

Szabolcsi Róbert

Autonóm járművek kooperatív irányítása

Az elmúlt és a következő évek egyik nagy kihívása az autonóm (A) járművek kooperatív irányítása. Az autonóm járművek, mint például a pilóta nélküli légi jármű (AUAV), a vezető nélküli felszíni jármű (AUGV), a vízfelszíni jármű (AUSV) kooperatív irányítása viszonylatában számos esetben találkozunk olyan foratókönyvvel, hogy egy-egy közös cél (például UAV zárt kötelékes repülési alakzatainak létrehozása, vagy az UAV repülési alakzatának bontása, UAV földi utántöltése, felderítő UAV-repülések, UAV leszállása autonóm földi jármű fedélzetére, UAV automatikus leszállása hajók fedélzetén stb.) elérése érdekében a különféle autonóm járművek együttműködnek egymással. A szerző célja néhány speciális UAV-alkalmazás koncepciójának leírása, és a fő kooperatív irányítási stratégiák bemutatása.

Kulcsszavak: (A)UAV, (A)UGV, (A)USV, autonóm jármű, kooperatív irányítás, optimális irányítás

1. Bevezetés, motiváció, problémafelvetés

Az UAV-k a modern kor leginkább dinamikus fejlődő eszközei közé tartoznak. Az UAV-kat széles körben használják az állami (katonai és nem katonai) és a nem állami (magán-) repülésben. Mindazonáltal a kis (SUAV) és a közepes (MALE) kategóriába tartozó UAV-k alkalmazásának egyik fontos korlátja a fedélzeten rendelkezésre álló üzemanyag (fosszilis vagy villamos) mennyisége. Könnyű belátni, hogy légi utántölthetőség hiányában a belső égésű motorokkal hajtott légi eszközök a földön vételeznek üzemanyagot újabb repülési feladataik végrehajtásához.

A háborús műveletekben azonban a leszállóhely megközelítése és maga a leszállás is kifejezetten veszélyes, hiszen ekkor földközeli, alacsony sebességgel közelítik meg az UAV-k a leszállóhelyet, és így maguk is kiszolgáltatott célponttá válnak. Másodsorban pedig maga a repülőtér, ahonnan üzemeltetik az UAV-kat, könnyű célpont, és a repülőtéren telepített infrastruktúrát könnyen és gyorsan el lehet pusztítani, így módon is gátolva az UAV-k fel- és leszállását. Az UAV-k földi irányító állomását (GCS) rendszerint mobil eszközökre telepítik, így védelmük érdekében azok szükség esetén gyorsan más helyre telepíthetők. Ilyen esetben is jól szolgálja az UAV-k harci alkalmazhatóságának és harcértékének megőrzését, ha az UAV-kat felszíni, mobil utántöltő- és karbantartó állomások szolgálják ki. Ily módon, az UAV-k akár megfelelő módon kiépített és előkészített közúton vagy autópálya-szakaszon is leszállhatnak üzemanyagot és egyéb felszerelést vételezni, vagy szükség esetén mobil karbantartó csoport akár javításokat is végezhet az UAV-kon.

Az UAV-k leszállása sokszor nagy kihívás a kezelők számára. A SUAV-kategóriához tartozó légi járművek leszállását akár ejtőernyő segítségével is tervezhetjük. E módszer hátránya, hogy

az ejtőernyőzés során az UAV már nem irányítható, és rossz időjárási feltételek (például erős szél) esetén a légi jármű számottevő mértékben sodródhat el a leszállás tervezett helyétől. A legrosszabb esetben akár el is veszíthetjük őket.

A SUAV-kategóriában a másik gyakran alkalmazott leszállási módszer a hasra szállás. E módszer előnye, hogy a megfelelő módon előre kiválasztott leszállóhelyen maga a leszállás nem igényel semmilyen eszközt. Más szóval, a leszállóhely fizikai mérete és felszíne határozza meg a leszállás végrehajthatóságát. Hátrányként jelentkezik ebben az esetben, hogy az UAV alsó részeit, főként a törzset megfelelő módon meg kell erősíteni, hogy az ütközési és a súrlódási energiát el tudja nyelni. Ez azonban az UAV saját tömegének növekedésével, míg a hasznos teher csökkenésével jár.

A fent ismertetett leszállási módok hátrányai jól kezelhetők, ha az UAV-t egy mozgó platformra szállítjuk le. Az UAV felszíni jármű fedéltetere való leszállítása már régen foglalkoztatja a mérnököket, mert a leszállás folyamata jól automatizálható. Ilyenkor a megfelelően felépített UGV vagy AUGV tetején egy leszállóplatformot hoznak létre, amelyre az UAV leszáll, és a megfelelő földi kiszolgálás és egy esetleges karbantartás után, ha a felszálláshoz megvannak a technikai eszközök, új bevetésre indulhat.

Végezetül, nagy kihívást jelent az UAV-k hajók fedéltetéről való üzemeltetése is. Sem a felszállás, sem pedig a leszállás nem tűnik egyszerű feladatnak, ha a leszállóhely egy mozgó hajó fedélzete, amely kiteve a hullámnak, folyamatosan változtatja a le- és felszálló platform helyét. Érdemes megemlíteni, hogy a hajófedélzeti UAV-leszállást sokszor hálós befogással oldják meg. Mindazonáltal, a forgószárnyas UAV-k a függőleges emelkedési és süllyedési képességük miatt képesek leszállni hajófedélzeti leszállóhelyre is.

2. Szakirodalmi áttekintés

Az automatikus repülésszabályozás annak kezdeti éveitől központi helyet foglal el az irányítás, napjainkban pedig a kooperatív irányítás különféle területein. Rendszerint olyan modellalapú irányításokkal van dolgunk, amelyek a klasszikus repülésszabályozás feladatait (értéktartó és értékkövető szabályozások megvalósítása) újabb, modern és posztmodern irányítási feladatokkal (optimális repülési pálya tervezése, összeütközés-mentes repülések, mesterséges intelligencia alkalmazása a repülési feladatok végrehajtása során stb.) egészíti ki.

A klasszikus 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.

Műholdak mozgásának szabályozásával az [1] és a [15] irodalom foglalkozik részletesen. A légi járművek mozgásának modellezésével, és a légi járművek automatikus repülésszabályozásának kérdéseivel a [2], [7], [8], [11], [14] irodalmak foglalkoznak behatóan, és vizsgálják az automatikus repülésszabályozási rendszerek előzetes tervezésének kérdéseit is.

Megemlítjük, hogy a légi járművek klasszikus automatikus repülésszabályozása nem foglalkozik a kooperatív irányítás kérdéseivel. Az automatikus repülésszabályozás az egyedi légi járművek térbeli mozgásának irányítását helyezi középpontba.

Az UAV-k kooperatív irányítása ma az automatikus repülésszabályozás egyik kulcsfontosságú eleme. A gyakorlatban előfordul, hogy az újabb küldetés sikeres teljesítése érdekében (például felderítési feladat, térképezés, földi célok támadása kötelékben stb.) az egyébként önállóan tevékenykedő UAV-kat kötelékbe rendezzük, és a (zárt) kötelék kialakítása után az UAV-k együtt hajtják végre repülési feladataikat [3], [4], [5], [6], [9], [13], [16], [17].

A kooperatív járműirányítás másik fontos forгатókönyve, ha az UAV földi utántöltése oly módon valósul meg, hogy a felszínen a helyét folyamatosan változtató töltőjármű közelében hajtja végre a leszállást [12]. Az UAV–UGV-viszonylatban egy másik fontos repülési forгатókönyv lehet az UAV automatikus leszállítása a földön megadott pályán mozgó járművön kiépített platformra [10]. Végezetül, a multirotoros UAV-k hajófedélzeti automatizált leszállását [10] mutatja be. A fent felsorolt és a szerző által hivatkozott irodalmak mellett természetesen számos egyéb szakirodalom is elérhető és rendelkezésre áll az egyes irányítási feladatok megoldása során.

3. Az UAV–UGV-rendszer kooperatív irányítása

A pilóta nélküli légi járművek irányítása és azok sikeres alkalmazása során egyre gyakrabban merül fel az igény azok kooperatív irányítására. Az UAV-k vizuális látómezőn túl (*Line of Sight*, LoS) végrehajtott repülése, valamint a repülési feladatok komplexitásának növekedése (együttműködés más autonóm járművekkel, például felszíni vagy vízi járművekkel) miatt egyre gyakrabban találkozunk olyan autonóm irányításokkal, amikor a repülési feladatok sikeres végrehajtását mesterséges intelligencia is segíti. A következő fejezetekben olyan UAV repülési forгатókönyvekkel foglalkozunk, amelyek az alkalmazók körében ma a legnagyobb érdeklődésre tartanak számot.

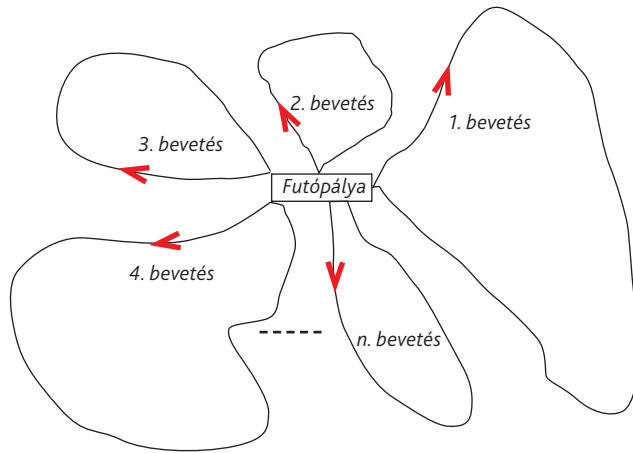
3.1. Az (A)UAV földi utántöltése (A)UGV segítségével

A merev szárnyú közepes méretű UAV-k (MALE kategória) széles körben használatosak az állami célú repülésben. A MALE UAV-k lehetővé teszik a légi felderítést és a légi térképezést is, amikor nagy területekről kell információt szerezni.

Számos esetben, amikor felmerül az UAV elvesztésének reális esélye (például műveleti területi alkalmazások esetén), akkor a veszteségek minimalizálása érdekében az UAV olcsó megoldásokkal, olcsó eszközökből és minimális anyagi ráfordítással épül meg, így a fedélzeten rendelkezésre álló üzemanyag mennyisége is korlátozott [12].

Ily módon, hosszú idejű repülések esetén felmerül az utántöltés biztosításának szükségessége. Az egyik kézenfekvő megoldás a légi utántöltés, de annak kivitelezésével kapcsolatos nehézségek miatt a SUAV és a MALE UAV kategóriákban ez eléggé ritkán fordul elő. A leginkább kézenfekvő és a legolcsóbb megoldás, ha az UAV-kat a földön töltik fel újra üzemanyaggal, látják el egyéb hadianyaggal, és készítik fel az újabb bevetésre.

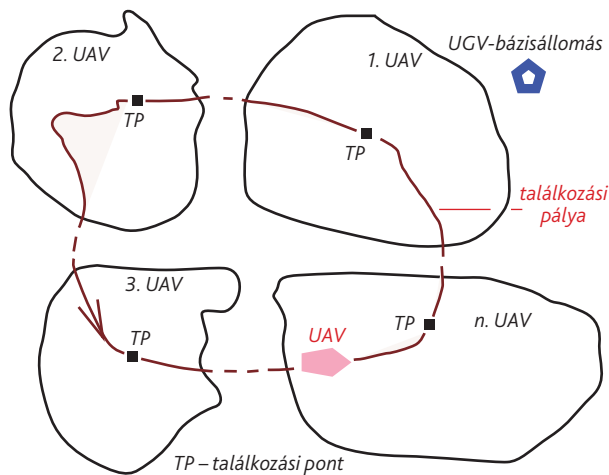
A földi utántöltés klasszikus forгатókönyve, hogy az UAV-t repülőtérről üzemeltetik, ahol lehetőség van üzemanyag vételezésére is (1. ábra).



1. ábra
Az UAV utántöltése repülőtéren [a szerző]

Be kell azonban látni, hogy a repülőterek könnyen megsemmisíthetők, vagy funkciójukban nagymértékben korlátozhatók, akár csekély eszközökkel is. Ily módon a repülőteres üzemeltetés és az UAV-k üzemanyaggal való földi utántöltése csak abban az esetben működhet, ha az UAV az ellenséges erők fegyvereinek hatótávolságán jóval kívül esnek, vagy a repülőtér olyan saját védelmi rendszerrel rendelkezik, amely elrettentő a támadó erők számára.

Eme hátrány kiküszöbölésére szolgál az a koncepció, amikor az üzemanyagtöltő jármű autonóm módon, a földön egy olyan, előre megadott pályán halad végig, amely átfedi az UAV-k repülési pályáit, így azok megadott helyen és megadott időben leszállhatnak üzemanyagot vételezni (2. ábra).



2. ábra
Az UAV-UGV-rendszer kooperatív irányításának síkbeli elvi vázlatja és koncepciója [a szerző]

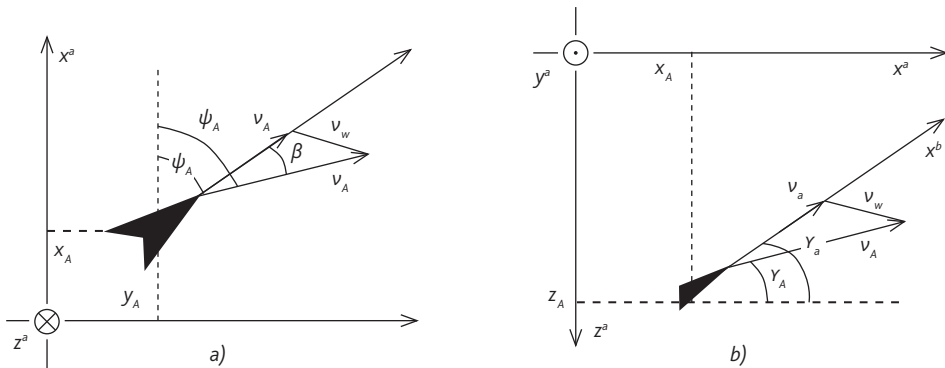
A koncepció lényege: az UGV (AUGV) előre megadott pályán, megadott sebességgel halad végig, így a tartózkodási helye könnyen számítható. Az UAV(-k) megadott időben leszállnak, és az egyes találkozási pontokon a földi üzemeltetők utántöltik az UAV-t, és az ismételt felszállás előtt elvégzik a további szükséges repülés előtti ellenőrzéseket és egyéb munkálatokat (például fűggesztmények elhelyezése a fedélzetre).

Ezzel a módszerrel sikerül csökkenteni az utántöltések idejét, hiszen növelni tudjuk a valós bevetési időt, növelni tudjuk egy-egy utántöltés ideje alatt feltérképezett terület nagyságát, vagy növelni tudjuk a fedélzeti fegyverrendszerek alkalmazásának hatékonyságát is. Az UAV-flotta vagy egy-egy UAV optimális repülési pályáinak megtervezése és a leszállás végrehajtása során az UAV által szolgáltatott adatok jól használhatók az UGV mozgási pályáinak tervezéséhez (ha ez lehetséges), az UGV-k helyzetéről megosztott információ pedig segíti az UAV-kat azok repülési pályáinak megtervezésében.

A koncepció magában foglalja, hogy minden egyes találkozási ponton rendelkezni kell az UGV-bázisállomásról kitelepített, megfelelő földi üzemeltető és karbantartó szakemberegárdával.

Könnyű belátni, hogy az UAV-k biztonságos üzemeltetése, azok gyors rendelkezésre állása érdekében ez a befektetés megtérül, hiszen nem tesszük ki az UAV üzemeltetéséhez használt repülőteret, annak infrastruktúráját és a repülőtéren tárolt UAV-kat az ellenséges csapásoknak.

Vizsgáljuk meg az UAV–UGV-rendszer kooperatív irányítását a sebességháromszögek segítségével (3. ábra).



3. ábra

Az UAV mozgása az aerodinamikai (szél) koordináta-rendszerben [a szerző]

A 3. ábrán az alábbi jelöléseket alkalmaztuk: $Ox^ay^az^a$ az aerodinamikai (szél) koordináta-rendszer, $Ox^by^bz^b$ az UAV test (húr) koordináta-rendszere, ψ_A az UAV irányszöge, Ψ_A az UAV útvonal szöge, β a csúszási szög (oldalszél szöge), γ_a a pályaszög, $\gamma_a = 0$ esetén; v_a az UAV levegőhöz viszonyított repülési sebessége, v_A az UAV földhöz viszonyított repülési sebessége, v_w a szélesebesség vektora [7], [8], [12].

A 3. ábra alapján az UAV térbeli mozgásának egyenleteit az alábbi alakban írhatjuk fel [1], [2], [7], [8], [11], [12], [14], [15]:

$$\left. \begin{aligned}
 \dot{x}_A &= v_A \cos \Psi_A \cos \gamma_A \\
 \dot{y}_A &= v_A \sin \Psi_A \cos \gamma_A \\
 \dot{z}_A &= -v_A \sin \gamma_A \\
 \dot{v}_A &= \frac{u_1 - D}{m} - g \sin \gamma_A \\
 \dot{\gamma}_A &= \frac{1}{v_A} \left(\frac{L \cos \psi_A}{m} - g \cos \gamma_A \right) \\
 \dot{\psi}_A &= \frac{1}{v_A \cos \gamma_A} \left(\frac{L \sin \psi_A \cos(\beta)}{m} \right) \\
 \dot{\phi}_A &= u_2 \\
 L &= \frac{1}{2} \rho v_a^2 S C_L; D = \frac{1}{2} \rho v_a^2 S C_D; C_D = C_{D_0} + K_{D/L} C_L^2
 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Az UAV térbeli mozgásának irányításához az alábbi irányító bemeneteket használjuk: $u_1 = T$ az UAV hajtóműve toló-/vonóerejének változása; $u_2 = \dot{\phi}_A$ az UAV orsózó szögsebessége; és az $u_2 = C_L(\alpha)$ felhajtóerő-tényező.

Az UAV v_A és a v_a sebességeire igazak az alábbi összefüggések:

$$\left. \begin{aligned}
 v_A \cos \Psi_A \cos \gamma_A &= v_a \cos \psi_A \cos \gamma_a + v_{w_x} \\
 v_A \sin \Psi_A \cos \gamma_A &= v_a \sin \psi_A \cos \gamma_a + v_{w_y} \\
 -v_A \sin \gamma_A &= -v_a \sin \gamma_a + v_{w_z}
 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Az UAV dinamikus mozgásegyenleteinek felírásakor feltételezzük, hogy a repülési paraméterek és az irányító bemeneti jelek az alábbiak szerint korlátozottak:

$$\left. \begin{aligned}
 v_{a_{min}} &\leq v_a \leq v_{a_{max}} \\
 n_{lf_{min}} &\leq n_{lf} \leq n_{lf_{max}} \\
 \gamma_{A_{min}} &\leq \gamma_A \leq \gamma_{A_{max}} \\
 0 &\leq u_1 \leq u_{1_{max}} \\
 |\phi_A| &\leq \phi_{A_{max}} \\
 |u_2| &\leq u_{2_{max}} \\
 |u_3| &\leq u_{3_{max}} \\
 n_{lf} &= \frac{L}{mg}
 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Korábban ismeretes, hogy az UGV előre megtervezett pályán is mozoghat (2. ábra). Az UGV mozgását felszíni, egyenes és görbe vonalú pályán az alábbi egyenletekkel adhatjuk meg (4. ábra) [12]:

$$\left. \begin{aligned}
 \dot{x}_G &= v_G \cos \Psi_G \\
 \dot{y}_G &= v_G \sin \Psi_G \\
 \dot{v}_G &= a_e = u_4 \\
 \dot{\psi}_G &= v_G \sigma_G
 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

ahol

$$\mathbf{e} = [e_x \quad e_y \quad e_z]^T \quad (8)$$

és

$$\mathbf{R}_z(\Psi_G) = \begin{bmatrix} \cos\Psi_G & -\sin\Psi_G & 0 \\ \sin\Psi_G & \cos\Psi_G & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

Mivel az UGV a földfelszínen ($z_G = 0$) manőverezik, ezért igaz, hogy $e_z = z_A$. Deriváljuk a (7) egyenletet idő szerint. Az alábbi egyenletet kapjuk:

$$\dot{\mathbf{p}}_A = \dot{\mathbf{p}}_G + \begin{bmatrix} -\sin\Psi_G & -\cos\Psi_G & 0 \\ \cos\Psi_G & -\sin\Psi_G & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dot{\Psi}_G \mathbf{e} + \mathbf{R}_z(\Psi_G) \dot{\mathbf{e}} \quad (10)$$

Az (1) és a (4) egyenletrendszerek figyelembevételével a (10) egyenlet az alábbi alakban írható fel [12]:

$$\dot{\mathbf{e}} = \mathbf{R}_z(\Psi_G)^T \mathbf{R}_z(\Psi_A) \mathbf{R}_y(\gamma_A) \begin{bmatrix} v_A \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} (1 - e_y \sigma_G) v_G \\ e_x \sigma_G v_G \\ 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

A (11) egyenlet az UAV-UGV-rendszer \mathbf{e} hibajelének változását írja le. Az $e_\psi = \Psi_A - \Psi_G$, az $e_v = v_A - v_G$, az $e_\gamma = \gamma_A$, végezetül az $e_\phi = \phi_A$ hibajelek esetén az (1) és a (4) egyenletrendszereket az

$$(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = (e_x, e_y, e_z, e_v, e_\gamma, e_\phi, e_\psi, v_G, \sigma_G, u_1, u_2, u_3, u_4) \quad (12)$$

rendszerben az alábbi egyenletekkel írhatjuk le [12]:

$$\left. \begin{aligned} \dot{e}_x &= (e_v + v_G) \cos e_\psi \cos e_\gamma - (1 - \sigma_G e_y) v_G \\ \dot{e}_y &= (e_v + v_G) \sin e_\psi \cos e_\gamma - e_x \sigma_G v_G \\ \dot{e}_z &= -(e_v + v_G) \sin e_\gamma \\ \dot{e}_v &= \frac{u_1 - D}{m} - g \sin e_\gamma - u_4 \\ \dot{e}_\gamma &= \frac{1}{(e_v + v_G)} \left(\frac{L \cos \phi_A}{m} - g \cos e_\gamma \right) \\ \dot{e}_\psi &= \frac{1}{(e_v + v_G) \cos e_\gamma} \left(\frac{L \cos \phi_A \cos \Psi_G}{m} \right) \sigma_G v_G \\ \dot{e}_\phi &= u_2 \\ \dot{v}_G &= u_4 \\ \dot{\sigma}_G &= v_G \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

A továbbiakban az \mathbf{e} hibajel összetevőire vezessünk be újabb korlátokat:

$$|e_\Psi| \leq \left. \begin{array}{l} e_z \leq 0 \\ \left(\frac{e_x}{\bar{e}_x}\right)^2 + \left(\frac{e_y}{\bar{e}_y}\right)^2 + \left(\frac{e_z}{\bar{e}_z}\right)^2 + \bar{e}_\Psi \end{array} \right\} \quad (14)$$

ahol \bar{e}_x , \bar{e}_y , és \bar{e}_z a hibajel összetevőinek megengedett stacionerértékei. Könnyű belátni, hogy hibajel e_x , e_y , e_z összetevőinek zérusértékei mellett az UAV-t sikerül az UGV-hoz egy előre megadott \bar{e}_Ψ pontossággal kivezetni.

Az UAV találkozási helyre való repülésének automatizálása során keressük azt az optimális vezérlési törvényt, amely az (1) dinamikus rendszert úgy viszi át a (4) rendszerhez, hogy a [7], [12]

$$\min_{\mathbf{x}(\cdot), \mathbf{u}(\cdot)} \frac{1}{2} \int_{t_0}^T \|\mathbf{x}(t) - \mathbf{x}^d(t)\|_Q^2 + \|\mathbf{u}(t) - \mathbf{u}^d(t)\|_R^2 dt + \frac{1}{2} \|\mathbf{x}(T) - \mathbf{x}^d(T)\|_P^2 \rightarrow \text{Min}. \quad (15)$$

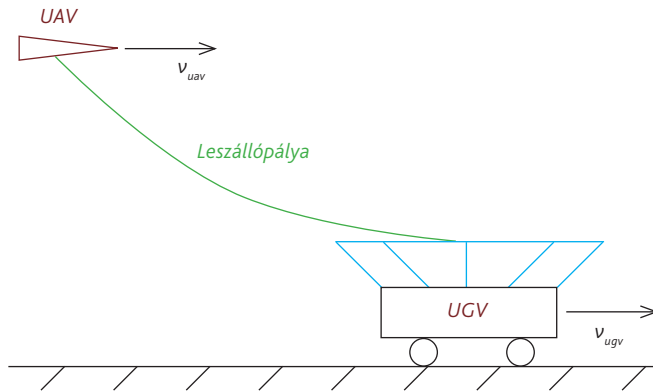
nemlineáris integrálkritérium minimális értéket vegyen fel az átmenet során [1], [2], [7], [8], [11], [12], [14], [15]. A (15) egyenletben: $\mathbf{x}^d(t)$ az állapotvektor, $\mathbf{u}^d(t)$ a kívánt (referencia) jellemzőket magában foglaló bemeneti vektor, míg \mathbf{Q} , \mathbf{R} és \mathbf{P} megfelelően megválasztott átlós, súlyozó mátrixok. A súlyozó mátrixok kiválasztásakor használhatjuk a Bryson-szabályt [1], amikor az $\mathbf{x}^d(t)$ állapotvektor és az $\mathbf{u}^d(t)$ bemeneti vektor rendezőire felvett korlátokat ismerjük. E korlátok ismeretének hiányában támaszkodhatunk az azonos súlyozás elvére, amikor a súlyozó mátrixok fő átlóin egységnyi értékeket állítunk be, majd a zárt rendszer viselkedésének és a minőségi jellemzők értékeinek függvényében heurisztikusan, támaszkodva korábbi tapasztalatainkra és mérnöki intuícióinkra, több iteratív lépésben hangoljuk a súlyozó mátrixok elemeit annak érdekében, hogy a szabályozási cél (az UAV eljuttatása az UGV-vel való találkozási pontba) megvalósuljon.

3.2. (A)UAV automatikus leszállása (A)UGV-jármű fedélzetére

A 3.1. fejezetben bemutatott utántöltési repülési feladat megoldására kézenfekvőnek kínálkozik, ha az UAV akár a töltőjármű fedélzetén kialakított megfelelő leszállóhelyen száll le (5. ábra).

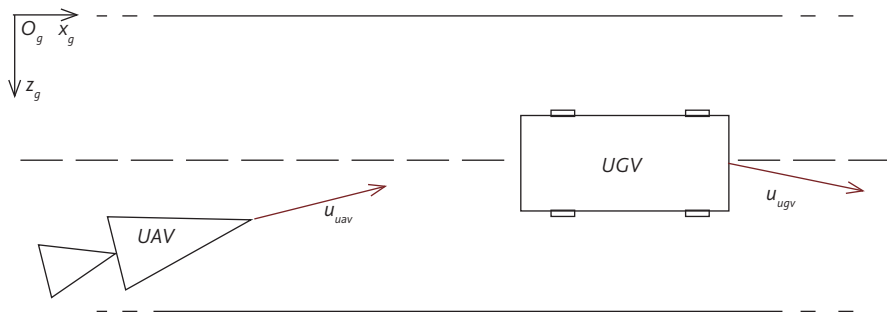
Szüksége lehet az UAV ilyen módon végrehajtott leszállására akkor is, ha például meghibásodás miatt nem engedélyezett a leszállása a leszállóhelyen, vagy futóműves UAV-k esetén, ha nem sikerül kiengedni a futóműveket, és az UAV törzse nem megfelelően megerősített egy kényszerleszálláshoz, amit hasra szállással hajtanak végre.

Az UGV fedélzetén a „leszállóhely” egy megfelelően kialakított „kosár”, amelybe a leszállás során az UAV be kell találnon.



5. ábra
Az UAV–UGV-rendszer kinematikája a függőleges síkban [a szerző]

Az UAV és az UGV mozgását a vízszintes síkban a 6. ábrán láthatjuk.



6. ábra
Az UAV–UGV-rendszer kinematikája a vízszintes síkban [a szerző]

Ha forgószárnyas UAV leszállásának irányítását tervezzük, akkor az UGV fedélzetén kialakított kellő méretű leszállóhely mellett a biztonságos leszállás álló UGV fedélzetére könnyen tervezhető és könnyen végrehajtható [12].

Ha az UGV fedélzetére merev szárnyú UAV-val tervezünk leszállni, akkor a leszállást csak olyan sárkányszerkezeti kialakítású UAV hajthatja végre, amelynek a légcsavarlapátjai nem sérülhetnek a leszállás során.

Az UAV és az UGV kölcsönös, kooperatív irányítása e feladat végrehajtása során számos ok miatt nehézkes, mivel:

- a leszállás folyamata a valós fizikai környezetben nagyon kitett a környezeti zavarásoknak (például légköri turbulencia, útfelület minősége stb.);
- a manőver során az UAV térbeli és az UGV síkbeli mozgását nemlineáris differenciálegyenlet-rendszerrel írhatjuk le, amelyek valós idejű megoldása nagy számítási kapacitást igényel;

- a leszállás során az UAV leszálló sebességéhez igazított UGV haladási sebessége is nagy értékű lesz;
- a repülési feladat biztonságkritikussága: egy esetleges durva leszállás veszélyezteti az UAV-t és az UGV-t is; illetve ha az UGV maga a tankerjármű, akkor egy esetleges balesetben a környezetre is veszélyes lehet az UGV sérülése.

Az UAV leszállása során a repülési magasság tekintetében a repülés alábbi fázisait különböztetjük meg:

- a leszállás megkezdése előtt az UAV állandó értéken tartja a repülési magasságot;
- az UAV megadott, előre megtervezett repülési pályán süllyed, és a szükséges értékűre csökkenti repülési magasságát;
- az UAV az UGV-n kialakított leszállóhelyre úgy érkezik, hogy e repülési fázis végén a sebességük megegyezik;
- a biztonságos repülés érdekében a leszállás megszakítható a leszállás bármelyik fázisában, és előkészítendő az újabb leszállást, az UAV a levegőben átstartol.

Az UAV és az UGV sebességeinek és az irányszögeinek referenciaértékeit az alábbi egyenletekkel adhatjuk meg [12]:

$$\left. \begin{aligned} v_{uav}^{ref}(t) &= k_1[x_{uav}(t) - x_{ugv}(t)] \\ v_{ugv}^{ref}(t) &= k_2[x_{ugv}(t) - x_{uav}(t)] \\ \psi_{uav}^{ref}(t) &= k_3[y_{uav}(t) - y_{ugv}(t)] \\ \psi_{ugv}^{ref}(t) &= k_4[y_{ugv}(t) - y_{uav}(t)] \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

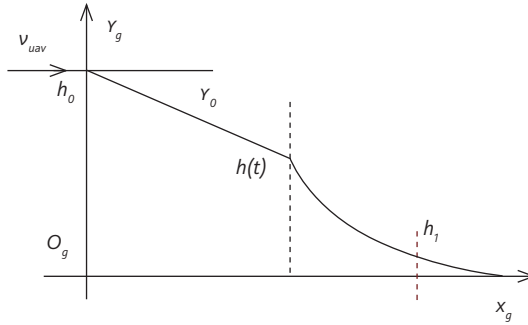
ahol $k_1 \geq 0$, $k_2 \geq 0$, $k_3 \geq 0$, és $k_4 \geq 0$.

A függőleges síkban az UAV repülését a $h(t)$ repülési magassága függvényében az alábbi algoritmus szerint változtatjuk:

$$h(t) = \begin{cases} h_0 - \gamma_0 t, & \text{ha } h(t) \geq -(T \sin \gamma_0 v_0 + h_1) \\ \dot{h}(t) + \frac{1}{T}(h(t) + h_1) = 0, & \text{ha } h(t) < -(T \sin \gamma_0 v_0 + h_1) \end{cases} \quad (16)$$

ahol γ_0 az UAV pályaszöge, T az időállandó, és végül h_0 a kezdeti repülési magasság, és h_1 a repülési magasság a leszállás végén.

A (16) egyenlet a következő repülési pályát adja meg (7. ábra):



7. ábra

Az UAV automatikus leszállítása mozgó UGV fedélzetére [saját szerkesztés]

A leszállás első fázisában az UAV állandó γ_0 pályaszöggel, lineáris pályaszakaszon közelíti meg az UGV-t, majd a megadott feltétel teljesülésekor az UAV belép a kilebegtetés fázisába (*flare*), ahol a repülési magasság exponenciálisan csökken a h_1 repülési magassáig, ahol az UAV betalál az UGV fedélzetén a leszállóhelyébe, és ezzel a leszállás befejeződik.

Ismeretes, hogy az UAV-ra ható aerodinamikai erők és nyomatékok az alábbi egyenletekkel írhatók fel az UAV test-koordináta-rendszerében [2], [7], [8], [11], [12], [14], [15]:

$$\mathbf{F}_{aero}^b = \begin{bmatrix} X^B \\ Y^B \\ Z^B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -QSC_D \\ qSC_L \\ -qSC_C \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$\mathbf{M}_{aero}^b = \begin{bmatrix} L \\ M \\ N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} qSbC_p \\ qScC_q \\ qSbC_r \end{bmatrix} \quad (18)$$

ahol $q = \frac{1}{2} \rho v^2$ a torlónyomás, S a szárnyfelület, b a fesztávolság, c közepes aerodinamika húr; C_D , C_L és C_C az aerodinamikai erők együtthatói; C_p , C_q és C_r nyomatéki együtthatók, amelyek függenek a repülési paramétereiktől, a környezeti levegő jellemzőitől és az UAV paramétereitől is.

A merev szárnyú, hagyományos aerodinamikai elrendezésű UAV rendszerint négy bemenettel irányított, amelyek a magassági kormánylapok szöghelyzetváltozása, a csűrőlapok szöghelyzetváltozása, az oldalkormány szöghelyzetváltozása és a hajtómű toló-/vonóerejének megváltozása. Mindezen megfontolások alapján, az anyagi pontnak tekintett, merev UAV egyenes vonalú mozgásának egyenletei a test-koordináta-rendszerben az

$$\left. \begin{aligned} m(\dot{u} + qw - rv) &= X^b - mg\sin\theta \\ m(\dot{v} + ru - pw) &= Y^b - mg\cos\theta\sin\phi \\ m(\dot{w} + pv - qu) &= Z^b + mg\cos\phi\sin\theta \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

egyenletrendszerrel, míg a test-koordináta-rendszer tengelyei körül végrehajtott forgómozgás az

$$\left. \begin{aligned} I_x\dot{p} + (I_z - I_y)qr - I_{xz}(pq + \dot{r}) &= L \\ I_y\dot{q} + (I_x - I_z)pr - I_{xz}(p^2 - r^2) &= M \\ I_z\dot{r} + (I_y - I_x)pr - I_{xz}(qr - \dot{p}) &= N \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

egyenletrendszerrel írható le, ahol I_i az \mathbf{I} tehetetlenségi tenzor főtehetetlenségi nyomatékai, míg I_{ij} a centrális nyomatékok. A tengelyek körüli forgómozgások Euler-féle kinematikai egyenletei a következő alakban adhatók meg [1], [2], [7], [8], [11], [12], [14], [15]:

$$\left. \begin{aligned} \dot{\phi} &= p + tg\theta \sin\phi q + tg\theta \cos\phi r \\ \dot{\theta} &= \cos\phi q - \sin\phi r \\ \dot{\psi} &= \frac{\sin\phi}{\cos\theta} q + \frac{\cos\phi}{\cos\theta} r \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

A (19)–(21) egyenletrendszerek egy kilencdimenziós, nemlineáris állapotteret határoznak meg, amelyet gyakran egyszerűbb alakban adunk meg. Így tehát, az UAV térbeli mozgása az

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_{uav}(t) &= u_{uav}(t) \cos\gamma_{uav}(t) \cos\psi_{uav}(t) \\ \dot{y}_{uav}(t) &= u_{uav}(t) \cos\gamma_{uav}(t) \sin\psi_{uav}(t) \\ \dot{h}_{uav}(t) &= u_{uav}(t) \sin\gamma_{uav}(t) \\ \dot{v}_{uav}(t) &= a_{uav}(t) \\ \dot{a}_{uav}(t) &= f_1(a_{uav}(t), a_{uav}^{com}(t)) \\ \dot{\gamma}_{uav}(t) &= f_2(\gamma_{uav}(t), \gamma_{uav}^{com}(t)) \\ \dot{\psi}_{uav}(t) &= f_3(\psi_{uav}(t), \psi_{uav}^{com}(t)) \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

egyenletrendszerrel, míg az UGV síkbeli mozgása az

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_{ugv}(t) &= u_{ugv}(t) \cos\psi_{ugv}(t) \\ \dot{y}_{ugv}(t) &= u_{ugv}(t) \sin\psi_{ugv}(t) \\ \dot{v}_{ugv}(t) &= a_{ugv}(t) \\ \dot{a}_{ugv}(t) &= f_4(a_{ugv}(t), a_{ugv}^{com}(t)) \\ \dot{\psi}_{ugv}(t) &= f_5(\psi_{ugv}(t), \psi_{ugv}^{com}(t)) \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

egyenletrendszerrel adható meg, ahol a „com” felső index az irányítási parancsjeleket jelöli. Automatikus repülésszabályozásból ismeretes, hogy repülésbiztonsági és egyéb okok

miatt az állapotvektor és a bemeneti vektor rendezői is korlátosok, vagy éppen mi magunk határozunk meg korlátot az egyes állapotváltozókra, vagyis

$$x_i \in \{a_{uav}, a_{ugv}, v_{uav}, v_{ugv}, \psi_{uav}, \psi_{ugv}, \gamma_{uav}\} \quad (24)$$

és

$$u_j \in \{a_{uav}^{com}, a_{ugv}^{com}, \psi_{uav}^{com}, \psi_{ugv}^{com}, \gamma_{uav}^{com}\} \quad (25)$$

esetén igaz, hogy

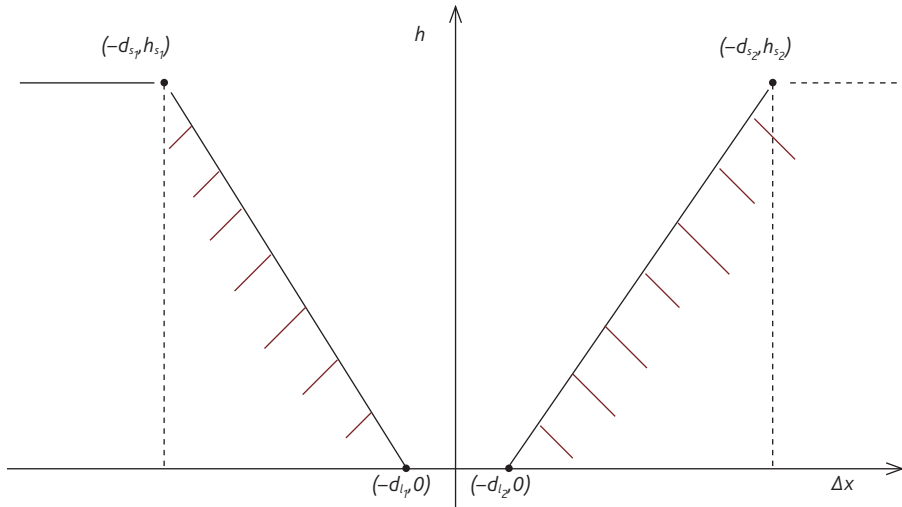
$$\begin{cases} x_{min} \leq x_i(t) \leq x_{max} \\ u_{min} \leq u_j(t) \leq u_{max} \end{cases} \quad (26)$$

A pontos és kíméletes leszállás érdekében a függőleges sebességre vegyük figyelembe a következő korlátot:

$$w(t_{TD}) = u_{uav} \sin \gamma(t_{TD}) \geq w_{TD} \quad (27)$$

ahol $w_{TD} \leq 0$ az a legkisebb megengedett függőleges sebesség, amivel az UAV eltalálhatja az UGV fedélzetén a leszállókosarat.

Végezetül, az UGV megközelítésére vezessünk egy térbeli korlátot is (8. ábra), amely az UGV megközelítése szempontjából azt a veszélyes teret jelöli ki, ahová az UAV nem léphet be az UGV megközelítése során.



8. ábra

Az UAV veszélyes repülési zónája UGV-re való leszálláskor [saját szerkesztés]

A 8. ábrán látható korlátot az alábbi egyenlőtlenségek határozzák meg:

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -1 \\ \pm h_s & d_l - d_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x(t) \\ h(t) \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} h_s \\ 0 \\ h_s d_l \end{bmatrix} \quad (28)$$

ahol $\Delta x(t)$ távolság az UAV és az UGV tömegközéppontjai között az Ox tengely mentén, d_s , d_l és h_s azon tervezési paraméterek összessége, amelyek segítségével a tiltott repülési zóna geometriája már könnyen meghatározható. A $(-d_{s_1}, h_{s_1})$ és a $(-d_{l_1}, 0)$, s a $(-d_{l_1}, 0)$, valamint a (d_{s_2}, h_{s_2}) és a $(d_{l_2}, 0)$ pontokon az átmenő görbe most egyenes vonal, de ettől eltérő korlátokat (geometriákat) is használhatunk (exponenciális függvény, hatványfüggvény, körív stb.) a gyakorlatban. Megemlítjük, hogy általános esetben $h_{s_1} \neq h_{s_2}$, $d_{s_1} \neq d_{s_2}$, és $d_{l_1} \neq d_{l_2}$.

A (22) és a (23) egyenletrendszerekkel megadott UAV–UGV kooperáló dinamikus rendszer számára tervezhető hagyományos (PI-, PD-, PID, PID_LQR, LQR, H_2 , H_∞ stb.) és modern (MPC, Fuzzy stb.) irányítási rendszer [1], [2], [7], [8], [11], [12], [14], [15].

3.3. Multirotoros (A)UAV automatikus leszállása (A)USV-jármű fedélzetére

A multirotoros UAV-k egyik fontos alkalmazási területe lehet a felszíni vizek vizsgálata is, valamint állami célú, katonai repülésben felderítési, aknakeresési és egyéb műveletet hajthatnak végre.

Ismeretes, hogy a quadrotorok mozgásegyenletei a test-koordináta-rendszerben a következő kifejezéssel adhatók meg [1], [2], [7], [8], [11], [12], [14], [15]:

$$\Sigma \mathbf{F} = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ mg \end{bmatrix} + \mathbf{R}_{ib} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \sum_{k=1}^4 T_k \end{bmatrix} + \mathbf{F}_D + \mathbf{F}_E \quad (29)$$

ahol g a nehézségi gyorsulás, $\mathbf{F}_D = \frac{1}{2} \rho v^2 S C_D$ a légellenállás ereje, \mathbf{F}_E a teljes külső zavaró erő (például légköri turbulenciából adódó), T_k az egyes rotorlapátok által létesített felhajtóerő, és végül, $\mathbf{R}_{ib}(t)$ a quadrotor inercia- és a test-koordináta-rendszere közötti forgatómátrix [1], [2], [7], [8], [11], [12], [14], [15].

Az UAV térbeli mozgásának irányítására használjuk az alábbi paramétereket: $\phi_{com}(t)$, $\theta_{com}(t)$, $\psi_{com}(t)$, és a $w_{com}(t)$ bemeneti referenciajeleket. Feltételezzük, hogy a multirotor (*quadrotor*) irányítása a függőleges irányítási csatornában az alábbi átviteli függvény segítségével történik:

$$W(s) = \frac{w(s)}{w_{com}(s)} = \frac{k_w}{\tau_w s + 1} \quad (30)$$

Az UAV légcsavarlapátjai minden időpillanatban a

$$T(t) = \sum_{k=1}^4 T_k(t) = \frac{g + \dot{w}(t)}{\cos\theta(t)\cos\phi(t)} = \frac{g + 1/\tau_w (k_w w_{com}(t) - w(t))}{\cos\theta(t)\cos\phi(t)} \quad (31)$$

teljes felhajtóerőt hozzák létre.

Feltételezzük, hogy az UAV orsózó- és bólintómozgásának dinamikáját másodrendű dinamikus rendszer írja le, vagyis

$$W_\phi(s) = \frac{\phi(s)}{\phi_{com}(s)} = \frac{k_\phi \omega_\phi^2}{s^2 + 2\xi_\phi \omega_\phi s + \omega_\phi^2} \quad (32)$$

$$W_\theta(s) = \frac{\theta(s)}{\theta_{com}(s)} = \frac{k_\theta \omega_\theta^2}{s^2 + 2\xi_\theta \omega_\theta s + \omega_\theta^2} \quad (33)$$

Az irányszög irányítása az alábbi matematikai modell alapján történik:

$$W_\psi(s) = \frac{\psi(s)}{s \psi_{com}(s)} = \frac{1}{s} \frac{k_\psi}{\tau_\psi s + 1} \quad (34)$$

A multirotoros UAV térbeli mozgásának dinamikus modelljét a következő egyenletrendszer írja le [12]:

$$\left. \begin{aligned} \dot{\mathbf{p}}(t) &= \mathbf{v}(t) \\ \dot{\mathbf{v}}(t) &= -\mathbf{g} + \mathbf{R}_{ib}(t)\mathbf{T}(t) - \mathbf{D}\mathbf{v}(t) + \frac{1}{m}\mathbf{F}_E \\ \dot{\boldsymbol{\theta}}(t) &= \boldsymbol{\omega}(t) \\ \dot{\boldsymbol{\omega}}(t) &= \mathbf{f}_\omega(\boldsymbol{\omega}(t), \boldsymbol{\theta}(t), \boldsymbol{\theta}_{com}(t)) \end{aligned} \right\} \quad (35)$$

ahol $\mathbf{p}(t)$ az UAV helyvektorát, $\mathbf{v}(t)$ a sebességvektorát, $\boldsymbol{\theta}(t)$ a szöghelyzetét, és végül $\boldsymbol{\omega}(t)$ a szögsebességvektorát adja meg, míg az \mathbf{f}_ω függvényt a (32)–(34) átviteli függvények határozzák meg.

A (35) egyenletrendszer a második egyenlet miatt nemlineáris, az egyenletrendszer többi egyenlete lineáris. A (35) egyenletrendszer második egyenletében a nemlinearitást okozó $\mathbf{R}_{ib}(t)\mathbf{T}(t)$ tag most a következő alakban adható meg:

$$\mathbf{R}_{ib}(t)\mathbf{T}(t) = (g + \dot{w}(t)) \begin{bmatrix} \frac{\cos\psi\cos\phi\sin\theta + \sin\psi\sin\phi}{\cos\theta\cos\phi} \\ \frac{\sin\psi\cos\phi\sin\theta - \cos\psi\sin\phi}{\cos\theta\cos\phi} \\ 1 \end{bmatrix} = (g + \dot{w}(t)) \begin{bmatrix} \cos\psi t g\theta + \frac{\sin\psi t g\phi}{\cos\theta} \\ \sin\psi t g\theta - \frac{\cos\psi t g\phi}{\cos\theta} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (36)$$

Feltesszük, hogy az UAV θ bólintó, és a ϕ dőlési szögei kis értékűek a leszállás során, így módon, a (36) nemlineáris egyenlet az alábbi linearizált alakban is felírható:

$$\mathbf{R}_{ib}(t)\mathbf{T}(t) \approx (g + \dot{w}(t)) \begin{bmatrix} \theta + \psi \phi \\ \psi \theta - \phi \\ 1 \end{bmatrix} \quad (37)$$

Összefoglalva az eddig bemutatott mozgás- és kinematikai egyenleteket, az UAV mozgás-egyenletei az alábbi állapotterez (többváltozós) alakban írhatók fel:

$$\dot{\mathbf{p}}(t) = \mathbf{v}(t) = \begin{bmatrix} \dot{p}_x \\ \dot{p}_y \\ \dot{p}_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} \quad (38)$$

$$\dot{\mathbf{v}}(t) = \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \\ \dot{w} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} k_{d_x} & 0 & 0 \\ 0 & k_{d_y} & 0 \\ 0 & 0 & k_{d_z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} + \frac{1}{m} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{bmatrix} +$$

$$+ (g + \dot{w}(t)) \begin{bmatrix} \cos\psi t g \theta + \frac{\sin\psi t g \phi}{\cos\theta} \\ \sin\psi t g \theta - \frac{\cos\psi t g \phi}{\cos\theta} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (39)$$

$$\boldsymbol{\omega}(t) = \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \end{bmatrix} \quad (40)$$

$$\dot{\boldsymbol{\omega}}(t) = \begin{bmatrix} \dot{\omega}_1 \\ \dot{\omega}_2 \\ \dot{\omega}_3 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \omega_\phi^2 & 0 & 0 \\ 0 & \omega_\theta^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi \\ \theta \\ \psi \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 2\xi_\phi \omega_\phi & 0 & 0 \\ 0 & 2\xi_\theta \omega_\theta & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\tau_\psi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_\phi \omega_\phi & 0 & 0 \\ 0 & k_\theta \omega_\theta & 0 \\ 0 & 0 & \frac{k_\psi}{\tau_\psi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_{com} \\ \theta_{com} \\ \psi_{com} \end{bmatrix}. \quad (41)$$

Az A(USV)-jármű (hajó) dinamikáját [12] alapján az alábbi nemlineáris, állapotterés alakban írhatjuk fel:

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{M}\dot{\mathbf{v}}_r(t) + \mathbf{C}(\mathbf{v}_r)\mathbf{v}_r + \mathbf{D}(\mathbf{v}_r)\mathbf{v}_r + \mathbf{g}(\boldsymbol{\eta}) &= \boldsymbol{\tau}_{com} + \mathbf{w}_E \\ \dot{\boldsymbol{\eta}} &= \mathbf{J}_\theta(\boldsymbol{\eta})\mathbf{v} \end{aligned} \right\} \quad (42)$$

ahol: $\boldsymbol{\eta} = [x^b \ y^b \ z^b \ \phi^b \ \theta^b \ \psi^b]^T$ az USV helyzetét (pozíció és szöghelyzet) leíró helyvektor, $\mathbf{v}_r = [u^b \ v^b \ w^b \ p^b \ q^b \ r^b]$ az USV sebességeit (egyenes-vonalú és forgómozgás) leíró vektor; \mathbf{M} a dinamikus rendszer inerciamátrixa, és az USV szimmetrikus felépítése miatt feltételezzük, hogy $I_{xy} = I_{yz} = 0$; $\mathbf{C}(\mathbf{v}_r)$ a Coriolis-erők vektora, $\mathbf{D}(\mathbf{v}_r)$ a centrifugális erők vektora, $\boldsymbol{\tau}_{com}$ a kormányerők és nyomatékok vektora, \mathbf{w}_E a külső környezeti (zavarások) erők vektora.

Az USV test-koordináta-rendszerben felvett $\boldsymbol{\eta}$ helyzete tetszőleges új $\boldsymbol{\eta}_p$ helyzetbe átvihető, mert

$$\boldsymbol{\eta}_p = \mathbf{P}^T(\psi_b)\boldsymbol{\eta} = \begin{bmatrix} \cos\psi_b & -\sin\psi_b & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \sin\psi_b & \cos\psi_b & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \boldsymbol{\eta} \quad (43)$$

Kis értékű ϕ bedöntési, és kis értékű θ bólintószögek esetén, valamint a hajó állandó haladási sebessége $u = u_o = \text{áll.}$ mellett a dinamikus rendszer $\mathbf{x}_b = [\boldsymbol{\eta}_p^T \ \Delta\mathbf{v}^T]^T$ állapotvektorára felírható, hogy

$$\dot{\mathbf{x}}_b = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{G} & -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{N}(u_o) \end{bmatrix} \mathbf{x}_b + \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{M}^{-1} \end{bmatrix} u_b + \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{M}^{-1} \end{bmatrix} w_b + \begin{bmatrix} \mathbf{I} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \mathbf{v}_0 \quad (44)$$

ahol $\mathbf{N}(u_o)$ a Coriolis- és a csillapító erők vektora. A továbbiakban feltételezzük, hogy a hajó hullámzásmentes vízfelületen közlekedik (a függőleges tengely mentén nem változik a helyzete), és $\phi = \phi_0 = 0$, valamint $\theta = \theta_0 = 0$. Ebben az esetben az USV egyenes vonalú és oldalirányú mozgást végez a vízszintes síkban. Az USV korábban meghatározott mozgásegyenletei most az alábbi egyszerűbb alakot veszik fel:

$$\dot{\boldsymbol{\eta}}(t) = \begin{bmatrix} \cos\psi_b & \sin\psi_b & 0 \\ -\sin\psi_b & \cos\psi_b & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{v}_r(t) \quad (45)$$

$$\dot{\mathbf{v}}_r(t) = \mathbf{M}^{-1}(-\mathbf{N}(\mathbf{v}_r)\mathbf{v}_r + \boldsymbol{\tau}_{com} + \mathbf{w}_E) = \mathbf{M}^{-1}(-\mathbf{C}(\mathbf{v}_r)\mathbf{v}_r - \mathbf{D}(\mathbf{v}_r)\mathbf{v}_r + \boldsymbol{\tau}_{com} + \mathbf{w}_E) \quad (46)$$

ahol $\boldsymbol{\eta} = [x \ y \ \psi]^T$, és $\mathbf{v}_r = [u \ v \ r]^T$.

ahol $\boldsymbol{\eta} = [x \ y \ \psi]^T$, és $\mathbf{v}_r = [u \ v \ r]^T$.

Végezetül, az \mathbf{M} inerciamátrix most a következő alakban írható fel:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m - X_{\ddot{u}} & 0 & 0 \\ 0 & m - y_{\ddot{u}} & mx_g - Y_{\dot{r}} \\ 0 & mx_g - Y_{\dot{r}} & I_z - N_{\dot{r}} \end{bmatrix} \quad (47)$$

A korábban bemutatott $\mathbf{C}(\mathbf{v}_r)$ és a $\mathbf{D}(\mathbf{v}_r)$ mátrixokat alapvetően az USV típusa határozza meg. Ha az USV térbeli mozgását szeretnénk modellezni, akkor a vízfelszín hullámzását is figyelembe kell venni, amit leggyakrabban szinuszos jellel szokás modellezni [12]:

$$z = A \sin(\omega t + \varphi_0) \quad (48)$$

ahol az A amplitúdó értéke:

$$A = \sqrt{\frac{2}{n} \sum_{i=1}^n z_i^2(t)} \quad (49)$$

Könnyű belátni, hogy a hajó Oz függőleges tengelye mentén az $a_z(t)$ gyorsulást az alábbi egyenlettel adhatjuk meg:

$$a_z(t) = \ddot{z}(t) = -\omega^2 A \sin(\omega t + \varphi_0) \quad (50)$$

Az UAV-k USV fedélzetére való automatikus leszállása során, hasonlóképpen, mint az UGV fedélzetére leszálláskor, szükséges olyan biztonságos repülési zóna definiálása, ahol az UAV nem ütközhet hajófedélzeti eszközökkel (például antennák, egyéb tornyok stb.). A repülési pálya formájának megválasztása alapvető fontosságú, mert ez alapvetően befolyásolja az UAV repülésbiztonságát és az USV-jármű épségét. A multitoros UAV automatizált leszállása lehetővé teszi a hagyományos hajófedélzeti befogóhálók elhagyását, ami nagyban egyszerűsíti az UAV-k leszállásához szükséges eszközrendszert. Az UAV és az USV dinamikus mozgásegyenleteinek ismeretében már megtervezhetjük a leszállás irányításának folyamatát.

4. Befejezés, eredmények értékelése, kitekintés

E cikk az UAV–UGV- és az UAV–USV-járműrendszerek kooperatív irányításának néhány példáját mutatta be. Az első alkalmazás az UAV-k üzemanyag-utántöltését támogató manőverező UGV-k esetét vizsgálta. E módszer nagyban javítja az UAV-k hadrafoghatóságát, csökkenti az üzemanyaggal való utántöltés és egyéb függesztmények elhelyezésének idejét. Ily módon, az UAV-alkalmazások hatékonysága lényeges mértékben növelhető, míg az UAV-k elvesztésének valószínűsége csökken.

A második alkalmazás egy olyan UAV repülési forgatókönyvet ír le, amikor az UAV felszíni jármű fedélzetén megfelelő módon kialakított leszállóplatformon landol. Előfordulhat, hogy az UAV nem tudja kiengedni a futóműveit, vagy nem tudja kinyitni a leszálláshoz az ejtőernyőjét, és ő maga nem felkészített hasra szállásra, ily módon, a vázolt koncepció nagyban segítheti az UAV-k biztonságos leszállását és azok mentését.

Számos UAV-alkalmazásban a légi jármű hajók fedélzetéről száll fel, és oda is tér vissza. A hajófedélzeti, merev szárnyú UAV-k főleg állami célú, katonai alkalmazásokban jeleskednek. A nem hordozóhajóról indított UAV-k leszállása meglehetősen nehézkes, főként a hálós befogás terjedt el a haditengerészeti erőknél. Ez azonban meglehetősen hely- és eszközigényes leszállási módszer, így abban az esetben, ha multitoros UAV-t használnak, automatizált leszállást végrehajtva az UAV a hajók fedélzetén akár kis helyen és gyakorlatilag egyéb más eszköz nélkül is leszállhat.

Megemlíteni szükséges, hogy eme UAV repülési forgatókönyvek gyakorlati alkalmazása terén még csak a kezdeti lépések történtek meg, ily módon, a cikkben vázolt kooperatív repülési feladatok számítógépes szimulációja, az irányítási rendszer tervezése a következő időszak feladata.

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. 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.
- [4] 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>
- [5] T. W. McLain, P. R. Chandler, S. Rasmussen, M. Pachter, „Cooperative Control of UAV Rendezvous,” *BYU ScholarArchive*, 2001. Online: <https://doi.org/10.1109/ACC.2001.946096>
- [6] 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>
- [7] D. McLean, *Automatic Flight Control Systems*. New York, Prentice-Hall International Ltd., 1990.

- [8] R. C. Nelson, *Flight Stability and Automatic Control*. Boston, McGraw-Hill Companies, Inc., 1998.
- [9] A. Papan, 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>
- [10] 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
- [11] R. W. Pratt szerk., *Flight Control Systems*. Reston, Virginia, American Institute of Aeronautics, and Astronautics, Inc., 2000.
- [12] 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>
- [13] 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>
- [14] 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.
- [15] R. K. Yedavalli, *Flight Dynamics and Control of Aero and Space Vehicles*. Hoboken, NJ, John Wiley & Sons, Ltd., 2020.
- [16] 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>
- [17] 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 Autonomous Vehicles

The largest challenge both in the past and in the upcoming years is the cooperative control of autonomous vehicles. In several relations like UAV–UGV, and UAV–USV there are many scenarios (like close formation control, UAV recce flight missions, UAV refuelling using UGV, UAV landing on moving vehicles like ground or surface vehicles etc.), when autonomous vehicles are forced to cooperate to improve their mission effectiveness and other safety issues. Main goal of the author is to highlight few of those UAV flight scenarios listed above, and to present the main cooperative control strategies.

Keywords: (A)UAV, (A)UGV, (A)USV, autonomous vehicle, cooperative control, optimal control

<p>Prof. Dr. habil. Szabolcsi Róbert egyetemi tanár Óbudai Egyetem Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar Mechatronika és Járműtechnikai Intézet Mechatronika Tanszék</p> <p>szabolcsi.robert@bgk.uni-obuda.hu orcid.org/0000-0002-2494-3746</p>	<p>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</p> <p>szabolcsi.robert@bgk.uni-obuda.hu orcid.org/0000-0002-2494-3746</p>
---	---

