

# Свэрвэ роботыг урьдчилан тодохойлогдсон замын дагуу удирдах аргачлал

Норпэлийн Даваадорж\*, М.Баярпүрэв†

\* Электроникийн тэнхим  
МХТС, ШУТИС  
[drj.2013.new@gmail.com](mailto:drj.2013.new@gmail.com)

† Электроник, инженерчлэлийн тэнхим  
ХШУИС, МУИС  
[bayarpurev@num.edu.mn](mailto:bayarpurev@num.edu.mn)

**Хураангуй**—Энэхүү өгүүлэлд свэрвэ (swerve) буюу тус бүрдээ эргэлтын удирдлагатай дөрвөн дугуйт роботыг удирдах аргачлалыг моторуудын дурын байрлалд тооцоолж, MATLAB орчинд кинематик тооцооллыг хэрэгжүүлж шалгасан.

*Түлхүүр үг - Свэрвэ; Бизьегийн муруй; кинематик; таректор; чиглүүлэгч эргэлтын тэнхлэг*

## I. УДИРТГАЛ

Өнөөгийн нийгэмд роботуудыг хүний байнгын удирдлагаас чөлөөлөх буюу автомат жолоодлоготой болгох асуудал тулгамдаад байна. Роботыг урьдчилан тодорхойлогдсон замын дагуу удирдан явуулах аргачлалын боловсруулалт, хөгжүүлэлт нь эрчимтэй явагдаж байгаа судалгааны ажлуудын нэг юм. Үүнийг хэрэгжүүлэхийн тулд тухайн роботын онцлогт тулгуурлан кинематик тооцооллыг хийх шаардлагатай байдаг. Свэрвэ робот нь омни буюу чөлөөт шилжилттэй роботуудын нэг хэлбэр бөгөөд тухайн байрлалаас дурын чиглэлд шилжилт хийх чадвартай бадаг. Хэдийгээр свэрвэ робот нь дизайн болон удирдлагын хувьд төвөгтэй хэдий ч бусад төрлийн роботуудаас ялгарах гол онцлог нь ямар чиглэлд шилжилт хийсэнээс хамаарахгүй дугуйны хөдөлгөөн моторын бүрэн хүчин чадлыг ашигладаг бөгөөд харьцуулалтыг хүснэгт I-д [1] харуулсан байна.

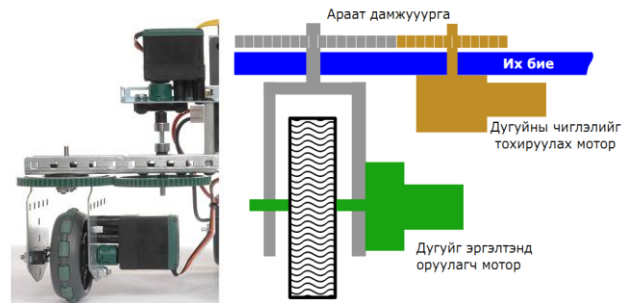
ХҮСНЭГТ I. Омни роботуудын харьцуулалт

Роботын хэлбэр	Омни	Mecanum	Swerve (Crab)	
Техникийн үзүүлэлт	Хурд	Диагоналын чиглэлд бүрэн хурдтай	Урагш, хойш чиглэлд бүрэн хурдтай	Бүх чиглэлд бүрэн хурдтай
	Түлхэх хүч	Бага	Дунд	Бүрэн
	Авирах чадвар	Байхгүй	Бага	Дунд
	Дизайны хүндрэл	Хялбар	Маш хялбар	Бэрхшээлтэй
	Тогтвортой байдал	Бага	Өндөр	Бага
	Моторын тоо	4	4	5-аас 8
	Удирдлагийн төвөгтэй байдал	Дунд	Дунд	Төвөгтэй
	Жин	Хөнгөн	Дунд зэрэг	Хүнд

## II. УЛАМЖЛАЛТ СВЭРВЭ РОБОТ

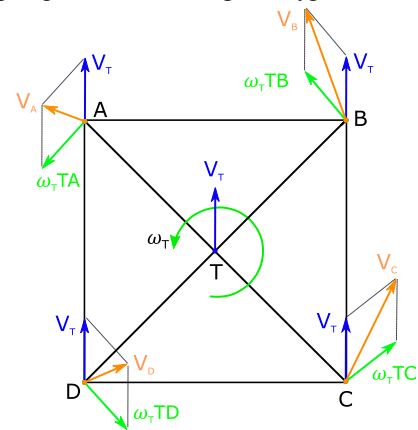
### A. Свэрвэ роботын техникийн шийдэл

Роботын дугуйнууд нь чиглүүлэгч эргэлтын тэнхлэгтэй давхцан байрласан үндсэн байрлалыг зураг 1-д харуулсан байна. Свэрвэ роботын энэ шийдэл нь тооцооллын хувьд хялбар, нийт моторын тоог цөөлөх боломжтой боловч дугуйны чиглэлийг тохируулах моторын хувьд ачаалал их үүсгэх бөгөөд, чиглэлийг тохируулах хурд удааширнаас роботын хурд удаан болно.



Зураг 1. Свэрвэ роботын нэг мөчний үндсэн механик шийдэл

Энэ тохиолдолд дөрвөн дугуйг (A, B, C, D) свэрвэ роботын хурдыг төвийн T цэгийн хувьд урьдчилан тодорхойлогдсон  $\vec{r}_T(t)$  зам ( $\vec{r}_T(t)$  замыг их биеийн эргэлтгүйгээр туулах боломжтой) болон  $\theta_T(t)$  гэсэн их биеийн эргэлт(T цэгийг тойрч эргэх)-ийн илэрхийллүүдээр өгөгдөнө гэж үзнэ (зураг 2) [2].



Зураг 2. Свэрвэ роботын кинематик

Доорхи тооцоонд роботын анхны байрлалыг тодорхойлогч  $\overline{TA}(0), \overline{TB}(0), \overline{TC}(0), \overline{TD}(0), \vec{r}_{T(0)}, \theta_{T(0)}$  өгөгдөх бөгөөд роботыг удирдахад шаардагдах  $\|\vec{v}_A(t)\|, \|\vec{v}_B(t)\|, \|\vec{v}_C(t)\|, \|\vec{v}_D(t)\|$  хурдны векторуудын норм болон роботын их биетэй харьцангуй  $\alpha_A, \alpha_B, \alpha_C, \alpha_D$  хурдны векторын өнцгүүдийг тодорхойлох даалгавар өгөгдөнө. Мөн ТА, ТВ, ТС, TD мөчүүдийн хэмжээ, хоорондох өнцөг тэнцүү байх шаардлагагүй юм.

Дугуй тус бүрийн замын илэрхийлэл (2) [3] нь:

$$\vec{r}_T(t) = \begin{pmatrix} x_T(t) \\ y_T(t) \end{pmatrix}; \quad (1)$$

$$\vec{r}_A(t) = \vec{r}_T(t) + R * \overline{TA}(0)$$

$$\vec{r}_B(t) = \vec{r}_T(t) + R * \overline{TB}(0) \quad (2)$$

$$\vec{r}_C(t) = \vec{r}_T(t) + R * \overline{TC}(0)$$

$$\vec{r}_D(t) = \vec{r}_T(t) + R * \overline{TD}(0)$$

Үүнд  $R = \begin{pmatrix} \cos\theta_T(t) & -\sin\theta_T(t) \\ \sin\theta_T(t) & \cos\theta_T(t) \end{pmatrix}$  эргэлтийн матриц.

Эдгээр замын илэрхийллээс хурдны вектор (3,4) тус бүр нь:

$$\begin{aligned} \vec{V}_A(t) &= \vec{r}_A(t)'; & \vec{V}_B(t) &= \vec{r}_B(t)' \\ \vec{V}_C(t) &= \vec{r}_C(t)'; & \vec{V}_D(t) &= \vec{r}_D(t)' \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \vec{V}_A(t) &= \vec{V}_T(t) + \omega_T(t) * R * \overline{TA}(0) \\ \vec{V}_B(t) &= \vec{V}_T(t) + \omega_T(t) * R * \overline{TB}(0) \\ \vec{V}_C(t) &= \vec{V}_T(t) + \omega_T(t) * R * \overline{TC}(0) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\vec{V}_D(t) = \vec{V}_T(t) + \omega_T(t) * R * \overline{TD}(0)$$

Роботын их биетэй харьцангуй өнцгүүдийг тооцоолбол:

$$\alpha_A = \arccos\left(\frac{\vec{v}_{AX}(t)}{|\vec{v}_A(t)|}\right) + \frac{\pi}{2} - \theta_T(t)$$

$$\alpha_B = \arccos\left(\frac{\vec{v}_{BX}(t)}{|\vec{v}_B(t)|}\right) + \frac{\pi}{2} - \theta_T(t) \quad (5)$$

$$\alpha_C = \arccos\left(\frac{\vec{v}_{CX}(t)}{|\vec{v}_C(t)|}\right) + \frac{\pi}{2} - \theta_T(t)$$

$$\alpha_D = \arccos\left(\frac{\vec{v}_{DX}(t)}{|\vec{v}_D(t)|}\right) + \frac{\pi}{2} - \theta_T(t)$$

Дугуй тус бүрийн тухайн агшинд байрлах өнцгийг (5) илэрхийллээр тодорхойлох бөгөөд дугуй тус бүрд харгалзах хурдыг (4) илэрхийллээс тус бүрээс нь норм авч  $\|\vec{v}_A(t)\|, \|\vec{v}_B(t)\|, \|\vec{v}_C(t)\|, \|\vec{v}_D(t)\|$  утгуудыг тодорхойлно.

### В. Бизьегийн муруй

Бизьегийн муруй нь олон гишүүнтээр өгөгдсөн вектор утгатай функц юм. Энэ муруй байгуулахын тулд  $P_0, P_1, \dots, P_n$  цэгүүд өгөгдөөд

$$\begin{aligned} B(t) &= \sum_{i=0}^n C_n^i (1-t)^{n-i} t^i P_i \\ C_n^i &= \frac{n!}{i!(n-i)!} \quad t \in [0,1] \end{aligned} \quad (6)$$

Куб эрэмбийн бизье муруйн хувьд дөрвөн цэгээр байгуулалт хийнэ. Энэхүү дөрвөн цэгийг харгалзан  $P_0, P_1, P_2, P_3$  гэе.

$$C_{3,3}(t) = (1-t)C_{2,2}(t) + tC_{2,1}(t) \quad (7)$$

$$C_{3,3}(t) = (1-t)^3 P_0 + 3t(1-t)^2 P_1 + 3t^2(1-t) P_2 + t^3 P_3$$

### С. Замын таректорыг байгуулах

$\vec{r}_T(t)$  замыг (7) Бизьегийн муруйгаар өгвөл:

$$\vec{r}_T(t) = (1-t)^3 P_0 + 3t(1-t)^2 P_1 + 3t^2(1-t) P_2 + t^3 P_3(8)$$

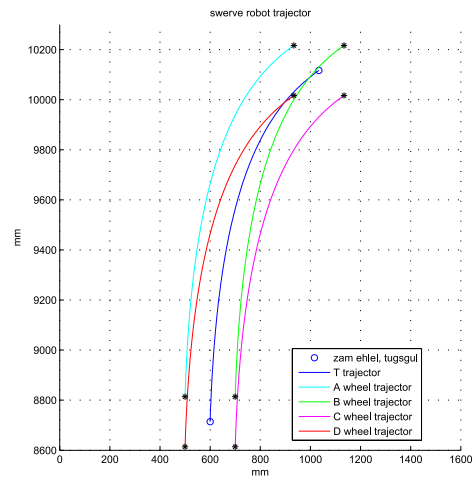
Дээрх (8) томъёог задлаад эмхтгэвэл  $\vec{r}_T(t)$  замын илэрхийлэл (9) хэлбэртэй болно[3].

$$\vec{r}_T(t) = Et^3 + Ft^2 + Gt + H \quad (9)$$

$$E = P_3 - 3P_2 + 3P_1 - P_0; F = 3P_2 - 6P_1 + 3P_0;$$

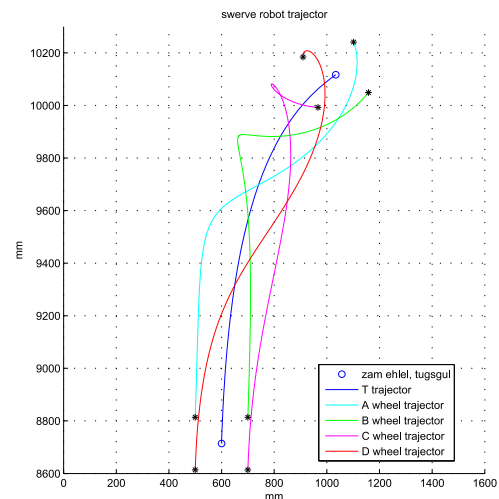
$$G = 3P_1 - 3P_0; H = P_0$$

1) Робот их биений эргэлтгүй үед:  $\vec{r}_T(t)$ -г (9) илэрхийллээр өгөх ба  $\theta_T(t)=0$  үед А, В, С, D дугуйнуудын үүсгэх замыг зураг3-д харуулав.



Зураг 3. А, В, С, D дугуйнуудын замыг тооцоолсон байдал.

2) Робот их биений эргэлттэй үед:  $\vec{r}_T(t)$ -г (9) илэрхийллээр,  $\theta_T(t)$ -г квадрат эрэмбын илэрхийллээр өгсөн үед А, В, С, D дугуйнуудын үүсгэх замыг зураг4-д харуулав.

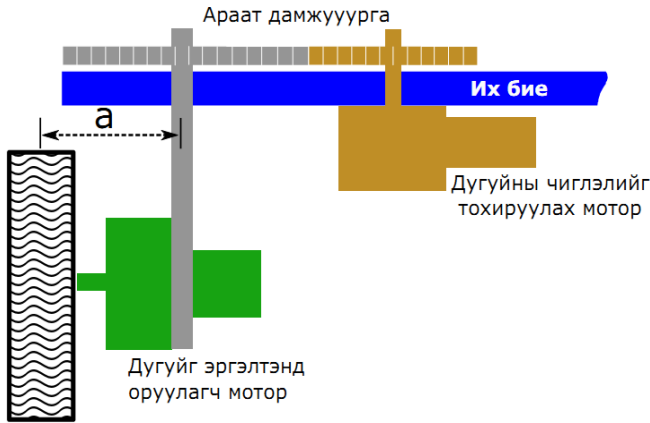


Зураг 4. А, В, С, D дугуйнуудын замыг тооцоолсон байдал.

### III. ДЭВШҮҮЛЖ БУЙ СВЭРВЭ РОБОТЫН ШИЙДЭЛ

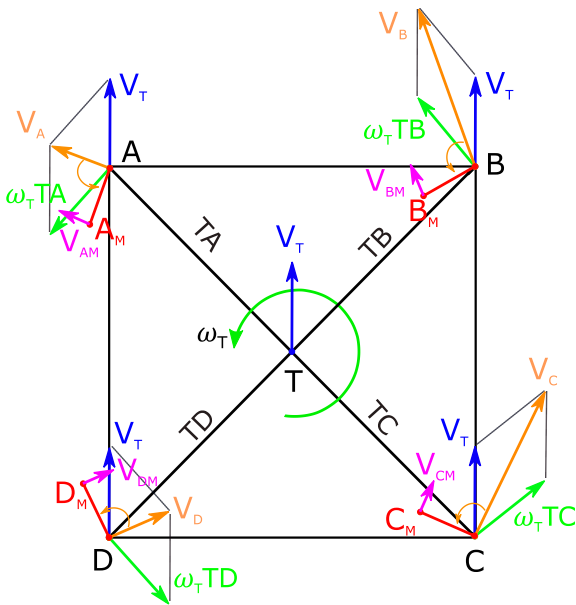
#### A. Свэрвэ роботын дэвшүүлж буй хэлбэр

Роботын дугуйнууд нь чиглүүлэгч эргэлтын тэнхлэгээс тодорхой зайд ('a' зайг дугуйг эргэлтэнд оруулагч моторын хүндийн төвийн байрлалаар сонгоно) байрласан нэг мөчийг зураг 5-д харуулсан байна. Свэрвэ роботын энэ шийдэл нь тооцооллын хувьд уламжлалт хэлбэрээсээ хүндрэлтэй боловч дугуйны чиглэлийг тохируулах моторын хувьд ачаалал бага үүсгэх бөгөөд чиглэлийг тохируулах хурд нэмэгдсэнээр роботын хурд нэмэгдэх боломжтой. Мөн "a" зайг мотор бүрийн хувьд ижил байлгах шаардлагагүй юм.



Зураг 5. Свэрвэ роботын дэвшүүлж буй хэлбэрийн нэг мөчийн үндсэн механик шийдэл

Энэ тохиолдолд дөрвөн дугуйт ( $A_M, B_M, C_M, D_M$ ) свэрвэ роботын хурдыг төвийн T цэгийн хувьд урьдчилан тодорхойлогдсон  $\vec{r}_T(t)$  зам болон  $\theta_T(t)$  гэсэн их биеийн эргэлтийн илэрхийллүүдээр өгөгдөнө гэж үзнэ (зураг 6). Моторын удирдлагын хувьд өмнөх шийдлээс ялгаатай нь  $A_M, B_M, C_M, D_M$  цэгүүд дээрх хурд нь A, B, C, D цэгүүд дээрх хурдуудаас ялгаатай байна.



Зураг 6. Свэрвэ роботын кинематик

$V_T$ -T цэгийн хурдны вектор,  $\omega_T$ TA-T цэгийн эргэлтийн шугаман хурд, A- чиглүүлэгч эргэлтын тэнхлэг,  $A_M$ - моторийн байрлал,  $V_{AM}$ -моторын хурд

Роботын анхны байрлалыг тодорхойлогч  $\vec{T\bar{A}}(0), \vec{T\bar{B}}(0), \vec{T\bar{C}}(0), \vec{T\bar{D}}(0), \vec{r}_T(0), \theta_T(0)$  өгөгдөх бөгөөд роботыг удирдахад шаардагдах  $\|\vec{V}_{AM}(t)\|, \|\vec{V}_{BM}(t)\|, \|\vec{V}_{CM}(t)\|, \|\vec{V}_{DM}(t)\|$  хурдны векторуудын норм болон роботын их биетэй харьцангуй  $\alpha_A, \alpha_B, \alpha_C, \alpha_D$  моторын мөчүүдийн өнцгүүдийг тодорхойлох даалгавар өгөгдөнө. TA, TB, TC, TD мөчүүдийн хэмжээ болон хоорондох өнцөг тэнцүү байх шаардлагагүй юм.

Моторуудын байрлалууд нь харгалзах хурдны нэгж векторыг цагийн зүүний эсрэг  $90^\circ$  эргүүлж мөчийн уртаар үржүүлсэнтэй тэнцүү байна. Дугуй тус бүрийн замын илэрхийлэл нь:

$$\begin{aligned} \vec{r}_{AM}(t) &= \vec{r}_A(t) + a \cdot \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \frac{\vec{v}_A(t)}{|\vec{v}_A(t)|} \\ \vec{r}_{BM}(t) &= \vec{r}_B(t) + b \cdot \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \frac{\vec{v}_B(t)}{|\vec{v}_B(t)|} \\ \vec{r}_{CM}(t) &= \vec{r}_C(t) + c \cdot \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \frac{\vec{v}_C(t)}{|\vec{v}_C(t)|} \\ \vec{r}_{DM}(t) &= \vec{r}_D(t) + d \cdot \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \frac{\vec{v}_D(t)}{|\vec{v}_D(t)|} \end{aligned} \quad (10)$$

Үүнд a, b, c, d нь нь чиглүүлэгч эргэлтын тэнхлэгээс дугуйны төв хүртлэх зай.

R эргэлтийн матрицын уламжлал нь:

$$\begin{aligned} \vec{T\bar{A}}(t) &= R * \vec{T\bar{A}}(0) \\ \vec{T\bar{B}}(t) &= R * \vec{T\bar{B}}(0) \\ \vec{T\bar{C}}(t) &= R * \vec{T\bar{C}}(0) \\ \vec{T\bar{D}}(t) &= R * \vec{T\bar{D}}(0) \end{aligned} \quad (11)$$

T цэгээс A, B, C, D цэгүүд үрүү чиглэсэн вектрыг (11) илэрхийллээр илэрхийлж болно. Мөн хурдний нэгж векторын уламжлалыг

$$\vec{n}_{VA} = \frac{\vec{v}_A(t)}{|\vec{v}_A(t)|} = \begin{pmatrix} \cos\left(\alpha_A - \frac{\pi}{2} + \theta_T(t)\right) \\ \sin\left(\alpha_A - \frac{\pi}{2} + \theta_T(t)\right) \end{pmatrix} \quad (12)$$

$$\vec{n}_{VAd} = \left(\frac{\vec{v}_A(t)}{|\vec{v}_A(t)|}\right)' = \omega_T(t) \begin{pmatrix} -\sin\left(\alpha_A - \frac{\pi}{2} + \theta_T(t)\right) \\ \cos\left(\alpha_A - \frac{\pi}{2} + \theta_T(t)\right) \end{pmatrix}$$

(12)-р илэрхийлж болно.

Эдгээр илэрхийллүүдээс хурдны вектор тус бүр нь:

$$\vec{V}_{AM}(t) = \vec{r}_{AM}(t)', \vec{V}_{BM}(t) = \vec{r}_{BM}(t)'$$

$$\vec{V}_{CM}(t) = \vec{r}_{CM}(t)', \vec{V}_{DM}(t) = \vec{r}_{DM}(t)' \quad \text{буюу}$$

$$R_{der} = \omega_T(t) * \begin{pmatrix} -\sin\theta_T(t) & -\cos\theta_T(t) \\ \cos\theta_T(t) & -\sin\theta_T(t) \end{pmatrix}; R_{90} = \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\vec{V}_{AM}(t) = \vec{V}_T(t) + \omega_T(t) * R_{der} * \vec{T\bar{A}}(0) + a * R_{90} * \vec{n}_{VAd}$$

$$\vec{V}_{BM}(t) = \vec{V}_T(t) + \omega_T(t) * R_{der} * \vec{T\bar{B}}(0) + b * R_{90} * \vec{n}_{VBder}$$

$$\vec{V}_{CM}(t) = \vec{V}_T(t) + \omega_T(t) * R_{der} * \vec{T\bar{C}}(0) + c * R_{90} * \vec{n}_{VCder}$$

$$\vec{V}_{DM}(t) = \vec{V}_T(t) + \omega_T(t) * R_{der} * \overline{TD}(0) + d * R_{90} * \vec{n}_{VDder} \quad (13)$$

Эргэлтийн матрицийн уламжлал нь:

$$\begin{pmatrix} \cos\theta_T(t) & -\sin\theta_T(t) \\ \sin\theta_T(t) & \cos\theta_T(t) \end{pmatrix}' = \omega_T(t) \begin{pmatrix} -\sin\theta_T(t) & -\cos\theta_T(t) \\ \cos\theta_T(t) & -\sin\theta_T(t) \end{pmatrix} \\ = \omega_T(t) \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\theta_T(t) & -\sin\theta_T(t) \\ \sin\theta_T(t) & \cos\theta_T(t) \end{pmatrix} \quad (14)$$

(4) илэрхийллийг (14) болон (11) илэрхийллүүдээр хувиргавал:

$$\begin{aligned} \vec{V}_A(t) &= \vec{V}_T(t) + \omega_T(t) * R_{90} * \overline{TA}(t) \\ \vec{V}_B(t) &= \vec{V}_T(t) + \omega_T(t) * R_{90} * \overline{TB}(t) \\ \vec{V}_C(t) &= \vec{V}_T(t) + \omega_T(t) * R_{90} * \overline{TC}(t) \\ \vec{V}_D(t) &= \vec{V}_T(t) + \omega_T(t) * R_{90} * \overline{TD}(t) \end{aligned} \quad (15)$$

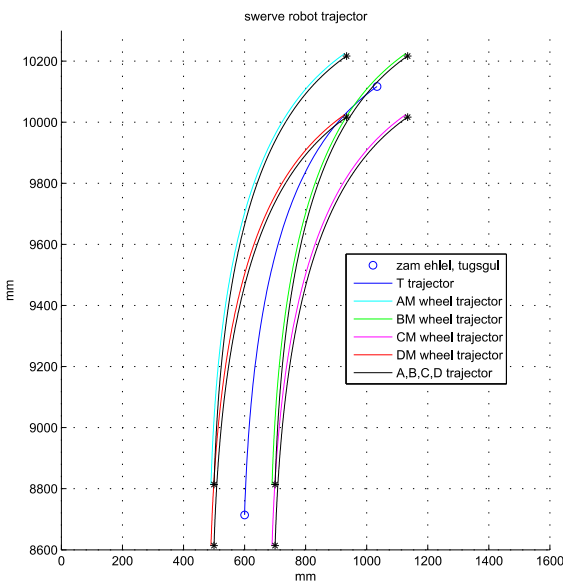
(13) илэрхийллийг (15) илэрхийллээр хувиргавал:

$$\begin{aligned} \vec{V}_{AM}(t) &= \vec{V}_T(t) + \omega_T(t) * R_{90} * \overline{TA}(t) + a * R_{90} * \vec{n}_{VAder} \\ \vec{V}_{BM}(t) &= \vec{V}_T(t) + \omega_T(t) * R_{90} * \overline{TB}(t) + b * R_{90} * \vec{n}_{VBder} \\ \vec{V}_{CM}(t) &= \vec{V}_T(t) + \omega_T(t) * R_{90} * \overline{TC}(t) + c * R_{90} * \vec{n}_{VCder} \\ \vec{V}_{DM}(t) &= \vec{V}_T(t) + \omega_T(t) * R_{90} * \overline{TD}(t) + d * R_{90} * \vec{n}_{VDder} \end{aligned} \quad (16)$$

Дугуй бүрийн тухайн агшинд байрлах өнцгийг (5) илэрхийллээр тодорхойлох бөгөөд харгалзах хурдыг (16) илэрхийл тус бүрээс нь норм авч  $\|\vec{V}_{AM}(t)\|$ ,  $\|\vec{V}_{BM}(t)\|$ ,  $\|\vec{V}_{CM}(t)\|$ ,  $\|\vec{V}_{DM}(t)\|$  утгуудаар тодорхойлно.

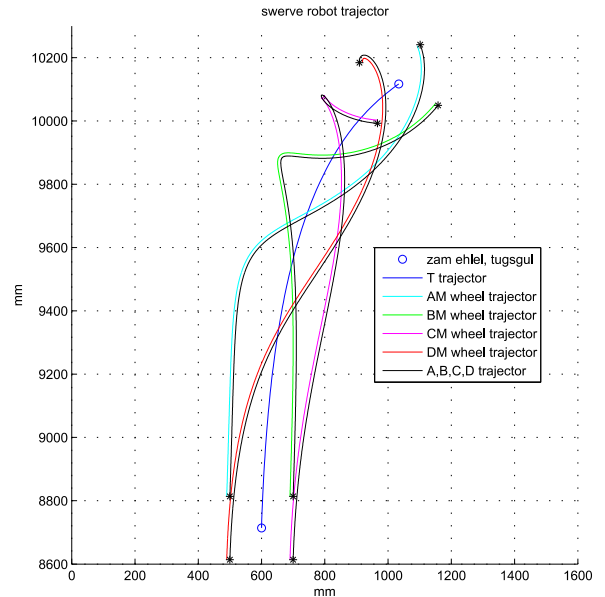
**В. Замын таректорыг байгуулах**

1) Робот их биеийн эргэлтгүй үед:  $\vec{r}_T(t)$ -г (9) илэрхийллээр өгөх ба  $\theta_T(t)=0$  үед А, В, С, D дугуйнуудын үүсгэх замыг зураг7-д харуулав.



Зураг 7. AM, BM, CM, DM дугуйнуудын замыг тооцоолсон байдал.

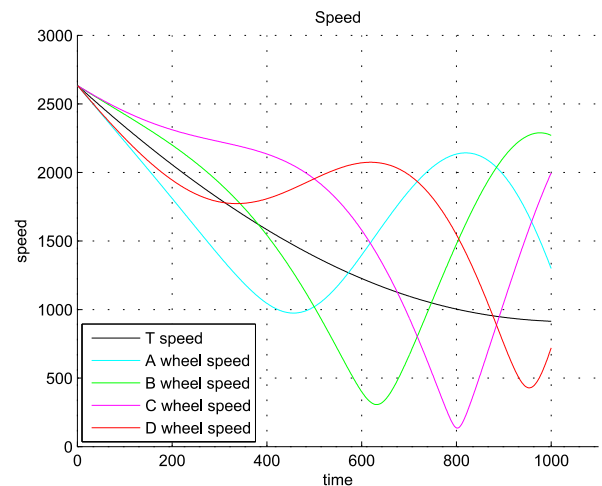
2) Робот их биеийн эргэлттэй үед:  $\vec{r}_T(t)$ -г (9) илэрхийллээр,  $\theta_T(t)$ -г квадрат эрэмбын илэрхийллээр өгсөн үед А, В, С, D дугуйнуудын үүсгэх замыг зураг8-д харуулав.



Зураг 8. AM, BM, CM, DM дугуйнуудын замыг тооцоолсон байдал.

**IV. БИЗЬЕГИЙН МУРУЙН ПАРАМЕТР БА БОДИТ ХУГАЦААНЫ ХАМААРАЛЫГ ТОДОРХОЙЛОХ**

Бизьегийн муруйн t паратетр нь  $t \in [0,1]$  утга авах бөгөөд бодит хугацаа биш юм. Тиймд бид дээрх туршилтуудыг бодит робот дээр хийхийн тулд t параметр болон бодит хугацааны хамаарлыг тооцоолох үйлдлийн хийх хэрэгтэй болно. Хэрэв Бизьегийн муруйгаар өгөгдсөн  $\vec{r}_T(t)$  илэрхийллээс  $\vec{V}_T(t)$ -г олж харгалзах  $\vec{V}_A(t)$ ,  $\vec{V}_B(t)$ ,  $\vec{V}_C(t)$ ,  $\vec{V}_D(t)$ -тай хамтатган графикаар илэрхийлвэл (Зураг 9) T цэгийн хурд байнага хувьсаж байгааг харж болно.



Зураг 9.  $\vec{V}_T(t)$ ,  $\vec{V}_A(t)$ ,  $\vec{V}_B(t)$ ,  $\vec{V}_C(t)$ ,  $\vec{V}_D(t)$  хурдыг илэрхийлсэн байдал.

Харин бидний хувьд T цэгийн хурдыг удирдах шаардлага тулгардаг. Тиймээ нэмэлтээр бидны тооцоолох

$\vec{V}_T(\tau)$  илэрхийллийг Т цэгийн бодит хугацаан дахь хурд хэмээн үзвэл.

$$\vec{V}_T(\tau) = J + \tau * K \quad (17)$$

(17) илэрхийллээр өгөгдвөл тохиромжтой хэмээн үзэж болно.

Иймд бид Т цэгийг  $\vec{V}_T(\tau)$  хурдад (18) харгалзах  $\vec{V}_A(\tau)$ ,  $\vec{V}_B(\tau)$ ,  $\vec{V}_C(\tau)$ ,  $\vec{V}_D(\tau)$  хурдуудыг дахин тооцоолох шаардлага тулгарах бөгөөд эдгээрийг (19) илэрхийллээр тодорхойлж зураг 10-д харуулсан байна.  $\vec{V}_{AE}(\tau)$ ,  $\vec{V}_{BE}(\tau)$ ,  $\vec{V}_{CE}(\tau)$ ,  $\vec{V}_{DE}(\tau)$  хурдуудыг (20) илэрхийллээр тодорхойлно.

$$\vec{V}_T(\tau) = \vec{r}_T(t(\tau))'_\tau = \vec{r}_T(t(\tau))'_t * t'_t = \vec{V}_T(t) * t'_t \quad (18)$$

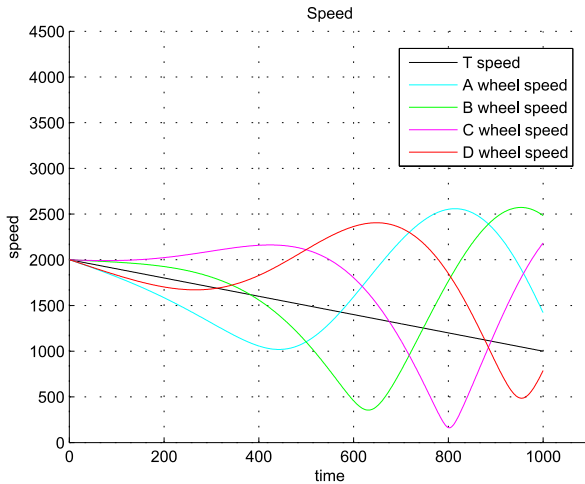
$$\begin{aligned} \vec{V}_A(\tau) &= \vec{r}_A(t(\tau))'_\tau = \vec{r}_A(t(\tau))'_t * t'_t \\ \vec{V}_B(\tau) &= \vec{r}_B(t(\tau))'_\tau = \vec{r}_B(t(\tau))'_t * t'_t \\ \vec{V}_C(\tau) &= \vec{r}_C(t(\tau))'_\tau = \vec{r}_C(t(\tau))'_t * t'_t \\ \vec{V}_D(\tau) &= \vec{r}_D(t(\tau))'_\tau = \vec{r}_D(t(\tau))'_t * t'_t \\ \vec{V}_{AE}(\tau) &= \vec{r}_{AE}(t(\tau))'_\tau = \vec{r}_{AE}(t(\tau))'_t * t'_t \\ \vec{V}_{BE}(\tau) &= \vec{r}_{BE}(t(\tau))'_\tau = \vec{r}_{BE}(t(\tau))'_t * t'_t \\ \vec{V}_{CE}(\tau) &= \vec{r}_{CE}(t(\tau))'_\tau = \vec{r}_{CE}(t(\tau))'_t * t'_t \\ \vec{V}_{DE}(\tau) &= \vec{r}_{DE}(t(\tau))'_\tau = \vec{r}_{DE}(t(\tau))'_t * t'_t \end{aligned} \quad (19)$$

$$t'_t = \frac{\vec{V}_T(\tau)}{\vec{V}_T(t)} = \frac{\vec{V}_A(\tau)}{\vec{V}_A(t)} = \frac{\vec{V}_B(\tau)}{\vec{V}_B(t)} = \frac{\vec{V}_C(\tau)}{\vec{V}_C(t)} = \frac{\vec{V}_D(\tau)}{\vec{V}_D(t)} \quad (21)$$

$$t'_t = \frac{\vec{V}_T(\tau)}{\vec{V}_T(t)} = \frac{\vec{V}_{AE}(\tau)}{\vec{V}_{AE}(t)} = \frac{\vec{V}_{BE}(\tau)}{\vec{V}_{BE}(t)} = \frac{\vec{V}_{CE}(\tau)}{\vec{V}_{CE}(t)} = \frac{\vec{V}_{DE}(\tau)}{\vec{V}_{DE}(t)} \quad (22)$$

Үүнээс  $\vec{V}_{AE}(\tau)$ ,  $\vec{V}_{BE}(\tau)$ ,  $\vec{V}_{CE}(\tau)$ ,  $\vec{V}_{DE}(\tau)$  хурдууд:

$$\begin{aligned} \vec{V}_{AE}(\tau) &= \frac{\vec{V}_T(\tau)}{\vec{V}_T(t)} * \vec{V}_{AE}(t) \\ \vec{V}_{BE}(\tau) &= \frac{\vec{V}_T(\tau)}{\vec{V}_T(t)} * \vec{V}_{BE}(t) \\ \vec{V}_{CE}(\tau) &= \frac{\vec{V}_T(\tau)}{\vec{V}_T(t)} * \vec{V}_{CE}(t) \\ \vec{V}_{DE}(\tau) &= \frac{\vec{V}_T(\tau)}{\vec{V}_T(t)} * \vec{V}_{DE}(t) \end{aligned} \quad (23)$$



Зураг 10.  $\vec{V}_T(\tau)$ ,  $\vec{V}_A(\tau)$ ,  $\vec{V}_B(\tau)$ ,  $\vec{V}_C(\tau)$ ,  $\vec{V}_D(\tau)$  хурдыг илэрхийлсэн байдал.

Симуляцийн үр дүнд үндэслэн дээрх тэгшитгэлүүдийг дөрвөн дугуйт свэрвэ роботын бодит загвар дээр ашиглах болгох боломжтой байна.

### ДҮГНЭЛТ

Энэхүү судалгааны ажлаар кинематик тооцоон дээр тулгуурлан свэрвэ роботын уламжлалт хэлбэр болон дэвшүүлж буй шийдлээр роботыг координат тодорхойлох хэрэгсэлгүйгээр урьдчилан тодорхойлсон замын дагуу явуулах тооцооллыг хийж, эхний аргачлалын хувьд роботыг удирдах (4), (5), хоёр дахи аргачлалын хувьд (16), (5) илэрхийллүүдийг гарган авлаа. (2), (10) дугуйны таректорын илэрхийллүүдийг шалгахын тулд MATLAB програмын орчинд  $\vec{r}_T(t)$ -г бизьегийн муруйгаар,  $\theta_T(t)$ -г квадрат эрэмбын илэрхийллээр өгч симуляцийн үр дүнг зурган хэлбэрээр орууллаа. Бидний дэвшүүлж буй шийдэл нь роботын хийцийн хувьд төвөгтэй байдлыг (роботын дугуйнуудыг чиглүүлэгч эргэлтын тэнхлэгтэй давхцан байрлуулах шаардлагаас үүдэх хүндрэл) хялбаршуулах бөгөөд эдгээр илэрхийллүүдийг ашиглан та өөрийн роботийн хийц, онцлог хэлбэрт тохирсон удирдлагыг гүйдэтгэж чадах юм. Мөн цаашлаад чиглүүлэгч эргэлтын тэнхлэг(A, B, C, D)-ээс тодорхой зайд байрласан энкодерын тасалдлын мэдээлэл ашиглан роботын координат сэргээх аргачлалыг тооцоолох боломжтой юм.

Бизьегийн муруйн илэрхийлийг ашиглан роботын зам төлөвлөлт хийж байгаа нь таректорыг илүү гөлгөр болгож, замыг дөт болгох, роботын хурд сааруулахгүй явуулах, энерги болон хугацааны хувьд хэмнэлт үүсгэх давуу талуудтай байдаг. Роботын төвийн Т цэгийн хурдыг удирдахын тулд t параметр болон бодит хугацааны хамаарлыг тооцоолох үйлдлийг хийж IV хэсэгт багтаасан болно.

### АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ

- [1] Jon Anderson, "Omni-Directional Drive and Mecanum: Team 1675 Style" FRC Mentor FRC Mentor, 2012.
- [2] J. Clerk Maxwell, "Derivation of the inverse kinematics for Swerve", 2011.
- [3] Г.Ганбат, "Залуурдагддаггүй тэнхлэг бүхий роботын координатыг хугацааны мэдээлэл ашиглаж олох алгоритм" 2013.
- [4] Andy Baker, "Omnidirectional Drive Systems Kinematics and Control", Ian Mackenzie, 2008 FIRST Robotics Conference.
- [5] Swerve Control Development 8-22-2012