



ÓBUDAI EGYETEM
OBUDA UNIVERSITY

DOKTORI (PHD) ÉRTEKEZÉS

LOVAS ISTVÁN

MULTIROTOROS REPÜLŐ PLATFORM SZABÁLYOZÁSA KRITIKUS HELYZETEKBEN

Témavezető:

Prof. Dr. Molnár András

Tartalomjegyzék

1. A kutatás előzményei	1
2. Célkitűzések	4
3. Vizsgálati módszerek	4
4. Új tudományos eredmények	7
5. Az eredmények hasznosítási lehetősége	12
6. Irodalmi hivatkozások listája	13
7. A tézispontokhoz kapcsolódó tudományos közlemények	17
8. További tudományos közlemények	18

I. A kutatás előzményei

A multirotoros pilóta nélküli légitárművek, UAV-k (Unmanned Aerial Vehicle - UAV) az elmúlt évtizedben jelentős fejlődésen mentek keresztül, és napjainkra számos polgári és ipari alkalmazásban megjelentek. A növekvő autonóm működés és az egyre összetettebb feladatok végrehajtása ezzel párhuzamosan fokozott elvárásokat támaszt az energiahatékonyság, a robusztus irányítás és a megbízható állapotfelügyelet területén. A kutatásom e három, egymással szorosan összefüggő problémakör vizsgálatára irányult.

A multirotoros UAV-k süllyedési és leszállási manőverei a repülés biztonsága és az energiafelhasználás szempontjából egyaránt kiemelt jelentőségűek. A megfelelő leszállási trajektória megválasztása nemcsak a repülési időt és az energiaigényt befolyásolja, hanem vészhelyzetekben – például hajtásrendszeri meghibásodás vagy alacsony akkumulátorfeszültség esetén – a biztonságos földet érés szempontjából is meghatározó szerepet játszik.

Különösen fontos jelenség az örvénygyűrűs állapot (Vortex Ring State - VRS), amely a rotorok által létrehozott örvényrendszerbe történő visszasüllyedés következtében alakul ki, és a felhajtóerő jelentős csökkenéséhez, valamint instabil repülési állapotokhoz vezethet [1]. A jelenség a helikopterek esetében régóta ismert, azonban az utóbbi években egyre több kutatás foglalkozik multirotoros rendszerekkel is. A legújabb kísérleti eredmények szerint a quadcopter konfigurációk a hagyományos egyrotoros rendszereknél nagyobb érzékenységet mutathatnak az örvénygyűrűs állapot kialakulására [2, 3]. Emellett több kutatás foglalkozik a VRS felismerésével és detektálásával, valamint annak energiafelhasználásra gyakorolt hatásával is [4].

Ebből adódóan, a landolás során alkalmazott repülési stratégia jelentősen befolyásolja a jármű aerodinamikai környezetét, ezáltal a rendelkezésre álló felhajtóerőt, a stabilitást és a hajtásrendszer energiafelhasználását is.

A második kutatási terület a multirotoros UAV-k robusztus pályakövető szabályozása. A szakirodalomban széles körben alkalmaznak adaptív, modellprediktív (Model Predictive Control - MPC) és különböző nemlineáris szabályozási módszereket a rendszer nemlinearitásainak, modellbizonytalanságainak és a külső zavarások hatásainak kezelésére.

Az utóbbi években jelentős figyelmet kaptak a csúszómód-alapú szabályozási eljárások, különösen az adaptív csúszómód szabályozási (Sliding Mode Control, SMC) és a terminális csúszómód szabályozási (Terminal Sliding Mode Control, TSMC) megoldások, amelyek kedvező zavarelnyomó képességük és robusztusságuk révén nagy pontosságú pályakövetést tesznek lehetővé bizonytalan környezetben is [5, 6, 7]. Emellett egyre nagyobb szerepet kapnak az Incremental Nonlinear Dynamic Inversion (INDI) alapú megközelítések, amelyek kedvező zavarelnyomó tulajdonságaik és korlátozott modellfüggőségük miatt különösen alkalmasak UAV-rendszerek szabályozására [8, 9]. Az INDI napjainkra a multirotoros repülőeszközök egyik meghatározó robusztus szabályozási irányzatává vált, amelynek alkalmazási területei a hagyományos repülésszabályozástól a nagy manőverezőképeségű UAV-rendszerekig terjednek [10].

A fenti irányzatok mellett a Robust Fixed Point Transformation (RFPT) alapú adaptív szabályozás egy alternatív robusztus szabályozási keretrendszert képvisel. Az RFPT elméleti alapjait Tar és munkatársai fektették le a robusztus fixpont-transzformációk alkalmazásával meg-

valósított adaptív szabályozás területén, majd a módszert alulaktuált mechanikai rendszerekre is kiterjesztették [11, 12]. A megközelítést később quadcopterek pályakövető szabályozására is alkalmazták, igazolva annak gyakorlati alkalmazhatóságát UAV-rendszerek esetén [13]. Ugyanakkor az RFPT-alapú UAV-szabályozás szakirodalma továbbra is lényegesen szűkebb, mint az SMC-, MPC- vagy INDI-alapú megoldásoké, különösen a robusztusság növelése, a kinematikai blokkok kialakítása és a paraméterhangolás automatizálása területén [14]. Ez indokoltá teszi az RFPT-alapú szabályozási struktúrák további vizsgálatát és fejlesztését multirotoros UAV-k alkalmazási környezetében.

A harmadik kutatási irány a multirotoros UAV-k fedélzeti diagnosztikája és állapotfelügyelete. A rotorok és hajtásrendszerek degradációja jelentősen befolyásolhatja a repülési teljesítményt és a biztonságot, ezért a korai hibafelismerés kiemelt jelentőségű. A közelmúltban számos kutatás foglalkozott adatvezérelt, gépi tanulási, rezgésalapú és modell-alapú hibadiagnosztikai eljárásokkal [15]. A rotorhibák azonosítása azonban továbbra is kihívást jelent, különösen zárt szabályozási kör mellett. Bár a mesterséges intelligencián alapuló diagnosztikai megoldások egyre nagyobb figyelmet kapnak, gyakorlati alkalmazásukat a fedélzeti számítási kapacitás korlátai, a nagy mennyiségű tanítóadat igénye, valamint a megbízhatósági és validációs követelmények korlátozhatják [16, 17]. Emiatt az aktív, modellalapú diagnosztikai módszerek továbbra is jelentős kutatási irányt képviselnek.

A jelen értekezésben bemutatott kutatások szervesen kapcsolódnak ezekhez a nemzetközi kutatási irányokhoz. Az első témakörben a süllyedési és leszállási folyamatok energiahatékonyságának vizsgálatával, a másodikban az RFPT-alapú robusztus szabályozás alkalmazásával, míg a harmadikban egy nulltér-alapú aktív diagnosztikai keretrendszer kidol-

gozásával járulok hozzá a multirotoros UAV-rendszerek aerodinamikájának, irányításának és állapotfelügyeletének kutatásához.

II. Célkitűzések

A multirotoros pilóta nélküli légijárművek működését számos, egymással szorosan összefüggő tényező befolyásolja. A rendelkezésre álló energia hatékony felhasználása, a nemlineáris dinamika pontos kezelése, valamint a meghibásodások időbeni felismerése egyaránt meghatározó szerepet játszik a rendszer teljesítményében, üzem- és repülésbiztonságában. Kutatásom célja olyan módszerek vizsgálata és fejlesztése volt, amelyek e területeken járulnak hozzá a multirotoros UAV-k hatékonyabb, biztonságosabb és megbízhatóbb működéséhez.

Kutatási céljaim:

- A multirotoros UAV-k süllyedési és leszállási folyamatai során fellépő aerodinamikai jelenségek vizsgálata, hasznosítása.
- Robusztus pályakövető szabályozási módszer alkalmazása és optimalizálása.
- Aktív diagnosztikai eljárás kidolgozása a rotorok állapotának felügyeletére és a meghibásodások korai felismerésére.

III. Vizsgálati módszerek

Kutatásom során a multirotoros pilóta nélküli légijárművek aerodinamikai, szabályozástechnikai és diagnosztikai problémáinak vizsgálatára analitikus, numerikus szimulációs, optimalizációs és kísérleti módsze-

reket alkalmaztam.

Az aerodinamikai fékezési jelenségek vizsgálatához a légsavar profilok áramlástani tulajdonságait ANSYS CFD környezetben elemeztem. Az ANSYS CFD szoftverkörnyezet a mérnöki gyakorlatban elterjedt és validált eszköz összetett áramlási jelenségek numerikus elemzésére [18]. A vizsgálatok célja annak feltárása volt, hogy autorotációs üzemben – amikor a légsavar forgásiránya az eredeti forgásirányhoz képest megfordul – miként változnak az áramlási viszonyok. A numerikus elemzések során a szelvények aerodinamikai viselkedését széles állásszög-tartományban vizsgáltam, különös tekintettel a megfordult áramlási viszonyokból adódó eltérésekre.

A CFD-vizsgálatokat saját építésű szélcsatorna-mérőrendszerben végzett kísérletekkel egészítettem ki. A légsavarok aerodinamikai jellemzőinek meghatározására a szélcsatornás mérések a leggyakrabban alkalmazott kísérleti módszerek közé tartoznak. A kutatás során különböző légsebességek mellett vizsgáltam az autorotációban működő légsavarok viselkedését. A mérések során a rotor fordulatszámát dinamikus fékezéssel szabályoztam, miközben meghatároztam a szélsősebesség, tengelyirányú erő és a fordulatszám közötti összefüggéseket.

A szabályozók vizsgálataihoz MATLAB környezetben kialakított nemlineáris quadcopter modellt implementáltam. A MATLAB a szabályozástechnikai kutatások és fejlesztések területén széles körben alkalmazott numerikus számítási és szimulációs környezet, amely hatékony eszközöket biztosít komplex dinamikai rendszerek modellezéséhez, elemzéséhez és optimalizálásához [19]. A kutatás során az adaptív Robust Fixed Point Transformation (RFPT) szabályozási módszer különböző kinematikai blokkokkal történő megvalósításait vizsgáltam. A szabá-

lyozási struktúrát PID-, SMC- és TSMC-alapú kinematikai blokkokkal kombináltam.

A szabályozási algoritmusok robusztusságának értékelésére Monte Carlo-elemzést alkalmaztam, amely a bizonytalanságok és véletlenszerű zavarások hatásának statisztikai vizsgálatára széles körben használt módszer [20, 21]. Az elemzés során számos szimulációs futtatást végeztem, amelyekben az ütközések paramétereit – különösen azok tömegét, becsapódási időpontját és irányát – véletlenszerűen változtattam. A szabályozók teljesítményét a pályakövetési hiba, a maximális eltérés és a sikeresen teljesített küldetések aránya alapján értékeltem.

A szabályozók paramétereinek meghatározására genetikus algoritmuson (GA) alapuló optimalizálási eljárást alkalmaztam. A genetikus algoritmusok széles körben alkalmazott, globális keresésre alkalmas optimalizációs módszerek, amelyek különösen hatékonyan használhatók több paraméter egyidejű hangolására nemlineáris problémák esetén [22, 23]. Az optimalizáció célfüggvénye a pályakövetési hiba, a szabályozási energiaigény, valamint a tranziens viselkedést jellemző mutatók figyelembevételével került kialakításra. Az eljárás lehetővé tette a különböző szabályozási struktúrák objektív összehasonlítását és paramétereik automatikus hangolását.

A rotorhibák diagnosztikai vizsgálatához MATLAB Simscape alapú multirotoros modellt használtam. A Simscape a mérnöki gyakorlatban széles körben alkalmazott modellezési környezet, mivel lehetővé teszi a fizikai rendszer és a szabályozó algoritmusok integrált vizsgálatát, ezáltal alkalmas összetett dinamikai és hibadiagnosztikai problémák elemzésére [24]. A modell segítségével különböző mértékű rotorhibákat reprodukáltam. A kialakított környezet lehetővé tette a nulltér-

keringetesen alapuló aktív gerjesztést és lock-in detekciót alkalmazó diagnosztikai módszer kidolgozását, valamint működésének és teljesítményének vizsgálatát. A lock-in detekció kis amplitúdójú, ismert frekvenciájú jelek zajjal terhelt környezetből történő kinyerésére széles körben alkalmazott szinkron detekciós eljárás [25, 26]. A vizsgálatok során elemeztem a hibák megfigyelhetőségét, detektálhatóságát és lokalizálhatóságát, valamint teszteltem a diagnosztikai eljárás robusztusságát különböző üzemállapotok és zavaró hatások mellett.

IV. Új tudományos eredmények

1. Téziscsoport – Aerodinamikai hatások hasznosítása multirotoros UAV-k süllyedésének és leszállásának optimalizálására

1.1. tézis

Kimutattam, hogy a spirális leszállási pálya alkalmazásával a multirotoros UAV az örvénygyűrűs állapot kialakulásának elkerülése mellett nagyobb vertikális süllyedési sebességgel üzemeltethető, ezáltal a leszállási idő csökkenthető. Igazoltam, hogy a rövidebb leszállási időből származó energiamegtakarítás meghaladja a spirális pálya követéséből adódó többletenergia-igényt, így a teljes leszállási energiafelhasználás a hagyományos függőleges süllyedéshez képest csökkenthető [S1].

A multirotoros UAV-k üzemidejét és bevetettségét jelentősen befolyásolja a leszállási manőver energiaigénye, ezért fontos annak vizsgálata, hogy a különböző leszállási pályák milyen hatással vannak a felhasznált energiára és a repülés biztonságára. A kutatás során külön figyelmet fordítottam az örvénygyűrűs állapot (Vortex Ring State, VRS) kialaku-

lásának kockázatára, amely a függőleges süllyedés során teljesítményvesztést és instabil működést okozhat. Az elvégzett szimulációk alapján kimutattam, hogy a landolási pálya megfelelő megválasztása jelentős hatással van a multirotoros UAV-k leszállási energiaigényére, továbbá, hogy a spirális leszállási manőver az örvénygyűrűs állapot elkerülése mellett kedvezőbb energiafelhasználást eredményez a hagyományos függőleges süllyedéshez képest.

1.2. tézis

Kimutattam, hogy a fix állásszögű multirotoros légsavaroknak autorotációs üzemmódban kialakuló aerodinamikai fékezőhatása dinamikus fékezéssel növelhető, mivel a maximális fékezőerő nem a szabadon forgó vagy a maximálisan fékezett állapothoz, hanem egy légsavar geometriától függő optimális lapátcsúcs-sebességhez tartozik [S2][S3].

A multirotoros UAV-k vészhelyzeti süllyedési manővereinek vizsgálata során elemeztem a fix állásszögű légsavarok autorotációs lehetőségeit és tulajdonságait. Az elemzések során kimutattam, hogy a fix állásszögű multirotoros légsavaroknak autorotációs üzemmódban kialakuló aerodinamikai fékezőhatása dinamikus fékezéssel tovább növelhető. Eredményeim alapján a maximális fékezőerő nem a szabadon forgó vagy a teljesen fékezett állapothoz tartozik, hanem egy, a légsavar geometriai paramétereitől függő optimális lapátcsúcs-sebességnél alakul ki.

2. Téziscsoport – RFPT-alapú pályakövető szabályozás robusztusságának növelése kinematikai blokk fejlesztéssel és paraméteroptimalizálással

2.1. tézis

Kimutattam, hogy az RFPT szabályozási struktúrában alkalmazott csúszómód-alapú (SMC), illetve terminális csúszómód-alapú (TSMC) kinematikai blokk jelentősen növeli a quadcopter pályakövető rendszerének robusztusságát. A robusztusság növekedését Monte Carlo szimulációkkal igazoltam, amelyekben nagy impulzusú külső zavarások mellett az SMC- és TSMC-alapú megoldások szignifikánsan magasabb pályakövetési sikerarányt értek el [S4].

Az RFPT szabályozás PID-alapú kinematikai blokkjának alkalmazása esetén nagy amplitúdójú külső zavarások hatására a rendszer állapota jelentősen eltávolodhat a kívánt fixpont környezetétől, ami a pályakövetési teljesítmény romlásához, szélsőséges esetben pedig instabil viselkedéshez vezethet. Monte Carlo alapú robusztussági vizsgálatokkal igazoltam, hogy a csúszómód-alapú kinematikai blokkokat (SMC, TSMC) alkalmazó RFPT szabályozási struktúrák szignifikánsan nagyobb pályakövetési sikerarányt érnek el, mint a hagyományos RFPT-PID megoldás. Az eredmények alapján a csúszómód-alapú kinematikai blokk alkalmazása hatékonyan növeli az RFPT szabályozás robusztusságát nagy impulzusú külső zavarások esetén.

2.2. tézis

Kidolgoztam egy genetikus algoritmuson alapuló hangolási eljárást, amely lehetővé teszi az RFPT szabályozó több paraméterének egyidejű, célfüggvény alapján történő optimalizálását, ezáltal automatizálva a paraméterhangolás folyamatát [S5].

A szakirodalomban az RFPT szabályozó paramétereinek meghatározása

jellemzően tapasztalati úton, illetve numerikus szimulációkon alapuló iteratív hangolással történik, mivel általánosan alkalmazható hangolási eljárás nem áll rendelkezésre. Ez motiválta a genetikus algoritmus alkalmazását az RFPT paraméterkészletének hangolására.

Az RFPT szabályozó számos, egymással kölcsönhatásban álló paramétert tartalmaz, amelyek kézi hangolása nagyméretű keresési tér esetén nehézkes és nem garantál optimális megoldást. Genetikus algoritmus alkalmazásával kimutattam, hogy az RFPT szabályozó többparaméteres hangolása a nagy kiterjedésű paramétertér szisztematikus feltárásával hatékonyan alkalmazható a paraméterkészlet optimalizálására.

3. Téziscsoport – Nulltér-alapú aktív diagnosztikai keretrendszer kidolgozása multirotoros UAV-k rotorállapotának vizsgálatára

3.1. tézis

Kidolgoztam egy aktív rotordiagnosztikai keretrendszert, amely a vezérlőallokációs mátrix nullterébe injektált szinuszos gerjesztés és lock-in detekció alkalmazásával zárt szabályozási kör mellett is lehetővé teszi a rotorok relatív állapotának meghatározását [S6].

A rotorok állapotának üzemszerű működés közbeni aktív diagnosztikája különösen nehéz feladat, mivel a gerjesztést úgy kell a rendszerbe bevinni, hogy az a zárt szabályozási kör mellett se befolyásolja kedvezőtlenül a repülési stabilitást és a szabályozás működését. Ennek megoldására egy aktív rotor-diagnosztikai keretrendszert dolgoztam ki, amelyben a diagnosztikai gerjesztést a vezérlőallokációs mátrix nullterébe injektált szinuszos jellel valósítottam meg. Ez lehetővé teszi a hajtásrendszer gerjesztését a jármű eredő erőinek és nyomatékainak

megváltoztatása nélkül. Az így keletkező kis amplitúdójú diagnosztikai válaszjelek megbízható kinyerésére lock-in detekciót alkalmaztam, amely a szabályozási beavatkozások és a külső zavarások jelenlétében is biztosítja a szükséges diagnosztikai információt. A kidolgozott módszer ennek eredményeként lehetővé teszi a rotorok relatív állapotának repülés közbeni folyamatos meghatározását.

3.2. tézis

Kidolgoztam egy hierarchikus diagnosztikai keretrendszert relatív, páronkénti és globális közös módusú diagnosztikai indikátorok integrált alkalmazásával. Igazoltam, hogy a módszer lehetővé teszi az egyedi rotorhibák lokalizálását, valamint a teljes hajtásrendszert érintő szimmetrikus állapotváltozások azonosítását [S6].

A rotorok állapotának teljes körű diagnosztikájához önmagában a relatív összehasonlítás nem volt elegendő, mivel az csak a rotorok egymáshoz viszonyított állapotkülönbségeit képes kimutatni. Ennek megvalósítására egy háromszintű diagnosztikai keretrendszert dolgoztam ki, amely relatív, páronkénti és globális közös módusú diagnosztikai indikátorokra épül. A három diagnosztikai szint egymást kiegészítve jellemzi a hajtásrendszer állapotát: a relatív indikátorok lehetővé teszik az egyedi rotorhibák lokalizálását, a páronkénti közös módusú indikátorok a rotorpárokat érintő közös állapotváltozások felismerését, míg a globális közös módusú indikátor a teljes hajtásrendszer állapotát jellemzi. A kidolgozott keretrendszer ezáltal a rotorhibák több szintű diagnosztikai kiértékelését teszi lehetővé.

V. Az eredmények hasznosítási lehetősége

A kutatás eredményei felhasználhatók a multirotoros rendszerek energiafelhasználásával, irányításával és állapotfelügyeletével kapcsolatos további fejlesztések támogatására.

Az első téziscsoport eredményei jó alapot szolgáltathatnak olyan autonóm repülésvezérlő algoritmusok kidolgozásához, amelyek figyelembe veszik a leszállási pálya energiaigényét és az örvénygyűrűs állapot kialakulásának kockázatát. Az autorotációs üzemmód és az aerodinamikai fékezés vizsgálatának eredményei hozzájárulhatnak energiahatékony süllyedési és landolási eljárások fejlesztéséhez a légcsavarok aerodinamikai tulajdonságaira építve.

A második téziscsoport eredményei az UAV-k robusztus autonóm irányítási rendszereinek fejlesztésében hasznosíthatók. A csúszómód-alapú kinematikai blokkok alkalmazása RFPT szabályzó esetén növeli a pályakövetés megbízhatóságát, impulzus szerű zavarásokkal terhelt környezetben, míg a genetikus algoritmuson alapuló paraméteroptymalizálás támogatja a szabályozó automatikus hangolását és az új platformokra történő gyors adaptációját.

A harmadik téziscsoport eredményei a fedélzeti állapotfelügyeleti és diagnosztikai rendszerek fejlesztésében alkalmazhatók. A kidolgozott nulltér-alapú diagnosztikai módszer lehetővé teszi a rotorok állapotának lebegés közbeni monitorozását valós terhelési környezetben, valamint a meghibásodások korai felismerését és lokalizálását. Ez elősegítheti a prediktív karbantartási eljárások fejlesztését, csökkentheti a váratlan meghibásodások számát és növelheti az üzemeltetés biztonságát.

Az eredmények együttesen hozzájárulhatnak olyan korszerű UAV-

rendszerek kialakításához, amelyek energiahatékony működést, robusztus irányítást és integrált állapotfelügyeleti képességeket valósítanak meg..

VI. Irodalmi hivatkozások listája

- [1] J. Stack. „Experimental Investigation of Rotor Vortex Wakes in Descent”. *42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*. American Institute of Aeronautics és Astronautics (AIAA), 2004. DOI: 10.2514/6.2004-297.
- [2] M. Veismann, D. Yos és M. Gharib. „Parametric Study of Small-Scale Rotors in Axial Descent”. *Physics of Fluids* 34.3 (2022), 35124. old. DOI: 10.1063/5.0083761.
- [3] G. Longobardo, A. Heintz, J. N. Braukmann, C. Wolf, J. Radatz, T. Astarita, F. De Gregorio, A. Gardner és M. Raffel. „Experimental Investigation of Vortex Ring State for Multicopters”. *51st European Rotorcraft Forum* (2025).
- [4] M. Kamiya, S. Nagai és H. Fujimoto. „Basic Study on Vortex Ring State Detection of Multi-rotor UAV Using Motor Counter Torque Observer”. *IECON 2024 - 50th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. 2024, 1–6. old.
- [5] K. Li és tsai. „Adaptive Robust Sliding Mode Trajectory Tracking Control of Quadrotor Unmanned Aerial Vehicles in Consideration of Bounded Disturbance”. *Journal of Engineering Science and Technology Review* 18.6 (2025). DOI: 10.25103/jestr.186.25.

- [6] R. Gao és tsai. „Global Fast Terminal Sliding Mode Control for Trajectory Tracking of Quadrotor UAVs”. *Scientific Reports* (2025).
- [7] Y. Wu, G. Ling és Y. Shi. „Robust Trajectory Tracking Fault-Tolerant Control for Quadrotor UAVs Based on Adaptive Sliding Mode and Fault Estimation”. *Computation* 13.7 (2025), 162. old. doi: 10.3390/computation13070162.
- [8] S. Sieberling, Q. P. Chu és J. A. Mulder. „Robust Flight Control Using Incremental Nonlinear Dynamic Inversion and Angular Acceleration Prediction”. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics* 33.6 (2010), 1732–1742. old. doi: 10.2514/1.49978.
- [9] Q. Zhang, Y. Wang, B. Li és Y. Wang. „Incremental Nonlinear Dynamic Inversion Control for Quadrotor UAV Based on Angular Acceleration Measurement”. *2023 Chinese Control Conference (CCC)*. 2023, 3834–3839. old. doi: 10.23919/CCC58697.2023.10240476.
- [10] A. Steinert, S. Raab, S. Hafner, F. Holzapfel és H. Hong. „From Fundamentals to Applications of Incremental Nonlinear Dynamic Inversion: A Survey on INDI – Part I”. *Chinese Journal of Aeronautics* (2025). doi: 10.1016/j.cja.2025.103553.
- [11] J. K. Tar, J. Bito, L. Nadai és J. T. Machado. „Robust Fixed Point Transformations in Adaptive Control Using Local Basin of Attraction”. *Acta Polytechnica Hungarica* 6.1 (2009), 21–37. old.

- [12] J. K. Tar, J. F. Bito és I. J. Rudas. „Contradiction Resolution in the Adaptive Control of Underactuated Mechanical Systems Evading the Framework of Optimal Controllers”. *Acta Polytechnica Hungarica* 13.1 (2016). doi: 10.12700/APH.13.1.2016.1.8.
- [13] J. K. Tar és tsai. „Novel Method for Quadcopter Controlling Using Nonlinear Adaptive Control Based on Robust Fixed Point Transformation Phenomena”. 2017.
- [14] A. Atinga, K. Kósi és J. K. Tar. „Multivariable Steffensen’s Accelerator in Adaptive Sliding Mode Control”. *Acta Polytechnica Hungarica* (2024).
- [15] Z. Adaika, L. A. Al-Haddad, W. Giernacki, A. A. Jaber, M. Boumehraz, M. N. Hamzah és M. A. Flayyih. „Fault Detection and Diagnosis Methodologies for Unmanned Aerial Vehicles: State-of-the-Art”. *Journal of Intelligent & Robotic Systems* 111.2 (2025), 63. old. doi: 10.1007/s10846-025-02267-8.
- [16] L. A. Al-Haddad és A. A. Jaber. „An Intelligent Fault Diagnosis Approach for Multirotor UAVs Based on Deep Neural Network of Multi-Resolution Transform Features”. *Drones* 7.2 (2023), 82. old. doi: 10.3390/drones7020082.
- [17] J. Cacace, V. Scognamiglio, F. Ruggiero és V. Lippiello. „Motor Fault Detection and Isolation for Multi-Rotor UAVs Based on External Wrench Estimation and Recurrent Deep Neural Network”. *Journal of Intelligent & Robotic Systems* 110.4 (2024), 148. old. doi: 10.1007/s10846-024-02176-2.

- [18] J. H. Ferziger, M. Perić és R. L. Street. *Computational Methods for Fluid Dynamics*. 4. kiad. Cham: Springer, 2020. doi: 10.1007/978-3-319-99693-6.
- [19] The MathWorks Inc. *MATLAB Version R2025a*. The MathWorks Inc. Natick, Massachusetts, USA. URL: <https://www.mathworks.com>.
- [20] N. Metropolis és S. Ulam. „The Monte Carlo Method”. *Journal of the American Statistical Association* 44.247 (1949), 335–341. old. doi: 10.2307/2280232.
- [21] R. Y. Rubinstein és D. P. Kroese. *Simulation and the Monte Carlo Method*. 3. kiad. John Wiley & Sons, 2017. ISBN: 9781118632161. doi: 10.1002/9781118631980.
- [22] D. E. Goldberg. *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*. 1989. ISBN: 0-201-15767-5.
- [23] A. E. Eiben és J. E. Smith. *Introduction to Evolutionary Computing*. 2. kiad. Natural Computing Series. Berlin, Heidelberg: Springer, 2015. ISBN: 978-3-662-44873-1. doi: 10.1007/978-3-662-44874-8.
- [24] The MathWorks Inc. *Simscape User’s Guide*. The MathWorks Inc. Natick, Massachusetts, USA. URL: <https://www.mathworks.com/products/simscape.html>.
- [25] M. L. Meade. „Lock-in amplifiers : principles and applications”. 1983.
- [26] L. Bengtsson. „The Lock-In Amplifier”. *Electrical Measurement Techniques: For the Physics Laboratory*. Singapore: Springer Nature Singapore, 2024, 307–318. old. doi: 10.1007/978-981-99-8187-8_15.

VII. A tézispontokhoz kapcsolódó tudományos közlemények

- [S1] I. Lovas és A. Molnár. „Quadcopter Power Consumption Analyzation at Different Landing Trajectories”. *IEEE 18th International Symposium on Computational Intelligence and Informatics (CINTI 2018)*. IEEE Hungary Section, 2018, 217–222. old. DOI: 10.1109/CINTI.2018.8928215
- [S2] I. Lovas és A. Molnár. „Experimental Investigation of the Relationship Between Tip Speed Ratio and Aerodynamic Braking Force in Windmilling Multirotor UAV Propellers”. *IEEE 24th International Symposium on Intelligent Systems and Informatics (SISY 2026)*. IEEE, 2026
- [S3] I. Lovas és A. Molnár. „Aerodynamic Analysis of the Low Reynolds Number Eppler-E63 Airfoil With Normal and Reverse Flow”. *6th IEEE International Symposium on Logistics and Industrial Informatics, LINDI 2024: Proceedings*. IEEE, 2024, 83–88. old. DOI: 10.1109/LINDI63813.2024.10820434
- [S4] I. Lovas és A. Molnár. „Comparison of PID-, SMC- and TSMC-Based RFPT Controllers for Robust Quadcopter Trajectory Tracking”. *IEEE 24th International Symposium on Intelligent Systems and Informatics (SISY 2026)*. IEEE, 2026
- [S5] I. Lovas. „Fixed Point, Iteration-based, Adaptive Controller Tuning, Using a Genetic Algorithm”. *Acta Polytechnica Hungarica* 19.2 (2022), 59–77. old. DOI: 10.12700/APH.19.2.2022.2.4
- [S6] I. Lovas. „In-Hover Quadrotor Rotor Degradation Monitoring

Using Null-Space Excitation and Lock-In Detection”. *Drones* 10.5 (2026), 395. old. DOI: 10.3390/drones10050395

VIII. További tudományos közlemények

- [S7] A. Dineva, Z. Bringye, I. Lovas, A. Gerse és R. Fleiner. „AI-Driven IoT-based Energy Community Platform Design, Model Experimentation and Implementation Insights”. *2024 22nd International Conference on Intelligent Systems Applications to Power Systems (ISAP)*. IEEE, 2024, 10744343. old. DOI: 10.1109/ISAP63260.2024.10744343
- [S8] A. Molnár, I. Lovas és Z. Domozi. „Practical Application Possibilities for 3D Models Using Low-resolution Thermal Images”. *Acta Polytechnica Hungarica* 18.4 (2021), 199–212. old. DOI: 10.12700/APH.18.4.2021.4.11
- [S9] A. Molnar, Z. Domozi és I. Lovas. „Drone-Based Gamma Radiation Dose Distribution Survey with a Discrete Measurement Point Procedure”. *Sensors* 21.14 (2021), 4930. old. DOI: 10.3390/s21144930
- [S10] A. Molnár, I. Lovas és Z. Domozi. „Measurement of Outdoor Gamma Dose Distribution with a Multicopter”. *2020 IEEE 24th International Conference on Intelligent Engineering Systems (INES 2020)*. IEEE, 2020, 103–108. old. DOI: 10.1109/INES49302.2020.9147190
- [S11] A. Molnár, I. Lovas és Z. Domozi. „Photogrammetry on Low Resolution Thermal Pictures”. *Proceedings of the Sixth International*

Conference on Parallel, Distributed, GPU and Cloud Computing for Engineering. Civil-Comp Press, 2019, 1–11. old.

- [S12] D. Stojcsics, I. Lovas, Z. Domozi és A. Molnár. „High Resolution 3D Thermal Imaging Using FLIR Duo R Sensor”. *Proceedings of the 22nd IEEE International Conference on Intelligent Engineering Systems 2018 (INES 2018)*. IEEE Hungary Section, 2018, 311–316. old. DOI: 10.1109/INES.2018.8523914
- [S13] I. Lovas és A. Molnár. „Orthophoto Creation Based on Low Resolution Thermal Aerial Images”. *IEEE 12th International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics (SACI 2018)*. IEEE Romania Section és IEEE Hungary Section, 2018, 219–224. old.
- [S14] M. Tóth, D. Stojcsics, Z. Domozi és I. Lovas. „Stereo Odometry Based Realtime 3D Reconstruction”. *2018 IEEE 16th International Symposium on Intelligent Systems and Informatics (SISY): Proceedings*. IEEE Hungary Section, 2018, 321–326. old.
- [S15] M. Tóth, D. Stojcsics, Z. Domozi és I. Lovas. „Fuzzy Based Indoor Navigation for Mobile Robots”. *2018 IEEE 16th International Symposium on Intelligent Systems and Informatics (SISY): Proceedings*. IEEE Hungary Section, 2018, 333–338. old. DOI: 10.1109/SISY.2018.8524842
- [S16] A. Molnár, D. Stojcsics, Z. Domozi és I. Lovas. „Gamma Radiation Distribution Map Creation Using a Small-Sized Drone”. *IEEE 18th International Symposium on Computational Intelligence and Informatics (CINTI 2018)*. IEEE Hungary Section, 2018, 161–166. old. DOI: 10.1109/CINTI.2018.8928202

- [S17] A. Molnár, D. Stojcsics és I. Lovas. „Precision Agricultural and Game Damage Analysis Application for Unmanned Aerial Vehicles”. *International Journal of Applied Mathematics and Informatics* 10.1 (2016), 38–43. old.
- [S18] I. Lovas. „Opticalflow alapú multikopter navigáció zárttérben”. A *Selye János Egyetem 2016-os „Korszerű szemlélet a tudományokban és az oktatásban” Nemzetközi Tudományos Konferenciájának tanulmánykötete*. Szerk. G. Juhász, Z. Árki és P. Csiba. Selye János Egyetem, 2016, 77–84. old.
- [S19] A. Molnár, D. Stojcsics, I. Lovas és L. Csemez. „Damage Assessment, Damage Control and Monitoring by UAV in Agriculture”. *Fluids, Heat and Mass Transfer, Mechanical and Civil Engineering*. WSEAS Press, 2015, 75–80. old.