

ESN を用いた筋電位による関節トルク推定 Joint Torque Estimation by EMG Using ESN

村上 美里[†] 都城 宏治[†] 櫻沢 繁[†]
Misato Murakami Koji Miyashiro Shigeru Sakurazawa

1. はじめに

近年、機械学習によって装着者の意図を推定し駆動する筋電義手が多く開発されている。筋電義手とは、脳で身体運動が意図されたとき、筋電位を計測することでそれを読み取ることができることを利用した義手のことである。筋電位とは、人間の筋活動時に生じる電位変化のことであり、筋電位から身体運動の意図を読み取ることができる[1]。

実用化されているほとんどの義手において、ロボットハンドの指関節角度が、計測された筋電位の振幅情報によって制御されている。これは義手の指を動かすサーボモータが角度制御で動くからである。しかし実際は筋電位の振幅は筋収縮時の筋張力に比例する量であり、人間の手指は筋活動によって指関節トルクが制御されて動いている。そのため、筋電義手をトルク制御することで操作性が高くなると考えられる。トルク制御型筋電義手の開発には、筋電位から関節トルクを推定するシステムが必要となる。そのため、本研究ではトルク測定器を開発し、先行研究[2]で有用性が示された ESN を用いて筋電位から示指の各関節トルクを推定するシステムを構築した。

2. 指関節トルク推定手法

2.1 筋電位

本研究では表面筋電位計測方法を用いて筋電位を計測した。筋電位の計測には、筋電位信号が微弱であることや、信号にノイズが入ってしまうことなどの問題点がある。本研究ではこれらの問題点を解決するために、表面電極としてアクティブ電極を使用し、ノイズを除去し信号の振幅を大きくするために差動増幅器、ハイパスフィルタ、非反転増幅器からなる筋電位計測回路を使用した。

2.2 関節トルク

関節トルクとは、1つの関節を構成する隣り合う2つのセグメントに働く、その関節軸周りの2つのトルクのことである[3]。関節トルクには外力によるものと内力によるものがあり、それぞれ外的関節トルクと内的関節トルクと呼ばれている。今回はトルク計測器にかかる外的関節トルクを計測した。本研究で行う屈曲動作においては指の弾性による影響が極めて小さいと考え、計測した外的関節トルクが内的関節トルクにつりあっていると近似して指関節トルクの学習・推定を行った。

2.3 関節トルク

指関節トルクを計測するための指関節トルク計測器を、3Dプリンタを用いて出力した。指関節角度を計測するために、関節中心にポテンシオメータを取りつけて指屈曲時の指関節角度を計測した。ポテンシオメータは緑測器の CP-2UN

を使用した。また、指関節にかかる力を計測するために、それぞれの関節をまたぐように引きバネを取りつけた。その際、指の関節角度と関節にかかる力が一意に定まらないように、異なるバネ定数を持つ3種類のバネを用いた。

2.4 ESN

ESN (Echo State Network) は、リザーバーコンピューティングの代表的なモデルの1つで、時系列入力過去の情報が反響して残る状態 (Echo State) をつくり出し、そこから入力の特徴の読み出し (リードアウト) を行う[4]。リードアウトの調整には計算量の小さい線形学習機を用いる。この仕組みにより、高計算性能と高速学習を可能にしている。この構造は一般 RNN の構造と同じだが、ESN は入力層とリザーバー層の結合重みを固定し、出力層の結合重みのみを学習アルゴリズムによって調整するところが異なっている。本研究で用いた ESN モデルを図1に示す。

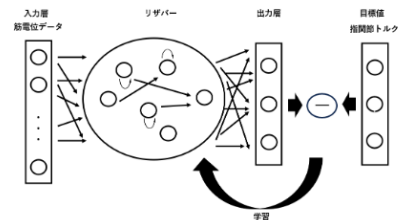


図1 ESN モデル

3. システム評価実験

3.1 実験方法

本研究で構築したトルク推定システムを評価するために、1人の被験者に対して評価実験を行った。

まず、被験者は左腕前腕の筋電位と左手手指の指関節トルクを計測する。筋電位を計測するための電極は7つで、4つを深指屈筋、浅指屈筋付近に貼付し、3つを総指伸筋付近に貼付する。不関電極は手首付近に貼付する。被験者はランダムに指の屈曲と伸展を行う動作を120秒間繰り返した。これをそれぞれのバネで行い、計3回計測した。そして、それぞれの関節に異なるバネ定数のバネをつけた状態でも同様に計測を行った。

次に、計測した筋電位データの差分と指関節角度データを PowerLab16/35 を用いて出力する。筋電位データは ESN に入力する前にカットオフ周波数 1kHz のデジタルローパスフィルタをかけ、その後 0 から 1 の大きさになるよう正規化した。指関節角度データは指関節トルクへの変換式を用いて指関節トルクデータに変換し、筋電位データと同様の方法で正規化した。

これらのデータを用いて ESN で学習・推定を行った。最初に計測した3種類のバネを用いた計測データを出力重み学習用のトレーニングデータ、最後に計測したそれぞれの

[†] 公立はこだて未来大学 Future University Hakodate

関節に異なるバネをつけた計測データをテストデータとして用いた。

3.2 実験結果

実験結果を図 2 から図 4 に示す。

図 2 は DIP 関節の関節トルク推定結果, 図 3 は PIP 関節の関節トルク推定結果, 図 4 は MP 関節の関節トルク推定結果である。青色の線がテストデータの関節トルクの値, 橙色の線が推定値である。横軸は時間を, 縦軸は関節トルクの大きさを表している。各関節における推定値とテストデータの平均二乗誤差を表 1 に示す。

表 1 より, 3 つの関節の中では PIP 関節の推定精度が最も低く, MP 関節の推定精度が最も高いということが分かる。ただ, 図 2 と図 3 を比較すると, DIP 関節の推定結果の方が PIP 関節の推定結果よりも実測値に沿っていない部分が多いと分かる。

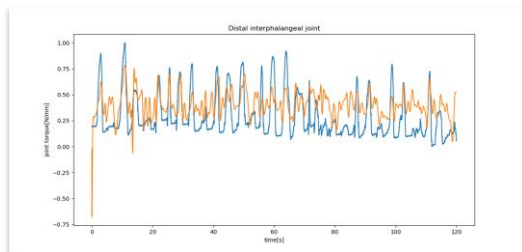


図 2 DIP 関節予測結果

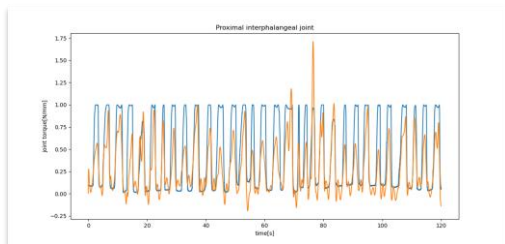


図 3 PIP 関節予測結果

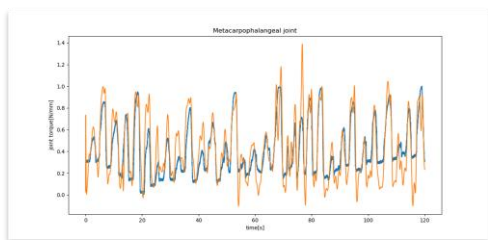


図 4 MP 関節予測結果

関節	平均二乗誤差
DIP 関節	0.04505096277957967
PIP 関節	0.08211643181404472
MP 関節	0.024585581625539792

表 1 平均二乗誤差

4. 考察

PIP 関節や DIP 関節の推定精度が低かったことについて, いくつかの原因が考えられる。まず, DIP 関節と PIP 関節は斜支靭帯などの影響により連動して動くことが多く, 片方を独立して動かそうとするともう片方の動きに制限がかかる。これによって, それぞれを同時に動かそうとしたときと片方だけを動かそうとしたときで筋電位と関節トルクの関係が変化して, それが正確な予測を困難にしていると考えられる。実際に, DIP 関節と PIP 関節は片方を任意の角度に固定するともう片方の動作に制限がかけられることが示されている[5]。さらに, PIP 関節は他の関節よりも屈曲時の関節角度が大きく, バネの伸びやモーメントアームの変化の幅が大きくなっていることも原因だと考えられる。そして, MP 関節は DIP 関節や PIP 関節に比べて屈曲時の剛性が高いことや, これらの関節のように他の関節を固定したときに動作に制限が生じることが少ないことが示されており[5][6], 安定性が高いことによって予測がより正確になったのではないかと考えられる。

5. おわりに

本研究では, トルク制御型筋電義手を開発するために ESN を用いて筋電位から示指の各関節トルクを推定するシステムを構築した。各関節をまたぐバネと関節の中心に取り付けたポテンショメータからなるトルク測定器と表面電極を用いて示指各関節トルクと筋電位を計測し, そのデータから各関節トルクを推定した結果, MP 関節に比べて PIP 関節や DIP 関節の予測精度が低かった。これは PIP 関節と DIP 関節が連動して動くことや, PIP 関節の関節可動域が大きくモーメントアームやバネの伸びの変化幅が大きかったからだと考えられる。また, MP 関節の予測精度が最も高かったのは, 他の関節よりも独立して動きやすく, 指屈曲時の安定性が高いからだと考えられる。

今後は, 指屈曲時における指肉の弾性を計測することや, 示指以外の指関節トルクを予測できるようにすること, リアルタイムで予測ができるようにシステムを改良することでトルク制御型筋電義手の開発に応用できると考えている。

参考文献

- [1] 木塚 朝博, 増田 正, 木竜 徹, 佐渡山 亜兵, “表面筋電図”, 東京大学出版局, 2006.
- [2] 白戸 千夏, “筋電位による指関節トルクの時系列推定における ESN の有用性”, 公立はこだて未来大学, 学士論文, 2023.
- [3] Vladimir M. Zatsiorsky, Boris I. Prilutsky, “骨格筋のバイオメカニクス”, シナノ印刷株式会社, 2014.
- [4] 田中 剛平, 中根 了昌, 廣瀬 明, “リザーバーコンピューティング”, 森北出版, 2021.
- [5] 秋山 寛治, 今村 宏太郎, 千葉 剛次, “手指関節運動の動的解析 1 関節固定時の多関節への影響”, 40, 2, pp.663-665 (1991).
- [6] 中沢 信明, 植北 祥充, 池浦 良淳, 猪岡 光, “人間の指関節のインピーダンス特性”, 66, 641, pp.214-219 (2000).