

Дөрвөн сэнстийн тэнцвэржилтэнд төлөвийн орны туйлыг оновчтой байршуулах нь

Ц.Тэнгис, А.Батмөнх,

Электроникийн салбар, ШУТИС

tengis@must.edu.mn, abatomkh@must.edu.mn,

Хураангуй - Тус өгүүллээр өөрөө нисэгч олон сэнстийг зохион бүтээх төслийн хүрээнд хэрэгжүүлж буй туршилтын ажлын сүүлийн үеийн зарим үр дүнгээс танилцуулж байна. Олон тооны өгүүлэлд чөлөөний 6 зэрэгтэй дөрвөн сэнстийг PID удирдлагаар тэнцвэржүүлсэн тухай өгүүлсэн байдаг. Бидний судалгааны ажлын гол зорилго нь төлөвийн орны математик тэгшитгэл дээр үндэслэн шугаман бус математик загварыг боловсруулж уг загварыг шугамчлах замаар чөлөөний 6 зэрэгтэй системийн удирдлагыг бий болгоход оршиж байгаа юм. Төлөвийн орны арга нь туйл байршуулах аргыг гэдрэг холбоотой удирдлагын системд хэрэглэдэг. Энэхүү өгүүллээр бид туйлыг байршуулах аргыг хэрэглэн дөрвөн сэнстийг тогтворжуулах удирдлагын загварыг танилцуулна. Туйлын оновчтой байршлын сонголтыг бид MATLAB симуляци дээр шалгасан ба бодит загварын үр дүнтэй харьцуулав. Энэхүү өгүүлэлд байрлалын удирдлагыг авч үзээгүй болно.

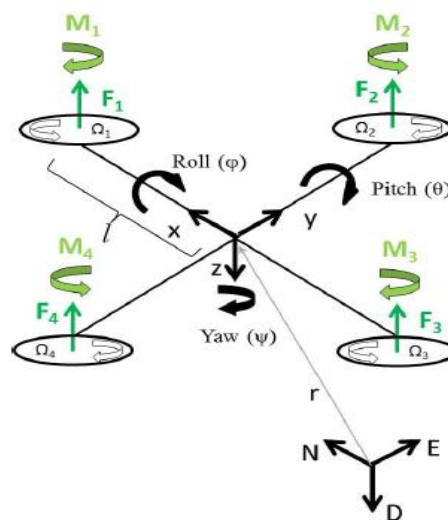
Тулхуур үг - олон сэнс, хазайлтын өнцөг, хөдөлгүүр, туйл

I. УДИРТГАЛ

Төрөл бүрийн хөдөлгөөнт робот зохион бүтээхэд тулгардаг гол асуудлуудын нэг нь тэнцвэрийг хангахад оршино [1]. Дөрвөн сэнст нь хамгийн нарийн төвөгтэй системүүдийн нэг [2] бөгөөд энэ нь тойргийн дагуу жигд байрласан дөрвөн хөдөлгүүрээс тогтсон нисдэг тээврийн хэрэгсэл юм. Хөдөлгүүр тус бүр өргөх хүчийг үүсгэх ба төхөөрөмжийн жин нь тойргийн төвд байрлана. Эсрэг байрласан хоёр хөдөлгүүрийн эргэлтийн чиглэл нь цагийн зүүний дагуу байдаг бөгөөд нөгөө хоёрын чиглэл нь цагийн зүүний эсрэг байна. Дөрвөн сэнстийн хөдөлгөөний чиглэл нь хөдөлгүүр бүхий дөрвөн сэнстийн эргэлтийн хурд буюу эргэлтээс үүсэх хүчээр тодорхойлогдох ба энэ нь системийн удирдлагын оролт болж өгнө. Харин хөдөлгүүрүүдийн эргэлтийн чиглэл огт өөрчлөгддөггүй байна [1-5]. Физикийн олон нөлөөллүүд системд үйлчилдэг ба эдгээрийн тоонд аэродинамик нөлөө, хүндийн хүч, гироскоп, үрэлт болон инерц гэх мэтийг нэрлэж болно. Энэхүү технологийг цэрэг зэвсэг, тагнуул, терроризмын эсрэг үйл ажиллагаа, аж ахуйн бусад салбарт ч өргөнөөр хэрэглэж эхлээд байна.

Бид дөрвөн сэнстийг бүтээхийн тулд, эхлээд, түүний математик загварыг гаргав. Үүний дараа математик

загварт тулгуурлан удирдлагын системийг боловсруулсан [2]. Эцэст нь, энэ удирдлагын системийг бидний зохион бүтээсэн бодит дөрвөн сэнст дээр микроконтроллэрын код болгон хэрэгжүүлээ. Зураг 1-д дөрвөн сэнстэд үйлчилж буй хүчнүүдийг үзүүлэв. Математик загварыг Euler-ын тэгшитгэл, Euler Ньютоны арга, Lagrangian аргаар тодорхойлсон байна [1, 2, 3]. Төлөвийн орны арга дээр тулгуурлан дөрвөн сэнстийн математик загварыг тодорхойлсон хэд хэдэн нийтлэлүүд байдаг хэдий ч тэд бүгд PID удирдлагыг ашиглаж байна. Энэхүү өгүүллээр дөрвөн сэнстийн тэнцвэржилтэнд шугаман төлөвийн орны загвар болон оновчтой туйл байршуулах аргыг танилцуулж байна.



Зураг 1. Дөрвөн сэнстэд үйлчилж буй хүчнүүд

Биетийн тэнхлэгийн хазайлтыг, Зураг 1-д үзүүлсэнээр, $[\phi \ \theta \ \psi]^T$ өнцөгүүдээр дүрслэн томъёолж болно. Энд, ϕ - x тэнхлэгийн хазайлт (roll), θ – y тэнхлэгийн хазайлт (pitch), ψ – босоо буюу z тэнхлэгийн хазайлт (yaw). Харин тэнхлэг тус бүрийн эргэлтийн өнцөг хурдыг $[\dot{\phi} \ \dot{\theta} \ \dot{\psi}]^T$ гэж тус тус тэмдэглэнэ.

II. МАТЕМАТИК ЗАГВАР БОЛОН ДИЗАЙН

Ихэнх тохиолдолд төхөөрөмжийн оролт гаралтын хоорондын хамаарлыг математик загвараар тайлбарласан байдаг. Дөрвөн сэнстийн хөдөлгөөнийг эргэлтийн дэд систем болон шилжилтийн дэд систем гэсэн хоёр дэд системд хувааж болно. Хөдөлгөөний

эргэлтийн тэгшитгэлийг Ньютон-Эйлерийн аргаар дараах байдлаар гаргана [6, 7, 8].

$$J\dot{\omega} + \omega \times J\omega + M_g = M_b \quad (1)$$

J - хөдөлгүүрийн инерцийн матриц, ω - өнцөг хурд, M_g -эргэлтийн момент, M_b -дөрвөн сэнстэд үйлчилж буй мушгих хүч.

$$M_b = \begin{bmatrix} lU_2 \\ lU_3 \\ lU_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} lK_f(\omega_1^2 - \omega_2^2) \\ lK_f(\omega_2^2 - \omega_4^2) \\ K_m(\omega_1^2 - \omega_2^2 + \omega_3^2 + \omega_4^2) \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$M_b = \begin{bmatrix} lU_2 \\ lU_3 \\ lU_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} l(F_1 - F_3) \\ l((F_2 - F_4)) \\ K_z(F_1 + F_3 - F_2 - F_4) \end{bmatrix} \quad (3)$$

Энд K_f болон K_m нь аэродинамик хүч болон моментийн тогтмол, ω_i хөдөлгүүрийн өнцөг хурд, F_i хөдөлгүүрээс үүсэх өргөх хүч.

Төлөвийн орны гол давуу тал нь олон оролт болон олон гаралтай системийн удирдлагыг загварчлахад оршино. Дөрвөн сэнстийн төлөвийн векторыг дараах байдлаар тодорхойлно. Энэхүү өгүүлэлд байрлалын удирдлагыг авч үзээгүй болно.

$$X = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5 \ x_6]^T$$

$$X = [\varphi \ \dot{\varphi} \ \theta \ \dot{\theta} \ \psi \ \dot{\psi}]^T$$

Дөрвөн сэнстийн шугаман бус динамик системийн төрөл бүрийн шугамчилсан удирдлагын шийдлүүдийг дараах бүтээлүүдээс харж болно [8]. Тэнцвэрийн цэг орчимд системийг шугамчлахын тулд $\cos \psi \approx 1$ болон $\sin(\theta) \approx \theta$ гэж авч болно.

Хөдөлгөөний эргэлтийн тэгшитгэл нь:

$$\begin{bmatrix} I_x & 0 & 0 \\ 0 & I_y & 0 \\ 0 & 0 & I_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\varphi} \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{\psi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{\varphi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_x & 0 & 0 \\ 0 & I_y & 0 \\ 0 & 0 & I_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\varphi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{\varphi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ J_r \omega_r \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} lU_2 \\ lU_3 \\ lU_4 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Эндээс төлөвийг тодорхойлбол,

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= \dot{\varphi} = x_2 \\ \dot{x}_2 &= \ddot{\varphi} = lk(\omega_4^2 - \omega_2^2)/I_x = \frac{l}{I_x} U_2 = \frac{l}{I_x} (F_1 - F_3) \\ \dot{x}_3 &= \dot{\theta} = x_4 \\ \dot{x}_4 &= \ddot{\theta} = lk(\omega_3^2 - \omega_1^2)/I_y = \frac{l}{I_y} U_3 = \frac{l}{I_y} (F_2 - F_4) \\ \dot{x}_5 &= \dot{\psi} = x_6 \\ \dot{x}_6 &= \ddot{\psi} = b(\omega_1^2 - \omega_2^2 + \omega_3^2 - \omega_4^2)/I_z = \frac{K_z}{I_z} U_4 = \frac{K_z}{I_z} (F_1 + F_3 - F_2 - F_4) \end{aligned} \quad (5)$$

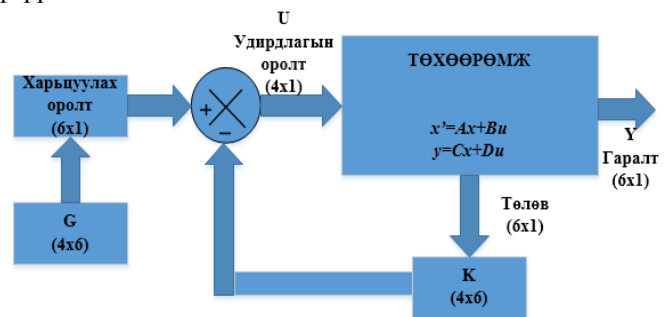
Энд, $\omega_1^2, \omega_2^2, \omega_3^2, \omega_4^2$ өнцөг хурдны квадрат, l, k, b дөрвөн сэнстийн тойргийн радиусууд, тогтмол, m

объектын жин, g татах хүч, I_x, I_y, I_z тэнхлэг бүр дээрх инерц.

(4), (5) илэрхийллийг матриц хэлбэрт бичвэл:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \\ \dot{x}_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{l}{I_x} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{K_z}{I_z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ F_4 \end{bmatrix} \quad (6)$$

A, B, C матрицууд олдсоноор бид дөрвөн сэнстийн шугаман удирдлагыг загварчлах боломжтой. Зураг 2-т төлөвийн гэдрэг холбоотой удирдлагын блок схемийг үзүүлэв.



Зураг 2. Төлөвийн гэдрэг холбоотой удирдлагын блок схем

Дөрвөн сэнстийн симуляци болон туршилтанд ашигласан параметруудийг харуулав.

- $g = 9.81$ $[\frac{m}{s^2}]$ татах хүч
- $m = 0.09$ $[kg]$ хөдөлгүүрийн жин
- $M = 0.8 - (4m)$ $[kg]$ биетийн жин
- $l = 0.22$ $[m]$ мөрний урт
- $a = 0.02$ $[m]$ биетийн дотоод радиус
- $b = 0.22$ $[m]$ биетийн дотоод радиус
- $I_x = \frac{1}{2} M(a^2 + b_2) + 2l^2 m$ $[kg \ m^2]$ x тэнхлэг дээрх инерц
- $I_y = \frac{1}{2} M(a^2 + b_2) + 2l^2 m$ $[kg \ m^2]$ y тэнхлэг дээрх инерц
- $I_z = \frac{1}{2} M(a^2 + b_2) + 4l^2 m$ $[kg \ m^2]$ z тэнхлэг дээрх инерц
- $F = K_t \omega^2$ $[N]$ сэнснээс үүсэх хүч
- $C_t = 0.1154$ түлхэх тогтмол
- $q = 1.225$ $[\frac{kg}{m^3}]$ агаарын нягтын коэффициент
- $D_p = 0.256$ $[m]$ сэнсний диаметр
- $K_t = C_t \frac{\rho D^4}{4\pi^2}$ $[kg \ m^2 \ rad^2]$ хүчний коэфф.

$$M = K_m \omega^2 \quad [Nm] \text{ сэнснээс үүсэх момент}$$

$$C_p = 0.0743 \quad \text{татах хүчний коэффициент}$$

$$K_m = C_t \frac{\rho D^5}{8\pi^2} \quad [kg m rad^2] \text{ моментийн}$$

коэфф.

$$K_z = \frac{K_m}{K_t} \quad [m] z \text{ тэнхлэг дээрх үүсэх}$$

моментийн коэф.

Тухайн системийн хэвтээ тэнхлэгтэй үүсгэх хяналтын өнцгийг MPU6050 мэдрүүрийг ашиглан хэмжсэн ба энэ мэдрэгч нь 3 тэнхлэгийн хурдатгал хэмжигч, мөн 3 тэнхлэгийн гироскоп – өнцөг хурдыг хэмжигч электрон схемээр тоноглогдсон болно.

III. ДӨРВӨН СЭНСТИЙН ТӨЛӨВИЙН ОРНЫ ТУЙЛЫГ БАЙРШУУЛАХ НЬ

Дөрвөн сэнстийн системийг загварчилж чадсанаар тухайн системийн төлөвийг хянаж удирдах боломжтой болно. Өмнө нь дурьдсанчлан, удирдлагын системийг ихэвчлэн PID удирдлагыг ашиглан хэрэгжүүлсэн байдаг. Энэ өгүүллээр бид төлөвийн гэдрэг холбоотой удирдлагын аргыг хэрэглэн MATLAB орчинд туршилт хийсэн болно. Удирдлагын оролт u нь 4 хөдөлгүүр тус бүрийн өнцөг хурдаар илэрхийлэгдэх ба томъёо (7) – оор тодорхойлно.

$$u = G \cdot ref - Kx \quad (7)$$

Системийн хувьд төлөвийн гэдрэг холбооны харьцуулах утга нь өнцгүүд (Зураг 1) байна. Харьцуулах утга болон төлөвийн гэдрэг холбоог хамааралтай болгох үүднээс G -г тодорхойлдог (8).

$$G = -B^{-1}(A - BK)C^{-1} \quad (8)$$

Ийнхүү төлөвийн гэдрэг холбоотой удирдлагын системийг төлөвийн тэгшитгэлүүдээр илэрхийлбэл (9) болно.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= (A - BK)x + BGu \\ y &= Cx \end{aligned} \quad (9)$$

Дөрвөн системийн шугаман загвар нь 12 төлөвтэй ба бид 12 туйлыг олох шаардлагатай. Энэхүү өгүүллийн хүрээнд 4 сэнстийн газар зүйн байрлалын төлөвүүдийг авч үзээгүй тул бид зөвхөн өнцгийн 6 туйлын байршлыг тодорхойлно. Төлөвүүд гэдрэг холбооны K коэффициентээр үржигдэнэ (7). Гэдрэг холбооны матриц K -г туйлыг байршуулсны дараа тодорхойлно. Системийн туйлыг оноон байрлуулахдаа халилт, өгсөх болон тогтворжих хугацааг [9, 10, 11]-д үзүүлсэн аргаар тооцоолов (10).

$$\xi = \frac{-\ln(0.05/100)}{\sqrt{\pi^2 + (\ln(0.05/100))^2}}$$

$$t_{\text{settling}} \approx \frac{4}{\xi \omega_n} \quad (10)$$

IV. СИМУЛЯЦИ БОЛОН ТУРШИЛТЫН ҮР ДҮН

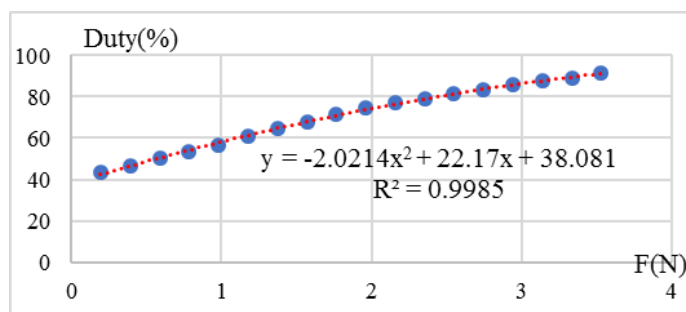
Манай лабораторид бүтээсэн (Зураг 3) бодит дөрвөн сэнстийн загварын мөчний урт нь 22 см, мөрийн төгсгөлд бэхлэгдсэн хөдөлгүүрт сэнсний жин 70 грамм ба нийт жин 750 грамм байна.



Зураг 3. Бидний хийсэн бодит 4 сэнст

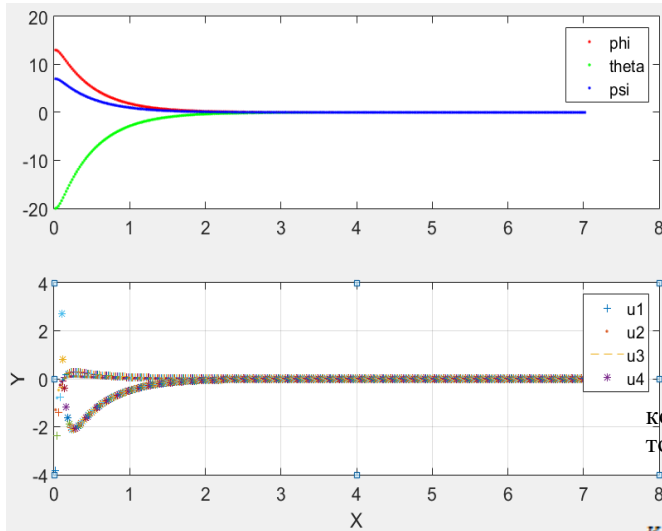
Туршилтыг A2208 1000KV BLDC маркийн хөдөлгүүр болон 10x4.5 маркийн сэнс дээр хийсэн. Хөдөлгүүрийн өргөх хүч болон хөдөлгүүрийн эргэлтийн хурдны хамаарлыг дараах (11) илэрхийллээр тодорхойлно Зураг 4.

$$y = -2.0214x^2 + 22.17x + 38.081 \quad (11)$$

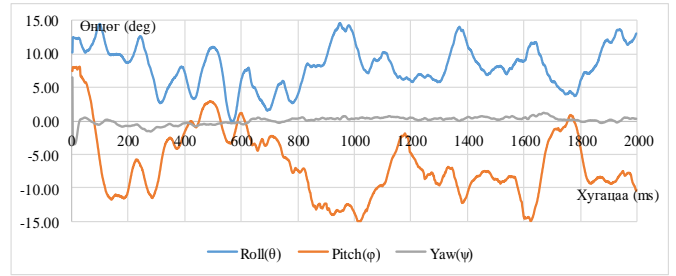


Зураг 4. Өргөх хүч болон хөдөлгүүрийн хурдны хамаарал

Симуляцийг 2 шатлалаар явуулсан бөгөөд эхний шатлалыг задгай системийн хувьд, хоёрдох шатлалыг гэдрэг холбоотой системийн хувьд хийж гүйцэтгэв. Симуляцийн алхам $dt = 0.02 \text{ sec}$ байхаар, нийт үргэлжлэх хугацааг нийт 8 секунд ба туйлыг [-21, -21, -21, -2.1, -2.1, -2.1] байхаар сонголоо.



Зураг 5. Өнцөг (roll-phi, pitch-theta, yaw-psi) болон хүчний график(u1, u2, u3, u4)



Зураг 6b. Туршилт, туйлын утгууд p=[-60 -5 -4 -3 -2 -1]

Туйлууд p=[-60 -50 -4 -3 -2 -1] байх үеийн K коэффициентууд: Илүү их сөрөг туйл өгснөөр хурдан тогтворжуулах гэж оролдож байна. Савалгаа их.

$$K = \begin{bmatrix} -0.4509 & -0.3050 & -0.6411 & -0.3177 & 6.5913 & 1.8600 \\ -0.9355 & -0.4347 & -0.7781 & -0.4261 & -6.7698 & -1.8983 \\ 0.9448 & 0.4896 & 0.6646 & 0.3191 & 6.8056 & 1.9074 \\ 0.4416 & 0.2501 & 0.7546 & 0.4247 & -6.6271 & -1.8691 \end{bmatrix}$$

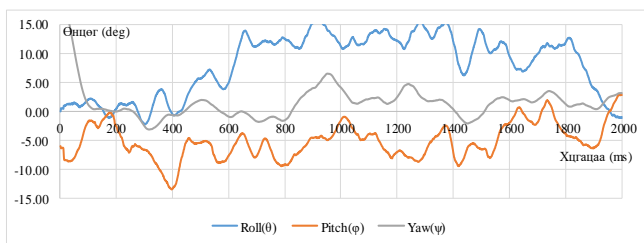
Давамгай туйлын шалгуурыг ашиглан олон төрлийн хувилбаруудаас бид туйлуудыг сонгож болно. Туйлыг дурын сонгох боломжтой хэдий ч гэдрэг холбооны K коэффициентыг үндэслэлтэй байлгахын тулд хэт өндөр эсвэл хэт бага байх нь зохимжгүй юм. Зураг 6-д бодит туршилтын үер MEMS мэдрүүрээс уншиж авсан 3 тэнхлэгийн дагуух өнцгийг утгуудыг үзүүлэв. Дураар сонгон байрлуулсан 6 туйлуудын үр дүнд үүссэн гэдрэг холбооны K коэффициентыг үзүүлэв

Туйлууд p=[-6 -5 -4 -3 -2 -1] байх үеийн K коэффициентууд:

$$K = \begin{bmatrix} -0.1157 & -0.1023 & -0.0458 & -0.0181 & 1.4578 & 0.5497 \\ -0.0500 & -0.0203 & -0.1007 & -0.0973 & -1.4579 & -0.5497 \\ 0.1160 & 0.1024 & 0.0456 & 0.0180 & 1.4579 & 0.5497 \\ 0.0497 & 0.0202 & 0.1009 & 0.0974 & -1.4579 & -0.5497 \end{bmatrix}$$

Туйлууд p=[-40 -40 -3 -3 -2 -2] байх үеийн K коэффициентууд:

$$K = \begin{bmatrix} -0.1188 & -0.1002 & 0.0045 & 0.0023 & 4.3446 & 1.6064 \\ 0.0045 & 0.0023 & -1.1228 & -0.6022 & -4.3446 & -1.6064 \\ 0.1188 & 0.1002 & -0.0045 & -0.0023 & 4.3446 & 1.6064 \\ -0.0045 & -0.0023 & 1.1228 & 0.6022 & -4.3446 & -1.6064 \end{bmatrix}$$



Зураг 6a. Туршилт, туйлын утгууд p=[-6 -5 -4 -3 -2 -1]

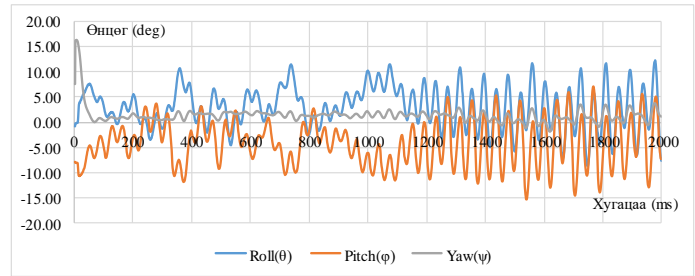
Туйлууд p=[-60 -5 -4 -3 -2 -1] байх үеийн K коэффициентууд:

Эхний туйлыг хол байрлуулах нь z тэнхлэгийн өнцөгт нөлөөлж байгааг харж болно.

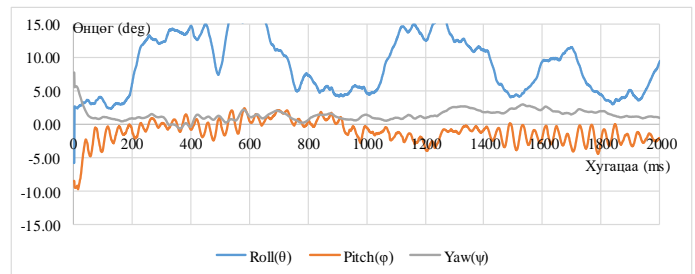
$$K = \begin{bmatrix} -0.1159 & -0.1024 & -0.0457 & -0.0180 & 9.0092 & 2.0612 \\ -0.0498 & -0.0202 & -0.1008 & -0.0973 & -9.0092 & -2.0612 \\ 0.1159 & 0.1024 & 0.0457 & 0.0180 & 9.0092 & 2.0612 \\ 0.0498 & 0.0202 & 0.1008 & 0.0973 & -9.0092 & -2.0612 \end{bmatrix}$$

Туйлууд p=[-40 -40 -40 -3 -3 -3] байх үеийн K коэффициентууд: Гэдрэг холбооны коэффициентууд тэгш хэмтэй.

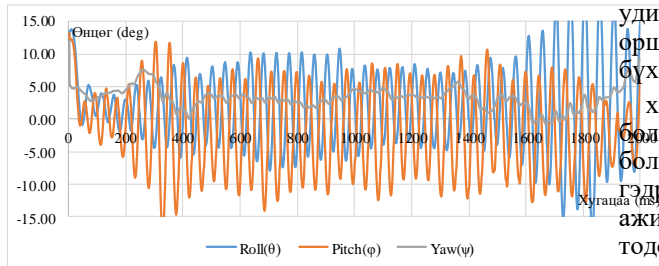
$$K = \begin{bmatrix} -1.6676 & -0.6166 & 0.0000 & 0.0000 & 4.3446 & 1.6064 \\ 0.0000 & 0.0000 & -1.6676 & -0.6166 & -4.3446 & -1.6064 \\ 1.6676 & 0.6166 & 0.0000 & 0.0000 & 4.3446 & 1.6064 \\ -0.0000 & -0.0000 & 1.6676 & 0.6166 & -4.3446 & -1.6064 \end{bmatrix}$$



Зураг 6c. Туршилт, туйлын утгууд p=[-60 -50 -4 -3 -2 -1]



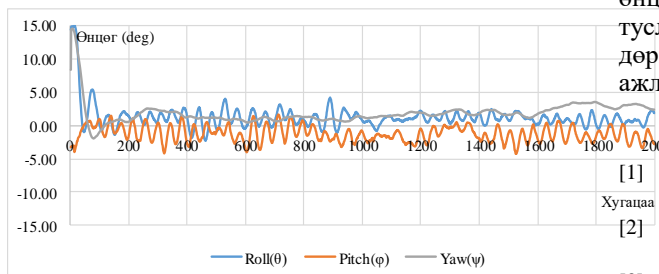
Зураг 6d. Туршилт, туйлын утгууд p=[-40 -40 -3 -3 -2 -2]



Зураг 6e. Туршилт, туйлын утгууд $p=[-40 -40 -40 -3 -3 -3]$

Туйлууд $p= [-30 -30 -30 -3 -3 -3]$ байх үеийн K коэффициентууд: Систем тогтвортой.

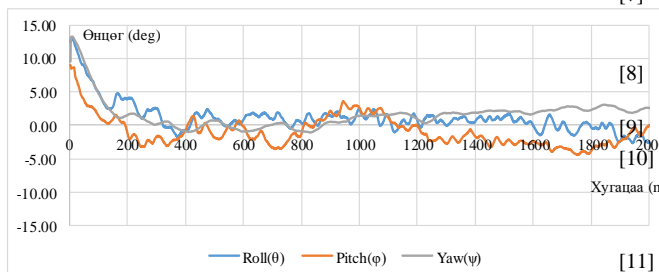
$$K = \begin{bmatrix} -1.3663 & -0.5161 & 0.0000 & 0.0000 & 3.5597 & 1.3444 \\ 0.0000 & 0.0000 & -1.3663 & -0.5161 & -3.5597 & -1.3444 \\ 1.3663 & 0.5161 & 0.0000 & 0.0000 & 3.5597 & 1.3444 \\ -0.0000 & -0.0000 & 1.3663 & 0.5161 & -3.5597 & -1.3444 \end{bmatrix}$$



Зураг 6f. Туршилт, туйлын утгууд $p=[-30 -30 -30 -3 -3 -3]$

Туйлууд $p=[-30 -30 -30 -1 -1 -1]$ байх үеийн K коэффициентууд: Систем тогтвортой боловч удаан.

$$K = \begin{bmatrix} -0.4646 & -0.4852 & 0.0000 & 0.0000 & 1.2104 & 1.2641 \\ 0.0000 & 0.0000 & -0.4646 & -0.4852 & -1.2104 & -1.2641 \\ 0.4646 & 0.4852 & 0.0000 & 0.0000 & 1.2104 & 1.2641 \\ -0.0000 & -0.0000 & 0.4646 & 0.4852 & -1.2104 & -1.2641 \end{bmatrix}$$



Зураг 6g. Туршилт, туйлын утгууд $p=[-30 -30 -30 -1 -1 -1]$

Бүх туйлууд хавтгайн зүүн хагас дээр байрлах ба тэд бүгд сөрөг бодит хэсэгтэй байна.

ДҮГНЭЛТ

Туйл байршуулах аргын давуу тал нь энэ аргаар загварчилсан удирдлагыг оптимал эсвэл адаптив

удирдлагад хялбар хөрвүүлэн өргөжүүлэх боломжтойд оршино. Энэхүү ажлаар бид удирдлагын системийн бүх үе шатуудыг хэрэгжүүлэв. Үүнд, дөрвөн сэнстийн хөдөлгөөний шинжилгээ, математик загварын боловсруулалт, удирдлагын аргын сонголт, симуляци болон туршилтуудыг хийлээ. Удирдлагын системийн гэдрэг холбооны коэффициентуудыг тооцоолох ажиллагааг MATLAB орчинд гүйцэтгэв. Нийт 6 туйлыг тодорхойлсон ба давамгай туйлууд (гурван туйл) нь өнцгийн коэффициентод нөлөөлж байгааг тодорхойлов. Хэдийгээр туйлуудын байрлалыг давамгай туйлуудын ойролцоо хүссэн байрлалд сонгож болох боловч, практикт, туйлуудыг хэт хол байрлуулснаар системд тооцогдоогүй шуугианыг өсгөж системийг тогтворгүй төлөвт оруулж байлаа. Симуляци болон туршилтаас гарсан үр дүн нь дөрвөн сэнстийн удирдлагын системд тавих шаардлагыг хангасан үр дүнг харуулж байсан болно.

Цаашид бид судалгааны ажилдаа 3 хэмжээсийн өнцгийн мэдээллийг авах ажиллагааг стерео камерын тусламжтай хийх бөгөөд өнцгийн мэдээллийг авснаар дөрвөн сэнстийг тогтворжуулах, удирдан жолоодох ажлыг үргэлжлүүлэх юм.

НОМ ЗҮЙ

- [1] Andrew Gibiansky. Quadcopter Dynamics, Simulation and Control.
- [2] Teppo Luukkonen. Modelling and control of quadcopter. Aalto University. School of science. 2011
- [3] Lucas M. Argentim, Willian C. Rezende, Paulo E. Santos, Renato A. Aguiar. PID, LQR and LQR-PID on a Quadcopter Platform.
- [4] Katherine Karwoski. Quadcopter Control Design and Flight Operation. NASA USRP – Internship Final Report. Marshall Space Flight Center. May 2011.
- [5] Tserendondog Tengis, Amar Batmunkh. Quadcopter stabilization using state feedback controller by pole placement method / 01. International Journal of Internet, Broadcasting and Communication Vol.9 No.1 (2017)
- [6] Randal W. Beard. Quadrotor Dynamics and Control. Brigham Young University. 2008.
- [7] Heba talla Mohamed Nabil ElKholy, “Dynamic Modeling and Control of a Quadrotor Using Linear and Nonlinear Approaches” American University in Cairo, 2014
- [8] Beard, Randal, “Quadrotor Dynamics and Control Rev 0.1” (2008). All Faculty Publications. Paper 1325.
- [9] <http://scholarsarchive.byu.edu/facpub/1325>
- [10] Abas Ab.Wahab, Rosbi Mamat, Syariful Syafiq Shamsudin. The effectiveness of pole placement method in control system design for an helicopter model in hovering flight. International Journal of Integrated Engineering.
- [11] Alexander Lebedev, “Design and Implementation of a 6DOF Control System for an Autonomous Quadcopter” Master Thesis, 2013
- [12] Graeme N. Wilson, Alejandro Ramirez-Serrano, and Qiao Sun, “Vehicle Parameter Independent Gain Matrix Selection for a Quadrotor using State-Space Controller Design Methods” 11th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics Vienna University of Technology September 1-3, 2014, Vienna, Austria