

SZABOLCSI RÓBERT*

HUMÁN OPERÁTOROK TEVÉKENYSÉGÉNEK MODELLEZÉSE ZÁRT IRÁNYÍTÁSI RENDSZEREKBE

BEVEZETÉS

A kézi, vagy a félautomatikus (folyamat)irányítási rendszerekben az ember mindig is központi helyet foglalt el. Bár a korai „ember-gép” kapcsolat még alapvetően a gazdasági és a termelési folyamatokat szolgálta, ez a viszonyrendszer nagyon hamar megjelent a katonai műveletek során is. Ismeretes, hogy az ember régóta használt katonai eszközöket és gépeket is, mint például a katapultok, a sorozatvető számszeríjak, vagy az emelőgépek.

A modern folyamatirányítási rendszerek a gőzgépek használatával terjedtek el, amelyek már a nyomás, a hőmérséklet és a fordulatszám komplex irányítási folyamatát is megoldották. Az első irányítási rendszerekben az ember sokszor *off-line*, a hatásláncon kívülről, a saját szellemi, és sokszor fizikai képességeit kihasználva avatkozott be az irányítási folyamatokba, amelyek automatizálását a villamosenergia feltalálása és a mérés technika gyors fejlődése már a XIX. század második felében lehetővé tette. Ily módon az automatikus (folyamat) irányítási rendszerekben már nem volt szükség a közvetlen emberi beavatkozásra, az operátorok *off-line*, tehát a rendszeren kívülről követték az irányítási folyamatokat.

A folyamatirányítás egy másik nagyon fontos területe a félautomatikus irányítások, és azok alkalmazása. Az ilyen elven működő katonai eszközök és rendszerek egyik fontos jellemzője, hogy bennük az információ gyűjtése és kijelzése automatikusan történik, míg az operátor szerepe most a számára kijelzett tevékenység végrehajtása. Ilyen irányítási tevékenység például a helikopterek irányított fedélzeti rakétáinak rávezetése földi célokra, a kézi páncéltörő eszközök rávezetése televíziós képernyő, vagy egyéb eszközök segítségével, vagy egyéb speciális járművek és rendszerek (pilóta nélküli légi jármű, vezető nélküli szárazföldi robot/jármű, vízfelszíni robot, vagy a víz alatti robot) irányítása.

A szerző célja annak bemutatása, hogyan befolyásolja az operátorok viselkedése a zárt folyamatirányítási rendszerek működését. A szerző az operátorok különféle matematikai modelljeit is felsorakoztatja, és részletesen vizsgálja, hogyan befolyásolja a kezelő viselkedése, illetve fizikai és mentális állapota az egyes irányítási folyamatok végrehajtását, és azok hatékonyságát.

TUDOMÁNYOS ELŐZMÉNYEK

A humán operátor, a kezelő, az irányítási folyamatban tevékenykedő ember viselkedése alapvetően befolyásolja a teljes irányítási folyamatot, annak stabilitását vagy a minőségi jellemzőit. A félautomatikus irányítási rendszerekben az operátor *in-line*, aktívan vesz részt az irányítási feladatok végrehajtásában. [1] [4] [5] [6] [8] [10] [15]

Úgy is fogalmazhatunk, hogy az operátor egy „elem” a folyamatirányítási rendszernek. Ily módon, az operátor tevékenységét akár matematikai úton is leírhatjuk, és elvonatkoztathatunk attól, hogy a humán operátor emberként a beavatkozó szerv szerepét tölti be a rendszerben. [2] [3] A légi járművek humán kezelőinek viselkedését az automatikus repülésszabályozó rendszerek egyváltozós irányítási rendszereiben [7] és [9] is vizsgálta.

E cikkben a szerző kis méretű, pilóta nélküli légi jármű (Small Unmanned Aerial Vehicle – SUAV) félautomatikus irányítását vizsgálja, amely vizsgálatokhoz az UAV térbeli mozgásának matematikai modelljét a szerző korábbi művei adják. [13] [14] Az UAV-k egy speciális alkalmazását a [11] és a [12] irodalmak mutatják be, ahol az UAV-k térképezést szolgáló repüléseihez a szerzők a megfelelő repülési pályák tervezését vizsgálták, és optimális repülési pályák geometriájára tettek javaslatot.

ÖSSZEFOGLALÁS: *A nem teljesen automatizált irányítási rendszerek egyik fontos jellemzője – és egyben a központi eleme is – az „ember-gép” kapcsolat. A kézi, vagy a félautomatikus (folyamat)irányítási rendszerekben a jelenben megszerzett információ, a múltbéli tapasztalatok és a korábban megtanult szabályrendszer alapján az ember dönt, és beavatkozik az egyes folyamatokba. Ily módon, a félautomatikus, zárt, érték tartó, vagy érték követő irányítási rendszerek tervezése és vizsgálata során elengedhetetlen az ember, az operátor viselkedésének ismerete.*

KULCSSZAVAK: *humán operátor, zárt folyamatirányítási rendszerek, matematikai modellezés, számítógépes rendszervizsgálat, minőségvizsgálat*

ABSTRACT: *In the semi-automated systems the core and central part is the 'man-machine' relationship. Both in manual and in semi-automated control systems the operator is responsible to reach the process goals, leaning on real-time information gained, on experiences gained in the past, and on the rule base he memorized earlier. Thus, knowledge of the operators' mathematical models are very important both in closed loop tracking and regulatory systems.*

KEYWORDS: *human operator, closed control systems, mathematical modelling, computer-aided simulation, performance analysis*

* Prof. dr. habil. Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar, tart. okl. mk. ezredes, egyetemi tanár. ORCID: 0000-0002-2494-3746

A HUMÁN OPERÁTOR MATEMATIKAI MODELLJE

Az egyes folyamatirányítási rendszerekben tevékenykedő humán operátorok, kezelők tevékenységét legpontosabban az alábbi általános alakú átviteli függvény írja le [1] [4] [5] [6] [7] [8] [9] [10]:

$$Y(s) = \frac{x_{ki}(s)}{x_{be}(s)} = K \frac{1+sT_L}{(1+sT_I)(1+sT_N)(s^2+2\xi\omega s+\omega^2)} e^{-s\tau} \quad (1)$$

ahol: $x_{be}(s)$ az operátor kisméretű bemeneti vizsgálójel; $x_{ki}(s)$ az operátor kimeneti (válasz) jele; K az operátor jelátvitelének változó erősítése; τ a holtidő;

$\frac{1}{(1+sT_N)(s^2+2\xi\omega s+\omega^2)}$ a neuromuskuláris rendszer dinamikája;

$(1+sT_L)$ az operátor predikciós, a bemeneti jel változását előre látó képességét leíró modell; $\frac{1}{(1+sT_I)}$ a bemeneti jelkövetésének időkéssége, az operátor integráló tulajdonságát leíró tag. Az (1) átviteli függvény nevezőjében a neuromuskuláris rendszer gyors dinamikájának másodrendű, $(s^2 + 2\xi\omega s + \omega^2)$ alakú polinomját egységnyi értékkel közelítjük. A gyakorlatban így az (1) átviteli függvény sokszor egyszerűbb alakot vesz fel:

$$Y_1(s) = \frac{x_{ki}(s)}{x_{be}(s)} = K \frac{1+sT_L}{(1+sT_I)(1+sT_N)(s^2+2\xi\omega s+\omega^2)} e^{-s\tau} \cong K \frac{1+sT_L}{(1+sT_I)(1+sT_N)} e^{-s\tau} \quad (2)$$

A további vizsgálataink során a (2) egyenletben megadott modell $\tau = 0,3s$ holtidejét az alábbi lineáris, ötödrendű Padé-approximációs alakokkal közelítjük [15]:

$$e^{-\tau s} = e^{-0,3s} \cong \frac{1 - \frac{0,3}{2}s + \frac{0,3^2}{12}s^2 - \frac{0,3^3}{120}s^3 + \frac{0,3^4}{1680}s^4 - \frac{0,3^5}{30240}s^5}{1 + \frac{0,3}{2}s + \frac{0,3^2}{12}s^2 + \frac{0,3^3}{120}s^3 + \frac{0,3^4}{1680}s^4 + \frac{0,3^5}{30240}s^5} \quad (3)$$

A (2) átviteli függvény paraméterei az alábbi tartományokon változhatnak [6] [7] [15]:

$$K = (5 \div 10); T_L = (1 \div 1,5)s; T_I = (0,2 \div 1)s; T_N = (0,1 \div 0,3)s; \tau = (0,1 \div 0,3)s \quad (4)$$

Tekintettel az operátorok fizikai-mentális állapotára, a szakmai elméleti és gyakorlati tudásukra, valamint a folyamatirányítási feladatokban megszerzett tapasztalataikra, a (2) átviteli függvény további egyszerűbb alakokat is felvehet:

$$Y_2(s) = \frac{x_{ki}(s)}{x_{be}(s)} = K \frac{1+sT_L}{(1+sT_N)} e^{-s\tau}$$

T_I elhanyagolhatóan kis értékű, az operátor képes nagyon gyorsan beavatkozni; (5)

$$Y_3(s) = \frac{x_{ki}(s)}{x_{be}(s)} = K \frac{1}{(1+sT_N)} e^{-s\tau}$$

T_I elhanyagolhatóan kis értékű, de az operátor nem tapasztalt, nincs predikciós képessége; (6)

$$Y_4(s) = \frac{x_{ki}(s)}{x_{be}(s)} = K \frac{1+sT_L}{(1+sT_I)} e^{-s\tau}$$

T_N elhanyagolhatóan kis értékű, az operátor kifogástalan fizikai és mentális állapotban van; (7)

$$Y_5(s) = \frac{x_{ki}(s)}{x_{be}(s)} = K \frac{1}{(1+sT_I)} e^{-s\tau}$$

T_N elhanyagolhatóan kis értékű, de az operátor nem tapasztalt, nincs tapasztalatokon alapuló predikciós képessége (kezdő operátor); (8)

$$Y_6(s) = \frac{x_{ki}(s)}{x_{be}(s)} = K(1+sT_L)e^{-s\tau}$$

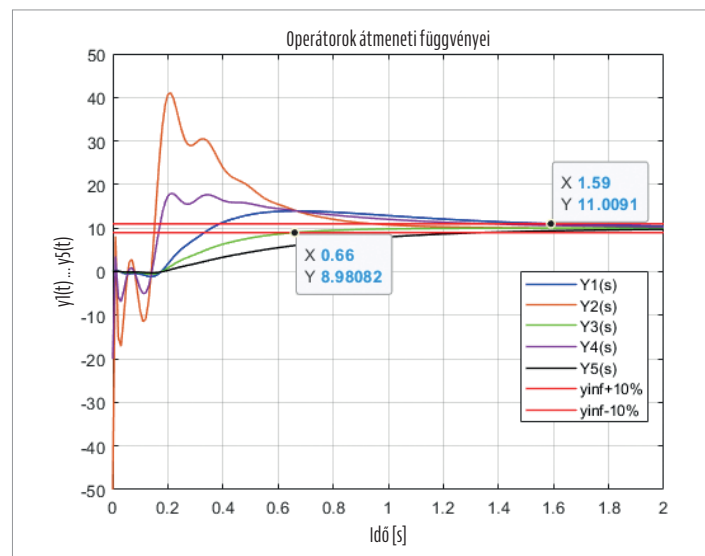
T_I és T_N elhanyagolhatóan kis értékű, és az operátor nagyon gyorsan avatkozik be, valamint predikciós képességekkel is bír (profli, tapasztalt operátor). (9)

Az operátor nagyon gyors beavatkozása miatt a (9) átviteli függvényvel leírt tevékenységet szokás „agresszív” tevékenységnek is nevezni, amely rendszerint nagy túlszabályozásokkal, és nagy energiaigénnyel bír. Tekintettel az irányító beavatkozások kimagaslóan nagy energiaigényére, ezt a viselkedést, az ilyen jellegű beavatkozásokat célszerű elkerülni, mert ily módon egy-egy feladat végrehajtására több idő marad. A fenti megfontolások alapján, a kezdő, kevésbé képzett, kevés tapasztalattal bíró, és a profli, képzett és tapasztalt operátorok viselkedését a (2) átviteli függvény segítségével vizsgáljuk, míg az egyes operátormodellek paramétereit az 1. táblázat mutatja be.

1. TÁBLÁZAT. Az operátor paraméterei
(A szerző szerkesztése)

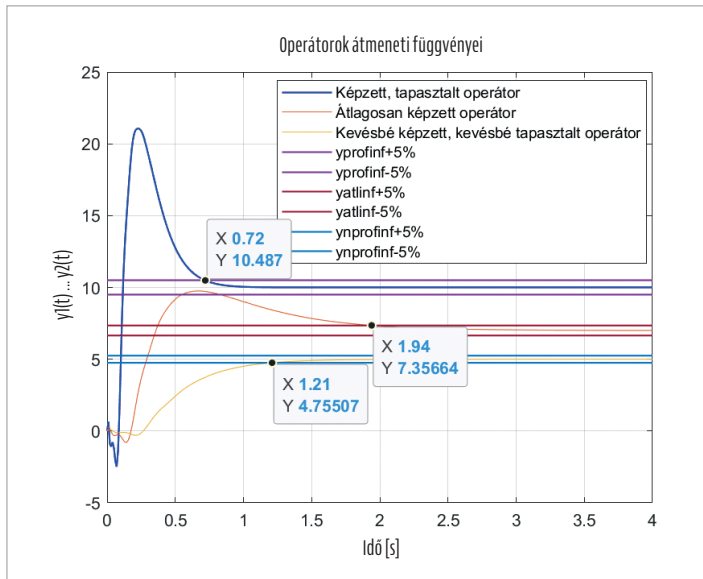
Operátor	T_L [s]	T_L [s]	T_N [s]	K	τ [s]
Profli, jól képzett, tapasztalt	0,1	0,5	0,1	10	0,1
Átlagos képességgel és közepes mértékű tapasztalattal bíró	0,5	1	0,2	7	0,2
Kezdő, kevésbé képzett, kevésbé tapasztalt	1	1	0,3	5	0,3

Az átlagosan képzett, és átlagos tapasztalattal bíró humán operátorok $Y_1(s)$, $Y_2(s)$, $Y_3(s)$, $Y_4(s)$ és $Y_5(s)$ átviteli függvényeit felhasználva, az operátorok az $x_{be}(t) = 1(t)$ bemeneti jelre válaszként adott átmeneti függvényei az 1. ábrán láthatók.



1. ÁBRA. Az átlagos humán operátor átmeneti függvényei
(A MATLAB-script a szerző szerkesztése)

Az 1. ábra alapján könnyen belátható, hogy a bemeneti jelre a leggyorsabb választ az $Y_3(s)$ átviteli függvényvel (arányos, egytárolós, holtidős modell) leírt operátor adja, míg az $Y_1(s)$ átviteli függvényvel (arányos, kétszeresen időkéssé, valós differenciálós, holtidős modell) leírt operátor a legnagyobb reakcióidővel bír. Érdekes összehasonlítani a „képzett, tapasztalt”, és a „kevesbé képzett, kevésbé tapasztalt” operátorok viselkedését is (2. ábra).



2. ÁBRA. A képzett, és a kevésbé képzett humán operátor átmeneti függvényei (A MATLAB-script a szerző szerkesztése)

A 2. ábra alapján megállapítható, hogy a képzett és tapasztalt operátor gyorsabban beavatkozik a folyamatokba, de nagy túlszabályozással rendelkezik, amely egyfajta magabiztos, agresszív beavatkozást, agresszív viselkedést jelent.

A kevésbé képzett és kevésbé tapasztalt operátor ugyanakkor lassabban avatkozik be az irányítási folyamatokba és a nagyobb holtideje ellenére is túlszabályozás nélkül követi le a bemeneti jelet. Ez az operátor kevésbé energikus, óvatos, megfontolt viselkedését jelenti.

HUMÁN OPERÁTOR A ZÁRT FOLYAMATIRÁNYÍTÁSI RENDSZERBEN

Ismeretes, hogy a folyamatirányítási rendszerek a referencia (bemeneti) jelek tekintetében lehetnek értéktartó, vagy értékkövető szabályozási rendszerek. Az értéktartó folyamatirányítási rendszerekben a referenciajel állandó. Ily módon, az operátor feladata a következő: a rendszerre ható külső és belső zajok és zavarások ellenére, a referenciajel értékének megtartása.

Az értékkövető folyamatirányítási rendszerekben a referenciajel változik. E változás lehet előre ismert, mint például a légi járművek leszállásának flare (kilebegtetés) fázisa, amikor is a valós repülési magasság egy előre definiált exponenciális függvény szerint változik.

Egyes folyamatirányítási rendszerekben az alapjel, és azzal együtt a jelkövetési folyamat hibajele is véletlenszerűen, és állandóan változik (pl. célzás mozgó légi, vagy felszíni célpontra). Ily módon, ha operátor gondoskodik a jelkövetési feladat végrehajtásáról (félautomatikus irányítás), akkor az irányítási (célzási) folyamat során az operátorra nagy fizikai és pszichés terhelés hárul, a neuromuszkuláris modelljének paraméterei leromlanak.

A továbbiakban vizsgálatainkat korlátozzuk kis méretű UAV-k félautomatikus irányítására. A vizsgált SUAV legyen a Trainer-60 típusú, kis méretű, hobbicélú UAV, amelynek dőlési szögét félautomatikusán változtatják meg. Ez a gyakorlatban azt jelenti, hogy a $\phi_r(t)$ referenciajel, és az UAV $\phi(t)$ kimeneti válaszele $e(t)$ különbségét kiszámítják, és kijelzik az operátor számára.

Az UAV-kezelő igyekszik a két jel különbségét jelentő $e(t)$ hibajelet megszüntetni, vagyis az UAV-t egy megadott (idealizált, referencia)

repülési pályán végigvezetni úgy, hogy ideális esetben teljesüljön az $e(\infty) \rightarrow 0$ irányítási stratégia, vagy az $|e(\infty)| \leq \epsilon$ valós, reálisan kitűzhető stratégia, ahol ϵ a megengedett statikus hiba nagysága. [7] [9] [10]

A klasszikus aerodinamikai elrendezésű Trainer-60 SUAV térbeli oldalirányú mozgásának teljes állapotteres modellje a következő alakban írható fel [13] [14]:

$$\dot{x} = Ax + Bu = \begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{p} \\ \dot{r} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,7724 & 0 & -18,9671 & 9,0867 \\ 1,9247 & -19,9149 & 7,7565 & 0 \\ 69,1314 & -23,8689 & -2,5966 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ p \\ r \\ \phi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 2,2582 \\ -23,8289 & 1,5015 \\ -11,7532 & -15,2855 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_a \\ \delta_r \end{bmatrix} \quad (10)$$

ahol: v a keresztirányú, egyenes vonalú mozgás sebessége; p a dőlési szögsebesség, r a legyező szögsebesség, ϕ a dőlési szög, δ_a a csűrőlapok szöghelyzetének változása, és végül δ_r az oldalkormány szöghelyzetváltozása.

Tegyük fel, hogy az UAV-operátor kiküszöböli az UAV lassan változó, fugoid, hosszúperiodikus pályalengéseit, így a SUAV egyszabadságfokú, rövidperiodikus mozgásának állapotegyenlete az alábbi egyszerű alakban írható fel:

$$\dot{x} = Ax + Bu = \begin{bmatrix} \dot{p} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -19,9149 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ \phi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -23,8289 \\ 0 \end{bmatrix} \delta_a \quad (11)$$

A (11) dinamikus rendszer A,B mátrixpárját felhasználva megállapítható, hogy a SUAV-dinamika irányítható, mert az irányíthatósági hipermátrix

$$Co = [B \quad AB \quad A^2B \quad \dots \quad A^{n-1}B] = \begin{bmatrix} -23,8289 & 474,5502 \\ 0 & -23,8289 \end{bmatrix} \quad (12)$$

amelynek rangja 2, vagyis a SUAV Kalman-féle értelemben irányítható. [13] [14] A (11) állapotteres UAV-modell A,C mátrixpárját felhasználva megállapítható, hogy az UAV-dinamika megfigyelhető, mert a megfigyelhetőségi hipermátrix

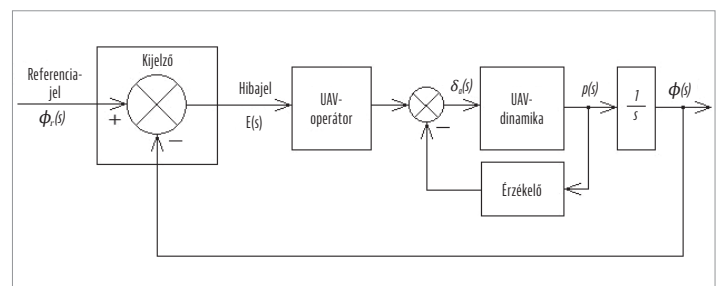
$$Ob = [C \quad CA \quad CA^2 \quad \dots \quad CA^{n-1}]^T = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ -19,9149 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

és e mátrix rangja 2, vagyis az UAV Kalman-féle értelemben megfigyelhető.

A vizsgált SUAV egyváltozós, egyhurkú, zárt folyamatirányítási rendszerének hatásvázlata a 3. ábrán látható. A belső hurokban elhelyezkedő orsózó szögsebesség-érzékelő 0,5 értékű proporcionális tag. A kijelző a megszüntetendő $e(t)$ hibajelet jeleníti meg az UAV-operátor számára.

A (11) állapotteres modell segítségével a SUAV belső hurokjában az UAV dinamikája könnyen meghatározható:

$$p' + 19,9149p = -23,8289\delta_a \quad (14)$$



3. ÁBRA. A félautomatikus irányítás elve (A szerző szerkesztése)



vagy zérus kezdeti feltételek mellett, az alábbi Laplace-transzformált alakban is felírható:

$$sp(s) + 19,9149p(s) = -23,8289\delta_a(s) \quad (15)$$

amely egyenletből a SUAV átviteli függvénye a következő lesz:

$$Y_{UAV}(s) = \frac{p(s)}{-\delta_a(s)} = \frac{23,8289}{s+19,9149} \quad (16)$$

Mindezen előkészületek után már elkezdhetjük vizsgálni a SUAV dőlési szögének félautomatikus irányítási rendszere követési tulajdonságainak viselkedését különféle $\phi_r(t)$ értékek mellett. Ismeretes, hogy a repülési irányszöget főként a dőlési szög megváltoztatásával, tehát az UAV bedöntésével érhetjük el a leginkább energikus módon. [7] [9] [13] [14]

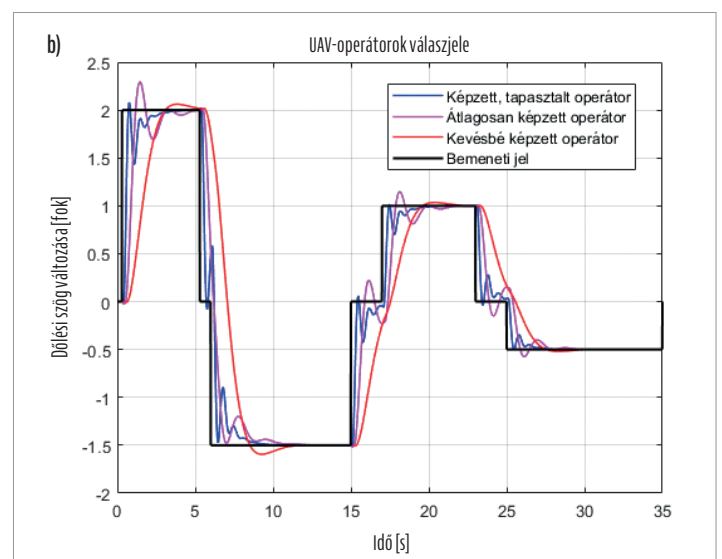
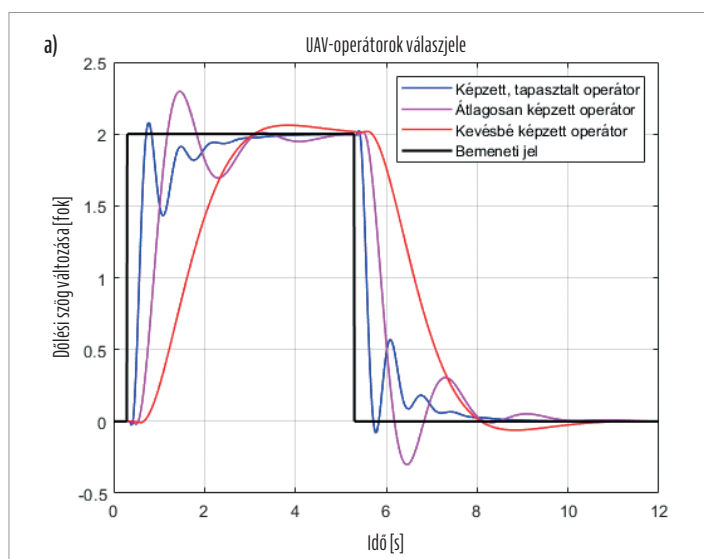
HIRTELEN MEGJELENŐ, HIRTELEN ELTŰNŐ, ASZIMMETRIKUS NÉGYSZÖGJEL

Az útvonalrepülések során az újabb navigációs töréspontnál a kezdeti, egyensúlyi $\phi_r(0) = 0^\circ$ bedöntési szöget adott értékre kell állítani, hogy az UAV ráforduljon a következő repülési pályaszakaszra. A $\phi_r(t)$ bemeneti vizsgálójel egy gyorsan változó folyamatot repre-

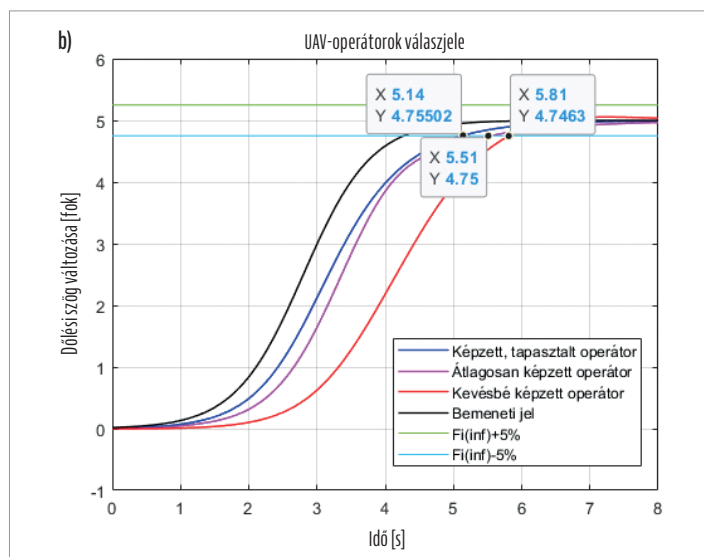
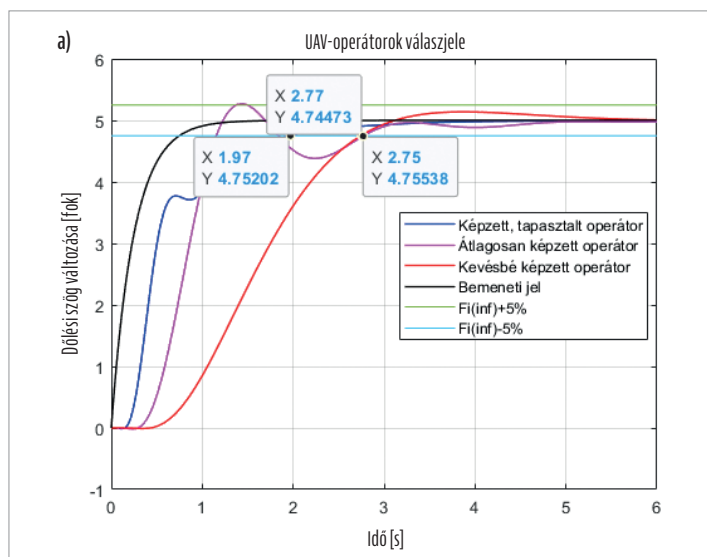
zentál. Az UAV bedöntése révén az elkezd változtatni az irányszögét, és az átmeneti folyamat végén az UAV egy új irányszögön folytatja a repülését.

A 4.a ábra egy ilyen helyzetet mutat be. A 4.a ábrán jól látható, hogy a képzett, tapasztalt UAV-operátor agilis ($K=3$), mondhatjuk, hogy agresszív módon igyekszik követni a bemeneti jelet, míg a legkevésbé képzett operátor ($K=1$) inkább a biztonságra törekszik: nagyobb holtidővel, és lassabban avatkozik be. Az átlagosan képzett UAV-operátor ($K=2$) nagy túlszabályozással működik, beavatkozása gyorsabb, mint a kezdő operátoré, és a viselkedése közelíti a képzett UAV-operátor agilis beavatkozását. Elmondhatjuk, hogy mindhárom tipikus viselkedésű UAV-operátor képes ellátni a feladatát, de teljesen más viselkedési mintát követnek.

A 4.b ábrán egy több négyszögjellel álló $\phi_r(t)$ jelsorozatot vettünk fel lekövetendő, bemeneti referenciajelként, ahol a négyszögjelsorozat sem nem periodikus, sem nem szimmetrikus. Ilyen és hasonló referenciaértékekkel írható le az UAV kis magasságú repülési pályája, amikor épített környezetben kell a repülést végrehajtani. A 4.b ábrán is jól látható, hogy bár a különféle viselkedési mintákkal bíró UAV-operátorok ellátnak feladataikat, de a beavatkozásaik jellege és minősége



4. ÁBRA. A képzett, az átlagosan képzett és a kevésbé képzett UAV-operátor válaszelei (A MATLAB-script a szerző szerkesztése)



5. ÁBRA. A képzett, az átlagosan képzett és a kevésbé képzett UAV-operátor válaszelei (A MATLAB-script a szerző szerkesztése)

alapján elmondható, hogy az egyes irányító beavatkozások más és más energiaigénnyel járnak. Ily módon, főként a SUAV kategóriában, ahol nagymértékben korlátos a fedélzeten rendelkezésre álló villamos és egyéb energiaféle, a túlzott mértékű energiafelhasználás lényeges, akár 30-40%-ban is csökkentheti a repülési időt, amire a gyártók és a forgalmazók is rendszerint felhívják úgy az UAV-t üzemeltetőt, mint az UAV-operátorok figyelmét. Megállapíthatjuk tehát, hogy az UAV-operátorok elméleti és gyakorlati képzésének egyik fontos eleme kell, hogy legyen az UAV energiatudatos irányítása.

LASSAN VÁLTOZÓ VIZSGÁLÓJEL

A vizsgálójelnek e kategóriájában most két bemeneti referenciajelet vizsgálunk, amelyek az alábbiak:

- lassan változó, exponenciális jel: $\phi_r(t) = 5 \cdot (1 - e^{-4 \cdot t})$ (17)
- logisztikus (szigmoid¹) függvény: $\phi_r(t) = 5 / (1 + e^{2(2,8-t)})$ (18)
- '1-cos' jel: $\phi_r(t) = 5 - 5 \cdot \cos(0,2\pi \cdot t)$ (19)
- harmonikus jel: $\phi_r(t) = 5 \cdot \sin(0,2\pi \cdot t)$ (20)

Az 5.a ábrán jól látható, hogy a képzett operátor gyorsan követi le a $\phi_r(t)$ exponenciális referenciajelet, de a viselkedése és a beavatkozás most is agilis, agresszív; míg az átlagos, és a kevésbé képzett operátor jóval nagyobb beavatkozási idővel rendelkezik.

Az 5.b ábra alapján megállapíthatjuk, hogy ebben az esetben is a képzett UAV-operátor adja a leggyorsabb választ, de a másik két UAV-operátor tranziens ideje most nem növekszik akkora mértékben, mint az exponenciális bemeneti referenciajel esetén.

Egy másik fontos tulajdonsága mindhárom UAV-operátornak, hogy nagyon jól követik a szigmoid függvény alakját, nincsenek túlszabályozások a rendszerben, vagyis az operátorok viselkedése nem agresszív. Következtetésként tehát megállapíthatjuk, hogy az UAV-k repülési pályáinak tervezésekor a szigmoid függvény jól használható pályageometria.

A 6.a ábrán az UAV-operátorok „1-cos” determinisztikus bemeneti vizsgálójelre adott válaszfüggvényei láthatók. Könnyen belátható, hogy az operátorok nagyon jól lekövetik a $\phi_r(t)$ bemeneti referenciajel változását, és egyik UAV-operátor sem agilis a beavatkozás során.

Mindazonáltal, az UAV-operátorok holtideje és időkése miatt egyre nő a tranziens idő, és még a képzett operátor sem képes időkése nélkül lekövetni a bemeneti jelet.

Most vessük össze a 4.a és a 6.a ábrán látható válaszfüggvényeket. Szembetűnő, hogy az UAV-operátorok a négyesszögjel bemeneti jelle erősen, vagy kevésbé erősen, de lengő tranziens folyamatokkal válaszolnak, míg az '1-cos' típusú bemeneti referenciajelet lengések nélkül képesek lekövetni.

A 6.b ábrán az UAV-operátorok harmonikus (szinuszos) bemeneti jelle adott válaszfüggvényeit láthatjuk. Az ábrán jól látszik, hogy az UAV-operátorok lekövetik a bemeneti referenciajelet, de a kezdő, kevésbé képzett operátor csak nagyon nagy késéssel képes követni a referenciajel változó értékét.

A gyakorlatban érdemes megvizsgálni, hogy ez az időkése nem veszélyezteti-e a repülési feladat sikeres és eredményes végrehajtását.

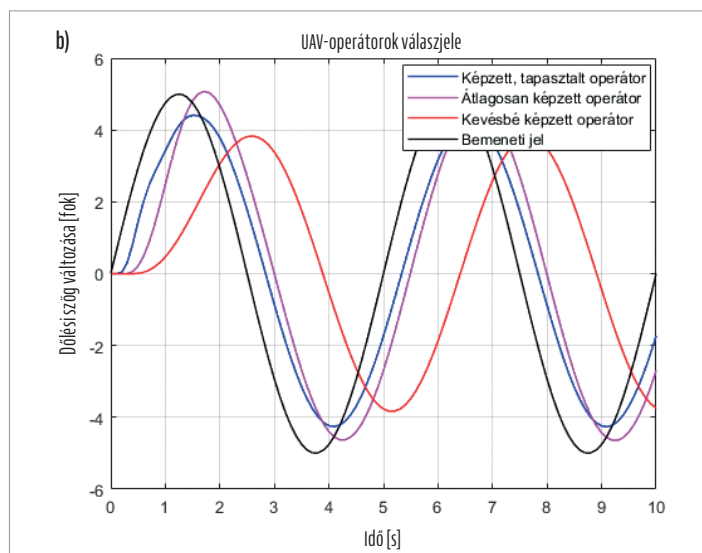
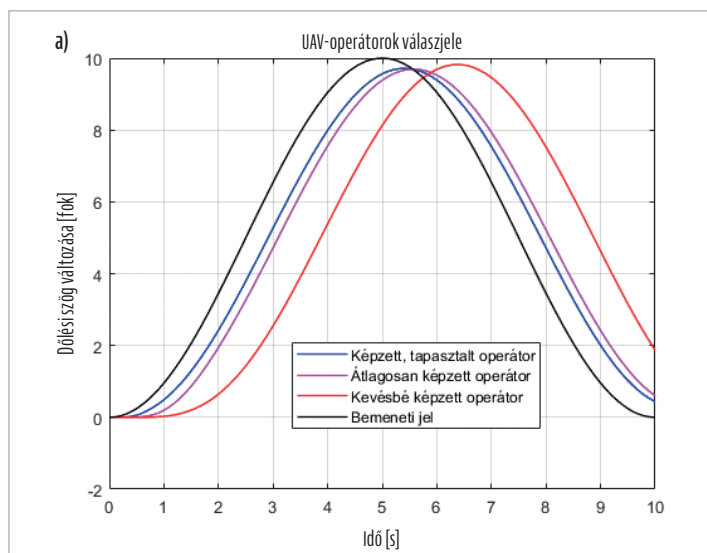
Előfordulhat, hogy a $\phi_r(t)$ referencia dőlési szög az irányaszög olyan szükséges és elégséges változását kell, hogy létrehozza, amely a repülés során lehetővé teszi a statikus tereptárgyakkal (pl. városi, épített környezetben házak, köztéri lámpaoszlopok, műemlékek stb.; lakott területeken kívüli, természetes környezetben adótoronyok, ipari létesítmények, kémények, villamos távvezeték tartóoszlopai, fák stb.) történő összeütközés elkerülését.

Ilyen esetekben, a nagy időkése és holtidők nem feltétlenül engedhetők meg a repülésbiztonság veszélyeztetése miatt. Az UAV-operátor matematikai modellje paramétereinek kritikus értékét meghatározhatjuk, ha elvégezzük a 3. ábrán látható zárt szabályozási rendszer stabilitásvizsgálatát. E célra is nagyon jól használhatóak a Routh-, vagy a Hurwitz-féle algebrai stabilitásvizsgálati módszerek és stabilitási kritériumok.

ÖSSZEGZÉS

Az UAV-operátorok irányítási tevékenysége is jól leírható matematikai módszerekkel. A zárt folyamatirányítási rendszerek sokszor arra tervezettek, hogy félautomatikus üzemmódokon az operátor, a kezelő – a megfelelő és szükséges tréningek sikeres abszolválása után – a zárt szabályozási rendszer végrehajtó és beavatkozó „szerveként” tevékenykedjen.

¹ A szigmoid függvények gyűjtőnév alatt 'S' alakú grafikonnal rendelkező (általában valós értékű és folytonos) függvényeket szokás érteni. Ezek közel szimmetrikus viselkedést mutatnak az induló- és a megállapodó tartományban.



6. ÁBRA. A képzett, az átlagosan képzett és a kevésbé képzett UAV-operátor válaszelei (A MATLAB-script a szerző szerkesztése)

Az operátorok a tevékenységük kezdetén csak korlátozott tapasztalattal rendelkeznek, mivel a szükséges kiképzés/felkészítés során – rendszerint – csak a szükséges minimális tudásra és kevés gyakorlati tapasztalatra tesznek szert.

Az UAV-operátorok a szakmai pályafutásuk során folyamatosan javítják szakmai elméleti, és gyakorlati tudásukat, és gyűjtik az UAV-k földi, és légi üzemeltetésének tapasztalatait. Mindazonáltal jól megfigyelhető, hogy a megfelelő szakmai tapasztalat megszerzése után az operátorok sokszor túlságosan is magabiztos, agilis, szélső esetben agresszív viselkedési formát vesznek fel, amely tükröződik az irányítási rendszerben megvalósított beavatkozásaikban is. Ily módon, az agresszív UAV-irányításoknak nagyobb lesz az energiaigénye, amely lényeges mértékben leronthatja az UAV-k gyártók által garantált műszaki-technikai paramétereket.

Szakmai pályafutásuk elején, a kezdő UAV-operátorok csak korlátozott repülési feladatok végrehajtásában vehetnek részt, mivel a prediktív képességük – repülési tapasztalatok hiányában – még nem teljesen fejlődött ki, és a pszichés terhelések miatt nagy időkésséssel avatkoznak be, amely veszélyeztetheti a repülésbiztonságot. Megemlítjük, hogy a műveleti területeken végrehajtott UAV-repülések során az operátorokat nagymértékű harcmezei stresszhatás is éri, ami nemcsak az operátori, hanem az alapvető katonai képességeiket is lényeges mértékben lerontja.

Végezetül különösen fontos annak hangsúlyozása, hogy a képzett és már tanúsított UAV-operátornak minden repülés előtt képesnek kell lennie a saját fizikai állapotának és alkalmasságának megítélésére ahhoz, hogy egy UAV-val történő repülést hajtson végre. Különösen fontos ellenállni a repülés kísértésének, ha tudottan nem megfelelő az operátor alkalmassága a repülésre.

KITEKINTÉS

Az UAV-k zárt irányítási rendszerében tevékenykedő kezdő operátorok gyakran maguk hoznak létre olyan kezelhetetlen repülési helyzetet (pl. a PiO – Pilot induced oscillations jelenség²), amely az esetek döntő többségében egyenes utat jelent az UAV elvesztéséhez. Ez

² A pilóta által kiváltott oszcillációk (PiO) ritka, váratlan és nem szándékos eltérések a repülőgép helyzetében és repülési útvonalában, amelyet a repülőgép és a pilóta közötti rendellenes kölcsönhatások okoznak. (A szerk.)

a „túlhúzott”, agresszív irányítás főleg a képzett, túlzottan magabiztos UAV-operátorokra jellemző. Az UAV-operátorok képzésének egy nagyon fontos része lehet tehát annak megtanítása, hogy milyen feltételek mellett alakulhatnak ki PiO-jelenségek, illetve, ha azok már kezdetüket vették, hogyan lehet kezelni a kialakult repülési helyzetet. ■

HIVATKOZÁSOK

- [1] McRuer, D. T., Krendel, E. S. Dynamic Response of Human Operators, WADC Technical Report, 56–524., 1957. <https://doi.org/10.21236/AD0110693> (Letöltve: 2023. 09. 15.)
- [2] Ward, J. R. The Dynamics of a Human Operator in a Control System – A Study Based on the Hypothesis of Intermittency. PhD Dissertation, University of Sydney, Australia, 1958.
- [3] McRuer, D. T., Krendel, E. S. The Human Operator as a Servo System Element. Journal of the Franklin Institute, Vol. 267, Issue 5, pp. 381–403., 1959. [https://doi.org/10.1016/0016-0032\(59\)90091-2](https://doi.org/10.1016/0016-0032(59)90091-2) (Letöltve: 2023. 09. 15.)
- [4] McRuer, D. T., Graham, G., Krendel, E., Reisener, W. Human Pilot Dynamics in Compensatory Systems. US Government Report, AFFDL-TR-65-15, 1965. <https://doi.org/10.1109/THFE.1965.6591261> (Letöltve: 2023. 09. 15.)
- [5] Bekey, G. A. The Human Operator in Control Systems. University of Southern California, USCEE Report 359, 1969.
- [6] McRuer, D. T., Krendel, E. S. Mathematical Models of Human Pilot Behavior. NATO AGARD-AG-188, 1974.
- [7] Aslanyan, A. E. Aircraft Automatic Flight Control Systems, Part I. Kiev Military Aviation Technical Academy, Kiev, Ukraine, 1984.
- [8] McRuer, D. T., Clement, W. F., Thompson, P. M., Magdaleno, R. E. Minimum Flying Qualities, Volume II, Pilot Modeling for Flying Qualities Applications. Technical Report WRDC-TR-89-3125, 1990.
- [9] McLean, D. Automatic Flight Control Systems. Prentice Hall International (UK) Ltd., 1990.
- [10] MIL-HDBK-1797A, Notice3, Flying Qualities of Piloted Aircraft, USA MoD, Interface Standard, p. 849., 2004.
- [11] Wael, A., Omar, A., Satam, I. A. Developing Google Areal Images Using Flying Robot with Specified Path. LAP Lambert Academic Publishing House, Saarbrücken, Germany, ISBN 3-6597-7081-7, 2015.
- [12] Wael, A., Omar, A., Satam, I. A. Effect of Path Planning on Flying Measured Characteristics for Quadcopter Using APM2.6 Controller. International Journal of Engineering Trends and Technology, Vol. 23, Issue 7, pp. 329–334., 2015. <https://doi.org/10.14445/22315381/IJETT-V23P262> (Letöltve: 2023. 09. 15.)
- [13] Szabolcsi, R. UAV/UAS rendszerek koncepcionális és előzetes tervezése, vizsgálata. Óbudai Egyetem, ISBN 978-963-449-169-9, p. 282., 2019.
- [14] Szabolcsi, R. Pilóta nélküli légi járművek automatikus repülésszabályozó rendszerei. Óbudai Egyetem, ISBN 978-963-449-168-2, p. 640., 2020.
- [15] Szabolcsi, R. Humán operátorok tevékenységének matematikai modellezése. Haditechnika, LVII. évf. 2023/6., pp. 2–9. <https://doi.org/10.23713/HT.57.6.01>