

R-V Dynamics Illusion における各種刺激の影響分析 (7)

～振り方と筋疲労の客観的評価～

片岡佑太^{†1} 藤光翼^{†2} 坂海輝^{†2} 山田泰己^{†1} 橋口哲志^{†3} 柴田史久^{†2} 木村朝子^{†2}

概要: 我々は、実物体と仮想物体の異なる運動状態が引き起こす錯覚“R-V Dynamics Illusion”について研究している。これまで、実物体に液体を模した CG 映像を重畳描画して振ることで、様々な知覚の変化が生じることを発見した。具体的には、実物体の振り動作に伴って CG 映像の液体を揺らしたところ、液体が揺れない条件よりも、実物体を軽く・振りやすく知覚し、さらに筋活動量も低下することを確認した。本研究では次のステップとして、同条件における実物体の加速度、および被験者の筋疲労を計測することで、R-V Dynamics Illusion が与える影響を客観的に評価した。実験の結果、CG 映像の液体が揺れる条件の方が、小さな加速度で実物体を振っている一方で、筋疲労しやすい傾向にあることが分かった。

キーワード: R-V Dynamics Illusion, 複合現実感, マルチモーダル

1. はじめに

人工現実感 (Virtual Reality; VR) や複合現実感 (Mixed Reality; MR) の技術が急速に発展している。各種センサの高性能化や、オーサリングツールの開発に伴い、医療・教育・アート&エンタテインメントなど、様々な分野で活用されるようになった。特に、体験空間のリアリティを高めるために、視覚提示だけに限らず、触覚提示へ寄せられる期待は大きくなる一方である。そのために、様々な触覚提示デバイスが提案されており、没入感の高い体験空間の構築に貢献している [1][2]。しかし、デバイスを用いた触覚提示は、体格差による装着の制限が生じることや、システムが煩雑化してしまうなどの問題を持つ。

この問題に対し、ヒトの知覚特性を上手く利用することで、再現の難しい触覚を表現することや、簡略化されたシステムで触覚提示を行う、マルチモーダル・クロスモーダルの研究が盛んに取り組まれている [3]。この一事例として、Pseudo-Haptics と呼ばれる錯覚現象が挙げられる [4]。これは、体験者が行った操作と、それに対する視覚的な動きに差異を発生させることで、触覚提示デバイスを用いることなく、疑似的な触覚が知覚される現象である。例えば、マウス操作に対してポインタの移動量を小さくすることで、抵抗感を知覚することが報告されている [5]。つまり、物理的な触覚提示を必要とせず、視覚のみを変化させるだけで、様々な触覚を再現することが可能である。これまで、ヒトが感じる重さ [6]、硬さ [7] や満腹感 [8] など、様々な感覚が視覚によって操作できることが明らかになっている。種々の錯覚をインタフェースに活用するためにも、錯

覚によって発生する知覚への影響や、適用できる範囲を明確にすることが肝要である。

我々の研究グループでも、MR 技術を用いることで、視覚と触覚に差異を生じさせ、そこから発生する影響を系統的に分析してきた [9][10]。MR は、実時間で現実空間と仮想空間を融合できる技術であるため、見ているものと、触れているものが異なる状況を意図的に作り出し、その時にヒトがどの様に対象を知覚するか分析することに適した技術である。研究の過程において、内部の重心が変化しない剛体の容器に対して、水を模した CG 映像を重畳描画することを試みた。その結果、実物体内部の力学的特性が変化していないにも関わらず、液体の揺れを見ながら実物体を振ることで、様々な触覚の変化が知覚された。我々は、実物体と CG 映像の運動状態に差異を発生させたときに生じる触覚への変化を“R-V (Real-Virtual) Dynamics Illusion”と命名し [11]、発生メカニズムの解明に取り組んできた。

これまでの取り組みとして、錯覚の影響を主観評価や筋電評価によって分析してきた。具体的には、実物体の振り動作に伴って CG 映像の液体が揺れる条件と、液体が揺れない条件を振り比べたところ、液体が揺れる条件の方が実物体を軽く・振りやすく知覚し、小さな筋活動量で振っていることを確認した [12][13]。これらの研究では、CG 映像の視覚条件に応じて、触覚への影響が異なることを確認しているが、実物体そのものをどの様に振っているかは不明であった。視覚条件によって、体験者が知覚する重さや振りやすさが変化しているのであれば、実物体の振り動作自体も変化している可能性が高い。さらに、実物体の知覚や動作にも影響を与えるのであれば、筋活動量に加えて、筋疲労への影響も見られる可能性がある。そこで本研究では、R-V Dynamics Illusion を分析する次のステップとして、実物体の加速度変化と、筋疲労への影響を確認する客観実験を行った。以下、実験の結果と錯覚のメカニズムを考察した内容について報告する。

^{†1} 立命館大学大学院 情報理工学研究科
Graduate School of Information Science and Engineering,
Ritsumeikan University

^{†2} 立命館大学 情報理工学部
School of Information Science and Engineering,
Ritsumeikan University

^{†3} 龍谷大学 理工学部
School of Engineering Science, Ryukoku University

2. 関連研究

ヒトは物体を持ったり触ったりすることで、重さや長さ、形状といった特徴を知覚できる。この様な筋感覚を伴う探索行動は、総称してダイナミックタッチと呼ばれる [14]。特に、物体を受動的に触知する場合と比べて能動的に触知する方が、より明確に物体の特徴を知覚できることが報告されている [15]。しかし、ヒトは複数の感覚モダリティを相補的に働かせて外界からの情報を処理しており、とりわけ、視覚優位となって知覚が統合される傾向にある。これにより、物体の本来の特徴が、視覚の影響を受けることで異なる特徴として知覚されることがある。この特性を効果的に活用した錯覚が Pseudo-Haptics である [4]。

Pseudo-Haptics は、日常的な経験を事前知識として持つことにより、錯覚が発生すると考えられている [16]。つまり、触覚が視覚情報に対する必要十分な情報を提示できていなくても、過去の経験によって触覚の情報が補完される。例えば Taima らは、HMD を装着して実物体を持ち上げるとき、素早く持ち上げたように映像を変化させることで、実物体がより軽く知覚される現象を報告している [6]。これは、「質量が軽い物体は素早く持ち上げられるはず」という日常的な経験によって錯覚が発生していると考えられる。また、硬さ知覚 [7] や満腹感 [8] などの錯覚についても、同じメカニズムで説明できる。

本研究で対象としている R-V Dynamics Illusion は、実物体の内部ダイナミクスを CG 映像の液体として表現することで、感覚の変化を発生させている。これも、「液体が動く」と慣性が生じる」という経験から発生している、Pseudo-Haptics の一種とも考えられる。しかし、これまでの R-V Dynamics Illusion の研究では、様々な条件下での知覚変化の分析は行われてきたものの、錯覚に伴って生じる人の動作の変化については分析されてこなかった。そこで、本研究では実物体の加速度変化に着目することで、人の運動特性への影響を明らかにする。

さらに、視覚的な見た目が重さ知覚へ影響を与える、Size-Weight Illusion と呼ばれる錯覚が存在する [17]。この錯覚は、質量が同一である 2 つの物体を持ち比べたとき、より体積の大きな物体を軽く知覚する現象である。ヒトが物体を操作するときは、視覚の影響を受けて運動の調整が常に行われており [18]、物体の体積が大きいほど、強い力で素早く持ち上げることが分かっている [19][20]。また、Brightness-Weight Illusion と呼ばれる、物体の明度が高いほど、重く知覚される錯覚も報告されている [21]。この錯覚では、主観的な知覚の傾向に反して、明度が高い物体より、明度が低い方が筋疲労しやすいことが報告されている [22]。

以上のことから、操作している物体の特徴が全く同じ場合でも、見た目によって運動特性や筋疲労が変化すること

が分かる。よって R-V Dynamics Illusion でも同様に、視覚条件に応じて実物体の振り方が変わり、さらに筋疲労にも影響を与える可能性が高い。本研究では、これらの影響に関する実験を行い、その結果を分析する。

3. 実験目的と準備

3.1 実験目的

R-V Dynamics Illusion の客観的な影響分析として、実物体に水を模した CG 映像を重畳描画して振り、視覚条件によって運動特性や筋疲労がどの様に異なるか分析する。本研究では、2 つの実験を行った。実験 1 では、R-V Dynamics Illusion が実物体の加速度、および被験者の筋活動量に与える影響を確認する。実験 2 では、錯覚が筋疲労へ与える影響を確認し、両実験を通して、錯覚の客観的な影響とメカニズムについて考察する。

3.2 実験準備

【実験環境】

実験のシステム構成を図 1 に示す。MR を実現するシステムとして、ビデオシースルー型 HMD (Canon, HM-A1)、および MR 空間管理用ソフトウェア (Canon, MREAL) を用いた。また、実物体上に CG 映像を重畳描画するために、実物体と被験者の頭部の位置姿勢情報を磁気センサ (Polhemus, 3SPACE FASTRAK) によって取得した。

さらに、実物体を把持した状態で CG 映像を重畳描画すると、被験者の腕より手前に CG 映像が描画されるオクルージョン問題が発生する。この問題に対し、実物体と CG 映像の位置関係に関する整合性を保つために、HMD のキャプチャ画像から手領域の抽出とマスキングを行った。これを、HMD の解像度 1280×960 [pixel]、フレームレート 30 [fps] の環境で実行した。また、表示映像の時間遅れや、CG 映像の遮蔽関係に関する違和感が無いことを確認した上で実験を行った。

【実物体】

実物体の容器として、幅 165mm×高さ 90mm×奥行き 80mm のアクリルケースを作成し、容器の上部に把手を取

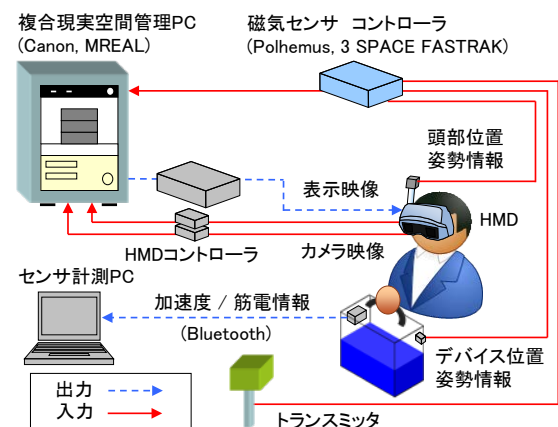


図 1 MR システムの構成

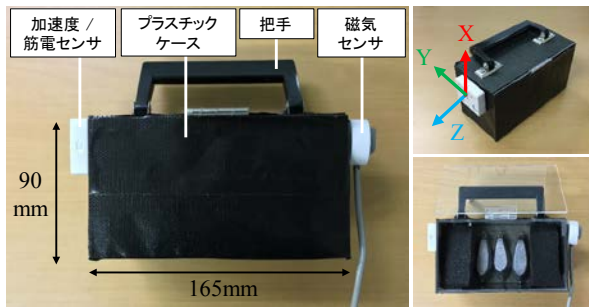


図 2 使用した実物体とセンサ



(a) CGなし (b) 揺れなし (c) 揺れあり
 図 3 提示する視覚条件

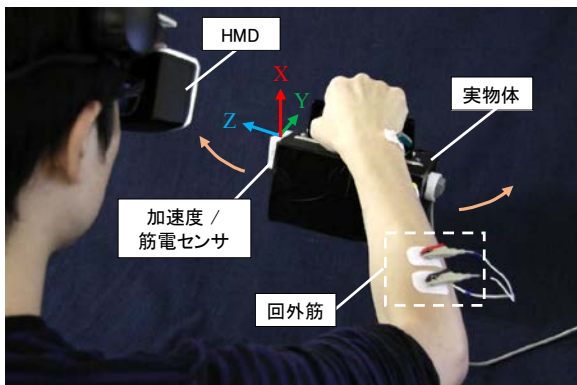


図 4 実験の環境

り付けた。そして、全体の質量が容器の半分の高さ 45mm まで水を入れた質量である、750g となるよう錘を入れて調整した (図 2)。このとき、錘が容器の内部で動かないように固定して入れている。なお被験者には、実物体の把手を握り込む形で持たせた。

【CG 映像】

実物体と同じ大きさである、幅 165mm×高さ 90mm×奥行き 80mm の仮想容器に、液体を模した CG 映像を高さ 45mm の位置に重畳描画した。仮想容器の内壁は白色、CG 映像の液体は青色で着色されている (図 3)。実験では、次の 3 つの視覚条件から実物体を振らせた。

- CG なし：実物体に CG 映像を重畳描画せず、黒色の実物体を振らせる条件 (図 3 (a))
- 揺れなし：実物体を傾けても、内部の液体が動かない CG 映像を重畳描画する条件 (図 3 (b))
- 揺れあり：実物体を傾けると、内部の液体が動く CG 映像を重畳描画する条件 (図 3 (c))

実物体を振る方向は、左右方向に統一した。また、CG 映像の液体は、しぶきや波のような詳細表現は行わず、液

面を直線に近似したモデルを使用した。これにより、実物体内部に水が入っているように知覚されることを確認しており、液体モデルの詳細なアルゴリズムは先行研究を参照されたい [11]。また、被験者は実物体、CG 映像、および自身の腕のみが視界に入る環境で実験を行った (図 4)。

【加速度 / 筋電位計測】

実験では、実物体の 3 軸加速度と被験者の表面筋電位を、小型の無線センサを用いて計測した (ATR-Promotions, TSND121)。実物体の左側面にセンサを取り付け、さらにディスプレイ電極を、被験者の前腕回外筋に貼り付けた (図 2, 4)。電極間の距離は約 25mm、アース電極は尺骨茎状突起とした。なお、電極の貼り付け時には、皮膚抵抗を下げるために、アルコール綿にて皮脂を除去してから貼り付けた。計測したアナログ信号は、Bluetooth によってサンプリング周波数 500Hz で計測用 PC に送信された。

4. 実験 1: R-V Dynamics Illusion が実物体の振り方に与える影響の分析

4.1 実験目的

先行研究では、液体の揺れを見ながら実物体を振ることで、軽く・振りやすく知覚することを確認した [13]。実物体は同一であるにも関わらず、視覚的な変化のみで知覚に影響を与えているならば、実物体の振り方にも差異が見られる可能性が高い。そこで実験 1 では、実物体の加速度と被験者の筋活動量を計測し、運動学的な錯覚の影響を分析する。

4.2 実験条件・評価方法

実験 1 で比較を行う条件は、3.2 節で示した 3 種類である (図 3 (a) - (c))。被験者には、各視覚条件で実物体を振らせ、実物体の加速度と被験者の筋活動量を計測した。まず加速度については、各軸の加速度平均と合成加速度平均を評価した。計測した加速度は、重力成分の影響を取り除いた上で、カットオフ周波数 20Hz のローパスフィルタにて処理を行った。そして、振り動作の方向である x, z 軸を対象に、各軸の絶対値平均と合成加速度平均を求めた。なお、実物体の振り時間 T に対する合成加速度 Acc_{xz} を、式 (1) の通り算出した。

$$Acc_{xz} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \sqrt{A_x(t)^2 + A_z(t)^2} \quad (1)$$

続いて筋活動量については、前腕回外筋を対象に表面筋電位の計測を行い、発揮筋力を表す %MVC (Percentage of Maximal Voluntary Contraction) を評価した (図 4)。計測した表面筋電位は、カットオフ周波数 20Hz のハイパスフィルタと、60Hz のハムフィルタでノイズを除去した。さらに、波形を整流化し、5Hz のローパスフィルタで平滑化した。%MVC は、随意最大筋力の筋電位 MVC に対する、筋電位 EMG の割合を示し、式 (2) の通り算出した。なお、

各被験者の MVC は、実験の前に自発筋収縮の最大値を計測した。

$$\%MVC = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \frac{EMG(t)}{MVC} \times 100 \quad (2)$$

実物体の振り動作は左右方向とし、傾ける角度を左右約 30 度になるよう教示した。被験者の体位は直立状態で、肘を約 90 度に屈曲させた状態で、メトロノームのテンポ 70BPM に合わせて実物体を振らせた。実物体を振る時間は、1 条件につき左右 5 往復とした。また、実験での試行を連続的に行うと、腕の疲労感によって知覚に影響を与える可能性がある。その様な場合は、途中で休憩を取らせるようにした。

4.3 実験手順

具体的な実験手順は以下の通りである。

- (1) 被験者に HMD を装着させる
 - (2) 3 種類の条件から、1 種類をランダムに提示する
 - (3) 被験者に実物体を振らせる (70bpm, 5 往復)
 - (4) (3) を行った後、同じ時間静止する
 - (5) (3)(4) を 3 回繰り返す
 - (6) 筋疲労の影響を排除するため、インターバルを設ける
 - (7) 残りの条件についても (2)-(6) を繰り返す
- 被験者は成人男性 7 名 (全て 20 代の右利き) で、試行回数は 1 名あたり 3 回である。

4.4 実験結果と考察

実験 1 の結果を図 5 に示す。図 5 (a) は、%MVC の平均値を表しており、数値が高いほど筋力を発揮していることを表す。図 5 (b) は、実物体の加速度の平均値を表している。被験者が実物体を振っている区間を抽出し、平均値を算出した。なお、エラーバーは標準偏差を表す。

まず、図 5 (a) の筋活動量の値について、分散分析を行った結果、有意傾向が見られた ($F(2, 18)=2.94, p<.1$)。そこで、Holm の多重比較を行った結果、揺れなし条件と揺れ

あり条件間のみ有意傾向が見られた ($p<.1$)。この結果から、揺れあり条件では小さな筋活動量で実物体を振っていることを確認した。また、CG なし条件については、いずれの条件とも有意差が見られなかった。筋活動量に関する本実験の傾向は、先行研究 [12] と同様の結果となった。

続いて、図 5 (b) の加速度の値について、分散分析を行った結果、z 軸の絶対平均値と、合成加速度に有意差が見られた ($Z: F(2,18) = 10.55, p < .01, Acc_{xz}: F(2, 18) = 8.18, p < .01$)。そこで、多重比較を行ったところ、図に記した通りの有意差が見られた。この結果より、実物体を振る角度やリズムを統制しているにも関わらず、視覚条件によって異なる加速度であることを確認した。分散分析の結果より、x 軸は視覚条件の間に有意差は見られなかったが、z 軸では有意差が見られた。よって、上下方向ではなく左右方向の実物体の動きが、視覚条件によって異なることが分かった。また、以上の典型的な傾向を表した、代表的な被験者 1 名の加速度波形、%MVC 波形を付録に記している。

さらに、実物体の合成加速度では、CG なし条件と揺れなし条件間を除いて、有意差が見られた。先行研究 [13] にて、本実験における条件での主観的な振りやすさを比較したところ、CG なし条件と揺れなし条件間を除いて有意差が見られており、今回の合成加速度に関する評価と一致する傾向が確認できた。揺れなし条件は、液体の CG 映像を重畳描画しているが、振り始めると液体は動かないため、模様着色されているだけの実物体を振っている条件とも換言できる。よって、CG なし条件と揺れなし条件は内部のダイナミクスが変化しない点で同じであったため、振りやすさの主観評価に加え、加速度の評価でも有意差が見られなかったと考えられる。一方で、揺れあり条件は、実物体の振り動作に合わせて CG 映像の液体が揺れる。液体の揺れを制御しながら実物体を振ることにより、他の条件と比べて滑らかな振り動作になった可能性がある。

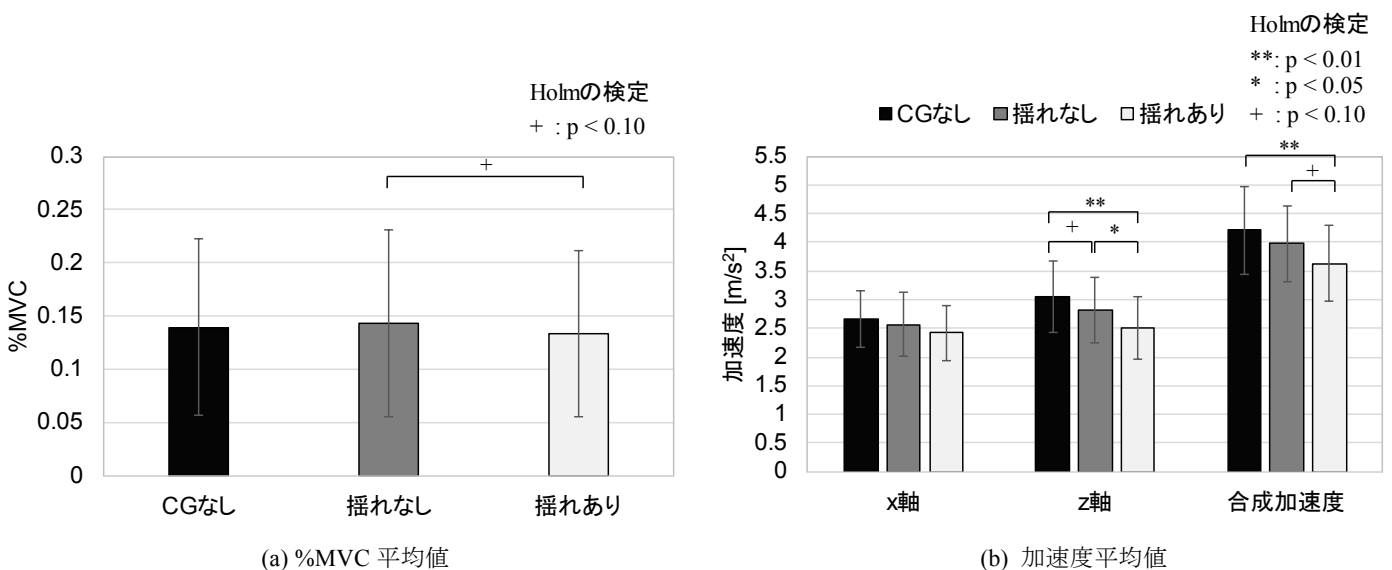


図 5 実験 1 結果

5. 実験 2: R-V Dynamics Illusion が筋疲労に与える影響の分析

5.1 実験目的

実験 1 では、液体の揺れを見ながら実物体を振ることで、揺れない条件と比べて、小さな加速度と筋活動量で実物体が振られていることを確認した。視覚条件に応じて、主観的な知覚と、実物体の振り動作が異なっているのであれば、筋活動量に加えて筋疲労にも影響を与える可能性がある。そこで実験 2 では、視覚的な液体の揺れが筋疲労へ与える影響を分析する。

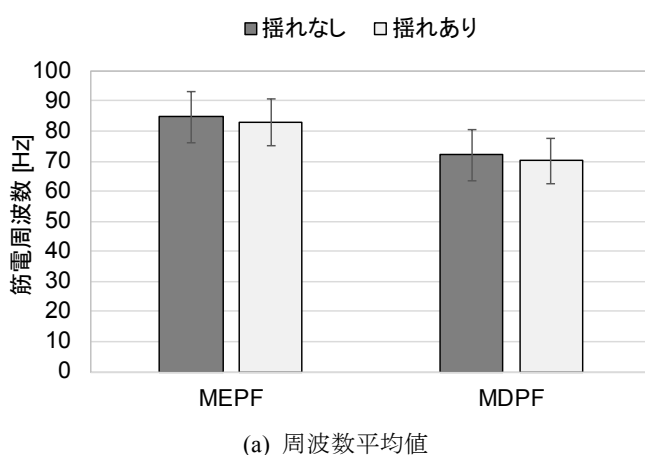
5.2 実験条件・評価方法

実験 2 では、実験 1 と同じ前腕回外筋の表面筋電位を対象に、各条件で 60 秒の振り動作を継続させ、R-V Dynamics Illusion が筋疲労へ与える影響を評価した。なお、明度が筋疲労へ与える影響として Ban らは、黒色と白色の実物体を持ち比べたとき、黒い（明度が低い）実物体ほど、より筋疲労が増すことを報告している [22]。そこで本実験では、最も高い筋疲労を示すことが予想される CG なし条件を除き、揺れなし条件と揺れあり条件を対象に分析した。被験者には何れかの条件で試行させ、休憩を挟んだ後に、もう一方の条件も試行させた。さらに別の日に、条件の順序を入れ替えた上で、同様の試行を行わせた。なお休憩時間は、筋疲労の影響が回復することを確認できた 40 分とした。

筋疲労については、表面筋電位を高速フーリエ変換することによって得られるパワースペクトルの、平均周波数 (Mean Power Frequency; MEPF) と中央周波数 (Median Power Frequency; MDPF) で評価した [23]。MEPF と MDPF は、式 (3)(4) に従って算出され、筋疲労に伴ってこれらの値は低下する。

$$MEPF = \frac{\int_0^{\infty} f * p(f)df}{\int_0^{\infty} p(f)df} \quad (3)$$

$$\int_0^{MDPF} p(f)df = \int_{MDPF}^{\infty} p(f)df \quad (4)$$



なお、信号ノイズのフィルタ処理や実験統制は実験 1 と同一で、パワースペクトルの解析範囲は 20 - 250Hz とした。

5.3 実験手順

具体的な実験手順は以下の通りである。

- (1) 被験者に HMD を装着させる
- (2) 2 種類の条件から、1 種類をランダムに選択する
- (3) 被験者に実物体を振らせる (70bpm, 60 秒)
- (4) 筋疲労の影響を排除するため、40 分以上の休憩を取る
- (5) もう一方の条件について (3) を行う
- (6) 1 日以上の間隔を空けた上で、提示順序を変えて (1) - (5) を行う

被験者は成人男性 8 名で (全て 20 代の右利き)、試行回数は 1 名あたり 2×2 (CG の種類×順序) =4 回である。

5.4 実験結果と考察

実験 2 の結果を図 6 に示す。図 6 (a) は被験者の MEPF と MDPF の平均値を表しており、図 6 (b) は揺れなし条件に対する、揺れあり条件の周波数減少量を表す。この数値が大きいくほど、揺れあり条件の方が筋疲労していることを示す。なお、エラーバーについては、図 7 (a) が標準偏差、図 7 (b) が 95%信頼区間を表す。

液体の揺れによる筋疲労への影響について、対応のある t 検定を行った結果、両指標で有意差が見られた (MEPF: $t(7) = 2.69, p < .05$, MDPF: $t(7) = 2.75, p < .05$)。実験 1 では、揺れなし条件と比べて、揺れあり条件の方が、小さな加速度と筋活動量で実物体を振っていた。よって、揺れなし条件の方が筋疲労することが考えられたが、予想と反する結果が見られた。この結果は、ヒトのフィードフォワード制御が関係している可能性がある。

フィードフォワード制御は、現在の状態から次の運動を予測して行動するモデルのことで、素早い運動で見られる。そして、この制御では運動に先立ち、脳の運動準備電位が観察されることが分かっている [24]。この対となる概念が、フィードバック制御である。運動における誤差を修正しながら行動するモデルのことで、遅い運動で見られる。実物体を素早く左右に振り続けるという本実験では、フィード

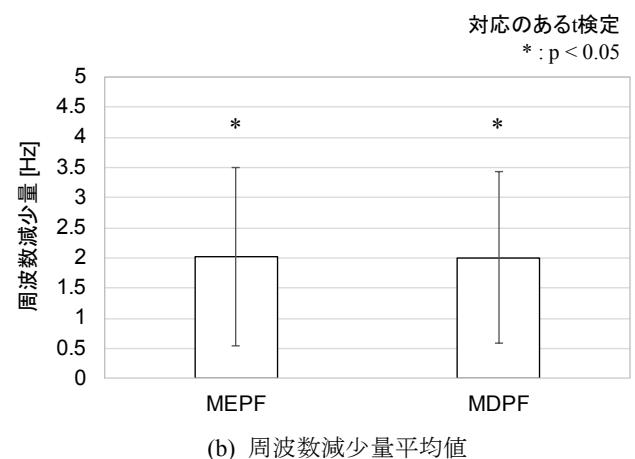


図 6 実験 2 結果

フォワード制御の機能の重みが大いことが考えられる。特に、揺れあり条件は揺れなし条件と比べて、常に液体の揺れを予測・制御しながら運動を繰り返さなければならない。よって、フィードフォワード制御の働きが、揺れなし条件と比べて強いことが考えられる。

また Yoshida らは、運動準備電位が動作に先行して発火することに加えて、筋活動も同時に観察されることを報告している [25]。さらに Slobounov らは、運動を起こそうとする意図が強いほど、運動準備電位の活動が強くなることを報告している [26]。本実験では、揺れなし条件より揺れあり条件の方が動作への意識が向けられるため、筋緊張が高まったことが考えられる。その結果、筋疲労の指標において差が見られた可能性がある。

6. むすび

本研究では、実物体と仮想物体の運動状態の差異によって発生する錯覚“R-V Dynamics Illusion”を対象に、液体を模した CG 映像を実物体に重畳描画したときの、振り動作の変化と筋疲労への影響を分析した。実験の結果、液体の揺れを見ながら実物体を振ると、液体の揺れない条件と比べて、小さな加速度と筋活動量で振っていることを確認した。特に、左右方向の加速度に顕著な変化が見られ、主観的な知覚の変化に加えて、実物体の運動特性にも影響を与えていることを確認した。また、揺れあり条件では筋疲労が大きくなる傾向も見られ、フィードフォワード制御との関係性も示唆された。今後も、錯覚における各種パラメータが、知覚特性や運動特性に与える影響を系統的に分析していく予定である。

謝辞 本研究の一部は、科研費・基盤研究 A「手掌触覚伝達による手術手技の遠隔 VR 実地訓練基盤構築」、基盤 B「複合現実型視覚刺激による R-V Dynamics Illusion の研究」による。

参考文献

- [1] B. Son and J. Park, “Haptic feedback to the palm and fingers for improved tactile perception of large objects,” ACM UIST 2018, pp. 757 - 763, 2018.
- [2] Y. Konishi, N. Hanamitsu, B. Outram, K. Minamizawa, T. Mizuguchi, and A. Sato, “Synesthesia suit: the full body immersive experience,” ACM SIGGRAPH 2016, No. 20, 2016.
- [3] 「クロスモーダル/マルチモーダル 2 特集号」, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 23, No. 3, 2018.
- [4] A. Lécuyer, “Simulating haptic feedback using vision: A survey of research and applications of pseudo-haptic feedback,” *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, Vol. 18, No. 1, pp. 39 - 53, 2009.
- [5] A. Lecuyer, S. Coquillart, A. Kheddar, P. Richard, and P. Coiffet, “Pseudo-haptic feedback: can isometric input devices simulate force feedback?,” *IEEE Virtual Reality 2000*, pp. 83 - 90, 2000.
- [6] Y. Taima, Y. Ban, T. Narumi, T. Tanikawa, and M. Hirose, “Controlling fatigue while lifting objects using Pseudo-haptics in a mixed reality space,” *IEEE Haptics Symposium 2014*, pp. 175 - 180, 2014.
- [7] P. Punpongsonon, D. Iwai, and K. Sato, “SoftAR: Visually manipulating haptic softness perception in spatial augmented reality,” *IEEE Transaction on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 21, No. 11, pp. 1279 - 1288, 2015.
- [8] T. Narumi, Y. Ban, T. Kajinami, T. Tanikawa, and M. Hirose, “Augmented perception of satiety: Controlling food consumption by changing apparent size of food with augmented reality,” *ACM CHI 2012*, pp. 109 - 118, 2012.
- [9] M. Kagimoto, A. Kimura, F. Shibata, and H. Tamura, “Analysis of tactual impression by audio and visual stimulation for user interface design in mixed reality environment,” *HCI 2009*, pp. 326 - 335, 2009.
- [10] H. Omosako, A. Kimura, F. Shibata, and H. Tamura, “Shape-COG Illusion: Psychophysical influence on center-of-gravity perception by mixed-reality visual stimulation,” *IEEE Virtual Reality 2012*, pp. 65 - 66, 2012.
- [11] 佐野洋平, 橋口哲志, 柴田史久, 木村朝子: “動的に変化する複合現実型視覚刺激が重さ知覚に与える影響”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 19, No. 2, pp. 255 - 264, 2014.
- [12] Y. Kataoka, S. Hashiguchi, F. Shibata, and A. Kimura, “R-V Dynamics Illusion: Psychophysical phenomenon caused by the difference between dynamics of real object and virtual object,” *ICAT-EGVE 2015*, pp. 133 - 140, 2015.
- [13] 坂海輝, 藤光翼, 片岡佑太, 山田泰己, 橋口哲志, 柴田史久, 木村朝子: “R-V Dynamics Illusion における各種刺激の影響分析 (6) ~実物体の各種条件の拡張と評価~”, 第 182 回ヒューマンコンピュータインタラクション研究会, 2019.
- [14] J. J. Gibson, “The senses considered as perceptual systems,” *Houghton Mifflin*, 1966.
- [15] E. H. Weber, “The sense of touch,” *Academic Press*, 1978.
- [16] M. O. Ernst, “A Bayesian view on multimodal cue integration,” *Human Body Perception From the Inside Out: Oxford University Press*, pp. 105 - 131, 2006.
- [17] A. Charpentier, “Experimental study of some aspects of weight perception,” *Archives de Physiologie Normales et Pathologiques*, Vol. 3, pp. 122 - 135, 1891.
- [18] R. Cunnington, C. Windischberger, L. Deecke, and E. Moser, “The preparation and execution of self-initiated and externally-triggered movement: a study of event-related fMRI,” *Neuroimage*, Vol. 15, No. 2, pp. 373 - 385, 2002.
- [19] S. Kawai, F. Henigman, C. L. MacKenzie, A. B. Kuang, and P. H. Faust, “A reexamination of the size-weight illusion induced by visual size cues,” *Experimental Brain Research*, Vol. 179, No. 3, pp. 443 - 456, 2007.
- [20] J. R. Flanagan and M. A. Beltzner, “Independence of perceptual and sensorimotor predictions in the size-weight illusion,” *Nature Neuroscience*, Vol. 3, No. 7, pp. 737 - 741, 2000.
- [21] W. Peter, B. J. Francis, and L. Walker, “The brightness-weight illusion,” *Experimental Psychology*, Vol. 57, pp. 462 - 469, 2010.
- [22] Y. Ban, T. Narumi, T. Fujii, S. Sakurai, J. Imura, T. Tanikawa, and M. Hirose, “Augmented endurance: Controlling fatigue while handling objects by affecting weight perception using augmented reality,” *ACM CHI 2013*, pp. 69 - 78, 2013.
- [23] T. Moritani, M. Muro, and A. Nagata, “Intramuscular and surface electromyogram changes during muscle fatigue,” *Journal of Applied Physiology*, Vol. 60, No. 4, pp. 1179 - 1185, 1986.
- [24] H. H. Kornhuber and L. Deecke, “Hirnpotentialänderungen beim menschen vor und nach willkurbewegungen, dargestellt mit magnetbandspeicherung und ruckwärtsanalyse,” *Pflugers Arch ges Physiol*, Vol. 281, p. 52, 1964.
- [25] S. Yoshida, K. Nakazawa, E. Shimizu, and I. Shimoyama, “Anticipatory postural adjustments modify the movement-related potentials of upper extremity voluntary movement,” *Gait & Posture*, Vol. 27, No. 1, pp. 97 - 102, 2008.
- [26] S. Slobounov, M. Hallet, and K. M. Newell, “Perceived effort in force production as reflected in motor-related cortical potentials,” *Clinical Neurophysiology*, Vol. 115, No. 10, pp. 2391 - 2402, 2004.

付録

付録 A 代表的な被験者の加速度波形と%MVC 波形

実験 1 では、視覚条件によって加速度、および筋活動量が異なることが分かった。中でも、実物体の横方向の動きである z 軸の加速度に顕著な差異があることを確認した。そこで、代表的な波形の傾向を示した被験者の、各条件における 5 往復の振り動作の加速度波形と%MVC 波形を図 A に示す。

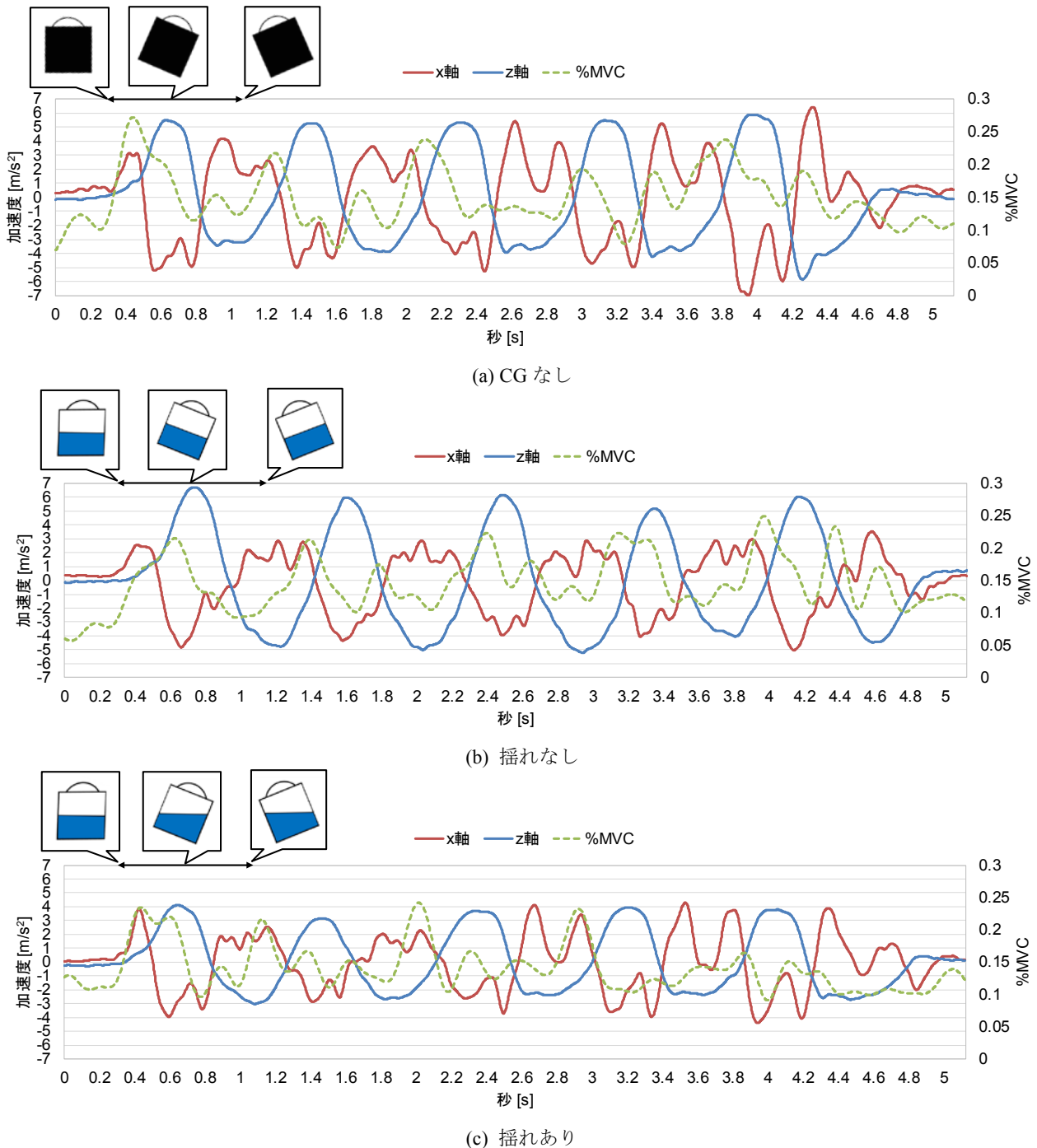


図 A 実験 1 における加速度と筋活動量の代表波形