

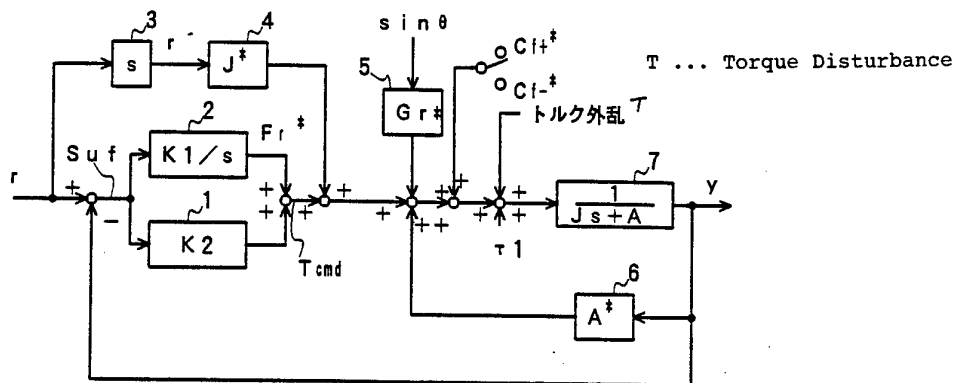


特許協力条約に基づいて公開された国際出願

<p>(51) 国際特許分類 5 H02P 5/00</p>	<p>A1</p>	<p>(11) 国際公開番号 WO 94/02989 (43) 国際公開日 1994年2月3日 (03.02.1994)</p>
<p>(21) 国際出願番号 PCT/JP93/00995 (22) 国際出願日 1993年7月16日 (16. 07. 93) (30) 優先権データ 特願平4/212268 1992年7月17日 (17. 07. 92) JP 特願平4/311142 1992年10月28日 (28. 10. 92) JP (71) 出願人 (米国を除くすべての指定国について) ファナック株式会社 (FANUC LTD) [JP/JP] 〒401-05 山梨県南都留郡忍野村忍草字古馬場3580番地 Yamanashi, (JP) (72) 発明者; および (75) 発明者/出願人 (米国についてのみ) 加藤哲朗 (KATO, Tetsuaki) [JP/JP] 〒401-05 山梨県南都留郡忍野村忍草3511-1 ファナックマンションハリモミ8-101 Yamanashi, (JP) 吉田 修 (YOSHIDA, Osamu) [JP/JP] 〒920-03 石川県金沢市藤江南2-66 カントリーハイツ203 Ishikawa, (JP) 中村 勝 (NAKAMURA, Masaru) [JP/JP] 〒401-05 山梨県南都留郡忍野村忍草3527-1 ファナック第3ヴィラカラマツ Yamanashi, (JP) 有田創一 (ARITA, Soichi) [JP/JP] 〒401-05 山梨県南都留郡忍野村忍草3533-1 ファナックマンションハリモミ10-305 Yamanashi, (JP)</p>	<p>(74) 代理人 弁理士 竹本松司, 外 (TAKEMOTO, Shoji et al.) 〒105 東京都港区虎ノ門1丁目23番10号 山縣ビル2階 Tokyo, (JP) (81) 指定国 AT (欧州特許), BE (欧州特許), CH (欧州特許), DE (欧州特許), DK (欧州特許), ES (欧州特許), FR (欧州特許), GB (欧州特許), GR (欧州特許), IE (欧州特許), IT (欧州特許), KR, LU (欧州特許), MC (欧州特許), NL (欧州特許), PT (欧州特許), SE (欧州特許), US. 添付公開書類 国際調査報告書</p>	

(54) Title : ADAPTIVE PI CONTROL METHOD

(54) 発明の名称 適応PI制御方法



(57) Abstract

This invention relates to a method of obtaining an extremely robust adaptive PI control method even when any parameter fluctuation exists in a control object. Estimation values J^* , A^* , Gr^* and Cf^* of an inertia, a coefficient of dynamic friction, gravitational disturbance due to a robot angle and Coulomb friction are determined, respectively, using [speed command r - actual speed y] as a state variable Suf , and a torque command τ is determined in the following way so as to make the difference between each estimation value and an actual value zero: $\tau = K2.Suf + (K1/s).Suf + J^*.r' + A^*.y + Gr^*.sin\Theta + Cf^* + \tau1$. In this equation, the first and second terms on the right side are torque commands obtained by the PI control, r' is an acceleration of the command, Θ is a robot arm angle, and $\tau1$ is a change-over input so as to cope with other disturbances. Since the difference between each estimation value and the actual value becomes zero, [acceleration command r = actual speed y] can be obtained and adaptive PI control having a transmission function "1" can be obtained.

(57) 要約

制御対象にパラメータ変動があっても非常にロバストな適応PI制御方法を得る方法であって、[速度指令 r - 実速度 y] を状態変数 Suf として用い、イナーシャ、動摩擦係数、ロボット角度による重力外乱、クーロン摩擦の推定値 J^* , A^* , Gr^* , Cf^* 求め、この各推定値と実際の値との誤差がゼロとなるようにトルク指令 τ を次のように求める。

$$\tau = K2 \cdot Suf + (K1/s) \cdot Suf + J^* \cdot r' + A^* \cdot y + Gr^* \cdot \sin \theta + Cf^* + \tau 1$$

なお、上記式の右辺1項と2項はPI制御より求められるトルク指令である。 r' は指令の加速度、 θ はロボットアーム角度であり、 $\tau 1$ はその他の外乱に対応するための切換入力である。各推定値と実際の値との誤差がゼロとなるため、速度指令 $r =$ 実速度 y が得られ、伝達関数「1」の適応PI制御が得られる。

情報としての用途のみ

PCTに基づいて公開される国際出願のパンフレット第1頁にPCT加盟国を同定するために使用されるコード

AT	オーストリア	CS	チェッコスロヴァキア	KR	大韓民国	PL	ポーランド
AU	オーストラリア	CZ	チェッコ共和国	KZ	カザフスタン	PT	ポルトガル
BB	バルバドス	DE	ドイツ	LI	リヒテンシュタイン	RO	ルーマニア
BE	ベルギー	DK	デンマーク	LK	スリランカ	RU	ロシア連邦
BF	ブルキナファソ	ES	スペイン	LU	ルクセンブルグ	SD	スーダン
BG	ブルガリア	FI	フィンランド	LV	ラトヴィア	SE	スウェーデン
BJ	ベナン	FR	フランス	MC	モナコ	SI	スロヴェニア
BR	ブラジル	GA	ガボン	MG	マダガスカル	SK	スロヴァキア共和国
BY	ベラルーシ	GB	イギリス	ML	マリ	SN	セネガル
CA	カナダ	GN	ギニア	MN	モンゴル	TD	チャド
CF	中央アフリカ共和国	GR	ギリシャ	MR	モーリタニア	TG	トーゴ
CG	コンゴ	HU	ハンガリー	MW	マラウイ	UA	ウクライナ
CH	スイス	IE	アイルランド	NE	ニジェール	US	米国
CI	コートジボアール	IT	イタリア	NL	オランダ	UZ	ウズベキスタン共和国
CM	カメルーン	JP	日本	NO	ノルウェー	VN	ヴェトナム
CN	中国	KP	朝鮮民主主義人民共和国	NZ	ニュージーランド		

- 1 -

明 細 書

適 応 P I 制 御 方 法

本発明は、ロボットや工作機械等の制御対象を駆動するモータの制御方法に関するもので、特に、イナーシャ、
5 動摩擦係数、重力外乱、クーロン摩擦等のパラメータの適応を行い、これらのパラメータが変動しても制御系の特性が変化のない、ロバストな適応P I（比例、積分）制御方法に関する。

背 景 技 術

10 サーボモータで駆動されるロボットや工作機械等の機械の制御においては、通常、位置制御をP制御（比例制御）で、速度制御をP I制御（比例、積分制御）で行っている。図2はこのP I制御方法を用いたモータの速度
15 制御方法をブロック図で示したものである。同図において、指令速度 r からモータの実速度 y を減じた速度偏差に比例器1で比例ゲイン $K2$ を乗じた値に、積分器2で上記速度偏差を積分しそれに積分ゲイン $K1$ を乗じた値を加算することでトルク指令 T_{cmd} を求める。そしてこのトルク指令 T_{cmd} を制御対象のモータ7に出力しモータ7を
20 駆動する。このP I制御での比例ゲイン $K1$ 、 $K2$ は通常固定された値で制御が実行されている。

ところが、比例ゲイン $K1$ 、 $K2$ が固定であると、制御対象の機械等のイナーシャ、動摩擦係数、重力外乱、クーロン摩擦等のパラメータが変化すると、制御特性が変化
25 してしまい、制御性能を悪くするという欠点がある。

- 2 -

例えば、図3に示すように、積分ゲイン $K1$ 、比例ゲイン $K2$ がある固定の値で、制御対象のイナーシャがある値のとき、周波数に対する制御系全体のゲインおよび位相がそれぞれ G 、 f である場合、前記制御対象のイナーシャが5倍に増大すると、前記ゲインおよび位相はそれぞれ G' 、 f' のように変化してしまい、制御系全体の特性が変化してしまう。そのため、従来は、上記積分ゲイン、比例ゲイン $K1$ 、 $K2$ は、所定範囲でのパラメータ変動において制御系が常に安定になるという値を選択しなければならなかった。

発明の開示

本発明の目的は、モータを制御するうえで特に問題となるイナーシャ、動摩擦係数、重力外乱等のパラメータが変動しても制御系の特性が変化しない、ロバストな適応PI制御（比例及び積分制御）方法を提供することにある。

上記目的を達成するために、本発明は、速度ループに比例・積分ループを有するモータ制御系において、モータ実速度を速度指令に等しくすることを目標として、モータ速度指令からモータ実速度を差し引いたものを状態変数としてまず定義し、次にこの状態変数がゼロに集束するとともに、イナーシャ、動摩擦係数、重力外乱、クーロン摩擦などの適応させるべきパラメータの推定値がそれぞれ真値に集束するように、モータに与える実トルク指令を制御対象の運動方程式に基づいて決定する。

また、本発明は、速度ループに比例積分ループを有するモータ制御系において、速度指令からモータの実速度を減じた速度偏差を状態変数とし、該状態変数を用いてモータで制御される制御対象の特性を変動させる各種パラメータの値を推定し、各推定値と実際との誤差がゼロになるようにトルク補正值を求め、該トルク補正值を上記比例積分ループ処理で得られたトルク指令に加算してモータへのトルク指令としてモータを駆動する。

好ましくは、上記各種パラメータは、制御対象のイナーシャ、動摩擦係数、重力外乱である。さらに、これにクーロン摩擦が含まれる。

好ましくは、各種パラメータの重力外乱の推定は、制御対象の位置姿勢によって決まる外乱を決める重力外乱係数とそれ以外の一定重力外乱を推定し、該重力外乱を推定する。

好ましくは、制御対象がロボットで、重力外乱は該重力外乱に影響するパラメータを重力の影響が一番大きいアームの角度に対する重力外乱係数、上記アーム以外のアームの角度によって決まる外乱、及び一定重力外乱に分けて推定し該重力外乱を推定する。

さらに、本発明は、速度ループに比例・積分ループを有するモータ制御系において、モータへのトルク指令 τ を、運動方程式に対応させることにより、次式、

$$\tau = K2 \cdot Suf + J* \cdot r' + A* \cdot y + Gr* \cdot \sin \theta + Fr* + Cf* + \tau 1$$

- 4 -

により決定し、上の式の右辺の $K2 \cdot Suf$ の項と Fr^* の項とを通常のPI制御における比例項及び積分項としている。ただし、上式で、 $K2$ は比例定数； Suf は速度指令からモータ実速度 y とを差し引いた値である速度偏差； r^{\cdot} は速度指令の時間での微分値で、指令の加速度； J^* 、 A^* 、 Gr^* 、 Fr^* 、 Cf^* は、イナーシャ、動摩擦係数、重力外乱係数、一定重力外乱、クーロン摩擦のそれぞれの推定値； θ は重力外乱に一番大きく影響を与えるロボットアームの回転角度であり、さらに、上の式のイナーシャ推定値 J^* は、速度偏差 Suf に指令の加速度 r^{\cdot} とさらに適応速度を決める調整パラメータ α の逆数($1/\alpha$)を乗じたものを時間で積分したものであり、動摩擦係数の推定値 A^* は、速度偏差 Suf にモータ実速度 y とさらに上記調整パラメータ β の逆数($1/\beta$)を乗じたものを時間で積分したものであり、動力外乱係数の推定値 Gr^* は、速度偏差 Suf に上記アームの回転角度 θ に対する $\sin\theta$ にさらに上記調整パラメータ γ の逆数($1/\gamma$)を乗じたものを時間で積分したものであり、一定重力外乱の推定値 Fr^* は、速度偏差 Suf に上記調整パラメータ δ の逆数($1/\delta$)を乗じたものを時間で積分したものであり、クーロン摩擦の推定値 Cf^* は、速度偏差 Suf にモータの回転方向に応じての上記調整パラメータ ε の逆数($1/\varepsilon$)を乗じたものを時間で積分したものであり、さらに、上記切り換え入力 τ_1 は、速度偏差 Suf がゼロまたは正であるときは、上記重力外乱に一番大きく影響

を与えるロボットアーム以外のアームの回転角度等によって与えられる重力外乱の最大値とし、また、負であるときはこの重力外乱の最小値とする。なお、使用するロボットによってはこの値を常にゼロとおくこともある。

5 上述のように、本発明によれば、制御対象のイナーシャ、動摩擦係数、重力外乱、クーロン摩擦等の制御対象の特性に影響するパラメータの変動に適応させて制御を行うので、これらのパラメータ変動に対して制御系の特性が変化せず、非常にロバストなP I（比例・積分）制
10 御ができる。特に、ロボットのようなアームの位置によってイナーシャや重力外乱が変化する制御対象に有効に適用できる。

図面の簡単な説明

図1は本発明の一実施例の適応P I制御方法を用いた
15 モータの速度制御系のブロック図、

図2は従来のP I制御方法を用いたモータの速度制御系のブロック線図、

図3は従来のP I速度制御方法で制御対象のイナーシャが変動したときに制御系の特性が変わることの説明図、

20 図4は本発明の一実施例を実施するロボットを駆動するサーボモータ制御のブロック図、及び、

図5は同実施例におけるデジタルサーボ回路のプロセッサが実施する処理の要部フローチャートである。

発明を実施するための最良の形態

25 以下、制御対象をロボットとした本発明の一実施例に

ついて説明する。

まず、状態変数 Suf を次の (1) 式とする。また、制御対象であるロボットの運動方程式を立てると次の (2) 式となる。

$$5 \quad Suf = r - y \quad \dots (1)$$

$$\tau = J \cdot y' + A \cdot y + Gr \cdot \sin \theta + Fr + Cf + Dis \quad \dots (2)$$

なお、上記 (1) 式、(2) 式において、r はモータへの速度指令、y はモータの実速度である。その結果、状態変数 Suf は速度偏差を意味する。また、 τ はモータのトルクで、 y' はモータの実速度を時間で微分したものの (加速度) を示している。なお、ここで及びこれ以降、文字の右肩に「 $'$ 」を付したものは、その文字が意味する変数を時間で微分したものを意味することにする。さらに、J はイナーシャ、A は動摩擦係数、Gr はロボットアーム角度に対する重力外乱係数、 θ は重力外乱に一番大きく影響を与えるロボットアームの回転角度、Fr は一定重力外乱、Cf はクーロン摩擦、Dis は他のロボットアームの回転角度等によって与えられる重力外乱等のその他の外乱である。

また、モータへの実際のトルク指令 τ は次の (3) 式とする。

$$\tau = K2 \cdot Suf + J^* \cdot r' + A^* \cdot y + Gr^* \cdot \sin \theta + Fr^* + Cf^* + \tau 1 \quad \dots (3)$$

25 上記 (3) 式において、K2 は後述するように収束速度

- 7 -

を決める定数であり、 J^* はイナーシャ項の推定値、 A^* は動摩擦係数の推定値、 Gr^* は重力外乱係数の推定値、 Fr^* は一定重力外乱の推定値、 Cf^* はクーロン摩擦の推定値で、速度 y の正負の極性と同一極性で絶対値が等しい。

5 すなわち、

$$y = 0 \text{ のときは、 } Cf^* = 0$$

$$y > 0 \text{ のときは、 } Cf^* = \text{正の所定値の推定値 } Cf^{+*}$$

$$y < 0 \text{ のときは、 } Cf^* = \text{負の所定値の推定値 } Cf^{-*}$$

である。また、 τ_1 は切換入力である。

10 次に、リアプノフ関数候補 V を次の(4)式とする。

$$\begin{aligned} V = & (1/2)J \cdot Suf^2 + (1/2)\alpha \cdot Jbar^2 \\ & + (1/2)\beta \cdot Abar^2 + (1/2)\gamma \cdot Grbar^2 \\ & + (1/2)\delta \cdot Frbar^2 + (1/2)\varepsilon \cdot Cfbar^2 \end{aligned}$$

... (4)

15 なお、上の α , β , γ , δ , ε は適応速度を決める正の調整パラメータであり、 $Jbar$, $Abar$, $Grbar$, $Frbar$, $Cfbar$ はイナーシャ項の推定誤差、動摩擦係数の推定誤差、重力外乱係数の推定誤差、一定重力外乱の推定誤差、クーロン摩擦の推定誤差で、次の(5)式の関係にある。

$$\begin{aligned} 20 \quad Jbar &= J - J^* \\ Abar &= A - A^* \\ Grbar &= Gr - Gr^* \\ Frbar &= Fr - Fr^* \\ Cfbar &= Cf - Cf^* \end{aligned}$$

... (5)

25 上記リアプノフ関数候補 V は最小値がゼロで常に正に

なる関数である。よって、リアプノフ関数候補 V の微分値 \dot{V} が常に負になる（単調減少）ようなモータへのトルク τ を決定すれば、リアプノフ関数候補 V は最小値ゼロに収束する。すなわち、

$$\begin{aligned}
 5 \quad & \text{Suf} = 0, \\
 & \text{Jbar} = 0, \\
 & \text{Abar} = 0, \\
 & \text{Grbar} = 0, \\
 & \text{Frbar} = 0, \\
 10 \quad & \text{Cfbar} = 0
 \end{aligned}$$

となる。

ここで、 $\text{Suf} = 0$ ということは、指令速度 (r) に実速度 (y) が等しくなるということであるから、制御系全体の伝達関数が 1 となって、応答は制御対象のパラメータ
 15 (イナーシャ、動摩擦係数、重力外乱、一定重力外乱、クーロン摩擦およびその他の外乱) に依存しなくなる。それとともに、各推定誤差 (Jbar , Abar , Grbar , Frbar , Cfbar) がゼロとなり、これら推定値はそれぞれ真値に集束することになる。

20 そこで、上の (4) 式の両辺を微分すると、

$$\begin{aligned}
 \dot{V} = & \text{J} \cdot \text{Suf} \cdot \dot{\text{Suf}} + \alpha \cdot \text{Jbar} \cdot \dot{\text{Jbar}} \\
 & + \beta \cdot \text{Abar} \cdot \dot{\text{Abar}} + \gamma \cdot \text{Grbar} \cdot \dot{\text{Grbar}} \\
 & + \delta \cdot \text{Frbar} \cdot \dot{\text{Frbar}} + \varepsilon \cdot \text{Cfbar} \cdot \dot{\text{Cfbar}}
 \end{aligned}$$

… (6)

25 また、(1) 式の両辺を微分すると、

- 9 -

$$\text{Suf}' = r' - y' \quad \dots (7)$$

(2) 式より y' を求めると、

$$y' = (\tau / J) - (A \cdot y / J) - (Gr \cdot \sin \theta + Fr + Cf) / J - (Dis / J) \quad \dots (8)$$

(7) 式に (8) 式を代入して解くと、

$$\begin{aligned} \text{Suf}' &= r' + (A \cdot y / J) \\ &\quad + (Gr \cdot \sin \theta + Fr + Cf) / J \\ &\quad + (Dis / J) - \tau / J \quad \dots (9) \end{aligned}$$

10 (9) 式を (6) 式に代入して V' を求めると、

$$\begin{aligned} V' &= \text{Suf} (J \cdot r' + A \cdot y + Gr \cdot \sin \theta + Fr + Cf + Dis - \tau) \\ &\quad + \alpha \cdot \text{Jbar} \cdot \text{Jbar}' + \beta \cdot \text{Abar} \cdot \text{Abar}' \\ &\quad + \gamma \cdot \text{Grbar} \cdot \text{Grbar}' + \delta \cdot \text{Frbar} \cdot \text{Frbar}' \\ &\quad + \varepsilon \cdot \text{Cfbar} \cdot \text{Cfbar}' \quad \dots (10) \end{aligned}$$

15 上記 10 式に 3 式を代入して整理すると、次の (11) 式となる。

$$\begin{aligned} V' &= -K2 \cdot \text{Suf}^2 \\ &\quad + \text{Jbar} (\text{Suf} \cdot r' + \alpha \cdot \text{Jbar}') \\ &\quad + \text{Abar} (\text{Suf} \cdot y + \beta \cdot \text{Abar}') \\ 20 &\quad + \text{Grbar} (\text{Suf} \cdot \sin \theta + \gamma \cdot \text{Grbar}') \\ &\quad + \text{Frbar} (\text{Suf} + \delta \cdot \text{Frbar}') \\ &\quad + \text{Cfbar} (\text{Suf} + \varepsilon \cdot \text{Cfbar}') \\ &\quad + \text{Suf} (Dis - \tau) \quad \dots (11) \end{aligned}$$

上記リアブノフ関数候補の微分値 V' を常に負にする
25 には、(11) 式の右辺第 1 項は常に負であることから、

右辺第 2 ～ 第 6 項をゼロとし、さらに、第 7 項が常に負になるように切り替え入力 $\tau 1$ を選択するようにする。

そこで、まず、上記 (11) 式の第 2 項をゼロにすることを考える。すなわち、

$$5 \quad \text{Jbar} \cdot (\text{Suf} \cdot r' + \alpha \cdot \text{Jbar}') = 0 \quad \dots (12)$$

上記 (12) 式が常にゼロになるには、

$$\text{Suf} \cdot r' + \alpha \cdot \text{Jbar}' = 0$$

が成り立てばよい。よって、

$$\text{Jbar}' = - (1/\alpha) \text{Suf} \cdot r' \quad \dots (13)$$

10 ここで、イナーシャ J の変化が非常に小さくてその微分値 J' がゼロ ($J' = 0$) であるとすると、上記 (5) 式の $\text{Jbar} = J - J^*$ より、

$$\text{Jbar}' = - J^*'$$

となる。そこで、この式と (13) 式とで、

$$15 \quad J^* \cdot = (1/\alpha) \text{Suf} \cdot r' \quad \dots (14)$$

が得られる。すなわち、推定イナーシャ J^* を、状態変数 Suf と指令速度の微分値 (加速度) r' に基づき上の (14) 式に基づいて変化させれば、(11) 式右辺第 2 項はゼロとなる。

20 同様に、動摩擦係数、重力外乱係数、一定重力外乱、クーロン摩擦の変化が小さいとして、それぞれの微分値が、

$$A' = 0,$$

$$Gr' = 0,$$

$$25 \quad Fr' = 0,$$

$$Cf' = 0$$

と仮定して、

(11) 式右辺の第3項～第6項についてもゼロとすれば、

$$5 \quad A*' = (1/\beta) \text{Suf} \cdot y \quad \dots (15)$$

$$Gr*' = (1/\gamma) \text{Suf} \cdot \sin \theta \quad \dots (16)$$

$$Fr*' = (1/\delta) \text{Suf} \quad \dots (17)$$

$$Cf+*' = (1/\varepsilon) \text{Suf} \quad y > 0 \text{の時のみ適応} \quad \dots (18)$$

$$Cf-*' = (1/\varepsilon) \text{Suf} \quad y < 0 \text{の時のみ適応} \quad \dots (19)$$

10 となり、動摩擦係数の推定値 A^* 、重力外乱係数の推定値 Gr^* 、一定重力外乱の推定値 Fr^* 、及びクーロン摩擦をモータ実速度 y が正の時と負の時に分けての推定値 $Cf+^*$ 、 $Cf-^*$ をそれぞれ上記(15)式～(19)式を満足するように変化させれば、(11)式右辺第3項～第6項
15 はゼロとなる。

また、(11)式右辺の第7項が常に負となるには、すなわち、

$$\text{Suf} (Dis - \tau 1) < 0 \quad \dots (20)$$

が成立するには、

20 $\text{Suf} \geq 0$ のときには、

$\tau 1 > Dis$ であればよいから、切換入力 $\tau 1$ を上記その他の外乱 Dis の最大値 Dis_{max} にすれば ($\tau 1 = Dis_{max}$) よい。

また、 $\text{Suf} < 0$ のときには、

25 $\tau 1 < Dis$ であればよいから、切換入力 $\tau 1$ を上記その他の外乱 Dis の最小値 Dis_{min} にすれば ($\tau 1 = Dis_{min}$) よい。

そこで、上記(14)～(19)式の左辺を時間で積分することで、推定値 J^* , A^* , Gr^* , Fr^* , Cf^{+*} , Cf^{-*} を得、また、(20)式により Suf の符号に応じて $\tau 1$ を $Dismax$ か $Dismin$ に選択すれば、(3)式により
 5 モータへのトルク指令 τ を求めることができる。すなわち、こうして求めたトルク指令によりモータを制御すれば、(14)～(20)式が成り立ち、したがって、リアプノフ関数候補 V の微分値は常に負になって、リアプノフ関数候補 V は正の値から減少してゼロ(最小値)に
 10 集束する。これにより、状態変数 $Suf = 0$, 各パラメータの推定誤差もゼロとなる ($Jbar = 0$, $Abar = 0$, $Grbar = 0$, $Frbar = 0$, $Cfbar = 0$) 。

ここで、

$$1/\delta = K1$$

15 とすると、上記(17)より以下の式が成立する。

$$Fr^* = (K1/S) Suf \quad \dots (21)$$

この式の右辺は $Suf = r - y$ 、すなわち速度偏差を積分し定数 $K1$ を乗じるということであり、これは、従来の P I 制御による速度ループ処理の積分器 2 の処理と同一である。
 20 ある。

そこで、(3)式で求めるトルク指令 τ は次の式となる。

$$\begin{aligned} \tau = & K2 \cdot Suf + (K1/S) \cdot Suf + J^* \cdot \dot{r} + A^* \cdot y \\ & + Gr^* \cdot \sin \theta + Cf^* + \tau 1 \quad \dots (22) \end{aligned}$$

25 上記(22)式において、状態変数 Suf は $(r - y)$ で

- 13 -

あり、速度偏差であるので、 $\{K2 \cdot Suf + (K1/S) \cdot Suf\}$ は従来の P I 制御によって求められるトルク指令 T_{cmd} となるから、上記 (22) 式は次の式となる。

$$\tau = T_{cmd} + J^* \cdot r' + A^* \cdot y + Gr^* \cdot \sin \theta + Cf^* + \tau_1 \quad \dots (23)$$

なお、この式における Cf^* は、上記 (18) 式、(19) 式より、実速度 y が正の時及び負のときのそれぞれの微分値 Cf^* を積分して得られる値 Cf^{+*} 、 Cf^{-*} であって、したがって、 Cf^* として Cf^{+*} 、 Cf^{-*} のいずれをとるかは実速度 y の正負による。また、実速度 y がゼロのときは Cf^* はゼロとする。

そこで、上述の (22) 式 (すなわち (23) 式) の関係をブロック図により表せば、図 1 に示すものとなる。この図 1 において、符号 1 の項は速度偏差 (状態変数) Suf に定数 $K2$ を乗じる項 (比例項) で、また、符号 2 の項はこの Suf を積分し定数 $K2$ を乗じる項 (積分項) で、この項 1 及び 2 で従来の P I 制御における比例積分項に対応する。そして、 $Suf (= r - y)$ に項 1 の定数 $K2$ を乗じた値と、 Suf を積分し項 2 の定数 $K2$ を乗じた値とを加算するとは、(22) 式の右辺第 1 項及び第 2 項を計算すること、すなわち、(23) 式右辺第 1 項のトルク指令 T_{cmd} を求めることになる。なお、 Suf を積分し項 2 の定数 $K1$ を乗じることは、(21) 式の右辺を演算することであり、したがって、左辺の Fr^* を求めていることになる。

符号 3 は指令速度 r を微分して指令の加速度 r' を求める項である。符号 4 はこの指令の加速度 r' に推定イナーシャ J^* を乗じる項で、(23) 式の右辺第 2 項の値を求める項である。符号 5 はロボットアーム角度 θ に対する重力外乱係数の推定値 G_r^* の項であり、ロボットアーム角度 θ に対応する $\sin \theta$ にこの推定値 G_r^* を乗じて重力外乱を求める項で、(23) 式の右辺第 4 項の値を求める項である。符号 6 は動摩擦係数の推定値 A^* をモータの実速度 y に乗じて重力外乱を求める項であり、(23) 式における第 3 項の値を求める項である。

そして、上記各項 1, 2, 4, 5, 6 からの出力をすべて加算し、さらに、実速度 y の正、負に応じて正のクーロン摩擦及び負のクーロン摩擦を加算し、切換入力 τ_1 を加算した値をトルク指令 τ としてモータへ入力してモータを駆動する。

図 4 は本発明の一実施例を実施するロボットを駆動するサーボモータの制御系の要部ブロック図である。図 4 中、20 は制御対象 (ロボット) を制御するホストプロセッサで、制御対象の各軸に位置指令を分配する。21 はホストプロセッサ 20 とデジタルサーボ回路 22 のプロセッサ間の情報の伝達を仲介する共有メモリで、ホストプロセッサ 20 が書き込んだ位置指令等のデータをデジタルサーボ回路 22 のプロセッサに受け渡し、デジタルサーボ回路 22 のプロセッサが書き込んだアラーム情報等をホストプロセッサに引き渡す機能を行うも

のである。22はデジタルシグナルプロセッサ等で構成されるデジタルサーボ回路で、プロセッサ、ROM、RAM等で構成されている。このデジタルサーボ回路22はロボットの各軸のサーボモータの制御を行うもので、本発明の適応PI制御のサーボモータ制御処理を行うものである。23はトランジスタインバータ等で構成されるサーボアンプで、24はサーボモータである。また、25はサーボモータ24の位置、速度を検出する位置・速度検出器で、位置、速度 y はデジタルサーボ回路にフィードバックされている。なお、サーボアンプ23、サーボモータ24は1軸のみを図示している。

図5は、本実施例において、上記デジタルサーボ回路22のプロセッサが実行する本発明のサーボモータ制御処理に関するフローチャートであり、該プロセッサは所定周期毎図5に示す処理を実行する。

まず、デジタルサーボ回路22のメモリ内に本実施例における適応PI制御のサーボモータ制御処理に必要な定数等、すなわち、比例ゲイン K_2 、積分ゲイン $K_1 (= 1/\delta)$ 、他の外乱の予想される最大値 Dis_{max} 、最小値 Dis_{min} および調整パラメータ α 、 β 、 γ 、 ε の値をあらかじめ設定する。

そして、制御対象（ロボット）の動作を開始させると、ホストプロセッサ20は制御対象の各軸に対して位置指令を分配し、デジタルサーボ回路22のプロセッサは共有メモリ21より位置指令を読み取ると共に、パルス

コーダ 16 から出力される位置フィードバック量を読取り従来と同様に位置ループ処理を行い速度指令 r を求める。

次に、デジタルサーボ回路のプロセッサは図 5 に示す処理を開始し、まず、位置ループ処理によって得られた速度指令 r を読取ると共に、位置速度検出器 25 で検出されたモータ 24 の実速度 y を読取る（ステップ S 1, S 2）。さらに、共有メモリ 21 を介してホストプロセッサ 20 から送られてくる重力の影響を一番受けるロボットアームの回転角度 θ を読み、該値より $\sin\theta$ の値を算出する（ステップ S 3）。次に、速度指令 r を微分して（当該周期の速度指令 r から前周期の速度指令 r を減じた値を周期時間で除して）指令加速度 r' を算出すると共に速度指令 r から実速度 y を減じて状態変数 Suf としての速度偏差を求める（ステップ S 4, S 5）。次に、従来と同様の処理である P I 制御の処理を行い P I 制御によるトルク指令 $Tcmd$ を求める。

次に各パラメータの適応処理として、（14）式、（15）式、（16）式をそれぞれ積分する処理を行い、イナーシャ、動摩擦係、及び重力外乱係数のパラメータの推定値 J^* , A^* , Gr^* をそれぞれ求める（ステップ S 7）。

すなわち、イナーシャの推定値 J^* を積算記憶するレジスタに、ステップ S 5 で求めた位置偏差 Suf にステップ S 4 で求めた指令の加速度 r' を乗じ、さらに設定さ

- れた調整パラメータ α の逆数 $1/\alpha$ を乗じた値を加算し
イナーシャの推定値 J^* を求める。また、動摩擦係数の
推定値 A^* を積算記憶するレジスタに、ステップ S 5 で
求めた位置偏差 Suf に実速度 y および調整パラメータ β
5 の逆数 $1/\beta$ を乗じた値を加算し動摩擦係数の推定値 A^*
を求める。重力外乱係数の推定値 Gr^* を積算記憶するレ
ジスタに、位置偏差 Suf にステップ S 3 で求めた $\sin\theta$
および調整パラメータ γ の逆数 $1/\gamma$ を乗じた値を加算
し重力外乱係数の推定値 Gr^* を求める。
- 10 次に、ステップ S 2 で読み取ったモータ速度 y がゼロ
か「正」か「負」かを判断し（ステップ S 8）、速度 y
がゼロのときには、クーロン摩擦の推定値 Cf^* を記憶
するレジスタにゼロをセットする。また、速度 y が正の
ときには、正のクーロン摩擦の推定値 $Cf+^*$ を積算記憶
15 するレジスタに位置偏差 Suf に調整パラメータ ε の逆数
を乗じた値を加算し、正のクーロン摩擦の推定値 $Cf-^*$
を求め、この求められた正のクーロン摩擦の推定値 $Cf-^*$
をクーロン摩擦の推定値 Cf^* を記憶するレジスタにセ
ットする。また、速度 y が負のときには、負のクーロン
20 摩擦の推定値 $Cf-^*$ を積算記憶するレジスタに、位置偏
差 Suf に調整パラメータ ε の逆数を乗じた値を加算し、
負のクーロン摩擦の推定値 $Cf-^*$ を求め、この求められ
た負のクーロン摩擦の推定値 $Cf+^*$ をクーロン摩擦の推
定値 Cf^* を記憶するレジスタにセットする（ステップ
25 S 9, S 10, S 11）。

次に状態変数（速度偏差） Suf の値が 0 以上か否か判断する（ステップ S 1 2）。状態変数 Suf がゼロ若しくは正であると、切換入力 $\tau 1$ を、設定されているその他の外乱の最大値 Dis_{max} とする。また、状態変数 Suf の値
5 が負であると、切換入力 $\tau 1$ を、設定されているその他の外乱の最小値 Dis_{min} とする（ステップ S 1 3, S 1 4）。

以上のステップ 3 ~ 1 4 で求めたロボットアームの角度 θ に対する $\sin \theta$ の値、指令の加速度 r' 、PI 制御によるトルク指令値 T_{cmd} 、各パラメータの推定値 J^* 、
10 A^* 、 Gr^* 、 Cf^* 、切換入力 $\tau 1$ 、及び指令の加速度 r' とさらに実速度 y とで、(23) 式の演算を行ってトルク指令 τ を求め（ステップ S 1 5）、このトルク指令 τ を電流ループ処理に引き渡して（ステップ S 1 6）、当該処理を終了する。

15 以下上記ステップ S 1 ~ ステップ S 1 6 の処理を所定周期毎実行し、サーボモータ 2 4 を駆動することになる。

なお、上記実施例では、スライディングモードによる切換入力 $\tau 1$ をトルク指令 τ に加算するようにしたが、
例えばロボットが 1 軸である場合や 1 軸以上の場合でも、
20 重力の影響を 1 軸のロボットアームからのみ受けて、すでにこのロボットアームの回転角による重力外乱の影響を推定値 Gr^* で考慮し、他の外乱を想定する必要がないような場合には、上記切換入力 $\tau 1$ をトルク指令に加算する必要はない。また、ロボットアームの角度によって
25 重力外乱の影響を受ける 2 軸以上の軸がある場合には、

上述した実施例のような処理で行うこともできるが、2つの軸共に、上記実施例で示した推定値 Gr^* を求めて処理する方法を採用してもよい。

また、上記図5で示す処理において、従来のPI制御の制御方法と比較し、ステップS3～S5、S7～S11、S15が本発明による適応制御をPI制御に付加したときに必要な処理である。さらに、ステップS12～S14がスライディングモードを併用したときに必要な処理である。

さらに、上記実施例では、制御対象がロボットの例を示したが、モータで駆動される工作機械等にも適用できるものである。また、上記実施例では、位置、速度制御を行うサーボモータの例を示したが、速度制御のみを行うモータ制御の場合でも本発明は適用できるものである。

15

20

25

請求の範囲

1. 速度ループに比例・積分ループを有するモータ制御系において、

モータ実速度を速度指令に等しくすることを目標として、モータ速度指令からモータ実速度を差し引いたものを状態変数としてまず定義し、

次にこの状態変数がゼロに集束するとともに、イナーシャ、動摩擦係数、重力外乱、クーロン摩擦などの適応させるべきパラメータの推定値がそれぞれ真値に集束するように、モータに与える実トルク指令を制御対象の運動方程式に基づいて決定する、

ことからなる適応比例・積分制御方法。

2. 速度ループに比例積分ループを有するモータ制御系において、速度指令からモータの実速度を減じた速度偏差を状態変数とし、該状態変数を用いてモータで制御される制御対象の特性を変動させる各種パラメータの値を推定し、各推定値と実際との誤差がゼロになるようにトルク補正値を求め、該トルク補正値を上記比例積分ループ処理で得られたトルク指令に加算してモータへのトルク指令としてモータを駆動する適応PI制御方法。

3. 上記各種パラメータは、制御対象のイナーシャ、動摩擦係数、重力外乱である請求の範囲第2項記載の適応PI制御方法。

4. 上記各種パラメータには、さらに、クーロン摩擦を

も含む請求の範囲第3項記載の適応P I制御方法。

5. 上記各種パラメータの重力外乱の推定は、制御対象の位置姿勢によって決まる外乱を決める重力外乱係数とそれ以外の一定重力外乱を推定し、該重力外乱を推定する請求の範囲第4項記載の適応P I制御方法。

6. 制御対象がロボットで、重力外乱は該重力外乱に影響するパラメータを重力の影響が一番大きいアームの角度に対する重力外乱係数、上記アーム以外のアームの角度によって決まる外乱、及び一定重力外乱に分けて推定し該重力外乱を推定する請求の範囲第3項または第4項記載の適応P I制御方法。

7. 速度ループに比例・積分ループを有するモータ制御系において、モータへのトルク指令 τ を、運動方程式に対応させることにより、次式、

$$\tau = K2 \cdot \text{Suf} + J* \cdot r' + A* \cdot y + Gr* \cdot \sin \theta + Fr* + Cf* + \tau 1$$

により決定し、上の式の右辺の $K2 \cdot \text{Suf}$ の項と $Fr*$ の項とを通常のP I制御における比例項及び積分項とした適応P I制御方法。

ただし、上式で、 $K2$ は比例定数； Suf は速度指令からモータ実速度 y とを差し引いた値である速度偏差； r' は速度指令の時間での微分値で、指令の加速度； $J*$ 、 $A*$ 、 $Gr*$ 、 $Fr*$ 、 $Cf*$ は、イナーシャ、動摩擦係数、重力外乱係数、一定重力外乱、クーロン摩擦のそれぞれの推定値； θ は重力外乱に一番大きく影響を

与えるロボットアームの回転角度であり、さらに、

上の式のイナーシャ推定値 J^* は、速度偏差 Suf に指令の加速度 r' とさらに適応速度を決める調整パラメータ α の逆数 ($1/\alpha$) を乗じたものを時間で積分したものであり、

動摩擦係数の推定値 A^* は、速度偏差 Suf にモータ実速度 y とさらに上記調整パラメータ β の逆数 ($1/\beta$) を乗じたものを時間で積分したものであり、

動力外乱係数の推定値 Gr^* は、速度偏差 Suf に上記アームの回転角度 θ に対する $\sin\theta$ にさらに上記調整パラメータ γ の逆数 ($1/\gamma$) を乗じたものを時間で積分したものであり、

一定重力外乱の推定値 Fr^* は、速度偏差 Suf に上記調整パラメータ δ の逆数 ($1/\delta$) を乗じたものを時間で積分したものであり、

クーロン摩擦の推定値 Cf^* は、速度偏差 Suf にモータの回転方向に応じての上記調整パラメータ ε の逆数 ($1/\varepsilon$) を乗じたものを時間で積分したものであり、

さらに、上記切り換え入力 τ_1 は、速度偏差 Suf がゼロまたは正であるときは、上記重力外乱に一番大きく影響を与えるロボットアーム以外のアームの回転角度等によって与えられる重力外乱の最大値とし、また、負であるときはこの重力外乱の最小値としたものである。

8. 上記上記切り換え入力 τ_1 の値を常にゼロとしたこ

とを特徴とする請求の範囲第7項記載の適応P I制御方法。

5

10

15

20

25

FIG. 1

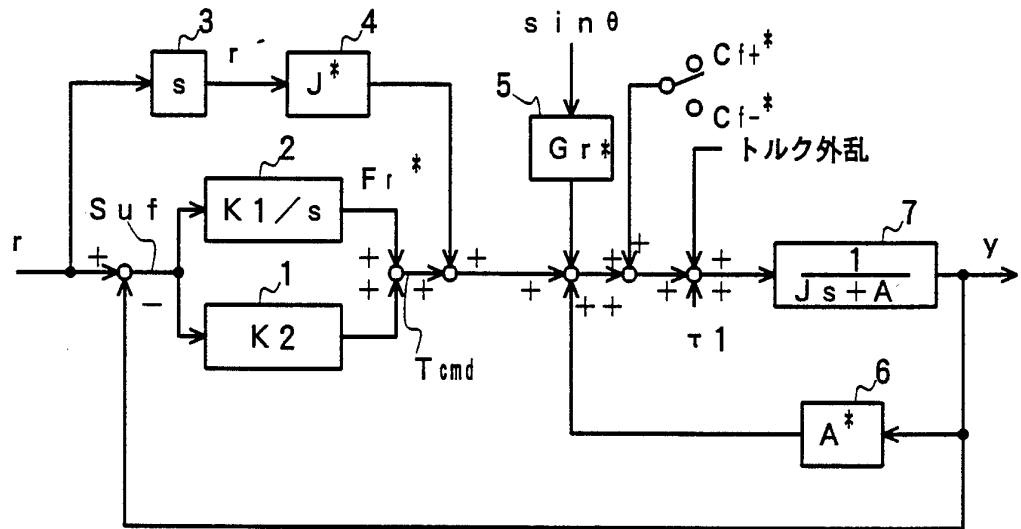


FIG. 2

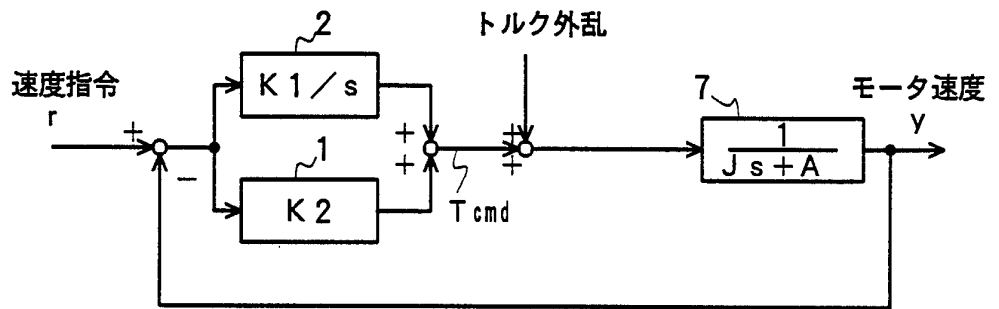


FIG. 3

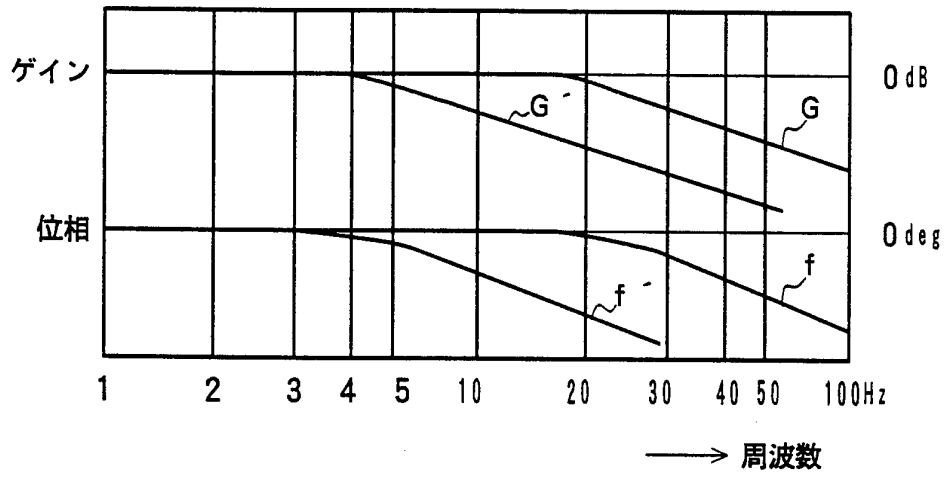


FIG. 4

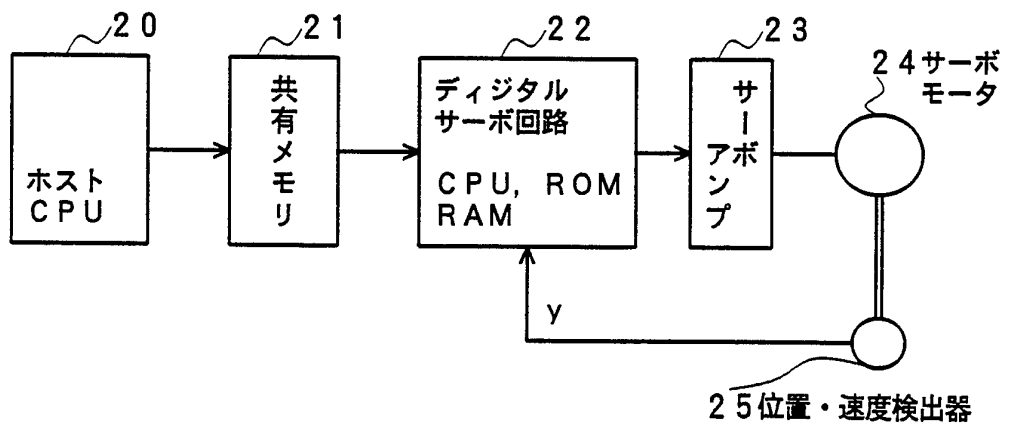
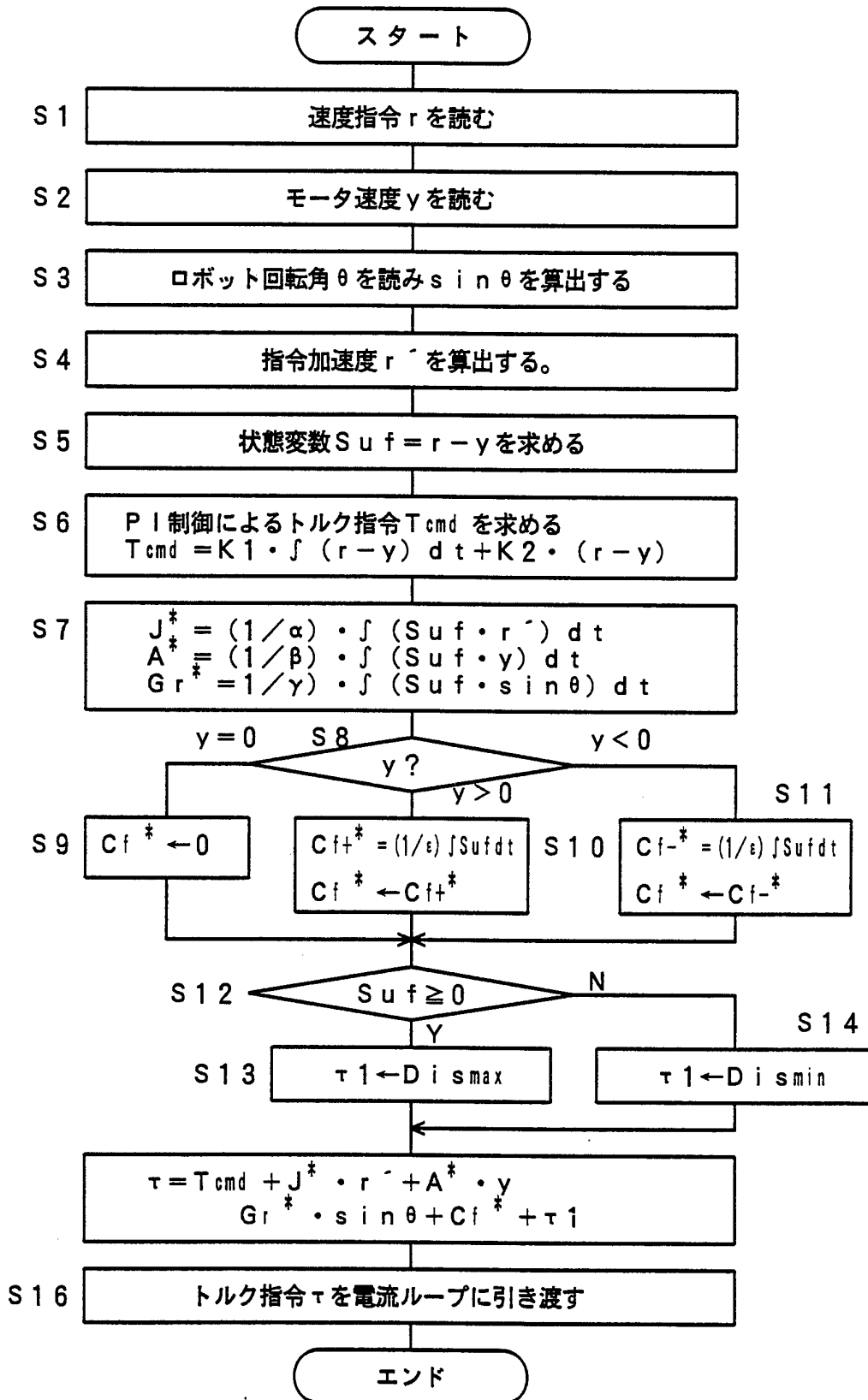


FIG. 5



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/JP93/00995

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER Int. Cl ⁵ H02P5/00 According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC		
B. FIELDS SEARCHED Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) Int. Cl ⁵ H02P5/00 Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched Jitsuyo Shinan Koho 1970 - 1992 Kokai Jitsuyo Shinan Koho 1971 - 1992 Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)		
C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	JP, A, 64-47290 (Toshiba Corp.), February 21, 1989 (21. 02. 89), (Family: none)	1-5
X	JP, A, 63-154085 (NKK Corp.), June 27, 1988 (27. 06. 88), (Family: none)	1-5
X	JP, A, 61-132088 (Yasukawa Electric Mfg. Co., Ltd.), June 19, 1986 (19. 06. 86), (Family: none)	1-5
Y	JP, A, 64-47290 (Toshiba Corp.), February 21, 1989 (21. 02. 89), (Family: none)	6-8
Y	JP, A, 63-154085 (NKK Corp.), June 27, 1988 (27. 06. 88), (Family: none)	6-8
<input checked="" type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of Box C. <input type="checkbox"/> See patent family annex.		
<ul style="list-style-type: none"> * Special categories of cited documents: "A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance "E" earlier document but published on or after the international filing date "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified) "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed 		<ul style="list-style-type: none"> "T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art "&" document member of the same patent family
Date of the actual completion of the international search October 5, 1993 (05. 10. 93)		Date of mailing of the international search report October 26, 1993 (26. 10. 93)
Name and mailing address of the ISA/ Japanese Patent Office Facsimile No.		Authorized officer Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP93/00995

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	JP, A, 61-132088 (Yasukawa Electric Mfg. Co., Ltd.), June 19, 1986 (19. 06. 86), (Family: none)	6-8
Y	JP, A, 2-30487 (Matsushita Electric Ind. Co., Ltd.), January 31, 1990 (31. 01. 90), (Family: none)	6-8
Y	JP, A, 63-287377 (Fujitsu Ltd.), November 24, 1988 (24. 11. 88), (Family: none)	6-8
Y	JP, A, 62-233081 (Fanuc Ltd.), October 13, 1987 (13. 10. 87), (Family: none)	6-8

A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC))

Int. Cl⁸ H02P5/00

B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料 (国際特許分類 (IPC))

Int. Cl⁸ H02P5/00

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報 1970-1992年

日本国公開実用新案公報 1971-1992年

国際調査で使用了電子データベース (データベースの名称、調査に使用した用語)

C. 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求の範囲の番号
X	JP, A, 64-47290 (株式会社 東芝) 21. 2月. 1989 (21. 02. 89) (ファミリーなし)	1-5
X	JP, A, 63-154085 (日本鋼管株式会社) 27. 6月. 1988 (27. 06. 88) (ファミリーなし)	1-5
X	JP, A, 61-132088 (株式会社 安川電機製作所) 19. 6月. 1986 (19. 06. 86) (ファミリーなし)	1-5

C欄の続きにも文献が列挙されている。

パテントファミリーに関する別紙を参照。

* 引用文献のカテゴリー

「A」 特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの

「E」 先行文献ではあるが、国際出願日以後に公表されたもの

「L」 優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日

若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献

(理由を付す)

「O」 口頭による開示、使用、展示等に言及する文献

「P」 国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願の日

の後に公表された文献

「T」 国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの

「X」 特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの

「Y」 特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの

「&」 同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日

05. 10. 93

国際調査報告の発送日

26.10.93

名称及びあて先

日本国特許庁 (ISA/JP)

郵便番号100

東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官 (権限のある職員)

小川 謙

5 H 7 3 1 5

電話番号 03-3581-1101 内線

3530

C (続き). 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求の範囲の番号
Y	JP, A, 64-47290 (株式会社 東芝) 21. 2月. 1989 (21. 02. 89) (ファミリーなし)	6-8
Y	JP, A, 63-154085 (日本鋼管株式会社) 27. 6月. 1988 (27. 06. 88) (ファミリーなし)	6-8
Y	JP, A, 61-132088 (株式会社 安川電機製作所) 19. 6月. 1986 (19. 06. 86) (ファミリーなし)	6-8
Y	JP, A, 2-30487 (松下電器産業株式会社) 31. 1月. 1990 (31. 01. 90) (ファミリーなし)	6-8
Y	JP, A, 63-287377 (富士通株式会社) 24. 11月. 1988 (24. 11. 88) (ファミリーなし)	6-8
Y	JP, A, 62-233081 (ファナック株式会社) 13. 10月. 1987 (13. 10. 87) (ファミリーなし)	6-8