

# 表面筋電位を用いて操縦するロボットアームの操縦訓練支援システム - 訓練の難易度を段階的に変更する操縦訓練手法の提案 -

○下田 直樹（岡山理科大学），林 良太（岡山理科大学），  
衣笠 哲也（岡山理科大学），吉田 浩治（岡山理科大学）

## Support system for Acquisition of Maneuvering Skill of a Robot Arm Manipulation Using Surface Myoelectric Signals - Proposal of Training Scheme by Increasing Difficulty Level Gradually -

○Naoki SHIMODA (Okayama University of Science),  
Ryota HAYASHI (OUS), Tetsuya KINUGASA (OUS), and Koji YOSHIDA (OUS)

**Abstract :** In these days, various control systems for robot arms using surface myoelectric signals have been developed. Abundant pattern recognition techniques have been proposed to predict human motion intent based on these signals. However, it may become burdensome for users to train voluntary control of myoelectric signals with these systems. In this study, we are seeking to develop schemes to evoke surface myoelectric signals and facilitate skill acquisition of robot arm manipulation. In this report, we construct a simple 1-link robot arm which is controlled by estimating the wrist motion from the surface myoelectric signals on the forearm. We propose a novel training scheme which increases the difficulty level gradually. We make several training experiments for skill acquisition of robot arm manipulation with and without the proposed scheme. Then, we investigate the differences in facilitation effects of skill acquisition comparing with the results from these training experiments.

### 1. 緒言

表面筋電位を用いて制御するパワーアシストシステムやリハビリ支援システムなどが多く提案されている [1]-[4]. しかし、表面筋電位を随意的に制御できるようになるための訓練が、操縦者にとって大きな負担となることがある。人間の手足の運動は、脳からの信号が神経路を通して筋肉に伝えられて制御される (Fig.1)。運動に必要な神経路が未発達の状態であるか、あるいは脳卒中や傷害の後遺症により神経路が壊れてしまった場合に、適切な筋に脳からの信号が届かなくなることがある。しかし、近年の脳科学の発展に伴い、脳の可塑性が明らかとなり、随意的な運動を繰り返し訓練（促通訓練）を行うことによって、神経路が強化されることが分かっている [5]。人間は、生来的に運動技能を獲得しようとする能力を有しているので、負担が小さく継続的に進める促通訓練を実現することができれば、表面筋電位を適切に発生させることが可能になると期待できる。

本研究では、表面筋電位を用いて操縦する 1 リンクロボットアームを対象として、操縦に慣れていない者が操縦しようとした際の操縦性について調べ、操縦訓練によって、表面筋電位の発生を促して、操縦技能獲得を支援する手法について検討している。これまでに、手の運動方向に対して抵抗力を与えて操縦訓練を実施した場合と、抵抗力を与えずに操縦訓練を実施した場合の訓練効果について比較するとともに、発生する表面筋電位の強度変化について考察した。その結果、抵抗力を与えて訓練を実施した方が、訓

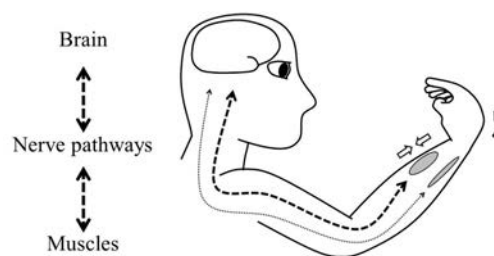


Fig. 1: Impulses from brain through nerve pathways to muscles

練効果が認められた [6]。本報告では、表面筋電位によるロボットアームの操縦に不慣れな初心者が操縦訓練を行う際に、自動制御を用いて訓練課題の達成を補助し、訓練の難易度を段階的に変更することで、訓練の負担を軽減するとともに上達を促す手法を提案する。

### 2. ロボットアームの操縦システム

#### 2.1 1 リンクロボットアーム

対象としている 1 リンクロボットアームは、操縦者の手関節の屈曲・伸展運動に対応して水平面内を 1 自由度で回転するものを試作した (Fig.2)。水平面内を回転するアームの長さは 200[mm] であり、回転軸に駆動モータ (maxon, 90[W])、減速器、エンコーダ (OMRON, 2000[P/R]) を取り付けられている。また、アームの先端には鉛直方向に延びた 70[mm] のポールがあり、角度目盛盤と

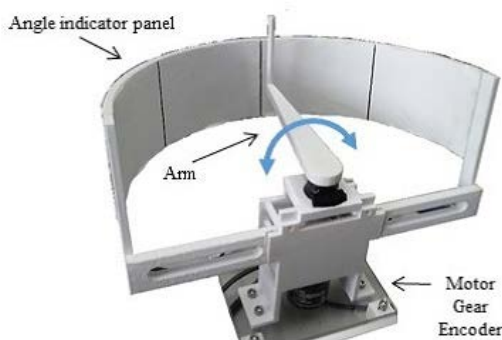


Fig. 2: Experimental model of the robot arm



Fig. 4: Fixing device for the arm



Fig. 3: Position of the surface myoelectric sensors

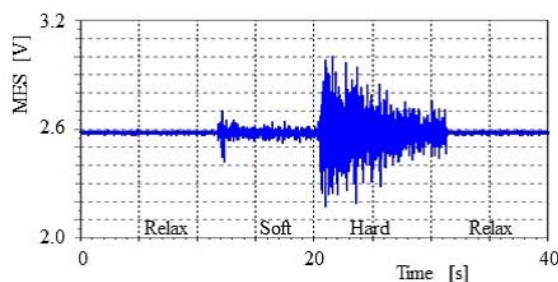


Fig. 5: Sample of myoelectric signal

合わせて操縦者がアームの回転角を視認しやすいようにしている。

## 2.2 表面筋電位による操縦

手関節の屈曲筋と伸展筋がある前腕の表皮に、それぞれ1つ（合計2つ）の表面筋電位センサ（追坂電子，2極乾式筋電センサ）を取り付ける（Fig.3）。操縦時の腕の条件を揃えるため，表面筋電位センサを取り付けた前腕は固定台に面ファスナーを使って拘束する．表面筋電位センサを取り付けた前腕を固定台に拘束している様子を Fig.4 に示す．

手関節の屈曲筋または伸展筋に対応した部位から測定される表面筋電位の大きさが，設定した閾値を超えるときに，超えた値に比例する速度の大きさを目標角度を増減させることで，ロボットアームの回転角度を制御する．ただし，屈曲筋と伸展筋に対応する部位からの表面筋電位の大きさが，設定した閾値を両方同時に超えないとき，あるいは両方同時に超えたときには，目標角度の増減を行わないことにする．すなわち，これらのときロボットアームは回転しない．操縦訓練を開始する前に，操縦者の脱力時に測定される表面筋電位の大きさから，ロボットアームの目標角度を増減するときの閾値を設定する．本実験装置で用いる筋電センサの出力値（MES: Myoelectric Signal）は，操縦者によっても異なるが，定常ゲインの値は概ね約 2.6[V] 前後であり，最大振幅は 0.4[V] 程度となっている．Fig.5

に，脱力時（Relax），やや力んだ時（Soft），強く力んだ時（Hard），そして再びに脱力した時（Relax）を連続して測定した筋電センサの出力値の一例を示す．操縦訓練の際には，測定される筋電センサの出力値を整流した（定常ゲインを引いて絶対値をとった）ものを表面筋電位の大きさとする．そして，その大きさが設定した閾値を超えたとき，超えた値に比例した速さ（超えた値が 0.25[V] のとき 25[deg/s]）で，ロボットアームを操縦することができる．なお，操縦者ごとに，また屈曲筋側と伸展筋側とで，表面筋電位の特性が異なるので，設定する閾値もそれぞれ異なるものとなる．

## 3. ロボットアームの操縦訓練

### 3.1 訓練課題

ロボットアームを操縦する訓練課題を以下の通りにする．本訓練システムは，左右の手に対応することができるが，以下では，右手に対応した場合を仮定して詳細を述べる．

操縦者には手関節を脱力した状態にして，自由に回転できるように設定する．一方，ロボットアームを 3 時の方向に向けた状態を回転角度 0[deg] に設定して初期状態とする．そして，手関節の屈曲方向に対応する反時計方向をロボットアームの回転角度の正方向にとる．訓練課題は，制限時間 40[s] 以内に Fig.6 に示すように2つの角度（45[deg] と 135[deg]，以下目的角度と呼ぶ）を通過して，

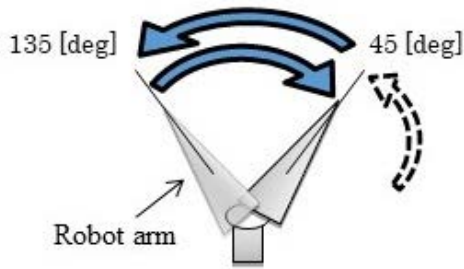


Fig. 6: Target task of the robot arm maneuvering

できるだけ往復回数を多くすることとする。ただし、それぞれの目的角度に対して、往復範囲内の方向に 15[deg] の許容範囲を設けて、許容範囲に到達しなければ往復回数をカウントしないことにする。なお、許容範囲に到達してカウントされる往復回数と合わせて、そのときの目標角度との誤差も訓練課題の達成度評価の対象とする。

### 3.2 訓練時の負担の軽減

経験の浅い操縦者は、狙った筋を収縮させることを意識しすぎると、力を抜くべきときに弛緩がうまくできないことがある。また、屈曲筋あるいは伸展筋の一方の筋が弱く、その筋の収縮に呼応するようにもう一方の筋が収縮してしまうことがある。そのため従来は、筋の分離を確実にするための訓練の実施や、表面筋電位センサの感度を調整する対策が試みられていた [2][3]。

本研究では、表面筋電位によるロボットアームの操縦に不慣れた初心者が操縦訓練を行う際には、自動制御を用いて訓練課題の達成を補助することを考える。このことによって、不慣れた操縦者の訓練時の負担を軽減し、継続的な訓練を容易にすることを目指す。ただし、自動制御によってロボットアームを動かすため、操縦者の随意的な操縦は制限されることになる。そこで、訓練課題の達成度評価に応じて、与える補助を段階的に減らしていくことで、操縦技能の獲得を支援する。

### 3.3 段階的な補助の低減

訓練課題の達成を容易にする条件を、Table 1 に示すように、レベル 1 からレベル 7 の 7 つの段階に分ける。レベル 7 は、訓練課題の達成を容易にする補助はなく、2.2 節で述べた条件のままである。

前述のとおり訓練課題は、2 つの目的角度を通過して、制限時間内にできるだけ多くロボットアームを往復させることとしている。操縦時は、屈曲筋と伸展筋から交互に適切な表面筋電位が発生していることが望ましいが、操縦に

Table 1: Difficulty levels in target task

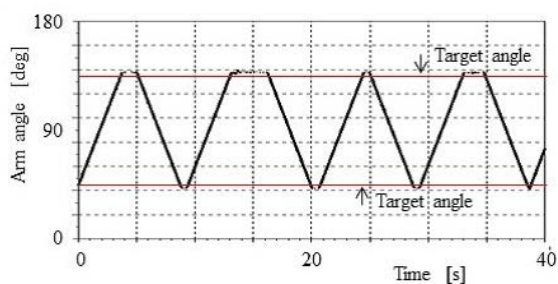
LV	Proper side MES	Opposit side MES	Control of arm (Angular velocity)
1	Active at least once	Any	Move to target (Const. 25[deg/s])
	Inactive at all	Any	Stop at start point
2	Active at least once	Inactive	Move to target (Const. 25[deg/s])
		Active	Move to target (Const. 5[deg/s])
	Inactive at all	Any	Stop at start point
3	Active for a while	Inactive	Move to target (Const. 25[deg/s])
		Active	Move to target (Const. 5[deg/s])
	Inactive at all	Any	Stop at start point
4	Active	Any	Move to target (Const. 25[deg/s])
	Inactive	Any	Stop moving
5	Active	Inactive	Move to target (Const. 25[deg/s])
		Active	Move to target (const. 5[deg/s])
	Inactive	Any	Stop moving
6	Active	Inactive	Move to target (Proportional to MES)
		Active	Stop moving
	Inactive	Any	Stop moving
7	Active	Inactive	Move to target (Proportional to MES)
		Active	Stop moving
		Inactive	Stop moving
	Inactive	Active	Back to start (Proportional to MES)

不慣れた初心者には、適切な表面筋電位を発生させることは容易ではない。そこで、訓練課題の達成を容易にするための条件を以下のように段階的に考える。

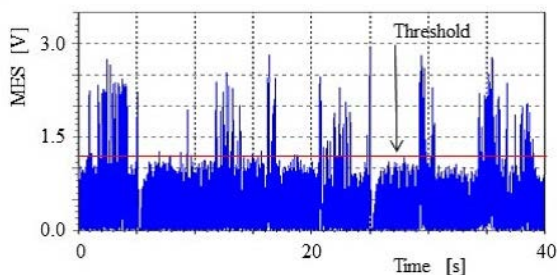
まず、レベル 1 の条件は、ロボットアームが運動するべき方向に対して適切な筋（屈曲筋または伸展筋）からの表面筋電位の大きさが設定した閾値を一瞬でも超えれば、その後はロボットアームを自動的に目的角度に到達するまで制御することを考える。なおその際、不適切な筋（伸展筋または屈曲筋）からの表面筋電位の発生には、かかわらないこととする。この補助によって、訓練課題の達成は容易になると考えられるが、ロボットアームを自動的に目的角度に到達するまで制御することから、途中でロボットアームの動きを変更することができないので、操縦者の随意的な操縦は制限されることになる。レベル 1 の条件では、ロボットアームの運動に合わせて表面筋電位を発生させる意識の訓練効果が期待される。

レベル 2 の条件は、レベル 1 の条件に、不適切な筋からの表面筋電位の大きさが閾値を超えてしまっている間は、ロボットアームの運動の速さを遅くすることにする。レベル 2 の条件では、不適切な筋の活動を抑制する訓練効果が期待される。

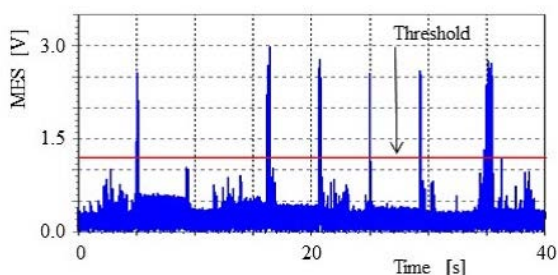




(i) Angle of the robot arm



(Flex side)



(Extend side)

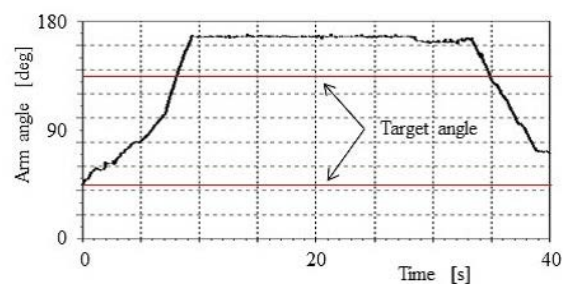
(ii) Surface myoelectric signals.

Fig. 7: Result of the first training with Level 1.

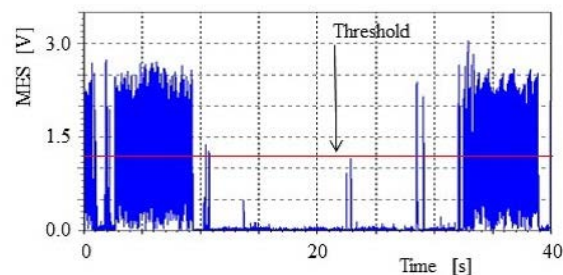
レベル3の条件は、レベル2の条件に、表面筋電位の大きさが設定した閾値を超える状態を一定時間持続しなければ、ロボットアームが目的角度に向けて自動的に運動を開始しないことにする。レベル3の条件では、適切な筋から表面筋電位を発生させることの訓練効果が期待される。

レベル4の条件は、適切な筋からの表面筋電位の大きさが設定した閾値を超えている間だけ、一定の速さでロボットアームを目的角度に向けて運動させることとする。適切な筋からの表面筋電位の大きさが設定した閾値を超えない間は、ロボットアームは停止する。ただし、不適切な筋からの表面筋電位の発生には、かかわらないこととする。レベル4の条件では、適切な筋から表面筋電位を持続的に発生させることの訓練効果が期待される。

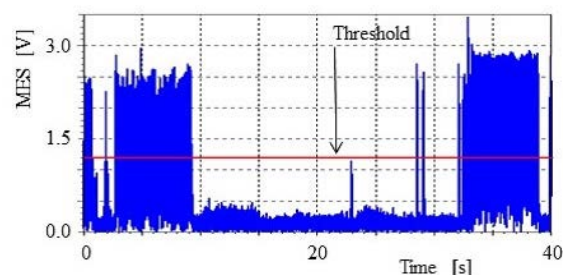
レベル5の条件は、レベル4の条件に、不適切な筋からの表面筋電位の大きさが閾値を超えている間は、ロボットアームの運動の速さを遅くすることにする。レベル5の条件では、不適切な筋の活動を抑制するとともに、適切な筋から表面筋電位を持続的に発生させることの訓練



(i) Angle of the robot arm



(Flex side)



(Extend side)

(ii) Surface myoelectric signals.

Fig. 8: Result of the second training with Level 7.

効果が期待される。

レベル6の条件は、適切な筋からの表面筋電位の大きさが設定した閾値を超えたとき、超えた値に比例した速さで、ロボットアームを目的角度に向けて運動させる。ただし、不適切な筋からの表面筋電位の大きさが閾値を超えている間は、ロボットアームの運動を停止することにする。レベル6の条件では、不適切な筋の活動を抑制するとともに、適切な筋から表面筋電位を随意的に発生させることの訓練効果が期待される。

#### 4. 訓練の比較

表面筋電位によるロボットアームの操縦に不慣れな初心者だが、レベル1の条件で操縦訓練を行った場合と、レベル7の条件で操縦訓練を行った場合の比較を行った。

被験者として、本訓練装置のロボットアームの操縦に不慣れな右利きの初心者健常者1名の協力を得た。制限時間40[s]の訓練課題に対して、1回目の操縦をレベル1で、2

回目の操縦をレベル7で実施してみた。また、2回の操縦訓練を実施した後に、被験者からの感想を得た。その内容は、「いずれの訓練も屈曲運動より伸展運動の際の操縦が難しいと感じた。ただし、レベル1では比較的楽であったが、レベル7になると、とても難しく感じた。」というものであった。

レベル1での1回目の操縦訓練でのロボットアームの角度を Fig.7-(i) に、そのときの表面筋電位の強度を Fig.7-(ii) に示す。また、レベル7での2回目の操縦訓練でのロボットアームの角度を Fig.8-(i) に、そのときの表面筋電位の強度を Fig.8-(ii) に示す。

これらの結果から、レベル1の条件では、4回以上の往復回数を達成できている一方で、レベル7の条件では1回も往復できていないことが分かる。レベル1の条件では、屈曲筋および伸展筋の表面筋電位が、随意的でないときにも持続的に小さく発生しているが、目的角度に応じて瞬間的ではあるが、適切な筋からの大きな表面筋電位の発生を確認することができる。レベル1の条件で、繰り返し操縦訓練することで、ロボットアームの運動に合わせて、随意的に適切な筋から表面筋電位を発生させることができるようになることが期待される。一方、レベル7の条件では、はじめの伸展の際に、目的角度に対して、適切な筋だけでなく不適切な筋も大きな表面筋電位が同時に発生してしまい、ロボットアームが目的角度に到達するまで時間がかかっている様子が確認できる。また、折り返しの屈曲の際には、しばらくの間、適切な筋からの表面筋電位が閾値を超えることができず、ロボットアームが止まっている様子が分かる。そしてしばらくして、適切な筋だけでなく不適切な筋も大きな表面筋電位が同時に発生して、少しずつ目的角度にロボットアームが運動している様子がわかる。

以上から、操縦に不慣れな初心者は、適切な筋から随意的に表面筋電位を発生させることは難しく、訓練課題の達成が容易となる条件から段階的に訓練をすることで、訓練の負担を軽減することができると考えられる。

## 5. 結言

本報告では、表面筋電位によるロボットアームの操縦訓練を行う際に、自動制御を用いて訓練課題の達成を補助するシステムの適用を考えた。そこで、手関節の運動に対して、随意的に適切な筋から筋電位を発生できるかどうかに着目して、7つのレベルの訓練条件を設定した。そして、提案する訓練条件を段階的に変更することで、不慣れな操縦者の訓練時の負担を軽減し、継続的な訓練を実現することを考えた。また、最も課題の達成が容易なレベル1の条件と、課題の達成を容易にする補助のないレベル7の条件とで、操縦に不慣れな初心者が操縦したときの結果を比較

した。その結果、訓練課題の達成が容易となる条件から段階的に訓練をすることで、訓練の負担を軽減する可能性を見出すことができた。

本研究は JSPS 科研費 JP17K01491 の助成を受けたものであり、ここに記して謝意を表す。

## 参考文献

- [1] Sakakima H, Ijiri K, Matsuda F, Tominaga H, Biwa T, Yone K and Sankai Y: “A newly developed robot suit hybrid assistive limb facilitated walking rehabilitation after spinal surgery for thoracic ossification of the posterior longitudinal ligament”, *Hindwai Publishing Corp. Case Reports in Orthopedics* **013** 621405(2013)
- [2] Dawson M, Fahimi F and Carey J: “The development of a myoelectric training tool for above-elbow amputees”, *The Open Biomedical Engineering Journal* **6** pp 5–15(2012)
- [3] Ison M, Vujaklija I, Whitsell B, Farina D and Artemiadis P: “Simultaneous myoelectric control of a robot arm using muscle synergy-inspired inputs from high-density electrode grids”, *IEEE International Conference on Robotics and Automation* DOI: 10.1109/ICRA.2015.7140108(2015)
- [4] Rong Song, Kai-yu Tong, Xiaoling Hu and Wei Zhou: “Myoelectrically controlled wrist robot for stroke rehabilitation”, *Journal of Neuroengineering and Rehabilitation*, 10:52(2013)
- [5] 林良太, 石嶺友康, 川平和美, 余永, 辻尾昇三: “脳卒中片麻痺上肢の運動機能回復訓練を支援するための電磁石を用いた伸張反射誘発装置の開発”, 計測自動制御学会論文集, Vol.45, No.12, pp.630–637(2009)
- [6] R Hayashi, T Sawada, T Kinugasa, and K Yoshida: “On facilitating method for skill acquisition of robot arm manipulation using surface myoelectric signals”, *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series* **1065**, doi:10.1088/1742-6596/1065/17/172004(2018)