

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月18日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22591634

研究課題名（和文）：ニューラルネットワーク制御による多指機構を有する
5指駆動型筋電義手の開発研究課題名（英文）：Development of a five-fingered prosthetic hand controlled by neural
network

研究代表者：陳 隆明（TAKA AKI CHIN）

神戸大学・医学研究科・客員准教授

研究者番号：20437495

研究成果の概要（和文）：

本研究では、筋電義手制御に重要となる生体電極選定法および義手操作のための訓練システムのプロトタイプを開発した。そして、多指機構を有する5指駆動型電動義手を試作し、筋電位信号による制御を実現した。

研究成果の概要（英文）：

This study proposed a quasi-optimal channel selection method and a prototype training system for a prosthetic hand control. A five-fingered prosthetic hand was also developed and controlled based on electromyogram (EMG) signals.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2011年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2012年度	900,000	270,000	1,170,000
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：医歯薬学

科研費の分科・細目：外科系臨床医学・整形外科学

キーワード：筋電位，5指駆動型筋電義手，電極選定，トレーニング，ニューラルネット

1. 研究開始当初の背景

日本には平成18年現在で約82,000人の上肢切断者がいる。これらの人々の生活の質：quality of life（以下、QOL）を向上させるために、義手が代替手段として重要である。義手は失われた手の作業を行うものであり、人間の手と相似機能を有する義手による作業性の向上が必須である。最新のテクノロジーを駆使した義手として現在広く普及し使用されている筋電電動義手（以下、筋電義手）は、前腕切断者に対するハンド型筋電義手である。断端の筋収縮により発生する筋電位信号（以下、EMG信号）を用いて、筋電義手の手先具であるハンドの開閉を操作し、物体を

把持するなどの必要な動作を行う。通常はEMG信号を採取する電極の取り付け箇所は2箇所であり、1箇所はハンドの開き操作、もう1箇所はハンドの閉じ操作を行う。従ってその機能は単純なハンドの開閉のみであり、人の手の如く複雑な動作は不可能である。近年では多指関節機構を有する（指の各関節が曲がる）ハンドの開発が大学の研究所で盛んに行われており、人間の手の如き複雑な動作は機械的性能面では可能である。我々の研究グループにおいても5指動作筋電義手を試作しているものの、屈曲駆動機構や把持力増大機構において課題を有する。さらに、人間の手の如き複雑な動作をハンドで再現するた

めには、ニューラルネットワークを利用した知的制御方法の開発が必須である。ニューラルネットワークを利用した生体信号 (EMG 信号) の識別技術を用いた人間生活支援ロボットの研究はこれまでに進められており [Tsuji *et al.* 1999, Fukuda *et al.* 2003], ニューラルネットワーク学習を用いた制御は高機能な義手パーツの複雑な制御に対し応用できる可能性が大きい。

2. 研究の目的

上肢切断者が QOL の向上を達成するためには、代替手段としての義手の作業性の向上が必須であるが、最新のテクノロジーを駆使した義手として現在広く普及し使用されている筋電動義手では、人間の手の如き複雑な動作は不可能である。そこで本研究では、切断者が実行したい手の動きを再現できる 5 指駆動型筋電義手の開発を目的とする。提案法ではまず、複雑な動作が可能な多指関節機構を有する (指の各関節が曲がる) ハンドを開発する。そして、複雑な手の動作を義手ハンドで再現するための知的制御方法としてニューラルネットワークを利用した生体信号 (EMG 信号) の識別技術を利用し、複雑な動作を行う高機能義手ハンドの制御を行なう。

3. 研究の方法

筋電義手の制御では、計測した EMG 信号から動作毎の特徴を抽出して識別する必要がある。

そこで、まず切断端に取付けられた複数の電極を用いて EMG 信号を計測し、EMG のパターン情報を抽出する。そして、抽出した EMG パターンから切断者のイメージした手の動作を識別するために、確率ニューラルネットワークにより EMG パターンと動作との対応関係を学習して各動作の事後確率を算出可能とする。このとき、より少ない電極数 (EMG 信号) で複雑な動作を識別することが望ましいため、偏 Kullback-Leibler (KL) 情報量という新たな情報量を用いて電極数の削減を図る。提案法を用いて各電極がパターン識別の精度に与える影響度を検証し、最少で最適な生体電極を選定する。

一方、個々に適切な電極を選定して識別が可能となったとしても、切断者が動作毎の EMG 信号を正確に再現できなければ義手を精度良く制御することは困難である。そこで、切断者がイメージした手の動作が、その動作の筋のパターン情報として正確に再現できるように、パソコンを用いたバーチャルハンド制御トレーニングシステムを開発する。最終的には多指関節機構を有する (指の各関節が曲がる) 5 指駆動型筋電義手を完成させ、

実際に被験者 (切断者) に装着し、開発したトレーニングシステムの有効性を検証する。

4. 研究成果

本研究では、多指機構を有する筋電義手を精度良く制御するために、(1) 最適な電極の選定方法と (2) トレーニングシステム、および (3) 多指義手の開発と EMG 信号による制御方法について検討を行った。

研究成果 (1) 偏 Kullback-Leibler 情報量に基づく変数選択法の提案と生体電極位置選定法の確立

筋電義手を自らの手のように操作するためには、通常、数週間から数ヶ月程度の訓練が必要である。切断者はそれぞれ切断部位や状態、手術等によって筋の位置が異なるため、筋電義手処方の際にはまず作業療法士が触診および電極を貼付しながら試行錯誤的に適切な位置を決定し、随意的に分離可能な動作イメージを選定している。しかしながら、熟練した作業療法士においても被験者ごとに適切な電極位置や動作を選定することは困難である場合が多く、また、適切な電極・動作を選定しなければその後の訓練が実施できないという問題がある。

そこでまず、適切な電極を選定するための指標として新たに偏 Kullback-Leibler (KL) 情報量を定義し、偏 KL 情報量に基づく適切な電極貼付位置選定法を提案した。偏 KL 情報量はあらかじめ貼付した電極のうち、ある電極を除去した際の情報量の偏りを表しており、各電極が動作の識別に必要なかを判別できる。提案法は、まず使用者から計測した筋電位の確率密度関数を KL 情報量に基づいた確率ニューラルネットの学習によって推定する。そして、計測したデータの各次元 (電極) が識別に与える影響度を偏 KL 情報量に基づいて評価し、識別に不要な電極を 1 つずつ削除していくことで識別に有効な電極を選択可能である。提案法では、筋電位の学習・識別に確率ニューラルネットを用いているため、KL 情報量最小化に基づく学習則を導入することで、ニューラルネットの学習と各電極が識別に与える影響度を同時に評価可能である。

実験では、上肢切断者を含む全 9 名を対象に筋電位信号識別実験を行い、あらかじめ貼付した多数の電極 (最大 13 チャンネル) から識別に必要な少数の電極を選定できること (電極削減率: $54.3 \pm 19.1\%$), そして選定電極のみを用いて精度良い動作識別が可能であることを示した (平均識別率: $96.6 \pm 2.8\%$) [IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2013].

本研究では、さらに偏 KL 情報量を識別対象

動作の選定に応用し、被験者が随意的に再現可能な動作（識別可能動作）を選定する方法を提案した。筋電義手処方においては、切断者が随意的に分離可能な動作イメージ（たとえば、手首の伸展・屈曲動作）を義手の開閉などの制御に割り当てているため、精度良く識別可能な動作を選定できる方法が必要である。そこで、ある識別対象動作を除く前後のKL情報量の偏りをクラス偏KL情報量として新たに定義し、クラス偏KL情報量に基づいて識別困難な動作を逐次除去することで高い精度で識別可能な動作を選定可能とした。実験では、あらかじめ被験者に手首・指に関連する動作を多数実施させ、提案法を用いて識別可能動作のみを選定できることを示した。

以上により、適切な電極と動作を偏KL情報量という統一的な枠組みによって獲得できる可能性を示した [第2回全国電動義手研究会, 2011, IEEE/CME International Conference on Complex Medical Engineering (CME2012), 2012, 計測自動制御学会論文集, 2012].

研究成果 (2) VR 技術を利用した筋電義手制御トレーニングシステムの開発

5 指駆動型筋電義手を精度良く制御するための筋電義手トレーニングシステムについて検討を行った。ここでは切断者がイメージした手の動作が、その動作の筋のパターン情報として正確に再現できるように、コンピュータ上に作成した仮想的な義手を用いたトレーニングシステムを開発した。

まず、コンピュータ上に仮想的な義手（バーチャルハンド：VH）を作成し、EMG 信号による制御を実現した。作成した VH は人間の手の構造を参考に片手 22 関節を有する剛体リンク構造としており、各関節は回転 3 自由度を有するボールジョイントである。各関節の角度を調節することで、握り・開きの 2 動作が可能な市販の義手から多指機構を有する複雑な義手まで、さまざまな義手の動きを再現可能とした。このシステムでは、被験者から計測した EMG 信号の動作ごとの特徴をニューラルネットワークを用いて学習・識別することで VH を制御することが可能である。提案法では VH の制御に人腕のインピーダンスモデルを導入したバイオメトリック制御を採用することで、人間らしい滑らかな運動を可能とした。

そして、開発した VH を用いて仮想的な作業が可能なトレーニングシステムのプロトタイプを構築した。提案システムを用いることで、仮想空間上に作成した物体の把持や移動等の仮想的な作業を行うことができる。本研究では、義手の操作能力評価に広く用いら

れている Box and Block Test (BBT) を仮想空間上に再現し、箱上に出現する物体（球）を把持・移動し、もう一方の箱上に落とすという作業訓練を実装した。そして、提案システムを用いて熟練者を含む全 5 名の健常大学生 (20 代男性) を対象として 5 日間の訓練実験を実施した。その結果、作業能力が有意に向上することを確認した [第 2 回全国電動義手研究, 2011, 日本人間工学会中国・四国支部九州・沖縄支部合同開催支部大会, 2011, 第 20 回計測自動制御学会中国支部学術講演会, 2011, 日本ロボット学会誌, 2012].

研究成果 (3) 筋シナジーモデルに基づく 5 指駆動型電動義手の筋電制御

これまでに、5 指機構を有する筋電義手がさまざま開発されているものの [Carrozza *et al.* 2005, Kamikawa *et al.*, 2008], 5 指の独立制御や俊敏さと力強さを兼ね備えた義手は検討されていなかった。

本研究では、俊敏な動きと力強い把持を両立可能な 5 指駆動型電動義手を試作し、EMG 信号による制御を実現した。開発した筋電義手は 5 指の素早い動きを実現する屈曲駆動機構と、この原理を利用して力強い把持を実現する把持力増大機構を独立に構成することで、俊敏な 5 指の屈曲と大把持力を同時に実現可能である。そして、EMG 信号を用いて多指ハンドを制御するために筋シナジーモデルに基づく制御法を提案した。この方法は、5 指動作を構成する基本動作を筋シナジー（筋の活動を調整する構成単位）として捉え、筋シナジーの組み合わせにより多様な 5 指の動作を識別可能である。

実験では、複雑な手指動作を提案法を用いて識別し、開発した 5 指駆動型筋電義手を実際に制御できることを確認した。そして、アルミ缶の把持によって、5 指の素早い開閉と缶を握りつぶすほどの大きな把持力とを同時に実現可能なことを明らかにした [日本義肢装具学会誌, 2010, 第 21 回インテリジェント・システム・シンポジウム (FAN2011), 2011].

以上のように、多指機構を有する筋電電動義手制御のための電極選定法とトレーニングシステムのプロトタイプを開発し、筋電位信号による 5 指駆動型義手の随意的な制御を実現することができた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

- ① Taro Shibasaki, Keisuke Shima, Toshio Tsuji, Akira Otsuka and Takaaki Chin, “A Quasi-Optimal Channel Selection Method for Bioelectric Signal Classification Using a Partial KL Information Measure”, IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 査読有り, Vol. 60, No. 3, pp. 853-861, 2013
- ② 芝軒太郎, 村上隆治, 島圭介, 辻敏夫, 大塚彰, 陳隆明, “VRを利用した筋電義手操作トレーニングシステムの開発と仮想 Box and Block Test の実現”, 日本ロボット学会誌, 査読有り, Vol. 30, No. 6, pp. 621-628, 2012
- ③ 芝軒太郎, 島圭介, 高木健, 栗田雄一, 大塚彰, 陳隆明, 辻敏夫, “偏KL情報量に基づくクラス選択法の提案とEMG識別のための動作選定問題への応用”, 計測自動制御学会論文集, 査読有り, Vol. 12, No. 9, pp. 580-588, 2012
- ④ 辻敏夫, 芝軒太郎, 島圭介, 高木健, 大塚彰, 陳隆明, 5指駆動型筋電義手と筋シナジーモデルに基づく新しい制御法, 日本義肢装具学会誌, 査読無し, Vol. 26, pp. 91-96, 2010

[学会発表] (計7件)

- ① Taro Shibasaki, Keisuke Shima, Takeshi Takaki, Yuchi Kurita, Akira Otsuka, Takaaki Chin and Toshio Tsuji “Multi-channel Surface EMG Classification Based on a Quasi-optimal Selection of Motions and Channels”, 2012 IEEE/ICME International Conference on Complex Medical Engineering (CME 2012), pp. 276-279, 2nd July, 2012, ANA Crowne Plaza Kobe, Hyogo
- ② 村上隆治, 芝軒太郎, 島圭介, 辻敏夫, 大塚彰, 陳隆明, 筋電義手操作のためのバーチャルトレーニングシステムの提案と仮想 Box and Block Test の実現, 第20回計測自動制御学会中国支部学術講演会, 2011年11月26日, 岡山大学, 岡山
- ③ 中村豪, 村上隆治, 芝軒太郎, 島圭介, 栗田雄一, 辻敏夫, 大塚彰, 陳隆明, Otto Bock筋電義手操作を目的としたバーチャルトレーニングシステム, 日本人間工学会中国・四国支部九州・沖縄支部合同開催支部大会, 2011年11月26日, 下関生涯学習プラザ, 山口
- ④ 島圭介, 高木健, 芝軒太郎, 辻敏夫, 小俣透, 大塚彰, 陳隆明, 把持力増大機構を有する5指駆動型筋電義手, 第21回インテリジェント・システム・シンポジウム(FAN2011), 2011年9月2日, 神戸大

学, 兵庫

- ⑤ 村上隆治, 芝軒太郎, 島圭介, 高木健, 辻敏夫, 大塚彰, 陳隆明, 筋電義手操作を目的としたバーチャルトレーニングシステムの提案, 第2回全国電動義手研究会, 2011年3月5日, 兵庫県立総合リハビリテーションセンター, 兵庫
- ⑥ 芝軒太郎, 島圭介, 高木健, 辻敏夫, 大塚彰, 陳隆明, 偏KL情報量に基づく動作選定法~ヒトとシステムが相互に学習可能な訓練システムの実現を目指して~, 第2回全国電動義手研究, 2011年3月5日, 兵庫県立総合リハビリテーションセンター, 兵庫
- ⑦ Taro Shibasaki, Keisuke Shima, Takeshi Takaki, Toshio Tsuji, Akira Otsuka and Takaaki Chin, “A Class Selection Method Based on a Partial Kullback-Leibler Information Measure for Biological Signal Classification,” Proceedings of the 2010 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII 2010), pp. 317-322, 2010年12月21日, 東北大学川内萩ホール, 仙台

[図書] (計0件)

[その他]

ホームページ等: なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

陳隆明 (TAKA AKI CHIN)
神戸大学・医学研究科・客員准教授
研究者番号: 20437495

(2) 研究分担者

黒坂 昌弘 (KUROSAKA MASAHIRO)
神戸大学・医学研究科・教授
研究者番号: 70170115

辻 敏夫 (TSUJI TOSHIO)
広島大学・工学研究院・教授
研究者番号: 90179995

秋末 敏宏 (AKISUE TOSHIHIRO)
神戸大学・医学研究科・講師
研究者番号: 90379363

大塚 彰 (OTSUKA AKIRA)
県立広島大学・保健福祉学部・教授
研究者番号: 50280194