Prof. Dr. Szabolcsi Róbert[1]

MULTIROTOROS LÉGIJÁRMŰVEK REPÜLÉSDINAMIKAI MODELLJEI, ÉS AZOK VIZSGÁLATA

I. BEVEZETÉS

A forgószárnyú pilóta nélküli repülőeszközök széles körben használhatóak felderítési célokra, mert a helyből felszálló képességük, a jó irányíthatóságuk, a nagyfokú manőverező képességük még szűk, zárt térben, épületek belső terében is alkalmassá teszi őket a repülésre. Pilóta nélküli repülőgépekkel (UAV[2]), légi robotokkal szinte nincs olyan felsőoktatási-, vagy akadémiai intézmény, sem itthon, sem külföldön, amely ne foglalkozna. A kutatások széles területet fednek le, az aerodinamikai elrendezéstől, a fedélzeti robotpilóták tervezéséig. A multirotoros elrendezésű légijárművek számos példáját találjuk a gyakorlatban (koaxiális helikopterek, dönthető rotorú helikopterek, négyrotoros (quadrotor), hat-rotoros (hexarotor) stb.), amelyek lehetséges alkalmazási területe is széles területet ölel át. Tekintettel a sajátos repülési képességekre, a multirotoros légijárművek alapvetően a kis repülési sebesség, kis repülési magasság, és rövid bevetési időt igénylő repülésekre alkalmazhatók jól.

Az egyes repülési feladatok során a multirotoros légijármű alapvetően adatgyűjtő/felderítő feladatokat lát el, jórészt a korlátos repülési tartomány, és a korlátos repülési jellemzők miatt. A repülési feladatokat, azok jellege szerint, „tiszta”, és „D3”[3] feladatokra lehet osztani. A tiszta repülési feladatokat szó szerint tiszta környezetben hajtjuk végre, etikus tevékenységek mellett, míg ellenkező esetben, ha a környezet szennyezett (pl. ipari katasztrófák, természeti katasztrófák felderítése stb.), maga a repülés veszélyes, vagy nem kifejezetten etikus (de legális!) módon szervezett a repülés, akkor „D3” repülésről beszélünk. A szerző célja röviden összefoglalni a multirotoros légijárművek dinamikus modelljeit, bemutatni azok irányításstechnikai vizsgálatát, és összefoglalni a lehetséges repülési üzemmódokat, és bemutatni azok jellemzőit.

II. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

McLean részletesen foglalkozik a merev-, és a forgószárnyú légijárművek térbeli mozgásának matematikai modellezésével, a térbeli mozgás modell-, és parametrikus identifikációjával, valamint a klasszikus-, és a modern (optimális, robusztus) szabályozótervezéssel [1].

---

[1] ZMNE Bolyai János Hadmérnöki Kar, Had- és Biztonságtechnikai Mérnöki Intézet, Katonai Robotika Tanszék, egyetemi tanár. (1581 Budapest, Pf. 15.)
[2] UAV: **U**nmanned **A**erial **V**ehicle
[3] D3: **D**irty – **D**ull – **D**angerous

Nelson bemutatja a merevszárnyú repülőgépek klasszikus átviteli függvényeit, a többváltozós rendszerdinamikai modelleket, és gyakorlati példákat mutat be a különféle repülésszabályozó rendszerek szabályozóinak tervezésére [2].

A [3] és a [4] irodalmak részletesen foglalkoznak a négyrotoros repülőszerkezetek térbeli mozgás dinamikájának leírásával, valamint a repülési magasság stabilizáló repülésszabályozó rendszer előzetes tervezésével.

R. Goel (et al.) részletesen bemutatják négyrotoros repülőszerkezetek dinamikus egyenleteit, PID-szabályozót terveztek, és repülési adatokat publikáltak [5].

P. NEČAS (et al.) és szerzőtársai összehasonlítják a jelenleg rendelkezésre álló, különféle fontosabb quadrotor (UAV) típusokat, és bemutatják, levezetik egy klasszikus elrendezésű négyrotoros pilóta nélküli repülőgép (quadrotor) dinamikus modelljét az állapottéren [6].

T. Lee (et al.) és szerző társai négyrotoros pilóta nélküli repülőgépek térbeli mozgásának matematikai modellezésével foglalkoznak, és részletesen bemutatják az értékkövető (pályakövető) repülésszabályozó rendszer tervezését, és repülési szimulációs eredményeket mutattak be [7].

III. MULTIROTOROS LÉGIJÁRMŰVEK ALKALMAZÁSA „TISZTA”, ÉS „EC_D3”[4] REPÜLÉSI FELADATOKRA

3.1. Quadrotorok alkalmazása „tiszta” feladatokra

A multirotoros repülőeszközök jól használhatóak a kis repülési sebességű, kis magasságú felderítő repülések esetén, mint például:

1. ipari létesítmények (pl. gyárak, üzemek, közlekedési infrastruktúra stb.), veszélyes üzemek (pl. vegyi üzemek, erőművek, atomerőművek, kritikus infrastruktúra stb.) monitoring vizsgálata;
2. mezőgazdasági termőterületek, növényi kultúrák, erdők szennyezettségének, és biológiai állapotának vizsgálata;
3. hálózatok (pl. villamos-energia hálózat, kőolaj-vezetékek, gázvezetékek, telekommunikációs vezetékek stb.) állapotának vizsgálata;
4. vízügyi helyzet monitoring vizsgálata; árterek, gátak megfigyelése;
5. határőrizeti tevékenység támogatása.

A fenti felsorolás sem teljes, hiszen folyamatosan jelennek meg új igények, különféle új információk megszerzésére, új feladatok végrehajtására. Ily módon, a repülő fedélzeti szenzorok, és a fedélzeti elektronika is oly módon, folyamatosan újul meg, hogy képes legyen kielégíteni a felhasználói igényeket. A hobbi-repülési eszközök folyamatosan alakulnak át hordozó platformmá, és

[4] EC_D3: **E**xtra **C**heap_D3

a legújabb elektronikai eszközök fedélzetre történő integrálásával új távlatok nyílnak a távérzékelésben, az adatfeldolgozásban, célazonosításban, és más területeken is.

3.2. Quadrotorok alkalmazása „EC_D3” feladatokra

Az UAV alkalmazások során, sokszor ún. „D3”, azaz (Dirty-Dull-Dangerous) repüléseket kell végrehajtani. Mikor mondhatjuk egy repülési feladatra, hogy az „D3” tulajdonságokkal bír? A *Dirty* repülési feladat fogalmát még nem írták le szakirodalmak, ezért az alábbiakban egy sajátos, általam javasolt definíciót adok közre.

Egy repülési feladat *Dirty*, ha

- fizikailag szennyezett területek felett hajtjuk végre (pl. ipari katasztrófák, atomerőművek, természeti katasztrófák, közlekedési balesetek, árvizek, belvizes területek);
- bizonyos érdekeket sértő, de ugyanakkor legális repülések során (pl. éjszakai felderítése feladat, városi alkalmazások; középületek (bevásárló központok, stadionok, pályaudvarok) monitoringja; közterületek monitoringja) adatgyűjtést végzünk;
- UAV-alkalmazások a szórakoztató-, szabadidős-, és szállodaipar területén: hosszú óceáni, vagy tengeri partszakaszokon eltévedt turisták, gyerekek megkeresése;
- katonai alkalmazások felderítési céllal (célazonosítás, célkövetés, tűzvezetés stb.);
- UAVk harcászati alkalmazása (fedélzeti fegyverek alkalmazása).

A fenti felsorolás a leggyakrabban előforduló, tipikus eseteket sorolja fel, ami nem végleges: új elemek jelenhetnek meg az egyes sajátos repülési eljárásokban, módszerekben, a repülés megtervezésében, és a repülési feladatok meghatározásában.

Egy repülési feladat *Dull*, ha

- a repülési idő hosszú;
- a kezelőszemélyzet számára unalmas, egyhangú, és gyakorlatilag rutinszerű, eseménytelen repüléseket kell végrehajtani.

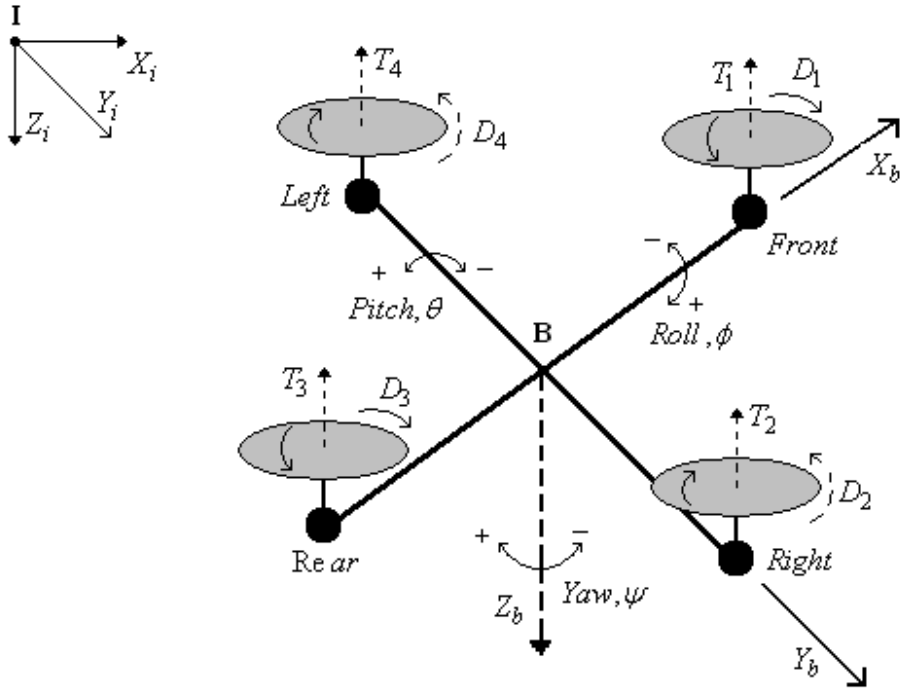
Egy repülési feladat *Dangerous*, ha

- a repüléseket *Dirty* körülmények között (pl. természeti, vagy ipari katasztrófák, árvizek, belvizes területek) kell végrehajtani, ezért az UAV leszállása, esetleg kényszerleszállása olyan területeken történik, hogy elveszíthetjük a repülőeszközt, vagy olyan károsodásokat szenvedhet, amelyek rövidebb, vagy hosszabb időre, repülésre alkalmatlanná teszik az UAVt;
- repülések olyan domborzati viszonyok között (közép-, illetve magashegység), ahol a nem tervezett leszállások során károsodást szenvedhet az UAV, esetleg teljesen össze is törhet, vagy az is előfordulhat, hogy nem találjuk meg a leszállás helyén;
- erdőtüzek, láptüzek, bozóttüzek monitoringja;
- katonai alkalmazások felderítési céllal (célazonosítás, célkövetés, tűzvezetés stb.), amikor számolni kell a repülőgép elvesztésével, vagy sérülésével;
- UAVk harcászati alkalmazása (fedélzeti fegyverek alkalmazása).

Számos repülési feladat végrehajtásakor, sajnos, számolnunk kell a repülőeszköz esetleges sérülésével, extrém esetben, a repülőgép elvesztésével, ezért a gyakorlatban sokszor olyan technológiákat, olyan eszközöket használnak, amelyek nem jelentenek túlzottan nagy anyagi veszteséget, egy UAV-ra számítva. Az ily módon tervezett légijárművek „EC_D3" jellemzővel bírnak: a repülések során akár el is veszíthetjük őket, esetleg, nem is törekszünk a sikeres leszállás végrehajtására az adott repülőgép típussal, mert nincsenek meg a leszállás biztonságos feltételei (pl. hadszíntéri, éjszakai repülések magashegyi körülmények között, rossz időjárási viszonyok mellett – Worst Case Scenario).

IV. A QUADROTOROK TÉRBELI MOZGÁSÁNAK DINAMIKUS MODELLJE

A négyrotoros UAV dinamikus viselkedését vizsgáljuk az 1. ábrán [5, 6].



1. ábra A négyrotoros UAV dinamikus viselkedése.

A Qudarotor sajátos aerodinamikai elrendezést jelent: a tartószerkezet végein elhelyezett villamos motorok közvetlenül hajtják a légcsavarokat, amelyek beállítási szöge nem változtatható. A motorok fordulatszáma egyenként is változtatható ebben az elrendezésben, így a négyrotoros légijármű helyből felszálló, VTOL[5]-képességekkel rendelkezik, valamint jó kormányozhatósági-, és irányíthatósági jellemzőkkel bír. Az 1. ábra alapján könnyen belátható, hogy az egyes tengelyeken elhelyezett

[5] VTOL: **V**ertical **T**ake-**o**ff and **L**anding

motorok azonos irányban, vagy az óramutató járásával azonos, vagy azzal ellentétes irányban forognak, így az eredő reaktív nyomaték hatását sikerül kiküszöbölni [5, 6].

A függés repülési helyzetben mind a négy motor fordulatszáma azonos. Értelemszerű, hogy a függőleges tengely mentén a manőverezést a négy motor fordulatszámának azonos mértékű, és azonos irányú megváltoztatásával tudjuk elérni. A bólintás, és a megfelelő oldalirányú mozgás létrehozására az 1, és a 3 motorok fordulatszámát ellentétes értelemben kell megváltoztatni. A bedöntési szög, és a megfelelő oldalirányú mozgás létrehozása a 2, és a 4 motorok fordulatszámának ellentétes értelmű megváltoztatásával lehetséges. A legyező szög megváltoztatásához az egyes tengelyeken elhelyezett motorok fordulatszámának azonos, de a másik tengelyen elhelyezett motorokkal ellentétes értelmű megváltoztatása szükséges: így a reaktív nyomaték kiegyensúlyozatlansága miatt a quadrotor elfordul a függőleges tengely körül.

Az 1. ábrán **I** jelöli az inercia(vonatkoztatási) rendszert, míg **B** jelöli a légijárműhöz rögzített „test" koordináta-rendszert. A légijármű „test" koordináta-rendszerben mért Euler-szögeinek változási sebessége az alábbi módon írható fel [1, 2, 5]:

$$\begin{bmatrix}\dot{\phi} & \dot{\theta} & \dot{\psi}\end{bmatrix}^T = \mathbf{M}^{-1}\begin{bmatrix}\omega_{x_i} & \omega_{y_i} & \omega_{z_i}\end{bmatrix}^T = \mathbf{M}^{-1}\mathbf{A}\begin{bmatrix}\omega_{x_b} & \omega_{y_b} & \omega_{z_b}\end{bmatrix}^T, \tag{4.1}$$

ahol: ϕ bedöntési szög; θ bólintási szög; ψ irányszög; ω_{x_i} szögsebességek az inercia-rendszerben; ω_{x_b} szögsebességek a „test" koordináta rendszerben; valamint:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \frac{c\psi}{c\theta} & \frac{s\psi}{c\theta} & 0 \\ -s\psi & c\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \ \mathbf{A} = \begin{bmatrix} c\psi c\theta & c\psi s\theta s\phi - s\psi c\phi & c\psi s\theta c\phi - s\psi s\phi \\ s\psi c\theta & s\psi s\theta s\phi + c\psi c\phi & s\psi s\theta c\phi - c\psi s\phi \\ -s\theta & c\theta s\phi & c\theta c\phi \end{bmatrix} \text{ – forgatómátrixok,}$$

ahol: c – cos, s – sin.

Tekintettel arra, hogy számunkra a későbbi feladatok megoldása miatt csak a „test" koordináta-rendszer **B** pontjának a sebessége a szabályozandó paraméter, ezért a „test"+ kkordináta-rendszerben mért sebességeket az alábbi egyenlettel határozhatjuk meg [1, 2, 5, 6]:

$$\begin{bmatrix}\dot{x}_b & \dot{y}_b & \dot{z}_b\end{bmatrix}^T = \mathbf{A}^{-1}\begin{bmatrix}\dot{x}_i & \dot{y}_i & \dot{z}_i\end{bmatrix}^T, \tag{4.2}$$

ahol x_b, y_b, z_b koordináták a test-koordináta rendszerben, és x_i, y_i, z_i koordináták az inercia(referencia) koordináta rendszerben.

4.1 A quadrotor egyenesvonalú mozgásegyenletei

A mozgásegyenletek levezetése során feltételezzük, hogy

1. a quadrotor szerkezete merev, és szimmetrikus;
2. a quadrotor tömegközéppontja a **B** pontban helyezkedik el;
3. a légcsavar-lapátok merev szerkezetek, és a quadrotor nem végez bólintó mozgást.

Az i-edik légcsavarlapátok által létesített felhajtóerő arányos az adott légcsavar forgási sebességének négyzetével, vagyis [1, 2, 5, 6]:

$$T_i = C_1\left(\frac{1-2\pi LCS}{P\alpha_i} + 2\pi\frac{\dot{z}_b - w_{z_b}}{P\alpha_i}\right), \tag{4.3}$$

ahol: $C_1 = k_t \rho A_p \alpha_i^2 R_p^2$; k_t aerodinamikai felhajtóerő tényező; ρ a levegő sűrűsége; A_p a légcsavar felülete; α_i az i-edik légcsavar szögsebessége; R_p a légcsavar sugara; L a légcsavar középpontjának távolsága az origótól; P a légcsavarlapátok beállítási szöge, és végül, w_{z_b} a légköri turbulencia vektorának z-tengelyre eső vetülete. C=1, ha i=1, vagy i=4. C= –1, ha i=2, vagy i=3. $S = \omega_{y_b}$, ha i=1, vagy i=3. $S = \omega_{x_b}$, ha i=2, vagy i=4.

A légijármű hossztengelye mentén ható erők eredője az alábbi egyenlettel írható le [5]:

$$F_{wI} = \mathbf{A}\left[k_s(w_{x_b} - \dot{x}_b) \quad k_s(w_{y_b} - \dot{y}_b) \quad k_u(w_{z_b} - \dot{z}_b)\right]^T, \tag{4.4}$$

ahol: k_s, k_u az egyenesvonalú mozgás súrlódási együtthatói; w_{x_b} és w_{y_b} a légköri turbulencia vektorának *x–, és y*–tengelyekre eső vetületei, értelemszerűen.

A quadrotor térbeli lineáris mozgásának állapot–egyenlete a következő mátrixos alakban is megadható [5]:

$$\begin{bmatrix}\ddot{x}_i\\ \ddot{y}_i\\ \ddot{z}_i\end{bmatrix} = -\begin{bmatrix}\omega_{x_b}\\ \omega_{y_b}\\ \omega_{z_b}\end{bmatrix}\times\begin{bmatrix}\dot{x}_i\\ \dot{y}_i\\ \dot{z}_i\end{bmatrix} + g\begin{bmatrix}0\\0\\1\end{bmatrix} + \frac{F_{wI}}{m} - \frac{T_1+T_2+T_3+T_4}{m}\mathbf{A}\begin{bmatrix}0\\0\\1\end{bmatrix}, \tag{4.5}$$

ahol: g a nehézségi gyorsulás, m a légijármű tömege.

4.2 A quadrotor forgómozgásának egyenletei

Ismeretes, hogy a légcsavarlapátok légellenállásból származó nyomatéka arányos a légcsavarlapát forgási sebességének a négyzetével, vagyis [1, 5]:

$$D_i = C_2\left(\frac{1-2\pi LCS}{P\alpha_i} + 2\pi\frac{\dot{z}_b - w_{z_b}}{P\alpha_i}\right), \tag{4.6}$$

ahol: $C_2 = k_d \rho A_p \alpha_i^2 R_p^3$; k_d a nyomatéki együttható.

A légcsavarlapátok eredő reakciónyomatéka az alábbi egyenlettel írható le:

$$I_{ct} = J_p\left(-\dot{\alpha}_1 + \dot{\alpha}_2 - \dot{\alpha}_3 + \dot{\alpha}_4\right), \tag{4.7}$$

ahol: J_p egy légcsavarlapát tehetetlenségi nyomatéka.

A súrlódási terhelő nyomatékot az alábbi egyenlet alapján is számíthatjuk:

$$\mathbf{M}_f = k_r \begin{bmatrix} \dot{\phi} & \dot{\theta} & \dot{\psi} \end{bmatrix}^T, \tag{4.8}$$

ahol: k_r a súrlódási együttható.

A légijármű motorjának forgórészére redukált nemirányítható zavarások (pl. légköri turbulencia) a következő összefüggéssel írható le:

$$\tau_d = \begin{bmatrix} \tau_{x_b} & \tau_{y_b} & \tau_{z_b} \end{bmatrix}^T, \tag{4.9}$$

A légijármű giroszkópikus nyomatéka a következő egyenlettel írható le:

$$\mathbf{M}_g = J_p \begin{bmatrix} \dot{\theta}\alpha & \dot{\phi}\alpha & 0 \end{bmatrix}^T, \tag{4.10}$$

ahol: $\alpha = -\alpha_1 + \alpha_2 - \alpha_3 + \alpha_4$.

Mindezek alapján, a quadrotor térbeli forgómozgásának állapot–egyenlete a következő mátrixos alakban is megadható [5]:

$$\begin{bmatrix} \dot{\omega}_{x_b} \\ \dot{\omega}_{y_b} \\ \dot{\omega}_{z_b} \end{bmatrix} = -J^{-1}\omega \times J \begin{bmatrix} \omega_{x_b} \\ \omega_{y_b} \\ \omega_{z_b} \end{bmatrix} - J^{-1}\left(\mathbf{M}_f + \tau_d + \mathbf{M}_g\right) + J^{-1} \begin{bmatrix} L(T_4 - T_2) \\ L(T_1 - T_3) \\ D_1 - D_2 + D_3 - D_4 + I_{ct} \end{bmatrix}, \tag{4.11}$$

ahol: $\omega = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_{z_b} & \omega_{y_b} \\ \omega_{z_b} & 0 & -\omega_{x_b} \\ -\omega_{y_b} & \omega_{x_b} & 0 \end{bmatrix}$, $J = \begin{bmatrix} J_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & J_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & J_{zz} \end{bmatrix}$ a főtehetetlenségi mátrix; J_{xx}, J_{yy}, J_{zz} a hossz-, a kereszt-, és a függőleges tengelyre vett főtehetetlenségi nyomatékok, értelemszerűen.

4.3 A quadrotor egyenáramú motorjának dinamikája

Ismeretes, hogy az egyenáramú motor – kis motor induktivitás esetén – dinamikus egyenlete a következő alakban írható fel:

$$J_p \dot{\alpha}_i = G\tau_{m_i} - D_i, \tag{4.12}$$

ahol: $\tau_{m_i} = \dfrac{k_i(V_i - \frac{k_v \alpha_i}{G})}{R}$ a motor dinamikus gyorsító nyomatéka; k_i a motor állandója; k_v a motor forgási sebesség állandója; V_i a motor vezérlő feszültsége; R a motorellenállás; G a motor-légcsavar rendszer áttételi száma.

Az [5] irodalom – szimulációs céllal – közzé teszi egy hipotetikus quadrotor adatait, melyek az alábbiak:

Paraméter	Mérőszám	Mértékegység
m	4,493	kg
L	0,38	m
G	80/12	–
J_p	$1{,}46 \cdot 10^{-3}$	kg/m^2
J_{xx}, J_{yy}	0,177	kg/m^2
J_{zz}	0,334	kg/m^2
R_p	0,228	m
P	0,152	m
V	5	V
R	0,3	Ω
k_t	0,008	–
k_d	0,0013	–
k_i	$3{,}87 \cdot 10^{-3}$	Nm/Ω
k_v	0,0004	V/ford.
k_r	0,35	Nms/rad
k_s, k_u	1	Ns/m
ρ	1,25	kg/m^3
A_p	$8 \cdot 10^{-3}$	m^2
α_{i_o}	1000	ford/perc

1. táblázat. Quadrotor szimulációs paraméterei

Vizsgáljuk kismagasságú függés repülési helyzetben a quadrotor dinamikáját, ha a függőleges tengely mentén kell emelkedő mozgást végrehajtania. A kiindulási feltételek – zavarásmentes esetre – most az alábbiak lesznek:

$$\theta = 0^o; \phi = 0^o; \psi = 0^o; v_{x_{b_o}} = 0m/s; v_{y_{b_o}} = 0m/s; v_{z_{b_o}} = 0m/s, \tag{4.13}$$

A (4.1)–(4.5) egyenleteket felhasználva, a (4.13) kezdeti feltételek figyelembe vételével a quadrotor függőleges tengely mentén végrehajtott mozgásának dinamikus egyenlete az alábbi alakban írható fel:

$$\ddot{z}_b = \frac{F_{mI}}{m} - \frac{T_1 + T_2 + T_3 + T_4}{m} + g\,, \tag{4.14}$$

vagy más alakban:

$$\ddot{z}_b + \frac{\dot{z}_b}{m} = g - \frac{T_1 + T_2 + T_3 + T_4}{m} = g - \frac{4T}{m}\,, \tag{4.15}$$

Az egyes rotorlapátok felhajtóereje az alábbi egyenlettel adható meg:

$$T = C_1\left(\frac{1}{P\alpha_i} + 2\pi\frac{\dot{z}_b}{P\alpha_i}\right), \tag{4.16}$$

ahol: ahol: $C_1 = k_t \rho A_p \alpha_i^2 R_p^2 = 4{,}15872 \cdot 10^{-6}\,\alpha_i^2$.

Helyettesítsük be a (4.16) egyenletet a (4.15) egyenletbe:

$$\ddot{z}_b + \frac{\dot{z}_b}{m} = g - \frac{4T}{m} = g - \frac{4}{m}C_1\left(\frac{1}{P\alpha_i} + 2\pi\frac{\dot{z}_b}{P\alpha_i}\right), \tag{4.17}$$

és rendezzük a kapott egyenletet:

$$\ddot{z}_b + \frac{\dot{z}_b}{m} + \frac{4}{m}C_1 2\pi\frac{\dot{z}_b}{P\alpha_i} = g - \frac{4}{m}C_1\frac{1}{P\alpha_i}\,, \tag{4.18}$$

valamint további rendezéssel:

$$\ddot{z}_b + \dot{z}_b\left(\frac{1}{m} + \frac{4}{m}C_1 2\pi\frac{1}{P\alpha_i}\right) = g - \frac{4}{m}C_1\frac{1}{P\alpha_i}\,. \tag{4.19}$$

Az 1. táblázatban foglalt adatok figyelembevételével a (4.19) egyenlet a következő alakban írható fel:

$$\ddot{z}_b + \dot{z}_b\left(0{,}222568 + 153{,}045136 \cdot 10^{-6}\alpha_i\right) = 9{,}81 - 24{,}35789 \cdot 10^{-6}\alpha_i\,. \tag{4.20}$$

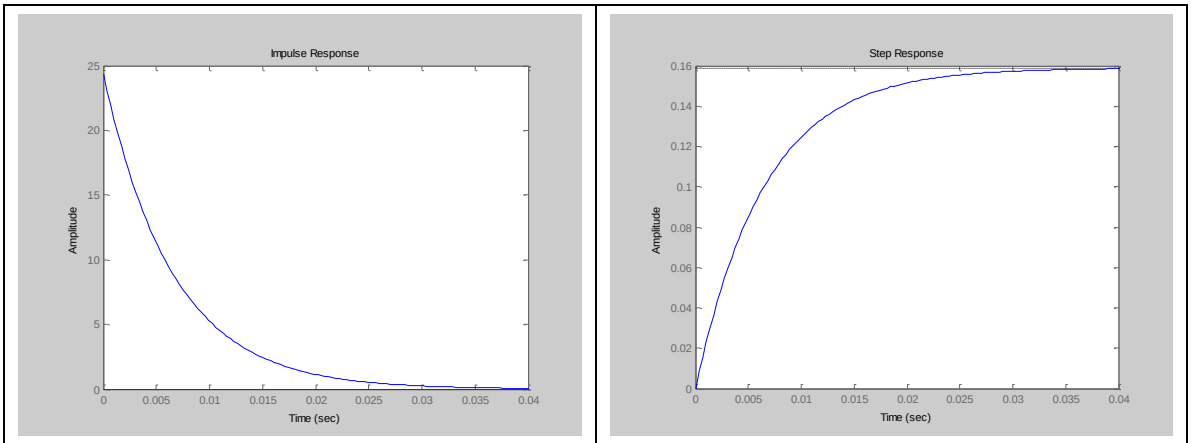
Legyen $\alpha_{i_o} = 1000\,ford/p$. Akkor a függőleges sebesség változását az alábbi egyenlet adja meg:

$$\dot{v}_b + v_b 153{,}2677049 = 9{,}81 - 24{,}35789\Delta\alpha_i\,. \tag{4.21}$$

A (4.21) egyenlet alapján a quadrotor átviteli függvénye a következő lesz:

$$Y(s) = \frac{v_b(s)}{\Delta\alpha_i(s)} = -\frac{24{,}35789}{153{,}2677049 + s}\,. \tag{4.22}$$

A 2. ábrán a quadrotor időtartománybeli viselkedése látható.

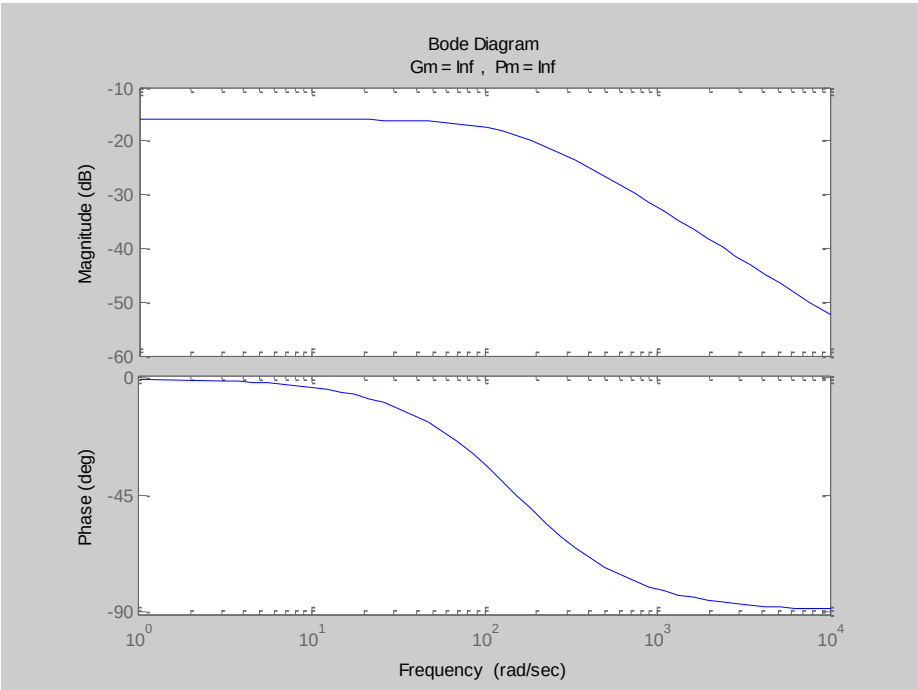


a) Súlyfüggvény | b) Átmeneti függvény

2. ábra. Tranziens analízis eredménye

A 2. ábra alapján megállapíthatjuk, hogy a quadrotor gyorsan reagál a bemenetekre, képes nagy sebességgel reagálni a gerjesztő jelre, és állandó sebességgel emelkedni (2.b. ábra). A súlyfüggvény állandósult állapotban zérushoz tart, így az irányított quadrotor stabilis viselkedésű.

A 3. ábrán a quadrotor frekvenciatartománybeli viselkedése látható.



3. ábra. Viselkedés frekvenciatartományban – Bode diagram

A 3. ábrán jól látható, hogy a quadrotor aluláteresztő jelleggel viselkedik, nagyfrekvenciás tartományban „levágja” a bemeneti jeleket, jól szűri a nagyfrekvenciás zajokat.

V. ÖSSZEGZÉS, KÖVETKEZTETÉSEK

A cikkben a szerző összefoglalta a négyrotoros repülőszerkezetek dinamikus egyenleteit. A vizsgálat kiterjedt úgy a quadrotor egyenesvonalú, mint a forgó mozgására is. A dinamikus modell felállítása után a szerző bemutatta egy hipotetikus, de valós, reális paraméterekkel rendelkező quadrotor számítógépes analízisét. Az idő-, és frekvenciatartománybeli viselkedés alapján stabilitásvizsgálatot, és minőségi jellemzők vizsgálatát hajtotta végre. A közölt eredmények jól használhatóak a quadrotor repülésének automatizálására, fedélzeti automatikus repülésszabályozó rendszer előzetes tervezésére is. A Katonai Robotika Tanszék GAUI 330x quadrotorokra épülő laborjában a közeljövőben elkezdődnek a tesztrepülések, és valós mérések a quadrotor repülésének automatizálását előkészítendő [8].

FELHASZNÁLT IRODALOM

[1] D. McLean: Automatic Flight Control Systems, Prentice-Hall International, New York-London-Toronto-Sydney-Tokyo-Singapore, 1990.

[2] R. C. Nelson: Flight Stability and Control, McGraw-Hill Companies, Inc., Boston, Massachusetts, Burr Ridge, 1998.

[3] A Tayebi, S. McGilvray: Attitude Stabilization of a VTOL Quadrotor Aircraft, IEEE Transactions on Control System Technology, Vol. 14., No 3, pp(562-571), 2006.

[4] H. Bouadi, M. Bouchoucha, M. Tadjine: Modelling and Stabilizing Control Laws Design Based on Sliding Mode for an UAV Type-Quadrotor, Engineering Letters, 15:2, EL_15_2_24 (Advance On-Line Publication: 17 November 2007).

[5] R. Goel, S. M. Shah, N. K. Gupta, N. Ananthkrishnan: Modeling, Simulation, and Flight Testing of an Autonomous Quadrotor, Proceedings of the IISc Centenary International Conference and Exhibition on Aerospace Engineering, ICEAE 2009, May 18-22, 2009 (http://www.idearesearch.in/Papers/GN-070.pdf. Letöltve: 2011. március 29.)

[6] P. Nečas, I. Cîrciu, C. Rotaru, M. Boşcoianu: An Analysis of the Stability and Performances of Rotary Wing Micro Aerial Vehicles, Review of the Air Force Academy, The Scientific Informative Review, N° 1(16)/2010, Brasov, Romania.

[7] T. Lee, M. Leok, N. M. McClamroch: Geometric Tracking Control of a Quadrotor UAV on SE(3), Proc. of the 49th IEEE Conference on Decision and Control, pp(5420-5425), December 15-17, 2010, Atlanta, GA, USA.

[8] http://www.gaui.com.tw/ (Letöltve: 2011. 03. 30.)