

Papp István,¹ Békési Bertold,² Károly Krisztián³

Pilóta nélküli légi járművek rajirányítási és rakétavezérlési vizsgálata komplex légi műveletek során⁴

Study of Unmanned Aerial Vehicle Flight Control and Missile Guidance During Complex Air Operations

Absztrakt

A pilóta nélküli légi járműveket (UAV) egyre szélesebb körben alkalmazzák mind a katonai, mind pedig a polgári szférában. Az orosz–ukrán háború bebizonyította ezen eszközök létjogosultságát, különösen a rakétahordozó jellegű támadásokban, és kulcsszerepet fognak betölteni a jövőbeni háborúkban mint különleges harci mód. A szerzők összegzik a rakétahordozó támadási művelet irányítási és vezérlési eljárásait, bemutatják az irányító- és vezérlőrendszer hagyományos tervezési megoldásait, ezt követően pedig elemzik a jellegzetes rajtámadás irányítási és vezérlési módszereit a megfelelő jellemzők figyelembevételével, és kitérnek a hagyományos tervezési módszerek korlátjaira. A cikk az intelligens integrált irányítási és vezérlési tervezés előnyeire koncentrál a hagyományos

¹ Gyakorlati oktató, Nemzeti Közszerológati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar Repülőfedélzeti Rendszerek Tanszék (Szolnok), e-mail: papp.istvan@uni-nke.hu

² Egyetemi docens, Nemzeti Közszerológati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar Repülőfedélzeti Rendszerek Tanszék (Szolnok), e-mail: bekesi.bertold@uni-nke.hu

³ Tanársegéd, Nemzeti Közszerológati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar Katonai Repülő Intézet Repülésirányító és Repülő-Hajózó Tanszék (Szolnok), e-mail: karoly.krisztian@uni-nke.hu

⁴ A kutatás a 2022-2.1.1-NL-2022-00012 azonosító számú Kooperatív Technológiák Nemzeti Laboratóriuma projekt a Kulturális és Innovációs Minisztérium Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, a 2022-2.1.1-NL Nemzeti Laboratóriumok Létrehozása, Komplex Fejlesztése pályázati program finanszírozásában valósul meg.

tervezési ötletekkel szemben. Összegzi az általánosan alkalmazott integrált irányítási és vezérléstervezési módszereket és azok felhasználásait, valamint feltárja az integrált irányító- és vezérlőrendszerhez megfelelő rakétahordozó kooperatív támadási stratégiáját. Megvizsgálja a rakétahordozók irányításának és vezérlésének kihívásait, és feltárja azokat a problémákat, amelyek a jövőben további kutatásra érdemesek. A rakéták irányítási és vezérlési módszereinek összefoglalása hozzájárul az innovatív kutatáshoz ezen a területen, ami elősegíti a pilóta nélküli rajtámadási technológia fejlődését.

Kulcsszavak: UAV, raj, rakéta, irányítás

Abstract

The unmanned aerial vehicles (UAVs) are being used more and more widely in both the military and civilian sectors. The Russian-Ukrainian war has demonstrated the value of these systems, particularly in missile-carrying attacks, and they will play an indispensable key role in future wars as a specialised combat method. The authors summarise the C2 (command and control) procedures for missile-based attack operations, present traditional design solutions for command and control systems, and then analyse the command and control methods for typical swarm attacks while considering relevant characteristics, and discuss the limitations of traditional design methods. The article focuses on the advantages of intelligent integrated guidance and control design over traditional design concepts. It summarizes commonly used integrated guidance and control design methods and their applications, and explores a cooperative attack strategy for missile carriers suitable for an integrated guidance and control system. It examines the challenges of missile guidance and control and identifies issues worthy of further research in the future. The summary of missile guidance and control methods contributes to innovative research in this field, which promotes the development of drone swarm attack technology.

Keywords: UAV, swarm, missile, guidance

Bevezetés

Az UAV elterjedt megnevezés a repülőgépeknek arra a típusára, amelyet precíziós irányítású fegyverként is használhatnak ellenséges célpontok megtámadására (például az öngyilkos UAV [*loitering munition*]).⁵ Az ember irányította vadászgéppel szemben az UAV előnyei a gyors reagálóképesség, az erős mobilitás, a személyi kockázat minimalizálása és a kényelmes, több repülőgép kooperatív működése.⁶ Különösen az UAV-kat értékeli nagyra a katonai erők szerte a világon, például az amerikai hadsereg MQ-1 Predatorját számos gyakorlati csataterén használták: a pakisztáni terrorizmus elleni küzdelemben, az afganisztáni háborúban és az iraki háborúban.⁷ A hiperszonikus,

⁵ MALIK–HAYDAR–ZIAR 2021.

⁶ SHIN 2018: 305.

⁷ HUANG et al. 2022.

mesterséges intelligencia és rajharc technológia csábítása alatt az UAV fokozatosan fontos eszközzé vált a légi harci előnyök megragadásában, fenntartásában, a jövőben pedig a légierő stratégiai és felforgató erejévé fejlődhet.⁸

Jelenleg az amerikai haderő MQ-1 Predator drónjának a földi irányítók közreműködésére van szüksége a támadási folyamat összes láncszemében, a „Földi irányító távvezérlése harci móddal” üzemmódban. A támadási időablak viszont nagyon rövid, és a harctéri szereplők dinamikusan változnak a konfrontációs környezetben. A földi irányításon alapuló hagyományos UAV harci mód nehezen felel meg a precíziós támadás és az időérzékeny célponttalálat követelményeinek. Az UAV autonóm támadási technológiája kritikus fejlesztési irányvá vált.⁹ Az autonóm támadás működési módban az UAV önállóan végzi el a céladatok feldolgozását és fúzióját, a helyzetértékelést, a fegyvercél kiosztását, a repülésirányítást, a fegyverindítást, a támadási célpontot és a műveleti hatékonyság értékelését a műveleti légtérben.¹⁰ Áttöri az „ember a hurokban” korlátait, teljesen kiaknázza a mesterségesintelligencia-technológiát, hogy teljesen kihasználja az UAV működési hatékonyságát, és képes megvalósítani a gyors támadási döntést és irányítást magas dinamikában és erős bizonytalanság mellett.

A drón a harci feladatok összetettsége miatt kooperatív támadással néz szembe, amikor a tényleges harci alkalmazásban vizsgáljuk. Egyetlen drónhoz képest több UAV kooperatív harcrendszert alkothat kölcsönös együttműködéssel, kiegészítő előnyökkel és jelentősen növelt hatékonysággal a repülési térben. Az Amerikai Egyesült Államok Légierője 2009–2047-es drónrendszerének repülési terve rámutat arra, hogy „az automatikus képességről az autonóm képességre való áttéréssel az UAV-k több repülőgép kooperatív műveletét valósítják meg, így egyetlen operátor egyszerre több többcélú UAV-t is megfigyelhet, és a támadás koncentráltabbá, tartósabbá és nagyszabásúbbá válik”.¹¹ Ezért a raj kooperatív működése lesz a több drón autonóm támadási üzemmód elkerülhetetlen fejlesztési trendje.

A *high-tech* pilóta nélküli harci repülőgépek a mostani élvonalbeli technológia, valamint a legfejlettebb harci eszközök ötvözete. Ilyen nagy teljesítményű technikákat a világon csak néhány ország birtokol.¹² Az Egyesült Államok mindig is a pilóta nélküli harci technológia fejlesztésére koncentrált. Az elmúlt években az Egyesült Államok Védelmi Minisztériuma erőteljesen fejlesztette az UAV-technológiát, ami megváltoztathatja a hadviselés jellegét, és beépítette az Egyesült Államok katonai ellentételezési stratégiájának harmadik fejlesztési tervébe. Az amerikai hadsereg már 1994-ben felszerelte az eredeti RQ-1 Predator felderítő pilóta nélküli rendszert lézer megjelölővel és levegő-föld (AGM-114 Hellfire) nagy sebességű rakétával, hogy az MQ-1 Predator támadó UAV-vá fejlődjön, földi precíziós csapásmérő képességgel. 2013-ra az Egyesült Államok sikeresen kifejlesztette az X-47B hiperszonikus lopakodó UAV új generációját. Bár a projekt végül zátonyra futott, ez nem befolyásolja az amerikai hadsereg fejlődését az UAV-technológia területén. 2015-ben az Egyesült Államok Védelmi Minisztériuma Fejlett Védelmi Kutatási Projektek Ügynökségének

⁸ ZHANG–WEI 2021.

⁹ DANIAL et al. 2019: 5.

¹⁰ NOBAHARI–NASROLLAHI 2020: 15.

¹¹ ZHOU et al. 2020: 4.

¹² KUCHAR–YANG 2000: 133.

(DARPA) ELF projektje az UAV rajműveleti technológiájának fejlesztését tervezte, amely C-130-as szállító repülőgépekből állt, kölcsönös hálózatépítési és koordinációs képességekkel bocsátottak ki UAV-kat, hogy rajt alkossanak a támadási művelet végrehajtásához. Ugyanakkor az Egyesült Államok Légierőjének jövőbeli műveleti koncepciója először javasolta nagy légi platformok használatát több UAV-kivetési kooperatív támadási harci feladathoz. Ezenkívül az Egyesült Államok haditengerészete a Boeing csapatával karöltve olyan kis pilóta nélküli harci repülőgépeket fejleszt ki, amelyek kooperatív tengeralattjáró-ellenes hadviselésre alkalmazhatók. Ez a fejlesztési projekt mérőföldkőnek számított az amerikai hadsereg tengeri harci képességének javításában. Az UAV-technológia fejlesztését illetően a világ más katonai hatalmai nem szeretnék lemaradni, és egymás után versenyezni a katonai parancsnoki szinteken, ahogy az az izraeli Harpy öngyilkos drón és az európai nEUROn UAV esetében történt. A vonatkozó híradások szerint 2016-ban az orosz katonai repülőgépgyártó MIG megállapodást írt alá a Kereskedelmi és Ipari Minisztériummal, és a Ray prototípuson alapuló UAV-projekt megvalósítására készült. Az említett UAV belső fegyverkabinja 2 t tömegű irányítható fegyvert képes szállítani, beleértve a levegő-föld nagy sebességű UAV-kat, síklóbombákat, utazó nagy sebességű UAV-kat és sugárzás elleni nagy sebességű drónokat.

Bár a Kínában fejlesztett UAV-berendezések alkalmasak földi célpontok megtámadására, még mindig jelentős technológiai lemaradás van az UAV autonóm precíziós támadási képessége és kooperatív harci képessége, valamint az Egyesült Államok és más, vezető UAV autonóm harctechnológiával bíró országok között, bonyolult viszonyok közepette, különösen dinamikus harctéri környezetben. Az UAV-raj autonóm támadásának sajátossága, hogy az olyan feladatokat, mint több UAV közös légtérben való irányítása, a környezet és a célok érzékelése, a döntéshozatal és a támadási pálya tervezése, a fegyverindítás és a nagy sebességű pilóta nélküli légi járművek zuhanó támadása, az UAV-k egymástól függetlenül végzik, az üzemeltetők és a külvilág közötti beavatkozás nélkül, és rengeteg együttműködési tényezőt kell figyelembe venni az UAV-k között annak érdekében, hogy teljes mértékben kihasználhassák a rajharc előnyeit, ami nagy kihívásokat jelent az ezen eszközök navigációs/irányító- és vezérlőrendszerének tervezésében.

Az irányítási probléma mindig is a repülőgép alapvető gondja volt. A célészlelés és a pozicionálás tévedése, valamint az UAV-k kooperatív vezérlőrendszer teljesítményének romlása nagymértékben csökkenti az UAV vezérlési pontosságát és támadási precizitását, valamint súlyosan befolyásolja az UAV pontos kooperatív támadási hatékonyságát. Ezért számos nemzetközi kutatóintézet és tudós tanulmányozza az UAV autonóm támadás irányítási és vezérlési technológiáját.

Összefoglalva: a szerzők kutatják és összegzik a nagy sebességű pilóta nélküli légi járművek rajirányítását és vezérlését összetett légi harci környezetben. Először bemutatják a hagyományos irányító- és vezérlőrendszer szétválasztási tervezési gondolatát, elemzik a tipikus rajtámadás irányítási és vezérlési módszereit, és felvázolják a hagyományos tervezési módszerek korlátait. Ennek alapján a cikk az integrált vezérlési és irányítási tervezés előnyeire koncentrál a hagyományos tervezési ötletekkel

szemben, összefoglalja az általánosan használt integrált irányítástervezési módszereket és azok felhasználásait, majd feltárja a rendszerhez megfelelő rajkooperatív támadási stratégiát. Ismerteti a drónrajok irányításának és vezérlésének kihívásait, és bemutatja azokat a problémákat, amelyek a jövőben további kutatásra szorulnak. Végezetül szimulációkkal szemlélteti egy UAV-raj mozgó ellenséges célpont elleni dinamikus támadásait harctéri környezetben.

A tudományos probléma megfogalmazása

A cikk által tárgyalt tudományos probléma az összetett, bizonytalan és magas dinamikájú harctéri környezetben operáló UAV-rajok autonóm, nagy pontosságú kooperatív támadásának megvalósítása, amely a hagyományos, földi távvezérlésen alapuló „ember a hurokban” üzemmód korlátai miatt vált sürgetővé. A fő kihívást az jelenti, hogy az időérzékeny célpontok sikeres megsemmisítéséhez a drónoknak emberi beavatkozás nélkül, teljesen önállóan kell elvégezniük a valós idejű céladatfűzést, a helyzetértékelést, a fegyverkiosztást, valamint a közös légtérben zajló repülésirányítást és pályatervezést. A folyamatot nehezítik a célészlelési és pozicionálási hibák, amelyek a kooperatív vezérlőrendszer teljesítményromlásához vezetnek, drasztikusan csökkentve a támadás precizitását. Mivel a hagyományos irányító- és vezérlőrendszerek szétválasztott tervezési módszerei a korlátaik miatt már képtelenek lekezelni ezeket a komplex tényezőket, a kutatás központi magva egy olyan integrált navigációs, irányítási és vezérlési stratégia kidolgozása, amely képes koordinálni a nagy sebességű pilóta nélküli légi járművek zuhanó támadását és precíz pályaszabályozását.

A rakéta pályájának szabályozása és irányítása

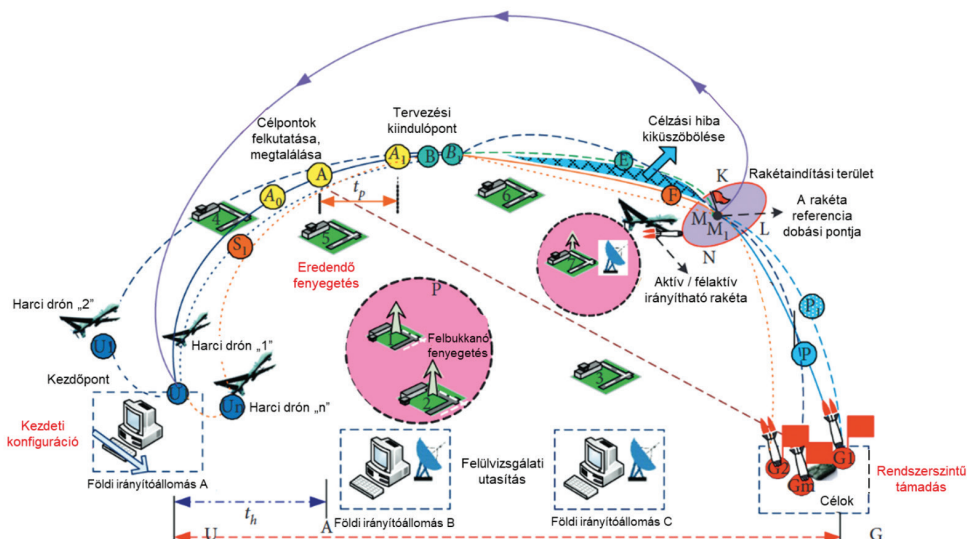
A több rakétát szállító pilóta nélküli harci légi jármű (UCAV) rajának autonóm támadási vázlata az 1. ábrán látható. Tegyük fel, hogy az UCAV-raj „n” számú UCAV-ból áll és az ellenséges célpontok megtámadásának feladatát végzi. Az egyéni UCAV-támadáshoz viszonyítva a rajalapú független támadás egyes szakaszaiban a következő eltérések tapasztalhatók.

UCAV-raj kooperatív repülési szakasz

Az utazó repülési szakaszban a sok UCAV-ból álló rajnak egy bizonyos kooperatív vezérlő mechanizmusra kell támaszkodnia, hogy garantálja több UCAV biztonságos repülését, és raj formájában repüljön a műveleti zónában. Ugyanakkor több ilyen eszköz együttműködési tényezőit is figyelembe kell venni a célkiosztás, a támadási övezet és az optimális indítási pozíció számítása közben.

Nagy sebességű UAV zuhanó támadási szakasz

Néhány kulcsfontosságú vagy speciális célpont vonatkozásában egyetlen rakéta sokszor nem elegendő a teljes megsemmisítés megvalósításához, így több rakétára van szükség a célpont egyidejű vagy meghatározott becsapódási szögben történő megtámadásához. Emiatt a támadási fázisban a több rakéta koordinációja visszatükröződik az összehangolt integrált irányítási és vezérlési stratégiában. A rakéták közötti együttműködési faktorokat átfogóan kell figyelembe venni, hogy konkrét célpontok ellen kooperatív telítettségi vagy szög behatolási támadást lehessen végrehajtani.



1. ábra: A hagyományos irányító- és vezérlőrendszer tervezési módszere

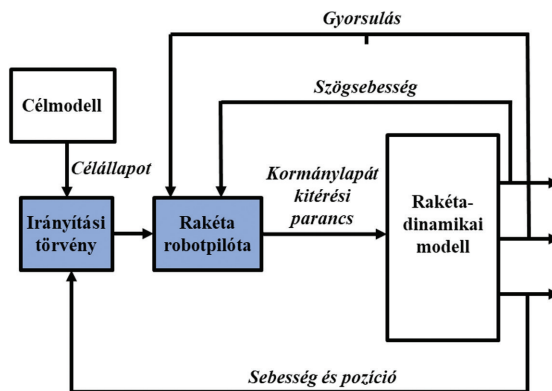
Forrás: a szerzők szerkesztése HUANG 2022: 3 alapján

Az önálló támadás végén a rakétairányító- és rakétavezérlő-rendszer a kulcs az autonóm és pontos támadás kivitelezéséhez, miután a pilóta nélküli légi járművek rakétákat indítanak. A rendszer teljesítőképessége végső soron meghatározza a támadási feladat hatását. Komplex hadműveleti környezetben a drónok és rakéták pontos és időérzékeny csapásmérő képessége a hagyományos irányítási rendszerek hiányosságainak felszámolásán múlik, és az integrált irányítás, valamint az intelligens vezérlési módja teljes mértékben kihasználhatja a különböző funkcionális modellek egymást kiegészítő előnyeit. Mindezek kiemelten fontosak a különböző külső zavarok közötti különbségek kiegyenlítése, a valós idejű kumulatív hiba csökkentése és az általános felügyelet megalapozottságának hatékony javítása érdekében.¹³

¹³ YU et al. 2013: 7.

A hagyományos irányítási rendszer tervezési megközelítése

A 2. ábrán a rakéta hagyományos irányító- és vezérlőrendszer-tervezési gondolata látható. Az elmélet az, hogy szétválasztják az irányítórendszert a vezérlőrendszertől, majd külön hajtják végre a rendszer megtervezését.¹⁴ A hagyományos irányítási és ellenőrzési tervezési mód lényege az irányítási parancs kidolgozásában rejlik. Az irányítási parancsot az irányítási törvény adja meg, majd a repülésirányító rendszer végrehajtja azt, annak érdekében, hogy fenntartsa a stabil repülési helyzetet és elvégezze a harctéri célpontok támadásának és megsemmisítésének feladatát.¹⁵



2. ábra: A hagyományos irányító- és vezérlőrendszer tervezési módszere

Forrás: a szerzők szerkesztése HUANG et al. 2022: 3 alapján

A rakéta precíziós irányítása szempontjából először az arányos irányítási szabályt használták a rakétavezérlő rendszer tervezésénél, amely egyszerű és hatásos módszernek bizonyult.¹⁶ Megtervezték az RBF neurális hálózaton alapuló rakéta háromdimenziós arányos vezérlési törvényét, amely nemcsak a vezérlési pontosságot, de az arányos vezérlési módszer robusztusságát is javította. Az 1970-es években széles körben kezdték alkalmazni az optimális vezérlési szabályt, minimális energiafogyasztással a rakéta sebességvektorának specifikus iránykorlátai szerint.

A rakéták nagyobb hatékonysága és pusztító ereje érdekében le kell küzdeni a repülés közben fellépő becsapódásiszög-korlátozásokat. Ugyanakkor az ellenséges célpontok telítettségi támadásának végrehajtásához meg kell felelni az időkoordinációnak, és a szinkrontámadás megvalósításának is eleget kell tenni. Ezért a multirakéták kooperatív irányítási és vezérlési technológiájának kutatása kiemelt kutatási területté vált.¹⁷ Egy olyan vezérlési szabályt szükséges megvizsgálni, amely a több rakéta cselekvési idejének konzisztenciáján alapuló arányos irányításon nyugszik, és a cselekvési idő hibáját visszajelzésként veszi figyelembe. Ez a módszer nemcsak a nyomkövető látómezőkorlátait kezeli, hanem a fix vagy változó kommunikációs

¹⁴ ZHU–DUAN 2013: 153.

¹⁵ LEVY–SHIMA–GUTMAN 2013.

¹⁶ YUEH–LIN 1984: 740.

¹⁷ YANG et al. 2013.

hálózat alapján a cselekvési idő konzisztenciáját is megvalósítja.¹⁸ Kifejlesztették az optimális irányítási és vezérlési módszert a rakétablokk korlátainak kielégítésére azáltal, hogy optimalizálták a gyorsulásiparancs-impulzusokat az irányítórendszerben a becsapódási szög és a gyorsulási korlátozások alapján. A fejlesztő először egyetlen rakétára vonatkozó eltolt arányos irányítási eljárást dolgozott ki, végül hálózatba kapcsolt kooperatív irányítási és vezérlési módszert alakított ki becsapódási szöggel és időkorlátokkal más rakéták hátralévő támadási idejének valós idejű beállításával. A szimulációs eredmények azt mutatják, hogy ez a módszer jobban illeszkedik a támadási idő és a becsapódási szög koordinációjához.¹⁹

A klasszikus felépítés eredményes megoldásnak bizonyult, a rakétatámadás végén az irányítási kör időállandója kisebb lesz, a sávszélesség pedig nagyobb, a rakéta és a célpont közti relatív távolság csökkenésével. Ha a hagyományos metódust alkalmazzuk az irányítórendszer és a vezérlőrendszer tervezéséhez, az gyakorta olyan gondokhoz vezet, mint a nagymértékű tévedési távolság és a repülés instabilitása. Ugyanakkor az irányítórendszer és az ellenőrző rendszer szétválasztása bizonyos nehézségeket is felvet, például a rendszertervezési redundanciát és a magas mérnöki tervezési költségeket, és nem segíti elő a fegyverek általános potenciáljának és hatékonyságának teljes körű kiaknázását, ami súlyosan korlátozza a rakéták precíziós csapásmérő képességét és harci hatékonyságát.

Integrált irányítási és vezérlési megközelítés (IGC²⁰)

Az integrált irányítás és vezérlés, más néven irányítás és vezérlés fúziója és tervezési gondolata immár nem tesz különbséget a vezetőhurok és a vezérlőhurok között, a két hurkot egy egészként vizsgálja. A módszer keretrendszerét a 3. ábra mutatja. A kormánylapát elfordulási szögének felügyeleti parancsa közvetlenül a rakéta célpontjának relatív mozgása és a rakéta saját repülési állapota szerint generálódik, ami nemcsak az instabilitást tudja elkerülni, hanem nagymértékben javítja az irányítási pontosságot is. Ugyanakkor az integrált irányítás és vezérlés csökkentheti a vezérlőrendszer tervezési költségeit, javíthatja a fegyverrendszer általános megbízhatóságát, elősegítheti az alrendszerek közötti koordinációt, és nagymértékben javíthatja a rakéta működési hatékonyságát.²¹ Lényegében az integrált irányítás és vezérlés tervezése a rendszer kimeneti szabályozásának nemlineáris vezérlési problémájára redukálható. Mivel figyelembe kell vennie az irányító- és a vezérlőrendszer közötti erős kapcsolatot, eltér az általános nemlineáris vezérlési módszertől.

A rendszer fejlesztői 1983-ban indítványozták az IGC koncepcióját, a kutatók különféle tervezési eljárásokat javasoltak az integrált irányításra és szabályozásra, főleg az optimális szabályozási módszert, a visszalépéses szabályozási eljárást, a csúszó módú vezérlési módszert, a pályalinearizáló szabályozási módot és a dinamikus felületszabályozási eljárást.²²

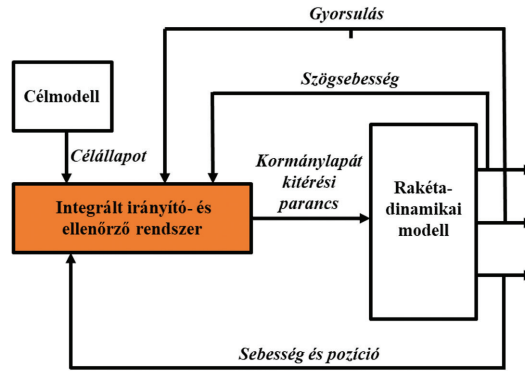
¹⁸ ZHANG-CHEN-SHEN 2013.

¹⁹ GU-ZHAO-ZHANG 2008.

²⁰ IGC: *integrated guidance and control* – integrált irányítási és vezérlési módszer.

²¹ MORGAN-THARP-VINCENT 2011.

²² ZHANYUAN et al. 2021: 244.



3. ábra: Az integrált irányító- és vezérlőrendszer tervezési módszere

Forrás: a szerzők szerkesztése HUANG et al. 2022: 4 alapján

Optimális vezérlési módszer (OC²³)

Az optimális vezérlés a rakéták integrált irányítási és vezérlési (IGC) módszerei közül a legkorábbi. Ezt a taktikai rakétákhoz tervezett rendszert az optimális irányítás és a Bank-to-Turn becslési elmélet alapján alakították ki. A koncepció helyességét és az optimális irányítás hatékonyságát mozgó célpont elleni numerikus szimulációkkal igazolták. Az IGC vezérlési problémát optimális szabályozási problémává transzformálták, és az IGC-vezérlőt a lineáris másodfokú szabályozó módszerrel alkották meg. Az irányítás célja az volt, hogy a kihagyási távolságot nullára redukálják, és biztosítsák a rakéta repülési állapotának stabilitását. A továbbfejlesztett, exponenciális átlag módszert a célpálya előrejelzésére alkalmazták, és a rakéta integrált irányítását és vezérlését nemlineáris optimalizálási problémává alakították át véges időtartományban, és megtervezték a gördülő időtartományú IGC-vezérlési stratégiát a Gauss-pszédo spektrum²⁴ (GPM) módszer alapján. Jóllehet az optimális ellenőrzési módszer egyszerű és hatékony, hátránya a hatékony analitikai megoldás hiányában rejlik.²⁵

Visszalépéses vezérlési eljárás (BC²⁶)

Tipikus nemlineáris szabályozási eljárásként a visszalépés-vezérlésnek megvan az az előnye, hogy jól tudja kezelni a rendszer páratlan bizonytalanságát. Ezért az integrált

²³ OC: *optimal control* – optimális vezérlés.

²⁴ A Gauss-pszédo spektrális módszer hatékony numerikus eljárás nemlineáris optimális vezérlési feladatok megoldására. A módszer a folytonos időtartományú problémát diszkrét nemlineáris programozási (NLP) feladattá transzformálja. Ehhez a rendszerállapotot és a vezérlést globális ortogonális polinomokkal közelíti, a dinamikai egyenleteket pedig specifikus Gauss-kvadratúrapontokban (kollokációs pontok) illeszti.

²⁵ LI-MA 2020: 998.

²⁶ BC: *backstepping control* – visszalépéses vezérlés.

irányítás és vezérlés tervezésénél is alkalmazták.²⁷ A szimulációs eredmények azt mutatták, hogy ez a módszer nemcsak a bemeneti korlátokat képes hatékonyan kezelni, hanem a rendszer bizonytalanságaival szemben is robusztus lehet. A visszalépéses vezérlési eljárás az előlről hátrafelé irányuló rekurzív ötleten alapul. Adaptív és robusztus vezérlésre alkalmas, és egyedülálló előnyökkel rendelkezik a bizonytalanság kezelésében. A virtuális vezérlő ismételt differenciálszámítása azonban túl bonyolult. Ezenkívül ennek a módszernek vannak problémái, mint például a dimenziórobbanás és a paraméterek beállítása.²⁸

Csúszó módú vezérlési módszer (SMC²⁹)

A nemlineáris problémák kezelésekor a csúszó módú vezérlési eljárás előnyei a gyors konvergencia, az egyszerű algoritmus és az erős robusztusság. Ugyanakkor ez a legszélesebb körben használt módszer az integrált irányítási és vezérlési tervezésben is.³⁰ A szimulációs eredmények azt mutatták, hogy ez az eljárás nemcsak a rakétarendszer stabilitását tudja biztosítani, hanem nagymértékben javítja a rendszer válaszütemét és a célpont becsapódási pontosságát is. Aktív zavarelhárítási eljárást terveztek a rakéta IGC-hez, amely csúszó módú vezérlésen és kiterjesztett állapotmegfigyelő technológián alapul. Ez a módszer nemcsak azt biztosítja, hogy a rakéta kis tévedési távolsággal és sima repülési pályával rendelkezzen, hanem a rakétát is robusztussá teszi a rendszer bizonytalanságával és a külső zavarokkal szemben. Ezen eljárásnál létrehozták a rakéta egyfajta referenciamodelljét, és új irányítási törvényt terveztek a visszalépés ötletének és a csúszó módú vezérlő algoritmusnak a felhasználásával, hogy a rakéta erős mobilitással pontosan megtámadhassa a célpontot. A csúszó módú vezérlési módszer legnagyobb hátránya, hogy a rakéta repülése közben pulzáló, magas frekvenciájú hangok sorozata alakul ki. A jelenség zajcsökkentése nehézkes eljárás. A harctéri célpont megtámadásának repülési folyamata során a rakétának nemcsak a gördülést kell minimalizálnia, hanem biztosítani kell a repülési stabilitást és a pálya simaságát is. Ezért a csúszó módú vezérlési eljárásnak nagy korlátai vannak a gyakorlati alkalmazásban.³¹

Pályalinearizációs vezérlési módszer (TLC³²)

Új és hatékony nemlineáris nyomkövetési és szétválasztási szabályozási eljárásként a pályamozgató linearizációs irányítást egyre inkább használják az új rakéták és UAV-k repülésirányító rendszerének tervezésében egyszerű és hatékony vezérlési struktúrája

²⁷ HOU-LIANG-DUAN 2013: 742.

²⁸ Fu et al. 2020.

²⁹ SMC: *sliding mode control* – csúszó módú vezérlés.

³⁰ WILLIAMS-RICHMAN-FRIEDLAND 1983: 60.

³¹ LIN et al. 1998.

³² *Trajectory linearization control method* – pályalinearizációs vezérlési módszer.

miatt.³³ A TLC szempontjából a hiperszonikus jármű a leginkább alkalmazott. A pályalinearizálás és az aktív zavarelutasító vezérlés ötvözésével egy olyan attitűdkövetési módszert alakítottak ki a hiperszonikus járművek visszatérési szakaszára, amely korlátos bizonytalanságok mellett is hatékony, emellett javaslat született egy olyan IGC-pályalinearizációs szabályozási eljárásra is, amely kezeli a jármű egyes csatornái és a dinamikus korlátok közötti erős csatolást. A szimulációs eredmények azt mutatják, hogy ezen eljárás nagy előnyökkel jár az optimális szabályozási módszerrel szemben a szabályozási teljesítmény tekintetében.³⁴ Robosztus fúziós irányítási és vezérlési módszert terveztek a rakétához, amelyek a pályalinearizációs vezérlésen alapulnak, de ez csupán a hangmagassági csatornára fókuszál. A TLC-módszer tervezésének két fő nehézsége az IGC-rendszer magas rendjében és a rendszer számos bizonytalanságában rejlik, amelyek nagymértékben befolyásolják a TLC-módszer szabályozási pontosságát és robusztusságát.³⁵

Dinamikus felületszabályozási eljárás (DSC³⁶)

A visszalépéses vezérlési metódus és a csúszó módú vezérlési eljárás tárgyrobbanás problémájának megoldása érdekében a kutatók először a dinamikus felületszabályozási módszert javasolták. Az alapgondolat az, hogy az eredeti visszaléptetési vezérlés első és hátsó kétlépcsős vezérlési törvények kidolgozása között elsőrendű aluláteresztő szűrőt adjon, hogy kikerülje egyes nemlineáris jelek közvetlen differenciálását a következő fázisban. A szűrő bevezetése okán az egyes lépésvezérlők kialakítása lényegében különválik az előző szekció kidolgozásától. Egy sokkal egyszerűbb „felületi” vezérlési gonddal kell foglalkoznia, ami mérsékli a vezérlő megtervezésének komplexitását. Eddig a dinamikus felületszabályozási módszert számos mérnöki gyakorlatban sikeresen alkalmazták, továbbá az integrált vezetés és szabályozás megtervezésében használták. Számításba vették az előlő látásmód korlátait, megtervezték a Ljapunov-függvényen és a dinamikus felületszabályozáson alapuló fúziós irányítási és vezérlési módszert, és bizonyították az IGC-rendszer stabilitását, Barbalat-lemma és Ljapunov stabilitási tétel³⁷ alkalmazásával dinamikus felületi fúziós irányítási és vezérlési módszert terveztek meg a rakéta rendszerében rögzített célokhoz, terminális leszállási szögkorlátozásokkal. A kooperatív fúziós irányításban és szabályozásban kevés szakirodalom alkalmazza a dinamikus felületszabályozási metódust. A fejlesztők megtervezték a kooperatív fúziós irányítási

³³ MENON–OHLMEYER 2001: 7.

³⁴ ZHAO–ZHOU 2016.

³⁵ SHARMA–RICHARDS 2004.

³⁶ DSC: *dynamic surface control* – dinamikus felületszabályozó vezérlés.

³⁷ A Barbalat-lemma és Ljapunov stabilitási tétel középpontjában a differenciálegyenlet stabilitásának vizsgálata áll. A Barbalat-lemma a differenciálegyenlet stabilitásának vizsgálata során a sajátértékek és a Routh–Hurwitz-kritérium segítségével stabil, instabil, centrális altér kategorizálását teszi. A Ljapunov stabilitási tétel pedig a differenciálegyenlet stabilitásának vizsgálata – sajátértékek segítségével, a Ljapunov stabilitási és instabilitási tételekkel, az aszimptotikus viselkedés vizsgálata során, az ω -határhalmaz fogalma és tulajdonságai, valamint az egyensúlyi pont stabilitás vizsgálata – linearizálással.

és szabályozási eljárást a dinamikus felületszabályozás alapján. Ez az eljárás azonban a hangmagasság-csatorna rögzített célpontját célozza meg, miközben a dinamikus rendszer változó sebessége csökkenti az IGC-rendszer tervezésének nehézségeit. Emiatt a kutatók egy dinamikus felületi irányításon alapuló multirakétás kooperatív fúziós irányítási és szabályozási módszert dolgoztak ki, ám ez kizárólag a földi rögzített célpontokat célozza meg, ami nagymértékben korlátozza a módszer felhasználhatóságát. A dinamikus felületszabályozási módszer a fúziós irányítási és szabályozási problémát a rendszer egyes állapotainak nemlineáris szabályozási problémájává formálja. Az irányítási cél világos, és a kihívás az, hogy miként lehet fejleszteni az IGC dinamikus felületi irányításának alkalmazkodóképességét és robusztusságát, amikor maga a rakétarendszer rendelkezik vezérlő bemenet telítettséggel, és a rendszerben nemlineárisan paraméterezett, nem egyező bizonytalanság van.³⁸ A különbségeket és az összehasonlítást az 1. táblázat mutatja be.

1. táblázat: Az integrált irányítási és vezérlési módszerek különbsége és összehasonlítása

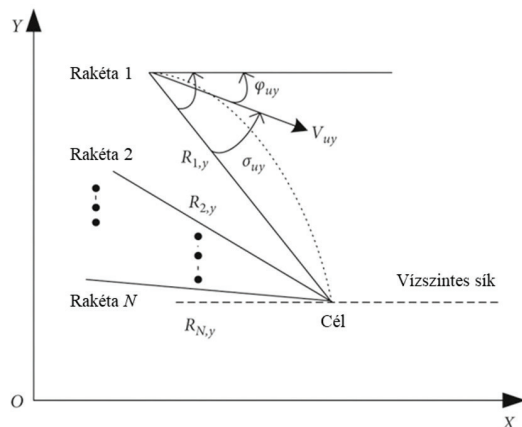
Módszerek	Előnyei	Hátrányai
Optimális szabályozás (OC)	A tervezés egyszerű és könnyen megvalósítható	A rendszerből hiányzik a hatékony analitikai megoldás
Visszalépés-szabályozás (BC)	Jól megbirkózik a bizonytalansággal	Ez az elem robbanási problémájához vezethet
Csúszó mód vezérlési módszer (SMC)	Gyors konvergenciával, egyszerű algoritmussal és erős robusztussággal rendelkezik	Problémája van a <i>chattering</i> jelenséggel
Pályalinearizációs vezérlési módszer (TLC)	A leválasztási ellenőrzési struktúra egyszerű	A bizonytalanságok magas rendje és nagy száma
Dinamikus felületszabályozási eljárás (DSC)	Leküzdheti az elemrobbanás problémáját	Javítani kell a bemeneti telítettség robusztusságát

Forrás: a szerzők szerkesztése

Együttműködési taktika a rajtámadáshoz

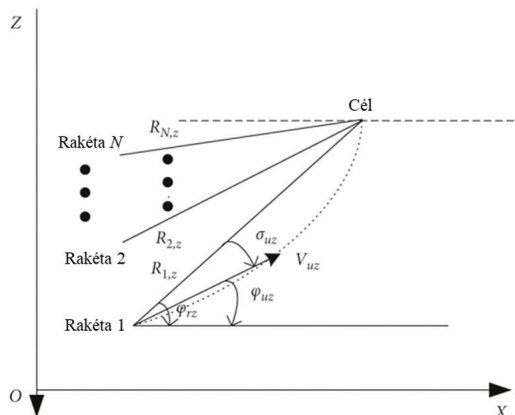
A megszokott klaszter kooperatív támadási műveleti elgondolást a 4. és az 5. ábra szemlélteti, amelyek az egy célpontot támadó N számú rakéta viszonylagos mozgási kapcsolatait a hosszanti és az oldalirányú síkban mutatják be.

³⁸ SHIMA–IDAN–GOLAN 2006: 255.



4. ábra: Relatív mozgás hosszanti síkban

Forrás: a szerzők szerkesztése HUANG et al. 2022: 6 alapján



5. ábra: Relatív mozgás az oldalsíkban

Forrás: a szerzők szerkesztése HUANG et al. 2022: 6 alapján

Amikor több nagy sebességű pilóta nélküli légi jármű együttműködik a harctéri célpontok megtámadásában, átfogóan figyelembe kell venniük az együttműködést a repülési folyamatban, és meg kell felelniük a végső támadási idő vagy támadási szög koordinációs követelményeinek. Az optimális irányítás ötlete alapján a kutatók a hajóelhárító nagy sebességű pilóta nélküli légi jármű támadási időszabályozási irányítási törvényét javasolták.³⁹ Beállították a hibakifejezést az előre beállított támadási idő és a hátra lévő támadási idő között, hozzáadták az arányos irányítási törvényhez, és új irányítási törvényt terveztek a csúszó módú vezérlési módszerrel, hogy az biztosítsa az előre beállított támadási időkorlátok betartását. Sem a támadási időszabályozási

³⁹ Huo et al. 2017.

törvény, sem a csúszó módú irányítási törvény nem veszi teljes mértékben figyelembe a drónok repülési folyamatában való kölcsönhatást és együttműködést.⁴⁰ Ezenkívül a hivatkozások a kooperatív irányelvek és a kooperatív arányos iránymutatási szabály kétrétegű szerkezetét hozták létre. A harci repülés alatt a hátralévő támadási időt online adatkapcsolaton keresztül elosztják a nagy sebességű pilóta nélküli légi járművek között, és valós időben módosítják saját repülési helyzetüket a végső támadási idő egyeztetése végett.⁴¹ A támadási szög koordinációját illetően kooperatív irányítást fejlesztettek ki a támadási idő és támadási szög korlátozásaival a csúszó mód szabályozása és az általánosan alkalmazott látószög-beállítási technika, valamint a másodrendű csúszó mód eljárás révén, amiatt, hogy megfeleljen a támadási idő és a támadási szög korlátainak. Kidolgozták az eltolásos arányos irányítási törvényét a visszalépés-szabályozási módszer használatával, amelyben az eltolási komponens átfogóan figyelembe vette a támadási idő és a támadási szög hibáját.⁴²

A támadási idő koordinációjával összefüggő fenti kutatásban elkerülhetetlen a hátralévő támadási idő megállapítása. A becslési pontossága nagy hatással van a pilóta nélküli légi járművek végső irányítási pontosságára. A gyakorlati alkalmazásokban rendkívül nehéz pontosan megbecsülni a hátralévő támadási időt, különösen a támadási idő korlátaival rendelkező irányítási törvény kidolgozásában; a nagy sebességű pilóta nélküli légi járműveknek gyakran különböző manőverekre van szükségük a végső támadási idő koordinációjának eléréséhez. A kooperatív irányítási törvénynek nem kell megbecsülnie a hátralévő támadási időt, a tervezett vezérlő túl specifikus, és meghibásodik, ha a támadási vezetési szög nulla, ezért nehéz a gyakorlati mérnöki munkában alkalmazni. A leszállási szög megkötésű nagy sebességű UAV irányítási problémájában a jelenlegi kutatás elsősorban a hagyományos irányítási törvény kidolgozására koncentrál, és nem veszi figyelembe a támadási szög korlátozását. Ezért tovább kell vizsgálni a kooperatív fúziós irányítást és a támadási szög szabályozását.⁴³

Kihívások és lehetőségek

Keletkező nehézségek

Javítani kell a fúziós irányítás és a rakétahordozó irányításának precizitását és stabilitását

Az UAV-támadás végső szakaszában a megszokott irányítórendszer és vezérlőrendszer tervezési technikái hajlamosak olyan gondokra, mint a nagy kihagyási távolság és a repülés instabilitása. Az integrált irányítás és ellenőrzés kialakításánál a meglévő módszerek eltérő szintű hiányosságokkal rendelkeznek. Ezzel szemben, habár a pálya linearizációs szabályozási módszere egyszerű és könnyen megvalósítható és jó szabályozási hatású, az IGC-rendszer magasrendű és nagy mennyiségű bizonytalanságának

⁴⁰ HONG et al. 2017.

⁴¹ JIAN et al. 2016.

⁴² ZHU-SHEN 2015.

⁴³ ZHOU et al. 2015.

kezelése ebben a módszerben két nehézséggé vált a komplex dinamikus környezetben. A nagy sebességű pilóta nélküli légi járművek IGC vezérlési pontosságát és robusztusságát még fejleszteni kell.

Nehéz kivitelezni a rakétahordozó irányítási és vezérlési stratégiáját

Jelenleg kevés szakirodalom vizsgálja a kooperatív integrált irányítási és vezérlési problémát, amely még az előzetes kutatási stádiumban van, és a hátralévő támadási idő becslésén alapuló kooperatív integrált irányítási és vezérlési stratégia nehezen alkalmazható. Ugyanakkor a tervből hiányzik a rendszer stabilitásának és robusztusságának problémáira vonatkozó teljes körű figyelembevétele és alapos kutatása, amelyeket a nagy sebességű UAV nemlinearitása és időbeli változékonysága, a nagy sebességű UAV aerodinamikai paramétereinek zavarása és a bemeneti telítettség korlátozása okoz.

A nyomon követési kutatás kilátásai

Nagy sebességű pilóta nélküli légi járművek és rakétahordozók IGC-vezérlőjének paraméterhangolására irányuló kutatás

A nagy sebességű UAV IGC-vezérlő paramétereinek nagyrészt bizonyos logikai levezetésekkel és ismételt próbálkozásokkal és hibákkal nyerjük. A számos szabályozási törvényi, szűrőállandó és zavarmegfigyelő paraméterek miatt a hibakeresési idő hosszú és nehézkes. Ezért a kooperatív IGC-vezérlő paraméterhangolási módszerének kutatása egy másik mélyreható vizsgálatra érdemes téma.

A rakéta (nagy sebességű UAV és raj kooperatív) vezérlőrendszerének műszaki megvalósítására irányuló kutatás

A vezérlési metódus tervezésekor, habár bizonyos tanulmányok figyelembe veszik az olyan szempontokat, mint a parancskészség, a bemeneti telítettség és a dinamikai határérték, nem veszik figyelembe a valós vezérlőrendszer nemlineáris bizonytalan jellemzőit, mint például a hiszterézist és a holtzónát, amelyek még mindig bizonyos távolságra vannak a műszaki megvalósítástól.⁴⁴

Szimulációk

A szimuláció egy (3) UAV-ból álló raj és egy indított rakéta mozgását modellezi egy védett, mozgó ellenséges célpont ellen dinamikus harctéri környezetben. A raj tagjai

⁴⁴ ZHANG et al. 2020.

koordinálják a pozíciójukat (konvergálnak a célra), miközben a rakéta az autonóm fázisoknak megfelelően, záró fázisú arányos navigációs (*proportional navigation*) vezérléssel semmisíti meg a célt.

Dinamikai modellek felírása

A raj tagjainak ($i = 1, 2, 3$) és a rakétának (m) kétdimenziós kinematikai egyenleteit az alábbi (1) és (2) differenciálműveletek írják le

$$\dot{x}_i = v_i \cos(\theta_i), \quad \dot{y}_i = v_i \sin(\theta_i) \quad (1)$$

$$\dot{x}_m = v_m \cos(\theta_m), \quad \dot{y}_m = v_m \sin(\theta_m) \quad (2)$$

Ahol (x, y) a pozíciókoordináták, (v) a sebességek, (θ) pedig a haladási irányok (pályaszögek).

Kooperatív rajirányítási törvény

A drónok közötti konszenzusos együttműködést egy kétszintű irányítási törvény biztosítja, amely minimalizálja a célponttól mért távolságot, miközben fenntartja a raj kohézióját

$$u_i = -k_d(p_i - p_{target}) - k_c \sum_{j \in N_i} (p_i - p_j) \quad (3)$$

Ahol $p = [x, y]^T$ a pozícióvektor, $k_d = 0,15$ a célratartás erősítése, $k_c = 0,08$ a drónok közötti kooperációs együtttható.

Rakétavezérléses arányos navigáció (PN)

A rakéta indítása után a vezérlőrendszer a látóvonal szögsebességét $\dot{\lambda}$ használja fel a szükséges oldalgyorsulási parancs (a_n) kiszámítására:

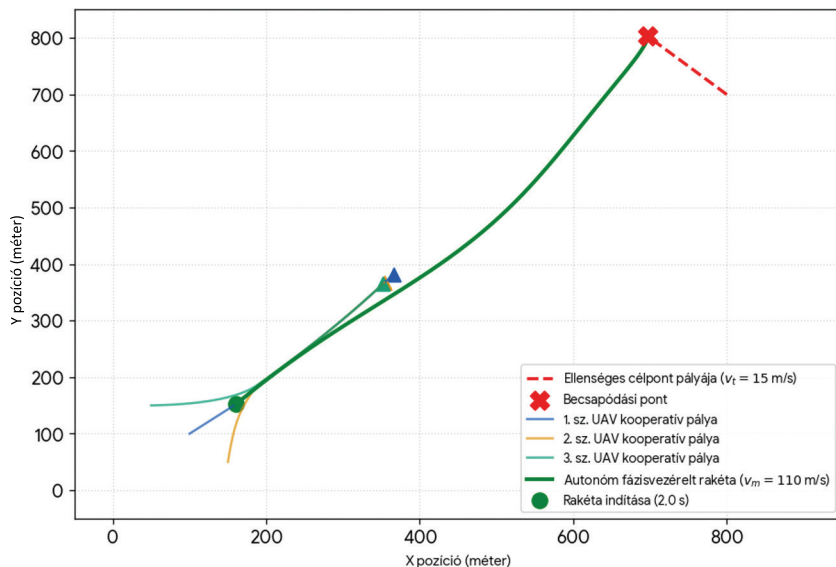
$$a_n = N v_r \dot{\lambda} \quad (4)$$

Ahol $N = 4,0$ a navigációs állandó, v_r a relatív sebesség, a látóvonal szög pedig:

$$\lambda = \arctan 2(y_{target} - y_m, x_{target} - x_m) \quad (5)$$

Időléptetéses szimuláció

A lefutott numerikus szimuláció, amely a 6. ábrán látható, igazolja cikkünk azon állítását, miszerint a mesterségesintelligencia-alapú autonóm vezérlés képes áttörni az „ember a hurokban” korlátokat dinamikus környezetben is.



6. ábra: UAV-rajkooperáció és autonóm fegyvervezérlés komplex légi műveletben

Forrás: a szerzők szerkesztése Python NumPy matematikai szoftverrel lefutott szimuláció alapján

A grafikon egy komplex légi harcászati szimuláció kétdimenziós (X , Y) koordináták méterben megadott helyzetképét mutatja be az idő függvényében.

Ellenséges célpont (piros szaggatott vonal és X): egy lassabb (15 m/s), egyenes vonalban haladó ellenséges objektum pályája. A piros X jelzi a becsapódási pontot, ahol a megsemmisítés megtörtént.

UAV-rajkooperáció (kék, sárga és világoszöld görbék): három különböző pontból induló drón pályáját mutatja. Jól látható, hogy a kezdeti szétszórt formációból a kooperatív algoritmus hatására a görbék gyorsan egy közös, rendezett alakzatba (rajba) konvergálnak, majd együtt repülnek a cél felé. A kis háromszögek a drónok pozícióját mutatják a szimuláció végpontjában.

Rakéta indítása (zöld kör): a 2,0 másodperces repülési időnél az egyik hordozó UAV elvégzi a helyzetértékelést, és elindítja a saját rakétáját az $X \approx 160$, $Y \approx 150$ koordinátáknál.

Autonóm fázisvezérelt rakéta (vastag zöld egyenes): a rakéta a leválás után rendkívül nagy sebességgel (110 m/s) halad. Az arányos navigációs (PN) vezérlésének köszönhetően nem közvetlenül a cél pillanatnyi helyzetét követi, hanem a jövőbeli pályáját kalkulálva egyenesen a találkozási (becsapódási) pontba navigálja önmagát.

Kiszámíthatatlan, cikcakk vonalú kitérő manőverek (evasive manoeuvres)

A 6. ábrán bemutatott elméleti modell gyakorlati kiterjesztéseként az alábbiakban részletesen bemutatunk két környezeti és harcászati tényezőt (a kiszámíthatatlan kitérő manőverek és a szélterhelés) matematikai modellezését, valamint vizsgáljuk azok hatását a rakéta arányos navigációs (PN) vezérlésére.

A manőverező célpont matematikai modellje

A célpont (t) irány szöge (θ_t) egy alapirányból, egy harmonikus (szinuszos) kitérésből és egy véletlenszerű (úgynevezett fehér zaj) zavarból tevődik össze. Az összefüggést a (6) egyenlet írja le.

$$\theta_t(t) = \theta_0 + A \sin(\omega t) + \eta(t) \quad (6)$$

Ahol:

$\theta_0 = 135^\circ$: az alapvető haladás iránya, $A = 0,5 \text{ rad/s} \approx 28.6^\circ$ a kitérés maximális amplitúdója (a cikcakk élessége), $\omega = 1,5 \text{ rad/s}$ a manőverezés frekvenciája (milyen gyorsan vált irányt), $\eta(t)$ pedig a Gauss-féle fehér zaj ($\sigma = 0,05$), amely a kiszámíthatatlan, hirtelen instabil működést (lengéseket) szimulálja.

A vezérlésre és a pályára gyakorolt hatásokat megvizsgálva a következőket állapíthatjuk meg:

- A folyamatos irányváltások miatt a látóvonal (*line of sight*) szögsebessége ($\dot{\lambda}$) konstans érték helyett hevesen oscillál, tehát a LOS szögsebessége ingadozik.
- Megnövekedett túlterhelésigény mutatkozik, mivel az arányos navigációs parancs $a_n = N v_r \dot{\lambda}$, a rakétának folyamatosan korrigálnia kell. Ez a rakéta részéről sokkal nagyobb oldalgyorsulást (G-erőt) és jelentős mozgásenergia-vesztést igényel.
- A rakéta a kanyargós pálya miatt már nem egyenes vonalon repül a becsapódási pontig, hanem S-alakú, finoman korrigáló görbét ír le, megpróbálva lekövetni a célpont jövőbeli pozícióját.

Szélterhelés és légköri zavarok (*wind disturbance & gusts*)

A szél külső aerodinamikai zavaró tényező, amely oldalirányban eltéríti mind a drónokat, mind a rakétát a tervezett pályájukról. A szélhatást egy konstans háttérszél és egy hirtelen fellépő szélleökés (szélnyírás) összegeként modellezzük.

A *szélterhelés matematikai modelljének* felírásakor a szélesebességvektort ($\vec{W} = [W_x, W_y]$) hozzáadjuk az eszköz saját hajtóereje által biztosított sebességkomponensekhez. A szél modelljét a (7) és (8) egyenletek írják le.

$$W_x(t) = W_{cst,x} + W_{gust} \cos \phi_{gust} \quad (7)$$

$$W_y(t) = W_{cst,y} + W_{gust} \sin \phi_{gust} \quad (8)$$

Ahol $W_{cst} = [12,0 - 5,0] m/s$ folyamatos, konstans északnyugati háttérszél, W_{gust} egy diszkrét széllokés (például a 4. és 6. másodperc között), amelyet az űrhasználatban és katonai szabványokban használt „1-minus-cosine” profillal modellezzük [(9) egyenlet].

$$W_{gust}(t) = \frac{A_g}{2} \left(1 - \cos \left(\frac{2\pi(t-t_s)}{T_g} \right) \right) \quad (9)$$

Ahol $A_g = 25 m/s$ a széllokés ereje, $t_s = 4,0 s$ a kezdete, és $T_g = 2,0 s$ a lefutási időtartama.

A vezérlésre és a pályára gyakorolt hatása három tényezőt von maga után:

- Amennyiben a vezérlőrendszer nem kompenzálja, a szél egyszerűen elfújja a rakétát a cél mellett. A valóságban a rakéta sebességvektora elfordul az aktuális haladási iránytól (csúszásszög alakul ki). Ez az úgynevezett sodródás (*drift*).
- Módosult kinematikai egyenletek, ami annyit jelent, hogy a szimulációs hurokban a pozíciófrissítés az alábbiak szerint módosul:

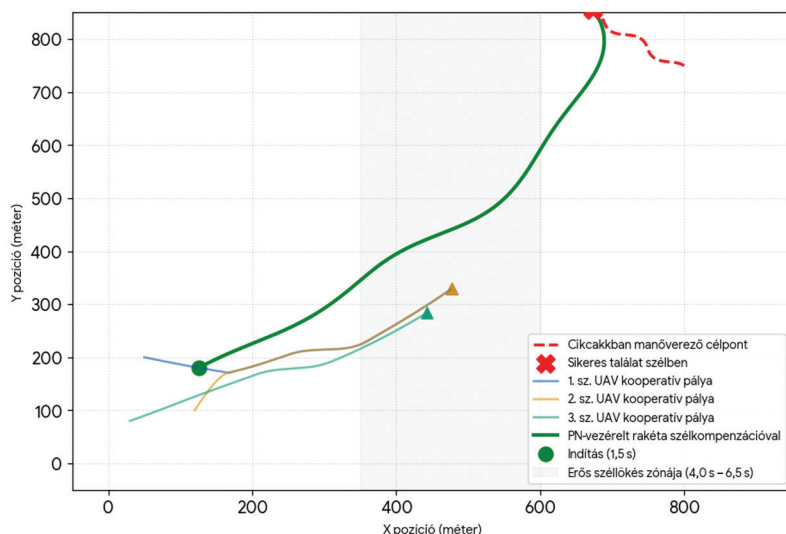
$$\dot{x}_m = v_m \cos(\theta_m) + W_x(t) \quad (10)$$

$$\dot{y}_m = v_m \sin(\theta_m) + W_y(t) \quad (11)$$

- A kormányfelületek leterheltsége tekintetében, amikor a rakéta belép a széllokés zónájába (4. másodperc), a látóvonal hirtelen elugrik. A PN-algoritmus ezt a célpont manővereként érzékeli, és azonnali, agresszív kormánymozdulattal válaszol.

A 7. ábrán a fentiek alapján részletezett kibővített numerikus szimulációt futtattuk le. A modellben a célpont kiszámíthatatlan cikcakkmanővereket végez, miközben a teljes légtérben erős északnyugati szél és egy hirtelen fellépő széllokés terheli az eszközt. A grafikonon ez a szakasz hirtelen törésként vagy irányváltási dudorként jelenik meg a zöld vonalon, amelyet a rakéta a szélzónát elhagyva csillapít le, hogy végül biztosítsa a találatot.

A grafikonon jól láthatók a bevezetett fizikai és harcászati módosítások közvetlen hatásai. Először is a célpont kiszámíthatatlansága (piros szaggatott vonal) egyértelműen mutatja a cikcakkos, hullámzó és kitérő manővereket. A célpont folyamatosan változtatta az irányát, hogy megnehezítse a befogást. Továbbá a (szélterhelés és sodródás) szürke sávval jelzett széllokészónájában (350 és 600 m között) a drónok és a rakéta pályáján egyaránt megfigyelhető az oldalirányú eltolódás. A szél megpróbálta délkeleti irányba elfújni a fegyvert. Végül a zöld vonal íve (intelligens PN-korrekció) mutatja, hogy az arányos navigációs algoritmus sikeresen reagált. Amikor a széllokés és a célpont hirtelen irányváltása együttesen lépett fel, a rakéta vezérlőrendszere agresszív pályamódosítással válaszolt, áttörte a zavaró tényezőket, és a végfázisban pontos közvetlen találatot (X) ért el.



7. ábra: Zavart környezeti szimuláció (manőverező célpont és szélterhelés)

Forrás: a szerzők szerkesztése Python NumPy matematikai szoftverrel lefutott szimuláció alapján

Kvantitatív eredmények

A cikk kvantitatív elemzése rávilágít, hogy az UAV-k fejlesztése 38 éves stratégiai időtávot (2009–2047) ölel fel, amely során a technológia a 7 egymásra épülő fázisból álló autonóm támadási folyamat irányába mozdul el. A hadtörténeti evolúció 4 fő mérföldkövön keresztül (1994, 2013, 2015, 2016) mutatja be a rendszerek fejlődését, amelyben 5 globális szereplő (USA, Izrael, Európa, Oroszország, Kína) verseng egymással. A cikkben vizsgált 6 konkrét dróntípus és projekt közül kiemelkedik az orosz Ray prototípus, amely 2 t-s belső fegyverkabin-kapacitással rendelkezik és 4 különböző típusú irányítható fegyver hordozására alkalmas. Ez a strukturális elmozdulás a korábbi, korlátozott hatékonyságú „egy operátor – egy gép” modelltől a mesterséges intelligencia által vezérelt, külvilági beavatkozás nélküli, tömeges rajtámadások felé mutat.

Összefoglalás

Jelen kutatás a nagy sebességű pilóta nélküli légi járművek rajirányítását és vezérlését vizsgálja összetett légiharc környezetben, például a rakétahordozóban. Bemutattuk a hagyományos irányító- és vezérlőrendszer elválasztási tervezési elgondolását, elemeztük a tipikus rajtámadás-irányítási és vezérlési módszereket, és megadtuk a hagyományos tervezési módszerek korlátait, amelyek súlyosan akadályozzák a rakéták precíziós csapásmérő képességét és harci hatékonyságát. A cikkben vizsgáltuk az integrált vezérlési és irányítástervezés előnyeit a hagyományos tervezési elképzelésekkel

szemben, és összefoglaltuk az általánosan használt integrált vezérlési és irányítástervezési módszereket és azok alkalmazásait. Feltártuk az integrált vezérlő- és irányítórendszerhez megfelelő rajkooperatív támadási stratégiákat, ismertettük a rakétahordozók irányításának és vezérlésének kihívásait, és részleteztük azokat a problémákat, amelyek a jövőben további kutatásra érdemesek. Végül rajirányítási és rakétavezérlési numerikus szimulációkat futtattunk le és elemeztük azokat. A jelenlegi háborús helyzet, valamint a drónok széles körű alkalmazása miatt, a fentebb taglalt rendszerek tervezése, a kooperatív intelligens integrált irányítás és vezérlés lehet e széles körű téma következő kutatási gócpontja.

Felhasznált irodalom

- DANIAL, Syed Nasir et al. (2019): Situation Awareness Modeling for Emergency Management on Offshore Platforms. *Human-centric Computing and Information Sciences*, 9(37), 1–26. Online: <https://doi.org/10.1186/s13673-019-0199-0>
- FU, Zhenhua et al. (2020): Integrated Guidance and Control with Input Saturation and Impact Angle Constraint. *Discrete Dynamics in Nature and Society*. Online: <https://doi.org/10.1155/2020/5917983>
- GU, Wenjin – ZHAO, Hongchao – ZHANG, Ruchuan (2008): A Three-Dimensional Proportional Guidance Law Based on RBF Neural Network. *Proceedings of the 7th World Congress on Intelligent Control And Automation, Chongqing, China*, 6978–6982. Online: <https://doi.org/10.1109/wcica.2008.4593997>
- HONG, Toan Dinh et al. (2017): Active Disturbance Rejection Control Design for Integrated Guidance and Control Missile Based SMC and Extended State Observer. *Proceedings of the 2017 International Conference on System Science and Engineering, Ho Chi Minh City, Vietnam*, 476–481. Online: <https://doi.org/10.1109/ICSSE.2017.8030920>
- HOU, Mingzhe – LIANG, Xiaoling – DUAN, Guangren (2013): Adaptive Block Dynamic Surface Control for Integrated Missile Guidance and Autopilot. *Chinese Journal of Aeronautics*, 26(3), 741–750. Online: <https://doi.org/10.1016/j.cja.2013.04.035>
- HUANG, Hanqiao et al. (2022): Intelligent Guidance and Control Methods for Missile Swarm. *Computational Intelligence and Neuroscience*. Online: <https://doi.org/10.1155/2022/8235148>
- HUO, Ran et al. (2017): Integrated Guidance and Control Based On High-Order Sliding Mode Method. *Proceedings Of the 36th Chinese Control Conference, Dalian, China*, 6073–6078. Online: <https://doi.org/10.23919/chicc.2017.8028323>
- JIAN, Chen et al. (2016): Integrated Guidance and Control Design Based on a Reference Model. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 14(5), 1299–1308. Online: <https://doi.org/10.1007/s12555-015-0048-5>
- KUCHAR, James K. – YANG, Lee C. (2000): A Review of Conflict Detection and Resolution Modeling Methods. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 1(4), 179–189. Online: <https://doi.org/10.1109/6979.898217>

- LEVY, Mital – SHIMA, Tal – GUTMAN, Shaul (2013): Linear Quadratic Integrated versus Separated Autopilot-Guidance Design. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 36(6), 1722–1730. Online: <https://doi.org/10.2514/1.61363>
- LI, Rui – MA, Hongzhong (2020): Research on UAV Swarm Cooperative Reconnaissance and Combat Technology. *Proceedings of the 2020 3rd International Conference on Unmanned Systems (ICUS), Harbin, China*, 996–999. Online: <https://doi.org/10.1109/icus50048.2020.9274902>
- LIN, Ching Fang et al. (1998): Optimal Design of Integrated Missile Guidance and Control. *Proceedings of the World Aviation Conference*, 1–13. Online: <https://doi.org/10.2514/6.1998-5519>
- MALIK, Zishan et al. (2021): Cooperative Guidance Scheme for Flight of Multiple Combat Uavs Against a Non-Accelerating Moving Target. *Proceedings of the 2021 International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technologies (IBCAST)*. Islamabad. Online: <https://doi.org/10.1109/ibcast51254.2021.9393309>
- MENON, P. – OHLMEYER, Ernest J. (2001): Nonlinear Integrated Guidance-Control Laws for Homing Missiles. *Proceedings of the AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, Montreal, Canada*, 1–9. Online: <https://doi.org/10.2514/6.2001-4160>
- MORGAN, Robert Wes – THARP, Hal – VINCENT, Thomas L. (2011): Minimum Energy Guidance for Aerodynamically Controlled Missiles. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 56(9), 2026–2037. Online: <https://doi.org/10.1109/tac.2011.2108619>
- NOBAHARI, Hadi – NASROLLAHI, Saeed (2020): A Nonlinear Robust Model Predictive Differential Game Guidance Algorithm Based on the Particle Swarm Optimization. *Journal of the Franklin Institute*, 357(15), 11042–11071. Online: <https://doi.org/10.1016/j.jfranklin.2020.08.032>
- SHARMA, Manu – RICHARDS, Nathan (2004): Adaptive Integrated Guidance and Control for Missile Interceptors. *Proceedings of AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, Rhode Island*, 1–15. Online: <https://doi.org/10.2514/6.2004-4880>
- SHIMA, Tal – IDAN, Moshe – GOLAN, Oded M. (2006): Sliding-Mode Control for Integrated Missile Autopilot-Guidance. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 29(2), 250–260. Online: <https://doi.org/10.2514/1.14951>
- SHIN, Heemin (2018): An Autonomous Aerial Combat Framework for Two-On-Two Engagements Based on Basic Fighter Maneuvers. *Aerospace Science and Technology*, 72, 305–315. Online: <https://doi.org/10.1016/j.ast.2017.11.014>
- WILLIAMS, Douglas – RICHMAN, Jack – FRIEDLAND, Bernard (1983): Design of an Integrated Strapdown Guidance and Control System for a Tactical Missile. *Proceedings of Guidance and Control Conference, Gatlinburg, TN, USA*, 57–66. Online: <https://doi.org/10.2514/6.1983-2169>
- YANG, Biao et al. (2013): Self-Adaptive PID Controller of Microwave Drying Rotary Device Tuning On-Line by Genetic Algorithms. *Journal of Central South University*, 20, 2685–2692. Online: <https://doi.org/10.1007/s11771-013-1784-4>
- YU, Wenwu et al. (2013): Distributed Control Gains Design for Consensus in Multi-Agent Systems with Second-Order Nonlinear Dynamics. *Automatica*, 49(7), 2107–2115. Online: <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2013.03.005>

- YUEH, William R. – LIN, Ching F. (1984): Optimal Controller for Homing Missile. *Proceedings of the American Control Conference, San Diego, CA, USA*, 737–742. Online: <https://doi.org/10.23919/ACC.1984.4788473>
- ZHANG, Qirui – WEI, Ruixuan (2019): Ground Attack Strategy of Cooperative UAVs for Multitargets. *Complexity*. Online: <https://doi.org/10.1155/2019/9428087>
- ZHANG, Xue et al. (2020): Nonlinear Distributed Model Predictive Control for Multiple Missiles Against Maneuvering Target with a Trajectory Predictor. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 25, 779–789. Online: <https://doi.org/10.1007/s12204-020-2233-9>
- ZHANG, Yu – CHEN, Jing – SHEN, Lincheng (2013): Real-Time Trajectory Planning for UAV Air-To-Surface Attack Using Inverse Dynamics Optimization Method and Receding Horizon Control. *Chinese Journal of Aeronautics*, 26(4), 1038–1056. Online: <https://doi.org/10.1016/j.cja.2013.04.040>
- ZHANYUAN, Jiang et al. (2021): A Modified Proportional Navigation Guidance Law for Impact Time Control. *Proceedings of the 2021 6th International Conference on Automation, Control and Robotics Engineering (CACRE), Dalian, China*, 239–248. Online: <https://doi.org/10.1109/cacre52464.2021.9501293>
- ZHAO, Jinlong – ZHOU, Jun (2016): Receding Horizon Integrated Guidance and Control for Interceptors Based on Gauss Pseudospectral Method. *Proceedings of the 2016 IEEE Chinese Guidance, Navigation and Control Conference, Nanjing, China*, 1270–1275. Online: <https://doi.org/10.1109/CGNCC.2016.7828971>
- ZHOU, Huan et al. (2015): Robust Integrated Guidance and Control Design Method for UAV Based on Trajectory Linearization Control. *Proceedings of the 15th International Conference on Control, Automation and Systems, Busan, Korea (South)*, 1030–1035. Online: <https://doi.org/10.1109/ICCAS.2015.7364797>
- ZHOU, Kai et al. (2020): An Air Combat Decision Learning System Based on a Brain-Like Cognitive Mechanism. *Cognitive Computation*, 12(4), 128–139. Online: <https://doi.org/10.1007/s12559-019-09683-7>
- ZHU, Guodong – SHEN, Zuojun (2015): Three Dimensional Trajectory Linearization Control for Flight of Air-Breathing Hypersonic Vehicle. *Procedia Engineering*, 99, 1108–1119. Online: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.646>
- ZHU, Weiren – DUAN, Haibin (2013): Chaotic Predator-Prey Biogeography-Based Optimization Approach for UAV Path Planning. *Aerospace Science and Technology*, 32(1), 153–161. Online: <https://doi.org/10.1016/J.AST.2013.11.003>