

SZABOLCSI RÓBERT*

UAV-OPERÁTOROK ÁLTAL LÉTREHOZOTT HOSSZÚPERIODIKUS, DIVERGÁLÓ LENGÉSEK

ÖSSZEFOGLALÁS: A humán operátorok a légi járművek irányítása során akaratlanul is létrehozhatnak olyan divergáló, instabil lengéseket (Pilot-Induced Oscillation – PIO), amelyek akár a légi jármű komoly sérüléséhez, vagy esetleg az elvesztéséhez is vezethetnek. A hagyományos légi járművek PIO-jelenségeit már régóta vizsgálják a szakemberek, de a pilóta nélküli légi járművek (Unmanned Aerial Vehicle – UAV) PIO-jelenségei csak nemrég kerültek a tudósok látókörébe. Így módon, az UAV-k rohamos elterjedésének is köszönhetően, ez a terület a jelen és a közeljövő ígéretes kutatási területe, amelynek eredményeit az UAV-alkalmazók, és főleg az UAV-operátorok hathatósan tudják majd felhasználni.

KULCSSZAVAK: humán operátor, UAV, PIO, PIO-kategóriák, stabilitásvizsgálat, minőségvizsgálat

ABSTRACT: During UAV operations the operators can establish oscillations of the aircraft even unintentionally. The PIOs might lead to severe damages or to the loss of the aircraft at all. The PIOs of the conventional manned aircraft are in the focus of attention of the experts since many decades. However, due to diversity of the newest and wide-scale UAV applications more and more attention is paid to the PIOs of the UAVs, which is an emerging field holding forth. Hopefully, results and experiences gained in this field will be applied effectively both by UAV owners and also by the UAV operators.

KEYWORDS: human operator, UAV, PIO, PIO categories, stability analysis, dynamic performances analysis

BEVEZTÉS, PROBLÉMAFELVETÉS

A divergáló, instabil lengések (Pilot-Induced Oscillation – PIO), PIO-jelenség néven régóta ismert és kutatott területe a repülésdinamikának. Már az 1950-es évektől előfordultak ezek a nemkívánatos, a repülésbiztonságra is kifejezetten veszélyes jelenségek, amelyek főleg a sugárhajtású repülőgépek, és a nem hagyományos aerodinamikai elrendezések megjelenésére, valamint a hajózók nem megfelelő képzésére voltak visszavezethetők.

Ismeretes, hogy a PIO jellegzetes folyamatainak hátterében számos ok állhat, és többféle PIO is kialakulhat, amelyek kimenetele is lényegesen elérhet egymástól. A hagyományos légi járművek PIO-jelenségeit az első repülőesemények óta naplózzák, és a speciális esetek dokumentációit vizsgálják, majd az elemzések eredményeit és a megállapításokat közzéteszik.

A pilóta nélküli légi járművek (Unmanned Aerial Vehicle – UAV) rohamtempójú és változatos elterjedésével egyre gyakrabban találkozhatunk az UAV-repülések esetén is a PIO-jelenséggel, ugyanis itt is egyre inkább megfigyelhető és tapasztalható az UAV-k építésében alkalmazott nem hagyományos aerodinamikai elrendezés.

A jelenség elnevezése alapján is könnyen belátható, hogy a PIO egyes fajtáit az UAV-operátor, a kezelő nem megfelelő tevékenysége indíthatja el. Ez visszavezethető részben az operátorok képzettségének esetleges hiányosságaira, az operátori készségek részleges



hiányára, vagy az operátor repülés közben fennálló fizikai-mentális állapotára.

A szerző célja annak bemutatása, hogy az operátorok fizikai-mentális állapota és a tevékenysége hogyan befolyásolja az UAV-k repülési paramétereit, valamint a zárt irányítási folyamatok stabilitását és minőségét.

TUDOMÁNYOS ELŐZMÉNYEK

A pilóta nélküli légijármű-rendszer (Unmanned Aircraft System – UAS) egyik fontos elemeként, az UAV-k irányítását végző humán operátorok matematikai modellezése hosszabb időszakra nyúlik vissza. Laboratóriumi és repülő-szimulátoros, tudományos kísérletek eredményeként az UAV-operátorok viselkedésének leírására többféle átviteli függvényt is identifikáltak. [1] [3] [4] [5]

A humán operátorok zárt folyamatirányítási rendszerekben betöltött szerepét a [11] [15] irodalmak vizsgálták. Az UAV-k felderítési célú alkalmazását a [12] és a [13] források mutatják be, ahol az UAV-k térképezést szolgáló repüléseihez a szerzők a megfelelő repülési pályák tervezését vizsgálták, és javaslatot tettek optimális repülési pályák geometriájára.

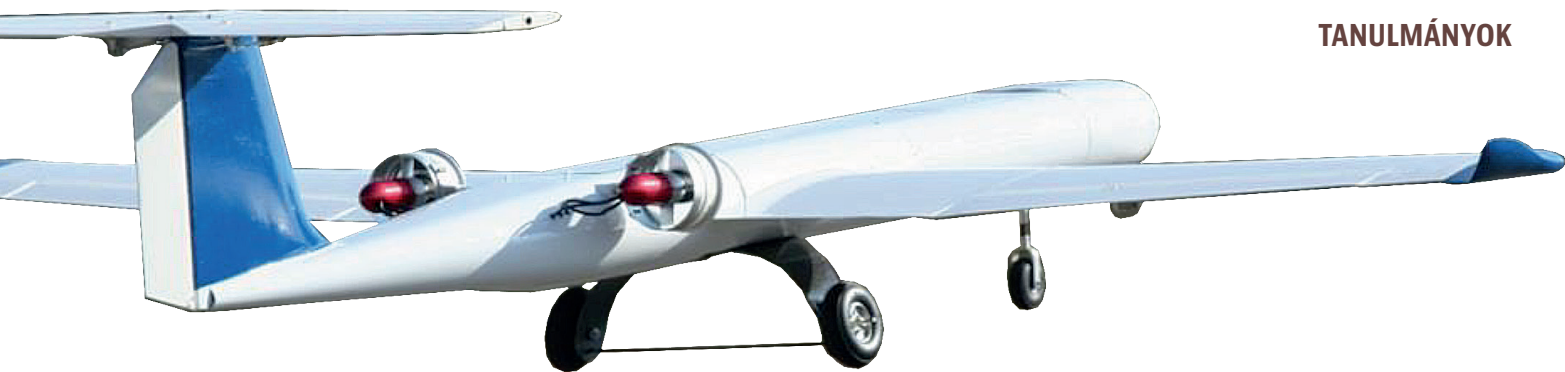
A PIO definícióját a [9] forrás adja meg. A PIO-jelenség kialakulásának fizikai és egyéb hátterét már a kezdeti időktől alaposan tanulmányozták. [2] [6] [7] A PIO-jelenség lengéseinek csillapítását a modern irányításmélet segítségével vizsgálhatjuk. [8] [10]

Az UAV, illetve az UAS-rendszerek esetleges PIO-folyamatait a [11] és a [14] vizsgálta, és széles körben alkalmazták az operátorok tevékenységének lineáris matematikai modellezését a zárt irányítási folyamatokban.

A PIO-JELENSÉGRŐL

A PIO-jelenség definícióját a [9] kézikönyv az alábbiak szerint adja meg: „A PIO fennmaradó, vagy irányíthatatlan lengés, amelyet a pilóta légi járművet irányító tevékenysége hoz létre”. Ismeretes,

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



1. ÁBRA. A „Phastball” SUAV [16]

hogy a légijármű-vezető (pilóta, operátor, kezelő) képes széles határok között megváltoztatni a viselkedését, és a folyamatirányítási rendszerekben a saját tevékenységét leíró matematikai modellt.

Ily módon azt is mondhatjuk, hogy az operátor a változó, adaptálódó tevékenységével megváltoztathatja a légi jármű irányításának nyílt, vagy zárt hatásvázlatát is. A légi jármű irányítóinak lehetséges viselkedését az alábbiak szerint adhatjuk meg [2] [6] [7]:

- „kompenzáló”: a hajózó tevékenysége a hibajelek kompenzálására korlátozódik (pl. hibajelek megszüntetése nullindikátorok segítségével);
- „üldöző”: a hajózó tevékenysége a hibajelek kompenzálására irányul, de irányító tevékenysége közben figyelembe veszi úgy a rendszer bemeneteit, mint a rendszer kimeneteit is (pl. félautomatikus leszállás ILS-rendszer által szolgáltatott adatok alapján);
- „üldözés előre látással”: a folyamatok előre „látása”, ha új bemeneti jelekkel irányít az operátor (főként tapasztalatokon alapuló prediktív képesség);
- „pre-kognitív”: képzett operátorra jellemző viselkedés, főként felnyitott irányítási rendszerekben;
- „pre-kognitív” / „kompenzáló”: operátorok viselkedése több irányítási csatornában egyidejűleg végrehajtott irányítási tevékenység során.

A légijármű-vezetők, operátorok fenti „normális” viselkedési formái mellett megkülönböztetünk számos, általuk tanúsított „abnormális” viselkedést is, mint például a [2] [6] [7]:

- nem megfelelő, nem koordinált viselkedés;
- nem megfelelő adaptáció a más viselkedési formát megkívánó helyzetekhez;
- túlságosan nagy erősítéssel történő beavatkozás, agilis, esetleg agresszív irányítás;
- átmenetek az egyes, korábban ismert viselkedési formák között;
- tranziens folyamatok utáni „beragadás”, „megrekedés”.

A PIO lehetséges okait [2] az alábbiak szerint foglalta össze:

a pilóta nem megfelelősége:

- nem megfelelő, hiányos képzés;
- nem megfelelő adaptáció (pl. az egyébként sem megfelelő vezetési technikák átvitele két légi jármű között);

túlzott elvárások, számottevő igények a pilóta adaptációs képességével szemben;

- az elvárt erősítés, az időkésés, és a predikciós képességek messze túlmutatnak a pilóta valós, meglévő adottságain és képességein;
- a pilóta adaptációjának alacsony sebessége a lengések kizárásához, vagy a kialakult lengések megszüntetéséhez;
- nem megfelelő képességek a nemlinearitások kezeléséhez;

csatolt „végtagoperátor” rendszer;

- a neuro-muszkuláris rendszer fizikai hatása a légi jármű kezelőszerveire megváltoztatja az irányítási rendszerek dinamikáját;

- a pilóta nem szándékos, mozgások miatti terhelések által vezérelt végtagkitérései.

A légi járművek PIO-eseményeit az előfordulásuk jellege szerint az alábbi kategóriákba sorolhatjuk:

CAT I PIO: A LINEÁRIS „PILÓTA-LÉGI JÁRMŰ” RENDSZER LENGÉSEI

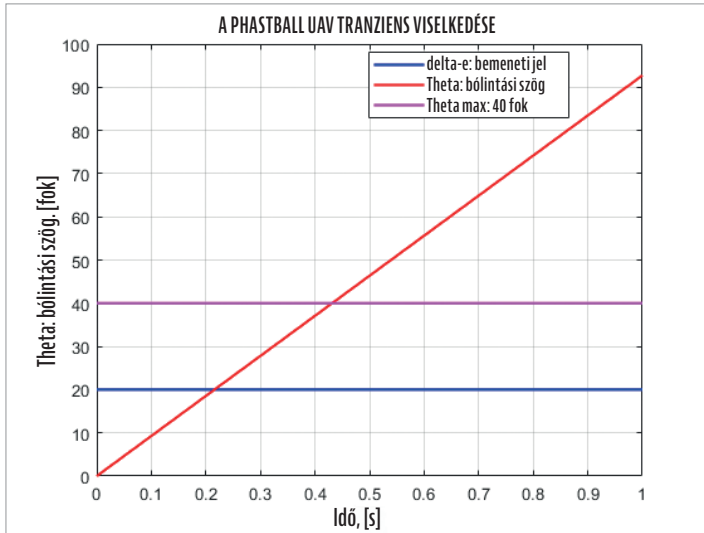
E PIO-kategóriára jellemző, hogy úgy a légi jármű irányítási rendszerének elemeit, mint a hajózó/operátor viselkedését is lineáris, vagy kvázilineáris modellekkel írhatjuk le. Ebben az esetben a PIO-jelenséget főként a felnyitott folyamatirányítási rendszerek nagy erősítési tényezője okozza. E kategóriában a PIO eseti, könnyen megismételhető, de a kormánysszervek elengedésével, más szóval, a hajózó/operátor erősítésének csökkentésével könnyen megszüntethető, és általában nem jelent veszélyt a repülésbiztonságra. Mindazonáltal, a gyorsan változó, nagy bemeneti jelek még ebben az esetben is eredményezhetik a légi jármű szélsőségesen nagy lengéseit, amely esetleg katasztrófához/géptöréshez is vezethet. E jelenség leginkább azokon a légi járműveken alakul ki, amelyek jelentős időkéséssel bírnak. Az ehhez a kategóriához sorolt PIO-lengések egyaránt lehetnek alacsony, és magas amplitúdójúak is.

CAT II PIO: KVÁZILINEÁRIS „PILÓTA-LÉGI JÁRMŰ” RENDSZER LENGÉSEI A PILÓTÁVAL SORBA KÖTÖTT BEAVATKOZÓ SZERVEK KORLÁTOZÁSÁVAL

E kategóriára jellemző, hogy az irányítási rendszerek előre vezető ágában a pilótával sorba kötött beavatkozó szerv nemlineáris: rendszerint a beavatkozás sebességét, esetleg a munkahengerek dugattyúrúdjának járatát lehatároló korlátozást tartalmaz a szervberendezés, de emellett előfordulhat az is, hogy érzéketlenségi sávval is bír (pl. tolatyús szervoszelepek) a beavatkozó szerv. Mindezen nemlinearitások mellett előfordulhatnak egyéb nemlineáris hatások is: a kormánysszervek nemlineáris függvény szerinti kitérítése, az egyes repülési (pl. a légnyomás nemlineáris függése a repülési magasságtól), illetve aerodinamikai paraméterek nemlineáris függvényei (pl. a torlónyomás nemlineáris függése a repülési sebességtől). A CAT II PIO-jelenségek nagyban hasonlítanak a CAT I PIO-hoz, azzal az eltéréssel, hogy a nemlinearitások nagy időkéséseket hoznak létre a dinamikus rendszerben, és e lengések amplitúdói szélsőségesen nagyok is lehetnek.

CAT III PIO: SZÁMOTTEVŐ MÉRTÉKBEN NEMLINEÁRIS „PILÓTA-LÉGI JÁRMŰ” RENDSZER LENGÉSEI

E kategória PIO-lengései lényeges mértékben függenek a légi jármű dinamikájának nemlinearitásaitól, az irányítási rendszer egyes építőelemeinek (pl. beavatkozó szerv, szabályozó, érzékelő) nemlinearitásaitól, az aerodinamikai folyamatok nemlinearitásaitól, a hajtómű nemlinearitásaitól, a pilóta változó viselkedésétől és az egyes viselkedési formák közötti átmenetektől, a pilóta változó



2. ÁBRA. A Phastball SUAV viselkedése időtartományban: I. (A MATLAB-script a szerző szerkesztése)

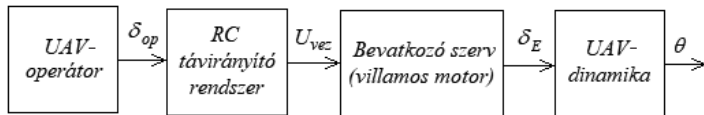
bemeneti utasításaitól, a hirtelen megváltozó repülési feladatoktól, valamint az operátor/pilóta dinamikus modelljének nemlineari-tásaitól is.

KIS MÉRETŰ UAV CAT I PIO JELENSÉGE

A pilóta nélküli repülőgépeket széles körben alkalmazzák többek között a légköri turbulencia, valamint a széllekek és szélnyírások dektálására, mérésre is. Ilyen projekt például a West Virginia University (WVU) által kifejlesztett és gyártott kis méretű, tudományos-kutatási célra használt „Phastball” SUAV. (1. ábra)

A PHASTBALL SUAV NYÍLT HATÁSLÁNCÚ IRÁNYÍTÁSA CAT I PIO ESETÉN

A „Phastball” távirányított SUAV operátora által létrehozott CAT I PIO jelenségét az alábbi nyílt hatásláncú rendszerben vizsgálhatjuk. (4. ábra)



4. ÁBRA. A Phastball SUAV nyílt hatásláncú távirányítása (A szerző szerkesztése)

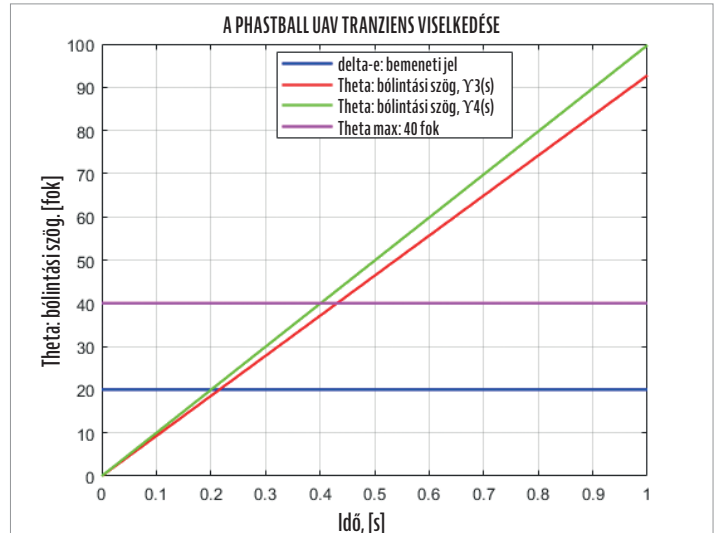
Az UAV-operátor most abban az értelemben vesz részt az UAV távirányításában, hogy létrehozza a SUAV δ_{op} bemeneti jelét. Az RC távirányító rendszer dinamikája magába foglalja a távirányítás adás-vételének holtidejét, valamint a számítógépes jelfeldolgozás egyes műveleteinek, és az U_{vez} beavatkozó jel létrehozásának időigényét. Az RC távirányító rendszer átviteli függvényét az alábbi alakban írhatjuk fel [11]:

$$Y_1(s) = \frac{U_{vez}(s)}{\delta_{op}(s)} = e^{-(\tau_{op} + \tau_{RC})s}, \tag{1}$$

ahol $\tau_{op} = 0,17s$ a matematikai és egyéb számítások valós időszükséglete, míg $\tau_{RC} = 0,1s$ a teljes RC távirányító rendszer összegzett adat-átviteli holtideje. [11] További vizsgálataink során a holtidők ötödrendű Padé approximációs alakjait használjuk majd.

A beavatkozó szerv szerepét gyors működésű villamos szervomotorok látják el, amelyek átviteli függvénye [11]:

$$Y_2(s) = \frac{\delta_E(s)}{U_{vez}(s)} = \frac{0,0217}{0,1222s + 1}. \tag{2}$$



3. ÁBRA. A Phastball SUAV viselkedése időtartományban: II. (A MATLAB-script a szerző szerkesztése)

1. TÁBLÁZAT. A Phastball SUAV pólusai, zérusai és minőségi jellemzői (A szerző szerkesztése)

Pólusok (p), zérusok (z)	Csillapítási tényező, ξ , [-]	Körfrekvencia, ω , [rad/s]
$p_1 = 0,0295$	-1	0,0295
$p_2 = 0,414$	-1	0,414
$p_{3,4} = -3,92 \pm 3,48i$	0,748	5,25
$z_1 = -3,2774 \cdot 10^{16}$		
$z_2 = -0 \cdot 10^{16}$		
$z_3 = 0 \cdot 10^{16}$		

Végezetül, a „PhastBall” távirányított SUAV hosszirányú irányítási csatornájában a CAT I PIO-jelenség identifikált modelljére az alábbi átviteli függvényt alkalmazzuk [11]:

$$Y_3(s) = \frac{\theta(s)}{-\delta_E(s)} = \frac{8,882 \cdot 10^{-16} s^3 + 29,11 s^2 + 123,4 s - 56,09}{s^4 + 7,406 s^3 + 24,05 s^2 - 12,11 s + 0,3362}, \tag{3}$$

ahol: $\theta(s)$ a bőlíntási szög, $\delta_E(s)$ pedig: magassági kormány szöghelyzetének megváltozása. Az UAV $\delta_E(t) = 20t$ bemeneti jelle adott válaszfüggvénye a 2. ábrán látható.

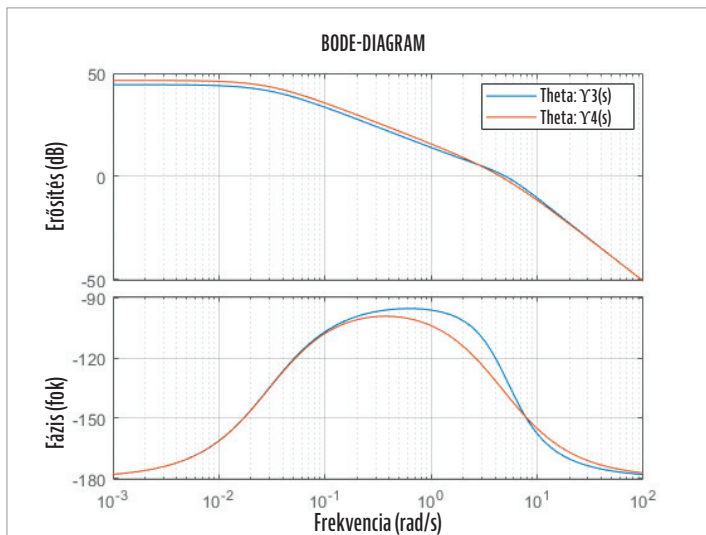
A 2. ábra alapján megállapítható, hogy az UAV nagyon gyorsan reagál a bemeneti jelle, és hamar eléri a légi üzemeltetés θ_{max} értékét. Az UAV dinamikáját meghatározó (3) átviteli függvény alapján a pólusok és a zérusok most az 1. táblázatban foglaltaknak megfelelően alakulnak.

A MATLAB minreal.m függvénye segítségével 10%-os pontossággal elvégezve a (3) dinamikus rendszer egyszerűsítését, más szóval, az egymáshoz megfelelően közel eső zérusok és pólusok kizárását, az alábbi közelítő átviteli függvényt kapjuk:

$$Y_3(s) = \frac{\theta(s)}{-\delta_E(s)} = \frac{8,882 \cdot 10^{-16} s^3 + 29,11 s^2 + 123,4 s - 56,09}{s^4 + 7,406 s^3 + 24,05 s^2 - 12,11 s + 0,3362} \approx \frac{8,882 \cdot 10^{-16} s + 29,11}{s^2 + 4,624 s - 0,1373}, \tag{4}$$

A SUAV választát a $\delta_E(t) = 20 \cdot 1(t)$ bemeneti jelle a 3. ábrán láthatjuk. Az ábrán úgy ábrázoltuk a (3) átviteli függvényvel megadott UAV válaszfüggvényét, mint a modell egyszerűsítése révén nyert UAV-modell válaszfüggvényét.

A 3. ábra alapján megállapítható, hogy az UAV hosszirányú mozgásmodelljének egyszerűsítése a bőlíntási szög megengedett tartomá-



5. ÁBRA. A Phastball SUAV viselkedésének vizsgálata frekvenciatartományban (A MATLAB-script a szerző szerkesztése)

nyán nem okoz érdemi változást. Az 5. ábra az UAV Bode diagramját mutatja be.

Könnyen belátható, hogy az erősítés csak elhanyagolhatóan kis mértékben változik, míg a fázisszög közepes frekvenciatartományban változik meg érdemben.

A 3. ábra alapján megállapítható, hogy a SUAV viselkedése az identifikált CAT I PIO dinamikus modellje alapján instabil. [11]

A (4) egyenlet karakterisztikus egyenletének gyökeit, más szóval, a SUAV pólusait, illetve zérusait és a minőségi jellemzőit *A Phastball SUAV egyszerűsített modelljének pólusai, zérusai és minőségi jellemzői* című, 2. táblázat foglalja össze.

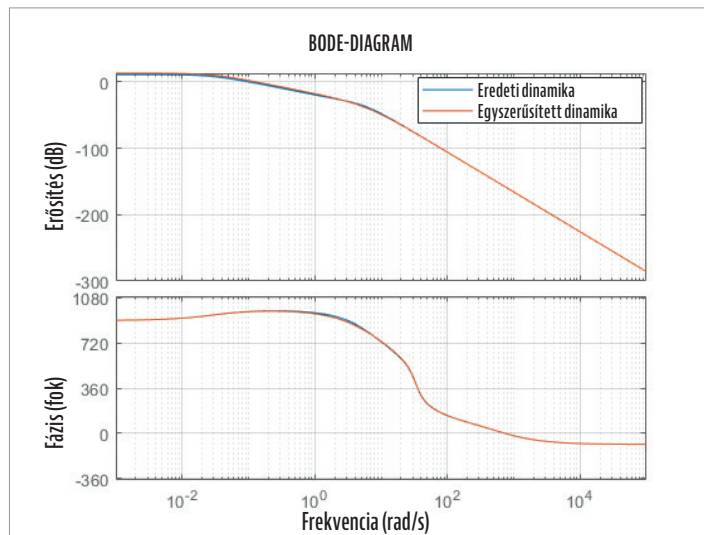
Mivel a Phastball SUAV egy valós, pozitív előjelű pólussal is rendelkezik (p_1), ezért a SUAV a korlátos, ugrásfüggvény jelleggel, hirtelen változó $\delta_e(t)$ bemenetre aperiodikusan divergáló, instabil $\theta(s)$ bólintási szög válaszfüggvénnyel reagál.

Az UAV 4. ábrán látható teljes, nyílt hatásláncú irányítási rendszer átviteli függvénye az (1)–(3) egyenletek segítségével most az alábbi alakban adható meg:

$$Y_{O.L.}(s) = \frac{\theta(s)}{\delta_{op}(s)} = Y_1(s)Y_2(s)Y_3(s) = e^{-(\tau_{op} + \tau_{RC})s} \cdot \frac{0,0217}{0,1222s+1} \cdot \frac{8,882 \cdot 10^{-16}s+29,11}{s^2+4,624s-0,1373} \quad (5)$$

A vizsgált SUAV (5) átviteli függvénye, a holtidő ötödrendű Padé-approximációs közelítése esetén, nyolcadrendű karakterisztikus egyenlettel bír. Az (5) átviteli függvény alapján könnyen belátható, hogy a Phastball SUAV CAT I PIO dinamikája miatt a felnyitott hatásláncú irányítási rendszer is instabil működésű lesz, mivel az (5) átviteli függvény nevezőjében egy negatív előjelű együttható is található.

A SUAV felnyitott irányítási rendszerének (4) átviteli függvénye, és annak egyszerűsítése révén nyert (5) rendszermodell viselkedését a 6. ábrán hasonlíthatjuk össze.

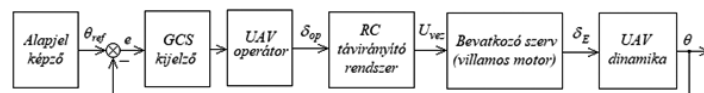


6. ÁBRA. A Phastball SUAV nyílt hatásláncú irányításának vizsgálata frekvenciatartományban (A MATLAB-script a szerző szerkesztése)

A 6. ábrán jól látható, hogy az UAV dinamikájának egyszerűsítése a nyílt hatásláncú irányítás (4. ábra) frekvenciatartománybeli viselkedését érdemben nem befolyásolja, tehát a dinamikus modell egyszerűsítése nem vezet érdemi eltéréshez. Ily módon, a továbbiakban az egyszerűsített modellekkel dolgozunk.

A PHASTBALL SUAV ZÁRT HATÁSLÁNCÚ IRÁNYÍTÁSA CAT I PIO ESETÉN

Az UAV-k CAT I PIO-jelenségre való fogékonyságát, hajlamát a Neal-Smith kritérium alapján zárt hatásláncú irányításokkal kezeljük, amikor az operátor maga is tagja, aktív résztvevője a zárt irányítási folyamatnak. [11] Az UAV zárt hatásláncú PiL (Processor-in-the-Loop) irányítását a 7. ábra mutatja be. E rendszerben az operátor kijelzője a megszüntendő $e(t) = \theta_{ref}(t) - \theta(t)$ hibajelét jelzi ki számára.



7. ÁBRA. A Phastball SUAV nyílt hatásláncú távirányítása (A szerző szerkesztése)

A Neal-Smith kritérium az operátor zárt hatásláncban kifejtett tevékenységének modellezésére az alábbi átviteli függvény alkalmazását javasolja:

$$Y_2(s) = \frac{\delta_{op}(s)}{e(s)} = K \frac{1+sT_L}{(1+sT_N)} e^{-s\tau} \quad (6)$$

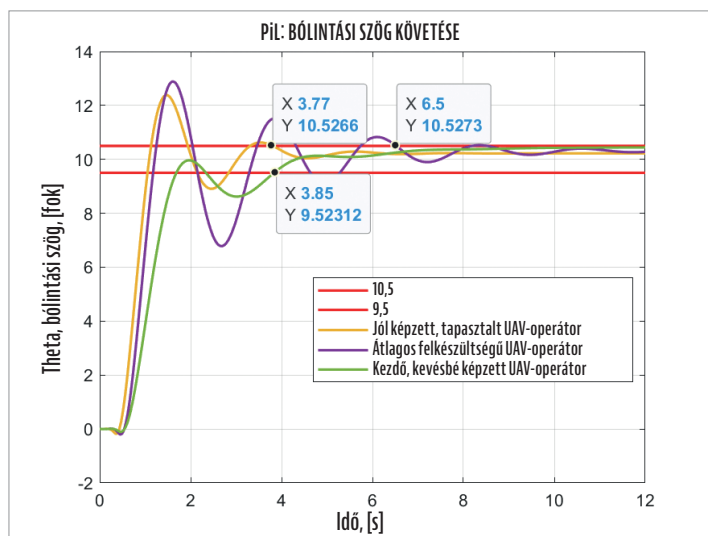
amikor is a földi irányító állomás (Ground Control Station – GCS) egységnyi erősítésű, arányos működésű rendszerként viselkedik. Ismeretes, hogy az UAV-operátorok (6) egyenletben szereplő T_L , T_N , K , és τ paraméterei különféle értékeket vehetnek fel, amelyeket a 3. táblázat foglal össze. [16] [17]

2. TÁBLÁZAT. A Phastball SUAV egyszerűsített modelljének pólusai, zérusai és minőségi jellemzői (A szerző szerkesztése)

Pólusok (p_i), zérusok (z_i)	Csillapítási tényező, ξ , [-]	Körfrekvencia, ω , [rad/s]
$p_1 = 0,0295$	-1	0,0295
$p_2 = -4,65$	1	4,65
$z_1 = 3,6882 \cdot 10^{-7}$		

3. TÁBLÁZAT. Az UAV-operátorok modelljeinek paraméterei (A szerző szerkesztése)

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



8. ÁBRA. A Phastball UAV zárt hatásláncú viselkedése időtartományban (A MATLAB-script a szerző szerkesztése)

A 3. táblázat adatait felhasználva, az UAV CAT I PIO viselkedésének megszüntetésére épített zárt szabályozási rendszer válaszát a $\theta_{ref}(t) = 10 \cdot 1(t)$ bemeneti jelre a 8. ábrán láthatjuk. Az első szembevető változás az instabil UAV-hoz képest, hogy a teljes állapot-visszacsatolásként megvalósított zárt szabályozási rendszer stabilis működésű lesz. A tranziens folyamatra most $\Delta = \theta(\infty) \pm 5\%$ dinamikusságot írtunk elő.

A 8. ábrán az is jól látható, hogy az UAV-operátorok más és más módon járnak el a hirtelen megjelenő, nagy értékű bólintási szög követése során. A legnagyobb túlszabályozással az átlagos képességekkel rendelkező, de már nem kezdő UAV-operátor követi le a $\theta_{ref}(t)$ bemeneti jelet. Az általa menedzselte tranziens folyamat az operátor túlzott magabiztossága miatt erősen lengő lesz, meglehetősen nagy, $t = 6,5$ s átmeneti idővel. Az átlagos képességű UAV-operátor beavatkozásának e jellemzője a már kialakulófélben lévő agilis/agresszív viselkedést jeleníti meg, ami egyfajta átmenetet jelent a képzett, tapasztalt operátorok felé.

A jól felkészült UAV-operátor követi le a leggyorsabban a bemeneti jelet, bár az ő viselkedésére is jellemző a túlkormányzás. Megfigyelhető, hogy a kezdő UAV-operátor inkább „alul” kormányoz, óvatosan állítja be az új bólintási szöveget, míg az általa menedzselte tranziens folyamat alig lassabb, mint a képzett UAV-operátoré.

ÖSSZEZÉS

Az UAV-k irányításának alapvetően két formáját különböztetjük meg. Az egyik a nyílt hatásláncú irányítás, amikor az UAV-operátor maga hozza létre a bemeneti jeleket, és vizsgálja, követi az UAV repülési paramétereinek változását. A szabadidős, hobbi célú UAV-repülések többsége ilyen jellegű. Ebben az esetben – megfelelő tudás és tapasztalat híján – az UAV-operátor maga hozhat létre olyan irányító jeleket, amelyek PIO-jelenséghez vezethetnek.

A másik lehetséges UAV-irányítás úgy valósul meg, hogy az irányítási rendszerbe bekapcsolt UAV-operátor (PiL) kijelzők segítségével maga szerez vizuális információt a bemeneti jelekről, és maga dönt a beavatkozásokról. Az UAV irányítása ebben az esetben zárt rendszerben történik. A gyakorlatban előfordul, hogy egyszerre több irányítási csatornában is irányít az UAV-operátor. Ilyen esetekben az UAV-operátorok egyre nehezebb, egyre nagyobb stresszel járó irányítási feladatokat látnak el, amely cselekvési sorozat törvényszerűen

HIVATKOZÁSOK

- [1] McRuer, D. T., Krendel, E. S. 1957. Dynamic Response of Human Operators, WADC Technical Report, pp. 56–524, <https://doi.org/10.21236/AD0110693>;
- [2] Ashkenas, I. L., Jex, H. R., McRuer, D. T. 1964. Pilot-Induced Oscillations: their Cause and Analysis. US Department of Commerce, National Technical Information Service, AD-481 994;
- [3] McRuer, D. T., Graham, G., Krendel, E., Reisener, W. 1965. Human Pilot Dynamics in Compensatory Systems. US Government Report, AFFDL-TR-65-15, <https://doi.org/10.1109/THFE.1965.6591261>;
- [4] Bekey, G. A. 1969. The Human Operator in Control Systems. University of Southern California, USCEE Report 359;
- [5] McRuer, D. T., Krendel, E. S. 1974. Mathematical Models of Human Pilot Behavior. NATO AGARD-AG-188;
- [6] McRuer, D. T. 1995. Pilot-Induced Oscillations and Human Dynamic Behavior. NASA TSD-93-STI-2806;
- [7] Klyde, D. H., McRuer, D. T., Myers, T. Z. 1995. Unified Pilot-Induced Oscillation Theory. Volume I: PIO Analysis with Linear and Nonlinear Effective Vehicle Characteristics, Including Rate Limiting. Wright Laboratory, WL-TR-96-3028;
- [8] Katayanagi, R. 2001. Pilot-Induced Oscillation Analysis with Actuator Rate Limiting and Feedback Control Loop. Trans. Japan Soc. Aero. Space Sci., Vol. 44, No. 143, pp. 48–53, <https://doi.org/10.2322/tjsass.44.48>;
- [9] MIL-HDBK-1797A, Notice 3, Flying Qualities of Piloted Aircraft, USA MoD, Interface Standard, p 849, 2004.;
- [10] Wang, C., Santone, M., Cao, C. Pilot-Induced Oscillation Suppression by Using L1 Adaptive Control. Hindawi Publishing Corporation, Journal of Control Science and Engineering Volume 2012, Article ID 394791, p 7, <https://doi.org/10.1155/2012/394791>;
- [11] Mandal, T., Gu, Y., Chao, H., Rhudy, M. Flight Data Analysis of Pilot-Induced Oscillations of a Remotely Controlled Aircraft. AIAA 2013-5010, AIAA Guidance, Navigation, and Control (GNC) Conference, August 19-22, 2013, Boston, MA, USA.;
- [12] Wael, A., Omar, A., Satam, I. A. 2015. Developing Google Aerial Images Using Flying Robot with Specified Path. LAP Lambert Academic Publishing House, Saarbrücken, Germany, ISBN 3659770817;
- [13] Wael, A., Omar, A., Satam, I. A. 2015. 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, <https://doi.org/10.14445/22315381/IJETT-V23P262>;
- [14] Mandal, K. T., Gu, Y. 2016. Analysis of Pilot-Induced Oscillation and Pilot Vehicle System Stability Using UAS Flight Experiments MDPI Aerospace, 2016, 3, 42, <https://doi.org/10.3390/aerospace3040042>;
- [15] Tohidi, S., Yildiz, Y. 2020. Adaptive Control Allocation: A Human-in-the-Loop Stability Analysis. IFAC-PapersOnLine, <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2020.12.1760>;
- [16] Forrás: https://nari.arc.nasa.gov/sites/default/files/attachments/Yu_Gu.pdf Letöltve: 2023.3.3.

a tevékenységüket jellemző paraméterek romlásával, pl. számottevő holtidő-növekedéssel jár.

KITEKINTÉS

Bár e kérdéskör meglehetősen kényes témát érint, az UAV-k zárt, félautomatikus irányítási rendszerében tevékenykedő operátorok tevékenységét számos matematikai modellel is leírhatjuk. Az UAV-operátorok dinamikus modellje számos tipikus paraméterrel bír, amelyek például az erősítés, a különféle időállandók, valamint a holtidő. Érdekes és ígéretes terület lehet annak vizsgálata, hogy az egyes UAV-operátormodell-paraméterek mely értékei mellett veszíti el a zárt félautomatikus irányítási rendszer a stabilitását, amelyek mellett az UAV irányítási folyamatában újra kialakulhat PIO-jelenség. ■