Delta t + \vec{a}_{damp}^i \Delta t$$

Technikai kihívások

- Akkumulátor – propeller – motor – méret – repülési idő – teherbírás – számítási kapacitás – képességek – ár – idő közös optimalizációja
- Teljes autonómia kényszer: felszállás, leszállás, ütközésselkerülés, hibamentes kód, optimális hibakezelés: repülési zóna, kommunikáció, hardver hibák, vészleszállás stb.
- Késleltetések minimalizálása, kommunikáció maximalizálása, paraméterek optimalizálása
- Sokdrónos (skálázható) repülési logisztika

2-szintű hierarchia: célpont követés (*valós adatok vizualizációja*)



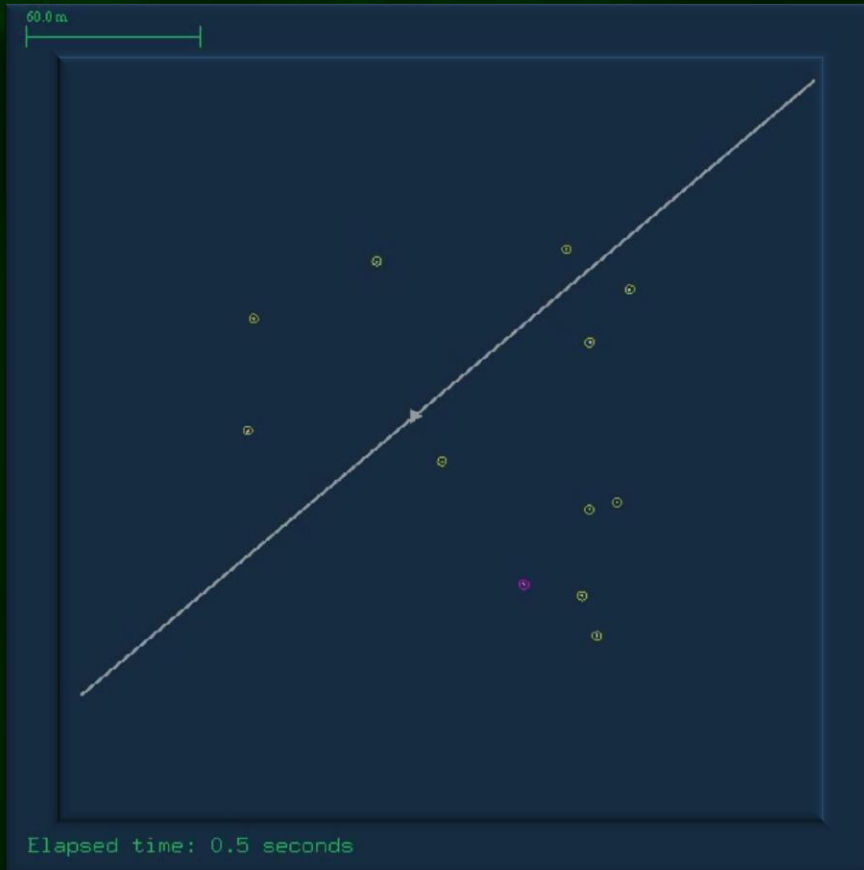
- Virágh, Cs.; Vásárhelyi, G.; Tarcai, N.; Szörényi, T.; Somorjai, G.; Nepusz, T. & Vicsek, T. Flocking algorithm for autonomous flying robots, *Bioinspir. Biomim.*, 9 (2): Paper 025012. (2014), *arXiv preprint* arXiv:1310.3601
- G. Vásárhelyi, Cs. Virágh, N. Tarcai, T. Szörényi, G. Somorjai, T. Nepusz and T. Vicsek, Outdoor flocking and formation flight with autonomous aerial robots, Intelligent Robots and Systems (IROS 2014), 2014 IEEE/RSJ International Conference on, 14-18 Sept. 2014, pp 3866-3873

Csoportos célpont követés



- Virágh, Cs.; Vásárhelyi, G.; Tarcai, N.; Szörényi, T.; Somorjai, G.; Nepusz, T. & Vicsek, T. Flocking algorithm for autonomous flying robots, *Bioinspir. Biomim.*, 9 (2): Paper 025012. (2014), *arXiv preprint* arXiv:1310.3601
- G. Vásárhelyi, Cs. Virágh, N. Tarcai, T. Szörényi, G. Somorjai, T. Nepusz and T. Vicsek, Outdoor flocking and formation flight with autonomous aerial robots, *Intelligent Robots and Systems (IROS 2014)*, 2014 IEEE/RSJ International Conference on, 14-18 Sept. 2014, pp 3866-3873

Alakzatrepülési feladatok



- Virágh, Cs.; Vásárhelyi, G.; Tarcai, N.; Szörényi, T.; Somorjai, G.; Nepusz, T. & Vicsek, T. Flocking algorithm for autonomous flying robots, *Bioinspir. Biomim.*, 9 (2): Paper 025012. (2014), *arXiv preprint* arXiv:1310.3601
- G. Vásárhelyi, Cs. Virágh, N. Tarcai, T. Szörényi, G. Somorjai, T. Nepusz and T. Vicsek, Outdoor flocking and formation flight with autonomous aerial robots, *Intelligent Robots and Systems (IROS 2014)*, 2014 IEEE/RSJ International Conference on, 14-18 Sept. 2014, pp 3866-3873

Csoportos objektum elkerülés

(c) 2014 Department of Biological Physics, Eötvös University
EU ERC COLLMOT

(key: `v`) Velocity limit	0n
(key: `a`) Acceleration limit	0n
(key: `q`) Delay Time (sec)	1.0
(key: `1`) Eq distance of potential (m)	16.00
(key: `2`) Spring Constant (1/sec)	2.0
(key: `3`) C_slip (m ²)	30.0
(key: `4`) GoalPoint Area Radius (m)	58.8
(key: `5`) Gamma (m)	4.50
(key: `6`) Outside Frict. (C_out)	1.00
(key: `7`) Relaxation Time of PID (sec)	1.00
(key: `8`) Noise Level (Eta) (m ² / sec ³)	0.00
(key: `9`) GPS xy Accuracy (m ² /sec ²)	0.000
(key: `r`) GPS Refresh Rate (sec)	0.20
(key: `t`) Sensor Range (m)	100.0
(key: `u`) Friction inside obst.	10.0
(key: `k`) V_flock (m/s)	2.00

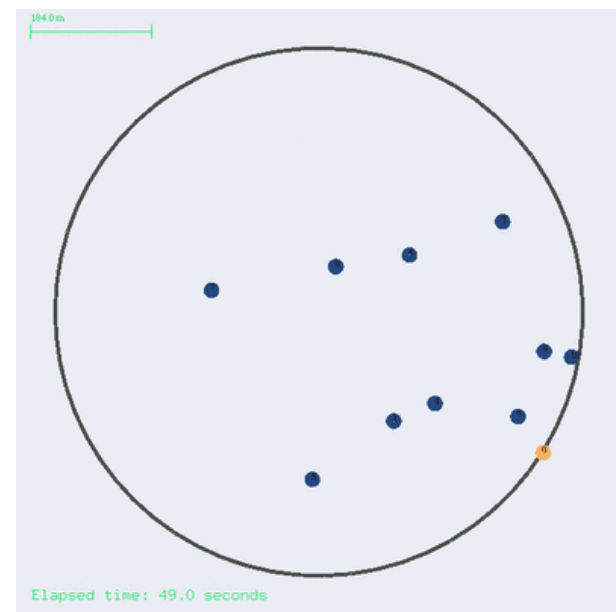
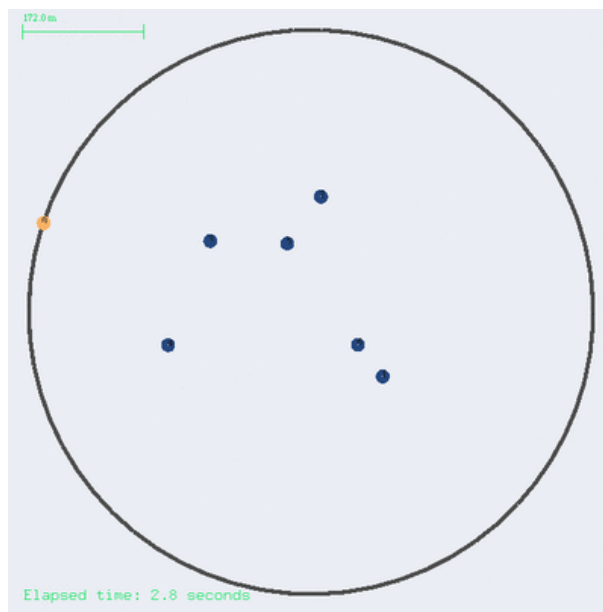
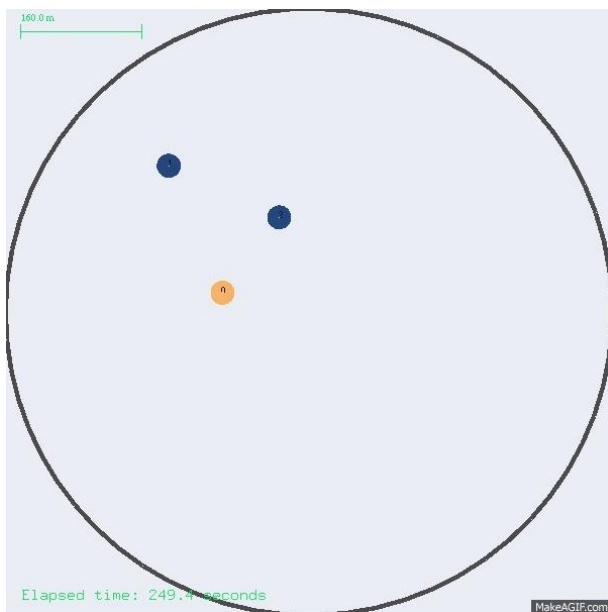
Elapsed time : 0.0 sec

64.0m



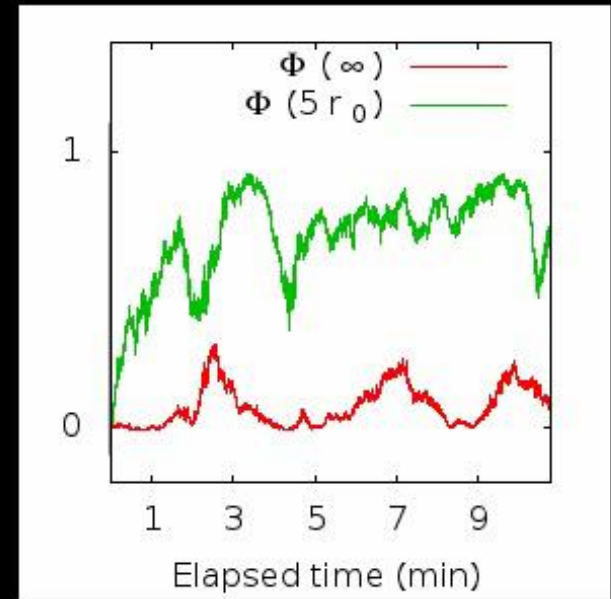
(key: `s`) Visualization Speed	50
--------------------------------	----

Csoportos üldözés-menekülés



M. Janosov, Cs. Viragh, G. Vasarhelyi and T. Vicsek, "Chasing strategies of a flock of drones," Principles of Multi-Robot Systems, Robotics: Science and Systems (RSS) 2015

SPP zárt térben, skálázhatóság



$N = 100$

Comm. Range = 3 · Eq. Distance

Virágh, Cs.; **Vásárhelyi, G.**; Tarcai, N.; Szörényi, T.; Somorjai, G.; Nepusz, T. & Vicsek, T. Flocking algorithm for autonomous flying robots, *Bioinspir. Biomim.*, 9 (2): Paper 025012. (2014), *arXiv preprint* arXiv:1310.3601

Self-organized UAV Traffic in Realistic Environments

C. Virág, M. Nagy, C. Gershenson, G. Vásárhelyi

- Cs. Virág , **G. Vásárhelyi** , M. Nagy , W. Aguilar , C. Gershenson and T. Vicsek, “Effectiveness of three-dimensional traffic algorithms under realistic conditions,” MECO 40, 23-25 March 2015, Esztergom, Hungary
- Cs. Virág, M. Nagy, C. Gershenson and G. Vásárhelyi, „Self-organized UAV Traffic in Realistic Environments,” submitted to IROS2016



Automatizált alkalmazások

- Csoportos megfigyelés keresés, beavatkozás:



**Katonai
alkalmazások?**

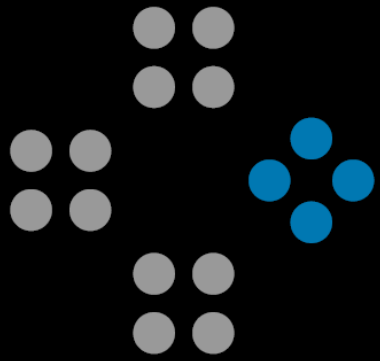
- Mezőgazdasági monitorozás
- Mentőakciók, katasztrófavédelem
- Ipari felhasználás (épület, gázvezeték, vagyonv.)

- Hasznos teher szállítás



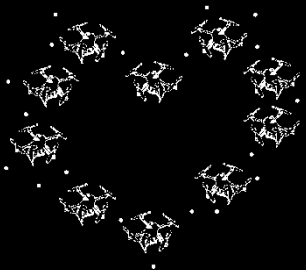
- Művészet, látvány, show



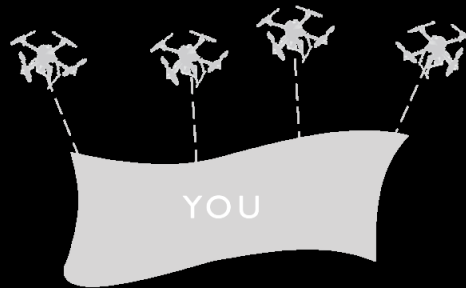


CollMOT
robotics

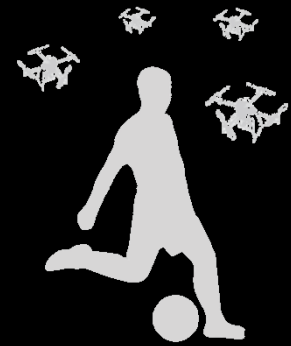
multi-drone
services



entertainment



advertisement



aerial filming



monitoring, inspection, surveillance

Partners and
investors
are welcome!

www.collmot.com



DWD

DANCING WITH DRONES

EU ERC COLLMOT (2009-2015)



MTA-ELTE Statisztikus és Biológiai Fizika Kutatócsoport (2012-)
Magyary Zoltán Posztdok. Ösztöndíj, TÁMOP 4.2.4.A/1-11-1-2012-0001 (2013-14)
Bolyai János Kutatási Ösztöndíj BO/00219/15/6 (2015-)

<http://hal.elte.hu/flocking> | vasarhelyi@hal.elte.hu

Üdv a csapatban?

- motiváltság, önálló feladatmegoldó képesség, angol nyelv
- fizikus/mérnök/informatikus szemlélet és tudás, statisztikus fizika, adatfeldolgozás, HW fejlesztés, programozás, computer vision, robotika, stb.
- látás alapú navigáció és döntéshozatal, elosztott érzékelés, hardware-in-the-loop szimulációk
- multi-agent realiztikus szimulációk, collision avoidance, obstacle avoidance, dense traffic, collective problem solving, heterogeneity, hierarchy etc.
- Drone-show elemek (alakzatok, kötelékek, látványos pályák, dinamika, központi/elosztott irányítás, tervezés és önszerveződés optimális aránya)
- terepi mérések, drón(csapat) irányítás, mezőgazdasági adatfeldolgozás, teljes automatizálás