

Opponensi véleményre adott válasz #2

Intelligens drónrajok vezérlése és alkalmazása

MTA doktori értekezés

Vásárhelyi Gábor, PhD

Tisztelt Börzsönyi Tamás!

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.

Nem lényeges pont, de megjegyzendő, hogy a publikációkból átvett ábrák többségében angol nyelvű feliratozásúak, és néhol a feliratok túl kicsik (pl. a 6.5 és 8.1 ábrák). Ez a nyomtatott verzió olvasásánál gondot jelenthet.

Elnézést kérek ezért a koncepcionális okokból eredő hibáért. Mivel a dolgozat felépítését a publikációs mérföldkövek adják, szerettem volna az ábrákat is hitelesen, a már elfogadott publikációkból átemelni, ezért maradtak angol nyelvű feliratok a magyar dolgozatban, amit azonban részletes magyar képfeliratokkal igyekeztem kompenzálni. A nem megfelelő betűméret is jogos kritika, talán segít ezekben az esetekben az online verzió megtekintése, ahol könnyebb nagyítani, mert az ábrákat igyekeztem vagy vektoros formában, vagy nagy felbontásban az anyagba illeszteni.

1. Kérem részletezze, hogy milyen kihívásokat jelentene a numerikus modellben, ill. valós kísérletben két drónraj egy térben való mozgásának létrehozása, aminek során sor kerülhet arra, hogy a rajok egymás útvonalát keresztezni fogják, és értelemszerűen el akarjuk kerülni, hogy az egyes egyedek ütközzenek, de azt célozzuk, hogy a két raj egymástól függetlenül mozogjon!

A dolgozatban két alapvető nagy modellcsoportot mutattam be. A „flocking” modellek a teljesen közös célú szinkron repülést célozták, a „traffic” modellek a teljesen egyedi célú koordinált repülést. A felvetett helyzet valahol e között a két véglet között van félúton, és ha ezekre az alapvető építőkövekre, mint ortogonális bázisvektorokra tekintek, amik a megoldási lehetőségeink terét feszítik ki, akkor a kevert helyzetre is ezekből a modellekből építkezve reagálnék, noha pont ilyen szimulációs helyzetet nem vizsgáltam még. Előzetes gondolataim a megoldásra az alábbiak:

- Erre a szituációra triviális megoldásként gondolhatunk első körben úgy, mint az általános célú „traffic” modell egyedi peremfeltételek közti változata, melyben az egyedekhez egyesével rendelünk konkrét kiinduló és végállapotot úgy, hogy azok a szimuláció elején és végén is két blokkra legyenek osztva térben, mondjuk egymással szembe menve, és megnézhetjük, hogy a bemutatott legjobb traffic modell erre a kihívásra milyen megoldást ad. Nagy valószínűséggel megoldható így a feladat fix kezdő és végállapot esetén nagy hatékonysággal, és azt tippem, hogy szembe menő két flock esetén látványos „lane formation” jelenségek tanúi is lennénk, ahol emergens módon maguktól kialakulnának egymást keresztező, szűkített dimenziójú haladási csatornák, amiken a nagyjából egy irányba haladó egyedek szoros egymásutánban haladnának.
- Ha a „flocking” irányból akarjuk megközelíteni a helyzetet, és azt szeretnénk, hogy a két csapat ne keveredjen, hanem egymással egyfajta meta-egyed szintű taszító kölcsönhatásban

legyen, akkor a flocking modellt úgy egészíteném ki, hogy minden egyedhez rendelnék egy raj azonosítót, hogy mindenki tudja, melyik polarizált csoportba tartozik, és ezt az azonosítót megosztanám az egyedek közti kommunikációban is, hogy egymásról is tudják, hogy ki hova tartozik. Egy adott egyed szemszögéből a másik csapat egyedeit nem a szokásos vonzó és sebességillesztő kölcsönhatással kezelném, hanem a falhoz hasonló, taszító kölcsönhatással. Így egy másik flock igazából mint egy mozgó, rugalmas objektum jelenhet meg a térben, teljesen azonos módon, mint a korábban bevezetett objektumok. Ha pedig az egyedi szintű csoport-taszítások nem állnának össze stabil egészként, akkor akár lehet bonyolítani a dolgot valamiféle körvonal dinamikus kiszámolásával a másik csoporthoz tartozó egyedek köré, lokálisan, minden egyed szemszögéből, de ez algoritmikusan nehéz és bonyolítja a helyzetet, első körben megpróbálnám az egyszerű párkölcsönhatásokkal megoldani a feladatot.

2. Milyen algorimust lenne célszerű alkalmazni egy kb. 10 autonóm egyedből álló drónraj mozgására, hogy egymással kooperálva a lehető leghamarabb megtaláljanak egy jól körülhatárolt területen lévő ismeretlen helyű célpontot? Pl. egy elkóborolt állat megkeresése egy nagy mezőn.

Ezt a helyzetet és feladatot Jónás Tamás diákkal közösen vizsgáltuk már korábban részletesen, ebből született „Csoportos keresés önszerveződő drónokkal” című BSc dolgozata az ELTE Biológiai Fizika Tanszékén 2023-ban. A dolgozatban taglalt megoldások közül néhányat azóta a saját drónflottánkon is megvalósítottuk a CollMot Kft. berkein belül a Skybrush drónvezérlő keretrendszerünkkel, a Kooperatív Technológiák Nemzeti Labor konzorciumi pályázatának keretében, ahol kettős felhasználású felderítő drónraj létrehozása az egyik kitűzött konzorciumi cél. Ezt a szálát azért nem tettem bele az MTA doktori dolgozatomba, mert önálló folyóirat publikáció nem született belőle, inkább csak gyakorlati hasznosulása lett az eredményeknek. Ennek ellenére a téma önmagában is érdekes és izgalmas.

Ez a helyzet egyben nagyon jó példája annak, hogy az ember kutatói hozzáállással nagyon sokszor feleslegesen el tudja bonyolítani a saját helyzetét intelligens és publikálható algoritmusok létrehozásával, miközben a gyakorlati feladat lényegesen egyszerűbb megoldásokkal, triviálisan is teljesíthető.

Jónás Tamás dolgozatában három féle csoportos keresési módszer hatékonyságát hasonlítottuk össze:

1. *Sávos keresés*, ahol a terület egyenlő méretű darabokra van felosztva és a drónraj egyedei egy-egy területet önállóan mérnek fel, determinisztikusan végigscannelve azt.
2. *Véletlenszerű keresés*, ahol az egyedek egyéni random bolyongást végeznek a területen, egyfajta nullmodellként.
3. *Adaptív keresés* egy heurisztikus algoritmussal, ahol a véletlen bolyongás ki van egészítve a területről alkotott információhalmaz egymás közti megosztásával és ezáltal adaptivitás van beépítve, hogy a drónok optimálisan tudják a korábbi keresett és talált tárgyak statisztikái alapján tervezni a jövőbeli útvonalukat, egyeztetve a többiekkel, hogy ki merre menjen.

Az eredmények azt mutatják, hogy ha a terület véges időben bejárható a flotta által, akkor többnyire nem érdemes vacakolni, egyszerűen fel kell osztani a területet a drónok között és „brute-force” módszerrel, determinisztikusan kell rajta végig menni, mert az a legegyszerűbb és a leghatékonyabb. Ha azonban a terület túl nagy ehhez, és pláne, ha ismert a keresett célpontok valamilyen elhelyezkedési statisztikája (pl. egyenletes, valamilyen elv szerint csomósodott, álló vagy mozgó stb.), akkor van reális előnye az adaptív csoportos keresési eljárásoknak, ahol a drónok a korábbi találati információból egyre jobban tudnak következtetni arra, hogy még hol található további találat.

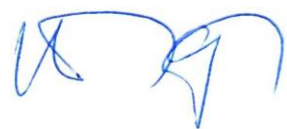
3. A fizikában számos helyen előfordul, hogy sokrészecske-rendszereket kell modellezni és ezeknél a részecskék közötti kölcsönhatás modellezésében a gépi tanulási algoritmusok hasznosak tudnak lenni. Ezzel kapcsolatos kérdés, hogy lehet-e ilyen algoritmusokat a drónok közötti kölcsönhatások optimalizálására használni és ezzel drónforgalmi szituációk, ill. különböző jellegű és geometriájú rajrepülések hatékonyságát növelni?

A CMA-ES evolúciós optimalizáció, amit a modelljeink optimalizálására használtunk, tulajdonképpen szintén egy gépi tanulós megoldás, ahol maga a „tanulási” folyamat előzetesen zajlik, szimulációban, evolúciós elvekkel. Ezt az evolúciós optimalizációt Gusz Eiben társ kutató kollégám segítségével sikerült integrálnunk a saját rendszerünkbe, aki Hollandiában sokat foglalkozik robotok fizikai térben történő evolúciójával is, de az egy sokkal nehezebb feladat, mert a valóság iterálása idő, és erőforrás igényes. A hagyományos értelemben vett, „reinforcement learning” vagy „konvolúciós neurális hálózat” alapuló gépi tanulás elveit mi nem alkalmaztuk a drónrajainkon, de ismerek olyan külső kutatásokat, ahol ennek demonstrálása megtörtént, pl. az alábbi cikkekben:

- Loquercio, Antonio, et al. "Learning high-speed flight in the wild." *Science Robotics* 6.59 (2021): eabg5810. <https://www.science.org/doi/abs/10.1126/scirobotics.abg5810>
- Azar, Ahmad Taher, et al. "Drone deep reinforcement learning: A review." *Electronics* 10.9 (2021): 999. <https://www.mdpi.com/2079-9292/10/9/999>
- Brilli, Raffaele, et al. "Towards trajectory following and vision-based collision avoidance for Micro Aerial Vehicles with Deep Reinforcement Learning." *Robotics and Autonomous Systems* (2025): 105214. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921889025003112>

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

Verőce, 2026.05.10.



Vásárhelyi Gábor