

Инерцлэг мэдрэгчийн системд Калманы шүүлтүүрийг хэрэгжүүлэх нь

Р.Бямбажав¹, Ц.Тэнгис² А.Батмөнх³

¹Электроникийн салбар, Үйлдвэрлэлийн автоматжуулалт /магистр,

²Электроникийн салбар, Үйлдвэрлэлийн автоматжуулалт / магистр,

³Электроникийн салбар, Үйлдвэрлэлийн автоматжуулалт / проф. док. PhD

Хураангуй — Энэхүү өгүүлэлээр инерцлэг мэдрэгчдийн өгөгдлийг Калманы шүүлтүүрээр шүүн илүү үнэн зөв өнцөг хазайлт болон роботын чиглэлийн мэдээлэл гарган авах талаар авч үзнэ.

Түлхүүр үг — мэдрэгч төхөөрөмж, акселерометр, гироскоп, хуримтлагдсан алдаа, робот, байршил тогтоох, ковариацийн матриц

I. УДИРТГАЛ

Төрөл бүрийн хөдөлгөөнт роботод тулгардаг гол асуудлуудын нэг нь байршил тогтоох юм. Роботын байршил нь роботын байрлаж буй тухайн координатын систем дэх тэнхлэгийн координатын цэгүүд, мөн роботын их бие тухайн координатын системтэй үүсгэж буй өнцөгүүдээр (orientation) тодорхойлогдоно [1].

Роботын локаль тэнхлэгийн хазайлтын өнцөгүүд мэдэгдэж буй тохиолдолд координатын хувиргалтын матрицыг ашиглан роботын байрлаж буй тухайн координатын системтэй үүсгэж буй өнцөгүүдийг тооцоолж олно.[2]

Хөдөлгөөнт роботын тэнхлэгийн хазайлтын өнцөгүүд болон чиглэлийг тооцоолоход инерцлэг мэдрэгчийн систем өндөр ач холбогдолтой бөгөөд ямар нэг гадны тулгуур мэдээлэл шаардагдахгүй, бие даасан, орон зайн нөлөөлөл бага, орчны нөхцлөөс хамааралгүй ажилладаг зэрэг олон давуу талуудтай ба нисгэгчгүй нисэх аппарат, шумбагч аппарат зэрэг өөрөө явагч хөдөлгөөнт роботын системүүдэд өргөн хэрэглэгддэг.

Роботын эргэлтийн болон хазайлтын өнцөгийн мэдээлэл дээр үндэслэн роботын чигийг тооцоолох ба ингэхдээ гироскоп, акселерометрийг ашигладаг. Эдгээр мэдрэгчид нь MEMS технологиор хийгддэг ба биетийн хөдөлгөөний инерцийг мэдэрдэг тул инерцлэг мэдрэгчийн систем гэж нэрлэдэг.

Сүүлийн жилүүдэд гироскоп болон акселерометрийг ашиглан роботын хөдөлгөөний чигийг мэдрэх олон арга, алгоритмууд боловсруулагдан гарж байна.

Хямд үнэтэй эдгээр инерцлэг мэдрэгчдийн гаралтын мэдээллийг үнэн зөв боловсруулах нь чухал асуудал ба нэг мэдрэгчийн сул талыг нөгөө мэдрэгчийн нь давуу талаар нөхөх аргыг мэдрэгчдийн нэгтгэл гэх ба энэ зорилгод

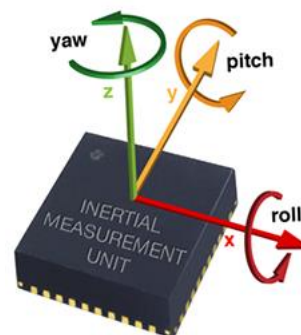
хамгийн өргөн хэрэглэгддэг, үр дүнтэй аргууд нь Комплементар шүүлтүүр ба Калманы шүүлтүүрийн [3] аргууд юм.

II. ИНЕРЦЛЭГ МЭДРҮҮРҮҮД

Туршилтын систем нь гурван тэнхлэгийн гироскоп, гурван тэнхлэгийн акселерометр бүхий инерцлэг мэдрэгчийн систем, мөн гурван тэнхлэгийн магнетометр зэргээс бүрдэнэ.

A. Тэнхлэгийн хазайлтын систем

Биетийн тэнхлэгийн хазайлтыг $[\phi \ \theta \ \psi]^T$ байдлаар дүрсэлж болно. Энд ϕ - x тэнхлэгийн хазайлт, θ - y тэнхлэгийн хазайлт, ψ - босоо буюу z тэнхлэгийн хазайлт. Харин тэнхлэг тус бүрийн эргэлтийн өнцөг хурдыг $[\dot{\phi} \ \dot{\theta} \ \dot{\psi}]^T$ гэж тэмдэглэнэ.



Зураг 1. ϕ , θ , ψ нь тус бүр x, y, z тэнхлэгийн дагуух эргэлтийн өнцөг болно.

B. Гироскоп

Гироскоп нь биетийн x, y, z тэнхлэгийн дагуух эргэлтийн өнцөг хурдны мэдээллийг өгнө. Гурван тэнхлэгийн өнцөг хурдыг тус бүрт нь ω_x , ω_y , ω_z гэж тэмдэглэх ба вектор хэлбэрт оруулан бичвэл $\vec{\omega} = [\omega_x \ \omega_y \ \omega_z]^T$ болно. Биетийн тэнхлэгийн дагуух өнцөг эргэлтийн хурд ба Эйлерийн өнцөг нь дараах хамааралтай байна (1). Хэрэв гироскопын гаралтын дохионд ямар нэг шуугиан байхгүй гэж үзвэл мэдрэгчийн тэнхлэг тус бүрийн өнцөг

хазайлтуудыг Эйлерийн өнцөг хурдыг интегралчлах замаар тодорхойлж болно.

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

Бодит гироскопын гаралтын дохио нь алдааны байгуулагч b_ω ба шуугиан η_ω –тай холилдсон байдаг (2). Иймд тэнхлэгийн өнцөг хазайлтыг гироскопын гаралтыг шууд интегралчлан олох нь учир дутагдалтай юм.

$$\bar{\omega}_{gyro} = \begin{bmatrix} \omega_{x,gyro} \\ \omega_{y,gyro} \\ \omega_{z,gyro} \end{bmatrix} = \bar{\omega}_b + \begin{bmatrix} b_{\omega_x} + \eta_{\omega_x} \\ b_{\omega_y} + \eta_{\omega_y} \\ b_{\omega_z} + \eta_{\omega_z} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Алдааны байгуулагч b_ω нь тэнхлэгийн өнцөг хазайлтын хурд бага байх үед илүү ажиглагддаг тул мэдрэгчийн байрлаж буй биетийн эргэлтийн өнцөг хурд бага байх тусам гироскопын мэдээллийг интегралчлан олсон тэнхлэгийн өнцөгийн мэдээллийн алдаа илүү хурдан хуримтлагдана.

C. Акселерометр

Тэнхлэг тус бүрийн хазайлт $[\phi \ \theta \ \psi]^T$ -г тооцоолоход гироскопын гаралтын дохиог интегралчлах ба алдааны байгуулагч b_ω ба η шуугианаас үүдэлтэй өнцөгийн хуримтлагдсан алдаа үүснэ. Акселерометрийн тусламжтай уг алдааны хуримлалыг засварлах боломжтой юм. Акселерометр нь чөлөөт уналтын хурдатгалтай харьцангуй шугаман хурдатгалыг мэдэрдэг. Акселерометрийн гаралтын дохиог дараах байдлаар илэрхийлж болно.

$$\bar{f}^b = \dot{\bar{V}}^b + \bar{\omega}^b \times \bar{V}^b - \bar{g}^b \quad (3)$$

$\dot{\bar{V}}^b$ - тэнхлэгийн дагуух өнцөг эргэлтийн хурдатгал \bar{V}^b - мэдрэгч байрлаж буй биетийн шугаман хурдны вектор, $\bar{\omega}^b \times \bar{V}^b$ нь мэдрэгчийн төв цэг дэх эргэлтийн хурдатгал, \bar{g} хүндийн хүчний хурдатгал. Хүндийн хүчний вектор нь g –тэй тэнцүү байна. Акселерометрийн хэмжсэн хүндийн хүчний хурдатгал нь у тэнхлэгийн хазайлт θ , x тэнхлэгийн хазайлт ϕ –тэй дараах байдлаар хамааралтай

$$\bar{f}_{steady\ state}^b = \bar{\omega}^b \times \bar{V}^b - g \begin{bmatrix} -\sin\theta \\ \sin\phi\cos\theta \\ \cos\phi\cos\theta \end{bmatrix} \quad (4)$$

Дээрх томъёоноос x – тэнхлэгийн хазайлт ϕ ба y – тэнхлэгийн хазайлт θ –г акселерометрийн хэмжилт ба гироскопын өнцөг хурд $\bar{\omega}^b$, биеийн хурд \bar{V}^b зэргээс олж болох нь харагдаж байна.

Акселерометр нь гироскопын адил MEMS технологиор хийгддэг тул гаралтын дохио нь шуугиантай [2] байх ба өнцөг хурдатгал өндөр үед хэмжилтийн нарийвчлал буурдаг. Акселерометрийн гаралтыгн дохио дараах хэлбэртэй байна.

$$\bar{f}_{accel}^b = \begin{bmatrix} f_{x,accel} \\ f_{y,accel} \\ f_{z,accel} \end{bmatrix} = \bar{f}^b + \begin{bmatrix} b_{ax} + \eta_{ax} \\ b_{ay} + \eta_{ay} \\ b_{az} + \eta_{az} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Тэнхлэгийн хазайлтын өнцөг хурдатгал бага үед акселерометрийн, өнцөг хурд их байх үед гироскопын өгөгдлийг тус бүрт нь компенсациан хэрэглэх нь эдгээр мэдрэгчдийг дан дангаар нь ашиглан өнцөг тооцоолохоос илүү үр дүнтэй байдаг байна.

D. Магнетометр

Робот болон өөрөө явагч автомат системд акселерометр, гироскопыг хамтад нь хэрэглэсэнээр x, y тэнхлэгийн хазайлтын өнцөг (ϕ, θ) болон өнцөгийн өөрчлөлтийн хурд ($\dot{\phi}, \dot{\theta}$) –г илүү алдаа багатай тодорхойлж болох ч роботын z тэнхлэгтэй үүсгэх өнцөг ψ болон өнцөг шилжилтийн хурд $\dot{\psi}$ тодорхойлоход хүндрэлтэй байдаг. Учир нь акселерометрын z тэнхлэгийн утга үргэлж ойролцоогоор -g байдаг. Иймд ψ –г тодорхойлоход магнетометрийг дээрх хоёр мэдрэгчтэй хамтад нь хэрэглэдэг.

Хойд зүг ба соронзон хойд туйл хоёрын зөрүүг соронзон хазайлт (δ_{mag}) гэнэ. Магнетометрийн гаралт $[M_x \ M_y \ M_z]^T$ байх ба ψ нь дараах байдлаар тодорхойлогдоно (6, 7).

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix} = C_{ned}^b C_z (-\delta_{mag}) \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \bar{\epsilon}_M^b \quad (6)$$

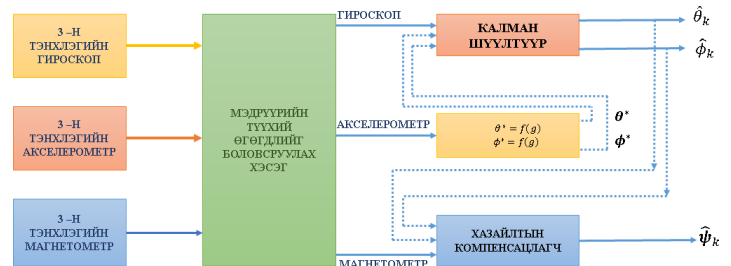
$$\psi_{mag} = \text{Tan}^{-1} \left(\frac{-M_y \cos\phi + M_z \sin\phi}{M_x \cos\theta + (M_y \sin\phi + M_z \cos\phi) \sin\theta} \right) + \delta_{mag} \quad (7)$$

Энд C нь координатын хувиргалтын матриц [2].

Практикт магнетометр нь цахилгаан соронзон орны нөлөөнд амархан өртдөг тул магнетометрийг байрлуулахдаа цахилгаан хөдөлгүүр зэрэг цахилгаан соронзон орны үүсгэгчдээс хол байрлуулах шаардлагатай байдаг.

III. СИСТЕМ ИЙН БҮТЭЦ

Инерцлэг мэдрэгчдийн өгөгдлийг Калманы шүүлтүүрээр нэгтгэх систем нь Зураг 2 хэлбэртэй байна. [4] Акселерометрийн гаралтыг томъёо 4 –д ашиглавал θ^* болон ϕ^* өнцөгүүдийг тооцоолж олж болно. Уг тооцоолж олсон θ^* болон ϕ^* нь шуугианаас нь салгаагүй мэдээлэл дээр хийгдсэн тул мөн шуугиантай байх ба эдгээр нь гироскопын өгөгдөлтэй хамт Калманы шүүлтүүрийн оролтын дохио болно. Калманы шүүлтүүрээр шүүгдсэн $\hat{\theta}_k, \hat{\phi}_k$ дохиог магнетометрийн гаралттай хамт хазайлтыг компенсацилах блок-д (томъёо 6,7) оролт болгон өгөх ба уг блокоос $\hat{\psi}_k$ буюу z тэнхлэгийн өнцөгийн хазайлтыг тооцоолж олно.



Зураг 2. Инерцлэг мэдрүүрүүдийг Калманы шүүлтүүрээр нэгтгэх системийн бүтэц

А. Калманы шүүлтүүр

Калманы шүүлтүүр[5] нь шуугиантай холилдсон дохионоос шуугианыг нь шүүх, мөн нэг нь нөгөөгийнхөө сул талыг нөхдөг мэдрэгчдийн өгөгдлийг нэгтгэхэд тохиромжтой, рекурсив алгоритм юм. Уг шүүлтүүрийн алгоритм нь системийн загварыг ашигладаг ба k алхам дахь байж болох системийн төлөвийг $(k-1)$ алхамд тооцоолсон системийн төлөвийг ашиглан урьдчилан олдог.

Калманы шүүлтүүрийг төлөвийн оронгийн илэрхийллийг ашиглан дараах байдлаар бичдэг.

$$x_{k+1} = A \cdot x_k + w_k \tag{8}$$

$$z_k = H \cdot x_k + v_k \tag{9}$$

Дээрх илэрхийлэлд x_k нь k дахь алхам дахь системийн төлөв, A – системийн төлөвийн шилжилтийн матриц, w_k – төлөвийн шилжилтийн процессын шуугиан, z_k – k алхам дахь шуугиантай холилдсон системийн төлөвийн хэмжилт, H – ажиглалтын матриц, v_k – хэмжилтийн алдааны шуугиан.

Төлөвийн хувьсагч гэдэг нь хурд, байрлал гэх мэт системийн физик төлөвийг илэрхийлэх хэмжигдэхүүнүүд байна. Манай тохиолдолд төлөвийн хувьсагч нь өнцөг хурд, хурдатгал, эсвэл өнцөг хазайлт байж болно.

A матриц нь системийн төлөв дараагийн алхамд хэрхэн өөрчлөгдөхийг тайлбарлах бол H матриц нь төлөвийн хувьсагч болон хэмжилтийн хоорондох хамаарлыг илэрхийлнэ. Манай тохиолдолд Калман шүүлтүүрийн оролтын векторууд нь дараах хэлбэрээр тодорхойлогдоно.

$$x = \begin{bmatrix} \omega \\ \varphi \end{bmatrix} \tag{10}$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & -dt \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{11}$$

$$H = [1 \quad 0] \tag{12}$$

Энд ω – гироскопын гаралтаас авсан өнцөг хурд, φ – акселерометрын гаралтаас тооцож олсон эргэлтийн өнцөг. Калманы шүүлтүүрийн алгоритм дахь A , H , Q , R матрицуудыг урьдчилан тодорхойлох шаардлагатай ба Q , R нь w_k v_k шуугиануудыг ковариацийн матрицууд болно.

Калманы шүүлтүүрийн алгоритм нь дараах алхамуудаас тогтоно.

Алгоритм 1.

1. Системийн анхны төлөв ба алдааны ковариацийн урьдчилсан таамаглалын төлөвийн анхны утгыг тавьж өгөх

$$P_0 = 0, \hat{x}_0 = 0$$

2. Системийн төлөвийг урьдчилан тооцоолох

$$\hat{x}_k^- = A \cdot \hat{x}_{k-1}$$

3. Алдааны ковариацийг урьдчилан тооцоолох

$$\hat{P}_k^- = A \cdot P_{k-1} \cdot A^T + Q$$

4. Калманы коэффициентийг тооцоолох

$$K_k = P_k^- H^T (HP_k^- H^T + R)^{-1}$$

5. Системийн төлөвийг тооцоолох

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k H^T (z_k - H \hat{x}_k^-)$$

6. Алдааны ковариацийг тооцоолох. Алдааны ковариация нь системийн төлөвийн тооцооллын нарийвчлалыг илэрхийлдэг. P_k их байх тутам системийн төлөвийн тооцоолол төдий чинээ зөрүүтэй байна.

$$P_k = P_k^- - K_k H P_k^-$$

7. 2 – р алхамаас дахин давтан

В. Магнетометрийн хазайлтыг компенсацилах

z тэнхлэгийн дагуух эргэлтийн өнцөгийг тооцоолохдоо магнетометрийн өгөгдлийг ашиглана. Z тэнхлэг нь нөгөө талаас дэлхийн гадаргатай перпендикуляр байрлалтай байх тул z тэнхлэгийн өнцөгийн хазайлт нь зовхисыг (heading) заадаг.

Гироскопын өгөгдлийг ашиглан z тэнхлэгийн өнцөгийн хазайлтыг тооцож болох ч роботын анхны зүг чиг мэдэгдэж байх шаардлагатай.

Дэлхийн соронзон орны вектор нь дэлхийн гадаргатай параллель тул гурван тэнхлэгийн магнетометр нь z тэнхлэгийн өнцөгийн хазайлт буюу зүг чигийг зөв, нарийвчлалтай мэдрэхийн тулд дэлхийн гадаргатай мөн адил параллель байрлалтай байх хэрэгтэй юм.

Гэтэл бодит хэрэглээн дээр магнетометр нь роботын их бие дээр суурилуулагдах ба роботын хөдөлгөөний хазайлтаас болж дэлхийн гадаргатай үргэлж параллель байрлалд байж чаддагүй. Магнетометр хэдий чинээ их хазайна төдий чинээ зүг чигийн мэдээлэл буруу бодогдох тул магнетометрийн хазайлтаас хамааруулан зүг чигийн мэдээллийн тооцооллыг компенсацилах шаардлагатай болдог.

x , y тэнхлэгийн хазайлт ϕ ба θ –г магнетометрын өгөгдөлтэй хамт ашиглан хазайлтын алдааг засварлана томъёо (6,7).

Зураг 2 –г тэнхлэгийн хазайлтын өнцөг $\hat{\theta}_k$, $\hat{\phi}_k$ нь Калманы шүүлтүүрийн гаралтаас авсан байна.

IV. ХЭРЭГЖҮҮЛЭЛТ

Манай системд MEMS технологиор хийгдсэн 3 тэнхлэгийн гироскоп, акселерометр бүхий инерцлэг мэдрэгчийн систем (Invensense MPU6050), 3 тэнхлэгийн MEMS магнетометр (Honey Well HMC5883L) зэрэг мэдрэгчид ашиглагдана.

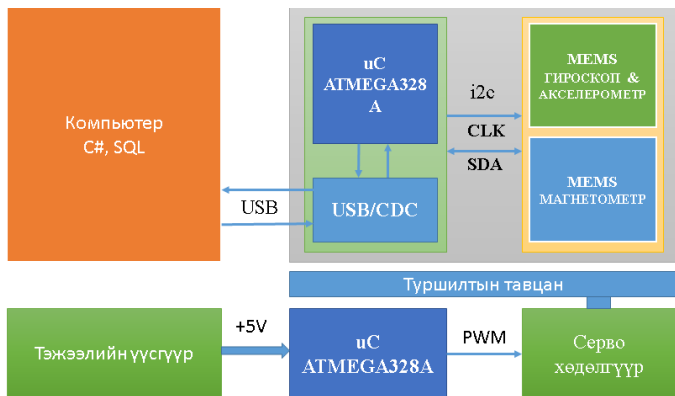
Бид эхлээд мэдрэгчид ба өгөгдөл цуглуулах микроконтроллер байрласан туршилтын хавтанг өнцөгийн серво хөдөлгүүр бүхий хөдөлгөөнт тавцан дээр байрлуулан мэдрэгчдийн гаралтын дохиог компьютерт хадгалж авна. Үүний дараа цуглуулсан мэдээллээ ашиглан MATLAB програм дээр Калманы шүүлтүүрээр мэдрэгчдийг нэгтгэх алгоритмыг хэрэгжүүлэх болно.

А. Хэмжилтийн систем

Инерцлэг мэдрэгчид ба магнетометрийн өгөгдлийг цуглуулж авах системийн бүтцийг Зураг 3 –т харуулав. Инерцлэг мэдрэгчийн гаралтыг $dt = 0.010$ гэсэн алхамтайгаар цуглуулж авах шаардлагатай. Үүний тулд мэдрэгчдийн гаралтын өгөгдлийг $dt = 0.010$ алхамтайгаар микроконтроллёрор цуглуулаад санах ойд нь хадгалж байх ба өгөгдөл цуглуулах компьютераас унших хүсэлт илгээх үед (ойролцоогоор 0,5 секунд тутамд) цуглуулсан өгөгдлүүдийг дамжуулна.

Компьютер нь микроконтроллёрор дамжуулсан мэдрэгчдийн өгөгдлийн цувааны тэмдэгт мөрийг задлан шаардлагатай мэдээллүүдээ ялгаж аваад өгөгдлийн санд хадгалах ба энэ хооронд микроконтроллёрын системийн цуглуулсан мэдээллийг дахин уншиж авах хүсэлтийг илгээнэ. Бид гироскопын алдааны хуримтлалыг ажиглах зорилгоор мэдрэгчдийн өгөгдөлийг 30 минутаас 1 цагийн хугацаанд цуглуулах шаардлагатай байсан тул мэдрэгчдийн өгөгдлийг өгөгдлийн санд хадгалсан.

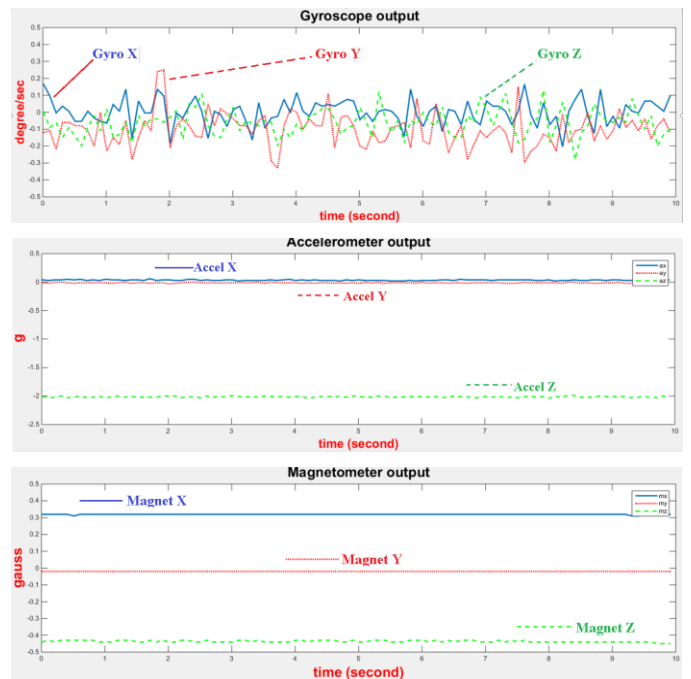
Инерцлэгийн мэдрэгчдийн гаралтын дохионы шуугианыг ажиглах зорилгоор мэдрүүрийн системийг хөдөлгөөнт тавцан дээр байрлуулсан. Хөдөлгөөнт тавцан нь хоёр чиглэлд 180 градусын тэнхлэгийн өнцөгөөр хөдлөх ба өнцөг өөрчлөлтийн хурдыг микроконтроллёрын системээс удирдсан.



Зураг 3. Мэдрэгчдийн өгөгдлийг цуглуулах систем

В. Хэмжилтүүд

Инерцлэг мэдрэгчид ба магнетометрийг байрлуулсан туршилтын хавтан хөдөлгөөнгүй байх үед эдгээр мэдрэгчдээс цуглуулсан өгөгдлийг Зураг 4 –т харуулав. Гироскопын гаралтын дохио нь өнцөг хурдыг илэрхийлэх ба өнцөг/сек нэгж байна. Хөдөлгөөнгүй байгаа туршилтын хавтангийн хувьд гироскопын мэдрэх өнцөг эргэлтийн хурд тэг байх ёстой ч MEMS технологид Коройлисын эффектийг үүсгэгч пьезо цахилгаан материалд дулааны нөлөөллөөс үүсгэгдсэн санамсаргүй хүчдэл нь гироскопын гаралтын дохион дээр нэмэгддээс болж уг мэдрэгчийн гаралтын дохио нь ямагт шуугиан агуулж байдаг байна. Гироскопын хазайлтыг тооцохдоо гироскопын гаралтын дохиог интегралчлах замаар олох ба дээрх шуугиан нь яваандаа өнцөгийн алдааны хуримтлал үүсгэх шалтгаан болдог байна.

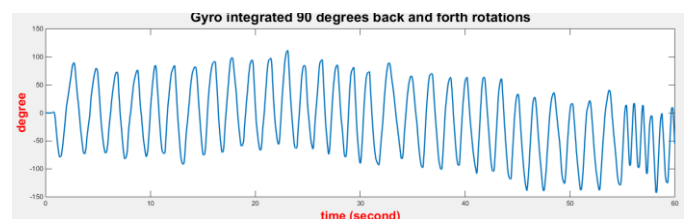


Зураг 4. Мэдрэгчдийн гаралтын өгөгдөл

Акселерометрийн гаралт нь g –р хэмжигдэх ба хөдөлгөөнгүй байх үед x, y тэнхлэгийн хувьд мэдрэгчийн гаралт ойролцоогоор тэг байх ба z тэнхлэгийн гаралт $-2g$ байна. x, y тэнхлэгийн хувьд ямар нэг инерцлэг хөдөлгөөн үүсээгүй тайван байх тул уг тэнхлэгүүдийн гаралт тэг байх нь зөв юм. Харин z тэнхлэгийн хувьд $-2g$ байгаагийн шалтгаан нь хүндийн хүчтэй холбоотой юм.

С. Туршилтын арга

Мэдрэгчийн байрласан туршилтын хавтанг x тэнхлэгийн дагуу $-90 < \phi < 90$ байхаар гармоник байдлаар хөдөлгөн гироскопын гаралтыг трапецын интегралчлалын дөхөлтийн аргаар (13) нийлбэрлэн ϕ өнцөгийн хазайлтыг тооцоолж үзвэл Зураг 5.



Зураг 5. Гироскопын гаралтын мэдээллийг интегралчлан тооцоолсон өнцөгийн хазайлт ба алдааны хуримтлал

Трапецын интегралчлалын дөхөлтийн арга нь дараах хэлбэрээр томъёологддог

$$\int_a^b f(x)dx = (b - a)f(a) + \frac{1}{2}(b - a)[f(b) - f(a)] \quad (13)$$

Зураг 5 – с харахад гироскопын гаралтын өнцөг хурдыг хугацаагаар интегралчлан хазайлтын өнцөгийг тодорхойлон нь гироскопын гаралтын шуугианыг дардаг ч

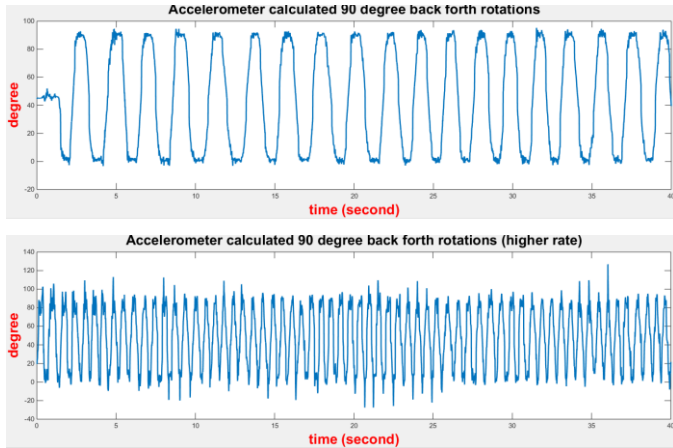
яваандаа өнцөгийн алдааны хуримтлал бий болдог нь анзаарагдаж байна. 1 минутын турш интералчлахад өнцөгийн алдаа аажмаар нэмэгдсээр - 50 градус хүртэл хуримтлагдсан байна.

Уг алдааны хуримтлалын шалтгаан нь гироскопын гаралтын шуугианаас болдог байна.

Харин одоо акселерометрийн гаралтыг 14 томъёог ашиглан x, y тэнхлэгийн хазайлтыг тооцоолж үзье.

$$\phi = \arctan\left(\frac{f_{y,accel}}{f_{y,accel}^2 + f_{z,accel}^2}\right) \quad (14)$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{f_{x,accel}}{f_{x,accel}^2 + f_{z,accel}^2}\right) \quad (15)$$



Зураг 6. Акселерометрийн гаралтуудаас тооцоолон олсон өнцөгийн хазайлт

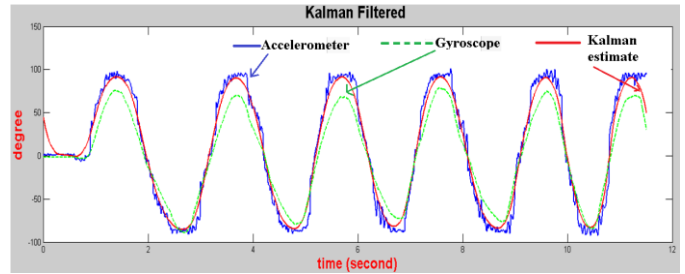
Дээрх зурагаас мэдрэгчийг байршуулсан хөдөлгөөнт тавцангийн хөдөлгөөн бага хурдтай байх үед акселерометрээс 14 томъёогоор тооцоолсон тэнхлэгийн хазайлтын өнцөг нь гироскопын гаралтын интегралчилж олсон аргаас алдааны хуримтлал үүсгэхгүй байгаагаараа давуу талтай ч илүү шуугиантай болох нь харагдаж байна. Харин дараагийн зурагт тавцангийн өнцөг хазайлтын хурд ихсэх үед акселерометрийн гаралтаас тооцоолсон өнцөгийн хурдны хазайлт илүү шуугиантай болсон байна.

Дээрх хэмжилтүүдээс гироскоп болон акселерометрийн аль альнаас тэнхлэгийн өнцөг хазайлтын үнэн зөв мэдээлэл гаргаж авахад учир дутагдалтай болох нь харагдаж байна.

D. Калманы шүүлтүүр ашиглан нэгтгэсэн үр дүн

Калманы шүүлтүүрийн гаралтын төлөв нь $\hat{\theta}_k, \hat{\phi}_k$ байх ба шуугианыг агуулсан мэдээлэл буюу z_k нь гироскопын өнцөгийн мэдээлэл ба акселерометрийн гаралтын мэдээлэл дээр 14, 15 томъёогоор тооцоолсон өнцөгийн хазайлтын мэдээлэл байна.

Зураг 2 –т үзүүлсэн Калманы шүүлтүүр бүхий мэдрэгчдийн мэдээллийг нэгтгэх системийг MATLAB дээр хэрэгжүүлэн дараах туршилтын үр дүнд хүрэв.



Зураг 6. Калманы шүүлтүүрээс шүүсэн өнцөгийн хазайлтын мэдээлэл ба гироскоп, акселерометр тус бүрийн мэдээлэл дээр тооцоолсон өнцөгийн хазайлтын мэдээлэл

Туршилтын үр дүнгээс харахад Калманы шүүлтүүрийг инерцлэг мэдрэгчийн системд ашиглах нь үр дүнтэй болох нь Зураг 6 -с харагдаж байна.

Бид туршилтыг хийж байх явцад Калманы шүүлтүүрийг удаан хугацаанд ажиллуулахын тулд P_k алдааны таамаглалын коэффициентийг тодорхой алхамын тооцооллын дараа дахин шинэчилж өгч байх шаардлагатай ба мөн Q болон R матрициудын утгыг зөв тохируулж өгөх нь шүүлтүүрийн ажиллагаанд нэн чухал юм гэдэгийг анзаарсан болно.

V. ДҮГНЭЛТ

Гироскопыг ашиглан роботын тэнхлэгийн хазайлтыг тооцоолох нь цагаан зураасны мэдрэгч, эсвэл энкодерын эргэлтээс тэнхлэг хазайлтыг тооцоолох шаардлагагүй зэрэг олон давуу талуудтай билээ.

Гэвч гироскопын алдааны интегралчлалын хуримтлал нь роботын найдвартай ажиллах хугацааг багасгадаг сул талтай юм.

Харин акселерометр нь өнцөг хурдатгалыг мэдрэхээс гадна мэдрэгчийн байрлаж буй роботын шугаман хөдөлгөөнийг ч мэдрдэг тул энэ нь уг мэдрэгчийг ашиглан өнцөгийн шилжилт буюу хазайлтыг хэмжихэд хүндрэл учруулдаг байна.

Бид энэхүү өгүүллээрээ Калманы шүүлтүүрийн алгоритмыг ашиглан дээрх мэдрэгчдийн мэдээллийг үр дүнтэй боловсруулж болох юм гэсэн дүгнэлтэнд хүрлээ.

АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ

- [1] Thomas Bräunl, “Embedded Robotics,” , Second Edition, 2006
- [2] Jeffrey D.Barton, “Fundamentals of Small Unmanned Aircraft Flight”, Johns Hopkins Apl Technical Digest, volume 31, number 2 (2012)
- [3] Walter T.Higgins , “A comparison of complementary and kalman filtering,” Arizona State University.
- [4] Fatemeh Abyarjoo, Armando Barreto, Jonathan Cofino1, Francisco R. Ortega, “Implementing a Sensor Fusion Algorithm for 3D Orientation Detection with Inertial/Magnetic Sensors,” Florida International University. Miami, FL. USA
- [5] А.Батмөнх, “Калманы шүүлтүүр,” ШУТИС, КТМС ЭШ хурлын эмхэтгэл, 4-р сар.