

# Тэнцвэргүй дүүжингийн PID болон төлөвийн орны удирлага

Ц.Тэнгис, А.Батмөнх, Р.Бямбажав, Б.Луубаатар  
Электроникийн салбар,  
ШУТИС

[tengis@must.edu.mn](mailto:tengis@must.edu.mn), [abatmunkh@must.edu.mn](mailto:abatmunkh@must.edu.mn), [r.byambajav@must.edu.mn](mailto:r.byambajav@must.edu.mn), [luubaatar@must.edu.mn](mailto:luubaatar@must.edu.mn)

*Хураангуй* - Системийг тогтвортой төлөвт байлгах нь удирдлагын онолын чухал асуудлуудын нэг байдаг билээ. Бидний судалгааны ажлын зорилго нь тэнцвэргүй дүүжингийн динамикийн загварыг математик илэрхийллээр тодорхойлж PID болон төлөвийн орны (State Space) аргаар удирдахад оршиж байгаа юм. Тус өгүүллээр дүүжингийн системийн тэнцвэржилтийг 3D орон зайн мэдээлэл дээр тулгуурлан PID удирдлагын аргаар, түүнчлэн бодит хугацаанд төлөвийн орны аргаар тогтворжуулалтыг тус тус шийдэх боломжийн талаар хийсэн судалгаа, MATLAB орчинд хийсэн туршилт болон бодит загвар дээр туршсан ажлын үр дүнг танилцуулна. Дээрх аргуудыг ашиглан дүүжингийн системийг тогтворжуулсан болно.

*Түлхүүр үг* - стерео дүрс, камер, гэдэрэг холбоо, мэдрүүр

## I. УДИРТГАЛ

Манай үндсэн судалгааны ажлын гол зорилго нь олон сэнст нисгэгчгүй тэрэгний тэнцвэржилтийн асуудлыг зөвхөн стерео дүрс боловсруулалтын аргыг хэрэглэн шийдэхийг зорьсонд оршиж байгаа тул тогтворгүй объектыг тэнцвэртэй төлөвт барих, түүн дотроо тэнцвэрийг хангах шийдэл нь нэн тэргүүний зорилтуудын нэг болж байдаг. Ийм төрлийн системийг тогтворжуулахад олон төрлийн мэдрүүрийг ашиглах бөгөөд автомат удирдлагын онолын өнцгөөс харахад системийг тогтворжуулахад эдгээр мэдрүүрээс авсан мэдээлэлд суурилсан гэдэрэг холбоог хэрэгжүүлдэг. Эдгээр мэдрэгчийн дотроос харааны систем нь бие даасан робот зохион бүтээхэд хамгийн чухал мэдрэгч болж өгдөг [1,2]. Бидний хувьд 3D хэмжээсийн зайн мэдээлэлд тулгуурлан тогтворжуулалтыг шийдэх судалгааны ажлыг явуулж байгаа бөгөөд энэхүү судалгааны ажлын нэг чухал хэсэг нь дүүжингийн системийн тогтворжилтыг бодит хугацаанд шийдэхэд оршиж байгаа юм. Тогтворгүй системийн судалгааны ажлуудын хүрээнд олон төрлийн дүүжингийн системийн загварыг үүсгэсэн байдаг ба эдгээрийн тэнцвэржилтийг ханган удирдах асуудлуудыг [3, 4]-д авч үзсэнээр шийдсэн байдаг. Энэ төрлийн системийг олон зорилгоор хэрэглэх боломжуудын дотор роботын гар, зогсож буй хүний загвар, пуужин ба онгоц хөөрөх болон газардах системүүдийн жишээгээр тайлбарлаж болно. Бидний туршиж байгаа дүүжингийн систем нь нисдэг тэрэгний системтэй төсөөтэй юм. Олон тооны судалгааны ажилд дөрвөн сэнстийн загварчлалын асуудлыг авч үзсэн байдаг [5, 6, 7]. Эдгээр ажлын

хувьд удирдлагын гэдэрэг холбоог PID арга дээр суурилан хэрэглэсэн байдаг. Ер нь, системийн тэнцвэржилтийн асуудлыг шийдэхийн өмнө тухайн системийн динамик загварыг судлах шаардлагатай юм. Энэ өгүүлэлд хоёр төрлийн удирдлагын аргыг судалгаандаа авч хэрэглэснийг танилцуулах болно. Нэгд, дүрс боловсруулалтын аргыг хэрэглэн 3D хэмжээсийн зайн мэдээлэлд үндэслэн дүүжингийн системд PID удирдлагыг хэрэглэн тэнцвэржилтийг хангах туршилтын үр дүнг танилцуулж байна. Хоёрт, хэвтээ дүүжингийн системийн математик загварыг төлөвийн орны аргаар илэрхийлж, гаргаж авсан хялбаршуулсан шугаман динамик тэгшитгэлийг ашиглан MATLAB орчинд хийсвэрээр туршиж, дараа нь бодит дүүжин дээр буулган туршсан үр дүнг танилцуулж байна.

## II. ДҮҮЖИНГИЙН ДИНАМИК ЗАГВАР

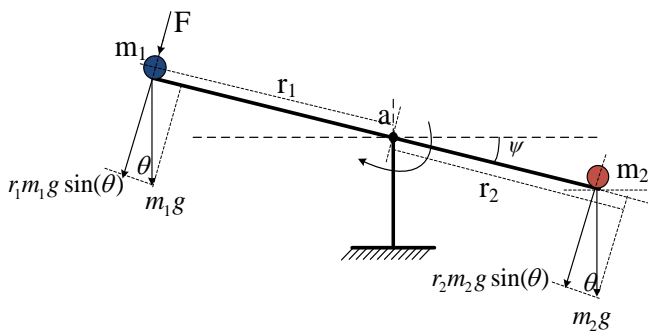
Зураг 1-д бидний бүтээсэн бодит дүүжингийн системийг харуулав. Дүүжингийн нэг мөрөнд BLDC хөдөлгүүрийг байрлуулсан бол нөгөө мөрөнд стерео камерыг байрлуулсан болно.



Зураг 1. Тэнцвэргүй дүүжингийн систем

### A. Дүүжингийн динамик тэгшитгэлийн гаргалгаа

Дүүжингийн динамик загварыг Зураг2-т үзүүлсэн ба энд  $a$ -эргэх тэнхлэгийн цэг,  $g$ -гравитацийн хүч,  $m1$  ба  $m2$  нь дүүжингийн хоёр мөрний төгсгөлд бэхэлсэн хоёр масс, эдгээрийн харилцан үйлчлэлээс үүсэх мушгих хүчийг тус тус байгаа нь харагдана. Мушгих хүч нь эргэлтээс үүсэх тойргийн шүргэгч бүрэлдэхүүнийг мөрний уртаар үржүүлсэн нийлбэр хүчнүүд байна. Харин тэнхлэгийн төвөөс  $r_1$  зайд гадны  $F$  хүчээр үйлчилнэ гэж үзсэн болно.



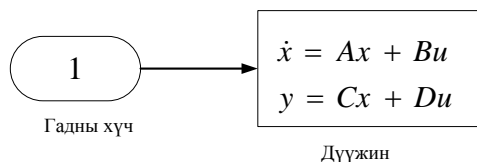
Зураг 2. Дүүжинд үүсэх мушгих хүчнүүд

$r_1, r_2$  урттай мөр тус бүрийн жинг тэгтэй тэнцүү гэж хялбаршуулснаар хөдөлгөөний тэгшитгэлийг дараах томъёогоор илэрхийлж болно:

$$r_2 m_2 g \sin(\theta) - r_1 m_1 g \sin(\theta) = (m_1 r_1^2 + m_2 r_2^2) \ddot{\theta} + F r_2 \quad (1)$$

Зураг 2-оос харахад, хэвтээ тэнхлэг ба мөр хоорондын өнцөг  $\psi = \pi/2 - \theta$  юм. Мөр нь хатуу биет учраас өнцгийн эхний болон хоёр дахь эрэмбийн уламжлал нь  $\psi' = -\theta'$  болон  $\psi'' = -\theta''$  тус тус байна. Тэгшитгэл (1)-д орж байгаа бүрэлдэхүүн тус бүр нь мушгих хүч [Joule] байна.

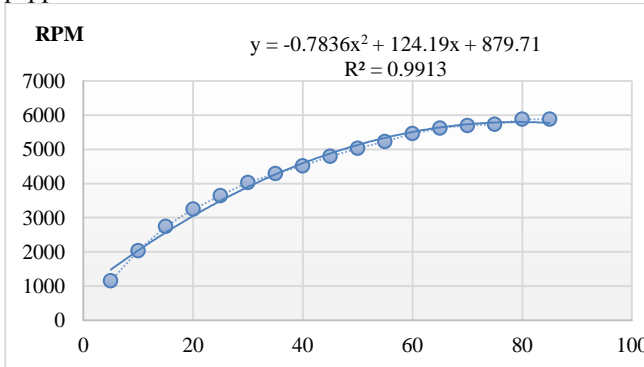
Зураг 3-т задгай (гэдрэг холбоогүй) системийн блок схемийг үзүүлэв.



Зураг 3. Задгай системийн блок схем

### В. BLDC хөдөлгүүрийн өргөх хүчийг тодорхойлох нь.

Дээрх симуляцийг бодит загвар дээр туршигдаа BLDC хөдөлгүүрийг ашиглав. Хөдөлгүүрийн шугаман бус характеристик болон сэнсний хэлбэрээс үүсэх аэродинамикийг тооцоолох нь бидний зорилго бус тул тус системд ашиглаж буй актуаторын математик загварыг нарийвчлан гаргаагүй болно. Үүний оронд энгийн туршилтын аргаар Detrum ESC 18A электрон удирдлага бүхий Detrum BM2810CD-KV1080 BLDC хөдөлгүүрийн эргэлтийн хурд, респонс хугацаа, өргөх хүч зэргийг хурдны удирдлагад өгөх импульсийн өргөнөөс хэрхэн хамаарч байгааг хэмжиж тодорхойлсныг Зураг 4-т үзүүлээ.



Зураг 4. Импульсийн өргөн ба эргэх хурдны хамаарал

Дээрх хэмжилтээс харахад респонс үзүүлэх хугацаа нь дунджаар 1,53 секунд байв. Сэнст хөдөлгүүрийн өргөх хүчийг (2) томъёогоор тодорхойлдог.

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

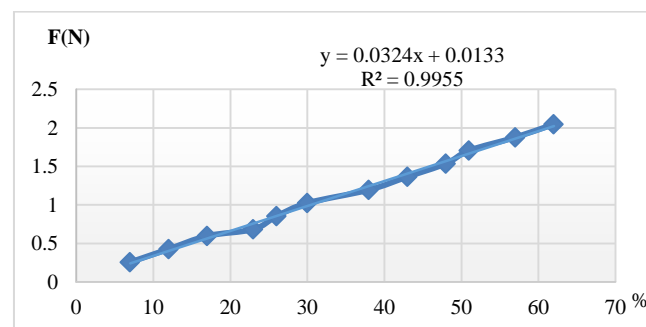
Энд,  $C$ - сэнсний өргөх коэффициент (өнцөг),  $\rho$  - агаарын нягт,  $A$ - сэнсний эргэх талбай,  $v$ - сэнсний эргэх хурд.

Бид өргөх хүчийг тодорхойлохдоо Зураг 1-т үзүүлсэнтэй адил дүүжин ашигласан бөгөөд дүүжингийн нэг мөрөнд 180гр жинтэй стерео камер, нөгөө мөрөнд 130гр жинтэй BLDC хөдөлгүүрийг байрлуулсан. Дүүжин анхны байрлалд байхад дүүжингийн мөр дүүжин байрлах хавтгайтай  $30^\circ$  өнцөг үүсгэж байрлана. Дүүжин анхны байрлалд байхад дүүжингийн баруун талын мөрөнд  $m$  масстай ачаа байх ба уг ачаа нь эгц доош  $W=mg$  хүчээр дарж байна. Харин эсрэг мөрөнд байрлах сэнст хөдөлгүүр нь мөрөнд перпендикуляр  $F_{\text{lift}}$  хүч үүсгэнэ. Дүүжингийн ачаа талд янз бүрийн жинг байрлуулж хөдөлгүүрт өгөх импульсийн өргөнийг уг ачааг өргөх хүртэл нэмэгдүүлэх замаар, ачааг өргөж эхлэх агшны импульсийн өргөнийг тэмдэглэж авсныг Хүснэгт-1-д харуулав.

Хүснэгт 1. Импульсийн өргөн ба өргөх хүч

№	Duty (%)	RPM	m (kg)	g	mg (N)	cos(30)*mg (N)
1	7	1670	0.03	9.81	0.29	0.25
2	12	2360	0.05	9.81	0.49	0.42
3	17	2820	0.07	9.81	0.68	0.59
4	23	3530	0.08	9.81	0.78	0.68
5	26	3750	0.1	9.81	0.98	0.85
6	30	4000	0.12	9.81	1.17	1.02
7	38	4390	0.14	9.81	1.37	1.19
8	43	4670	0.16	9.81	1.56	1.36
9	48	4950	0.18	9.81	1.76	1.53
10	51	5150	0.2	9.81	1.96	1.7
11	57	5446	0.22	9.81	2.15	1.87
12	62	5580	0.24	9.81	2.35	2.04

Зураг 5-д Хүснэгт 1-ийн өгөгдлийг графикаар харуулав. Графикаас харахад дээрх хамаарал нь үндсэндээ шугаман шинж чанартай байгаа нь харагдана. Бодит орчинд туршилт хийсэн дүүжинг Зураг 1-с харж болно.



Зураг 5. Импульсийн өргөн ба хөдөлгүүрийн өргөх хүчний хамаарал

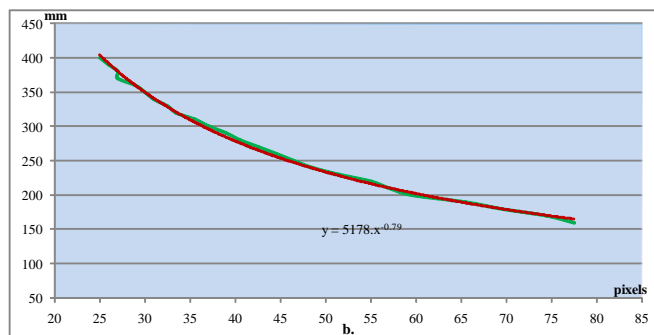
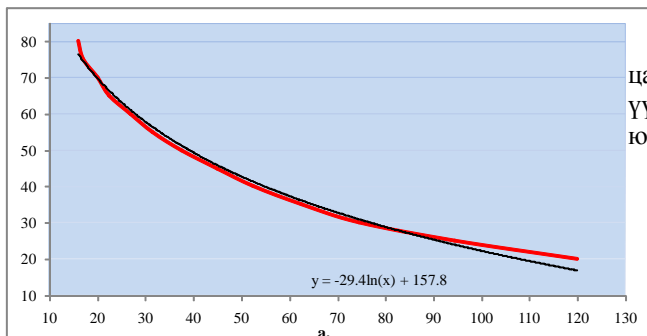
### III. СТЕРЕО ДҮРС БОЛОВСРУУЛАЛТ ДЭЭР СУУРИЛСАН PID УДИРДЛАГА

#### A. Объектыг илрүүлэх

Дүрс боловсруулалтыг ашиглан гэдрэг холбоо үүсгэх замаар дүүжингийн тэнцвэржилтийн асуудлыг олон аргаар шийдсэн байдаг [3, 4]. Дээр авч үзсэнээр, манай судалгааны ажлын үндсэн зорилго нь зөвхөн стерео дүрсний мэдээлэлд тулгуурлан 3D орон зайд хөдөлж буй объект бие даан тэнцвэрээ олох боломжийг судлахад оршиж байгаа тул энэ ажлын хүрээнд хэд хэдэн төрлийн онцлог цэгийг таньж илрүүлэх аргуудын харьцуулалт хийсэн билээ[8].

Ажиглагч ба объект хоорондын зайг хэмжих олон аргууд байдаг ба эдгээрийг идэвхтэй ба идэвхгүй, хүрэх ба үл хүрэх гэж ангилдаг байна[1]. Ихэнх судалгааны ажлын зорилго нь 3 хэмжээст орон зайн мэдээллийг хурдан, алдаа багатай боловсруулахад оршиж байна[12]. Стерео зургийг ашиглан зургийн алслалт буюу гүнгийг (depth) тодорхойлох боломжтой болох талын бидний хийсэн судалгаа ажлын үр дүнг [8, 9] –аас харж болно.

Манай судалгаанд 15FPS (15 frames per second) хурдтай боловсруулалт хийдэг стерео камерыг ашиглав. Дүрсний хэмжээ нь 640x480 байх ба RGB өнгөөр дүрсийг дамжуулна. Дүрс боловсруулалтын явцад өнгөт дүрс (кадр) бүрийг саарал дүрсэнд хөрвүүлэх, Гауссын шүүлтүүрээр дүрсийг шүүх, дүрс тус бүрээс 2 онцлог тойргийг илрүүлэх шаардлагатай юм. Эцэст нь, эдгээр тойрог бүрийн камертай харьцангуй байрлах зайг тодорхойлж, уг зайн мэдээллийг (USB - COM) цуваа портоор хөдөлгүүрийн удирдлагын контроллэрт дамжуулна. Дүрс боловсруулалтанд Visual Studio 10, OpenCV 2.49 сангуудыг хэрэглэсэн ба энэ боловсруулалтын нийт хугацаа 160ms болж байв. Энэ нь дүүжингийн тэнцвэржилтэнд хангалтгүй буюу хэт удаан байсныг өмнөх туршилтуудаар [9] баталсан тул дүрсний хэмжээг 320x240 болгох замаар дүрс боловсруулалтын хугацааг 50ms болгон бууруулав. Эндээс зай болон ялгааны хамаарлыг дахин тооцоолсон үр дүнг Зураг 6-д харууллаа.

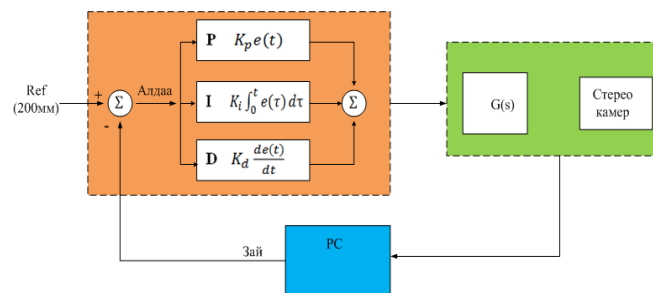


Зураг. 6. Зай болон ялгааны хамаарал. а. 640x480 пиксель – улаан нь хэмжилтийн үр дүн, б.320x240 пиксель- ногоо нь хэмжилтийн үр дүн

Дээрх аргыг хэрэглэн дүрс боловсруулалтын хурдыг ихэсгэсэн боловч камер болон тойрог хоорондын зай хамгийн холдоо 45см болж буурсан үзүүлэлттэй байлаа. Стерео дүрснээс авсан мэдээллийг ашиглан миллиметрийн нарийвчлалтай зайг тодорхойлох боломжтой юм. Тойрог ба камер хоорондын зайг 350мм – 200 мм хооронд байхаар сонгож авсан.

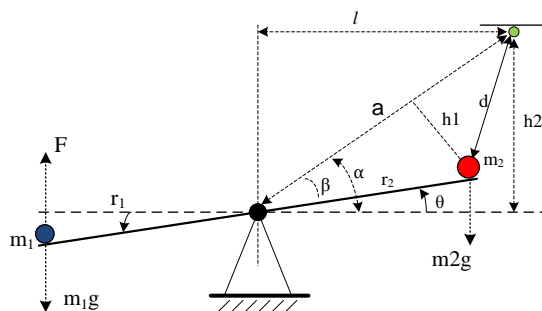
#### B. PID удирдлага

Судалгааны ажлын хүрээнд энэхүү зайн мэдээллийг цуваа портоор (9600 baud) Arduino Uno контроллэрт дамжуулах замаар сэнсний эргэлтийн хурдыг удирдсан бөгөөд гэдрэг холбооны PID удирдлагын аргыг ашиглан импульсийн өргөний модуляц (PWM)-аар сэнсний эргэлтийн хурдыг автоматаар тохируулж дүүжингийн тэнцвэрийг хангасан [9].



Зураг. 7. PID удирдлага бүхий битүү системийн бүтэц

Стерео дүрснээс зайн мэдээллийг тодорхойлсон ба цаашлаад тухайн мэдээллийг ашиглан дүүжингийн үүсгэх өнцгийн мэдээллийг гарган авах боломжтой юм Зураг 8.



Зураг. 8 Зай болон өнцгийн хамаарал

$$p = a + d + r2 \quad (3)$$

$$A = \sqrt{p(p-a)(p-d)(p-c)} \quad (4)$$

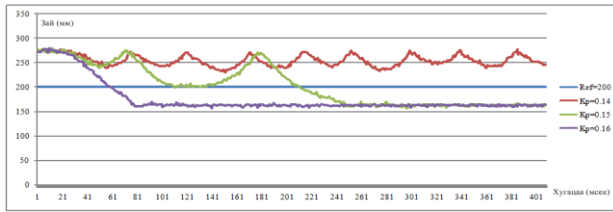
$$h1 = \frac{2A}{a} \quad (5)$$

$$\sin \alpha = \frac{h2}{l}, \sin \beta = \frac{h1}{r2} \quad (6)$$

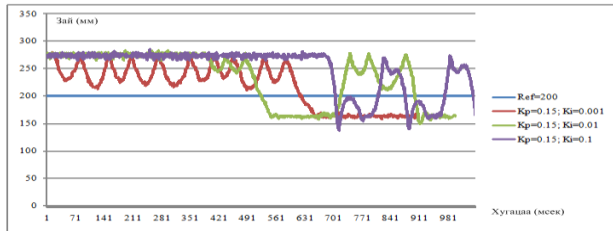
$$\theta = \alpha - \beta \quad (7)$$

Энд,  $h2$ -тогтворжсон дүүжингийн тэнхлэгээс онцлог цэг хүртэлх зай,  $h1$ - гурвалжны өндөр,  $l$ - онцлог цэгээс дүүжингийн төв тэнхлэг хүртэлх зай,  $a$ - онцлог цэгээс дүүжингийн төв хүртэлх зай,  $d$ -стерео камераас онцлог цэг хүртэлх зай.

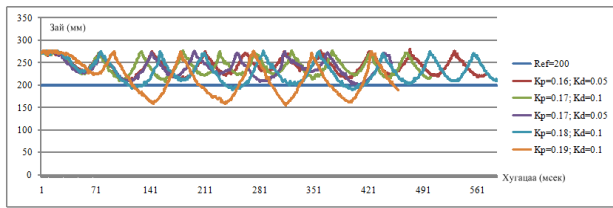
Зураг 9-өөс PID удирдлагын үр дүнг харж болно. Системийн тогтворжих өндрийг 200 мм байхаар сонгож авсан ба  $K_p=0.16$ ,  $K_i=0.01$ ,  $K_d=0.1$  байх үед систем тогтвортой байгааг сүүлийн зургаас харж болно.



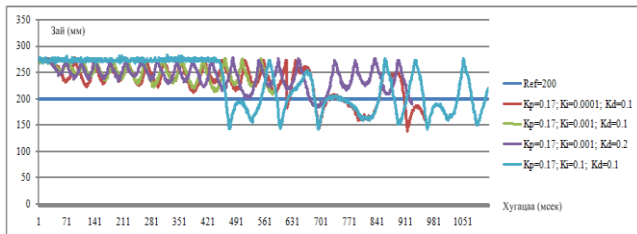
a.



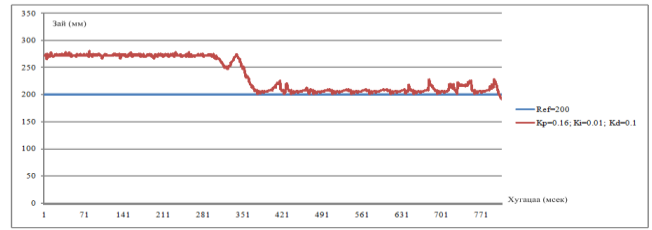
b.



c.



d.



e.

Зураг. 9 PID удирдлагын үр дүн, a-P, b-PI, c-PD, d-PID удирдлагын үр дүн, e-PID тогтворжсон үеийн удирдлагын үр дүн

#### IV. ДҮҮЖИНГИЙН ТӨЛӨВИЙН ОРНЫ ИЛЭРХИЙЛЭЛ

Төлөвийн орны аргын гол давуу тал нь олон оролт, олон гаралттай удирдлагын системийг загварчлах боломжтой оршино. Тэгшитгэл (1)-ээс харахад энэ систем нь синус ба косинус бүрэлдэхүүн хэсгийг агуулсан байгаа нь тухайн систем нь шугаман бус болохыг илэрхийлэх бөгөөд цаашид үүнийг шугамчлах шаардлагатай юм. Бага өнцгийн хувьд  $\sin \theta \approx \theta$  and  $\cos \theta \approx 1$  гэж ойролцоолж болно. Дүүжин  $\theta = \pi/2$  (дүүжингийн мөр хэвтээ тэнхлэгтэй параллель) байх үед тогтвортой байна гэж үзээд  $\theta$  нь  $\pi/2$  орчимд бага хэмжээний хазайлт өгнө гээд  $\sin \theta$  нь  $\sin \theta \approx 1 + \psi$  гэсэн ойролцооллыг авч болно. Энэ тохиолдолд (1) нь (8) тэгшитгэлээр илэрхийлэгдэнэ.

$$(r_2 m_2 - r_1 m_1) g (1 \pm \psi) = -(m_1 r_1^2 + m_2 r_2^2) \ddot{\psi} + F r_2 (8)$$

Дээрх параметруудийг төлөвийн хувьсагчаар илэрхийлбэл  $\psi = x_1$ ,  $\dot{\psi} = \dot{x}_1 = x_2$ ,  $\ddot{\psi} = \dot{x}_2$  гэж гарах ба төлөвийн орны илэрхийллийг томъёо (9)-р гарган авна.

$$\dot{x}_1 = x_2$$

$$\dot{x}_2 = \frac{(m_2 r_2 - m_1 r_1)}{(m_1 r_1^2 + m_2 r_2^2)} g x_1 + \frac{r_2}{(m_1 r_1^2 + m_2 r_2^2)} F - \frac{(m_2 r_2 - m_1 r_1)}{(m_1 r_1^2 + m_2 r_2^2)} (9)$$

Системийн төлөвийн орны илэрхийллийг стандарт матриц хэлбэрт оруулсныг (10)-г харуулав.

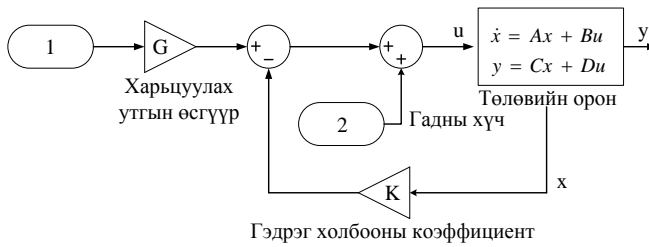
$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{(m_2 r_2 - m_1 r_1) g}{(m_1 r_1^2 + m_2 r_2^2)} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{r_2}{(m_1 r_1^2 + m_2 r_2^2)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F \\ -1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

(10)-аас A, B матриц тус бүрийг задгай системийн хувьд задалж бичвэл,

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{r_2 m_2 - r_1 m_1}{(m_1 r_1^2 + m_2 r_2^2)} g & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{r_2}{(m_1 r_1^2 + m_2 r_2^2)} & \frac{(m_2 r_2 - m_1 r_1)}{(m_1 r_1^2 + m_2 r_2^2)} \end{bmatrix}$$

Одоо, өмнө нь авч үзсэн PID аргын оронд бүрэн төлөвийн гэдрэг холбооны аргыг хэрэглэн MATLAB орчинд туршилт хийж байгаа болно.



Зураг. 10 Төлөвийн гэдэрэг холбоотой системийн блок диаграм

(11)-ээр Зураг 10-г үзүүлсэн бүрэн төлөвийн гэдэрэг холбоотой системийн тэгшитгэлийг хугацааны мужид харуулав.

$$\dot{x} = Ax + B(G \cdot ref - Kx + Fr_3) \quad (11)$$

Энд  $G$  нь харьцуулах утгын өсгөлт,  $K$  нь гэдэрэг холбооны коэффициент ба  $F$  нь гадны хүч. Томьёо (11) тохируулга хийсний дараа  $B$  матрицыг дараах байдлаар илэрхийлж болно.

$$B_{new} = B[G \quad 1] \quad (12)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = (A - BK) \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + B_{new} \begin{bmatrix} ref \\ F \end{bmatrix} \quad (13)$$

Энд  $ref$  болон  $F$  нь  $1 \times n$  хэмжээст матриц байх ба  $n$  нь симуляцийн алхмын тоо юм.

Төлөвийн гэдэрэг холбоотой системийн дамжуулах функцийг тэгшитгэлийг Лапласын мужид хөрвүүлэх шаардлагатай бөгөөд Зураг 10-г үзүүлсэн төлөвийн тэгшитгэлийг  $s$ -мужид доорх байдлаар илэрхийлнэ (14).

$$\begin{aligned} sX(s) &= AX(s) + B(G \cdot Ref(s) - K \cdot X(s) + F) \\ Y(s) &= CX(s) \end{aligned} \quad (14)$$

Томьёо (14)-өөс системийн гаралт нь дараах байдлаар тодорхойлогдоно (15).

$$Y(s) = \frac{CBG}{sI - (A - BK)} Ref(s) + \frac{CB}{sI - (A - BK)} F(s) \quad (15)$$

Томьёо (15)-аас харвал, систем нь хоёр удирдлагын оролттой байна. Энд, 1-харьцуулах утга, 2-гадны хүч (Зураг10). Системийн туйлыг оноон байрлуулахдаа халилт, өгсөх болон тогтворжих хугацааг [5, 6, 7]-д үзүүлсэн аргаар хийв (16).

$$\begin{aligned} \xi &= \frac{-\ln(OS/100)}{\sqrt{\pi^2 + (\ln(OS/100))^2}} \\ t_{settling} &\approx \frac{4}{\xi \omega_n} \end{aligned} \quad (16)$$

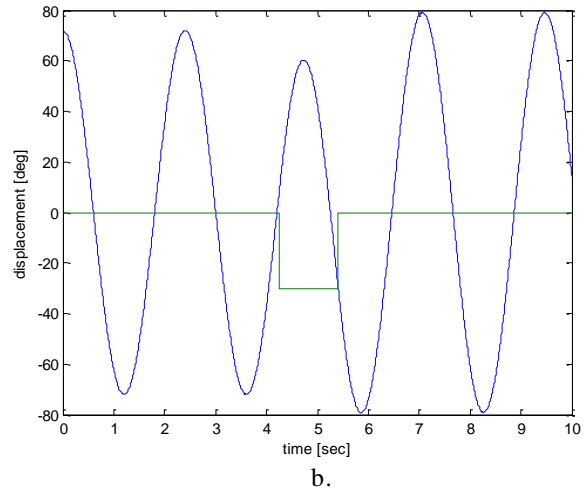
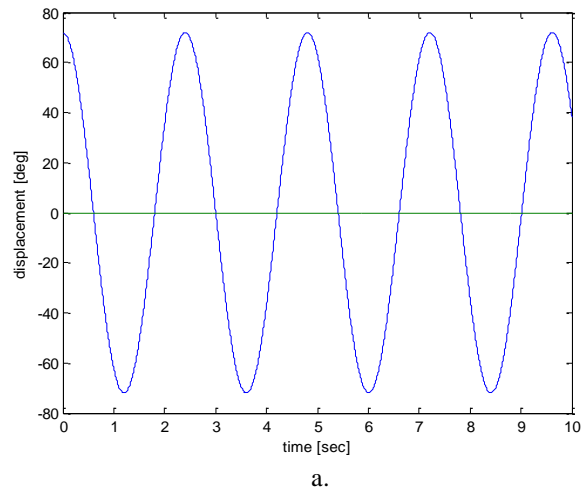
Туйлыг байршуулах процедурын дараа гэдэрэг холбооны коэффициентыг тодорхойлно. Системийн хувьд төлөвийн гэдэрэг холбооны харьцуулах утга нь өнцөг  $\theta$  (Зураг 2) юм. Төлөвийн бүх утгуудыг хэмжиж болох учраас ажиглагч буюу “observer” дээр тулгуурласан гэдэрэг холбоо шаардлагагүй юм. Харьцуулах утга болон төлөвийн гэдэрэг холбоог хамааралтай болгох үүднээс  $G$ -г тодорхойлдог (17).

$$G = -B^{-1}(A - BK)C^{-1} \quad (17)$$

#### V. СИМУЛЯЦИ БА ҮР ДҮН

Симуляцийг 2 шатлалаар хийв. Эхний шатлал нь задгай системийн хувьд хоёр дахь нь гэдэрэг холбоотой системийн хувьд хийсэн. Симуляцийн алхам  $dt = 0.005 \text{ sec}$  байхаар, нийт үргэлжлэх

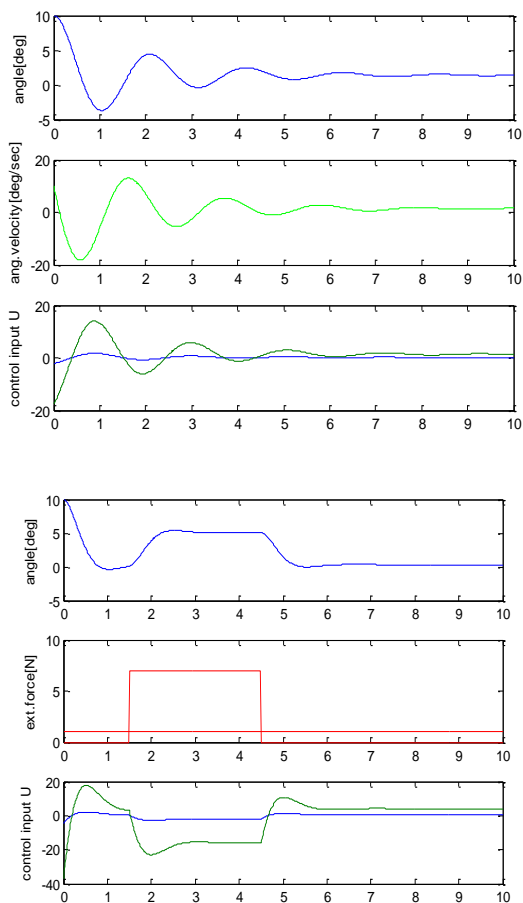
хугацааг нийт 10 секунд байхаар сонголоо. Задгай системийн симуляцийн үр дүнг Зураг 11-т үзүүлэв.



Зураг.11. а. Дээд тал задгай системд хүч үйлчлээгүй үед, б. доод талд задгай системд сөрөг хүч үйлчлэх үед

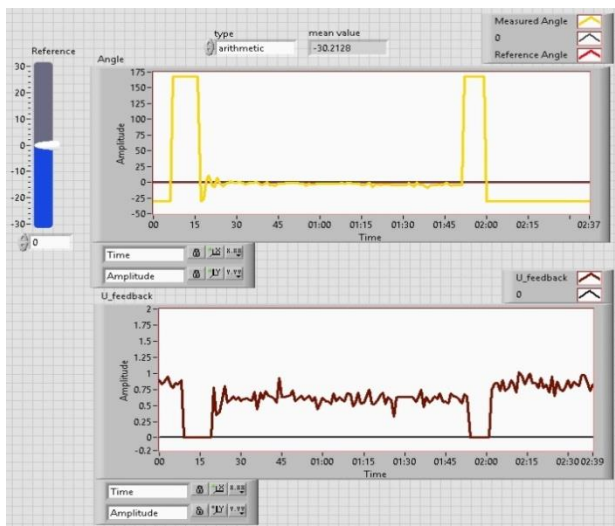
Бодит дүүжингийн хувьд тогтворжих хугацааг 2 секунд, халилтыг 4% ихгүй байхаар сонгов. Томьёо (16)-г ашиглан унтрах харьцааг  $\xi = 0.72$  ба давтамж  $\omega_n = 2.79 \text{ Hz}$  байхаар тооцоолсон. Энэ тооцоолсон утгуудыг ашиглан 2 туйлыг  $(-2 + 1.97j)$  ба  $(-2 - 1.96j)$  гэж тогтоов.

Зураг 12-ийн дээд зурагт гадны хүч үйлчлээгүй үеийн, доод талд эерэг хүч үйлчилсэн үеийн гэдэрэг холбоотой системийн хугацааны диаграммыг үзүүлэв.



Зураг 12. Дээд талд хүч үйлчлээгүй үеийн, доод талд эерэг хүч үйлчилсэн үеийн гэдрэг холбоотой системийн хугацааны диаграмм.

Бодит системийн тэнцвэржих үйлдлийг Зураг 13-т үзүүлэв. Дээд график нь өнцгийн өөрчлөлтийг, хоёр дахь график нь дүүжингийн системийг тогтвортой төлөвт оруулах хүчний үйлчлэлийг үзүүлж байна.



Зураг 13. Бодит дүүжинд үүссэн үр дүнгийн хугацааны график

#### IV. ДҮГНЭЛТ

Уг судалгааны ажлын хүрээнд хос веб камер ашиглан стерео дүрсийг үүсгэж, онцлог цэг болон

камер хоорондын зайг миллиметрийн нарийвчлалтайгаар тодорхойлсон ба ийнхүү тодорхойлсон мэдээллийг ашиглан дүүжингийн системийг PID аргаар тэнцвэржүүлсэн туршилтын ажлын үр дүнг танилцууллаа.

Мөн энэхүү өгүүлэлд бүрэн төлөвийн гэдрэг холбоотой дүүжингийн загварчлалыг танилцуулав. Энэ аргаар дүүжингийн хялбаршуулсан математик загварыг үүсгэсэн ба энд шугаман бус хамаарлуудыг шугамчилж заримыг тэглэсэн болно. Хэдийгээр загварыг нилээд хялбаршуулсан боловч симуляцийн үр дүн нь харьцангуй бодит үр дүнг харуулж чадсан гэж бид үзэж байна.

Системийн загварын симуляцийг задгай болон гэдрэг холбоотой үеийн горим тус бүрт хийж туршив. Симуляцийн туршид тулгуур өгөгдлийн оролтын харьцуулах утгыг хазайлтын өнцгөөр авч үзлээ. Симуляцийг бодит загвар дээр буулгаж өнцгийн мэдээллийг потенциометрээр туршиж үзсэн зарим үр дүнг энэхүү өгүүллийн төгсгөлд мөн оруулав. Туршилтаас харахад дүүжингийн систем тогтвортой байх үеийн гаралтын дохио шуугианд нилээд өртсөн байгаа нь шүүх шаардлагатай болохыг илтгэж байв. Ийнхүү гаргаж авсан загвар нь системийн тэнцвэржүүлэлт чиглэлээр ажиллаж буй судлаачдад хэрэгтэй материал болно гэдэгт бид найдаж байна.

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] Manaf A. Mahammed, Amara I. Melhim, Faris A. Kochery, "Object Distance Measurement by Stereo Vision" *International Journal of Science and Applied Information Technology (IJSAIT)*, Vol.2 , No.2, Pages : 05-08 (2013) Special Issue of ICSTE 2013 - Held during 11-12 March, 2013 in Hotel Crowne Plaza, Dubai
- [2] X. Armangué Quintana, "Modelling Stereoscopic Vision Systems for Robotic Applications". Universitat de Girona, 2003.
- [3] Selcuk Kizir, Hasan Ocak, Zafer Bingul and Cuneyt Oysu, "Time delay compensated vision based stabilization control of an inverted pendulum" *international Journal of Innovative Computing, Information and Control*. Volume 8, Number 12, December 2012
- [4] Jan Mattner, Sacha Lange, Martin Riedmiller, "Learn Swing Up and Balance a Real Pole Based Raw Visual Input Data" Machine Learning Lab, Department of Computer Science, University of Freiburg, Germany.
- [5] Andrew Gibiansky, *Quadcopter Dynamics, Simulation and Control*.
- [6] Teppo Luukkonen. *Modelling and control of quadcopter*. Aalto University. School of science. 2011
- [7] Lucas M. Argentim, Willian C. Rezende, Paulo E. Santos, Renato A. Aguiar, *PID, LQR and LQR-PID on a Quadcopter Platform*.
- [8] Ц.Тэнгис<sup>#1</sup>, А.Батмөнх<sup>#2</sup>, Р.Бямбажав<sup>#3</sup>, Э.Наранбаатар<sup>#4</sup>, "Объектын бодит хугацааны гурван хэмжээсхөдөлгөөний зураглалыг үүсгэх судалгаа" MMT conference 2015
- [9] Tengis Tserendondog, Batmunkh Amar, Byambajav Ragchaa, "Stereo Vision Based Balancing System Results" *International Journal of Internet, Broadcasting and Communication* Vol.8 No.1.2016