

腱振動刺激による運動錯覚創出インタフェースの開発

友田 達也^{*1} 上杉 繁^{*2} 三輪 敬之^{*2}

Development of Interface Creating Illusory Kinesthesia by Tendon Vibration

Tatsuya Tomota^{*1}, Shigeru Wesugi^{*2} and Yoshiyuki Miwa^{*2}

Abstract - It is important to direct attention to kinesthesia to create a new physical action in sports and rehabilitation. To address such a challenge on kinesthesia, authors study how to change freely bodily position sensed through kinesthesia without constraints of physical action. Therefore authors focus attention on illusory kinesthesia by vibrating tendon, and developed an interface system which vibrates two parts of upper arm and which moves the arm toward extending or bending direction with variable speed and from / to a target position. Experiment results indicate that moving the vibrated arm slowly has an influence on enhancing illusory kinesthesia.

Keywords: Illusory kinesthesia, Tendon vibration, Upper arm, Bodily action

1. はじめに

乳幼児が自分で初めて寝返りをうったり、手助けなしに靴下を履くことができたり、補助輪を外した自転車に乗ることができたりなど、身体の発達の過程においては、日常生活の様々な場面で新たな身体の動きは日々創出されている。

身体発達の場面のみならず、スポーツや舞踊などの領域においてはパフォーマンスや表現力の向上のため、あるいは医療福祉のリハビリテーションにおいては日常的な動作を取り戻すために、新しい身体動作の構築を積極的に試みる必要がある。こうした問題に対して、バーチャル・リアリティ技術やロボット技術を活用し、身体の動作を学習するための工学的な研究が数多く行われている。例えば、視覚的に表現する方法では、頭部に搭載したディスプレイ内に身体の動きを表現する教示方法^[1]などがある。また、身体を直接動かす方法では、自発的あるいは他動的に四肢を動かすときに、抵抗力や軌跡を変化させることで身体の動きを支援する研究^[2]などが行われている。

一方、最新のリハビリテーション手法である認知運動療法では、脳科学の知見を踏まえ新たな身体の動きを創出するために、身体や運動のイメージ、身体の実在感や運動の感覚、そして実際の身体部位の運動の3者間の一連の関係をつなげることが重要であると指摘している^{[3],[4]}。こうした方針に基づいて、身体の実在感や運動の感覚への注意を促すことが、認知運動療法を従来の手法と比較したときの大きな特長のひとつである。

本研究では、新たな身体動作を創出する際の身体の運動の感覚の重要性に着目し、実際の身体動作以上に運

動の感覚を創出させることによって、運動の感覚という問題を扱うための実験的な装置の開発に取り組んだので報告する。

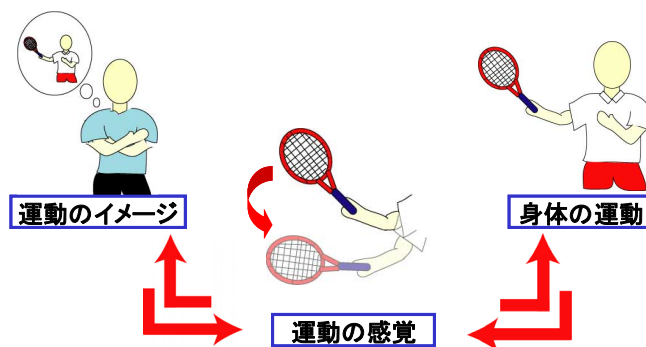


図1 運動イメージ、運動感覚、身体運動の関係
Fig.1 Relations among motor image, kinesthesia, and physical action

2. システムの設計

2.1 研究方法

実際の身体の動き以上に動いている感覚を創出させる方法の手がかりとして、Goodwinらが発見した運動錯覚^[5]に着目した。筋肉の腱に100 [Hz]程度の振動刺激を与えると筋肉が反射運動によって収縮する。このとき、刺激を与えている身体部位を固定して収縮を妨害すると、図2(a)に示すような、あたかも筋が伸展したかのような運動錯覚が創出する。この錯覚のメカニズムは、筋肉の腱を振動刺激することによって、筋肉が実際に伸びたときと同じように筋紡錘が興奮するためであると報告されている^[6]。脳は筋紡錘から求心神経への信号によって四肢の動きを知覚し脳内で処理しているので、錯覚による四肢の動きの感覚は実際の身体の動きに限定されない^[7]。

*1: 早稲田大学大学院 理工学研究科

*2: 早稲田大学 理工学術院

*1: Graduate School of Science and Engineering, Waseda University

*2: Faculty of Science and Engineering, Waseda University

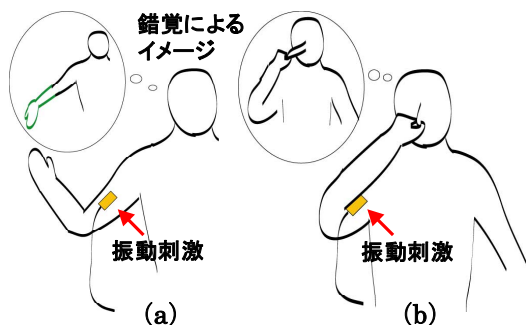


図2 腱振動刺激による運動錯覚

(a) 伸張錯覚, (b) ピノキオ錯覚

Fig.2 Illusory kinesthesia by tendon vibration

(a) An extension illusion, (b) Pinocchio illusion

また, Lackner らはこの錯覚を応用し, 親指と人差し指で鼻をつまんだ状態で右手の上腕二頭筋の腱に振動刺激を与えると, 図 2(b)に示すような鼻が伸びたかのような感覚が得られることを発見した(ピノキオ錯覚)^[8].

近年では, 内藤らは運動錯覚を感じているときの脳の活動領域を fMRI を用いて調べ, 運動野が関係していることを明らかにしている^[9].

以上に示したような関連研究においては, 錯覚のメカニズムや脳の活動領域について研究されてきたものの, 運動の感覚を強めたり, 変化させたりする方法についてはほとんど取り組まれていない.

そこで本研究では, 身体部位として今回は上腕に着目し, 実際の腕の動きは止まっていたり, 少ししか動いたりしていないにも関わらず, 様々な運動の感覚の創出を目指し, 複数個所の腱への振動刺激を同時に制御し, それと同時に腕を他動的に自在に動かす方法を考案した.

このアイデアに基づいたインタフェースを開発するにあたり, 錯覚が生じる条件を調べるため, まずは従来研究の追実験を行った. Goodwin や内藤らの研究から, 振動数が 70~100 [Hz], 振幅が 1~2 [mm]の振動を与えると運動錯覚が生じると報告されており, 振動素子として市販のマッサージ器を用いた.

また, 振動刺激による筋肉の収縮を妨害し, 他動的に腕を動かす方法として, 腕を固定する小手を紐で引っ張る機構を試作した. そして, 実験者が被験者の上腕二頭筋にマッサージ器を押し当て振動刺激を与えることを試みた. モックアップを試している様子を, 図 3 に示す.

その結果, 実際には腕の位置は動いていないが腕が伸張方向に動く運動の感覚が創出することを確認した.

次に, 運動錯覚が生じているときに, 小手の紐を引っ張ることで腕を動かすことを試みた. その結果, 振動刺激を与えている腕を動かすことで, 実際に腕が動くこと以上に, 運動の感覚が生じるという, 提案手法の可能性が示唆された.

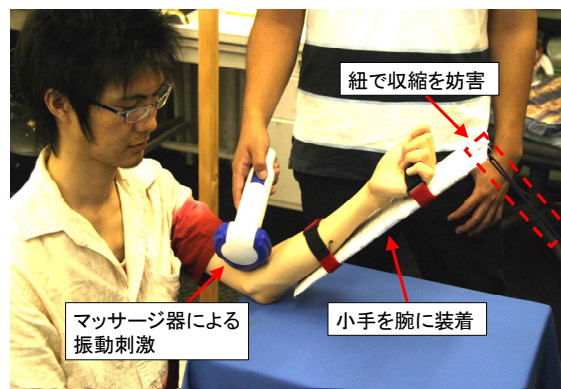


図3 運動錯覚創出のモックアップを利用する様子

Fig.3 Mock-up system for creating illusory kinesthesia in use

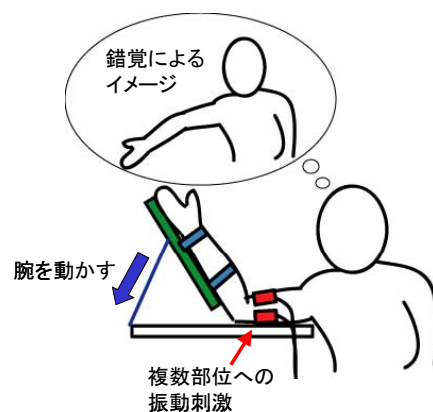


図4 運動の感覚を操作するシステムのイメージ

Fig.4 Concept image of system changing illusory kinesthesia

そこで, 上腕において様々な運動の感覚を創出するために, 上腕二頭筋と上腕三頭筋の二カ所に振動刺激を与え, 上腕を固定する小手の位置を制御する装置を開発することにした. 本システムのイメージを図 4 に示す.

2.2 システムの要求諸元

本システムを実現するためには, 振動刺激を付与する装置, 腕を外から動かす機構, そして運動の感覚の変化を表現する機能が必要である.

振動刺激装置の要求諸元は, もっとも錯覚を生じやすいと報告されている, 振動数が 70~100 [Hz], 振幅が 1~2 [mm]の振動であることとした. また, 腕の伸展, 屈曲方向への錯覚を生じる上腕二頭筋, 上腕三頭筋に正確に振動刺激を与える必要があるため, 腕に装着しやすい機構で, 小型であること, PC から振動数の制御が可能であることとした.

腕を外から動かす機構(以下, 腕位置制御機構)として, 肘と同軸で回転する小手に取り付けた紐をプーリーで巻き取るという方法を考案し, その要求諸元について検討した. 振動刺激によって収縮が起きている状態における, 紐の張力を計測したところ, 約 19.6 [N]であった. また, 小手に取り付けたバネを引っ張るために必要とな

る張力は、約 19.6 [N]であった。よって、計 39.2 [N]の力が必要となる。以上より、直径が 100 [mm]のプーリーを用いて、腕を動かすために必要なトルクを、1.96[N/m]と算出した。また、腕位置制御機構を制御するために、PCから位置、速度が制御可能であることも要求諸元とした。

運動の感覚を表現する機構（以下、運動感覚追従機構）の要求諸元としては、小手と同軸で回転でき、その際の角度を計測できることとした。

以上の要求諸元を満たすべく、運動錯覚創出インタフェースの開発を行った。

3. システムの開発

本インタフェースは、振動刺激装置、腕を外部から動かす腕位置制御機構、運動感覚追従機構、そしてこれらを制御するための制御ユニットから構成される。以下に、それぞれの装置、機構の詳細を述べる。

はじめに、振動刺激装置を図 5 に示す。この装置は、偏心重 10 [g]をモータ（最大連続トルク 14.2 [mNm]、最大連続トルク時の回転数 6030 [rpm]）で回転させる機構とした。この構造に、外装パーツとヘッド部分を組み合わせ、ヘッド部分で振動を与える振動刺激装置を開発した。また、振動刺激装置を三次元ジョイントを用いてフレームに固定することで、腕に押し当てる際の自由度を向上し、ジョイントと振動刺激装置の間に、バネを用いたサスペンション機能を組み込むことで、一定の強さで腕に押し当てることを可能とした。

続いて、腕位置制御機構の外観を図 6 に示す。腕位置制御機構は、肘と同軸で回転する小手、紐、そして紐を巻き取る機構から構成される。小手の先端をバネで懸垂することで、腕の自重をキャンセルする。小手の回転軸には、エンコーダが取り付けられており、角度が測定できる。紐を巻き取る機構は、ギヤードモータ（減速比 531:1、最大連続トルク 6 [N/m]）と、ギア比が 2:1 のギアボックス（最大連続トルク 12 [N/m]）、そしてプーリーから構成され、プーリーを回転させることで紐を巻き取ることができる。

次に、運動感覚追従機構は、創出した運動の感覚にあわせて動かすよう指示した非錯覚側の腕の動きを計測するための装置である。これは、小手と同軸で回転する軸に棒が取り付けられており、棒の角度を軸に取り付けられたエンコーダで計測することができる。

振動刺激装置と腕位置制御機構を制御するために作製した制御ユニットは、モータドライバ(iXs Research 社製、iMDs03、定格：24[V]、7[A])、モータコントローラ(iXs Research 社製、iMCs01)、そして PC からコントローラを介してモータの制御、エンコーダカウント値の計測を行うための、GUI 機能を兼ね備えたソフトウェアから構成される。モータコントローラは、USB 通信によって PC から直接制御可能で、制御周期は最大 1[ms]である。

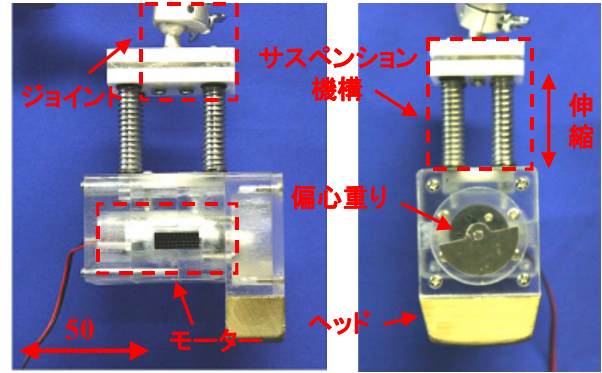


図 5 振動刺激装置（左；側面，右；前面）

Fig.5 Vibration device (Left ; Side , Right ; Front)

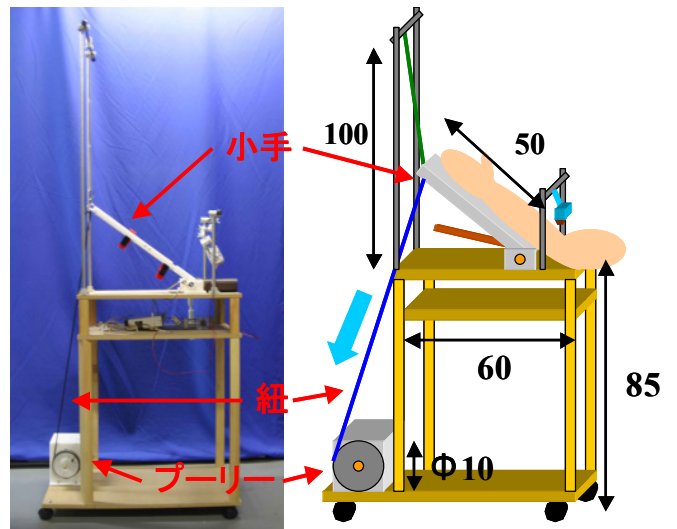


図 6 腕位置制御機構

Fig.6 Arm positioning mechanism

この制御ユニットによって、PC からコントローラを介して、振動刺激装置 2ch の振動数制御、腕位置制御機構の目標位置、速度の制御、そして、エンコーダ 3ch の計測が可能となり、PC 上には操作のための GUI も開発した。

上記に述べた、振動刺激装置、腕位置制御機構、運動感覚追従機構、そして制御ユニットを組み合わせることによって、上腕の伸展・屈曲を組み合わせた運動、伸展方向のみの運動、屈曲方向のみの運動の 3 つの運動錯覚の創出実験が可能なシステムが構成される。この 3 つのシステムの仕様について表 1 に、システムの全体構成を図 7 に示す。

図 7 (A) は、上腕の伸展・屈曲の運動を組み合わせた実験システムであり、点線の枠内の機構を図 7 (B), (C) に変更することで、伸展運動のみの実験システム、屈曲運動のみの実験システムにそれぞれ組み替えることが可能である。図 7 (C) の屈曲実験システムでは、小手を 60 ~110[deg]の間で制御するため、紐で小手を動かす方向が (A), (B) とは逆になっている。

表 1 運動錯覚創出システムの仕様

Table 1 Specifications of illusory kinesthesia creation system

	伸展	屈曲	伸展屈曲
刺激部位	上腕二頭筋	上腕三頭筋	上腕二頭筋・三頭筋
小手の初期位置 θ [degree]	40	60	40
小手の稼動範囲 [degree]	0~40	60~110	0~40
小手の最大速度 [degree/s]	5	14	5

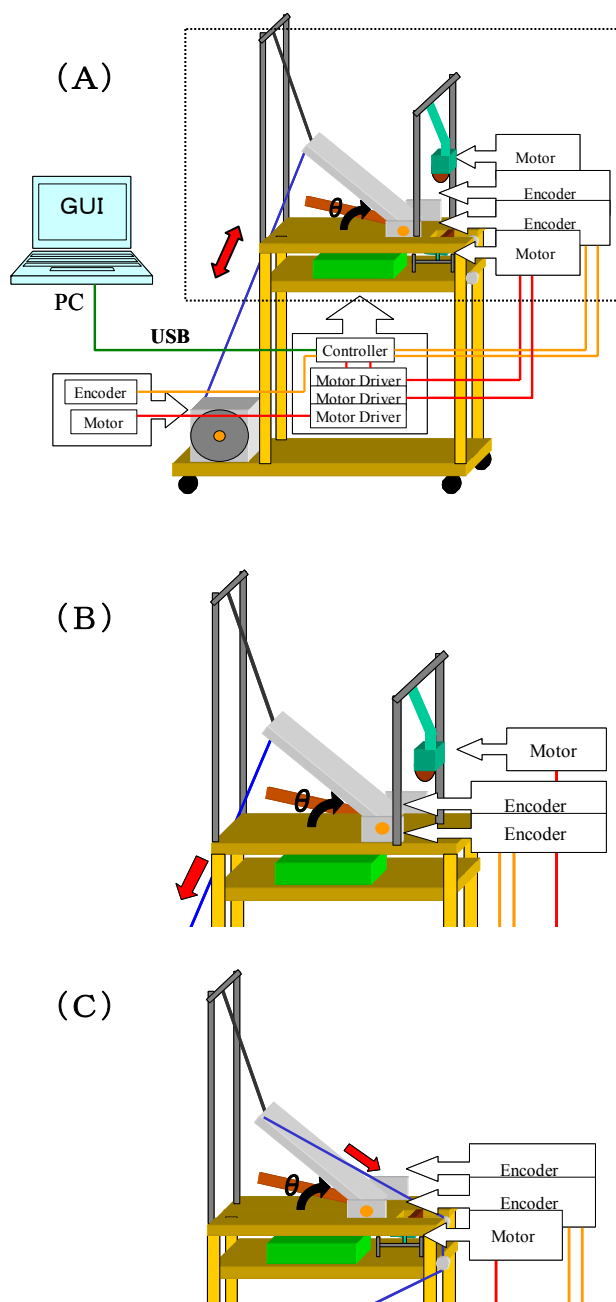


図 7 運動錯覚創出システムの構成

(A) 伸展・屈曲, (B) 伸展, (C) 屈曲

Fig.7 Schematic diagram of illusory kinesthesia creation system

(A) extending and bending, (B) extending, (C) bending

4. 運動感覚の創出実験

4.1 実験デザイン

今回は上腕の伸展方向のみの運動に着目し、振動刺激による運動錯覚と、外部から他動的に伸展方向に動かすことによる運動の感覚の影響について調査を行った。そこで、伸展運動錯覚創出実験システムを利用して、振動刺激を与えながら、小手を動かす速度、小手を動かす回数、腕の初期位置を変化させる実験を行った。閉眼状態での腕の動きの追従性についての調査も含め、実験条件を表 2 にまとめる。

表 2 実験条件の詳細

Table 2 Details of experiment conditions

	振動刺激	小手指初期位置 [degree]	小手を動かす回数	小手の速度 [degree/s]
条件1	なし	40	3	5
条件2	あり	0	0	0
条件3-1	あり	40	4	5
条件3-2	あり	40	2	5
条件4-1	あり	20	4	5
条件4-2	あり	20	2	5
条件5-1	あり	40	3	2
条件5-2	あり	40	3	5

以上の実験条件において、被験者 6 名（健康な成人男子、右利き 5 名、左利き 1 名、22-33 歳）を対象に、条件 1 のみ 5 回、他の条件は 1 条件 3 回、合計 60[s]間、左腕に振動刺激を与える実験を行った。実験中は、錯覚が生じている左腕の運動の位置に一致するように、計測するための棒を反対側の右手で操作するように指示した。また、実験後には運動の主観的な感覚についてのコメントと、腕の伸展運動のイメージについてイラストを描くように指示した。

4.2 実験結果

4.2.1 閉眼状態における腕位置の追従

条件 1 の実験を行い、閉眼状態において、左腕の位置変化をどの程度の精度で追従することが出来るのか調べた。小手の角度と運動感覚追従感覚の角度の最大誤差の平均と標準偏差を計算したところ、約 6.2 ± 1.3 [degree]であった。

4.2.2 腕を動かす全体の移動量の影響

条件 2, 条件 3-1, 条件 4-2 の実験結果を比較し、振動刺激を与えている腕を動かすことと、動かす際の腕の初期位置の変化が、錯覚による運動の感覚に影響を及ぼしているのかを調べた。実験終了時の小手の角度と、運動感覚追従機構の角度差を図 8 に示す。

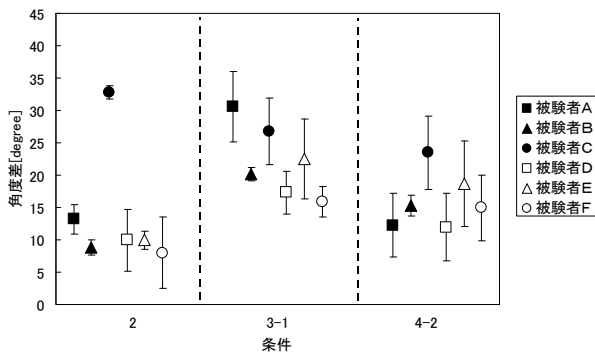


図 8 初期位置の効果
Fig.8 Effect of arm initial position

4.2.3 腕を動かす部分的な移動量の影響

条件 3-1, 条件 5-2, 条件 3-2 の実験結果を比較し, 腕を動かす回数を変えることによる 1 回あたりの移動量の変化が, 錯覚による運動の感覚に影響を及ぼしているのかを調べた. 実験終了時の小手の角度と, 運動感覚追従機構の角度差を図 9 に示す.

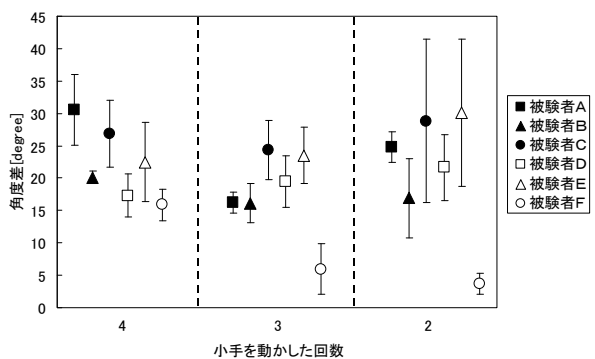


図 9 腕を動かす回数の効果について
Fig.9 Effect of the number of times to move the arm

4.2.4 腕を動かす速度の影響

条件 5-1 (2[degree/s]) と条件 5-2 (5[degree/s]) の実験結果を比較し, 腕を動かす速度によって, 運動の感覚が変化するかを調べた. 実験終了時の小手と運動感覚追従機構の角度差を図 10 に示す.

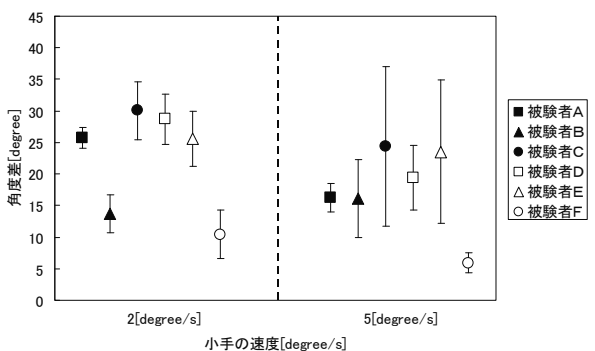


図 10 腕を動かす速度の効果について
Fig.10 Effect of the speed moving the arm

4.2.5 コメントとイラスト

実験終了後に行ったコメント結果を, 表 3 にまとめる.

表 3 コメントのまとめ

Table 3 Summary of comments

錯覚が生じたとき, どのような感覚がしたか?
- 手を動かされているように感じた. - 腕が折れ曲がっていくような感覚がした. - 腕が少しずつ伸びていく感覚がする. - 腕の位置感覚と, 動いている感覚の 2 種類の感覚を感じた. - 腕が平行に沈んでいく感じがする. - 腕が下がっていく, 落ちていく感覚がする. - 腕が引っ張られるイメージがする.
腕を動かされたとき, どのような感覚がしたか?
- 腕がぐにゅっと曲がるような感覚がした. - 腕の曲がる感覚がより鮮明になった. - 腕がどれだけ動いたか, よく分からなくなった. - 腕が普通では曲がらない方向まで曲がったように感じた. - 腕を動かす条件のほうが強い錯覚を感じる.

また, 実験終了後に描いてもらった腕の運動のイメージのイラストの数例を, 図 11 に示す.

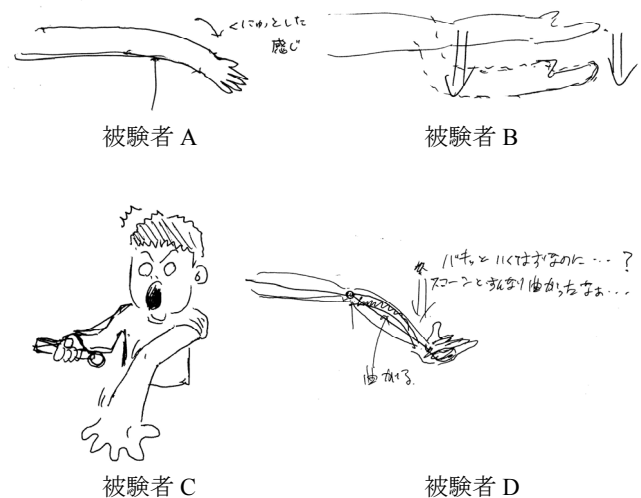


図 11 腕の運動錯覚イメージのイラスト
Fig.11 Illustrations of illusory kinesthesia of the arm

5. 実験結果のまとめと考察

はじめに, 腕を外部から動かすことによる運動の錯覚への影響について検討する. 図 8 において, 条件 2 (腕を動かさない条件) に対して条件 3-1 (腕を 40[degree] から 4 段階で動かす条件), 4-2 (腕を 20[degree] から 2 段階で動かす条件) を比較すると, 1 名を除いて角度差が大きい傾向が確認できる. そして, 条件 3-1 は条件 2 に対して, 有意水準 5% の有意差が見られた. また, 実験後のコメントからも, 腕を動かさない場合と比較して, 動かす条件のほうが強い運動の錯覚が生じることが報告され

ている。以上の結果を踏まえると、少なくとも腕を他動的に動かすことによって、運動の錯覚への影響が強まることが示唆される。

一方で、条件 3-1 と条件 4-2 を比較すると、少なくとも図 8 からは条件 3-1 の方において、角度差がやや大きいような傾向が見られるが、有意差はなかった。この点については、初期位置がもう少し大きい場合を条件に含め、さらに検討する必要がある。

次に、腕を動かす回数を変えることによる、一回あたりの移動量を変化することの運動の感覚への影響について検討する。図 9 を見るかぎり、これらの条件のときには、個人のばらつきが大きく一定の影響については見られず、有意差も確認できなかった。このことから、一回あたりの移動量についてはあまり影響を与えないことが示唆される。

最後に、振動刺激を与えている腕を動かす速度を変えることによる影響について検討する。図 10 の結果を踏まえると、遅い速度である条件 5-1 (2[degree/s]) の方が条件 5-2 (5[degree/s]) よりも、角度差が大きい傾向が見られる。そして、この両条件間で有意水準 5% の有意差が見られた。したがって、錯覚が生じている腕を動かす速度が遅いほうが運動の感覚への影響が強いことが示唆される。

以上、今回の実験をまとめると、振動刺激を与えている腕を外部から操作することと、その移動速度が錯覚によって生じる運動の感覚に影響を及ぼすことが示唆された。全体の移動量の影響や、移動速度の影響の限界値などについて今後さらに調査することにより、錯覚が強まるメカニズムについても検討していきたい。

次に、錯覚の影響を計測する方法について検討する。被験者のコメントから「腕の位置感覚と、腕の運動感覚が分離し、2 つの情報を感じている」などと報告されたように、腕の位置は一定であるが、運動しているように感じるという、腕の運動の感覚と腕の位置の感覚が必ずしも一致しているわけではないことが指摘されている。今回の実験では、運動感覚追従機構を用いて、腕の位置感覚の追従を行ったが、これによってどのような量を計測しているのかという問題、そして運動の感覚の量そのものを表現する方法について検討する必要がある。

また、屈曲方向に錯覚を生じさせている腕を外部から他動的に動かすこと、2 つの振動刺激を制御することについては、引き続いて調査を行う。

6. まとめ

新たな身体の動きを創出するためには、運動の感覚への注意を促すことが重要であると考えられており、本研究ではこうした運動の感覚という問題を扱うため、実際の身体の動作以上に運動の感覚を創出させるための実験的な装置の開発に取り組んだ。そこで、腱振動刺激によ

る運動錯覚現象に着目し、振動刺激を与えている腕を外部から自在に動かすことで運動の感覚を変化させるインタフェースの開発を行った。伸展方向へ他動的に腕を動かすことによる、運動の感覚への影響を調査するために、固定した腕を動かす速度、初期位置、移動回数を変える比較実験を行った。その結果、腕を他動的に動かすことと、腕をゆっくり動かすことが運動の感覚に影響を与えることが示された。今後は、屈曲方向や伸展・屈曲の両方向に他動的に腕を動かす影響について調査するとともに、運動の感覚を表現する方法についても検討する。

謝辞

本研究の一部は、2006 年度科学研究費補助金（課題番号 18700127）によって行われた。

参考文献

- [1] 本荘, 伊坂, 満田, 川村: HMD を用いたスポーツスキルの学習方法の提案; TVRSJ, Vol.10, No.1, pp.63-70 (2005)
- [2] 古荘, 小柳, 片岡, 笹, 井上, 竹中: 三次元上肢リハビリ訓練システムの開発; 日本ロボット学会誌, Vol.23, No.5, pp.629-636 (2005)
- [3] 河本: システム現象学 オートポイエーシス第四領域; 新曜社 (2006)
- [4] 宮本: リハビリテーションルネサンス; 春秋社 (2006)
- [5] Goodwin,G.M., McCloskey,D.I., Matthews,P.B.C.: The contribution of muscle afferents to kinesthesia shown by vibration induced illusions of movement and by the effects of paralyzing joint afferents; Brain, Vol.95, Issue.4, pp.705-748 (1972)
- [6] Burke,D., Lofstedt,L., Wallin,G.: The responses of human muscle spindle endings to vibration of non-contracting muscles; J Physiol (Lond), Vol.261, pp.673-693 (1976)
- [7] Naito,E: Sensing Limb Movements in the Motor Cortex : How Humans Sense Limb Movement; The Neuroscientist, Vol.10, pp.73-82 (2004)
- [8] Lackner, J.R.: Some proprioceptive influences on the perceptual representation of body shape and orientation; Brain 111, pp.281-297 (1988)
- [9] Naito,E, Ehrsson,H.H, Geyer,S, Zilles,K, Roland,P.E.: Illusory Arm Movements Activate Cortical Motor Areas : A Position Emission Tomography Study; The Journal of Neuroscience, pp.6134-6144 (1999)