

三自由度共振アクチュエータの 新しいベクトル制御法の提案



2017年10月27日
大阪大学大学院工学研究科
知能・機能創成工学専攻
◎加藤雅之
平田勝弘

目次

1. 研究背景・目的
2. 三自由度共振アクチュエータの構造・動作原理
 - 2.1. 基本構造
 - 2.2. 制御手法
3. 推力干渉の評価
 - 3.1. 静推力特性
 - 3.2. ベクトル制御下での推力特性
4. 新しいベクトル制御法
 - 4.1. 着想
 - 4.2. 数学モデルの導出
 - 4.3. 通常制御との比較
5. まとめ

研究背景

リニア共振アクチュエータ
可動子を直線往復運動させるアクチュエータ

小型・高速駆動

回転・直動の変換機構が不要

高効率

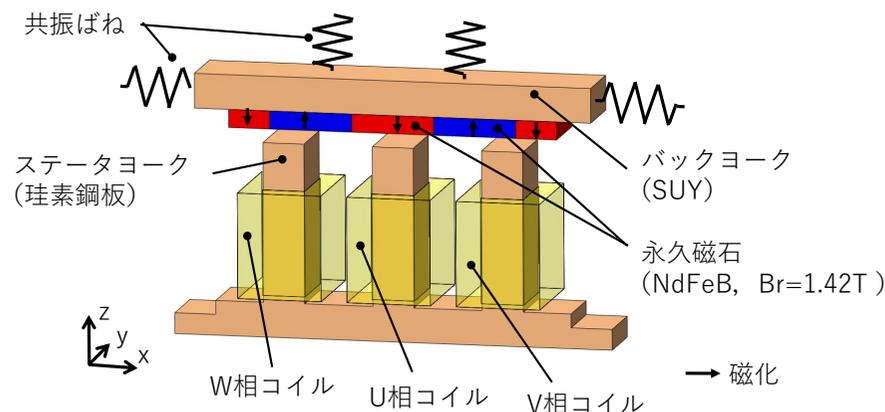
摩擦による損失小
機械共振の利用



応用例
電気シェーバ
エアコンプレッサ
人工心臓など

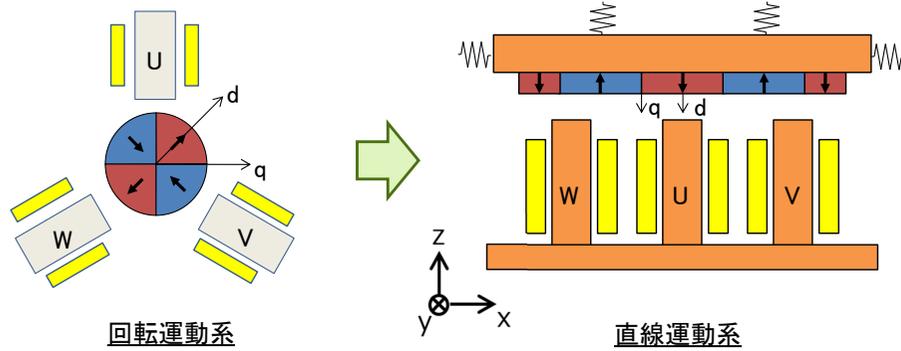
近年、小型化・高機能化が求められている
⇒リニア共振アクチュエータの多自由度化

二自由度共振アクチュエータ^[1]



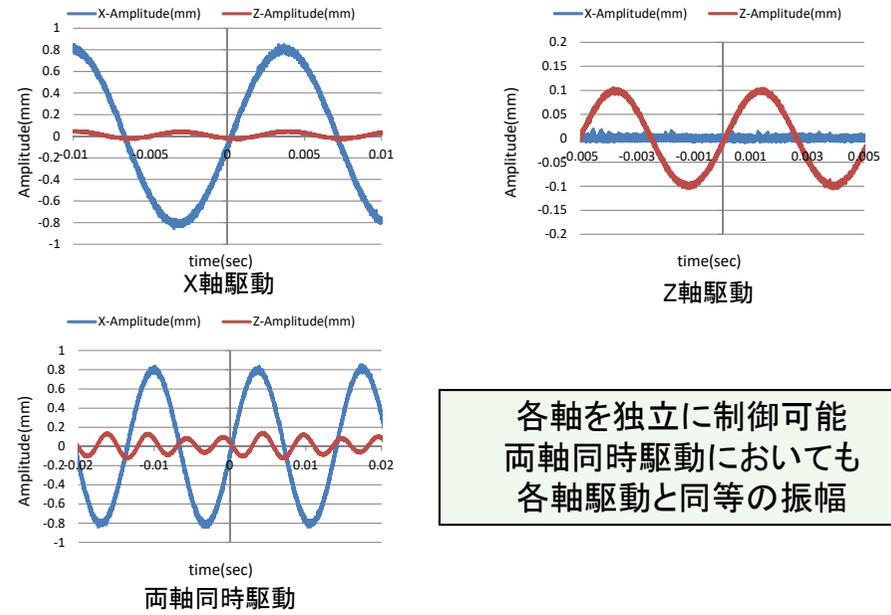
初期エアギャップ 1.0mm 駆動領域 X軸方向±1.2mm
Z軸方向±0.5mm

ベクトル制御の適用



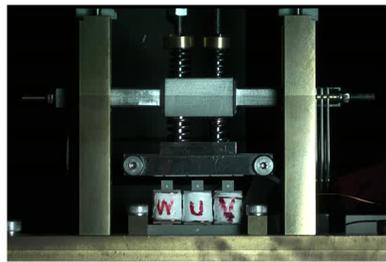
トルク電流 (i_q) を X 軸方向推力成分,
 界磁電流 (i_d) を Z 軸方向推力成分
 として扱い, 各軸方向の駆動を独立に制御

動作特性解析結果

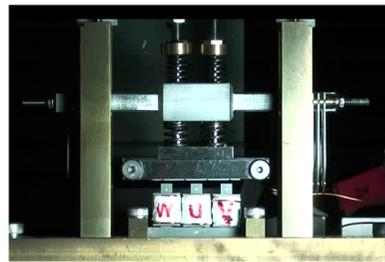


各軸を独立に制御可能
 両軸同時駆動においても
 各軸駆動と同等の振幅

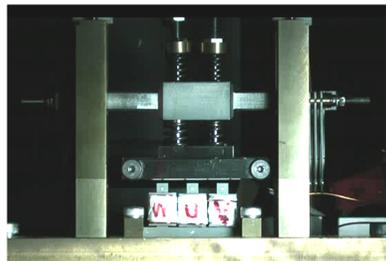
実験結果 -ストロボ撮影-



X軸駆動

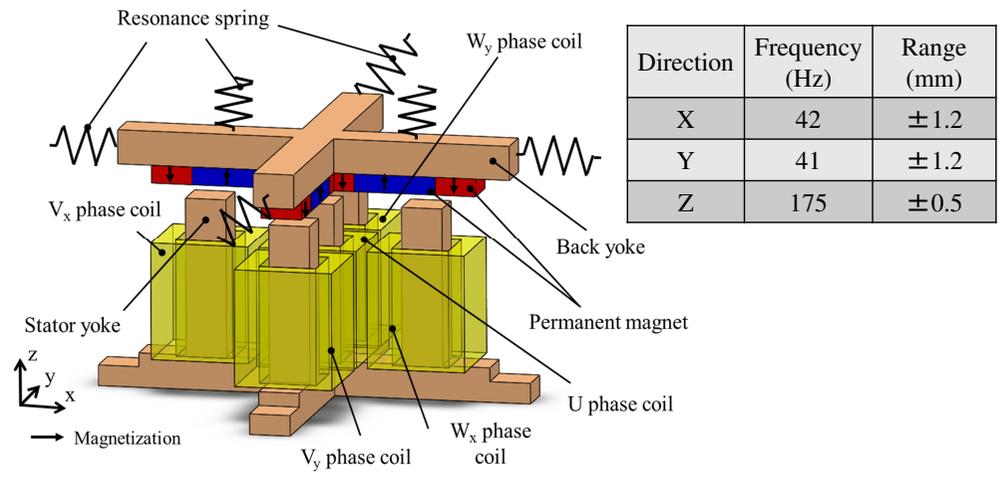


Z軸駆動



両軸同時駆動

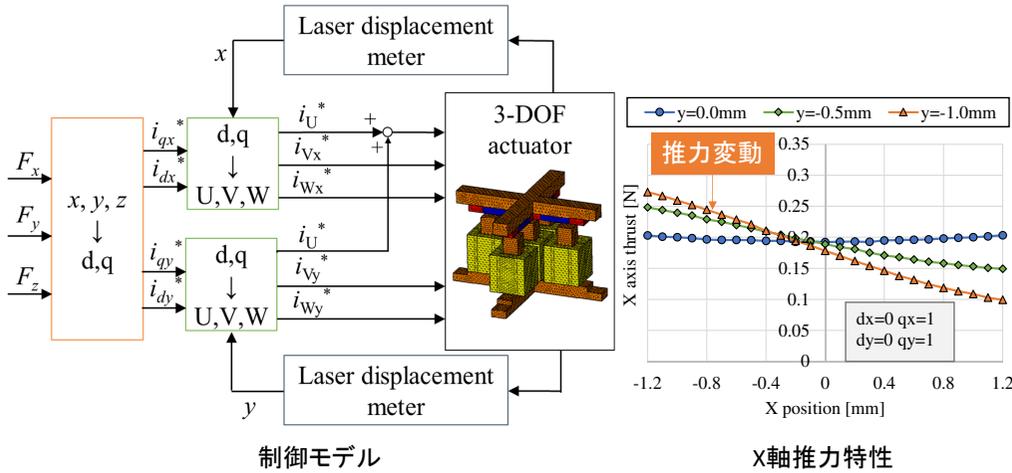
三自由度への拡張



二自由度アクチュエータをy方向に拡張した
 三自由度共振アクチュエータ^[2]を提案

[2] 藤田, 平田, 加藤, “三自由度共振アクチュエータの提案,” 電気学会 リニアドライブ研究会資料, LD-17-019, 2017

課題



各軸方向に独立な座標変換モデル
軸間の推力干渉が発生
⇒提案アクチュエータに適したベクトル制御法が必要

研究目的・方針

研究目的

➢三自由度共振アクチュエータに適用可能な新しいベクトル制御法の提案

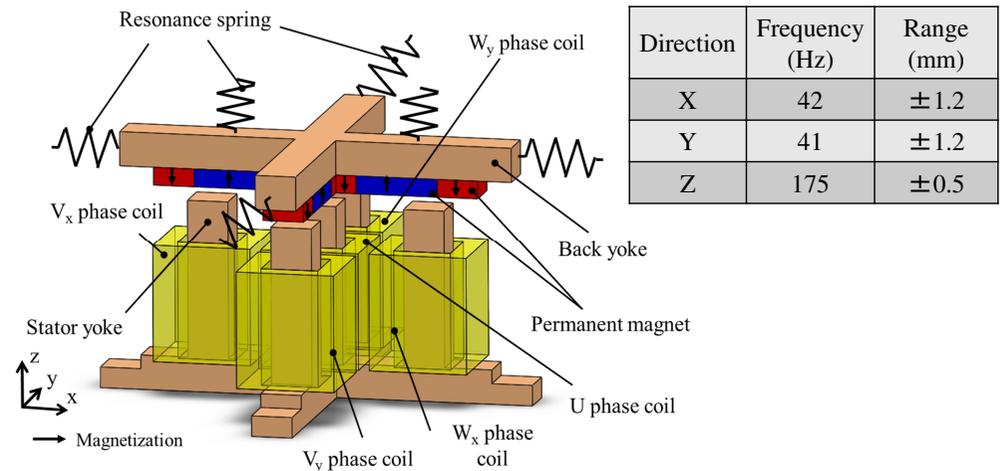
方針

- 各相の推力特性に着目
- U相を使用しない四相駆動を提案
- 新たな座標変換の数学モデルを構築

目次

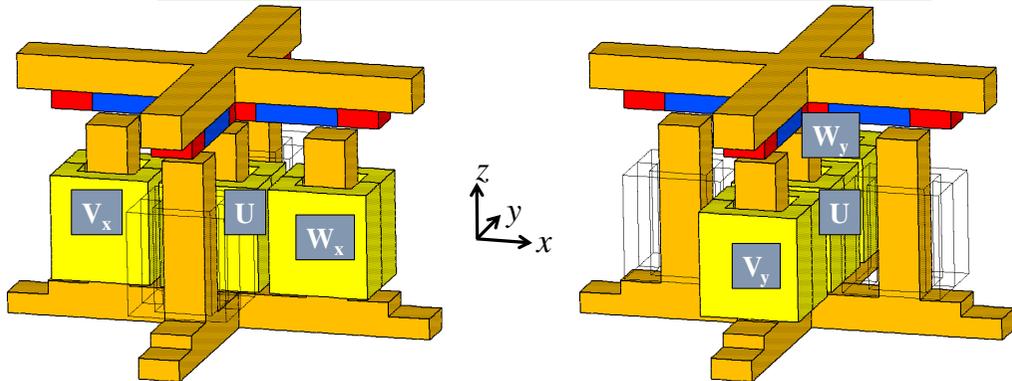
- 1.研究背景・目的
- 2.三自由度共振アクチュエータの構造・動作原理
 - 2.1.基本構造
 - 2.2.制御手法
- 3.推力干渉の評価
 - 3.1.静推力特性
 - 3.2.ベクトル制御下での推力特性
- 4.新しいベクトル制御法
 - 4.1.着想
 - 4.2.数学モデルの導出
 - 4.3.通常制御との比較
- 5.まとめ

三自由度アクチュエータの基本構造



・二自由度アクチュエータをy方向に拡張
・5相のコイルで三軸方向の駆動を制御

ベクトル制御の適用 (三自由度)

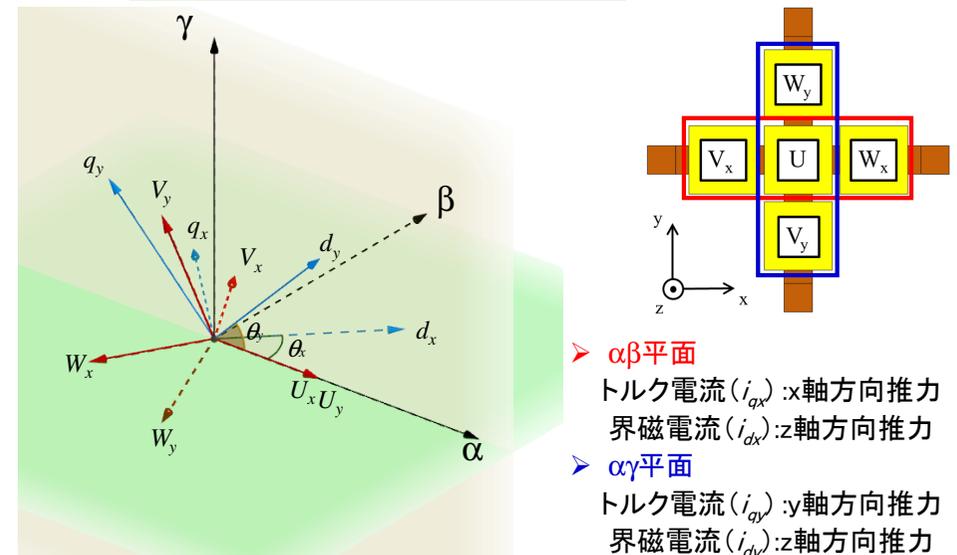


$$\begin{bmatrix} i_U \\ i_{Vx} \\ i_{Wx} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta_x & -\sin \theta_x \\ \cos(\theta_x - 2/3\pi) & -\sin(\theta_x - 2/3\pi) \\ \cos(\theta_x + 2/3\pi) & -\sin(\theta_x + 2/3\pi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dx} \\ i_{qx} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} i_U \\ i_{Vy} \\ i_{Wy} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta_y & -\sin \theta_y \\ \cos(\theta_y - 2/3\pi) & -\sin(\theta_y - 2/3\pi) \\ \cos(\theta_y + 2/3\pi) & -\sin(\theta_y + 2/3\pi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dy} \\ i_{qy} \end{bmatrix}$$

x軸, y軸それぞれに対し逆dq変換から指令電流を計算

ベクトル制御の適用 (三自由度)

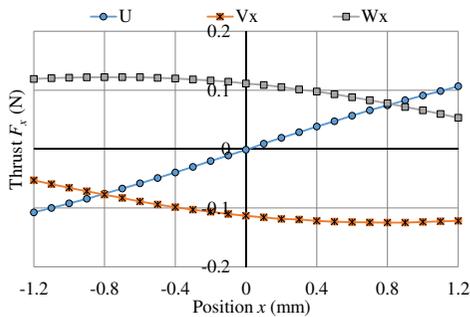


- **αβ平面**
トルク電流 (i_{qx}): x軸方向推力
界磁電流 (i_{dx}): z軸方向推力
- **αγ平面**
トルク電流 (i_{qy}): y軸方向推力
界磁電流 (i_{dy}): z軸方向推力

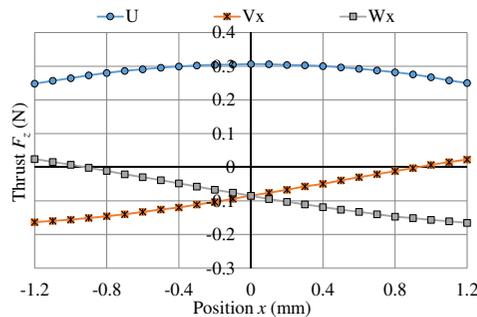
2平面にそれぞれx軸方向とY軸方向の推力成分が存在

電流推力特性

起磁力:45AT



x軸方向

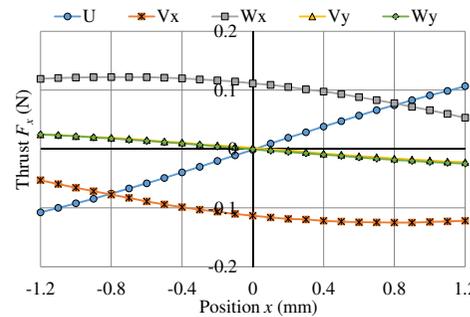


z軸方向

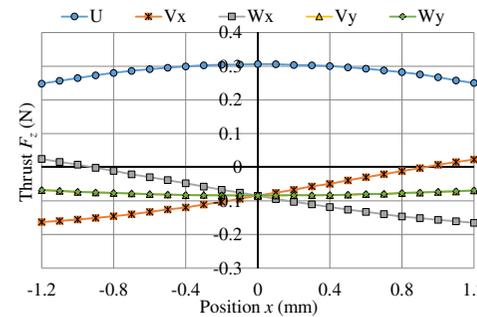
各相ともに位相が120度ずれた正弦波状の推力特性
x軸推力とz軸推力では90度ずれた状態

電流推力特性

起磁力:45AT



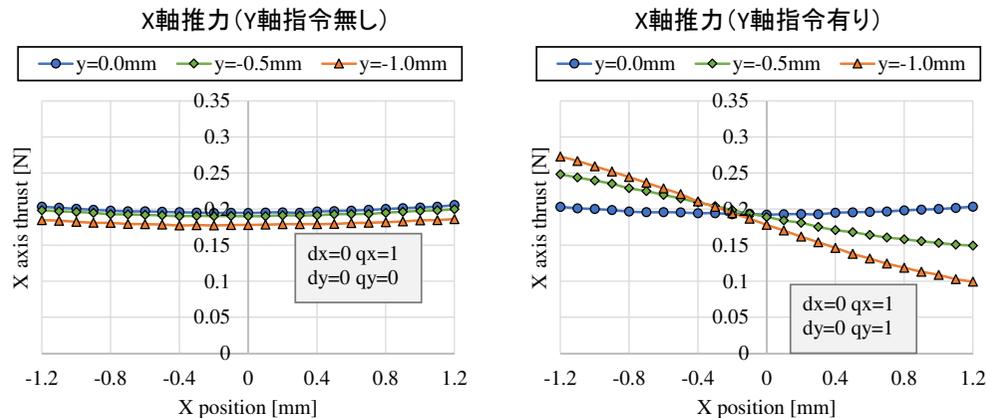
x軸方向



z軸方向

・可動子と磁極の位置関係によりVy, Wy相にも推力が発生
・それらの推力はU相と同位相

推力一定性の評価



推力の干渉要因

①他軸の変位 ②他軸の指令電流

“多軸同時駆動”する場合に厳密な振幅制御は困難

疑似逆行列による電流決定

逆dq変換から決定

$$\begin{bmatrix} i_U \\ i_{V_j} \\ i_{W_j} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta_j & -\sin\theta_j \\ \cos(\theta_j - 2/3\pi) & -\sin(\theta_j - 2/3\pi) \\ \cos(\theta_j + 2/3\pi) & -\sin(\theta_j + 2/3\pi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dj} \\ i_{qj} \end{bmatrix}$$

疑似逆行列から決定

$$[F(x, y)] = \begin{bmatrix} \phi_U^x & \phi_{V_x}^x & \phi_{W_x}^x & \phi_{V_y}^x & \phi_{W_y}^x \\ \phi_U^y & \phi_{V_x}^y & \phi_{W_x}^y & \phi_{V_y}^y & \phi_{W_y}^y \\ \phi_U^z & \phi_{V_x}^z & \phi_{W_x}^z & \phi_{V_y}^z & \phi_{W_y}^z \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} I_U \\ I_{V_x} \\ I_{W_x} \\ I_{V_y} \\ I_{W_y} \end{bmatrix} = [F]^+ \begin{bmatrix} F_z \\ F_x \\ F_y \end{bmatrix}$$

推力定数行列を予め作成し疑似逆行列を解き、指令電流を算出

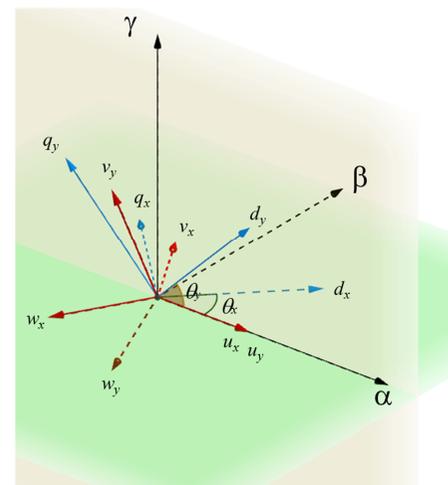
✓ 推力一定性を確保できる

✓ 疑似逆行列による演算コストの増大

目次

1. 研究背景・目的
2. 三自由度共振アクチュエータの構造・動作原理
 - 2.1. 基本構造
 - 2.2. 制御手法
3. 推力干渉の評価
 - 3.1. 静推力特性
 - 3.2. ベクトル制御下での推力特性
4. 新しいベクトル制御法
 - 4.1. 着想
 - 4.2. 数学モデルの導出
 - 4.3. 通常制御との比較
5. まとめ

着想① 5相での座標変換



$$\begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos 0 & \cos \frac{2}{3}\pi & \cos \frac{4}{3}\pi & \cos \frac{2}{3}\pi & \cos \frac{4}{3}\pi \\ \sin 0 & \sin \frac{2}{3}\pi & \sin \frac{4}{3}\pi & 0 & 0 \\ \sin 0 & 0 & 0 & \sin \frac{2}{3}\pi & \sin \frac{4}{3}\pi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U \\ V_x \\ W_x \\ V_y \\ W_y \end{bmatrix}$$

巻線座標系(5相)から固定子座標系(3相)への変換

変換の不成立

巻線座標(5相) → 固定子座標(αβγ) 固定子座標(αβγ) → 巻線座標(5相)

$$\begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos 0 & \cos \frac{2}{3}\pi & \cos \frac{4}{3}\pi & \cos \frac{2}{3}\pi & \cos \frac{4}{3}\pi \\ \sin 0 & \sin \frac{2}{3}\pi & \sin \frac{4}{3}\pi & 0 & 0 \\ \sin 0 & 0 & 0 & \sin \frac{2}{3}\pi & \sin \frac{4}{3}\pi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U \\ V_x \\ W_x \\ V_y \\ W_y \end{bmatrix} \quad [C^{5 \rightarrow 3}]$$

$$\begin{bmatrix} U \\ V_x \\ W_x \\ V_y \\ W_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos 0 & \sin 0 & \sin 0 \\ \cos \frac{2}{3}\pi & \sin \frac{2}{3}\pi & 0 \\ \cos \frac{4}{3}\pi & \sin \frac{4}{3}\pi & 0 \\ \cos \frac{2}{3}\pi & 0 & \sin \frac{2}{3}\pi \\ \cos \frac{4}{3}\pi & 0 & \sin \frac{4}{3}\pi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{bmatrix} \quad [C^{3 \rightarrow 5}]$$

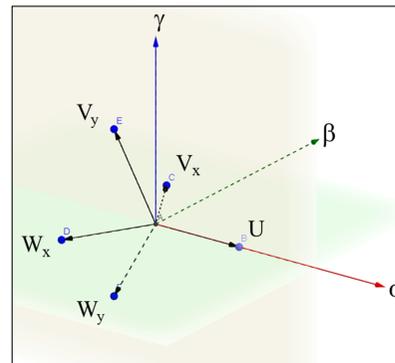
座標変換の確認

$$\begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{bmatrix} = [C^{5 \rightarrow 3}] \begin{bmatrix} U \\ V_x \\ W_x \\ V_y \\ W_y \end{bmatrix} = [C^{5 \rightarrow 3}] [C^{3 \rightarrow 5}] \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 \\ 0 & 3/2 & 0 \\ 0 & 0 & 3/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{bmatrix} \neq [I] \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{bmatrix}$$

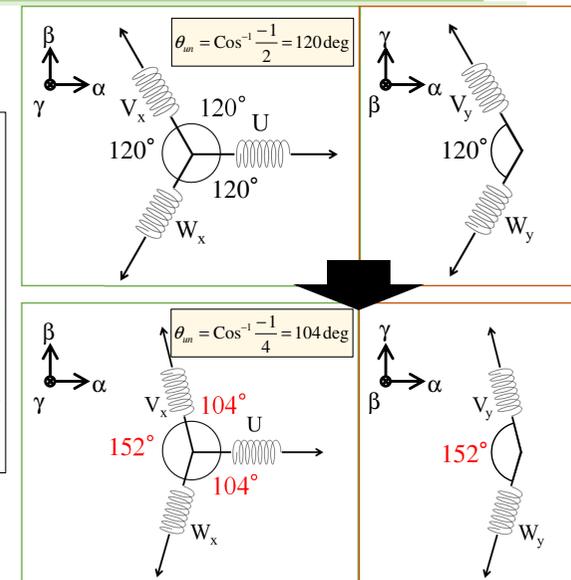
従来の電気角位相(120度)では正しく座標変換できない

零相が定義できる条件

$$U + V_x + W_x + V_y + W_y \neq 0$$



$$U + V_x + W_x + V_y + W_y = 0$$



$\theta_{un} = 104 \text{ deg. } (\cos \theta_{un} = -1/4)$ のとき, 電流の総和がゼロ

絶対変換(電力不変)

巻線座標(5相) → 固定子座標(αβγ) 固定子座標(αβγ) → 巻線座標(5相)

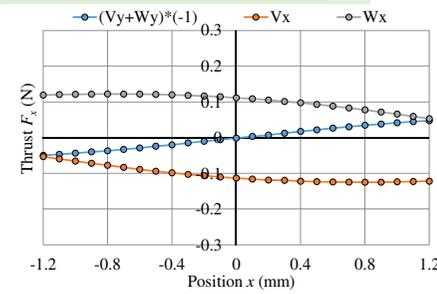
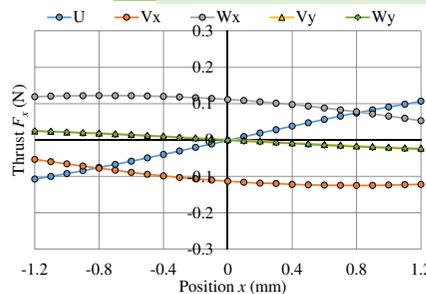
$$\begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{bmatrix} = k \begin{bmatrix} \cos 0 & \cos \theta_{un} & \cos \theta_{un} & \cos \theta_{un} & \cos \theta_{un} \\ \sin 0 & \sin \theta_{un} & -\sin \theta_{un} & 0 & 0 \\ \sin 0 & 0 & 0 & \sin \theta_{un} & -\sin \theta_{un} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U \\ V_x \\ W_x \\ V_y \\ W_y \end{bmatrix} \quad [C^{5 \rightarrow 3}]$$

$$\begin{bmatrix} U \\ V_x \\ W_x \\ V_y \\ W_y \end{bmatrix} = k \begin{bmatrix} \cos 0 & \sin 0 & \sin 0 \\ \cos \theta_{un} & \sin \theta_{un} & 0 \\ \cos \theta_{un} & -\sin \theta_{un} & 0 \\ \cos \theta_{un} & 0 & \sin \theta_{un} \\ \cos \theta_{un} & 0 & -\sin \theta_{un} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{bmatrix} \quad [C^{3 \rightarrow 5}]$$

$$k^2 [C^{5 \rightarrow 3}] [C^{3 \rightarrow 5}] = k^2 \begin{bmatrix} 1 + 4 \cos^2 \theta_{un} & 0 & 0 \\ 0 & 2 \sin^2 \theta_{un} & 0 \\ 0 & 0 & 2 \sin^2 \theta_{un} \end{bmatrix} \Rightarrow \cos \theta_{un} = -\frac{1}{\sqrt{6}} \Rightarrow \theta_{un} \cong 114 \text{ deg.}$$

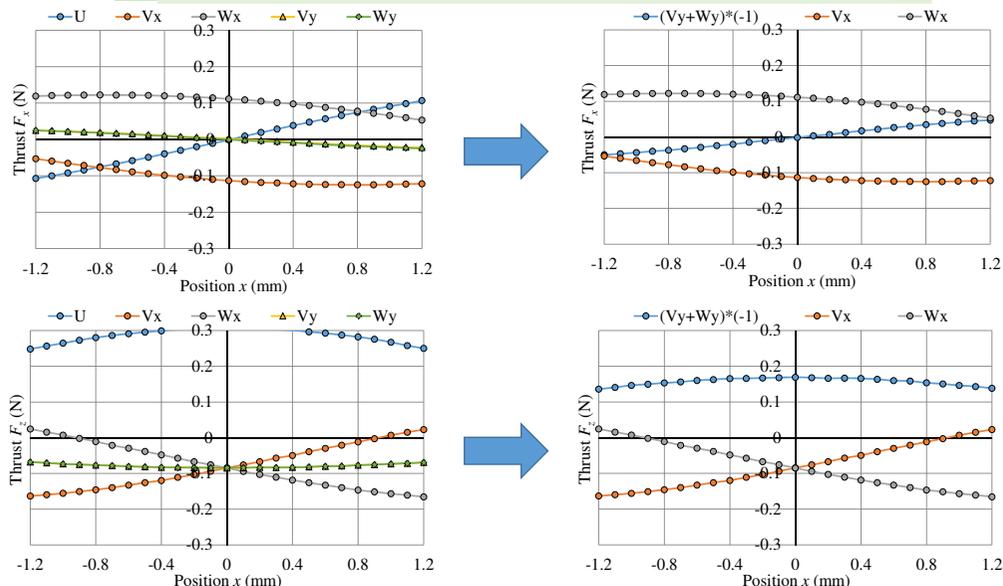
$\theta_{un} = 114 \text{ deg. } (\cos \theta_{un} = -1/\sqrt{6})$ のとき, 絶対変換が成立
 $\theta_{un} = 104 \text{ deg. } (\cos \theta_{un} = -1/4)$ のとき, 零相が定義可能
しかし, 二つの条件は両立しない

着想② 推力特性の位相



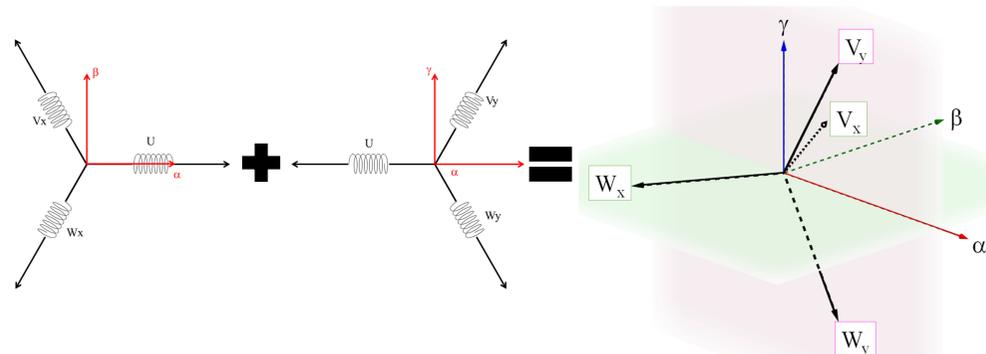
(Vy+W_y)相がU相を代替できる可能性がある

着想② 推力特性の位相



(Vy+Wy)相がU相を代替できる可能性がある

四相駆動の提案



Four phase (V_x, W_x, V_y, W_y)

四相駆動の場合、以下のような対応関係が成立

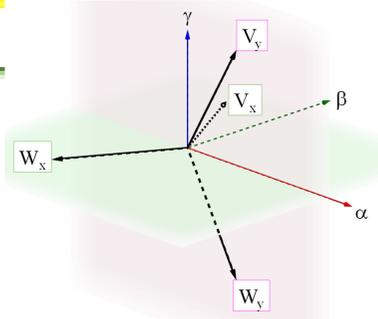
1. d軸: Z軸推力
2. q_x軸: X軸推力
3. q_y軸: Y軸推力
4. 0軸: 対称性によりゼロ

座標変換 (αβγ変換)

V_xW_xV_yW_y (4phase) → αβγ0 (4phase)

$$\begin{bmatrix} S_\alpha \\ S_\beta \\ S_\gamma \\ S_0 \end{bmatrix} = k \begin{bmatrix} \cos \theta_{un} & \cos \theta_{un} & -\cos \theta_{un} & -\cos \theta_{un} \\ \sin \theta_{un} & -\sin \theta_{un} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sin \theta_{un} & -\sin \theta_{un} \\ a & a & a & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{V_x} \\ S_{W_x} \\ S_{V_y} \\ S_{W_y} \end{bmatrix}$$

[C]



絶対変換

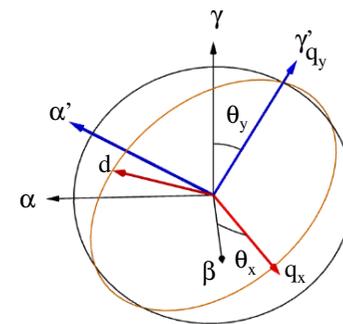
$$k^2 [C][C]^T = k^2 \begin{bmatrix} 4 \cos^2 \theta_{un} & & & \\ & 2 \sin^2 \theta_{un} & & \\ & & 2 \sin^2 \theta_{un} & \\ & & & 4a^2 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{cases} \theta_{un} \cong 125 \text{ deg.} \Leftrightarrow \cos \theta_{un} = -\frac{1}{\sqrt{3}} \\ k = \frac{\sqrt{3}}{2} \\ a = \frac{1}{\sqrt{3}} \end{cases}$$

4相駆動の場合でもαβγ空間への座標変換を導出可能

オイラー角(β-γ)によるdq変換

αβγ0 (4phase) → dq_xq_y0

$$\begin{bmatrix} S_d \\ S_{q_x} \\ S_{q_y} \\ S_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_x \cos \theta_y & \sin \theta_x & \cos \theta_x \sin \theta_y & 0 \\ -\sin \theta_x \cos \theta_y & \cos \theta_x & -\sin \theta_x \sin \theta_y & 0 \\ -\sin \theta_y & 0 & \cos \theta_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_\alpha \\ S_\beta \\ S_\gamma \\ S_0 \end{bmatrix}$$



V_xW_xV_yW_y (4phase) → dq_xq_y0

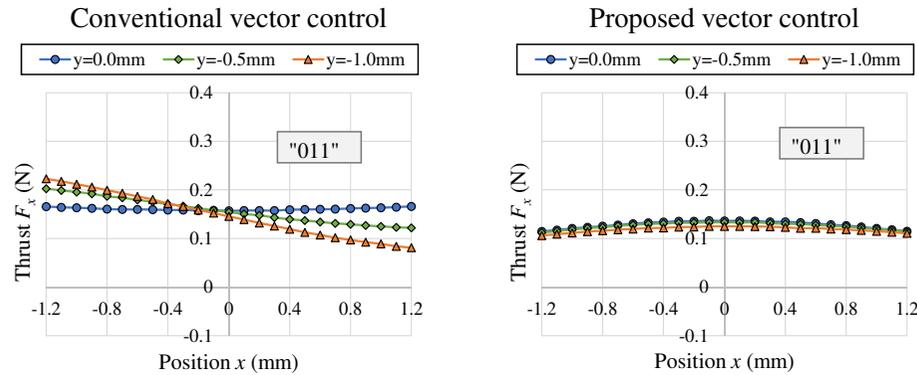
$$\begin{bmatrix} S_d \\ S_{q_x} \\ S_{q_y} \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{3}}{2} \begin{bmatrix} c\theta_x c\theta_y c\theta_{un} + s\theta_x s\theta_{un} & c\theta_x c\theta_y c\theta_{un} - s\theta_x s\theta_{un} & -c\theta_x c(\theta_y + \theta_{un}) & -c\theta_x c(\theta_y + \theta_{un}) \\ -s\theta_x c\theta_y c\theta_{un} + c\theta_x s\theta_{un} & -s\theta_x c\theta_y c\theta_{un} - c\theta_x s\theta_{un} & s\theta_x c(\theta_y + \theta_{un}) & s\theta_x c(\theta_y - \theta_{un}) \\ -s\theta_y s\theta_{un} & -s\theta_y s\theta_{un} & s(\theta_y + \theta_{un}) & s(\theta_y + \theta_{un}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{V_x} \\ S_{W_x} \\ S_{V_y} \\ S_{W_y} \end{bmatrix}$$

※ cθ = cos θ
sθ = sin θ

オイラー角を活用することにより、空間内のdq変換を定義可能

提案法の効果 (X軸方向推力)

※3つの数字は“d, qx, qy”軸の指令電流を表す



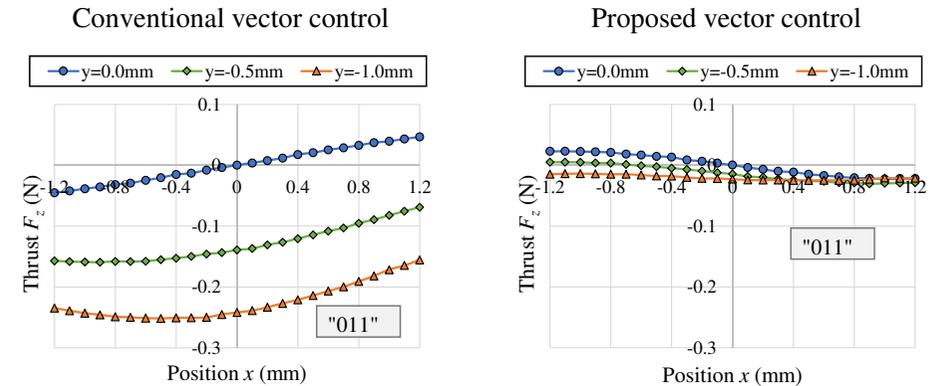
$$F = [\Phi]^T [I] = \frac{4}{3} \Phi_x I$$

$$F = [\Phi]^T [I] = \frac{3}{2} \Phi_x I$$

推力の一定性が大幅に向上
理論上、わずかに平均推力は低下する

提案法の効果 (Z軸方向推力)

※3つの数字は“d, qx, qy”軸の指令電流を表す



推力の干渉を大幅に低減できることを確認
その効果はX軸方向よりも顕著

まとめ

研究目的

- 三自由度共振アクチュエータに適用可能な新しいベクトル制御法の提案

成果

- U相を使用しない4相駆動を提案
- 数学的に厳密に座標変換を導出可能
- 推力干渉を大幅に低減できることを確認

今後の展望

- 電圧方程式の導出
- 提案制御適用時の動的評価