

多点振動刺激による腕の運動錯覚への効果検証

Evaluation of Multi-Point Vibratory Stimulation on Kinesthetic Illusion of the Arm

○学 牛山 奎悟 (電通大) 学 田中 叡 (電通大)
高橋 哲史 (電通大) 梶本 裕之 (電通大)

Keigo USHIYAMA, The University of Electro-Communications, ushiyama@kaji-lab.jp
Satoshi TANAKA, The University of Electro-Communications, tanaka@kaji-lab.jp
Akifumi TAKAHASHI, The University of Electro-Communications, a.takahashi@kaji-lab.jp
Hiroyuki KAJIMOTO, The University of Electro-Communications, kajimoto@kaji-lab.jp

Presenting kinesthetic sensation usually requires a large space so as to avoid users colliding with objects or other users. One way to tackle this issue is to use kinesthetic illusion, which is a way of presenting kinesthetic sensation without physical motion. However, realizing dynamic motion and fast movement remains difficult. Considering that multiple synergist muscles are usually involved in a movement, stimulating multiple synergist muscles might enhance the illusion. Thus, we investigated whether multi-point vibratory stimulation to multiple synergist muscles enhances induced kinesthetic illusions. We found that stimulating multiple synergist muscles created more vivid illusions. Additionally, we found that our method was effective for inducing steady illusions, but not for rapid illusions. We also calculated the contribution of each proposed stimulation point to the illusion.

Key Words: Haptic Interface, Kinesthetic Illusion, Proprioception, Tendon Vibration

1. はじめに

VR 環境において没入感や、臨場感を向上させるためには自己受容感覚や運動感覚を提示することが大切である。通常、物理的な運動に対応し運動感覚が生起するので、体験者に歩行を行わせるなど実際の運動を組み込んだ装置が多く用いられるが、大きなスペースが必要であったり、体験者がモノや人に衝突してしまったりするという問題がある。

これらの課題を解決するために我々は運動錯覚に着目した。物理的な運動ではなく外部から運動感覚のみを操作できれば実際の空間に制限されることなく VR 体験を提示することが可能となる。本稿では運動錯覚の VR 応用を目指し、運動錯覚の強度について基礎的な実験を行ったことを報告する。

運動錯覚とは身体的位置や運動の錯覚であり、自己受容器を刺激することによって物理的な運動を伴わずに運動感覚のみを生起させることができ、視覚のみでも錯覚が生起したことが報告されている。運動錯覚を生起させるための方法として、筋や腱への約 100Hz の振動刺激が多く用いられる[1]。腱振動による運動錯覚は筋へ振動が伝わり内部の筋紡錘が刺激され、周波数に対応した発火頻度に変化することで物理的に動いていない身体が動いているという錯覚が生起すると考えられている[2]。

筋が運動感覚に高い貢献をしていることを考えれば、腱振動が運動錯覚生起のための効果的な方法である。腱振動により生起する運動錯覚の強度は主に振動周波数と振動振幅に強く依存する[2][3]。一方で振動子の押し込み力が錯覚生起の閾値に影響を及ぼすことも知られている[4]。

しかしながら、現在生起する錯覚の強度は VR 応用のためには不十分であり、ダイナミックな動きや速い運動を実現するのは難しい。強い錯覚を生起できない理由の一つとして、刺激点が制限されていることが考えられる。実際に錯覚を増強するという観点では Yaguchi ら[5]は二つの協同筋または両端の腱を刺激することで錯覚が増強されたことを報告している。また運動を行う際の身体の筋の活動を考えると、一つの筋のみによって運動が引き起こされるという場合は少なく、基本的に多数の協同筋が協調的に活性化することで運動を実現する。したがって、より自然な強い錯覚を生起させるためには複数の協同筋を刺激することが必要不可欠であると考

えられる。しかし一つの運動錯覚を生起させるために複数関節、協同筋を刺激した場合についてはまだ調査がされていない。

我々は前報[6]にて多点振動刺激を提示した場合に刺激点が少ない場合に比べ錯覚が強くなる傾向があることを報告した。本稿では振動条件を増やし、振動提示数に対する運動錯覚の強度及びそれぞれの振動位置の運動錯覚への貢献を調査した。

2. 実験

12名の被験者(男性:10名,女性:2名,21から25歳,全員右利き)が本実験に参加した。我々は刺激点が増えるにつれて錯覚がより強く生起し、それぞれの刺激箇所での錯覚への貢献度が異なるという仮説を立て実験を行った。刺激提示部位は著者による予備実験により左胸,上腕,前腕において肩回りの伸展運動の錯覚が生起することを想定して7カ所を選定した。振動刺激位置を図1の左側に示す。1番は大胸筋鎖骨部の近心に位置する腱,2,4番は烏口腕筋の腱(ただし,2番は三角筋も刺激する),3,5番は上腕二頭筋の腱,6番は腕橈骨筋の遠心に位置する腱,7番は手関節屈筋群の腱を想定した位置である。

被験者の運動を計測するために光学式モーションキャプチャ(OptiTrack V120 Duo)を使用した。計測を行うために、被験者には図1の右側に示すように首近辺と左右両方の肩,肘,手首の7点にマーカを配置した。これにより右腕と左腕両方の動きの計測を行った。Unityを使用し120fpsで位置情報の取得及び記録を行った。計測座標の原点は椅子背面の中心線と床が交わる点に設定した。マーカの座標は正面方向をz軸,鉛直上向きをy軸とした左手座標系で記録された。実験装置の概要と計測座標系について図2に示す。

2.1. 振動刺激

振動子(Acouve Lab VP210)は底面にスポンジを貼った振動子ケース(図3)に組み込まれゴムバンドとサポータを用いて被験者の身体に装着された。入力信号は波形生成ソフトウェア(Cycling'74 Max7)により70Hzの正弦波を生成しオーディオインターフェース(Roland OCTA-CAPTURE)を介して7chに分配され、オーディオアンプ(FX-AUDIO-FX202A/FX-36A PRO)により増幅されて振動子へ入力された。

振動子ケース内部では3本のバネ(全体のバネ定数は

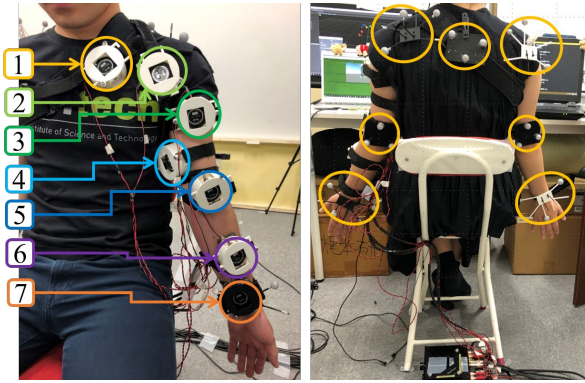


Fig. 1 Positions of vibrators and markers for measuring movement via optical tracking camera.

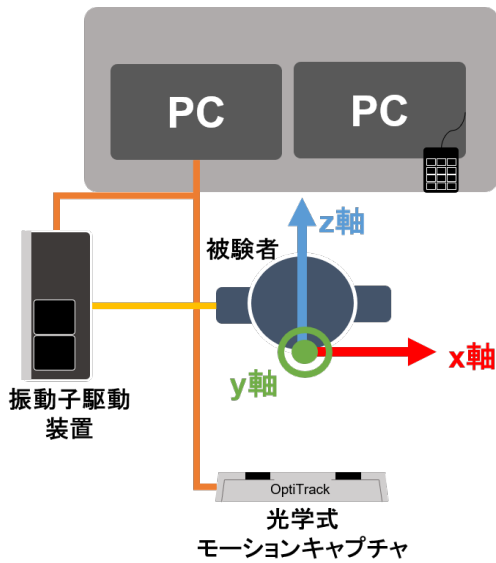


Fig. 2 The overall of the experiment system.

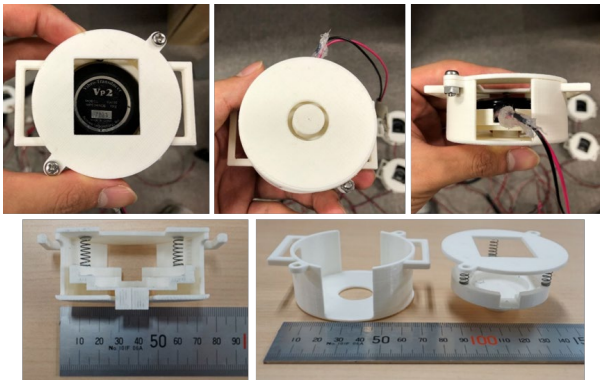


Fig. 3 The vibrator case made with 3D Printer

1.2N/mm) によって振動子が吊るされている。実験では、皮膚に接触するヘッドの変位量を観測することで押し込み力を1.2N から 2.4N の間に調整した。さらに、振動加速度は加速度センサ (Sparkfun LIS331) を用いて約 90m/s^2 になるように統制された。この加速度は変位振幅としては約 0.47mm に相当する。

2.2. 実験手順

被験者が疲弊すること避けるため、本実験は振動提示する

試行を半分に分け二日間に分けて実施された。実験全体の流れを図 4 に示す。

まず被験者に椅子に座った状態で実験姿勢の教示や実験の流れの説明を行った。次に被験者に実験装置を装着した。振動刺激装置を装着する際は被験者の腕を触りながら目的の筋、腱の位置を探し振動子を配置した。振動加速度及びモーションキャプチャの計測点のキャリブレーションを行った後、被験者の運動表現能力の計測と振動刺激により生起する運動錯覚を被験者に評価させる実験を行った。実験全体を通して、被験者にはリラックスし生じる受動的な動きには逆らわずに左腕の動きに意識的に注意を向けるよう伝えた。

運動表現能力の計測について述べる。この計測の目的は、錯覚の評価に用いる回答方法 (刺激側の腕の姿勢を非刺激側の腕で模擬させる) が極端にできない被験者を除くことである。具体的な手順として、実験者は閉眼状態の被験者の左腕を肩まわりに屈曲・伸展及び内転・外転の二方向へ正弦波的に動かした。このタスクはそれぞれの方向で 3 回ずつランダムに計 6 回行った。各方向で 3 回の内、2 回は約 3deg/s の遅い運動、1 回は約 10deg/s の速い運動が提示され、提示順は被験者ごとに異なり、各試行は 10 秒であった。

次に、振動提示及び錯覚の評価について述べる。振動提示パターンは各振動子の全組み合わせである 127 通り (2^7-1) を用い、被験者ごとに異なる順番で 1 回ずつ計 127 回振動提示を行った。1 回の振動提示時間は 5 秒間であり、振動提示後に約 5 秒間のインターバルを設けるというものを 1 試行とした。さらに 10 回の振動提示ごとに 1 分間の休憩を取った。また振動提示中は被験者に目を閉じてもらい、振動の音が聞こえないようにヘッドフォンを装着させホワイトノイズを流した。被験者には、振動提示中に刺激している腕とは反対側の腕で知覚した左腕の動きを反対側の腕で表現してもらい、振動提示後に表 1 に示す 3 つの尺度で錯覚を 10 段階評価させた。

実験を行う前には錯覚を評価する方法に被験者が慣れるために練習として 5 回の試行を行った。振動は実際の実験とは異なる振動パターンの順序で提示され、それぞれの刺激点は最低でも 1 回は刺激された。

2.3. 解析手法

本稿における角速度とは振動刺激を開始する時の腕の位置と終了時の腕の位置の角度差を振動提示時間で割った値である。腕の角度は肩と手首の座標から腕のベクトルを求めることで計算された。また主に対象とする運動は伸展・屈曲の方向と内転・外転方向であり、それぞれ座標平面で考えると前者は y-z 平面の運動、後者は x-y 平面の運動に対応する。y-z 平面では z 軸方向 (伸展方向)、x-y 平面では x 軸方向 (外転方向) を正として計算を行った。

Table 1 The evaluation scales of the illusion

評価尺度	最小値(1) と 最大値(10)
Vividness	錯覚が全く鮮明ではなかった (1) 実際に動いているように鮮明だった (10)
Duration	錯覚が生起しなかった (1) 提示時間と同じ時間 錯覚が生起した (10)
Magnitude	腕が全く動かなかった (1) 腕が可動域の限界まで動いた (10)

1日目	実験装置の装着 キャリブレーション	運動表現能力 の計測	練習 (5試行)	錯覚評価 (64試行)
2日目		✖	練習 (5試行)	錯覚評価 (63試行)

※1試行: 振動提示 (5s) + 休憩 (5s)

Fig. 4 The flow of experiment

3. 実験結果

3.1. 運動能力表現の計測

左腕の位置に対する右腕の位置の誤差を求めた。運動の方向ごとに全被験者のデータの平均と標準偏差を求めた結果、屈曲・伸展の方向では平均で $1.92 \pm 5.43 \text{deg}$ の誤差があり、内転・外転方向では平均で $-5.79 \pm 3.91 \text{deg}$ の誤差があった。

両方の腕のミラーリングが全くできないという被験者は観測されなかったため、結果の解析には全被験者のデータを利用した。

3.2. 被験者による錯覚の評価

全 1524 試行の内 11 試行 (0.72%) は振動提示中にトラッキングが外れてしまったのでデータ処理には含まなかった。角速度の解析には右腕の運動の角速度に注目して行った。伸展・屈曲方向の角速度を ω_{yz} 、内転・外転方向の角速度を ω_{xy} と表す。

振動を提示した振動子の数に対する各平均角速度と平均主観評価値の散布図を図 5 に示す。各振動提示数においてサンプル数の偏りはあるが、全散布図において有意に正の相関がみられた。

各方向の振動パターンごとの平均角速度を図 6 に示す。横軸の振動パターンは上から順番に 7 ヶ所の振動子に対応している。白い丸は振動を提示しなかったことを示しており、黒い丸は振動を提示したことを示している。例えば、図 6 の ω_{yz} の平均値のグラフにおいて、最も大きい角速度の振動パターンは 2, 3, 4, 5, 7 番の振動子から構成されることを表している。

さらに、各方向の平均角速度を目的変数、振動子それぞれの刺激の有無を説明変数として重回帰分析を行った結果を表 2 に示す。また、各方向の角速度の線形モデルの回帰式を (1)、(2) 式に示す。

$$\omega_{yz} = -0.042v_1 + 0.385v_2 + 0.112v_3 + 0.254v_4 + 0.441v_5 + 0.138v_6 + 0.292v_7 - 0.347 \quad (1)$$

$$\omega_{xy} = -0.005v_1 + 0.229v_2 + 0.038v_3 + 0.216v_4 + 0.023v_5 + 0.112v_6 + 0.171v_7 + 0.111 \quad (2)$$

$$v_i = \begin{cases} 1 & \text{if vibrated} \\ 0 & \text{if not vibrated} \end{cases}$$

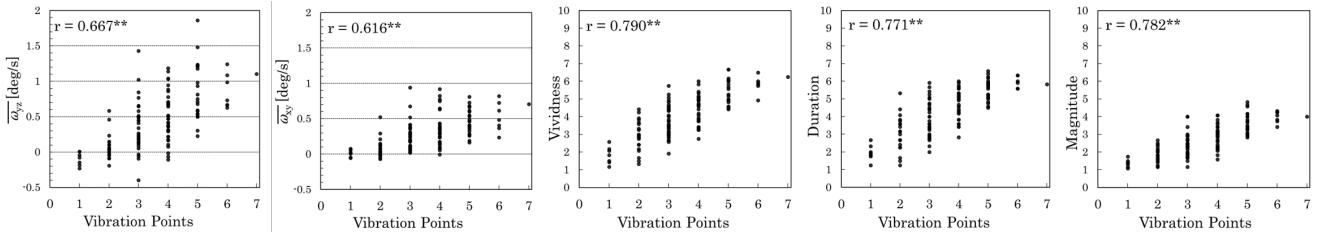


Fig. 5 Correlations (r) between vibration points and each subjective evaluation. **, $p < 0.01$

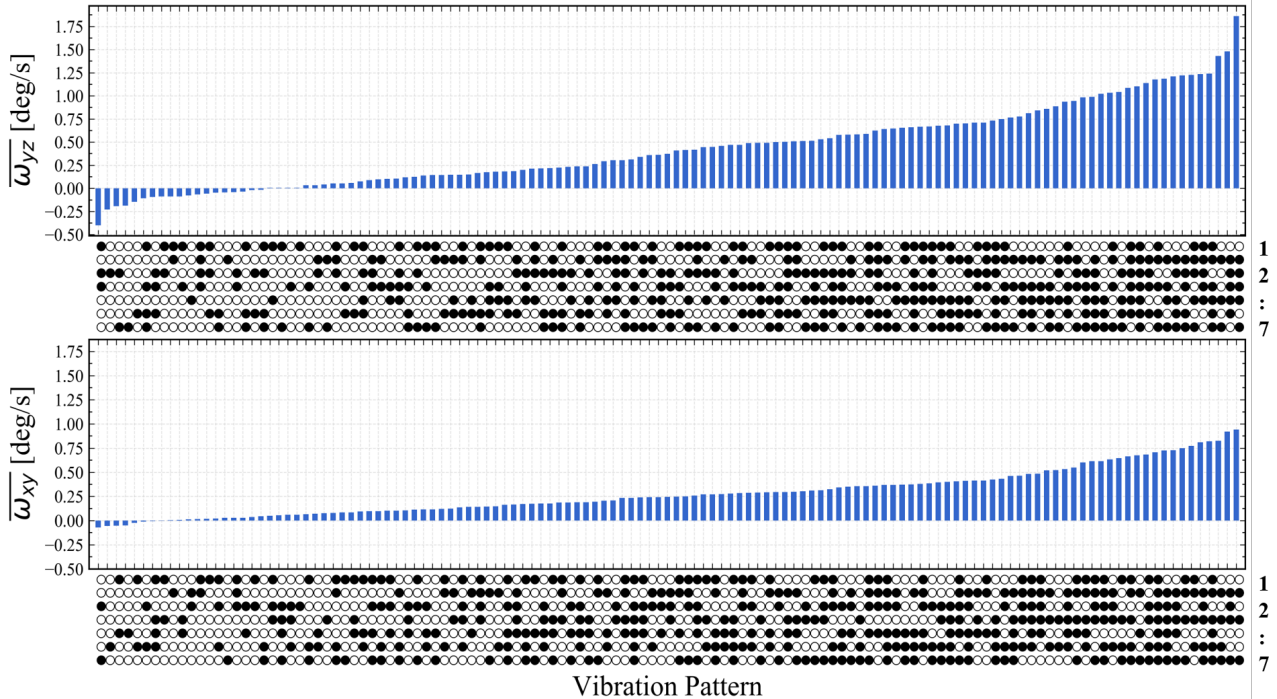


Fig. 6 (Above) Average ω_{yz} for each vibration pattern. (Below) Average ω_{xy} for each vibration pattern. Vibration pattern corresponds to vibrators 1 through 7 (from the top).

Table 2 The results of multiple regression analysis of each average angular velocity based of vibration patterns (ω_{yz} model: $F(7;119) = 32.942, p < 0.001$, the adjusted $R^2 = 0.640$, ω_{xy} model: $F(7;119) = 29.204, p < 0.001$, the adjusted $R^2 = 0.610$)

	Unstandardized Coefficients	Standard Error	Standardized Coefficients	t	p	Collinearity Statistics	
						Tolerance	VIF
(Constant)	-0.347	0.067		-5.20	<0.001		
ω_{yz} model							
Vibrator 1	-0.042	0.046	-0.049	-0.913	0.363	1.000	1.000
Vibrator 2	0.385	0.046	0.449	8.396	<0.001	1.000	1.000
Vibrator 3	0.112	0.046	0.131	2.440	0.016	1.000	1.000
Vibrator 4	0.254	0.046	0.296	5.537	<0.001	1.000	1.000
Vibrator 5	0.411	0.046	0.479	8.958	<0.001	1.000	1.000
Vibrator 6	0.138	0.046	0.161	3.003	0.003	1.000	1.000
Vibrator 7	0.292	0.046	0.340	6.361	<0.001	1.000	1.000
ω_{xy} model							
(Constant)	-1.111	0.038		-2.921	0.004		
Vibrator 1	-0.005	0.026	-0.010	-0.179	0.859	1.000	1.000
Vibrator 2	0.229	0.026	0.489	8.788	<0.001	1.000	1.000
Vibrator 3	0.038	0.026	0.080	1.441	0.152	1.000	1.000
Vibrator 4	0.216	0.026	0.460	8.275	<0.001	1.000	1.000
Vibrator 5	0.023	0.026	0.049	0.883	0.379	1.000	1.000
Vibrator 6	0.112	0.026	0.238	4.288	<0.001	1.000	1.000
Vibrator 7	0.171	0.026	0.364	6.547	<0.001	1.000	1.000

4. 考察

4.1. 平均角速度の振動パターンによる重回帰分析

表 2 により、 ω_{yz} のモデルにおいて 5 番, 2 番, 7 番の振動子の標準化係数が有意に高い値となっている。図 6 の上部のグラフより実際の振動パターンにおいても上位パターンには 2 番と 5 番の振動子が必ず含まれている。一方、 ω_{xy} のモデルにおいて 2 番, 4 番, 7 番の振動子の標準化係数が有意に高い値となっている。図 6 の下部のグラフより、同様に実際の振動パターンと比較すると上位のパターンには 2, 4, 7 番の振動子が含まれている。

それぞれのモデルにおいて 2, 7, 4 番の振動子の係数が高いことは共通している。主に異なる点は最も高い係数を持つ振動子である。 ω_{yz} のモデルでは 5 番の振動子が、 ω_{xy} のモデルでは 2 番の振動子が最も高い係数となっていることが分かる。これは Roll ら[7]のようにそれぞれの筋が刺激された際に生起し得る錯覚の方向をベクトルとして考えることで理解することができる。つまり、三角筋 (2 番の振動子の位置) と烏口腕筋 (2, 4 番の振動子の位置)、手関節の屈筋群 (7 番の振動子の位置) は、伸展と外転方向への運動錯覚のベクトルを有しており、上腕二頭筋 (5 番の振動子の位置) は伸展方向のみの運動錯覚のベクトルを有していると考えられる。

さらに興味深いことは、肩回りの関節の運動には直接関係していない手関節の屈筋群への振動刺激が高い貢献を持っていたことである。これは、手関節屈筋群への振動刺激が手に対して外力が加えられて腕が動くというような運動イメージを生起させ、錯覚が自然な感覚に近づき錯覚が知覚されやすくなったのではないかと考える。実際に被験者が腕の受動的な運動を感じたとコメントしている。

4.2. 振動子数との関係

図 5 より、振動提示数が増えるにつれて各値は増加傾向があった、また平均角速度は最大でも 2deg/s 程度の値となり十分な増強ができたとは言えない。このことから、振動刺激数を増やすことは錯覚をより安定的に生起させることに効果があると考える。特に角速度に着目すると、図振動パターン順番を見ると比較的大きな効果がある刺激点を含んだ 3 から 5 つの振動刺激によっても錯覚の速度の増強は可能であった。

一点に対してより強い振動刺激を加えても運動錯覚は増強可能であるが、今回のように多数の刺激点で刺激することに

より、一点の強烈な振動ではない、分散されたマイルドな振動刺激によって運動錯覚を生じうる可能性が示されたと言える。

4.3. 刺激位置の筋や腱

2 番の振動子の位置は烏口突起を目印として烏口腕筋の腱を想定して配置を行っていたが、表層には三角筋があるため直接的に烏口腕筋を刺激できてはいなかった。この位置への刺激が錯覚の生起に大きい貢献をしていた理由を考える。三角筋の筋腹への刺激が効果的であったこと、そして烏口突起を通じて烏口腕筋や上腕二頭筋の腱に効率的に振動が伝搬したことが考えられる。

5. おわりに

本実験は、運動錯覚の増強を目的として振動提示数を増やした際の錯覚について調査した。胸部、上腕及び前腕の肩周りの運動における協同筋の全 7 カ所に振動子を配置し、全 127 パターンの振動提示を行った。運動錯覚の評価として被験者には、振動提示中には生起した錯覚を反対側の腕で表現してもらい、振動提示後には三つの主観評価の設問に回答してもらった。結果として、振動子数が増加するにつれてより速い運動の錯覚が生起するのではなく錯覚が安定的に生起するようになることが分かった。また、特に運動錯覚に寄与する振動子を特定することができた。

本実験において生起した錯覚は速くても平均で約 2deg/s であった。10deg/s 単位のダイナミックな運動を錯覚として知覚させるためには十分に増強できたとは言えない。実験に用いた姿勢の影響も考えられるが、腱振動による運動錯覚には錯覚の強度に限界があると言える。本稿では解析に平均値を用いたが、錯覚の生起する度合いには個人差があるため、外れ値に平均値が大きく影響を受けてしまうことがあった。今後は実験データのより詳細な解析を行うとともに、他のモダリティとの組み合わせも検討する。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP18H04110 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] G. M. Goodwin, D. I. McCloskey, and P. B. C. Matthews, "The contribution of muscle afferents to kinesthesis shown by vibration induced illusions of movement and by the effects of paralysing joint afferents," *Brain*, vol. 95, no. 4, pp. 705–748, 1972.
- [2] J. P. Roll and J. P. Vedel, "Kinaesthetic role of muscle afferents in man, studied by tendon vibration and microneurography," *Exp Brain Res*, vol. 47, no. 2, pp. 177–190, 1982.
- [3] J. S. Schofield, M. R. Dawson, J. P. Carey, and J. S. Hebert, "Characterizing the effects of amplitude, frequency and limb position on vibration induced movement illusions: Implications in sensory-motor rehabilitation," *Technol Heal Care*, pp. 129–141, 2015.
- [4] F. Ferrari, F. Clemente, and C. Cipriani, "The Preload Force Affects The Perception Threshold of Muscle Vibration-Induced Movement Illusions," *Exp Brain Res*, vol. 237, no. 1, pp. 111–120, 2019.
- [5] H. Yaguchi, O. Fukayama, T. Suzuki, and K. Mabuchi, "Effect of simultaneous vibrations to two tendons on velocity of the induced illusory movement," *Proc. IEEE Int. Conf. Eng. Med. Biol. Soc.*, pp. 5851–5853, 2010.
- [6] K. Ushiyama, S. Tanaka, A. Takahashi, and H. Kajimoto, "Reinforcement of Kinesthetic Illusion by Simultaneous Multi-Point Vibratory Stimulation," *SIGGRAPH Asia 2019 Posters*, pp. 1–2, 2019.
- [7] J.-P. Roll, F. Albert, C. Thyriou, E. Ribot-Ciscar, M. Bergenheim, and B. Mattei, "Inducing Any Virtual Two-Dimensional Movement in Humans by Applying Muscle Tendon Vibration.," *J Neurophysiol*, vol. 101, no. 2, pp. 816–823, 2009.