

(19)日本国特許庁 (J P)

(12) 特 許 公 報 (B 2)

(11)特許番号

第2558599号

(45)発行日 平成8年(1996)11月27日

(24)登録日 平成8年(1996)9月5日

(51)Int.Cl. ⁶	識別記号	庁内整理番号	F I	技術表示箇所
B 2 5 J 13/08			B 2 5 J 13/08	Z
A 6 1 F 2/68			A 6 1 F 2/68	
B 2 5 J 19/02			B 2 5 J 19/02	
G 0 5 D 3/12			G 0 5 D 3/12	N
// G 0 5 B 19/42			G 0 5 B 19/42	H

請求項の数8(全 8 頁)

(21)出願番号	特願平5-171688	(73)特許権者	592179296 株式会社エイ・ティ・アール人間情報通信研究所 京都府相楽郡精華町大字乾谷小字三平谷5番地
(22)出願日	平成5年(1993)7月12日	(72)発明者	川人 光男 京都府相楽郡精華町大字乾谷小字三平谷5番地 株式会社エイ・ティ・アール人間情報通信研究所内
(65)公開番号	特開平7-24766	(72)発明者	小池 康晴 京都府相楽郡精華町大字乾谷小字三平谷5番地 株式会社エイ・ティ・アール人間情報通信研究所内
(43)公開日	平成7年(1995)1月27日	(74)代理人	弁理士 深見 久郎 (外2名)
		審査官	島田 信一
		(56)参考文献	特開 平5-111881 (J P, A)

(54)【発明の名称】 ロボット制御装置

1

(57)【特許請求の範囲】

【請求項1】 オペレータの複数の筋肉の活動に基づいてロボットを制御するロボット制御装置であって、前記複数の筋肉の活動に応じた筋電信号を検出する検出手段と、前記検出手段の各検出出力である前記検出された筋電信号を各筋肉が発生する張力に対応する擬似張力を表わす張力信号に変換し、その張力信号に基づいて前記オペレータの各関節トルク、手先の力、身体の加速度軌道、速度軌道および位置軌道という特徴量を推定する非線形ダイナミクスモデルと、前記非線形ダイナミクスモデルの出力である前記推定された特徴量に応じて、前記ロボットを制御する制御手段とを備えたロボット制御装置。

【請求項2】 前記検出手段は、前記筋肉の活動に応じ

2

た筋電信号を検出するために、前記オペレータの身体に装着される表面電極を含む、請求項1記載のロボット制御装置。

【請求項3】 前記制御手段は、前記推定された加速度軌道、速度軌道および位置軌道を目標軌道に変換する変換手段と、フィードフォワード制御またはフィードバック制御を用いて、前記オペレータとロボットとの動力学的構造および動特性が同じときには前記推定されたトルクにより前記ロボットを制御するトルク制御手段と、前記フィードフォワード制御またはフィードバック制御を用いて、前記オペレータとロボットとの動力学的構造のみが同じときには前記推定された加速度軌道、速度軌道および位置軌道により前記ロボットを制御する軌道制御手段とを含み、

前記オペレータとロボットの動力的構造が異なるときには前記変換手段によって変換された目標軌道を前記軌道制御手段に入力して前記ロボットを制御することを特徴とする、請求項 1 記載のロボット制御装置。

【請求項 4】 前記変換手段は、前記ロボットを制御するための目標軌道に対応した動作を前記オペレータが追従することで学習する第 1 の神経回路を含む、請求項 3 記載のロボット制御装置。

【請求項 5】 前記非線形ダイナミクスモデルは、第 2 の神経回路を含み、

前記第 2 の神経回路は、前記検出手段から入力される複数の筋肉の活動に応じた筋電信号をフィルタリングし、各筋肉が発生する張力に対応する擬似張力を表わす張力信号を出力する前段回路と、

前記前段回路から張力信号を受け、擬似張力、位置、速度からトルク、外界へ及ぼす力および加速度信号を推定する複数層からなる後段回路を含む、請求項 1 記載のロボット制御装置。

【請求項 6】 前記第 1 または第 2 の神経回路は、パラメータを決定するために所定の学習則を用いて学習することを特徴とする、請求項 4 または 5 記載のロボット制御装置。

【請求項 7】 前記第 1 または第 2 の神経回路は、パラメータを決定するために所定の非線形アルゴリズムを用いて学習することを特徴とする、請求項 4 または 5 記載のロボット制御装置。

【請求項 8】 前記第 2 の神経回路は、前記推定されたトルクを身体の力学を記述する非線形方程式に代入して数値積分を行なって軌道を推定するか、前記推定された加速度を巡回結合で数値積分して軌道を推定することを特徴とする、請求項 5 記載のロボット制御装置。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【産業上の利用分野】この発明はロボット制御装置に関し、たとえばロボットのオンラインティーチングと制御、ロボットの遠隔制御、オペレータの遠隔存在、通信システムとロボットとの遠隔共同作業において、オペレータが自分の身体を操るのと同様の安易さ巧みさでロボットの運動軌道計画、運動軌道制御および力制御をオンラインで行なうことができるようなロボット制御装置に関する。

【0002】

【従来の技術】従来、ロボットに使用された多関節型の産業用マニピュレータなどに対しての軌道計画は、人間のオペレータが工場の製造ラインでティーチングボックスを用いることによってオンラインで行なわれていた。ところがこのような軌道計画は、複雑な軌道が幾つもの小部分に分けられ、その小部分における代表点の位置を産業用マニピュレータなどに記憶させるという面

倒なものであった。そのため、この作業を行なうオペレータには、熟練した技術を必要とし、さらに、軌道計画を行なうことができるのは製造ラインの止まった夜間や祝祭日に限られるため、特定の熟練オペレータへの負担が大きくなっていった。

【0003】これに対し、オフラインでの軌道計画は、理論的には活発に研究されていたが、特に 3 次元空間に複雑な形状の障害物が複数配置されているような状況下では問題点があり実用化されていない。その問題点は、10 目的のタスクを行なうための軌道計算を行なうには画像入力のためのコストが非常に嵩むこと、さらに状況が複雑になるとともに軌道計算の時間が爆発的に増大することが挙げられる。

【0004】一方、ロボットの遠隔制御、オペレータの遠隔存在および通信システムとロボットとによる遠隔作業などにおいて、オペレータの運動軌道と力を計測する手段としては、オペレータに装着させるマスタアームやゴニオメータという機械計測装置が用いられてきた。しかし、これらの機械計測装置は、自由度が増せば体積および重量が嵩むことになり、オペレータの動作に大きな負担をかけてしまう。また、重量や慣性を補償するためのアクチュエータをつけた機械計測装置は、高価になるだけでなく、暴走時にはオペレータの身体に危害を加える極めて危険なものであり、一般には用いられていない。

【0005】したがって、上述したそれぞれの問題を解決するために筋電信号を用いてロボットの腕や手および義手・義足を制御することが試みられた。

【0006】まず、1948年にノーバートウィナーによって、筋電信号を用いる着想が発表され、それ以後基礎的研究や実用化が進められた。その段階での技術は、ロボットを 1 自由度で制御するオン・オフ制御や比例制御が目標とされていたため、多自由度のロボットの腕や手および義手・義足の軌道計画と制御は行なうことができなかった。

【0007】次に、多自由度のロボットの腕や手および義手・義足を筋電信号を用いて制御する装置は、特開昭 51-43888、特開昭 51-63595、特開昭 58-177647、特開昭 60-221270 号公報において示されているようにノーバートウィナーの発表以後も数多く提案されてきた。しかし、提案はされても、筋電信号をどのように情報処理してロボットの腕の手および義手、義足を制御するための信号を得るかについての具体的な提案はされていなかった。そのため、鈴木良次他（医用電子と生体工学、7 巻 1 号、47-48 頁、1969）が提案した多チャンネルの筋電信号をパーセプトロンで学習識別させ、推定された動作によって義手を制御することに基づいて、多層パーセプトロンを用いたものが特開平 2-298479 号公報で提案されている。

【0008】

【発明が解決しようとする課題】しかしながら、多層パーセプトロンを用いて筋電信号のパターン認識を行ない、それに基づいてロボットの腕や手および義手・義足を制御するには、以下に示すような問題が生じている。まず、人間と同様の動作をする必要のあるロボットや義手は、無限の動作パターンを識別することができるだけでなく、限られた動作パターンの識別しかできない。次に限られた動作パターンであってもロボットは、その動作パターンを正確に識別するのではなく、誤認識に伴う誤動作を生じる。次に、ロボットや義手に対して動作パターンを正確に認識させるためには、数十ミリ秒から数秒間の筋電信号パターンの時間平均やパワースペクトラムの計算が行なわれる必要があり、この方法では、たとえロボットや義手は正確に動作パターンを実行したとしても、1秒間に数回程度の動作の変化があるだけで、速くかつ滑らかな動作をロボットや義手に行なうことはできない。

【0009】それゆえに、この発明は、上記のような問題を解決し、ロボットに対してオンラインで速く滑らかでかつオペレータが要求するすべての動作を正確に実行させるための軌道計画と制御を行なうことができ、さらに、ロボットの遠隔制御、オペレータの遠隔存在、通信システムとロボットとによる遠隔共同作業において、オペレータの動作の運動軌道と力を計測する入力手段としても使え、操作性、安全性、利便性、価格がマスタームなどよりも優れた役割を果たすロボット制御装置を提供することである。

【0010】

【課題を解決するための手段】請求項1のロボット制御装置は、オペレータの複数の筋肉の活動に基づいてロボットを制御するロボット制御装置であって、複数の筋肉の活動に応じた信号を検出する検出手段と、検出手段の各検出出力を各筋肉が発生する張力に対応する擬似張力を表わす信号に変換し、その信号に基づいてオペレータの各関節トルク、手先の力、身体の加速度軌道、速度軌道および位置軌道という特徴量を推定する非線形ダイナミクスモデルと、非線形ダイナミクスモデルの出力である推定された特徴量に応じて、ロボットを制御する制御手段とを備えて構成される。

【0011】請求項2に係る発明では、請求項1の検出手段は、筋肉の活動に応じた信号を検出するために、オペレータの身体に装着される表面電極を含む。

【0012】請求項3の発明では、請求項1の制御手段は、推定された加速度軌道、速度軌道および位置軌道を目標軌道に変換する変換手段と、フィードフォワード制御またはフィードバック制御を用いて、オペレータとロボットとの動力学的構造および動特性が同じときには推定されたトルクによりロボットを制御するトルク制御手段と、フィードフォワード制御またはフィードバック制

御を用いてオペレータとロボットとの動力学的構造のみが同じときには推定された加速度軌道、速度軌道および位置軌道によりロボットを制御する軌道制御手段とを含み、オペレータとロボットの動力学的構造が異なるときには変換手段によって変換された目標軌道を目標軌道に変換手段に入力してロボットを制御することを特徴とする。

【0013】請求項4の発明では、請求項3の変換手段は、ロボットを制御するための目標軌道に対応した動作をオペレータが追従することで学習する第1の神経回路を含む。

【0014】請求項5の発明では、請求項1の非線形ダイナミクスモデルは、第2の神経回路を含み、その第2の神経回路は、検出手段から入力される複数の筋肉の活動に応じた信号をフィルタリングし、各筋肉が発生する張力に対応する擬似張力を表わす信号を出力する前段回路と、前段回路から信号を受け、擬似張力、位置、速度からトルク、外界へ及ぼす力および加速度信号を推定する複数層からなる後段回路を含む。

【0015】請求項6の発明では、請求項4の第1の神経回路または請求項5の第2の神経回路は、パラメータを決定するために所定の学習則を用いて学習する。

【0016】請求項7の発明では、請求項4の第1の神経回路または請求項5の第2の神経回路は、パラメータを決定するために所定の非線形アルゴリズムを用いて学習する。

【0017】請求項8の発明では、請求項5の第2の神経回路は、推定されたトルクを身体の力学を記述する非線形方程式に代入して数値積分を行なって軌道を推定するか、推定された加速度を巡回結合で数値積分して軌道を推定する。

【0018】

【作用】この発明に係るロボット制御装置は、オペレータの複数の筋肉の活動に応じた信号を検出手段によって検出し、その検出信号を各筋肉が発生する張力に対応する擬似張力を表わす信号に変換した後、非線形ダイナミクスモデルによってオペレータの各関節のトルク、手先の力、身体の加速度軌道、速度軌道および位置軌道という特徴量を推定し、推定された特徴量に応じてロボットを制御手段によって制御する。

【0019】

【実施例】図1は、この発明のロボット制御装置の概略ブロック図である。図1においてオペレータの人腕には表面電極1が装着され、人腕の筋肉の活動に応じて、表面電極1は筋電信号を検出する。検出された筋電信号は筋電信号増幅器2に与えられて増幅され、フィルタ3に与えられる。フィルタ3は、増幅された筋電信号をフィルタリングし、擬似張力を表わす信号に変換し、関節トルク推定回路4に与える。関節トルク推定回路4は関節トルクを推定し、オペレータの人腕に対して動力学的構造が同じロボット6を制御するためのトルク制御回路5

に関節トルクを表わす信号を出力する。トルク制御回路 5 は、ロボット 6 に目標トルクを表わす信号を出力することによって制御する。

【0020】一方、関節トルク推定回路 4 は、オペレータの人腕に対して動力学的構造が異なるロボット 10 を制御するために、人腕ダイナミクスモデル 7 に関節トルクを表わす信号を出力する。人腕ダイナミクスモデル 7 は、入力された関節トルクを表わす信号から軌道を推定し、ロボット 10 がオペレータの人腕と幾何学的構造が同じ場合には、推定した軌道を目標軌道としてその目標軌道を表わす信号を軌道制御回路 9 に出力し、ロボット 10 がオペレータの人腕と幾何学的構造が異なる場合には、推定された軌道を表わす信号を動力学変換回路 8 に出力する。動力学変換回路 8 は、入力された推定軌道を目標軌道に変換し、目標軌道を表わす信号を軌道制御回路 9 に出力する。軌道制御回路 9 はロボット 10 の幾何学的構造に応じて制御信号を出力してロボット 10 を制御する。

【0021】図 2 は、この発明の一実施例のロボット制御装置の動作を説明するためのフローチャートであり、以下図 2 を参照して図 1 で示したロボット制御装置の動作について説明する。

【0022】表面電極 1 を操作者（オペレータ）の身体に装着し、操作者が身体を動かしたり力を発生したりすると、筋電信号が筋電信号増幅器 2 に与えられて、増幅される。この増幅された筋電信号はフィルタ 3 に与えられ、擬似張力を表わす信号が関節トルク推定回路 4 に与えられる。関節トルク推定回路 4 はその擬似張力に基づいて、関節トルクを推定する。図 3 に示すようなフィルタ 3 と関節トルク推定回路 4 とを接続した 4 層パーセプトロン神経回路を用いて、フィルタ 3 と関節トルク推定回路 4 について詳細に説明する。

【0023】4 層パーセプトロン神経回路は、第 1 層 11、第 2 層 12、第 3 層 13 および第 4 層 14 とを含む。第 1 層 11 のニューロン 15 の出力は、過去から現在に至る筋電信号 $EMG_m(n) \dots EMG_m(n - N + 1)$ を表わし、第 2 層 12 のニューロン 16 のそれぞれに入力される。第 1 層 11 から第 2 層 12 までの変換によって上述のフィルタ 3 を実現しており、第 2 層 12 のニューロン 16 の出力は擬似張力を表わす。第 2 層 12 は、ニューロン 16 の他に出力が肩の関節角度 s_1 、肘の関節角度 e_1 、肩の関節角速度 s_2 および肘の関節角速度 e_2 を表わすニューロン 17, 18, 19 および 20 が設けられており、第 2 層 12 のニューロン 16, 17, 18, 19, 20 の出力は、第 3 層 13 のニューロン 21 のそれぞれに入力される。第 3 層 13 のニューロン 21 は、シグモイド関数による非線形活動関数を有しており、その出力は第 4 層 14 のニューロン 22 に入力される。第 2 層 12 から第 4 層 14 までの非線形変換によって上述の関節トルク推定回路 4 を実現してお

り、第 4 層 14 のニューロン 22 の出力は、擬似張力、関節角度および関節角速度から推定された関節トルクを表わす。

【0024】なお、第 2 層 12 から第 4 層 14 までの非線形変換は、筋肉の非線形な長さ張力曲線、短縮速度張力曲線および各筋肉が各関節に付着するモーメントアームがオペレータの姿勢変化に依存することによって生じる非線形効果を含む。

【0025】また、図 3 において、ニューロン間の結合を表わした各実線に対して 1 つの実数（結合荷重）が割り振られており、この結合荷重の設定には与えられた非線形変換に対して様々な神経回路モデルの学習アルゴリズムを用いることができるが、たとえば一般的な誤差逆伝播学習アルゴリズムを用いればよい。

【0026】次に以上の 4 層パーセプトロン神経回路を用いて図 4 に示すようなトルクを推定する方法について具体的に説明する。

【0027】運動中のオペレータから筋電図と肩肘の関節角度、角速度、角加速度を 200 Hz のサンプル信号でサンプリングして同時に計測する。オペレータの腕の 3 次元形状をレーザ計測装置で測定し、それに基づいてオペレータの上腕、前腕の長さ、質量、重心位置、慣性モーメントを比重 1 として計算する。これらの物理的パラメータを用いて肩および肘の関節の運動を記述する運動方程式（ラグランジュ方程式）を書き下す。この方程式は人腕の順方向ダイナミクスモデルを提供しているため、この方程式に計測した関節角度、角速度、角加速度が代入されることによって、運動中のオペレータの肩と肘で発生しているトルクの時間経過を 200 Hz のサンプリング信号でサンプリングして推定することができる。

【0028】この場合の 4 層パーセプトロンの結合荷重の誤差逆伝播学習において、第 4 層の出力の教師信号は推定されたトルクを、第 1 層の入力の教師信号は計測された筋電信号を、第 2 層の入力の教師信号は計測された関節角度、角速度を用いた。図 4 は、学習した神経回路を用いて、訓練に用いていないトルクの時間波形を再構成した結果を示し、図 4 (a) は肩のトルクの時間波形、図 4 (b) は肘のトルクの時間波形を示す。破線が実際にオペレータに発生したトルク、実線が神経回路で推定したトルクを示しており、全テストデータに対して決定数 0.9 という高い推定精度が得られた。

【0029】次に図 2 に戻り、フローチャートの説明を続ける。ロボットのダイナミクスは操作者の身体と同じか否かが判断され、同じ場合には関節トルク推定回路 4 の出力である推定された関節トルクは、トルク制御回路 5 に入力される。トルク制御回路 5 はロボットの各関節のモータごとに設けられており、さらにロボット 6 に対して、トルクフィードバックを行なうことにより、オペレータは意図した運動をロボットに高時間分解能で行な

わすことができる。なお、この制御は自由運動のみならず束縛運動中の制御においても同様であり、ロボット 6 を制御するためにフィードフォワードを用いてもよい。

【0030】一方、ロボットのダイナミクスが操作者のダイナミクスと異なる場合には、関節トルク推定回路 4 は人腕ダイナミクスモデル 7 に推定された関節トルクを出力する。人腕ダイナミクスモデル 7 は、図 5 に示すように推定されたトルクを身体の力学を記述する非線形方程式に代入して数値積分を行って肩肘の関節角加速の軌道を推定する。なお、図 5 において、特に図 5 (a) および (c) は肩および肘の推定されたトルクの結果を示した図であり、図 5 (b) および (d) は肩および肘の推定された関節角速度の結果を示した図である。またさらに、人腕ダイナミクスモデル 7 は、推定された関節角加速の軌道を巡回結合で数値積分して肩肘の関節角速度および角度の軌道も推定する。

【0031】求められた軌道を用いてロボット 10 を制御するが、ロボット 10 は、操作者の身体ダイナミクスが異なるだけか、それともさらに幾何学的構造が同じか否かが問題とされる。ロボット 10 の幾何学的構造が操作者の身体と同じ場合には、人腕ダイナミクスモデル 7 の出力は、推定された軌道をそのまま目標軌道として軌道制御回路 9 に入力される。軌道制御回路 9 は、図 1 に示すようにフィードバックを用いてロボット 10 を制御してもよいが、目標軌道が加速度頂まで計算されているので計算トルク法とフィードバック法を組合せて制御してもよい。

【0032】一方、ロボットの幾何学的構造が操作者の身体と異なる場合には、推定軌道を目標軌道としてそのまま使えないため、人腕ダイナミクスモデル 7 は動力学変換回路 8 に推定軌道を入力する。動力学変換回路 8 は、ロボット 10 の手先位置と姿勢により生じる 6 自由度のみを制御する場合には、人腕関節角度から人腕手先の位置と姿勢を計測し、それを所望の並行移動、拡大、回転してロボット手先位置と姿勢の目標値を決定し、目標軌道を記述して、ロボットの関節角度の目標軌道に変換する。このように変換されたロボットの関節角度の目標軌道を動力学変換回路 8 が軌道制御回路 9 に入力し、軌道制御回路 9 はロボット 10 に制御信号を入力して制御する。

【0033】ただし、ロボットに動力学的な冗長性がない場合には、動力学変換回路 8 で行なわれる変換は、人腕の順キネマティクス方程式、人腕手先からロボットの手先への座標変換、ロボットの逆キネマティクス方程式に従って数式とアルゴリズムによって厳密に行なえる。しかし、一般には人腕手先とロボット手先の位置計測と座標変換のキャリブレーションが必要で時間がかかるため、動力学変換回路 8 においても神経回路モデルを用いて、キャリブレーションを実時間の学習で行なう。この方法は、ロボットの作業空間において、ロボットを制御

するために必要な目標軌道をオペレータに掲示し、その動きをオペレータに追従させることによって、動力学変換回路 8 として用いた神経回路は学習することができる。さらに動力学変換回路 8 として用いた神経回路が不完全なものであっても、ロボットが実際に動作することによって実現した軌道と動力学変換回路 8 として用いた神経回路で変換された目標軌道との誤差を用いることにより、動力学変換回路 8 として用いた神経回路は学習アルゴリズムによって修正される。

10 【0034】

【発明の効果】以上のように、この発明によればオペレータの複数の筋肉の活動に応じた信号を検出し、その検出信号を各筋肉が発生する張力に対応する擬似張力を表わす信号に変換し、その信号に基づき非線形ダイナミクスモデルによってオペレータの各関節トルク、手先の力、身体の加速度軌道、速度軌道および位置軌道という特徴量を推定し、推定された特徴量に応じて、ロボットを制御するようにしたので、オペレータの動力学的構造または幾何学的構造と異なるロボットであってもオペレータは実時間で自分自身の身体を操るのと同じように自然に制御することができる。さらにオペレータの動作の運動軌道や力を計測する手段としても操作性、安全性、利便性、価格などの点で従来のマスタームと同等の機械計測装置に比べて遙かに優れた装置を実現できる。

【図面の簡単な説明】

【図 1】この発明の一実施例のロボット制御装置の概略ブロック図である。

【図 2】図 1 に示したロボット制御装置の動作を説明するためのフローチャートである。

30 【図 3】筋電信号と角度、角速度からトルクを推定する基本的な 4 層構造パーセプトロンを示す図である。

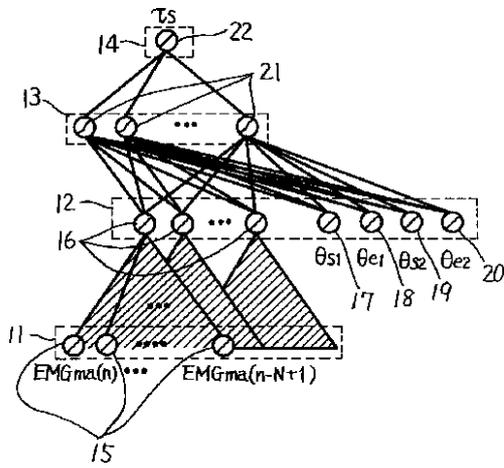
【図 4】図 3 に示した 4 層構造パーセプトロンによって推定されたトルクの軌道を示した図である。

【図 5】推定されたトルクの軌道から角加速度軌道を推定した結果のグラフである。

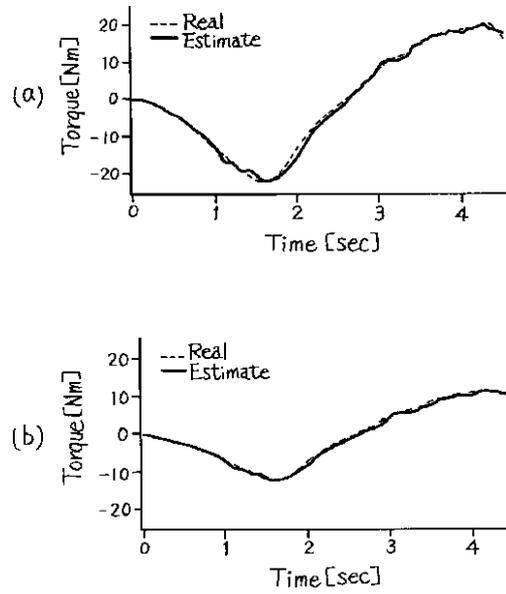
【符号の説明】

- 1 表面電極
- 2 筋電信号増幅器
- 3 フィルタ
- 40 4 関節トルク推定回路
- 5 トルク制御回路
- 6 , 10 ロボット
- 7 人腕ダイナミクスモデル
- 8 動力学変換回路
- 9 軌道制御回路
- 11 第 1 層
- 12 第 2 層
- 13 第 3 層
- 14 第 4 層
- 50 15 , 16 , 17 , 18 , 19 , 20 , 21 , 22 二

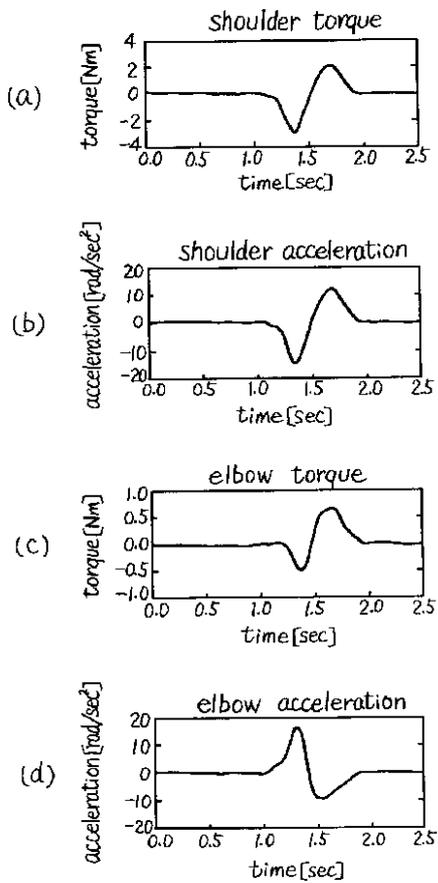
【図3】



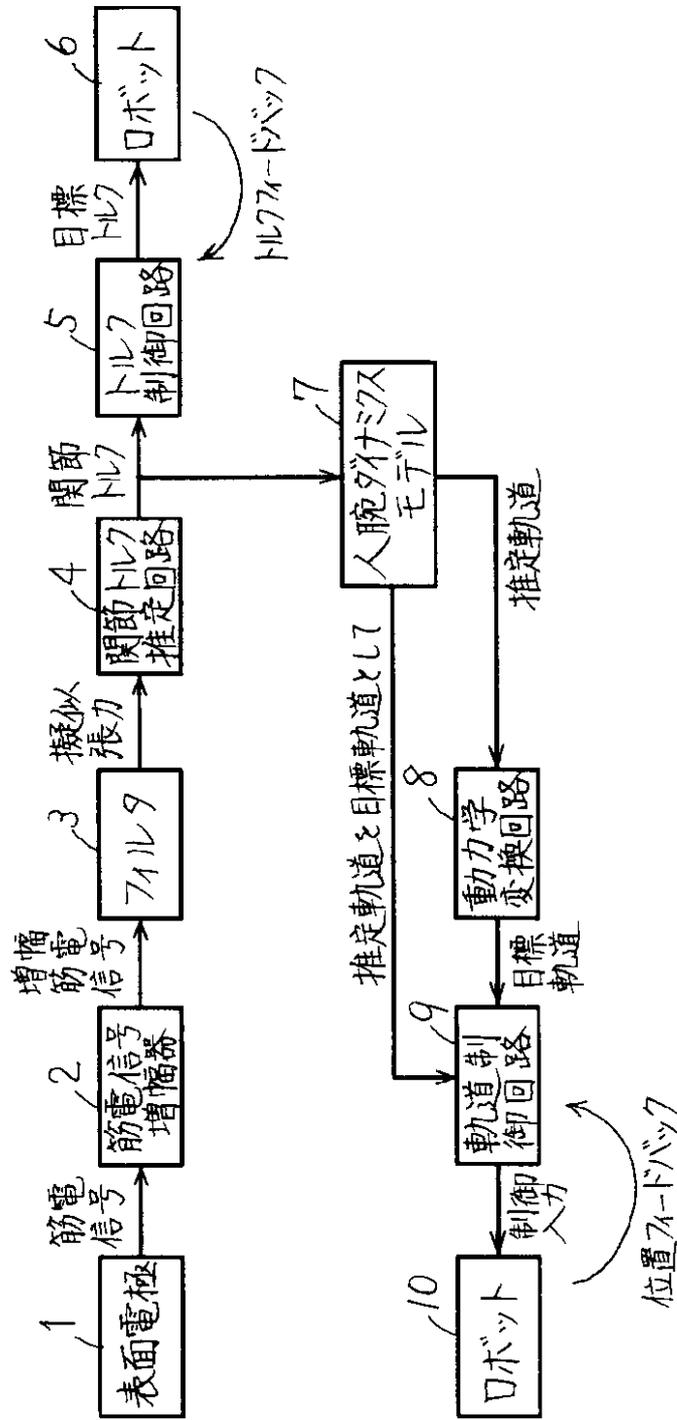
【図4】



【図5】



【図1】



【図2】

