

上腕への腱振動刺激と他動運動による 過伸展錯覚の特性

友田 達也^{*1} 上杉 繁^{*2} 三輪 敬之^{*2}

Characteristic of Illusory Hyperextension Kinesthesia by Vibrating Tendon and
by Moving Upper Arm

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

Abstract - To develop an interaction system to create new motor sensation that is not limited to range of joint motion, authors focused attention on illusory kinesthesia created by tendon vibration. Therefore, authors developed an experimental system which created illusory hyperextension kinesthesia of an upper arm by vibrating the biceps brachii muscle, and by moving the upper arm toward extending direction with variable speed and from / to a target position. Experiment results indicated that an initial position of a vibrated arm, number of times to move the arm, and moving velocity of the arm had an influence on enhancing illusory hyperextension kinesthesia.

Keywords: illusory kinesthesia, hyperextension, tendon vibration, range of joint motion

1 はじめに

錯覚とは、現実の物理現象とは異なる知覚現象が生じることであり、錯視^[1]、幻肢^[2]などさまざまな現象が報告されている。昨今では、知覚現象にかかわる脳機能解明のアプローチとして錯覚研究の関心がより高まっている^[3]。

こうした錯覚現象をバーチャルリアリティなどの工学領域で活用する試みが多数行われている。例えば、模型や映像の手を自身の手と錯覚してしまう現象を活用し、映像空間への身体の没入感を強める研究^{[4][5]}や、腹と背に装着した振動子により適切な時間差で振動刺激を提示することで、腹部を通過する仮現運動感を創出させる研究^[6]、また、どのように脳が視覚情報から実空間を認識し、身体運動に影響を及ぼすのか測定する手段として、錯視を利用した研究^[7]などがある。錯覚現象を工学的に活用する特長として、機械的には直接与えることができない刺激による感覚や、現実世界では起こり得ない感覚などを新たに経験させることが可能である。こうした特長により、バーチャルリアリティ技術の幅を広げるだけでなく、エンターテインメントや教育・学習の場面における錯覚技術の利用が期待される^[8]。

本研究では、視覚的な表現や三半規管に関する運

動感覚ではなく、腕や足の関節が伸びたり曲がったりするかのような、四肢の運動に関する錯覚に着目した。現実世界では、四肢の物理的な動きとその時に知覚する運動の感覚は、通常は分離することができない。そこで四肢の動きにおいて、関節可動域に物理的に制約されずに、運動の感覚のみを外部から操作させることを実現する基礎的な技術の開発に取り組むこととした。そして、腱振動刺激による運動錯覚現象に着目し、上腕の伸展運動の感覚を調整することが可能な実験システムを新たに開発した。これにより、上腕が伸びきった状態よりもさらに伸展する過伸展の運動錯覚を強める方法について基礎的な実験を行ったので報告する。

まずは、Goodwin らが発見し、本研究で着目している、腱振動刺激による運動錯覚現象^[9]について説明する。筋肉の腱に 100[Hz]程度の振動刺激を与えると、緊張性振動反射によって筋肉に収縮が生じる。このとき、振動刺激を与えている身体部位を固定し、筋の収縮を妨害すると、図 1(a)に示すような、あたかも筋が収縮方向とは逆の方向に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と、筋肉が実際に伸びたときと同様に筋紡錘が興奮するためであると報告されている^[10]。筋紡錘から求心神経への信号は、その筋肉の動きとして脳で知覚されるため、この錯覚による身体部位の動きの感覚は、物理的な身体の動きに制約されない^[11]。

Lackner らはこの錯覚を応用し、親指と人差し指で鼻

*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

2 実験

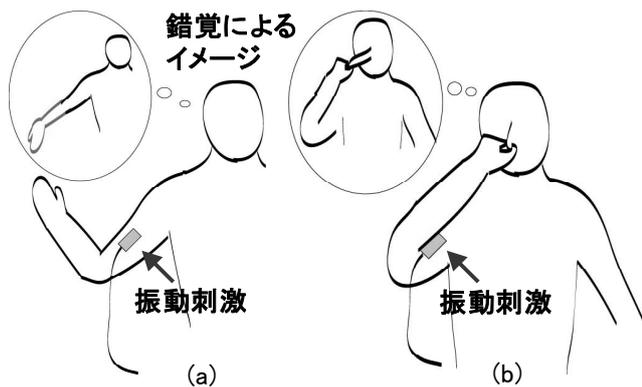


図 1 腱振動刺激による運動錯覚
(a) 伸展錯覚, (b) ピノキオ錯覚

Fig.1 Illusory kinesthesia by tendon vibration
(a) Extension illusion, (b) Pinocchio illusion

をつまんだ状態で上腕二頭筋の腱に振動刺激を与えると、図 1(b)に示すような鼻が伸びるような感覚が得られることを発見した(ピノキオ錯覚)^[12]。

近年では、内藤らは運動錯覚が生じているときの脳活動を、fMRI を用いて調べ、運動錯覚時にも運動実行時と同様に運動野が関係していることを明らかにした^[13]。

また、Cordo らは運動錯覚中に、身体の錯覚部位を運動錯覚の生じている方向に他動運動させることで、運動錯覚が強まることを報告した^[14]。

以上に示した関連研究では、身体の物理的な可動範囲内における運動の感覚に対し、錯覚のメカニズムや脳の活動領域についての研究に重点が置かれている。

一方本研究では、図 2 に示すように、四肢の物理的な関節可動域に制約されずに、さまざまな運動の感覚を創出させる技術の開発を目指している。そこで、腱振動刺激と他動運動を組み合わせることで運動錯覚が強まる知見に着目し、特に物理的な身体の動きの範囲外である動きの感覚として、上腕をまっすぐに伸ばしきった以上に伸展する、過伸展の運動錯覚を強める方法について調査することにした。

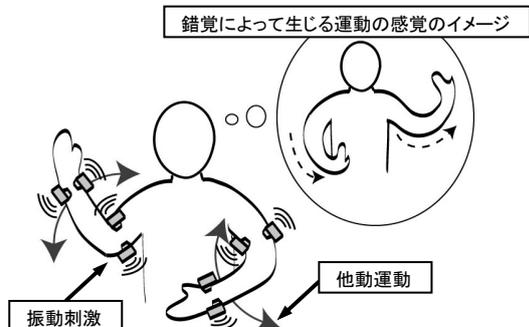


図 2 物理的な身体の動きに制約されない運動の感覚を創出

Fig.2 Creation of motor sensation that is not limited to range of joint motion

2.1 方法

2.1.1 実験機材

上腕二頭筋の腱へ振動刺激を付与し(振動刺激装置), それと同時に速度や移動量を任意に設定しながら、小手に固定した上腕を他動的に動かし(腕位置制御機構), その時の上腕の運動感覚の変化をレバーの回転量で表現する(運動感覚表現機構), 過伸展感覚実験システムを開発した. システムのイメージおよび構成等を図 3, 図 4, 図 5 に示す

振動刺激装置は、図 4 に示すように、上腕に接触するヘッド内部で、モータ回転軸先端に取り付けた偏心錘 10 [g]を回転させること(最大連続トルク: 14.2 [mNm], 最大連続トルク回転数: 6030 [rpm])で振動を発生させる. これにより最も錯覚を生じやすいと報告されている、振動刺激(振動数: 70~100 [Hz], 振幅: 1~2 [mm])を発生することが可能である. また、本装置は、実験フレームにボールジョイントとサスペンション機構を組み合わせて設置している. そのため、腕に押し当てる際のヘッド部の位置の微調整を可能とし、サスペンション機構のバネを調整することで、最大で約 20[N]までの荷重をかけ、被験者ごとに錯覚が生じやすい振動を付与することを実現している。



図 3 過伸展錯覚実験システムの概要

Fig.3 Concept image of illusory hyperextension kinesthesia experimental system

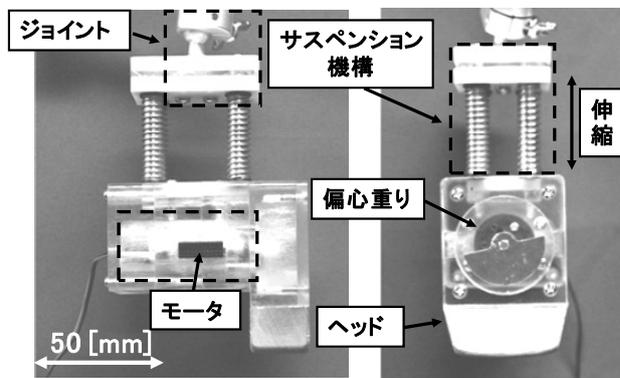


図 4 振動刺激装置(左:側面, 右:前面)

Fig.4 Vibration device (Left ; Side , Right ; Front)

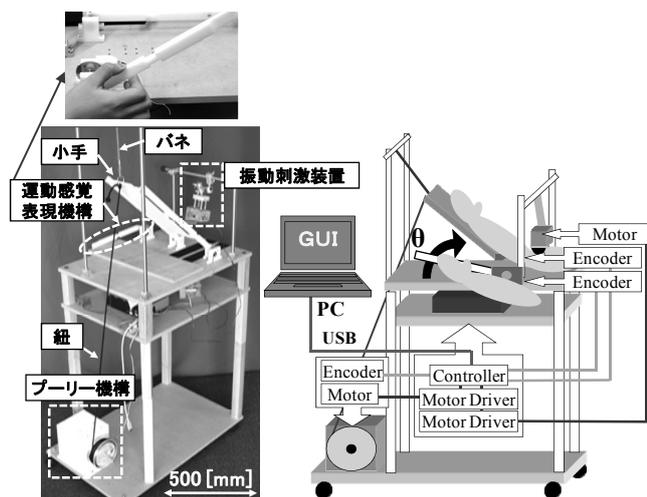


図5 過伸展錯覚実験システムの構成

Fig.5 Diagram of illusory hyperextension kinesthesia experimental system

腕位置制御機構は、前腕部を固定した小手を、肘関節を回転中心に伸展方向に回転させる機構である。小手の先端をバネで懸垂することで、小手自身および上腕の自重をキャンセルする構造であり、小手の先端に取り付けたワイヤを実験フレーム下部のギアボックスのプーリーに巻きつけることで、小手を上腕伸展方向に回転させることができる(最大連続トルク:12 [Nm], 最大回転数:5.7[rpm])。これにより、振動刺激による上腕二頭筋の収縮状態において、上腕を伸展方向に他動運動させることが可能となった。さらに、小手の回転軸内にロータリーエンコーダーを内蔵し回転位置を計測しているため、小手の回転位置と回転速度を制御することが可能である。

続いて、運動感覚表現機構として、錯覚が生じている上腕の運動感覚の変化を表現するために、その肘関節と回転中心がほぼ同じ軸上に、仮想的な腕として自在に回転させることが可能なレバーを設置した。ロータリーエンコーダーを内蔵し回転角度を計測することが可能なレバーを、被験者が非錯覚側の手で操作することで、錯覚が生じている手で表現することはなく、過伸展の運動感覚もレバーを回転させ続けることで表現することが可能である。また、感じとった動きをレバーの回転として表現する方法であるので、特殊な操作や訓練は必要としない。

そして、実験制御・記録用コンピューターの画面内で、振動刺激装置の振動数、腕位置制御機構の移動量、速度を設定し、そのコンピューターにUSB接続されたモータコントローラ(iXs Research社製, iMCs01), モータドライバ(iXs Research社製, iMDs03, 定格:24[V], 7[A])を介してそれぞれの装置を制御する。また、腕位置制御機構の小手の回転角度および運動感覚表現機構のレバーの回転角度は、実験制御・記録用コンピューターに記録される。

2.1.2 予備実験

過伸展錯覚の創出に関し、振動刺激のみを付与した条件について事前に予備実験を行った。本実験は、上腕を真っ直ぐに伸展させた状態で、屈曲しないようテーブル上に固定し、上腕二頭筋の腱周辺に振動刺激を60[sec]間付与した。この間には、動いていると錯覚している上腕の位置に一致するように、運動感覚表現装置のレバーを回転させるよう被験者に指示をした。この実験を、被験者6名を対象に、インターバルをはさんで3回行った。そのデータを図6に示す。これによると、実験終了時には6名全員において過伸展錯覚が生じていることが分かる。3名の被験者(図6(a), (c), (d))においては、最終的に10[deg]程度のばらつきが見られるが、他の3名(図6(b), (e), (f))においては、ばらつきは少なく、ほぼ同様の過伸展錯覚が生じていた。特に6名の実験結果として、実験開始から約40[sec]経過すると、過伸展の運動感覚変化が少なくなる傾向が見られた。このことは振動刺激時間の長さにしたがって、過伸展する運動感覚が絶えず強まり続けるわけではないことを示唆していると考えられる。そこで、以下に行う実験では、一定の振動刺激時間内において過伸展錯覚を強める方法について調査することにした。

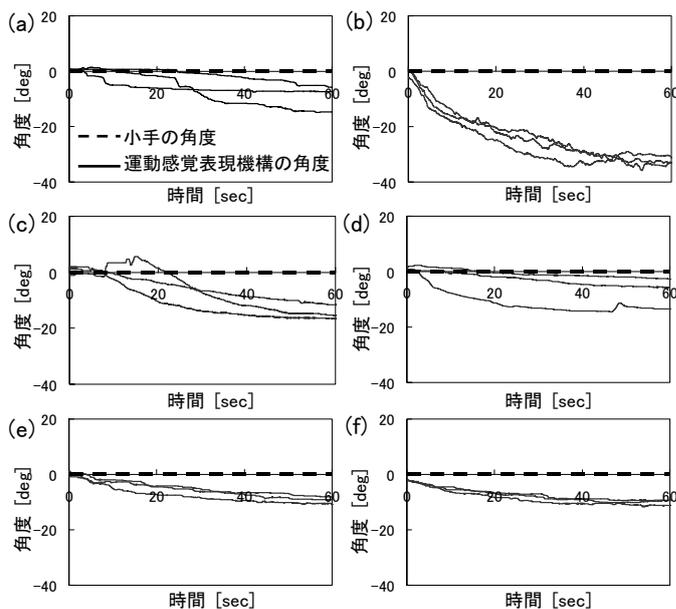


図6 振動刺激のみを付与した実験結果

Fig.6 Result of only vibratory stimulation condition

2.1.3 実験参加者

被験者8名(健康な成人男性, 右利きのみ, 21-26歳)を対象に2.1.4で示す実験を行った。順序効果为了避免するために被験者ごとに実験条件の順序はランダムにした。また、被験者には閉眼状態で左腕に振動刺激を与えたが、モータ音の影響を避けるために実験中は絶えずヘッドホンを装着し、ホワイトノイズを聞かせることにした。

2.1.4 実験デザインと手続き

上腕の前腕部を小手に固定し、上腕二頭筋の腱周辺に振動刺激を付与し続けた状態において、その小手を伸展方向へ他動的に回転させる際に、上腕の初期位置(移動量)、小手を動かす回数、小手を動かす速度に着目した実験を行った。

実験条件を表 1, 実験手法を図 7 に示し、各実験条件における実験手順について説明する。

図 7(a)に示す上腕の初期位置に関する実験条件では、実験開始とともに被験者の左上腕に振動刺激を付与し、5 秒間経過した後に前腕部を固定した小手を一定の移動速度(5[deg/s])で、上腕がまっすぐ水平になるまで回転させた。被験者に対し、実験開始から終了の合図があるまで、動いていると感じている左上腕の位置に一致するように、運動感覚表現機構のレバーを反対の右手で回転させるように指示した。初期位置は、0[deg](表 1 の条件 2)、20[deg] (表 1 の条件 6)、40[deg] (表 1 の条件 5)の 3 条件で実験を行い、それぞれインターバルをはさんで 3 回施行した。移動量が条件ごとに異なるので、振動刺激時間を 20 秒間に一定とした。

次に、図 7(b)に示す小手を動かす回数については、実験開始とともに左上腕に振動刺激を付与し、5 秒間隔で前腕部を固定した小手を一定移動速度(5[deg/s])で回転させた。移動回数が、1 回(表 1 の条件 5)、2 回(表 1 の条件 4)、4 回(表 1 の条件 3)の 3 条件で比較を行った。移動回数が 1 回の場合は初期位置に関する実験と同じであり、移動回数が 2 回の場合は開始 5 秒後に小手をテーブル面から 20[deg]の位置まで回転させ、その角度を 5 秒間維持した後に、先と同じ速度で小手が 0[deg]になるまで回転させ、その状態で 20 秒経過した後に実験を終了した。また、移動回数が 4 回の場合は、小手のテーブル面からの角度が、30, 20, 10[deg]それぞれの位置において、5 秒経過した後に次々と回転させた。最終的に、小手の角度が 0[deg]になるまで回転させ、0[deg]で 20 秒経過したのちに実験を終了した。この

表 1 実験条件

Table 1 Details of experiment conditions

	振動刺激	小手初期位置 [deg]	小手を動かす回数	小手の速度 [deg/s]	実験時間[s]
条件1	なし	40	3	5	60
条件2	あり	0	0	0	20
条件3	あり	40	4	5	48
条件4	あり	40	2	5	38
条件5	あり	40	1	5	※33
条件6	あり	20	1	5	※29
条件7	あり	40	1	2	45
条件8	あり	40	1	1	65

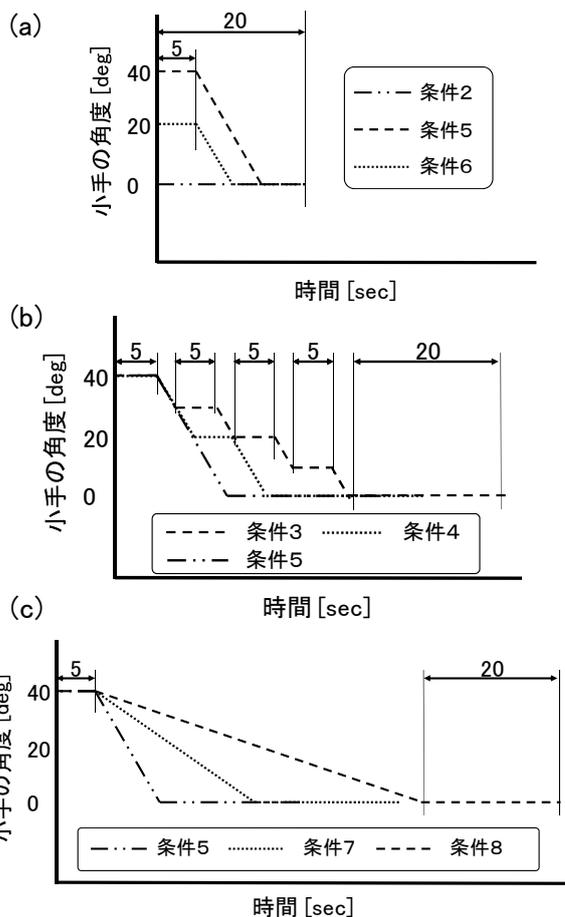


図7 3条件の実験手順

(a)上腕の初期位置に関する実験, (b)上腕を動かす回数に関する実験, (c)上腕を動かす速度に関する実験

Fig.7 Experiment procedures of three experiment conditions

- (a) Experiment on initial position of a vibrated arm,
- (b) Experiment on the number of times to move a vibrated arm,
- (c) Experiment on moving velocity of a vibrated arm

実験においては、振動刺激を与えている時間が異なるので、小手の移動速度(5[deg/s])、最終的な移動量(40[deg])を一定とした。先の実験と同様に、実験中は動いていると感じている左上腕の位置に一致するように、運動感覚表現機構のレバーを右手で回転させるように指示し、インターバルをはさみ合計で 3 回施行した。

最後に、図 7(c)に示す小手を動かす移動速度については、実験開始とともに振動刺激を付与し、5 秒間経過した後に、移動速度 1[deg/s] (表 1 の条件 8)、2[deg/s] (表 1 の条件 7)、5[deg/s] (表 1 の条件 5)で上腕がまっすぐ水平になるまで移動させた。実験中は感じとった左上腕の位置に一致するように、運動感覚表現装置のレバーを右手で回転させるように指示し、インターバルをはさんで 3 回施行した。振動刺激を与えている時間が条件ごとに異なるので、小手の移動量を 40[deg]で一定とした。

以上の実験条件(表 1 の条件 2-8)と、運動感覚表現機構のレバーを回転させるトレーニングの意味を兼

ね、閉眼状態において左上腕の位置変化に伴う、運動感覚表現機構のレバーの回転変化を調査する1条件を加えた8条件において実験を行った。

各条件の実験終了後に、過伸展する運動錯覚の強さを5段階で評価するアンケートと、運動錯覚に関する自由筆記、さらには過伸展時の運動感覚のイメージをイラストで描くように指示し、各実験条件の間には適度な休息を与えた。

2.2 実験結果

2.2.1 閉眼状態における上腕位置の表現

条件1の実験を行い、移動中の小手の角度と運動感覚表現機構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 -2.0 ± 7.5 [deg]であった。

2.2.2 上腕の初期位置に関する実験結果

上腕の初期位置に関する3条件の実験結果をまとめる。本実験終了時には上腕は水平状態に移動しており、このときの小手と運動感覚表現機構の角度差、すなわち、現実の上腕はテーブル上にてまっすぐに伸ばしたままにもかかわらず、そのときに感じていた上腕の動きとしての、運動感覚表現機構で示した角度の大きさである過伸展錯覚の角度を各条件間で比較した。なお、3条件のそれらの結果と、錯覚が全く生じていないと想定した値(小手と運動感覚表現機構の角度差が0[deg])との間でのt検定結果は次に示す通りであった(0[deg] ($t(7)=9.71$), 20[deg] ($t(7)=6.63$), 40[deg] ($t(7)=6.11$), いずれも有意水準1[%]で有意差がみられた)。

これらの小手と運動感覚表現機構の角度差をまとめた平均値と標準偏差の結果を図8(a)に、錯覚の強さに関する主観調査の結果の平均値と標準偏差を図8(b)に示す。

図8(a)の角度差において、初期位置が20[deg]の条件は、0[deg]の条件に対して5[%]の有意水準で有意差がみられた($t(7)=2.59$, $p<0.05$)。また、図8(b)の主観調査の結果からも、初期位置が20[deg]の条件は0[deg]の条件に対して1[%]の有意水準で有意差がみられ($t(7)=7.51$, $p<0.01$)、また、40[deg]の条件は0[deg]の条件に対して1[%]の有意水準で有意差がみられた($t(7)=4.24$, $p<0.01$)。

2.2.3 上腕の移動回数に関する実験結果

上腕の移動回数に関する3条件の実験結果をまとめる。本実験終了時においても、上腕は水平状態に移動しており、そのときに感じていた上腕の動きとしての運動感覚表現機構で示した角度の大きさである過伸展錯覚の角度を、小手と運動感覚表現機構の角度差として各条件間で比較した。なお、3条件のそれらの結果と、錯覚が全く生じていないと想定した値(小手と運動感覚表現機構の角度差が0[deg])との間でのt検定結果は次に示す通りであった(1回($t(7)=5.19$), 2回($t(7)=7.72$),

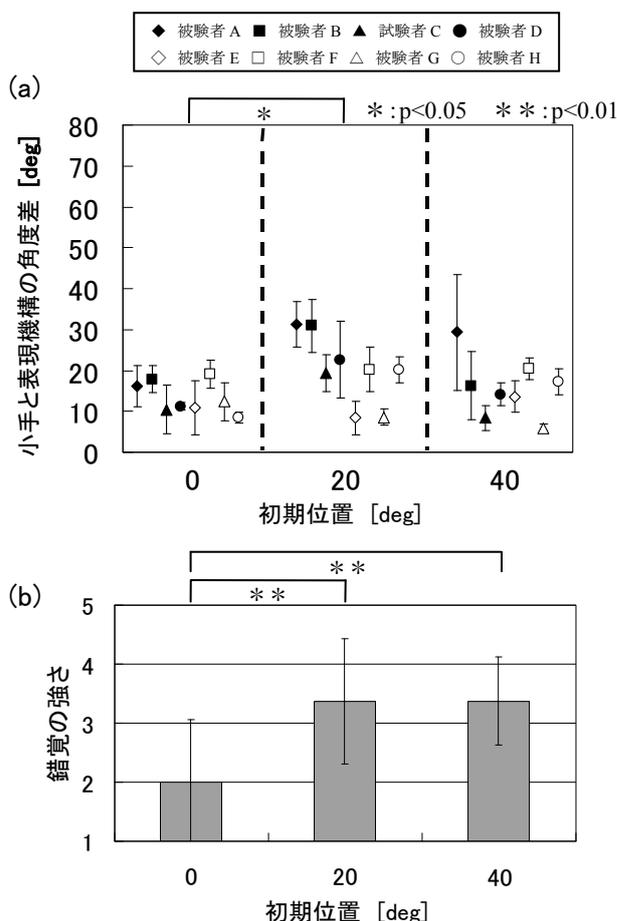


図8 上腕の初期位置に関する実験結果(平均値と標準偏差)
 (a) 小手と表現機構の角度差, (b)錯覚の強さ

Fig.8 Result of a condition on an initial position of a vibrated arm

- (a) Difference between splint angle and rotating lever angle,
- (b) Subjective intensity of the illusion

4回 ($t(7)=8.55$), いずれも有意水準1[%]で有意差がみられた)。

これらの小手と運動感覚表現機構の角度差をまとめた結果を図9(a)に、錯覚の強さに関する主観調査の結果の平均値と標準偏差を図9(b)に示す。

角度差において、移動回数が2回の条件は1回の条件に対して5[%]の有意水準で有意差がみられ($t(7)=2.74$, $p<0.05$), 4回の条件は1回の条件に対して1[%]の有意水準で有意差がみられた($t(7)=3.64$, $p<0.01$)。一方、主観調査の結果では、図9(b)をみる限りにおいても、錯覚の強さの差はほとんど見られず、有意差も見られなかった。

2.2.4 上腕の移動速度に関する実験結果

上腕の移動速度に関する3条件の実験結果をまとめる。本実験においても同様に、実験終了時の小手と運動感覚表現機構の角度差である過伸展錯覚の角度を、各条件間で比較した。なお、3条件のそれらの結果と、錯覚が全く生じていないと想定した値(小手と運動感覚表現機構の角度差が0[deg])との間でのt検定結果は次に示す通りであった(1[deg/s] ($t(7)=11.94$), 2[deg/s]

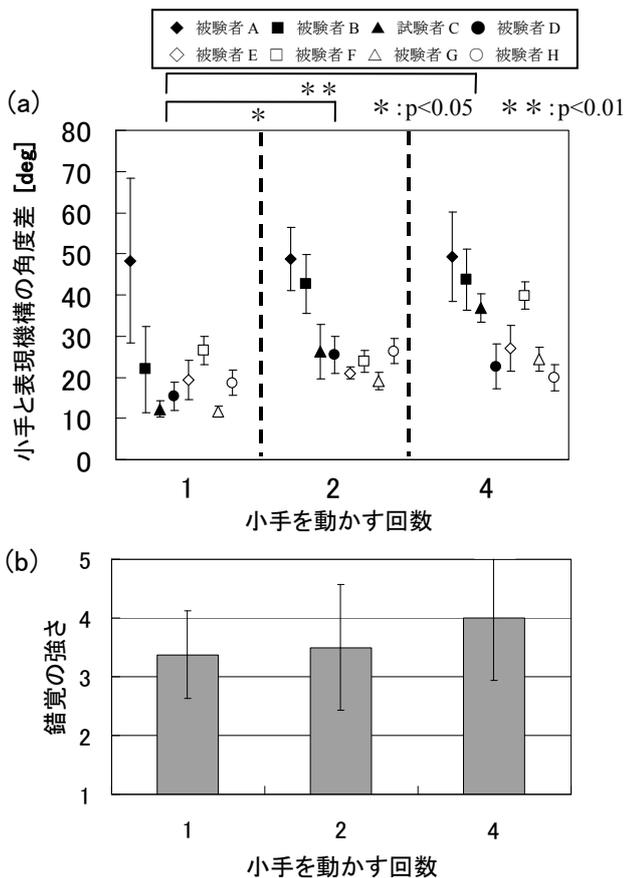


図9 上腕を動かす回数に関する実験結果(平均値と標準偏差)

(a) 小手と表現機構の角度差, (b)錯覚の強さ

Fig.9 Result of a condition on the number of times to move a vibrated arm

(a) Difference between splint angle and rotating lever angle,
(b) Subjective intensity of the illusion

($t(7)=4.75$), 5[deg/s] ($t(7)=5.19$), いずれも有意水準 1[%]で有意差がみられた)。

これらの小手と運動感覚表現機構の角度差の結果および、錯覚の強さに関する主観調査の結果の平均値と標準偏差を、それぞれ図 10(a),(b)に示す。

角度差において、運動速度が 1[deg/s]の条件は 5[deg/s]の条件に対して 5[%]の有意水準で有意差がみられ ($t(7)=2.70$, $p<0.05$), 2[deg/s]の条件も 5[deg/s]の条件に対して 5[%]の有意水準で有意差がみられた ($t(7)=2.62$, $p<0.05$)。

一方、主観調査の結果では、図 10(b)をみる限りにおいても、錯覚の強さの差はほとんど見られず、有意差も見られなかった。

2.2.5 運動感覚表現機構の角度と主観的な強さとの関係

各実験条件の結果としてまとめた小手と運動感覚表現機構の角度差、すなわち運動感覚表現機構で示された過伸展錯覚の角度の大きさと、主観的な強さの対応関係についてまとめる。そこで、各被験者の全ての実験条件において、横軸を 5 段階評価による主観的な錯

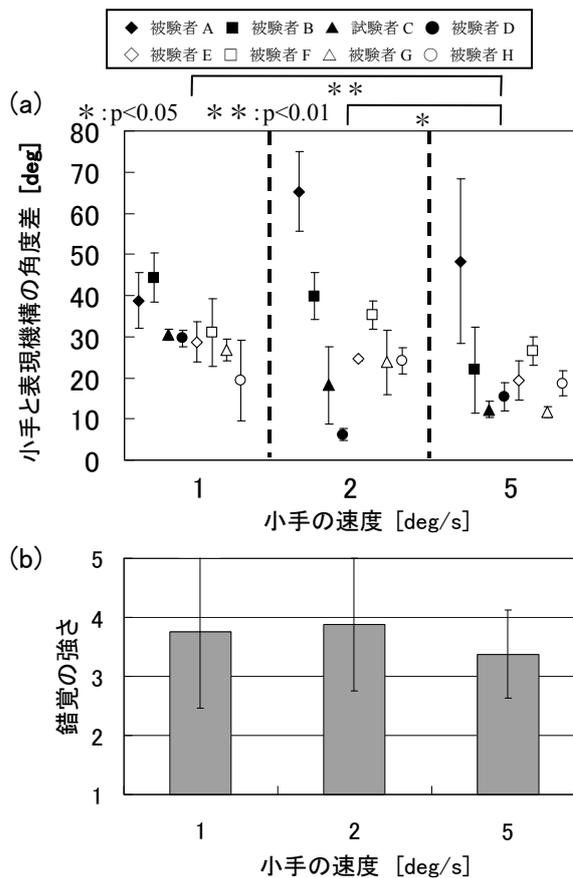


図 10 上腕を動かす速度に関する実験結果(平均値と標準偏差)

(a) 小手と表現機構の角度差, (b)錯覚の強さ

Fig.10 Result of a condition on moving velocity of a vibrated arm

(a) Difference between splint angle and rotating lever angle,
(b) Subjective intensity of the illusion

覚の強さに設定し、縦軸に各実験条件時の最大の過伸展錯覚の角度をプロットし、さらに相関係数を算出した。各被験者におけるこれらの相関係数を表 3 にまとめ、その中の特長的な 3 名(C, D, E)の事例を図 11 に示した。

図 11 で一部示すように、主観的な錯覚の強さが大きいほど、過伸展錯覚の角度量も大きくなる傾向が被験者全員に見られ、表 2 が示すように、特に 6 名(被験者 A,B,D,F,G)では比較的強い相関関係が示された。しかし、1 名(被験者 C)においては図 12(C)のように、錯覚の強さと過伸展角度量との間で低い相関関係が見られた。

2.2.6 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。また、実験終了後に描いた過伸展時の運動感覚のイメージのイラストの数例を、図 12 に示す。

3 考察

上腕への振動刺激に加え他動運動させることによる過伸展錯覚への影響をまとめると以下のようにまとめられる。

表 2 過伸展角度と錯覚の強さの相関係数

Table 2 Coefficient of correlation between illusory hyperextension angle and subjective intensity of the illusion

被験者	A	B	C	D
相関係数R	0.74	0.78	0.40	0.83
被験者	E	F	G	H
相関係数R	0.65	0.73	0.78	0.59

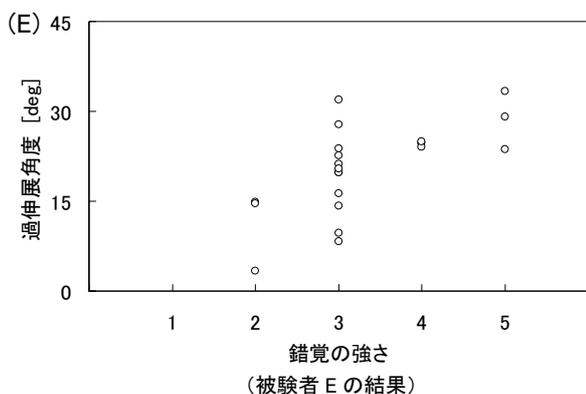
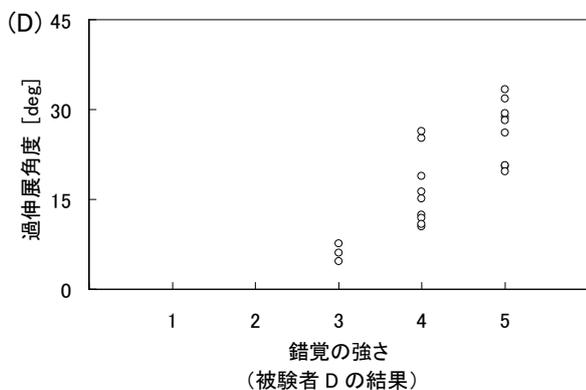
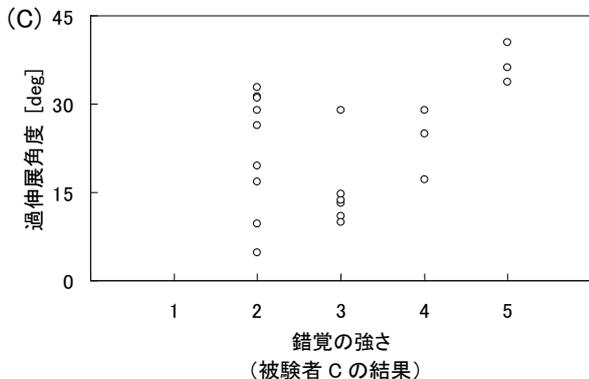


図 11 過伸展角度と錯覚の強さの関係

Fig.11 Relations of illusory hyperextension angle and subjective intensity of the illusion

- ・上腕の初期位置(移動量)に関しては、移動しない条件と比較して、移動する方が過伸展錯覚の効果が強まるものの、移動量がより大きいほど有意に影響が生じるわけではなかった。
- ・上腕を動かす回数に関しては、1 回だけの条件と比較して回数が多い方が過伸展錯覚の効果が強まるものの、その回数が増加するほど有意に影響が生じるわけではなかった。

表 3 コメントのまとめ

Table 3 Summary of comments

腕を動かさない条件(条件2)
・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。
腕を動かす条件(条件3~8)
・腕を動かす条件のほうが、強い錯覚を感じる。
・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。
・速さが遅いほうが、錯覚が強い。(条件7,8)
・腕の初期位置が大きいほうが、錯覚がきやすい。(条件5,6)
・腕の位置感覚と、動きの感覚に感覚が分離する。

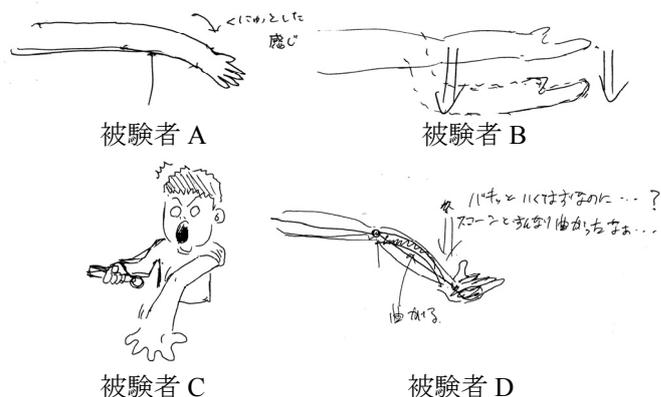


図 12 腕の過伸展錯覚のイメージイラスト

Fig.12 Illustrations of illusory hyperextension kinesthesia of a vibrated arm

- ・上腕を動かす速度に関しては、今回の条件の中で最も遅い速度の方が、早い速度の条件よりも、過伸展錯覚の効果が有意に強まった。

以上の知見を踏まえると、将来的に図 2 で示したようなアイデアを実現する上で、他動運動の小さな可動範囲や少ない移動回数によっても過伸展錯覚を強めることが可能であることから、システムの小型化を進めることが期待できる。その上で、偏心錘の回転からクランク機構による振動刺激方法への変更や、振動刺激装置の皮膚への押し付け力や接触面積、さらには振動装置の振幅量の調整も可能とすることで、被験者への振動刺激の負担や違和感を可能な限り軽減できると思われる。

一方で、今回の実験では伸展方向に移動させるのみの過伸展錯覚に着目したため、屈曲方向に移動させる場合、さらには伸展・屈曲の両方向に運動錯覚を生じさせる場合についても引き続き調査を行う必要がある。

続いて過伸展錯覚の表現方法について言及し、錯覚の現実性について考察する。

上腕の運動錯覚をレバーの移動量として表現する方法においては、本実験ではある特定の時点における過

伸展錯覚の角度に着目したが、この方法の特長として、その時間的な変化の記録が可能ながあげられる。その場合、感じつつ上腕の動きと、それに一致させるようにレバーを動かす行為において時間ズレが生じてしまう。本実験では、5[deg/s]前後の他動運動であればほとんど時間ズレが生じることなく、追従可能であることを事前の予備的な実験から判断したが、実際に錯覚が生じている場合にはより早い速度で動いている感覚が生じている可能性もある。本実験では、他動運動を行っていない状態での過伸展錯覚の角度を評価しているため、時間ズレの影響はほとんどないと考えられが、過伸展錯覚の時間的ダイナミクスについて調査するには、こうした追従性についても今後検討しておく必要がある。

続いて、コメントとイラストによる表現方法の特徴も踏まえ、錯覚の現実性について考察する。表 2 の被験者コメントによると、「折れ曲がっていく...」、「伸びていく...」、「平行に沈んでいく...」、「下がっていく、落ちていく...」、「くにゅっと曲がる...」、「曲がらない方向まで曲がった...」などと記述されたように、過伸展錯覚の現象を、「腕が〇〇する」といった形式で、客観的な身体の動きとして報告される特徴がみられた。また、図 12 のイラストによると、コメントでは十分に表現されていない動きの感覚として、例えば、肘関節を中心に逆方向に曲がるのではなく前腕部そのものが曲がったり、肘関節付近が伸びるように歪んで前腕部が平行に移動したりする表現がみられた。さらには、「パキュ...?」「スコーン...」「くにゅ...」というような、擬音語・擬態語を注釈として追加することで、過伸展錯覚における主観的な質感を表現しようとする試みもみられた。

以上のように、本実験で行った過伸展錯覚の表現方法において、時間的な変化、あるいは質感に関する現象を表現した特徴があったものの、非現実的な過伸展の状態が、まさにそれが自身の身体で起きているという現実性の程度については必ずしも表現されていなかった。

こうした錯覚の現実性は、被験者が過伸展錯覚を体験しているときには、「お！ すげえー すげえー すげえー...」、「ひゃあー」、「あ、きゃー」などの、感嘆の言葉を数名が発していた現象に関係すると考えられる。思わず発してしまう上記の驚きの言葉は、現実には起こりえず、自分でもほとんど予想していなかった驚きをそのまま表現したものであり、被験者における錯覚の現実性の確かさを示していると考えられる。さらには、このような状態のときには、心拍や発汗などの生理的な変化において著しい変動が生じているとも予想され、そのような変動からも、錯覚の現実性の程度を評価できる可能性があると思われる。

その一方で、表 3 の「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」というコメントが示すように、

過伸展という統合された感覚ではなく、上腕の位置は動かずに一定状態であるという感覚と、一方で上腕は伸展し続けているように感じるという、位置と運動の感覚が分離してしまう現象が生じることも報告された。このことは、図 11(C)の関係に見られたように、上腕の位置の感覚の方が前面に出たために運動錯覚としての強さは弱く感じたが、動きの感覚そのものは生じていたためレバーを動かし続けたなどの現象が生じ、その結果として両者の相関が低くなったことに関係すると考えられる。

すなわち、非日常的な過伸展の錯覚は、身体の可動域近傍あるいは短時間に限って創出し、その範囲を超えてしまうと統合された過伸展の感覚というよりは、別の感覚や、違和感として感じられてしまうような現象であると考えられる。

4 おわりに

本研究では、錯覚現象を活用すると現実世界では起こり得ない感覚を体験させることができる特長に着目し、物理的な身体の動きに制約されず、新しい運動の感覚を創出する技術の開発に取り組むことにした。そこで、腱振動刺激による運動錯覚と他動運動を組み合わせることで、上腕の伸展運動の感覚を調整することが可能な実験システムを開発し、上腕の過伸展錯覚を強める条件について調査を行った。固定した上腕を動かす際の初期位置、移動回数、速度を変える比較実験を行った結果、上腕を他動的に動かす初期位置が大きいこと、移動回数が多いこと、そして他動運動の速度が遅いことにおいて過伸展錯覚を強めることが示された。今後は、伸展・屈曲の両方向に自在に運動錯覚を生じさせる技術に取り組むと共に、運動錯覚の質感や程度を表現するための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] Kitaoka,A., Ashida,H.: A variant of the anomalous motion illusion based upon contrast and visual latency; *Perception*,Vol.36 (7) ,pp.1019-1035 (2007)
- [2] V.S.ラマチャンドラン：脳の中の幽霊；角川書店(1999)
- [3] Georgeson,M.: Visual aftereffect: cortical neurons change their tune; *Curr.Biology*, Vol.14, pp. 751-753 (2004)
- [4] Morikawa, H., Kawai, T., Kubota, H., Nagashima, H.: A study on the illusion caused by stereoscopic 3-D images and tactile stimulus; *Proceedings of Japan Ergonomics Society*, pp.80-81 (2002)

[著者紹介]

- [5] Ijsselstein, W.A., de Kort, Y. A. W., Haans, A.: Is this my hand I see before me? The Rubber Hand Illusion in Reality, Virtual Reality, and Mixed Reality; Proceedings of PRESENCE, pp.41-47 (2005)
- [6] 渡邊淳司, 福沢恭, 梶本裕之, 安藤英由樹: 腹部を通過する仮現運動を利用した貫通感覚提示; 情報処理学会論文誌, Vol. 49, No. 10, pp. 3542-3545 (2008)
- [7] 小坂翔, 原正之, 黄健, 藪田哲郎: 上肢運動におけるミューラー・リヤー錯視情報の影響; 第 26 回日本ロボット学会学術講演会講演論文, 313-04 (2008)
- [8] 河合隆史, 柴田隆史: 先端メディアと人間の科学; 早稲田大学 e ヒューマン研究所 (2006)
- [9] 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)
- [10] 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)
- [11] Naito, E.: Sensing Limb Movements in the Motor Cortex: How Humans Sense Limb Movement; The Neuroscientist, Vol.10, pp.73-82 (2004)
- [12] Lackner, J.R.: Some proprioceptive influences on the perceptual representation of body shape and orientation; Brain 111, pp.281-297 (1988)
- [13] 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)
- [14] Cordo, P.J., Gurfinkel, V.S., Brumagne, S., Flores-Vieira, C.: Effect of slow, small movement on the vibration-evoked kinesthetic illusion; Experimental Brain Research, Vol.167, pp.324-334 (2005)

(2009 年 1 月 10 日受付)

友田 達也



平成 19 年早稲田大学理工学部機械工学科卒業。同年、同大学創造理工学研究科総合機械工学修士課程修士課程入学。現在に至る。運動錯覚の研究に従事。

上杉 繁 (正会員)



平成 11 年早稲田大学大学院理工学研究科修士課程修了。大日本印刷(株)、金沢工業大学場の研究所、早稲田大学理工学部助手を経て、同大学生命医療工学インスティテュート助手、講師。平成 19 年より同大学創造理工学部総合機械工学科専任講師。平成 20 年より同准教授。博士(工学)。共創インタフェース、場のコミュニケーション・テクノロジーなどの研究に従事。情報処理学会、日本機械学会、ヒューマンインタフェース学会、IEEE、ACM などの会員。

三輪 敬之



昭和 51 年早稲田大学大学院理工学研究科博士課程修了。同大学助手、講師、助教授を経て、昭和 61 年同大学理工学部機械工学科教授、平成 19 年より、同大学創造理工学部総合機械工学科教授、現在に至る。工学博士。場の工学技術、共創システム、植物のコミュニケーション、などの研究に従事。日本機械学会フェロー、電子情報通信学会、ヒューマンインタフェース学会、IEEE、ACM などの会員。