

## 拡張現実感と筋電位を利用する筋疲労軽減システムの設計と評価 Design and Evaluation of a Muscle Fatigue Reduction System using Augmented Reality and Myoelectric Signals

山下 政人<sup>†</sup> 小俣 昌樹<sup>†</sup>  
Masato Yamashita<sup>†</sup> Masaki Omata<sup>†</sup>

### 1. はじめに

近年、複数の感覚が相互作用することでより強い刺激や錯覚を生み出す感覚間相互作用（クロスモダリティ）について研究がされている[1][2][3]。感覚間相互作用の中には、ユーザに物体の重量を錯覚させるものもあり、特に視覚刺激は錯覚を引き起こしやすいことがわかっている[4]。このことに関する先行研究として、拡張現実感（Augmented Reality, AR）技術を利用して物体の輝度を変化させることでユーザに物体の重量を錯覚させる拡張持久力システムがある[2]。しかし、このシステムは、持ち上げる物体の輝度がもともと高い場合、錯覚の効果が弱まることが示唆されている。このシステムのように物体そのものに変化を起こす場合、その形状や大きさ、見た目の色などの要因によってシステムに制約が生じる可能性がある。したがって、持ち上げる物体からの影響を受けない錯覚の方が有用であると考えられる。

本研究では、AR技術を利用してユーザが持ち上げる物体の周囲にCGを重畳し、ユーザの重量知覚に錯覚を引き起こすことで、中・軽量の物体を持ち上げるときの疲労を軽減するシステムを提案する。そのための第一段階の設計として、力強さを想起するロボットアームのCGをユーザの腕に重畳する。また、ユーザにより強い錯覚を与えるために、ユーザの力の変化に合わせてロボットアームの表面テクスチャを赤く変化させる。ユーザの力の変化を測定する手段として、筋電位を利用する。

### 2. 関連研究

本節では、AR技術を利用した錯覚に関する研究を紹介する。

鳴海らは、輝度が高い物体ほど重量が軽く見積もられる錯覚に注目し、輝度の変化によってユーザの疲労の軽減と作業量の増加を行う拡張持久力システムを提案した[2]。この評価実験において、被験者はシステムによって輝度を変化させた物体を繰り返し持ち上げて移動させるタスクを実施した。この実験の結果、輝度を高くした物体を持ち上げたときほど、被験者の疲労が軽減されることが示された。また、もう一つの実験として、システムを使用した状態でダンベルを上げ下げするタスクを実施した結果、輝度が高いダンベルほど、タスクを実行できる回数が増加することが示された。以上のことから、このシステムはユーザの力作業時の疲労軽減と作業量向上を行うことが可能である。

岡崎らは、AR技術を利用して通路に擬似的な傾斜を発生させて、歩行者の脚の負担を軽減する疑似傾斜提示システムを提案した[5]。この評価実験の結果、被験者は通路に傾斜が発生したと感じたが、脚の疲労の改善は見られなかった。

### 3. 提案手法

本研究では、ユーザの腕にロボットアームのCGを重畳することで、重量知覚に錯覚を引き起こして物体を持ち上げるときの疲労を軽減する手法を提案する（図1参照）。

人間は、普段物体を持ち上げるときに無意識に必要な以上の力を入れている。そこで、本研究では力強さを想起するロボットアームのCGをユーザの腕に重畳することによって、ユーザに自身の腕力が強くなったと錯覚させることを目指す。これによって、ユーザが物体を持ち上げるときに無意識に力を抜くと予想し、その結果、ユーザの腕の疲労が軽減されるという仮説を立てた。ロボットアームのCGを利用する理由は、ロボットが娯楽作品などを通して大衆に馴染みがあり、ユーザが力強さを想起しやすいと考えられるためである。また、提案手法に対して自身の腕を筋肉質に見せる方法も考えられるが、本研究では、人間の腕よりもはるかに強力な力を連想させるロボットアームを使用することで、ユーザに対してより強い錯覚を引き起こすことができると考える。

さらに、ユーザの力の変化に合わせた視覚効果があればより強い錯覚を引き起こすことができると考え、ユーザの力の変化に合わせてロボットアームの表面を赤く変化させる。赤色に変化させる理由は、赤色に活力や力強さを連想させる心理作用があり、関連研究でもAR技術を利用した物体の見た目の変化がユーザの疲労具合に影響を与えることが示されているためである[2][6]。これらのことから、ロボットアームの色を赤く変化させることによって、ユーザに対して更なる力強さの錯覚を与えることができると考える。なお、ユーザの力の測定には筋電位を用いる。筋電位とは、人間の筋が収縮し筋力を発揮しているときの筋活動電位である。提案手法では、筋電位が大きくなるほどロボットアームの表面の赤みを濃くする。

#### 3.1 システムの実装と使用方法

ユーザは両眼の視野映像を撮影するカメラの付いたHMDを装着し、そのカメラ越しにCGの重畳を視認できる。システムの実装には、AR開発ライブラリのARToolKit[7]を使用する。CGの重畳のために必要なマークが持ち上げられる物体に取り付けられる。ユーザはロボット

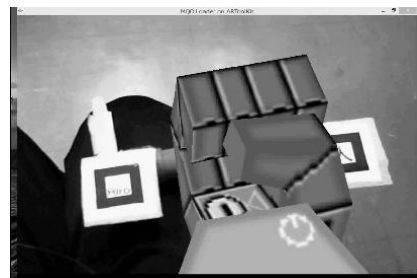


図1 ロボットアームを重畳した様子

<sup>†</sup> 山梨大学, University of Yamanashi

アームの重量を視認するために、物体に取り付けたマーカを HMD 越しに視界に収め続ける必要がある。

筋電位を測定するためにユーザの腕に筋電計が装着される。本システムでは、あらかじめ表面テクスチャの RGB 値が変更されたロボットアームの CG モデルを用意しておき、測定された筋電位に合わせて重畳するロボットアームのテクスチャを切り替える。

システムの概要を図 2 に示す。ユーザは、頭部に HMD、右腕に筋電計の電極を装着する。HMD として Vuzix Corporation 社の WRAP 1200AR を使用する。また、筋電計として Thought Technology 社の ProComp INFINITI を使用する。そして、視野映像と筋電位を実時間で取得し、HMD へ出力する映像をレンダリングするための PC として HP ENVY 700-260jp (CPU:Core i5-4570(3.20 Hz), OS:Windows8.1) を使用する。なお、HMD と筋電計は USB で PC と接続される。本研究では、2つのマーカを両端に取り付けたダンベルをユーザが持ち上げる物体として使用する(図 2 参照)。このダンベルの重さは 1.0 kg である。重畳するロボットアームは、Windows 用 3DCG ソフトウェアのメタセコイア[8]にあらかじめ用意されたサンプルモデルである。

### 3.2 システムのデータ処理

図 3 に提案手法の処理の流れを示す。事前に登録されたマーカが HMD のカメラに写ったら、そのマーカの位置情報からロボットアームの重畳位置が算出される。そのとき、色変化が有効になっているなら、筋電位に応じた処理が行われる。ユーザの筋電位は、筋電計からシステムへ実時間で送信されて絶対値に変換される。そして、その値に応じて重畳するロボットアームが切り替えられる(図 4 参照)。筋電位の合計値が  $800 \mu\text{V}$  未満の場合、色変化しない条件と同様のロボットアームが重畳される。合計値が  $800 \mu\text{V}$  以上  $1500 \mu\text{V}$  未満の場合、色変化しない条件から表面テクスチャの R 値を 30 (RGB の範囲:  $0 \sim 255$ ) だけ加算したロボットアームが重畳される。合計値が  $1500 \mu\text{V}$  から  $1000 \mu\text{V}$  増加するごとに、表面テクスチャの R 値を 10 だけ加算したロボットアームが重畳される。なお、本研究では G 値と B 値の加算や減算は行わない。筋電計のサンプリング

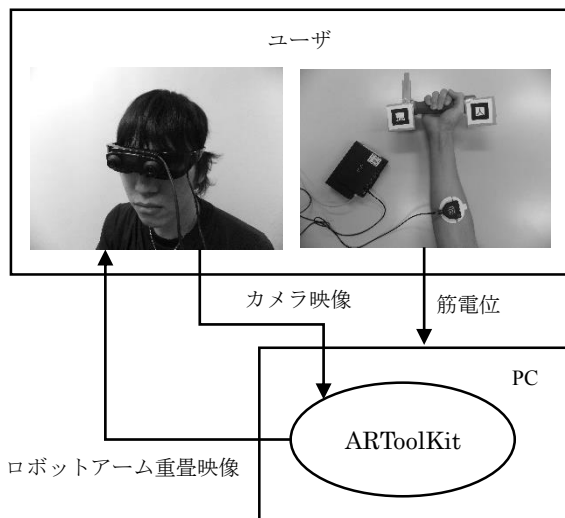


図 2 システムの概要

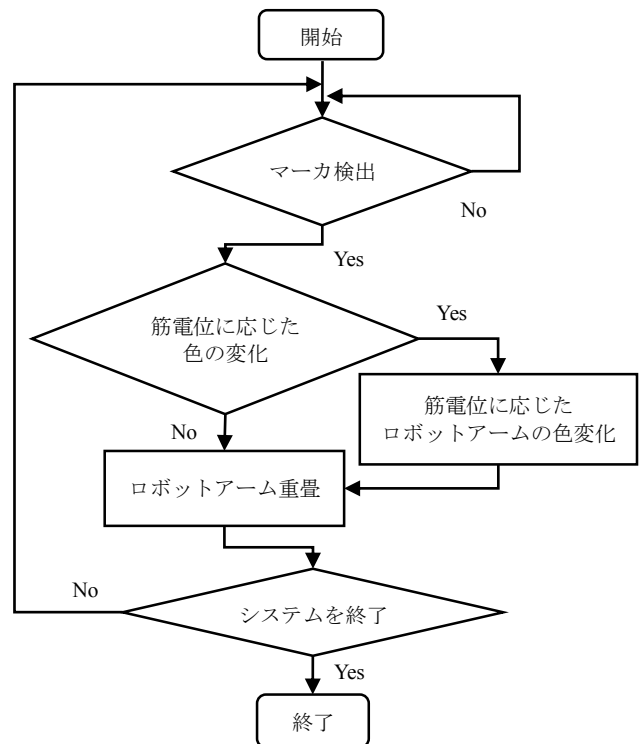


図 3 システム全体の処理の流れ

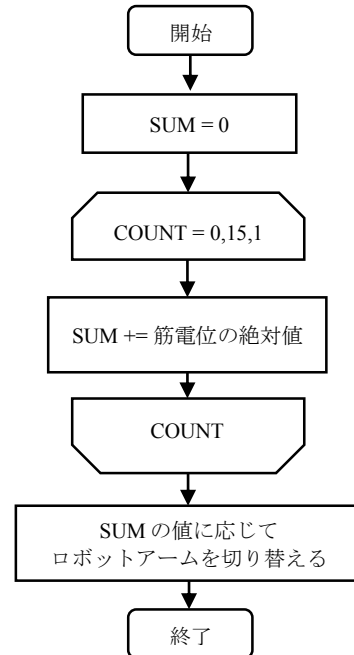


図 4 筋電位の計算と色変化の流れ

周波数は  $1024 \text{ Hz}$  で、データが 15 個送信される時間はおよそ  $0.01$  秒である。

## 4. 評価実験

提案手法によって、物体を持ち上げるときの疲労を軽減できるか検証する。実験では、被験者の精神的な疲労を主観的評価、肉体的な疲労を客観的評価とする。独立変数はロボットアームの重畳の条件である。この条件は、ロボットアームを重畳しない条件、ロボットアームを重畳する条件、およびロボットアームを重畳して色を変化させる条件

の 3 条件である。従属変数は、Visual Analog Scale (VAS) 法[9]を用いた主観的評価値と、筋電位を分析して得られる客観的評価の筋疲労値である。

#### 4.1 実験環境

本実験を実施する環境として、被験者が座るための椅子を用意し、その座面からおおよそ 40 cm の高さに紐を張る。また、被験者に一定のリズムを呈示するためにメトロノームが使用される。

#### 4.2 実験タスク

実験タスクは、「疲労フェーズ」とその前後の「疲労評価フェーズ」の 3 つのフェーズで構成される。

疲労評価フェーズでは、被験者の疲労の主観的評価と客観的評価が行われる。このフェーズ中、被験者は HMD を装着しない。被験者の疲労の主観的評価には VAS 法が利用される。これは、「今どれくらい疲労しているか?」という質問を受けた被験者が、左端に「全く疲労していない」、右端に「最大の疲労感」と書かれた 100 mm の数直線上に現在の疲労具合を矢印で示す評価方法である。被験者の疲労の客観的評価は、筋電位を周波数解析して得られる平均周波数 (Mean Power Frequency, MEPF) と中間周波数 (Median Power Frequency, MDPF) に基づく筋疲労を算出して評価される[10]。MEPF と MDPF は筋疲労の測定に使用される一般的な指標である。なお、MEPF と MDPF を筋疲労の評価に使用するためには、筋肉に同じ負荷がかかっている状態で筋電位を測定する必要がある。したがって、被験者には、右腕を地面と水平にしてダンベルを保持した状態でダンベルの中心を見る姿勢を 15 秒ほど維持してもらい、その間の被験者の筋電位を測定する (図 5 参照)。このとき測定された筋電位を高速フーリエ変換することで、筋電位波形をパワースペクトルに変換する。このパワースペクトルの各周波数の平均値が MEPF、パワースペクトルの面積を二等分する周波数が MDPF である。MEPF と MDPF は、筋疲労が蓄積するほど値が大幅に減少する。疲労フェーズ前後に行われる VAS 法の結果の増加量を各条件の主観的評価値とする。また、疲労フェーズ前後に測定する MEPF と MDPF の減少量を客観的評価値とする。

疲労フェーズにおいて、被験者は HMD を装着して、右手にマークを取り付けたダンベルを持ち、ダンベルの上げ下げを行う (図 6 参照)。ダンベルの上げ下げはおおよそ 2 秒に一往復するペースとし、このタイミングをメトロノームで呈示される。ダンベルを持ち上げる高さは座面の上に張った紐にダンベルが触れる位置までとし、ダンベルを下げる位置は被験者の腿に軽く触れるまでとする。ダンベルを上げ下げする回数は 50 回とし、その回数は実験者が数える。疲労フェーズ中に被験者は常にダンベルの中心を見続ける。これは、マークが被験者の視界に収まるようにするためである。

#### 4.3 実験準備

被験者は、腕に筋電計の電極を貼り付けられた状態で椅子に座り、実験者から実験内容の説明を受ける。その後、HMD を装着してダンベルを右手で持ち、ダンベルの中心付近を見ることでロボットアームの重畳を確認する。この

とき、被験者がロボットアームの位置に違和感を覚えた場合、キーボード入力によって表示位置を補正できる。

つぎに被験者は、ロボットアームを重畳した状態で数回ダンベルの上げ下げを行う。ダンベルを上げ下げするタイミングや高さは、疲労フェーズと同様である。被験者がダンベルを上げ下げするタイミングと高さを把握したら実験準備を終了する。

#### 4.4 実験手続き

実験タスクでは、実験の独立変数の 3 条件のうちいずれかひとつが被験者に呈示される。この 1 条件の評価を 1 セットとし、3 条件全ての評価を 1 ブロックとする。1 セット目の実験タスクが終了したら、最低でも 5 分間の休憩を挟み、その後、2 セット目の実験タスクが行われる。2 セット目の実験タスクでは、1 セット目の実験タスクで評価しなかった 2 条件のうちいずれかひとつが被験者に呈示される。その後、休憩を挟み、3 セット目の実験タスクが行われる。3 条件ですべての実験が完了したら、1 ブロック目の実験を終了する。その後、30 分以上の休憩を挟んで、同じ被験者に 2 ブロック目の実験を実施してもらう。なお、カウンターバランスをとるために呈示する条件の順番は固定されていない。2 ブロック目の実験が終了したら、被験者に自由記述の質問紙を回答してもらう。

#### 4.5 実験結果

実験の被験者は、22 歳から 24 歳の男性 12 名である。被験者全員が右利きであり、全員が実験タスクを右手でのみ行った。

被験者 12 名分の疲労の主観的評価値の増加量の平均を図 7 に示す。各条件の主観的評価値の増加量は、ロボットアームを重畳しない条件が 15.92、ロボットアームを重畳する条件が 14.29、ロボットアームを重畳して色を変化させる条件が 15.42 となった。この結果について分散分析を行ったところ、各条件に有意差は見られなかった ( $F(2, 22) = 0.28, p > 0.05$ )。

被験者 12 名分の MEPF の減少量の平均を図 8 に、MDPF の減少量の平均を図 9 に示す。各条件の MEPF の減少量は、



図 5 疲労の客観的評価を行う被験者



図 6 疲労フェーズタスクを行っている被験者

ロボットアームを重量しない条件が 6.58 Hz, ロボットアームを重量する条件が 4.81 Hz, ロボットアームを重量して色を変化させる条件が 4.86 Hz となった. また, 各条件の MDPF の減少量は, ロボットアームを重量しない条件が 5.02 Hz, ロボットアームを重量する条件が 3.63 Hz, ロボットアームを重量して色を変化させる条件が 4.48 Hz となった. この結果について分散分析を行ったところ, MEPF でも MDPF でも各条件間の減少量に有意差は見られなかった (MEPF : (F(2, 22)=1.99,  $p > 0.05$ ), MDPF : (F(2, 22)=1.90,  $p > 0.05$ )).

被験者の自由記述には, ロボットアームを自分の体の一部だと思いつくことと少し楽に感じたという意見(2人)や自分の腕の動きが小さく感じて楽になったという意見(1人)があった. 一方, ロボットアームの位置と自分の腕の位置のずれが気になったという意見(5人)やロボットアームがダンベルをしっかりと握っていないことが気になったという意見(2人)があった.

#### 4.6 考察

実験の結果, 提案手法によって有意差が生じるほどの疲労の軽減はなかった. しかし, 提案手法を用いた場合の MEPF と MDPF の減少量が小さいことから, 提案手法によって被験者の筋疲労が軽減する傾向があることがわかった. 一方, 主観的評価値は各条件でほとんど差がなかったことから, 被験者が疲労の軽減を自覚するほどの錯覚は得られなかったと考える. また, 自由記述から, ロボットアームの位置のずれなどが原因で, 被験者がロボットアームを自

分の腕だと強く錯覚できなかったと考える.

また, 筋電位にあわせて色を変化させる条件は, 変化させない条件との結果に差がなく, あまり効果がなかったと考える. その理由として, 赤一色では, 筋電位にあわせて変化していることが被験者に伝わりにくく, 被験者に注目されにくかったからと考える.

#### 5. おわりに

本研究では, 拡張現実感と筋電位を利用した筋疲労軽減システムの提案と評価を行った. このシステムは, ユーザの腕にロボットアームの CG を重量することで, ユーザの重量知覚に錯覚を引き起こし, 中・軽量の物体を持ち上げるときの疲労を軽減することを目指した. さらに, ユーザにより強い錯覚を与えるために, ユーザの筋電位に応じてロボットアームの表面テクスチャを赤く変化させた.

評価実験の結果, 提案手法を使用した条件と使用しない条件で被験者の疲労具合に有意差はなかったが, 提案手法によって被験者の筋疲労が軽減する傾向が見られた.

以上の結果から, 提案手法ではユーザの重量知覚に強い錯覚を与えることはできないことがわかった. 一方, 筋疲労がある程度軽減する傾向が見られたことから, CG の重量がユーザの重量知覚に影響を与えると考えられる. したがって, 被験者により強い錯覚効果を与えることで, 提案手法の有効性が高まると考える. そのために, 今後は, 正確にロボットアームを重量する方法や効果的な色変化について検討する. ロボットアームを正確に重量する方法として, 複数のカメラや Kinect を使用して腕やダンベルの位置情報を正確に測定することを考えている. また, 色変化については, 変化の幅を大きくすることで被験者に印象付けることを考えている. 一方で, 変化させる色を鎮静作用のある青色[6]にして, ユーザの力を抑制する効果を検証する.

#### 参考文献

- [1] 北川 智利, “多感覚錯覚からみる身体のリアリティ”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.10, No.1, pp.26-31 (2005).
- [2] 鳴海 拓志, 伴 祐樹, 藤井 達也, 櫻井 翔, 井村 純, 谷川 智洋, 廣瀬 通孝, “拡張持久力: 拡張現実感を利用した重量知覚操作による力作業支援”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.17, No.4, pp.333-342 (2012).
- [3] 鳴海 拓志, 谷川 智洋, 梶波 崇, 廣瀬 通孝, “メタクッキー: 感覚間相互作用を用いた味覚ディスプレイの検討”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.15, No.4, pp.579-588 (2012).
- [4] 井頭 均, “重さの知覚 シャルバンティエ効果”, 日本保育学会大会研究発表論文集, Vol.39, pp.74-75 (1986).
- [5] 岡崎 成晃, 小川 剛史, “拡張現実感による擬似傾斜提示が歩行者に与える影響の検証”, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.114, No.239, pp.57-62 (2014).
- [6] “共通認識される色の働き・色の性質, 色カラー”, 色彩を中心とした情報サイト (online), <<http://iro-color.com/episode/color-effect.html>> (最終閲覧日: 2015年4月3日).
- [7] Lamb, P. R., “ARToolKit”, ARToolKit Home Page(online), <<http://www.hitl.washington.edu/artoolkit/>> (最終閲覧日: 2015年4月1日).
- [8] テトラフェイス, “Metaseq.net”, metasequoia4(online), <<http://metaseq.net/jp/>> (最終閲覧日: 2015年4月1日).
- [9] 日本疲労学会, “日本疲労学会”, 日本疲労学会 (online), <<http://www.hirougakkai.com/>> (最終閲覧日: 2015年4月1日).
- [10] 正門 由久, 長谷 公隆, 木村 彰男, 野田 幸男, 千野 直一, “表面筋電図周波数分析による筋疲労の検討: 同一筋内での topographical analysis”, リハビリテーション医学: 日本リハビリテーション医学会誌, Vol.31, No.6, pp.409-414 (1994).

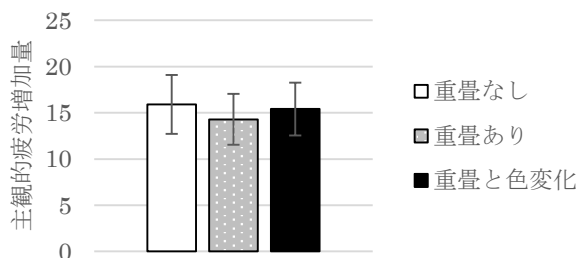


図7 主観的疲労増加量の平均

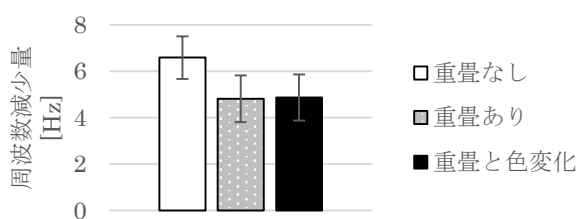


図8 平均周波数(MEPF)減少量の平均

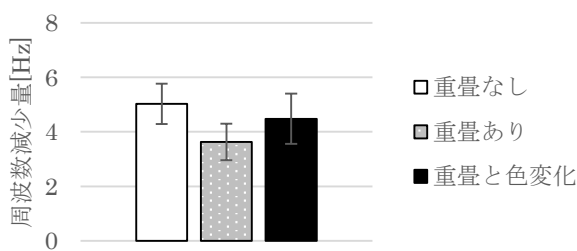


図9 中間周波数(MDPF)減少量の平均