

Szabolcsi Róbert

Pilóta nélküli légi járművek kooperatív irányítása

Az autonóm járművek, így többek között a pilóta nélküli légi járművek (UAV) irányításának egyik fontos területe a járművek kooperatív irányítása. A kooperatív irányítás során megvalósítandó célkitűzés a járművek mozgásának összehangolása egy előre megadott közös, globális cél megvalósítása érdekében. Ilyen cél lehet például az UAV eljuttatása megadott időben egy előre megadott helyre (például légi utántöltés, légi kötelék kialakítása, eljutás a megfigyelési helyre, eljutás a felderítés helyére, eljutás a harci bevetés helyére, eljutás megadott határszakaszra stb.). A szerző célja bemutatni néhány lehetséges UAV bevetési forgatókönyvet és repülési feladatot, és az ezeket megvalósító irányításokat és irányítási rendszerek alapkonceptióit.

Kulcsszavak: UAV, UAS, UGV, USV, autonóm jármű, kooperatív irányítás, légi utántöltés

1. Bevezetés, motiváció, problémafelvetés

A modern kor egyik fontos vívmánya az autonóm jármű. Az autonóm járművek képességei is meglehetősen széles palettán helyezkednek el. Autonóm járműnek tekinthetjük a vezeték nélküli porszívót, a vezeték nélküli kerti fűnyírót, a gyártósorok között alkatrészeket és termékeket szállító logisztikai robotokat, de ebbe a körbe tartoznak a légi, valamint a szárazföldi és a (víz)felszíni autonóm járművek is, vagy a víz alatti robotok és egyéb vízfelszín alatti járművek.

A 2022 februárjában kezdődött világpolitikai események hatalmas lökést adnak az autonóm járművek fejlesztésének, főleg a katonai célú UAV/UAS/UCAV/UCAS alkalmazásoknak. Ezen alkalmazások azonban megkövetelik a repülés egyes fázisainak, sőt, adott esetben a teljes UAV/UCAV repülésének automatizálását is. Tekintettel azonban az UAV-k műveleti területen elszenvedett háborús sérüléseire, vagy esetleg az UAV elvesztésének lehetőségére, az UAV-/UAS-rendszerek tervezői olyan műszaki megoldásokra törekcsenek, amelyek megvalósítása minimális költséggel jár, így az UAV elvesztése esetén a veszteség minimalizálható.

Számos esetben szükséges a légi járművek kooperatív irányítása, hiszen számos repülési feladat megoldásához elengedhetetlen az együttműködés a repülési feladat végrehajtásában részt vevő aktorok között. Ilyen repülési feladat lehet például a légi utántöltés, a több UAV-val végrehajtott felderítés/térképezés, vagy az UCAV-ok repülési kötelékbe szervezése harci bevetések előtt, ami alapvető fontosságú a repülési feladatok végrehajtása során.

A repülési feladatok megoldása során olyan megoldásokra törekszünk, amelyek valamilyen értelemben optimálisnak tekinthetők, a lehető legrövidebb időn belül, a lehető legnagyobb hatékonysággal és a legkisebb energiabefektetéssel járnak.

A szerző célja bemutatni néhány repülési forgatókönyvet, amikor a szabályozási cél elérése, valamint a legjobb hatékonyság és a legmagasabb szintű repülésbiztonság elérése érdekében szükséges az UAV-k kooperatív irányítása.

2. Szakirodalmi áttekintés

Légi járművek automatikus repülésszabályozásának sarokpontja a légi jármű térbeli mozgása identifikált/mért modelljének ismerete. Űrjárművek mozgásszabályozásával az [1] és a [17] irodalom foglalkozik, míg a hagyományos légi járművek mozgásának modellezésével és a légi járművek automatikus repülésszabályozásával a [2], [8], [9], [12], [16] irodalmak foglalkoznak behatóan, és vizsgálják az automatikus repülésszabályozási rendszerek előzetes tervezésének és vizsgálatának kérdéseit.

Megemlítjük, hogy a légi járművek klasszikus automatikus repülésszabályozása nem foglalkozik a kooperatív irányítás kihívásaival. Az automatikus repülésszabályozás az egyedi légi járművek térbeli mozgásának irányítását helyezi középpontba, amelynek fontosabb területei az értéktartó és értékkövető szabályozási rendszerek tervezése, az alapjelkövetési tulajdonságok vizsgálata, a külső és belső szenzorajok káros következményeinek szűrése, a stabilitás és a minőségi jellemzők teljesülésének vizsgálata, optimális irányítások, időben változó, paraméterbizonytalanságokkal terhelt nemlineáris, dinamikus rendszerek tervezése.

Az utóbbi években rohamléptekben fejlődött a pilóta nélküli légi járművek (UAV-k) automatikus repülésszabályozása. Egyrészt, számos ország szabályozása már régóta előírja az UAV fedélzeti robotpilóta használatát, hogy a robotpilóták a veszélyes repülési üzemmódok (például kényszerleszállás, automatikus hazatérés, hajtóműleállás, jegesedés stb.) automatizált végrehajtásával javítsák az UAV-repülések repülésbiztonságát.

Másrészt, ma már számos gyártó kínál kis méretű és kis energiaigényű szabályozókat/vezérlőket (például Arduino Uno, ArduPilot, Paparazzi, MP2028, Autopilot 1x, PX4, Pixhawk, V5+, Intel Falcon 8+ stb.), amelyek az UAV fedélzetén könnyen beépíthetők.

Napjaink egyik legfontosabb kihívása az UAV-k kötelék- vagy együttes precíziós repülésének összeütközés-mentes automatizálása. E témakörrel a [3], [5], [6], [7], [10], [11], [14], [15], [18], [20] irodalmak foglalkoznak behatóan.

A nagy méretű, fosszilis energiával működő HALE UAV-k (RQ-4 Global Hawk, MQ-1 Predator, MQ-9 Reaper, Heron, RQ-7 Shadow, TB2 Bayraktar stb.) hatósugara növelésének egyik lehetséges módja az UAV-k légi utántölthetőségének megoldása, amelynek esetleges automatizálását a [3], [15] és a [19] irodalmak tárgyalják és mutatják be részletesen.

Végül az UAV-k kooperatív irányítását a [4], [5], [6], [14] irodalmak foglalják össze, és mutatják be. A szabályozásoknak az alacsonyabb (rendszerdinamika egyszerűsítése, a minőségi jellemzők megfelelő beállítás, a stabilitás biztosítása stb.) és a magasabb szintjein megvalósuló kooperatív irányítás (optimális repülési pálya tervezése, UAV-k kötelékbe szerveződése, összeütközés elkerülése UAV–UAV és UAV – nem UAV viszonylatban stb.) egyes komponenseit.

3. A kooperatív irányításról általában

A kooperatív járműirányítás az autonóm járművek irányításának azon területe, amikor a vezető nélküli járművek (például légi jármű [UAV], felszíni jármű [UG], vízfelszíni jármű [USV] stb.)

összetett feladataik megoldása során az irányításban a saját képességeiken messze túlmutató képességekre tesznek szert.

A kooperatív irányítás javíthatja az egyes feladatok végrehajtásának hatékonyságát, és feladat-végrehajtás során növelheti a biztonságot is, mivel képes kezelni az összeütközés elkerülésének kérdéseit és megoldásának kihívásait is.

A kooperatív irányítás területén nagyszámú és egyben különféle irányítástervezési feladattal is találkozhatunk, amelyek közül néhányat, bár törekedve a teljességre, de azt el nem érve, most megemlíttünk:

- kooperatív irányítás UAV–UAV-viszonylatban:
 - UAV-formáció (alakzat, kötelék) létrehozása vagy bontása különféle (térképezés, felderítés, harcászati alkalmazások, precíziós mezőgazdaság stb.) céllal [4], [5], [6], [18], [20];
 - UAV kivezetése egy előre megadott találkozási pontba;
 - UAV légi utántöltésének irányítása [3], [15], [19];
- kooperatív irányítás UAV–USV-viszonylatban:
 - UAV leszállítása álló vagy mozgó vízfelszíni járműveken [11];
- kooperatív irányítás UAV–UGV-viszonylatban:
 - UAV leszállása álló vagy mozgó platformra [11];
 - UAV álló vagy mozgó UGV-ről való utántöltésének irányítása [13].

A fenti felsorolás természetesen csak egy kis szeletét mutatja be a kooperatív járműirányítás lehetséges területeinek, és kifejezetten az UAV-k kooperatív irányítására helyezi a figyelmet. Mindazonáltal a felszíni közlekedésben (OTTO Truck, Volvo Truck) és az iparban (KUKA omni-Move Universal Transport Vehicle), vagy akár a precíziós mezőgazdaságban (John Deere Fully Autonomous Tractor, CHN Autonomous Tractor, CASE IH Autonomous Tractor stb.) egyre szélesebb körben terjed el a kooperatív irányítás.

Ily módon a közlekedésben és az egyéb feladatok végrehajtása során a részt vevő aktorok a leginkább hatékony és biztonságos megoldások elérése érdekében a megfelelő, előre megadott módon együttműködnek, más szóval, kooperálnak.

4. Az UAV–UAV-rendszer kooperatív irányítása

A pilóta nélküli légi járműveket széles körben alkalmazzák az állami (katonai, katasztrófaelhárítási, tűzoltási, határvédelmi, egészségügyi stb.) és a nem állami (magán) célú repülések területein (precíziós mezőgazdaság, vagyonvédelem, szabadidős alkalmazások, áruszállítás, filmipar, média stb.).

Napjainkban az UAV-k széles körű alkalmazását gátló akadályok (például jogi szabályozási kérdések, a légtérhasználat kérdései, a repülésbiztonság kérdései, az UAV-k típus- és légi alkalmassága tanúsításának kérdései, az UAV-k földi és légi üzemeltetésének kérdései stb.) folyamatosan szűnnek meg. Ily módon, az UAV-k repülésének tervezése során ma már egyre kevesebb korlátba ütközünk.

Az UAV-k alkalmazása során számos olyan speciális esettel találkozunk, amikor a hagyományos repülésről alkotott korábbi elképzeléseinken túllépve, nem a korábbi és nem a szokásos módon alkalmazzuk az UAV-kat. Eme alkalmazásokra álljon itt néhány példa:

- alapértelmezetten egy repülésre tervezett légi cél UAV-k (drónok), amelyeket kiképzési céllal használnak a földi légvédelemben (például Meteor-3, Meteor-3MA stb.);
- COTS_EC (*Commercial-off-the-Shelves_Extra Cheap*) kereskedelmi forgalomban széles körben hozzáférhető, nagyon olcsó, jórészt felderítési célra használt UAV-k, amelyek esetleges elvesztése nem jár nagyobb, számottevő anyagi kárral és egyéb veszteséggel. Ezen UAV-kat gyakran csak egy-egy bevetési feladatra alkalmazzák (Black Hornet Nano, Aeryon Scout stb.);
- egyszeri repülésre tervezett kamikaze drónok (például ZALA KYB UAV, IAI Harop, UVision Hero-30, IAI Harpy, Harop, Green Dragon, Rotem, Lancet-3, ST-35 stb.), amelyek felszíni célok (ellenséges statikus célpontok, mozgó járművek és személyek) keresése és megsemmisítése során cirkáló repülő töltetként hajtanak végre repülést, és a lehetséges célok autonóm, főleg mesterséges intelligenciára épülő azonosítása után becsapódnak a célba.

A következő fejezetekben olyan UAV repülési forgatókönyvekkel foglalkozunk, amelyek ma a legnagyobb érdeklődésre tartanak számot.

4.1. Az UAV légi utántöltése – a kooperatív irányítási probléma megfogalmazása

Az UAV-k légi utántölthetősége már régen foglalkoztatja a szakembereket. Az autonóm légi utántöltés lényeges mértékben terjesztheti ki még a HALE UAV-k alkalmazásának határait is.

A pilóta nélküli repülőgépek alkalmazásának egyik nagyon fontos sarokköve, és a repülési tartomány, valamint a repülési idő meghatározása szempontjából is kiemelkedő fontosságú a fedélzeten tárolható fosszilis vagy a repülés során a környezetből nyerhető villamos energia mennyisége (például Airbus QinetiQ Zephyr 8, NASA Pathfinder, AeroVironment Helios stb.).

Könnyű belátni, hogy a légi utántölthetőség nagymértékben javíthatja a fosszilis hajtóanyagra épülő hajtóművel rendelkező UAV-k alkalmazásának hatékonyságát, főleg olyan repülések esetében, amikor nem tudjuk előre pontosan megtervezni a repülést, mert egy-egy adott repülési feladat végrehajtása során újabb ad hoc végrehajtandó feladatok mellett döntenek a bevetés irányítói.

Az UAV-k légi utántöltésének kérdéseivel elsők között már J. L. Stephenson korai munkája is foglalkozott, amely az MQ-1 Predator harcászati UCAV repülőgép KC-135 tanker repülőgépről való légi utántöltésének irányítási kérdéseit is taglalja [15].

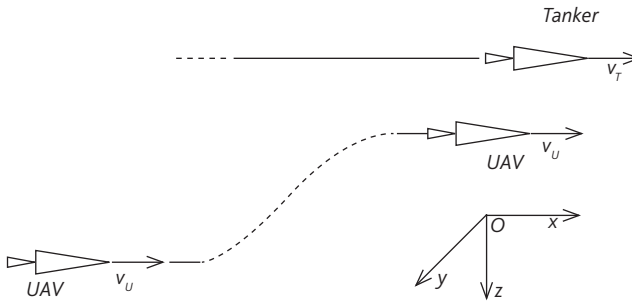
Az UAV-k légi utántöltésének történeti előzményeit a [19] irodalom mutatta be, amely főleg az RQ-4 Global Hawk HALE UAV-val folytatott korábbi kísérletek eredményeit tárgyalta, majd a szerzők kis méretű SUAV-k légi utántöltésének lehetséges rendszereit mutatták be SUAV–SUAV-viszonylatban. A szerzők által javasolt dokkolási technikák alapját a nagy felbontású kamerák és az infravörös markerek képezték.

UAV-k autonóm légi utántöltésének problémáját a [3] irodalom mutatja be részletesen. Ismeretes, hogy az UAV-k légi utántöltésének folyamata az alábbi három alapvető repülési fázisra bontható:

1. az UAV kivezetése annak tetszőleges előzetes repülési helyzetéből a tankerrepülőgép-hez az utántöltésre kijelölt biztonságos légtérbe;

2. dokkolás az utántöltő repülőgépen: az üzemanyagtöltő cső végén elhelyezett kosárba találás a saját töltőcsonkkal;
3. zárt kötelékrepülés a tankerrepülőgéppel együtt az utántöltés teljes ideje alatt.

Az UAV autonóm légi utántöltését vizsgáljuk az 1. ábrán. Mint az 1. ábrán is jól látható, a repülés kinematikai leírását NED-tájolású (North-East-Down) referenciarendszerben végezzük el [1], [2], [8], [9], [12], [16], [17].

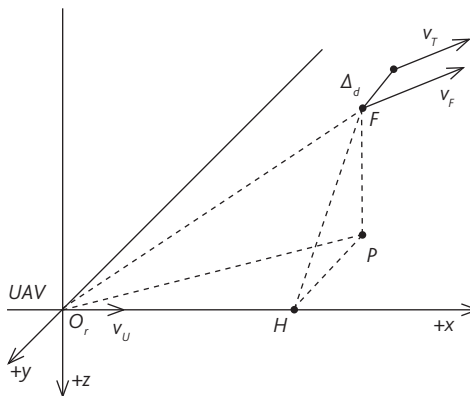


1. ábra

Az UAV és a tankerrepülőgép találkozásának folyamata [saját szerkesztés]

Az UAV légi utántöltése meglehetősen összetett folyamatának most csak azon részével foglalkozunk, amikor az UAV-t tetszőleges repülési helyzetből a tankergép közelébe visszük ki, és az UAV megkezdi a tankergép közelében a kötelékrepülést.

Általános esetben, a megközelítési manőver végén, amikor az UAV és a tankerrepülőgép belép a „kötelékrepülés” fázisába, az UAV térbeli mozgásának \mathbf{v}_U sebességvektora és az O_rxy a vízszintes sík lehet nem párhuzamos (2. ábra) vagy párhuzamos is (4. ábra). A légi utántöltés folyamatát vizsgáljuk a földhöz rögzített O_rxyz referencia-koordinátarendszerben (2. ábra) [1], [2], [8], [9], [12], [16].



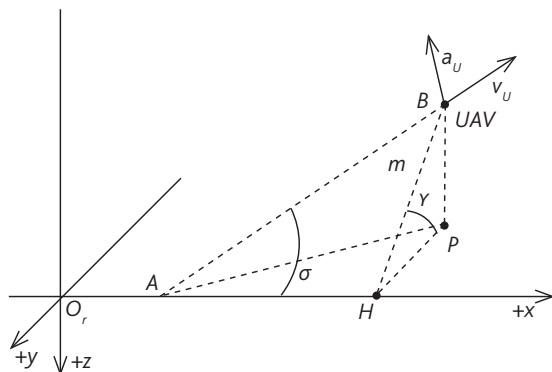
2. ábra

UAV nem vízszintes repülési helyzetben [saját szerkesztés]

Kezdeti állapotban (2. ábra) az UAV tömegközéppontja az O_r pontban helyezkedik el, és a \mathbf{v}_U sebességvektora egybeesik az $O_r x$ tengellyel, illetve a $O_r xy$ vízszintes síkban fekszik. Az $O_r z$ tengely pozitív féltengelye a föld középpontja felé mutat, míg a $O_r y$ tengely jobbsodrásúvá egészíti a koordináta-rendszert. Az $O_r xy$ a vízszintes sík, míg $O_r xz$ a függőleges sík.

A 2. ábrán az F pont az UAV azon helyzetét reprezentálja, amikor megközelítette a tanker UAV-t, és elkezdte vele a kötelékrepülést, míg P az F pont merőleges vetülete a $O_r xy$ vízszintes síkra. Végezetül, H a P pont merőleges vetülete az $O_r x$ tengelyre.

A 3. ábra az UAV F pont felé történő irányításának egy köztes pillanatát mutatja be. Az m sík (az AHB háromszög felülete) az a felület, amellyel az UAV \mathbf{v}_U sebessége párhuzamos. A γ szög az m sík és az $O_r xy$ vízszintes sík által bezárt szög, míg σ a \mathbf{v}_U sebességvektor és az $O_r x$ tengely által bezárt szög az $O_r xz$ függőleges síkban.



3. ábra
Az UAV irányítása az F pont felé [saját szerkesztés]

Az UAV térbeli helyzete a $\mathbf{P}_U = [x_U \ y_U \ z_U]^T$ helyvektorral, míg a sebességvektora a $\mathbf{v}_U = [v_U \ x v_U \ y v_U \ z]^T$ vektorral adható meg.

A 3. ábrán bemutatott kinematikai elrendezés segítségével az UAV térbeli mozgása most a következő nemlineáris mozgásegyenletekkel írható le [3]:

$$\left. \begin{aligned} v_{U_x} &= \dot{x}_U = v_U \cos \sigma \\ v_{U_y} &= \dot{y}_U = v_U \sin \sigma \cos \gamma \\ v_{U_z} &= \dot{z}_U = v_U \sin \sigma \sin \gamma \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ahol

$$v_U = \sqrt{v_{U_x}^2 + v_{U_y}^2 + v_{U_z}^2} \quad (2)$$

Felhasználva a 2. ábrát, az UAV megközelítő manővere során a következő egyenleteket írhatjuk fel:

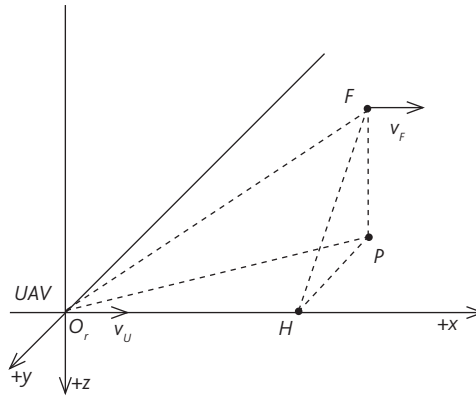
$$\mathbf{P}_F = \mathbf{P}_T - \Delta \mathbf{d} = [x_F \ y_F \ z_F]^T \quad (3)$$

$$\mathbf{v}_F = \mathbf{v}_T = [v_{F_x} \quad v_{F_y} \quad v_{F_z}]^T \quad (4)$$

ahol \mathbf{P}_T a tanker légi jármű helyvektora, míg \mathbf{v}_T a tankerrepülőgép sebességvektora. Ismeretes, hogy az F pont sebességvektora a következő alakban is felírható:

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_F &= v_{F_x} \\ \dot{y}_F &= v_{F_y} \\ \dot{z}_F &= v_{F_z} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Tekintettel arra, hogy az UAV vízszintes repülése (4. ábra) tekinthető az általános nem vízszintes repülés (2. ábra) egyik speciális esetének, ezért a továbbiakban csak a nem vízszintes UAV-repülés feltételeit taglaljuk.



4. ábra
UAV vízszintes repülési helyzetben [saját szerkesztés]

Az UAV kivezetése a tanker légi jármű közelébe a manőver kezdetétől addig az időpontig tart, amikor is az UAV tömegközéppontja és az F pont között mért távolság kisebb, mint egy előre megadott, kellően kis értékű ε , vagyis

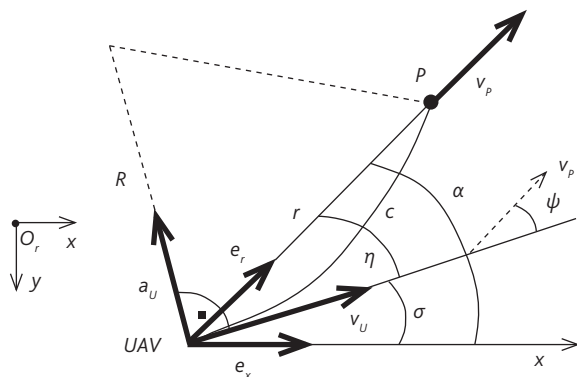
$$\Delta d = \sqrt{\Delta d_x^2 + \Delta d_y^2 + \Delta d_z^2} \leq \varepsilon \quad (6)$$

és ebben az időpillanatban elkezdődhet az UAV és a tanker légi jármű kötelékrepülése. Ha a \mathbf{v}_U és a \mathbf{v}_F sebességvektorok egymással nem párhuzamosak, akkor az UAV távoli rávezetése a tanker légi járműre két repülési fázisra bontható. Az első a korrekciós repülési fázis, míg a másik a közeli rávezetés repülési fázisa.

A korrekciós repülési fázisban arra törekszünk, hogy az UAV \mathbf{v}_U repülési sebessége és az O_r, xy a vízszintes sík egymással párhuzamos helyzetbe kerüljenek, és megvalósuljon az UAV vízszintes repülése (4. ábra). A továbbiakban vizsgáljuk meg az UAV irányításának kinematikáját a vízszintes síkban (5. ábra).

Ismeretes, hogy az UAV az $\mathbf{P}_U(t_0)$ kezdeti helyzetéből a \mathbf{P}_P helyre végtelen nagyszámú lehetséges pályán is haladhat. Az UAV irányítási feladatának megoldása során a továbbiakban feltételezzük, hogy az UAV a P kezdeti állapotból (a manőver elkezdésének időpillanatától) a végállapotba egy R sugarú kör c körvén kerül, így tehát az UAV körmozgása során igaz, hogy $\mathbf{v}_U \perp \mathbf{a}_U$.

Az 5. ábrán az alábbi jelöléseket alkalmaztuk: r az UAV és a P pont közötti \mathbf{r} helyvektor abszolút értéke; α a látószög; η az előre tartási szög; \mathbf{v}_P a P pont O_rxy a vízszintes sík síkra vett vetületének sebessége; ψ az UAV \mathbf{v}_U sebessége és a \mathbf{v}_P sebességek közötti szög; \mathbf{e}_x az $O_r x$ tengely egységvektora; \mathbf{e}_r az UAV-P irány egységvektora.



5. ábra

Az UAV rávetetésének geometriája [saját szerkesztés]

Az UAV korrekciós repülési szakaszán az UAV térbeli helyzetét irányíthatjuk az \mathbf{a}_U gyorsulás segítségével is. A korrekciós irányítás bármely időpillanatra igaz, hogy:

$$\dot{\sigma} = \frac{v_U}{R} \quad (7)$$

ahol

$$R = \frac{r}{2 \sin \eta}; \quad \eta = \alpha - \sigma; \quad \alpha = \arccos \frac{\mathbf{e}_x \mathbf{e}_r}{|\mathbf{e}_x| |\mathbf{e}_r|} \quad (8)$$

Korábban ismeretes, hogy az UAV körpályán mozog, így módon igaz, hogy

$$\mathbf{a}_U = \frac{v_U^2}{R} \quad (9)$$

Az UAV-t a $\mathbf{P}_U(t_0)$ kezdeti állapotából a \mathbf{P}_P állapotba átvivő korrekciós (nagybani, durva), nagy távolságról végrehajtott irányítás kezdeti feltételei legyenek most az alábbiak [3]:

- az UAV kezdeti térbeli helyzetének definiálása a $t_0 = 0$ időpillanatra:

$$\mathbf{P}_U(t_0) = [x_U(t_0) \quad y_U(t_0) \quad z_U(t_0)]^T = [0 \quad 0 \quad 0]^T \quad (10)$$

- az UAV kezdeti repülési sebessége a $t_o = 0$ időpillanatra:

$$\mathbf{v}_U(t_o) = [v_{U_x}(t_o) \quad v_{U_y}(t_o) \quad v_{U_z}(t_o)]^T = [v_U \quad 0 \quad 0]^T \quad (11)$$

- a P pont kezdeti térbeli helyzetének definiálása a $t_o = 0$ időpillanatra:

$$\mathbf{P}_P(t_o) = [x_P(t_o) \quad y_P(t_o) \quad z_P(t_o)]^T = [x_P \quad y_P \quad 0]^T \quad (12)$$

- a P pont kezdeti repülési sebessége a $t_o = 0$ időpillanatra:

$$\mathbf{v}_P(t_o) = [v_{P_x}(t_o) \quad v_{P_y}(t_o) \quad v_{P_z}(t_o)]^T = [v_{P_x} \quad v_{P_y} \quad v_{P_z}]^T \quad (13)$$

- az UAV σ szöge a $t_o = 0$ időpillanatra:

$$\sigma(t_o) = 0 \quad (14)$$

- az UAV és a P pont közötti relatív helyvektor:

$$\mathbf{r}(t_o) = \mathbf{P}_P(t_o) - \mathbf{P}_U(t_o) \quad (15)$$

- az UAV és a P pont közötti relatív távolság:

$$r(t_o) = |\mathbf{r}(t_o)| \quad (16)$$

Az α látószög:

$$\alpha = \arccos \frac{\mathbf{e}_x \mathbf{r}(t_o)}{|\mathbf{e}_x| |\mathbf{r}(t_o)|} \quad (17)$$

Az η előre tartási szög:

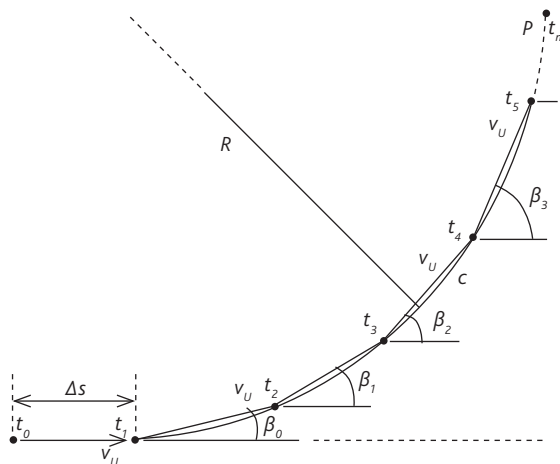
$$\eta(t_o) = \alpha(t_o) - \sigma(t_o) \quad (18)$$

A korrekciós repülési fázis normál gyorsulásának értéke:

$$a_U(t_o) = \frac{v_U^2}{R(t_o)} = 2v_U^2 \frac{\sin \eta(t_o)}{r(t_o)} \quad (19)$$

Az UAV távoli rávezetése során az irányított repülési paraméter az \mathbf{a}_U normál gyorsulás. Korábban ismeretes, hogy az UAV rávezetésének első repülési fázisában az UAV tömegközéppontja egy R sugarú kör c körívén mozog, és a \mathbf{v}_U sebességvektor minden időpillanatban a c körív egyes húrjaival párhuzamos.

A körívén való mozgás felfogható úgy is, hogy nagyszámú pontot veszünk fel a körívén, és a körívet az egyes pontokat összekötő húrokkal helyettesítjük. Ily módon, a c körív bármely két pontja között az UAV tömegközéppontja egyenes vonalú pályaszakaszokon mozog (6. ábra).



6. ábra
Az UAV mozgása a köríven [saját szerkesztés]

Könnyű belátni, hogy minél nagyobb számban veszünk fel a köríven diszkrét pontokat, térbeli pozíciókat, annál jobban közelítjük a körív geometriáját, ez viszont azt jelenti, hogy több alkalommal kell az UAV egyenes vonalú pályamozgását változtatni, ami bonyolultabbá és energiaigényesebbé teszi az UAV rávezetését a tankerrepülőgépre.

A c körívet szakaszonként lineáris pályaelemekre bontottuk. Minden egyes előző repülési szakasz vége a következő repülési szakaszba való belépést jelenti. A manőver első szakaszában az UAV $\Delta t = t_1 - t_0$ idő alatt Δs utat tesz meg. A $t = t_1$ időpillanatban az UAV β_0 korrekciós szöggel korrigálja a v_U sebességvektorának az irányát.

Megállapíthatjuk tehát, hogy az UAV c körpályája $i = 1, \dots, n$ számú, egymástól független, lineáris pályaszakaszra bontható. Minden egyes repülési fázis előtt iteratív módon, a következő repülési szakaszra újra kell számítani az a_U normál gyorsulásnak és a β korrekciós szögnek az értékeit is. Vizsgáljuk meg e probléma megoldásának lépéseit:

- Legyen

$$i = 1; \quad \gamma = 0 \quad (20)$$

- Számítsuk ki az UAV helyvektorát a $t = t_i$ időre:

$$\mathbf{P}_U(t_i) = [x_U(t_i) \quad y_U(t_i) \quad z_U(t_i)]^T \quad (21)$$

ahol

$$\left. \begin{aligned} x_U(t_i) &= x_U(t_{i-1}) + v_{U_x}(t_{i-1})\Delta t \\ y_U(t_i) &= y_U(t_{i-1}) + v_{U_y}(t_{i-1})\Delta t \\ z_U(t_i) &= z_U(t_{i-1}) + v_{U_z}(t_{i-1})\Delta t \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

- Számítsuk ki a \mathbf{P} helyvektort a $t = t_i$ időre:

$$\mathbf{P}_P(t_i) = [x_P(t_i) \quad y_P(t_i) \quad z_P(t_i)]^T \quad (23)$$

ahol

$$\left. \begin{aligned} x_U(t_i) &= x_U(t_{i-1}) + v_{U_x}(t_{i-1})\Delta t \\ y_U(t_i) &= y_U(t_{i-1}) + v_{U_y}(t_{i-1})\Delta t \\ z_U(t_i) &= z_U(t_{i-1}) + v_{U_z}(t_{i-1})\Delta t \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

- Számítsuk ki a \mathbf{P} helyvektor sebességét a $t = t_i$ időre:

$$\mathbf{v}_P(t_i) = \mathbf{v}_P(t_{i-1}) \quad (25)$$

- Számítsuk ki a \mathbf{P} helyvektor relatív helyzetét az UAV helyzetéhez képest a $t = t_i$ időre:

$$\mathbf{r}(t_i) = \mathbf{P}_P(t_i) - \mathbf{P}_U(t_i) \quad (26)$$

- Számítsuk ki a \mathbf{r} helyvektor abszolút értékét a $t = t_i$ időre:

$$r(t_i) = |\mathbf{r}(t_i)| \quad (27)$$

- Számítsuk ki a α szög értékét a $t = t_i$ időre:

$$\alpha(t_i) = \arccos \frac{e_x \mathbf{r}(t_i)}{|e_x| |\mathbf{r}(t_i)|} \quad (28)$$

- Számítsuk ki a σ szög értékét a $t = t_i$ időre:

$$\sigma(t_i) = \sigma(t_{i-1}) + \Delta\beta(t_{i-1}) \quad (29)$$

- Számítsuk ki az UAV \mathbf{v}_U sebességét a $t = t_i$ időre:

$$\mathbf{v}_U(t_i) = [v_{U_x}(t_i) \quad v_{U_y}(t_i) \quad v_{U_z}(t_i)]^T \quad (30)$$

ahol

$$\left. \begin{aligned} v_{U_x}(t_i) &= \dot{x}_U = v_U \cos \sigma(t_i) \\ v_{U_y}(t_i) &= \dot{y}_U = v_U \sin \sigma(t_i) \\ v_{U_z}(t_i) &= \dot{z}_U = 0 \end{aligned} \right\} \quad (31)$$

- Számítsuk ki az η szög értékét a $t = t_i$ időre:

$$\eta(t_i) = \alpha(t_i) - \sigma(t_i) \quad (32)$$

- Számítsuk ki az a_U normál gyorsulás értékét a $t = t_i$ időre:

$$a_U(t_o) = \frac{v_U^2}{R(t_o)} = 2v_U^2 \frac{\sin\eta(t_o)}{r(t_o)} \quad (33)$$

- Számítsuk ki az UAV sebességvektora β korrekciós szögének értékét a $t = t_i$ időre:

$$\beta(t_i) = \frac{a_U(t_o)}{v_U} \Delta t \quad (34)$$

- Számítsuk ki a v_U és a v_P sebességvektorok (5. ábra) közötti szög értékét a $t = t_i$ időre:

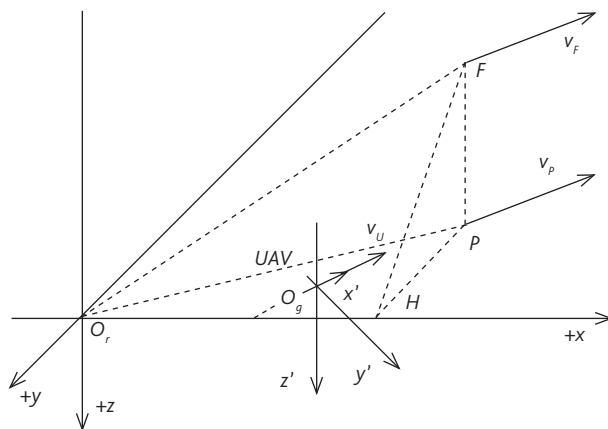
$$\psi(t_i) = \arccos \frac{v_{U(t_i)} v_{P(t_i)}}{|v_{U(t_i)}| |v_{P(t_i)}|} \quad (35)$$

• Ha a $t = t_i$ időre $\psi(t_i)$ értéke kisebb, mint egy előre megadott ε skalárérték (szabályozási pontatlanság, statikus hiba), akkor a számítások befejeződnek. Ha ez a feltétel nem teljesül, akkor a számításokat megismételjük az $i + 1$ értékre is. A számításokat mindaddig végezzük, amíg nem teljesül a

$$\psi(t_i) \leq \varepsilon \quad (36)$$

egyenlőtlenségi feltétel. Ebben a pillanatban az UAV tanker légi járműre való távoli rávezetése befejeződik, és azonnal elkezdődik az UAV közeli rávezetése a tankerrepülőgépre.

Vizsgáljuk ezt a repülési fázist a 7. ábra segítségével.



7. ábra

Az UAV helyzete a távoli rávezetés végén [saját szerkesztés]

Az F pont P_F helyvektorát az alábbi egyenlettel adhatjuk meg:

$$\mathbf{P}_F = [x_F \quad y_F \quad z_F]^T \quad (37)$$

ahol

$$x_F = x_P; \quad y_F = y_P; \quad z_F = z_D \quad (38)$$

és z_D egy előre megadott koordináta/pozíció (repülési magasság).

A F és a P pontok pont sebességvektoraira igaz, hogy:

$$\mathbf{v}_F = \mathbf{v}_P \quad (39)$$

Az UAV irányításának iteratív számításához vizsgáljuk az UAV helyzetét az $O_g x' y' z'$ koordináta-rendszerben, amely az UAV aerodinamikai (szél) mozgó koordináta-rendszere, mivel \mathbf{v}_F és $O_g x'$ egybeesnek. A koordináta-rendszer $O_g z'$ tengelye a helyi függőleges iránya, míg a $O_g y'$ tengely jobbsodrásúvá egészíti ki a koordináta-rendszert.

Az UAV eredeti $O_r xyz$ koordináta-rendszere transzformálható az $O_g x' y' z'$ koordináta-rendszerbe. A transzformációs egyenlet most a következő lesz:

$$\mathbf{P}' = \mathbf{R}_{gr} \mathbf{P} + \mathbf{D} \quad (40)$$

ahol \mathbf{P} egy 3×1 méretű mátrix az $O_r xyz$ koordináta-rendszerben; \mathbf{P}' egy 3×1 méretű, az $O_g x' y' z'$ koordináta-rendszerbe áttranszformált \mathbf{P} mátrix; az \mathbf{R}_{gr} forgatómátrix a következő alakban írható fel [1], [2], [8], [9], [12], [16], [17]:

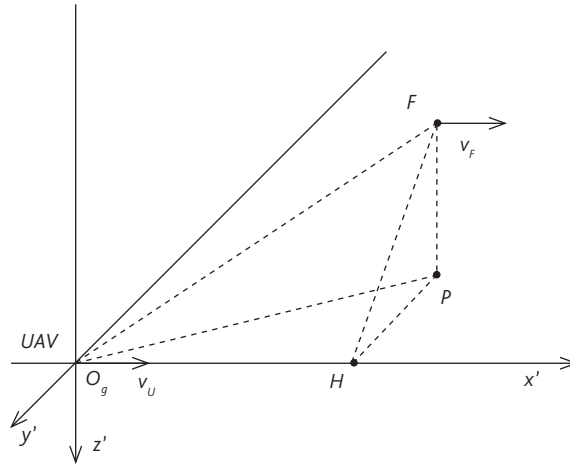
$$\mathbf{R}_{gr} = \begin{bmatrix} \cos \sigma_{rg} & \sin \sigma_{rg} & 0 \\ -\sin \sigma_{rg} & \cos \sigma_{rg} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (41)$$

ahol σ_{rg} a σ szög azon értéke, amelyet az $O_g x' y' z'$ koordináta-rendszer létrehozásakor vett fel. Végezetül a \mathbf{D} elmozdulás-mátrix a következő alakban adható meg:

$$\mathbf{D} = -\mathbf{R}_{gc} \mathbf{P}_{cg} \quad (42)$$

ahol \mathbf{P}_{cg} az O_g helyzete az $O_r xyz$ koordináta-rendszerben.

Az UAV új helyzetét a 8. ábra mutatja be.



8. ábra

Az UAV pillanatnyi helyzete a távoli rávezetés során [saját szerkesztés]

Az UAV sebességvektora az új helyzetben a következő összefüggés alapján számítható:

$$\mathbf{v}'_U = \mathbf{R}_{gc} \mathbf{v}_U \quad (43)$$

Az F pont helyvektora az új, $O_g x' y' z'$ koordináta-rendszerben a következő egyenlet segítségével számítható:

$$\mathbf{P}'_F = \mathbf{R}_{gr} \mathbf{P}_F + \mathbf{D} = [x'_F \quad y'_F \quad z'_F]^T \quad (44)$$

Végezetül, a F pont sebességvektora- az új, $O_g x' y' z'$ koordináta-rendszerben a következő összefüggés szerint határozható meg:

$$\mathbf{v}'_F = \mathbf{R}_{gc} \mathbf{v}_F \quad (45)$$

Az UAV térbeli mozgásának utolsó fázisa az utántöltéshez elengedhetetlenül szükséges térbeli pozíció felvétele, és annak megtartása az utántöltés teljes idejére.

Más szóval, az UAV és a tankerrepülőgép zárt kötelékes repülést hajt végre, és az UAV felkészül arra, hogy a töltőcsonkjával csatlakozzon a tankerrepülőgép által kiengedett kosárhoz. Ez a repülési fázis nagy pontosságot igényel, egyébként az UAV légi utántöltése meg is hiúsulhat.

Amikor az UAV már kellően kis távolságra helyezkedik el a tankergéphez (F pont), akkor létrehozunk az $O_v x'' y'' z''$ sebességi koordináta-rendszert (9. ábra).

a tankergép zárt kötelékes követéséhez megfelelő módon tudjuk változtatni. Az \mathbf{a}_b gyorsulás értéke függ az UAV és az \mathbf{F} pont közötti relatív távolságtól, valamint a két légi jármű repülési sebességétől is.

Az UAV s nagyságú utat

$$t = \frac{2s}{v_U + v_F} \quad (47)$$

idő alatt tesz meg, ahol s az $O_v x'' y'' z''$ koordináta-rendszerben az UAV által befutott körív pályahossza, amelyet az \mathbf{F} pontig tesz meg az UAV. Az UAV sebességének irányítására szolgáló \mathbf{a}_b irányító gyorsulás értéke az

$$\mathbf{a} = \frac{v_F - v_U}{t} = \frac{v_F^2 - v_U^2}{2s} \quad (48)$$

egyenlet alapján már könnyen számítható.

5. Befejezés, eredmények értékelése, kitekintés

A cikkben bemutattam a légi utántöltés egyes repülési fázisait, azok jellemzőit és a repülés automatizálásához elengedhetetlenül szükséges repülésdinamikai és kinematikai összefüggéseket.

A pilóta nélküli légi járművekkel egyre gyakrabban találkozunk az állami és a nem állami (magán-) repülésben. Az elmúlt években az európai uniós és a hazai UAV-szabályozás nagyot lépett előre, és az UAV-repülések elől folyamatosan tűnnek el az évtizedek óta meglévő korlátozások.

A pilóta nélküli légi járművek autonóm irányítása napjainkban az automatikus repülésszabályozás egyik kiemelkedő fontosságú feladata. Az autonóm irányítás lehetővé teszi olyan precíziós repülési feladatok végrehajtását is, mint például a légi utántöltés. Természetesen, megfelelő kamerarendszerrel vagy egyéb (például infravörös) markerek segítségével ez a repülési feladat kézi irányítással is végrehajtható.

Napjainkban az UAV-alkalmazások egyik fontos területe a precíziós mezőgazdaság, ahol permetezésre már napjainkban is használhatók. Bár a kihordandó permetezőszer ma még nagyon korlátozott, az e cikkben vázolt légi utántöltés olyan új gondolatot is jelent, hogy nemcsak az üzemenyagot, de a kihordandó permetszert is után lehet tölteni a levegőben. Ily módon sok időt és energiát takaríthat meg egy légi utántölthető UAV.

Megemlítjük, hogy az UAV a repülési feladatainak sikeres végrehajtása érdekében nemcsak másik UAV-val, hanem egyéb autonóm felszíni járművel vagy autonóm vízfelszíni járművel együtt is végezhet kooperatív mozgást. Ebben az esetben az UAV a felszínen (például logisztikai robot) vagy a vízfelszínen mozgó (például parti őrség autonóm hajói) autonóm járművekkel működik együtt. E területeken még csak kezdeti eredmények mutatkoztak eddig, e témák alapos kutatása új tudományos eredményekkel kecsegtet.

Felhasznált irodalom

- [1] A. E. Bryson Jr., *Control of Spacecraft and Aircraft*. Princeton, New Jersey, Princeton University Press, 1994.
- [2] B. Dickinson, *Aircraft Stability and Control for Pilots and Engineers*. London, Sir Isaac Pitman & Sons, Ltd., 1968.
- [3] L. Delin, X. Rongzeng, D. Haibin, „A Guidance Law for UAV Autonomous Aerial Refueling Based on the Iterative Computation Method,” *Chinese Journal of Aeronautics*, Vol. 27. No. 4. pp. 875–883. 2014. Online: <https://doi.org/10.1016/j.cja.2014.06.003>
- [4] L. Guoliang, X. Dongjing, H. Jianyong, J. Guting, Z. Ziyang, „Distributed Cooperative Control Algorithm for Multi-UAV Mission Rendezvous,” *Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, Vol. 34. No. 6. pp. 617–627. 2017. Online: <https://doi.org/10.16356/j.1005-1120.2017.06.617>
- [5] N. Harl, S. N. Balakrishnan, „Co-Ordinated Rendezvous of Unmanned Air Vehicles to a Formation Using a Sliding Mode Approach,” *Journal of Aerospace Engineering*, Vol. 225. No. 1. pp. 105–119. 2011. Online: <https://doi.org/10.1243/09544100JAERO714>
- [6] T. W. McLain, P. R. Chandler, S. Rasmussen, M. Pachter, „Cooperative Control of UAV Rendezvous,” *BYU ScholarsArchive*, 2001. Online: <https://doi.org/10.1109/ACC.2001.946096>
- [7] T. W. McLain, P. R. Chandler, S. Rasmussen, M. Pachter, „Cooperative Control of UAV Rendezvous,” in *Proceedings of the American Control Conference*, 2001. pp. 2309–2314. Online: <https://doi.org/10.1109/ACC.2001.946096>
- [8] D. McLean, *Automatic Flight Control Systems*. New York, Prentice-Hall International Ltd., 1990.
- [9] R. C. Nelson, *Flight Stability and Control*. Boston, McGraw-Hill Companies, Inc., 1998.
- [10] A. Papen, R. Vandenhoeck, J. Boltong, F. Defay, „Collision-Free Rendezvous Maneuvers for Formations of Unmanned Aerial Vehicles,” *IFAC Paper-OnLine*, Vol. 50. No. 1. pp. 282–289. 2017. Online: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.047>
- [11] L. Persson, *Autonomous and Cooperative Landing Using Model Predictive Control*. Sweden, KTH Royal Institute of Technology, 2019. Online: www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1296460/FULLTEXT01.pdf
- [12] R. W. Pratt szerk., *Flight Control Systems*. Reston, Virginia, American Institute of Aeronautics, and Astronautics, Inc., 2000.
- [13] A. Rucco, S. Baliyarasimhuni, P. Auigar, „Optimal Rendezvous Trajectory for Unmanned Aerial-Ground Vehicles,” *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 54. No. 2. pp. 834–847. 2018. Online: <https://doi.org/10.1109/TAES.2017.2767958>
- [14] Z. Shao, F. Yan, Z. Zhou, X. Zhu, „Path Planning for Multi-UAV Formation Rendezvous Based on Distributed Cooperative Particle Swarm Optimization,” *Applied Science*, Vol. 9. No. 13. p. 2621. 2019. Online: <https://doi.org/10.3390/app9132621>
- [15] J. L. Stephenson, The Air Refueling Rendezvous and Controlling the Unmanned Aerial Vehicles during the Air Refueling, in *The Air Refueling Receiver That Does Not Complain*. Air University Press, 1999. pp. 19–28. Online: www.jstor.org/stable/resrep13763.9
- [16] B. L. Stevens, F. L. Lewis, E. N. Johnson, *Aircraft Control and Simulation: Dynamics, Control Design and Autonomous Systems*. 3rd Edition. Hoboken, NJ, Wiley-Blackwell, 2015. Online: <https://doi.org/10.1002/9781119174882>

- [17] R. K. Yedavalli, *Flight Dynamics and Control of Aero and Space Vehicles*. Hoboken, NJ, John Wiley & Sons, Ltd., 2020.
- [18] Z. Wang, L. Liu, G. Xu, „Efficient Unmanned Aerial Vehicle Formation Rendezvous Trajectory Planning Using Dubins Path and Sequential Convex Programming,” *Engineering Optimization*, Vol. 51. No. 8. pp. 1412–1429. 2019. Online: <https://doi.org/10.1080/0305215X.2018.1524461>
- [19] D. B. Wilson, A. H. Göktoğan, S. Sukkarieh, *Guidance and Navigation for UAV Airborne Docking*. Online: www.roboticsproceedings.org/rss11/p17.pdf
- [20] Q. Zhang, J. Tao, F. Yu, Y. Li, H. Sun, W. Xu, „Cooperative Solution of Multi-UAV Rendezvous Problem with Network Restrictions,” *Mathematical Problems in Engineering*, Vol. 2015. pp. 1–14. Online: <https://doi.org/10.1155/2015/878536>

Cooperative Control of the Unmanned Aerial Vehicles

One of the modern control principle applied in automatic flight control systems is the cooperative control of vehicles, among those of the UAVs. In the cooperative control meaning, vehicles cooperate to reach their control goals with the maximum of efficiency of the fleet they created. Such control goals might be like aerial refuelling, formation flight, reaching designated areas in proper time etc. The purpose of the author is to describe one of these flight missions ensuring collision-free autonomous manoeuvres of two UAVs in order to conduct their flight mission successfully.

Keywords: UAV, UAS, UGV, USV, autonomous vehicle, cooperative control, aerial refuelling

Prof. Dr. habil. Szabolcsi Róbert
 egyetemi tanár
 Óbudai Egyetem
 Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai
 Mérnöki Kar
 Mechatronika és Járműtechnikai Intézet
 Mechatronika Tanszék

szabolcsi.robort@bgk.uni-obuda.hu
orcid.org/0000-0002-2494-3746

Prof. Róbert Szabolcsi PhD. Habil.
 Professor
 Óbuda University
 Bánki Donát Faculty of Mechanical and
 Safety Engineering
 Institute of Mechatronics and Vehicle
 Engineering
 Department of Mechatronics

szabolcsi.robort@bgk.uni-obuda.hu
orcid.org/0000-0002-2494-3746
