REPÜLÉSTUDOMÁNYI KÖZLEMÉNYEK
32. évfolyam (2020) 1. szám 29–50. • DOI: 10.32560/rk.2020.1.2

Szabolcsi Róbert[1]

Pilóta nélküli légi jármű kis magasságú repülési pályáinak tervezése

A pilóta nélküli légi járművek (UAV-k) európai légtérhasználatával kapcsolatos jogalkotói tevékenység előrehaladtával, és a nemzeti szabályozások megalkotásával a közeljövőben az UAV-rendszerek robbanásszerű elterjedése várható. Az UAV, függetlenül az irányítási módjától, hasonlóan a hagyományos légi járművekhez, a repülési feladat megkezdése előtt felszáll, majd a repülési feladatát végrehajtva leszáll. Ezek a földközeli repülési üzemmódok sohasem veszélytelenek, a kezelők részéről is magas szintű tudást és nagy körültekintést igényelnek. Az UAV-k repülési feladataikat számos küldetésük során, kis magasságokon hajtják végre. Ily módon, amikor fokozottan kell számolni az UAV lehetséges ütközéseinek problémájával, az UAV kis magasságú repüléseinek repülési pályáit úgy kell megtervezni, hogy az ütközések elkerülhetőek legyenek, valamint a repülési pályán repülve megfelelő legyen a repülésbiztonság. A szerző célja bemutatni a kis magasságú repülések néhány lehetséges formáját és azok lehetséges repülési pályáit.

Kulcsszavak: *kis magasságú repülések, terepkövetés, leszállás, repülési pálya tervezése, UAV*

Planning of UAVs' Low Altitude Flight Paths

Regarding development of the UAV regulations at the EU, an intensive legislation process is expected in the EU Member Countries, too. Regardless of the UAV control principle, it must take off to execute missions, and, after successful flight mission, it must land. These flight regimes require from the UAV operators the highest skill levels. Besides there regimes there are many flight missions planned to be executed at low altitudes when UAV collision might happen. The UAV flight path must be planned in a way to avoid collisions, ensuring flight safety criteria. The purpose of the author is to introduce low altitude UAV flights and the paths best serving their flight missions.

Keywords: *low altitude flights, terrain-following, landing, flight path planning, UAV*

[1] Egyetemi tanár, Óbudai Egyetem; e-mail: szabolcsi.robert@uni-obuda.hu, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2494-3746

1. Bevezetés

A pilóta nélküli légi járművek (UAV) repüléseinek várható tömeges megjelenése és elterjedése épített környezetben, veszélyes, de nem elkülönített légterekben, és egyéb szenzitív alkalmazásokban előrevetíti annak igényét, hogy a kiemelten veszélyes repülési fázisokban UAV fedélzeti automatika segítse a kezelők és az üzemeltetők munkáját, főleg a kis magasságokon végrehajtott műveletek során.

Az UAV-repülések mára meglehetősen sokrétűek, de főleg a kis magasságokon végrehajtott műveletek szükségessé teszik, hogy a megfelelő repülésbiztonság elérése érdekében fedélzeti (vagy földi) automatika segítse a kezelő munkáját. Ilyen repülési üzemmódok lehetnek például a felszállás, a leszállás, a kis magasságú terepkövetés, kis repülési magasságokon a valós repülési magasság szabályozása.

A normál repülési üzemmódokat kiegészíthetik a következő vészhelyzeti repülési üzemmódok is: felszínnel történő ütközés megakadályozása, felszíni természetes vagy mesterséges tereptárgyakkal az összeütközés megakadályozása, légi összeütközés elkerülése UAV–UAV-, UAV– nem UAV-viszonylatban, összeütközés elkerülése nem kommunikáló célokkal (például madarak).

Az UAV vészhelyzeti kis magasságú repülésének automatizálása terén külön meg kell említeni a kényszerleszállások automatizálásának kérdéskörét. Az UAV kényszerleszállására számos ok (például kommunikáció elvesztése, adatkapcsolat minőségének leromlása, motor leállása, jegesedés, szélsőséges időjárási viszonyok, szélsőséges turbulenciák kialakulása stb.) miatt is sor kerülhet. Ilyen helyzetekben a vizuális látómezőn túlra tervezett repülések esetén a kezelőt nagyban segítheti, ha a veszélyhelyzet kialakulásakor adott logikai feltételek mellett, az UAV irányítását és leszállítását a fedélzeti automatika hajtja végre.

E repülések kritikus pontja a repülési pálya megtervezése, hiszen főleg a kis UAV-k esetén a vészhelyzeti repülési forgatókönyvek alkalmazásakor előre megtervezett és előre lemodellezett repülési pályákat használunk, amelyek biztosítják az UAV biztonságos földet érését, és igyekeznek minimalizálni a környezetben okozott károkat.

A szerző célja, hogy néhány kitüntetett kis magasságú repülési üzemmódra olyan repülési pályákat adjon meg, amelyek a gyakorlatban a megadott UAV-dinamikához illesztve jól szolgálják a kis magasságú repülések automatizálását.

2. Szakirodalmi áttekintés

A légi járművek automatikus repülésszabályozásában régóta ismert a kis magasságú repülési pályákon a légi jármű automatikus irányítása. E témában korai munkának számít John H. Blakelock műve, aki légi járművek, és kifejezetten irányított rakéták szabályozástechnikájával foglalkozott.[2] Az optimális irányítások elmélete és gyakorlati alkalmazása a repülésszabályozásban is régóta áll a tudósok figyelmének középpontjában. Rabinovich a cirkálórakéták optimális repülési pályáinak tervezését 1966-ban mutatta be.[3]

[2] John H. Blakelock: *Automatic Control of Aircraft and Missiles*. New York, John Wiley & Sons, 1965.
[3] Igor B. Rabinovich: *Optimal Flight Path Design for Cruising Missiles*. Moscow, Russia, Mashinostroenie, 1966.

A repülések során a légi járművek stabilitása, irányíthatósága és kormányozhatósága alapvető fontosságú úgy a mérnökök,[4] mint a hajózók számára.[5] Az automatikus repülésszabályozás rendszerszintű megközelítését Eduard A. Aszlanjan[6] és Alekszandr A. Kraszovszkij[7] mutatták be, amely források részletesen foglalkoznak a repülőgépek, helikopterek és repülő fedélzeti rakéták célba juttatásának lehetséges módszereivel. Donald McLean[8] új alapokra helyezte az automatikus repülésszabályozó rendszerek tervezését és vizsgálatát. Művében a többváltozós irányítási rendszerek állapotteres tárgyalási módszerére hagyatkozik, és e modellekből az egyváltozós rendszermodellekhez csak elfogadott és megengedett egyszerűsítések után jut el.[9] Az automatikus repülésszabályozó rendszerek tervezésével és vizsgálatával foglalkozik még Stevens, Lewis és Johnson könyve is.[10]

Az UAV-k repülési pályáinak tervezésével E. Beseda-Portas, L. de la Torre, J.M. de la Cruz és B. de Andrés-Toro[11] foglalkozik, míg E. Pillar[12] az UAV kényszerleszállásának automatizálását vizsgálja, és ad meg lehetséges robot viselkedési mintákat és vészhelyzeti viselkedési algoritmusokat. M. Vestergren[13] posztmodern, lágyszámítási módszereket vonultat fel a kis méretű UAV leszállása automatizálásának támogatására. Az általa javasolt lineáris leszállópálya két elemből állt, és alapvetően a nagyméretű leszállóhelyre történő leszállást vizsgálta.

Megemlítjük, hogy az UAV-szabályozás területén számos szervezet, például a NATO is hosszú évek óta, meglehetősen kiforrott normarendszert alakított ki, és a NATO STANAG 4586 (2012)[14] szabványban felsorolja a kis magasságú repülések fajtáit is.

Az Európai Unió pedig 2014-ben, széles körű társadalmi vitával egybekötött, aktív szabályozókészítési folyamatot indított el, majd 2019-ben,[15] sikeres éveket maga mögött tudva rendeleteiben részletekbe menően szabályozta az UAV-k használatát.[16]

---

4 Brian Dickinson: *Aircraft Stability and Control for Pilots and Engineers.* London, Sir Isaac Pitman & Sons Ltd., 1968.

5 Tiberiu Hacker: *Flight Stability and Control.* New York, American Elsevier, 1970.

6 Эдуард А. Асланян: *Системы автоматического управления полётом летательных аппаратов, Часть I.* Киев, Киевское Высшее Военное Авиационное Инженерное Училище, 1984.

7 Алексадр А. Красовский – Юрий А. Вавилов – Алексадр И. Сучков: *Системы автоматического управления летательных аппаратов.* Москва, Издание ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского, 1986.

8 Donald McLean: *Automatic Flight Control Systems.* New York – London – Toronto – Sydney – Tokyo – Singapore, Prentice-Hall International Ltd., 1990.

9 Robert C. Nelson: *Flight Stability and Control.* McGraw-Hill Companies, Inc., 1998.

10 Brian L. Stevens – Frank L. Lewis – Eric N. Johnson: *Aircraft Control and Simulation: Dynamics, Control Design and Autonomous Systems.* 3rd Edition, Wiley-Blackwell, 2015.

11 Eva Beseda-Portas et alii: Evolutionary Trajectory Planner for Multiply UAVs in Realistic Scenarios. *IEEE Transactions on Robotics,* 26. (2010), 4. 619–634.

12 Pillar C. S. Eng: *Path Planning, Guidance and Control for a UAV Forced Landing.* Queensland University of Technology, 2011.

13 Magnus Vestergren: *Automatic Takeoff and Landing of Unmanned Fixed Wing Aircraft. A System Engineering Approach.* MSc Thesis, Linköping University, 2016.

14 *NATO STANAG 4586 (Ed. 3) – Standard Interfaces of UAV Control System (UCS) for NATO Interoperability.* 9 November 2012.

15 A Bizottság (EU) 2019/945 felhatalmazáson alapuló rendelete (2019. március 12.) a pilóta nélküli légijármű-rendszerekről és a pilóta nélküli légijármű-rendszerek harmadik országbeli üzembentartóiról.

16 A Bizottság (EU) 2019/947 végrehajtási rendelete (2019. május 24.) a pilóta nélküli légi járművekkel végzett műveletekre vonatkozó szabályokról és eljárásokról.

Az UAV-k repülésdinamikai modelljeinek vizsgálatát, azok számára zárt szabályozási rendszerek tervezését, valamint a repülési pálya szimulációját a MATLAB® program[17] és a Control System Toolbox[18] támogatják.

3. Az UAV kis magasságú repülései

A NATO STANAG 4586 (2012) szabvány az UAV-repülések alábbi repülési üzemmódjainak automatizálását definiálja:

- indítás/felszállás;
- útvonalrepülés;
- megközelítés;
- tereppel való ütközés elkerülése;
- automatikus leszállás.

Hasonlóképpen, az automatikus repülésszabályozó rendszer egyéb fontos képességei az alábbiak:

- forgómozgás szögsebességeinek irányítása;
- térbeli szöghelyzet (dőlés, bólintás, irány) szabályozása;
- repülési magasság szabályozása;
- repülési sebesség szabályozása;
- függőleges sebesség szabályozása;
- útirányszög szabályozása;
- megközelítés (földrajzi szélesség, hosszúság) szabályozása.

Figyelmesen olvasva a fenti felsorolásokat, könnyű belátni, hogy az UAV-k automatikus repülésszabályozásában a szabályozni kívánt üzemmódok és repülési paraméterek nagyfokú hasonlóságot mutatnak a hagyományos légi járművek automatikus repülésszabályozó rendszereinek képességeivel. Másképpen fogalmazva, az UAV-szabályozásokban is érvényesül az igény, hogy az UAV-k repülésbiztonsága a legmagasabb szintű követelményeknek is megfeleljen. E követelmények elérésében segíti az UAV-kezelőket többek között az automatikus repülésszabályozás is.

4. Az UAV repülésimagasság-szabályozó rendszere

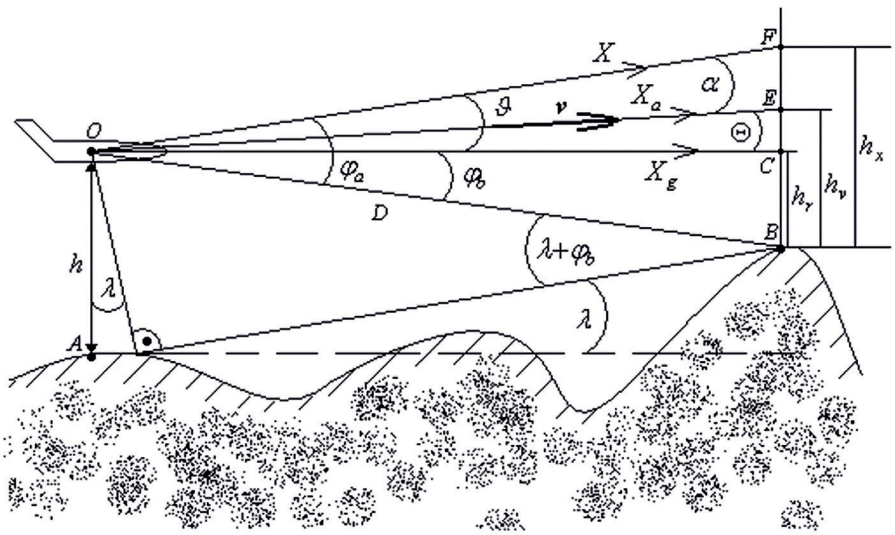
Ismeretes, hogy az UAV repülési magassága létfontosságú repülési paraméter. A korábban felsorolt lehetséges repülési üzemmódok közül a továbbiakban a két legfontosabb üzemmódot, az automatikus terepkövetést, valamint az automatikus leszállást vesszük górcső alá.

[17] *MATLAB R2020a, User's Guide*. The MathWorks Inc., 2020.
[18] *MATLAB R2020a Control System Designer/Control System Toolbox 10.8, User's Guide*. The MathWorks, Inc., 2020.

4.1. Az UAV automatikus terepkövető rendszere

Az UAV terepkövető képessége kiemelkedő fontosságú úgy a felderítési célú (például árvízvédelem, bozót- és erdőtüzek felderítése, precíziós mezőgazdasági alkalmazások, természetvédelem, környezetvédelem, határvédelem, csővezetékek és villamos távvezetékek monitoringja stb.) repülések, mint harcászati célú (cél megközelítése, ellenséges radarok és légvédelmi rakéta egységek elkerülése stb.) repülések esetén. Az UAV kis magasságú terepkövető képessége csökkenti az összeütközés veszélyét, így javítja a repülésbiztonságot.

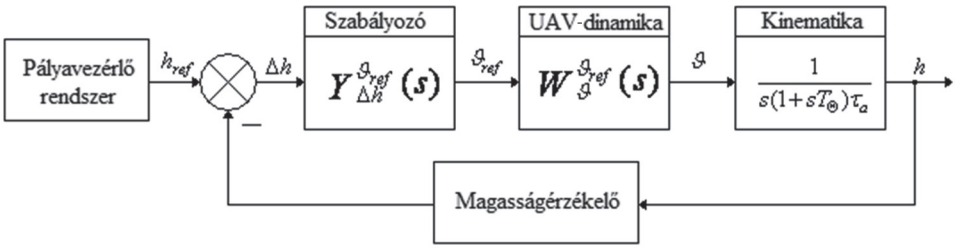
Az UAV kis magasságú repülését vizsgáljuk meg az 1. ábrán.



1. ábra
Légi jármű (UAV) kis magasságú repülése. Forrás: Асланян i. m. (6. lj.) alapján a szerző szerkesztése

Az 1. ábrán alkalmazott jelölések: O – az UAV tömegközéppontja; A, B – felszíni magaslati pontok; D – az UAV és a földfelszíni magaslati pont között aktív (radar, lézer, infra, ultrahang) eszközökkel mért távolság; OX_g – az UAV normál koordináta-rendszerének tengelye; OX – az UAV testkoordináta-rendszerének hossztengelye; OX_a – az UAV aerodinamikai koordináta-rendszerének hossztengelye; ϑ – bólintó szög; α – állásszög; Θ – repülési pályaszög; λ – domborzati szög; $\varphi_a = \varphi_b + \vartheta$ – aktív eszköz sugárnyalábtengelyének az UAV hossztengelyével bezárt szöge; φ_b – aktív eszköz sugárnyalábtengelyének az OX_g hossztengellyel bezárt szöge.

Az UAV kis magasságú terepkövetése megvalósítható a földfelszíntől mért *h* valós repülési magasság irányítása révén. Az UAV automatikus szabályozórendszere ebben az esetben a bólintó szög stabilizálórendszerére épül, amelynek hatásvázlata a 2. ábrán látható.



2. ábra
UAV kis magasságú repülésének zárt szabályozórendszere. Forrás: McLean i. m. (8. lj.), Nelson i. m. (9. lj.), Stevens–Lewis–Johnson i. m. (10. lj.) alapján a szerző szerkesztése

A repülési magasság mérésére számos hagyományos és modern érzékelő és autonóm mérési rendszer áll rendelkezésre. Könnyű belátni, hogy a valós repülési magasság irányításának elvén alapuló rendszer csak és kizárólag abban az esetben használható, ha a földfelszín λ domborzati szöge kis értékű, más szóval, a földfelszínen nincsenek nagy egyenetlenségek. Ha a földfelszín túlzottan tördelt, például nagymértékű hirtelen emelkedések tarkítják, akkor fennáll a veszélye, hogy a valós repülési magasság stabilizálása során az UAV földfelszínbe csapódik, ami akár végzetes következményekkel is járhat. Ennek elkerülésére szolgálhat az a módszer, amikor nem az UAV valós repülési magasságát stabilizáljuk, hanem valamilyen előretartási pontig mérjük a távolságot, mintegy térképezve az UAV előtt elterülő domborzatot.

4.1.1. Terepkövetés az előretartási pontig mért D távolság tartása segítségével

Az 1. ábrát felhasználva az *OAB* háromszögre felírhatjuk, hogy:

$$\frac{D}{sin(\pi/2-\lambda)}=\frac{h}{sin(\varphi_a-\vartheta+\lambda)}. \tag{1}$$

Az (1) egyenlet segítségével a *D* távolság már kifejezhető:

$$D=h\frac{cos\lambda}{sin(\varphi_a-\vartheta+\lambda)}. \tag{2}$$

A (2) egyenlet linearizálása a Taylor-sorfejtés módszerével (kis zavarások módszere) is elvégezhető. A távolság kis értékű megváltozása a következő alakban is felírható:

$$\Delta D=K_1\Delta h+K_2\Delta(\varphi_a-\vartheta)+K_3\Delta\lambda. \tag{3}$$

A (3) egyenlet derivatív együtthatói most az alábbiak lesznek:

$$K_1 = \left(\frac{\partial D}{\partial h}\right)_O = \left(\frac{D}{h}\right)_O, \tag{4}$$

$$K_2 = \left(\frac{\partial D}{\partial \varphi_b}\right)_O = -[D \cdot ctg(\varphi_a - \vartheta + \lambda)]_O, \tag{5}$$

$$K_3 = \left(\frac{\partial D}{\partial \lambda}\right)_O = -\left[D \frac{cos(\varphi_a - \vartheta)}{sin(\varphi_a - \vartheta + \lambda) cos\lambda}\right]_O. \tag{6}$$

Az (5) és a (6) egyenletek alapján könnyű belátni, hogy kis értékű λ esetén $K_2 \cong K_3$. Ha az UAV fedélzeti aktív szenzor nagy sebességgel pásztázza a földfelszínt, azt mondhatjuk, hogy gyors térképezések esetén $\Delta\vartheta \cong 0$ és $\Delta h \cong 0$. Az aktív térképezőeszközök két mintavételezési időpontjában a keresett D távolságokra felírhatók az alábbi egyenletek is:

$$D_1 = h \frac{cos\lambda}{sin(\varphi_{a_1} - \vartheta + \lambda)}, \; D_2 = h \frac{cos\lambda}{sin(\varphi_{a_2} - \vartheta + \lambda)}. \tag{7}$$

Osszuk el a (7) egyenlet első egyenletét annak második egyenletével. A következő kifejezést kapjuk:

$$\frac{D_1}{D_2} = \frac{sin(\lambda - \vartheta) cos\varphi_{a_2} + cos(\lambda - \vartheta) sin\varphi_{a_2}}{sin(\lambda - \vartheta) cos\varphi_{a_1} + cos(\lambda - \vartheta) sin\varphi_{a_1}}. \tag{8}$$

A (8) egyenlet rendezése után kapjuk, hogy:

$$D_1 tg(\lambda - \vartheta) cos\varphi_{a_1} + D_1 sin\varphi_{a_1} = D_2 tg(\lambda - \vartheta) cos\varphi_{a_2} + D_1 sin\varphi_{a_2}. \tag{9}$$

A felszín λ emelkedési szöge a (9) egyenletből a következő lesz:

$$\lambda = \vartheta + arctg\left(\frac{D_2 sin\varphi_{a_2} - D_1 sin\varphi_{a_1}}{D_1 sin\varphi_{a_1} - D_2 sin\varphi_{a_2}}\right). \tag{10}$$

Megmérve a D távolságot, az UAV számára már tervezhető olyan automatikus repülésszabályozó rendszer, amely képes a D_{ref} távolság automatikus tartására, illetve korlátozására. A zárt szabályozás D_{ref}referencia (előírt) értékét az eltérés elve alapján már könnyen megtarthatjuk. A távolságtartás hibajele most a következő alakban írható fel:

$$D_{ref} - D = \frac{\Delta D}{\tau_a v_o}, \tag{11}$$

ahol: $\tau_a = m/\rho vS$ az aerodinamikai időegység.

A fent vázolt módszer egyik fontos hiányossága, hogy az aktív távolságmérő rendszer visszavert jelének vétele sokszor nem megbízható, vagy nem kellő erősségű a visszavert jel, így előfordulhatnak nem megbízható távolságmérések. E hiányosság kiküszöbölésére jól használható az a módszer, amikor nem az UAV alatt a földfelszíntől mért valós repülési magasságot stabilizáljuk, hanem az UAV repülési pályáján a *D* előretartási pontban stabilizáljuk az előre számított, biztonságos repülési magasságot.

4.1.2. Terepkövetés a repülési magasság *B* előretartási pontban történő stabilizálásával

Az UAV repülési magassága előretartási pontban történő stabilizálását vizsgáljuk meg az 1. ábrán. Könnyen belátható, hogy az adott *B* előretartási pontban többféle repülési magasságot is értelmezhetünk. A h_v repülési magasságot az OEB derékszögű háromszögből az alábbi módon határozhatjuk meg:

$$\frac{h_v}{sin(\varphi_a - \alpha)} = \frac{D}{sin(\pi/2 - \Theta)}. \tag{12}$$

A (2) egyenletet helyettesítsük a (12) egyenletbe. Az egyenlet rendezése után kapjuk, hogy:

$$h_v = h\frac{sin(\varphi_a - \alpha)}{sin(\varphi_a - \vartheta + \lambda)}\frac{cos\lambda}{cos\Theta}. \tag{13}$$

Repülésmechanikából ismeretes, hogy $\alpha = \vartheta - \Theta$, ezért a (13) egyenlet a következő alakban írható fel:

$$h_v = h\frac{sin(\varphi_a - \vartheta + \Theta)}{sin(\varphi_a - \vartheta + \lambda)}\frac{cos\lambda}{cos\Theta}. \tag{14}$$

A (14) egyenletet zérus kezdeti feltételek mellett, a munkaponti linearizálás módszerével fejtsük Taylor-sorba. A magasabb rendű differenciálhányadosok teljes összegének elhanyagolásával, megtartva a sorban az elsőrendű deriváltakat kapjuk, hogy:

$$\Delta h_v = K_{1v}\Delta h + K_{2v}\Delta(\varphi_a - \vartheta) + K_{3v}\Delta\lambda + K_{4v}\Delta\Theta, \tag{15}$$

ahol a (15) egyenlet derivatív együtthatói az alábbiak lesznek:

$$K_{1v} = \left(\frac{\partial h_v}{\partial h}\right)_O = \left(\frac{h_v}{h}\right)_O \tag{16}$$

$$K_{2v} = \left(\frac{\partial h_v}{\partial \varphi_b}\right)_O = \left[h_v\frac{sin(\lambda - \Theta)}{sin(\varphi_a - \vartheta + \lambda)sin(\varphi_a - \vartheta + \Theta)}\right]_O \tag{17}$$

$$K_{3v} = \left(\frac{\partial h_v}{\partial \lambda}\right)_O = -\left[h_v \frac{cos(\lambda - \vartheta)}{cos\lambda \cdot sin(\varphi_a - \vartheta + \lambda)}\right]_O \tag{18}$$

$$K_{4v} = \left(\frac{\partial h_v}{\partial \Theta}\right)_O = \left[h_v \frac{cos(\varphi_a - \vartheta)}{cos\Theta \cdot sin(\varphi_a - \vartheta + \Theta)}\right]_O \tag{19}$$

Az UAV szabályozórendszerében (lásd a 2. ábrát) a *B* előretartási pontban mért h_v repülési magasság irányításához (szabályozás alsó, veszélyes repülési magasságérték korlátozással) használhatjuk az alábbi hibajelet is:

$$h_{v\,ref} - h_v = \frac{\Delta h_v}{\tau_a v_o} \tag{20}$$

ahol $\tau_a = m/\rho vS$ az aerodinamikai időegység.
A hibajel (15) egyenlettel megadott linearizált alakjában új tagként megjelent $\Delta\Theta$ pályaszögváltozás, ami kis értékű valós repülési magasságokon lényeges mértékben javítja az UAV repülésbiztonságát. Kis értékű Θ pályaszögek és a domborzat kis értékű λ emelkedési szögeire a (15) egyenlet a következő alakban adható meg:

$$\Delta h_v = K_{1v}\Delta h + K_{2v}\Delta(\varphi_a - \vartheta) + K_{3v}\Delta(\lambda - \Theta) \tag{21}$$

A (21) egyenlet alapján könnyen belátható, hogy az adott vezérlési törvény megvalósításához – ismert φ_a és λ szögek esetén – szükséges a *h* valós repülési magasság és a ϑ bólintási szög mérése, valamint a Θ pályaszög számításához szükséges még állásszög mérése is.

Az 1. ábrán jól látható, hogy az UAV terepkövetése megvalósítható a *B* előretartási pontban *hr* repülési magasság irányítása, annak szabályozása és korlátozása útján is. Az *OBC* háromszög alapján igaz, hogy:

$$h_r = D \cdot sin(\varphi_a - \vartheta) \tag{22}$$

A (2) egyenletet most helyettesítsük a (22) egyenletbe:

$$h_r = h\frac{cos\lambda \cdot sin(\varphi_a - \vartheta)}{sin(\varphi_a - \vartheta + \lambda)} \tag{23}$$

A (23) nemlineáris egyenletet – zérus kezdeti feltételek mellett – a munkaponti linearizálás módszerével fejtsük Taylor-sorba. A magasabb rendű differenciálhányadosok teljes összegének elhanyagolásával kapjuk, hogy:

$$\Delta h_r = K_{1r}\Delta h + K_{2r}\Delta(\varphi_a - \vartheta) + K_{3r}\Delta\lambda \tag{24}$$

ahol a (24) egyenlet derivatív együtthatói az alábbiak:

$$K_{1r} = \left(\frac{\partial h_r}{\partial h}\right)_O = \left(\frac{h_r}{h}\right)_O \tag{25}$$

$$K_{2r} = \left(\frac{\partial h_r}{\partial \varphi_b}\right)_O = \left[h_r \frac{\sin\lambda}{\sin(\varphi_a - \vartheta)\sin(\varphi_a - \vartheta + \lambda)}\right]_O \tag{26}$$

$$K_{3v} = \left(\frac{\partial h_v}{\partial \lambda}\right)_O = -\left[h_v \frac{\cos(\varphi_a - \vartheta)}{\cos\lambda \cdot \sin(\varphi_a - \vartheta + \lambda)}\right]_O \tag{27}$$

Végezetül, az 1. ábrán a h_x repülési magasság az OBF háromszög segítségével, a *B* előretartási pontban felírható, mint:

$$\frac{h_x}{\sin\varphi_a} = \frac{D}{\sin(\pi/2 - \vartheta)} \tag{28}$$

A (2) egyenletet most helyettesítsük a (28) egyenletbe:

$$h_x = h\frac{\cos\lambda \cdot \sin\varphi_a}{\cos\vartheta \cdot \sin(\varphi_a - \vartheta + \lambda)} \tag{29}$$

A (29) egyenlet nemlineáris függvény, amit zérus kezdeti feltételek mellett a munkaponti linearizálás módszerével Taylor-sorba fejthetünk:

$$\Delta h_x = K_{1x}\Delta h + K_{2x}\Delta\varphi_a + K_{3x}\Delta\lambda + K_{4x}\Delta\vartheta \tag{30}$$

ahol a (30) egyenletben szereplő derivatív együtthatók az alábbi egyenletekkel adhatók meg:

$$K_{1x} = \left(\frac{\partial h_x}{\partial h}\right)_O = \left(\frac{h_x}{h}\right)_O \tag{31}$$

$$K_{2x} = \left(\frac{\partial h_v}{\partial \varphi_a}\right)_O = \left[h_x \frac{\sin(\lambda - \vartheta)}{\sin(\varphi_a - \vartheta + \lambda)\sin\varphi_a}\right]_O \tag{32}$$

$$K_{3x} = \left(\frac{\partial h_x}{\partial \lambda}\right)_O = -\left[h_x \frac{\cos(\varphi_a - \vartheta)}{\cos\lambda \cdot \sin(\varphi_a - \vartheta + \lambda)}\right]_O \tag{33}$$

$$K_{4v} = \left(\frac{\partial h_x}{\partial \vartheta}\right)_O = \left[h_x \frac{\cos(\varphi_a + \lambda)}{\cos\vartheta \cdot \sin(\varphi_a - \vartheta + \lambda)}\right]_O \tag{34}$$

A (15), a (24) és a (30) egyenletekkel megadott vezérlési törvények alkalmazása természetesen előnyös, mert azok nem az UAV alatt mért valós repülési magasság irányítására koncentrálnak, hanem prediktív, előrelátó képességűek, mert a repülési magasságot előretartási pontban számítják. Ily módon, az esetleges földfelszíni ütközés valószínűsége a megengedett érték alá csökkenthető, lényeges módon javítva a repülés- és vagyonbiztonságot.

4.2. Repülési pálya tervezése az UAV automatikus leszállítórendszere részére

A légi járművek, többek között az UAV-k repülésének egyik leginkább veszélyesnek mondható repülési fázisa a leszállás. A leszállást számos módon végre lehet hajtani. A legegyszerűbb leszállási mód talán a hasra szállás. Ez a leszállási eljárás az UAV-kezelőtől nagyfokú képzettséget és gyakorlatot igényel, de a megerősített törzsű UAV-k leszállása ily módon egyszerű körülmények mellett is sikeresen végrehajtható. A módszer sajátossága, hogy a törzs megerősítése lényeges mértékben növeli a felszálló tömeget, így csökkenti az UAV lehetséges hasznos terhének tömegét. Ha a leszállás során az UAV sérül, akkor rendszerint az orr-részen elhelyezett motor vagy a légcsavarlapát sérül, ami lényeges mértékben korlátozza, esetleg lehetetlenné teszi az UAV ismételt felszállását.

A kis és a közepes UAV-kategóriában gyakran alkalmazott az ejtőernyős leszállás is. E módszer sajátossága, hogy a leszálló-ejtőernyő kinyitása után a földet érésig az UAV gyakorlatilag irányítatlanul, szabadon ereszkedik. Bár ebben az esetben lényegesen csökkenthető a földet érés sebessége, de még így is fennáll a durva leszállás esélye és veszélye, amikor az UAV sárkányszerkezete megsérül. Könnyű belátni, hogy ez a módszer nem alkalmazható akkor, ha az UAV bevetése erősen tördelt felszíni (közepes és magashegységek, sziklás és kőtörmelékes talaj) környezetben valósul meg.

Főleg haditengerészeti (hajófedélzeti) alkalamzású UAV-k esetén széles körben használt a hálós befogás, amikor az UAV szándékosan belerepül a megfogóhálóba, és a megfelelő helyen elhelyezett szerkezettel (kampóval) beleakad abba és fennakad azon. Ha ez nem történik meg, akkor az UAV a hajófedélzetre zuhan, és komolyan megsérülhet.

A leszállóhely megközelítését és a légi járművek leszállását gyakran műszeres leszállítórendszerek (ILS/MLS)[19] segítik, amelyek főleg a hagyományos, nagy méretű légi járművek számára nyújtanak segítséget. E rendszerek jellemzője, hogy jelentős földi rádiótechnikai infrastruktúra (iránypálya adó, siklópálya adó, irányadó rádióállomások stb.) kiépítését követelik meg, és a légi járművek fedélzetén szintén ki kell építeni a szükséges közelnavigációs és leszállító vevőberendezéseket.

Könnyű belátni, hogy a kis méretű UAV-k a műszaki képességeik és a repülési teljesítményeik, valamint költségokok miatt sem képesek a hagyományos rádiótechnikai leszállítórendszerek segítségével végrehajtani a leszállást.

A 3. ábrán a HM EI Zrt.[20] és a HM Currus Zrt.[21] egy korábbi fejlesztése látható. Az Ikran felderítési célú UAV volt, amelynek a felszálló tömege 16-18 kg volt, ami még a kis UAV-kategória felső határa alatti. Az UAV merev futóművel rendelkezett, amelyről a felszállást, és amelyre a leszállást végrehajtotta.

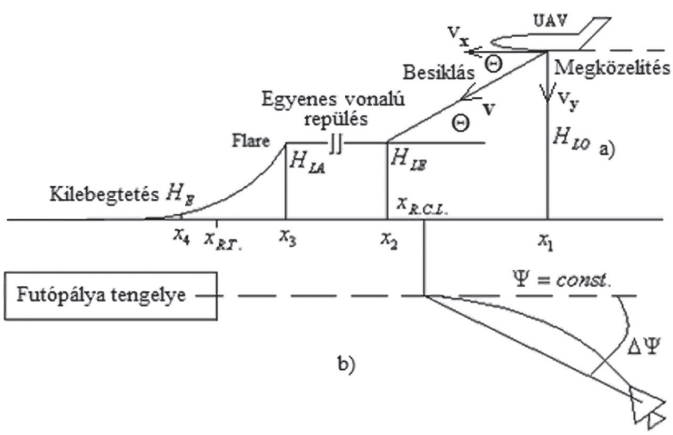
[19] Instrument Landing System/Microwave Landing System.
[20] Honvédelmi Minisztérium Elektornikai Logisztikai és Vagyonkezelő Zrt.
[21] Honvédelmi Minisztérium Currus Gödöllői Harcjárműtechnikai Zrt.

3. ábra
Az Ikran UAV leszállása. Forrás: PNR – Pilóta Nélküli Repülőeszközök. Elérhető: www.hmei.hu/kutatas-fejlesztes/#PNR (A letöltés dátuma: 2020. 03. 03.)

Mint az a 3. ábrán is látható, az UAV akár füves repülőterekről is üzemeltethető, és futóműve segítségével megbízhatóan manőverezik a repülőtéren, valamint felszállása és leszállása is könnyen és megbízhatóan automatizálható.

4.2.1. UAV leszállóhely-megközelítése és leszállása ívelt repülési pályán

Az UAV leszállóhely-megközelítő és leszállómanővere repülési pályájának egyik lehetséges formája, a leszállás egyik lehetséges stratégiája egy, a számítások alapját képező, hipotetikus UAV esetén a 4. ábrán látható. Vizsgálatainkat most az UAV hosszirányú irányítására korlátozzuk, és feltételezzük, hogy az UAV bedöntés nélkül ($|\gamma| = 0^0$) és megadott irányszögön ($\Psi = const.$) közelíti meg a leszállópályát.



4. ábra
Az UAV-leszállópálya jellemzői és a leszállás repülési fázisai. Forrás: Асланян i. m. (6. lj.) alapján a szerző szerkesztése

Az UAV a leszállást az alábbi gondolatmenet mentén hajtja végre:

a) Az UAV a leszállóhelyet a $H_{LO} = 20$ *m* repülési magasságon közelíti meg. A leszállóhely megközelítésének vízszintes repülési sebessége $v = 20$ *m/s*.

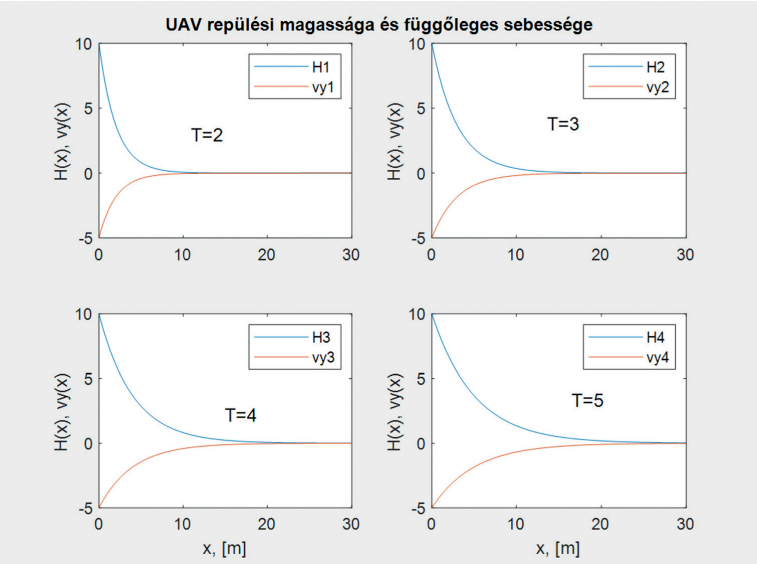
b) A $H = H_{LO}$ repülési magasságon, a földet érés helyétől mért $x = x_1$ helyen a repülési sebesség csökkentésével, és az UAV megfelelő negatív értékű bólintási szögének létrehozásával elkezdődik a besiklás. A manőverbe belépéskor és közvetlenül azt követően az UAV repülési sebessége $v = 18$ *m/s* értékre csökken. Az $x_2 \leq x \leq x_1$ helyen az UAV magassága a $H(x) = H_{LO}(1-kx)$ összefüggés szerint, lineárisan csökken a $H = H_{Le} = 10$ *m* repülési magasságig. Tekintettel arra, hogy a leszállóhely fizikai mérete rendszerint korlátozott, feltételezzük, hogy $\Delta x = x_1 - x_2 = 100$ *m*. A besiklás $\Theta \cong 6^0$ pályaszögű repülési pályán történik. Ekkor az UAV vízszintes repülési sebessége, $v_x \cong 17{,}90$ m/s, míg a függőleges repülési sebesség értéke $v_y \cong 1{,}89$ m/s. Az UAV ezen a pályaszakaszon t ≅ 5,58 s idő alatt halad végig.

c) Az $x_3 \leq x \leq x_2$ helyen az UAV a $H = H_{LE} = H_{LA} = 10$ *m* állandó repülési magasságon $v = v_x \cong 17{,}90$ m/*s* repülési sebességgel egyenes vonalú, vízszintes repülést hajt végre.

d) Ha korlátozott a rendelkezésre álló leszállóhely mérete, ami rendszerint előfordul, akkor az $x = x_3 = x_2$ koordinátájú helyen elkezdődik az UAV repülési magasságának a $H(x) = H_{LA} \cdot e^{-\frac{x}{T}}$ függvény szerinti csökkentése. Ebben az esetben a függőleges repülési sebesség $v_y(x) = H_{LA} \cdot (-\frac{1}{T})\, e^{-\frac{x}{T}} = -v_{y_o} e^{-\frac{x}{T}}$ lesz. A kilebegtetés a $H(x) = 0{,}2$ *m* magasságon fejeződik be, amikor a hajtómű teljesítménye alapjárati értékre csökken, és az UAV kis értékű pozitív bólintó szög mellett földet ér. A földet érés pillanatában az UAV függőleges repülési sebességének maximális értéke $v_{y_{max}}(x) = -0{,}1$ m/*s*.

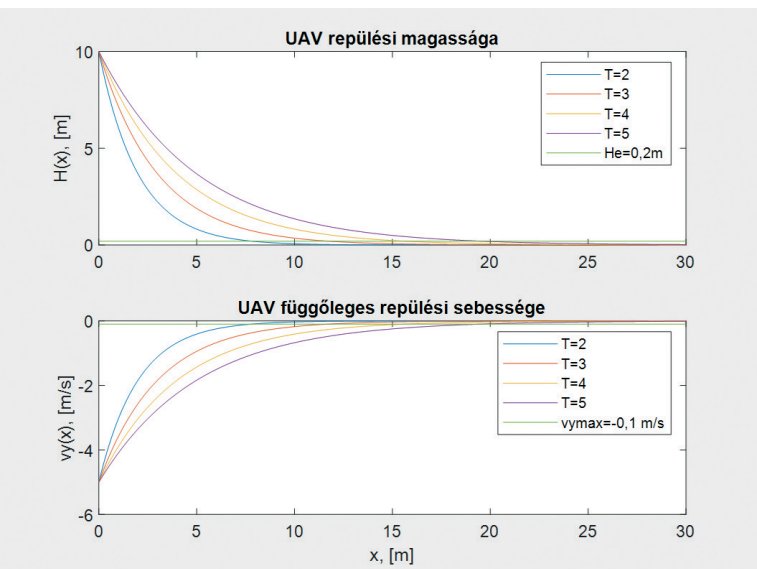
Az UAV leszállásának tervezésekor figyelembe kell venni a rendelkezésre álló leszállóhely fizikai méreteit is. Ha a leszálláshoz rendelkezésre álló hely mérete erősen korlátozott, akkor az UAV számára olyan pályát kell tervezni, amelyen az UAV repülése és viselkedése agresszív. Más szóval, az UAV leszállítórendszere nem enged meg nagy eltéréseket a referencia-leszállópályától, és az UAV repülési paramétereinek (függőleges terhelési többes, függőleges sebesség) felső értékei közelítik azok megengedett maximális értékeit. Az UAV exponenciális repülési pályaszakasza különféle *T* értékek mellett az 5. ábrán látható.[22]

[22] *MATLAB R2020a, User's Guide*. i. m. (17. lj.)



5. ábra
Az UAV repülési paraméterei leszálláskor. Forrás: MATLAB-script: Szabolcsi R.

Az 5. ábrán látható UAV repülési pályaszakasz jellemzőinek jobb áttekintéséhez és megértéséhez tekintsük meg a 6. ábrát.



6. ábra
Az UAV repülési paraméterei leszálláskor. Forrás: MATLAB-script: Szabolcsi R.

Az 5. és a 6. ábrákon jól látható, hogy a *T* paraméter megfelelő megválasztásával az UAV leszállásakor biztosítható a megfelelő repülési pálya. A *T* növelésével az exponenciális pálya meredeksége és a függőleges sebesség is csökken, viszont növekszik a megtett út, vagyis hosszabb futópályával kell számolnunk a leszállás során.

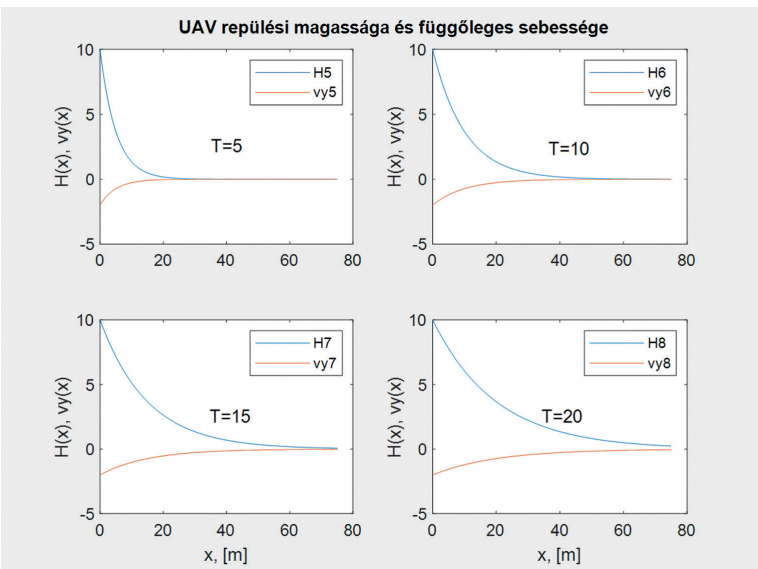
Az 5. és a 6. ábrák alapján a repülési pálya exponenciális fázisában a H(x) = 0,2 m repülési magasság eléréséig megtett út már könnyen számítható:

1. táblázat
Leszállópálya adatai. Forrás: a szerző szerkesztése

T	2	3	4	5
x, [m]	7,6	11,6	15,7	19,7

Ha az UAV leszállásához rendelkezésre álló hely ezt lehetővé teszi, akkor olyan repülési pályaszakaszokat kell terveznünk, amelyeken az UAV nem agresszív módon viselkedik: a repülési pályától nagyobb eltérések is megengedettek, ily módon az UAV irányítása során annak sárkányszerkezetére jóval kisebb légerők és jóval kisebb nyomatékok hatnak.

Az UAV exponenciális repülési pályaszakasza különféle *T* értékeit most is heurisztikus úton választjuk meg. Követve az UAV korábban vázolt repülési pályájának viselkedését, növeljük meg az exponenciális repülési pálya *T* paraméterét. A számítógépes szimuláció eredményei a 7. ábrán láthatók.



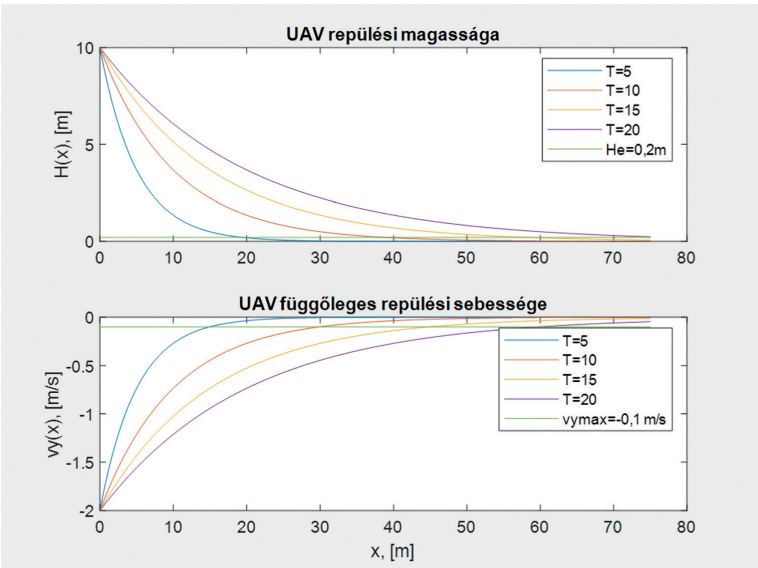
7. ábra
Az UAV repülési paraméterei leszálláskor. Forrás: MATLAB-script: Szabolcsi R.

A 7. ábra alapján az UAV leszállása során a repülési pálya exponenciális fázisában a $H(x) = 0{,}2\ m$ repülési magasság eléréséig megtett út könnyen kiszámítható.

2. táblázat
Leszállópálya adatai. Forrás: a szerző szerkesztése

T	5	10	15	18
x, [m]	19,7	38,9	55,7	74,6

Az UAV exponenciális repülési pályaszakaszának földfelszínre vetített hossza a *T* paraméter növekedésével fokozatosan növekszik. A 7. ábrán látható UAV repülési pályaszakasz jellemzőinek jobb áttekintéséhez és megértéséhez tekintsük meg a 8. ábrát.



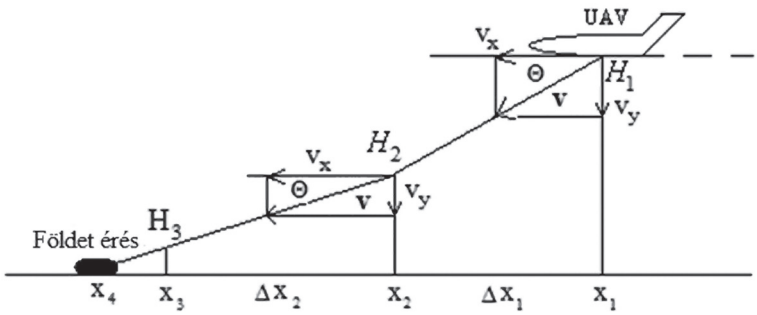
8. ábra
Az UAV repülési paraméterei leszálláskor. Forrás: MATLAB-script: Szabolcsi R.

A 7. és 8. ábrákon jól látható, hogy a *T* paraméter megfelelő megválasztásával az UAV leszállásakor biztosítható a megfelelő repülési pálya. A 6. és 8. ábrákon bemutatott UAV-pályák tovább változtathatók, és szükség, valamint igény szerint még módosíthatók.

Az UAV repülésszabályozó rendszere tervezőinek számos nyílt forráskódú UAV-robotpilóta áll rendelkezésre (például Paparazzi UAV Autopilot; UAV Arduino; Embenton Veronte UAV Autopilot, Airelectronics UAV Autopilot stb.), amelyek az UAV-üzemeltetők és -kezelők által szabadon kiegészíthetők, a beépített eszköztárai fejleszthetők, új pályageometriákat adhatunk az alapértelmezetten meglévő repülési pályákhoz.

4.2.2. UAV leszállóhely-megközelítése és leszállása egyenes vonalú siklópályán

Az ívelt leszállópályák tervezésével kapcsolatos nehézségek elkerülése érdekében használhatunk két vagy több lineáris szakaszból álló siklópályát is.[23] A 9. ábrán egy három szakaszból álló leszállópályát láthatunk.



9. ábra
Az UAV földet érése. Forrás: Vestergren i. m. (13. lj.) alapján a a szerző szerkesztése

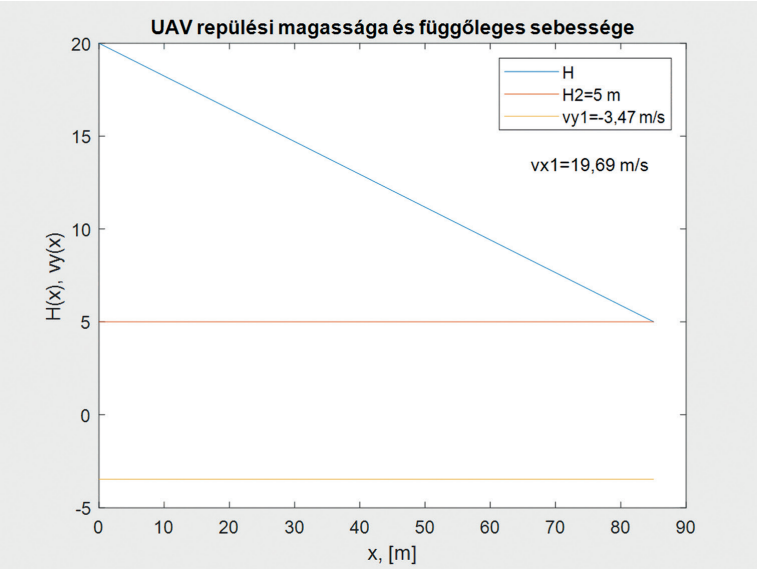
Az egyes pályaszakaszokon az UAV repülési paraméterei (sebesség, függőleges sebesség, megtett út) az elvárt módon változnak. Az UAV a leszállást most az alábbi módon hajtja végre:

a) A földet érés helyétől mért $x \geq x_1$ távolságig az UAV állandó $H = H_1 = 20$ *m* repülési magasságon, állandó v = 20 *m/s* sebességgel vízszintes repülést hajt végre. b) A földet érés helyétől mért $x = x_1$ távolságon és $H = H_1$ repülési magasságon, a megfelelő negatív értékű bólintó szög létrehozásával az UAV $\Theta_1 = 10^0$ értékű pályaszögön süllyedni kezd a függőleges tengely mentén. Az $x_2 \leq x \leq x_1$ koordinátájú helyeken az UAV mozgásegyenlete a következő alakban írható fel:

$$H(x) = H_1 \cdot (1 - k_1 x). \tag{35}$$

A függőleges repülési sebesség értéke a $H = H_2 = 5$ *m*-ig tartó pályaszakaszon $v_y \cong -3{,}47$ *m/s*, a vízszintes repülési sebesség $v_x \cong 19{,}69$ *m/s*. Az első pályaszakaszon megtett út $\Delta x1 \cong 85$ *m*, amelynek megtételéhez $t \cong 4{,}32$ *s* idő szükséges. A pálya meredekségét a $k_1 = 0{,}008823529$ értékű együttható határozza meg. Az első repülési pályaszakasz a 10. ábrán látható.

[23] Vestergren i. m. (13. lj.)

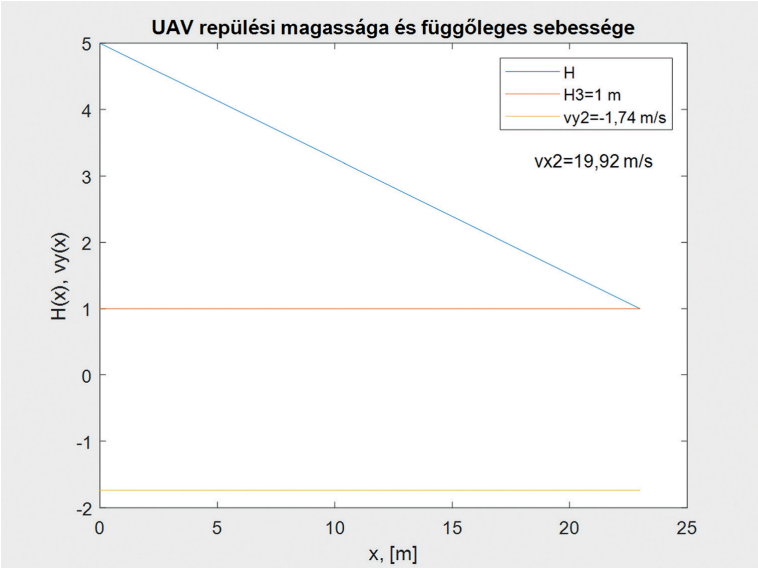


10. ábra
Az UAV egyenes vonalú siklópályája – 1. szakasz. Forrás: MATLAB-script: Szabolcsi R.

b) A földet érés helyétől mért $x = x_2$ távolságon és $H = H_2$ repülési magasságon, a megfelelő negatív értékű bólintó szög létrehozásával az UAV most $\Theta_2 = 5^0$ értékű pályaszögön süllyed a függőleges tengely mentén. Az $x_3 \leq x \leq x_2$ koordinátájú helyeken az UAV mozgásegyenlete a következő alakban írható fel:

$$H(x) = H_2 \cdot (1 - k_2 x). \tag{36}$$

A függőleges repülési sebesség értéke a $H = H_3 = 1$ *m*-ig tartó pályaszakaszon $v_y \cong -1{,}74$ *m/s*, a vízszintes repülési sebesség $v_y \cong 19{,}92$ *m/s*. A második pályaszakaszon megtett út $\Delta x_2 \cong 23$ *m*, aminek megtételéhez t ≅ 1,15 *s* idő szükséges. A pálya meredekségét a $k_2 = 0{,}034782608$ értékű együttható határozza meg. Az UAV-leszállópálya második repülési szakasza a 11. ábrán látható (MATLAB Control System Toolbox 10.8).



11. ábra
Az UAV egyenes vonalú siklópályája – 2. szakasz. Forrás: MATLAB-script: Szabolcsi R.

c) A földet érés helyétől mért $x = x_3$ távolságon és $H = H_3$ repülési magasságon, a megfelelő negatív értékű bólintó szög létrehozásával az utolsó pályaszakaszon az UAV $\Theta_1 = 1{,}5^0$ értékű pályaszögön süllyed. Az $x_4 \leq x \leq x_3$ koordinátájú helyeken az UAV mozgásegyenlete a következő alakban írható fel:

$$H(x) = H_3 \cdot (1 - k_3 x) \tag{37}$$

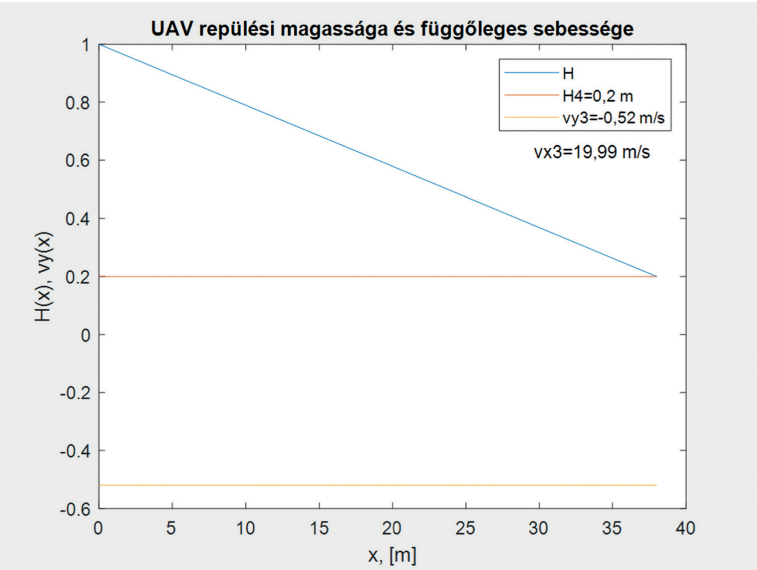
A függőleges repülési sebesség értéke a $H = H_3 = 1\ m$-ig tartó pályaszakaszon $v_y \cong -0{,}52\ m/s$, a vízszintes repülési sebesség $v_x \cong 19{,}99\ m/s$. A harmadik pályaszakaszon megtett út $\Delta x_2 \cong 38\ m$, amelynek megtételéhez $t \cong 1{,}92\ s$ idő szükséges. A pálya meredekségét a $k_3 = 0{,}021052631$ értékű együttható határozza meg. Az UAV-leszállópálya harmadik repülési szakasza a 12. ábrán látható (MATLAB Control System Toolbox 10.8).

A 12. ábrán jól látható, hogy a harmadik repülési pályaszakaszon már elég kicsi a függőleges sebesség ahhoz, hogy egy egyszerű gázlevétellel csökkentve a hajtómű vonó(toló)erejét, az UAV sikeres leszállása már végrehajtható.

A H = H4 = 20 m repülési magasságról végrehajtva a leszállást az UAV vízszintes síkra vetített repülési pályahossza közel L ≅ 150 m, és a megadott repülési magasságról a földet érésig a leszállás ideje t ≅ 7,5 s. Ha az UAV repülését repülőterekről irányítják, ez a leszállópálya könnyen biztosítható.

Ha viszont a földrajzi környezet és annak korlátozott volta nem teszi lehetővé az UAV biztonságos leszállását, akkor csökkenteni kell a leszállópálya méreteit, például városi környezetben

UAV kényszerleszállásának automatizálásakor. A leszállóhelyigény csak akkor csökkenthető, ha az UAV lényegesen agresszívebb manővert hajt végre: nagyobb függőleges sebességgel süllyed a leszállópályán, és nagyobb függőleges sebességgel ér földet a leszállás helyén, ami nagyobb igénybevételnek teszi ki a futóműveket.



12. ábra
Az UAV egyenes vonalú siklópályája – 3. szakasz. Forrás: MATLAB-script: Szabolcsi R.

A gyakorlatban felmerül a kérdés, hogy milyen módszerrel mérhető a leszállópálya harmadik szakaszán a földfelszíntől mért repülési magasság?! E repülésimagasság-tartományban a valós repülési magasság mérésére jól használható például a HC-SR04 ultrahangos magasságmérő, amely 0,3 *cm* értékű felbontással, 2 *cm* ≤ *L* ≤ 400 *cm* tartományon képes érzékelni a távolságot. A HC-SR04 ultrahangos távolságmérő az Arduino vezérlővel képes együttműködni, mérete, tömege és villamosenergia-igénye kicsi, tehát távolság (valós repülési magasság) mérésére jól használható akár UAV-k fedélzetén is[24]

5. Következtetések

A cikk az UAV-k kis magasságú repülésének automatizálásával foglalkozik. Napjainkban az UAV-k (felderítési célú UAV-k, autonóm légi taxik stb.) – várhatóan – egyre szélesebb körben nyernek majd alkalmazást városi környezetben is, ami magától értetődővé teszi, hogy az UAV-kezelők munkáját jól segítheti és a repülésbiztonságot is lényeges mértékben javíthatja az UAV fedélzeti robotpilóta.

[24] *Complete Guide for Ultrasonic Sensor HC-SR04 with Arduino.* Elérhető: https://randomnerdtutorials.com/complete-guide-for-ultrasonic-sensor-hc-sr04/ (A letöltés dátuma: 2020. 03. 09.)

Az UAV kis magasságú repülések egyik tipikus esete a kis magasságú terepkövetés, amely során az UAV igyekszik elkerülni az összeütközést a természetes vagy a mesterséges, épített tereptárgyakkal.

A kis magasságú repülések egy másik formája az a repülés, amikor a bevetési területet a lehető legkisebb, de még biztonságos repülési magasságban kell megközelíteni, mert az UAV-nek észrevétlennek kell maradnia (például határőrizeti járőröző repülések, katonai felderítési feladatok stb.). Könnyű belátni, hogy ebben az esetben is lényeges mértékben javulhat a repülésbiztonság, és javulhatnak az UAV bevetésének sikerességi mutatói.

Felhasznált irodalom

Асланян, Эдуард А.: *Системы автоматического управления полётом летательных аппаратов, Часть I.* Киев, Киевское Высшее Военное Авиационное Инженерное Училище, 1984.

Beseda-Portas, Eva – Luis de la Torre – Jesús M. de la Cruz – Bonifacio de Andrés-Toro: Evolutionary Trajectory Planner for Multiply UAVs in Realistic Scenarios. *IEEE Transactions on Robotics,* 26. (2010), 4. 619–634. DOI: https://doi.org/10.1109/tro.2010.2048610

Blakelock, John H.: *Automatic Control of Aircraft and Missiles.* New York, John Wiley & Sons, 1965.

Dickinson, Brian: *Aircraft Stability and Control for Pilots and Engineers.* London, Sir Isaac Pitman & Sons Ltd, 1968.

Eng, Pillar C. S.: *Path Planning, Guidance and Control for a UAV Forced Landing.* Queensland, University of Technology, 2011.

Hacker, Tiberiu: *Flight Stability and Control.* New York, American Elsevier, 1970.

Красовский, Алексадр А. – Юрий А. Вавилов – Алексадр И. Сучков: *Системы автоматического управления летательных аппаратов.* Москва, Издание ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского, 1986.

MATLAB R2020a Control System Designer/Control System Toolbox 10.8, User's Guide. The MathWorks, Inc., 2020.

MATLAB R2020a, User's Guide. The MathWorks Inc., 2020.

McLean, Donald: *Automatic Flight Control Systems.* New York – London – Toronto – Sydney – Tokyo – Singapore, Prentice-Hall International Ltd., 1990.

NATO STANAG 4586 (Ed. 3) – Standard Interfaces of UAV Control System (UCS) for NATO Interoperability. 9 November 2012.

Nelson, Robert C.: *Flight Stability and Control.* McGraw-Hill Companies, Inc., 1998.

Rabinovich, Igor B.: *Optimal Flight Path Design for Cruising Missiles.* Moscow, Russia, Mashinostroenie, 1966.

Stevens, Brian L. – Frank L. Lewis – Eric N. Johnson: *Aircraft Control and Simulation: Dynamics, Control Design and Autonomous Systems.* 3rd Edition, Wiley-Blackwell, 2015. DOI: https://doi.org/10.1002/9781119174882

Vestergren, Magnus: *Automatic Takeoff and Landing of Unmanned Fixed Wing Aircraft. A System Engineering Approach.* MSc Thesis, Linköping University, 2016.

Jogi források

A Bizottság (EU) 2019/945 felhatalmazáson alapuló rendelete (2019. március 12.) a pilóta nélküli légijármű-rendszerekről és a pilóta nélküli légijármű-rendszerek harmadik országbeli üzembentartóiról

A Bizottság (EU) 2019/947 végrehajtási rendelete (2019. május 24.) a pilóta nélküli légi járművekkel végzett műveletekre vonatkozó szabályokról és eljárásokról

Internetes források

Complete Guide for Ultrasonic Sensor HC-SR04 with Arduino. https://randomnerdtutorials.com/complete-guide-for-ultrasonic-sensor-hc-sr04/ (A letöltés dátuma: 2020. 03. 09.)

PNR – Pilóta Nélküli Repülőeszközök. Elérhető: www.hmei.hu/kutatas-fejlesztes/#PNR (A letöltés dátuma: 2020. 03. 03.)