

関節の平衡位置を考慮したパワーアシストシステムの提案と試作

A Power-Assist System Using Equilibrium Points of the Wrist

川瀬 利弘 (PY)[†], 倉茂 和雄[†], 渡邊 将人[‡], 神原 裕行[‡], 小池 康晴[‡]

Toshihiro Kawase(PY), Kazuo Kurashige, Masato Watanabe, Hiroyuki Kambara and Yasuharu Koike

[†] 東京工業大学

[‡] 科学技術振興機構 CREST

kawase@hi.pi.titech.ac.jp

Abstract— We propose a new method for estimation of wrist state using electromyogram and developed a prototype power-assist system for the wrist. Stiffness and equilibrium posture are estimated and used for controlling a ultrasonic motor. User's intentions are reflected adequately, based on a neuroscientific perspective.

Keywords— Exoskeleton, Electromyogram, Equilibrium Point, Joint Stiffness, Rehabilitation Robot

1 はじめに

人が到達運動において腕をスムーズに動かすことができるのは、フィードバック制御だけでなくフィードフォワード制御も併用しているからだということが、これまでの計算論的神経科学の研究から示唆されている [1]。そうだとすれば、パワーアシストシステムの利用者が装置を装着している時もこのようなフィードフォワード制御がなされていることになる。よって、装置が運動の到達位置を再現できない場合、使用者は感覚のフィードバック情報に多く頼らなければならなくなり、操作がしにくくなるのではないかと考えられる。このように、神経系の計算論を考慮すると、パワーアシストシステムを使いやすくするために満たすべき条件が得られる。

本研究はこのような考えに基づき、使用者の意図する運動を実現できるパワーアシストシステムを開発することを目的とする。本報告ではまず、手首の関節スティフネスと平衡位置を、筋電信号を用いて単一のモデルで推定できる手法を提案する。運動の到達位置は運動終端での平衡位置であるから、平衡位置を正確に再現することにより到達運動が行いやすくなると期待できる。また、この推定手法を用いてパワーアシストシステムを試作し、その性能を評価する。

2 筋電信号による手首状態の推定

2.1 手首関節のモデル

筋電信号からリアルタイムに手首の状態を推定するため、[2]を参考に手首関節の1自由度(屈曲/伸展)に対する数式モデルを作成した(図1)。ここではその概要を述べる。 M 個の筋肉に送られる運動指令 $u = \{u_i; i = 1, \dots, M\}$ により各筋肉のばね的特性が変化し、その結果と関節角度 θ に応じて関節トルク τ が決定される。運動指令には、筋電信号の絶対値にローパスフィルタをかけ、最大随意収縮中の値で割ることにより正規化したものを用いる。なおモデルを表す式の中には、モデルの特性を決めるパラメータがいくつか含まれている。

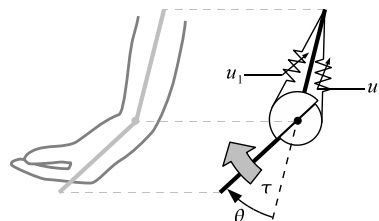


図 1: 手首の数式モデルの概要 (筋肉数 $M = 2$ の場合)

2.2 状態の推定

モデルを表す式を変形することにより、関節トルク τ を式 (1) のように表すことができる。ただし、 $K(u)$ 、 $\Theta_{eq}(u)$ は変形の結果得られた項を示す関数である。

$$\tau = K(u) (\Theta_{eq}(u) - \theta) \quad (1)$$

式 (1) より、 $K(u)$ は関節スティフネス、 $\Theta_{eq}(u)$ は関節の平衡位置を表す関数と見なすことができる。よってモデルのパラメータが得られていれば、実際の筋電信号からこれらの関数の値を求めることで、関節スティフネスや平衡位置をリアルタイムで推定することができる。

2.3 モデルのパラメータの推定

モデルのパラメータの推定においては、平衡位置を精度よく推定することを重視した方法を用いる。

関節スティフネスが常に無視できない大きさの値を持つとすれば、式 (1) より、関節トルク τ が 0 と見なせる時 ($\tau \approx 0$)、関節角度 θ は

$$\theta \approx \Theta_{eq}(u) \quad (2)$$

となる。手首に重力や他の負荷がかかっておらず、粘性や慣性が無視できるほど低速で手首を動かしている時は $\tau \approx 0$ が成り立つ。そこで、手首を水平面内で低速で屈曲/伸展させ、その時の手首関節角度と計算した運動指令に対して式 (2) をフィッティングすることで、モデルのパラメータを推定する。

2.4 手首状態推定の精度

上記の推定手法の精度を調べるため、1人の被験者に対し、2.3節の方法でモデルのパラメータを推定したあと、運動中の筋電信号から元の運動の情報を推定した。図2に結果を示す。上段は水平面内で低速で手首を運動させている時(式(2)が成り立つ状況)の関節角度と推定平衡位置、下段は等尺性運動時のトルクと推定トルク ($K(u)(\Theta_{eq}(u) - \theta)$) である。モデルの筋肉数は $M = 2$ とし、筋電を計測する筋肉は橈側手根屈筋と尺側手根伸筋とした。

推定トルクが実測値の半分程度になっている部分もあるが、多くの場合において推定値が実測値に近い値を

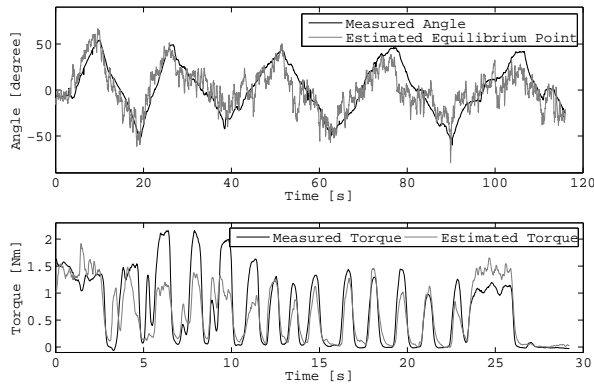


図 2: 手首の状態の実測値と推定値の比較



図 3: 超音波モータコントローラ (左) とパワーアシスト用装具 (右)

持っていることがわかる。図 2 のデータ全体での実測値と推定値の間の相関係数は、平衡位置については 0.82、関節トルクについては 0.81 であった。

3 パワーアシストシステムの試作

2 節で述べた推定手法を用い、手首用パワーアシストシステムの試作を行った。システムは、新たに開発した装具と超音波モータコントローラ、既存の筋電計測装置と PC で構成される。基本的には、手首に負荷がかかっていない時には手首動作に追従し、負荷がかかっている時には手首と同じトルクを出力するという動作をする。

3.1 パワーアシスト用装具

手首を直接アシストするのは、屈曲 / 伸展の 1 自由度を持ち、アクチュエータにより手首にトルクを加えられる装具 (図 3 右) である。アクチュエータには、静音かつ高トルクを発生できる超音波モータを用いた。超音波モータに備え付けられたロータリエンコーダにより、手首の関節角度を計測することができる。また、面ファスナーにより装具の内壁に筋電計測用電極を装着できる。

3.2 超音波モータコントローラ

開発した超音波モータコントローラ (図 3 左, MIZOUE PROJECT JAPAN 社製) は、超音波モータの粘性とスティフネス、平衡位置の指令値を PC から受け取って、それらの特性を超音波モータにほぼ実現させることができる。超音波モータの入力信号の 1 つである位相差は出力トルクとおおよそ線形な関係を持っているので、コントローラは必要なトルクに比例した位相差を超音波モータに出力する。ただし、位相差は ± 90 度の範囲しかとることができないので、計算した位相差がその範囲を超えた時は絶対値を 90 度にして出力する。

今回の実装では、PC が筋電信号から $K(u)$ と $\theta_{eq}(u)$ を計算し、粘性 0 、スティフネス $K(u)$ 、平衡位置 $\theta_{eq}(u)$

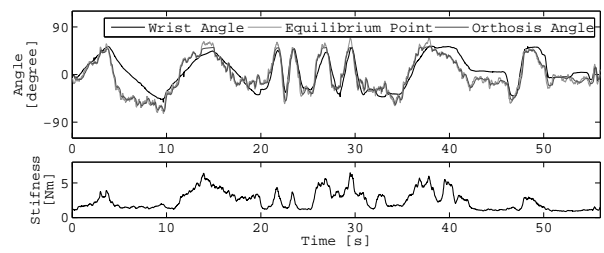


図 4: 追従性能 (上) と実験中の $K(u)$ (下)

の指令値をコントローラへ約 30Hz で送り続ける。これにより、装具にもこれらの特性がほぼ実現される。ただし、装具自身の粘性・慣性・摩擦は無視しているの、実際には装置自身の動特性も反映される。

3.3 性能

装具を手から外した状態で、手首の動作にどれだけ追従できるかを調べた結果を図 4 に示す。モデルのパラメータや筋電を計測する筋肉は 2.4 節と同様にした。装具は手首と近い運動パターンを実現し、運動の終端においてはある程度関節位置を再現できている。しかし、手首の関節角度よりも平衡位置の推定値に対して追従していることがわかる。そのため、特に関節スティフネスの推定値 $K(u)$ が小さい時に追従性能が悪い。これは、今回のモデルや実験において、手首の粘性を考慮しなかったためである。また静止中においては、式 (2) が成り立つにもかかわらず、装具がずれた角度を示している。これはモデルのパラメータを推定する際に動作中のデータを用いたため、静止中の運動指令に対するフィッティングがうまく行われなかったからである可能性がある。

装具を手から外した状態での外力に対抗するトルクについては、おおむね $K(u)$ や $\theta_{eq}(u) - \theta$ に比例することを確認した。また、実際に装具を手に着用して動作させてみたところ、手首を自由に動かさず、物を持つ時はアシスト力を発揮することを確認したが、無負荷時に手首を素早く動かした時に抵抗を感じた。これは装具自身の持つインピーダンスや摩擦が影響していると思われる。

4 まとめ

本報告では、運動に関する脳の計算論的な観点から考慮した、使用者の意図する運動を反映しやすいパワーアシストシステムを目指し、手首の状態推定の手法の提案とパワーアシストシステムを試作した結果を報告した。その結果、現状では問題も多いものの、提案手法が到達運動のしやすいパワーアシストシステムに有効に働き得ることが示された。今後は、モデル、制御手法、装具の設計を精緻化して現状の問題を解決すること、到達運動以外の運動に関しても脳の計算論的な視点から考慮すること、他の自由度に対する実装、リハビリテーション訓練への応用などを行う予定である。

謝辞 この研究は、文部科学省科学研究費補助金特定領域研究「身体・脳・環境の相互作用による適応的運動機能の発現」、科学技術振興機構 CREST (脳学習: 櫻井芳雄代表) および、産学共同サイズイノベーション化事業 ((有) MIZOUE PROJECT JAPAN 代表) の補助を受けている。また装具の製作においては、古澤敬志氏をはじめ (財) 鉄道弘済会 義肢装具サポートセンターの方々の協力を受けた。

参考文献

- [1] 川人光男 (1996) 脳の計算理論, 産業図書.
- [2] 辛徳, 嶋田修, 佐藤誠, 小池康晴 (2004) “筋肉骨格系の数式モデルによる腕のスティフネスの推定.” 電子情報通信学会論文誌, J87-D-II, 9, 1860-1869.