

Szabolcsi Róbert

Multirotoros pilóta nélküli légi járművek háromdimenziós repülési pályáinak számítógépes tervezése és szimulációja

[DOI 10.17047/HADTUD.2020.30.4.133](https://doi.org/10.17047/HADTUD.2020.30.4.133)

A pilóta nélküli légi járművek (UAVk) repülése során, főként városi, épített környezetben a felszállás és a leszállás során a repülési pálya megtervezése és a lehetséges repülési pályák közül a leginkább megfelelőnek a kiválasztása kiemelkedően fontos és egyben kritikus feladat is. A megfelelő repülési pálya megtervezésekor elsősorban tekintettel kell lennünk a repülésbiztonságra, valamint a repülési feladat sikeres végrehajtására is. Az UAVk repülési pályáinak tervezése különösen fontos akkor, ha úgy a felszálló-, mint a leszállóhelyen korlátozott fizikai méretek állnak rendelkezésünkre, így adott esetben, akár extrém leszállópályák tervezésére is szükségünk lehet. A szerző célja olyan háromdimenziós (3D) repülési pályák számítógépes megtervezése, amelyek alkalmasak lehetnek akár multirotoros, akár hagyományos, merevszárnyú elrendezéssel bíró UAVk fel- és leszállásának végrehajtására úgy kézi, mint automatikus irányítások esetén is.

KULCSSZAVAK: multirotoros UAV, városi alkalmazások, művelési területi katonai alkalmazások, 3D pályatervezése, UAV fel- és leszállása

Computer Design and Simulation of three-dimensional Flight Paths of Multi-Rotor UAVS

The design and simulation of the flight paths of unmanned aerial vehicles (UAVs) conducting flight missions like take-off or landing in urban areas, or selection of proper flight paths comprise an important and critical task. During UAV flight path design a designer must be driven by flight safety regulations and norms, moreover, the successful flight mission also impacts the flight path design and the selection of the proper flight paths. The UAV flight path design and selection is an important issue if both the take-off and the landing

Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar – Óbuda University, Donát Bánki Faculty of Mechanical and Safety Engineering; e-mail: szabolcsi.robort@bkgk.uni-obuda.hu; <https://orcid.org/0000-0002-2494-3746>

manoeuvres are conducted in limited spaces, and an extreme flight path selection is required. The objective of the author is to design the three-dimensional (3D) flight paths proper for multicopter and fixed-wing UAVs' take-off and landing manoeuvres both for manual and automated landings.

KEYWORDS: multicopter UAV, urban area applications, war theatre military applications, 3D flight path planning, UAV take-off and landing.

1. Bevezetés, motiváció, problémafelvetés

A pilóta nélküli légi járművek (UAVk) egyik kitüntetett csoportja a multirotoros drón, amely a függőleges tengely mentén is képes manőverezni, emelkedni vagy akár süllyedni is.¹ A multirotos drónok alkalmazásának előnye a hagyományos, merevszárnyú UAVk-kal szemben, hogy képesek nagyon kis sebességgel is repülni, így hordozó platformként kiválóan használhatók például városi környezetben csomagok, eszközök, műtétekhez szükséges vérvérvények sürgős kiszállítására is.² A modern városok sajátos velejárója a nagyarányú forgalom a közterületeken, ami adott esetben jelentősen gátolja a sürgősségi beteg vagy vérvérvény felszíni szállítását vagy éppen életmentő, újraélesztő készülék eljuttatását a bajban lévőkhöz. Egyes országokban, amelyek tengeri határokkal vagy tördelt partszakasszal, kisebb szigetekkel és azokon kevés lakóval rendelkeznek, a vízfelszínen csak nagyon lassan juthat el az érintettekhez az egészségügyi szakszemélyzet, az életmentő eszközök és gyógyszerek. Ezek az országok sikerrel használhatnak pilóta nélküli légi járműveket a gyógyszerek és kisebb méretű, könnyű orvosi eszközök célba juttatására.³ A multirotoros UAVk egyik sajátos alkalmazási területe az épített, városi környezetben a felszínen közlekedő járművek megfigyelése, a forgalomszámlálás és adatok nyerése a forgalmi dugók elkerülése érdekében.⁴ A drónok biztonságos repülési pályáinak tervezése kiemelt feladat, amely segíti és támogatja, hogy a légi jármű repülésbiztonsága megfeleljen az előírásoknak.⁵ Az UAVk biztonságos leszállásának peremfeltétele épített városi

¹ Albeano, Gilles; Gheisari, Masoud; Franz, Bryan W.: A systematic review of unmanned aerial vehicle application areas and technologies in the AEC domain. *Journal of Information Technology in Construction*, ITcon, Vol. 24. (2019) 381–405. o.

² Kwak, Jeonghoon; Sung, Yunsick: Autonomous UAV flight control for GPS-based navigation, *IEEE Access*. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2854712>. (Letöltés ideje: 2020. 09. 17.)

³ Claesson, Andreas; Friedman, David; Svensson, Leif.; Ringh, Mattias; Hollenberg, Jacob; Nordberg, Per.; Rosenquist, Marten.; Djarv, Therese.; Östenberg, Sven; Lennartsson, Josefin.; Ban, Yifang: Unmanned Aerial Vehicles (Drones) in Out-of-Hospital-Cardiac-Arrest. *Journal of Trauma, Resuscitation and Emergency Medicine*, (2016) 24:124. <https://doi.org/10.1186/s13049-016-0313-5>.

⁴ Kim, Jongrae; Crassidis, John, L.: UAV Path Planning for Maximum Visibility of Ground targets in an Urban Area, 21 May 2014. <https://www.researchgate.net/publication/224218547> (Letöltés ideje: 2020. 09. 16.)

⁵ Jenkins, Nathan A. L.: An Application of Aerial Drones in Zoning and Urban Land Use Planning in Canada. Master Thesis, Ryerson University, Toronto, Canada, 2015.

környezetben, hogy a leszállóhelyet megfelelően válasszuk meg.⁶⁷ Mindazonáltal, arra is gondolnunk kell, hogy a drónok leszállása veszélyhelyzeti kényszerleszállás során is megtörténhet.⁸ Az UAVk repülése során kiemelt fontossággal bír a 'fedélzet-föld' adatcsatorna, valamint a helymeghatározás egyik alapvető rendszere, a GPS-rendszer, amely lehetővé teszi a pontos és gyors helymeghatározást.⁹ A drónok felszállása és leszállása során azok viselkedése lehet normál vagy agresszív, ha ezzel például összeütközést kerülünk el.¹⁰ A pilóta nélküli légitjárművek földi- és légi üzemeltetésének egyik sarkalatos pontja a földi irányítás és a kiszolgálás rendszere. E kihívás akkor okozhat nehézséget, ha az UAVt katonai repülőtérről üzemeltetik, és a légiforgalmi irányítás számára kiemelt feladat az UAV biztonságos integrálása a légiközlekedésben részt vevő egyéb légitjárművek közé.¹¹¹² A drónok légtérintegrációs feladatainak megoldását ma már Európai Unió szabályok is segítik.¹³ Célunk olyan háromdimenziós repülési pályák számítógépes tervezése és szimulációja, amelyek jól használhatóak a multitrotoros drónok fel- és leszállása során épített környezetben is, ahol fennállhat az összeütközés veszélye úgy a természetes, mint a mesterséges tereptárgyakkal vagy éppen emberekkel is.

2. UAV repülések épített, városi környezetben

Napjainkban számos olyan UAV alkalmazással találkozunk, amelyeket városi, épített környezetben hajtanak végre. A drónt használhatjuk forgalomszámlálás, környezeti emisszió és a levegő összetételének mérésére vagy különféle csomagok (például orvosi eszközök, vérvérvények, kisebb csomagok, illetve postai küldemények) megrendelőkhöz vagy felhasználóhoz történő célba juttatására. Az épített fizikai környezet jellemzői miatt e repülések rendszerint az operátorok/kezelők vizuális látótávolságán belül vagy azon kívül történnek. Könnyű belátni, hogy ebben az esetben, de egyébként is, az UAV repülésének automatizálása nagy mértékben segítheti a kezelők munkáját, illetve javíthatja a repülés- és

⁶ Primatesta, Stefano; Rizzo, Alessandro; la Cour-Harbo, Anders: Ground Risk map for Unmanned Aircraft in Urban Environments. <https://www.researchgate.net/publication/326225175> (Letöltés ideje: 2020. 09. 16.)

⁷ HADTUDOMÁNY

2020/4.

⁸ Lee, Joon Y.; Chung, Albert Y.; Shim, Hooyeop; Joe, Changwan; Park, Seongjoon; Kim, Hwangnam: UAV Flight and Landing Guidance System for Emergency Situations, *Sensor*, 2019, 19. <https://doi.org/10.3390/s19204468>.

⁹ Qui, Zhihong; Chu, Xi; Calvo-Ramirez, Cesar; Briso, César; Yin, Xuefeng: Low Altitude UAV Air-to-Ground Channel Measurement and Modeling in Semiurban Environments. *Wiley Hindawi Wireless Communications and Mobile Computing*, Volume 2017, Article ID 1587412.

¹⁰ Szabolcsi Róbert: 3D Flight Path Planning for Multitrotor UAV. *Review of the Air Force Academy / Revista AFA / Revista Academiei Fortelor Aeriene*, No1. 41. (2020) 5–16. o. <https://doi.org/10.19062/1842-9238.2020.18.1.1>.

¹¹ Vas Tímea, Palik Mátyás: UAV Operations in Aerodrome Safety and ACS Procedures. The 7th International Scientific Conference "Defense resources Management in the 21st Century", Brasov,

¹² November 2012. http://www.codrm.eu/conferences/2012/12_Vas.pdf (Letöltés ideje: 2020. 09. 16.)

¹³ European Aviation Safety Agency. (EU) 2019/947, *Commission Implementing Regulation on the Rules and Procedures for the operation of Unmanned Aircraft*, 24 May 2019. <https://www.easa.europa.eu/document-library/regulations/commission-implementing-regulation-eu-2019947> (Letöltés ideje: 2020. 09. 16.)

a vagyonbiztonságot is. A modern városokra jellemző a nagyfokú beépítettség, a magas épületek, szűk utcák és terek jelenléte, így módon a népességsűrűség egyes helyeken nagyon magas is lehet. Az 1. ábra jól mutatja, hogy a térségben logisztikai szállítási céllal igazán hatékonyan csak a multirotoros UAVk használhatóak, mert a merevszárnyú drónok



1. ábra. **Modern város felhőkarcolókká**¹²

üzemeltetéséhez nem áll rendelkezésre megfelelő fizikai környezet. A magas építmények tetején egyébként is szokás helikopter-leszállóhelyeket kialakítani, így módon a multirotoros UAVk repülése e légtérben könnyen megvalósítható a rendelkezésre álló nagyszámú le- és felszállóhely miatt.

A 2. ábra a jövő városát ábrázolja, ahol már akár tágabb terek, sétányok, parkok is találhatóak, amelyek viszont alapvetően az emberek közlekedését és szabadidős tevékenységüket hivatottak szolgálni. Mindazonáltal, e közösségi terek a megfelelő méretük miatt is kiválóan használhatóak multirotoros UAVk biztonságos földi- és légi üzemeltetésére.

Az UAVk üzemeltetésére vonatkozó EASA-szabály alapján azok alapvetően kézi irányítással, a kezelők vizuális látómezején belül, a drón típusához megfelelően megválasztott repülési sebességgel és korlátozott repülési magasságon üzemeltethetők.¹³

3. Multirotoros UAVk katonai alkalmazása

Az UAVk széleskörű katonai alkalmazásának tapasztalatai rámutattak, hogy számos esetben, főleg a megfigyelő és felderítő feladatot ellátó UAVk esetén, különösen fontos a megfelelő típus kiválasztása, mert ez biztosíthatja leginkább a saját erők és a saját katonai objektumok magasabb fokú és hatékonyabb védelmét. Egy elképzelt katonai tábor elrendezése a 3. ábrán látható.¹⁴

¹²

¹³

¹⁴

- 12 Forrás: www.google.com. (Letöltés ideje: 2020. 09. 24.)
13 European Aviation Safety Agency. (EU) 2019/947.
14 Forrás: www.google.com. (Letöltés ideje: 2020. 09. 25.)
15 Forrás: www.google.com. (Letöltés ideje: 2020. 09. 24.)

136

HADTUDOMÁNY 2020/4.



2. ábra. *Modern város rekonstrukció látványterve*¹⁵

A bázis külső, közvetlen mechanikai védelmét betonfal alkotja, amely nagyobb katonai táborok, katonai repülőterek és egyéb objektumok (például raktárak, logisztikai bázisok) esetén akár több kilométer hosszú is lehet. Könnyű belátni, hogy egy ilyen tábor külső, perimetrikus védelmében az UAV, mint technológiai platform, kiemelt szerepet kaphat úgy az előre tervezett, járőröző, mint a nem tervezett, időszakos repüléseivel.

Tekintettel a kis méretű multitrotoros drónok rendszerint kis repülési sebességére és az alacsony repülési magasságukra, azok a repüléseik során meglehetősen sérülékenyek,



3. ábra. Előretolt katonai bázis elrendezése

sebezhetőek: akár kis kaliberű kézfegyverrel is működésképtelenné tehetőek, de legalábbis a repülési feladat megszakítására kényszeríthetők. Ily módon célszerű az UAVplatformot úgy megválasztani, hogy annak esetleges üzemképtelensége vagy elvesztése minél kisebb anyagi veszteséggel járjon, így a COTS_EC¹⁶ elv célravezető lehet a veszteségek minimalálására.

Másik fontos szempont, hogy a drónok ne használjanak a fedélzeten szenzitív eszközt, berendezést vagy fedélzeti szoftvert, és ily módon az ellenséges erők kezére kerülése során ne jelentsen számukra különösebb katonai értéket, hiszen a drón értéke a valós időben a földi irányítóállomásra lesugárzott információ. Könnyű belátni, hogy a drónok katonai műveleti területen történő használata során a leginkább veszélyes repülési fázisok a fel-, illetve a leszállás, tehát a biztonságos repülési pálya tervezése kiemelten fontos feladat.

4. Multirotoros UAV fel- és leszálló repülési pályáinak tervezése és szimulációja

A pilóta nélküli légi járművek felszállása és leszállása a repülés két kiemelt fontosságú szakasza. Ha a repülést épített városi környezetben, emberek által is használt közterületen (parkok, nyílt terek, utcák) szükséges végrehajtani, akkor a megfelelően megtervezett vagy megfelelően megválasztott repülési pályák nagymértékben javítják a repülésbiztonságot, és segítik a repülési feladat sikeres végrehajtását. Ha a drón irányítása kézzel történik, akkor az UAV kezelő felelőssége, hogyan hajtja végre a fel-, illetve a leszállást. A továbbiakban olyan fel- és leszálló pályák számítógépes tervezésével foglalkozunk, amelyek lehetővé teszik a drónok automatizált fel- és leszállását közterületeken vagy akár épületek között is, így az UAV operátorok feladata a megfelelő fel- és leszállópálya alakjának kiválasztása egy előre megadott repüléspálya-függvénykönyvtárból.

A drónok fel- és leszállásának alapvetően két fajtáját különböztetjük meg. Az első csoportba tartoznak az ún. agresszív manőverek, amelyek rendszerint nagy túlterhelésekkel járnak, és így nagy túlterhelést jelentenek az UAV fedélzeti villamos energiarendszere számára villamos értelemben is. Az agresszív manőverek során az intenzív villamos energiafelhasználás miatt a drónok műszaki-technikai paraméterei (például repülési idő, hatósugár, hatótávolság) lényegesen, akár 25–30%-al is csökkenhetnek, ami már veszélyeztetheti a repülési feladat sikeres és eredményes végrehajtását vagy magát a repülésbiztonságot is. Mindazonáltal, ha a felszállás és a leszállás környezetében az UAV csak ilyen intenzív, más szóval, agresszív repülési pályák mentén emelkedhet a levegőbe, ebben az esetben is készen kell lennünk a repülési feladat végrehajtására. Ha a drónok üzemeltetése során megfelelő fizikai tér és megfelelő földi infrastruktúra áll rendelkezésünkre, akkor azt, hasonlóan a hagyományos léggérművekhez, a klasszikus, más szóval, nem agresszív repülési pályákon üzemeltetjük (például egyenes vonalú felszállás korlátozott pályaszög mellett; egyenes vonalú vagy exponenciális pályán történő leszállás, korlátozott pályaszögek mellett). A továbbiakban olyan repülési pályákat mutatunk be, amelyek jól használhatóak kisméretű, multitrotoros UAVk légi üzemeltetése során.

16 Commercial off the shelf – Extra Cheap.

17 MATLAB R2020b, User's Guide, The MathWorks Inc., 2020.; MATLAB R2020b Control System Designer/Control System Toolbox 10.8, User's Guide. The MathWorks, Inc., 2020.

4.1. Kisméretű multitrotoros UAVk agresszív felszálló pályái

A drónok repülési pályáinak tervezésekor rendszerint érvényesül a korlátozottság elve, ami tipikusan jellemző az UAVk városi, épített környezetben végrehajtott repülései során. Az UAV háromdimenziós felszálló pályáinak egyenletei most legyenek az alábbiak:

$$x = X \cdot \sin(\omega t), \quad (1)$$

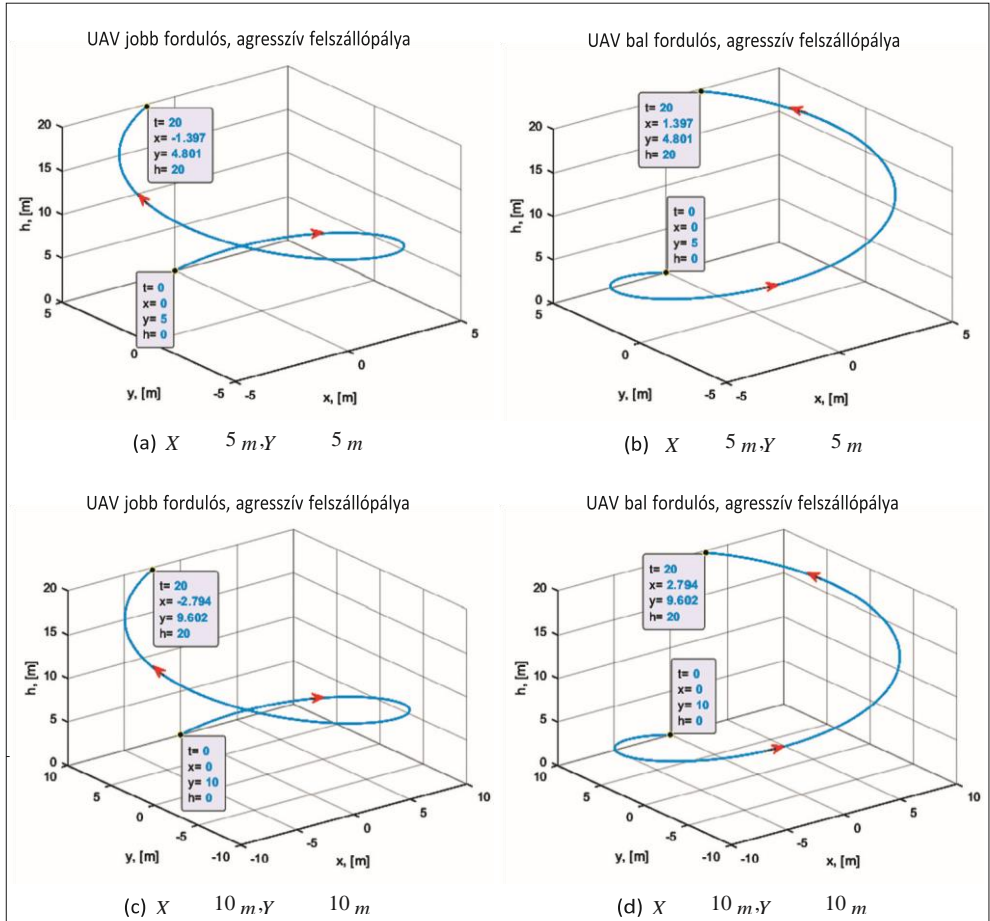
$$y = Y \cdot \cos(\omega t), \quad (2)$$

$$h = H_0 + a \cdot t. \quad (3)$$

Az (1)-(3) egyenletekben az alábbi kezdeti feltételeket vesszük figyelembe:

$$\omega = 0,3 \text{ } ^\circ/\text{s}; H_0 = 0 \text{ m}; a = 1 \quad (4)$$

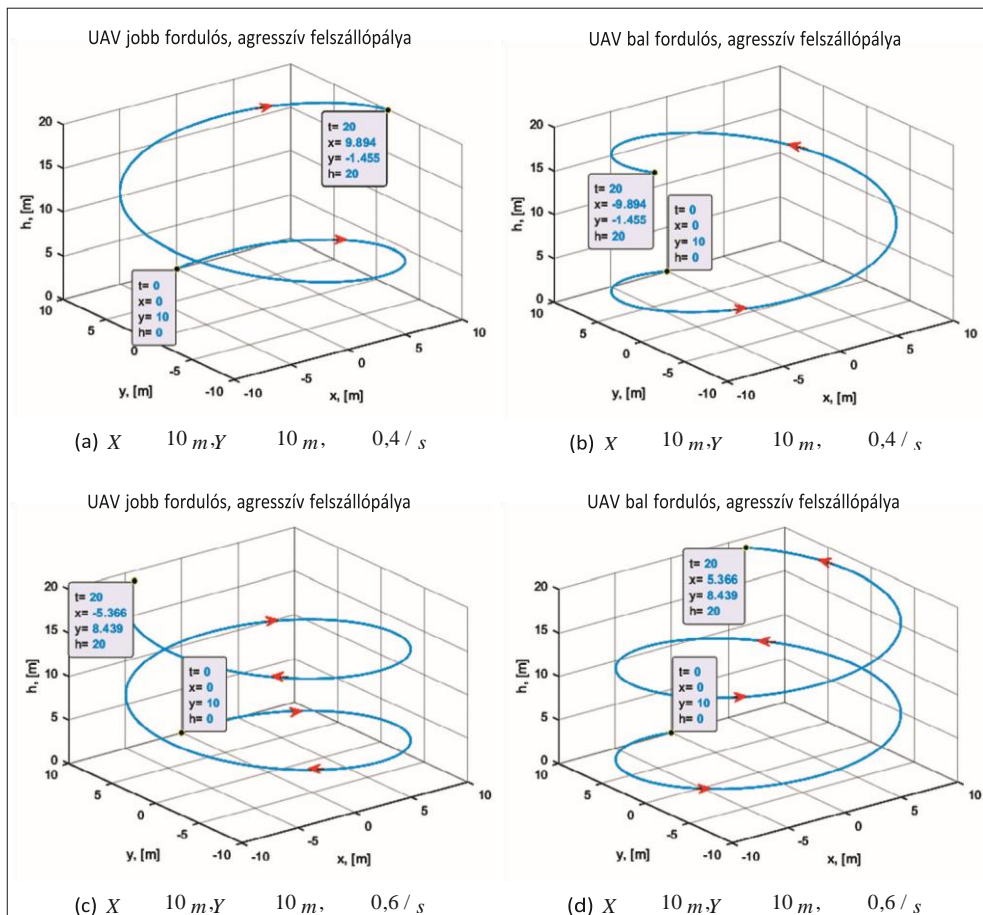
Az UAV repülési pályák tervezése során különféle lehetséges repülési tartományokat vettünk figyelembe. A számítógépes szimuláció eredményeit a 4. ábrán láthatjuk.¹⁷



4. ábra. *Multirotoros UAV agresszív felszállópálya profilok*

A 4. ábrán látható repülési pályákat $t = 20 \text{ sec}$ időintervallumra számítottuk, így tehát a repülési pálya a függőleges tengely mentén 1 m/s függőleges sebességgel emelkedik. A felszállópálya tervezésekor az X és az Y maximális értékek adják meg a felszálláshoz szükséges légtér biztonságos méreteit.

Az 5. ábrán több, a függőleges tengely körüli fordulatot is igénylő UAV repülési pályák láthatóak. Az 5. ábrán jól látható, hogy a felszálló manőver $t = 20 \text{ sec}$ ideje alatt azt is megadhatjuk, hogy az UAV a függőleges tengelye körül milyen jellegű és milyen értékű forgást hajtson végre. Az növekedésével nő a fordulók száma is.



5. ábra. Multirotoros UAV agresszív felszállópálya profilok

Az (1)-(3) egyenletekben szereplő X, Y, H, ω, α , és a t paraméterek megfelelő megválasztásával olyan nagyszámú felszállópálya-modellt magába foglaló függvénykönyvtárat is létrehozhatunk, amelyből szükség esetén az UAV operátor már könnyen ki tudja választani az adott repülési feladatnak és a repülésbiztonságnak is leginkább megfelelő repülési pályát.

4.2. Kisméretű multirotoros UAVk nem agresszív felszálló pályái

AZ UAVK felszálláshoz számos esetben megfelelő méretű le- és felszállópálya áll rendelkezésre. Főleg repülőtérről üzemeltetett UAVk esetében igaz, hogy a megfelelő méretű futópálya mellett egyéb földi navigációs és irányító rendszerek is segíthetik az UAVK

közel körzeti navigációját és a leszállását is. A 6. ábrán bemutatott felszállópálya profilok jól használhatóak úgy a merevszárnyú, mint a forgószárnyas vagy multirotoros UAVk felszállása során is. A felszálló manőver tervezett ideje $t = 10 \text{ sec}$. A 6. ábra bal oldalán látható lineáris felszállópálya egyenletei az alábbiak:

$$L = L_o + 8 * t, \tag{5}$$

$$Z = Z_o + b * L_{max}, \tag{6}$$

$$h = h_o + t, \tag{7}$$

míg a 8. ábra jobb oldalán látható parabolikus felszálló pálya egyenletei az alábbiak:

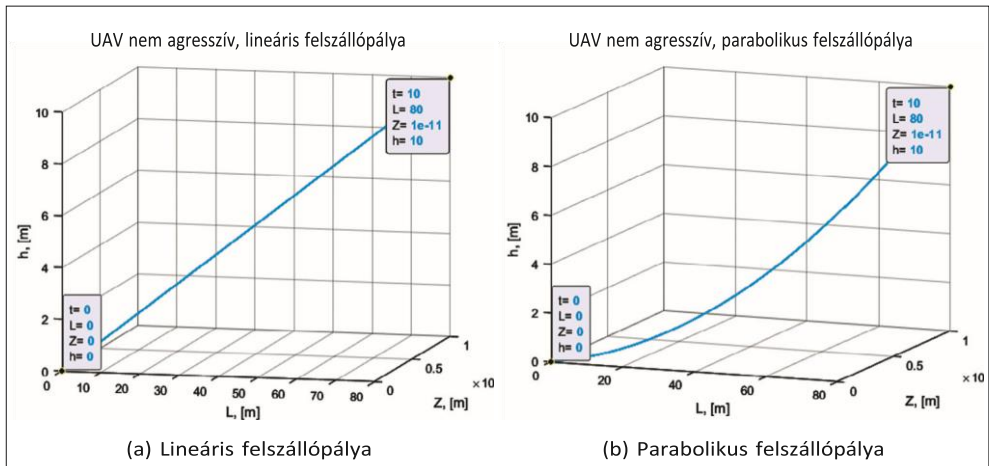
$$L = L_o + 8 * t, \tag{8}$$

$$Z = Z_o + b * L_{max}, \tag{9}$$

$$h = h_o + a * t^2, \tag{10}$$

Az (5)-(10) egyenletek pályatervezés során használt adatai legyenek az alábbiak:

$$L_o = 0 \text{ m}; L_{max} = 80 \text{ m}; Z_o = 0 \text{ m}; \Delta Z \leq 0,2 \text{ m}; h_o = 0 \text{ m}; H|_{L=80 \text{ m}} \leq 0,5 \text{ m}; a = 0,1; b = 0,000000000001. \tag{11}$$

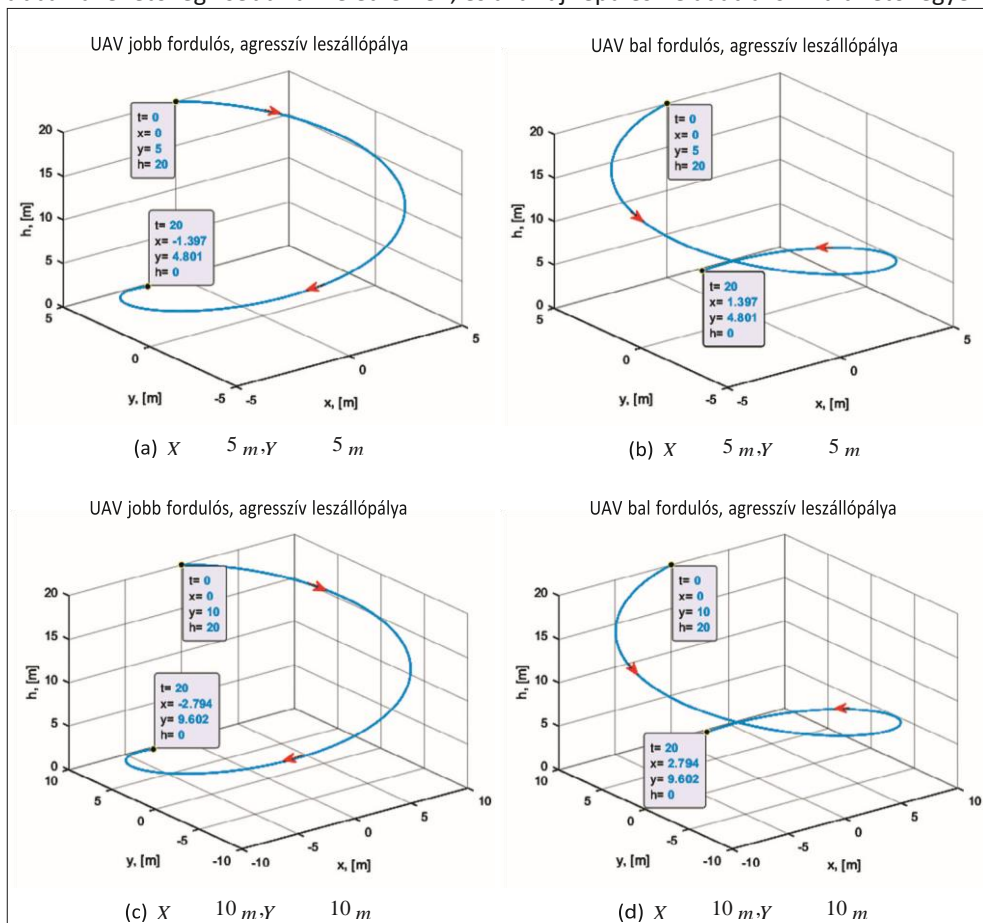


6. ábra. UAV nem agresszív felszállópálya profilok

A 6. ábrán is jól látható, hogy a felszálló pályák háromdimenziósak, az UAV ideális pályatengelytől mért eltérés a felszálló manőver végén $Z = 1 \cdot 10^{11} \text{ m}$, ily módon, az UAV repülési pályája nagyon jó közelítéssel kétdimenziósnak, más szóval, síkbélinek tekinthető, és ez az eltérés megfelel a (11) egyenletben is megfogalmazott minőségi feltételnek. Könnyű belátni, hogy a (11) egyenlet adatait módosítva, számos más, még nem agresszívnek nevezhető UAV felszállópálya is megtervezhető. Megemlítjük, számos más, nemlineáris matematikai függvény, mint például a hatvány függvény, a tangens függvény vagy például a gyökfüggvény is jól használható az UAVk repülési pályáinak tervezése során, ha az elemi függvények transzformált alakjait használjuk.

4.3. Kisméretű multirotoros UAVk agresszív leszálló pályái

Az UAVk repülési pályáinak tervezésekor figyelembe kell vennünk, hogy a leszállást akár városi, épített környezetben is végre kell majd hajtani. Az UAVk légi üzemeltetése során előfordulhat, hogy az UAV kényszerleszállást kell végrehajtson (például a hajtás leállásakor vagy a toló/vonó/emelő erő drasztikus csökkenése esetén), amikor is olyan rendezőelveket használunk, hogy a leszállás során embert nem veszélyeztethetünk, az esetleges vagyoni kárt a lehető legkisebbre kell csökkenteni, és az UAVt is lehetőleg úgy kell leszállítani, hogy abban a lehető legkisebb kár keletkezzen, és akár új repülési feladatra is kiküldhető legyen.



7. ábra. Multirotoros UAV agresszív leszállópálya profilok

Az UAV háromdimenziós leszálló pályáinak egyenletei legyenek az alábbiak:

$$x = X \cdot \sin(\omega t), \quad (12)$$

$$y = Y \cdot \cos(\omega t), \quad (13)$$

$$h = H_0 - a \cdot t. \quad (14)$$

A (12)-(14) egyenletekben az alábbi kezdeti feltételeket vesszük figyelembe:

$$\omega = 0,3 \text{ }^\circ/\text{s}; H_0 = 20 \text{ m}; a = 1 \quad (15)$$

Az UAV repülési pályák tervezése során különféle lehetséges repülési tartományokat vettünk figyelembe. A számítógépes szimuláció eredményeit a 7. ábrán láthatjuk.¹⁴

A 7. ábrán bemutatott repülési leszállópályákon az UAV a H_0 20m magasságon lép be a manőverbe, és kezdi meg a leszállást. A 7. ábrán jól átható, hogy az (12)-(14) egyenletekben szereplő X, Y, H, ω, a , és a t paraméterek megfelelő megválasztásával olyan nagyszámú leszállópálya-modellt is létrehozhatunk, amelyből szükség esetén az UAV operátor/kezelő már könnyen ki tudja választani az adott repülési feladatnak és a repülésbiztonságnak is leginkább megfelelő repülési pályát. Ily módon, az UAV operátor/kezelő tevékenysége az UAVk automatizált kényszerleszállása során a megfelelő leszállópálya kiválasztására szorítkozik. A 8. ábra nagyobb repülési magasságokról végrehajtott leszálló pályákat mutat be.

4.4. Kisméretű UAVk nem agresszív, exponenciális leszálló pályái

Az UAVk üzemeltetése során gyakran előfordul, hogy kellően nagy szabad terület áll rendelkezésre az UAV hagyományos fel- és leszállására. Ebben az esetben az UAVk leszállására az alábbi exponenciális leszálló pályák is jól használhatóak:

$$L = L_0 + t, \quad (16)$$

$$Z = Z_0 + b \cdot L_{max}, \quad (17)$$

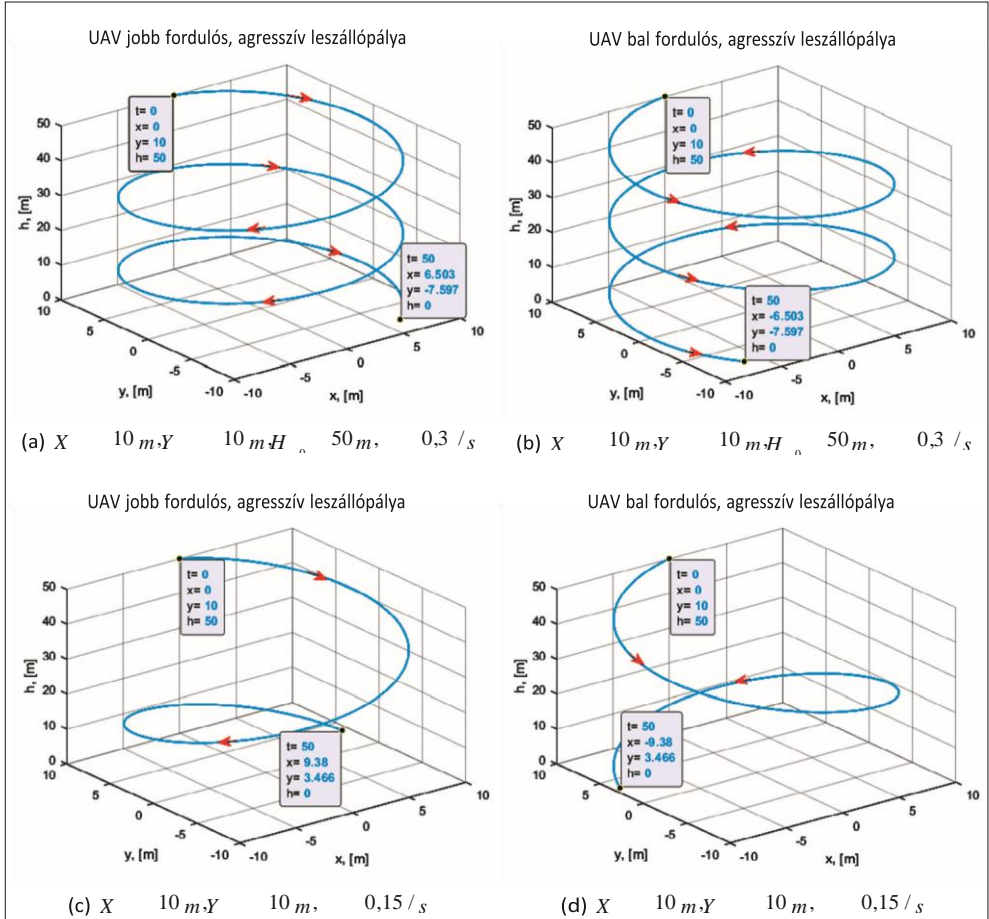
$$h = H_0 \cdot e^{-t/T}. \quad (18)$$

A (16)-(18) egyenletek pályatervezés során használt adatai az alábbiak:

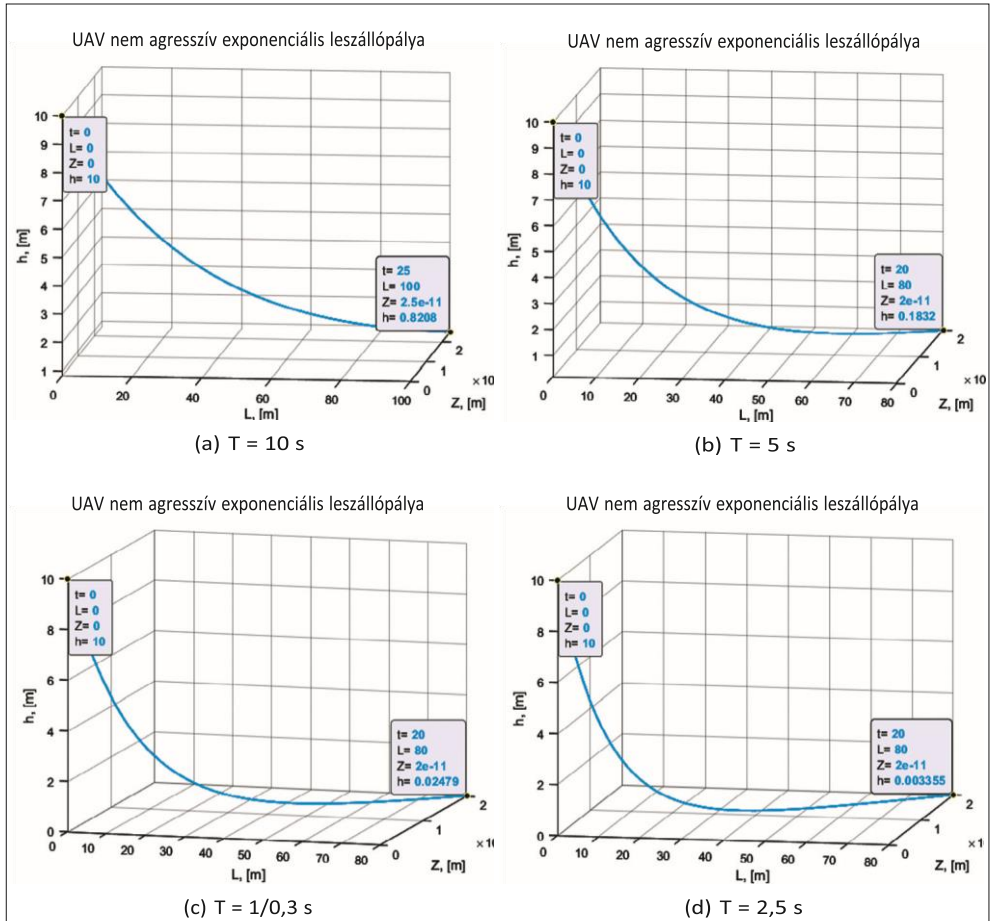
$$\begin{aligned} L_0 &= 0 \text{ m}; L_{max} = 80 \text{ m}; Z_0 = 0 \text{ m}; \Delta Z \leq 0,2 \text{ m}; H_0 = 10 \text{ m}; H|_{L=80 \text{ m}} \leq 0,5 \text{ m}; \\ b &= 0,000000000001. \end{aligned} \quad (19)$$

A (19) egyenlet adatait felhasználva, és az exponenciális függvény különféle időállandói segítségével az UAV számára az alábbi nem agresszív leszálló pályák is tervezhetőek (9. ábra).

¹⁴ MATLAB R2020b, User's Guide, The MathWorks Inc., 2020.; MATLAB R2020b Control System Designer/Control System Toolbox 10.8, User's Guide. The MathWorks, Inc., 2020.



8. ábra. Multitrotoros UAV agresszív leszállópálya profilok



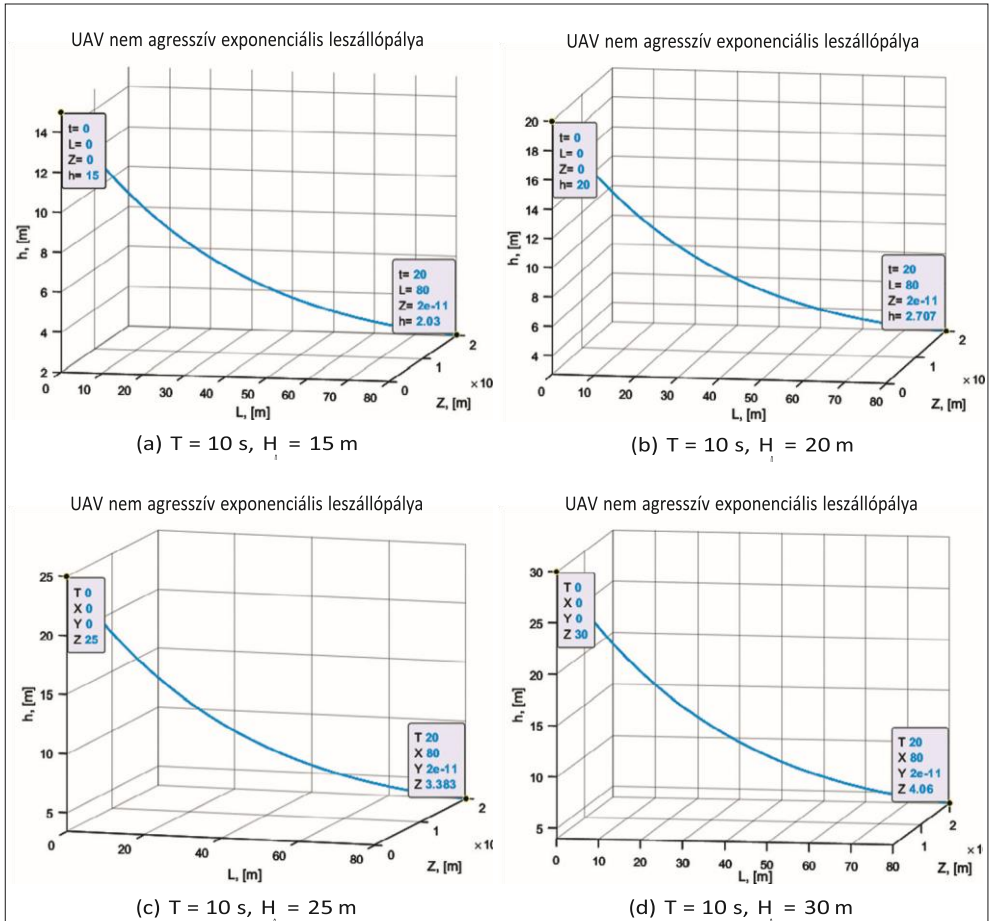
9. ábra. Multirotoros UAV nem agresszív leszállópálya profilok

A 9. ábrán jól látható, hogy az exponenciális leszállópálya meredekségének változtatása során csökken az UAV manőverének befejezésekor a földtől mért valós repülési magasság is.

1. táblázat.

$T = 10$ sec	$T = 5$ sec	$T = 1/0,3$ sec	$T = 2,5$ sec
$H \cong 82$ cm	$H \cong 18$ cm	$H \cong 2,5$ cm	$H \cong 0,33$ cm

Az 1. táblázat adatai alapján megállapíthatjuk, hogy a $T = 10$ sec időállanóval bíró exponenciális függvény nem felel meg a (19) egyenletben megadott feltételeknek, ezért célszerű a $T = 5$ sec meredekséggel bíró függvény használata. A 10. ábrán különféle magasságon megkezdett UAV leszálló manőverek exponenciális repülési pályái láthatóak.



10. ábra. Multirotoros UAV nem agresszív leszállópálya profilok

A 9. és a 10. ábrákon látható exponenciális repülési pályák háromdimenziósak, bár az oldalirányban mért lineáris kitérés a futópálya tengelyétől $Z = 2 \cdot 10^{-11} m$, ami megfelel a (19) egyenletben megadott feltételnek.

A gyakorlatban előfordulhat (például, ha az előzőleg kiválasztott leszállóhely mégsem alkalmas az UAV leszállására, vagy összeütközést elkerülő manővert kell végrehajtani), hogy az UAV nem feltétlenül egyenes nyomvonalon közelíti meg a leszállóhelyet, hanem jobb vagy bal fordulóval egybekötött süllyedést hajt végre az exponenciális sikló pályán (11. ábra). A fordulót jobb, és bal irányban is végrehajthatja az UAV. A 11. ábrán bemutatott bal fordulós exponenciális pálya egyenleteit lásd a következő oldalon.

Az UAVk nem agresszív pályán történő leszállására egyéb, a matematikában is jól ismert függvényeket is használhatunk, melyek közül a fontosabbak az alábbiak: a folytonos, szigorúan monoton növekvő hatványfüggvény és a négyzetgyök függvény.

$$L = L_0 + t, \tag{20}$$

$$Z = -1,2 + 1,2 \cdot e^{t/T}, \tag{21}$$

$$h = h_0 \cdot e^{-\frac{t}{T}}, \tag{22}$$

míg a jobb fordulás exponenciális leszálló pálya egyenletei a következők:

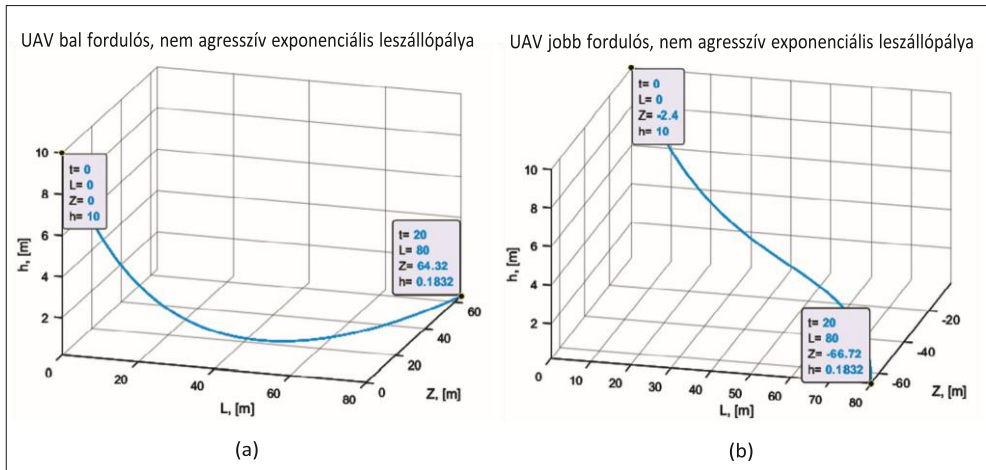
$$L = L_0 + t, \tag{23}$$

$$Z = -1,2 - 1,2 \cdot e^{-\frac{t}{T}}, \tag{24}$$

$$h = h_0 \cdot e^{-t/T}. \tag{25}$$

A (20)-(25) egyenletek pályatervezés során használt paraméterei legyenek az alábbiak:

$$L_0 = 0 \text{ m}; L_{\max} = 80 \text{ m}; Z_0 = 0 \text{ m}; h_0 = 10 \text{ m}; H|_{L=80 \text{ m}} \leq 0,5 \text{ m}. \tag{26}$$



11. ábra. Multirotoros UAV nem agresszív leszállópálya profilok

Bár $atg(\)$ függvény is szigorúan monoton növekvő, ugyan periodikus, de nem folytonos függvény, tekintettel arra, hogy a $k = 1, 2, 3, \dots, n$ szögeken szakadása van,

2

ennek ellenére, az értelmezési tartomány megfelelő megválasztásával gyakran alkalmazzák az UAVk pályatervezése során.

5. Következtetések

A drónok repülésbiztonsága lényeges mértékben javítható, ha a repülés egyes fázisait, főleg a leginkább veszélyesnek számító fel- és leszállást az UAV képes automatikusan végrehajtani. Ez azonban azt jelenti, hogy a rendszerint értéktartó vagy esetleg érték követő automatikus repülésszabályozó rendszerek bemenetén be kell olvasni az egyes referencia

repülési paramétereket, pályaadatokat, amelyeket a pilóta nélküli légitűeszköz ideális esetben maradó hiba nélkül értéken tart, vagy hibamentesen lekövet.

Az UAVk egyre szélesebb körű állami és nem állami célú alkalmazása előre vetíti, hogy azok földi és légi üzemeltetési rendszereiben megjelenhetnek nem szakértők is, olyan üzemeltetők és kezelők, akik rendelkeznek ugyan a drón üzemeltetéséhez szükséges minimális tudással és képesítéssel, de nem rendelkeznek kellő tudással ahhoz, hogy akár nyílt forráskódú fedélzeti robotpilótákat (például Paparazzi, ArduPilot, MP2028) programozzanak, és az UAVk számára biztonságos, optimális repülési pályákat tervezzenek. E feladatok merőben más jellegűek, mint a drónok hobbi célú, szabadidős repültetése. A cikkben olyan le- és felszállópálya-típusokat terveztünk meg, és mutattunk be, amelyek segítségével az egyes repülési üzemmódokhoz az előre megtervezett és megfelelő repülési pálya már könnyen kiválasztható, akár laikusok által is. A bemutatott pályaminták alapján, a pályaadatok módosítása révén már megtervezhető egy olyan függvénykönyvtár, amelyből az UAV fel- és a leszálló helyének és az időjárás viszonyoknak is megfelelő repülési pálya már könnyen kiválasztható.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- Albeano, Gilles; Gheisari, Masoud; Franz, Bryan W.: A systematic review of unmanned aerial vehicle application areas and technologies in the AEC domain. *Journal of Information Technology in Construction*, ITcon, Vol. 24 (2019) 381–405. o.
- Claesson, Andreas; Friedman, David; Svensson, Leif; Ringh, Mattias; Hollenberg, Jacob; Nordberg, Per.; Rosenquist, Marten.; Djarv, Therese; Östenberg, Sven; Lennartsson, Josefin; Ban, Yifang: Unmanned Aerial Vehicles (Drones) in Out-of-Hospital-Cardiac-Arrest, *Journal of Trauma, Resuscitation and Emergency Medicine*, (2016) 24:124. <https://doi.org/10.1186/s13049-016-0313-5>
- European Aviation Safety Agency. (EU) 2019/947. *Commission Implementing Regulation on the Rules and Procedures for the operation of Unmanned Aircraft*, 24 May 2019. <https://www.easa.europa.eu/document-library/regulations/commission-implementing-regulation-eu-2019947>
- Jenkins, Nathan A. L.: An Application of Aerial Drones in Zoning and Urban Land Use Planning in Canada. Master Thesis, Ryerson University, Toronto, Canada, 2015.
- Kim, Jongrae; Crassidis, John, L: UAV Path Planning for Maximum Visibility of Ground targets in an Urban Area, 21 May 2014. <https://www.researchgate.net/publication/224218547>
- Kwak, Jeonghoon; Sung, Yunsick: Autonomous UAV flight control for GPS-based navigation, *IEEE Access*. accessed on 21 May 2020. Available at <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2854712>
- Lee, Joon Y.; Chung, Albert Y.; Shim, Hooyeop; Joe, Changwan; Park, Seongjoon; Kim, Hwangnam: UAV Flight and Landing Guidance System for Emergency Situations. *Sensor*, 2019, 19. <https://doi.org/10.3390/s19204468>
- Primatesta, Stefano; Rizzo, Alessandro; la Cour-Harbo, Anders: Ground Risk map for Unmanned Aircraft in Urban Environments. <https://www.researchgate.net/publication/326225175>
- Qui, Zhihong; Chu, Xi; Calvo-Ramirez, Cesar; Briso, César; Yin, Xuefeng: Low Altitude UAV Air-to-Ground Channel Measurement and Modeling in Semiurban Environments. *Wiley Hindawi Wireless Communications and Mobile Computing*, Volume 2017, Article ID 1587412. <https://doi.org/10.1155/2017/1587412>
- Szabolcsi Róbert: 3D Flight Path Planning for Multitrotor UAV. *Review of the Air Force Academy /Revista AFA / Revista Academiei Fortelor Aeriene*, 41. (2020) No 1. 5–16. o. <https://doi.org/10.19062/1842-9238.2020.18.1.1>
- Vas Tímea, Palik Máttyás: UAV Operations in Aerodrome Safety and ACS Procedures. The 7. International Scientific Conference “Defense resources Management in the 21. Century”, Brasov, 15 November 2012. http://www.codrm.eu/conferences/2012/12_Vas.pdf MATLAB R2020b, User’s Guide, The MathWorks Inc., 2020.

MATLAB R2020b Control System Designer/Control System Toolbox 10.8, User's Guide. The MathWorks, Inc., 2020.