

# Тогтворгүй системийн тэнцвэржилт

## Дөрвөн сэнст нисдэг тэрэг

Б. Давгасүрэн\*, А. Батмөнх<sup>+</sup>

\*<sup>+</sup> Электроникийн салбар, МХТС

<sup>+</sup>ШУТИС

\*[ce13e004@csms.edu.mn](mailto:ce13e004@csms.edu.mn), <sup>+</sup>[abattmunkh@must.edu.mn](mailto:abattmunkh@must.edu.mn)

**Хураангуй** — Энэхүү өгүүллээр дөрвөн сэнст нисдэг тэрэгний удирдлагын загварыг сонгон загварчилж байсан өмнөх ажлын үргэлжлэл болох судалгааны ажлын одоогийн үр дүн, дөрвөн сэнстийн төлөвийн орны математик загвар, инерцлэг мэдрүүрийн утгыг Sensor Fusion, Complimentary фильтрийн алгоритмаар боловсруулан 3D хэмжээт байдлаар MATLAB орчинд PID удирдлагын доор загварчилсан сүүлийн үеийн үр дүнг танилцуулах болно.

**Түлхүүр үг** — Complimentary; PID; загвар; агаарын хөлөг; тогтворгүй систем; quadcopter; дөрвөн сэнст нисдэг тэрэг

### I. УДИРТГАЛ

Дөрвөн сэнст нисдэг тэрэгний ажиллах зарчмын алгоритм нь дэлхий даяар судлагдаж буй судалгааны ажлын гол чиглэлүүдийн нэг юм. 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 тэрэгтэй харьцуулбал 4 сэнст нь маневр сайтай, энгийн механик хийцтэй, бага хурдны нислэгт тохиромжтой, тэнцвэржил болон аэродинамикийн зохицолтой, удирдлагын зардал багатай зэрэг давуу талуудтай байдаг [5].

Тогтворгүй системийн судалгаа, түүн дотроо нисдэг тогтворгүй системийн математик загварт үндэслэн хийсэн систем манай орны хувьд хараахан хэрэглээний бүтээгдэхүүн болж чадаагүй байна. Үүнээс үүдэн энэхүү судалгааны ажлын үндсэн зорилго нь дөрвөн сэнст нисдэг тэрэгний загварт шаардлагатай бүх тооцоог хийж түүний математик загварыг гарган MATLAB орчинд ажиллуулах, тус загварын дагуу бодит загварыг хийх, хэрэглээнд нэвтрүүлэхэд оршино гэж үзэж байна [2].

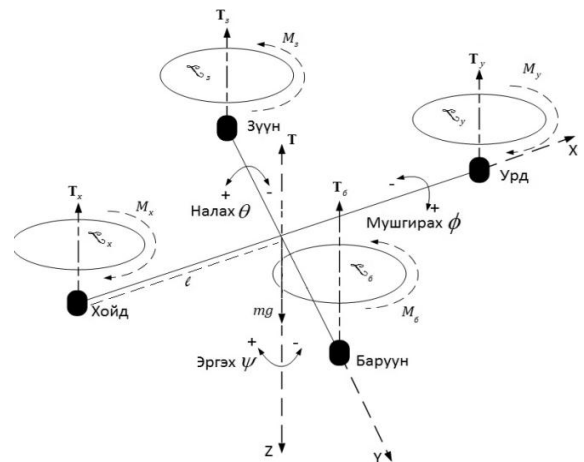
Дөрвөн сэнст энэхүү төхөөрөмж нь эргэх, мушгирах, налах буюу x, y, z тэнхлэгээр бүрэн эргэлт хийх боломжтой [1]. Нисэж буй объектыг тэнцвэртэй байлгах зорилгоор удирдлагын системд олон тооны инерцлэг мэдрэгчүүдийг ашигладаг.

II-р бүлгийн (A)-д дөрвөн сэнстийн эргэлт хийх боломжтой нөхцлүүд, (B)-д координатын шилжилт, (C)-д нисэх төхөөрөмжид үйлчлэх кинематик, динамик, аэродинамик гэсэн 3-н хүчний талаар орууллаа. III-р бүлэгт инерцлэг мэдрүүрийн утга боловсруулах, MATLAB орчинд хийсэн PID удирдлага ба туршилтийн үр дүн, 4-н сэнстийн нисэх загварыг орууллаа.

### II. ДӨРВӨН СЭНСТ БА ТҮҮНД ҮЙЛЧЛЭХ ХҮЧ

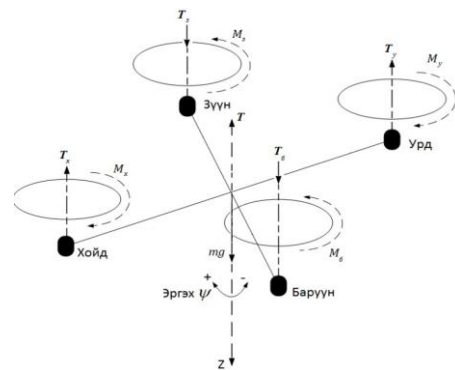
#### A. Дөрвөн сэнст

Дөрвөн сэнст загвар нь 4-н мотор, сэнс, удирдлагын хавтан, баттареи гэсэн үндсэн хэсгүүдээс тогтох ба 4-н сэнс нь диагоналиараа ижил чиглэлд эргэнэ. Зураг. 1-д  $M$  – нь сэнсний эргэх чиглэлийг,  $T$ - нь 4-н мотор тус бүрийн үүсгэх хүчийг,  $\tau$  –нь мотор тус бүрийн инерцийн хүчний моментийг,  $\phi$   $\theta$   $\psi$ –нь Эйлерийн өнцөг,  $mg$  – биеийн жинг тус тус илэрхийлнэ [3].



Зураг. 1. Дөрвөн сэнстийн ерөнхий хүч

Зураг. 2-т гурван хэмжээт тэнхлэгийн дагуу өнцөг үүсгэн үйлдэл хийх жишээг хүчний вектороор харуулав.  $T_z, T_\phi$  сумны чиглэл эгц доош чиглэсэн байгаа нь дээш чиглэсэн  $T_y, T_x$  хүчнээс бага өргөх хүч үүсгэж байгааг илэрхийлнэ.

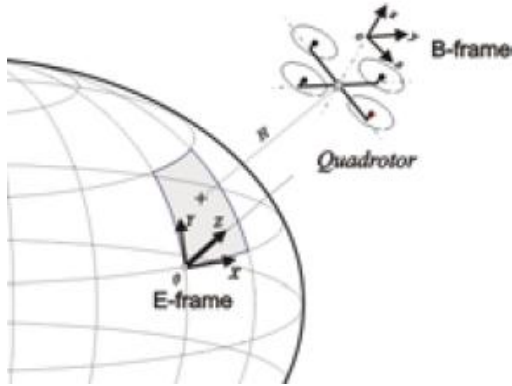


Зураг. 2. Дөрвөн сэнстийн баруун эргэх үйлдэл

**В. Үйлчлэх хүчнүүд**

**1. Кинематик**

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



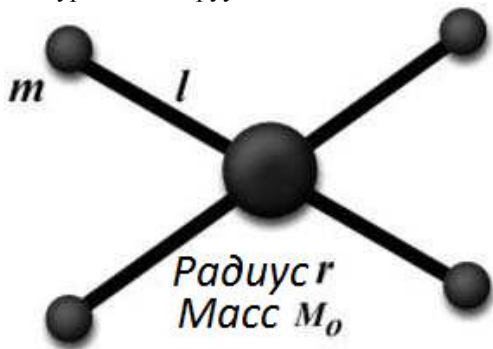
Зураг 3. Тэнхлэгийн зөрүү

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

Энд (1) нь биеийн өнцөг хурдыг дэлхийтэй харьцангуй өнцөг хурдаар илэрхийлсэн тэгшитгэл байна.

**2. Динамик**

Дөрвөн сэнстийн инерцийн моментийг  $M_0$  масстай,  $r$  радиустай бөмбөлөг  $m$  масстай,  $l$  урттай саваа болгон дүрсэлснийг Зураг. 4 –т харуулав.



Зураг. 4. Инерцийн момент

$$\begin{bmatrix} \ddot{\phi} \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{\psi} \end{bmatrix}_e = \begin{bmatrix} \frac{1}{j_x} \tau_\phi \\ \frac{1}{j_y} \tau_\theta \\ \frac{1}{j_z} \tau_\psi \end{bmatrix}_b - \begin{bmatrix} \frac{j_y - j_z}{j_x} \dot{\theta} \dot{\psi} \\ \frac{j_z - j_x}{j_y} \dot{\phi} \dot{\psi} \\ \frac{j_x - j_y}{j_z} \dot{\phi} \dot{\theta} \end{bmatrix}_b \quad (2)$$

(2) нь өнцөг хурдатгалыг өнцөг хурд, моторын торк, инерцийн моментуор илэрхийлсэн тэгшитгэл юм [9] [5].

**3. Аэродинамик**

Дөрвөн сэнст нисдэг тэрэгт үйлчлэх агаарын даралт, мотороос үүсэх өргөх хүчийг томъёолбол (3)[2][3].

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho A_D v^2 \quad (3)$$

Энд,  $C$ - сэнсний өргөх коэффициент (өнцөг),  $\rho$  - агаарын нягт,  $A$ - сэнсний эргэх талбай,  $v$ - сэнсний эргэх хурд тус тус болно. Дээшээ чиглэсэн өргөх хүчийг (4), мушгирах торкийг (5), налах торкийг (6), эргэх торкийг (7) томъёогоор тооцоолно.

$$T = T_3 + T_6 + T_x + T_y \quad (4)$$

$$\tau_\phi = l(T_3 - T_6) \quad (5)$$

$$\tau_\theta = l(T_y - T_x) \quad (6)$$

$$\tau_\psi = \tau_y + \tau_x - \tau_6 - \tau_3 \quad (7)$$

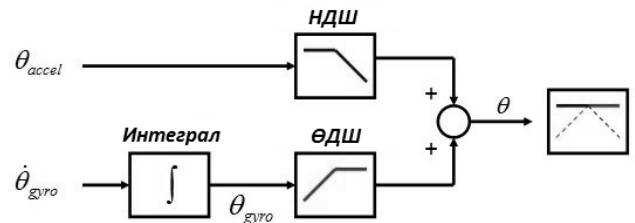
Өөрөөр хэлбэл аэродинамикийн эффект нь моторын үүсгэх хүч дээр орж байна.

**III. ИНЕРЦЛЭГ МЭДРҮҮР БА MATLAB ЗАГВАР**

**А. Инерцлэг мэдрүүр ба түүний утгыг боловсруулах**

Инерцлэг мэдрүүрийг гадны тулгуур координатгүйгээр эргэлдэх болон шугаман хөдөлгөөнийг хэмжихэд өргөн хэрэглэдэг. Энэ хөдөлгөөнийг гироскоп болон хурдатгал хэмжигчээр хэмжиж болох ба ихэнх тохиолдолд эдгээр мэдрүүрийг 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.

Инерцлэг мэдрүүрийн утгыг хурдатгал хэмжигч болон гироскопоос гарсан өнцгийг хослуулан нэгнийх нь алдааг нөгөөгөөр нь нөхөх аргаар удирдлагын системд хэрэглэдэг. Мөн инерцлэг хэмжигдэхүүнд цагаан шуугиан орсон байдаг тул Калманы шүүр, харилцан бие биенээ нөхсөн (Complementary) шүүрийг ашигладаг [10]. Энгийн бүтэц, програмаар загварчлахад хялбар гэсэн үүднээс харилцан бие биенээ нөхсөн шүүрийг энэхүү судалгаанд сонголоо (Зураг.5).



Зураг.5. Харилцан бие биенээ нөхсөн шүүр

$$\theta = \beta * \theta_g + (1 - \beta) * \theta_a \quad (8)$$

(8)-д орсон  $\beta$  нь шүүрийн коэффициент ба  $\beta$  нь 0.5-с их үед өндөр давтамжийн шүүр,  $1-\beta$  нь нам давтамжийн шүүр байна. Мэдрүүрийн утгаас шүүрийн гаралтанд гарах хүртэл хугацааг  $\tau$ - гэж тэмдэглэх бөгөөд (9) томъёогоор илэрхийлнэ.

$$\tau = (\beta * \delta t) / (1 - \beta) \quad (9)$$

**В. Удирдлагын дохио боловсруулах**

[9] – өөс харахад дараахи алмхуудыг хийх шаардлагатай.

**1. Үйлчлэх хүчнүүд**

$$T_B = \sum_{i=0}^4 T_i = k \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \sum \omega_i^2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

Бүх моторын нийлбэр хүчийг олоходоо (10) хэлбэрт шилжих ба нийт чирэх хүч  $F_D$  нь  $\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}$  – гэсэн биеийн шугаман хурдыг тогтмол  $k_d$ - ээр үржүүлсэнтэй тэнцүү байна (11).

$$F_D = \begin{bmatrix} -k_d \dot{x} \\ -k_d \dot{y} \\ -k_d \dot{z} \end{bmatrix} \quad (11)$$

2. Торк

Биеийн торкийн матрицийг зохиовол дараах хэлбэртэй бичигдэнэ (23).

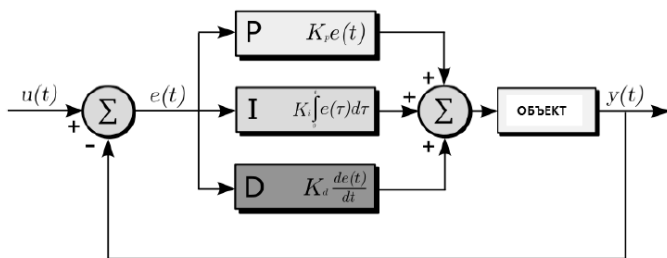
$$\tau_B = \begin{bmatrix} Lk(\omega_1^2 - \omega_3^2) \\ Lk(\omega_2^2 - \omega_4^2) \\ b(\omega_1^2 - \omega_2^2 + \omega_3^2 - \omega_4^2) \end{bmatrix} \quad (12)$$

3. Удирдлагын дохио боловсруулах

Дөрвөн сэнстийн удирдлага нь үндсэн 4-н хөдөлгөөнтэй гэж болно. 1-д өндөрөө авах, 2-д мушгирах, 3-д налах, 4-д эргэх. Тодорхой тогтмол өндөрт тогтож байхын тулд өнцөг болон хурдатгал нь бүгд 0 угтатай байх шаардлагатай.

C. PID удирдлага

Дөрвөн сэнстийг PID болон PD удирдлагаас гадна мөн LQR, SS, Quaternion, Fuzzylogic гэсэн олон төрлийн удирдлагын системээр удирдах боломжтой ба энэ судалгаанд PID удирдлагын системийг сонгон авч ажиллав. Зөвхөн өнцөг хурдны гироскоп мэдрүүртэй байх үед ч PID удирдлагыг дөрвөн сэнстэд ашиглах боломжтой. P буюу пропорциональ нь одоогийн алдаанаас, I буюу интеграл нь хуримтлагдсан алдаа, D буюу дифференциал нь өнгөрсөн болон одоогийн алдааны ялгавар бөгөөд ирээдүйд бий болох алдаануудыг урьдчилан таамаглах зарчим дээр удирдлагын динамик нь суурилсан байдаг (Зураг. 6). Объектын гаралтын төлөв  $y(t)$  нь оролтын  $u(t)$ -г даган мөрдөх үйлдлийг өндөр нарийвчлалтай гүйцэтгэхийн тулд Пропорциональ-Интеграл-Дифференциал удирдлагыг хэрэглэдэг [7]. PID удирдлагыг томъёолбол (13), (14) хэлбэртэй байна.



Зураг.6. PID удирдлагын блок диаграм

$$y = K_p e + K_i \int e dt + K_d \frac{de}{dt} \quad (13)$$

$$\tau = I \ddot{\theta} \tau = I u(t) \quad (14)$$

Дөрвөн сэнстийг хэвтээ тэнхлэгтэй өнцөг үүсгэлгүйгээр өндөрт хөөргөхийн тулд хэвтээ тэнхлэгтэй үүсгэх өнцөг болон хурд нь 0 байх ёстой. Моторын торкийг өнцөг хурдатгалаар PID аргаар илэрхийлсэн байдал (15).

$$\begin{bmatrix} \tau_\phi \\ \tau_\theta \\ \tau_\psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -I_x * (K_d \dot{\phi} + K_p \int_0^T \dot{\phi} dt) \\ -I_y * (K_d \dot{\theta} + K_p \int_0^T \dot{\theta} dt) \\ -I_z * (K_d \dot{\psi} + K_p \int_0^T \dot{\psi} dt) \end{bmatrix} \quad (15)$$

Дэлхийтэй харьцангуй үүсэх торкийг өнцөг тус бүр дээр өнцөг хурданд PID-ээр бичвэл (16) хэлбэртэй болно.

$$\tau_B = \begin{bmatrix} Lk(Y_1 - Y_3) \\ Lk(Y_2 - Y_4) \\ b(Y_1 - Y_2 + Y_3 - Y_4) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -I_x * (K_d \dot{\phi} + K_i \int_0^T \dot{\phi} dt + K_p \int_0^T \dot{\phi} dt) \\ -I_y * (K_d \dot{\theta} + K_i \int_0^T \dot{\theta} dt + K_p \int_0^T \dot{\theta} dt) \\ -I_z * (K_d \dot{\psi} + K_i \int_0^T \dot{\psi} dt + K_p \int_0^T \dot{\psi} dt) \end{bmatrix} \quad (16)$$

Биеийн өөртөө харьцангуйгаар үүсгэх торктой тэнцүүлэн бичвэл (17) хэлбэрт шилжинэ. Бидэнд дөрвөн үл мэдэгдэгчтэй гурван тэгшитгэл байгаа тул,

$$T = \frac{mg}{\cos \theta \cos \phi} \quad (17)$$

$$T = \frac{mg}{\cos \theta \cos \phi} = k \sum Y_i \Rightarrow \sum Y_i = \frac{mg}{k \cos \theta \cos \phi} \quad (18)$$

$$Y_1 = \frac{mg}{4k \cos \theta \cos \phi} - \frac{2be_\psi I_x + e_\psi I_x k L}{4b k L} \quad (19)$$

$$Y_2 = \frac{mg}{4k \cos \theta \cos \phi} + \frac{e_\psi I_z k L - 2be_\theta I_y}{4b k L} \quad (20)$$

$$Y_3 = \frac{mg}{4k \cos \theta \cos \phi} - \frac{e_\psi I_z k L - 2be_\phi I_x}{4b k L} \quad (21)$$

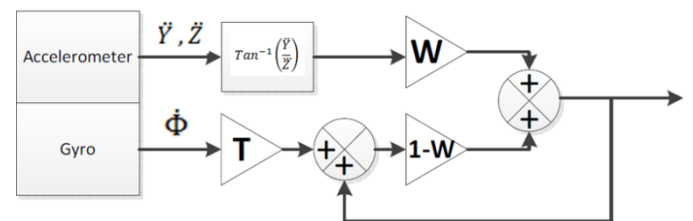
$$Y_4 = \frac{mg}{4k \cos \theta \cos \phi} + \frac{e_\psi I_z k L + 2be_\theta I_y}{4b k L} \quad (22)$$

Шугаман тэгшитгэлээр оролтын мэдрүүрийн утга болон тогтмолоор мотор тус бүр дээрх торкийг бодож гаргах боломжтой (17-22) нь PID удирдлага хийх хурэлцээтэй нөхцөл болох юм[9].

III. МАТЛАБ СИМУЛЯЦИ

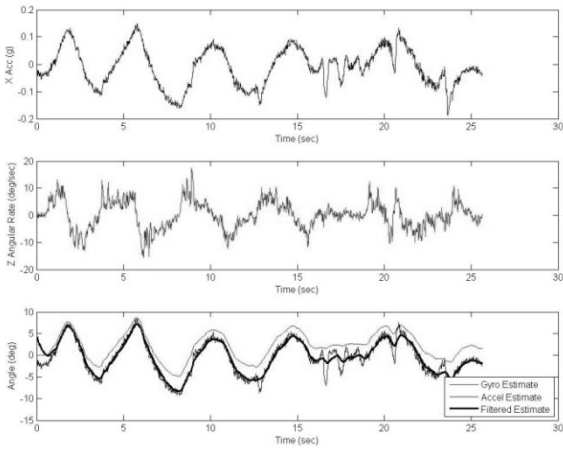
A. Харилцан бие биенээ нөхсөн шүүр

Удирдлагын дохионы хамгийн чухал зүйл болох өнцгийн алдааг харилцан бие биенээ нөхсөн шүүрийг ашиглан багасгахыг зорьлоо. Accelerometer, Gyro –оос авсан өнцөг хурдатгал болон өнцөг хурдны дохиог боловсруулах, түүнийг харилцан бие биенээ нөхсөн шүүрээр шүүх блок диаграмыг Зураг. 6-д үзүүлэв.



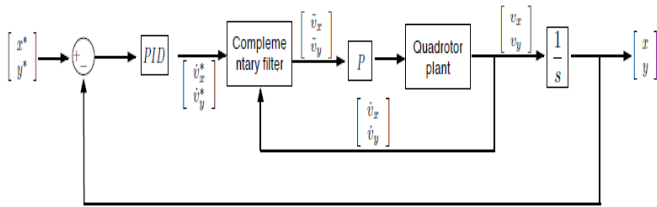
Зураг.7. Complementary филтрийн блок диаграм

Шүүсэн болон accelerometer, гуго мэрүүрээс гаргасан өнцөгүүдийн графикийг Зураг. 8-д харуулав. Энхний дохио нь accelerometer-с гарсан өнцөг, дараагийн дохио нь гуго-гоос гарсан өнцөг, сүүлийн дохио нь шүүгдсэн дохио болно.



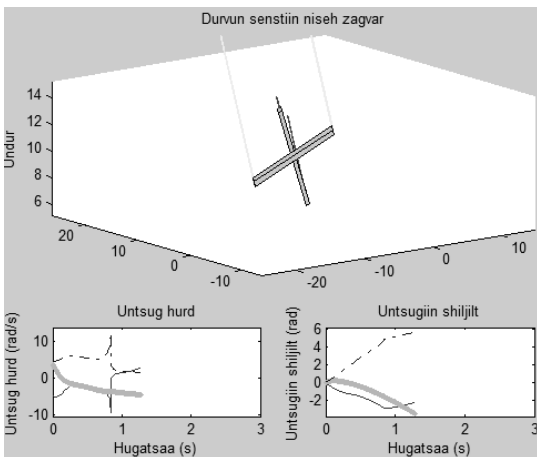
Зураг.8. Шүүсэн болон шүүгдээгүй гаргасан өнцөгүүд

Ийнхүү шүүсэн өнцгийн өгөгдөл нь удирдлагын системийг илүү тогтвортой болгоно. Зураг 9-д удирдлагын загварыг үзүүлэв.



Зураг.9. Удирдлагын системийн блок

Дөрвөн сэнстийн нисэх загварыг MATLAB програм ашиглан симуляци хэлбэрээр ажиллуулж туршсан байдлыг Зураг. 10-т, харгалзах коодын хэсгийг Зураг 11-т харуулав.



Зураг.10. Ерөнхий системийн симуляци

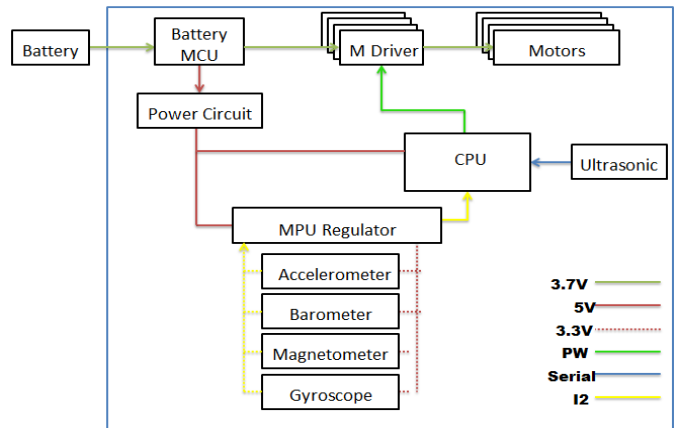
```
function [input, state] = pid_controller(state, thetadot, Kd, Kp, Ki)
    if ~isfield(state, 'integral')
        state.integral = zeros(3, 1);
        state.integral2 = zeros(3, 1);
    end
    if max(abs(state.integral2)) > 0.01
        state.integral2(:) = 0;
    end
    total = state.m * state.g / state.k / ...
        (cos(state.integral(1)) * cos(state.integral(2)));
    err = Kd * thetadot + Kp * state.integral - Ki * state.integral2;
    input = err2inputs(state, err, total);
    state.integral = state.integral + state.dt .* thetadot;
    state.integral2 = state.integral2 + state.dt .* state.integral;
end
```

Зураг.11. Matlab PID удирдлагын код

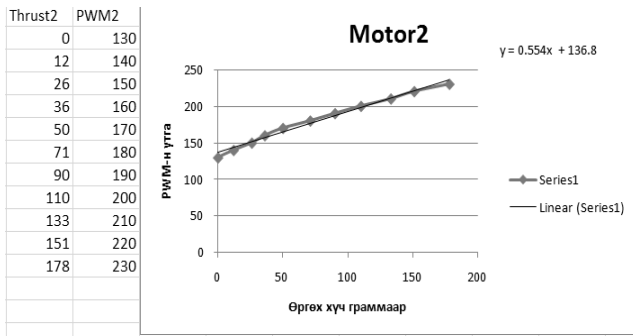
**V. Бодит загвар бүтээх үйл явцын талаар**

Бодит загвар бүтээхэд орох материал болох сэнс, мотор, хурдны удирдлага гээд шаардлагатай тооцоог хийв. Тооцооны үндсэн дээр өөрийн цэвэр жингээс гадна 200гр даах хэмжээний дөрвөн сэнстийг угсарсан. Бодит загварыг бүтээх үйл явцыг хурдасгах зорилгоор KK2.1HC удирдлагын хавтанг авч судалгаандаа ашиглаж байгаа бөгөөд энэхүү удирдлагын хавтангаас barometer, magnetometer, ultrasonic гэсэн өндөр болон зүг чиг олох мэдрүүрүүдийг ашиглан тогтмол өндөрөө барих систем болгон хөгжүүлэх, өөрийн хийсэн удирдлагын хавтангаар хөөргөх ажиллагаа ид өрнөж байна.

Зураг 12, 13, 14, 15-д угсарч буй техник хангамжийн блок диаграм, моторыг тестэлсэн график хамаарал, удирдагын контроллэрын програмын алгоритм, дөрвөн сэнстийг угсарсан бодит байдлыг тус тус харууллаа.



Зураг.12. Системийн техник хангамжийн блок диаграм



Зураг.13. Brushless мотор тестлэсэн байдал

```

while True do
  On Tr timer tick ;
  (φM, θM, ψM) = sample_gyro();
  (ax, ay, az) = sample_accel();
  (φM, θM) = fusion_filter(φM, θM, ψM, ax, ay, az);
  if after N loops then
    (φT, θT, ψT, F) = sample_remote_control();
    φT := roll_controller(φM, φT);
    θT := pitch_controller(θM, θT);
  end
  Cφ := roll_rate_controller(φM, φT);
  Cθ := pitch_rate_controller(θM, θT);
  Cψ := yaw_rate_controller(ψM, ψT);
  (pwm1, pwm2, pwm3, pwm4)T := K-1(Cφ, Cθ, Cψ, F)T;
  send_to_motors(pwm1, pwm2, pwm3, pwm4);
end
    
```

Зураг.14. Микроконтроллэрын програмын алгоритм гаргасан байдал



Зураг.15. PID тохируулах стенд дээр байрлуулсан байдал

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.

Ойрын үед бодит загвар агаарт хөөрөн тогтоно гэдэгт бид эргэлзэхгүй байна.

### НОМ ЗҮЙ

- [1] Б.Давгасүрэн, А.Батмөнх “Тогтворгүй системийн тэнцвэржилт- Нисдэг тэрэгний өндрийн тэнцвэржилт” 2013-11-28
- [2] Б.Давгасүрэн, А.Батмөнх “Тогтворгүй системийн тэнцвэржилт- Автомат удирдлагатай агаарын хөлөг, түүний тэнцвэржилт” ММТ-2014
- [3] С. Батмөнх “Агаарын хөлөг бүтээгдсэн түүх онолын үндэс”. 2009
- [4] 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,
- [5] Teppo Luukkonen "Modelling and control of quadcopter" Aalto University 2011
- [6] Michael David Schmidt "SIMULATION AND CONTROL OF A QUADROTOR UNMANNED AERIAL VEHICLE" University of Kentucky 2011
- [7] 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,
- [8] Quadcopter Control Design and Flight Operation. Katherine Karwoski. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, 02139
- [9] <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>
- [10] Andrew Gibiansky "Quadcopter Dynamics, Simulation, and Control" 2012 unpublished
- [11] 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](#)
- [12] Robert Babuška and Stefano Stramigioli Matlab and Simulink for Modeling and Control 1999
- [13] <https://www.chrobotics.com/library/understanding-euler-angles>
- [14] <https://www.chrobotics.com/library/attitude-estimation>

### IV. ДҮГНЭЛТ

Аливаа судалгааны ажлыг бодитоор хийж эхлэхийн өмнө тухайн системийн симуляцийг хийсвэр орчинд, тухайлбал MATLAB програмын орчинд, онолын үндэстэйгээр турших нь цаг хугацаа, мөнгөн зардлыг хэмнэсэн, илүү уян хатан боломжийг олгосон зэрэг олон давуу талыг олгодог болох нь тодорхой юм.

Тус судалгааны ажлыг эхлээд жил гаруй хугацаа өнгөрсөн ба энэ хугацаанд загварчилалыг олон аргаар хийж ирлээ. Тус өгүүлэлд танилцуулж байгаа үр дүнг 4-н сэнстийн загварчилалын өмнөх туршилтуудаас илүү амжилттай, илүү бодит байдалд ойртсон үр дүн болсон гэж бид үзэж байна.