



AZƏRBAYCAN ELM FONDU

Azərbaycan Elm Fondunun
Ümummilli Lider Heydər Əliyevin 100-illik
yubileyinə həsr olunmuş
“Əsas qrant müsabiqəsi-2023” ün
(AEF-MCG-2023-1(43)) qalibi olmuş
layihənin yerinə yetirilməsi üzrə aralıq
(rüblük olaraq 2-ci mərhələ)

ELMI-TEXNİKİ HESABAT

Layihənin adı: **Oktokopter vasitəsilə ağır yüklərin (100 kq-a qədər) çatdırılması və xilasetmə işlərinin aparılması üçün proqram-texniki kompleksin işlənməsi**

Layihə rəhbərinin soyadı, adı və atasının adı: **Rzayev Ramin Rza oğlu**

Layihənin nömrəsi: **AEF-MCG-2023-1(43)-13/03/1-M-03**

Müqavilənin imzalanma tarixi: **15 noyabr 2023-cü il**

Qrant layihəsinin yerinə yetirilmə müddəti: **24 ay**

Layihənin icra müddəti (başlama və bitmə tarixi): **01 dekabr 2023-cü il – 01 dekabr 2025-ci il**

Layihənin **II mərhələ** üzrə (rüb) məbləği:

Hesabatda aşağıdakı məsələlər işıqlandırılmalıdır:

1 Layihənin həyata keçirilməsi üzrə cari rübdə yerinə yetirilmiş **elmi işlər**

«Oktokopterin sistem modelinin işlənilməsi» adlı tədqiqat mərhələsi kontekstində hesabat rübündə oktokopter dinamikasının qeyri-xətti tənliklərinə baxılmışdır. 1-ci rübdə qəbul edilmiş fərziyyələri və oktokopterin vahid sərt cisim kimi modelləşdirilməsini nəzərə alsaq, oktokopter dinamikası modelinin əsası çox sadədir - bu İ. Nyutonun ikinci qanunudur. Vektor şəklində o aşağıdakı kimi görünür (yalnız iki sadə tənlik):

$$\frac{d\vec{p}(t)}{dt} = \vec{F}(t),$$
$$\frac{d\vec{L}(t)}{dt} = \vec{M}(t).$$

Burada $\vec{p}(t) = m \cdot \vec{v}(t)$ – oktokopterin impulsu; $\vec{L}(t) = I(t) \cdot \vec{\omega}(t)$ – oktokopter impulsunun momenti; m – oktokopterin cismi; $I(t)$ – inersiyanın tenzoru (ətalət momentinin xətti operatoru); $\vec{F}(t)$ və $\vec{M}(t)$ – oktokopterə təsir edən bütün qüvvələrin və bütün momentlərin cəmidir.

Nyutonun II qanununun yuxarıda göstərilən tənliklərində oktokopterin impuls və bucaq impulsunun dəyərlərini inertial koordinat sistemi üçün əvəz edərək aşağıdakıları əldə edirik:

$$\frac{d\vec{v}_1(t)}{dt} = \frac{1}{m} \vec{F}_1(t),$$

$$\frac{d\vec{\omega}_1(t)}{dt} = I^{-1}(\vec{M}_1(t) - \frac{dI_1}{dt} \cdot \vec{\omega}_1).$$

Bu tənliklərdə sağ tərəflər riyazi cəhətdən çox mürəkkəbdir və **B** əlaqəli koordinat sistemindəki (sağ tərəflərin daha sadə olduğu) dinamik tənlikləri o qədər də asan əldə etmək mümkün deyil, çünki oktokoptərlə əlaqəli koordinat sistemi fırlanır.

Riyaziyyatda vektorları bir koordinat sistemindən digərinə və əksinə çevirmək üçün iki əsas yanaşma mövcuddur – fırlanma matrisləri və kvaternionlar. Sonuncular daha universaldır, birincilər isə daha sadədir. Əgər oktokopterin oriyentasiyası üç bucaqla təmsil olunursa: φ (roll), θ (pitch) və ψ (yaw), və **I** sistemdən **B**-yə və geriyyə çevrilmə matrisləri R_{IB} və $R_{BI} = R_{IB}^T$ kimi göstərsək, onda **I** koordinat sistemi üçün yazılmış istənilən vektor **B** koordinat sistemində və əksinə, müvafiq matrisin vektorla vurulmasından istifadə etməklə çevrilə bilər, məsələn:

$$\vec{F}_I(t) = R_{BI} \vec{F}_B(t) \text{ və ya } \vec{F}_B(t) = R_{IB} \vec{F}_I(t).$$

Mövcud tədqiqat modelində fırlanma matrislərindən istifadə edilir. **I** sistemdən **B**-yə fırlanma matrisi üçün istifadə olunan ifadə aşağıdakı kimidir:

$$R_{IB} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) \cdot \cos(\psi) & \cos(\theta) \cdot \sin(\psi) & -\sin(\theta) \\ \sin(\varphi) \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\psi) - \cos(\varphi) \cdot \sin(\psi) & \sin(\varphi) \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\psi) + \cos(\varphi) \cdot \cos(\psi) & \sin(\varphi) \cdot \cos(\theta) \\ \cos(\varphi) \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\psi) + \sin(\varphi) \cdot \sin(\psi) & \cos(\varphi) \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\psi) - \sin(\varphi) \cdot \cos(\psi) & \cos(\varphi) \cdot \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

Bir daha qeyd edək ki, zamanın hər anında bu matris açıq-aydın fərqli olacaq, çünki oktokopterin oriyentasiya bucaqları dəyişir. Lakin bunlar heç bir diferensial tənlik olmadan sadəcə cəbri hesablamalardır. Matris özü sabit deyil və onun zaman törəməsi var.

Sistem modelləşdirmə metodundan istifadə etməklə həyata keçirilən SimInTech mühitindəki matris Şəkil 1-də göstəriləni kimi görünür.

Bu halda xətti sürət vektoru üçün aşağıdakı ifadə əldə olunur:

$$\vec{v}_B(t) = R_{IB} \cdot \vec{v}_I(t)$$

və moment impulsu üçün isə

$$\vec{L}_B(t) = R_{IB} \cdot \vec{L}_I(t).$$

Nəticədə, nəzərdən keçirilən dinamik tənliklərdən birincisi üçün oktokoptərlə əlaqəli **B** koordinat sistemində aşağıdakı ifadəni alırıq:

$$\frac{d\vec{v}_B(t)}{dt} = -\vec{\omega}_B(t) \times \vec{v}_B(t) + \frac{1}{m} \vec{F}_B(t),$$

və ikinci tənlik üçün nəzərə alaraq ki, $\vec{L}_B(t) = I_B \cdot \vec{\omega}_B(t)$, və fırlanan birləşmiş koordinat

sistemində ətalət tenzoru sabit olduğundan və onun zaman törəməsi sifira bərabər olduğundan və $\frac{d\vec{L}_B(t)}{dt} = I_B \cdot \frac{d\vec{\omega}_B(t)}{dt}$, aşağıdakını alırıq:

$$\frac{d_B \vec{\omega}_B(t)}{dt} = I_B^{-1} \left(\vec{M}_B(t) - \vec{\omega}_B(t) \times (I_B \cdot \vec{\omega}_B(t)) \right).$$

Beləliklə, Nyutonun II qanununun fırlanan **B** sistemi üçün ilkin orijinal tənliklərlə müqayisədə iki vektor hasili ilə tamamlandı.

Bu qeyddə oktokopterin vəziyyət dəyişənləri iki vektor kəmiyyətdir (və ya 6 skalyar) – xətti sürət vektoru və bucaq sürət vektoru. Cəbri olaraq bu, 6 dəyişən olacaq – xətti sürətin üç proyeksiyası və bucaq sürətinin üç proyeksiyası. Nəticədə, Koşi formasında yazılmış, SimInTech və ya Simulink və ya Scilab sistemli (struktur) modelləşdirmə mühitində asanlıqla həyata keçirilə bilən və hətta bu və ya digər inteqrasiya üsulu ilə uğurla həll edilə bilən 6 birinci dərəcəli qeyri-xətti tənliklər sistemləri mövcuddur.

Oktokopterin sürət dəyərlərini aldıqdan sonra (əvvəlcə **B** sistemində), onlar tərs fırlanma matrisindən istifadə edərək *I* sistemə çevrilə bilər, yenidən inteqrasiya olunaraq koordinat qiymətləri və buna görə də obyektin fəzada mövqeyi, inertial koordinat sistemində.

Oktokopterə təsir göstərən güvvələri və momentləri **B** koordinat sistemində təsvir edər. Fərziyyələrə görə, nəzərə alırıq və indekslərlə işarə edirik: **M** – mühərriklərin işi (yalnız yaranan dartma qüvvəsi və ondan momentlər baxımından), **D** – hava müqavimətinin qüvvəsi (küləklə birlikdə), **O** – xarici təsirlər, ümumiyyətlə sıfırdır və istifadəçi tərəfindən ixtiyari qaydada təyin olunur, cazibə qüvvəsi – qüvvələrin dönüş momentini yaratır:

$$\begin{aligned} \vec{F}_B(t) &= \vec{F}_M(t) + \vec{F}_D(t) + \vec{F}_O(t) + mg \cdot R_{IB} \cdot \vec{e}_{IZ}, \\ \vec{M}_B(t) &= \vec{M}_M(t) + \vec{M}_D(t) + \vec{M}_O(t). \end{aligned}$$

Əlaqəli koordinat sistemindəki cazibə qüvvəsi oktokopterin istiqamətindən asılı olaraq "fırlanacaq". Şərtlərin nəyə bərabər olduğunu daha ətraflı təsvir edək:

$$\begin{aligned} \vec{F}_M(t) &= C_T \cdot \omega_{M_1}^2(t) \cdot \vec{e}_{M_1} + C_T \cdot \omega_{M_2}^2(t) \cdot \vec{e}_{M_2} + C_T \cdot \omega_{M_3}^2(t) \cdot \vec{e}_{M_3} + C_T \cdot \omega_{M_4}^2(t) \cdot \vec{e}_{M_4} + \\ &+ C_T \cdot \omega_{M_5}^2(t) \cdot \vec{e}_{M_5} + C_T \cdot \omega_{M_6}^2(t) \cdot \vec{e}_{M_6} + C_T \cdot \omega_{M_7}^2(t) \cdot \vec{e}_{M_7} + C_T \cdot \omega_{M_8}^2(t) \cdot \vec{e}_{M_8}. \end{aligned}$$

- Hava müqavimət qüvvəsi (külək olmadıqda):

$$\vec{F}_D(t) = -0.5\rho \cdot C_D \cdot \begin{bmatrix} A_{yz} \cdot v_x \cdot |v_x| \\ A_{zz} \cdot v_y \cdot |v_y| \\ A_{xy} \cdot v_z \cdot |v_z| \end{bmatrix}$$

- Xarici təsirlər sıfırdır, istifadəçinin istəyi ilə 0, bu və ya digər qiymətini təyin edə bilər.
- Mühərriklərin dartma qüvvələri:

$$\begin{aligned} \vec{M}_M(t) &= \vec{r}_{M_1} \times \vec{e}_{M_1} \cdot C_T \cdot \omega_{M_1}^2 + \vec{r}_{M_2} \times \vec{e}_{M_2} \cdot C_T \cdot \omega_{M_2}^2 + \vec{r}_{M_3} \times \vec{e}_{M_3} \cdot C_T \cdot \omega_{M_3}^2 + \vec{r}_{M_4} \times \vec{e}_{M_4} \cdot C_T \cdot \omega_{M_4}^2 + \\ &+ \vec{r}_{M_5} \times \vec{e}_{M_5} \cdot C_T \cdot \omega_{M_5}^2 + \vec{r}_{M_6} \times \vec{e}_{M_6} \cdot C_T \cdot \omega_{M_6}^2 + \vec{r}_{M_7} \times \vec{e}_{M_7} \cdot C_T \cdot \omega_{M_7}^2 + \vec{r}_{M_8} \times \vec{e}_{M_8} \cdot C_T \cdot \omega_{M_8}^2. \end{aligned}$$

- Hava müqavimətinin momenti:

$$\vec{M}_D(t) = -0.5\rho \cdot C_D \cdot \begin{bmatrix} A_{yz} \cdot v_x \cdot |v_x| \cdot l_x \\ A_{zz} \cdot v_y \cdot |v_y| \cdot l_y \\ A_{xy} \cdot v_z \cdot |v_z| \cdot l_z \end{bmatrix}.$$

Ən yığcam formada alınan və həll edilən dinamik tənliklər aşağıdakı kimidir:

$$\frac{d\vec{v}_B}{dt} = \frac{1}{m} (\vec{F}_M(t) + \vec{F}_D(t) + \vec{F}_O(t)) + gR_{IB} \vec{e}_I z - \vec{\omega}_B(t) \times \vec{v}_B(t),$$

$$\frac{d\vec{\omega}_B}{dt} = I_B^{-1} (\vec{M}_M(t) + \vec{M}_D(t) - \vec{\omega}_B(t) \times (I_B \cdot \vec{\omega}_B(t))).$$

Onları inteqrasiya edərək və **B** sistemində sürətlərin qiymətlərini əldə edərək, *I* inersial koordinat sistemində sürət və oriyentasiya bucaqlarını a.ağıldaki kimi tapırıq:

$$\vec{v}_1(t) = R_{BI} \cdot \vec{v}_B(t),$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = W_{BI} \cdot \vec{\omega}_B(t).$$

Sistemli modelləşdirmə mühitində dinamika tənliklərinin realizasiyası. Növbəti məsələ – SimInTech dinamik modelləşdirmə mühitindən istifadə etməklə əldə edilmiş dinamika tənliklərinin realizasiyasıdır. Məlum olduğu kimi, istənilən problemi həmişə bir neçə yolla həll etmək olar və o, nə qədər mürəkkəb və çoxölçülüdürsə, yolların sayı da bir o qədər çox olur. Bu hesabatda tək bir həll təklif edilir və o bəzi yerlərdə ən optimal deyil. Həll seçimi bir tərəfdən realizasiyasının asanlıığı, digər tərəfdən isə metodikanın əlverişliyi ilə müəyyən edilir.

Beləliklə, **B** koordinat sistemində 2 vektor diferensial tənliyi mövcuddur ki, onlar proyeksiyalara (və skalyar tənliklərə) keçərkən 6 dəyişənə aid birinci dərəcəli 6 qeyri-xətti diferensial tənlik verir: üç sürət və üç bucaq sürəti. Bu 6DOF məsələsidir, yəni altı sərbəstlik dərəcəsi ilə problemdir.

Sistemli modelləşdirmə metodundan istifadə edərək diferensial tənliyi həll etmək üçün ya birinci və ikinci dərəcəli standart bəndlər istifadə olunur – əgər diferensial tənlik xəttidirsə və növlərdən birinə uyğundursa və ya girişi olan "İnteqrator" tipli blok istifadə olunur. Məsələn kimi 6 diferensial tənlik sistemini həll etmək üçün Şəkil 2-ə şablon təqdim edilir. Bu şəkildə "inteqrator" tipli 6+3+3 bloklarından ibarət olan oktokopter modelinin dinamik hissəsinin "əsasları" göstərilmişdir. Diferensial tənliklərin sağ tərəflərini giriş kimi qəbul edən ilk altı blok (onlar növbəti mərhələdə hesablanacaq) – $a_{Bx}, a_{By}, a_{Bz}, \omega_{Bx}, \omega_{By}, \omega_{Bz}$ oxları boyunca oktokopterin təcilləri, eyni oxlar boyunca oktokopterin sürətlərinin inteqrasiyası və hesablanması ilə məşğul olmaq mümkündür (həmçinin oktokopterlə əlaqəli **B** sistemində).

Növbəti üç inteqrator *I* koordinat sistemində xətti sürətləri götürür (fırlanma matrisini tətbiq etməklə **B** sistemində sürətlərdən cəbri üsulla alınır) və onları inteqral edərək inersial koordinat sistemində oktokopterin kütlə mərkəzinin koordinatlarını alır.

Və "inteqrator" tipli daha üç blok, W_{BI} istifadə edərək, **B** sistemində oktokopterin bucaq

	sürətlərindən alınan törəmələrini (bucaq sürətləri) I sistemdə birləşdirərək, oktokoqterin orientasiya bucaqlarının hesablanması ilə məşğul olur. Burada fırlanma bucaqlarının zəruri triqonometrik funksiyalarının hesablanması da həyata keçirilir. "Yaddaşda" və "yaddaşdan" blokların çoxluğu əldə edilən dəyərlərin modelin digər hissələrində təkrar istifadəsi ilə əlaqədardır.
2	Layihənin həyata keçirilməsi üzrə planda nəzərdə tutulmuş işlərin yerinə yetirilmə dərəcəsi (cari rüb üçün, faizlə qiymətləndirməli) 100%
3	Hesabat dövründə alınmış elmi nəticələr , onların yenilik dərəcəsi Hesabat məntiqi cəhətdən tam, lakin tam modelləşdirmə işinin yalnız bir hissəsini təsvir edir. Belə ki, mövcud tədqiqatda sistemli modelləşdirmə mühitində oktokoqterlərin dinamik modelləşdirilməsi məsələsi həll olunub. Başqa sözlərlə, struktur formada oktokoqter dinamikası üçün tənliklər sistemini təsvir etmək imkanı əldə edilmişdir. SimInTech proqram mühitində oktokoqter dinamikasının bütün tənlikləri müvafiq sxemə uyğun olaraq virtual qaydada həyata keçirilib. Burada oktokoqterin koordinatlarını və fırlanma bucaqlarını hesablamaq üçün digər diferensial tənlikləri daxil edəndən sonra sxem əhəmiyyətli dərəcədə mürəkkəbləşir. Buna görə hər bir tənliyə müvafiq xidmət hesablamaları əlavə olunandan sonra (təcillər, qüvvələrin və momentlərin müxtəlif komponentləri, modelin və tənzimləyicilərin sazlanması üçün), bu tənlikləri struktur olaraq 6+ alt modellərə bölünmüşdür: onlardan hər biri öz tənliyini həll edir. Burada giriş kəmiyyətlər mühərriklərin dartma qüvvələridir (onlar hər bir pervanenin cari fırlanma sürətindən və onun güc xüsusiyyətlərindən asılı olaraq bu tənliklərdən kənarında nəzərə alınır), xarici təsir qüvvə və fırlanma momenti (istifadəçi tərəfindən ixtiyari qaydada müəyyən edilir) və cazibə qüvvəsidir. Çıxış kəmiyyətləri oktokoqterin təcilləri, sürətləri və mövqeyidir (koordinatları): B və I koordinat sistemlərində - təcillər və sürətlər, I sistemdəki – mövqe.
4	Layihənin yerinə yetirilməsi zamanı istifadə olunan üsul və yanaşmalar SimInTech proqram paketinin alətlərindən istifadə edilib. SimInTech proqram mühitində oktokoqter dinamikasının bütün tənlikləri struktur sxemə uyğun olaraq həyata keçirilib.
5	Layihə üzrə elmi nəşrlər (məqalələr, monoqrafiyalar, icmallar, konfrans materialları, tezislər) (dərc olunmuş, çapa qəbul olunmuş və çapa göndərilmişləri ayrılıqda qeyd etməklə) (<i>surətlərini əlavə etməli!</i>) Əliyev E.R., Əhmədov İ.M., Qurbanlı Ü.Q., Almasov Ə.Ş., Salmanlı F.M. "Об одной задаче автоматического ориентирования мультикоптера в пространстве с использованием средств компьютерного зрения" adlı məqalə Proceedings of IAM jurnalında cari ilin iyun ayında dərc olunmalıdır.
6	İxtira və patentlər, sərəfəşdirici təkliflər –
7	Layihə üzrə ezamiyyətlər –
8	Layihə üzrə elmi ekspedisiyalarda iştirak –
9	Layihə üzrə digər tədbirlərdə iştirak –

10	Layihə mövzusu üzrə elmi məruzələr (seminarlar, konfranslar, dəyirmi masalar və s. çıxışlar) Məqalələrin nəticələri AR Elm və Təhsil Nazirliyinin İdarəetmə Sistemləri İnstitutunun laboratoriyasının genişləndirilmiş seminarında həm layihə iştirakçıları, həm də dəvət olunan profil mütəxəssisləri tərəfindən müzakirə edilmişdir.
11	Layihə üzrə əldə olunmuş cihaz, avadanlıq və qurğular, mal və materiallar –
12	Yerli həmkarlarla əlaqələr –
13	Xarici həmkarlarla əlaqələr –
14	Layihə mövzusu üzrə kadr hazırlığı –
15	Sərgilərdə iştirak –
16	Təcrübəartırmada iştirak və təcrübə mübadiləsi –
17	Layihə mövzusu ilə bağlı elmi-kütləvi nəşrlər, kütləvi informasiya vasitələrində çıxışlar, yeni yaradılmış internet səhifələri və s. –

Layihə rəhbərinin imzası _____ Rzayev Ramin Rza oğlu

Tarix _____

QEYD: bütün hallarda uyğun olan bəndlər doldurulmalıdır.