

三相誘導モータのベクトル制御 アルゴリズム編

R01AN2193JJ0100
Rev.1.00
2014.09.05

要旨

本アプリケーションノートでは、ルネサス製マイクロコントローラのサンプルプログラムで使用する三相誘導モータのベクトル制御アルゴリズムについて説明します。

目次

1. 概説	2
2. 三相誘導モータ電圧方程式	2
3. 間接形ベクトル制御	7

1. 概説

本アプリケーションノートでは、ルネサス製マイクロコントローラのサンプルプログラムで使用する三相誘導モータのベクトル制御アルゴリズムについて説明します。

2. 三相誘導モータ電圧方程式

2.1 三相誘導モータの制御モデル

三相誘導モータの電圧方程式は下記の様に表すことができます。

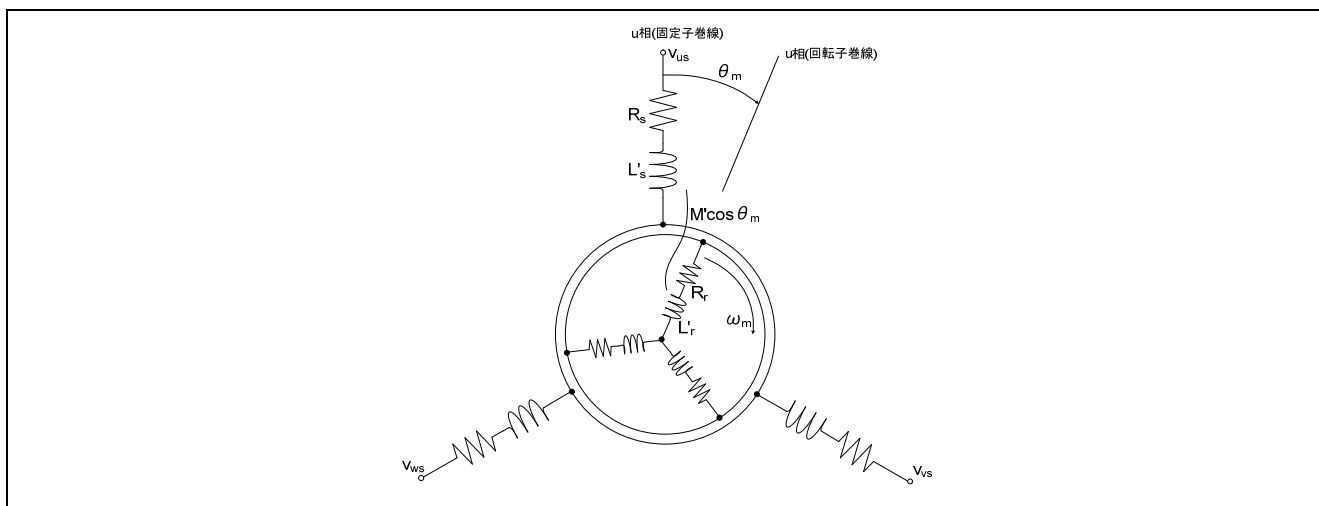


図 2-1 三相誘導モータの概念図

$$\begin{pmatrix} V_{us} \\ V_{vs} \\ V_{ws} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_s + PL_s' & -P\frac{M'}{2} & -P\frac{M'}{2} & PM'\cos\theta_m & PM'\cos\left(\theta_m + \frac{2\pi}{3}\right) & PM'\cos\left(\theta_m - \frac{2\pi}{3}\right) \\ -P\frac{M'}{2} & R_s + PL_s' & -P\frac{M'}{2} & PM'\cos\left(\theta_m - \frac{2\pi}{3}\right) & PM'\cos\theta_m & PM'\cos\left(\theta_m + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -P\frac{M'}{2} & -P\frac{M'}{2} & R_s + PL_s' & PM'\cos\left(\theta_m + \frac{2\pi}{3}\right) & PM'\cos\left(\theta_m - \frac{2\pi}{3}\right) & PM'\cos\theta_m \\ PM'\cos\theta_m & PM'\cos\left(\theta_m - \frac{2\pi}{3}\right) & PM'\cos\left(\theta_m + \frac{2\pi}{3}\right) & R_r + PL_r' & -P\frac{M'}{2} & -P\frac{M'}{2} \\ PM'\cos\left(\theta_m + \frac{2\pi}{3}\right) & PM'\cos\theta_m & PM'\cos\left(\theta_m - \frac{2\pi}{3}\right) & -P\frac{M'}{2} & R_r + PL_r' & -P\frac{M'}{2} \\ PM'\cos\left(\theta_m - \frac{2\pi}{3}\right) & PM'\cos\left(\theta_m + \frac{2\pi}{3}\right) & PM'\cos\theta_m & -P\frac{M'}{2} & -P\frac{M'}{2} & R_r + PL_r' \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{us} \\ i_{vs} \\ i_{ws} \\ i_{ur} \\ i_{vr} \\ i_{wr} \end{pmatrix} \quad \dots\dots(1)$$

$$L_s' = l_s + M', \quad L_r' = l_r + M'$$

V_u, V_v, V_w : 角相固定子電圧

i_{us}, i_{vs}, i_{ws} : 各相固定子電流

i_{ur}, i_{vr}, i_{wr} : 各相回転子電流

R_s : 固定子巻線抵抗

R_r : 回転子巻線抵抗

P : 微分演算子

θ_m : U相固定子巻線からU相回転子巻線の角度

L_s' : 固定子巻線自己インダクタンス

L_r' : 回転子巻線自己インダクタンス

l_s : 固定子巻線漏れインダクタンス

l_r : 回転子巻線漏れインダクタンス

M' : 各巻線間相互インダクタンス

2.2 モータ制御システムの電圧方程式

2.2.1 $\alpha\beta$ 変換

三相交流の電圧方程式を座標変換し、二軸直流で表します。

まず二相交流で表す為に、下記の変換行列を用いて $\alpha\beta$ 変換を行います。

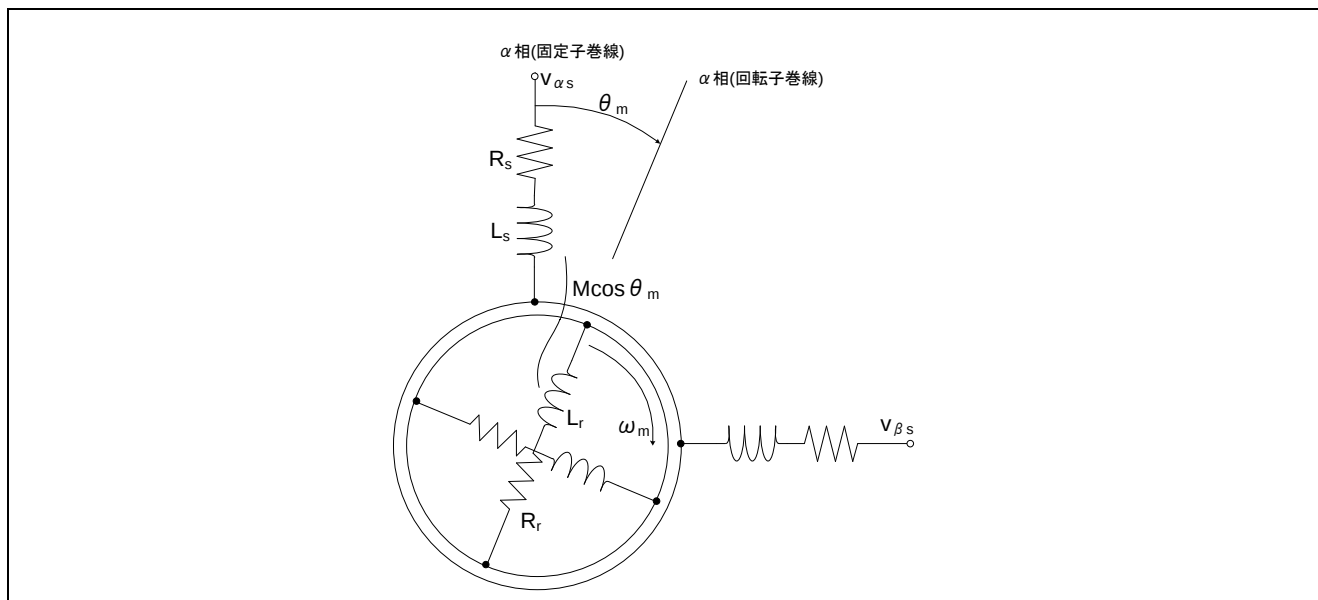


図 2-2 $\alpha\beta$ 変換後の概念図

$$C = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{pmatrix} \quad \dots\dots(2)$$

$\alpha\beta$ 変換により $\alpha\beta$ 座標系での三相誘導モータの電圧方程式は以下の様に表すことができます。

$$\begin{pmatrix} v_{\alpha s} \\ v_{\beta s} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_s + PL_s & 0 & PM \cos \theta_m & -PM \sin \theta_m \\ 0 & R_s + PL_s & PM \sin \theta_m & PM \cos \theta_m \\ PM \cos \theta_m & PM \sin \theta_m & R_r + PL_r & 0 \\ -PM \sin \theta_m & PM \cos \theta_m & 0 & R_r + PL_r \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{\alpha s} \\ i_{\beta s} \\ i_{\alpha r} \\ i_{\beta r} \end{pmatrix} \quad \dots\dots(3)$$

$$L_s = l_s + M, \quad L_r = l_r + M, \quad M = \frac{3}{2} M'$$

v_{α}, v_{β} : 各相固定子電圧

L_s : 固定子巻線インダクタンス

$i_{\alpha s}, i_{\beta s}$: 各相固定子電流

L_r : 回転子巻線インダクタンス

$i_{\alpha r}, i_{\beta r}$: 各相回転子電流

M : 巻線間相互インダクタンス

2.2.2 dq 変換

dq 変換を行い、固定された直交二軸座標で表す為に下記の変換行列を用います。d 軸はどこにとっても構いませんが、ここでは u 相(α 相)にとります。

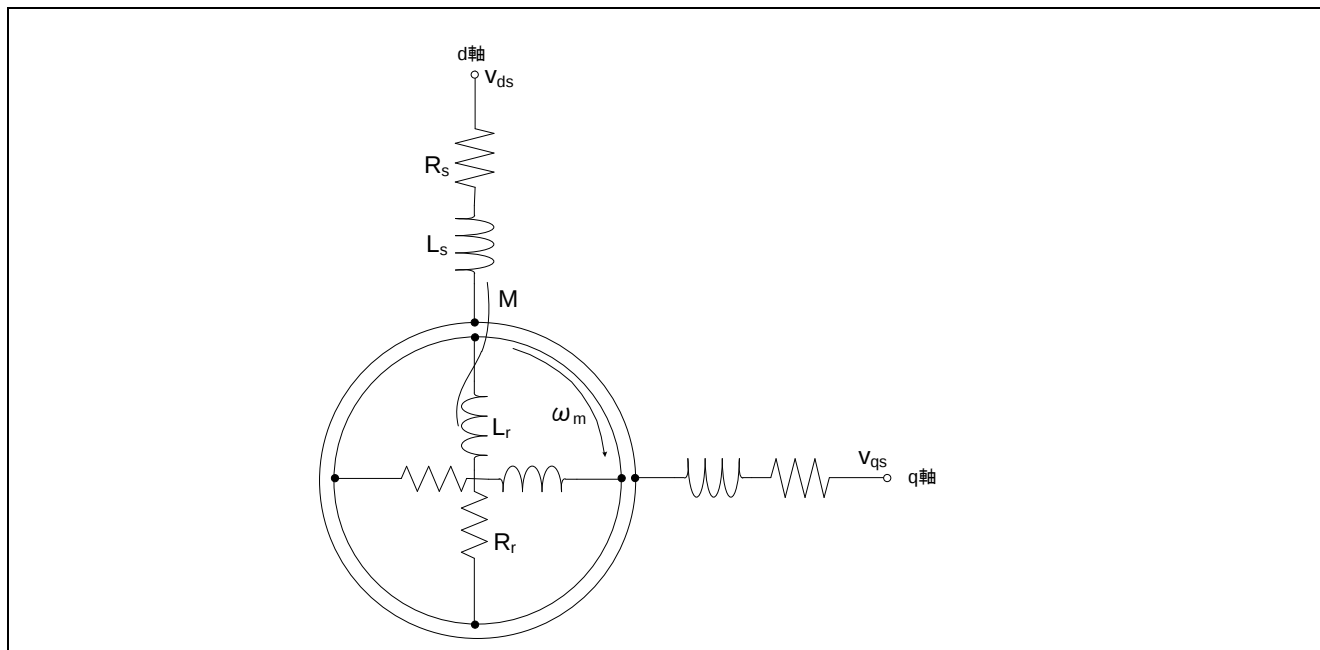


図 2-3 dq 変換後の概念図

$$C = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos\theta_m & -\sin\theta_m \\ 0 & 0 & \sin\theta_m & \cos\theta_m \end{pmatrix} \quad \dots\dots(4)$$

dq 変換により dq 座標系での三相誘導モータの電圧方程式は以下の様に表すことができます。

$$\begin{pmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_s + PL_s & 0 & PM & 0 \\ 0 & R_s + PL_s & 0 & PM \\ PM & \omega_m M & R_r + PL_r & \omega_m L_r \\ -\omega_m M & PM & -\omega_m L_r & R_r + PL_r \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{pmatrix} \quad \dots\dots(5)$$

v_{ds}, v_{qs} : 各相固定子電圧

i_{dr}, i_{qr} : 各相回転子電流

i_{ds}, i_{qs} : 各相固定子電流

ω_m : 回転子角速度

2.2.3 $\gamma\delta$ 変換

$\gamma\delta$ 変換を行い、二軸直流で表す為に下記の変換行列を用います。

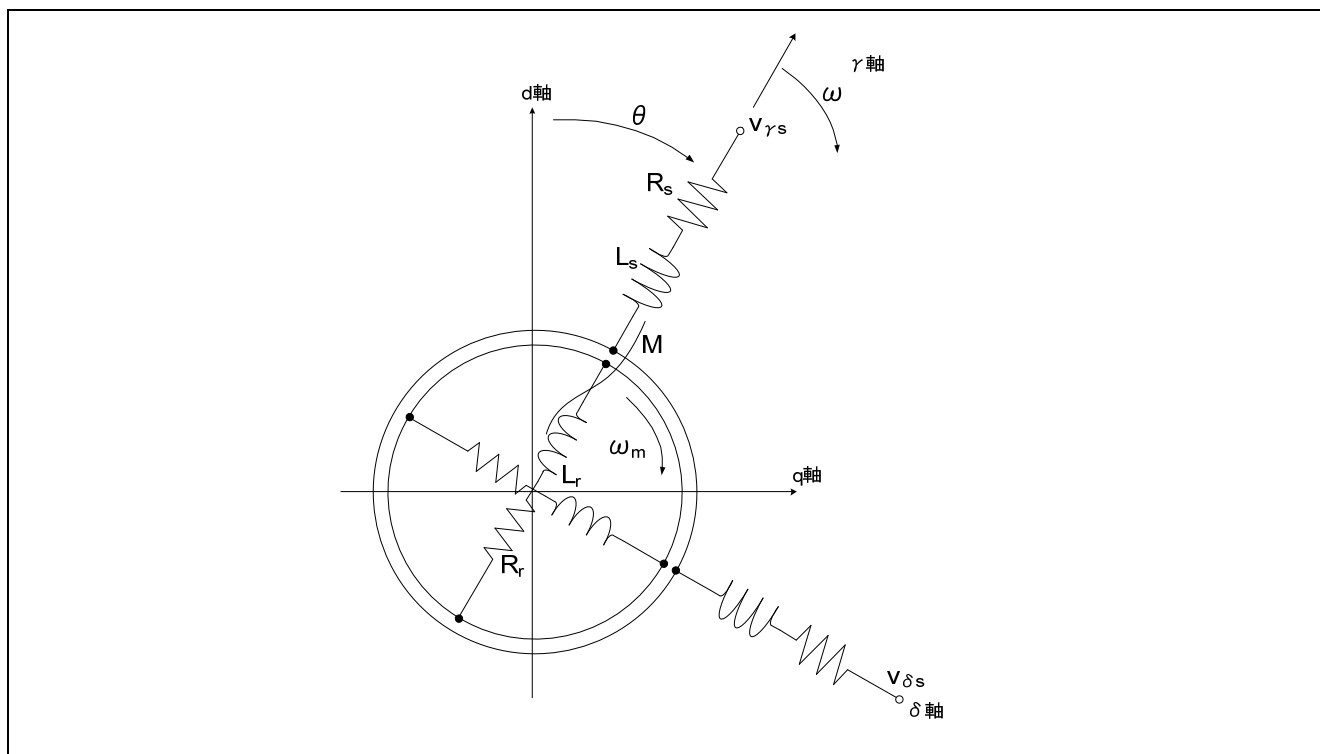


図 2-4 $\gamma\delta$ 変換後の概念図

$$C = \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos\theta & \sin\theta \\ 0 & 0 & -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \quad \dots\dots (6)$$

θ : d軸から γ 軸までの角度

$\gamma\delta$ 変換により $\gamma\delta$ 座標系での三相誘導モータの電圧方程式は以下の様に表すことができます。

$$\begin{pmatrix} v_{\gamma s} \\ v_{\delta s} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_s + PL_s & -\omega L_s & PM & -\omega M \\ \omega L_s & R_s + PL_s & \omega M & PM \\ PM & -(\omega - \omega_m)M & R_r + PL_r & -(\omega - \omega_m)L_r \\ (\omega - \omega_m)M & PM & (\omega - \omega_m)L_r & R_r + PL_r \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{\gamma s} \\ i_{\delta s} \\ i_{\gamma r} \\ i_{\delta r} \end{pmatrix} \quad \dots\dots (7)$$

$v_{\gamma s}, v_{\delta s}$: 各相固定子電圧

$i_{\gamma r}, i_{\delta r}$: 各相回転子電流

$i_{\gamma s}, i_{\delta s}$: 各相固定子電流

ω : 電源角周波数

以上より、角速度 ω で回転する座標系から見ることで、固定子、回転子に流れていた三相交流は、二相直流と看做す事が出来ます。

2.2.4 回転子鎖交磁束ベースによる表現

式(7)を回転子電流の代わりに回転子鎖交磁束を用いると下記のようになります。

$$\begin{pmatrix} v_{\gamma s} \\ v_{\delta s} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_s + PL_\sigma & -\omega L_\sigma & P\frac{M}{L_r} & -\omega\frac{M}{L_r} \\ \omega L_\sigma & R_s + PL_\sigma & \omega\frac{M}{L_r} & P\frac{M}{L_r} \\ -R_r\frac{M}{L_r} & 0 & \frac{R_r}{L_r} + P & -\omega_s \\ 0 & -R_r\frac{M}{L_r} & \omega_s & \frac{R_r}{L_r} + P \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{\gamma s} \\ i_{\delta s} \\ \phi_{\gamma r} \\ \phi_{\delta r} \end{pmatrix} \quad \dots\dots(8)$$

$$\phi_{\gamma r} = Mi_{\gamma s} + L_r i_{\gamma r}, \quad \phi_{\delta r} = Mi_{\delta s} + L_r i_{\delta r}, \quad L_\sigma = L_s - \frac{M^2}{L_r}, \quad \omega_s = \omega - \omega_m$$

$\phi_{\gamma r}, \phi_{\delta r}$: 各相回転子鎖交磁束 ω_s : すべり周波数

2.2.5 トルク

モータに生じるトルクの大きさは固定子電流による回転子磁束と回転子電流より下記の様に表します。

$$T = P_n \frac{M}{L_r} (\phi_{\gamma r} i_{\delta s} - \phi_{\delta r} i_{\gamma s}) \quad \dots\dots(9)$$

T : モータトルク P_n : 極対数

3. 間接形ベクトル制御

3.1 三相誘導モータのベクトル制御

ベクトル制御は、回転子磁束を発生させる電流と磁束に直交して流れる電流をそれぞれ独立に制御し、磁束および発生トルクを制御する方法です。回転子磁束を一定に制御することを前提にしている場合、回転子磁束を検出する必要があります。磁束検出には直接磁束センサを取り付ける直接形ベクトル制御と、本サンプルプログラムで使用する、端子電圧、電流、回転速度の検出値から演算する間接形ベクトル制御があります。

3.2 間接形ベクトル制御原理

間接形ベクトル制御では、制御対象をトルクと回転子鎖交磁束として、これらの制御を電流制御に置き換えて行います。これらを制御することで、指令回転速度に追従させることができます。

トルクは前述の回転座標変換において、回転子鎖交磁束の方向を γ 軸と一致するように定めると、式(9)より下記の様に求まります。

$$\phi_{\gamma r} = \phi_r \quad \phi_{\delta r} = 0 \quad \dots\dots (10)$$

$$T = P_n \frac{M}{L_r} \phi_r i_{\delta s} \quad \dots\dots (11)$$

また、回転子鎖交磁束は式(8)より下記の様に求まります。

$$\phi_r = \frac{M}{1 + PT_r} i_{\gamma s} \quad \dots\dots (12)$$

$$T_r = \frac{L_r}{R_r} : \text{回転子時定数}$$

以上より、固定子電流を制御することでトルク、回転子鎖交磁束を制御することができます。

さらに、すべり角周波数は式(8)および式(12)より下記の様に求まります。

$$\omega_s = \frac{M}{T_r \phi_r} i_{\delta s} = \frac{i_{\delta s}}{T_r \left(\frac{1}{1 + PT_r} \right) i_{\gamma s}} \quad \dots\dots (13)$$

すべり角周波数と回転子の回転角周波数との和を時間積分することにより、回転子鎖交磁束の方向である γ 軸の位相を求めることができます。

この方法は、すべり周波数を介して間接的に γ 軸の位相を求めているために間接形ベクトル制御と呼ばれ、またすべり周波数制御とも呼ばれています。

3.3 速度センサレスベクトル制御

回転速度センサを取り付けずにベクトル制御を行う場合、回転速度を何らかの方法で推定する必要があります。様々な方法が存在しますが、本アプリケーションノートでは電圧制御に基づく方式を紹介します。

回転子鎖交磁束が一定であれば、すべり角周波数は式(13)で示したようにトルク成分電流と比例関係にあります。したがって、トルク成分電流とその指令値が一致するように固定子角周波数を調整することでベクトル制御が可能になります。

$$\omega_s = \frac{i_{\delta s}}{T_r \left(\frac{1}{1 + PT_r} \right) i_{\gamma s}} = K_s i_{\delta s} \quad \dots\dots (14)$$

K_s : 定数

回転子角周波数は、下記のように固定子角周波数からすべり角周波数を減ずれば求まります。

$$\omega_m = \omega - \omega_s \quad \dots\dots (15)$$

指令電流から指令電圧への変換は式(8)より下記のようになります。

$$\begin{aligned} v_{\gamma s} &= R_s i_{\gamma s} - \omega L_\sigma i_{\delta s} \\ v_{\delta s} &= R_s i_{\delta s} + \omega L_s i_{\gamma s} \end{aligned} \quad \dots\dots (16)$$

この電圧を印加した際に検出したトルク成分電流と指令電流が一致していない場合は、 γ 軸が回転子鎖交磁束の方向と一致していないからとして、その偏差をPI増幅したものを経過積分して γ 軸位相としています。

この方式の制御フローを下記に記します。

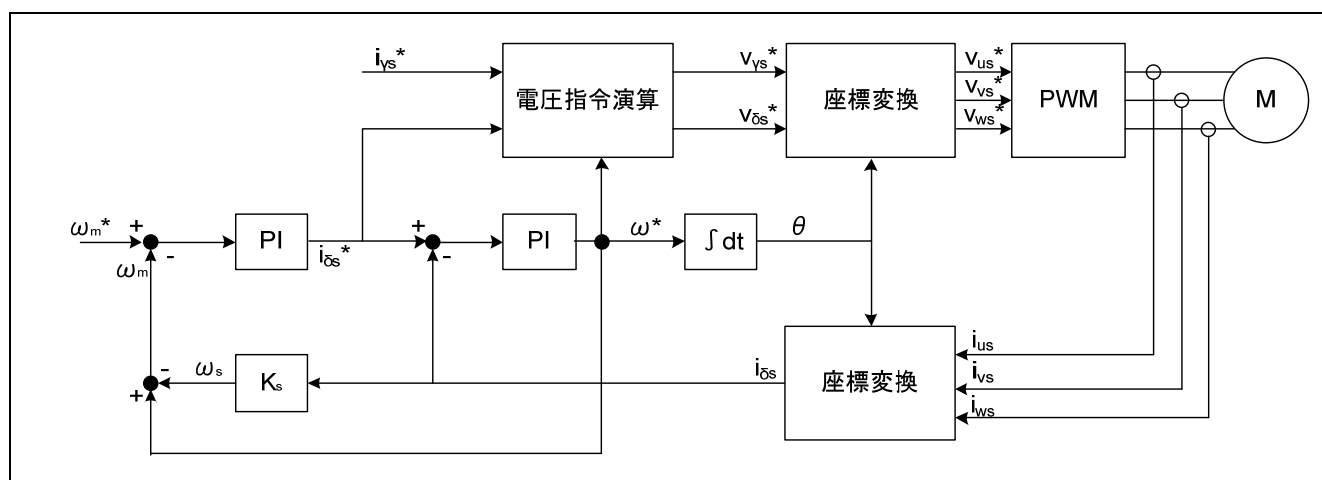


図 3-1 速度センサレスベクトル制御フロー

ホームページとサポート窓口

ルネサス エレクトロニクスホームページ

<http://japan.renesas.com/>

お問合せ先

<http://japan.renesas.com/contact/>

すべての商標および登録商標は、それぞれの所有者に帰属します。

改訂記録

Rev.	発行日	改訂内容	
		ページ	ポイント
1.00	2014.09.05	-	新規発行

製品ご使用上の注意事項

ここでは、マイコン製品全体に適用する「使用上の注意事項」について説明します。個別の使用上の注意事項については、本文を参照してください。なお、本マニュアルの本文と異なる記載がある場合は、本文の記載が優先するものとします。

1. 未使用端子の処理

【注意】未使用端子は、本文の「未使用端子の処理」に従って処理してください。

CMOS製品の入力端子のインピーダンスは、一般に、ハイインピーダンスとなっています。未使用端子を開放状態で動作させると、誘導現象により、LSI周辺のノイズが印加され、LSI内部で貫通電流が流れたり、入力信号と認識されて誤動作を起こす恐れがあります。未使用端子は、本文「未使用端子の処理」で説明する指示に従い処理してください。

2. 電源投入時の処置

【注意】電源投入時は、製品の状態は不定です。

電源投入時には、LSIの内部回路の状態は不確定であり、レジスタの設定や各端子の状態は不定です。外部リセット端子でリセットする製品の場合、電源投入からリセットが有効になるまでの期間、端子の状態は保証できません。

同様に、内蔵パワーオンリセット機能を使用してリセットする製品の場合、電源投入からリセットのかかる一定電圧に達するまでの期間、端子の状態は保証できません。

3. リザーブアドレスのアクセス禁止

【注意】リザーブアドレスのアクセスを禁止します。

アドレス領域には、将来の機能拡張用に割り付けられているリザーブアドレスがあります。これらのアドレスをアクセスしたときの動作については、保証できませんので、アクセスしないようにしてください。

4. クロックについて

【注意】リセット時は、クロックが安定した後、リセットを解除してください。

プログラム実行中のクロック切り替え時は、切り替え先クロックが安定した後に切り替えてください。リセット時、外部発振子（または外部発振回路）を用いたクロックで動作を開始するシステムでは、クロックが十分安定した後、リセットを解除してください。また、プログラムの途中で外部発振子（または外部発振回路）を用いたクロックに切り替える場合は、切り替え先のクロックが十分安定してから切り替えてください。

5. 製品間の相違について

【注意】型名の異なる製品に変更する場合は、事前に問題ないことをご確認下さい。

同じグループのマイコンでも型名が違うと、内部メモリ、レイアウトパターンの相違などにより、特性が異なる場合があります。型名の異なる製品に変更する場合は、製品型名ごとにシステム評価試験を実施してください。

ご注意書き

1. 本資料に記載された回路、ソフトウェアおよびこれらに関連する情報は、半導体製品の動作例、応用例を説明するものです。お客様の機器・システムの設計において、回路、ソフトウェアおよびこれらに関連する情報を使用する場合には、お客様の責任において行ってください。これらの使用に起因して、お客様または第三者に生じた損害に関し、当社は、一切その責任を負いません。
2. 本資料に記載されている情報は、正確を期すため慎重に作成したのですが、誤りがないことを保証するものではありません。万一、本資料に記載されている情報の誤りに起因する損害がお客様に生じた場合においても、当社は、一切その責任を負いません。
3. 本資料に記載された製品データ、図、表、プログラム、アルゴリズム、応用回路例等の情報の使用に起因して発生した第三者の特許権、著作権その他の知的財産権に対する侵害に関し、当社は、何らの責任を負うものではありません。当社は、本資料に基づき当社または第三者の特許権、著作権その他の知的財産権を何ら許諾するものではありません。
4. 当社製品を改造、改変、複製等しないでください。かかる改造、改変、複製等により生じた損害に関し、当社は、一切その責任を負いません。
5. 当社は、当社製品の品質水準を「標準水準」および「高品質水準」に分類しており、各品質水準は、以下に示す用途に製品が使用されることを意図しております。
標準水準： コンピュータ、OA機器、通信機器、計測機器、AV機器、家電、工作機械、パーソナル機器、産業用ロボット等
高品質水準： 輸送機器（自動車、電車、船舶等）、交通用信号機器、防災・防犯装置、各種安全装置等
当社製品は、直接生命・身体に危害を及ぼす可能性のある機器・システム（生命維持装置、人体に埋め込み使用するもの等）、もしくは多大な物的損害を発生させるおそれのある機器・システム（原子力制御システム、軍事機器等）に使用されることを意図しておらず、使用することはできません。たとえ、意図しない用途に当社製品を使用したことによりお客様または第三者に損害が生じても、当社は一切その責任を負いません。なお、ご不明点がある場合は、当社営業にお問い合わせください。
6. 当社製品をご使用の際は、当社が指定する最大定格、動作電源電圧範囲、放熱特性、実装条件その他の保証範囲内でご使用ください。当社保証範囲を超えて当社製品をご使用された場合の故障および事故につきましては、当社は、一切その責任を負いません。
7. 当社は、当社製品の品質および信頼性の向上に努めていますが、半導体製品はある確率で故障が発生したり、使用条件によっては誤動作したりする場合があります。また、当社製品は耐放射線設計については行っておりません。当社製品の故障または誤動作が生じた場合も、人身事故、火災事故、社会的損害等を生じさせないよう、お客様の責任において、冗長設計、延焼対策設計、誤動作防止設計等の安全設計およびエージング処理等、お客様の機器・システムとしての出荷保証を行ってください。特に、マイコンソフトウェアは、単独での検証は困難なため、お客様の機器・システムとしての安全検証をお客様の責任で行ってください。
8. 当社製品の環境適合性等の詳細につきましては、製品個別に必ず当社営業窓口までお問合せください。ご使用に際しては、特定の物質の含有・使用を規制するRoHS指令等、適用される環境関連法令を十分調査のうえ、かかる法令に適合するようご使用ください。お客様がかかる法令を遵守しないことにより生じた損害に関し、当社は、一切その責任を負いません。
9. 本資料に記載されている当社製品および技術を国内外の法令および規則により製造・使用・販売を禁止されている機器・システムに使用することはできません。また、当社製品および技術を大量破壊兵器の開発等の目的、軍事利用の目的その他軍事事務に使用しないでください。当社製品または技術を輸出する場合は、「外国為替及び外国貿易法」その他輸出関連法令を遵守し、かかる法令の定めるところにより必要な手続を行ってください。
10. お客様の転売等により、本ご注意書き記載の諸条件に抵触して当社製品が使用され、その使用から損害が生じた場合、当社は何らの責任も負わず、お客様にご負担して頂きますのでご了承ください。
11. 本資料の全部または一部を当社の文書による事前の承諾を得ることなく転載または複製することを禁じます。

注1. 本資料において使用されている「当社」とは、ルネサス エレクトロニクス株式会社およびルネサス エレクトロニクス株式会社がその総株主の議決権の過半数を直接または間接に保有する会社をいいます。

注2. 本資料において使用されている「当社製品」とは、注1において定義された当社の開発、製造製品をいいます。



ルネサスエレクトロニクス株式会社

■営業お問合せ窓口

<http://www.renesas.com>

※営業お問合せ窓口の住所は変更になることがあります。最新情報につきましては、弊社ホームページをご覧ください。

ルネサス エレクトロニクス株式会社 〒100-0004 千代田区大手町2-6-2（日本ビル）

■技術的なお問合せおよび資料のご請求は下記へどうぞ。
総合お問合せ窓口：<http://japan.renesas.com/contact/>