

多点振動子アレイによる義手の体性感覚フィードバック

Somatosensory feedback of prosthetic hand by multi vibrator array

○ 望月大二郎(電通大) 中村達弘(東大) 加藤龍(電通大)

森下壮一郎(東大) 横井浩史(電通大)

Daijiro MOCHIZUKI(The University of Electro-Communications : UEC), Tatsuhiko NAKAMURA(Tokyo University), Ryu KATO(UEC), Soichiro MORISHITA(Tokyo University) and Hiroshi YOKOI(UEC),

Abstract: The sensory feedback technology of hand posture and gripping force of myoelectric hand prosthesis gives useful information for operations of activities of daily life. However, the conventional studies mainly have dealt with only in the tactile feedback, and ignored importance of deep sensation on motor control. In this paper, authors focused on feedback of deep sensation related to the finger motion of myoelectric hand prosthesis, and developed deep sensation feedback system using vibrator array affixed to the skin surface of forearm. This system is designed as modulating various vibration patterns according to finger angle of robot hand. In order to investigate the effectiveness of this system, three kinds of experiments related to identification of hand postures are conducted with healthy persons. As a result, six simple postures of robot hand were identified with the probability of more than 70% using proposed feedback system.

Key Words: Prosthetic Hand, Sensory Feedback, Deep Sense, Vibrator Array

1. はじめに

近年、上肢切断者の運動機能再建のために筋電義手の研究・開発が活発に行われており、臨床現場でも用いられるようになってきた⁽¹⁾。このような随意制御可能な義手の操作性向上を目的として、義手の指先の触圧覚をフィードバックする試みが行われ、把持タスクにおいてパフォーマンス向上の効果が確認されている⁽²⁾。一方で、ヒトの運動制御においては、触覚等の表在感覚に加えて筋張力・関節角度などの深部感覚が重要な役割を果たしている。特に柔軟物把持では筋張力情報に基づいて力制御が行われ、また把持アプローチでは関節角度情報を元に姿勢が調整される。これらのことから、義手の操作性を向上し、直感的に操作し得る高性能な義手を実現するには、触圧覚に加えて深部感覚に相当する情報の提示が必要である。また深部感覚は身体の自己帰属感を得る上でも重要だと考えられており、適切にフィードバックすることで、ヒトに受け入れられ易い義手の実現や、操作習熟の短期化が期待できる。

以上の背景から本研究では、義手の操作性向上に寄与する深部感覚提示法の確立を目的とし、ヒトに提示すべき義手の体性感覚情報の種類と提示手法を検討する。本稿では多点での皮膚の振動刺激を用いた義手の状態のフィードバック装置を提案する。さらに、義手に設置した曲げセンサで義手の指の角度情報を取得し、開発した装置を用いて、多点の皮膚の振動刺激パターンとして空間的に義手姿勢をヒトにフィードバックする被験者実験を行い、本装置の有効性を検証したので報告する。

2. 情報提示の要件と手法

義手に関する触覚と深部感覚をヒトに持たせるためには、義手指先にかかる圧力や姿勢と言った義手の情報を、ヒトの何らかの感覚に提示する必要がある。よって本研究で対象とする義手の状態のフィードバック装置は、これら2種類の情報が提示できる必要がある。義手に関するこれらの感覚を直感的に持たせるためには、視覚や聴覚ではなく体性感覚への刺激として提示するべきである。そのような情報提示に利用できるヒトの体性感覚には、力覚などの深部感覚、圧覚などの機械的な皮膚感覚、その他の皮膚感覚と

して痛覚と温覚が挙げられるが、刺激手段の簡便性や刺激装置の規模、感覚の神経伝達速度を考慮し、皮膚の機械的刺激を採用した。

皮膚の機械的刺激の手法として、圧刺激、機械振動刺激、電気刺激が考えられる。電気刺激はエネルギー効率がよく順応しにくいという特長があるが、義手の制御信号である筋電の検出に影響があり義手動作が不安定になるという難点がある。圧刺激は筋電への影響が少ないが、順応が早い。これらに対して、機械振動は圧刺激よりも順応が起こりにくく、最大で15段階程度という高分解能な強度識別が可能とされている⁽³⁾。筋電への影響も電気刺激と比較して少ない。以上のことから、本研究では機械振動刺激を採用する。

ヒトの深部感覚には筋張力から知覚される力覚、筋伸長と関節角度情報から知覚される身体の位置覚があり、それらの変化から運動覚が知覚される。義手においてヒトの深部感覚に相当する情報はそれぞれ義手の関節角度、義手にかかる力である。一方、本稿で行う実験の目的は、開発した義手情報のフィードバック装置の検討であり、義手の操作性向上に有用な義手情報の探索ではない。よって、曲げ

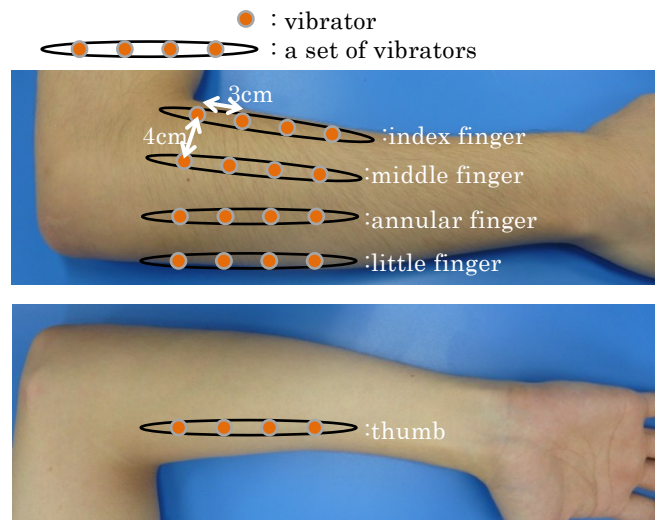


Fig. 1 Placement of vibrators

センサを用いることで比較的簡便に取得できる関節角度を、提示する義手の情報として用いた。

3. 多点振動子アレイを用いた感覚フィードバック装置

振動強度が可変である振動子を、皮膚表面に刺激位置が識別可能な間隔で配置し、義手の指先にかかる触圧を振動強度に、義手の指関節の曲率を刺激の位置に対応づけることで、2種類の情報提示を実現する。義手の指先にかかる圧力の提示は先行研究によって有効性が示されているので検討は行わず、本研究では義手の関節角度の提示のみを対象とした。アレイ状に配置した振動子の振動パターンで義手の姿勢提示を行い、提案手法の有効性を検討する。

4. 提案装置を用いた義手姿勢の識別実験

実験では、5指の屈曲に対応した振動パターンの変化による義手姿勢の提示を行う。振動パターンから義手姿勢が推測できるか否かを確認することで、本手法の有効性を検証する。事前に予備実験を行い、ヒトに認知し得る多段階の振動強度を設定できる振動子を選定し、さらに識別可能な刺激点間距離を決定した。

提案装置を用いて、まず5指の屈曲を提示する実験を行い、5指の識別可能性を確認した(実験1)。次に1指での屈曲角度を提示する実験を行い、関節角度の分解能を検討し

た(実験2)。最後に隣接する2指の屈曲角度を対象とする識別実験を行い、複数の指が同時に運動する際の識別可能性について検討した。

4-1 実験環境

振動子として、市販の密閉型小型 DC モータ(VMT-003 Yastugatake club 製 直径約 11mm, 厚さ約 3mm, 張付面に対して水平に振動)を選定した。振動強度変化は個人差があるものの最低でも3段階程度が識別可能であることを予備実験で確認した。振動子間距離は前腕における圧覚の2点弁別距離を参考に3cmとし、やはり予備実験により振動位置の識別精度が90%以上であることを確認した。

成人の前腕の長さを約20cmと考え、中央での切断を想定して残存した前腕に収まる大きさとするため、3cm間隔に設置した振動子4つを1セットとする。義手の5指に対応する5セットを用意した。振動子の配置は、手の解剖学的構造を参考にし、前腕外側に示指から小指に対応する4セットを、内側に親指に対応する1セットを配置した。セット間の距離は4cmとし、互いに平行に配置した。配置図をFig.1に示す。各セットのモータは4つのうち1つが常に振動しており、指の屈曲に伴う曲げセンサの曲率の増加に従って、振動するモータが手首側から肘側のものに変化する。実験で用いる義手は本研究室で開発されたもので、5指に14関節自由度を持つ。指ごとに、全関節を跨ぐ曲げセンサを計5本配置し、指姿勢情報として曲り量を得る。被験者は健康な2名の女性である。

4-2 実験設定：実験で提示する姿勢

実験1で提示する姿勢は、義手の全指を伸ばした姿勢(stretch)を安静状態として、母指・示指・中指・薬指・小指いずれかの屈曲と全指屈曲(all finger bend)の6種である。全姿勢を一度ずつ計6回提示し、1セッションとした。

実験2では、義手の示指とそれに対応する振動子セットを用いる。提示する姿勢と対応する振動子の振動状態をFig.2に示す。伸展状態(stretch: Fig2(a))を安静とし、3段階(浅い屈曲: shallow bend: Fig2(b), 深い屈曲: deep bend: Fig2(c), 完全屈曲 full bend: Fig2(d))の屈曲である。全姿勢を2度ずつ計6回提示して、これを1セッションとした。

実験3では、義手の示指、中指と、それに対応する振動子セットを用いる。提示する姿勢は、両方の指の伸展状態を安静とし、各指3段階(shallow, deep, full bend)の屈曲の計6種類である。全姿勢を1度ずつ計6回提示して、これを1セッションとした。

全ての実験で、被験者には実験開始前に提示姿勢を教示し、義手の姿勢、姿勢変化とそれに応じた振動刺激位置の変化を対応付けた。義手を被験者から見えないう移動した後、ランダムな順に提示し、義手の姿勢を質問した。姿勢提示は毎回安静状態に戻してから行った。すべての実験は5セッション行い、セッション間に姿勢を再び教示した。

5. 結果と考察

提示した姿勢の識別率を検証するため、実験1の全セッションでの平均識別率をFig.3に示す。全セッション平均で7~80%の識別率であった。これは、6種類の提示姿勢識別のチャンスレベルである17%と比べ、十分に高いと考えられる。ここから、本手法を用いた5指の動作識別は可能であると結論した。

識別率の偏りの検討のため、各提示姿勢の識別率をFig.3に示す。中指と薬指の識別率が低い。中指と薬指に対応する振動子セットは、最も振動子が密集した位置にある。この配置の為に、識別率が低かったと考えられる。識別率を

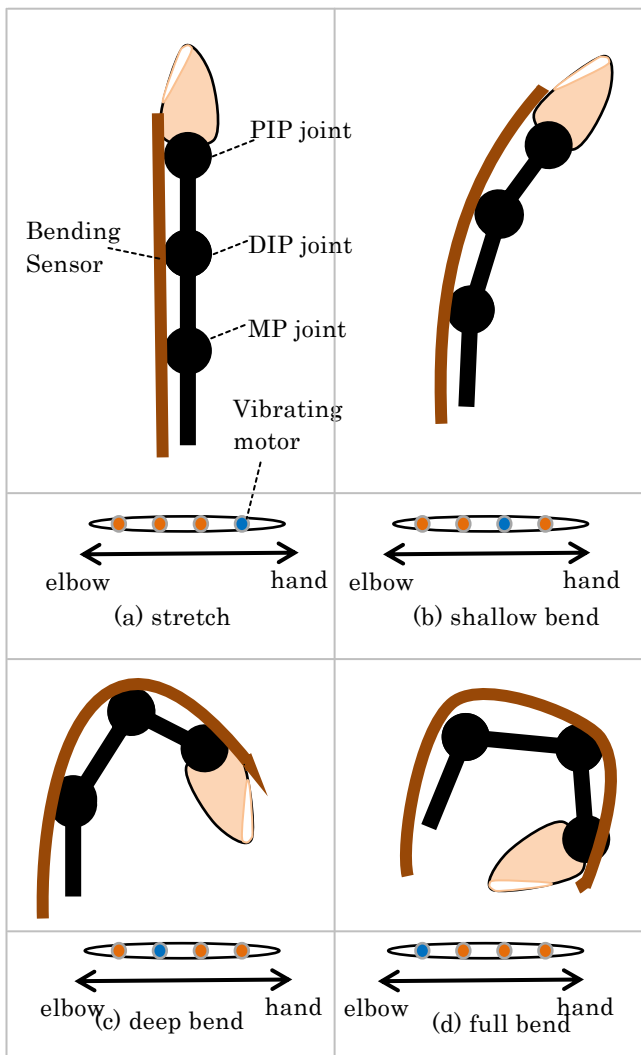


Fig. 2 Bending posture and vibration mode. Four levels of finger bend. Vibrating positions are switched with finger bend from hand side to elbow side on forearm.

向上させるためには、振動子の配置を再考する必要がある。

次に、単指の屈曲について何段階の識別が可能か検討するため、実験2の被験者ごとの全セッションでの平均識別率と各提示姿勢の識別率を Fig.4 に示す。被験者 A は全セッションでの平均識別率は低いが、完全屈曲のみ高い識別率を示した。被験者 B は全セッション平均でも各姿勢でも高い識別率を示した。それぞれ、1段階と3段階の角度識別が可能と考えられる。以上から提案手法は、個人差はあるものの3段階の姿勢提示が可能である。ただし被験者数が少ないため、さらなる実験と検証を要する。

識別失敗の傾向から、失敗の原因を考察するため、実験2において識別が失敗した際の誤認の内訳を Table 1 に示す。どちらの被験者も、shallow を deep と、deep を full bend と誤認することが多い。完全屈曲時以外の、手首寄りの刺激が知覚し難くなっていたと考えられる。実験設定から、手首側の振動受容器の順応が原因であろう。実験中の多くの時間が安静状態であり、一番手首側のモータが振動している時間が長い。これによって手首側の振動受容器が刺激に順応して反応しなくなり、結果として肘側の受容器の反応が知覚されたと推測される。

提示する情報の増加が識別率に与える影響を検討するため、実験3の、被験者ごとの全セッションでの平均識別率と、各提示姿勢の識別率を Fig.5 に示す。実験2と比べ、全セッション平均での認識率が低くなっている。これは主に完全屈曲以外の識別率の低下による。

識別率低下が起きた理由を考察するため、識別失敗の時の誤認の内訳を Table 2 に示す。識別失敗は各指内での誤認が主な原因であり、示指の刺激を中指と誤認するなどの、指の間の誤認は少ない。指が2本になることで提示される姿勢の種類が増えたが、指間の誤認が起きていないことから、指の識別は出来ていると言える。また実験2と同じく、順応によって手首寄りの刺激の知覚が困難になったことが誤認の原因であると推測される。さらに実験3は実験2に続いて行っているため、順応がより広範囲で起きた為に、実験2と比較してさらに識別率が低下したと推測される。

全実験を通して、実験1で5指6姿勢の識別率が高かった被験者 B が、実験2, 3でも比較的高い識別率を保っていた。指の識別が出来ることは、刺激の混同が少ないことを意味する。本研究の課題として、まず5指の識別率を向上させる配置を決定することが重要である。

Table 1 Misidentify in experiment 2

Sub. A	success	failure			
		all failure	to shallow	to deep	to full bend
shallow	3	7		6	1
deep	4	6	1		5
full bend	9	1	-	1	
Sub. B	success	failure			
shallow	9	1		1	-
deep	8	3	1		2
full bend	10	0	-	-	

-- : No data

Table 2 Misidentify in experiment 3

Sub. A	success	all failure	failure	
			in one finger	between fingers
Sub. A	13	17	15	2
Sub. B	21	9	9	-

-- : No data

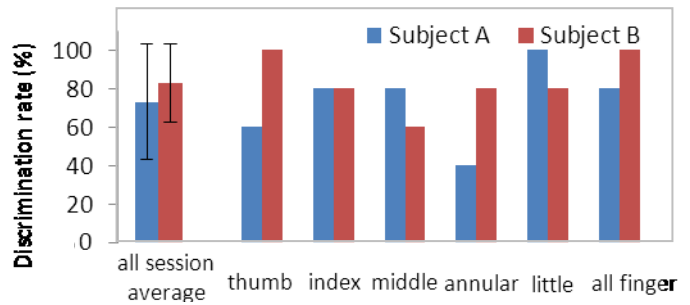


Fig. 3 Results of experiment 1

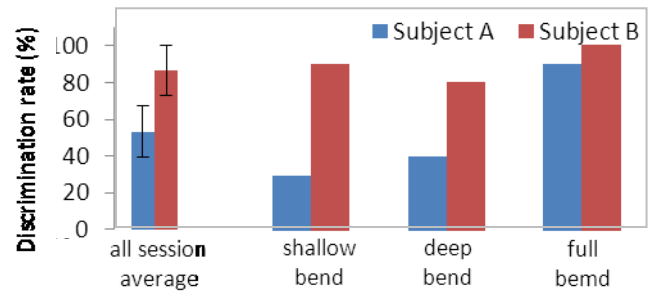


Fig. 4 Results of experiment 2

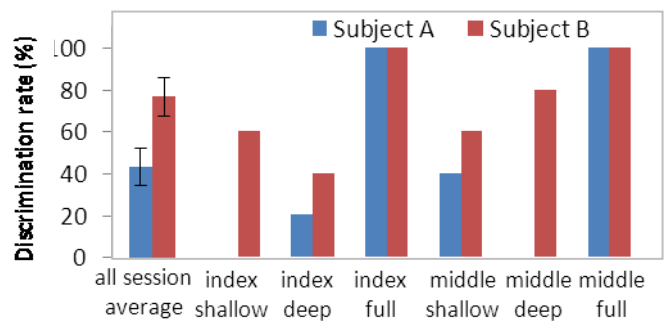


Fig. 5 Results of experiment 3

6. おわりに

本稿では義手の体性感覚情報の提示を目的として振動子アレイを用いた手法を提案し、5指の動作識別が可能であること、3段階の関節角度の変化が提示できることを示した。また順応が識別率に影響している可能性が示唆された。今後は被験者数の追加と共に、順応が識別率に与える影響の定量的評価と、5指の識別率が向上するような振動子の配置方法の検討を行う。

参考文献

- (1) 川村次郎, 福井信佳, 藤下武, 青山孝, 古川宏, 上肢切断者の現状と動向 -近畿地区におけるアンケート調査から-, リハビリテーション医学, vol.36 no.6, pp.384-489, 1999
- (2) 奥野竜平, 吉田正樹, 内山孝憲, 赤澤堅造, 可聴周波数以下の皮膚振動刺激を用いた義手感覚フィードバック, 信学技報MBE96-137, pp.99-106, 1997
- (3) 文部省科学研究費補助金 基盤研究(B-2) 課題番号 06452407 研究代表者「清水 豊」, インターネットによる情報公開「触覚伝達機器の設計支援情報」: <http://www.tsukuba-tech.ac.jp/info/trekyu:8080/index.html/kaken/home.html>