

# Adataalapú aerodinamikai modell megalkotása kvadrokopterekhez

## Formulation of a data-driven aerodynamic model for quadcopters

*HORVÁTH Dávid András, LELKES János, BAK Bendegúz Dezső*

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Áramlástan Tanszék  
H-1111 Budapest, Bertalan Lajos u. 4-6. Telefon: +36-1-463-4072, Fax: +36-1-463-3464  
Honlap: www.ara.bme.hu, E-mail: horvathd1@edu.bme.hu, lelkes.janos@gpk.bme.hu, bak.bendeguz@gpk.bme.hu

### Abstract

*The application of drones or unmanned aerial vehicles is increasing in place of traditional aircraft in several fields due to their maneuverability and pilotless nature. The main aim of the research is a new data-driven aerodynamical model for multi-rotor drones and helicopters. This model can calculate the forces generated by the rotating blades from the motion state of the drone. With the help of this model, the maneuverability and precision of drones can be increased in the future.*

**Keywords:** nonlinear aerodynamics, data-driven methods, reduced-order modeling, quadcopter

### Kivonat

*Drónokat, vagyis pilóta nélküli repülőgépeket egyre gyakrabban alkalmaznak a hagyományos repülőgépek helyett különböző területeken, a mozgékonyáguk és a pilóta nélküli természetük miatt. A kutatás fő célja egy újszerű adatalapú aerodinamikai modell kidolgozása multirotoros drónokhoz és helikopterekhez. A modell segítségével a forgó lapátok által generált erők kiszámíthatók a drón mozgásállapotából. Ezen modell segítségével a drónok manőverezési sebességét és pontosságát is növelni tudjuk a jövőben.*

**Kulcsszavak:** nemlineáris aerodinamika, adatalapú módszerek, redukált modellezés, kvadrokopter

## 1. Bevezetés

Pilóta nélküli repülő szerkezetek (UAV) az elmúlt évtizedekben nagy népszerűsége tettek szert köszönhetően a széles alkalmazási területüknek. Egy kedvelt típusuk a kvadrokopterek, melyek négy rotorral rendelkeznek, így képesek tetszőleges irányú repülés mellett függőleges fel- és leszállásra, illetve lebegésre is. Azonban a kvadrokopterek általában egy instabil rendszert alkotnak és erősen nemlineáris, többváltozós, erősen csatolt, alulaktuált dinamikával rendelkeznek. Emiatt szükség van egy pontos és gyorsan számolható aerodinamikai modellre a pontos szabályozásukhoz [1].

Tradicionalis helikopterekkel szemben a kvadrokopter egy nagy előnye, hogy a szabályozás csupán a rotorok fordulatszámának változtatásával megvalósítható. A rotorok forgásirányai úgy vannak beállítva, hogy az átlósan szomszédosok egy irányba forognak. Előre-hátra, illetve oldalra való dőlés megvalósításához a megfelelő oldalon található rotorok fordulatszámát csökkentik, míg az ellenkező oldaliakét növelik. Függőleges tengely körüli elforduláshoz a kívánt elfordulás irányába forgó rotorok fordulatszámát csökkentik, míg a másik irányba forgókét növelik.

Kvadrokopterek tanulmányozásához rendkívül nagy segítséget nyújt a rotorok numerikus szimulációja. Ehhez egy módszer az úgynevezett virtuális lapátmodell (VBM). A módszer lényege, hogy a rotort kis szegmensekre kell felbontani, minden szegmens esetében pedig a légerőket a 2D szárnyprofilra vonatkozó egyenletekkel lehet kiszámítani. Ezen légerőkből egy periódusra történő átlagolást követően momentumforrások számíthatóak, melyekkel a CFD szimuláció során modellezhető a rotor légáramlásra gyakorolt hatása. A kifejtett felhajtóerő is ezen momentumforrásokból számítható ki [2].

A rendszer-identifikáció egy eljárás, melynek során dinamikai modelleket határozzunk meg a megfigyelt bemeneti és kimeneti jelekből [3,4]. Az adatalapú modellezés problémája általánosságban három részre bontható [5]. Először modellek egy csoportját kell meghatározni, melyek jól illeszkedhetnek az adatokra, aztán a modell paramétereit szükséges becsülni az adatokból, végül pedig a kapott modell adatokra való illeszkedését kell vizsgálni.

## 2. CFD szimuláció

Az adatalapú modell megalkotásához 3D CFD szimulációkat végeztünk egy rotor esetére a virtuális lapátmodell (VBM) alkalmazásával. A rotor geometriáját DJI Tello drón alapján modelleztük. A VBM-hez egy hengeres tartományt volt szükséges behálózni, aminek a közepén található egy kivágás a rotoragynak. A VBM tartományban, ami a rotor síkja, 1 elem vastagságú strukturált hálót kell alkalmazni [2]. A tartomány többi részén tetszőleges háló alkalmazható, azonban esetünkben a teljes tartományon strukturált hálót alkalmaztunk a szimulációk pontosságának növelése érdekében.

A szimulációk során a hengeres tartomány 1.6 millió cellát tartalmazott és közepén helyezkedett el a drón rotorját reprezentáló impulzus forrás. A hengeres tartomány tetején, és az oldalának egyik felén belépő előírt sebesség peremfeltételt, míg a henger alján, és az oldalának másik felén előírt statikus nyomás peremfeltételt alkalmaztunk. A szimulációkhoz  $k - \omega$  SST turbulenciamodellt használtunk.

Először 0 m/s szélesebbeségre készítettünk egy szimulációt, aminek eredményét a többi szimuláció kezdeti feltételének használtuk fel. Három különböző paramétert változtattunk, a megfűvás szögét, sebességét, illetve a rotor szögsebességét. Összesen 280 különböző paraméterkombinációra számítottuk ki a rotor által keltett felhajtóerőt. A szimulációkat DJI Tello drónon végzett mérések segítségével validáltuk.

## 3. Adatalapú modell felépítése

A szimulációs eredményekből polinomiális regresszió alkalmazásával építettük fel az adatalapú modellt. Ehhez először a CFD szimulációhoz használt paraméterekből kiszámítottuk a vízszintes, illetve függőleges irányú megfűvási sebességet  $(\dot{x}, \dot{y})$ , mivel ezen paraméterekre a felhajtóerő sokkal jobban közelíthető polinomokkal. A felépített modell így három változó függvénye volt,  $x, y$  irányú megfűvás, illetve a rotor szögsebessége. Mivel a felhajtóerő sokkal jobban függ a szögsebességtől, mint a másik két paramétertől, a szögsebességtől való függés modellezéséhez elegendő egy  $\omega^2$  tag hozzáadása a regresszióhoz. A tagok kiválasztásánál bizonyos fizikai tulajdonságokat is figyelembe vettünk. A bal, illetve jobb irányú repülés között nincsen különbség, így az  $x$  irányú megfűvás függvényében csak páros tagok szerepeltek a modellben.

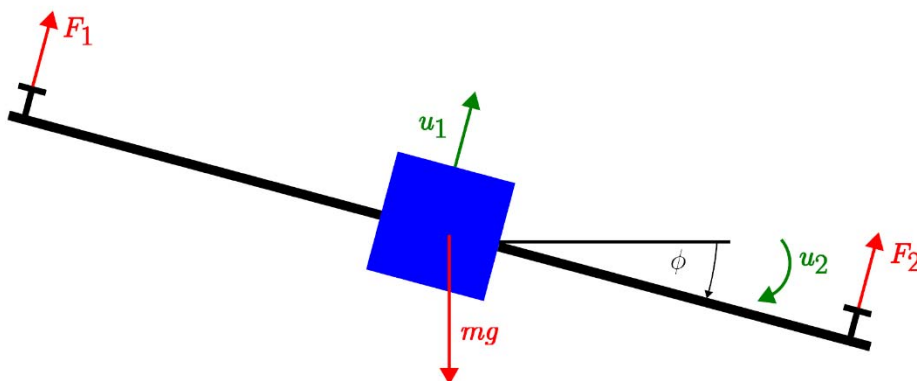
Az illesztés végrehajtásához először az adatokat két részre bontottuk, a tanítóadatokat a teljes adathalmaz 90%-ából álltak, és véletlenszerűen lettek kiválasztva. Ezen szétbontásra a túltanulás elkerülése, és a modell teljesítményének jobb mérhetősége miatt volt szükség. Az ezen az adathalmazon tanított modell alakja az alábbi:

$$F(\dot{x}, \dot{y}, \omega) = -0,000592\dot{x}^2 - 0,0000256\dot{x}^4 - 0,000976\dot{y} + 0,0000456\dot{y}^3 - 0,000139\dot{x}^2\dot{y} - 7,894 \cdot 10^{-8}\omega^2. \quad (1)$$

A modellt a teljes adathalmazra alkalmaztuk, és a CFD szimulációból ismert felhajtóerő eredményekkel összehasonlítottuk. Azt tapasztaltuk, hogy a relatív hiba abszolút értékének maximuma 8,65% volt, vagyis a modell megfelelő eredményeket ad a vizsgált tartományon. Azt is megfigyeltük, hogy a relatív hiba nagyobb magasabb sebességek, illetve alacsonyabb szögsebességek esetén.

## 4. Síkban mozgó drónmodell

A modell teszteléséhez a kvadrokopternek egy síkmodelljét alkalmaztuk, amely az 1. ábrán látható.



1. ábra. Az alkalmazott síkmodell [6]

A síkmodell és az alkalmazott PD szabályzó Venkatesh [6] és tsai. munkája alapján lett meghatározva. A modell mozgásegyenletei a következők:

$$\begin{aligned} m\ddot{x} &= u_1 \sin \phi, \\ m\ddot{y} &= -mg + u_1 \cos \phi \\ J\ddot{\phi} &= u_2, \end{aligned} \quad (2)$$

ahol  $m$  a drón tömege,  $J$  a tehetetlenségi nyomatéka,  $\phi$  az elfordulása,  $g$  a nehézségi gyorsulás,  $u_1$  a propellerek által kifejtett függőleges irányú erő,  $u_2$  pedig a propellerek által kifejtett forgatónyomaték. A PD szabályzót az egyszerűség kedvéért az  $u_1, u_2$  szabályzó paraméterekre alkottuk meg, majd ezekhez kiszámítottuk a szükséges  $F_1, F_2$  értékeket. A szabályzó az alábbi módon volt definiálva:

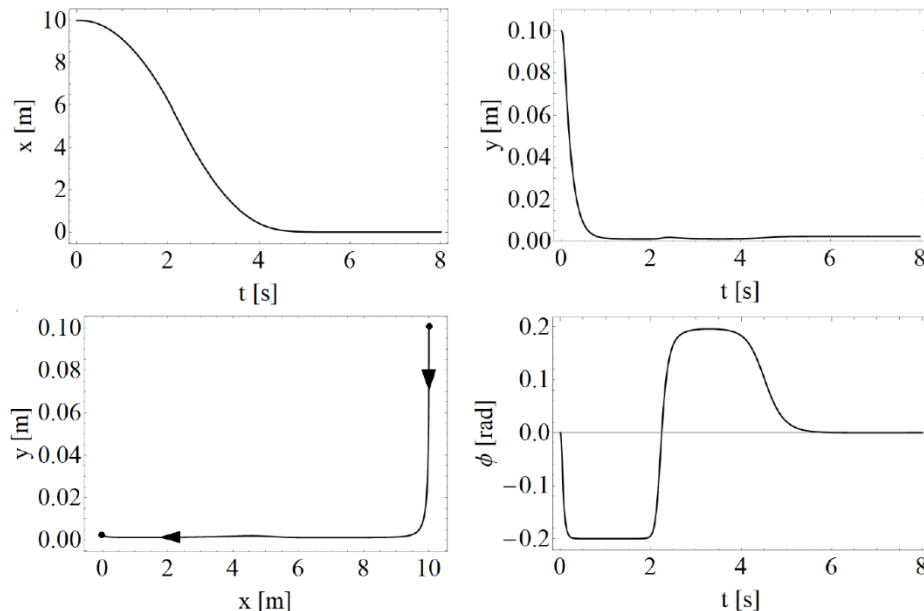
$$\begin{aligned} u_1 &= mg + P_1(y_{\text{des}} - y) + D_1(\dot{y}_{\text{des}} - \dot{y}), \\ u_2 &= P_3(\phi_{\text{des}} - \phi) - D_3\dot{\phi}, \\ \phi_{\text{des}} &= \phi_{\text{lim}} \tanh(P_2(x_{\text{des}} - x) + D_2(\dot{x}_{\text{des}} - \dot{x})), \end{aligned} \quad (3)$$

ahol  $(x_{\text{des}}, y_{\text{des}})$  az előírt pozíció. A  $P_1, P_2, P_3, D_1, D_2, D_3$  szabályozási együtthatók értékeit a [6] cikk alapján választottuk meg. Az ebből kapott  $u_1, u_2$  értékekből az alábbi egyenletekkel lett kiszámolva a propellerek fordulatszáma:

$$\begin{aligned} \omega_1 &= \frac{u_1 + 2\frac{u_2}{L}}{2} s, \\ \omega_2 &= \frac{u_1 - 2\frac{u_2}{L}}{2} s, \end{aligned} \quad (4)$$

ahol  $L$  a drón szélessége,  $s$  pedig egy skálázási faktor. A fordulatszámokra szaturáció is alkalmazva volt, vagyis nem lehetett nagyobb  $\omega_{\text{max}}$ -nál, illetve kisebb  $\omega_{\text{min}}$ -nél. Ezekből a fordulatszámokból a valóban fellépő erőket az alkalmazott aerodinamikai modell segítségével lehet kiszámolni.

A síkmodellt először egy egyszerű aerodinamikai modell segítségével teszteltük, melynél a felhajtóerő a fordulatszám négyzetével volt arányos. Ezt a modellt a DJI Tello drónon végzett mérések segítségével alkottuk meg, és a továbbiakban aerodinamikai alapmodellnek fogjuk nevezni. Numerikus szimulációkat végeztünk, melynek során a drónt egy kitérített helyzetből indítottuk, és vizsgáltuk, hogyan tér vissza az origóba. A szimuláció eredményei a 2. ábrán vannak ábrázolva. Megfigyelhető, hogy nagyjából 5 másodperc alatt a drón visszatér az origóba, 0 túllendüléssel.



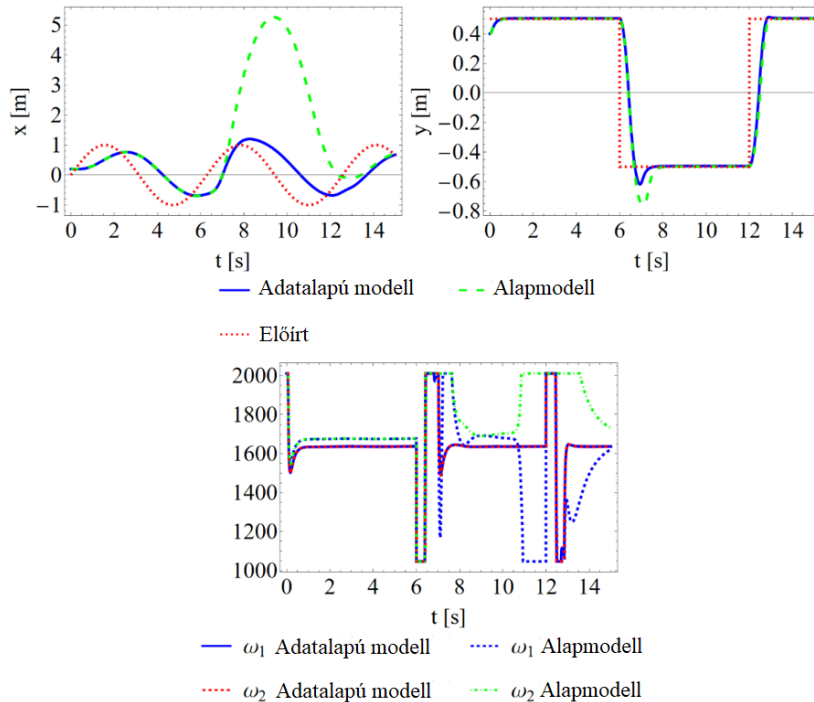
2. ábra. A síkmodell numerikus szimulációja

## 5. Alapmodell és adatalapú modell összehasonítása

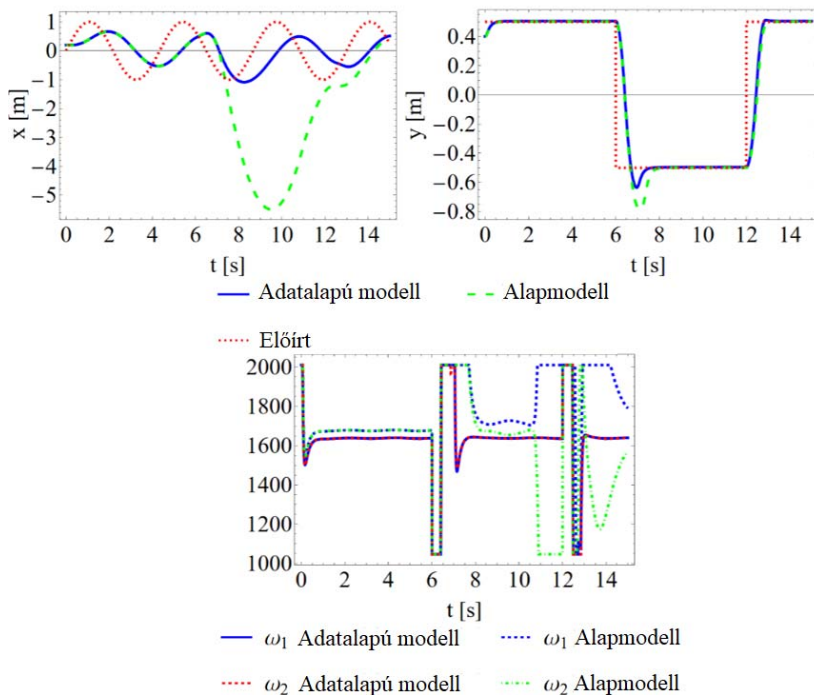
A 3. fejezetben taglalt modell az előző fejezetben leírt síkmodellen lett tesztelve PD szabályzó alkalmazásával, bizonyos előírt trajektóriák esetén. Mind az adatalapú modell, mind pedig egy egyszerűbb

aerodinamikai modell (alapmodell) alkalmazva volt, és a kapott trajektóriák, illetve szabályozó bemenetek összehasonlításra kerültek. Az egyszerűbb aerodinamikai modellben az erő lineárisan függ a rotor szögsebességének négyzetétől és a rendszer további állapotváltozóitól független.

Az eredmények egy olyan trajektóriára lesznek prezentálva, amelynél a vízszintes elmozdulás szinuszosan változik, míg a függőleges elmozdulás négyzetjel szerint. Az időben előírt trajektória kétféle sebességére lesznek a modellek összehasonlítva, 1, illetve 1,45 m/s-ra. A kapott elmozdulás idősorok, illetve szabályzó bemenetek a 3. illetve a 4. ábrán láthatóak. Mindkét esetben megfigyelhető, hogy a vízszintes elmozdulásban jelentős eltérés tapasztalható a két modell között. Az alacsonyabb sebességre nagy pozitív, míg a magasabb sebességre nagy negatív kilendülés figyelhető meg az alapmodellben. A függőleges elmozdulásban is tapasztalható eltérés a két modell között, azonban ez jóval kisebb, mint a vízszintes elmozdulásban tapasztalt eltérés. Ezenkívül az adatlapú modell esetén a szabályzó bemenetek jóval hamarabb lecsengenek a diszkontinuitás után, mint az alapmodellnél.



3. ábra. A két modell összehasonlítása  $v = 1 \text{ m/s}$  sebesség esetén



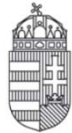
4. ábra. A két modell összehasonlítása  $v = 1,45 \text{ m/s}$  sebesség esetén

## 6. Összefoglalás

A kutatás során kvadrokopter egy rotorjához készültek numerikus áramlástani szimulációk a keltett felhajtóerő megállapítására különböző fordulatszámokra, állásszögekre, és repülési sebességekre. Ezen adatokból polinomiális regresszió alkalmazásával alkottunk meg egy adatalapú aerodinamikai modellt, ami gyorsan számítható, és figyelembe veszi a nemlineáris aerodinamikai hatásokat. Ezt a modellt egy PD szabályozó alkalmazásával teszteltük egy drón síkmodelljén, és összehasonlítottuk egy egyszerűbb modellel. Azt tapasztaltuk, hogy bizonyos trajektóriák esetén jelentős eltérések figyelhetők meg a két modell között. Jövőbeli célunk az adatalapú modell eredményeinek összehasonlítása valós drónreptetéssel kapott mozgáspályákkal, illetve az adatalapú modell további hangolása valós mérési adatokkal.

### Köszönetnyilvánítás

A kutatás a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal K-21 137726 projektjének a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával, és a Kulturális és Innovációs Minisztérium **ÚNKP-22-2-III-BME-78** kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával készült. A bemutatott kutatás a BME-NVA-02 számú projekt részeként az Innovációs és Technológiai Minisztérium Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatással, a TKP2021 pályázati program finanszírozásában valósult meg.



KULTURÁLIS ÉS INNOVÁCIÓS  
MINISZTERIUM



NATIONAL RESEARCH, DEVELOPMENT  
AND INNOVATION OFFICE  
HUNGARY



Új Nemzeti  
Kiválóság Program

### Irodalmi hivatkozások

- [1] Zhang, X., Li, X., Wang, K., Lu, Y. *A survey of modelling and identification of quadrotor robot*. Abstract and Applied Analysis, Hindawi, 2014, vol. 2014.
- [2] Wahono, S. *Development of virtual blade model for modelling helicopter rotor downwash in openfoam*. Aerospace Division, Defence Science and Technology Organisation, 2013.
- [3] Ljung, L. *System identification. Signal analysis and prediction*, Springer, 1998, pp. 163–173.
- [4] Bekey, G. A. *System identification-an introduction and a survey*. 1970.
- [5] Kozin, F., Natke, H. *System identification techniques*. Structural Safety, 1986, vol. 3, no. 3-4, pp. 269–316.
- [6] Venkatesh, P., Vadhvana, S., Jain, V. *Analysis and control of a planar quadrotor*, arXiv preprint, 2021, arXiv:2106.15134.