

ÖNVEZÉRLŐ SIKLÓREPÜLŐ ROBOTPILÓTA ÉS A FEDÉLZETI ÁLLATFELISMERÉS FEJLESZTÉSE

Berekméri Evelin^{1,2,3}, Pedro Lacerda^{1,2,3}, Göksel Keskin^{1,2}, Szarvas Zoltán^{1,4}, Palatitz Péter⁵, Nepusz Tamás³, Vásárhelyi Gábor^{2,3}, Nagy Máté^{1,2,6,*}

¹MTA-ELTE Lendület Csoportos Viselkedés Kutatócsoport, Budapest

²Eötvös Loránd Tudományegyetem, Biológiai Fizika Tanszék, Budapest

³CollMot Robotikai Kutató-fejlesztő KFT, Budapest

⁴Eötvös Loránd Tudományegyetem, Informatikai Kar, Budapest

⁵MME/BirdLife Hungary, Budapest

⁶Max-Planck Institute of Animal Behavior, Konstanz

*E-mail: mate.nagy@ttk.elte.hu

A felszálló meleg légáramlatokat (termikeket) több madárfaj is mesterien hasznosítja, mégpedig azért, hogy az energiaigényes aktív repülés helyett a légoszlopon belül körözve nyerjenek magasságot, majd a termikek között kitárt szárnyakkal siklórepülésben tegyenek meg nagyobb távolságokat. Az MTA-ELTE Lendület Csoportos Viselkedés Kutatócsoportban egyebek mellett ezt a jelenséget tanulmányozzuk, és a madarak termikelő viselkedéséből megismert törvényszerűségeket használjuk fel önvezérlő, fedélzeti állatfelismerő siklórepülő robot (drón) fejlesztéséhez. A következőkben ebbe a kutatásba szeretnénk betekintést nyújtani, a kutatás alkalmazásainak lehetőségeit is kiemelve. A madarak csoportos viselkedésének kutatása önmagában is érdekes. A környezet csoportos érzékelésével – mint ahogyan ezt termikelés közben is teszik – a madárcsoport egy összetett rendszerként működik, amely képes olyan feladatokat is ellátni, amelyeket az egyének önmagukban nem tudnának. Ennek a komplex problémának a megértése segít abban, hogy hatékony mesterséges rendszereket tervezzünk, amit a későbbiekben mutatunk be részletesebben.

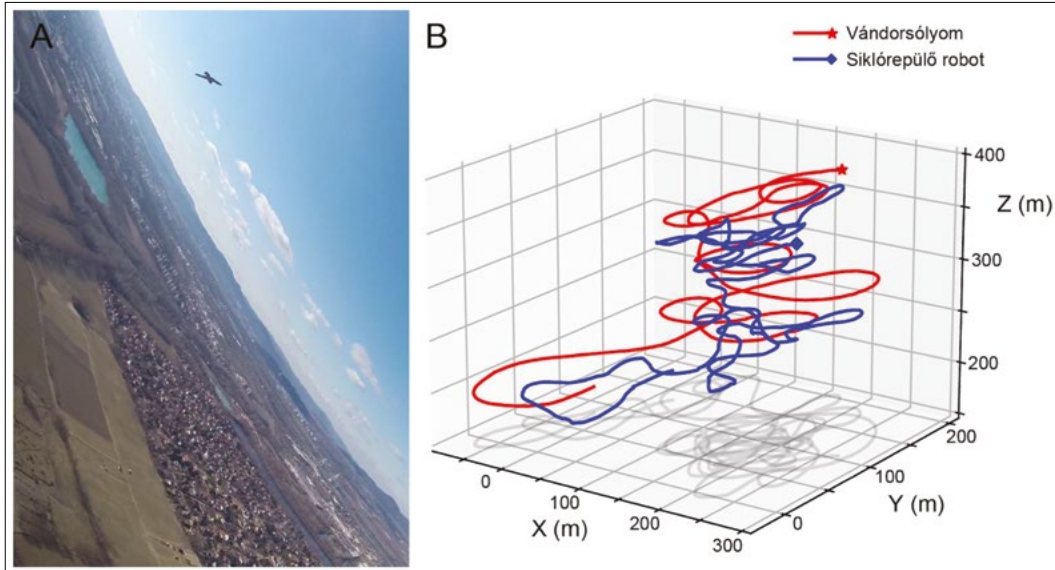
Mindemellett a vándormadarak kutatása fontos eredményeket tartogat, amik közvetve vagy közvetlenül hatással vannak a mi életünkre is. Vándorlásuk során távoli helyeket kötnek össze a Föld különböző pontjain, ezáltal egy globális hálózatot hoznak létre. Ez többek között betegségek terjedését is segítheti, ezért is fontos a rendszer pontos megismerése és megértése. A madarak nagyon érzékenyen reagálnak a környezeti változásokra, így az egészségi állapotuk és viselkedésük olyan globális környezeti változások fontos jelzői lehetnek, mint például a rendelkezésre álló táplálékforrások, a klímaváltozás vagy a környezeti szennyezések.

Kísérleti vizsgálatok – madarak és repülő robotok

A pilóta nélküli légi jármű-rendszerek (UAV – unmanned aerial vehicle) fejlesztése során régóta próbálják az energiahatékonyságot növelni annak érdekében, hogy autonóm repülés közben hosszú ideig tudjon levegőben maradni a repülő. Az autonóm vitorlázó repülés alapját



(balról jobbra) *Berekméri Evelin* és *Pedro Lacerda* fizikus, *Göksel Keskin* biológus és *Szarvas Zoltán* informatikus a MTA-ELTE Lendület Csoportos Viselkedés Kutatócsoport doktoranduszai, *Nagy Máté* fizikus a kutatócsoport vezetője. *Palatitz Péter* ornitológus, természetvédelmi szakember, senior kutató. *Nepusz Tamás* mérnök-informatikus (nem kívánt képet közétetni) és *Vásárhelyi Gábor* mérnök-fizikus, senior kutatók a CollMot Robotikai Kutató-fejlesztő Kft. társalapítói



1. ábra. Siklórepülő robot és vándorsólyom közös repülése. (A) A fedélzeti videofelvétel egy képkockája, amelyen látható a sikló drón és a vándorsólyom dőlésszöge termikelés közben. (B) A madár és a robotrepülő pályája GPS-adatok alapján, amely alapján nyomon követhető mennyire került közel a robotrepülő a madárhoz

a felszálló légáramlatok képezik. Ezeknek több formája van, a korábban említett – hőmérséklet-különbség hatására kialakuló – termikek mellett például a domborzati akadályba ütköző szél által okozott feláramlás. A kedvező feláramlások előfordulása a nap- és szélviszonyok talajformákra gyakorolt hatásától függ, tehát a felszálló régiók kihasználásának az egyik leghatékonyabb módja az, hogy a repülési útvonalakat a domborzat figyelembevételével tervezzük meg. A felszálló levegő függőleges sebességét hagyományosan variométerrel mérik.

A csoportos termikelés előnyeit mini-UAV-kkal is vizsgálták, és megállapították, hogy a termikek detektálása és a termik közepén való körözés egyszerűbb, ha csoportosan történik [1]. Egy másik vitorlázó repülési technikát, a tengeri madarak által használt dinamikus vitorlázást is, amellyel a különböző magasságú szelek előnyeit lehet kihasználni, sikeresen alkalmaztak pilóta nélküli vitorlázó járműveken, és ezzel megnövekedett repülési időt értek el [2]. Ezeket a fejlesztéseket figyelembe véve minden évben autonóm pilóta nélküli vitorlázórepülő-versenyeket rendeznek, amelyeken egyes modellek több órányi (akár 24 órát meghaladó) repülési időt is elértek már [3]. A GPS-adatokból kiolvasható, hogy a madarak hatékonyabban használják ki a termikeket a NASA által gyártott UAV-knál is [4] – bár ez egy gyorsan és folyamatosan fejlődő kutatási terület. A termikek keletkezési helyének megbecslését lehetővé tevő meteorológiai viszonyok és tájak előrejelzését fontos beépíteni a fedélzeti vezérlőrendszerbe annak érdekében, hogy egy előre telepített robotpilóta-rendszerrel hatékony repülési útvonalakat és pályát alakítsanak ki a hosszú repüléshez [5].

A madarak repülésének megértése a bioinspiráció egyik fontos fajtája. A vitorlázást többnyire kitárt, mereven tartott szárnyakkal hajtják végre a madarak, hasonlóan a merevszárnyú vitorlázó repülőgépekhez. A

távírányítású vitorlázó repülőgépekkel hosszan és csendesen lehet repülni. Kísérleteink során kereskedelmi célú vitorlázórepülő-modellkészletet választottunk, és fejlesztettünk tovább, hogy hosszabb és biztonságosabb repülést biztosítsunk, mely elbírja a saját kísérleti be rendezéseinket is: a manuális távírányításhoz szükséges kamerarendszert (FPV, mely segítségével a földi pilóta valós időben láthat úgy, mintha a drónban ülne), nagy felbontású kamerát az automatizált képfeldolgozáshoz és a mikroszámítógépet, amin az általunk fejlesztett önvezérlő rendszer fut (az utóbbiakról részletesen lásd később).

A siklórepülő robotunk egy solymászmadárként tartott vándorsólyommal (*Falco peregrinus*) repült együtt, mert ez a madár és robot alkotta hibrid rendszer lehetőséget teremt arra, hogy a madarak repülésirányítási döntéseit közvetlenül vizsgáljuk. Első körben fontos volt megbizonyosodni arról, hogy a madár nem reagál-e rosszul a hozzá közel repülő robotrepülőre. A próbarepülések során képzett pilóta vezette a robotrepülőt távírányítással, és nagy felbontású GPS-nyomkövetővel rögzítettük a drón és a madár mozgását. A teljes repülésről videót is rögzítettünk, melyet később automatizált objektumfelismerésre használtunk. A GPS-elemzés szerint (1. ábra) időnként akár 10 méteres távolságra is sikerült megközelíteni a drónnal a madarat, és még aktívan hajtott motorral (zajos üzemmódban) sem tapasztaltunk semmilyen negatív hatást a madár viselkedésében.

Automatizált objektumfelismerés mesterséges intelligencia alkalmazásával

Az objektumdetektálás egy olyan számítógépes látási módszer, amely vizuális felvételeken előre meghatáro-

zott objektumosztályokat azonosít és lokalizál a képkockán belül. Az elmúlt évtized fejlesztéseinek köszönhetően előtérbe került a mesterséges intelligencián alapuló objektumdetektálás, amely során neurális hálóval végezzük az objektumdetektálást, amelyet korábban az objektumokat körülhatároló „keret” pixelkoordinátaiban tanítottunk sok-sok képkockán. Manapság már többféle neurális háló-architektúra elérhető erre a célra nyilvánosan, több népszerű objektumosztályokon tanított súlyokkal együtt; így akár az úgynevezett transzfertanulás segítségével elegendő a számunkra érdekes objektumosztályokkal tanítani, kiegészíteni őket, nem kell az inicializálástól kezdve újratanítani a hálókat.

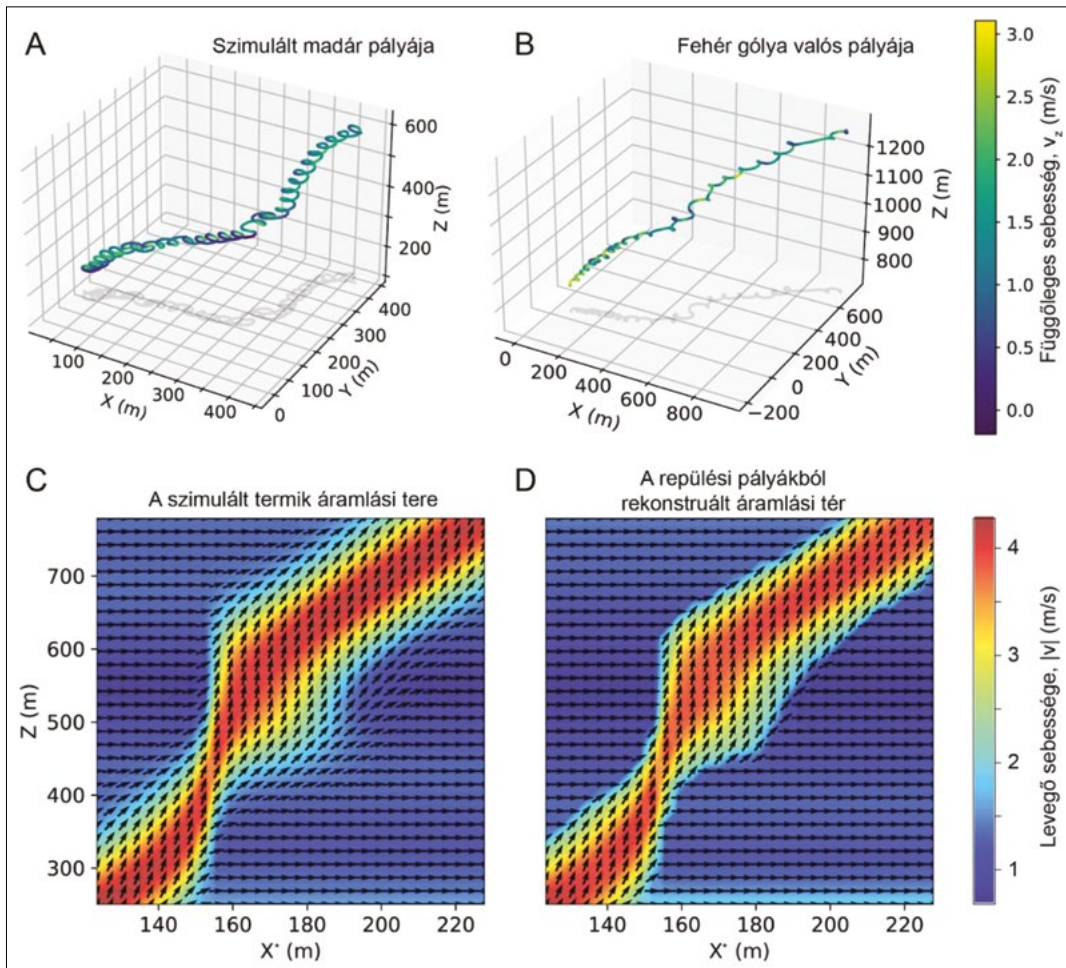
Az utóbbi évtizedek technikai fejlesztései révén mára a mindennapi élet részévé váltak a drónok, bár a távirányításos modellrepülésnek és légifotók készítésének közel száz éves múltja van. A drónokra szerelhető kamerák egyszerre jelentettek minőségi és mennyiségi változást, és különböző területeket forradalmasítottak, hiszen például az ingatlan- és szórakoztatóipar mellett a tudományos kutatás [6] is hasznosítja a madártávlatból készült felvételeket. Drónok olyan helyekre is gyorsan eljuthatnak, amelyeket a szárazföldön nehéz lenne megközelíteni, és nem igényelnek fedélzeti jelenlétet, ezért alkalmazásuk számtalan lehetőséget tartogat. Többek között felgyorsíthatják a kereső- és mentőakciókat [7], szerepet játszhatnak a természetvédelmi területek megfigyelésében, az erdők, valamint az érintetlen helyek és fajállományuk felderítésében [8, 9], mezőgazdasági folyamatokat segíthetnek elő [10], de akár az emberek egyéni azonosítására is alkalmasak arcfelismerés alapján. Az így gyűjtött óriási adatmennyiség értelmezése idő- és energiaigényes, és emberi kiértékeléssel gyakran fel sem dolgozható. Ezért szükség van olyan technológiák kidolgozására, amelyek segítségével a „látottak” feldolgozása

akár valós időben történhet. A drónok gépi látásának valós idejű, azonnali objektumfelismerése egy olyan technológia, amely forradalmasítja és kibővíti a drónok tudományos és ipari hasznosítási lehetőségeit. A valós idejű feldolgozás azonnali reagálást tesz lehetővé, így a robotrepülő – vagy az ezekből összeálló automatizált raj – elkerülheti az esetleges összeütközéseket (madarakkal, fákkal, épületekkel, esetleg nem a saját csoporthoz tartozó más robotrepülőkkel stb.). A látás alapon vezérelt robotrepülők feladata lehet a kiválasztott objektum megkeresése, egy élőlény követése, esetleg szándékos terelése – mint például madárcsapatok elriasztása nagy forgalmú repterek közeléből, vagy nagy testű vadon élő állatok távoltartása forgalmas autópályáktól és legelő- vagy egyéb mezőgazdasági területekről. Afrika emblemikus nagyvadjai gyakran esnek áldozatul efféle, az ember és a természetes élővilág közötti konfliktusoknak. Egy terület túllegelése is lehet olyan probléma, ami utána egy megszaladó, önerősítő folyamatot indít meg, és aztán elsivatagosodáshoz vezethet. A tudományos kutatás során a valós idejű, adaptív követés lehetőséget nyit arra, hogy egy kiválasztott egyedről vagy csoportról gyűjtsünk hosszabb ideig adatokat és tanulmányozzuk a viselkedésüket. Az élőhelyeket, ökoszisztémákat sok szereplő viselkedése és a köztük lévő kapcsolatok alakítják ki [11], és az egyes elemek viselkedése és a rendszer egészének megértése csak az összes tag viselkedésének együttes mérésével valósítható meg. Ehhez elengedhetetlen automatizált módszerek használata.

A fentiekkel összhangban, kutatócsoportunkban a drónos objektumdetektálás fejlesztésén és implementálásán dolgozunk, elsősorban madarakra és személyekre szabva; úgy offline módon, mint valós időben, a fedélzeten. Utóbbit drónra szerelhető mikroszámítógépek segítségével oldjuk meg. A 2. ábrán egy vándormadár-



2. ábra. Madarak helyzetének meghatározása egy drónfelvételen mélytanuláson alapuló objektumfelismeréssel. A bal oldalon az eredeti kép látható, míg a jobb oldalon keretek mutatják a felismert madarakat



3. ábra. Szimulált és valós repülési pályák segítségével visszafejthető a repülő (madár vagy robot) viselkedése és a levegő komplex áramlási tere is. (A) Példa egy mesterséges madár szimulált röppályájára. A szín a függőleges irányú GPS-sebességet jelzi. A színekódolás megegyezik a B panellel. (B) Egy vadon élő gólya rögzített GPS-nyomvonala (adatok a [12]-ből). (C) A szimulált légsebességmező, melyet különböző magasságokban eltérő irányú és erősségű szél és egy normál eloszlású függőleges sebességprofilú, 4 m/s-os maximumú és 30 m sugarú termik összehatásaként hoztunk létre. A vízszintes tengelyt a termik fő vízszintes irányú sodródása mentén jelenítettük meg, a függőleges tengely a magasságot, a szín a levegő sebességét mutatja (megegyezően a D panellel). Nyilak jelzik a levegő áramlási irányát. (D) A visszafejtés után kapott becsült légsebesség. Az algoritmus a termiknek csak azon pontjaiban szolgáltat eredményt, ahol a madarak repültek

gyülekezőhely drónos felvételeinek offline feldolgozása látható, ahogyan a betanított hálónk több száz madarat detektál.

A szimuláció és kísérleti adatfeldolgozás mint a termik szerkezetét és dinamikáját feltáró módszer

A termikelő madarak repülésének tanulmányozásával (a madarak viselkedésén túl) a termik működését – áramlási és fizikai törvényszerűségeit – is megérthetjük. Ezáltal olyan eszközöket fejleszthetünk, amelyek képesek a termikeket detektálni és hatékonyan hasznosítani.

A termik áramlási terének megértése, összetettsége miatt kihívást jelentő feladat, de számos madárfajnak

sikerült megbirkóznia ezzel a kihívással. A madaraknak a siker érdekében folyamatosan módosítaniuk kell a repülési útvonalukat, hogy a termik olyan részein maradjanak, ahol lehetőleg minél nagyobb magasságnövekedést érhetnek el. Gyakran csoportosan, rajban repülve néznek szembe ezzel a kihívással: más madarak jelenléte és viselkedése a termikben tájékoztathatja az egyes egyedeket arról, hogy mi történik a termik távolabbi pontjain. A vadon repülő madárrajok (például gólyák vagy keselyűk) esetén nyomkövető jeladó segítségével mérhetjük meg a pontos térbeli koordinátáikat és sebességüket a globális helymeghatározó rendszer (GPS) segítségével. A mért sebességeket két részre bonthatjuk: a madarak levegőhöz viszonyított sebessége és a levegő földhöz viszonyított sebessége. Az előbbi a madarak viselkedéséről szolgáltat értékes információt, míg az utóbbi a levegő komplex mozgását tartalmazza, amelyben repülnek. Ez a felbontás azonban korántsem magától értetődő.

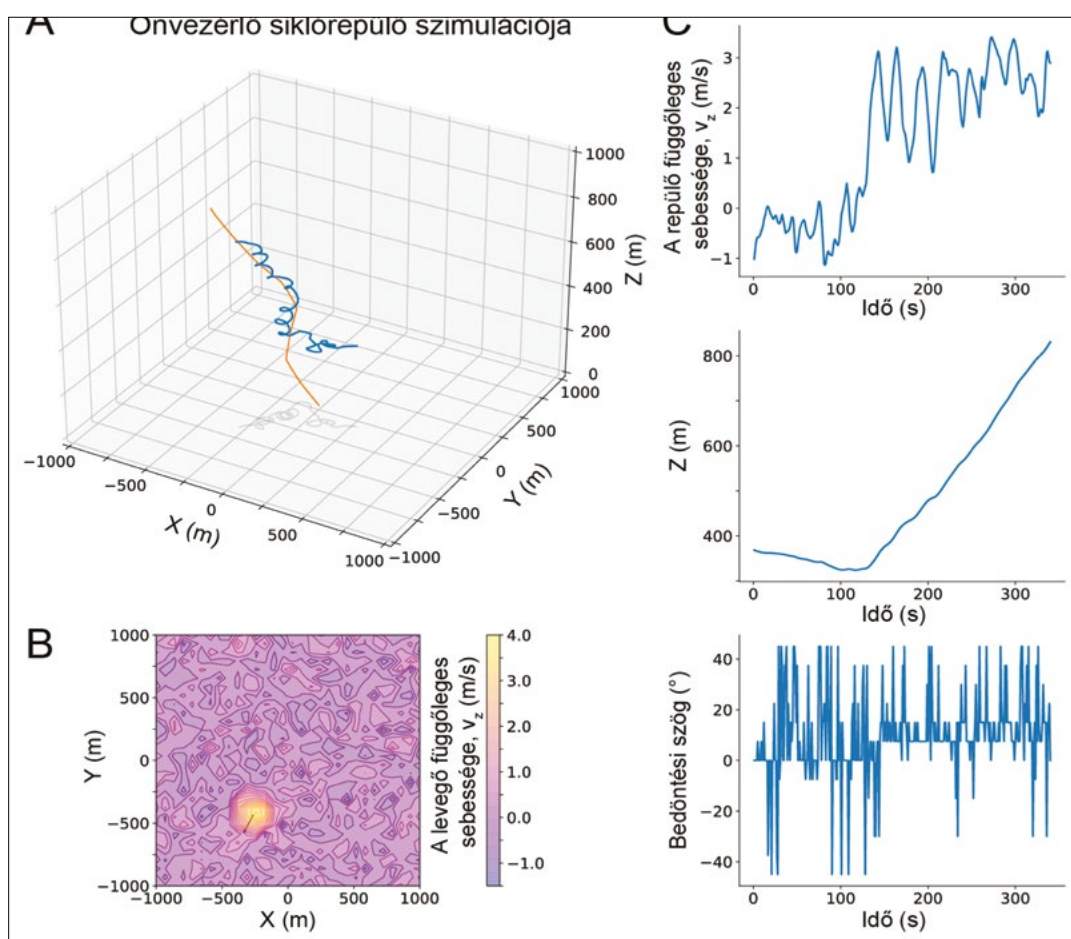
A felbontás vizsgálatára először mesterséges adathalmazokat hoztunk létre: általunk, tetszőlegesen definiált légáramlatokban szimuláltuk, hogy hogyan repülhetnének „mesterséges madarak”. A szimuláció segítségével különféle áramlási tereket állíthatunk elő: a legegyszerűbb lehetőségtől, mely pusztán állandó szél- és állandó feláramlási sebességeket tartalmaz, a részletes és valóságos, sztochasztikus, idő- és magasságfüggő szélsebesség-profilokat és összetett, turbulens termikeket tartalmazó lehetőségig. A röppályák létrehozása érdekében minden mesterséges madárhoz egy sor egyedileg meghatározott paramétert rendelünk, amelyek leírják a madár aerodinamikáját (például a szárnyterhelést) és repülési viselkedését (például mi alapján határozza meg a saját repülését).

A sebességkomponensek felbontásához a röppályák geometriájának figyelembevételével aerodinamikai modellezést alkalmazunk. Egy többszörös iterációs folyamat során egyidejűleg közelítjük a levegő áramlási terét és ebben a madarak mozgását jellemző paramétereket.

Az újonnan felbontott sebességek segítségével tanulmányozhatóak azok a döntések, amelyeket a vitorlázó madarak a környezetük előzetes ismeretében egyénileg (vagy akár rajban) hoznak meg. Ezek az eredmények a madarak viselkedésének megértésén túl az önvezérlő robotpilóta fejlesztésének alapjául is szolgálhatnak. Továbbá ez a felbontás lehetővé teszi, hogy reális szimulációs környezeteket hozzunk létre, ahol más madarak vagy repülő robotok viselkedése szimulálható, és így a madarakhoz hasonló egyéni és kooperatív technikákat is fejleszthetünk.

Önvezérlő robotpilóta fejlesztése mesterséges intelligencia alkalmazásával

A valóságos termik szimulációja lehetőséget biztosít, hogy önvezérlő robotrepülőt taníthassunk és tesztelhesünk biztonságos környezetben, akár sok ezer órát „repülve”, hogy aztán a valós repülések során már csak a



4. ábra. Önvezérlő siklórepülő tanítása realizisztikus komplexitású szimulációs környezetben. (A) Az algoritmus által irányított szimulált siklórepülő mozgása (kékekkel jelölve) a tanulás során. A széllel sodródó termik fő tengelyét a narancssárga vonal jelöli három dimenzióban. (B) Felülnézetből látható a repülőgép aktuális pozíciója, valamint a levegő feláramlási sebessége, amelyet a színskála jelöl. A sárgás folt középpontja a termik magja, és a termikelés annál hatékonyabb, minél közelebb tud körözni a siklórepülő a maghoz úgy, hogy közben a nagy bedöntés miatti merülősebesség még ne legyen túl nagy anélkül, hogy a fokozott dőlésszög okozta nagyobb merülősebesség miatt jelentős magasságot áldozna erre. Továbbá az is megfigyelhető, hogy a levegő függőleges sebessége a termiken kívül sem homogén a szimulált turbulencia miatt. (C) A három grafikon fentről lefelé mutatja a siklórepülő pillanatnyi függőleges irányú sebességének, magasságának és az aktuális bedöntési szögének alakulását a repülés során

szimulációban megszerzett tudást kelljen finomhangolni. Az önvezető siklórepülő robotpilóta algoritmusának fejlesztése során a mesterséges intelligencia kutatásának legújabb vívmányait alkalmazzuk. A megerősítéses tanulás (reinforcement learning) segítségével több millió lépés során „megtaníthatjuk” a robotpilótának, hogy hogyan használja hatékonyan a termikeket. Valójában a tanulás során a robotpilóta maga „kísérletezi ki”, hogy milyen stratégia szerint érdemes repülnie. A tanítás során pusztán annyit csinálunk, hogy ha az önvezérelt repülőgépnél sikerül magasságot nyernie, akkor ezt bizonyos pontszámmal (jutalom, reward) jutalmazzuk. Az algoritmus célja, hogy ezt a pontszámot maximalizálja. A robotpilóta minden időpillanatban megkapja az eddigi repülésének szenzoradatait (visszamenőlegesen egy 30 másodperces ablakban). Ez szolgáltatja a memóriáját. A memóriában tárolt szenzoradatok között vannak a relatív mozgás adatai, a földhöz viszonyított sebesség és a repülőgép orientációja. Ezen szenzoradatok alapján kell a gépnek döntést hoznia, hogy egyenesen repüljön-e, vagy forduljon, és ha igen, akkor milyen mértékben ahhoz, hogy „meg tudja fogni” a termiket, és kiemelkedjen a segítségével. A forduláshoz a repülőgép hossz tengelye körüli elfordulást – a bedöntési szöveget – szabályozza az algoritmus.

A döntési folyamathoz az algoritmus egy olyan gépi tanulással (machine learning) tanított modellt használ, melynek alapja a figyelmi mechanizmus (attention mechanism). A figyelmi mechanizmus segítségével a modell minden döntéshez a memóriában tárolt adatok más és más időpillanatára fókuszál. Ezáltal meg tudja határozni, hogy mi a fontosabb, és mi kevésbé fontos az adott döntés szempontjából. Például, ha a modell látja, hogy 10 másodperccel ezelőtt még emelkedett, de azóta elvesztette a termiket, akkor képes korrigálni a megfelelő irányba, hogy újra a termik felé repüljön. Hasonló figyelmi mechanizmus segítségével sikerült elérni a ChatGPT sikerét is.

A tanítás során változatos, szimulált szél-, turbulencia- és termikerősségű szituációkba helyezük a siklórepülőt – ezzel segítve, hogy a megtanult viselkedés minél általánosabb legyen; azaz minél több szituációban tudjon a termikek kihasználásához szükséges jó döntést hozni (generalization). A tanítás elején az algoritmus még inkább csak megpróbálja „felfedezni”, hogy az aktuálisan a memóriájában lévő egyes szenzoradatokhoz a választott kormányozdatoknak rövid és hosszú távon milyen következményei lesznek, és milyen viselkedés maximalizálja a pontszámot. Ezt hívjuk felfedezési szakasznak (exploration), majd ahogy az algoritmus már egyre jobban ki tudja használni a légáramlatokat, egyre kevesebbet kísérletez, találgat, hanem inkább egyre több időt fordít a termik lehetőségeinek „kiaknázására” (exploitation szakasz). A tanítás addig folyik, amíg az új és új szimulációk javítani tudják a teljesítményt, amíg az algoritmus magasabb pontszámot tud elérni, mint az előző verziói.

Összességében az automatizált, fedélzeti objektum- (állat-) felismeréssel rendelkező önvezérlő siklódrón megvalósításához több szerteágazó kutatás-fejlesztési irányban kell egyszerre haladnunk. Viszont a fejlesztés megvalósulása számos alkalmazási lehetőséget kínál a tudomány és az ipari felhasználások terén egyaránt. A fejlesztés során számos önmagában is kiemelten érdekes tudományos eredményhez juthatunk; mint például a termikek szerkezetének feltérképezése, illetve a madarak csoportos viselkedésének megértése. Az itt bemutatott kutatás egyúttal számos további fejlesztési lehetőséget tartogat magában a jövőre nézve. Például a madarak termikelő viselkedésének automatizált azonosításával a robotrepülő képes lehet a termikek távolból való felismerésére.

Köszönetnyilvánítás

Köszönetünket fejezzük ki a vándorsólyommal való kísérleti repítésekben való közreműködésért Pataki Felícia, Pataki Zsolt és Puskás László solymászkodnak.

Irodalom

- Hanson C. E. (2008): Cooperative autonomous thermal soaring for small uninhabited aerial vehicles. ProQuest. 29.
- Edwards D. J., Silberberg L. M. (2010): Autonomous soaring: The Montague cross-country challenge. *Journal of Aircraft* 47(5), 1763–1769. <https://doi.org/10.2514/1.C000287>
- Ákos Z., Nagy M., Leven S., Vicsek T. (2010): Thermal soaring flight of birds and unmanned aerial vehicles. *Bioinspiration & Biomimetics*, 5(4), 045003. <https://doi.org/10.1088/1748-3182/5/4/045003>
- Irvine R., Innes F., Brown A., Vosper S., Rooney G., Devenish B., Hook M., Sparks E. (2007): Autonomous soaring project phase 2. In: 2nd SEAS DTC Technical Conference 33.
- Pogorzelski G., Silvestre F. J. (2019): Autonomous soaring using a simplified MPC approach. *The Aeronautical Journal*, 123(1268), 1666–1700. <https://doi.org/10.1017/aer.2019.6>
- Watts A. C., Ambrosia V. G., Hinkley E. A. (2012): Unmanned aircraft systems in remote sensing and scientific research. Classification and considerations of use. *Remote Sensing*, 4(6), 1671–1692. <https://doi.org/10.3390/rs4061671>
- Naidoo Y., Stopforth R., Bright G. (2011): Development of an UAV for search & rescue applications. *IEEE Africon '11*. IEEE. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1109/afrcon.2011.6072032>
- Laliberte A. (2009): Unmanned aerial vehicle-based remote sensing for rangeland assessment, monitoring, and management. *Journal of Applied Remote Sensing*, 3(1), 033542. <https://doi.org/10.1117/1.3216822>
- Torresan C., Berton A., Carotenuto F., Di Gennaro S. F., Gioli B., Matese A., et al., Wallace L. (2016): Forestry applications of UAVs in Europe: A review. *International Journal of Remote Sensing*, 38(8–10), 2427–2447. <https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1252477>
- Mogili U. R., Deepak B. B. V. L. (2018): Review on application of drone systems in precision agriculture. *Procedia Computer Science*, 133, 502–509. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.07.063>
- Hawes C. (2009): *Essentials of Ecology*. 3rd edition. By C. R. Townsend, M. Begon and J. L. Harper. Oxford: Blackwell Publishing (2008). ISBN 978-1-4051-5658-5. *Experimental Agriculture*, 45(1), 128–128. <https://doi.org/10.1017/s001447970800714x>
- Flack A., Nagy M., Fiedler W., Couzin I. D., Wikelski M. (2018): From local collective behavior to global migratory patterns in white storks. *Science*, 360(6391), 911–914. <https://doi.org/10.1126/science.aap7781>

