法政大学学術機関リポジトリ
HOSEI UNIVERSITY REPOSITORY

PDF issue: 2025-07-04

筋電義手のための振動提示による触覚フィードバック装置の開発

小林, 耕太 / KOBAYASHI, Kota

(出版者 / Publisher)
法政大学大学院理工学研究科
(雑誌名 / Journal or Publication Title)
法政大学大学院紀要. 理工学・工学研究科編 / 法政大学大学院紀要. 理工学・工学研究科編
(巻 / Volume)
59
(開始ページ / Start Page)
1
(終了ページ / End Page)
7
(発行年 / Year)
2018-03-31
(URL)
https://doi.org/10.15002/00014796

筋電義手のための振動提示による触覚フィードバック装置の開発

DEVELOPMENT OF TACTILE SENSE FEEDBACK DEVICE BASED ON VIBRATION FOR A MYOELECTRIC PROSTHETIC HAND

小林耕太
Kota Kobayashi
指導教員　石井千春　教授

法政大学大学院工学研究科機械工学専攻修士課程

The purpose of this study is to develop a new tactile sense feedback device for myoelectric prosthetic hand users that can convey the tactile sense in real time. First, a vibration sensor which can be attached to the fingertip of the myoelectric prosthetic hand and a tactile sense feedback device with linear vibration actuators which can be attached to the upper arm of the user were developed. Using the vibration sensor, surface roughness of the object can be measured through the amplitude of vibration at the fingertip. The tactile sense feedback device is attached to the user's upper arm, and when the user touched the object, the tactile sense is conveyed to the user's upper arm by vibration of linear vibration actuators. In addition, the magnitude of the vibration which is presented to the user's upper arm is changed in proportion to the surface roughness of the touched subject. Thus, the user can distinguish the roughness of the touched object in real time. Second, investigation of the tactile sense which the user can feel the vibration at the upper arm was performed using the vibration with fixed frequency and variable amplitude (Method 1) and the vibration with fixed amplitude and variable frequency (Method 2). As a result, the range of amplitude from 0.83V to 2.5V, and the range of frequency from 92Hz to 150Hz were determined as the vibration to be presented. In addition, the vibration with variable frequency and variable amplitude (Method 3) was also constructed as the vibration to be presented. Finally, distinction experiment of the roughness was carried out for the 3 kinds of sand papers using the Method 1, Method 2 and Method 3. As a result, the Method 1 showed the highest distinction rate among 3 methods.

Key Words *: Sensory feedback, Tactile sense, Myoelectric prosthetic hand, Roughness, Vibration*

１．緒論

筋電義手とは，筋肉を動かす際に発生する筋電位と呼ばれる生体信号により動作を識別し，内蔵されたアクチュエータを起動させ，物体を掴む，離す動作を可能にした義手である．自分の意思で操作することができる優れた義手であるが，物体を把持する際の状況の確認が目視に依存するという問題点があり，把持力や触覚などを使用者にフィードバックする機能が望まれる．

そこで近年，筋電義手の感覚フィードバックに関する研究が行われており，文献[1]では力覚のフィードバック装置を開発している．これは，フィードバック装置を使用者の上腕部に装着し，モータでベルトを巻き取り，腕を圧迫することで使用者に筋電義手の把持力を感知させるものである．また，把持した物体の硬さに応じてベルトの巻き取り速度を変化させることで，物体の硬さの判別を可能にしている．文献[2]では，温度覚のフィードバック装置を開発している．これは，フィードバック装置を使用者の上腕部に装着し，ペルチェ素子と呼ばれるペルチェ効果を利用した半導体熱電素子の温度制御を行い，義手の指先で触れた物体の温度を上腕部に感知させるものである．文献[3]では，振動子による感覚フィードバック装置を開発し，使用者に振動子を取り付け，義手の把持力に応じて振動の振幅を変化させることで，感覚をフィードバックすることを試みている．

触覚フィードバックの研究例として，文献[4]および文献[5]では，仮想空間での操作感，臨場感を向上させるため，指先に微細な電気的刺激を加える触覚ディスプレイを開発し，物の硬さ，物の触り心地の提示を試みている．

本研究では，感覚のうちの物体の粗さを感じ取る触覚を筋電義手装着者の上腕部にフィードバックすることを

目的とする．先行研究[6]では，超小型トラックボール(Miniature Track Ball : MTB)による粗さ検出方法を提案し，複数の振動モータで構成された触覚フィードバック装置を開発した．しかし，MTB による粗さの検出方法では，一定距離間物体をなぞることで粗さを計測するため，計測から振動を提示するまでに時間差が発生し，瞬時に触覚を提示できないことが課題となった．

そこで本研究では，リアルタイムで触覚のフィードバックが可能である触覚フィードバック装置の開発を目的とし，筋電義手で物体に触れたこと，および物体の粗さを装着者が感じ取れる装置を開発した．提示方法としては，リニア振動アクチュエータを用いた触覚フィードバック装置を上腕部に取り付け，義手が物体に触れた際に検出した振動の振幅値に応じて振動の振幅，周波数を変えて，上腕部に振動を提示する．また，この際に検出される振動の振幅値はなぞった物体の粗さに応じて大きくなるため，提示される振動が大きくなり，物体に触れたこと，物体の粗さを感じることができる．

本稿では，上腕部への適切な振動の提示方法を検討するため，振動の刺激強度の要因として考えられる，振幅と周波数に着目し，双方を変化させて上腕部が知覚できる刺激強度と知覚できない刺激強度の境である絶対閾を求める感覚調査実験を行った．また，その結果に基づく 3 種類の振動の提示方法を用いて粗さ判別実験を行った．

２．触覚フィードバック装置と振動センサの製作

（１）触覚について

人間は，皮膚や関節，筋肉に生じる振動，圧力等による機械的刺激，または温度，痛み等から感覚を得る．これらの感覚は大きく分けて皮膚感覚，深部感覚に分類され，触覚は皮膚感覚から得られる感覚である．触覚に関わる受容器は 4 種類存在し，これらから振動，圧力，曲率等の複合した情報を刺激として受け取ることで，物体に触れたこと，物体の粗さ，形状を感じることができる．

本研究では，触覚に関わる刺激のうち，振動に着目して，物体に触れたこと，物体の粗さの再現を目的に装置の開発を行った．

（２）触覚フィードバック装置の製作

事故などによって後天的に上腕部より末端の部位を失った義手使用者の割合が全体の 67%を占めているため[7]，上腕部用の触覚フィードバック装置を開発した．以下に開発した触覚フィードバック装置について述べる．

装置の外観を図 1 に示す．寸法は 19W×40D×7H(mm)であり，振動アクチュエータにより上腕に振動を提示する．上腕部は指先に比べ触受容器が少なく，微細な振動を感じることができないため，より大きな振動を提示するか，広い範囲に振動を提示する必要がある．このため，触覚フィードバック装置は上腕三頭筋と上腕二頭筋を囲むベルトに，振動アクチュエータを 3 個取り付ける構造とした．これにより，上腕部の広い範囲に振動を伝えることができる．

振動アクチュエータには，日本電産コパル株式会社のリニア振動アクチュエータ LD14-002 を使用した．駆動方式はリニア駆動であり，電圧値に応じて内部の重りを往復直線運動させることで，振動が発生する．そのため，出力電圧の差（振幅）が大きいほど振動が大きくなる．本体の共振周波数は 150Hz である．

リニア振動アクチュエータのベルトへの取り付け機構は以下の仕様とした．リニア振動アクチュエータをアルミ板のくり抜いた穴に納める（振動部）．その上にベルトを載せ，上から金属板で挟み込み，ネジで固定することでリニア振動アクチュエータをベルトに取り付ける．振動部は，納めたリニア振動アクチュエータが直接肌に触れる構造になっている．

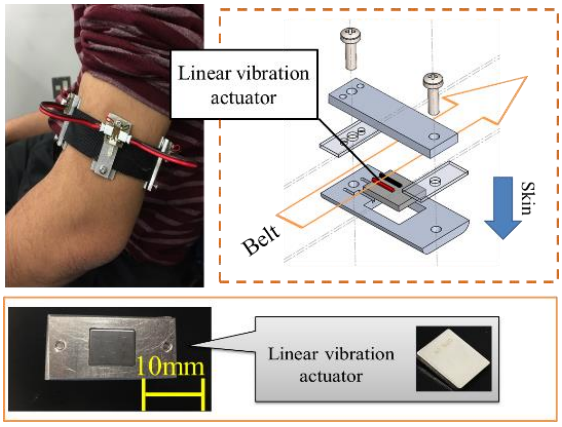


Fig.1 Feedback device of tactile sense

（３）振動センサの製作

本研究では，図 2 に示す，本研究室で開発された把持解放動作が可能である実験用の筋電義手の指先に設置が可能なセンサを開発する．筋電義手の指先という限られたスペースにセンサを設置するため，文献[8]で開発された筋電義手の触覚センサの機構を参考に振動センサを製作した．

製作した振動センサを図 3 に示す．半ドーム状のシリコーンソケット内にチューブを埋め込み，チューブ内に低粘性流体を充填し，根元に防水用のシートを張り付けたエレクトレットコンデンサーマイクロホン(Electret Condenser Microphone：ECM)を設置した構造になっている．物体に接触した際にシリコーンソケットが振動を受けると，チューブ内の内部液体に伝播するため，液体を通じてチューブの根元に設置した ECM に振動が伝わる．これにより，微小な電位が発生し，増幅回路を通じて計測することができるため，指先の振動を検出することができる．

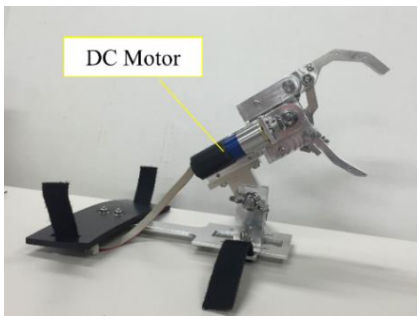


Fig.2 Myoelectric prosthetic hand

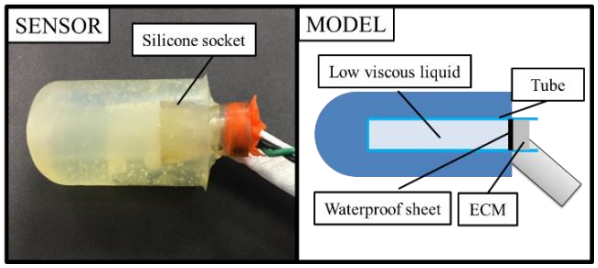


Fig.3 Vibration sensor with electret condenser microphone

実際に製作した ECM による振動センサを用いて，ラッピングフィルム＃1000，＃600，＃400 をなぞった際に計測された振動に差異が生じるかを検証した．計測された振動波形を図 4 に，振動波形の平均振幅を表 1 に示す．

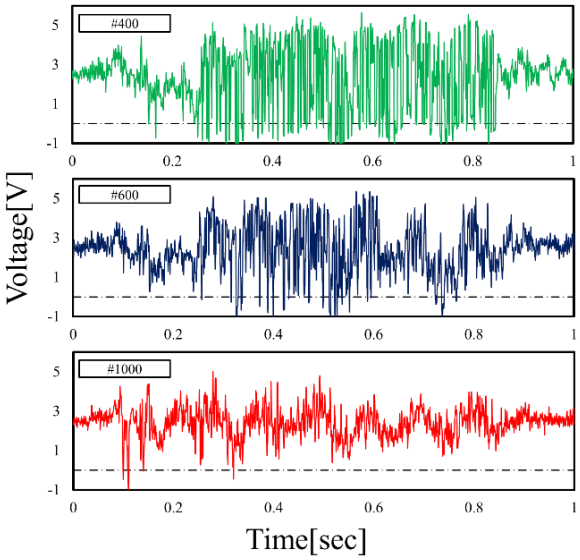


Fig.4 Results of measured roughness

Table1 The mean amplitude of the voltage

Roughness	#1000	#600	#400
The mean amplitude[V]	0.58	0.92	1.3

ラッピングフィルムをなぞったときの振動の計測値において，ラッピングフィルム＃1000，＃600，＃400 の順に平均振幅値が 0.58，0.92，1.3V となり，なぞる試料が粗いほど計測される振動波形は大きくなった．これにより，計測された指先の振動の振幅値の大きさから，物体の粗さを判別することが可能であることがわかった．

（４）粗さの判別方法

以下に ECM による振動センサによる粗さの判別方法について述べる．始めに筋電義手に取り付けた振動センサで対象物の表面をなぞることにより発生する振動を計測する．図 4，表 1 に示したように，振動センサがなぞる物体が粗いほど振動の振幅値が大きくなるため，本研究では検出した振動の振幅値から，以下に記す方法で絶対振幅値を算出し，絶対振幅値を物体の粗さの評価基準として，粗さの判別を行う．

振動センサにより 0.1msec のサンプリング時間で検出した振動の測定値（図 5 上図）を，10 点分ごとに式(1)の処理を行い，0-2.5V の範囲で得られる絶対振幅値（図 5 下図）を 1msec の間隔で算出する．文献[9]において，視覚情報と触覚情報の遅延時間において，人間が感覚のずれを許容できる遅延時間がおよそ 100msec と報告されている．したがって，物体の粗さを 1msec で検出し，粗さに応じた振動を提示すれば，感覚のずれは装着者の許容範囲内であるので，ほぼリアルタイムとして扱うことができる．そのため，リアルタイムでの触覚フィードバックが可能であると考えられる．

$$\begin{cases} m_n = max\{m_{n-1}, |k_n - 2.5|\} \\ x = \frac{1}{10}\sum_{i=1}^{10} m_i \end{cases} \quad (m_0 = 0, n = 1, \ldots 10) \qquad (1)$$

x: Absolute amplitude value [V]
m_n: Maximum value [V]
k_n: Sensor value [V]

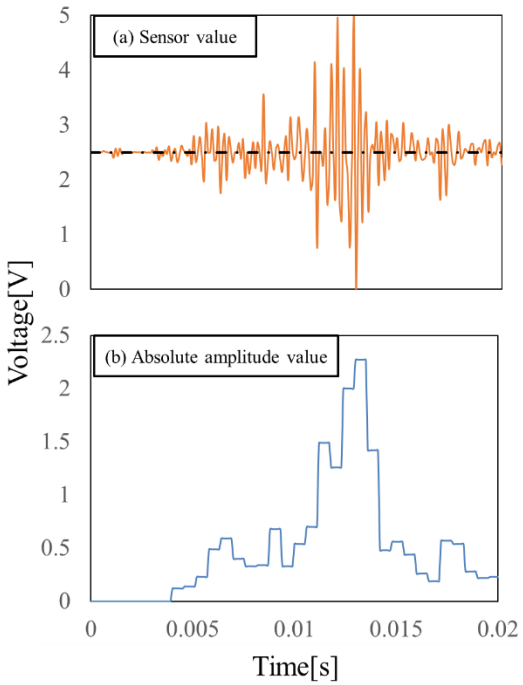
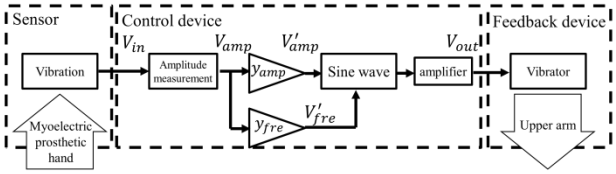


Fig.5 Calculation of absolute amplitude value

（５）触覚フィードバック装置による粗さの提示方法

振動センサとリニア振動アクチュエータによる触覚フィードバックのブロック線図を図 6 に示す．始めに振動センサで対象物の表面に触れ，なぞることにより発生する振動を計測し，粗さの評価基準として，振動の絶対振幅値を算出する．算出された絶対振幅値が大きいほど，刺激強度が大きい振動波形を生成し，生成された信号を増幅回路で増幅することにより，リニア振動アクチュエータを振動させる．

この時，刺激強度は振動の振幅と周波数によって決まる．そこで，振幅あるいは周波数，またはその両方を変動させた正弦波を生成し，算出された絶対振幅値に応じて刺激強度の大きさを変化させて上腕部に提示することで，装着者は振動刺激の有無により物体に触れていることを，また刺激強度の大小により物体の粗さの違いを感じ取ることができる．



V_{in} ：Sensor value [V]
V_{amp}:Absolute amplitude value [V]
V'_{amp}:Amplitude value depending on V_{amp} [V]
V'_{fre} :Frequency depending on V_{amp} [Hz]
V_{out} :Output value [V]

Fig.6 Block diagram of the tactile sense feedback

３．触覚フィードバック装置による感覚調査実験

（１）実験目的

上腕部は指先に比べ触受容器が少なく，微細な振動を感じることができないため，触覚フィードバック装置による振動は，装着者の上腕部が振動を知覚できる刺激強度で提示する必要がある．そのため，本研究で開発した触覚フィードバック装置を用いて，上腕部における振動を知覚できる刺激強度と知覚できない刺激強度の境である絶対閾を求める感覚調査実験を行った．本実験では，振幅，周波数による絶対閾をそれぞれ求めるため，２種類の実験を行った．

（２）実験方法

被験者の上腕二頭筋と上腕三頭筋を囲うように触覚フィードバック装置をベルトで取り付け，被験者に実験用のスイッチを持たせた．そして，MATLAB/Simulink により，サンプリング時間 1.0msec で正弦波を 26sec 間出力し，装置を振動させた．

振幅の感覚調査実験（方法 I）において，PC より出力する正弦波は，中央値を 2.5V とし，周波数はリニア振動アクチュエータの共振周波数である 150Hz とした．振幅は 0-2.5V の範囲とし，1.0sec ごとに振幅が 2.5V まで 0.1V ずつ増加する正弦波($\sin_{up,amp}$)と，振幅が 2.5V から 0.1V ずつ減少する正弦波($\sin_{down,amp}$)の 2 種類を用いた．

周波数の感覚調査実験（方法 II）において，PC より出力する正弦波は，中央値を 2.5V とし，振幅は 2.5V とした．周波数は 50-150Hz の範囲とし，1.0sec ごとに周波数が 150Hz まで 4Hz ずつ増加する正弦波($\sin_{up,fre}$)と，周波数が 150Hz から 4Hz ずつ減少する正弦波($\sin_{down,fre}$)の 2 種類を用いた．

実験方法として，図 7 に示すように，振動提示を行っている間，被験者には上腕部に提示される振動を知覚できる限り，実験用スイッチを押し続けてもらった．振動提示後に，スイッチの ON/OFF 信号により，知覚できる，できないの境を調査し，その際の値を$\sin_{up}$と$\sin_{down}$毎にそれぞれ境界値D_{up}，D_{down}として記録した．この動作を 5 セット行い，それぞれ境界値の平均値D_{up_ave}とD_{down_ave}を求め，絶対閾 D を式(2)より求めた．そして，5 人の被験者における絶対閾 D の平均値D_{ave}を上腕部における絶対閾とし，振幅および周波数の絶対閾$D_{ave,amp}$，$D_{ave,fre}$をそれぞれ求めた．

$$D = (D_{up_ave} + D_{down_ave})/2 \qquad (2)$$

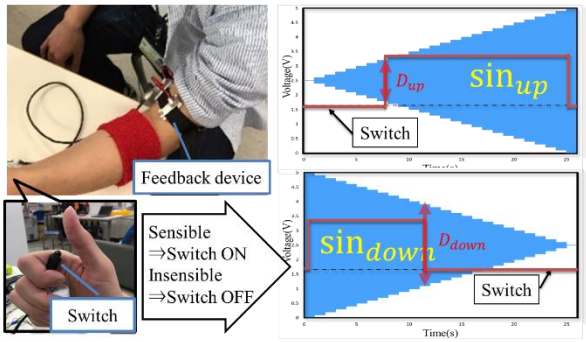


Fig.7 Measurement method of the threshold

（３）実験結果

健常な 20 代男性 5 人の被験者（A～E）に対し行った，振幅に関する感覚調査実験の結果を表 2, 周波数に関する感覚調査実験の結果を表 3 に示す．

Table2 Absolute threshold (amplitude)

	A		B		C		D		E	
	D_{up}	D_{down}	D_{up}	D_{down}	D_{up}	D_{down}	D_{up}	D_{down}	D_{up}	D_{down}
1st	0.6	1.3	0.6	1.0	0.6	1.1	0.6	1.1	0.7	1.1
2nd	0.5	1.2	0.6	0.9	0.6	0.8	0.7	0.8	0.7	0.9
3rd	0.5	1.4	0.6	1.2	0.6	1.1	0.5	1.2	0.7	1.0
4th	0.5	1.2	0.6	1.2	0.6	0.8	0.7	1.0	0.8	0.9
5th	0.5	1.1	0.7	0.9	0.6	1.1	0.6	1.1	0.7	0.9
Absolute threshold[V]	**0.88**		**0.83**		**0.79**		**0.83**		**0.84**	
Average of absolute threshold[V]	**0.83**									

Table3 Absolute threshold (frequency)

	A		B		C		D		E	
	D_{up}	D_{down}	D_{up}	D_{down}	D_{up}	D_{down}	D_{up}	D_{down}	D_{up}	D_{down}
1st	86	92	92	96	94	90	96	94	90	98
2nd	86	93	90	96	88	92	92	96	94	98
3rd	84	93	90	90	82	90	90	94	98	94
4th	86	97	94	94	92	88	92	92	94	92
5th	92	97	88	88	92	96	92	94	92	90
Absolute threshold[Hz]	**90.6**		**91.8**		**90.4**		**93.2**		**94**	
Average of absolute threshold[Hz]	**92.0**									

本研究で開発した触覚フィードバック装置の振幅の絶対閾$D_{ave,amp}$は 0.83V となり，周波数の絶対閾D_{down_ave}は 92Hz となった．これにより，本研究で開発した触覚フィードバック装置で提示する振動の出力値の範囲を表 4 のように定めることで，上腕部において，装着者は振動を知覚することができると考えられる．

Table4 Ranges of amplitude and frequency of the vibration

	Amplitude[V]	**Frequency[Hz]**
Method I	**0.83-2.5**	**150**
Method II	**2.5**	**92-150**

４．触覚フィードバック装置による粗さ判別実験

（１）実験目的

本実験では，人間の上腕部が感じ取れる振動の刺激強度の要因として考えられる，振幅と周波数の変化に着目し，上腕部においてどちらの提示方法の方が粗さ判別に適しているかを考察する．そのため，本研究で開発した触覚フィードバック装置と振動センサを用いて，振幅および周波数を変動させる 3 種類の振動提示方法により，3 種類の試料（ヤスリ：粒度 1000，320，120）に対して粗さを判別する，粗さ判別実験を行った．

（２）振動の提示方法

振動の提示方法については，３章で述べた周波数が一定で，検出された絶対振幅値に応じて振幅が変動する方法（方法Ⅰ），振幅が一定で，検出された絶対振幅値に応じて周波数が変動する方法（方法Ⅱ）と，さらに，振幅，周波数が共に変動する方法（方法Ⅲ）の 3 種類の提示方法を用いた．方法Ⅰ，方法Ⅱについては，表 4 の出力範囲より，検出された振動の絶対振幅値xと提示する振動の振幅値y_{amp}，および振動の周波数y_{fre}の関係式をそれぞれ式(3)，式(4)として定めた．

また，方法Ⅲについては，始めに式(3)のy_{amp_I}と式(4)のy_{fre_II}に基づいて関係式を定め，予備的な実験を行ったところ，共振周波数 150Hz 付近の振動でなければ，上腕部に提示される振動を知覚することができなかった．そのため，方法Ⅲにおけるy_{amp_III}とy_{fre_III}の値を，共振周波数 150Hz 付近の範囲で振動提示できるように，式(5)のように定めた．

$$\begin{cases} y_{amp_I} = 0.668x + 0.83 \\ y_{fre_I} = 150 \end{cases} \tag{3}$$

$$\begin{cases} y_{amp_II} = 2.5 \\ y_{fre_II} = 23.2x + 92.0 \end{cases} \tag{4}$$

$$\begin{cases} y_{amp_III} = 0.668x + 0.83 \\ y_{fre_III} = -x^2 + 25.7x + 92.0 \end{cases} \tag{5}$$

（３）実験方法

被験者に触覚フィードバック装置を取り付け，実験者に振動センサが取り付いた義手の指先を持たせた状態で，3 種類の試料（ヤスリ：粒度 1000，320，120）に対して以下の手順で実験を行った．

１．図 8 に示すように，実験者は 90mm の試料を，義手の指先により開始 1~3 秒間で奥になぞり，4~6 秒間で手前になぞり，被験者に対して振動を提示する．なお，被験者にはなぞり動作を目視させない．
２．各試料を数回提示し，練習を行う．
３．練習後，１と同様の方法でランダムに試料をなぞり，振動提示後，3 種類の粗さの中から被験者が感じ取った判別結果を，粒度 1000，320，120 に対してそれぞれ「滑らか」，「中間」，「粗い」として記録する．3 種類の試料に対し，各 5 回ずつランダムに計 15 回行う．

健常な 20 代男性 5 人に対して，上記の操作を方法Ⅰ，方法Ⅱ，方法Ⅲを用いて行い，被験者の粗さ判別の正答率により，上腕部においてどちらの方法が粗さ提示に適しているかを考察した．

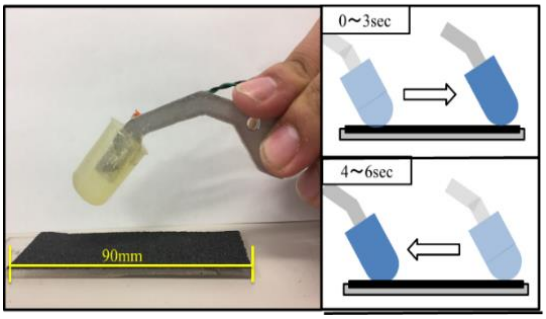


Fig.8 Experimental scene

（４）実験結果

方法Ⅰから方法Ⅲにおける，被験者ごとの全体の正答率を表 5 に，各粗さに対する正答率を表 6 に，全体の正答率と各粗さに対する正答率のグラフを図 9 に示す．

Table5 Result of distinction of roughness

Subject	Accuracy Rate[%]		
	Method Ⅰ	Method Ⅱ	MethodⅢ
A	86.7	73.3	80.0
B	86.7	80.0	80.0
C	73.3	93.3	86.7
D	93.3	80.0	73.3
E	86.7	73.3	73.3
Average	85.3	80.0	78.7

Table6 Accuracy rate for each roughness

Method		A	B	C	D	E	Average
#120 [%]	Ⅰ	80.0	80.0	60.0	100	100	84.0
	Ⅱ	80.0	60.0	100	100	100	88.0
	Ⅲ	60.0	100	80.0	60.0	60.0	72.0
#320 [%]	Ⅰ	100	80.0	60.0	100	80.0	84.0
	Ⅱ	60.0	80.0	100	100	40.0	76.0
	Ⅲ	80.0	80.0	80.0	80.0	80.0	80.0
#1000 [%]	Ⅰ	80.0	100	100	80.0	80.0	88.0
	Ⅱ	80.0	100	80.0	40.0	80.0	76.0
	Ⅲ	100	60.0	100	80.0	80.0	84.0

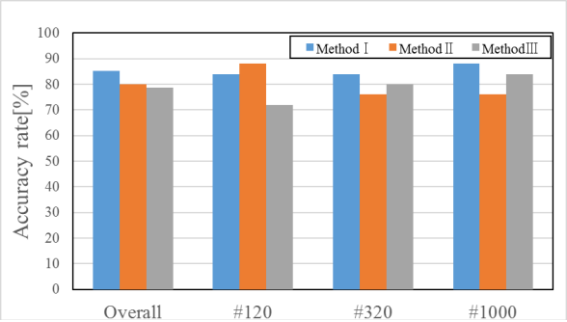


Fig.9 Accuracy rate for each method

表 5 より，全体の正答率が最も高い提示方法は方法Ⅰであり，正答率は 85.3%で，方法Ⅱより 5.3%，方法Ⅲより 6.6%ほど高かった．また表 6，図 9 より，方法Ⅰでは各試料の正答率が 84%以上であり，他の提示方法と比べて安定した結果が得られた．これにより，触覚フィードバック装置において，粒度 1000，320，120 の粗さを判別する際，方法Ⅰから方法Ⅲにおいて最も適した提示方法は方法Ⅰであることが分かった．

刺激強度は粒度 120，320，1000 の順に大きくなっていくことから，刺激強度が近接している粒度 120 と粒度 320 との判別，及び粒度 320 と粒度 1000 との判別が困難であると考えられる．表 6 の各粗さの正答率において，方法Ⅱでは粒度 120 の正答率が 88%と高かったが，粒度 320，1000 の正答率が 76%と低かった．これは，方法Ⅱでは粒度 120 の刺激強度と粒度 320 の刺激強度との差が大きかったため，粗さ判別しやすく，粒度 120 の正答率が高かったと考えられる．しかし，粒度 320 と粒度 1000 では，二つの試料の刺激強度の差が小さく，粗さ判別が困難であったため，粒度 320 と粒度 1000 の正答率が低かったと考えられる．

方法Ⅲでは，粒度 1000 の正答率が 84%，粒度 320 の正答率が 84%と高かったが，粒度 120 の正答率が 72%と低かった．これは，粒度 120 の刺激強度と粒度 320 の刺激強度との差が小さく，粒度 120 を粒度 320 と誤判別してしまうため，正答率が低かったと考えられる．

これらにより，方法Ⅱ，方法Ⅲでは，粒度 320 の刺激強度が粒度 1000 または粒度 120 の刺激強度のどちらかに近いため誤判別されてしまい，3 種類による粗さ判別が困難であると考えられる．

また表 5 より，方法Ⅰでは，被験者 C 以外の正答率が 86.7%以上であり，安定した判別結果が得られているが，方法Ⅱと方法Ⅲでは，各被験者において，方法Ⅰに比べて正答率が低い傾向が見られる．これは，周波数変動による振動の刺激強度に対する感覚が，被験者によって大きく異なるためだと考えられる．

これにより，周波数変動による振動提示方法よりも，振幅変動による振動提示方法の方が粗さ判別しやすいと考えられる．したがって，開発した触覚フィードバック装置で上腕部に振動提示する際，方法Ⅰが最も粗さ判別に適しているといえる．

５． 結論

本研究では，エレクトレットコンデンサーマイクロホン(ECM) を用いた振動センサ，およびリニア振動アクチュエータにより上腕部に振動を提示する触覚フィードバック装置を開発した．また，振動センサにより検出した振動から算出した絶対振幅値に応じて，振動の振幅，周波数を変動させることで刺激強度の大きさを変化させて上腕部に振動を提示することで，物体に触れたこと，および物体の粗さを提示する方法を考案した．

触覚フィードバック装置を用いた感覚調査実験では，上腕部における振動を知覚できる振幅と周波数の絶対閾を求め，提示する振動の出力値の範囲を定めた．また，粒度 1000，320，120 の試料を用いた粗さ判別実験では，周波数を一定とし，振幅を変動させる方法Ⅰ，振幅を一定とし，周波数を変動させる方法Ⅱ，及び振幅，周波数を共に変動させる方法Ⅲの 3 種類の振動提示方法を用いて触覚フィードバックを行った結果，方法Ⅰが上腕部における粗さ判別に最も適していることがわかった．

６． 今後の課題

振動センサに関して，シリコーンソケットで物体をなぞる度にシリコーンソケットの表面が擦り減るため，振動の測定に影響が生じてしまうこと，また指先以外の振

動を感知してしまうという問題点が挙げられる．このため，振動センサのソケットの材質の検討，及び振動センサが接触状態時にのみ，振動が提示されるようにタッチセンサを取り付けることなどを検討し，振動センサの改良を行う必要がある．

また，触覚フィードバック装置に関して，表面粗さが既知の試料に対して，心理物理実験による粗さ判別を行い，2 つの大きさの異なる同種の刺激を与えた時，それらの刺激の大きさの相違を感知できる最小の刺激の差である弁別閾を求め，どの程度の粗さを判別することができるのかについて性能評価を行う必要がある．

参考文献

1) T. Morita, T. Kikuchi and C. Ishii, “Development of Sensory Feedback Device for Myoelectric Prosthetic Hand to Provide Hardness of Objects to Users”, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.28, No.3, pp.361-370, 2016.

2) Y. Ueda and C. Ishii, “Development of a Feedback device of Temperature Sensation for a Myoelectric Prosthetic Hand by Using Peltier element”, Proceedings of the 2016 International Conference on Advanced Mechatronic Systems, pp.488-493, 2016.

3) 奥野竜平，吉田正樹，内山孝憲，赤澤 堅造，“皮膚振動刺激による筋電義手感覚フィードバック装置の検討”，電気学会論文誌 C, Vol.106-C, No.11, pp.1246-1251, 2008.

4) 梶本裕之，川上直樹，前田太郎，舘暲，“皮膚感覚神経を選択的に刺激する電気触覚ディスプレイ”，電子情報通信学会論文誌，Vol.J84-D-II, No.1, pp.120-128, 2001.

5) 昆陽雅司，田所諭，高森年，小黒啓介，徳田献一，“高分子ゲルアクチュエータを用いた布の手触り感覚を呈示する触感ディスプレイ”，日本バーチャルリアリティ学会論文誌，Vol.6, No.4, pp.323-328, 2001.

6) 小林耕太，植田勇貴，石井千春，“筋電義手のための振動による触感フィードバック装置の開発”，日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会 2016 講演論文集，No.16-2, 2A1- 02a2, 2016.

7) 川村次郎，福井信佳,中川正己,藤下武,青山孝,古川宏，“上肢切断者の現状と動向一近畿地区におけるアンケート調査から一”，リハビリテーション医学，Vol.36, No.6, 1999.

8) J.A. Fishel, V.J. Santos and G.E. Loeb, “A Robust Micro-Vibration Sensor for Biomimetic Fingertips”, Proceedings of IEEE/RASEMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics, pp.659-663, 2008.

9) 宮里勉，岸野文郎，“視覚情報と触覚情報の間の遅延知覚に関する主観評価”，テレビジョン学会誌，Vol.49, No.10, pp.1353-1356, 1995.