

腱振動刺激による運動錯覚と物体接触感覚との相互作用の調査

與野 航^{1,a)} 山崎 陽一¹ 井村 誠孝¹

概要: 腱への振動刺激提示により実際に体は動いていないが体が動いたように感じる現象は運動錯覚と呼ばれ、ハプティックデバイスへの応用が研究されている。また運動錯覚生起時に体が物体と接していると、運動錯覚と接触感覚との相互作用により錯覚内容が変じることが確認されている。よって運動錯覚を用いたハプティックデバイスは、運動錯覚に他刺激を組み合わせてることにより多様な錯覚をユーザに提示可能なことが期待される。本研究では、運動錯覚と他刺激により生じる錯覚の内容と生起条件の明確化を目的とする。指に物体を接触させた状態で左手示指 MP 関節屈曲運動錯覚を生起させる実験を行った。物体接触位置を変化させた際の錯覚内容を比較し、多様性・共通性を調査した。プラスチック製の円柱を左手示指に接触させ、腱振動刺激を用いて屈曲運動錯覚を提示し、生じた感覚をインタビュー形式で記録した。物体接触箇所は示指の手背側と手掌側の各 3 か所ずつ、計 6 箇所とした。実験から、通常の屈曲運動錯覚と比較して、接触物体が手背側にある場合は物体に押される感覚、手掌側では物体を押す感覚が生起するという結果が得られた。

1. はじめに

腱への振動刺激の提示により実際は体が動いていないにも関わらず体が動いたように感じる現象は、運動錯覚と呼ばれ、ハプティックデバイスやリハビリテーションへの応用が研究されている [1][2][3]。運動錯覚により非運動状態のユーザに対して深部感覚の提示が可能のため、運動感覚の補完ができる。また、運動錯覚生起時に外界物体に体が接していると、運動錯覚と外界物体からの刺激との相互作用により、錯覚の変質が生じることが確認されている [4]。よって運動錯覚を用いたハプティックデバイスは他刺激との相互作用により多様な錯覚を非運動状態のユーザに提示可能なことが期待される。近年ハプティクス技術はエンタテインメントへの応用も注目されており、多様な錯覚の提示は、エンタテインメントへの応用が期待される。しかし、運動錯覚と他刺激との相互作用による錯覚の内容とその生起条件は明確でない。本研究では、運動錯覚と他刺激との相互作用より生じる錯覚の内容と生起条件の明確化を目的とする。

2. 関連研究

2.1 運動錯覚生起メカニズム

運動錯覚とは、ヒトが自ら運動せずともあたかも運動しているように感じる現象であり、1972 年に Goodwin らによって示された [5]。運動錯覚を分類すると、視覚誘導性運動錯覚と腱刺激によって生じる運動錯覚に分類できる。更に、腱刺激による運動錯覚は腱刺激の方法として電気刺激と振動刺激に分類できる。

腱に振動刺激を与えると、筋紡錘が発火し求心性神経線維が活動し、振動刺激を与えている側と反対の方向に関節が曲がる感覚が生起する。運動錯覚中に活動する脳部位が随意運動を行うときに活動する部位と同じであることが明らかになっており [4]、運動錯覚生起時に提示される感覚は随意運動と比較して不自然なものではないといえる。

2.2 運動錯覚の評価と提示

運動錯覚を生起させる条件には主に振動数・振幅・押し込み力が関係していると考えられている [6]。特に振動数について、先行研究から振動を提示する部位にかかわらず 50Hz から 120Hz の間で生起しやすいことがわかっている [7][8][9]。また、同一の振動数であっても振幅や押し込み力の違いによって錯覚の生起率や明瞭度、最大錯覚角度などが変化する [8]。運動錯覚の評価は様々な項目について

¹ 関西学院大学
Kwansei Gakuin University
a) eef06166@kwansei.ac.jp

て行われており、評価項目として生起確率、明瞭度、最大錯覚角度、運動錯覚が生起するまでの時間・提示した錯覚と知覚した錯覚の正答率などが挙げられる。

運動錯覚に関する先行研究を比較すると、振動刺激を提示する腱によって運動錯覚が生起しやすい振動数には大きな差がないと考えられる。更に、押し込み力と振幅が痛みを感じない範囲でより大きい値であるほど生起しやすくなるということと、押し込み力と振幅が一定以上大きくなると錯覚生起率や明瞭度が変化しないことが報告されている [7][8]。

2010年には Thyriou らによって、任意の運動錯覚を引き起こす振動刺激パターンの生成が可能であることが報告された [10]。任意の3次元的な運動錯覚の提示が可能になれば、運動錯覚のユーザの運動を必要としないという特徴から、今後、運動錯覚を提示するハプティックデバイスが他分野においても利用されるであろうことが予想される。

2.3 運動錯覚のハプティックデバイスへの応用

前節で紹介した研究の運動錯覚提示方法では、関節の動作に基づく動作しかユーザに提示できないという問題がある。人間の動作は、動作だけで完結する場合と動作だけで完結しない場合がある。動作だけで完結しない場合とは、例えば他の物体とインタラクションする場合が挙げられ、ボールを触る動作やコップでコーヒーを飲む動作など多々存在する。内藤はニューロイメージング研究 [4] の中で、閉眼被験者が手を受動的にボールの横に置いた状態で手首伸展筋の腱に振動刺激を加えると、手首の屈曲運動錯覚に合わせてボールが手と一緒に動く錯覚が起きるという現象を報告している。内藤は、ボールと手と一緒に動く錯覚は手からの動的な運動感覚情報と手がボールに接触しているという皮膚情報を脳が統合した結果生じる錯覚であると述べている。同論文内では他にも外界物体と運動錯覚の組み合わせによる錯覚が報告されている。

3. 錯覚の条件・多様性の確認手法

人間と物体の相互作用を提示する方法として、運動錯覚と外界物体との接触感覚によるマルチモーダルな錯覚の提示を提案する。内藤による運動錯覚と外界物体との接触感覚による錯覚の報告により、運動錯覚と接触感覚によって関節運動以外の錯覚の提示が可能であることが示された。しかし、運動錯覚と接触感覚との相互作用によって生じる錯覚の内容とその生起条件は明らかになっていない。相互作用による錯覚の内容とその生起条件が明らかになれば、運動錯覚を用いたハプティックデバイスは提示できる錯覚を多様にすることができるとともに非運動状態のユーザに錯覚を提示することが可能になる。

本研究は大きく3つの実験からなる。内2つは予備実験

であり、1つが主題となる実験である。本論文では5節で予備実験1, 2について述べ、6節で主題の実験に関して述べる。以後、予備実験1を実験1、予備実験2を実験2とし、主題の実験を実験3とする。

3.1 実験の目的

主題である実験3の目的は運動錯覚と物体の接触感覚との相互作用により生じる錯覚の内容を明確にすることである。この目的を達成するため、運動錯覚を提示可能なデバイスの製作と運動錯覚提示条件の設定が必要となる。必要条件を求めるため、製作したデバイスで運動錯覚が提示可能であることと、複数の運動錯覚提示条件のうち、最も運動錯覚角度を大きくする条件を求めることを目的とする2つの予備実験を行った。

3.2 実験方法

本節では運動錯覚によって感じる動作と他刺激との相互作用を明確にするための実験手法を示す。実験内容は、腱の振動刺激により錯覚する関節の動作方向を阻害・追従するような位置にそれぞれ剛体を接触させた結果生じる錯覚を調べることである。本研究では感覚受容器の密度が高い指先に注目し左手第2指のMP関節を運動錯覚の対象とする。腱振動刺激によって提示する屈曲運動錯覚に対して、末節骨・中節骨・基節骨それぞれの中央から指の腹・背側に垂直な個所に剛体を1箇所ずつ接触させる。剛体を接触させた状態で総指伸筋、示指伸筋の腱上と浅指屈筋の腱上のMP関節の近位側を振動刺激提示部位とし、運動錯覚を生起させ、各物体接触箇所について生じる錯覚を記録する。

運動錯覚を生起させる条件には、押し込み力・振幅・振動数が関係していると考えられている [6]。押し込み力・振幅・振動数の3要素の違いによって運動錯覚の強度が変化する。運動錯覚の強度は、明瞭度や生起率などが挙げられるが、梅沢により人差し指MP関節の屈曲運動錯覚に関して、屈曲錯覚生起率と明瞭度が高い条件ほど錯覚角度が大きくなる傾向があることが報告されているため [8]、本研究では運動錯覚によって感じる関節の回転角度を、運動錯覚の強度の指標とする。上記の実験を行うにあたり、実験協力者に提示される実験協力者固有の運動錯覚条件が必要である。本研究では運動錯覚によって感じる関節の回転角度の最大値から運動錯覚生起条件を決定する。また運動錯覚を提示可能な腱振動刺激デバイスを製作し、製作デバイスによって本研究内の全ての実験を行う。

4. 腱振動刺激デバイス

4.1 腱振動刺激デバイス概要

運動錯覚を生起させる条件には、押し込み力・振幅・振動数が関係していると考えられており、理想的な腱振動刺

激提示デバイスはその3要素を独立して動的に変化可能なデバイスである。動的に振動刺激条件を変化可能であれば、2.2節で紹介した研究のように運動錯覚の内容を変化させることが可能である。本研究で製作するデバイスは単一の固定した振動刺激条件における運動錯覚と接触感覚との相互作用について調べるため、動的に錯覚提示条件を変化可能な機構は実装しない。製作デバイスは大きく分けて振動機構部とセンサからなり、振動機構の一部とセンサを除いて3DプリンターでPLAを用いて作成した。

4.2 振動機構

振動刺激デバイスは大きく分けて、振動機構部分とセンサから構成される。本節では振動機構部分について述べる。製作デバイスの模式図を図1に示す。振動部は円柱であり、腱の太さよりも大きい他の腱に接触しない大きさとして、直径を10mmとした。振動部の円柱の途中にロードセルを挟むように取り付けている。カムは偏心カムであり、振動刺激の振幅の決定と振動部を押し込む役割を持つ。偏心カムは回転することで振動部を押し込み直動運動を生成する(図2)。振動部は刺激方向のみに動くよう4個のベアリングにより固定されている。モータはCN22-06001(キャノンプレジジョン)を用いている。このモータの無負荷回転数は11000rpmであり、このときの振動数は183Hzである。運動錯覚が生じやすい振動数は50Hzから120Hzの間であり、使用するモータは必要な振動数の提示が可能である。製作デバイスで偏心カムを用いる理由として、実験時の振幅の変更を容易にすることと、振動刺激提示条件の3要素の内、振幅条件の種類を増やすことが挙げられる。製作デバイスでは振動部分と振幅決定部分が独立した構造になっており、偏心カムの変更のみで振幅の変更が可能である。偏心カムは実験1では3Dプリンターを用いてPLAで作成していたが2回ほどの使用で摩耗し振幅が変化するため、実験2以降ステンレス製に変更している。PLAで作成したカムは接着剤によってモータの軸に固定している。ステンレス製のカムは六角穴付き止めねじによってモータの軸に固定される。ステンレス製のカムの構造を図3に示す。使用する六角穴付き止めねじは偏心カムの中に全て入り込み(図4)、回転時に振幅に影響を与えない。

4.3 センサ

加速度センサおよびロードセルにより振動数を求めている。使用した加速度センサはH3LIS331DLであり、測定範囲は $\pm 100g \cdot \pm 200g \cdot \pm 400g$ の3段階で16bit出力である。サンプリング周波数は1000Hzであり、製作デバイスに使用するモータの最大振動数に対して十分な値である。加速度センサはraspberry pi 3とSPI通信を行う。加

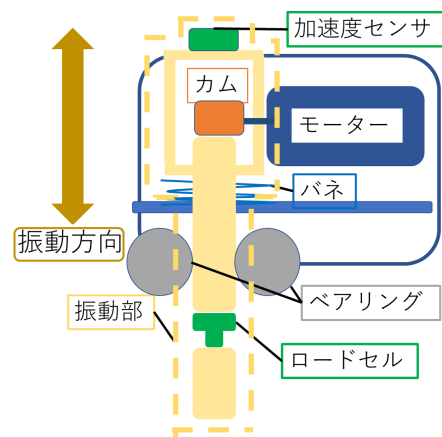


図1 振動刺激デバイスの構造
Fig. 1 Structure of vibrator

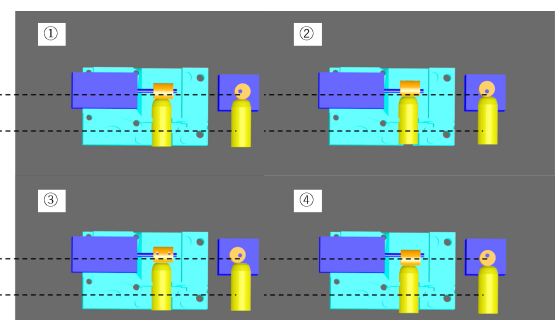


図2 偏心カムと振動生成

Fig. 2 Eccentric cam and mechanism of generating vibration

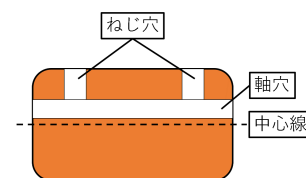


図3 偏心カムの構造

Fig. 3 Structure of eccentric cam

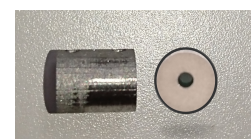


図4 偏心カム

Fig. 4 Eccentric cam

速度センサを製作デバイスの振動部分と一体化させ振動の加速度を記録する。3軸の加速度データと経過時間が欠落なく出力された。ロードセルは振動部と接触部分の間の押し込み力と振動数を計測するために用いる。ロードセルは先行研究[8]を参考にLMA-A-5N(共和電業)を用いる。ロードセルから得られた信号を計装アンプ(LT1167 LINEAR TECHNOLOGY社)を用いて増幅し、I/O Terminal(AIO-160802AY-USB CONTEC社)を通して付属のソフ

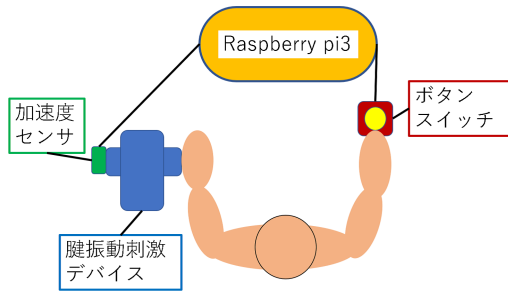


図 5 実験 1 の設定

Fig. 5 Setting of experiment 1

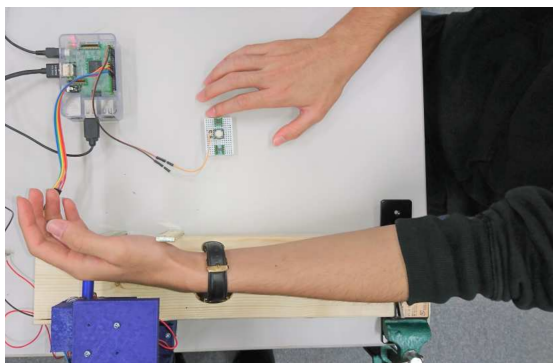


図 6 実験 1 の様子

Fig. 6 Scene of experiment 1

トウェアでサンプリング周波数を 1000Hz に設定し記録した。I/O Terminal の計測範囲は $\pm 10V$ で量子化ビット数は 16 ビットとした。

5. 運動錯覚提示

5.1 実験 1. 運動錯覚生起実験

実験 1 の目的は製作したデバイスで運動錯覚を生起可能であるか調べることである。実験協力者は健康な 20 代の男性 2 名、女性 3 名である。実験協力者は全員右利きであった。振動刺激の全振幅は 0.4mm とし、刺激提示個所は左手指示の総指伸筋・示指伸筋のの腱上で MP 関節の近位側とした。

5.1.1 実験環境

実験環境を模式図 (図 5) に示す。実験協力者は高さを調整可能な椅子に両腕を前に出した状態で座り、左腕を運動錯覚提示装置 (図 6) に置いたとき、楽な体勢になるように椅子の高さを調節する。実験 1 で用いた振動デバイスはロードセルは未実装である。

5.1.2 実験手順

まず刺激提示部位を指定し、デバイスの振動部に接触させる。刺激提示部位を脱力することと、示指が曲がったと感じたら右手でプッシュスイッチを押すように指示する。その後デバイスを振動させ、加速度・プッシュスイッチの記録を開始する。モータにかかる電圧を 1 試行ごとに 5V

表 1 実験 1 の結果

Table 1 Result of experiment 1

協力者	最小振動数 (Hz)	最大振動数 (Hz)
A	50	100
B	124	164
C	44	116
D	59	122
E	41	159

から 12V まで 1V ずつ変化させる。

5.1.3 結果と考察

実験結果を表 1 に示す。実験協力者 1 人当たり 8 個の加速度と運動錯覚の有無を合わせたデータから、実験協力者 5 名全員に運動錯覚が起きたことがわかった。実験協力者中 4 名が 60Hz から 100Hz の間で錯覚を感じているが、協力者によって提示された振動数に差があった。これらの結果から、製作デバイスで運動錯覚を生起させることが可能であることが示された。また、提示された振動数に差があった原因として、協力者に対して製作デバイスの振動部を押し込む力に差があることが考えられる。

5.2 実験 2. 錯覚角度計測実験

実験 2 の目的は示指 MP 関節の運動錯覚角度が最大になる振動提示条件を求めることである。振動刺激提示個所を左手指示の総指伸筋・指示伸筋の腱上で MP 関節の近位側とし、MP 関節の屈曲運動錯覚を生起させた。実験協力者は右利きの 20 代の男女 5 名である。腱振動刺激デバイスの振幅を変更する偏心カムを 0.5mm から 0.25mm 刻みで 2.25mm までの計 8 個用い、振動数はモータにかかる電圧を 5V から 10V まで 1 試行ごとに 1V ずつ変化させることで変更した。運動錯覚により MP 関節が曲がったと感じる角度を運動錯覚を提示している手と反対の手で再現し、カメラで記録した。

5.2.1 実験環境

実験 1 の環境からプッシュスイッチを除き、図 7 のように実験協力者の右手上にカメラを設置する。使用するカメラは右手示指が全て画角に入るように撮影する (図 8)。右手示指の MP 関節の側面と PIP 関節の側面、カメラを設置するための土台に再帰性反射材のマーカを張り付け、カメラのレンズ近辺に光源を設置して撮影を行う。光源には放射基盤付 1W1 白色パワー LED SOW4XME1C1S-100 (OptSupply 社) を用いた。

5.2.2 実験手順

まず刺激提示部位を指定し、デバイスの振動部に接触させる。次に刺激提示部位を脱力することと、示指が曲がったと感じたら、反対の手で曲がったと感じている角度を再現するように指示した。その後、腱振動刺激デバイスと手の接触力が 1N になるように接触部を押し込んだ。接触部

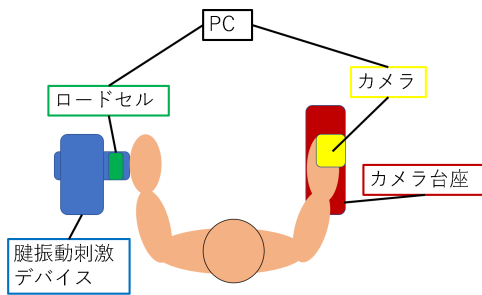


図 7 実験 2 の設定

Fig. 7 Setting of experiment 2

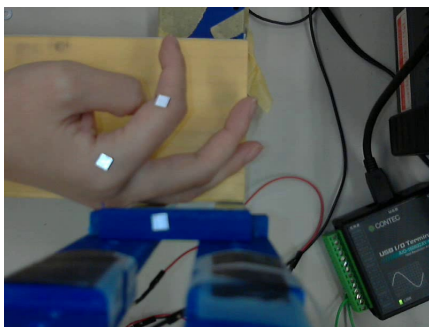


図 8 右示指の屈曲角度計測

Fig. 8 Measurement of bend of right index finger

が押し込まれた状態で実験協力者の左手示指を他動運動させ右手で再現する練習を行った。

腱振動刺激デバイスに用いる偏心カムは無作為に決定し、モータにかかる電圧は 5V から 10V まで順に 1 試行ごとに 1V ずつ変化させた。6 試行ごとに小休止を挟み、1 人当たり計 48 個のサンプルを得た。

5.2.3 結果と考察

実験の結果、最大錯覚角度と振幅に弱い相関 (図 9, 相関係数 0.41) がみられたが、先行研究 [8] に見られたような最大錯覚角度と振動数との相関が見られなかった (図 10)。最大錯覚角度と振動数に相関が見られなかった原因として、押し込み力が統一しきれていないことが考えられる (図 11)。

また、各実験協力者に対し一度のみの実験であったため同一人物に対し運動錯覚の再現性があるのかという疑問が生じた。そこで追加実験にて、個人の運動錯覚再現性を調べるとともに、運動錯覚提示条件を全振幅を 2mm に統一、複数の振動数を提示して最大錯覚角度と振動数と押し込み力の関係を明らかにした。

5.2.4 追加実験 対個人錯覚角度計測実験

本追加実験の目的は、運動錯覚提示条件を統制した際、個人の中で提示される運動錯覚に再現性があるのかを調べることである。実験環境はそのままに、全振幅を 2mm で固定し、振動数のみを変更させて最大錯覚角度を計測し 1 試行につき 6 個の計測結果を得た。また、試行は合計 10

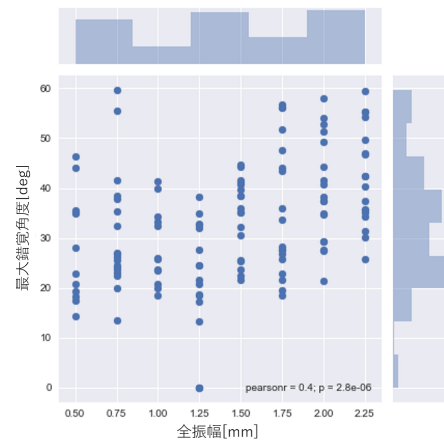


図 9 最大錯覚角度と全振幅の関係

Fig. 9 Relation between illusion angle and amplitude

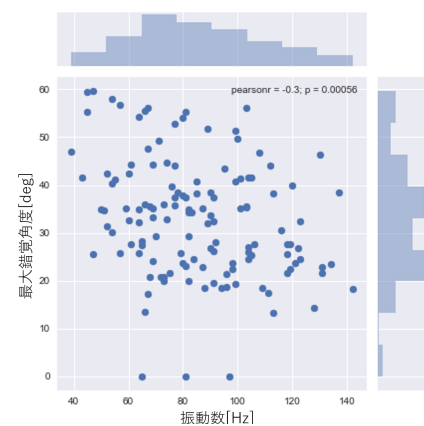


図 10 最大錯覚角度と振動数の関係

Fig. 10 Relation between illusion angle and frequency

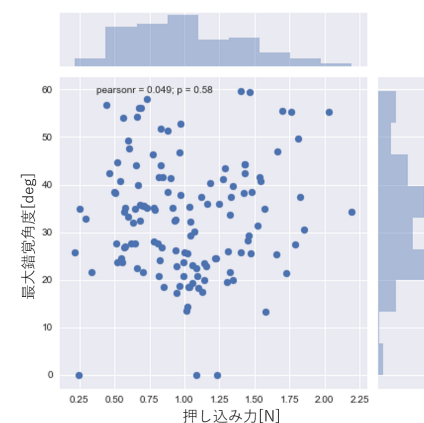


図 11 最大錯覚角度と押し込み力の関係

Fig. 11 Relation between illusion angle and pressure

回行い、計 60 個の計測データを得た。

5.2.5 追加実験結果

運動錯覚の生起に参与するとされる振動数、押し込み力 (以下初期押し込み力) と最大錯覚角度の相関関係を調べたところ、どの要素に関しても相関を得ることができなかった。そこで、腱振動刺激提示時の押し込み力 (以下提

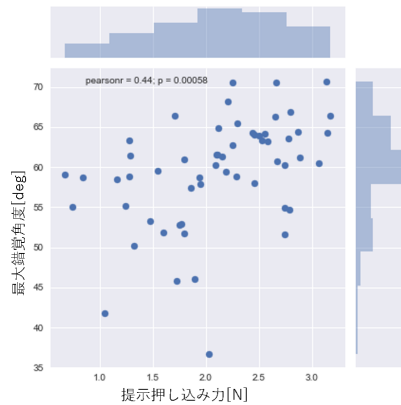


図 12 最大錯覚角度と提示押し込み力の関係

Fig. 12 Relation between illusion angle and presented pressure

示押し込み力)に着目し、提示押し込み力のうち初期押し込み力以上の値の平均値と最大錯覚角度の相関関係を求めた。その結果、最大錯覚角度と初期押し込み力以上の提示押し込み力の平均値に相関係数 0.44 の相関関係がみられた (図 12)。

5.3 先行研究との比較と考察

先行研究では、示指の MP 関節に腱振動刺激を与え最大錯覚角度を計測した結果、50Hz から 110Hz まで最大錯覚角度が増加する傾向があったことが報告されている [8]。先行研究では、使用した振動刺激デバイスが振動数の増加とともに振幅が減少するという特性を持っている。そのため振動数と最大錯覚角度の関係には振幅による差が含まれていないと考えられる。

本研究で製作したデバイスは先行研究 [8] の振動刺激デバイスと比較して、振動数の増加に関わらず振幅が一定であるという差異がある。このため、先行研究の結果は、最大錯覚角度と振動数の関係が振幅の変化を伴うものであり、純粋に振動数と最大錯覚角度の関係を表したものではなかったと考えられる。

また別の先行研究では、振動刺激対象を右手手関節の橈側手根屈筋 (FCR) 腱を対象に初期押し込み力を 0.3N に統一した状態で、振動数と加速度 (振幅) を変化させ、手関節伸展方向の錯覚角度を計測している [7]。この先行研究では、押し込み力 0.3N 時に加速度 (振幅) を増加させると最大錯覚角度が増加することが報告されている。

2.2 節で述べたように、先行研究 [8] より、押し込み力は痛みを感じない程度まで大きくすると運動錯覚が生じやすくなることが報告されており、このことを加味すると、加速度 (振幅) の上昇により最大錯覚角度が上昇した原因として、振動刺激を提示する箇所への押し込み力が大きくなったことが原因と考えられる。

よって、本予備実験から得られた結果は先行研究に矛盾

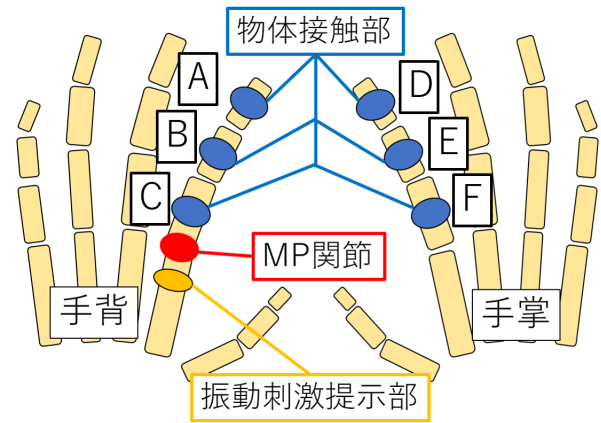


図 13 物体接触位置

Fig. 13 Object contact position

するものではなく、運動錯覚の生起に影響を与えるパラメータとして提示押し込み力が関連している可能性を示唆している。

6. 物体接触感覚位置と運動錯覚の組み合わせによる錯覚内容確認実験

実験 3 の目的は、左手示指屈曲運動錯覚と物体の接触感覚によって生じる錯覚の内容を調べ、物体接触位置の違いによる錯覚の違いや共通性について分類することである。実験協力者は健康な男性 7 名である。実験協力者に提示する振動刺激条件は追加実験結果に基づいて、全振幅 2mm、初期押し込み力を 1N に調整し、振動数を決定する電圧を予備実験で用いた電圧のうち最大の 10V に設定した。

6.1 実験環境

実験環境は腱振動刺激提示デバイスをこれまでの実験と同様に用い、左手示指に接触させる物体は直径 25mm の滑らかな円柱とした。

6.2 実験手順

実験協力者に刺激位置を指示し、腱振動刺激デバイスの振動部と接触させ、初期押し込み力を 1N に設定した。その後、物体を接触させる箇所 (図 13) を実験協力者に明示し、物体を接触させた状態で腱振動刺激を開始した。運動錯覚提示後に、実験協力者に生じた錯覚内容をインタビュー形式で記録した。

6.3 結果と考察

刺激位置と、生じた錯覚内容から一部を抜粋した内容の対応関係を表 2 に示す。表 2 において、数字は共通の錯覚内容が生じた人数であり、丸数字は 5.2.4 節の実験協力者に生じた錯覚である。実験結果から、生じる錯覚の種類は大きく物体を伴う移動感覚と物体の質感に関する錯覚に分類できる。その中でも、物体を伴う移動感覚は物体の位置

表 2 実験 3 の結果

Table 2 Result of experiment 3

	A	B	C	D	E	F
物体に押されている	5	5	2	-	-	-
物体を押している	-	-	-	2	2	1
物体から抵抗感	-	-	-	1	1	1
曲がろうとしているが曲がらない	-	-	-	1	1	1
比較的高速で曲がる	2	1	1	-	-	-
比較的低速で曲がる	1	-	-	1	1	1
爪付近に力を感じる	-	1	-	-	-	-
物体が柔らかくなる	-	-	-	-	1	1
物体なしの運動錯覚と同様	-	-	2	-	-	1
指先だけそる	1	-	-	1	-	-
物体がついてくる	1	-	-	1	-	-

と移動速度に分類でき、提示した屈曲運動錯覚に追従するような位置 (A, B, C) に物体を接触させた場合に示指が屈曲する速さが上昇し、屈曲運動錯覚に対立するような位置 (D, E, F) に物体を接触させた場合、屈曲運動速度が遅くなる感覚が生じた。また、物体が柔らかくなる錯覚は物体接触位置 E, F に限り生じている。

インタビューの内容を分類した結果、手背側で物体に押される感覚が生起しやすいことがわかった。手掌側では、物体を押す感覚、物体からの抵抗感、指は曲がろうとしているが曲がらないといった感覚が生起している。押す感覚と抵抗感、曲がろうとしているが曲がらない感覚のそれぞれが同時に生起した場合はなく、運動錯覚の強度 (錯覚角度) が関係していると考えられる。また手背側、首相側のどちらにも共通して、物体の接触位置が MP 関節に近い位置の C, F の場合、物体を押す・押されるの感覚が生起した協力者の数が少ないことが見てとれる。この理由として、提示した運動錯覚が左手示指の MP 関節の屈曲運動錯覚であったため、感覚的な動きを MP 関節を中心とした回転運動と考え、接触物体から受ける力を一定と仮定すると、距離に比例して MP 関節に生じるモーメントが変化し、結果押す・押されるのような感覚が生起しにくかったのではないかと考える。

7. おわりに

本研究では、運動錯覚と物体接触感覚との相互作用により生じる錯覚について、対象を左手示指に設定し、物体接触位置の差によって生起する錯覚に差があることと、生起する錯覚の傾向について述べた。製作したデバイスによって運動錯覚を提示し、示指の手背側と手掌側の 3 箇所ずつ 1 箇所ずつ物体を接触させ、生起した錯覚をインタビュー形式で調査した。その結果、手背側と手掌側で生起する錯覚に違いがあることが分かった。また基節に物体を接触させた場合、相互作用的な錯覚が生じにくいことが分かった。

本論文では、実験時に物体を接触させる際の圧力を計測していないため、物体と指との接触力と生じた錯覚の関係

性を考慮していない。また物体の種類を統一しているため、物体の種類の違いによる錯覚の違いは評価していない。本研究で製作したデバイスは、振動数、振幅、押し込み力をそれぞれ独立させ変更可能だが、具体的な値を定めての提示することはできておらず、実装予定である。

今後、より詳細な運動錯覚提示条件と物体接触条件の提示と、複数箇所物体を接触させた場合や温冷覚との相互作用についても調査していきたい。

参考文献

- [1] 友田達也, 上杉繁, 三輪敬之: 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, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 14, No. 3, pp. 361-369 (2009).
- [2] 兒玉隆之, 中野英樹, 大住倫弘, 森岡周, 大杉紘徳, 安彦鉄平: 振動刺激による運動錯覚時の脳内線形活動および機能的関連, 理学療法学, Vol. 41, No. 2, pp. 43-51 (2014).
- [3] Imai, R., Osumi, M., Ishigaki, T. and Morioka, S.: Effect of illusory kinesthesia on hand function in patients with distal radius fractures: a quasi-randomized controlled study, *Clinical Rehabilitation*, Vol. 31, No. 5, pp. 696-701 (2017).
- [4] 内藤栄一: 身体運動像の獲得に体性感覚入力果たす役割-ニューロイメージング研究から-, バイオメカニズム学会誌, Vol. 31, No. 4, pp. 178-186 (2007).
- [5] Goodwin, G. M., McCloskey, D. I. and Matthews, P. B. C.: *The contribution of muscle afferents to kinaesthesia shown by vibration induced illusions of movement and by the effects of paralysing joint afferents.*, Vol. 95, No. 4, pp. 705-748 (1972).
- [6] 本多正計, 唐川裕之, 赤堀晃一, 宮岡徹, 大岡昌博: 卓上型運動錯覚誘発・評価装置の開発, 日本機械学会論文集, Vol. 80, No. 820, pp. TRANS0350-TRANS0350 (2014).
- [7] 本多正計: 運動錯覚現象の誘発と制御を可能にする振動刺激条件の確立, 博士論文, 名古屋大学大学院情報科学研究科複雑系科学専攻 (2015).
- [8] 梅沢侑実: 腱振動刺激による運動錯覚特性の人間工学的評価, 博士論文, 早稲田大学大学院人間科学研究科 (2017).
- [9] Naito, E., Ehrsson, H. H., Geyer, S., Zilles, K. and Roland, P. E.: Illusory arm movements activate cortical motor areas: a positron emission tomography study., *The Journal of neuroscience : the official journal of the Society for Neuroscience*, Vol. 19, No. 14, pp. 6134-6144 (1999).
- [10] Thyrión, C. and Roll, J.-P.: Predicting Any Arm Movement Feedback to Induce Three-Dimensional Illusory Movements in Humans, *Journal of neurophysiology*, Vol. 104, pp. 949-59 (2010).