

**Dr. Mester Gyula\*** és **Dr. Rodić Aleksandar\*\***

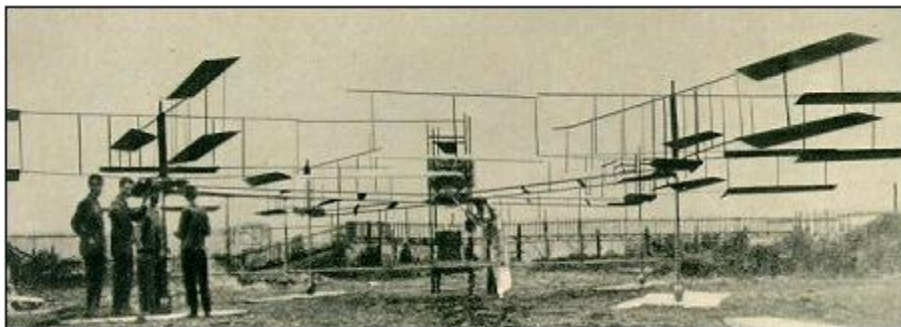
## **Négyrotoros robothelikopter modellje és irányítása**

Modeling and Control of Quad-Rotor Helicopter

*Abstract - Autonomous outdoor quad-rotor helicopters increasingly attract the attention of potential researchers. Several structures and configurations have been developed to allow 3D movements. The autonomous quad-rotor architecture has been chosen for this research for its low dimension, good manoeuvrability, simple mechanics and payload capability. This paper presents the modelling and control of an autonomous outdoor quad-rotor helicopter.*

### *Bevezetés*

Az első négyrotoros helikoptert (1. ábra), Gyroplane No.1 néven a Louis és Jacques Breguet 1907-ben építették meg, képes volt 1.5 m magasban lebegni [1].



*1. ábra  
Gyroplane No.1*

A négyrotoros robothelikopter (2. ábra) helyben felszálló és leszálló pilóta nélküli légi jármű, amely nem igényel kiépített repülőtér. Egy kisebb szabad terület vagy a szállítójármű felülete is elegendő a négyrotoros robothelikopter fel- és leszállásához.

---

\* *Dr. Mester Gyula, egyetemi tanár, Szegedi Tudományegyetem, Mérnöki Kar, Robotika Laboratórium, Szeged*

\*\* *Dr. Rodić Aleksandar, Belgrádi Egyetem, Mihajlo Pupin Kutatóintézet, Robotika Laboratórium, a Szegedi Tudományegyetem vendégkutatója, Belgrád*

Szállítójármű alkalmazásával jelentősen megnövelhetjük a jármű mozgásterét.



2. ábra  
*Négy rotoros robothelikopter*

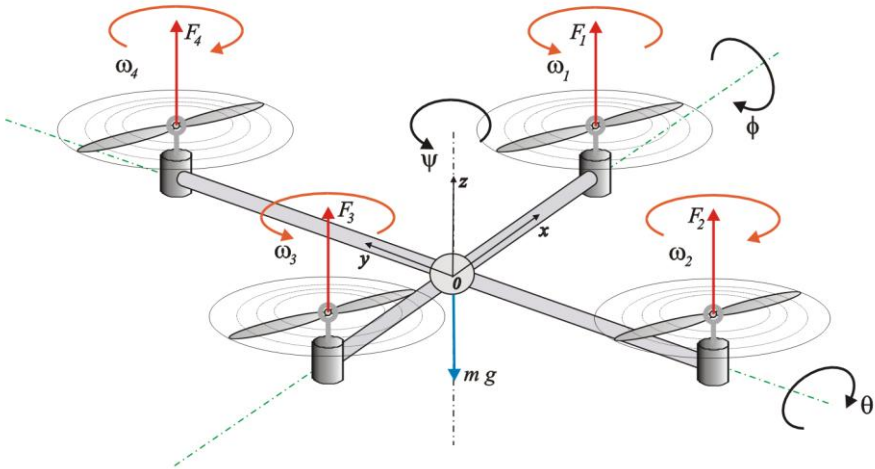
Négyrotoros robothelikopterek felhasználási területe, a helyből való fel- és leszállási képessége, a lebegése miatt folyamatosan bővül, így tehát alkalmazzuk: a hadászatban, mezőgazdaságban, tűzoltóságnál, légi megfigyelésre, optikai felderítésre, nehezen hozzáférhető terepen segítségnyújtásra (pl. síbalesetek), erdőtüzek felderítésére, tudományos kutatómunkára, stb.

### *Négyrotoros robothelikopter modellje*

A négyrotoros robothelikopter több bemenetű és több kimenetű (Multi Input Multi Output) rendszer, modellje a 3. ábrán látható. A 2-es és 4-es rotorok forgásszöge megegyezik az óramutató járásával, míg az 1-es és 3-as rotorok forgásszöge ellentétes az óramutató járásával. A rotorok fix állásszögűek.

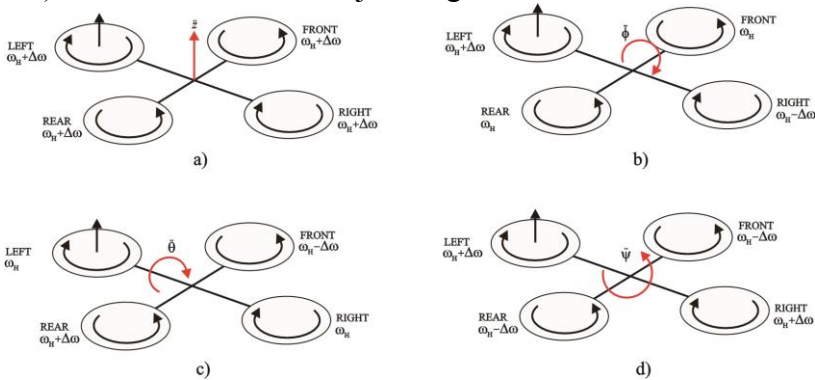
A robothelikopter tömegközéppontjához kötött  $oxyz$  mozgó koordináta-rendszer (B-frame) módosított Euler szögei a földhöz kötött vonatkozási koordináta-rendszerhez  $OXYZ$  viszonyítva (E-frame) a következők:  $\Phi$  (csavarás-Roll),  $\theta$  (billentés-Pitch),  $\psi$  (forgatás-Roll).

A robothelikopter függőleges mozgását a négy robot szögsebességének együttes növelésével vagy csökkentésével irányítjuk [1-4].



3. ábra  
Négyrotoros robothelikopter modellje

Az x,y,z tengelyek körüli forgómozgásokat (csavarás, billentés, forgatás) a 4. ábra szerint valósítjuk meg.



4. ábra  
a) Emelkedés, b) csavarás, c) billentés, d) forgatás

Az oldalirányú mozgást az egymás mellett lévő rotorok szögsebességének változtatásával lehet megvalósítani.

A robothelikopter a következő elektronikus modulokból van felépítve: repülés-irányító központi modul, motorvezérlő modul, giroszkóp és gyorsulásmérő modul, elektronikus irányító modul, helyzet meghatá-

rozó és magasságmérő modul, barometrikus szenzor modul, világítás és helyzetjelző modul.

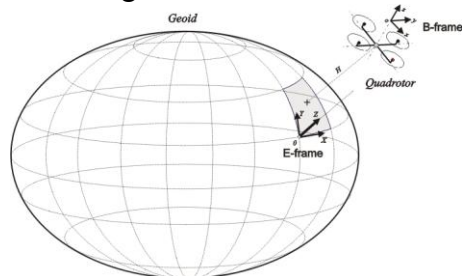
Alkalmas nagyfelbontású videó eszközök megemelésére és a térben elhelyezkedő kiválasztott céltárgyak elérésére.

A navigációs rendszerek együttesét tartalmazó repülő szerkezet a kiegészítő GPS és elektronikus iránytű segítségével magától is repülhet.

A kézi irányítás folyamatában át lehet adni a repülés felügyeletét a fedélzeten elhelyezett GPS robot pilótának.

### *Négy rotoros robothelikopter kinematikai és dinamikai modellje*

A merev testnek tekintett hat szabadságfokú robothelikopter térbeli mozgását az 5. ábra szerinti koordinátarendszerekben vizsgáljuk:



5. ábra

*A robothelikopter tömegközéppontjához kötött oxz mozgó- (B-frame) és a földhöz kötött OXYZ vonatkozási (E-frame) koordinátarendszerek*

A robothelikopter pozícióját és orientációját a következő vektorral határozhatjuk meg [5-13]:

$$\mathbf{s} = [X \ Y \ Z \ \Phi \ \theta \ \psi]^T \quad (1)$$

A mozgó koordinátarendszer orientációja a vonatkozási koordinátarendszerhez viszonyítva leírható a következő rotációs mátrixszal:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} c_\psi c_\theta & -s_\psi c_\theta + c_\psi s_\theta s_\phi & s_\psi s_\theta + c_\psi s_\theta c_\phi \\ s_\psi c_\theta & c_\psi c_\theta + s_\psi s_\theta s_\phi & -c_\psi s_\theta + s_\psi s_\theta c_\phi \\ -s_\theta & c_\theta s_\phi & c_\theta c_\phi \end{bmatrix} \quad (2)$$

a rendszer Jacobi-féle mátrixa:

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{T} \end{bmatrix} \quad (3)$$

ahol a  $\mathbf{T}$  mátrix:

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 1 & s_\phi t_\theta & c_\phi t_\theta \\ 0 & c_\phi & -s_\phi \\ 0 & s_\phi / c_\theta & c_\phi / c_\theta \end{bmatrix}$$

(4)

A  $0_{3 \times 3}$  nulla mátrix, további jelölések:  $c_\theta = \cos(\theta)$ ,  $s_\theta = \sin(\theta)$  stb. Négyrotoros robothelikopter sebességvektora a mozgó koordinátarendszerben:

$$\mathbf{v} = [\dot{x} \ \dot{y} \ \dot{z} \ \dot{\phi} \ \dot{\theta} \ \dot{\psi}]^T$$

(5)

Így a négyrotoros robothelikopter kinematikai modellje felírható a következőképpen:

$$\dot{\mathbf{s}} = \mathbf{J} \cdot \mathbf{v}$$

(6)

A dinamikai modell felírásánál figyelembe vesszük a négyrotoros robothelikopter tömegét  $m$  és az átlós inercia mátrixát  $J$ . A rotorok négy felhajtóerőt:  $F_1, F_2, F_3, F_4$  és nyomatékot:  $M_1, M_2, M_3, M_4$  biztosítanak. Így négy bemeneti és hat kimeneti nagyságról beszélhetünk ( $x, y, z, \psi, \theta, \phi$ ). A Newton törvények alkalmazásával felírhatjuk a robothelikopter dinamikai modelljét [3]:

$$\ddot{x} = \frac{\left( \sum_{i=1}^4 F_i \right) (c_\phi s_\theta c_\psi + s_\phi s_\psi) - K_x \dot{x}}{m}$$

(7)

$$\ddot{y} = \frac{\left( \sum_{i=1}^4 F_i \right) (s_\phi s_\theta c_\psi + c_\phi s_\psi) - K_y \dot{y}}{m}$$

(8)

$$\ddot{z} = \frac{\left( \sum_{i=1}^4 F_i \right) (c_\phi c_\psi) - K_z \dot{z} - G}{m}$$

(9)

$$\ddot{\psi} = l \cdot \frac{(-F_1 + F_2 + F_3 - F_4 - K_\psi \dot{\psi})}{J_x}$$

(10)

$$\ddot{\theta} = l \cdot \frac{(-F_1 - F_2 + F_3 + F_4 - K_\theta \dot{\theta})}{J_y}$$

(11)

$$\ddot{\phi} = \frac{(-M_1 + M_2 + M_3 - M_4 - K_\phi \dot{\phi})}{J_z}$$

(12)

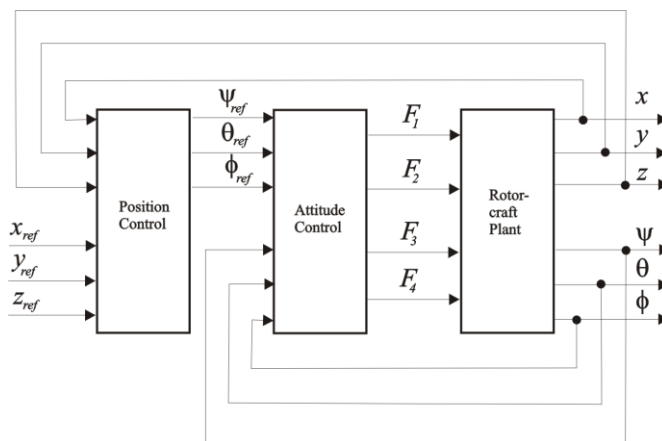
A fenti kifejezésekben a következő jelölések:  $K_x$ ,  $K_y$ ,  $K_z$ ,  $K_\psi$ ,  $K_\theta$ ,  $K_\phi$  kísérlettel meghatározható légellenállási tényezőket jelentenek.

### *Négyrotoros robothelikopter irányítása*

Az irányításnak az a feladata, hogy a tömegközépponthez kötött mozgó koordináta-rendszer origójának a sebessége és a tengelyek szögsebessége a repülési feladatnak megfelelően változzon a vonatkozási koordináta-rendszerhez képest. A több bemenetű:  $F_1$ ,  $F_2$ ,  $F_3$ ,  $F_4$ , és több kimenetű:  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ,  $\psi$ ,  $\theta$ ,  $\phi$ , négyrotoros robothelikopter irányítási blokkvázlatát a 6. ábrán mutatjuk be [3]. A robothelikopter irányítási eljárásai a következők:

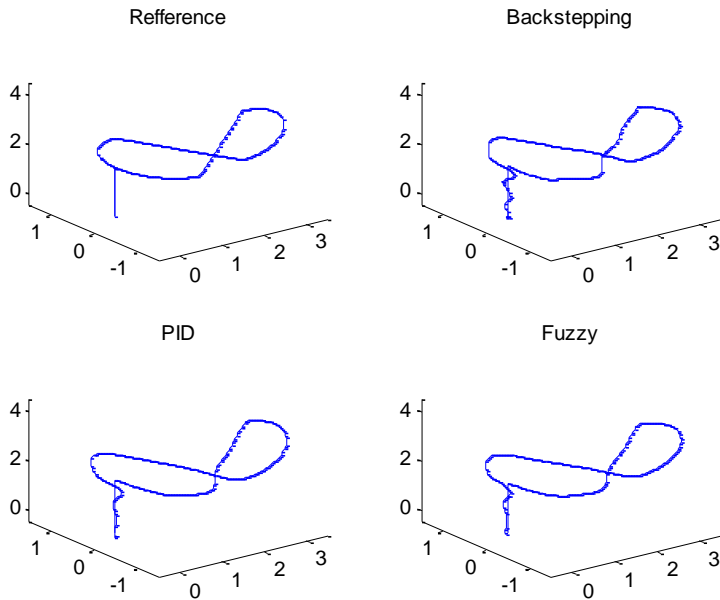
- PID irányítás,
- Backstepping irányítás és
- Fuzzy irányítás.

A három irányítási eljárás eredményeit a robothelikopter pályakövetési feladata esetében a 7. ábrán mutatjuk be [1].



6. ábra

*A négyrotoros robothelikopter irányítási blokkvázlata*



7. ábra  
Három irányítási eljárás alkalmazása pályakövetési feladat esetében

### Összegzés

A közlemény több bemenetű és több kimenetű négy rotoros robothelikopter modelljével és irányításával foglalkozik.

Áttekintettük a négy rotoros robothelikopter felépítését, kinematikáját és dinamikáját. Mozgását a tömegközéppontjához kötött mozgó- és a földhöz kötött vonatkozási koordináta-rendszerben vizsgáltuk.

Bemutattuk egyre bővülő alkalmazási területeit is.

### Felhasznált irodalom:

1. Aleksandar Rodić, Gyula Mester, Ivan Stojković, “Qualitative Evaluation of Flight Controller Performances for Autonomous Quadrotors”, in *Intelligent Systems: Models and Applications*, Endre Pap (Ed.), *Topics in Intelligent Engineering and Informatics*, Vol. 3, Part. 2, ISSN 2193-9411, e-ISSN 2193-942X, ISBN 978-3-642-33958-5, e-ISSN 978-3-642-33959-2, DOI 10.1007/978-3-642-33959-2\_7, Springer, 2012, pp. 115-134.

2. Aleksandar Rodić, Gyula Mester, *The Modeling and Simulation of an Autonomous Quad-Rotor Microcopter in a Virtual Outdoor Scenario*, *Acta*

Polytechnica Hungarica, Journal of Applied Sciences, Vol. 8, Issue No. 4, Budapest, Hungary, 2011, pp. 107-122.

3. Aleksandar Rodić, Gyula Mester, "Ambientally Aware Bi-Functional Ground-Aerial Robot-Sensor Networked System for Remote Environmental Surveillance and Monitoring Tasks", Proceedings of the 55th ETRAN Conference, Section Robotics, Vol. RO2.5, pp 1-4, ISBN 978-86-80509-66-2, Banja Vrućica, Bosnia and Herzegovina, 2011.

4. Aleksandar Rodić, Gyula Mester, "Modeling and Simulation of Quad-rotor Dynamics and Spatial Navigation", Proceedings of the SISY 2011, 9th IEEE International Symposium on Intelligent Systems and Informatics, pp 23-28, ISBN: 978-1-4577-1973-8, DOI: 10.1109/SISY.2011.6034325, Subotica, Serbia, 2011.

5. C. Lebres, V. Santos, N. M. Fonseca Ferreira and J. A. Tenreiro Machado, "Application of Fractional Controllers for Quad Rotor, Nonlinear Science and Complexity", Part 6, DOI: 10.1007/978-90-481-9884-9\_35, Springer, 2011, pp. 303-309.

6. J. Coelho, R. Neto, C. Lebres, V. Santos: "Application of Fractional Algorithms in Control of a Quad Rotor Flight", Proceedings of the 2<sup>nd</sup> Conference on Nonlinear Science and Complexity, Porto, Portugal, July 28-31, 2008, pp. 1-12.

7. Tommaso Bresciani, Modelling, "Identification and Control of a Quadrotor Helicopter", Department of Automatic Control, Lund University, ISSN 0280-5316, ISRN LUTFD2/TFRT/5823.SE, October 2008.

8. B. Siciliano, O. Khatib, Eds., Handbook of Robotics, Springer, ISBN: 978-3-540-23957-4, 2008, pp. 391-410.

9. Barnes W., McCormick, W., Aerodynamics Aeronautics and Flight Mechanics. New York: Wiley, 1995.

10. Gordon Leishman, J., Principles of Helicopter Aerodynamics, Second Edition, Cambridge University Press, 1995.

11. Etkin, B., Reid L. R., Dynamics of Flight- Stability and Control. John Wiley & Sons. New York, 1996.

12. Castillo, P. Dzul, A. Lozano, R. Stabilization of a Mini Rotorcraft Having Four Rotors, Control Systems Magazine, Vol. 25, No. 6, 2005, pp. 45-55.

13. Benallegue A, Mister V, M'Sirdi NK, Exact linearization and non-interacting control of a 4 rotors helicopter via dynamic feedback. IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication, 2001, pp. 586-593.

14. Aircraft X650 Quad-rotor, <http://www.infmetry.com/coolstuff/xaircraftx650-quadcopterquadrotor/>