

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第6024971号
(P6024971)

(45) 発行日 平成28年11月16日 (2016.11.16)

(24) 登録日 平成28年10月21日 (2016.10.21)

(51) Int. Cl.		F I			
GO1D	5/244	(2006.01)	GO1D	5/244	J
GO1B	7/30	(2006.01)	GO1B	7/30	H
GO1L	3/10	(2006.01)	GO1L	3/10	317
B62D	5/04	(2006.01)	B62D	5/04	

請求項の数 3 (全 37 頁)

(21) 出願番号	特願2012-271640 (P2012-271640)	(73) 特許権者	000001247
(22) 出願日	平成24年12月12日 (2012.12.12)		株式会社ジェイテクト
(65) 公開番号	特開2014-115261 (P2014-115261A)		大阪府大阪市中央区南船場3丁目5番8号
(43) 公開日	平成26年6月26日 (2014.6.26)	(74) 代理人	100087701
審査請求日	平成27年11月19日 (2015.11.19)		弁理士 稲岡 耕作
		(74) 代理人	100101328
			弁理士 川崎 実夫
		(74) 代理人	100086391
			弁理士 香山 秀幸
		(72) 発明者	高木 剛
			大阪府大阪市中央区南船場3丁目5番8号
			株式会社ジェイテクト内
		(72) 発明者	狩集 裕二
			大阪府大阪市中央区南船場3丁目5番8号
			株式会社ジェイテクト内
			最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 回転角検出装置

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

回転体の回転に応じて回転し、複数の磁極を有する多極磁石と、
前記多極磁石の回転に応じて、互いに所定の位相差を有する正弦波信号をそれぞれ出力する3つの磁気センサと、

前記各磁気センサの出力信号を所定時間毎にサンプリングするサンプリング手段と、
前記3つの磁気センサのうち2つの磁気センサが共に同じ1つの磁極を3サンプリング周期連続して検出しているという条件を満たしているときには、それらの2つの磁気センサの3サンプリング分の出力信号に基づいて、前記回転体の回転角を演算するとともに、常にまたは前記3サンプリング分の出力信号が一定の要件を満たしているときには、それらの2つの磁気センサが検出している磁極の磁極幅に関する情報およびそれらの2つの磁気センサの出力信号の振幅に関する情報を演算して当該磁極に関連付けて記憶する第1演算手段と、

前記条件を満たしていないときには、前記3つの磁気センサのうち、磁極幅に関する情報が関連付けて記憶されている磁極を検出している1つの磁気センサを含む2つの磁気センサの1サンプリング分の出力信号と、前記第1演算手段によって記憶されている前記情報とを用いて、前記回転体の回転角を演算する第2演算手段と、を含む回転角演算装置。

【請求項2】

前記3つの磁気センサを第1磁気センサ、第2磁気センサおよび第3磁気センサとすると、前記第1磁気センサの出力信号と前記第2磁気センサの出力信号との位相差が120

度であり、前記第1磁気センサの出力信号と前記第3磁気センサの出力信号との位相差が240度である、請求項1に記載の回転角演算装置。

【請求項3】

前記磁極の磁極幅に関する情報が、前記磁極の磁極幅誤差に基づく回転角誤差を補正するための磁極幅誤差補正值であり、

前記第1磁気センサの出力信号の振幅を A_1 、前記第1磁気センサが検出している磁極に対応する磁極幅誤差補正值を E_1 、前記回転体の回転角を θ とすると、前記第1磁気センサの出力信号 S_1 は、 $S_1 = A_1 \sin(\theta + E_1)$ で表され、

前記第2磁気センサの出力信号の振幅を A_2 、前記第2磁気センサが検出している磁極の磁極幅誤差補正值 E_2 とすると、前記第2磁気センサの出力信号 S_2 は、 $S_2 = A_2 \sin(\theta + 120 + E_2)$ で表され、

前記第3磁気センサの出力信号の振幅を A_3 、前記第3磁気センサが検出している磁極の磁極幅誤差補正值 E_3 とすると、前記第3磁気センサの出力信号 S_3 は、 $S_3 = A_3 \sin(\theta + 240 + E_3)$ で表される、請求項2に記載の回転角演算装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

この発明は、回転体の回転角を検出する回転角検出装置に関する。

【背景技術】

【0002】

回転体の回転角を検出する回転角検出装置として、ブラシレスモータの回転に応じて回転する検出用ロータを用いて、ブラシレスモータのロータの回転角を検出する回転角検出装置が知られている。具体的には、図16に示すように、検出用ロータ201（以下、「ロータ201」という）は、ブラシレスモータのロータに設けられている磁極対に相当する複数の磁極対を有する円筒状の磁石202を備えている。ロータ201の周囲には、2つの磁気センサ221、222が、ロータ201の回転中心軸を中心として所定の角度間隔をおいて配置されている。各磁気センサ221、222からは、所定の位相差を有する正弦波信号が出力される。これらの2つの正弦波信号に基づいて、ロータ201の回転角（ブラシレスモータのロータの回転角）が検出される。

【0003】

この例では、磁石202は、5組の磁極対を有している。つまり、磁石102は、等角度間隔で配置された10個の磁極を有している。各磁極は、ロータ201の回転中心軸を中心として、 36° （電気角では 180° ）の角度間隔で配置されている。また、2つの磁気センサ221、222は、ロータ201の回転中心軸を中心として 18° （電気角では 90° ）の角度間隔をおいて配置されている。

【0004】

図16に矢印で示す方向を検出用ロータ201の正方向の回転方向とする。そして、ロータ201が正方向に回転されるとロータ201の回転角が大きくなり、ロータ201が逆方向に回転されると、ロータ201の回転角が小さくなるものとする。各磁気センサ221、222からは、図17に示すように、ロータ201が1磁極対分に相当する角度（ 72° （電気角では 360° ））を回転する期間を一周期とする正弦波信号 S_1 、 S_2 が出力される。

【0005】

ロータ201の1回転分の角度範囲を、5つの磁極対に対応して5つの区間に分け、各区間の開始位置を 0° とし終了位置を 360° として表したロータ201の回転角を、ロータ201の電気角 θ ということにする。

ここでは、第1磁気センサ221からは、 $S_1 = A_1 \cdot \sin \theta$ の出力信号が出力され、第2磁気センサ222からは、 $S_2 = A_2 \cdot \cos \theta$ の出力信号が出力されるものとする。 A_1 、 A_2 は、振幅である。両出力信号 S_1 、 S_2 の振幅 A_1 、 A_2 が互いに等しいとみなすと、ロータ201の電気角 θ は、両出力信号 S_1 、 S_2 を用いて、次式に基づいて求

10

20

30

40

50

めることができる。

【0006】

$$= \tan^{-1} (\sin \theta / \cos \theta)$$

$$= \tan^{-1} (S_1 / S_2)$$

このようにして、求められた電気角 θ を使って、ブラシレスモータを制御する。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0007】

【特許文献1】特開2008-26297号公報

【発明の概要】

10

【発明が解決しようとする課題】

【0008】

前述したような従来の回転角検出装置においては、両磁気センサ221, 222の出力信号 S_1, S_2 の振幅 A_1, A_2 が等しいとみなして回転角 θ を演算しているが、両出力信号 S_1, S_2 の振幅 A_1, A_2 は、両磁気センサ221, 222の温度特性のばらつきおよび温度変化に応じて変化する。このため、両磁気センサ221, 222の温度特性のばらつきおよび温度変化によって、ロータの回転角の検出に誤差が発生する。

【0009】

この発明の目的は、精度の高い回転角を検出できる回転角検出装置を提供することである。

20

【課題を解決するための手段】

【0010】

請求項1記載の発明は、回転体(8)の回転に応じて回転し、複数の磁極を有する多極磁石(61)と、前記多極磁石の回転に応じて、互いに所定の位相差を有する正弦波信号をそれぞれ出力する3つの磁気センサ(71, 72, 73)と、前記各磁気センサの出力信号を所定時間毎にサンプリングするサンプリング手段(77A, S61)と、前記3つの磁気センサのうち2つの磁気センサが共に同じ1つの磁極を3サンプリング周期連続して検出しているという条件を満たしているときには、それらの2つの磁気センサの3サンプリング分の出力信号に基づいて、前記回転体の回転角を演算するとともに、常にまたは前記3サンプリング分の出力信号が一定の要件を満たしているときに、それらの2つの磁気センサが検出している磁極の磁極幅に関する情報およびそれらの2つの磁気センサの出力信号の振幅に関する情報を演算して当該磁極に関連付けて記憶する第1演算手段(77A, S64~S67, S68~S71)と、前記条件を満たしていないときには、前記3つの磁気センサのうち、磁極幅に関する情報が関連付けて記憶されている磁極を検出している1つの磁気センサを含む2つの磁気センサの1サンプリング分の出力信号と、前記第1演算手段によって記憶されている前記情報とを用いて、前記回転体の回転角を演算する第2演算手段(77A, S72~S76)と、を含む回転角演算装置である。なお、括弧内の英数字は、後述の実施形態における対応構成要素等を表すが、むろん、この発明の範囲は当該実施形態に限定されない。以下、この項において同じ。

30

【0011】

この発明では、3つの磁気センサのうち2つの磁気センサが共に同じ1つの磁極を3サンプリング周期連続して検出しているという条件を満たしているときには、それらの2つの磁気センサの3サンプリング分の出力信号に基づいて回転体の回転角が演算されるので、精度の高い回転角を演算することができる。また、前記条件を満たしていないときには、磁極幅に関する情報が関連付けて記憶されている磁極を検出している1つの磁気センサを含む2つの磁気センサの1サンプリング分の出力信号と、第1演算手段によって記憶されている情報とを用いて、回転角が演算されるので、第1演算手段の検出精度に近い検出精度で回転角を演算することができる。

40

【0012】

請求項2記載の発明は、前記3つの磁気センサを第1磁気センサ、第2磁気センサおよ

50

び第3磁気センサとすると、前記第1磁気センサの出力信号と前記第2磁気センサの出力信号との位相差が120度であり、前記第1磁気センサの出力信号と前記第3磁気センサの出力信号との位相差が240度である、請求項1に記載の回転角演算装置である。

この構成では、第1磁気センサおよび第2磁気センサの組み合わせからなる2つの磁気センサがそれぞれ異なる磁極を検出しているときには、第2磁気センサおよび第3磁気センサの組み合わせからなる2つの磁気センサが共に同じ一つの磁極を検出する。逆に、第2磁気センサおよび第3磁気センサの組み合わせからなる2つの磁気センサがそれぞれ異なる磁極を検出しているときには、第1磁気センサおよび第2磁気センサの組み合わせからなる2つの磁気センサが共に同じ一つの磁極を検出する。したがって、3つの磁気センサのうち2つの磁気センサが共に同じ1つの磁極を3サンプリング周期連続して検出しているという条件を満たす確率が高くなる。これにより、高い精度で回転角を演算できる第1演算手段によって回転角を演算できる確率が高くなる。

【0013】

請求項3記載の発明は、前記磁極の磁極幅に関する情報が、前記磁極の磁極幅誤差に基づく回転角誤差を補正するための磁極幅誤差補正值であり、前記第1磁気センサの出力信号の振幅を A_1 、前記第1磁気センサが検出している磁極に対応する磁極幅誤差補正值を E_1 、前記回転体の回転角を θ とすると、前記第1磁気センサの出力信号 S_1 は、 $S_1 = A_1 \sin(\theta + E_1)$ で表され、前記第2磁気センサの出力信号の振幅を A_2 、前記第2磁気センサが検出している磁極の磁極幅誤差補正值 E_2 とすると、前記第2磁気センサの出力信号 S_2 は、 $S_2 = A_2 \sin(\theta + 120 + E_2)$ で表され、前記第3磁気センサの出力信号の振幅を A_3 、前記第3磁気センサが検出している磁極の磁極幅誤差補正值 E_3 とすると、前記第3磁気センサの出力信号 S_3 は、 $S_3 = A_3 \sin(\theta + 240 + E_3)$ で表される、請求項2に記載の回転角演算装置である。

【図面の簡単な説明】

【0014】

【図1】図1は、本発明の一実施形態に係る回転角検出装置が適用された電動パワーステアリング装置の概略構成を示す模式図である。

【図2】図2は、モータ制御用ECUの電気的構成を示す概略図である。

【図3】図3は、電動モータの構成を図解的に示す模式図である。

【図4】図4は、検出操舵トルク T_h に対するq軸電流指令値 I_q^* の設定例を示すグラフである。

【図5】図5は、トルクセンサの構成を図解的に示す模式図である。

【図6】図6は、第1の磁石の構成および3つの磁気センサの配置を示す模式図である。

【図7】図7は、第1磁気センサ、第2磁気センサおよび第3磁気センサの出力波形を示す模式図である。

【図8】図8A、図8Bおよび図8Cは、それぞれ第3演算モード、第4演算モードおよび第5演算モードが適用される場合を説明するための模式図である。

【図9】図9は、第3演算モードを説明するための説明図である。

【図10】図10は、第1の回転角演算部77Aの動作を示すフローチャートである。

【図11A】図11Aは、図10のステップS1の強制回転に基づく回転角演算処理の手順の一部を示すフローチャートである。

【図11B】図11Bは、図10のステップS1の強制回転に基づく回転角演算処理の手順の一部を示すフローチャートである。

【図11C】図11Cは、図10のステップS1の強制回転に基づく回転角演算処理の手順の一部を示すフローチャートである。

【図12】図12は、トルク演算用ECU内のメモリの内容の一部を示す模式図である。

【図13】図13は、相対的極番号の設定処理の詳細な手順を示すフローチャートである。

【図14】図14は、相対的極番号の設定処理を説明するための模式図である。

【図15A】図15Aは、図10のステップS2の通常時の回転角演算処理の手順の一部を示すフローチャートである。

【図15B】図15Bは、図10のステップS2の通常時の回転角演算処理の手順の一部を示すフローチャートである。

【図16】図16は、従来の回転角検出装置による回転角検出方法を説明するための模式図である。

【図17】図17は、第1磁気センサおよび第2磁気センサの出力信号波形を示す模式図である。

【発明を実施するための形態】

【0015】

以下では、この発明の実施形態を、添付図面を参照して詳細に説明する。

図1は、本発明の一実施形態に係る回転角検出装置が適用された電動パワーステアリング装置の概略構成を示す模式図である。

電動パワーステアリング装置1は、車両を操向するための操舵部材としてのステアリングホイール2と、このステアリングホイール2の回転に連動して転舵輪3を転舵する転舵機構4と、運転者の操舵を補助するための操舵補助機構5とを備えている。ステアリングホイール2と転舵機構4とは、ステアリングシャフト6および中間軸7を介して機械的に連結されている。

【0016】

ステアリングシャフト6は、ステアリングホイール2に連結された入力軸8と、中間軸7に連結された出力軸9とを含む。入力軸8と出力軸9とは、トーションバー10を介して同一軸線上で相対回転可能に連結されている。すなわち、ステアリングホイール2が回転されると、入力軸8および出力軸9は、互いに相対回転しつつ同一方向に回転するようになっている。

【0017】

ステアリングシャフト6の周囲には、本発明の一実施形態に係る回転角検出装置が適用されたトルクセンサ(トルク検出装置)11が設けられている。トルクセンサ11は、入力軸8および出力軸9の相対回転変位量に基づいて、ステアリングホイール2に与えられた操舵トルクを検出する。トルクセンサ11によって検出される操舵トルクは、モータ制御用ECU(電子制御ユニット:Electronic Control Unit)12に入力される。

【0018】

転舵機構4は、ピニオン軸13と、転舵軸としてのラック軸14とを含むラックアンドピニオン機構からなる。ラック軸14の各端部には、タイロッド15およびナックルアーム(図示略)を介して転舵輪3が連結されている。ピニオン軸13は、中間軸7に連結されている。ピニオン軸13は、ステアリングホイール2の操舵に連動して回転するようになっている。ピニオン軸13の先端には、ピニオン16が連結されている。

【0019】

ラック軸14は、自動車の左右方向(直進方向に直交する方向)に沿って直線状に延びている。ラック軸14の軸方向の中間部には、ピニオン16に噛み合うラック17が形成されている。このピニオン16およびラック17によって、ピニオン軸13の回転がラック軸14の軸方向移動に変換される。ラック軸14を軸方向に移動させることによって、転舵輪3を転舵することができる。

【0020】

ステアリングホイール2が操舵(回転)されると、この回転が、ステアリングシャフト6および中間軸7を介して、ピニオン軸13に伝達される。そして、ピニオン軸13の回転は、ピニオン16およびラック17によって、ラック軸14の軸方向移動に変換される。これにより、転舵輪3が転舵される。

操舵補助機構5は、操舵補助力を発生するための電動モータ18と、電動モータ18の出力トルクを転舵機構4に伝達するための減速機構19とを含む。電動モータ18は、この実施形態では、三相ブラシレスモータからなる。減速機構19は、ウォーム軸20と、

10

20

30

40

50

このウォーム軸 20 と噛み合うウォームホイール 21 とを含むウォームギヤ機構からなる。減速機構 19 は、伝達機構ハウジングとしてのギヤハウジング 22 内に收容されている。

【0021】

ウォーム軸 20 は、電動モータ 18 によって回転駆動される。また、ウォームホイール 21 は、ステアリングシャフト 6 とは同方向に回転可能に連結されている。ウォームホイール 21 は、ウォーム軸 20 によって回転駆動される。

電動モータ 18 によってウォーム軸 20 が回転駆動されると、ウォームホイール 21 が回転駆動され、ステアリングシャフト 6 が回転する。そして、ステアリングシャフト 6 の回転は、中間軸 7 を介してピニオン軸 13 に伝達される。ピニオン軸 13 の回転は、ラック軸 14 の軸方向移動に変換される。これにより、転舵輪 3 が転舵される。すなわち、電動モータ 18 によってウォーム軸 20 を回転駆動することによって、転舵輪 3 が転舵されるようになっている。

10

【0022】

電動モータ 18 のロータの回転角（ロータ回転角）は、レゾルバ等の回転角センサ 25 によって検出される。回転角センサ 25 の出力信号は、モータ制御用 ECU 12 に入力される。電動モータ 18 は、モータ制御装置としてのモータ制御用 ECU 12 によって制御される。

図 2 は、モータ制御用 ECU 12 の電氣的構成を示す概略図である。

【0023】

モータ制御用 ECU 12 は、トルクセンサ 11 によって検出される操舵トルク T_h に応じて電動モータ 18 を駆動することによって、操舵状況に応じた適切な操舵補助を実現する。モータ制御用 ECU 12 は、マイクロコンピュータ 40 と、マイクロコンピュータ 40 によって制御され、電動モータ 18 に電力を供給する駆動回路（インバータ回路）31 と、電動モータ 18 に流れるモータ電流を検出する電流検出部 32 とを備えている。

20

【0024】

電動モータ 18 は、例えば三相ブラシレスモータであり、図 3 に図解的に示すように、界磁としてのロータ 100 と、U 相、V 相および W 相のステータ巻線 101, 102, 103 を含むステータ 105 とを備えている。電動モータ 18 は、ロータの外部にステータを対向配置したインナーロータ型のものであってもよいし、筒状のロータの内部にステータを対向配置したアウトロータ型のものであってもよい。

30

【0025】

各相のステータ巻線 101, 102, 103 の方向に U 軸、V 軸および W 軸をとった三相固定座標（UVW 座標系）が定義される。また、ロータ 100 の磁極方向に d 軸（磁極軸）をとり、ロータ 100 の回転平面内において d 軸と直角な方向に q 軸（トルク軸）をとった二相回転座標系（dq 座標系。実回転座標系）が定義される。dq 座標系は、ロータ 100 とともに回転する回転座標系である。dq 座標系では、q 軸電流のみがロータ 100 のトルク発生に寄与するので、d 軸電流を零とし、q 軸電流を所望のトルクに応じて制御すればよい。ロータ 100 の回転角（電気角） θ_s は、U 軸に対する d 軸の回転角である。dq 座標系は、ロータ角 θ_s に従う実回転座標系である。このロータ角 θ_s を用いることによって、UVW 座標系と dq 座標系との間での座標変換を行うことができる。

40

【0026】

マイクロコンピュータ 40 は、CPU およびメモリ（ROM、RAM、不揮発性メモリなど）を備えており、所定のプログラムを実行することによって、複数の機能処理部として機能するようになっている。この複数の機能処理部には、電流指令値設定部 41 と、電流偏差演算部 42 と、PI（比例積分）制御部 43 と、dq/UVW 変換部 44 と、PWM（Pulse Width Modulation）制御部 45 と、UVW/dq 変換部 46 と、回転角演算部 47 とを含む。

【0027】

50

回転角演算部 4 7 は、回転角センサ 2 5 の出力信号に基づいて、電動モータ 1 8 のロータの回転角（電気角。以下、「ロータ角 θ_s 」という。）を演算する。

電流指令値設定部 4 1 は、d q 座標系の座標軸に流すべき電流値を電流指令値として設定する。具体的には、電流指令値設定部 4 1 は、d 軸電流指令値 I_d^* および q 軸電流指令値 I_q^* （以下、これらを総称するときには「二相電流指令値 I_{dq}^* 」という。）を設定する。さらに具体的には、電流指令値設定部 4 1 は、q 軸電流指令値 I_q^* を有意値とする一方で、d 軸電流指令値 I_d^* を零とする。より具体的には、電流指令値設定部 4 1 は、トルクセンサ 1 1 によって検出される操舵トルク（検出操舵トルク） T_h に基づいて、q 軸電流指令値 I_q^* を設定する。

【0028】

検出操舵トルク T_h に対する q 軸電流指令値 I_q^* の設定例は、図 4 に示されている。検出操舵トルク T_h は、たとえば、右方向への操舵のためのトルクが正の値にとられ、左方向への操舵のためのトルクが負の値にとられている。また、q 軸電流指令値 I_q^* は、電動モータ 1 8 から右方向操舵のための操作補助力を発生させるべきときには正の値とされ、電動モータ 1 8 から左方向操舵のための操作補助力を発生させるべきときには負の値とされる。q 軸電流指令値 I_q^* は、検出操舵トルク T_h の正の値に対しては正をとり、検出操舵トルク T_h の負の値に対しては負をとる。検出操舵トルク T_h が零のときには、q 軸電流指令値 I_q^* は零とされる。そして、検出操舵トルク T_h の絶対値が大きくなるほど、q 軸電流指令値 I_q^* の絶対値が大きくなるように、q 軸電流指令値 I_q^* が設定されている。

【0029】

電流指令値設定部 4 1 によって設定された二相電流指令値 I_{dq}^* は、電流偏差演算部 4 2 に与えられる。

電流検出部 3 2 は、電動モータ 1 8 の U 相電流 I_u 、V 相電流 I_v および W 相電流 I_w （以下、これらを総称するときには、「三相検出電流 I_{uvw} 」という。）を検出する。電流検出部 3 2 によって検出された三相検出電流 I_{uvw} は、U V W / d q 変換部 4 6 に与えられる。

【0030】

U V W / d q 変換部 4 6 は、電流検出部 3 2 によって検出される U V W 座標系の三相検出電流 I_{uvw} （U 相電流 I_u 、V 相電流 I_v および W 相電流 I_w ）を、d q 座標系の二相検出電流 I_d および I_q （以下総称するときには「二相検出電流 I_{dq} 」という。）に座標変換する。この座標変換には、回転角演算部 4 7 によって演算されたロータ角 θ_s が用いられる。

【0031】

電流偏差演算部 4 2 は、電流指令値設定部 4 1 によって設定される二相電流指令値 I_{dq}^* と、U V W / d q 変換部 4 6 から与えられる二相検出電流 I_{dq} との偏差を演算する。より具体的には、電流偏差演算部 4 2 は、d 軸電流指令値 I_d^* に対する d 軸検出電流 I_d の偏差および q 軸電流指令値 I_q^* に対する q 軸検出電流 I_q の偏差を演算する。これらの偏差は、P I 制御部 4 3 に与えられる。

【0032】

P I 制御部 4 3 は、電流偏差演算部 4 2 によって演算された電流偏差に対する P I 演算を行なうことにより、電動モータ 1 8 に印加すべき二相電圧指令値 V_{dq}^* （d 軸電圧指令値 V_d^* および q 軸電圧指令値 V_q^* ）を生成する。この二相電圧指令値 V_{dq}^* は、d q / U V W 変換部 4 4 に与えられる。

d q / U V W 変換部 4 4 は、二相電圧指令値 V_{dq}^* を三相電圧指令値 V_{uvw}^* に座標変換する。この座標変換には、回転角演算部 4 7 によって演算されたロータ角 θ_s が用いられる。三相電圧指令値 V_{uvw}^* は、U 相電圧指令値 V_u^* 、V 相電圧指令値 V_v^* および W 相電圧指令値 V_w^* からなる。この三相電圧指令値 V_{uvw}^* は、P W M 制御部 4 5 に与えられる。

【0033】

10

20

30

40

50

PWM制御部45は、U相電圧指令値 V_U^* 、V相電圧指令値 V_V^* およびW相電圧指令値 V_W^* にそれぞれ対応するデューティのU相PWM制御信号、V相PWM制御信号およびW相PWM制御信号を生成し、駆動回路31に供給する。

駆動回路31は、U相、V相およびW相に対応した三相インバータ回路からなる。このインバータ回路を構成するパワー素子がPWM制御部45から与えられるPWM制御信号によって制御されることにより、三相電圧指令値 V_{UVW}^* に相当する電圧が電動モータ18の各相のステータ巻線101、102、103に印加されることになる。

【0034】

電流偏差演算部42およびPI制御部43は、電流フィードバック制御手段を構成している。この電流フィードバック制御手段の働きによって、電動モータ18に流れるモータ電流が、電流指令値設定部41によって設定された二相電流指令値 I_{dq}^* に近づくように制御される。

10

図5は、トルクセンサ11の構成を図解的に示す模式図である。

【0035】

入力軸8には、環状の第1の磁石(多極磁石)61が一体回転可能に連結されている。第1の磁石61の下側には、第1の磁石61の回転に応じて互いに位相差を有する正弦波状の信号をそれぞれ出力する3つの磁気センサ71、72、73が配置されている。

出力軸9には、環状の第2の磁石(多極磁石)62が一体回転可能に連結されている。第2の磁石62の上側には、第2の磁石62の回転に応じて互いに位相差を有する正弦波状の信号をそれぞれ出力する3つの磁気センサ74、75、76が配置されている。

20

【0036】

各磁気センサ71~76の出力信号 $S_1 \sim S_6$ は、入力軸8に加えられる操舵トルクを演算するためのトルク演算用ECU77に入力されている。トルク演算用ECU77の電源は、イグニッションキーがオン操作されることによってオンとなる。イグニッションキーがオフ操作されたときには、そのことを示すイグニッションキーオフ操作信号が、トルク演算用ECU77に入力される。なお、磁気センサとしては、たとえば、ホール素子、磁気抵抗素子(MR素子)等、磁界の作用により電気的特性が変化する特性を有する素子を備えたものを用いることができる。この実施形態では、磁気センサとしては、ホール素子が用いられている。

【0037】

30

前記磁石61、62、前記磁気センサ71~76およびトルク演算用ECU77によって、トルクセンサ11が構成されている。

トルク演算用ECU77は、マイクロコンピュータを含んでいる。マイクロコンピュータは、CPUおよびメモリ(ROM、RAM、不揮発性メモリ等)を備えており、所定のプログラムを実行することによって、複数の機能処理部として機能する。この複数の機能処理部には、第1の回転角演算部77Aと、第2の回転角演算部77Bと、トルク演算部77Cとを含んでいる。

【0038】

第1の回転角演算部77Aは、3つの磁気センサ71、72、73の出力信号 S_1 、 S_2 、 S_3 に基づいて入力軸8の回転角(電気角 θ_A)を演算する。第2の回転角演算部77Bは、3つの磁気センサ74、75、76の出力信号 S_4 、 S_5 、 S_6 に基づいて出力軸9の回転角(電気角 θ_B)を演算する。

40

トルク演算部77Cは、第1の回転角演算部77Aによって検出された入力軸8の回転角 θ_A と第2の回転角演算部77Bによって検出された出力軸9の回転角 θ_B とに基づいて、入力軸8に加えられた操舵トルク T_h を演算する。具体的には、操舵トルク T_h は、トーションバー10のバネ定数を K とし、各磁石61、62に設けられた磁極対数を N とすると、次式(1)に基づいて演算される。

【0039】

$$T_h = \{ (\theta_A - \theta_B) / N \} \times K \quad \dots(1)$$

第1の磁石61、磁気センサ71、72、73および第1の回転角演算部77Aによ

50

て、入力軸 8 の回転角 θ_A を検出するための第 1 の回転角検出装置が構成されている。また、第 2 の磁石 6 2、磁気センサ 7 4、7 5、7 6 および第 2 の回転角演算部 7 7 B によって、出力軸 9 の回転角 θ_B を検出するための第 2 の回転角検出装置が構成されている。第 1 の回転角検出装置（第 1 の回転角演算部 7 7 A）の動作と第 2 の回転角検出装置（第 2 の回転角演算部 7 7 B）動作は同様であるので、以下、第 1 の回転角検出装置（第 1 の回転角演算部 7 7 A）の動作についてのみ説明する。

【0040】

図 6 は、第 1 の磁石 6 1 の構成および 2 つの磁気センサの配置を示す模式図である。

第 1 の磁石 6 1 は、周方向に等角度間隔で配された 4 組の磁極対 (M 1, M 2), (M 3, M 4), (M 5, M 6), (M 7, M 8) を有している。つまり、第 1 の磁石 6 1 は、等角度間隔で配置された 8 個の磁極 M 1 ~ M 8 を有している。各磁極 M 1 ~ M 8 は、入力軸 8 の中心軸を中心として、ほぼ 45° （電気角ではほぼ 180° ）の角度間隔（角度幅）で配置されている。各磁極 M 1 ~ M 8 の磁力の大きさは、ほぼ一定である。

【0041】

3 つの磁気センサ 7 1, 7 2, 7 3 は、第 1 の磁石 6 1 の下側の環状端面に対向して、配置されている。以下において、磁気センサ 7 1 を第 1 磁気センサ 7 1、磁気センサ 7 2 を第 2 磁気センサ 7 2、磁気センサ 7 3 を第 3 磁気センサ 7 3 という場合がある。第 1 磁気センサ 7 1 と第 2 磁気センサ 7 2 とは、入力軸 8 の中心軸を中心として電気角で 120° の角度間隔で配置されている。また、第 2 磁気センサ 7 2 と第 3 磁気センサ 7 3 とは、入力軸 8 の中心軸を中心として電気角で 120° の角度間隔で配置されている。したがって、第 1 磁気センサ 7 1 と第 3 磁気センサ 7 3 とは、入力軸 8 の中心軸を中心として電気角で 240° の角度間隔で配置されている。

【0042】

図 6 に矢印で示す方向を入力軸 8 の正方向の回転方向とする。そして、入力軸 8 が正方向に回転されると入力軸 8 の回転角が大きくなり、入力軸 8 が逆方向に回転されると、入力軸 2 の回転角が小さくなるものとする。各磁気センサ 7 1, 7 2, 7 3 からは、図 7 に示すように、入力軸 8 の回転に伴って、正弦波状の信号 S_1, S_2, S_3 が出力される。なお、図 6 の横軸の回転角 [deg] は、機械角を表している。

【0043】

以下において、第 1 磁気センサ 7 1 の出力信号 S_1 を第 1 出力信号 S_1 または第 1 センサ値 S_1 といい、第 2 磁気センサ 7 2 の出力信号 S_2 を第 2 出力信号 S_2 または第 2 センサ値 S_2 といい、第 3 磁気センサ 7 3 の出力信号 S_3 を第 3 出力信号 S_3 または第 3 センサ値 S_3 という場合がある。

以下においては、説明の便宜上、入力軸 8 の回転角を θ_A ではなく、 θ で表すことにする。各出力信号 S_1, S_2, S_3 が正弦波信号であるとみなし、入力軸 8 の回転角を（電気角）とすると、第 1 磁気センサ 7 1 の出力信号 S_1 は、 $S_1 = A_1 \cdot \sin(\theta)$ と表され、第 2 磁気センサ 7 2 の出力信号 S_2 は、 $S_2 = A_2 \cdot \sin(\theta + 120^\circ)$ と表され、第 3 磁気センサ 7 3 の出力信号 S_3 は、 $S_3 = A_3 \cdot \sin(\theta + 240^\circ)$ と表される。 A_1, A_2, A_3 は、それぞれ振幅を表している。第 1 出力信号 S_1 と第 2 出力信号 S_2 との位相差は 120° である。第 2 出力信号 S_2 と第 3 出力信号 S_3 との位相差も 120° である。したがって、第 1 出力信号 S_1 と第 3 出力信号 S_3 との位相差は 240° である。

【0044】

第 1 の回転角演算部 7 7 A による回転角 θ の演算方法の基本的な考え方について説明する。第 1 の回転角演算部 7 7 A による回転角演算モードには、第 1 演算モード ~ 第 5 演算モードがある。以下、各演算モードについて説明する。

[1] 第 1 演算モード

第 1 演算モードは、第 1 および第 2 磁気センサ 7 1, 7 2 が、3 サンプル周期（3 演算周期）連続して共に同じ 1 つの磁極を検出している場合に適用される演算モードである。第 1 演算モードでは、第 1 および第 2 磁気センサ 7 1, 7 2 における 3 サンプル分の出力信号に基づいて回転角 θ が演算される。

10

20

30

40

50

【 0 0 4 5 】

第1出力信号 S_1 と第2出力信号 S_2 との位相差(電気角)を C で表すことにする。また、今回のサンプリング周期の番号(今回の演算周期の番号)を $[n]$ 、前回のサンプリング周期の番号を $[n-1]$ 、前々回のサンプリング周期の番号を $[n-2]$ で表すことにする。また、各磁極 $M_1 \sim M_8$ の角度幅(磁極幅, ピッチ幅)のばらつきに基づく回転角演算誤差を補正するための補正値を、角度幅誤差補正値(磁極幅誤差補正値)といい、 E で表すことにする。

【 0 0 4 6 】

位相差 C 、サンプリング周期番号 $[n]$, $[n-1]$, $[n-2]$ および角度幅誤差補正値 E を用いると、今回、前回および前々回にサンプリングされた第1出力信号 S_1 ならびに今回、前回および前々回にサンプリングされた第2出力信号 S_2 を、それぞれ次式(2a), (2b), (2c), (2d), (2e), (2f)で表すことができる。

$$S_1[n] = A_1[n] \sin(E_1[n] \quad [n]) \quad \dots(2a)$$

$$S_1[n-1] = A_1[n-1] \sin(E_1[n-1] \quad [n-1]) \quad \dots(2b)$$

$$S_1[n-2] = A_1[n-2] \sin(E_1[n-2] \quad [n-2]) \quad \dots(2c)$$

$$S_2[n] = A_2[n] \sin(E_2[n] \quad [n] + C) \quad \dots(2d)$$

$$S_2[n-1] = A_2[n-1] \sin(E_2[n-1] \quad [n-1] + C) \quad \dots(2e)$$

$$S_2[n-2] = A_2[n-2] \sin(E_2[n-2] \quad [n-2] + C) \quad \dots(2f)$$

前記式(2a)~(2f)において、 $E_1[x]$ は、 x 番目の演算周期において第1磁気センサ71が検出している磁極に対応する角度幅誤差補正値である。 $E_2[x]$ は、 x 番目の演算周期において第2磁気センサ72が検出している磁極に対応する角度幅誤差補正値である。

【 0 0 4 7 】

ある磁極の角度幅を w (電気角)とすると、その磁極の角度幅誤差 e_{rr} (電気角)は、次式(3)で定義される。

$$e_{rr} = w - 180 \quad \dots(3)$$

その磁極に対する角度幅誤差補正値 E は、次式(4)で定義される。

$$E = 180 / w \\ = 180 / (e_{rr} + 180) \quad \dots(4)$$

各磁極の角度幅誤差補正値 E は、各磁極の磁極幅に関する情報である。なお、各磁極の磁極幅に関する情報は、各磁極の角度幅 w であってもよいし、各磁極の角度幅誤差 e_{rr} であってもよい。

【 0 0 4 8 】

C が既知であるとする、前記式(2a)~(2f)で表される6つの式に含まれる未知数の数は16となる。つまり、未知数の数が方程式の数より多いため、このままでは、6つの式からなる連立方程式を解くことができない。

この実施形態では、サンプリング間隔(サンプリング周期)を短く設定することにより、3サンプリング間の温度変化による振幅の変化がないとみなす。つまり、3サンプリング間の第1磁気センサ71の出力信号の振幅 $A_1[n]$, $A_1[n-1]$, $A_1[n-2]$ が互いに等しいとみなして、これらを A_1 とする。同様に、3サンプリング間の第2磁気センサ72の出力信号の振幅 $A_2[n]$, $A_2[n-1]$, $A_2[n-2]$ が互いに等しいとみなし、これらを A_2 とする。

【 0 0 4 9 】

3サンプリング間において、両磁気センサ71, 72が共に同じ1つの磁極を検出している場合には、3サンプリング分の両磁気センサ71, 72の出力信号に含まれている角度幅誤差補正値 $E_1[n]$, $E_1[n-1]$, $E_1[n-2]$, $E_2[n]$, $E_2[n-1]$, $E_2[n-2]$ は同じ値となるので、これらを E で表すことにする。これにより、前記式(2a)~(2f)は、それぞれ次式(5a)~(5f)で表わされる。

【 0 0 5 0 】

$$S_1[n] = A_1 \sin(E \quad [n]) \quad \dots(5a)$$

10

20

30

40

50

$$S_1[n-1] = A_1 \sin(E[n-1]) \quad \dots (5b)$$

$$S_1[n-2] = A_1 \sin(E[n-2]) \quad \dots (5c)$$

$$S_2[n] = A_2 \sin(E[n] + C) \quad \dots (5d)$$

$$S_2[n-1] = A_2 \sin(E[n-1] + C) \quad \dots (5e)$$

$$S_2[n-2] = A_2 \sin(E[n-2] + C) \quad \dots (5f)$$

これら6つの式に含まれる未知数 ($A_1, A_2, E, [n], [n-1], [n-2]$) の数は6となる。つまり、未知数の数が方程式の数以下となるため、6つの式からなる連立方程式を解くことができる。したがって、前記6つの式(5a)~(5f)からなる連立方程式を解くことにより、入力軸8の回転角 $[n]$ を演算することができる。

【0051】

10

以下、両磁気センサ間の位相差 C が 120 度である場合について、具体的に説明する。位相差 C が 120 度である場合には、前記6つの式(5a)~(5f)は、それぞれ次式(6a)~(6f)で表わすことができる。

$$S_1[n] = A_1 \sin(E[n]) \quad \dots (6a)$$

$$S_1[n-1] = A_1 \sin(E[n-1]) \quad \dots (6b)$$

$$S_1[n-2] = A_1 \sin(E[n-2]) \quad \dots (6c)$$

$$S_2[n] = A_2 \sin(E[n] + 120) \quad \dots (6d)$$

$$S_2[n-1] = A_2 \sin(E[n-1] + 120) \quad \dots (6e)$$

$$S_2[n-2] = A_2 \sin(E[n-2] + 120) \quad \dots (6f)$$

$E[n]$ を1つの未知数と考えると、前記6つの式(6a)~(6f)のうちの4つの式(6a), (6b), (6d), (6e)からなる連立方程式を解くことにより、 $E[n]$ は、次式(7) (以下、「 E 基本演算式(7)」という。)で表わされる。

20

【0052】

【数1】

数1

$$E\theta[n] = \frac{1}{4} \cos^{-1} \left(1 - \frac{(3p_1^2 p_2^2 - 2p_1^2 - 2p_2^2 + p_1 p_2)^2}{2(p_1 - p_2)^2 (p_1^2 + p_1 p_2 + p_2^2)} \right) - \frac{1}{4} \cos^{-1} \left(\frac{1}{2} - \frac{3}{2} \cdot \frac{p_1 p_2 + p_2^2}{p_1^2 + p_1 p_2 + p_2^2} \right) \quad \dots (7)$$

30

ただし、

$$p_1 = \frac{S_1[n]}{S_1[n-1]}$$

$$p_2 = \frac{S_2[n]}{S_2[n-1]}$$

40

である。

【0053】

また、前記6つの式(6a)~(6f)からなる連立方程式を解くことにより、角度幅誤差補正値 E は、次式(8) (以下、「 E 演算式(8)」という。)で表わされる。

【0054】

【数2】

数2

$$E = \frac{1}{240} \cdot \cos^{-1} \left(\frac{q_1^2 t^2 - 2q_1 q_2 t + q_2^2}{2t(S_1[n]S_2[n] - S_1[n-1]S_2[n-1])^2} - 1 \right) \dots (8)$$

ただし、

$$q_1 = S_1[n-1]^2 - S_1[n]^2$$

$$q_2 = S_2[n]^2 - S_2[n-1]^2$$

$$t = \frac{S_1[n]S_2[n]q_3 + S_1[n-1]S_2[n-1]q_4 + S_1[n-2]S_2[n-2]q_1}{S_1[n]S_2[n]q_5 + S_1[n-1]S_2[n-1]q_6 + S_1[n-2]S_2[n-2]q_2}$$

$$q_3 = S_1[n-2]^2 - S_1[n-1]^2$$

$$q_4 = S_1[n]^2 - S_1[n-2]^2$$

$$q_5 = S_2[n-1]^2 - S_2[n-2]^2$$

$$q_6 = S_2[n-2]^2 - S_2[n]^2$$

10

20

【0055】

したがって、前記E 基本演算式(7)により演算されたE [n]を、前記E演算式(8)により演算された角度幅誤差補正值Eで除することにより、 [n]を求めることができる。つまり、次式(9)により、 [n]を求めることができる。

$$[n] = E [n] / E \dots (9)$$

ただし、E演算式(8)に含まれている分数のいずれかの分母が零になる場合には、E演算式(8)に基づいて角度幅誤差補正值Eを演算することはできない。そこで、この実施形態では、E演算式(8)に含まれている分数のいずれかの分母が零になる場合には、前回に演算された角度幅誤差補正值Eを今回の角度幅誤差補正值Eとして用いるようにしている。

30

【0056】

なお、E演算式(8)に含まれている分数のいずれかの分母が零になる場合とは、次式(10)、(11)、(12)でそれぞれ表される3つの条件のうちの少なくとも1つの条件を満たす場合である。

【0057】

【数3】

数3

$$S_1[n]S_2[n] - S_1[n-1]S_2[n-1] = 0 \quad \dots (10)$$

$$S_1[n]S_2[n]q_3 + S_1[n-1]S_2[n-1]q_4 + S_1[n-2]S_2[n-2]q_1 = 0 \quad \dots (11)$$

$$S_1[n]S_2[n]q_5 + S_1[n-1]S_2[n-1]q_6 + S_1[n-2]S_2[n-2]q_2 = 0 \quad \dots (12)$$

$$q_1 = S_1[n-1]^2 - S_1[n]^2$$

$$q_2 = S_2[n]^2 - S_2[n-1]^2$$

$$q_3 = S_1[n-2]^2 - S_1[n-1]^2$$

$$q_4 = S_1[n]^2 - S_1[n-2]^2$$

$$q_5 = S_2[n-1]^2 - S_2[n-2]^2$$

$$q_6 = S_2[n-2]^2 - S_2[n]^2$$

10

20

【0058】

また、E 基本演算式(7)に含まれている分数のいずれかの分母が零になる場合には、E 基本演算式(7)に基づいてE [n]を演算することはできない。そこで、この実施形態では、E 基本演算式(7)に含まれている分数のいずれかの分母が零になる場合には、E 基本演算式(7)とは異なる演算式によってE [n]を演算するようにしている。さらに、この実施形態では、E 基本演算式(7)に基づいてE [n]を演算することができるけれども、より簡単な演算式によってE [n]を演算できる場合には、E 基本演算式(7)とは異なる演算式によってE [n]を演算するようにしている。この実施形態では、E 基本演算式(7)よりも簡単にE [n]を演算できる場合とは、 $S_2[n] = 0$ の場合または $S_1[n] = 0$ の場合である。

30

【0059】

この実施形態では、E [n]を演算するための演算式として、E 基本演算式(7)を含めて10種類の演算式が用意されている。表1は、10種類の演算式と、その演算式が適用される条件とを示している。なお、E [n]を演算する際には、表1の上から順番にその条件を満たしているか否かが判別され、条件を満たしたと判別されるとそれ以降の条件判別は行われず、当該条件に対応する演算式により、E [n]が演算される。

【0060】

【表 1】

	条件 (AND)	演算式
1	$S_1[n] \neq 0, S_2[n-1] \neq 0, S_2[n] \neq 0, S_1[n-1] \neq 0, P_1 - P_2 \neq 0$	E 基本演算式 (式(7))
2	$S_1[n] \neq 0, S_2[n-1] \neq 0, S_2[n] \neq 0, S_1[n-1] \neq 0, P_1 - P_2 = 0$	$E\theta[n] \leftarrow$ 前回値
3	$S_1[n] \neq 0, S_2[n-1] \neq 0, S_2[n] \neq 0, S_1[n-1] = 0, S_2[n-1] > 0$	$E\theta[n] = \sin^{-1} \left[\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{S_2[n]}{S_2[n-1]} \right] - 120$
4	$S_1[n] \neq 0, S_2[n-1] \neq 0, S_2[n] \neq 0, S_1[n-1] = 0, S_2[n-1] < 0$	$E\theta[n] = \sin^{-1} \left[-\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{S_2[n]}{S_2[n-1]} \right] - 120$
5	$S_1[n] \neq 0, S_2[n-1] \neq 0, S_2[n] = 0, S_1[n] > 0$	$E\theta[n] = 60$
6	$S_1[n] \neq 0, S_2[n-1] \neq 0, S_2[n] = 0, S_1[n] < 0$	$E\theta[n] = -120$
7	$S_1[n] \neq 0, S_2[n-1] = 0, S_1[n-1] > 0$	$E\theta[n] = \sin^{-1} \left[\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{S_1[n]}{S_1[n-1]} \right]$
8	$S_1[n] \neq 0, S_2[n-1] = 0, S_1[n-1] < 0$	$E\theta[n] = \sin^{-1} \left[-\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{S_1[n]}{S_1[n-1]} \right]$
9	$S_1[n] = 0, S_2[n] > 0$	$E\theta[n] = 0$
10	$S_1[n] = 0, S_2[n] < 0$	$E\theta[n] = 180$

表1

【 0 0 6 1 】

表 1 の上から 1 番目の演算式は、E 基本演算式(7)である。E 基本演算式(7)は、 $S_1[n]$ および $S_2[n]$ のいずれもが零でなく、かつE 基本演算式(7)に含まれている分数のいずれの分母も零でないという条件を満たしている場合に、適用される。E 基本演算式(7)に含まれている分数のいずれの分母も零でないという条件は、 $p_1 - p_2 = 0$ でかつ、 $p_1^2 + p_1 p_2 + p_2^2 = 0$ でかつ、 $S_1[n-1] > 0$ でかつ $S_2[n-1] > 0$ である場合に満たされる。なお、 $S_1[n-1]$ は p_1 の分母であり、 $S_2[n-1]$ は p_2 の分母である。

【 0 0 6 2 】

ただし、 $p_1^2 + p_1 p_2 + p_2^2 = 0$ が成立するのは、 $p_1 = p_2 = 0$ の場合だけで

あるが、第1磁気センサ71と第2磁気センサ72とは位相が120度ずれているため、両磁気センサ71, 72のセンサ値 S_1, S_2 が同時に零になることはない。このため、 $p_1^2 + p_1 p_2 + p_2^2 = 0$ が成立することはない。したがって、E 基本演算式(7)に含まれている分数のいずれの分母も零でないという条件は、 $p_1 - p_2 = 0$ でかつ、 $S_1[n-1] = 0$ でかつ $S_2[n-1] = 0$ である場合に満たされる。

【0063】

表1の上から2番目の演算式は、 $p_1 - p_2 = 0$ である場合に適用される演算式である。 $p_1 - p_2 = 0$ が成立する場合について検討する。この場合には、 $p_1 = p_2$ であるから、次式(13)が成立する。

【0064】

【数4】

数4

$$\frac{A_1 \sin E \theta [n]}{A_1 \sin E \theta [n-1]} = \frac{A_2 \sin(E \theta [n] + 120)}{A_2 \sin(E \theta [n-1] + 120)} \dots (13)$$

【0065】

これを変形すると、次式(14)が得られる。

【0066】

【数5】

数5

$$\frac{\sin E \theta [n-1]}{\sin E \theta [n]} \cdot \frac{\sin(E \theta [n] + 120)}{\sin(E \theta [n-1] + 120)} = 1 \dots (14)$$

【0067】

前記式(14)が成立する場合とは、 $E[n]$ と $E[n-1]$ とが等しい場合である。つまり、今回の $E[n]$ が前回の $E[n-1]$ に等しい場合である。そこで、 $S_1[n]$ および $S_2[n]$ のいずれもが零でなく、かつ p_1 の分母 $S_1[n-1]$ および p_2 の分母 $S_2[n-1]$ のいずれもが零でなく、かつ $p_1 - p_2 = 0$ であるという条件を満たした場合には、前回に演算された $E[n-1]$ が今回の $E[n]$ として用いられる。

【0068】

表1の上から3番目および4番目の演算式は、 p_1 の分母 $S_1[n-1]$ が零となる場合に適用される演算式である。 $S_1[n-1] = A_1 \sin E[n-1]$ であるので、 $\sin E[n-1] = 0$ のときに、 $S_1[n-1] = 0$ となる。つまり、 $E[n-1]$ が0度または180度のときに、 $S_1[n-1]$ が零となる。 $S_2[n-1] = A_2 \sin(E[n-1] + 120)$ であるので、 $E[n-1]$ が0度のときには $S_2[n-1] > 0$ となり、 $E[n-1]$ が180度のときには $S_2[n-1] < 0$ となる。したがって、 $S_1[n-1] = 0$ でかつ $S_2[n-1] > 0$ のときには $E[n-1] = 0$ となり、 $S_1[n-1] = 0$ でかつ $S_2[n-1] < 0$ のときには $E[n-1] = 180$ となる。

【0069】

$E[n-1] = 0$ である場合には、前記式(6c), (6d)は、それぞれ次式(15c), (15d)で表される。

$$S_2[n] = A_2 \sin(E[n] + 120) \dots (15c)$$

$$S_2[n-1] = A_2 \sin 120 = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot A_2 \dots (15d)$$

前記式(15d)から、次式(16)が得られる。

【0070】

$$A_2 = \left(\frac{2}{\sqrt{3}}\right) \cdot S_2[n-1] \dots (16)$$

前記式(16)を前記式(15c)に代入すると、次式(17)が得られる。

$$\sin(E[n] + 120) = \left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right) \cdot \left(S_2[n] / S_2[n-1]\right) \dots (17)$$

10

20

30

40

50

したがって、E [n] は、次式(18)により演算することができる。

【 0 0 7 1 】

【 数 6 】

数6

$$E \theta [n] = \sin^{-1} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{S_2[n]}{S_2[n-1]} \right) - 120 \quad \dots (18)$$

【 0 0 7 2 】

つまり、表 1 の上から 3 番目に示すように、 $S_1 [n]$ および $S_2 [n]$ のいずれもが零でなく、かつ p_2 の分母 $S_2 [n-1]$ が零でなく、かつ p_1 の分母 $S_1 [n-1]$ が零であり、かつ $S_2 [n-1] > 0$ であるという条件を満たした場合には、前記式(18)で表される演算式に基づいて $E [n]$ が演算される。 10

一方、 $E [n-1] = 180$ である場合には、前記式 (6c) , (6d) は、それぞれ次式(19c) , (19d)で表される。

【 0 0 7 3 】

$$S_2 [n] = A_2 \sin (E [n] + 120) \quad \dots (19c)$$

$$S_2 [n-1] = A_2 \sin 300 = - \frac{3}{2} \cdot A_2 \quad \dots (19d)$$

前記式(19d)から、次式(20)が得られる。

$$A_2 = (- \frac{2}{3}) \cdot S_2 [n-1] \quad \dots (20) \quad 20$$

前記式(20)を前記式(19c)に代入すると、次式(21)が得られる。

【 0 0 7 4 】

$$\sin (E [n] + 120) = (- \frac{3}{2}) \cdot (S_2 [n] / S_2 [n-1]) \quad \dots (21)$$

したがって、 $E [n]$ は、次式(22)により演算することができる。

【 0 0 7 5 】

【 数 7 】

数7

$$E \theta [n] = \sin^{-1} \left(- \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{S_2[n]}{S_2[n-1]} \right) - 120 \quad \dots (22)$$

30

【 0 0 7 6 】

つまり、表 1 の上から 4 番目に示すように、 $S_1 [n]$ および $S_2 [n]$ のいずれもが零でなく、かつ p_2 の分母 $S_2 [n-1]$ が零でなく、かつ p_1 の分母 $S_1 [n-1]$ が零であり、かつ $S_2 [n-1] < 0$ であるという条件を満たした場合には、前記式(22)で表される演算式に基づいて $E [n]$ が演算される。

表 1 の上から 5 番目および 6 番目の演算式は、 $S_2 [n] = 0$ となる場合に適用される演算式である。 $S_2 [n] = A_2 \sin (E [n] + 120)$ であるので、 $\sin (E [n] + 120) = 0$ のときに、 $S_2 [n] = 0$ となる。つまり、 $E [n]$ が -120 度または 60 度のときに、 $S_2 [n] = 0$ となる。 $S_1 [n] = A_1 \sin E [n]$ であるので、 $E [n]$ が -120 度のときには $S_1 [n] < 0$ となり、 $E [n]$ が 60 度のときには $S_1 [n] > 0$ となる。したがって、 $S_2 [n] = 0$ かつ $S_1 [n] > 0$ のときには $E [n] = 60$ となり、 $S_2 [n] = 0$ かつ $S_1 [n] < 0$ であれば $E [n] = -120$ となる。 40

【 0 0 7 7 】

つまり、表 1 の上から 5 番目に示すように、 $S_1 [n]$ が零でなく、かつ p_2 の分母 $S_2 [n-1]$ が零でなく、かつ $S_2 [n] = 0$ であり、かつ $S_1 [n] > 0$ であるという条件を満たした場合には、 $E [n]$ は 60 度として演算される。また、表 1 の上から 6 番目に示すように、 $S_1 [n]$ が零でなく、かつ p_2 の分母 $S_2 [n-1]$ が零でなく、かつ $S_2 [n] = 0$ であり、かつ $S_1 [n] > 0$ であるという条件を満たした場合には、 $E [n]$ は -120 度として演算される。 50

【 0 0 7 8 】

表 1 の上から 7 番目および 8 番目の演算式は、 p_2 の分母 $S_2[n-1]$ が零となる場合に適用される演算式である。 $S_2[n-1] = A_2 \sin(E[n-1] + 120)$ であるので、 $\sin(E[n-1] + 120) = 0$ のときに、 $S_2[n-1] = 0$ となる。つまり、 $E[n-1]$ が -120 度または 60 度のときに、 $S_2[n-1]$ が零となる。 $S_1[n-1] = A_1 \sin E[n-1]$ であるので、 $E[n-1]$ が -120 度のときには $S_1[n-1] < 0$ となり、 $E[n-1]$ が 60 度のときには $S_1[n-1] > 0$ となる。したがって、 $S_2[n-1] = 0$ かつ $S_1[n-1] > 0$ のときには $E[n-1] = 60$ となり、 $S_2[n-1] = 0$ かつ $S_1[n-1] < 0$ のときには $E[n-1] = -120$ となる。

【 0 0 7 9 】

$E[n-1] = 60$ である場合には、前記式 (6a), (6b) は、それぞれ次式 (23a), (23b) で表される。

$$S_1[n] = A_1 \sin E[n] \quad \dots (23a)$$

$$S_1[n-1] = A_1 \sin 60 = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot A_1 \quad \dots (23b)$$

前記式 (23b) から、次式 (24) が得られる。

【 0 0 8 0 】

$$A_1 = \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \right) \cdot S_1[n-1] \quad \dots (24)$$

前記式 (24) を前記式 (23a) に代入すると、次式 (25) が得られる。

$$\sin E[n] = \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \cdot \left(S_1[n] / S_1[n-1] \right) \quad \dots (25)$$

したがって、 $E[n]$ は、次式 (26) により演算することができる。

【 0 0 8 1 】

【 数 8 】

数8

$$E\theta[n] = \sin^{-1} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{S_1[n]}{S_1[n-1]} \right) \quad \dots (26)$$

【 0 0 8 2 】

つまり、表 1 の上から 7 番目に示すように、 $S_1[n]$ が零でなく、かつ p_2 の分母 $S_2[n-1]$ が零であり、かつ $S_1[n-1] > 0$ であるという条件を満たした場合には、前記式 (26) で表される演算式に基づいて $E[n]$ が演算される。

一方、 $E[n-1] = -120$ である場合には、前記式 (6a), (6b) は、それぞれ次式 (27a), (27b) で表される。

【 0 0 8 3 】

$$S_1[n] = A_1 \sin E[n] \quad \dots (27a)$$

$$S_1[n-1] = A_1 \sin(-120) = -\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot A_1 \quad \dots (27b)$$

前記式 (27b) から、次式 (28) が得られる。

$$A_1 = \left(-\frac{2}{\sqrt{3}} \right) \cdot S_1[n-1] \quad \dots (28)$$

前記式 (28) を前記式 (27a) に代入すると、次式 (29) が得られる。

【 0 0 8 4 】

$$\sin E[n] = \left(-\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \cdot \left(S_1[n] / S_1[n-1] \right) \quad \dots (29)$$

したがって、 $E[n]$ は、次式 (30) により演算することができる。

【 0 0 8 5 】

【 数 9 】

数9

$$E\theta[n] = \sin^{-1} \left(-\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{S_1[n]}{S_1[n-1]} \right) \quad \dots (30)$$

【 0 0 8 6 】

10

20

30

40

50

つまり、表1の上から8番目に示すように、 $S_1[n]$ が零でなく、かつ p_2 の分母 $S_2[n-1]$ が零であり、かつ $S_1[n-1] < 0$ であるという条件を満たした場合には、前記式(30)で表される演算式に基づいて $E[n]$ が演算される。

表1の上から9番目および10番目の演算式は、 $S_1[n] = 0$ となる場合に適用される演算式である。 $S_1[n] = A_1 \sin E[n]$ であるので、 $\sin E[n] = 0$ のときに、 $S_1[n] = 0$ となる。つまり、 $E[n]$ が0度または180度のときに、 $S_1[n] = 0$ となる。 $S_2[n] = A_2 \sin(E[n] + 120)$ であるので、 $E[n]$ が0度のときには $S_2[n] > 0$ となり、 $E[n]$ が180度のときには $S_2[n] < 0$ となる。したがって、 $S_1[n] = 0$ でかつ $S_2[n] > 0$ であれば $E[n] = 0$ となり、 $S_1[n] = 0$ でかつ $S_2[n] < 0$ であれば $E[n] = 180$ となる。

10

【0087】

つまり、表1の上から9番目に示すように、 $S_1[n]$ が零であり、かつ $S_2[n] > 0$ であるという条件を満たした場合には、 $E[n]$ は0度として演算される。また、表1の上から10番目に示すように、 $S_1[n]$ が零であり、かつ $S_2[n] < 0$ であるという条件を満たした場合には、 $E[n]$ は180度として演算される。

$E[n]$ が演算されると、前記式(6a)に基づいて振幅 A_1 を演算することができる。また、前記式(6d)に基づいて振幅 A_2 を演算することができる。つまり、第1演算モードによって、 $E[n]$ 、 A_1 、 A_2 を演算することができる。

[2] 第2演算モード

第2演算モードは、第2および第3磁気センサ72、73が、3サンプリング周期(3演算周期)連続して共に同じ1つの磁極を検出している場合に適用される演算モードである。第2演算モードでは、第2および第3磁気センサ72、73における3サンプリング分の出力信号に基づいて回転角が演算される。

20

【0088】

第2磁気センサ72および第3磁気センサ73の出力信号 S_2 、 S_3 を、角度幅誤差補正值 E を用いて表すと、第2磁気センサ72の出力信号 $S_2[n]$ は $S_2[n] = A_2 \cdot \sin(E_2[n] + 120)$ で表され、第3磁気センサ73の出力信号 $S_3[n]$ は、 $S_3[n] = A_3 \cdot \sin(E_3[n] + 240)$ と表される。ここで、 E_3 は、第3磁気センサ73が検出している磁極に対応する角度幅誤差補正值である。第2磁気センサ72および第3磁気センサ73が同じ磁極を検出している場合には、 E_2 と E_3 とは等しいので、これらを E で表すと、第2磁気センサ72の出力信号 $S_2[n]$ は $S_2[n] = A_2 \cdot \sin(E[n] + 120)$ で表され、第3磁気センサ73の出力信号 $S_3[n]$ は、 $S_3[n] = A_3 \cdot \sin(E[n] + 240)$ と表される。

30

【0089】

$(E[n] + 120)$ を $E[n]$ に置き換えると、第2出力信号 $S_2[n]$ は $S_2[n] = A_2 \cdot \sin E[n]$ で表され、第3出力信号 $S_3[n]$ は $S_3[n] = A_3 \cdot \sin(E[n] + 120)$ で表わされる。したがって、第2出力信号 S_2 と第3出力信号 S_3 とを用い、前述した方法と同様な方法で $E[n]$ と E とを演算することができる。 $E[n] = E[n] + 120$ であるので、 $[n] = (E[n] - 120) / E$ である。したがって、 $[n] = (E[n] - 120) / E$ の式に、演算された $E[n]$ と E を代入することにより、入力軸8の回転角 $[n]$ を演算することができる。また、 $E[n]$ が演算されると、振幅 A_2 および振幅 A_3 を演算することができる。つまり、第2演算モードによって、 $E[n]$ 、 A_2 、 A_3 を演算することができる。

40

【0090】

第2演算モードによる回転角演算に用いられる3サンプリング分の第2および第3出力信号を、前記式(6a)～(6f)にならって次式(31a)～(31f)で表すと、 E 基本演算式および E 演算式はそれぞれ次式(32)および(33)で表すことができる。

$$S_2[n] = A_2 \sin(E[n] + 120) \quad \dots (31a)$$

$$S_2[n-1] = A_2 \sin(E[n-1] + 120) \quad \dots (31b)$$

$$S_2[n-2] = A_2 \sin(E[n-2] + 120) \quad \dots (31c)$$

50

$$S_3[n] = A_3 \sin(E[n] + 120) \quad \dots (31d)$$

$$S_3[n-1] = A_3 \sin(E[n-1] + 120) \quad \dots (31e)$$

$$S_3[n-2] = A_3 \sin(E[n-2] + 120) \quad \dots (31f)$$

【 0 0 9 1 】

【 数 1 0 】

数10

$$E\Theta[n] = \frac{1}{4} \cos^{-1} \left(1 - \frac{(3p_1'^2 p_2'^2 - 2p_1'^2 - 2p_2'^2 + p_1' p_2')^2}{2(p_1' - p_2')^2 (p_1'^2 + p_1' p_2' + p_2'^2)} \right) \\ - \frac{1}{4} \cos^{-1} \left(\frac{1}{2} - \frac{3}{2} \cdot \frac{p_1' p_2' + p_2'^2}{p_1'^2 + p_1' p_2' + p_2'^2} \right) \quad \dots (32)$$

10

ただし、

$$p_1' = \frac{S_2[n]}{S_2[n-1]}$$

$$p_2' = \frac{S_3[n]}{S_3[n-1]}$$

20

である。

【 0 0 9 2 】

【 数 1 1 】

数11

$$E = \frac{1}{240} \cdot \cos^{-1} \left(\frac{q_1'^2 t'^2 - 2q_1' q_2' t' + q_2'^2}{2t' (S_2[n] S_3[n] - S_2[n-1] S_3[n-1])^2} - 1 \right) \quad \dots (33)$$

30

ただし、

$$q_1' = S_2[n-1]^2 - S_2[n]^2$$

$$q_2' = S_3[n]^2 - S_3[n-1]^2$$

$$t' = \frac{S_2[n] S_3[n] q_3' + S_2[n-1] S_3[n-1] q_4' + S_2[n-2] S_3[n-2] q_1'}{S_2[n] S_3[n] q_5' + S_2[n-1] S_3[n-1] q_6' + S_2[n-2] S_3[n-2] q_2'}$$

40

$$q_3' = S_2[n-2]^2 - S_2[n-1]^2$$

$$q_4' = S_2[n]^2 - S_2[n-2]^2$$

$$q_5' = S_3[n-1]^2 - S_3[n-2]^2$$

$$q_6' = S_3[n-2]^2 - S_3[n]^2$$

【 0 0 9 3 】

第1演算モードまたは第2演算モードでは、3つの磁気センサ71, 72, 73のうち

50

の2つの磁気センサにおける3サンプリング分の出力信号に基づいて入力軸8の回転角[n]を演算しているため、精度の高い回転角を演算することが可能となる。また、第1演算モードまたは第2演算モードでは、入力軸8の回転角[n]の演算に用いられる数式の数が、これらの数式に含まれている本来の未知数の数より少なくても、入力軸8の回転角[n]を演算することができるので、入力軸8の回転角[n]を演算するために必要なセンサ値の数を少なくすることが可能となる。

【0094】

第1演算モードまたは第2演算モードでは、3サンプリング間での同じ磁気センサの出力信号の振幅が互いに等しいとみなしている。3サンプリング間での同じ磁気センサの出力信号の振幅は、温度変化の影響によって異なる値となる可能性がある。しかしながら、サンプリング間隔が小さい場合には、3サンプリング間の温度変化は非常に小さいので、3サンプリング間での同じ磁気センサの出力信号の振幅は等しいとみなすことができる。したがって、第1演算モードまたは第2演算モードでは、3サンプリング間での温度変化の影響による振幅のばらつきを補償することができる。また、第1演算モードまたは第2演算モードでは、回転角の演算に用いられている2つの磁気センサ間の振幅は、別々の未知数として扱っているため、それらの2つの磁気センサ間の温度特性のばらつきの影響を補償することができる。これにより、精度の高い回転角を検出することができる。

【0095】

また、第1演算モードまたは第2演算モードでは、磁石61の各磁極M1～M8の角度幅(ピッチ幅)のばらつきを高い精度で補償できるので、誤差のより小さい回転角を検出することが可能となる。

[3]第3演算モード

第3演算モードは、第1演算モードおよび第2演算モードのいずれもが適用できない場合であって、第1磁気センサ71が検出している磁極に対応する角度幅誤差補正值 E_1 および第1出力信号 S_1 の振幅 A_1 が第1演算モードによって既に演算されてメモリに記憶されている場合に適用される演算モードである。第3演算モードでは、主として第1磁気センサ71の出力信号 S_1 に基づいて回転角が演算される。

【0096】

たとえば、図8Aに示すように、磁石61(入力軸8)が矢印で示す方向に回転している場合において、第1および第2磁気センサ71,72が同じ磁極(この例ではM1)を検出している状態から、第2磁気センサ72の検出している磁極が変化した場合に、第3演算モードは適用される。

角度幅誤差補正值 E と今演算周期の番号 n を用いると、今演算周期においてサンプリングされた第1磁気センサ71の出力信号 S_1 は、次式(34)で表される。

【0097】

$$S_1[n] = A_1[n] \sin(E_1[n]) \quad \dots (34)$$

E_1 は、第1磁気センサ71が検出している磁極に対応する角度幅誤差補正值である。

前記式(34)から回転角[n]は、次式(35)で表される。

$$[n] = (1/E_1) \sin^{-1}(S_1[n]/A_1) \quad \dots (35)$$

メモリに記憶されており、第1磁気センサ71が検出している磁極に対応する E_1 および A_1 を、前記式(35)に代入することにより、[n]が演算される。ただし、式(35)によって回転角[n]を演算する場合には、2つの回転角[n]が演算されるので、いずれの回転角が実際の回転角であるかを判定する必要がある。この判定方法について、図9を参照して説明する。図9には、第1出力信号 S_1 、第2出力信号 S_2 および第3出力信号 S_3 の1周期分の波形が示されている。図9の横軸の回転角[deg]は、電気角を表している。

【0098】

図9に示すように、第1出力信号 $S_1[n]$ がたとえば正の値である場合には、 $(1/E_1) \sin^{-1}(S_1[n]/A_1)$ に対応する回転角[n]は、0度～90度の領域R1内の回転角と、90度～180度の領域R2内の回転角との2つの回転角となる。また、第1

10

20

30

40

50

出力信号 $S_1[n]$ がたとえば負の値である場合には、 $(1/E_1) \sin^{-1}(S_1[n]/A_1)$ に対応する回転角 $\theta_1[n]$ は、 $180^\circ \sim 270^\circ$ の領域 U_1 内の回転角と、 $270^\circ \sim 360^\circ$ の領域 U_2 内の回転角との2つの回転角となる。

【0099】

この実施形態では、第1磁気センサ71以外の2つの磁気センサ72, 73の出力信号 S_2, S_3 のいずれか一方に基づいて、前記式(35)によって演算される2つの回転角のうちのいずれが実際の回転角であるかが判定される。たとえば、第2出力信号 $S_2[n]$ に基づいて、前記判定が行われる場合について説明する。第2出力信号 S_2 の振幅 A_2 の $1/2$ を閾値 a ($a > 0$) とする。この閾値 a は、たとえば、メモリに記憶されている第2出力信号 S_2 の振幅 A_2 であって、第1磁気センサ71が検出している磁極に対応する振

10

【0100】

第2出力信号 $S_2[n]$ が a 以上のときに取り得る入力軸8の回転角 $\theta_2[n]$ は、 $0^\circ \sim 30^\circ$ の範囲および $270^\circ \sim 360^\circ$ の範囲である。第2出力信号 $S_2[n]$ が $-a$ 未満のときに取り得る入力軸8の回転角 $\theta_2[n]$ は、 $90^\circ \sim 210^\circ$ の範囲である。第2出力信号 $S_2[n]$ が $-a$ 以上 a 未満のときに取り得る入力軸8の回転角 $\theta_2[n]$ は、 $30^\circ \sim 90^\circ$ の範囲および $210^\circ \sim 270^\circ$ の範囲である。

【0101】

したがって、前記式(35)によって演算された2つの回転角のうち、いずれの回転角が実際の回転角であるかを、第2出力信号 $S_2[n]$ に基づいて判定することができる。具体的には、第1出力信号 $S_1[n]$ が正の値である場合には、第2出力信号 $S_2[n]$ が $-a$ 以上であれば、前記式(35)によって演算された2つの回転角のうち領域 R_1 内の回転角が実際の回転角であると判定される。一方、第2出力信号 $S_2[n]$ が $-a$ 未満であれば、前記式(35)によって演算された2つの回転角のうち領域 R_2 内の回転角が実際の回転角であると判定される。

20

【0102】

第1出力信号 $S_1[n]$ が負の値である場合には、第2出力信号 $S_2[n]$ が a 未満であれば、前記式(35)によって演算された2つの回転角のうち領域 U_1 内の回転角が実際の回転角であると判定される。一方、第2出力信号 $S_2[n]$ が a 以上であれば、前記式(35)によって演算された2つの回転角のうち領域 U_2 内の回転角が実際の回転角であると判定される。

30

[4] 第4演算モード

第4演算モードは、第1演算モードおよび第2演算モードのいずれもが適用できない場合であって、第2磁気センサ72が検出している磁極に対応する角度幅誤差補正值 E_2 および第2出力信号 S_2 の振幅 A_2 が第1演算モードまたは第3演算モードによって既に演算されてメモリに記憶されている場合に適用される演算モードである。第4演算モードでは、主として第2磁気センサ72の出力信号 S_2 に基づいて回転角 θ_2 が演算される。

【0103】

たとえば、図8Bに示すように、磁石61(入力軸8)が矢印で示す方向に回転している場合において、第1および第2磁気センサ71, 72が同じ磁極(この例では M_1)を検出している状態から、第1磁気センサ71が検出している磁極が変化した場合に、第4演算モードは適用される。

40

角度幅誤差補正值 E と今演算周期の番号 n を用いると、今演算周期においてサンプリングされた第2磁気センサ72の出力信号 S_2 は、次式(36)で表される。

【0104】

$$S_2[n] = A_2[n] \sin(E_2[n] + 120) \quad \dots(36)$$

E_2 は、第2磁気センサ72が検出している磁極に対応する角度幅誤差補正值である。前記式(36)から回転角 $\theta_2[n]$ は、次式(37)で表される。

$$\theta_2[n] = (1/E_2) \{ \sin^{-1}(S_2[n]/A_2) - 120 \} \quad \dots(37)$$

50

メモリに記憶されており、第2磁気センサ72が検出している磁極に対応する E_2 および A_2 を、前記式(37)に代入することにより、 $[n]$ が演算される。

【0105】

前記式(37)によって回転角 $[n]$ を演算すると、2つの回転角 $[n]$ が演算される。そこで、第2磁気センサ72以外の2つの磁気センサ71, 73の出力信号 S_1, S_3 のいずれか一方に基づいて、前記式(37)によって演算された2つの回転角 $[n]$ のうちのいずれが実際の回転角であるかを判定する。

たとえば、第1出力信号 $S_1[n]$ に基づいて、前記判定が行われる場合について説明する。メモリに記憶されている第1出力信号 S_1 の振幅 A_1 の $1/2$ または第2出力信号 S_2 の振幅 A_2 の $1/2$ を閾値 a ($a > 0$)とする。

10

【0106】

第2出力信号 $S_2[n]$ が正の値である場合には、第1出力信号 $S_1[n]$ が $-a$ 未満であれば、前記式(37)によって演算された2つの回転角のうち $240^\circ \sim 330^\circ$ の領域内の回転角が実際の回転角であると判定される。一方、第1出力信号 $S_1[n]$ が $-a$ 以上であれば、前記式(37)によって演算された2つの回転角のうち $0^\circ \sim 60^\circ$ または $330^\circ \sim 360^\circ$ の領域内の回転角が実際の回転角であると判定される。

【0107】

第2出力信号 $S_2[n]$ が負の値である場合には、第1出力信号 $S_1[n]$ が a 以上であれば、前記式(37)によって演算された2つの回転角のうち $60^\circ \sim 150^\circ$ の領域内の回転角が実際の回転角であると判定される。一方、第1出力信号 $S_1[n]$ が a 未満であれば、前記式(37)によって演算された2つの回転角のうち $150^\circ \sim 240^\circ$ の領域内の回転角が実際の回転角であると判定される。

20

[5] 第5演算モード

第5演算モードは、第1演算モードおよび第2演算モードのいずれもが適用できない場合であって、第3磁気センサ73が検出している磁極に対応する角度幅誤差補正值 E_3 および第3出力信号 S_3 の振幅 A_3 が第2演算モードによって既に演算されてメモリに記憶されている場合に適用される演算モードである。第5演算モードでは、主として第3磁気センサ72の出力信号 S_3 に基づいて回転角 $[n]$ が演算される。

【0108】

たとえば、図8Cに示すように、磁石61(入力軸8)が矢印で示す方向に回転している場合において、第2および第3磁気センサ72, 73が同じ磁極(この例ではM2)を検出している状態から、第2磁気センサ72が検出している磁極が変化した場合に、第5演算モードは適用される。

30

角度幅誤差補正值 E と今演算周期の番号 n を用いると、今演算周期においてサンプリングされた第3磁気センサ73の出力信号 S_3 は、次式(38)で表される。

【0109】

$$S_3[n] = A_3[n] \sin(E_3[n] + 240) \quad \dots (38)$$

E_3 は、第3磁気センサ72が検出している磁極に対応する角度幅誤差補正值である。

前記式(38)から回転角 $[n]$ は、次式(39)で表される。

$$[n] = (1/E_3) \{ \sin^{-1}(S_3[n]/A_3) - 120 \} \quad \dots (39)$$

40

メモリに記憶されており、第3磁気センサ73が検出している磁極に対応する E_3 および A_3 を、前記式(39)に代入することにより、 $[n]$ が演算される。

【0110】

前記式(39)によって回転角 $[n]$ を演算すると、2つの回転角 $[n]$ が演算される。そこで、第3磁気センサ73以外の2つの磁気センサ71, 72の出力信号 S_1, S_2 のいずれか一方に基づいて、前記式(39)によって演算された2つの回転角 $[n]$ のうちのいずれが実際の回転角であるかを判定する。

たとえば、第2出力信号 $S_2[n]$ に基づいて、前記判定が行われる場合について説明する。メモリに記憶されている第2出力信号 S_2 の振幅 A_2 の $1/2$ または第3出力信号 S_3 の振幅 A_3 の $1/2$ を閾値 a ($a > 0$)とする。

50

【 0 1 1 1 】

第3出力信号 $S_3[n]$ が正の値である場合には、第2出力信号 $S_2[n]$ が $-a$ 未満であれば、前記式(39)によって演算された2つの回転角のうち $120^\circ \sim 210^\circ$ の領域内の回転角が実際の回転角であると判定される。一方、第2出力信号 $S_2[n]$ が $-a$ 以上であれば、前記式(39)によって演算された2つの回転角のうち $210^\circ \sim 300^\circ$ の領域内の回転角が実際の回転角であると判定される。

【 0 1 1 2 】

第3出力信号 $S_3[n]$ が負の値である場合には、第2出力信号 $S_2[n]$ が a 以上であれば、前記式(39)によって演算された2つの回転角のうち $300^\circ \sim 360^\circ$ 度または $0^\circ \sim 30^\circ$ の領域内の回転角が実際の回転角であると判定される。一方、第2出力信号 $S_2[n]$ が a 未満であれば、前記式(39)によって演算された2つの回転角のうち $30^\circ \sim 120^\circ$ の領域内の回転角が実際の回転角であると判定される。

10

【 0 1 1 3 】

図10は、第1の回転角演算部77Aの動作を示すフローチャートである。

トルク演算用 ECU77 の電源がオンすると、第1の回転角演算部77Aは、強制回転に基づく回転角演算処理を行う(ステップS1)。この処理は、電動モータ18を一時的に強制回転させることにより、入力軸8(出力軸9)を回転させ、入力軸8の回転角を演算する処理である。この処理の詳細については後述する。

【 0 1 1 4 】

前述した第1演算モードまたは第2演算モードでは、前回のサンプリング時点と今回のサンプリング時点とにおいて、回転角 $[n]$ の演算に用いられる2つの磁気センサの出力信号が変化していない場合には、前回演算された $E[n]$ (または $E[n]$)、 E および $[n]$ が、今回の $E[n]$ (または $E[n]$)、 E および $[n]$ として用いられる(表1の上から2番目の演算式を参照)。しかしながら、イグニッションキーがオン操作されることによって、トルク演算用 ECU77 の電源がオンされた時点では、前回演算された $E[n]$ (または $E[n]$)、 E および $[n]$ は存在しないため、トルク演算用 ECU77 の電源がオンされた後に、回転角 $[n]$ の演算に用いられる2つの磁気センサの出力信号が変化していない場合には、回転角 $[n]$ を演算できなくなる。そこで、 $E[n]$ (または $E[n]$)、 E および $[n]$ の前回値を作成するために、強制回転に基づく回転角演算処理を行っている。

20

30

【 0 1 1 5 】

強制回転に基づく回転角演算処理が終了すると、第1の回転角演算部77Aは、通常時の回転角演算処理を行う(ステップS2)。この処理の詳細については後述する。通常時の回転角演算処理は、イグニッションキーのオフ操作が行われるまで継続して行われる。イグニッションキーのオフ操作が行われると(ステップS3: YES)、第1の回転角演算部77Aは通常時の回転角演算処理を終了する。

【 0 1 1 6 】

図11A、図11Bおよび図11Cは、図10のステップS1の強制回転に基づく回転角演算処理の手順を示すフローチャートである。

強制回転に基づく回転角演算処理開始時において第1磁気センサ71が検出している磁極を基準磁極として、各磁極に相対的な番号を割り当てた場合の各磁極の番号を相対的極番号と定義する。第1磁気センサ71が検出している磁極の相対的極番号(以下、「第1相対的極番号」という)を変数 r_1 で表し、第2磁気センサ72が検出している磁極の相対的極番号(以下、「第2相対的極番号」という)を変数 r_2 で表し、第3磁気センサ73が検出している磁極の相対的極番号(以下、「第3相対的極番号」という)を変数 r_3 で表すことにする。なお、各相対的極番号 r_1, r_2, r_3 は、 $1 \sim 8$ の整数をとり、 1 より 1 少ない相対的極番号は 8 となり、 8 より 1 大きい相対的極番号は 1 となるものとする。

40

【 0 1 1 7 】

トルク演算用 ECU77 内のメモリには、図12に示すように、 $e_1 \sim e_7$ で示すエリ

50

ア等が設けられている。エリア e 1 には、1 ~ 8 の相対的磁極番号毎に角度幅誤差補正值 E の値が記憶される。エリア e 2 には、1 ~ 8 の相対的磁極番号毎に第 1 出力信号 S_1 の振幅 A_1 が記憶される。エリア e 3 には、1 ~ 8 の相対的磁極番号毎に第 2 出力信号 S_2 の振幅 A_2 が記憶される。エリア e 4 には、1 ~ 8 の相対的磁極番号毎に第 3 出力信号 S_3 の振幅 A_3 が記憶される。

【 0 1 1 8 】

エリア e 5 には、複数演算周期分の第 1 相対的極番号 $r_1[n-k] \sim r_1[n]$ (k は、3 以上の自然数) が記憶される。エリア e 6 には、複数演算周期分の第 2 相対的極番号 $r_2[n-k] \sim r_2[n]$ が記憶される。エリア e 7 には、複数演算周期分の第 3 相対的極番号 $r_3[n-k] \sim r_3[n]$ が記憶される。

10

図 1 1 A に戻り、強制回転に基づく回転角演算処理では、短時間ではあるがステアリングホイール 2 が自動的に回転する。このため、運転者は何らかの故障が発生したと誤解するおそれがある。そこで、第 1 の回転角演算部 7 7 A は、運転者への警告を行う (ステップ S 1 1)。具体的には、第 1 の回転角演算部 7 7 A は、車内に設けられた表示装置 (図示略)、音声出力装置 (図示略) 等を制御するための映像音声制御装置 (図示略) に、警告出力指令を送信する。映像音声制御装置は、この警告出力指令を受信すると、「ステアリングホイールが強制的に回転しますが故障ではありません」等のメッセージを表示装置に表示したり、音声出力装置によって音声出力したりする。

【 0 1 1 9 】

次に、第 1 の回転角演算部 7 7 A は、第 1 方向に電動モータ 1 8 を回転駆動させる (ステップ S 1 2)。具体的には、第 1 の回転角演算部 7 7 A は、第 1 方向に電動モータ 1 8 を回転駆動させるための第 1 強制回転指令をモータ制御用 ECU 1 2 に送信する。モータ制御用 ECU 1 2 は、この第 1 強制回転指令を受信すると、第 1 方向に電動モータ 1 8 を回転駆動させる。

20

【 0 1 2 0 】

第 1 の回転角演算部 7 7 A は、各磁気センサ 7 1, 7 2, 7 3 のセンサ値 $S_1[n]$, $S_2[n]$, $S_3[n]$ を取得する (ステップ S 1 3)。ステップ S 1 3 の処理は、後述するステップ S 1 9 またはステップ S 2 1 で YES と判定されるまで、所定の演算周期毎に繰り返し実行される。トルク演算用 ECU 7 7 内のメモリには、所定回数前に取得されたセンサ値から最新に取得されたセンサ値までの複数回分 (3 回以上) のセンサ値が記憶されるようになっている。

30

【 0 1 2 1 】

第 1 の回転角演算部 7 7 A は、今回の処理が強制回転に基づく回転角演算処理開始後の初回の処理であるか否かを判別する (ステップ S 1 4)。今回の処理が強制回転に基づく回転角演算処理開始後の初回の処理である場合には (ステップ S 1 4 : YES)、第 1 の回転角演算部 7 7 A は、相対的極番号の設定処理を行う (ステップ S 1 5)。

図 1 3 は、相対的極番号の設定処理の詳細な手順を示すフローチャートである。

【 0 1 2 2 】

第 1 の回転角演算部 7 7 A は、まず、第 1 出力信号 S_1 が 0 より大きいかなんかを判別する (ステップ S 5 1)。第 1 出力信号 S_1 が 0 より大きい場合には (ステップ S 5 1 : YES)、第 1 の回転角演算部 7 7 A は、第 1 磁気センサ 7 1 が検出している磁極が N 極の磁極であると判別し、第 1 相対的極番号 r_1 を 1 に設定する (ステップ S 5 4)。そして、ステップ S 5 6 に進む。

40

【 0 1 2 3 】

一方、第 1 出力信号 S_1 が 0 以下である場合には (ステップ S 5 1 : NO)、第 1 の回転角演算部 7 7 A は、第 1 出力信号 S_1 が 0 より小さいかなんかを判別する (ステップ S 5 2)。第 1 出力信号 S_1 が 0 より小さい場合には (ステップ S 5 2 : YES)、第 1 の回転角演算部 7 7 A は、第 1 磁気センサ 7 1 が検出している磁極が S 極の磁極であると判別し、第 1 相対的極番号 r_1 を 2 に設定する (ステップ S 5 5)。そして、ステップ S 5 6 に進む。

50

【 0 1 2 4 】

前記ステップS 5 2において、第1出力信号 S_1 が0以上であると判別された場合には(ステップS 5 2: NO)、つまり、第1出力信号 S_1 が0である場合には、第1の回転角演算部7 7 Aは、入力軸8の回転角が 0° であるか 180° であるかを判別するために、第2出力信号 S_2 が0より大きいか否かを判別する(ステップS 5 3)。第2出力信号 S_2 が0より大きい場合には(ステップS 5 3: YES)、第1の回転角演算部7 7 Aは、入力軸8の回転角が 0° であると判別し、第1相対的極番号 r_1 を1に設定する(ステップS 5 4)。そして、ステップS 5 6に進む。

【 0 1 2 5 】

一方、第2出力信号 S_2 が0以下である場合には(ステップS 5 3: NO)、第1の回転角演算部7 7 Aは、入力軸8の回転角が 180° であると判別し、第1相対的極番号 r_1 を2に設定する(ステップS 5 5)。そして、ステップS 5 6に進む。

ステップS 5 6では、第1の回転角演算部7 7 Aは、「 $S_1 = 0$ かつ $S_2 > 0$ 」または「 $S_1 = 0$ かつ $S_2 < 0$ 」の条件を満たしているか否かを判別する。この条件を満たしている場合には(ステップS 5 6: YES)、第1の回転角演算部7 7 Aは、第2磁気センサ7 2が検出している磁極の極番号は、第1磁気センサ7 1が検出している磁極の極番号と同じであると判別し、第2相対的極番号 r_2 に第1相対的極番号 r_1 と同じ番号($r_2 = r_1$)を設定する(ステップS 5 7)。そして、ステップS 5 9に進む。

【 0 1 2 6 】

一方、前記ステップS 5 6の条件を満たしていない場合には(ステップS 5 6: NO)、第1の回転角演算部7 7 Aは、第2磁気センサ7 2が検出している磁極の極番号は、第1磁気センサ7 1が検出している磁極の極番号より1だけ大きい番号であると判別し、第2相対的極番号 r_2 に、第1相対的極番号 r_1 より1だけ大きい番号($r_2 = r_1 + 1$)を設定する(ステップS 5 8)。そして、ステップS 5 9に進む。

【 0 1 2 7 】

ステップS 5 9では、第1の回転角演算部7 7 Aは、「 $S_1 = 0$ かつ $S_3 < 0$ 」または「 $S_1 = 0$ かつ $S_3 > 0$ 」の条件を満たしているか否かを判別する。この条件を満たしている場合には(ステップS 5 9: YES)、第1の回転角演算部7 7 Aは、第3磁気センサ7 3が検出している磁極の極番号は、第1磁気センサ7 1が検出している磁極の極番号より1だけ大きい番号であると判別し、第3相対的極番号 r_3 に、第1相対的極番号 r_1 より1だけ大きい番号($r_3 = r_1 + 1$)を設定する(ステップS 6 0)。そして、図1 1 BのステップS 1 8に移行する。

【 0 1 2 8 】

一方、前記ステップS 5 9の条件を満たしていない場合には(ステップS 5 9: NO)、第1の回転角演算部7 7 Aは、第3磁気センサ7 3が検出している磁極の極番号は、第1磁気センサ7 1が検出している磁極の極番号より2だけ大きい番号であると判別し、第3相対的極番号 r_3 に、第1相対的極番号 r_1 より2だけ大きい番号($r_3 = r_1 + 2$)を設定する(ステップS 6 1)。そして、図1 1 BのステップS 1 8に移行する。

【 0 1 2 9 】

前記ステップS 5 6の条件に基づいて第2相対的極番号 r_2 を決定している理由および前記ステップS 5 9の条件に基づいて第3相対的極番号 r_3 を決定している理由について説明する。たとえば、磁石6 1における磁極M 1と磁極M 2とからなる磁極対が第1磁気センサ7 1を通過する際の、第1、第2および第3出力信号 S_1 、 S_2 、 S_3 の信号波形を模式的に表すと、図1 4の(a)、(b)、(c)のようになる。

【 0 1 3 0 】

図1 4において、Q 1およびQ 4で示す領域においては、第2磁気センサ7 2が検出している磁極の極番号は、第1磁気センサ7 1が検出している磁極の極番号と同じである。一方、Q 2、Q 3、Q 5およびQ 6で示す領域においては、第2磁気センサ7 2が検出している磁極の極番号は、第1磁気センサ7 1が検出している磁極の極番号より1だけ大きい。

10

20

30

40

50

【 0 1 3 1 】

領域 Q 1 においては、両センサ値 S_1 , S_2 は、 $S_1 = 0$ かつ $S_2 > 0$ の第 1 条件を満たす。領域 Q 2 および Q 3 においては、両センサ値 S_1 , S_2 は、 $S_1 > 0$ かつ $S_2 = 0$ の第 2 条件を満たす。領域 Q 4 においては、両センサ値 S_1 , S_2 は、 $S_1 = 0$ かつ $S_2 < 0$ の第 3 条件を満たす。領域 Q 5 および Q 6 においては、両センサ値 S_1 , S_2 は、 $S_1 < 0$ かつ $S_2 = 0$ の第 4 条件を満たす。そこで、第 1 の回転角演算部 77A は、第 1 条件および第 3 条件の一方を満たしているときには、第 2 磁気センサ 72 が検出している磁極の極番号が、第 1 磁気センサ 71 が検出している磁極の極番号と同じであると判別している。一方、第 1 条件および第 3 条件のいずれの条件をも満たしていないときには、第 1 の回転角演算部 77A は、第 2 磁気センサ 72 が検出している磁極の極番号が、第 1 磁気センサ 71 が検出している磁極の極番号より 1 だけ大きいと判別している。

10

【 0 1 3 2 】

図 14 において、Q 1 および Q 2 で示す領域ならびに Q 4 および Q 5 で示す領域においては、第 3 磁気センサ 73 が検出している磁極の極番号は、第 1 磁気センサ 71 が検出している磁極の極番号より 1 だけ大きい。一方、Q 3 および Q 6 で示す領域においては、第 3 磁気センサ 72 が検出している磁極の極番号は、第 1 磁気センサ 71 が検出している磁極の極番号より 2 だけ大きい。

【 0 1 3 3 】

領域 Q 1 および Q 2 においては、両センサ値 S_1 , S_3 は、 $S_1 = 0$ かつ $S_3 < 0$ の第 5 条件を満たす。領域 Q 3 においては、両センサ値 S_1 , S_3 は、 $S_1 > 0$ かつ $S_3 = 0$ の第 6 条件を満たす。領域 Q 4 および Q 5 においては、両センサ値 S_1 , S_3 は、 $S_1 = 0$ かつ $S_3 > 0$ の第 7 条件を満たす。領域 Q 6 においては、両センサ値 S_1 , S_2 は、 $S_1 < 0$ かつ $S_3 = 0$ の第 8 条件を満たす。そこで、第 1 の回転角演算部 77A は、第 5 条件および第 7 条件のいずれか一方を満たしているときには、第 3 磁気センサ 73 が検出している磁極の極番号が、第 1 磁気センサ 71 が検出している磁極の極番号より 1 だけ大きいと判別している。一方、第 5 条件および第 7 条件のいずれをも満たしていないときには、第 1 の回転角演算部 77A は、第 3 磁気センサ 73 が検出している磁極の極番号が、第 1 磁気センサ 71 が検出している磁極の極番号より 2 だけ大きいと判別している。

20

【 0 1 3 4 】

図 11A に戻り、前記ステップ S 14 において、今回の処理が強制回転に基づく回転角演算処理開始後の初回の処理ではないと判別された場合には (ステップ S 14 : NO)、ステップ S 16 に移行する。

30

ステップ S 16 では、第 1 の回転角演算部 77A は、メモリに記憶されているセンサ値 S_1 , S_2 , S_3 に基づいて、センサ値 S_1 , S_2 , S_3 毎に、センサ値の符号が反転するゼロクロスを検出したか否かを判別する。ゼロクロスが検出されなかったときには (ステップ S 16 : NO)、第 1 の回転角演算部 77A は、図 11B のステップ S 18 に移行する。

【 0 1 3 5 】

前記ステップ S 16 において、いずれかのセンサ値 S_1 , S_2 , S_3 に対してゼロクロスが検出された場合には (ステップ S 16 : YES)、第 1 の回転角演算部 77A は、相対的極番号の更新処理を行なう (ステップ S 17)。具体的には、第 1 の回転角演算部 77A は、前記ステップ S 16 でゼロクロスが検出された磁気センサに対して現在設定されている相対的極番号 r_1 , r_2 または r_3 を、入力軸 8 (磁石 61) の回転方向に応じて、1 だけ大きい番号または 1 だけ小さい番号に変更する。

40

【 0 1 3 6 】

入力軸 8 の回転方向が正方向 (図 6 に矢印で示す方向) である場合には、第 1 の回転角演算部 77A は、前記ステップ S 16 でゼロクロスが検出された磁気センサに対して現在設定されている相対的極番号 r_1 , r_2 または r_3 を、1 だけ大きい番号に更新する。一方、入力軸 8 の回転方向が逆方向である場合には、第 1 の回転角演算部 77A は、ゼロクロスが検出された磁気センサに対して現在設定されている相対的極番号 r_1 , r_2 または

50

r_3 を、1だけ小さい番号に更新する。ただし、前述したように、“1”の相対的極番号に対して、1だけ小さい相対的極番号は、“8”となる。また、“8”の相対的極番号に対して、1だけ大きい相対的極番号は、“1”となる。

【0137】

なお、入力軸8の回転方向は、例えば、ゼロクロスが検出された出力信号の前回値および今回値と、他方の出力信号の今回値とに基づいて判定することができる。具体的には、ゼロクロスが検出された出力信号が第1出力信号 S_1 である場合には、「第1出力信号 S_1 の前回値が0より大きくかつその今回値が0以下であり、第2出力信号 S_2 が0より小さい」という条件、または「第1出力信号 S_1 の前回値が0未満でかつその今回値が0以上であり、第2出力信号 S_2 が0より大きい」という条件を満たしている場合には、回転方向は正方向（図6に矢印で示す方向）であると判定される。

10

【0138】

一方、「第1出力信号 S_1 の前回値が0以上でかつその今回値が0未満であり、第2出力信号 S_2 が0より大きい」という条件、または「第1出力信号 S_1 の前回値が0以下でかつその今回値が0より大きく、第2出力信号 S_2 が0より小さい」という条件を満たしている場合には、回転方向は逆方向であると判定される。

ゼロクロスが検出された出力信号が第2出力信号 S_2 である場合には、「第2出力信号 S_2 の前回値が0より大きくかつその今回値が0以下であり、第1出力信号 S_1 が0より大きい」という条件、または「第2出力信号 S_2 の前回値が0未満でかつその今回値が0以上であり、第1出力信号 S_1 が0より小さい」という条件を満たしている場合には、回転方向は正方向（図6に矢印で示す方向）であると判定される。一方、「第2出力信号 S_2 の前回値が0以上でかつその今回値が0未満であり、第1出力信号 S_1 が0より小さい」という条件、または「第2出力信号 S_2 の前回値が0以下でかつその今回値が0より大きく、第1出力信号 S_1 が0より大きい」という条件を満たしている場合には、回転方向は逆方向であると判定される。

20

【0139】

ゼロクロスが検出された出力信号が第3出力信号 S_3 である場合には、「第3出力信号 S_3 の前回値が0より大きくかつその今回値が0以下であり、第2出力信号 S_2 が0より大きい」という条件、または「第3出力信号 S_3 の前回値が0未満でかつその今回値が0以上であり、第2出力信号 S_2 が0より小さい」という条件を満たしている場合には、回転方向は正方向（図6に矢印で示す方向）であると判定される。

30

【0140】

一方、「第3出力信号 S_3 の前回値が0以上でかつその今回値が0未満であり、第2出力信号 S_2 が0より小さい」という条件、または「第3出力信号 S_3 の前回値が0以下でかつその今回値が0より大きく、第2出力信号 S_2 が0より大きい」という条件を満たしている場合には、回転方向は逆方向であると判定される。

相対的極番号の更新処理が終了すると、第1の回転角演算部77Aは、図11BのステップS18に移行する。ステップS18では、第1の回転角演算部77Aは、第1および第2磁気センサ71, 72が共に同じ1つの磁極を3演算周期連続して検出しているという条件を満たしている否かを判別する。ステップS18の条件を満たしていない場合には（ステップS18：NO）、第1の回転角演算部77Aは、第2および第3磁気センサ72, 73が共に同じ1つの磁極を3演算周期連続して検出しているという条件を満たしている否かを判別する（ステップS20）。ステップS20の条件を満たしていない場合には（ステップS20：NO）、第1の回転角演算部77Aは、図11AのステップS13に戻る。

40

【0141】

前記ステップS18において、ステップS18の条件を満たしていると判別された場合には（ステップS18：YES）、第1の回転角演算部77Aは、E およびEを演算するための演算式に含まれている分数のいずれの分母も零でないという条件を満たしているか否かを判別する（ステップS19）。ステップS19の条件を満たしていない場合には

50

(ステップS 19 : NO)、第1の回転角演算部77Aは、図11AのステップS 13に戻る。一方、ステップS 19の条件を満たしている場合には(ステップS 19 : YES)、第1の回転角演算部77Aは、ステップS 22に移行する。

【0142】

前記ステップS 20において、ステップS 20の条件を満たしていると判別された場合には(ステップS 20 : YES)、第1の回転角演算部77Aは、E およびEを演算するための演算式に含まれている分数のいずれの分母も零でないという条件を満たしているか否かを判別する(ステップS 21)。ステップS 21の条件を満たしていない場合には(ステップS 21 : NO)、第1の回転角演算部77Aは、図11AのステップS 13に戻る。一方、ステップS 21の条件を満たしている場合には(ステップS 21 : YES)、第1の回転角演算部77Aは、ステップS 22に移行する。

10

【0143】

ステップS 22では、第1の回転角演算部77Aは、第1方向とは反対方向である第2方向に電動モータ18を回転駆動させる。具体的には、第1の回転角演算部77Aは、第2方向に電動モータ18を回転駆動させるための第2強制回転指令をモータ制御用ECU12に送信する。モータ制御用ECU12は、この第2強制回転指令を受信すると、第2方向に電動モータ18を回転駆動させる。

【0144】

この後、第1の回転角演算部77Aは、各磁気センサ71, 72のセンサ値 $S_1[n]$, $S_2[n]$, $S_3[n]$ を取得する(ステップS 23)。ステップS 23の処理は、後述するステップS 27またはステップS 31でYESと判定されるまで、所定の演算周期毎に繰り返し実行される。そして、第1の回転角演算部77Aは、メモリに記憶されているセンサ値 S_1 , S_2 , S_3 に基づいて、センサ値 S_1 , S_2 , S_3 毎に、センサ値の符号が反転するゼロクロスを検出したか否かを判別する(ステップS 24)。ゼロクロスが検出されなかったときには(ステップS 24 : NO)、第1の回転角演算部77Aは、図11CのステップS 26に移行する。

20

【0145】

前記ステップS 24において、いずれかのセンサ値 S_1 , S_2 , S_3 に対してゼロクロスが検出された場合には(ステップS 24 : YES)、第1の回転角演算部77Aは、相対的極番号の更新処理を行なう(ステップS 25)。この相対的極番号の更新処理は、前述したステップS 17における相対的極番号の更新処理と同じである。ステップS 25の相対的極番号の更新処理が終了すると、第1の回転角演算部77Aは、図11CのステップS 26に移行する。

30

【0146】

ステップS 26では、第1の回転角演算部77Aは、第1および第2磁気センサ71, 72が共に同じ1つの磁極を3演算周期連続して検出しているという条件を満たしている否かを判別する。ステップS 26の条件を満たしていない場合には(ステップS 26 : NO)、第1の回転角演算部77Aは、第2および第3磁気センサ72, 73が共に同じ1つの磁極を3演算周期連続して検出しているという条件を満たしている否かを判別する(ステップS 30)。ステップS 30の条件を満たしていない場合には(ステップS 30 : NO)、第1の回転角演算部77Aは、図11BのステップS 23に戻る。

40

【0147】

前記ステップS 26において、ステップS 26の条件を満たしていると判別された場合には(ステップS 26 : YES)、第1の回転角演算部77Aは、第1演算モードのためのE 基本演算式およびE 演算式に含まれている分数のいずれの分母も零でないという条件を満たしているか否かを判別する(ステップS 27)。ステップS 27の条件を満たしていない場合には(ステップS 27 : NO)、第1の回転角演算部77Aは、図11BのステップS 23に戻る。

【0148】

ステップS 27の条件を満たしていると判別された場合には(ステップS 27 : YES

50

)、第1の回転角演算部77Aは、第1演算モードによって $[n]$ 、 E 、 A_1 、 A_2 を演算する(ステップS28)。そして、第1の回転角演算部77Aは、演算された E 、 A_1 および A_2 を、第1および第2磁気センサ71、72が検出している磁極の相対的極番号に関連付けてメモリに記憶する(ステップS29)。第1および第2磁気センサ71、72が検出している磁極の相対的極番号は、現在設定されている第1相対的極番号 r_1 または第2相対的極番号 r_2 と同じ値となる。具体的には、第1の回転角演算部77Aは、メモリのエリア e_1 、 e_2 、 e_3 内の現在設定されている第1相対的極番号 r_1 に対応する記憶場所に、演算された E 、 A_1 および A_2 をそれぞれ記憶する。この後、第1の回転角演算部77Aは、ステップS34に進む。

【0149】

前記ステップS30において、ステップS30の条件を満たしていると判別された場合には(ステップS30: YES)、第1の回転角演算部77Aは、第2演算モードのための E 基本演算式および E 演算式に含まれている分数のいずれの分母も零でないという条件を満たしているか否かを判別する(ステップS31)。ステップS31の条件を満たしていない場合には(ステップS31: NO)、第1の回転角演算部77Aは、図11BのステップS23に戻る。

【0150】

ステップS31の条件を満たしている場合には(ステップS31: YES)、第1の回転角演算部77Aは、第2演算モードによって $[n]$ 、 E 、 A_2 、 A_3 を演算する(ステップS32)。そして、第1の回転角演算部77Aは、演算された E 、 A_2 および A_3 を、第2および第3磁気センサ72、73が検出している磁極の相対的極番号に関連付けてメモリに記憶する(ステップS33)。第2および第3磁気センサ72、73が検出している磁極の相対的極番号は、現在設定されている第2相対的極番号 r_2 または第3相対的極番号 r_3 と同じ値となる。具体的には、第1の回転角演算部77Aは、メモリのエリア e_1 、 e_3 、 e_4 内の現在設定されている第3相対的極番号 r_3 に対応する記憶場所に、演算された E 、 A_2 および A_3 をそれぞれ記憶する。この後、第1の回転角演算部77Aは、ステップS34に進む。

【0151】

ステップS34では、第1の回転角演算部77Aは、電動モータ18の駆動を停止させるとともに運転者への警告を停止させる。具体的には、第1の回転角演算部77Aは、電動モータ18の駆動停止指令をモータ制御用ECU12に送信するとともに、映像音声制御装置に警告停止指令を送信する。モータ制御用ECU12は、電動モータ18の駆動停止指令を受信すると電動モータ18の駆動を停止させる。映像音声制御装置は、警告停止指令を受信すると、警告表示、警告音声出力等を停止させる。これにより、強制回転に基づく回転角演算処理が終了する。

【0152】

図15Aおよび図15Bは、図10のステップS2の通常時の回転角演算処理の手順を示すフローチャートである。図15Aおよび図15Bの処理は、所定の演算周期毎に繰り返し実行される。

第1の回転角演算部77Aは、各磁気センサ71、72、73のセンサ値 $S_1[n]$ 、 $S_2[n]$ 、 $S_3[n]$ を取得する(ステップS61)。そして、第1の回転角演算部77Aは、メモリに記憶されているセンサ値 S_1 、 S_2 、 S_3 に基づいて、センサ値 S_1 、 S_2 、 S_3 毎に、センサ値の符号が反転するゼロクロスを検出したか否かを判別する(ステップS62)。ゼロクロスが検出されなかったときには(ステップS62: NO)、第1の回転角演算部77Aは、ステップS64に移行する。

【0153】

前記ステップS62において、いずれかのセンサ値 S_1 、 S_2 、 S_3 に対してゼロクロスが検出された場合には(ステップS62: YES)、第1の回転角演算部77Aは、相対的極番号の更新処理を行なう(ステップS63)。この相対的極番号の更新処理は、前述した図11AのステップS17における相対的極番号の更新処理と同じである。ステッ

10

20

30

40

50

ステップS 6 3の相対的極番号の更新処理が終了すると、第1の回転角演算部7 7 Aは、ステップS 6 4に移行する。

【0 1 5 4】

ステップS 6 4では、第1の回転角演算部7 7 Aは、第1および第2磁気センサ7 1, 7 2が共に同じ1つの磁極を3演算周期連続して検出しているという条件を満たしている否かを判別する。ステップS 6 4の条件を満たしている場合には(ステップS 6 4: YES)、第1の回転角演算部7 7 Aは、第1演算モードによって $[n]$, E , A_1 , A_2 を演算する(ステップS 6 5)。第1演算モードによって回転角 $[n]$ を演算する際には、第1の回転角演算部7 7 Aは、 E 基本演算式に含まれている分数の分母が零でないか否か、 E 演算式に含まれている分数の分母が零でないか否かを判定し、それらの判定結果に応じて $[n]$, E , A_1 , A_2 を演算する。

10

【0 1 5 5】

第1の回転角演算部7 7 Aは、 $[n]$, E , A_1 , A_2 を演算すると、 E 基本演算式および E 演算式に含まれている分数のいずれの分母も零でないという条件を満たしていたか否かを判別する(ステップS 6 6)。ステップS 6 6の条件を満たしていた場合には(ステップS 6 6: YES)、第1の回転角演算部7 7 Aは、演算された E , A_1 および A_2 を、第1および第2磁気センサ7 1, 7 2が検出している磁極の相対的極番号に関連付けてメモリに記憶する(ステップS 6 7)。第1および第2磁気センサ7 1, 7 2が検出している磁極の相対的極番号は、現在設定されている第1相対的極番号 r_1 または第2相対的極番号 r_2 と同じ値となる。具体的には、第1の回転角演算部7 7 Aは、メモリのエリア e_1 , e_2 , e_3 内の現在設定されている第1相対的極番号 r_1 に対応する記憶場所に、演算された E , A_1 および A_2 をそれぞれ記憶する。なお、メモリのエリア e_1 , e_2 , e_3 の前記記憶場所に既に E , A_1 および A_2 が記憶されている場合には、今回演算された E , A_1 および A_2 が上書きされる。その後、第1の回転角演算部7 7 Aは、今回演算周期での処理を終了する。

20

【0 1 5 6】

前記ステップS 6 6において、ステップS 6 6の条件を満たしていなかったと判別された場合には(ステップS 6 6: NO)、第1の回転角演算部7 7 Aは、ステップS 6 7の処理を行うことなく、今回演算周期での処理を終了する。したがって、この場合には、ステップS 6 5で演算された E , A_1 および A_2 は、メモリのエリア e_1 , e_2 , e_3 に記憶されない。

30

【0 1 5 7】

前記ステップS 6 4において、ステップS 6 4の条件を満たしていないと判別された場合には(ステップS 6 4: NO)、第1の回転角演算部7 7 Aは、第2および第3磁気センサ7 2, 7 3が共に同じ1つの磁極を3演算周期連続して検出しているという条件を満たしている否かを判別する(ステップS 6 8)。ステップS 6 8の条件を満たしている場合には(ステップS 6 8: YES)、第1の回転角演算部7 7 Aは、第2演算モードによって $[n]$, E , A_2 , A_3 を演算する(ステップS 6 9)。第2演算モードによって回転角 $[n]$ を演算する際には、第1の回転角演算部7 7 Aは、 E 基本演算式に含まれている分数の分母が零でないか否か、 E 演算式に含まれている分数の分母が零でないか否かを判定し、それらの判定結果に応じて $[n]$, E , A_2 , A_3 を演算する。

40

【0 1 5 8】

第1の回転角演算部7 7 Aは、 $[n]$, E , A_2 , A_3 を演算すると、 E 基本演算式および E 演算式に含まれている分数のいずれの分母も零でないという条件を満たしていたか否かを判別する(ステップS 7 0)。ステップS 7 0の条件を満たしていた場合には(ステップS 7 0: YES)、第1の回転角演算部7 7 Aは、演算された E , A_2 および A_3 を、第2および第3磁気センサ7 2, 7 3が検出している磁極の相対的極番号に関連付けてメモリに記憶する(ステップS 7 1)。第2および第3磁気センサ7 2, 7 3が検出している磁極の相対的極番号は、現在設定されている第2相対的極番号 r_2 または第3相対的極番号 r_3 と同じ値となる。具体的には、第1の回転角演算部7 7 Aは、メモリのエ

50

リア e_1 , e_3 , e_4 内の現在設定されている第3相対的極番号 r_3 に対応する記憶場所に、演算された E 、 A_2 および A_3 をそれぞれ記憶する。なお、メモリのエリア e_1 , e_3 , e_4 の前記記憶場所に既に E 、 A_2 および A_3 が記憶されている場合には、今回演算された E 、 A_2 および A_3 が上書きされる。この後、第1の回転角演算部 77A は、今回演算周期での処理を終了する。

【0159】

前記ステップ S70 において、ステップ S70 の条件を満たしていなかったと判別された場合には（ステップ S70：NO）、第1の回転角演算部 77A は、ステップ S71 の処理を行うことなく、今回演算周期での処理を終了する。したがって、この場合には、ステップ S69 で演算された E 、 A_2 および A_3 は、メモリのエリア e_1 , e_3 , e_4 に記憶されない。

10

【0160】

前記ステップ S68 において、ステップ S68 の条件を満たしていないと判別された場合には（ステップ S68：NO）、第1磁気センサ 71 が検出している磁極に対応する磁極幅補正值 E がメモリに記憶されているか否かを判別する（ステップ S72）。この判別は、メモリのエリア e_1 内の現在設定されている第1相対的極番号 r_1 に対応する記憶場所に、磁極幅補正值 E が記憶されているか否かに基づいて行われる。

【0161】

第1磁気センサ 71 が検出している磁極に対応する磁極幅補正值 E がメモリに記憶されている場合には（ステップ S72：YES）、第1の回転角演算部 77A は、第3演算モードによって回転角 $[n]$ を演算する（ステップ S73）。そして、第1の回転角演算部 77A は、今回演算周期での処理を終了する。

20

前記ステップ S72 において、第1磁気センサ 71 が検出している磁極に対応する磁極幅補正值 E がメモリに記憶されていないと判別された場合には（ステップ S72：NO）、第1の回転角演算部 77A は、ステップ S74 に進む。ステップ S74 では、第1の回転角演算部 77A は、第2磁気センサ 72 が検出している磁極に対応する磁極幅補正值 E がメモリに記憶されているか否かを判別する。この判別は、メモリのエリア e_2 内の現在設定されている第2相対的極番号 r_2 に対応する記憶場所に、磁極幅補正值 E が記憶されているか否かに基づいて行われる。

【0162】

30

第2磁気センサ 72 が検出している磁極に対応する磁極幅補正值 E がメモリに記憶されている場合には（ステップ S74：YES）、第1の回転角演算部 77A は、第4演算モードによって回転角 $[n]$ を演算する（ステップ S75）。そして、第1の回転角演算部 77A は、今回演算周期での処理を終了する。

前記ステップ S74 において、第2磁気センサ 72 が検出している磁極に対応する磁極幅補正值 E がメモリに記憶されていないと判別された場合には（ステップ S74：NO）、第1の回転角演算部 77A は、第5演算モードによって回転角 $[n]$ を演算する（ステップ S76）。そして、第1の回転角演算部 77A は、今回演算周期での処理を終了する。

【0163】

40

以上、この発明の一実施形態について説明したが、この発明はさらに他の形態で実施することもできる。たとえば、図15Aのステップ S66 を省略して、ステップ S65 の処理が終了したときには、ステップ S67 に進むようにしてもよい。同様に、図15Aのステップ S70 を省略して、ステップ S69 の処理が終了したときには、ステップ S71 に進むようにしてもよい。

【0164】

また、第2磁気センサ 72 に対して、入力軸 8 の半径方向に間隔をおいて、予備の磁気センサを配置しておき、第2磁気センサ 72 が故障したときに、予備の磁気センサの出力信号を第2磁気センサ 72 の出力信号の代わりに用いるようにしてもよい。

その他、特許請求の範囲に記載された事項の範囲で種々の設計変更を施すことが可能で

50

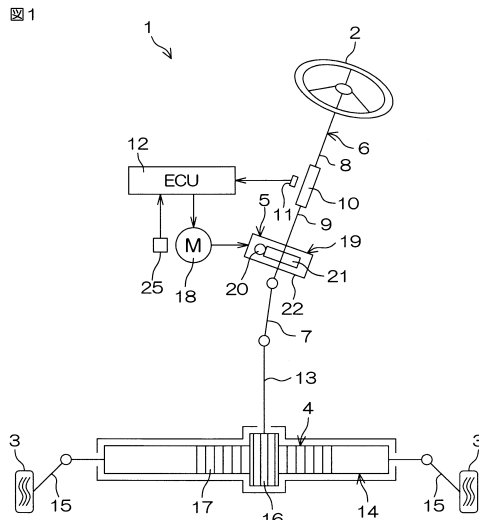
ある。

【符号の説明】

【0165】

1...電動パワーステアリング装置、8...入力軸、9...出力軸、12...モータ制御用ECU、18...電動モータ、61,62...磁石、71~76...磁気センサ、77...トルク演算用ECU、77A...第1の回転角演算部、77B...第2の回転角演算部、

【図1】



【図2】

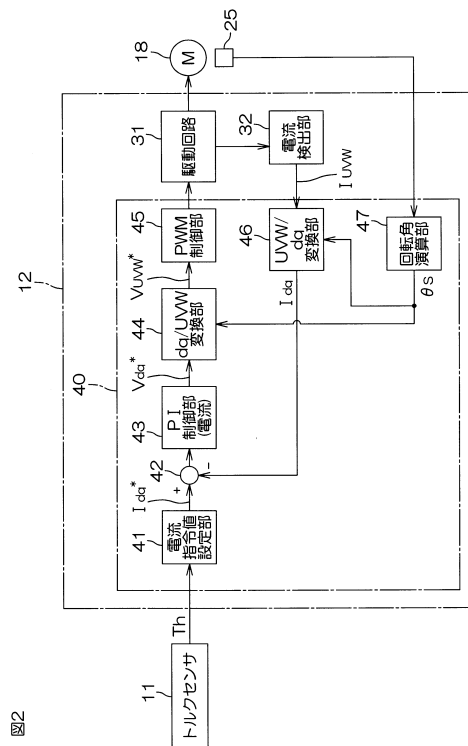
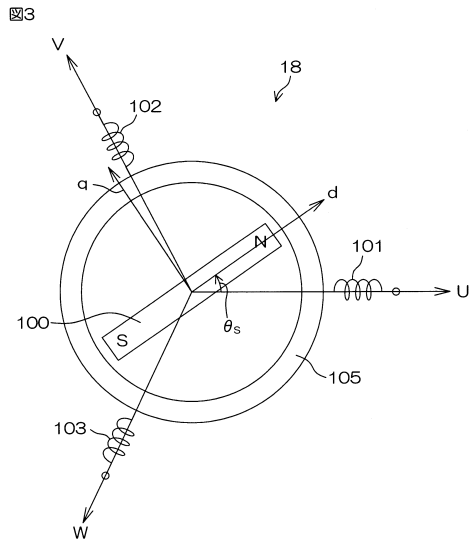
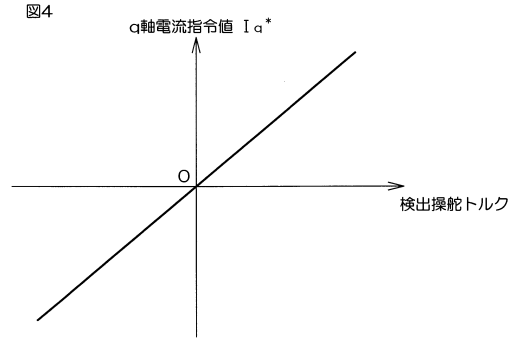


図2

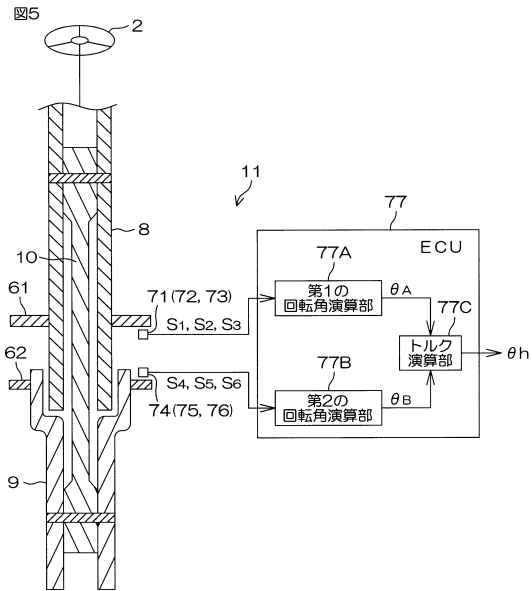
【図3】



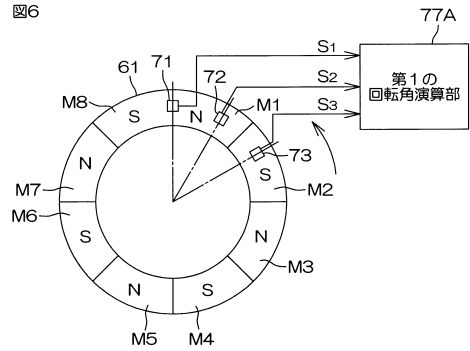
【図4】



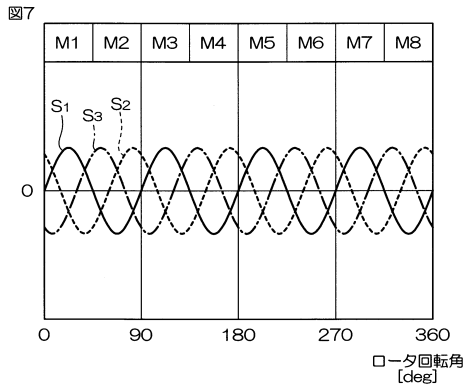
【図5】



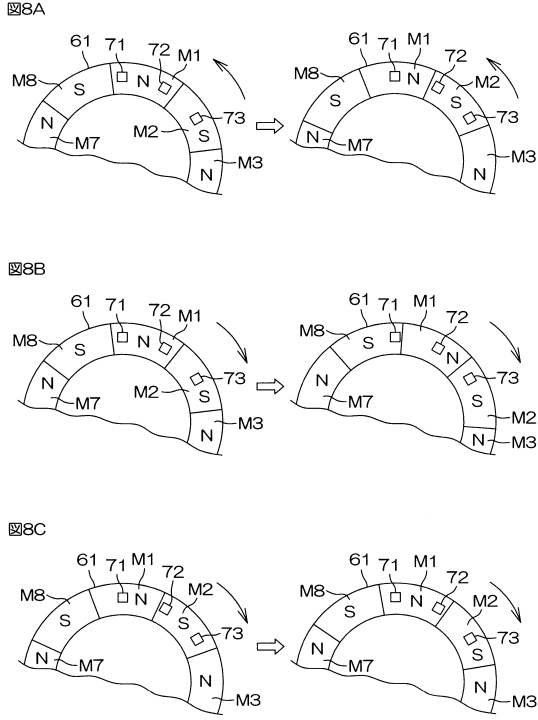
【図6】



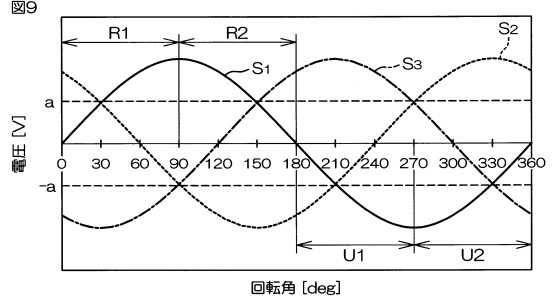
【図7】



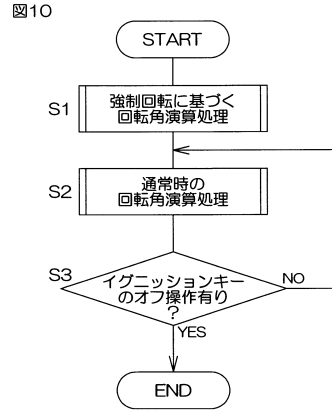
【図8】



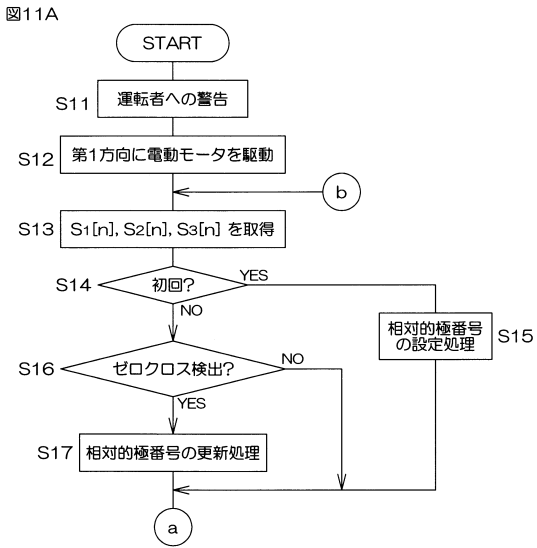
【図9】



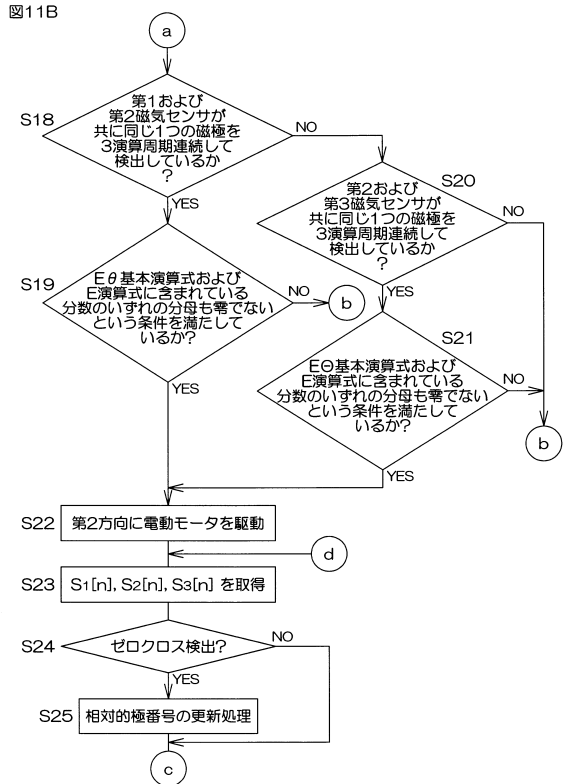
【図10】



【図11A】

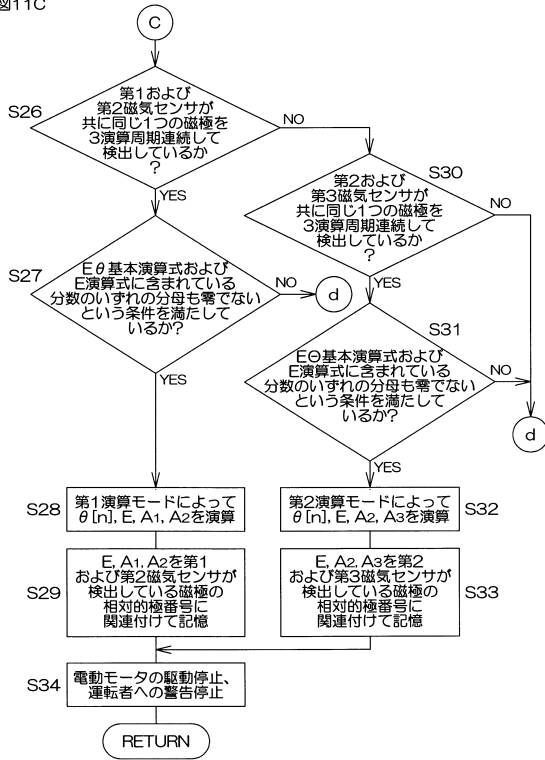


【図11B】



【図11C】

図11C



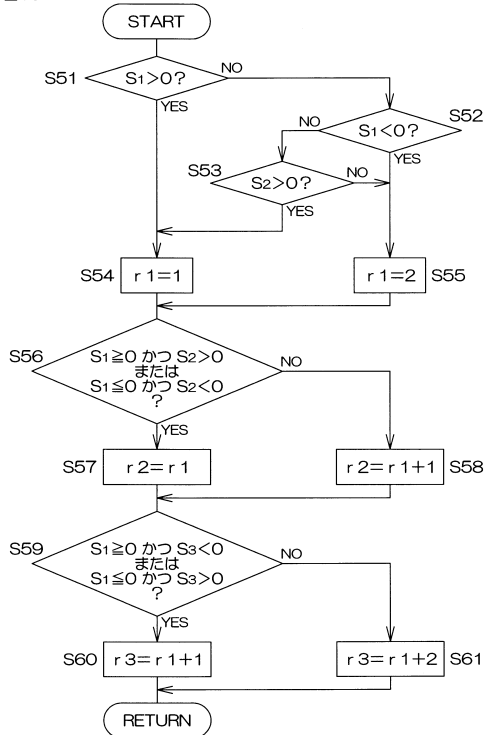
【図12】

図12

相対的極番号	E
1	
2	
3	
⋮	⋮
7	
8	
相対的極番号	A1
1	
2	
3	
⋮	⋮
7	
8	
相対的極番号	A2
1	
2	
3	
⋮	⋮
7	
8	
相対的極番号	A3
1	
2	
3	
⋮	⋮
7	
8	
e1	r1[n-k] ~ r1[n]
e2	r2[n-k] ~ r2[n]
e3	r3[n-k] ~ r3[n]
e4	
e5	
e6	
e7	

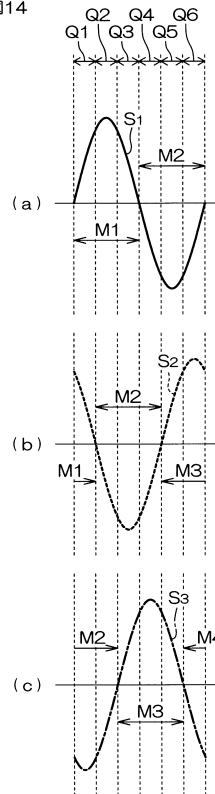
【図13】

図13

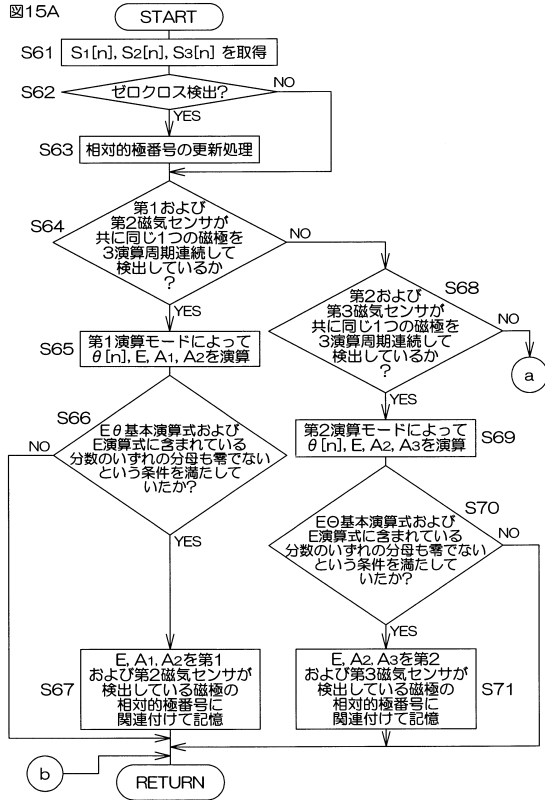


【図14】

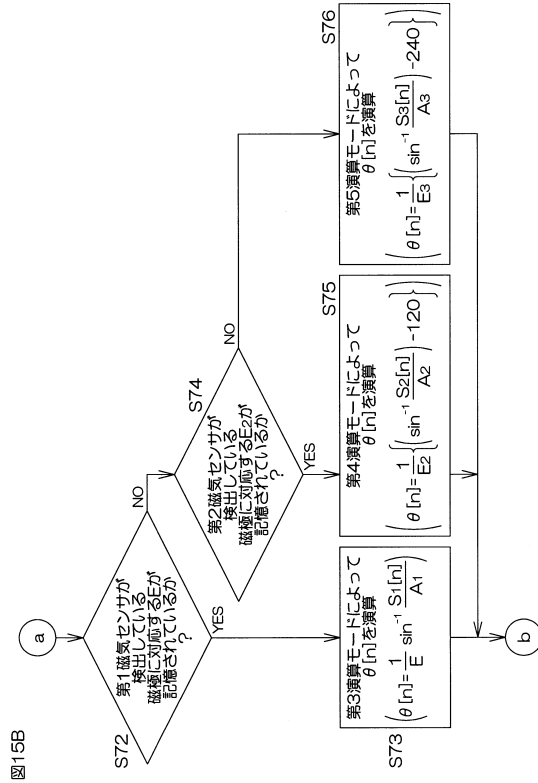
図14



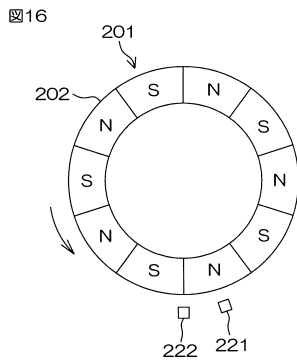
【図15A】



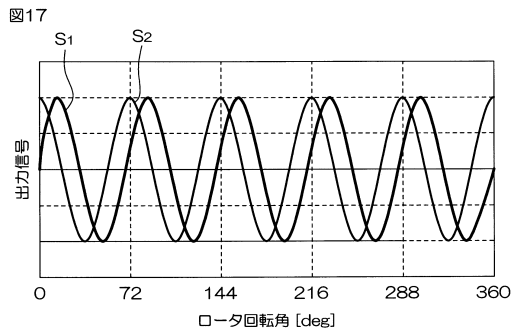
【図15B】



【図16】



【図17】



フロントページの続き

(72)発明者 冷水 由信
大阪府大阪市中央区南船場3丁目5番8号 株式会社ジェイテクト内

審査官 深田 高義

(56)参考文献 特開2012-149909(JP,A)
国際公開第2011/108421(WO,A1)
特開平06-261524(JP,A)
米国特許出願公開第2012/0182009(US,A1)
米国特許出願公開第2012/0158340(US,A1)
特開2012-127801(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G01D	5/244
B62D	5/04
G01B	7/30
G01L	3/10