

(19)日本国特許庁 (J P)

(12) 特 許 公 報 (B 2)

(11)特許番号

第2542336号

(45)発行日 平成8年(1996)10月9日

(24)登録日 平成8年(1996)7月25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 3/00			B 2 5 J 3/00	Z
			13/08	Z
G 0 5 B 13/02		7531-3H	G 0 5 B 13/02	L
		7531-3H	13/04	
G 0 5 D 15/01			G 0 5 D 15/01	

請求項の数10(全 10 頁)

(21)出願番号 特願平6-17206

(22)出願日 平成6年(1994)2月14日

(65)公開番号 特開平7-223186

(43)公開日 平成7年(1995)8月22日

特許法第30条第1項適用申請有り 第8回生体、生理工学シンポジウム論文集(1993年11月16日配布)主催、計測自動制御学会

(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

(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

(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

(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】 オペレータの身体部位における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信号を検出する検出手段と、前記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前記オペレータの身体部位における関節の位置状態を推定する非線形身体モデルと、前記非線形身体モデルで推定された前記関節の位置状態に基づい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】 前記非線形身体モデルは、前記オペレータの身体部位における関節の位置状態を所定の基準から

2

の回転角度である関節角度で表現して推定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3】 前記制御手段は、前記オペレータの身体部位の運動が釣合いの取れた平衡状態の連続的な変化と見なせることに応じて、前記非線形身体モデルで推定された前記関節角度を前記ロボットに目標軌道として与えて制御することを特徴とする、請求項2記載のロボット制御装置。

【請求項4】 前記制御手段は、前記オペレータの身体部位の運動が釣合いの取れた平衡状態の連続的な変化と見なせないことに応じて、前記ロボットのダイナミクスに対応する係数を与えて前記非線形身体モデルで推定された前記関節角度を目標軌道とし、その目標軌道で前記ロボットを制御することを特徴とする、請求項2記載のロボット制御装置。

【請求項 5】 前記非線形身体モデルは神経回路を含み、前記神経回路は、前記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に変換する前段回路と、前記前段回路からの信号から前記オペレータの身体部位における関節の位置状態を推定する複数層からなる後段回路とを含む、請求項 1 記載のロボット制御装置。

【請求項 6】 前記神経回路は、前記複数の筋肉の活動に応じた信号と前記関節の位置状態との間で成立する非線形写像のパラメータを決定するために、所定の非線形最適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 5 記載のロボット制御装置。

【請求項 7】 前記神経回路は、前記複数の筋肉の活動に応じた信号と前記関節の位置状態との間で成立する非線形写像の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 5 記載のロボット制御装置。

【請求項 8】 前記前段回路は、2つの層から形成されるフィルタを含む、請求項 5 記載のロボット制御装置。

【請求項 9】 前記後段回路は前記オペレータの腕の関節の位置状態を推定し、前記腕の関節の位置状態は、前記オペレータの腕の釣合いの取れた平衡状態を含み、かつ所定の基準からの回転角度である関節角度で表されることを特徴とする、請求項 5 記載のロボット制御装置。

【請求項 10】 前記後段回路は前記オペレータの腕の関節の位置状態を推定し、前記腕の関節の位置状態は、重力の影響も考慮された状態を含み、かつ所定の基準からの回転角度である関節角度で表され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、特に、オペレータの身体部位における複数の筋肉の活動に応じて検出される筋電信号によってロボットまたは計算機内での仮想現実世界のロボット（仮想身体）の制御を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、複数の軌道がいく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が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、目的のタスクを行なうための軌道計画を行なうには画像入力のためのコストが非常にかさむこと、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継続する手段としては、オペレータに装着させるマスタ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、自由度が増せば堆積および重量がかさむことになり、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付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手や、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や手および義手・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などは、無限の動作パターンを識別することができるわけではない。すなわち、限られた動作パターンの識別しか行なわれない。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わけではなく、誤認識に伴う誤動作を生じる。次に、

10 ロボットや義手など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る。したがって、この方法では、たとえロボットや義手などが正確に運動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わすことはできない。

【0009】ところで、発明者は、特願平5-171688号で提案しているように、筋電信号から水平面内における等尺性収縮における関節トルクおよび運動軌道を推定することで、ロボットを制御するロボット制御装置を提案している。しかし、たとえば人の腕の自由度は、肩3自由度、肘1自由度、手首3自由度併わせて7自由度あるといわれているにもかかわらず、平面内の2自由度しか考慮に入れられたなかった。そのため、腕の運動自体が平面内に拘束されており、それに伴うロボットの制御も拘束されていた。

【0010】ゆえに、本発明は、オペレータが多自由度の運動を行なったことによる筋肉の活動に応じた信号を検出し、その信号からオペレータの関節状態を推定して目標軌道としてロボットに与えることにより、ロボットを制御することができるようなロボット制御装置を提供することである。

【0011】さらに、本発明においては、ロボットに対して3次元空間内の運動・姿勢制御を行なうために、重力の影響（重力補償）をも考慮に入れたロボット制御装置を提供することである。

【0012】
【課題を解決するための手段】請求項1の発明に係るロボット制御装置は、オペレータの身体部位における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身体部位における関節の位置状態を推定する非線形身体モデルと、非線形身体モデルで推定された関節の位置状態に基づいてロボットを制御する制御手段とを備えている。

【0013】請求項2では、請求項1の非線形身体モ

ルは、オペレータの身体部位における関節の位置状態を所定の基準からの回転角度である関節角度で表現して推定する。

【0014】請求項3では、請求項2の制御手段は、オペレータの身体部位の運動が釣合いの取れた平衡状態の連続的な変化と見なせることに応じて、非線形身体モデルで推定された関節角度をロボットに目標軌道として与えて制御する。

10 【0015】請求項4では、請求項2の制御手段は、オペレータの身体部位の運動が釣合いの取れた平衡状態の連続的な変化と見なせないことに応じて、ロボットのダイナミクスに対応する係数を与えて非線形身体モデルで推定された関節角度を目標軌道とし、その目標軌道でロボットを制御することを特徴としている。

【0016】請求項5では、請求項1の非線形身体モデルは神経回路を含み、神経回路は、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に変換する前段回路と、前段回路からの信号からオペレータの身体部位における関節の位置状態を推定する複数層からなる後段回路とを含んでいる。

【0017】請求項6では、請求項5の神経回路は、複数の筋肉の活動に応じた信号と関節の位置状態との間で成立する非線形写像のパラメータを決定するために、所定の非線形最適アルゴリズムを用いて学習する。

【0018】請求項7では、請求項5の神経回路は、複数の筋肉の活動に応じた信号と関節の位置状態との間で成立する非線形写像の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。

30 【0019】請求項8では、請求項5の前段回路は、2つの層から形成されるフィルタを含んでいる。

【0020】請求項9では、請求項5の後段回路はオペレータの腕の関節の位置状態を推定し、腕の関節の位置状態は、オペレータの腕の釣合いの取れた平衡状態を含み、かつ所定の基準からの回転角度である関節角度で表される。

【0021】請求項10では、請求項5の後段回路はオペレータの腕の関節の位置状態を推定し、腕の関節の位置状態は、重力の影響も考慮された状態を含み、かつ所定の基準からの回転角度である関節角度で表される。

【0022】
【作用】請求項1の発明に係るロボット制御装置は、オペレータの身体部位における複数の筋肉の活動に応じた信号を検出し、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に変換し、その信号に基づいてオペレータの身体部位における関節の位置状態を実時間で推定し、その実時間で推定された関節の位置状態に基づいてロボットを制御できる。

50 【0023】請求項2の発明に係るロボット制御装置は、オペレータの身体部位における関節の位置状態を所

定の基準からの回転角度である関節角度で表現して推定し、その関節角度という特徴量に基づいてロボットを制御できる。

【0024】請求項3の発明に係るロボット制御装置は、オペレータの身体部位の運動が釣合いの取れた平衡状態の連続的な変化と見なせることに応じて、推定される関節角度をロボットに目標軌道として与えて精度の高い制御を行なうことができる。

【0025】請求項4の発明に係るロボット制御装置は、オペレータの身体部位の運動が釣合いの取れた平衡状態の連続的な変化と見なせないとしても、推定された関節角度にロボットのダイナミクスに対応する係数を与えて目標軌道とし、その目標軌道をロボットに与えて制御できる。

【0026】請求項5の発明に係るロボット制御装置は、オペレータの身体部位における関節の位置状態を推定するために好ましい一例として神経を回路を用いて、オペレータの身体部位における関節の位置状態を推定してロボットを制御できる。

【0027】請求項6の発明に係るロボット制御装置は、神経回路に非線形最適アルゴリズムを用いて学習させることにより、神経回路が推定するオペレータの身体部位における関節の位置状態の推定誤差を極力抑えることができる。

【0028】請求項7の発明に係るロボット制御装置は、神経回路に所定の学習則を用いて学習させることにより、オペレータの身体部位における関節の位置状態の推定誤差を極力抑えることができる。

【0029】請求項8の発明に係るロボット制御装置は、神経回路の前段回路として2つの層から形成されるフィルタを用いることにより、オペレータの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発生できる。

【0030】請求項9の発明に係るロボット制御装置は、神経回路の後段回路がオペレータ腕の釣合いの取れた平衡状態における関節の位置状態を関節角度で表わすことにより、ロボットを制御できる。

【0031】請求項10の発明に係るロボット制御装置は、神経回路の後段回路がオペレータの腕の関節の位置状態を重力の影響も考慮された関節角度で推定して、ロボットを制御できる。

【0032】

$$\tau_m \uparrow (u \uparrow, \theta \uparrow) + \tau_g \uparrow (\theta \uparrow) = 0$$

$$-\tau_m \uparrow (u \uparrow, \theta \uparrow) = \tau_g \uparrow (\theta \uparrow) = g \cdot h(\theta \uparrow) \quad \dots(1)$$

【0036】図1は、この発明の一実施例によるロボット制御装置を示すための概略ブロック図である。

【0037】図1を参照して、ロボット制御装置5は、人腕1に取付けられる表面電極7と、筋電信号を増幅する筋電信号増幅部9と、増幅筋電信号から関節角度を推

*【実施例】まず、実施例を説明する前に、筋電信号を用いた姿勢制御のモデルについて説明する。3次元空間内でオペレータが身体部位の1つである腕をある姿勢で固定しているとする。このとき、外力がなければ重力による力だけが腕にかかっている。この関係を関節角、各筋肉への運動指令u（以下、ベクトルを付けて表示する。）をベクトルで表現すると、第(1)式に示されるような関係が得られる。ここで、第(1)式におけるτ_mは筋肉により関節に発生するトルク、τ_gは重力による各関節にかかるトルク、gは重力加速度である。各筋肉への運動指令uを与えたときの第(1)式の解となる関節角θが求められれば、釣合い姿勢が推定される。

【0033】トルクτ_mは、その関節に関する多くの筋肉の発生する張力とモーメントアームによって決まる。モーメントアームとは、関節の回転軸と筋肉の作用線との距離である。運動指令と筋張力の関係の非線形性、長さ-張力曲線やモーメントアームの関節角度に依存する非線形性などのため、トルクτ_mと張力およびモーメントアームとの関係は、強い非線形性を示す。また、hは重力により各関節にどれだけのトルクがかかるかを定める関数で、キネマティックな関係により求められ、この関数も非線形関数である。このような非線形性から、第(1)式の解として釣合い位置である関節角θが解析的に解かれることはない。ところが、筋肉はばねのような性質を持つとも考えられるので、重力とばねの位置エネルギーが最小となる関節角θは唯一であるため、uと関節角θは、写像として表されると考えられる。

【0034】また、一定姿勢を保っているときでも、それぞれの筋張力は時間的に変化している場合があるので、筋電信号を時間的に処理しなければならない。さらに、同時活性化を起こして筋電信号を変化させることで筋張力が変化したとしても、関節トルクが変化しなければ同じ姿勢を取る。したがって、その場合の写像は、多対1の関係となり、非線形写像となる。そこで、オペレータの身体部位の筋電信号から関節トルクが生成され、釣合いの位置である関節角θが決定されることに基づく、ロボット制御装置について説明する。

【0035】

【数1】

定する非線形身体モデル11と、ロボット3に目標軌道を与えて制御する制御部17とを含む。

【0038】表面電極7は、オペレータの筋肉の活動に応じた信号、たとえば筋電信号を検出する検出手段の一例であり、オペレータの身体部位の1つである人腕1に

装着される。検出された筋電信号は筋電信号増幅部 9 で増幅され、非線形身体モデル 1 1 に与えられる。非線形身体モデル 1 1 は、時間フィルタ 1 3 と、平衡位置推定部 1 5 とを含む。そのため、時間フィルタ 1 3 が増幅筋電信号をフィルタリングし、人腕 1 の張力に対応する擬似張力を表わす信号に変換して平衡位置推定部 1 5 に与える。平衡位置推定部 1 5 は、たとえば非線形の神経回路が用いられ、擬似張力を表わす信号に基づいて人腕 1 が平衡状態に保たれたときの関節角度を推定し、制御部 1 7 に与える。制御部 1 7 は、推定された関節角度を目標軌道としてロボット 3 に与えてたとえばフィードバック制御を行なう。

【0039】図 2 は、この発明の一実施例による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、図 3 は、図 2 のステップ (図面では 5 で表わす 5 をより細かく示したフローチャートである。以下、図 2 および図 3 を参照して、図 1 に示したロボット制御装置の動作について説明する。

【0040】まず、ステップ 1 からステップ 5 について説明にする。表面電極 7 がオペレータの身体部位として人腕 1 に装着され、オペレータ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部 9 に与えられて増幅される。この増幅された増幅筋電信号は時間フィルタ 1 3 に与えられ、擬似張力を表わす信号が平衡位置推定部 1 5 に与えられる。次に、ステップ 5 1 からステップ 5 4 において、平衡位置推定部 1 5 では、与えられた擬似張力から長さ - 張力曲線を用いて張力を求める。求められた張力とモーメントアームとから関節トルクが求められる。人腕 1 に対しての重力補償が考慮された釣合いの取れた平衡状態での関節角度が推定される。推定された関節角度は制御部 1 7 に与えられ、ステップ 6 において、制御部 1 7 が推定された関節角度を目標軌道としてロボット 3 に与えて制御する。

【0041】次に、時間フィルタ 1 3 が行なう動作において必要とされる筋電信号と擬似張力との関係について説明する。表面筋電信号は、膜の興奮電位が時間的、空間的に重畳されている信号である。時間フィルタ 1 3 の一例であるローパスフィルタを通った出力信号は 運動*

$$T'(t) = \sum_{j=1}^n h_j \cdot EMG(t-j+1) \quad \dots(2)$$

$$\tau_m \uparrow = \sum_i^k (\alpha_i \uparrow (\theta \uparrow)^t T_i(\theta \uparrow, \theta \uparrow, T_i'))$$

ただし $\tau_m \uparrow = (\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n)^t$
 $\theta \uparrow = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n)^t$
 $\alpha_i \uparrow (\theta \uparrow) = (\alpha_{i1}(\theta), \alpha_{i2}(\theta), \dots, \alpha_{in}(\theta))^t$ } $\dots(3)$

【0045】図 4 は、関節トルクと釣合い位置の関係を説明するための図である。以下、釣合いの位置は、運動指令が変化しても主動筋、拮抗筋の発生するトルクの差

* ニューロンの発火頻度を反映していると期待される。また、この信号はかなり真の張力に近いと考えられるので、擬似張力と呼ばれる。ローパスフィルタは 2 次系で十分なことが知られており、入力を EMG とし、出力を T として FIR フィルタ実現されると、第 (2) 式に示す関係が得られる。ここで、EMG は筋電信号を表わし、T は擬似張力を表わす。

【0042】次に、運動指令と筋張力との関係について説明する。筋肉の発生する張力と運動指令との間には、以下のように非線形な性質がある。筋肉の発生する張力は同じ運動指令であっても筋長が長くなると増加する。この変化のしかたは非線形であり、長さ - 張力曲線と呼ばれている。また、同じ運動指令であっても、筋長の短縮速度が大きくなると張力は減少する。この変化のしかたも非線形であり、短縮速度 - 張力曲線と呼ばれている。図 1 に示すロボット制御装置においては、姿勢制御中の平衡状態の関節角度が推定されるため、短縮速度 - 張力曲線に関しては考慮に入れられる必要がない。

【0043】次に、張力と関節トルクとの関係について説明する。関節トルクは、張力とモーメントアームの積によって決まる。前述したようにモーメントアームは、関節の回転軸と筋肉の作用線との距離である。関節を曲げ伸ばしすると、筋肉は皮膚や骨によって曲げられるため、この距離は一定でなく、トルクと張力関係が関節角度に非線形に依存する。すなわち、関節トルクは、伸筋と屈筋の発生するトルクの差によって生じ、張力とモーメントアームに依存して決定される。これらの関係を第 (3) 式に示すように定式化する。ここで、 τ_j 、 θ_j () は、それぞれ j 番目の関節トルク、関節角度、i 番目の筋肉のモーメントアーム (単関節筋なら関与しない関節については 0)、 α_i は i 番目の筋肉の筋張力、 α_{it} は i 番目の筋肉の擬似張力を表わす。右上つき添字 t は転置を意味する。ただし、関節は n 個 (1 j n)、筋肉は k 個 (1 i k) であるとする。

【0044】

【数 2】

が同じであれば変わらないことについて、図 4 を用いて 1 自由度でそれぞれ 1 つの伸筋と屈筋について説明する。

【0046】図4において、横軸は関節角度を示し、縦軸は筋肉トルクを示す。 τ_f と τ_e のそれぞれは、伸筋、屈筋のトルクを示し、 u_f と u_e のそれぞれは、屈筋と伸筋への運動指令を示す。屈筋では、関節角度が大きくなると筋肉の長さが減少するため、右上がりのカーブになっている。逆に、伸筋では、関節角度が大きくなると筋肉の長さが増加するため、右上がりのカーブになっている。また、運動指令が u_e から u_f へ変化するように増加すると、これらの傾きは大きくなり、より大きな力が発生される。

【0047】すなわち、実線の τ_f および実線の τ_e で示されるようにある関節角度で腕が釣合っているとす。このとき、重力を補償するだけの関節トルク τ_g が実線の矢印で示されるように生じている。この状態から、運動指令を変化させる ($u_e \rightarrow u_f$, $u_f \rightarrow u_e$) ことにより屈筋および伸筋のそれぞれの張力が点線で示されるように増加させたとする。釣合いの位置である関節角度は変わらないので、重力を補償する関節トルク τ_g の大きさは、点線の矢印で示されるように実線の矢印と変わらない。このように、トルクの差が等しい屈筋と伸筋の張力の組み合わせならば、同じ釣合いの位置になる。そして、トルクの差が等しくても、それぞれの筋肉の発生する張力が大きければ、それだけステイフネスが高くなっている。

【0048】図5は、人腕の肩から肘までの自由度を説明するための図である。肩から肘までの自由度は4であるため、図5に示すリンク18, 19, 20, 21が設けられている。リンク18, 19, 20, 21は、1自由度の回転関節を表わし、各関節の側に関節の回転軸を白い矢印で示している。また、回転角が0度の始点を黒い矢印で示し、この位置から右ねじの方向に正の回転方向をとる。

$$\begin{aligned} \tau_{g1} &= g\{M_1 S_1 \sin \theta_1 \cos \theta_2 + M_2(L_1 \sin \theta_1 \cos \theta_2 + S_2 \sin \theta_1 \cos \theta_2 \cos \theta_4 \\ &\quad - S_2 \sin \theta_1 \sin \theta_2 \cos \theta_3 \sin \theta_4 + S_2 \cos \theta_1 \sin \theta_3 \sin \theta_4)\} \\ \tau_{g2} &= g\{M_1 S_1 \cos \theta_1 \sin \theta_2 + M_2(L_1 \cos \theta_1 \sin \theta_2 \\ &\quad + S_2 \cos \theta_1 \sin \theta_2 \cos \theta_4 + S_2 \cos \theta_1 \cos \theta_2 \cos \theta_3 \sin \theta_4)\} \\ \tau_{g3} &= g\{M_2(S_2 \sin \theta_1 \cos \theta_3 \sin \theta_4 - S_2 \cos \theta_1 \sin \theta_2 \sin \theta_3 \sin \theta_4)\} \\ \tau_{g4} &= g\{M_2(S_2 \cos \theta_1 \sin \theta_2 \cos \theta_3 \cos \theta_4 \\ &\quad + S_2 \sin \theta_1 \sin \theta_3 \cos \theta_4 + S_2 \cos \theta_1 \cos \theta_2 \sin \theta_4)\} \end{aligned}$$

…(4)

【0053】図6は、図1の非線形身体モデルの一例としての神経回路モデルを示した図である。

【0054】図6を参照して、神経回路は、4層のネットワーク22を形成し、第1層25と、第2層27と、第3層29と、第4層31とを含む。第1層25から第2層27までで、筋電信号から擬似張力を計算するFIRフィルタ(線形変換回路)23が形成され、第2層から第4層31までで非線形変換回路24が形成されてい

*【0049】肩の関節は、多軸性の関節として次のような運動が可能である。第1として、前後軸を中心とする上腕の側方への挙上(外転)と挙上した上腕を体幹に引き付ける運動(内転)(θ_1)である。第2は、垂直軸を中心とした上腕を外側に回す運動および内側に回す運動(θ_2)である。第3は、上腕の前方への挙上(屈曲)と後方への挙上(伸転)(θ_2)である。第4は、上腕を軸とした上腕を外側にねじる運動(外旋)および内側にねじる運動(内旋)(θ_3)である。第2および第3は、機構的には同じ動作であるので、1つの自由度であるとする。肩の関節は、3自由度になる。これらの3つの自由度のうち、第1の自由度をリンク18が回転角 θ_1 で表わし、第2の自由度をリンク19が回転角 θ_2 で表わし、第3の自由度をリンク19が回転角 θ_3 で表わしている。

【0050】また、肘関節は1自由度の運動を行なうことができ、それは、肘関節の屈曲と伸転で、肘を曲げたり伸ばしたりする運動(θ_4)である。この自由度をリンク21が回転角 θ_4 で表している。

【0051】次に、肩関節は1つで3自由度持つため、長さ0の2つのリンクと1自由度の3つの関節で置換えられる。したがって、上腕をリンク1、前腕をリンク2とする。このとき、重力によって生じる関節トルクと関節角度の関係は、第(1)式の右辺を成分ごとに書直すことにより、第(4)式のように表される。ここで、第(4)式における τ_i 、 θ_i のそれぞれは、関節角度の駆動トルク、関節角を表わし、 M_i 、 L_i 、 S_i のそれぞれは各リンクの質量、長さ、関節から質量中心までの長さを表わす。

【0052】
【数3】

る。第1層25、第2層27、第3層29、第4層31のそれぞれには、ニューロンが設けられている。第1層25はニューロン37を含み、第2層27はニューロン39を含み、第3層29はニューロン41を含み、第4層31はニューロン43a~43dを含む。

【0055】第1層25のニューロン37のそれぞれの出力は、過去から現在に至るある時間内の筋電信号 $EMGma(n) \dots EMGma(n - N + 1)$ を表わし、第

2層27のニューロン29のそれぞれに入力される。第2層27のニューロン39の個数は、ちょうど神経の数に対応しており、その出力は擬似張力45を表わす。第2層27のニューロン39のそれぞれの出力は、第3層29のニューロン41のそれぞれに入力される。第3層29の出力は第4層31のニューロン43a, 43b, 43c, 43dのそれぞれに入力される。第4層31のニューロン43aの出力は図5に示すリンク18の回転角₁を表わし、ニューロン43bの出力はリンク19の回転角₂を表わし、ニューロン43cの出力はリンク20の回転角₃を表わし、ニューロン43dの出力はリンク21の回転角₄を表わす。

【0056】第2層27から第4層31によって形成される非線形変換回路24は、擬似張力45が筋肉の非線形な性質を含んでいないため、筋肉骨格系の非線形な性質および釣合いの非線形方程式である第(1)を解く問題を所定の学習則で学習すればよい。それによって、第2層27のニューロン39と第3層29のニューロンとを結ぶシナプス結合33および第3層29のニューロン41と第4層31のニューロン43a, 43b, 43c, 43dとを結ぶシナプス結合35の結合荷重(1つの実数)が決定される。すなわち、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さまざまな神経回路モデルの学習アルゴリズムが用いられればよい。好ましくは、この学習アルゴリズムとして、推定される関節角₁, ₂, ₃, ₄の誤差を逆伝播する誤差逆伝播学習アルゴリズムが用いられればよい。

【0057】なお、第3層29のニューロン41のそれぞれは、シグモイド関数による非線形関数を有してお

$$EMG_{ma}(t) = \frac{1}{5} \sum_{i=2}^2 EMG_{ave}(t-i) \quad \dots(5)$$

【0061】次に、このように算出された擬似張力から関節角度を推定した結果について説明する。すなわち、図6に示す神経回路による関節角度の推定の結果について説明する。

【0062】図7は、図6に示す神経回路で推定された関節角度₁, ₂, ₃, ₄と実際に測定されたオペレータの関節角度の平均値との関係を示すグラフであり、特に、図7(a)は、関節角度₁に対するグラフであり、図7(b)は、関節角度₂に対するグラフであり、図7(c)は、関節角度₃に対するグラフであり、図7(d)は、関節角度₄に対するグラフである。ここで、図7(a)から図7(d)における横軸は測定された関節角度の平均値を表わして単位はラジアンで表わし、横軸は推定された関節角度を表わし単位はラジアンで表わす。

【0063】被検者に対して天井から吊した指標を与え、指標に手先を合わせて静止している状態で、6秒間筋肉を同時活性化するように指示した。そして前述した

*り、この非線形関数の定義によっては、第3層29はさらに複数層に分離されるので、非線形変換回路24は第2層27から第4層31までで形成される3つの層に限定されるものでない。

【0058】次に、筋電信号を計測した筋肉について説明する。計測した筋電信号は、以下の12個の筋肉から表面筋電信号として測定された。肩関節の伸筋、屈筋、外転筋、内転筋、外旋筋、内旋筋として三角筋前部(DLC)、三角筋上部(DLA)、三角筋後部(DLS)、大胸筋(PMJ)、大円筋(TEM)、広背筋(LDO)、そして、肩、肘の2関節筋として上腕二頭筋長頭(BIL)、上腕三頭筋長頭(TRL)、さらに肘関節伸筋、屈筋として上腕筋(BRC)、上腕三頭筋内側頭(TRM)、上腕三頭筋外側頭(TRA)、円回内筋(PRT)である。

【0059】筋電信号は、図1に示す表面電極7として、一对の銀塩化銀表面電極を用いた、表面筋電位を双極誘導し、差動増幅した筋電信号2kHz、12bitでサンプリングした。電極の直径は10mmで、筋線維に沿って電極間の距離15mmであった。この信号を全波整流した後で、10点ごとの平均をとり、(EMG_{ave})、さらに第(5)式に示すように5点ごとの平均をとって平滑化した。この信号を平均筋電信号(EMG_{ma})と呼ぶ。したがって、200Hzサンプリングしたことになる。第(5)式のEMG_{ma}を第(2)式のEMGとして用いれば、擬似張力が算出される。

【0060】

【数4】

銀塩化銀表面電極を用いて表面筋電信号を検出し、図6に示す第1層25のニューロン27に対して前述した12個の筋肉のEMG_{ma}をそれぞれ0.5秒間入力した。そして、第3層39のような中間層にはニューロンを30個用いた。このニューロン等を用いて非線形変換回路24は誤差逆伝播法による学習によって学習した。

【0064】その結果、第4層31のニューロン43aは図7(a)に示す₁を推定し、同様にニューロン43b, 43c, 43dのそれぞれは、図7(b)から図7(d)に示すそれぞれの関節角度を推定した。図7(a)から図7(d)におえる5.5秒間同時活性化が行なわれるときのそれぞれの結果は、平均値と標準偏差として現れている。縦軸に沿ったそれぞれの値の幅は標準偏差を表わし、標準偏差における中心の値が平均値である。たとえば、図7(a)において、標準偏差47の中心位置に位置するものが平均値49である。結果としていえることは、推定された関節角度と測定された関節角度とが一致すれば、直線上に乗っているはずであり、

特に、図 7 (b) に示す関節角度 θ_2 はよく一致している。

【 0 0 6 5 】図 8 は、図 7 に示したデータに基づく神経回路によって推定された結果を目標軌道として人腕と同じダイナミクスを持つ仮想腕を制御した結果を示すグラフである。特に、図 8 (a) は、関節角 θ_1 に対応したグラフであり、図 8 (b) は、関節角 θ_2 に対応したグラフであり、図 8 (c) は関節角 θ_3 に対応したグラフであり、図 8 (d) は、 θ_4 に対応したグラフである。

【 0 0 6 6 】図 8 を参照して、この発明に係る制御装置では、推定する関節軌道を 3 次元空間内で規制制御が行なわれているオペレータの筋電信号と人腕の姿勢から推定しているため、始点側と終点側ではかなり目標軌道と実際の軌道とが一致していることがわかる。すなわち、ロボットを推定した目標軌道で連続的に位置制御する場合において、ゆっくりした運動で制御するならば、釣合い位置である平衡状態を連続的に動かしていることと同等であるので、始点側と終点側のように位置の推定がかなり精度よく行なわれている。これは、短縮速度 - 張力曲線を考慮に入れていないことから起因するものである。したがって、始点側と終点側との間の多少の速度を有する運動でロボットを制御する場合には、図 8 に示すように中間過程で目標軌道と実際軌道とのばらつきが生じている。

【 0 0 6 7 】しかしながら、推定位置である関節角度が多少変動したとしても、ロボットのダイナミクスとオペレータのダイナミクスとの違いを考慮することで、なめらかな軌道を実現することができる。またダイナミクスの違いを考慮することのみならず、図 1 に示す制御部 1 7 がロボット 3 に対してフィードバック制御またはフィードフォワード制御のような制御で制御すれば釣合いの位置である平衡状態を連続的に変化させた運動でない場合でもロボットを制御でき、これらの制御を組み合わせることで、この発明に係るロボット制御装置はロボットをより自然に制御できる。

【 0 0 6 8 】なお、この実施例では、オペレータの身体部位として人腕に着目しているが、人腕に限らず、たとえば脚などの身体部位に関する関節角度が推定されてそのロボットを制御してもよい。

【 0 0 6 9 】また、この実施例では、筋電信号を検出する検出信号の一例として表面電極を用いているが、他の検出手段として針電極でもよく、電極に限っては、一对の銀塩化銀表面電極が好ましいと考えられる。ここで、考慮されるべきことは、人体に害を与えない検出手段であればよいことである。

【 0 0 7 0 】さらに、この発明に係るロボット制御装置で用いられている思想は、ロボットに限ったものでなく、たとえば義手・義足などに対しても適用されると考

えられる。

【 0 0 7 1 】さらに神経回路が行なう学習のための学習則は、誤差逆伝播学習だけでなく、E - M アルゴリズム、または連合報酬学習などのような最適アルゴリズムが用いられるのであればよい。

【 0 0 7 2 】さらに、制御部がロボットを制御するための制御方法は、フィードバック制御またはフィードフォワード制御に限られるものではない。

【 0 0 7 3 】

- 10 【発明の効果】以上のようにこの発明によれば、オペレータの身体部位における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、その信号に基づいて非線形身体モデルによってオペレータの関節の位置状態を推定してロボットを制御するので、たとえばロボットを釣合いの取れた平衡状態の連続的な運動で制御する場合に所望される軌道で制御できる。

【図面の簡単な説明】

- 20 【図 1】この発明の一実施例によるロボット制御装置を示すための概略ブロック図である。

【図 2】この発明の一実施例による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。

【図 3】図 2 のステップ (図面では S で表わす) 5 をより細かく示したフローチャートである。

【図 4】関節トルクと釣合い位置との関係を説明するための図である。

【図 5】人腕の肩から肘までの自由度を説明するための図である。

- 30 【図 6】図 1 の非線形身体モデルの一例としての神経回路モデルを示した図である。

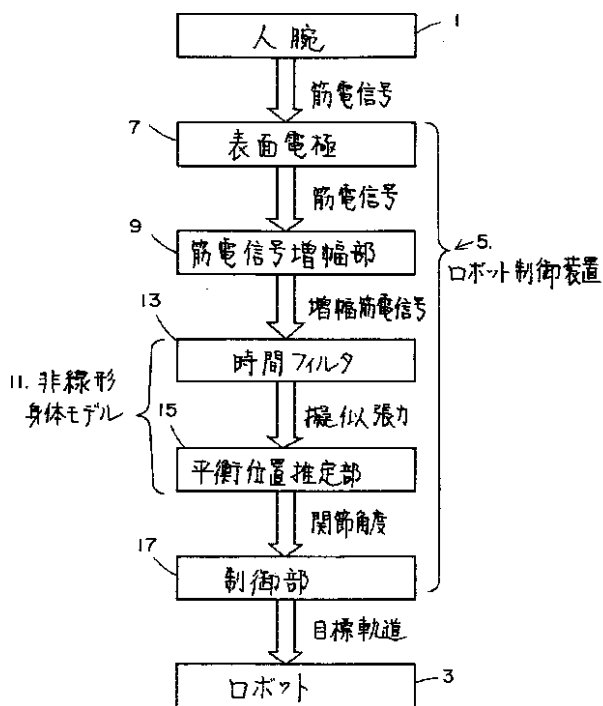
【図 7】図 6 に示す神経回路モデルで推定された関節角度 θ_1 , θ_2 , θ_3 , θ_4 と実際に測定されたオペレータの関節角度との関係を示すグラフである。

【図 8】図 6 に示す神経回路モデルで推定された関節角度を目標軌道として人腕と同じダイナミクスを持つ仮想腕を制御した結果を示すグラフである。

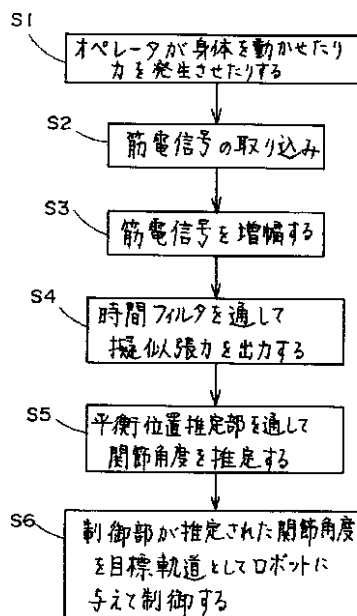
【符号の説明】

- 3 ロボット
5 ロボット制御装置
40 7 表面電極
11 非線形身体モデル
13 時間フィルタ
15 平衡位置推定部
17 制御部
22 ネットワーク
23 F I R フィルタ (線形変換回路)
24 非線形変換回路
45 擬似張力

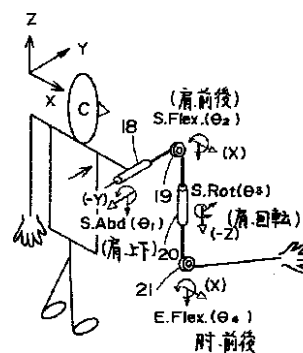
【図1】



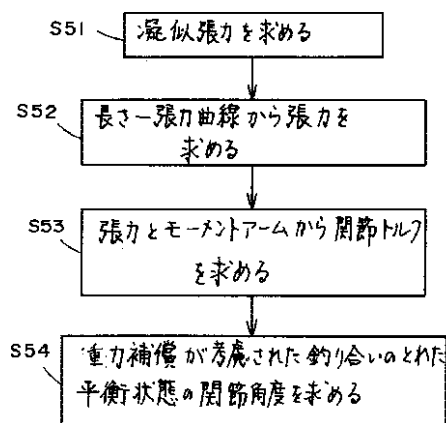
【図2】



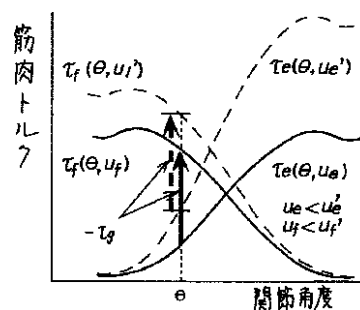
【図5】



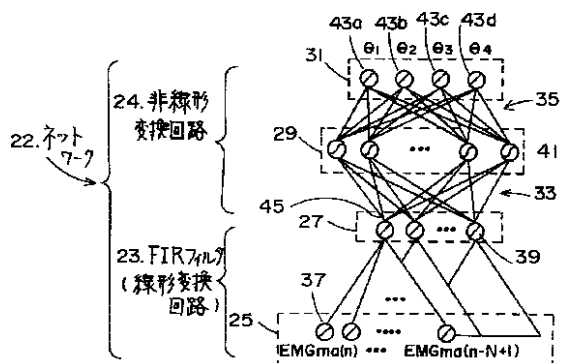
【図3】



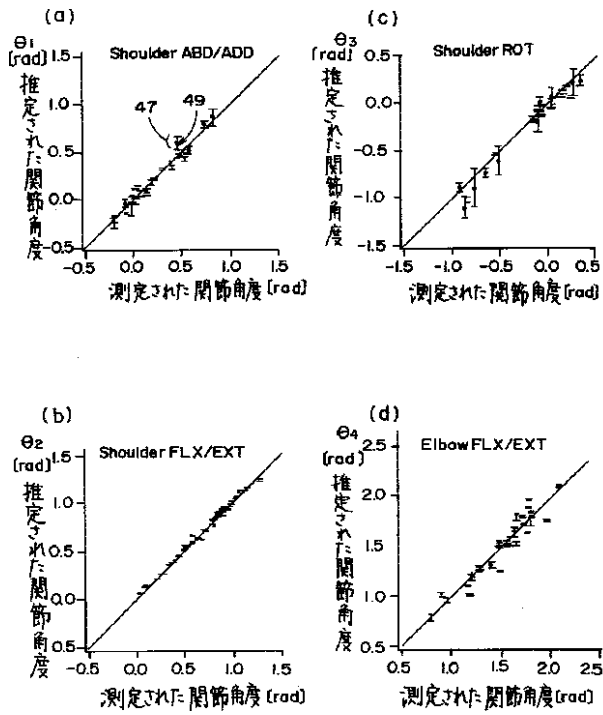
【図4】



【図6】



【図7】



【図8】

