

# 他動運動時における上腕運動錯覚の速度特性に関する研究

Velocity Characteristic of Illusory Kinesthesia of an Upper Arm while Moving the Upper Arm

仲村晃<sup>1)</sup>, 友田達也<sup>1)</sup>, 上杉繁<sup>2)</sup>, 渡辺貴文<sup>2)</sup>, 三輪敬之<sup>2)</sup>

Akira NAKAMURA and Tatsuya TOMOTA and Shigeru WESUGI and Takabumi WATANABE and Yoshiyuki MIWA

1) 早稲田大学大学院創造理工学研究科

(〒169-8555 新宿区大久保 3-4-1, a-nakamura@suou.waseda.jp, tomotatsu7-20@ruri.waseda.jp)

2) 早稲田大学理工学術院

(〒169-8555 新宿区大久保 3-4-1, wesugi@waseda.jp, takabumi@fuji.waseda.jp, miwa@waseda.jp)

**Abstract:** Authors have focused attention on illusory kinesthesia created by tendon vibration, and showed previously that vibrating a biceps brachii muscle and moving the upper arm toward extending direction strengthened illusory kinesthesia of the upper arm, and consequently created hyperextension kinesthesia of the arm. In order to control an amount of illusory kinesthesia by an "illusory kinesthesia generator", authors investigated a relationship among the velocity of illusory kinesthesia of the upper arm, initial position and moving velocity of the upper arm. From the experimental results, the response surface was created by using least squares method. Therefore the function of velocity of illusory kinesthesia during moving arm was obtained.

**Key Words:** Illusory kinesthesia, Tendon vibration, Upper arm, Moving velocity

## 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、昨今では、知覚現象に関わる脳機能解明のアプローチとして錯覚研究への関心がより高まっている[1]。また、錯覚現象を Virtual Reality などの工学領域で活用する試みが多数行われている[2][3][4]が、その特長として、直接的には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点が挙げられる。

著者らは、自身の身体の物理的な構造に制約されずに、運動の感覚のみを外部から操作することを目指し、腱振動刺激による運動錯覚現象[5]に着目した。これは、筋肉の腱に 70~100[Hz]程度の振動刺激を与えると、筋肉に収縮が生じ、この筋の収縮を妨害すると、筋が収縮方向とは逆の方向に伸展したかのように感じる現象である。これまでに、運動錯覚が生じている上腕において伸展方向、または屈曲方向に他動運動を加えることで運動錯覚が強まること、また、伸展方向に関しては、上腕を伸ばしきった以上に伸展する、過伸展の感覚が生じることを明らかにした[6][7]。特に、上腕を他動運動させる際の初期位置、他動速度、他動回数などが運動錯覚に影響を与えることを示した。しかし、運動錯覚の変化を外部から自在に制御するためには、これらのパラメータの運動錯覚への影響を定量化する必要がある。本研究では、上腕を他動運動させる際の初期位置、他動速度に着目し、まずは、錯覚が生じたときの上腕

伸展量の時間的変化（本研究では、これを以下、錯覚の速度と呼ぶことにする）との定量的な関係を調べることを試みたので以下に報告する。

## 2. 実験システム

運動錯覚を創出、変化させ、上腕の運動感覚の変化を被験者が表現する手法について述べる。まず、上腕に運動錯覚を創出させるため、上腕二頭筋の腱に正確に振動刺激を与え、筋の収縮を妨害するため上腕を固定する。そして、固定した上腕を、肘を中心に伸展方向に他動運動させ、生じた運動錯覚を変化させる。また、被験者は、運動錯覚が生じている上腕の運動の感覚に一致するように、反対側の腕を動かして、その運動を表現する。このとき、肘を中心として腕を動かした角度を、上腕の運動感覚の変化として計測する。

上記の手法を実現させるため、本研究において新たに開発した運動錯覚ジェネレータの構成及びそのシステム外観を図 1、図 2 に示す。本システムは、錯覚を生じさせるために振動刺激を付与する装置（振動刺激装置）、固定した上腕を外部から動かす装置（腕位置制御装置）で構成された、運動錯覚を創出・変化させるための「運動錯覚創出装置」と、上腕の運動感覚の変化を表現する「運動感覚表現装置」の 2 つの装置から構成される。

振動刺激装置は、錯覚を生じさせたい筋肉の腱の位置に固定して振動刺激（振動数：0~80[Hz]、振幅：5[mm]）を

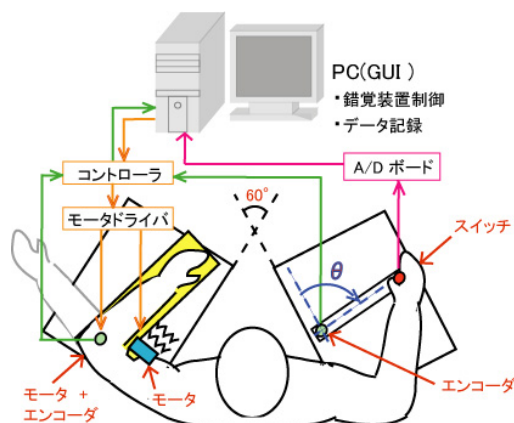


図1 運動錯覚ジェネレータの構成

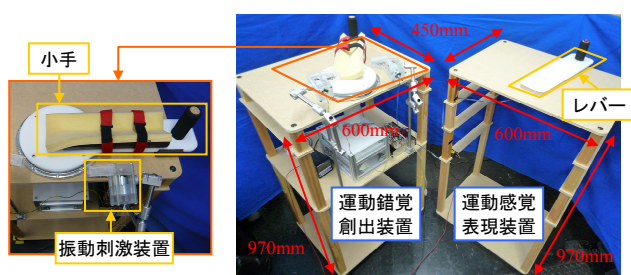


図2 運動錯覚ジェネレータの外観

与えることを実現した。

腕位置制御装置は、上腕を水平に真っ直ぐ伸ばした状態を  $0[\text{deg}]$ 、屈曲方向を正として、肘を中心に  $0\sim 90[\text{deg}]$  の範囲、 $0\sim 10[\text{deg/s}]$  の速度で伸展・屈曲運動させることが可能である。

運動感覚表現装置は、錯覚が生じている上腕と左右対称に位置するように、被験者が非錯覚側の手で操作するレバーと、レバーを動かした角度を計測するエンコーダから構成される。また、被験者が錯覚による運動感覚の変化を感じなくなったとき、上腕の位置がわからなくなったとき、あるいは位置の感覚と運動感覚が分離したときに押すスイッチを、レバー先端に取り付け、その時点の時間と運動感覚表現装置の角度を記録することを可能とした。

それぞれの機構は、上腕が肩と水平の高さで、伸展・屈曲運動ができるように位置している。また、上腕を水平に真っ直ぐ伸ばした状態から  $90[\text{deg}]$  屈曲させた状態が、上腕を前に自然に出した姿勢になるように、運動錯覚創出装置と運動感覚表現装置のなす角が  $60[\text{deg}]$  になるように配置した。また、2つの装置間の幅と、被験者が座る椅子の高さを調整することで、被験者の体格の違いにも対応することを可能とした。そして、PC画面上から振動刺激装置の振動数、上腕を他動運動させる際の初期位置および他動速度を、モータコントローラを介して制御し、腕位置制御装置、運動感覚表現装置の角度を記録する。

### 3. 運動錯覚実験

#### 3.1 実験手法

運動錯覚ジェネレータを用いて、運動錯覚の変化を外部から自在に制御することを目指し、まずは錯覚の速度に着目し、運動錯覚に影響を及ぼす他動運動との関係について調べることにした。そこで、上腕を伸展方向に他動運動させる際の上腕の初期位置  $\theta_{\text{init}}$ 、他動速度  $V_{\text{arm}}$  の2変数を変化させることで、上腕の錯覚の速度  $V_{\text{illu}}$  がどのように変化するかを調査する実験を行った。事前実験により、表1のように実験条件を決定し、各条件に関して3回ずつ、被験者7名（健常な成人男性5名、女性2名）を対象に運動錯覚実験を行った。被験者には、閉眼、ホワイトノイズを聞いてもらった状態で左腕に振動刺激を与え、運動感覚表現装置のレバーを回転することで運動感覚の変化を表現し、錯覚が生じなくなったときにレバー先端のスイッチを押すよう指示した。実験後には、錯覚が生じなかったと感じたときを1、はっきりと錯覚が生じているのを感じたときを5として、5段階評価で実験中の錯覚の強さを報告してもらった。各実験間には3分間の休憩を設けた。実験の様子を図3に示す。

表1  $\theta_{\text{init}}$  と  $V_{\text{arm}}$  の条件

| 上腕の初期位置<br>$\theta_{\text{init}} [\text{deg}]$ | 他動速度<br>$V_{\text{arm}} [\text{deg/s}]$ |   |   |   |
|------------------------------------------------|-----------------------------------------|---|---|---|
| 0                                              | 0                                       | — | — | — |
| 20                                             | 0                                       | 2 | 4 | 6 |
| 40                                             | 0                                       | 2 | 4 | 6 |
| 60                                             | 0                                       | 2 | 4 | 6 |

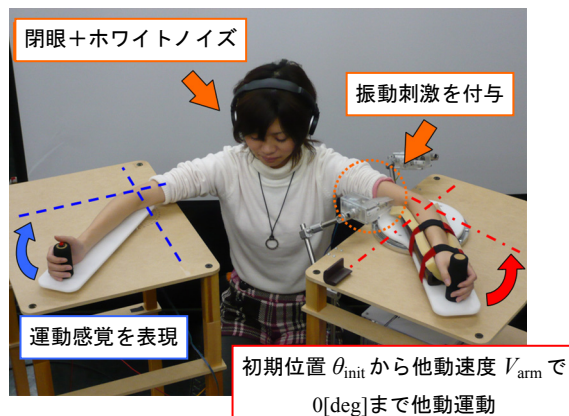


図3 運動錯覚実験の様子

#### 3.2 実験結果

実験結果の例を図4に示す。これらのグラフにおいて、実線は腕位置制御装置に固定され、振動刺激を付与された左上腕の角度で、破線が運動感覚表現装置の角度である。各グラフは、実験開始から、運動感覚表現装置のスイッチが押されて（運動錯覚の変化が生じなくなって）10[s]経過

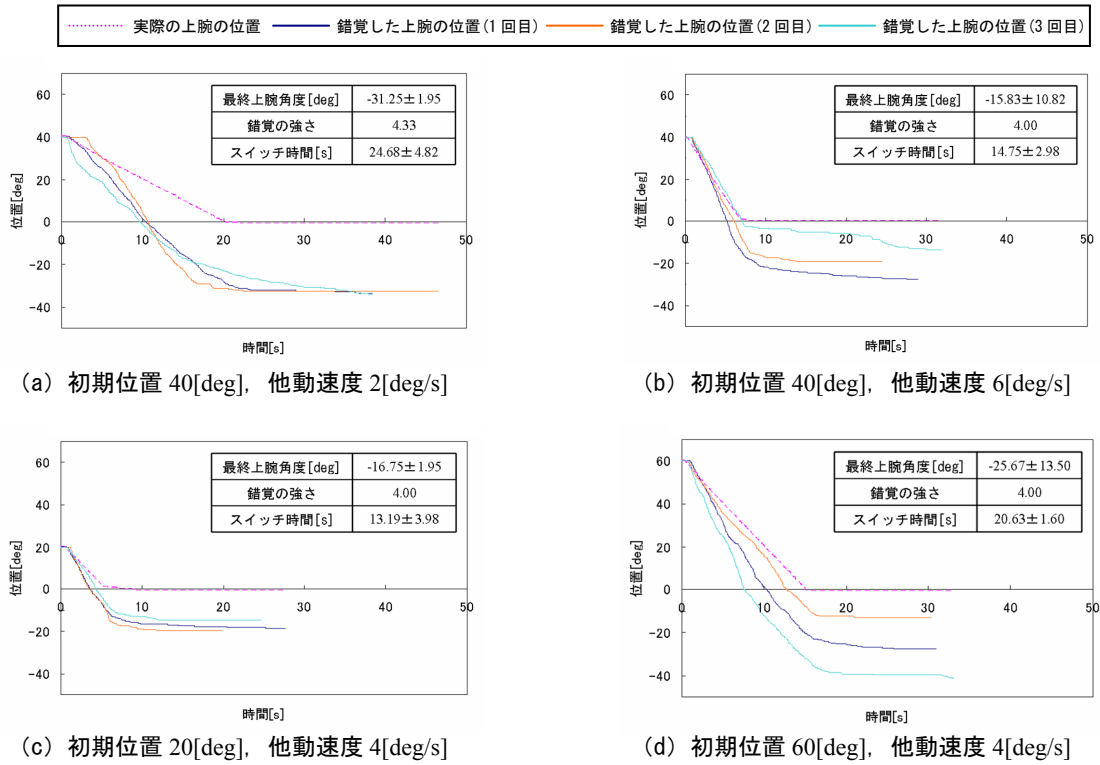


図 4 実験結果

するまでの結果である。また、スイッチが押されたときの時間、スイッチが押されたときの過伸展角度、アンケートによる錯覚の強さの 5 段階評価に関して、この被験者の平均値（各条件につき 3 回の実験）も共に示した。

実験結果から、どの条件でも被験者が感じている錯覚の強さはほとんど差が見られないが、他動運動中の錯覚の速度は実際の上腕の速度よりも大きいことがわかる。また、錯覚の生じている上腕を他動運動している間は、錯覚した上腕の角度が直線的に変化していることと、他動運動が終了した後は、時間と共に錯覚した上腕の角度が一定に近づく特徴が見られた。

#### 4. 錯覚の速度と他動運動の関係

実験結果から、他動運動中における錯覚の速度の変化と他動運動の初期位置  $\theta_{init}$ 、他動速度  $V_{arm}$  の関係を調べる。そこで、図 5 に示すように錯覚した上腕の角度の軌跡を直線近似 ( $\theta_{illu}(t)$ ) し、この傾きを錯覚の速度  $V_{illu}(t)$  とした。なお、本研究では他動運動中における錯覚の速度についてのみ対象とし、他動運動を停止した以降の領域については今後の課題とする。そこで、他動運動を含む条件のみを対象として実験結果を取り扱うこととする。

運動錯覚実験を行った被験者 7 名のうちの 3 名（被験者 A, B, C）は運動錯覚が生じやすく、また同じ条件において実験結果のばらつきが少なかった。その一例として被験者 A に関して、各条件 ( $\theta_{init}$ ,  $V_{arm}$ ) において 3 度行った実験結果からそれぞれ算出した  $V_{illu}$  の値と、これらの平均値及び標準偏差を表 2 に示す。また、3 名それぞれにおいて、運動錯覚実験結果 ( $\theta_{init}$ ,  $V_{arm}$ ,  $V_{illu}$ ) から、最小二乗法を用

いた一次近似により応答曲面を作成し、錯覚の速度の関数  $V_{app\_illu}(\theta_{init}, V_{arm})$  を求めた。すなわち  $V_{app\_illu}$  は、次式で表される。

$$V_{app\_illu} = aV_{arm} + b\theta_{init} + c \quad (1)$$

なお、応答曲面が実測値をどれだけ再現できているかを示す尺度である自由度決定済み決定係数  $R_{ab}^2$  の値は各被験者における式 (1) の係数  $a, b, c$  の値と共に表 3 に示し、式 (1) が良い近似であることが示された。

図 6 に被験者 A に関する  $V_{app\_illu}$  の応答曲面のグラフを示した。以上により、他動運動中における錯覚の速度に対する他動運動の初期位置や他動速度の関係を定量的に示すことができる見通しを得た。

ここで、式 (1) の定数項  $c$  について検討する。式 (1) において他動運動の初期位置  $\theta_{init}$  と他動速度  $V_{arm}$  にそれぞれ 0[deg], 0[deg/s] を代入する。これは上腕を水平し、他動運動を与えない状態に該当し、式の上では、 $V_{app\_illu} = c$  と

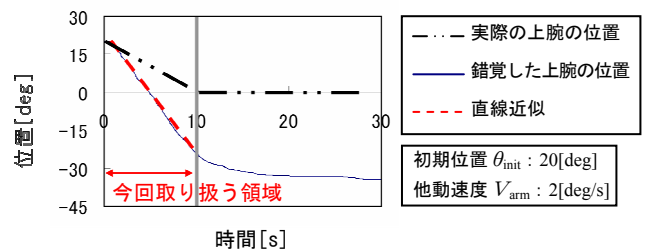
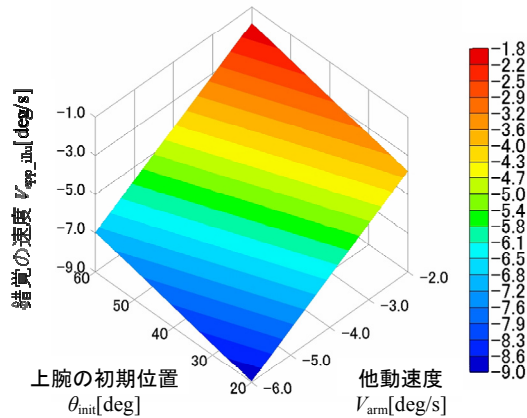


図 5 各領域の曲線を近似した結果

表 2 他動運動中の錯覚の速度

| 条件<br>( $\theta_{\text{init}}[\text{deg}]$ , $V_{\text{arm}}[\text{deg/s}]$ ) | 錯覚の速度 $V_{\text{illu}}[\text{deg/s}]$ |       |       |       |      |
|-------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|-------|-------|-------|------|
|                                                                               | 回数                                    |       |       | 平均値   | 標準偏差 |
|                                                                               | 1                                     | 2     | 3     |       |      |
| 条件(20, 2)                                                                     | -5.18                                 | -4.02 | -4.90 | -4.70 | 0.61 |
| 条件(20, 4)                                                                     | -6.60                                 | -6.26 | -5.58 | -6.15 | 0.52 |
| 条件(20, 6)                                                                     | -7.09                                 | -7.28 | -6.36 | -6.91 | 0.49 |
| 条件(40, 2)                                                                     | -4.72                                 | -3.78 | -3.12 | -3.87 | 0.80 |
| 条件(40, 4)                                                                     | -6.46                                 | -5.87 | -5.71 | -6.01 | 0.40 |
| 条件(40, 6)                                                                     | -6.42                                 | -7.74 | -9.25 | -7.80 | 1.41 |
| 条件(60, 2)                                                                     | -3.42                                 | -2.90 | -3.00 | -3.11 | 0.28 |
| 条件(60, 4)                                                                     | -4.59                                 | -5.76 | -6.33 | -5.56 | 0.89 |
| 条件(60, 6)                                                                     | -8.32                                 | -9.19 | -6.96 | -8.16 | 1.13 |

図 6  $V_{\text{app\_illu}}$  の応答曲面 (被験者 A)表 3 各被験者の  $V_{\text{app\_illu}}$  の係数の値

| 被験者 | $V_{\text{app\_illu}}$ の係数 |          |        | $R_{ab}^2$ |
|-----|----------------------------|----------|--------|------------|
|     | a                          | b        | c      |            |
| A   | 1.285                      | 0.05004  | -2.244 | 0.975      |
| B   | 0.9324                     | 0.007729 | -2.387 | 0.8747     |
| C   | 1.013                      | -0.01820 | -1.105 | 0.9535     |

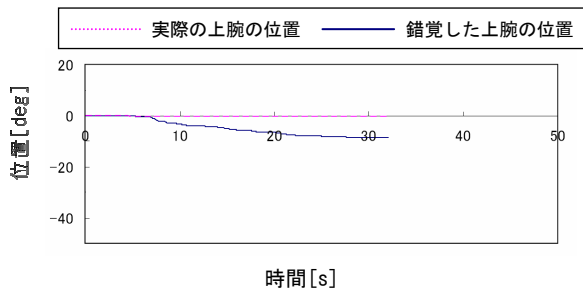


図 7 実験結果 (初期位置 0[deg], 他動速度 0[deg/s])

なるため、錯覚の速度が常に一定となると想定できる。一方で、 $\theta_{\text{init}}$ ,  $V_{\text{arm}}$  が 0[deg], 0[deg/s] の条件で実験を行った結果を図 7 に示す。これを見ると、錯覚の速度は徐々に変化

していき、定数で表すことができないことがわかる。このことから、伸展方向に一定速度で他動運動をさせている間に関しては、錯覚の速度と  $\theta_{\text{init}}$ ,  $V_{\text{arm}}$  の関係を  $V_{\text{app\_illu}}$  によって定量的に示せる可能性があり、錯覚の速度を外部から制御できる可能性が示唆された。

## 5. まとめ

本研究では、運動錯覚の変化を外部から自在に制御することを目指し、上腕を伸展方向に他動運動させる際の上腕の初期位置、他動速度と、上腕の錯覚の速度の変化との関係を調べる実験を行った。実験結果から、最小二乗法を用いて応答曲面を作成し、他動運動中の状態における錯覚の速度の関数を求めた。これにより、他動運動中における錯覚の速度に対する他動運動の初期位置と他動速度の関係を定量的に示すことができる見通しを得た。

## 謝辞

本研究の一部は、文部科学省グローバル COE プログラム「グローバルロボットアカデミア」の支援を受けた。ここに謝意を表す。

## 参考文献

- [1] M. Georgeson : Virtual affereffect:cortical neurons change their tune,Curr.Biology,Vol. 14, pp. 751-753, 2004
- [2] H. Morikawa, T. Kawai, H. Kubota, H. Nagashima : A study on the illusion caused by stereoscopic 3-D images and tactile stimulus, Proceedings of Japan Ergonomics Society, pp.80-81, 2002
- [3] W. A. IJsselsteijn, Y. A. W. de Kort, A. Haans : 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
- [4] 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
- [5] G. M. Goodwin, D. I. McCloskey, P. B. C. Matthews : 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] 友田達也, 上杉繁, 三輪敬之 : 腱振動刺激による運動錯覚創出インターフェースの開発, ヒューマンインターフェースシンポジウム 2007 論文集, pp. 487-492, 2007
- [7] 友田達也, 上杉繁, 三輪敬之 : 上腕伸展・屈曲の運動錯覚ジェネレータの開発, 計測自動制御学会システムインテグレーション部門学術講演会 (SI2007), 2007