

Opponensi véleményre adott válasz #3

Intelligens drónrajok vezérlése és alkalmazása

MTA doktori értekezés

Vásárhelyi Gábor, PhD

Tisztelt Kun Ferenc!

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.

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

...

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

Köszönöm ezeket az észrevételeket, amiket nem kívánok megkérdőjelezni, csak annyival kiegészíteni, hogy az analógiák és kitekintések mennyiségét valóban szabadon, a saját ízlésem és egyéni igényrendszerem szerint állítottam be. Tettem ezt egyrészt annak tudatában, hogy nagy valószínűséggel érkezni fognak ezzel kapcsolatos kritikák is, másrészt egy olyan motivált, vagy akár mondhatni eufórikus állapotban voltam, mint amilyenben utoljára talán az érettségi alatt, amikor azt éreztem, hogy a sok irányból megszerzett független tudásom kezd valamiféle nem várt egységgé összeállni, és láthatóvá válik, hogy a világon „minden mindennel összefügg”, és végre egy picit látom ezeknek az összefüggéseknek bizonyos korábban láthatatlan, mély összekötő szálait is. Nagyon klassz érzés ez, és valahol ennek az újbóli elérése is motivált az évtizedes kutatási szálak MTA nagydoktoriban történő összefűzésére, és egyszerűen meg akartam adni magamnak azt az örömet és szabadságot, hogy a folyamat közben elkalandozó gondolati szálaimat is papírra vetem, tudatosan teret adva a gondolatok nem feltétlenül tudományos vagy racionálisan ellenőrizhető, de kreatív burjánzásának. Ugyanakkor igyekeztem ezeket a részeket – ahogy az opponens is említi – tudatosan külön fejezetbe, dedikált keretbe foglalni, pont azért, hogy akinek zavaró, annak könnyű legyen átlépnie. Sajnos én magam nehezen boldogulok a teljesen száraz, szűken szakmai szövegekkel, szeretem, ha a legnehezebben megérthető dolgokat is fűszerezi humor és pihenőidős gondolat (ilyen

szempontból (is) példaképem Feynman), és részben ezt az igényemet projektáltam a dolgozatomba is az olvasók számára.

Egy további fontos indoka a dolgozatban megjelenő szubjektívebb, analóg társadalomelméleti gondolatoknak az a szomorú realitás, hogy a dolgozat egy spin-diktatórikus, elnyomó politikai rezsim regnálása alatt született, ami a számomra fontos és a dolgozatban is teret kapó szemléleti elemek közül mind a környezetvédelmet, mind a szabad gondolkodást, mind a valódi demokratikus döntéshozatalt lényegében tűzzel-vassal irtandó eszméknek kezelte. Fontosnak tartottam a dolgozatban – a rendszer kereteit így is feszegetve – finoman, de határozottan megfogalmazni ezzel kapcsolatos komoly aggályaimat, észrevételeimet. Mostanra erről már lehet beszélni, egy éve még nem lehetett ugyanígy!

Mindezek mellé azt is fontos hozzátenni, hogy valódi felelősséget természetesen csak a tézispontokban megfogalmazott és publikációkban alátámasztott állításokért tudok vállalni, a „csapongó” gondolatok inkább csak előfutárai lehetséges kutatási irányoknak, vízióknak.

Ami a „szakterület jövőjét, a módszer korlátait és a szerző további kutatási terveit” illeti, ez a kritika hasonlóan, és jogosan megjelenik Rohács Dániel opponensi véleményében is. Ott kifejtettem, hogy a további kutatási tervek azért hiányoznak, mert a cégalapítással – és nem utolsósorban az elmúlt évtizedben a magyar kutatás helyzetének áldatlan, politikai célok mentén meggyötört és megalázott állapota miatt – az én karrierem épp a tudományból kifelé mutató pályán van, nagyszabású új kutatási tervem jelenleg nincs és az ELTE-s jogviszonyom is épp véget ér. A szakterület jövőjével kapcsolatban az a sejtésem, hogy a szépen felfutó drónshow ipar után az első valódi swarm alkalmazások a drónháborúkban fognak megjelenni, ott van a lélektelen drónrajokra a legégetőbb szükség és a dróntechnológiai újítások ott fejlődnek manapság a leggyorsabban, ám ölő drónrajok létrehozásában én szintén nem kívánok részt venni. Érdekes módon egyéb alkalmazási területeken, kisebb létszámú drónrajjal egyszerűbb centralizált, determinisztikus, párhuzamosan, de függetlenül vezérelt rendszerekben gondolkodni, mint a kiszámíthatatlan önszerveződésben, és a gyakorlati alkalmazások többsége is inkább ilyen irányba mutat. De azért nem adtunk még mi sem fel, hogy katasztrófavédelmi, keresési, telephely felügyeleti, mezőgazdasági vagy tűzoltós alkalmazásokban tudjuk valódi drónrajainkat bevetni, ám ezeknek általában – ahogy azt az évtizednyi sikeres céges működésből megtanultuk – sokkal gyakorlatiasabb és egyszerűbb akadályai vannak, mint a nem megfelelő swarm algoritmus. A módszereink korlátai a gyakorlati alkalmazások tekintetében leginkább az alábbiak:

- az önszerveződés kiszámíthatatlansága, jósolhatatlansága,
- az egyelőre csak forgórótoros drónokra érvényes kontextus (mert egyre inkább VTOL felé halad a világ),
- az algoritmusok bonyolultsága, ami a hangolásukat nehezíti egy új kontextusban,
- a swarm logisztika általános infrastrukturális komplexitása.

A jövőről azt látom, hogy a drónok önálló környezetérzékelése és környezeti állapotbecslő számítási kapacitása fog még jelentősen fejlődni, ami megnyitja a teret majd a nagy biztonságú vizuális csoportos repülés előtt (egyébként ezen a téren már most vannak szép kezdeti eredmények, erdőben átrepülő drónrajokkal stb.). Ez a terület jelentős kihívásokat tartogat még, de ha a kihívásokra a tudomány megoldást talál, a drónrajok valódi gyakorlati használhatósága jelentősen fog növekedni.

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.

Köszönöm ezt az észrevételt, teljesen jogos mindkét szó nem megfelelő használatának felvetése.

Az „emergens” szó túlhasználatának az lehet az oka, hogy ez a szó valójában számomra a dolgozatom gondolatvilágának egyszavas esszenciája. Ez a szó fejezi ki számomra a legjobban azt a lenyűgöző, konkrétan az életet is adó alapelvet, ahogyan a világban a bonyolultság létrejön, rétegről rétegre, úgy, hogy a nagyobb egységű rétegekben az egyszerűbb egységek sokasága hoz létre az interakciók következtében új, korábban nem létező és nem redukálható minőséget. Fordítása ennek az alapvető szónak nem egyszerű, nem tudom, mi lehetne a legjobb magyar megfelelője, ami kellően tömör és kifejező. Alternatívák lehetnek az alábbiak: kibontakozó, felbukkanó, új minőségű, önszerveződő, öngerjesztő, szinergikus (bár ez sem magyar), holisztikusan létrejövő (ez sem), nem redukálható (ez sem), vagy ha nem létező új szavakat akarunk létrehozni, akkor talán „önépítő” vagy „többletképző”. Vagy csak egyszerűen „élő” vagy „Isteni”. További javaslatokat örömmel veszek, lesz még szükségem rá!

A „mindset” szóval kapcsolatos észrevételt is külön köszönöm, ez teljes mértékben az én saram, egyszerűen kifejezőnek érzem ezt a szót, jobban, mint magyar megfelelőit. De valóban használható lehet helyette a gondolkodási keret, belső hozzáállás, világlátás, szemléletmód. Köszönöm! Itt is örömmel veszek további jó magyar megfelelőket a jövőre nézve!

1. A dolgozat és a téziszfüzet 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.

Pontosan ugyanez a kérdés merült fel Rohács Dániel opponensi véleményében is, és itt is szeretném kérni az MTA titkárságát, hogy a habituszvizsgálat során bekért hiánypótlást, mely a fenti kérdésre teljesskörű választ ad, szíveskedjenek Kun Ferenc opponensnek is eljuttatni. Köszönöm!

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?

Szerintem a felsoroltak közül egyik sem. A decentralizált rendszerekben a kommunikáció elég, ha lokális, ettől lesz a rendszer decentralizált, és lokális kommunikációra lényegében minden drón képes. A pozicionálás és navigáció pontosságában a mai RTK-alapú GNSS vevők és kiforrott fedélzeti állapotbecslő EKF algoritmusok valóban centiméteres minőséget érnek már el, ami a sokezer drónos drónshow-k egyik alapvető feltétele, tehát ez adott. A késleltetés problémás lehet „mesh” típusú kommunikációs hálózat esetén, ahol az egyes egyedek a többiek felé adattovábbítóként is megjelenhetnek, mert ilyenkor a kommunikáció is bedugulhat. A valódi decentralizációt véleményem szerint csak UDP típusú kommunikációval lehet elérni, ahol csak küldeni kell, azt nem akadályozza semmi, a befogadásról viszont nincs direkt visszajelzés, mint a TCP/IP protokollban. Ha ez megoldható, akkor az elvárt kb. 1s alatti kommunikációs késleltetés nem kihívás. A fedélzeti számítási kapacitás pedig már 10 éve is alkalmas volt az éppen, hogy egyszerűségük miatt is érdekes elosztott swarm algoritmusok futtatására. A valódi skálázást leginkább gyakorlati okok korlátozzák: a szükséges pénz és a befektetések megtérülésének indoklása, a decentralizált rendszerek általános körülményessége,

infrastrukturális igénye, logisztikai kihívásai és jogi akadályai, valamint az operátorok általános felkészületlensége, mert a világ még mindig leginkább egy-egy drón irányításának elsajátításánál tart, a sok párhuzamos drón vezérlése egy következő lépcső, amire kevesen léptek még fel eddig, használható rendszer és valódi gyakorlati igény együttes hiányában. De szépen lassan el fogunk jutni ide is, inkább lassabban, mint gyorsabban.

3. Mennyire általánosíthatók a dolgozatban bemutatott eredmények heterogén drónrajokra, vagyis olyan rendszerekre, ahol az egyedek érzékelési, dinamikai vagy kommunikációs képességei eltérőek?

A „flocking” típusú algoritmusok nem általánosíthatók bizonyos fajta heterogenitásra, mert alapvetés, hogy például mindenkinek azonos sebességgel és gyorsulással kell rendelkeznie, különben a szinkron mozgás nem tud létrejönni. Az adaptív hierarchiákon alapuló algoritmusaink már sokkal inkább, ott éppen a lokális heterogenitás a hierarchiának a vezérelve, azaz aki több hiteles információval rendelkezik, az lesz lokálisan a vezéregyed, ilyenformán egy jobb kommunikációs modullal vagy fejlettebb érzékelővel ellátott egyed alapvetésként is kaphat nagyobb súlyt a vezető-követő hierarchiákban, az algoritmus érdemi változtatása nélkül.

A „chase and escape” modellnek épp az volt a lényege, hogy az üldözők képességei alacsonyabbak, mint a menekülőké, de összefogva így is többre képesek. Az üldözők képességeinek további színesítését itt el tudom képzelni, mint egyértelmű gyakorlati haszon, tipikusan lehet egy üldöző rajban többféle drón, gyors és lassú, magasan és alacsonyan szálló, olcsó és drága kamerával ellátott, és ennek a heterogén terepfelmérésnek az integrálása nem hiszem, hogy akadályt jelentene, inkább előnyt.

A „traffic” megoldásunkban épp az az egyik nagy eredmény, hogy heterogén dinamikai képességekkel, illetve prioritási viszonyokkal rendelkező egyedekre is általánosítottuk az algoritmust, azaz ez a modell már most megfelel a felvetett elvárásoknak.

4. A 100 drónos autonóm forgalmi demonstráció alapján milyen további lépések szükségesek ahhoz, hogy az ilyen rendszerek valós, városi légtérben is biztonságosan alkalmazhatók legyenek?

Szerintem a városi környezet lesz az utolsó, ahol szabadon repkedő drónrajokat látni fogunk, ezek első körben zárt területek felett, fix pontok közötti biztosított útvonalon stb. fognak megjelenni, emberektől biztonságosan elzárt területeken. Az általános felhasználás egyik előfeltétele a közel 100%-os repülésbiztonság, ami egy igen kemény dió. Hiába tud egy drón vagy egy drónraj tudományos kísérleti keretek között, vagy akár piaci megoldásokkal, megfelelő időjárási körülmények között, megfelelően képzett pilótával szép feladatokat teljesíteni. Ha az az elvárás, hogy „működjön”, akkor képesnek kell lennie repülni nagyon hidegben, nagyon melegben, nagy szélben, nagy esőben, nagy ködben, jégesőben stb., képesnek kell lennie felmérnie, hogy a repülési környezet alkalmas-e a felszállásra egyáltalán, és talán a legfontosabb, hogy megfelelőnek kell lennie az összes vészhelyzeti protokollnak. Egy piaci drónrendszer működésében nem az a legnagyobb kihívás, hogy mit csinál, ha minden feltétel megfelelő, hanem az, hogy mit csinál, ha a végtelen számú feltétel egyike, másika, vagy azok tetszőleges kombinációi nem megfelelőek. És erre felkészülni nagyon-nagyon sok idő, pénz és energia. Például óriási kihívás, hogy egy autonóm drónnak teljes 3D környezetérzékeléssel kell rendelkeznie, fel kell tudnia ismernie a levegőben maga körül minden egyéb repülő tárgyat és földi objektumot, nem elég, ha a társaitól kap dedikált üzeneteket. Mert a jégesőről nem fog üzenni neki, a galambok sem, egy felsővezeték se, egy magas fa se stb., viszont ezekre mind reagálnia kell, ha repülési konfliktusba kerül velük. Mindez a 2D utakon tonnás autókba tehető tetszőleges méretű számítógépek esetén is óriási kihívás, hát még a levegőben, ahol mind az energiafogyasztás, mind a felvihető tömeg igen korlátos.

5. Melyek a következő 5–10 év legfontosabb nyitott kérdései az intelligens drónrajok vezérlése és alkalmazása területén?

- a stabil önálló környezetérzékelés kialakítása minden drón számára,
- a jogszabályi, alkalmazhatósági és piaci környezet kialakítása,
- olyan praktikus és felhasználóbarát SW-HW rendszerek kialakítása, melyekben a drónrajok vezérlése nem jelentősen összetettebb egy darab drón vezérlésénél (ezzel foglalkozunk intenzíven a CollMot Kft-ben, drónshow-k esetén jelenleg 5000 drón párhuzamos vezérlésénél tartunk),
- azoknak a jól meghatározott célalkalmazásoknak a megtalálása, ahol valódi költségcsökkentést vagy érdemi hatékonyságnövekedést tudunk elérni, és nem csak ábrándozva elképzelt előnyt jelen a drónrajok „trendi” használata.

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

Verőce, 2026.05.10.



Vásárhelyi Gábor