

Тогтворгүй Системийн Тэнцвэржилт

Автомат удирдлагатай агаарын хөлөг, түүний тэнцвэржилт

Б. Давгасүрэн

Компьютерийн Техник хангамж мэргэжил
Магистрантур, ШУТИС. КТМС
Улаанбаатар хот, Монгол улс
ce13e004@csms.edu.mn

А. Батмөнх

Компьютерийн Техник Хангамжийн Профессорын Баг
Профессор, ШУТИС. КТМС
Улаанбаатар хот, Монгол улс
batmunkh@csms.edu.mn

Хураангуй — Энэхүү өгүүлэлд автомат удирдлагатай агаарын хөлөг дундаас дөрвөн сэнст загварыг сонгон авч ажиллагааг тайлбарлан, түүнд үйлчилэх хүчнүүдийг задлан математик загварт оруулан удирдлагын дохиог гарган авч, MATLAB орчинд PD – удирдлага, инерцлэг мэдрүүрийн утга боловсруулах загварыг хийхийг хичээлээ.

Түлхүүр үг — робот; тэнцвэржилт; агаарын хөлөг; тогтворгүй систем; quadcopter; дөрвөн сэнст нисдэг тэрэг

I. УДИРТГАЛ

Анх дөрвөн сэнст нисдэг тэргийг нисдэг тэрэгний арын чиглүүлэгч роторын ашигт үйлийн коэффициентийг нэмэгдүүлэх зорилгоор өргөх хүч болгон ашиглахаар зорин бүтээжээ [1]. Нэг болон хоёр сэнст уламжлалт нисдэг тэргийг бодвол маневарлах, энгийн механик хийц, бага хурдны нислэг, тэнцвэр, аэродинамиктай бүрэн зохицсон, удирдлагын зардал бага байдаг давуу талтай [5].

Дөрвөн сэнст нисдэг тэрэгний ажиллах зарчимийн алгоритм нь дэлхий даяар судлагдаж буй судалгааны ажлын гол чиглэлүүдийн нэг юм. Тогтворгүй системийн судалгаа, түүн дотроо нисдэг тогтворгүй системийн математик загварт үндэслэн хийсэн систем манай улсын хувьд хараахан хэрэглээний бүтээгдэхүүн болж чадаагүй байна. Үүнээс үүдэн энэхүү судалгааны ажлын үндсэн зорилгыг дөрвөн сэнст нисдэг тэрэгний загварт шаардлагатай бүх тооцоо хийж математик загвар гарган MATLAB орчинд ажилуулах, гаргасан загварын дагуу бодит байдлаар хийхийг зорилоо.

Дөрвөн сэнст энэхүү төхөөрөмж нь эргэх, мушгирах, налах буюу x, y, z тэнхлэгээр бүрэн эргэлт хийх боломжтой [1]. Нисэж буй объектыг тэнцвэртэй байлгах зорилгоор удирдлагын системд олон тооны инерцлэг мэдрэгчүүдийг ашигладаг.

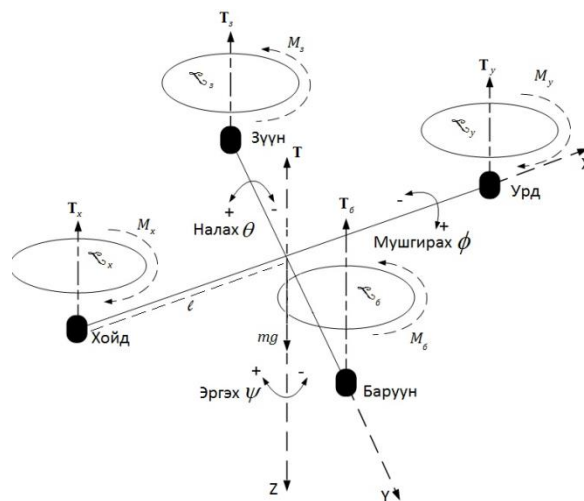
II-р бүлэг (А) дөрвөн сэнстийн эргэлт хийх боломжтой нөхцөлүүд, (В) координатын шилжилт, (С) нисэх төхөөрөмжид үйлчилэх кинематик, динамик, аэродинамик гэсэн 3-н хүчний талаар орууллаа. III-р бүлэгт инерцлэг мэдрүүрийн утга боловсруулах,

MATLAB орчинд хийсэн PD удирдлага туршилтийн үр дүн 4-н сэнстийн нисэх загварыг орууллаа.

II. ДӨРВӨН СЭНСТ БА ТҮҮНД ҮЙЛЧЛЭХ ХҮЧ

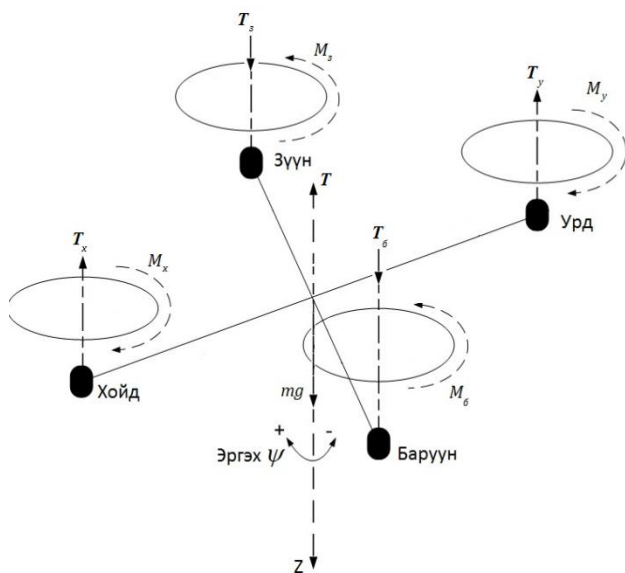
A. Дөрвөн сэнст

Дөрвөн сэнст загвар нь 4-н мотор, сэнс, удирлагын хавтан, баттерей гэсэн үндсэн хэсгүүдээс тогтох ба 4-н сэнс нь диагоналиараа ижил чиглэлд эргэнэ. “Зураг. 1”-т M – нь сэнстийн эргэх чиглэлийг, T – нь 4-н мотор тус бүрийн үүсгэх хүчийг τ – нь мотор тус бүрийн инерцийн хүчний моментийг, ϕ, θ, ψ – нь эйлерийн өнцөг, mg – биеийн жинг тус тус илэрхийлнэ [3].



Зураг. 1. Дөрвөн сэнстийн ерөнхий хүч

Ерөнхийдөө, дөрвөн моторын үүсгэх хүчний зөрүүгээс хамааран эргэх, налах мушгирах гэсэн x, y, z 3-н хэмжээт тэнхлэгийн дагуу ϕ, θ, ψ өнцөг үүсгэн хөдөлнө. Жишээ болгон баруун эргэх үйлдлийн хүчний векторыг зурсан байдлыг Зураг. 2-оор тайлбарлая. T_z, T_ϕ Сумны чиглэл эгц доош чиглэсэн байгаа нь дээш чиглэсэн T_x, T_y хүчнээс бага өргөх хүч үүсгэж байгааг илэрхийлнэ [3].

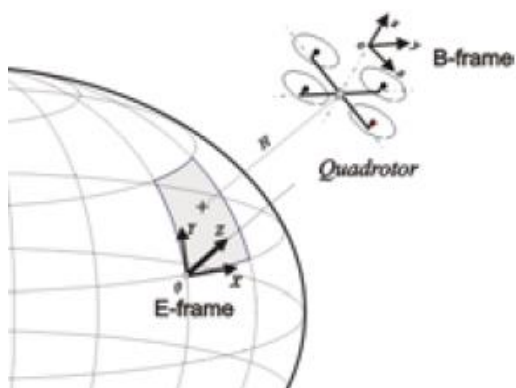


Зураг. 2. Дөрвөн сэнстийн баруун эргэх үйлдэл

В. Үйлчилэх хүчнүүд

1. Кинематик

Дөрвөн сэнст өөрөө x_b, y_b, z_b гэсэн биеийн тэнхлэгтэй ба энийг биеийн тэнхлэг (B-frame), дэлхий ч мөн адил x_e, y_e, z_e гэсэн дэлхийн тэнхлэгтэй (E-frame). Иймд дэлхийтэй харьцангуйгаар хөдлөхөд дэлхий болон дөрвөн сэнстийн тэнхлэг зөрөх тул Ньютон-Эйлерийн загварыг тэнхлэг шилжүүлэхэд ашиглана (Зураг. 3)[8][6].



Зураг 3. Тэнхлэгийн зөрүү

$$R_\phi = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\phi & \sin\phi \\ 0 & -\sin\phi & \cos\phi \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$R_\theta = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & -\sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$R_\psi = \begin{bmatrix} \cos\psi & \sin\psi & 0 \\ -\sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$R(\phi, \theta, \psi) = R_\phi * R_\theta * R_\psi \quad (4)$$

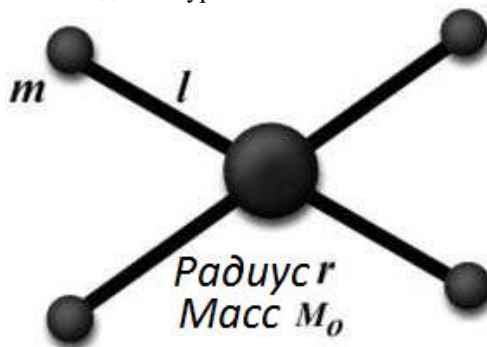
Эйлерийн өнцөг тус бүрийн шилжилтийн матриц (1),(2),(3)[8]. Шилжилтийн өнцөгийн матриц (4)[4].

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix}_e = \begin{bmatrix} 1 & \sin\phi \tan\theta & \cos\phi \tan\theta \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi \\ 0 & \sin\phi \sec\theta & \cos\phi \sec\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix}_b \quad (5)$$

Биеийн өнцөг хурдыг дэлхийтэй харьцангуй өнцөг хурдаар илэрхийлсэн тэгшитгэл (5).

2. Динамик

Дөрвөн сэнстийн инерцийн моментийг M_0 - масстай r - радиустай бөмбөлөг m - масстай l -урттай саваа болгон бодвол “Зураг. 4”.



Зураг. 4. Инерцийн момент

$$j_x = j_y = j_z = \frac{2M_0 r^2}{5} + 2l^2 m \quad (6)$$

Инерцийн момент (6) тэгшитгэлээс Ньютон-Эйлерийн томъёогоор хувиргалт хийхэд

$$\begin{bmatrix} \ddot{\phi} \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{\psi} \end{bmatrix}_e = \begin{bmatrix} \frac{1}{j_x} \tau_\phi \\ \frac{1}{j_y} \tau_\theta \\ \frac{1}{j_z} \tau_\psi \end{bmatrix}_b - \begin{bmatrix} j_y - j_z & \dot{\theta} \dot{\psi} \\ j_x - j_z & \dot{\phi} \dot{\psi} \\ j_x - j_y & \dot{\phi} \dot{\theta} \end{bmatrix}_b \quad (7)$$

(7) нь өнцөг хурдатгал нь өнцөг хурд, моторын торк, инерцийн моментээр илэрхийлэгдсэн тэгшитгэл юм[9] [5].

3. Аэродинамик

Дөрвөн сэнст нисдэг тэрэгт үйлчилэх агаарын даралт, моторын үүсгэх өргөх хүчийг томъёолбол (8)[2][3].

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho A_D v^2 \quad (8)$$

Энд, C - сэнсний өргөх коэффициент (өнцөг), ρ - агаарын нягт, A - сэнсний эргэх талбай, v - сэнсний эргэх хурд.

Дээшээ чиглэсэн өргөх хүч (9)

$$T = T_3 + T_6 + T_x + T_y \quad (9)$$

Мушгирах торк (10)

$$\tau_\phi = l(T_3 - T_6) \quad (10)$$

Налах торк (11)

$$\tau_{\theta} = \tau_y - \tau_x \quad (11)$$

Эргэх торк (12)

$$\tau_{\psi} = \tau_y + \tau_x - \tau_{\delta} - \tau_z \quad (12)$$

Өөрөөр хэлбэл аэродинамикийн эффект нь моторын үүсгэх хүч дээр орж байна.

III. ИНЕРЦЛЭГ МЭДРҮҮР БА МАТЛАВ ЗАГВАР

A. Инерцлэг мэдрүүр ба түүний утгыг боловсруулах

Инерцлэг мэдрүүрийг гадны тулгуур координатгүйгээр эргэлдэх болон шугаман хөдөлгөөнийг хэмжихэд өргөн хэрэглэдэг. Энэ хөдөлгөөн нь гироскоп болон хурдатгал хэмжигчээр хэмжигдэж болох ба ихэнх тохиолдолд эдгээр мэдрүүрүүдийг нисэх болон далайн навигацын системд хэрэглэдэг. Инерцлэг хэмжилтийн технологийн гол онцлог нь хэмжилтийн объектын байршлын болон чиглэлийн тухай мэдээллийг нэгэн зэрэг авах боломжтой байдаг оршино.

Хурдатгал хэмжигч нь хурдатгалыг x, y, z гэсэн 3-н тэнхлэгийн утгаар m/c^2 нэгжтэйгээр гаргана. Хурдатгал хэмжигчээр x болон y тэнхлэгийн өнцөгийг тооцоолон гаргаж болох (13, 14) ба z тэнхлэгт хүндийн хүчний хурдатгал g нөлөөлдөг тул гаргах боломжгүй байдаг[10].

$$\phi = \arctan\left(\frac{A_x}{\sqrt{A_y^2 + A_z^2}}\right) \quad (13)$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{A_y}{\sqrt{A_x^2 + A_z^2}}\right) \quad (14)$$

Гироскоп нь өнцөг хурдыг мөн x, y, z гэсэн 3-н тэнхлэгт хэмжих ба гаралтаа m/c нэгжтэйгээр гаргана. Гироскопоос x, y, z гэсэн 3-н тэнхлэгийн өнцөгийг интеграл авч гаргах боломжтой (15,16,17) байдаг[10].

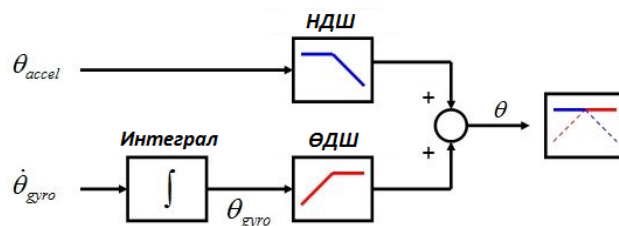
$$\phi = \phi_0 + (\omega_x - \omega_{x0}) * S\delta t \quad (15)$$

$$\theta = \theta_0 + (\omega_y - \omega_{y0}) * S\delta t \quad (16)$$

$$\psi = \psi_0 + (\omega_z - \omega_{z0}) * S\delta t \quad (17)$$

Дараах томъёонд ϕ_0, θ_0, ψ_0 нь анхны өнцөг, $\omega_{x0}, \omega_{y0}, \omega_{z0}$ нь анхны хурд буюу өмнөх төлвийн хурд, S нь δt хугацаанд хийсэн хэмжилтийн тоо болно.

Инерцлэг мэдрүүрийн утгыг хурдатгал хэмжигч болон гироскопын гаргасан өнцгийг хослуулан гарган нэгнийх нь алдааг нөгөөгөөр нь нөхүүлэн удирдлагын системд өгдөг. Мөн инерцлэг хэмжигдэхүүнд цагаан шуугиан орсон байдаг тул калманы шүүр, харилцан бие биенээ нөхсөн (Complementary) шүүрийг ашигладаг [10]. Энгийн бүтэцтэй програмчилах, загвар гаргахад хялбар гэсэн үүднээс харилцан бие биенээ нөхсөн шүүрийг сонголоо(Зураг.5).



Зураг.5. Харилцан бие биенээ нөхсөн шүүр

$$\theta = \beta * \theta_g + (1 - \beta) * \theta_a \quad (18)$$

Томъёонд орсон β нь шүүрийн коэффициент ба β нь 0.5-с их байх үед өндөр давтамжийн шүүр $1-\beta$ нь нам давтамжийн шүүр байна (18). Мэдрүүрийн утгаас шүүрийн гаралтанд гарах хүртэл хугацааг τ гэж тэмдэглэх бөгөөд дараах томъёогоор илэрхийлнэ (19).

$$\tau = (\beta * \delta t) / (1 - \beta) \quad (19)$$

B. Удирдлагын дохио боловсруулах

1. Моторын тооцоо

Цөмгүй тогтмол хүчдэлийн мотор (Coreless DC) дөрвөн мотор ашиглагдах тул нэг мотор дээр жишээ авч моторын чадлын тооцоо хийвэл[11].

$$\tau = K_t(I - I_0) \quad (20)$$

Моторын торкын тэгшитгэл (20) хэлбэртэй байх бөгөөд энд τ -нь торк, K_t -нь торкийн пропорциональ тогтмол, I_0 - нь ачаалалгүй үеийн гүйдэл, I - нь оролтын гүйдэл[11].

$$V = IR_m + K_v\omega \quad (21)$$

Мотор дээр унах хүчдэлийн тэгшитгэл (21) хэлбэрт байна үүнд V - нь мотор дээр унах хүчдэл, R_m -нь моторын дотоод эсэргүүцэл, K_v -нь пропорциональ тогтмол (RPM-н гаргах сөрөг хүчдэл), ω - өнцөг хурд[11].

$$P = I * V = \frac{(\tau + K_t I_0)(K_t I_0 R_m + \tau R_m + K_t K_v \omega)}{K_t^2} \quad (22)$$

$$P = \frac{(\tau + K_t I_0) K_v \omega}{K_t} \quad (23)$$

$$P = \frac{K_v}{K_t} \tau \omega \quad (24)$$

Моторын чадлын тэгшитгэл (22) хэлбэртэй моторын эсэргүүцэл нь өчүүхэн бага учир моторын эсэргүүцлийг тооцолгүйгээр томъёог хялбарчилбал (23) дараах томъёонд буй $K_t I_0$ нь τ -аас олон дахин бага тул байхгүй гэж үзэж болох учир хялбарчилаад (24) гэсэн моторын чадлын тэгшитгэлийг гаргалаа.

2. Үйлчилэх хүчнүүд [9]

Чадал нь нисдэг тэргийг нисэж байх үед буюу моторыг ачаалалтай байх үед үүснэ.

$$P * \Delta t = F * \Delta x \quad (25)$$

Моторын гаргах чадлыг хугацааны өөрчлөлтөөр үржсэн ажил нь өргөх хүчийг замын өөрчлөлтөөр үржсэнтэй тэнцүү байна (25).

$$P = F \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (26)$$

$$P = T v_h \quad (27)$$

Чадлыг олбол замын өөрчлөлтийг хугацааны өөрчлөлтөнд харьцуулсанаар (26) биеийн шугаман хурд v_h - гарах ба T –нь өргөх хүч байна (27).

$$v_h = \sqrt[2]{\frac{T}{2\rho A}} \quad (28)$$

Хурдыг олохын тулд (8) –г ашиглан агаарын үйлчлэх эсэргүүцлийг оруулснаар (28) тэгшитгэл гарна.

$$P = \frac{K_v}{K_t} \tau \omega = \frac{K_v K_t}{K_t} T \omega = \frac{T^2}{\sqrt[2]{2\rho A}} \quad (29)$$

Олсон хурдны тэгшитгэлээ орлуулан чадлыг олж өмнөх (24) тэгшитгэлтэй тэнцүүлбэр (29) тэгшитгэл гарна.

$$T = \left(\frac{K_v K_t 2\rho A}{K_t} \omega \right)^2 = k\omega^2 \quad (30)$$

T буюу өргөх хүчийг олж тогтмол тоонуудыг нэгтгэнк- коэффициент болговол (30) хэлбэрт шилжинэ.

$$T_B = \sum_{i=0}^4 T_i = k \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \sum \omega_i^2 \end{bmatrix} \quad (31)$$

Бүх моторын нийлбэр хүчийг олох юм бол (31) хэлбэрт шилжих ба нийт чирэх хүч F_D нь $\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}$ – гэсэн биеийн шугаман хурдыг k_d - тогтмолоор үржүүлэн гаргасантай тэнцүү байна (32).

$$F_D = \begin{bmatrix} -k_d \dot{x} \\ -k_d \dot{y} \\ -k_d \dot{z} \end{bmatrix} \quad (32)$$

3. Торк [9]

Чирэх хүчний τ_D торк-д аэродинамикийн (8) болон инерцийн момент оруулан томъёолбол (33). Бүх тогтмол утгуудыг b –коэффициент болгон хураагуулж бичлээ.

$$\tau_D = \frac{1}{2} R \rho A C_D v^2 = \frac{1}{2} R \rho A C_D (\omega R)^2 = b\omega^2 \quad (33)$$

$$\tau_z = b\omega^2 + I_M \dot{\omega} \quad (34)$$

Z тэнхлэгийн өнцөг хурдатгал нь газардах болон хөөрөх үеэс бусад тэнцвэртэй нисэж байх үед тэгрүү тэмүүлнэ гэсэн үүднээс $\dot{\omega}=0$ гэж авъя (34).

$$\tau_z = (-1)^{i+1} b\omega_i^2 \quad (35)$$

Цагийн зүүний дагуу болон цагын зүүний эсрэг чиглэлд эргэх моторын чиглэлийг нэмэх үүднээс $(-1)^{i+1}$ - коэффициентийг нэмж өглөө (35). Z тэнхлэгээр эргэх торк нь бүх моторын торкны нийлбэр байх тул (36) хэлбэрт бичигдэнэ.

$$\tau_\psi = b(\omega_1^2 - \omega_2^2 + \omega_3^2 - \omega_4^2) \quad (36)$$

X тэнхлэгийн дагуух торкийг бодвол $i=1, i=3$ үед буюу мушгирах өнцөгт үүсгэх хүчний чиглэлээр бодогдох ба дөрвөн сэнстийн төвөөс мотор хүртэлх зай L нэмэгдэж өгнө (37).

$$\tau_\phi = \sum r * T = L(k\omega_1^2 - k\omega_3^2) = Lk(\omega_1^2 - \omega_3^2) \quad (37)$$

Y тэнхлэгийн хувьд мөн адилхан бодогдох бөгөөд $i=2, i=4$ гэсэн утганд буюу налах өнцөгт үүсгэх хүчний чиглэлээр бодогдоно (38).

$$\tau_\theta = \sum r * T = L(k\omega_2^2 - k\omega_4^2) = Lk(\omega_2^2 - \omega_4^2) \quad (38)$$

Биеийн торкийн матрицийг зохиовол дараах хэлбэртэй бичигдэнэ (39).

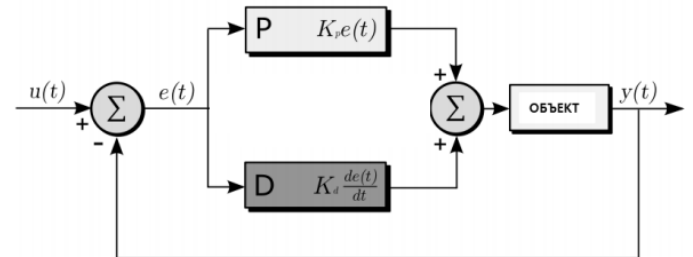
$$\tau_B = \begin{bmatrix} Lk(\omega_1^2 - \omega_3^2) \\ Lk(\omega_2^2 - \omega_4^2) \\ b(\omega_1^2 - \omega_2^2 + \omega_3^2 - \omega_4^2) \end{bmatrix} \quad (39)$$

4. Удирдлагын дохио боловсруулах

Дөрвөн сэнстийн удирдлага нь үндсэн 4-н хөдөлгөөнтэй гэж болно. 1-д өндөрөө авах (9), 2-д мушгирах (10), 3-д налах (11), 4-д эргэх (12). Өндөрөө барьж тодорхой өндөрт тогтож байхын тулд өнцөг болон хурдатгалыг бүгдийг нь 0 болгох шаардлагатай.

PD удирдлага

Дөрвөн сэнстийг ганцхан PD болон PID удирдлагаар биш LQR, SS, Quaternion, Fuzzylogic гэсэн олон төрлийн удирдлагын системээр удирдах боломжтойгоос PD удирдлагын системийг сонгон авч ажиллаа. PD удирдлагыг дөрвөн сэнст зөвхөн гироскоп мэдрүүртэй байх үед ч ашиглах боломжтой өнцөг хурдаар P буюу пропорциональ нь одоогын алдаанаас, D буюу дифференциал нь өнгөрсөн болон одоогын алдааны ялгавар бөгөөд ирээдүйд бий болох алдаануудыг урьдчилан тааварлах дээр өөрчлөлтийн хэмжээнүүд нь үндэслэгддэг “зураг. 6”. PD удирдлагыг томъёолбол (40) хэлбэртэй байна. Объектийн гаралтын төлөв $y(t)$ нь оролтын $u(t)$ -г даган мөрдөх үйлдлийг өндөр нарийвчлалтай гүйцэтгэхийн тулд Пропорциональ-Дифференциал удирдлагыг хэрэглэдэг [7].



Зураг.6. PD удирдлагын блок диаграм

$$y = K_p e + K_D \frac{de}{dt} \quad (40)$$

Дөрвөн сэнстийг хэвтээ тэнхлэгтэй өнцөг үүсгэлгүйгээр өндөрт хөөргөхийн тулд хэвтээ тэнхлэгтэй үүсгэх өнцөг болон хурд 0 байх ёстой. Моторын торкийг өнцөг хурдатгалаар илэрхийлсэн байдал (41)[9].

$$\tau = I \ddot{\theta} = I u(t) \quad (41)$$

$$\begin{bmatrix} \tau_\phi \\ \tau_\theta \\ \tau_\psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -I_x * (K_d \dot{\phi} + K_p \int_0^T \dot{\phi} dt) \\ -I_y * (K_d \dot{\theta} + K_p \int_0^T \dot{\theta} dt) \\ -I_z * (K_d \dot{\psi} + K_p \int_0^T \dot{\psi} dt) \end{bmatrix} \quad (42)$$

Дэлхийтэй харьцангуй үүсгэх торк өнцөг тус бүр дээр өнцөг хурданд PD оруулан бичвэл (42) хэлбэртэй болно.

$$\tau_B = \begin{bmatrix} Lk(Y_1 - Y_2) \\ Lk(Y_2 - Y_4) \\ b(Y_1 - Y_2 + Y_3 - Y_4) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -I_x * (K_d \dot{\phi} + K_p \int_0^T \dot{\phi} dt) \\ -I_y * (K_d \dot{\theta} + K_p \int_0^T \dot{\theta} dt) \\ -I_z * (K_d \dot{\psi} + K_p \int_0^T \dot{\psi} dt) \end{bmatrix} \quad (43)$$

Бисийн өөртөө харьцангуйгаар үүсгэх торктой тэнцүүлэн бичвэл (43) хэлбэрт шилжинэ. Бидэнд дөрвөн үл мэдэгдэхтэй гурван тэгшитгэл байгаа тул.

$$T = \frac{mg}{\cos \theta \cos \phi} \quad (44)$$

$$T = \frac{mg}{\cos \theta \cos \phi} = k \sum Y_i \Rightarrow \sum Y_i = \frac{mg}{k \cos \theta \cos \phi} \quad (45)$$

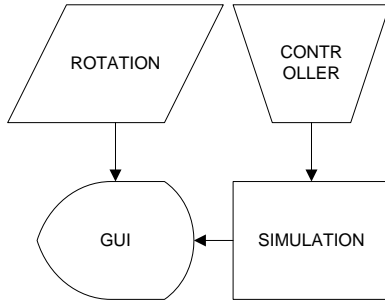
$$Y_1 = \frac{mg}{4k \cos \theta \cos \phi} - \frac{2D e_{\psi} I_x + e_{\psi} I_x k L}{4bkL} \quad (46)$$

$$Y_2 = \frac{mg}{4k \cos \theta \cos \phi} + \frac{e_{\psi} I_z k L - 2D e_{\theta} I_y}{4bkL} \quad (47)$$

$$Y_2 = \frac{mg}{4k \cos \theta \cos \phi} - \frac{e_{\psi} I_z k L - 2D e_{\phi} I_x}{4bkL} \quad (48)$$

$$Y_2 = \frac{mg}{4k \cos \theta \cos \phi} + \frac{e_{\psi} I_z k L + 2D e_{\theta} I_y}{4bkL} \quad (49)$$

Шугаман тэгшитгэлээр оролтын мэдрүүрийн утга болон тогтмолоор мотор тус бүр дээрх торкийг бодон гаргах боломжтой(44-49). PD удирдлага хийх хүрэлцээтэй нөхцөлтэй болох юм[9].

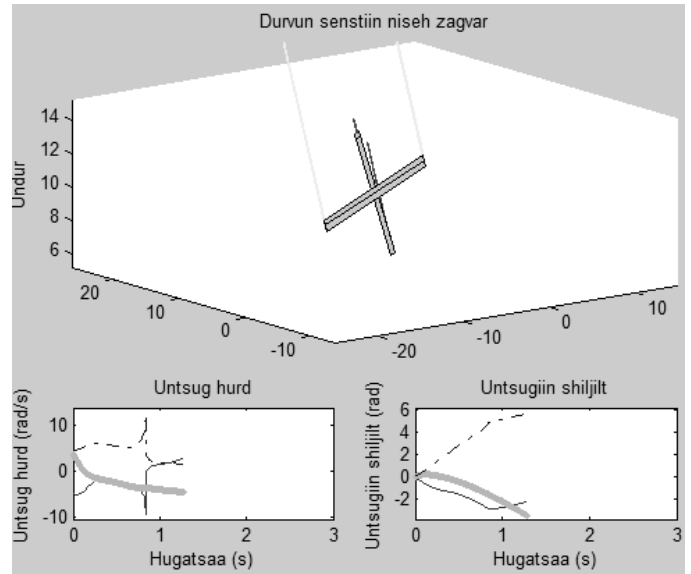


Зураг.7. Матлаб симуляцийн ерөнхий блок диаграм

Матлаб дээр хийсэн симуляци маань дараах 4-н үндсэн хэсгээс тогтох ба GUI-д хэрэглэгчийн интерфэйс, Simulation – д симуляци хийгдэх ба хурдатгал, торк болон тогтмол бусад утгуудыг агуулна. Rotation-д эргэлтийн өнцөгийн матриц, Controller – хэсэгт PD удирдлага болон түүний алдаа бодох функцуудыг агуулна “Зураг. 7”.

Матлаб симуляцийн үр дүнд

Дөрвөн сэнстийн нисэх загварыг MATLAB програм ашиглан симуляци хэлбэрээр ажиллуулж туршсан байдал “Зураг. 8”.



Зураг.8. Ерөнхий системийн симуляци

Симуляцийн үр дүнд үндэслэн автомат удирдлагатай дөрвөн сэнстийг агаарт тэнцвэр болон өндөрөө барих мөн програмчилж өгсөн траекторыг дагаж хөдлөх бодит загвар болгох боломжтой байна.

IV. ДҮГНЭЛТ

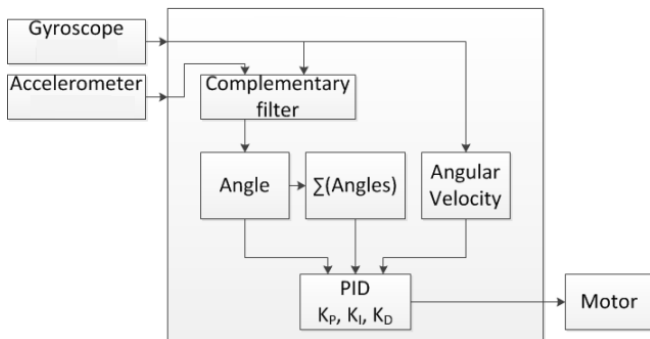
Энэхүү судалгааны ажлаар бие нисэхэд үүсэх хүч агаарт тэнцвэртэй байхын тулд ямар хүчээр тогтмол үйлчилж байх хэрэгтэй вэ? гэх мэт нисэх загвар хийж туршигдах мэдэх хэрэгтэй элементүүдийг математик загвартай уялдуулан оруулж MATLAB програмын орчинд удирдлагын системийн загвар гаргалаа. Манай оронд энэхүү чиглэлээр хийгдэж байсан судалгааны ажил бага тул сонирхон судлах хүүхэд залуучуудын оролцоог нэмэгдүүлэх үүднээс аль болох энгийн үгээр математик загвар, удирдлагын систем, инерцлэг мэдрүүр ашиглах үндсэн ойлголтуудыг өгөхийг зорисон. Цаашдаа удирдлагын системийг байнга сайжруулах, шинэчлэх, робот болон нисэх загвар сонирхогч хүүхэд залууст зориулсан platform бүтээх, бичлэг хийх, цаг уурын мэдээлэл цуглуулах, траектор дагах байрлал илэрүүлэх систем болгон хөгжүүлэх ажлууд хийгдсээр байх болно. Нэг эрдэм шинжилгээний өгүүллийн хүрээнд кинематик, динамик, математик загвар, удирдлагын систем, инерцлэг мэдрүүрийн талаар бичсэн нь учир дутагдалтай болсон байж болох ч дараа дараачийн судлаачид суурь бааз болж өгөхөөр үндсэн ойлголтуудыг тусгасан.

Нисэх төхөөрөмжийн бодит загварыг хийхэд илүү өртөг зардал ордог тул уг системийг тогтвортой найдвартай ажилуулж чадах техник хангамжийг сонгон авахад симуляци болон математик загварыг ашиглан онолын үндэстэйгээр сонгох нь зүйтэй байдаг. Тийм ч учраас өгүүллийн хүрээнд тогтворгүй системийн удирдлагын систем түүнд шаардлагатай тооцоог хийж симуляцийн орчинд дөрвөн сэнстийг нисгэлээ. Симуляци амжилттай болсон тул агаарт

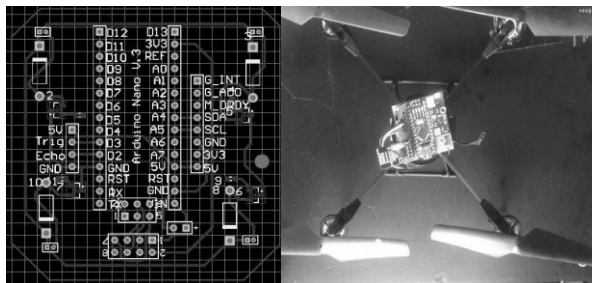
тэнцвэр болон өндөрөө барих мөн програмчилж өгсөн тракторыг дагаж хөдлөх бодит загвар болгох үйл ажиллагаандаа ороод байна.

Энэхүү судалгааны ажлын үр дүнд гаргасан математик загвартаа үндэслэн бодит загварыг хийх ажил дараах явцтай явагдаж байна.

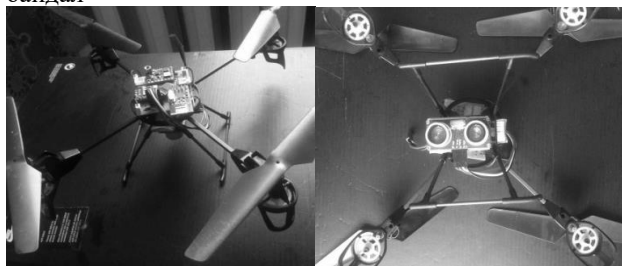
Тогтворжуулах програмын блок диаграм:



Техник хангамж:



PCB хавтангын зураг Загварыг эгц дээрээс харсан байдал



Урдаас

Доороос

PCB хавтанг CNC машин ашиглан зорж гаргасан.

HC-SR04- ултрасоник зайн мэдрүүр
MPU6050 – 3-н тэнхлэгийн хурдатгал хэмжигч, 3-н тэнхлэгийн гироскоф, температурын мэдрүүр
HMC5883L - 3-н тэнхлэгийн соронзон орон хэмжигч
VMP085 – Агаарын даралт хэмжигч, температурын мэдрүүр ашиглаж байна.

```

Range: 2 T/E/A 28.00 87538.00 1216.84 heading: 236.09 AccAngle:3.8 1.1 4.0 Gyro:-113 -245 -211
Range: 2 T/E/A 28.00 87538.00 1216.84 heading: 235.95 AccAngle:3.8 1.1 4.0 Gyro:-216 -747 -133
Range: 2 T/E/A 28.00 87537.00 1216.93 heading: 236.26 AccAngle:3.8 1.1 4.0 Gyro:-378 -102 384
Range: 2 T/E/A 28.00 87540.00 1216.65 heading: 235.96 AccAngle:3.8 1.1 4.0 Gyro:-296 -399 114
Range: 2 T/E/A 28.00 87535.00 1217.12 heading: 236.20 AccAngle:5.8 2.6 6.3 Gyro:-913 1127 -236
Range: 2 T/E/A 28.00 87535.00 1217.12 heading: 236.26 AccAngle:5.8 2.6 6.3 Gyro:17 90 -267
Range: 2 T/E/A 28.00 87535.00 1217.12 heading: 236.26 AccAngle:5.8 2.6 6.3 Gyro:-441 -276 87
Range: 2 T/E/A 28.00 87540.00 1216.65 heading: 236.06 AccAngle:5.8 2.6 6.3 Gyro:120 252 322
Range: 2 T/E/A 28.00 87538.00 1216.84 heading: 236.06 AccAngle:5.8 2.6 6.3 Gyro:-109 -231 -16
Range: 2 T/E/A 28.00 87538.00 1216.84 heading: 236.39 AccAngle:5.5 1.8 5.8 Gyro:-385 233 286
Range: 2 T/E/A 28.00 87540.00 1216.65 heading: 236.04 AccAngle:5.5 1.8 5.8 Gyro:-676 -487 -67
Range: 2 T/E/A 28.00 87539.00 1216.75 heading: 236.12 AccAngle:5.5 1.8 5.8 Gyro:-972 -770 -135
Range: 2 T/E/A 28.00 87535.00 1217.12 heading: 236.04 AccAngle:5.5 1.8 5.8 Gyro:-229 -668 417
Range: 2 T/E/A 28.00 87535.00 1217.12 heading: 236.09 AccAngle:5.5 1.8 5.8 Gyro:-358 27 -80
  
```

Мэдрүүрийн утгуудыг уншиж авсан байдал зарим (Газартай харьцангуй өндөр 2см, Температур

28°C, Агаарын даралт 87538Па, Далайн төвшинөөс дээших өндөр 1216м, магнетометрийн боловсруулсан утга луужин 236°, Хурдатгал хэмжигч ашиглан гаргасан өнцөг x-3.8°, y-1.1°, z-н өнцөг тогтворгүй тул ашиглах боломжгүй, Гироскопийн түүхий утга x, y, z тэнхлэгт)



Гурван моторт PWM дохио өгсөн байгаа байдал

НОМ ЗҮЙ

- [1] Б.Давгасүрэн, А.Батмөнх "Тогтворгүй системийн тэнцвэржилт- Нисдэг тэрэгний өндрийн тэнцвэржилт" 2013-11-28
- [2] С. Батмөнх "Агаарын хөлөг бүтээгдсэн түүх онолын үндэс". 2009
- [3] Syed Ali Raza and Wail Gueaieb "Intelligent Flight Control of an Autonomous Quadrotor" University of Ottawa, Canada Federico Casolo (Ed.), ISBN: 978-953-7619-55-8, InTech,
- [4] Teppo Luukkonen "Modelling and control of quadcopter" Aalto University 2011
- [5] Michael David Schmidt "SIMULATION AND CONTROL OF A QUADROTOR UNMANNED AERIAL VEHICLE" University of Kentucky 2011
- [6] Aleksandar Rodić1, Gyula Mester2 "The Modeling and Simulation of an Autonomous Quad-Rotor Microcopter in a Virtual Outdoor Scenario" 1 University of Belgrade, Institute Mihajlo Pupin, Robotics Laboratory, Belgrade, Serbia, 2 University of Szeged, Institute of Informatics, Department of Technical Informatics, Robotics Laboratory, Szeged. Hungary,
- [7] Quadcopter Control Design and Flight Operation. Katherine Karwoski. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, 02139
- [8] <http://ocw.mit.edu/courses/mechanical-engineering/2-154-maneuvering-and-control-of-surface-and-underwater-vehicles-13-49-fall-2004/lecture-notes/lec1.pdf>
- [9] Andrew Gibiansky "Quadcopter Dynamics, Simulation, and Control" 2012 unpublished
- [10] Magnussen, O "Experimental validation of a quaternion-based attitude estimation with direct input to a quadcopter control system" Dept. of Eng., Univ. of Agder, Grimstad, Norway Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), 2013 International Conference on
- [11] Robert Babuška and Stefano Stramigioli Matlab and Simulink for Modeling and Control 1999
- [12] <https://www.chrobotics.com/library/understanding-euler-angles>
- [13] <https://www.chrobotics.com/library/attitude-estimation>