

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号

特許第6202302号
(P6202302)

(45) 発行日 平成29年9月27日 (2017. 9. 27)

(24) 登録日 平成29年9月8日 (2017. 9. 8)

(51) Int. Cl.		F I			
G O 1 D	5/12	(2006.01)	G O 1 D	5/12	K
G O 1 L	3/10	(2006.01)	G O 1 L	3/10	3 1 7
B 6 2 D	5/04	(2006.01)	B 6 2 D	5/04	

請求項の数 7 (全 46 頁)

(21) 出願番号	特願2013-83038 (P2013-83038)	(73) 特許権者	000001247
(22) 出願日	平成25年4月11日 (2013. 4. 11)		株式会社ジェイテクト
(65) 公開番号	特開2014-206413 (P2014-206413A)		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10月30日 (2014. 10. 30)	(74) 代理人	100087701
審査請求日	平成28年3月15日 (2016. 3. 15)		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	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
		審査官	岡田 卓弥

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】

回転体の回転角を検出するための複数のセンサと、

所定の第1演算周期毎に、前記複数のセンサに含まれる2以上のセンサにおける2以上の所定数の異なるタイミングでサンプリングされた複数の出力信号を用いて、所定の第1演算方法によって前記回転体の回転角を演算する主回転角演算手段と、

所定の第2演算周期毎に、前記複数のセンサに含まれる2以上のセンサにおける2以上の所定数の異なるタイミングでサンプリングされた複数の出力信号を用いて、前記第1演算方法とは異なる所定の第2演算方法によって前記回転体の回転角を演算する異常判定用の副回転角演算手段と、

任意のタイミングにおいて、前記主回転角演算手段によって演算された回転角と、前記副回転角演算手段によって演算された回転角とを比較することにより、前記主回転角演算手段の演算処理に異常が発生したか否かを判別する異常判別手段とを含む、回転角演算装置。

【請求項 2】

前記第2演算周期が前記第1演算周期より長い、請求項1に記載の回転角演算装置。

【請求項 3】

前記第2演算周期が前記第1演算周期と同じである、請求項1に記載の回転角演算装置

。

【請求項 4】

前記主回転角演算手段は、前記複数のセンサに含まれる所定の2つのセンサにおける3つの異なるタイミングでサンプリングされた6つの出力信号を用いて、所定の第1演算方法によって前記回転体の回転角を演算するように構成されており、

前記副回転角演算手段は、前記所定の2つのセンサにおける3つの異なるタイミングでサンプリングされた6つの出力信号を用いて、前記第1演算方法とは演算過程が異なる所定の第2演算方法によって前記回転体の回転角を演算するように構成されている、請求項1～3のいずれか一項に記載の回転角演算装置。

【請求項5】

前記主回転角演算手段は、前記複数のセンサに含まれる所定の3つのセンサにおける2つの異なるタイミングでサンプリングされた6つの出力信号を用いて、所定の第1演算方法によって前記回転体の回転角を演算するように構成されており、

前記副回転角演算手段は、前記所定の3つのセンサにおける2つの異なるタイミングでサンプリングされた6つの出力信号を用いて、前記第1演算方法とは演算過程が異なる所定の第2演算方法によって前記回転体の回転角を演算するように構成されている、請求項1～3のいずれか一項に記載の回転角演算装置。

【請求項6】

前記主回転角演算手段は、前記複数のセンサに含まれる所定の2つのセンサにおける3つの異なるタイミングでサンプリングされた6つの出力信号を用いて、所定の第1演算方法によって前記回転体の回転角を演算するように構成されており、

前記副回転角演算手段は、前記複数のセンサに含まれる所定の3つのセンサにおける2つの異なるタイミングでサンプリングされた6つの出力信号を用いて、前記第1演算方法とは演算方法が異なる所定の第2演算方法によって前記回転体の回転角を演算するように構成されている、請求項1～3のいずれか一項に記載の回転角演算装置。

【請求項7】

前記主回転角演算手段は、前記複数のセンサに含まれる所定の3つのセンサにおける2つの異なるタイミングでサンプリングされた6つの出力信号を用いて、所定の第1演算方法によって前記回転体の回転角を演算するように構成されており、

前記副回転角演算手段は、前記複数のセンサに含まれる所定の2つのセンサにおける3つの異なるタイミングでサンプリングされた6つの出力信号を用いて、前記第1演算方法とは演算方法が異なる所定の第2演算方法によって前記回転体の回転角を演算するように構成されている、請求項1～3のいずれか一項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19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

10

20

30

40

50

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 19 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 20 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】

10

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、次式に基づいて求めることができる。

【0006】

$$\begin{aligned}\theta &= \tan^{-1} (\sin \theta / \cos \theta) \\ &= \tan^{-1} (S_1 / S_2)\end{aligned}$$

20

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】

【発明が解決しようとする課題】

【0008】

複数の磁気センサの出力信号に基づいて回転体の回転角を演算する回転角検出装置において、回転角の演算処理に異常が発生した場合には、誤った回転角が演算されてしまう。

30

この発明の目的は、回転体の回転角の演算処理に異常が発生した場合に、そのことを検知することができる回転角検出装置を提供することである。

【課題を解決するための手段】

【0009】

請求項 1 記載の発明は、回転体（8）の回転角を検出するための複数のセンサ（71, 72, 73）と、所定の第 1 演算周期毎に、前記複数のセンサに含まれる 2 以上のセンサにおける 2 以上の所定数の異なるタイミングでサンプリングされた複数の出力信号を用いて、所定の第 1 演算方法によって前記回転体の回転角を演算する主回転角演算手段（77A, S45, S103）と、所定の第 2 演算周期毎に、前記複数のセンサに含まれる 2 以上のセンサにおける 2 以上の所定数の異なるタイミングでサンプリングされた複数の出力信号を用いて、前記第 1 演算方法とは異なる所定の第 2 演算方法によって前記回転体の回転角を演算する異常判定用の副回転角演算手段（77A, S48, S106）と、任意のタイミングにおいて、前記主回転角演算手段によって演算された回転角と、前記副回転角演算手段によって演算された回転角とを比較することにより、前記主回転角演算手段の演算処理に異常が発生したか否かを判別する異常判別手段（77A, S49, S107）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。

40

【0010】

50

この発明によれば、主回転角演算手段の演算処理に異常が発生した場合に、そのことを検知することができるようになる。

請求項2記載の発明は、前記第2演算周期が前記第1演算周期より長い、請求項1に記載の回転角演算装置である。この構成によれば、第2演算周期が第1演算周期と同じである場合に比べて、回転角演算装置全体における演算処理負担が軽減される。なお、第2演算周期が第1演算周期の2以上の整数倍であってもよい。

【0011】

請求項3記載の発明は、前記第2演算周期が前記第1演算周期と同じである、請求項1に記載の回転角演算装置である。

請求項4記載の発明は、前記主回転角演算手段は、前記複数のセンサに含まれる所定の2つのセンサ(71, 72)における3つの異なるタイミングでサンプリングされた6つの出力信号を用いて、所定の第1演算方法によって前記回転体の回転角を演算するように構成されており、前記副回転角演算手段は、前記所定の2つのセンサ(71, 72)における3つの異なるタイミングでサンプリングされた6つの出力信号を用いて、前記第1演算方法とは演算過程が異なる所定の第2演算方法によって前記回転体の回転角を演算するように構成されている、請求項1～3のいずれか一項に記載の回転角演算装置である。

【0012】

請求項5記載の発明は、前記主回転角演算手段は、前記複数のセンサに含まれる所定の3つのセンサ(71, 72, 73)における2つの異なるタイミングでサンプリングされた6つの出力信号を用いて、所定の第1演算方法によって前記回転体の回転角を演算するように構成されており、前記副回転角演算手段は、前記所定の3つのセンサ(71, 72, 73)における2つの異なるタイミングでサンプリングされた6つの出力信号を用いて、前記第1演算方法とは演算過程が異なる所定の第2演算方法によって前記回転体の回転角を演算するように構成されている、請求項1～3のいずれか一項に記載の回転角演算装置である。

【0013】

請求項6記載の発明は、前記主回転角演算手段は、前記複数のセンサに含まれる所定の2つのセンサにおける3つの異なるタイミングでサンプリングされた6つの出力信号を用いて、所定の第1演算方法によって前記回転体の回転角を演算するように構成されており、前記副回転角演算手段は、前記複数のセンサに含まれる所定の3つのセンサにおける2つの異なるタイミングでサンプリングされた6つの出力信号を用いて、前記第1演算方法とは演算方法が異なる所定の第2演算方法によって前記回転体の回転角を演算するように構成されている、請求項1～3のいずれか一項に記載の回転角演算装置である。

【0014】

請求項7記載の発明は、前記主回転角演算手段は、前記複数のセンサに含まれる所定の3つのセンサにおける2つの異なるタイミングでサンプリングされた6つの出力信号を用いて、所定の第1演算方法によって前記回転体の回転角を演算するように構成されており、前記副回転角演算手段は、前記複数のセンサに含まれる所定の2つのセンサにおける3つの異なるタイミングでサンプリングされた6つの出力信号を用いて、前記第1演算方法とは演算方法が異なる所定の第2演算方法によって前記回転体の回転角を演算するように構成されている、請求項1～3のいずれか一項に記載の回転角演算装置である。

【図面の簡単な説明】

【0015】

【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の電氣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。

10

20

30

40

50

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

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

【図 8】図 8 は、第 1 の回転角演算部の動作を示すフローチャートである。

【図 9 A】図 9 A は、図 8 のステップ S 1 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 9 B】図 9 B は、図 8 のステップ S 1 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 10】図 10 は、図 9 A のステップ S 15 の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 11】図 11 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。

10

【図 12】図 12 は、図 8 のステップ S 2 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 13】図 13 は、図 12 のステップ S 45 で実行される第 2 演算モードによる回転角演算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、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 15】図 15 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 16】図 16 は、第 1 の回転角演算部の動作を示すフローチャートである。

【図 17】図 17 は、図 16 のステップ S 71 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。

20

【図 18】図 18 は、図 16 のステップ S 72 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 19】図 19 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 20】図 20 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】

【0016】

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。

30

図 1 は、本発明の第 1 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を備え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。

【0017】

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。

40

【0018】

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。

【0019】

50

転舵機構 4 は、ピニオン軸 1 3 と、転舵軸としてのラック軸 1 4 とを含むラックアンドピニオン機構からなる。ラック軸 1 4 の各端部には、タイロッド 1 5 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 1 3 は、中間軸 7 に連結されている。ピニオン軸 1 3 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 1 3 の先端には、ピニオン 1 6 が連結されている。

【0020】

ラック軸 1 4 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 1 4 の軸方向の中間部には、ピニオン 1 6 に噛み合うラック 1 7 が形成されている。このピニオン 1 6 およびラック 1 7 によって、ピニオン軸 1 3 の回転がラック軸 1 4 の軸方向移動に変換される。ラック軸 1 4 を軸方向に移動させることによって、10

【0021】

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 1 3 に伝達される。そして、ピニオン軸 1 3 の回転は、ピニオン 1 6 およびラック 1 7 によって、ラック軸 1 4 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 1 8 と、電動モータ 1 8 の出力トルクを転舵機構 4 に伝達するための減速機構 1 9 とを含む。電動モータ 1 8 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 1 9 は、ウォーム軸 2 0 と、このウォーム軸 2 0 と噛み合うウォームホイール 2 1 とを含むウォームギヤ機構からなる。20

【0022】

ウォーム軸 2 0 は、電動モータ 1 8 によって回転駆動される。また、ウォームホイール 2 1 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 2 1 は、ウォーム軸 2 0 によって回転駆動される。

電動モータ 1 8 によってウォーム軸 2 0 が回転駆動されると、ウォームホイール 2 1 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 1 3 に伝達される。ピニオン軸 1 3 の回転は、ラック軸 1 4 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 1 8 によってウォーム軸 2 0 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。30

【0023】

電動モータ 1 8 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 2 5 によって検出される。回転角センサ 2 5 の出力信号は、モータ制御用 ECU 1 2 に入力される。電動モータ 1 8 は、モータ制御装置としてのモータ制御用 ECU 1 2 によって制御される。

図 2 は、モータ制御用 ECU 1 2 の電氣的構成を示す概略図である。

【0024】

モータ制御用 ECU 1 2 は、トルクセンサ 1 1 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 1 8 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 1 2 は、マイクロコンピュータ 4 0 と、マイクロコンピュータ 4 0 によって制御され、電動モータ 1 8 に電力を供給する駆動回路（インバータ回路）3 1 と、電動モータ 1 8 に流れるモータ電流を検出する電流検出部 3 2 とを備えている。40

【0025】

電動モータ 1 8 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 1 0 0 と、U 相、V 相および W 相のステータ巻線 1 0 1, 1 0 2, 1 0 3 を含むステータ 1 0 5 とを備えている。電動モータ 1 8 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。50

【0026】

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。

10

【0027】

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/UW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。

【0028】

回転角演算部47は、回転角センサ25の出力信号に基づいて、電動モータ18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。

20

電流指令値設定部41は、dq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41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41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41は、トルクセンサ11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。

【0029】

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18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18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。

30

【0030】

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}^* は、電流偏差演算部42に与えられる。

40

電流検出部32は、電動モータ18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32によって検出された三相検出電流 I_{uvw} は、UVW/dq変換部46に与えられる。

【0031】

UVW/dq変換部46は、電流検出部32によって検出されるUVW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、dq座標系の二相検出電流 I_{dq} 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

50

座標変換する。この座標変換には、回転角演算部 47 によって演算されたロータ角 θ_s が用いられる。

【0032】

電流偏差演算部 42 は、電流指令値設定部 41 によって設定される二相電流指令値 I_{dq}^* と、UVW/dq 変換部 46 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 42 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、PI 制御部 43 に与えられる。

【0033】

PI 制御部 43 は、電流偏差演算部 42 によって演算された電流偏差に対する PI 演算を行なうことにより、電動モータ 18 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、dq/UVW 変換部 44 に与えられる。

dq/UVW 変換部 44 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 47 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、PWM 制御部 45 に与えられる。

【0034】

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。

【0035】

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。

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。

【0036】

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 2 つの磁気センサ 71、72 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 2 つの磁気センサ 74、75 が配置されている。

【0037】

各磁気センサ 71、72、74、75 の出力信号 S_1 、 S_2 、 S_4 、 S_5 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 ECU 77 に入力されている。トルク演算用 ECU 77 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、イグニッションオフ指令が、トルク演算用 ECU 77 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。

【0038】

前記磁石 61、62、前記磁気センサ 71、72、74、75 およびトルク演算用 ECU

10

20

30

40

50

Ｕ７７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。

【００３９】

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

10

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。

【００４０】

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

第１の磁石６１、磁気センサ７１，７２および第１の回転角演算部７７Ａによって、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６２、磁気センサ７４，７５および第２の回転角演算部７７Ｂ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７７Ａ）の動作と第２の回転角検出装置（第２の回転角演算部７７Ｂ）の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７７Ａ）の動作についてのみ説明する。

20

【００４１】

図６は、第１の磁石６１の構成および２つの磁気センサ７１，７２の配置を示す模式図である。

第１の磁石６１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６１は、等角度間隔で配置された８個の磁極 $M_1 \sim M_8$ を有している。各磁極 $M_1 \sim M_8$ 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 $M_1 \sim M_8$ の磁力の大きさは、ほぼ一定である。

30

【００４２】

２つの磁気センサ７１，７２は、第１の磁石６１の下側の環状端面に対向して、配置されている。これらの磁気センサ７１，７２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。以下において、一方の磁気センサ７１を第１磁気センサ７１といい、他方の磁気センサ７２を第２磁気センサ７２という場合がある。

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７１，７２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 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。

40

【００４３】

以下において、第１磁気センサ７１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７２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 が正弦波信号であるとみなし、入力軸８の回転角を θ （電気角）とすると、第１磁気センサ７１の出力信号 S_1 は、 $S_1 = A_1 \cdot \sin \theta$ と表され、第２

50

磁気センサ 7 2 の出力信号 S_2 は、 $S_2 = A_2 \cdot \sin(\theta + 120)$ と表される。 A_1 、 A_2 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 度である。

【0044】

第 1 の回転角演算部 77A 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 77A による回転角演算モードには、第 1 演算モードと第 2 演算モードの 2 種類がある。第 1 演算モードと第 2 演算モードのうちの一方の演算モードは、操舵トルクの演算のために用いられる入力軸 8 の回転角を演算するための主演算モードとして用いられ、他方の演算モードは、主演算モードの演算処理に異常が発生したか否かを判定するための異常判定用の演算モード（副演算モード）として用いられる。

10

【0045】

第 1 演算モードおよび第 2 演算モードのいずれのモードにおいても、第 1 および第 2 磁気センサ 7 1、7 2 における 3 サンプリグ分の出力信号に基づいて回転角 θ が演算される。しかしながら、第 1 演算モードと第 2 演算モードでは、回転角 θ の演算方法（この例では演算過程）が異なっている。つまり、回転角 θ の演算のためのソフトウェアの演算内容が異なっている。以下、各演算モードについて詳しく説明する。

〔1〕第 1 演算モード

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 $[n]$ 、前回のサンプリグ周期の番号を $[n-1]$ 、前々回のサンプリグ周期の番号を $[n-2]$ で表すことにする。また、各磁極 $M1 \sim M8$ の角度幅（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值を、角度幅誤差補正值といい、 E で表すことにする。

20

【0046】

位相差 C 、サンプリグ周期番号 $[n]$ 、 $[n-1]$ 、 $[n-2]$ および角度幅誤差補正值 E を用いると、今回、前回および前々回にサンプリグされた第 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。

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

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

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

30

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

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

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

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 7 1 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。 $E_2[x]$ は、 x 番目の演算周期において第 2 磁気センサ 7 2 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。

【0047】

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 θ_{err} （電気角）は、次式(3)で定義される。

40

$$\theta_{err} = w - 180 \quad \cdots (3)$$

その磁極に対する角度幅誤差補正值 E は、次式(4)で定義される。

$$E = 180 / w \\ = 180 / (\theta_{err} + 180) \quad \cdots (4)$$

各磁極の角度幅誤差補正值 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 θ_{err} であってもよい。

【0048】

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 15 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

50

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。

【0049】

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值 $E_1[n]$ 、 $E_1[n-1]$ 、 $E_1[n-2]$ 、 $E_2[n]$ 、 $E_2[n-1]$ 、 $E_2[n-2]$ 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。

【0050】

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

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

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

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

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

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

これら6つの式に含まれる未知数(A_1 、 A_2 、 E 、 $\theta[n]$ 、 $\theta[n-1]$ 、 $\theta[n-2]$)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 $\theta[n]$ を演算することができる。

【0051】

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。

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

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

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

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

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

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

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、 $\theta[n]$ は、次式(7)（以下、「 θ 基本演算式(7)」という。）で表わされる。

【0052】

【数 1】

数 1

$$\theta[n] = \frac{60}{\cos^{-1} \left(\frac{q_1^2 c^2 + 2q_1 q_2 c + q_2^2}{2c(S_1[n]S_2[n] - S_1[n-1]S_2[n-1])^2} - 1 \right)} \times \left\{ \cos^{-1} \left(1 - \frac{(3p_1^2 p_2^2 - 2p_1^2 - 2p_2^2 + p_1 p_2)^2}{2(p_1 - p_2)^2 (p_1^2 + p_1 p_2 + p_2^2)} \right) - \cos^{-1} \left(\frac{1}{2} - \frac{3}{2} \cdot \frac{p_1 p_2 + p_2^2}{p_1^2 + p_1 p_2 + p_2^2} \right) \right\} \quad 10$$

.... (7)

ただし、

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

20

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

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

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

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

30

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

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

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

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

である。

【0053】

40

第1演算モードでは、6つのセンサ値 $S_1[n]$, $S_1[n-1]$, $S_1[n-1]$, $S_2[n]$, $S_2[n-1]$, $S_2[n-1]$ と θ 基本演算式(7)を用いて、入力軸8の回転角 $\theta[n]$ が演算される。

ただし、 θ 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、 θ 基本演算式(7)に基づいて回転角 $\theta[n]$ を演算することはできない。そこで、 θ 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、 θ 基本演算式(7)とは異なる演算式によって回転角 $\theta[n]$ が演算される。

【0054】

この実施形態では、 θ 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適用される演算式と θ 基本演算式(7)とを含めて6種類の演算式が用意されている。表1は、6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。ただし、回

50

転角 $\theta[n]$ として前回値を用いる演算式が適用される条件は、2種類存在するため、表1には7種類の条件が示されている。なお、第1演算モードで回転角 $\theta[n]$ 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、回転角 $\theta[n]$ が演算される。

【0055】

【表1】

表1

	条件 (AND)	演算式
1	$S_1[n-1] \neq 0, S_2[n-1] \neq 0, P_1 - P_2 \neq 0$, 条件X1, X2, X3のいずれも満たさない。 条件1: $S_1[n] = S_1[n-1]$ かつ $S_2[n] = S_2[n-1]$ 条件2: $S_2[n] = S_2[n-1] = S_2[n-2]$ 条件3: $S_1[n] = S_1[n-1] = S_1[n-2]$	θ 基本演算式 (7)
2	$S_1[n-1] \neq 0, S_2[n-1] \neq 0, P_1 - P_2 \neq 0$, 条件X1, X2, X3のいずれかを満たす。	$\theta[n] \leftarrow \text{前回値}$
3	$S_1[n-1] \neq 0, S_2[n-1] \neq 0, P_1 - P_2 = 0$	$\theta[n] \leftarrow \text{前回値}$
4	$S_2[n-1] \neq 0, S_1[n-1] = 0, S_2[n-1] > 0$	$\theta[n] = \sin^{-1} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{S_2[n]}{S_2[n-1]} \right) - 120$
5	$S_2[n-1] \neq 0, S_1[n-1] = 0, S_2[n-1] < 0$	$\theta[n] = \sin^{-1} \left(-\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{S_2[n]}{S_2[n-1]} \right) - 120$
6	$S_2[n-1] = 0, S_1[n-1] > 0$	$\theta[n] = \sin^{-1} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{S_1[n]}{S_1[n-1]} \right)$
7	$S_2[n-1] = 0, S_1[n-1] < 0$	$\theta[n] = \sin^{-1} \left(-\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{S_1[n]}{S_1[n-1]} \right)$

【0056】

表1の上から1番目の演算式は、 θ 基本演算式(7)である。 θ 基本演算式(7)は、 θ 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。 θ 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、 $S_1[n-1] \neq 0$ かつ、 $S_2[n-1] \neq 0$ かつ、 $p_1 - p_2 \neq 0$ かつ、 S_1

10

20

30

40

50

$[n] S_2[n] - S_1[n-1] S_2[n-1] \neq 0$ かつ、 $p_1^2 + p_1 p_2 + p_2^2 \neq 0$ かつ、 c の分母 $\neq 0$ で、かつ c の分子 $\neq 0$ 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。

【0057】

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。

また、 $S_1[n] S_2[n] - S_1[n-1] S_2[n-1] = 0$ が成立するのは、次の条件X1を満たす場合である。

10

【0058】

条件X1： $S_1[n] = S_1[n-1]$ かつ $S_2[n] = S_2[n-1]$

また、 c の分母 $= 0$ が成立するのは、次の条件X2を満たす場合である。

条件X2： $S_2[n] = S_2[n-1] = S_2[n-2]$

また、 c の分子 $\neq 0$ という条件が θ 基本演算式(7)を適用するための条件に含まれているのは、 c の分子が0であれば、 θ 基本演算式(7)の右辺の第1項の $\cos^{-1}(Z-1)$ における Z の分母が零になるからである。そして、 c の分子 $= 0$ が成立するのは、次の条件X3を満たす場合である。

【0059】

条件X3： $S_1[n] = S_1[n-1] = S_1[n-2]$

20

したがって、 θ 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、 $S_1[n-1] \neq 0$ かつ、 $S_2[n-1] \neq 0$ かつ、 $p_1 - p_2 \neq 0$ かつ、条件X1、X2およびX3のいずれも満たさない場合に満たされる。

表1の上から2番目の演算式は、 $S_1[n-1] \neq 0$ かつ、 $S_2[n-1] \neq 0$ かつ、 $p_1 - p_2 \neq 0$ かつ、条件X1、X2およびX3のうちのいずれかを満たす場合に適用される演算式である。条件X1、X2およびX3のいずれかを満たす場合とは、少なくとも $S_1[n] = S_1[n-1]$ という条件または $S_2[n] = S_2[n-1]$ という条件を満たしている場合である。つまり、両磁気センサ71、72のうちの少なくとも一方の出力信号値が前回から変化していないので、前回に演算された回転角 $\theta[n-1]$ が今回の回転角 $\theta[n]$ として用いられる。

30

【0060】

表1の上から3番目の演算式は、 $S_1[n-1] \neq 0$ かつ、 $S_2[n-1] \neq 0$ かつ、 $p_1 - p_2 = 0$ 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(8)が成立する。

【0061】

【数2】

$$\text{数2} \quad \frac{A_1 \sin E \theta[n]}{A_1 \sin E \theta[n-1]} = \frac{A_2 \sin(E \theta + 120)}{A_2 \sin(E \theta[n-1] + 120)} \quad \dots (8)$$

40

【0062】

これを変形すると、次式(9)が得られる。

【0063】

【数3】

$$\text{数3} \quad \frac{\sin E \theta[n-1]}{\sin E \theta[n]} \cdot \frac{\sin(E \theta[n] + 120)}{\sin(E \theta[n-1] + 120)} = 1 \quad \dots (9)$$

【0064】

前記式(9)が成立する場合とは、 $\theta[n]$ と $\theta[n-1]$ とが等しい場合である。つまり、今

50

回の回転角 $\theta[n]$ が前回の回転角 $\theta[n-1]$ に等しい場合である。そこで、 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、前回に演算された回転角 $\theta[n-1]$ が今回の回転角 $\theta[n]$ として用いられる。

【0065】

表1の上から4番目および5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。 $S_1[n-1] = A_1 \sin E\theta[n-1]$ であるので、 $\sin E\theta[n-1] = 0$ のときに、 $S_1[n-1] = 0$ となる。つまり、 $E\theta[n-1]$ が0度または180度のときに、 $S_1[n-1]$ が零となる。 $S_2[n-1] = A_2 \sin(E\theta[n-1] + 120)$ であるので、 $E\theta[n-1]$ が0度のときには $S_2[n-1] > 0$ となり、 $E\theta[n-1]$ が180度のときには $S_2[n-1] < 0$ となる。したがって、 $S_1[n-1] = 0$ かつ $S_2[n-1] > 0$ のときには $E\theta[n-1] = 0$ となり、 $S_1[n-1] = 0$ かつ $S_2[n-1] < 0$ のときには $E\theta[n-1] = 180$ となる。

【0066】

$E\theta[n-1] = 0$ である場合には、前記式(6d)、(6e)は、それぞれ次式(10d)、(10e)で表される。

$$S_2[n] = A_2 \sin(E\theta[n] + 120) \quad \cdots (10d)$$

$$S_2[n-1] = A_2 \sin 120 = \sqrt{3}/2 \cdot A_2 \quad \cdots (10e)$$

前記式(10e)から、次式(11)が得られる。

【0067】

$$A_2 = (2/\sqrt{3}) \cdot S_2[n-1] \quad \cdots (11)$$

前記式(11)を前記式(10d)に代入すると、次式(12)が得られる。

$$\sin(E\theta[n] + 120) = (\sqrt{3}/2) \cdot (S_2[n]/S_2[n-1]) \quad \cdots (12)$$

したがって、 $E\theta[n]$ は、次式(13)で表される。

【0068】

【数4】

$$\text{数4} \quad E\theta[n] = \sin^{-1} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{S_2[n]}{S_2[n-1]} \right) - 120 \quad \cdots (13)$$

【0069】

ここで、簡易的に $E = 1$ とすると、回転角 $\theta[n]$ は、次式(14)となる。

【0070】

【数5】

$$\text{数5} \quad \theta[n] = \sin^{-1} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{S_2[n]}{S_2[n-1]} \right) - 120 \quad \cdots (14)$$

【0071】

つまり、表1の上から4番目に示すように、 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、前記式(14)で表される演算式に基づいて回転角 $\theta[n]$ が演算される。

一方、 $\theta[n-1] = 180$ である場合には、前記式(6d)、(6e)は、それぞれ次式(15d)、(15e)で表される。

【0072】

$$S_2[n] = A_2 \sin(E\theta[n] + 120) \quad \cdots (15d)$$

$$S_2[n-1] = A_2 \sin 300 = -\sqrt{3}/2 \cdot A_2 \quad \cdots (15e)$$

前記式(15d)から、次式(16)が得られる。

$$A_2 = (-2/\sqrt{3}) \cdot S_2[n-1] \quad \cdots (16)$$

前記式(16)を前記式(15d)に代入すると、次式(17)が得られる。

10

20

30

40

50

【0073】

$$\sin(E\theta[n] + 120) = (-\sqrt{3}/2) \cdot (S_2[n]/S_2[n-1]) \quad \cdots (17)$$

したがって、 $E\theta[n]$ は、次式(18)で表わされる。

【0074】

【数6】

$$\text{数6} \quad E\theta[n] = \sin^{-1} \left(-\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{S_2[n]}{S_2[n-1]} \right) - 120 \quad \cdots (18)$$

【0075】

10

ここで、簡易的に $E = 1$ とすると、回転角 $\theta[n]$ は、次式(19)となる。

【0076】

【数7】

$$\text{数7} \quad \theta[n] = \sin^{-1} \left(-\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{S_2[n]}{S_2[n-1]} \right) - 120 \quad \cdots (19)$$

【0077】

つまり、表1の上から5番目に示すように、 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 20

は、前記式(19)で表される演算式に基づいて回転角 $\theta[n]$ が演算される。
表1の上から6番目および7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。 $S_2[n-1] = A_2 \sin(E\theta[n-1] + 120)$ であるので、 $\sin(E\theta[n-1] + 120) = 0$ のときに、 $S_2[n-1] = 0$ となる。つまり、 $E\theta[n-1]$ が -120 度または 60 度のときに、 $S_2[n-1]$ が零となる。 $S_1[n-1] = A_1 \sin E\theta[n-1]$ であるので、 $E\theta[n-1]$ が -120 度のときには $S_1[n-1] < 0$ となり、 $E\theta[n-1]$ が 60 度のときには $S_1[n-1] > 0$ となる。したがって、 $S_2[n-1] = 0$ でかつ $S_1[n-1] > 0$ のときには $E\theta[n-1] = 60$ となり、 $S_2[n-1] = 0$ でかつ $S_1[n-1] < 0$ のときには $E\theta[n-1] = -120$ となる。

【0078】

30

$E\theta[n-1] = 60$ である場合には、前記式(6a)、(6b)は、それぞれ次式(20a)、(20b)で表される。

$$S_1[n] = A_1 \sin E\theta[n] \quad \cdots (20a)$$

$$S_1[n-1] = A_1 \sin 60 = \sqrt{3}/2 \cdot A_1 \quad \cdots (20b)$$

前記式(20b)から、次式(21)が得られる。

【0079】

$$A_1 = (2/\sqrt{3}) \cdot S_1[n-1] \quad \cdots (21)$$

前記式(21)を前記式(20a)に代入すると、次式(22)が得られる。

$$\sin E\theta[n] = (\sqrt{3}/2) \cdot (S_1[n]/S_1[n-1]) \quad \cdots (22)$$

したがって、 $E\theta[n]$ は、次式(23)によって表される。

40

【0080】

【数8】

$$\text{数8} \quad E\theta[n] = \sin^{-1} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{S_1[n]}{S_1[n-1]} \right) \quad \cdots (23)$$

【0081】

ここで、簡易的に $E = 1$ とすると、回転角 $\theta[n]$ は、次式(24)となる。

【0082】

【数 9】

$$\text{数9} \quad \theta[n] = \sin^{-1} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{S_1[n]}{S_1[n-1]} \right) \quad \dots (24)$$

【0083】

つまり、表1の上から6番目に示すように、 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(24)で表される演算式に基づいて回転角 $\theta[n]$ が演算される。

一方、 $E\theta[n-1] = -120^\circ$ である場合には、前記式(6a)、(6b)は、それぞれ次式(25a) 10
(25b)で表される。

【0084】

$$S_1[n] = A_1 \sin E\theta[n] \quad \dots (25a)$$

$$S_1[n-1] = A_1 \sin(-120^\circ) = -\sqrt{3}/2 \cdot A_2 \quad \dots (25b)$$

前記式(25b)から、次式(26)が得られる。

$$A_1 = (-2/\sqrt{3}) \cdot S_1[n-1] \quad \dots (26)$$

前記式(26)を前記式(25a)に代入すると、次式(27)が得られる。

【0085】

$$\sin E\theta[n] = (-\sqrt{3}/2) \cdot (S_1[n]/S_1[n-1]) \quad \dots (27)$$

したがって、 $E\theta[n]$ は、次式(28)によって表される。

20

【0086】

【数10】

$$\text{数10} \quad E\theta[n] = \sin^{-1} \left(-\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{S_1[n]}{S_1[n-1]} \right) \quad \dots (28)$$

【0087】

ここで、簡易的に $E=1$ とすると、回転角 $\theta[n]$ は、次式(29)となる。

【0088】

【数11】

30

$$\text{数11} \quad \theta[n] = \sin^{-1} \left(-\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{S_1[n]}{S_1[n-1]} \right) \quad \dots (29)$$

【0089】

つまり、表1の上から7番目に示すように、 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(29)で表される演算式に基づいて回転角 $\theta[n]$ が演算される。

[2] 第2演算モード

第1出力信号 S_1 および第2出力信号 S_2 の3サンプリング分の信号を、前記式(6a)～ 40
(6f)と同様に、次式(30a)～(30f)で表すことにする。

【0090】

$$S_1[n] = A_1 \sin(E\theta[n]) \quad \dots (30a)$$

$$S_1[n-1] = A_1 \sin(E\theta[n-1]) \quad \dots (30b)$$

$$S_1[n-2] = A_1 \sin(E\theta[n-2]) \quad \dots (30c)$$

$$S_2[n] = A_2 \sin(E\theta[n] + 120^\circ) \quad \dots (30d)$$

$$S_2[n-1] = A_2 \sin(E\theta[n-1] + 120^\circ) \quad \dots (30e)$$

$$S_2[n-2] = A_2 \sin(E\theta[n-2] + 120^\circ) \quad \dots (30f)$$

前記6つの式(30a)～(30f)のうちの4つの式(30a)、(30b)、(30d)、(30e)からなる連 50
立方程式を解くことにより、振幅 A_1 は、次式(31)(以下、「 A_1 演算式(31)」という。

) で表わされる。

【 0 0 9 1 】

【 数 1 2 】

数 1 2

$$A_1 = \frac{S_1[n]}{\sin \left\{ \frac{1}{4} \cos^{-1} \left(1 - \frac{(3p_1^2 p_2^2 - 2p_1^2 - 2p_2^2 + p_1 p_2)^2}{2(p_1 - p_2)^2 (p_1^2 + p_1 p_2 + p_2^2)} \right) - \frac{1}{4} \cos^{-1} \left(\frac{1}{2} - \frac{3}{2} \cdot \frac{p_1 p_2 + p_2^2}{p_1^2 + p_1 p_2 + p_2^2} \right) \right\}} \quad \dots (31) \quad 10$$

ただし、

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

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

である。

20

【 0 0 9 2 】

また、前記 6 つの式(30a)～(30f)からなる連立方程式を解くことにより、角度幅誤差補正值 E は、次式(32) (以下、「E 演算式(32)」という。) で表わされる。

【 0 0 9 3 】

【 数 1 3 】

数 1 3

$$E = \frac{1}{240} \cdot \cos^{-1} \left(\frac{q_1^2 c^2 + 2q_1 q_2 c + q_2^2}{2c(S_1[n]S_2[n] - S_1[n-1]S_2[n-1])^2} - 1 \right) \quad \dots (32) \quad 30$$

ただし、

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

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

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

$$q_3 = S_1[n-2]^2 - S_1[n-1]^2 \quad 40$$

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

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

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

である。

【 0 0 9 4 】

振幅 A_1 および角度幅誤差補正值 E を式 (30a) に代入することにより、回転角 $\theta[n]$ は 50

次式(33)（以下、「 θ 演算式(33)」という。）で表わされる。

【0095】

【数14】

数14

$$\theta[n] = \frac{1}{E} \sin^{-1} \left(\frac{S_1[n]}{A_1} \right) \quad \dots (33)$$

【0096】

第2演算モードでは、まず、 A_1 演算式(31)を用いて振幅 A_1 が演算される。次に、 E 演算式(32)を用いて角度幅誤差補正值 E が演算される。そして、 θ 演算式(33)を用いて回転角 $\theta[n]$ が演算される。角度幅誤差補正值 E を演算してから、振幅 A_1 を演算してもよい。

10

ただし、 A_1 演算式(31)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、前回に演算された振幅 A_1 が今回の振幅 A_1 として用いられる。 A_1 演算式(31)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、 $S_1[n-1] = 0$ の場合、 $S_2[n-1] = 0$ の場合、 $p_1 - p_2 = 0$ の場合または $p_1^2 + p_1 p_2 + p_2^2 = 0$ の場合である。ただし、前述したように、 $p_1^2 + p_1 p_2 + p_2^2 = 0$ が成立することはない。

【0097】

この実施形態では、さらに、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ない場合にも、前回に演算された振幅 A_1 が今回の振幅 A_1 として用いられる。

20

また、 E 演算式(32)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 が今回の角度幅誤差補正值 E として用いられる。 E 演算式(32)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、 $S_1[n] S_2[n] - S_1[n-1] S_2[n-1] = 0$ の場合、 c の分母 $= 0$ の場合または c の分子 $= 0$ の場合である。

【0098】

この実施形態では、さらに、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ない場合にも、前回に演算された角度幅誤差補正值 E が今回の角度幅誤差補正值 E として用いられる。

30

第1演算モードまたは第2演算モードでは、2つの磁気センサ71, 72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 $\theta[n]$ を演算しているので、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 $\theta[n]$ の演算に用いられる数式の数、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 $\theta[n]$ を演算することができるので、入力軸8の回転角 $\theta[n]$ 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。

【0099】

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($A_1[n]$ と $A_1[n-1]$ と $A_1[n-2]$, $A_2[n]$ と $A_2[n-1]$ と $A_2[n-2]$)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71, 72間の振幅 A_1 , A_2 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71, 72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

40

50

できる。

【0100】

また、第1演算モードまたは第2演算モードでは、回転角 $\theta[n]$ の演算に用いられる6つの数式に含まれている全ての角度幅誤差補正值 E が互いに等しいとみなしている。各磁極の角度幅誤差補正值 E は、磁極毎に異なる。このため、回転角 $\theta[n]$ の演算に用いられる6つの出力信号 $S_1[n]$, $S_1[n-1]$, $S_1[n-2]$, $S_2[n]$, $S_2[n-1]$, $S_2[n-2]$ を表す数式に含まれている角度幅誤差補正值 E は、全て同じ値になるとは限らない。しかしながら、2つの磁気センサ71, 72が、3サンプリング間において共に同じ1つの磁極を検出している場合には、これらの複数の出力信号を表す数式に含まれている角度幅誤差補正值 E は全て同じ値となる。したがって、第1演算モードまたは第2演算モードでは、2つの磁気センサ71, 72が、3サンプリング間において共に同じ1つの磁極を検出している場合には、磁石61の各磁極M1~M8の角度幅（磁極幅）のばらつきをも補償できるので、より精度の高い回転角を検出することが可能となる。

10

【0101】

以下、第2演算モードが主演算モードとして用いられ、第1演算モードが異常判定用演算モード（副演算モード）として用いられる場合の、第1の回転角演算部77Aの動作について説明する。以下の説明において、主演算モードによって演算される入力軸8の回転角 $\theta[n]$ を、主回転角 $\theta_{main}[n]$ といい、副演算モードによって演算される入力軸8の回転角 $\theta[n]$ を、副回転角 $\theta_{sub}[n]$ という場合がある。

20

【0102】

図8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 θ を演算する処理である。

【0103】

前述した第1演算モードでは、条件X1、X2およびX3のうちのいずれかの条件を満たしている場合または $p_1 - p_2 = 0$ の場合には、前回演算された回転角 $\theta[n]$ が、今回の回転角 $\theta[n]$ として用いられる。また、前述した第2演算モードでは、A₁演算式(31)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、前回に演算された振幅A₁が今回の振幅A₁として用いられる。また、E演算式(32)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 が今回の角度幅誤差補正值 E として用いられる。

30

【0104】

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、第1演算モードで演算された回転角 $\theta[n]$ の前回値ならびに第2演算モードで演算された振幅A₁および角度幅誤差補正值 E の前回値は存在しない。このため、第1演算モードおよび第2演算モードによって回転角 $\theta[n]$ を演算できなくなるおそれがある。そこで、第1演算モードで演算された回転角 $\theta[n]$ の前回値ならびに第2演算モードで演算された振幅A₁および角度幅誤差補正值 E 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。強制回転に基づく回転角演算処理の詳細については後述する。

40

【0105】

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、イグニッションオフ指令が入力されるまで繰り返し行われる。イグニッションオフ指令が入力されると（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。

【0106】

図9Aおよび図9Bは、図8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

50

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 で表すことにする。なお、各相対的極番号 r_1 、 r_2 は、1～8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。この実施形態では、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（基準磁極）がN極の磁極である場合には、当該磁極に”1”の相対的極番号が割り当てられる。一方、通常時の回転角演算処理の開始時において第1磁気センサ71が検出している磁極（基準磁極）がS極の磁極である場合には、当該磁極に”2”の相対的極番号が割り当てられる。

10

【0107】

図9A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が強制的に回転駆動される。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77Aは、運転者への警告を行う（ステップS11）。具体的には、第1の回転角演算部77A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。

20

【0108】

次に、第1の回転角演算部77Aは、第1方向に電動モータ18を回転駆動させる（ステップS12）。具体的には、第1の回転角演算部77Aは、第1方向に電動モータ18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ECU12に送信する。モータ制御用ECU12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18を回転駆動させる。

【0109】

第1の回転角演算部77Aは、各磁気センサ71、72のセンサ値 $S_1[n]$ 、 $S_2[n]$ を取得する（ステップS13）。ステップS13の処理は、後述するステップS19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ECU77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

【0110】

第1の回転角演算部77A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S14）。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S14：YES）、第1の回転角演算部77Aは、相対的極番号の設定処理を行う（ステップS15）。

図10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。

40

【0111】

第1の回転角演算部77Aは、まず、第1出力信号 S_1 が0より大きいか否かを判別する（ステップS31）。第1出力信号 S_1 が0より大きい場合には（ステップS31：YES）、第1の回転角演算部77Aは、第1磁気センサ71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S34）。そして、ステップS36に進む。

【0112】

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S31：NO）、第1の回転角演算部77Aは、第1出力信号 S_1 が0より小さいか否かを判別する（ステップS32）。第1出力信号 S_1 が0より小さい場合には（ステップS32：YES）、第1の回

50

回転角演算部 77A は、第 1 磁気センサ 71 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 35）。そして、ステップ S 36 に進む。

【0113】

前記ステップ S 32 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 32：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 77A 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 より大きいかな否かを判別する（ステップ S 33）。第 2 出力信号 S_2 が 0 より大きい場合には（ステップ S 33：YES）、第 1 の回転角演算部 77A 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 34）。そして、ステップ S 36 に進む。

10

【0114】

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 33：NO）、第 1 の回転角演算部 77A 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 35）。そして、ステップ S 36 に進む。

ステップ S 36 では、第 1 の回転角演算部 77A は、「 $S_1 \geq 0$ かつ $S_2 > 0$ 」または「 $S_1 \leq 0$ かつ $S_2 < 0$ 」の条件を満たしているかな否かを判別する。この条件を満たしている場合には（ステップ S 36：YES）、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は、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、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 37）。そして、図 9A のステップ S 18 に移行する。

20

【0115】

一方、前記ステップ S 36 の条件を満たしていない場合には（ステップ S 36：NO）、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 38）。そして、図 9A のステップ S 18 に移行する。

【0116】

前記ステップ S 36 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について説明する。たとえば、磁石 61 における磁極 M1 と磁極 M2 とからなる磁極対が第 1 磁気センサ 71 を通過する際の、第 1 および第 2 出力信号 S_1 、 S_2 の信号波形を模式的に表すと、図 11 の（a）、（b）のようになる。

30

図 11 において、Q1 および Q4 で示す領域においては、第 2 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と同じである。一方、Q2、Q3、Q5 および Q6 で示す領域においては、第 2 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 1 だけ大きい。

【0117】

領域 Q1 においては、両センサ値 S_1 、 S_2 は、 $S_1 \geq 0$ かつ $S_2 > 0$ の第 1 条件を満たす。領域 Q2 および Q3 においては、両センサ値 S_1 、 S_2 は、 $S_1 > 0$ かつ $S_2 \leq 0$ の第 2 条件を満たす。領域 Q4 においては、両センサ値 S_1 、 S_2 は、 $S_1 \leq 0$ かつ $S_2 < 0$ の第 3 条件を満たす。領域 Q5 および Q6 においては、両センサ値 S_1 、 S_2 は、 $S_1 < 0$ かつ $S_2 \geq 0$ 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。

40

【0118】

図 9A 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

50

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S14：NO）、ステップS16に移行する。

ステップS16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 に基づいて、センサ値 S_1 、 S_2 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S16：NO）、第1の回転角演算部77Aは、ステップS18に移行する。

【0119】

前記ステップS16において、いずれかのセンサ値 S_1 、 S_2 に対してゼロクロスが検出された場合には（ステップS16：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S17）。具体的には、第1の回転角演算部77Aは、前記ステップS16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 または r_2 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。

10

【0120】

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S26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 または r_2 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 または r_2 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。

20

【0121】

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。

30

【0122】

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。

40

【0123】

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、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。各演算周期において、各磁気センサ71、72が検出している磁極の相対的番号は、それぞれ第1相対的磁極番号 r_1 および第2相対的磁極番号 r_2

50

によって認識することができる。したがって、所定演算周期前から今演算周期までの複数演算周期分の各相対的磁極番号 r_1 , r_2 をメモリに記憶することにより、3 演算周期連続して両磁気センサ 7 1, 7 2 がともに同じ 1 つの磁極を検出しているか否かを判別できる。

【0124】

ステップ S 1 8 の条件を満たしていない場合には（ステップ S 1 8：NO）、第 1 の回転角演算部 7 7 A は、ステップ S 1 3 に戻る。一方、ステップ S 1 8 の条件を満たしている場合には（ステップ S 1 8：YES）、第 1 の回転角演算部 7 7 A は、 θ 基本演算式 (7)、 A_1 演算式 (31) および E 演算式 (32) に含まれている全ての分数の分母が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 1 9）。

10

【0125】

ステップ S 1 9 の条件を満たしていない場合には（ステップ S 1 9：NO）、第 1 の回転角演算部 7 7 A は、ステップ S 1 3 に戻る。一方、ステップ S 1 9 の条件を満たしている場合には（ステップ S 1 9：YES）、第 1 の回転角演算部 7 7 A は、図 9 B のステップ S 2 0 に移行する。

ステップ S 2 0 では、第 1 の回転角演算部 7 7 A は、第 1 方向とは反対方向である第 2 方向に電動モータ 1 8 を回転駆動させる。具体的には、第 1 の回転角演算部 7 7 A は、第 2 方向に電動モータ 1 8 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 ECU 1 2 に送信する。モータ制御用 ECU 1 2 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 1 8 を回転駆動させる。

20

【0126】

この後、第 1 の回転角演算部 7 7 A は、各磁気センサ 7 1, 7 2 のセンサ値 S_1 [n], S_2 [n] を取得する（ステップ S 2 1）。ステップ S 2 1 の処理は、後述するステップ S 2 5 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 7 7 A は、メモリに記憶されているセンサ値 S_1 , S_2 に基づいて、センサ値 S_1 , S_2 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 2 2）。ゼロクロスが検出されなかったときには（ステップ S 2 2：NO）、第 1 の回転角演算部 7 7 A は、ステップ S 2 4 に移行する。

【0127】

前記ステップ S 2 2 において、いずれかのセンサ値 S_1 , S_2 に対してゼロクロスが検出された場合には（ステップ S 2 2：YES）、第 1 の回転角演算部 7 7 A は、相対的極番号の更新処理を行なう（ステップ S 2 3）。この相対的極番号の更新処理は、前述したステップ S 1 7 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 2 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 2 4 に移行する。

30

【0128】

ステップ S 2 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 2 4 の条件を満たしていない場合には（ステップ S 2 4：NO）、第 1 の回転角演算部 7 7 A は、ステップ S 2 1 に戻る。一方、ステップ S 2 4 の条件を満たしている場合には（ステップ S 2 4：YES）、第 1 の回転角演算部 7 7 A は、 θ 基本演算式 (7)、 A_1 演算式 (31) および E 演算式 (32) に含まれている全ての分数の分母が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 2 5）。

40

【0129】

ステップ S 2 5 の条件を満たしていない場合には（ステップ S 2 5：NO）、第 1 の回転角演算部 7 7 A は、ステップ S 2 1 に戻る。一方、ステップ S 2 5 の条件を満たしている場合には（ステップ S 2 5：YES）、第 1 演算モードによって、回転角 θ [n]（この例では、副回転角 θ_{sub} [n]）を演算して、得られた回転角 θ [n] をメモリに記憶する（ステップ S 2 6）。

【0130】

50

また、第1の回転角演算部77Aは、第2演算モードによって、振幅A1、角度幅誤差補正值Eおよび回転角 $\theta[n]$ （この例では主回転角 $\theta_{main}[n]$ ）を演算して、得られた振幅A1、角度幅誤差補正值Eおよび回転角 $\theta[n]$ をメモリに記憶する（ステップS27）。

この後、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（ステップS28）。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し、第1の回転角演算部77Aは、図8のステップS2に移行する。

【0131】

図12は、図8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12の処理は、イグニッションオフ指令が入力されるまで、所定の演算周期（サンプリング周期）T毎に繰り返し実行される。

第1の回転角演算部77Aは、変数mを1だけインクリメントする（ステップS41）。変数mの初期値は零である。次に、第1の回転角演算部77Aは、センサ値 $S_1[n]$ 、 $S_2[n]$ を取得する（ステップS42）。

【0132】

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 に基づいて、センサ値 S_1 、 S_2 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S43）。ゼロクロスが検出されなかったときには（ステップS43：NO）、第1の回転角演算部77Aは、ステップS45に移行する。

前記ステップS43において、いずれかのセンサ値 S_1 、 S_2 に対してゼロクロスが検出された場合には（ステップS43：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S44）。この相対的極番号の更新処理は、前述した図9A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。ステップS44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、ステップS45に移行する。

【0133】

ステップS45では、第1の回転角演算部77Aは、前記ステップS42で取得されたセンサ値 $S_1[n]$ 、 $S_2[n]$ を含めた最新の3回分のセンサ値に基づいて、主演算モードによって入力軸8の回転角 $\theta[n]$ （主回転角 $\theta_{main}[n]$ ）を演算してメモリに記憶する。この例では、第2演算モードが主演算モードであるので、ステップS45では、第2演算モードによって主回転角 $\theta_{main}[n]$ が演算される。この際、現在までにステップS42で取得された第1および第2センサ値が3回分に満たない場合には、強制回転に基づく回転角演算処理において取得された両センサ値のうちから、不足分のセンサ値が選択される。この際、新しく取得されたセンサ値が優先的に選択される。なお、第2演算モードによる演算処理手順（この例ではステップS45の処理手順）の詳細については、後述する。

【0134】

この後、第1の回転角演算部77Aは、変数mが偶数であるか否かを判別する（ステップS46）。変数mが奇数であれば（ステップS46：NO）、第1の回転角演算部77Aは、ステップS45で演算された主回転角 $\theta_{main}[n]$ をトルク演算部77Cに出力する（ステップS47）。そして、図8のステップS3に移行する。ステップS3でイグニッションオフ指令が入力されていないと判別された場合には、第1の回転角演算部77Aは、ステップS41に戻る。

【0135】

前記ステップS46において、変数mが偶数であると判別された場合には（ステップS

10

20

30

40

50

46: YES)、第1の回転角演算部77Aは、副演算モードによって入力軸8の回転角 $\theta[n]$ (副回転角 $\theta_{sub}[n]$)を演算してメモリに記憶する(ステップS48)。この例では、第1演算モードが副演算モードであるので、ステップS48では、第1演算モードによって副回転角 $\theta_{sub}[n]$ が演算される。変数 m が偶数である場合のみ副演算モードによる回転角演算処理が行われるので、副演算モードによって入力軸8の回転角 $\theta[n]$ が演算される周期は、主演算モードによって入力軸8の回転角 $\theta[n]$ が演算される周期 T の2倍となる。

【0136】

具体的には、第1の回転角演算部77Aは、ステップS46で変数 m が偶数であると判別された演算周期において取得された最新の3回分の第1および第2センサ値に基づいて、副演算モード(この例では第1演算モード)によって副回転角 $\theta_{sub}[n]$ を演算する。ただし、ステップS46で変数 m が偶数であると判別された演算周期において現在までに取得された第1および第2センサ値が3回分に満たない場合もある。このような場合には、ステップS46で変数 m が奇数であると判別された演算周期において取得された両センサ値および強制回転に基づく回転角演算処理において取得された両センサ値のうちから、不足分のセンサ値が選択される。この際、新しく取得されたセンサ値が優先的に選択される。

【0137】

ステップ48において副回転角 $\theta_{sub}[n]$ が演算されると、第1の回転角演算部77Aは、今演算周期においてステップS45で演算された主回転角 $\theta_{main}[n]$ と副回転角 $\theta_{sub}[n]$ との差の絶対値 $|\theta_{main}[n] - \theta_{sub}[n]|$ が、所定値 $\alpha(>0)$ より小さいか否かを判別する(ステップS49)。前記差の絶対値 $|\theta_{main}[n] - \theta_{sub}[n]|$ が所定値 α より小さい場合には(ステップS49:NO)、第1の回転角演算部77Aは、主回転角 $\theta_{main}[n]$ の演算処理(ソフトウェア演算)に異常が発生していないと判別し、ステップS45で演算された主回転角 $\theta_{main}[n]$ をトルク演算部77Cに出力する(ステップS50)。そして、図8のステップS3に移行する。ステップS3でイグニッションオフ指令が入力されていないと判別された場合には、第1の回転角演算部77Aは、ステップS41に戻る。

【0138】

前記ステップS49において、前記差の絶対値 $|\theta_{main}[n] - \theta_{sub}[n]|$ が所定値 α 以上であると判別された場合には(ステップS49:NO)、第1の回転角演算部77Aは、主回転角 $\theta_{main}[n]$ の演算処理(ソフトウェア演算)に異常が発生したと判別し、異常処理を行う(ステップS51)。たとえば、第1の回転角演算部77Aは、トルク演算用ECU77の動作を停止させるとともに、モータ制御用ECU12による電動モータ18の制御を停止させる。これにより、ソフトウェア演算に異常が発生したときに演算される誤った回転角 $\theta[n]$ に基づいて操舵トルクが演算されるのを防止できる。また、誤った回転角 $\theta[n]$ に基づいて演算される操舵トルクに基づいて電動モータ18が制御されるのを防止できる。

【0139】

図13は、図12のステップS45で実行される第2演算モードによる回転角算処理の詳細な手順を示すフローチャートである。

第2演算モードによる回転角算処理においては、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S61)。各演算周期において、各磁気センサ71、72が検出している磁極の相対的番号は、それぞれ第1相対的磁極番号 $r1$ および第2相対的磁極番号 $r2$ によって認識することができる。したがって、所定演算周期前から今演算周期までの複数演算周期分の各相対的磁極番号 $r1$ 、 $r2$ をメモリに記憶することにより、3演算周期連続して両磁気センサ71、72がともに同じ1つの磁極を検出しているか否かを判別できる。

【0140】

ステップS 6 1の条件を満たしている場合には（ステップS 6 1：YES）、第1の回転角演算部7 7 Aは、振幅 A_1 を A_1 演算式（31）に基づいて演算する（ステップS 6 2）。次に、第1の回転角演算部7 7 Aは、角度幅誤差補正值EをE演算式（32）に基づいて演算する（ステップS 6 3）。そして、第1の回転角演算部7 7 Aは、回転角 $\theta[n]$ （この例では主回転角 $\theta_{main}[n]$ ）を θ 演算式（33）に基づいて演算する（ステップS 6 4）。その後、図1 2のステップS 4 6に移行する。

【0 1 4 1】

前記ステップS 6 1において、ステップS 6 1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 1：NO）、第1の回転角演算部7 7 Aは、振幅 A_1 および角度幅誤差補正值Eをそれぞれ前回演算された振幅 A_1 および角度幅誤差補正值Eに設定する（ステップS 6 5）。そして、第1の回転角演算部7 7 Aは、回転角 $\theta[n]$ （この例では主回転角 $\theta_{main}[n]$ ）を θ 演算式（33）に基づいて演算する（ステップS 6 6）。この後、図1 2のステップS 4 6に移行する。

【0 1 4 2】

前述の第1実施形態では、第2演算モードが主演算モードとして用いられ、第1演算モードが副演算モードとして用いられているが、第1演算モードを主演算モードとして用い、第2演算モードを副演算モードとして用いてもよい。

また、前述の第1実施形態では、第1の回転角演算部7 7 Aおよび第2の回転角演算部7 7 Bは、それぞれ、2つの磁気センサの出力信号に基づいて入力軸8および出力軸9の回転角を演算しているが、3つの磁気センサの出力信号に基づいて入力軸8および出力軸9の回転角を演算することもできる。

【0 1 4 3】

以下、第1の回転角演算部7 7 Aが3つの磁気センサの出力信号に基づいて入力軸8の回転角を演算する場合の実施形態（第2実施形態）について説明する。

図1 4は、第1の磁石6 1の構成および3つの磁気センサ7 1，7 2，7 3の配置を示す模式図である。図1 4において、前述の図6に示された各部に対応する部分には、図6の場合と同一の参照符号を付して示す。

【0 1 4 4】

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1 2 0°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1 2 0°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2 4 0°の角度間隔で配置されている。

【0 1 4 5】

図1 4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1 5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1 5の横軸の回転角[deg]は、機械角を表している。

【0 1 4 6】

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 θ （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

10

20

30

40

50

、第2磁気センサ72の出力信号 S_2 は、 $S_2 = A_2 \cdot \sin(\theta + 120)$ と表され、第3磁気センサ73の出力信号 S_3 は、 $S_3 = A_3 \cdot \sin(\theta + 240)$ 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度である。第2出力信号 S_2 と第3出力信号 S_3 との位相差も120度である。

【0147】

第1の回転角演算部77A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77Aによる回転角演算モードには、第1演算モードと第2演算モードの2種類がある。第1演算モードと第2演算モードのうちの一方の演算モードは、操舵トルクの演算のために用いられる入力軸8の回転角を演算するための主演算モードとして用いられ、他方の演算モードは、主演算モードの演算処理に異常が発生したか否かを判定するための異常判定用の演算モード（副演算モード）として用いられる。

10

【0148】

第1演算モードおよび第2演算モードのいずれのモードにおいても、第1、第2および第3磁気センサ71、72、73における2サンプリング分の出力信号に基づいて回転角 θ が演算される。しかしながら、第1演算モードと第2演算モードでは、回転角 θ の演算方法（この例では演算過程）が異なっている。つまり、回転角 θ の演算のためのソフトウェアの演算内容が異なっている。以下、各演算モードについて詳しく説明する。

[1] 第1演算モード

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、第1出力信号 S_1 と第3出力信号 S_3 との位相差（電気角）をDとすることにする。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]で表すことにする。また、各磁極M1～M8の角度幅（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、角度幅誤差補正値といい、Eで表すことにする。

20

【0149】

位相差C、サンプリング周期番号[n]、[n-1]および角度幅誤差補正値Eを用いると、今回および前回にサンプリングされた第1出力信号 S_1 、今回および前回にサンプリングされた第2出力信号 S_2 および今回および前回にサンプリングされた第3出力信号 S_3 を、それぞれ次式(34a)、(34b)、(34c)、(34d)、(34e)、(34f)で表すことができる。

30

$$S_1[n] = A_1[n] \sin(E_1[n] \theta[n]) \quad \cdots (34a)$$

$$S_1[n-1] = A_1[n-1] \sin(E_1[n-1] \theta[n-1]) \quad \cdots (34b)$$

$$S_2[n] = A_2[n] \sin(E_2[n] \theta[n] + C) \quad \cdots (34c)$$

$$S_2[n-1] = A_2[n-1] \sin(E_2[n-1] \theta[n-1] + C) \quad \cdots (34d)$$

$$S_3[n] = A_3[n] \sin(E_3[n] \theta[n] + D) \quad \cdots (34e)$$

$$S_3[n-1] = A_3[n-1] \sin(E_3[n-1] \theta[n-1] + D) \quad \cdots (34f)$$

前記式(34a)～(34f)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。 $E_3[x]$ は、x番目の演算周期において第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値である。

40

【0150】

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 θ_{err} （電気角）は、次式(35)で定義される。

$$\theta_{err} = w - 180 \quad \cdots (35)$$

その磁極に対する角度幅誤差補正値Eは、次式(36)で定義される。

$$E = 180 / w \\ = 180 / (\theta_{err} + 180) \quad \cdots (36)$$

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 θ_{err}

50

r であってもよい。

【0151】

CおよびDが既知であるとする、前記式(34a)～(34f)で表される6つの式に含まれる未知数の数は14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、2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、2サンプリング間の第1磁気センサ71の出力信号の振幅 $A_1[n]$ 、 $A_1[n-1]$ が互いに等しいとみなして、これらを A_1 とする。同様に、2サンプリング間の第2磁気センサ72の出力信号の振幅 $A_2[n]$ 、 $A_2[n-1]$ が互いに等しいとみなし、これらを A_2 とする。同様に、2サンプリング間の第3磁気センサ73の出力信号の振幅 $A_3[n]$ 、 $A_3[n-1]$ が互いに等しいとみなし、これらを A_3 とする。

10

【0152】

2サンプリング間において、3の磁気センサ71、72、73が共に同じ1つの磁極を検出していると仮定した場合には、2サンプリング分の両磁気センサ71、72、73の出力信号に含まれている角度幅誤差補正值 $E_1[n]$ 、 $E_1[n-1]$ 、 $E_2[n]$ 、 $E_2[n-1]$ 、 $E_3[n]$ 、 $E_3[n-1]$ 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(34a)～(34f)は、それぞれ次式(37a)～(37f)で表わされる。

【0153】

$$S_1[n] = A_1 \sin(E \theta[n]) \quad \cdots (37a)$$

20

$$S_1[n-1] = A_1 \sin(E \theta[n-1]) \quad \cdots (37b)$$

$$S_2[n] = A_2 \sin(E \theta[n] + C) \quad \cdots (37c)$$

$$S_2[n-1] = A_2 \sin(E \theta[n-1] + C) \quad \cdots (37d)$$

$$S_3[n] = A_3 \sin(E \theta[n] + D) \quad \cdots (37e)$$

$$S_3[n-1] = A_3 \sin(E \theta[n-1] + D) \quad \cdots (37f)$$

これら6つの式に含まれる未知数(A_1 、 A_2 、 A_3 、E、 $\theta[n]$ 、 $\theta[n-1]$)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(37a)～(37f)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 $\theta[n]$ を演算することができる。

【0154】

30

以下、位相差Cが120度で、位相差Dが240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、位相差Dが240度である場合には、前記6つの式(37a)～(37f)は、それぞれ次式(38a)～(38f)で表わすことができる。

$$S_1[n] = A_1 \sin(E \theta[n]) \quad \cdots (38a)$$

$$S_1[n-1] = A_1 \sin(E \theta[n-1]) \quad \cdots (38b)$$

$$S_2[n] = A_2 \sin(E \theta[n] + 120) \quad \cdots (38c)$$

$$S_2[n-1] = A_2 \sin(E \theta[n-1] + 120) \quad \cdots (38d)$$

$$S_3[n] = A_3 \sin(E \theta[n] + 240) \quad \cdots (38e)$$

$$S_3[n-1] = A_3 \sin(E \theta[n-1] + 240) \quad \cdots (38f)$$

前記6つの式(38a)～(38f)からなる連立方程式を解くことにより、 $\theta[n]$ は、次式(39) (以下、「 θ 基本演算式(39)」という。)で表わされる。

40

【0155】

【数 1 5】

数15

$$\theta[n] = \frac{120}{d-e-f+g} \quad \dots (39)$$

ただし、

$$d = \cos^{-1} \left(1 - \frac{(3p_2^2 p_3^2 - 2p_2^2 - 2p_3^2 + p_2 p_3)^2}{2(p_2 - p_3)^2 (p_2^2 + p_2 p_3 + p_3^2)} \right) \quad 10$$

$$e = \cos^{-1} \left(\frac{1}{2} - \frac{3}{2} \cdot \frac{p_2 p_3 + p_3^2}{p_2^2 + p_2 p_3 + p_3^2} \right)$$

$$f = \cos^{-1} \left(1 - \frac{(3p_1^2 p_2^2 - 2p_1^2 - 2p_2^2 + p_1 p_2)^2}{2(p_1 - p_2)^2 (p_1^2 + p_1 p_2 + p_2^2)} \right) \quad 20$$

$$g = \cos^{-1} \left(\frac{1}{2} - \frac{3}{2} \cdot \frac{p_1 p_2 + p_2^2}{p_1^2 + p_1 p_2 + p_2^2} \right)$$

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

30

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

$$p_3 = \frac{S_3[n]}{S_3[n-1]}$$

である。

【0 1 5 6】

第1演算モードでは、6つのセンサ値 $S_1[n]$, $S_1[n-1]$, $S_2[n]$, $S_2[n-1]$, $S_3[n]$, $S_3[n-1]$ と θ 基本演算式(39)を用いて、入力軸8の回転角 $\theta[n]$ が演算される。 40

ただし、 θ 基本演算式(39)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、 θ 基本演算式(39)に基づいて回転角 $\theta[n]$ を演算することはできない。そこで、 θ 基本演算式(39)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、 θ 基本演算式(39)とは異なる演算式によって回転角 $\theta[n]$ を演算する。

【0 1 5 7】

この実施形態では、 θ 基本演算式(39)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適用される演算式と θ 基本演算式(39)とを含めて8種類の演算式が用意されている。表2は、8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、回転角 $\theta[n]$ を演算する際には、表2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 50

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、回転角 $\theta[n]$ が演算される。

【0158】

【表2】

表2

	条件 (AND)	演算式
1	$S_1[n-1] \neq 0, S_2[n-1] \neq 0, S_3[n-1] \neq 0,$ $P_1 - P_2 \neq 0, P_2 - P_3 \neq 0$	θ 基本演算式 (39)
2	$S_1[n-1] \neq 0, S_2[n-1] \neq 0, S_3[n-1] \neq 0,$ $(P_1 - P_2)$ および $(P_2 - P_3)$ の少なくとも一方が零	$\theta[n] \leftarrow \text{前回値}$
3	$S_2[n-1] \neq 0, S_3[n-1] \neq 0, S_1[n-1] = 0, S_2[n-1] > 0$	$\theta[n] = \sin^{-1} \left(-\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{S_2[n]}{S_2[n-1]} \right) - 120$
4	$S_2[n-1] \neq 0, S_3[n-1] \neq 0, S_1[n-1] = 0, S_2[n-1] < 0$	$\theta[n] = \sin^{-1} \left(-\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{S_2[n]}{S_2[n-1]} \right) - 120$
5	$S_3[n-1] \neq 0, S_2[n-1] = 0, S_1[n-1] > 0$	$\theta[n] = \sin^{-1} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{S_1[n]}{S_1[n-1]} \right)$
6	$S_3[n-1] \neq 0, S_2[n-1] = 0, S_1[n-1] < 0$	$\theta[n] = \sin^{-1} \left(-\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{S_1[n]}{S_1[n-1]} \right)$
7	$S_3[n-1] = 0, S_1[n-1] > 0$	$\theta[n] = \sin^{-1} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{S_1[n]}{S_1[n-1]} \right)$
8	$S_3[n-1] = 0, S_1[n-1] < 0$	$\theta[n] = \sin^{-1} \left(-\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{S_1[n]}{S_1[n-1]} \right)$

【0159】

表2の上から1番目の演算式は、 θ 基本演算式(39)である。 θ 基本演算式(39)は、 θ 基本演算式(39)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。 θ 基本演算式(39)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、 $S_1[n-1] \neq 0$ であつ、 $S_2[n-1] \neq 0$ であつ、 $S_3[n-1] \neq 0$ であつ、

10

20

30

40

50

$p_1 - p_2 \neq 0$ かつ、 $p_2 - p_3 \neq 0$ かつ、 $p_1^2 + p_1 p_2 + p_2^2 \neq 0$ かつ、 $p_2^2 + p_2 p_3 + p_3^2 \neq 0$ 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 の分母であり、 $S_3[n-1]$ は p_3 の分母である。

【0160】

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。同様に、 $p_2^2 + p_2 p_3 + p_3^2 = 0$ が成立するのは、 $p_2 = p_3 = 0$ の場合だけであるが、第2磁気センサ72と第3磁気センサ73とは位相が120度ずれているため、両磁気センサ72、73のセンサ値 S_2 、 S_3 が同時に零になることはない。このため、 $p_2^2 + p_2 p_3 + p_3^2 = 0$ が成立することはない。

10

【0161】

したがって、 θ 基本演算式(39)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、 $S_1[n-1] \neq 0$ かつ、 $S_2[n-1] \neq 0$ かつ、 $S_3[n-1] \neq 0$ かつ、 $p_1 - p_2 \neq 0$ かつ、 $p_2 - p_3 \neq 0$ であるという条件を満たした場合に満たされる。

表1の上から2番目の演算式は、 $S_1[n-1] \neq 0$ かつ、 $S_2[n-1] \neq 0$ かつ、 $S_3[n-1] \neq 0$ かつ、 $(p_1 - p_2)$ および $(p_2 - p_3)$ のうちの少なくとも一方が零である場合に適用される演算式である。 $p_1 - p_2 = 0$ が成立する場合とは、第1実施形態で説明したように、 $\theta[n]$ と $\theta[n-1]$ とが等しい場合である。つまり、今回の回転角 $\theta[n]$ が前回の回転角 $\theta[n-1]$ に等しい場合である。また、同様に、 $p_2 - p_3 = 0$ が成立する場合とは、 $\theta[n]$ と $\theta[n-1]$ とが等しい場合である。

20

【0162】

そこで、 p_1 、 p_2 および p_3 の分母 $S_1[n-1]$ 、 $S_2[n-1]$ および $S_3[n-1]$ のいずれもが零でなく、 $(p_2 - p_3)$ および $(p_1 - p_2)$ のうちの少なくとも一方が零であるという条件を満たした場合には、前回に演算された回転角 $\theta[n-1]$ が今回の回転角 $\theta[n]$ として用いられる。

表2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。この場合には、第1実施形態の表1の上から4番目および5番目の演算式と同様に、 $S_2[n-1] > 0$ である場合には、回転角 $\theta[n]$ は前記式(14)となり、 $S_2[n-1] < 0$ である場合には、回転角 $\theta[n]$ は前記式(19)となる。

30

【0163】

つまり、表2の上から3番目に示すように、 p_2 の分母 $S_2[n-1]$ が零でなく、 p_3 の分母 $S_3[n-1]$ 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(14)で表される演算式に基づいて回転角 $\theta[n]$ が演算される。また、表2の上から4番目に示すように、 p_2 の分母 $S_2[n-1]$ が零でなく、 p_3 の分母 $S_3[n-1]$ 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(19)で表される演算式に基づいて回転角 $\theta[n]$ が演算される。

【0164】

40

表2の上から5番目および6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。この場合には、第1実施形態の表1の上から6番目および7番目の演算式と同様に、 $S_1[n-1] > 0$ である場合には、回転角 $\theta[n]$ は前記式(24)となり、 $S_1[n-1] < 0$ である場合には、回転角 $\theta[n]$ は前記式(29)となる。

つまり、表2の上から5番目に示すように、 p_3 の分母 $S_3[n-1]$ 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(24)で表される演算式に基づいて回転角 $\theta[n]$ が演算される。また、表2の上から6番目に示すように、 p_3 の分母 $S_3[n-1]$ 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(29)で表される演算式に基づいて回転角 $\theta[n]$ が演算される。

50

【0165】

表1の上から7番目および8番目の演算式は、 p_3 の分母 $S_3[n-1]$ が零となる場合に適用される演算式である。 $S_3[n-1] = A_3 \sin(E\theta[n-1] + 240)$ であるので、 $\sin(E\theta[n-1] + 240) = 0$ のときに、 $S_3[n-1] = 0$ となる。つまり、 $E\theta[n-1]$ が -60 度または 120 度のときに、 $S_3[n-1]$ が零となる。 $S_1[n-1] = A_1 \sin E\theta[n-1]$ であるので、 $E\theta[n-1]$ が -60 度のときには $S_1[n-1] < 0$ となり、 $E\theta[n-1]$ が 120 度のときには $S_1[n-1] > 0$ となる。したがって、 $S_3[n-1] = 0$ でかつ $S_1[n-1] > 0$ のときには $E\theta[n-1] = 120$ となり、 $S_3[n-1] = 0$ でかつ $S_1[n-1] < 0$ のときには $E\theta[n-1] = -60$ となる。

【0166】

10

$E\theta[n-1] = 120$ である場合には、前記式(38a)、(38b)は、それぞれ次式(40a)、(40b)で表される。

$$S_1[n] = A_1 \sin E\theta[n] \quad \cdots (40a)$$

$$S_1[n-1] = A_1 \sin 120 = \sqrt{3}/2 \cdot A_1 \quad \cdots (40b)$$

前記式(40b)から、次式(41)が得られる。

【0167】

$$A_1 = (2/\sqrt{3}) \cdot S_1[n-1] \quad \cdots (41)$$

前記式(41)を前記式(40a)に代入すると、次式(42)が得られる。

$$\sin E\theta[n] = (\sqrt{3}/2) \cdot (S_1[n]/S_1[n-1]) \quad \cdots (42)$$

したがって、回転角 $\theta[n]$ は、次式(43)によって表される。

20

【0168】

【数16】

数16

$$E\theta[n] = \sin^{-1} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{S_1[n]}{S_1[n-1]} \right) \quad \cdots (43)$$

【0169】

ここで、簡易的に $E = 1$ とすると、回転角 $\theta[n]$ は、次式(44)となる。

【0170】

30

【数17】

数17

$$\theta[n] = \sin^{-1} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{S_1[n]}{S_1[n-1]} \right) \quad \cdots (44)$$

【0171】

つまり、表2の上から7番目に示すように、 p_3 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(44)で表される演算式に基づいて回転角 $\theta[n]$ が演算される。

40

一方、 $E\theta[n-1] = -60$ である場合には、前記式(38a)、(38b)は、それぞれ次式(45a)、(45b)で表される。

【0172】

$$S_1[n] = A_1 \sin E\theta[n] \quad \cdots (45a)$$

$$S_1[n-1] = A_1 \sin(-60) = -\sqrt{3}/2 \cdot A_1 \quad \cdots (45b)$$

前記式(45b)から、次式(46)が得られる。

$$A_1 = (-2/\sqrt{3}) \cdot S_1[n-1] \quad \cdots (46)$$

前記式(46)を前記式(45a)に代入すると、次式(47)が得られる。

【0173】

$$\sin E\theta[n] = (-\sqrt{3}/2) \cdot (S_1[n]/S_1[n-1]) \quad \cdots (47)$$

50

したがって、回転角 $\theta[n]$ は、次式(48)によって表される。

【0174】

【数18】

数18

$$E\theta[n] = \sin^{-1} \left(-\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{S_1[n]}{S_1[n-1]} \right) \quad \dots (48)$$

【0175】

ここで、簡易的に $E = 1$ とすると、回転角 $\theta[n]$ は、次式(49)となる。

10

【0176】

【数19】

数19

$$\theta[n] = \sin^{-1} \left(-\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{S_1[n]}{S_1[n-1]} \right) \quad \dots (49)$$

【0177】

つまり、表1の上から8番目に示すように、 p_3 の分母 $S_3[n-1]$ 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(49)で表される演算式に基づいて回転角 $\theta[n]$ が演算される。

20

[2] 第2演算モード

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2サンプリング分の信号を、前記式(38a)～(38f)と同様に、次式(50a)～(50f)で表すことにする。

【0178】

$$S_1[n] = A_1 \sin(E\theta[n]) \quad \dots (50a)$$

$$S_1[n-1] = A_1 \sin(E\theta[n-1]) \quad \dots (50b)$$

$$S_2[n] = A_2 \sin(E\theta[n] + 120^\circ) \quad \dots (50c)$$

$$S_2[n-1] = A_2 \sin(E\theta[n-1] + 120^\circ) \quad \dots (50d)$$

$$S_3[n] = A_3 \sin(E\theta[n] + 240^\circ) \quad \dots (50e)$$

$$S_3[n-1] = A_3 \sin(E\theta[n-1] + 240^\circ) \quad \dots (50f)$$

30

前記6つの式(50a)～(50f)のうちの4つの式(50a)、(50b)、(50d)、(50e)からなる連立方程式を解くことにより、振幅 A_1 は、次式(51)（以下、「 A_1 演算式(51)」という。）で表わされる。

【0179】

【数 2 0】

数20

$$A1 = \frac{120}{\sin\left(\frac{1}{4} \cdot f - \frac{1}{4} \cdot g\right)} \quad \dots (51)$$

ただし、

$$f = \cos^{-1} \left(1 - \frac{(3p_1^2 p_2^2 - 2p_1^2 - 2p_2^2 + p_1 p_2)^2}{2(p_1 - p_2)^2 (p_1^2 + p_1 p_2 + p_2^2)} \right) \quad 10$$

$$g = \cos^{-1} \left(\frac{1}{2} - \frac{3}{2} \cdot \frac{p_1 p_2 + p_2^2}{p_1^2 + p_1 p_2 + p_2^2} \right)$$

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

20

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

である。

【0 1 8 0】

また、前記 6 つの式(50a)～(50f)からなる連立方程式を解くことにより、角度幅誤差補正值 E は、次式(52)（以下、「E 演算式(52)」という。）で表わされる。

【0 1 8 1】

【数 2 1】

数21

$$E = \frac{1}{480} (d - e - f + g) \quad \dots (52)$$

ただし、

$$d = \cos^{-1} \left(1 - \frac{(3p_2^2 p_3^2 - 2p_2^2 - 2p_3^2 + p_2 p_3)^2}{2(p_2 - p_3)^2 (p_2^2 + p_2 p_3 + p_3^2)} \right) \quad 10$$

$$e = \cos^{-1} \left(\frac{1}{2} - \frac{3}{2} \cdot \frac{p_2 p_3 + p_3^2}{p_2^2 + p_2 p_3 + p_3^2} \right)$$

$$f = \cos^{-1} \left(1 - \frac{(3p_1^2 p_2^2 - 2p_1^2 - 2p_2^2 + p_1 p_2)^2}{2(p_1 - p_2)^2 (p_1^2 + p_1 p_2 + p_2^2)} \right) \quad 20$$

$$g = \cos^{-1} \left(\frac{1}{2} - \frac{3}{2} \cdot \frac{p_1 p_2 + p_2^2}{p_1^2 + p_1 p_2 + p_2^2} \right)$$

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

30

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

$$p_3 = \frac{S_3[n]}{S_3[n-1]}$$

である。

【0 1 8 2】

振幅 A_1 および角度幅誤差補正值 E を式 (50a) に代入することにより、回転角 $\theta[n]$ は 40
次式 (53) (以下、「 θ 演算式 (53)」という。) で表わされる。

【0 1 8 3】

【数 2 2】

数22

$$\theta[n] = \frac{1}{E} \sin^{-1} \left(\frac{S_1[n]}{A_1} \right) \quad \dots (53)$$

【0 1 8 4】

第 2 演算モードでは、まず、 A_1 演算式 (51) を用いて振幅 A_1 が演算される。次に、 E 50

演算式(52)を用いて角度幅誤差補正值Eが演算される。そして、 θ 演算式(53)を用いて回転角 $\theta[n]$ が演算される。角度幅誤差補正值Eを演算してから、振幅 A_1 を演算してもよい。

ただし、 A_1 演算式(51)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、前回に演算された振幅 A_1 が今回の振幅 A_1 として用いられる。 A_1 演算式(51)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、 $S_1[n-1] = 0$ の場合、 $S_2[n-1] = 0$ の場合、 $p_1 - p_2 = 0$ の場合または $p_1^2 + p_1 p_2 + p_2^2 = 0$ の場合である。ただし、前述したように、 $p_1^2 + p_1 p_2 + p_2^2 = 0$ が成立することはない。

【0185】

また、E演算式(52)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が今回の角度幅誤差補正值Eとして用いられる。E演算式(52)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、 $S_1[n-1] = 0$ の場合、 $S_2[n-1] = 0$ の場合、 $S_3[n-1] = 0$ の場合、 $p_1 - p_2 = 0$ の場合、 $p_2 - p_3 = 0$ の場合、 $p_1^2 + p_1 p_2 + p_2^2 = 0$ の場合または $p_2^2 + p_2 p_3 + p_3^2 = 0$ の場合である。ただし、前述したように、 $p_1^2 + p_1 p_2 + p_2^2 = 0$ または $p_2^2 + p_2 p_3 + p_3^2 = 0$ が成立することはない。

【0186】

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における2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 $\theta[n]$ を演算しているので、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 $\theta[n]$ の演算に用いられる数式の数、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 $\theta[n]$ を演算することができるので、入力軸8の回転角 $\theta[n]$ 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。

【0187】

第1演算モードまたは第2演算モードでは、2サンプリング間での同じ磁気センサの出力信号の振幅($A_1[n]$ と $A_1[n-1]$, $A_2[n]$ と $A_2[n-1]$, $A_3[n]$ と $A_3[n-1]$)が互いに等しいとみなしている。2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、2サンプリング間の温度変化は非常に小さいので、2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、2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3つの磁気センサ71, 72, 73間の振幅 A_1 , A_2 , A_3 は、別々の未知数として扱っている、それらの3つの磁気センサ71, 72, 73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。

【0188】

以下、第2演算モードが主演算モードとして用いられ、第1演算モードが異常判定用演算モード(副演算モード)として用いられる場合の、第1の回転角演算部77Aの動作について説明する。以下の説明において、主演算モードによって演算される入力軸8の回転角 $\theta[n]$ を、主回転角 $\theta_{main}[n]$ といい、副演算モードによって演算される入力軸8の回転角 $\theta[n]$ を、副回転角 $\theta_{sub}[n]$ という場合がある。

【0189】

図16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S71)。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 θ を演算する処理である。

【0190】

前述した第1演算モードでは、 $p_1 - p_2 = 0$ の場合または $p_2 - p_3 = 0$ には、前回演算された回転角 $\theta[n]$ が、今回の回転角 $\theta[n]$ として用いられる。前述した第2演算モードでは、 A_1 演算式(51)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、前回に演算された振幅 A_1 が今回の振幅 A_1 として用いられる。また、 E 演算式(52)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 が今回の角度幅誤差補正值 E として用いられる。

【0191】

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、第1演算モードで演算された回転角 $\theta[n]$ の前回値ならびに第2演算モードで演算された振幅 A_1 および角度幅誤差補正值 E の前回値は存在しない。このため、第1演算モードおよび第2演算モードによって回転角 $\theta[n]$ を演算できなくなるおそれがある。そこで、第1演算モードで演算された回転角 $\theta[n]$ の前回値ならびに第2演算モードで演算された振幅 A_1 および角度幅誤差補正值 E 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。強制回転に基づく回転角演算処理の詳細については後述する。

【0192】

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S72)。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、イグニッションオフ指令が入力されるまで繰り返し行われる。イグニッションオフ指令が入力されると(ステップS73: 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。

【0193】

図17は、図16のステップS71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では、短時間ではあるがステアリングホイール2が強制的に回転駆動される。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77Aは、運転者への警告を行う(ステップS81)。具体的には、第1の回転角演算部77A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。

【0194】

次に、第1の回転角演算部77Aは、第1方向に電動モータ18を回転駆動させる(ステップS82)。具体的には、第1の回転角演算部77Aは、第1方向に電動モータ18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ECU12に送信する。モータ制御用ECU12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18を回転駆動させる。

【0195】

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S83)。トルク演算用ECU77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(2回以上)のセンサ値が記憶されるようになっている。

第1の回転角演算部77Aは、第1方向に電動モータ18が回転駆動された後において、2回分の各センサ値 S_1 , S_2 , S_3 を取得したか否かを判別する(ステップS84)。2回分の各センサ値 S_1 , S_2 , S_3 を取得していない場合には(ステップS84: NO)、第1の回転角演算部77Aは、ステップS83に戻り、各センサ値 $S_1[n]$, $S_2[n]$, $S_3[n]$ を取得する。ステップS83の処理が繰り返される際のセンサ値 $S_1[n]$, $S_2[n]$, $S_3[n]$ のサンプリング周期は予め定められている。

【0196】

前記ステップS 8 4において、2回分の各センサ値 S_1, S_2, S_3 が取得されたと判別された場合には（ステップS 8 4：YES）、第1の回転角演算部7 7 Aは、第1方向とは反対方向である第2方向に電動モータ1 8を回転駆動させる（ステップS 8 5）。具体的には、第1の回転角演算部7 7 Aは、第2方向に電動モータ1 8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ECU 1 2に送信する。モータ制御用ECU 1 2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1 8を回転駆動させる。

【0 1 9 7】

この後、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 8 6）。そして、第1の回転角演算部7 7 Aは、第2方向に電動モータ1 8が回転駆動された後において、2回分の各センサ値 S_1, S_2, S_3 を取得したか否かを判別する（ステップS 8 7）。2回分の各センサ値 S_1, S_2, S_3 を取得していない場合には（ステップS 8 7：NO）、第1の回転角演算部7 7 Aは、ステップS 8 6に戻り、各センサ値 $S_1[n], S_2[n], S_3[n]$ を取得する。ステップS 8 6の処理が繰り返される際のセンサ値 $S_1[n], S_2[n], S_3[n]$ のサンプリング周期は予め定められている。

【0 1 9 8】

前記ステップS 8 7において、2回分の各センサ値 S_1, S_2, S_3 が取得されたと判別された場合には（ステップS 8 7：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、回転角 $\theta[n]$ （この例では、副回転角 $\theta_{sub}[n]$ ）を演算して、得られた回転角 $\theta[n]$ をメモリに記憶する（ステップS 8 8）。

また、第1の回転角演算部7 7 Aは、第2演算モードによって、振幅A 1、角度幅誤差補正值Eおよび回転角 $\theta[n]$ （この例では主回転角 $\theta_{main}[n]$ ）を演算して、得られた振幅A 1、角度幅誤差補正值Eおよび回転角 $\theta[n]$ をメモリに記憶する（ステップS 8 9）。

【0 1 9 9】

この後、第1の回転角演算部7 7 Aは、電動モータ1 8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（ステップS 9 0）。具体的には、第1の回転角演算部7 7 Aは、電動モータ1 8の駆動停止指令をモータ制御用ECU 1 2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ECU 1 2は、電動モータ1 8の駆動停止指令を受信すると電動モータ1 8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し、第1の回転角演算部7 7 Aは、図1 6のステップS 7 2に移行する。

【0 2 0 0】

図1 8は、図1 6のステップS 7 2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1 8の処理は、イグニッションオフ指令が入力されるまで、所定の演算周期（サンプリング周期）T毎に繰り返し実行される。

第1の回転角演算部7 7 Aは、変数mを1だけインクリメントする（ステップS 1 0 1）。変数mの初期値は零である。次に、第1の回転角演算部7 7 Aは、センサ値 $S_1[n], S_2[n], S_2[n]$ を取得する（ステップS 1 0 2）。そして、第1の回転角演算部7 7 Aは、前記ステップS 1 0 2で取得されたセンサ値 $S_1[n], S_2[n], S_2[n]$ を含めた最新の2回分のセンサ値に基づいて、主演算モードによって入力軸8の回転角 $\theta[n]$ （主回転角 $\theta_{main}[n]$ ）を演算してメモリに記憶する（ステップS 1 0 3）。この例では、第2演算モードが主演算モードであるので、ステップS 1 0 3では、第2演算モードによって主回転角 $\theta_{main}[n]$ が演算される。この際、現在までにステップS 1 0 2で取得された第1、第2および第3センサ値が2回分に満たない場合には、強制回転に基づく回転角演算処理において取得されたセンサ値のうちから、不足分のセンサ値が選択される。この際、新しく取得されたセンサ値が優先的に選択される。

【0 2 0 1】

この後、第1の回転角演算部7 7 Aは、変数mが偶数であるか否かを判別する（ステッ

プ S 1 0 4)。変数 m が奇数であれば（ステップ S 1 0 4：NO）、第 1 の回転角演算部 7 7 A は、ステップ S 1 0 3 で演算された主回転角 $\theta_{main}[n]$ をトルク演算部 7 7 C に出力する（ステップ S 1 0 5）。そして、図 1 6 のステップ S 7 3 に移行する。ステップ S 7 3 でイグニッションオフ指令が入力されていないと判別された場合には、第 1 の回転角演算部 7 7 A は、ステップ S 1 0 1 に戻る。

【0202】

前記ステップ S 1 0 4 において、変数 m が偶数であると判別された場合には（ステップ S 1 0 4：YES）、第 1 の回転角演算部 7 7 A は、副演算モードによって入力軸 8 の回転角 $\theta[n]$ （副回転角 $\theta_{sub}[n]$ ）を演算してメモリに記憶する（ステップ S 1 0 6）。この例では、第 1 演算モードが副演算モードであるので、ステップ S 1 0 6 では、第 1 演算モードによって副回転角 $\theta_{sub}[n]$ が演算される。変数 m が偶数である場合のみ副演算モードによる回転角演算処理が行われるので、副演算モードによって入力軸 8 の回転角 $\theta[n]$ が演算される周期は、主演算モードによって入力軸 8 の回転角 $\theta[n]$ が演算される周期 T の 2 倍となる。

【0203】

具体的には、第 1 の回転角演算部 7 7 A は、ステップ S 1 0 4 で変数 m が偶数であると判別された演算周期において取得された最新の 2 回分の第 1、第 2 および第 3 センサ値に基づいて、副演算モード（この例では第 1 演算モード）によって副回転角 $\theta_{sub}[n]$ を演算する。ただし、ステップ S 1 0 4 で変数 m が偶数であると判別された演算周期において現在までに取得された第 1、第 2 および第 3 センサ値が 2 回分に満たない場合もある。このような場合には、ステップ S 1 0 4 で変数 m が奇数であると判別された演算周期において取得されたセンサ値または強制回転に基づく回転角演算処理において取得されたセンサ値のうちから、不足分のセンサ値が選択される。この際、新しく取得されたセンサ値が優先的に選択される。

【0204】

ステップ 1 0 6 において副回転角 $\theta_{sub}[n]$ が演算されると、第 1 の回転角演算部 7 7 A は、今演算周期においてステップ S 1 0 3 で演算された主回転角 $\theta_{main}[n]$ と副回転角 $\theta_{sub}[n]$ との差の絶対値 $|\theta_{main}[n] - \theta_{sub}[n]|$ が、所定値 α (> 0) より小さいか否かを判別する（ステップ S 1 0 7）。前記差の絶対値 $|\theta_{main}[n] - \theta_{sub}[n]|$ が所定値 α より小さい場合には（ステップ S 1 0 7：NO）、第 1 の回転角演算部 7 7 A は、主回転角 $\theta_{main}[n]$ の演算処理（ソフトウェア演算）に異常が発生していないと判別し、ステップ S 1 0 3 で演算された主回転角 $\theta_{main}[n]$ をトルク演算部 7 7 C に出力する（ステップ S 1 0 8）。そして、図 1 6 のステップ S 7 3 に移行する。ステップ S 7 3 でイグニッションオフ指令が入力されていないと判別された場合には、第 1 の回転角演算部 7 7 A は、ステップ S 1 0 1 に戻る。

【0205】

前記ステップ S 1 0 7 において、前記差の絶対値 $|\theta_{main}[n] - \theta_{sub}[n]|$ が所定値 α 以上であると判別された場合には（ステップ S 1 0 7：NO）、第 1 の回転角演算部 7 7 A は、主回転角 $\theta_{main}[n]$ の演算処理（ソフトウェア演算）に異常が発生したと判別し、異常処理を行う（ステップ S 1 0 9）。たとえば、第 1 の回転角演算部 7 7 A は、トルク演算用 ECU 7 7 の動作を停止させるとともに、モータ制御用 ECU 1 2 による電動モータ 1 8 の制御を停止させる。これにより、ソフトウェア演算に異常が発生したときに演算される誤った回転角 $\theta[n]$ に基づいて操舵トルクが演算されるのを防止できる。また、誤った回転角 $\theta[n]$ に基づいて演算される操舵トルクに基づいて電動モータ 1 8 が制御されるのを防止できる。

【0206】

前述の第 2 実施形態では、第 2 演算モードが主演算モードとして用いられ、第 1 演算モードが副演算モードとして用いられているが、第 1 演算モードを主演算モードとして用い、第 2 演算モードを副演算モードとして用いてもよい。

また、前述の第 1 実施形態および第 2 実施形態では、副演算モードによる回転角の演算

周期は、主演算モードによる回転角の演算周期の2倍であるが、副演算モードによる回転角の演算周期は、主演算モードによる回転角の演算周期の3以上の整数倍であってもよいし、主演算モードによる回転角の演算周期と同じであってもよい。

【0207】

第1の回転角演算部77Aの演算処理負担を軽減するためには、副演算モードによる回転角の演算周期は、主演算モードによる回転角の演算周期より長いことが好ましい。副演算モードによる回転角の演算周期は、主演算モードによる回転角の演算周期の2以上の整数倍であることがより好ましい。

前述の第2実施形態のように入力軸8の回転角を演算するために磁気センサが3つ設けられている場合には、前述の第2実施形態の第1演算モードおよび第2演算モードによって入力軸8の回転角を検出することが可能であるとともに、前述の第1実施形態の第1演算モードおよび第2演算モードによって入力軸8の回転角を検出することも可能である。そこで、前述の第1実施形態の第1演算モードおよび第2演算モードのうちのいずれか一方を主演算モードとし、前述の第2実施形態の第1演算モードおよび第2演算モードのうちのいずれか一方を副演算モードとしてもよい。また、前述の第2実施形態の第1演算モードおよび第2演算モードのうちのいずれか一方を主演算モードとし、前述の第1実施形態の第1演算モードおよび第2演算モードのうちのいずれか一方を副演算モードとしてもよい。

10

【0208】

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ある。

20

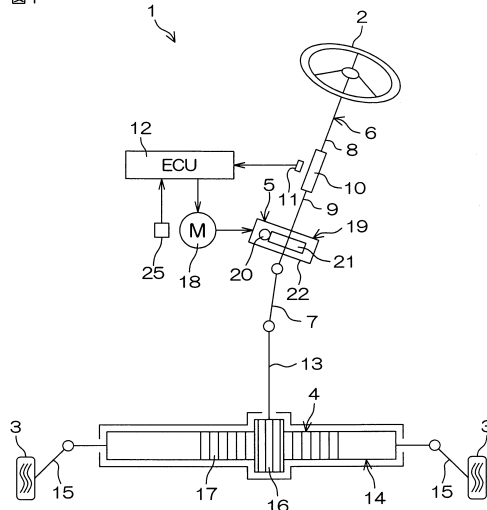
【符号の説明】

【0209】

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

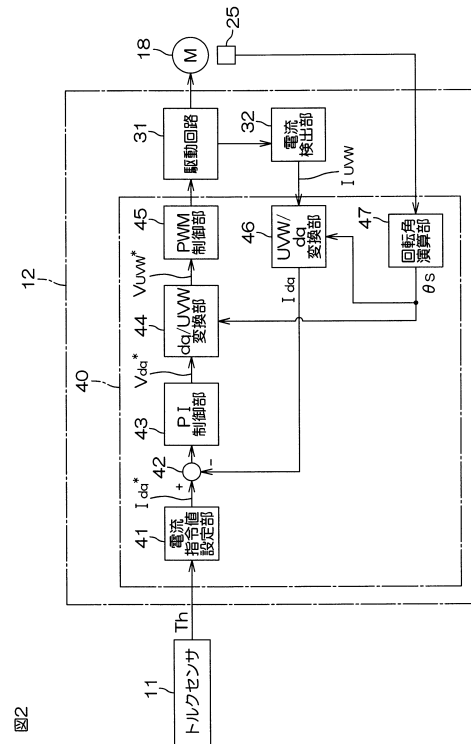
【図 1】

図1



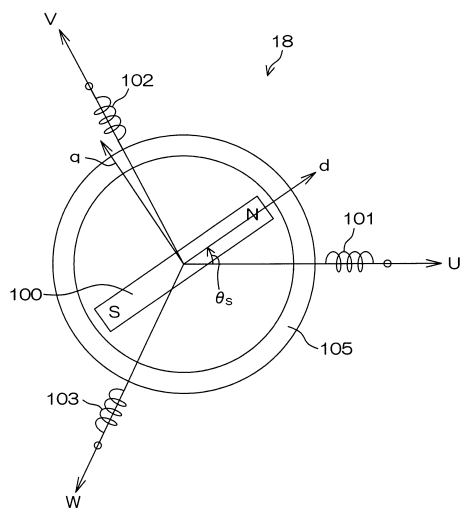
【図 2】

図2



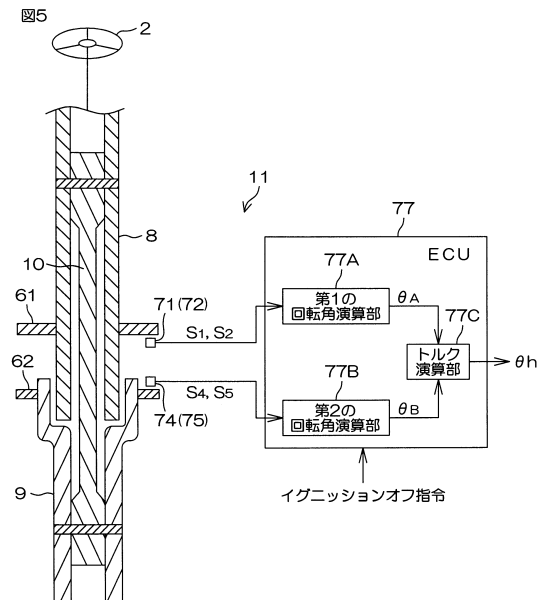
【図 3】

図3



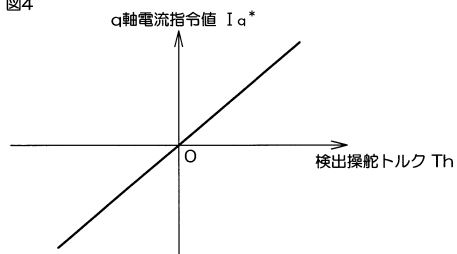
【図 5】

図5

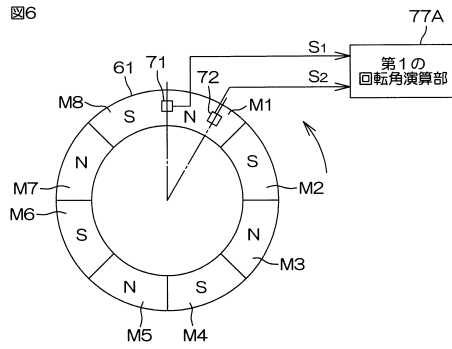


【図 4】

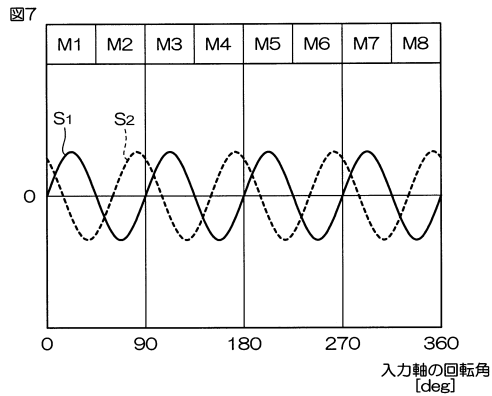
図4



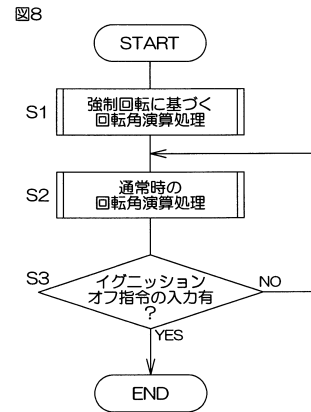
【図 6】



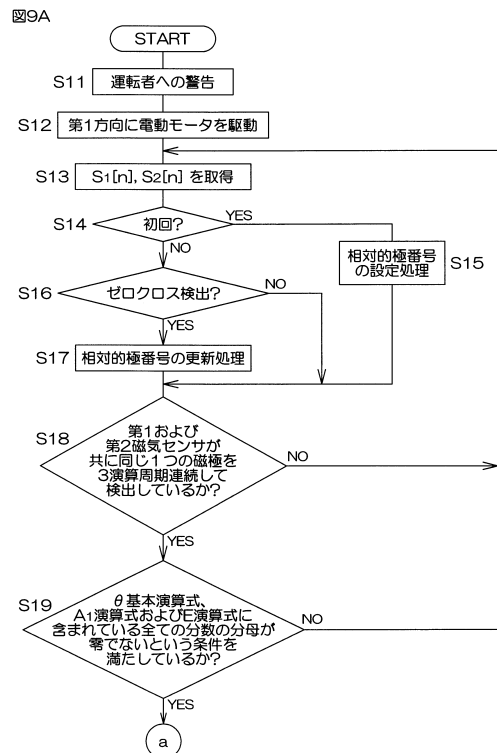
【図 7】



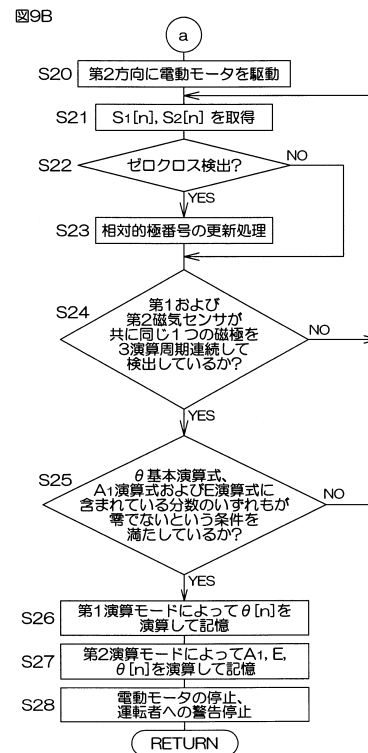
【図 8】



【図 9 A】

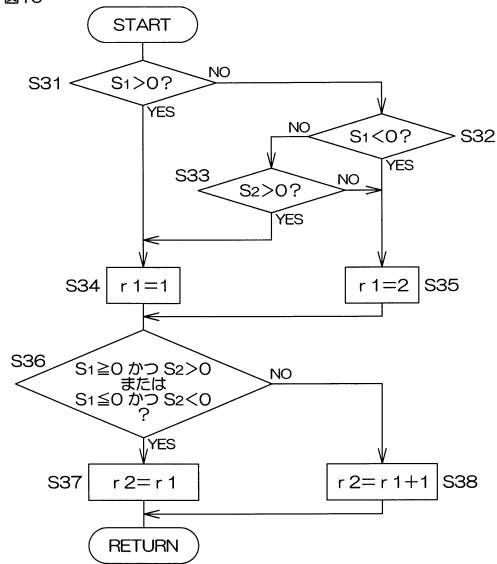


【図 9 B】



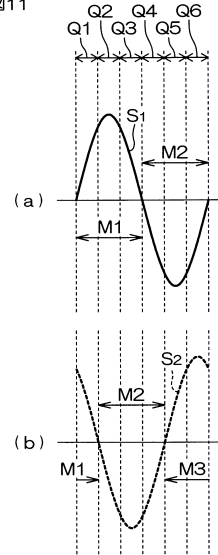
【図 10】

図10



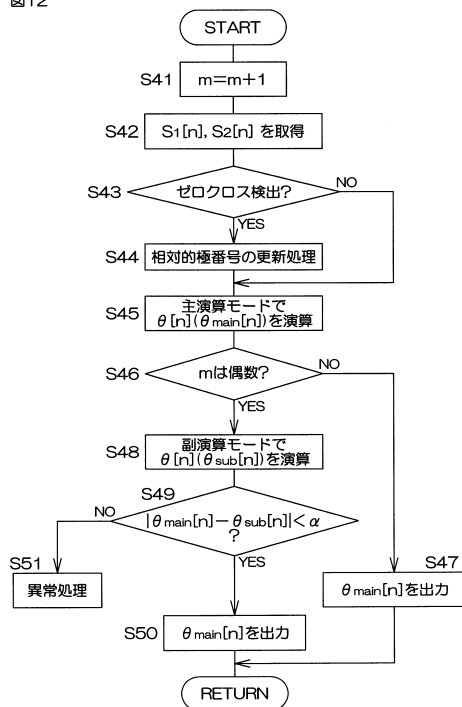
【図 11】

図11



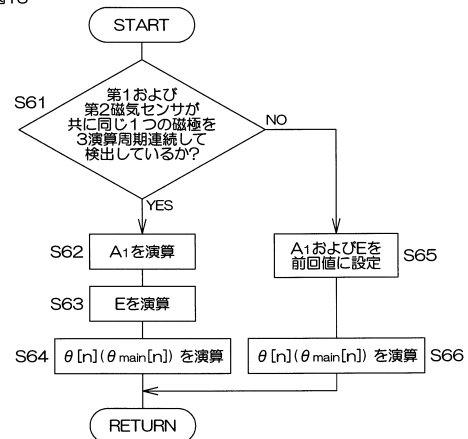
【図 12】

図12



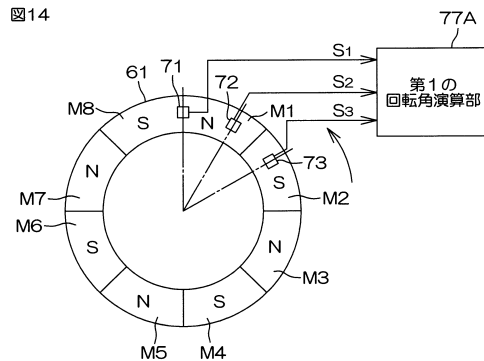
【図 13】

図13



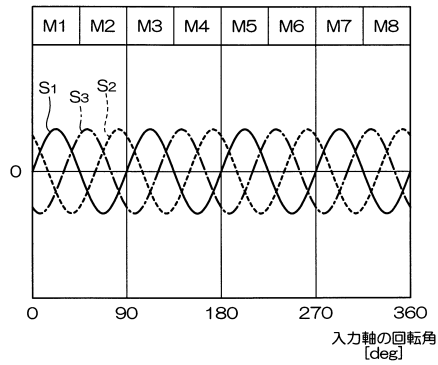
【図 14】

図14



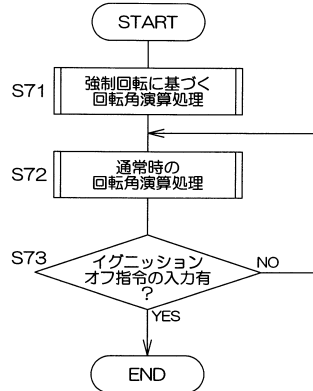
【図 15】

図15



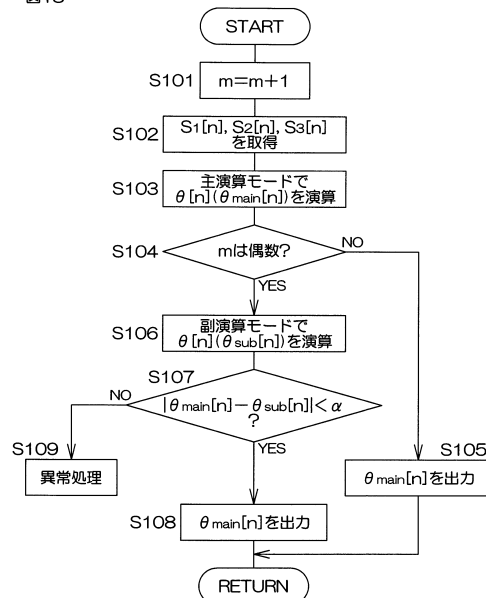
【図 16】

図16



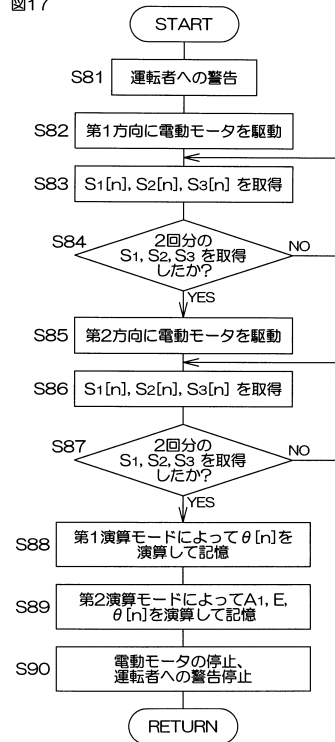
【図 18】

図18



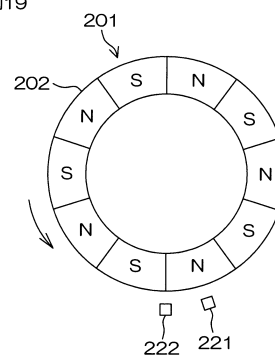
【図 17】

図17



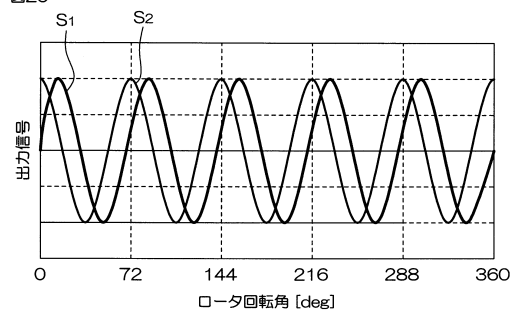
【図 19】

図19



【図 20】

図20



フロントページの続き

- (56)参考文献 特開2012-231588 (JP, A)
特開2011-220848 (JP, A)
特開2010-100286 (JP, A)
特開2010-19575 (JP, A)
特開2008-26297 (JP, A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G01D 5/00- 5/62
G01B 7/00- 7/34
G01B11/00-11/30
G01B21/00-21/32
G01L 3/00- 3/26
B62D 5/04