

複合現実空間での前腕の半透明表現が痛覚に与える影響の分析

三浦勇樹^{†1} 橋口哲志^{†1} 柴田史久^{†1} 田村秀行^{†2} 木村朝子^{†1}

概要：隠消現実感とは、現実世界に存在する物体を視覚的に消去する技術であり、意図的に物体を半透明にする表現も可能である。この半透明表現は、作業における視認領域の拡張など視覚的な利点で活用されているが、視覚的に半透明な身体が身体所有感に影響を与えるか否かも知覚心理学的に興味深い知見である。先行研究では、VRにおいて仮想身体が半透明になった場合、身体所有感に影響を与え、痛覚にも影響を与えることが確認されているが、仮想身体ではなく自分の身体が半透明になった場合については議論されていなかった。そこで、本研究では半透明処理する対象を現実の前腕とし、身体の不透明度を変化させることで、身体所有感に影響を与え、痛覚にも影響を与えることを確認した。

キーワード：痛覚、身体所有感、半透明、複合現実感、隠消現実感

1. はじめに

拡張現実感 (Augmented Reality; AR) や複合現実感 (Mixed Reality; MR) は、現実空間に付与したい情報を加算することができる技術である。一方、その逆の概念である隠消現実感 (Diminished Reality; DR) は、現実世界に存在する物体を視覚的に消去することで、情報を減算する技術として知られている [1]。

視覚的な DR は、現実世界に実存する物体を見かけ上消し去るために使用されているが [2]、物体を完全に消去するのではなく、意図的に少し残すために物体を半透明にすることも考えられる [3][4]。このような半透明表現は、DRと同様に情報を減算する技術であるが、他にも様々な用途で活用できる。例えば、完全に物体を消去すると体験者がそれに気付かず衝突する危険性がある。このような場合、物体を半透明化して存在を意識させることで、体験者は衝突を回避することができる [5]。また、将棋の実況中継映像では駒を動かす棋士の手によって盤面が遮られてしまうが、手を半透明にすることで盤面上に駒を視認できる [6]。

このように半透明表現は視認領域を拡張できる技術であるが、この半透明表現を、身体を対象に行うことで、身体の外観も変容させることができる。この身体の外観変容は、視覚的な変化だけでなく身体像に影響を与える可能性がある [7]。ここで言う身体像とは、無意識に自分の身体がどのような形をしているか知ることである。この身体像を外界と区別し、自分に属しているものだと感じることを身体所有感という。この身体所有感は、よく知られた錯覚である Rubber Hand Illusion [8] のように、外界の対象にも拡張することができ、身体像が変容することが知られている。

人工現実感 (Virtual Reality; VR) でも仮想身体に身体所有感が生起し、その身体が変容することで、自分の身体

像があたかも変化したように錯覚することが確認されている [9]。また、M. Martini らは仮想身体を半透明にすることで身体所有感が減少することを確認し、この状態で痛覚刺激を提示すると、痛みが軽減することを示唆した [10]。

しかし、これらはあくまで仮想身体に対する結果であり、現実世界にある身体そのものを半透明にした場合、仮想身体を介する場合と比べて、身体所有感が強くなると考えられる。もしそうであるならば、自分の身体が半透明になった場合でも、既存研究と同様に身体所有感に影響を与えたり、痛覚に影響を与えたりするのだろうか。

このような疑問から、我々は、まず DR 技術を用いて自分の身体の半透明表現を実現することにした。これまで我々の研究グループでは、DR 技術による実物体の視覚的な消去が触印象に与える影響を分析してきた [11]。本研究では、この DR 処理を身体半透明表現に適用して、これが痛覚に与える影響を分析する。そのためには、まず不透明度が身体所有感に影響を与えるのか調べる必要がある。そこで、実験 1 で前腕における不透明度の変化が身体所有感に与える影響をアンケート調査により確認し、実験 2 で不透明度の変化が知覚する痛覚強度に与える影響を確認する。

2. 実験準備

2.1 実験システム

実験で用いる MR/DR システムの構成を図 1 に示す。このシステムでは、ビデオシーヌルー型 HMD (Canon, HM-A1) および MR Platform System (Canon, MP-110) を使用する。また、被験者が自分の前腕を観察中に自由に頭部を動かすことができるよう、磁気センサ (Polhemus, 3SPACE FASTRAK) を用いて頭部の位置姿勢情報を取得する。本システムは 30fps で動作しており、予備実験において時間的遅れ・ずれは感じないということを確認している。

2.2 半透明な前腕の表現

本研究では、前述の MR/DR システムを用いることで、現実世界における前腕の不透明度を視覚的に変化させる。

DR 手法は様々な提案されているが [1]、本研究では不透明

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

^{†2} 立命館大学 総合科学技術研究機構
Research Organization of Science and Technology,
Ritsumeikan University

度の変化が人間の知覚に影響を与えるか確認するため、まずは簡易的な DR 手法を採用した。具体的には、図 2 のように実験背景を白で統一するとともに、背景と同色の CG モデルを被験者の前腕上に重畳描画する。この CG モデルのアルファ値を変更することで背景色と混合し、まるで前腕が透けたかのように表現する。不透明度をそれぞれ 100%、75%、50%、25%に変更した実行結果を図 3 に示す。

ただし、図 3 に示すような半透明の前腕を見せても、ディスプレイの問題などで前腕の色が正しく表示されていないと認識され、自分の前腕が透明になったと感じない被験者も少なくない。そこで、半透明であることを効果的に被験者に認識させるために、透明度の時間変化を提示することにした。具体的には、被験者に透明になる前の状態(不透明度:100%)を見せた後に、前腕が徐々に透明になっていく(不透明度が時間的に変化する)様子を観察させた。

また、自分の前腕が透明化したという印象を与えにくい要因として、前腕の影の影響が挙げられる。先行研究において、影を見る行為が身体の位置や運動状態などを知覚する固有感覚に影響を与えることが知られている [12]。そこで本研究では、図 2 のようにスタンドライト及び前腕置き台内部にライトを設置することで影が生成されないようにした。なお、実験中は予め設置した台の上に前腕を置くよう被験者に指示した。

2.3 痛覚刺激

痛みの定量的な測定方法に関して、多くの研究が行われてきた。一般的には、ある痛覚刺激に対する痛覚閾値や痛覚強度を主観的に評価する方法が使用されている。それらの研究と同様の評価をするためには、まず安定した痛覚刺激を提示する必要がある。

痛みとして知覚される痛覚刺激のうち、皮膚に対する刺激には、機械刺激や化学刺激、電気刺激、熱刺激など様々な種類がある。古典的な手法として von Frey フィラメント試験が知られている。その手法は、決まった圧力を加えることができる太さの異なる von Frey フィラメントを刺激提示部位に対して曲がるまで垂直に押し付けて痛覚閾値を測るものである [13]。機械刺激を用いた刺激装置はこれまで数多く考案されており、赤松らは、針の押し込み量をパラメータとして痛覚閾値を測定している [14]。しかし、機械刺激は皮膚に対して押し込む必要があるため、痛覚だけでなく、圧覚などの他の皮膚感覚の影響を受ける可能性がある。また、化学刺激に関しては、人体に悪影響を及ぼす可能性があるため望ましくない。一方で、皮膚感覚の影響を受けにくいとされる痛覚刺激として、電気刺激と熱刺激が挙げられるが、本研究では、簡便かつ安定した刺激提示が可能な電気刺激を採用した。

実験で使用する痛覚提示装置について、部品と装置の仕組みを表 1、図 4 に示す。実験では、電気刺激の発生装置として、コッククロフト・ウォルトン回路を用いて昇圧し

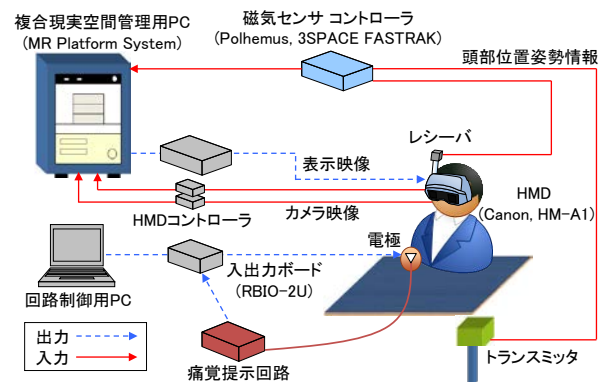


図 1 システム構成

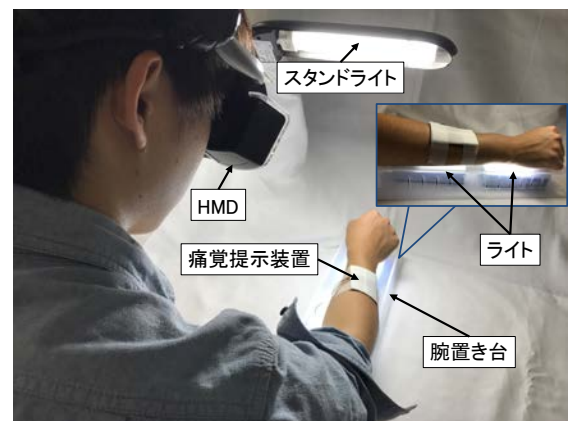


図 2 実験の様子

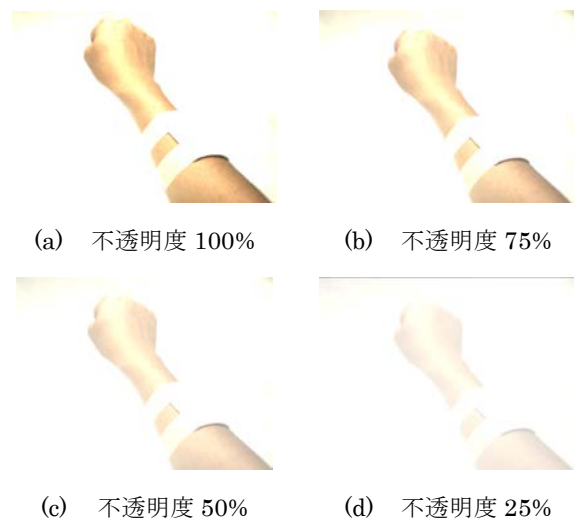


図 3 使用する視覚刺激

た電流を入出力ボード(共有電子産業, RBIO-2U)に通して使用した。

電極は、厚さ 1mm のゴムシートに穴を空け、導線(0.12mm 径, 10 芯)をこの穴に通して、固定する。この導線に電流を流すことで、痛覚を提示する。刺激提示位置は前腕(詳しくは橈骨点から橈骨茎突点間の有毛部)の中央として、前腕に電極付きのゴムシートの電極部が密着するよう装着した。また、各試行間での休憩中には装置を取り外さないようにした。

電気刺激の強度は、先行研究で同様のコッククロフト・

ウォルトン回路を使用していた片岡らの実験条件を踏襲し、電圧 320V、電流 1.8mA とする [15]。この電圧値は、コッククロフト・ウォルトン回路に印加した電圧値で、電流値は 1 名の被験者の前腕中央で測定した参考値である。また、実験で使用する痛覚提示装置は、パルス幅 0.15 秒の人体に有害な生理的影響を与えない電気刺激である [16]。なお、事前に行った予備実験にて、複数の被験者が痛みを覚知することを確認している。

3. 実験 1：前腕での半透明表現が身体所有感に与える影響の分析

3.1 実験目的

先行研究 [10] では、VR で仮想身体の前腕を半透明にした際、身体所有感が減少することを確認している。また、この効果はその不透明度によって変わり、身体所有感の減少が大きいほど、痛み強度が弱まることを示唆している。つまり、身体所有感を減少させる効果がない限り、痛覚に影響を与えない可能性がある。

一方、本研究では MR 空間上で自分の前腕を半透明に見せる。この場合、仮想身体を介することなく、自分の前腕を用いるため身体所有感是非常に強いと考えられる。よって半透明表現が身体所有感に影響を与えるのか検討する必要がある。

そこで、半透明表現が痛覚に与える影響を確認する前に、まず実験 1 では、2.2 節で述べた視覚刺激によって前腕が半透明になったと認識されるか、その表現が身体所有感に影響を与えるか確認する。また、先行研究 [10] において、不透明度の変化によっても身体所有感が増減することが確認されているため、不透明度を変更した場合についての実験を行った。

3.2 評価方法

半透明表現を行った前腕を観察した際、身体所有感にどのような影響を与えるのかを確認するため、リッカート法を用いて評価させた。表 2 は、実験に使用した評価項目である。

アンケート①は、ビデオシーズルー型 HMD を通して見える前腕が仮想物体のような仮想の前腕ではなく、現実世界の自分の前腕であると認識しているかどうかの確認である。アンケート②は、実験で用いた前腕の不透明度を変化させる視覚刺激によって、前腕が半透明になったように見えているかどうかの確認である。アンケート③は、不透明度を変化させる視覚刺激によって、あたかも自分の前腕が存在しないような感覚があるか、すなわち、自分の前腕の身体所有感に変化があったかどうかの確認である。アンケート④は、不透明度を変化させる視覚刺激によって、前腕自体が透けているような感覚があるか、すなわち、半透明表現が提示されたときに自分の前腕が半透明になったように感じたかどうかの確認である。

これらの項目に対して、7 段階 (7: 強く同意する～1: 強

表 1 痛覚提示に用いた部品

部品名	詳細
コンデンサ (C)	耐電圧：1000V
	容量：1500pE
ダイオード (D)	順電圧：1.1V
	順電流：1.0A
	逆電圧：1000V

表 2 アンケート項目

- ① 見えている前腕が自分の前腕であるように感じた
- ② 視覚刺激によって自分の前腕が半透明に見えた
- ③ 視覚刺激によって自分の前腕が無いように感じた
- ④ 視覚刺激によって自分の前腕が半透明になったように感じた

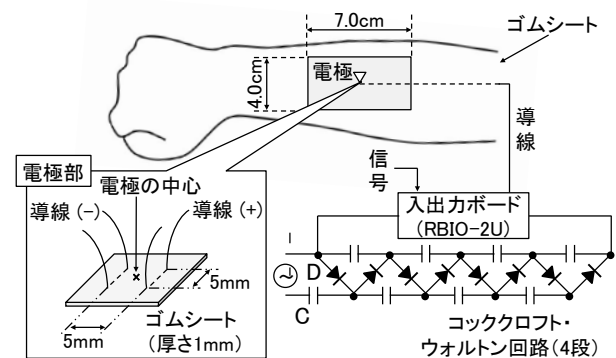


図 4 痛覚提示の仕組み

く同意しない) で回答させる。

3.3 実験条件と手順

被験者には、まず不透明度 100% の前腕を観察させた後、徐々に半透明になっていく様子を提示する。実験 1 で提示する視覚刺激は、前腕の不透明度が 75%、50%、25% の 3 種類とした。視覚的に半透明にする身体部位として右前腕を使用する。これは、被験者が椅子に座った状態で前腕を置いた際に視認しやすい部位である。そのため以降の実験でも、不透明度を変化させる身体部位は右前腕とする。また、2.2 節で述べたように、影による影響を排除するため、前腕を指定された台に置くよう指示し、各試行前に前腕の影が視認出来ないことを被験者に口頭で確認した。また、実験中は前腕を動かさないよう指示した。なお、順序効果の影響を防ぐため、3 種類の不透明度を被験者毎にランダムで提示した。被験者は成人 18 名 (男性 15 名、女性 3 名)、試行回数は 1 人あたり 3 回である。

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) 前腕を指定した位置に置かせる
- (3) 前腕の影が見えないかを確認させる
- (4) 前腕の不透明度の変化を観察させる
- (5) アンケートに関して 7 段階で回答させる
- (6) 残りの不透明度について (2)～(5) を繰り返す

3.4 実験結果と考察

【実験結果】

実験1の4つのアンケート結果を図5に示す。図中の青色は第1四分位数と中央値間、水色は中央値と第3四分位数間、各データの下端は最小値、上端は最大値を表す。なお、図中の白丸は外れ値、橙色の菱形は平均値である。また、グラフの横軸は前腕の不透明度を、縦軸は被験者18名分のアンケート評価値を表す。

アンケート①の結果は、評価値が7に近いほど、自分の前腕であると強く認識していることを示す。図より、Friedman検定で有意差 ($p<.01$) が見られたことから、多重比較のScheffé法を行ったところ、不透明度75%-25%間 ($p<.05$) で有意差が見られた。よって、不透明度の減少(より透明になる)に伴い、自分の前腕という認識も減少するが、多くの被験者はHMDを通して見える前腕を自分の前腕であると認識していることを示した。

アンケート②の結果は、評価値が7に近いほど、被験者が半透明に見えていることを示す。図より、Friedman検定で有意差 ($p<.001$) が見られたことから、多重比較のScheffé法を行ったところ、不透明度75%-50%間 ($p<.05$) と不透明度75%-25%間 ($p<.01$) で有意差が見られた。よって、不透明度の減少(より透明になる)に伴い、前腕がより半透明になったように見えることを示した。

アンケート③では、評価値が7に近いほど、自分の前腕の身体所有感が減少し、前腕自体がまるで存在しないように感じたことを示す。図より、Friedman検定で有意差 ($p<.01$) が見られたことから、多重比較のScheffé法を行ったところ、不透明度75%-25%間 ($p<.05$) と不透明度50%-25%間 ($p<.05$) で有意差が見られた。よって、不透明度を25%まで減少させることで、前腕の存在感に影響を与えることを示した。

アンケート④は、評価値が7に近いほど、半透明表現が提示されたときに、自分の前腕が半透明になったように感じた

ことを示す。図より、Friedman検定で有意差 ($p<.001$) が見られたことから、多重比較のScheffé法を行ったところ、不透明度75%-25%間 ($p<.01$) と不透明度50%-25%間 ($p<.05$) で有意差が見られた。よって、不透明度の減少(より透明になる)に伴い、自分の前腕が半透明になったように感じているという傾向を示した。

【考察】

実験結果から以下の3つのことがわかった。

- (i) 簡易的なDR手法でも自分の前腕が半透明に見える
- (ii) 不透明度を変更しても身体所有感が強い
- (iii) 自分の前腕が半透明になったように感じている

(i) に関して、アンケート①②の結果から、HMD越しに見ている前腕が自分のものであると感じながら、その前腕が半透明に見えると回答していることがわかる。このことから、実験で使用した視覚刺激によって自分の前腕が視覚的に半透明に見えていることを示した。また、不透明度の減少に伴い、自分の前腕がより半透明に見えていることがわかる。

(ii) に関して、アンケート②③の結果から、簡易的な視覚刺激で視覚的に半透明に見えていても、身体所有感を無くすることは困難であることを示した。これは、もとより身体所有感が存在しない仮想身体ではなく、現実世界にある自分の前腕を見ているため、身体所有感を強く感じていることが考えられる。特に、アンケート③の結果で、75%-25%間 ($p<.05$) と50%-25%間 ($p<.05$) で有意差は見られたが、全体を通して低いスコアを示した。したがって、各視覚刺激において半透明に見えていても、前腕の身体所有感が残ることを示唆している。

(iii) に関して、アンケート②③④の結果から、不透明度を25%まで減少させると自分の前腕が半透明になったように感じていることがわかる。これは(ii)のことからもわかるように、自分の前腕が半透明に見え、かつ身体所有感が無くならなかったことで、自分の前腕を半透明であると

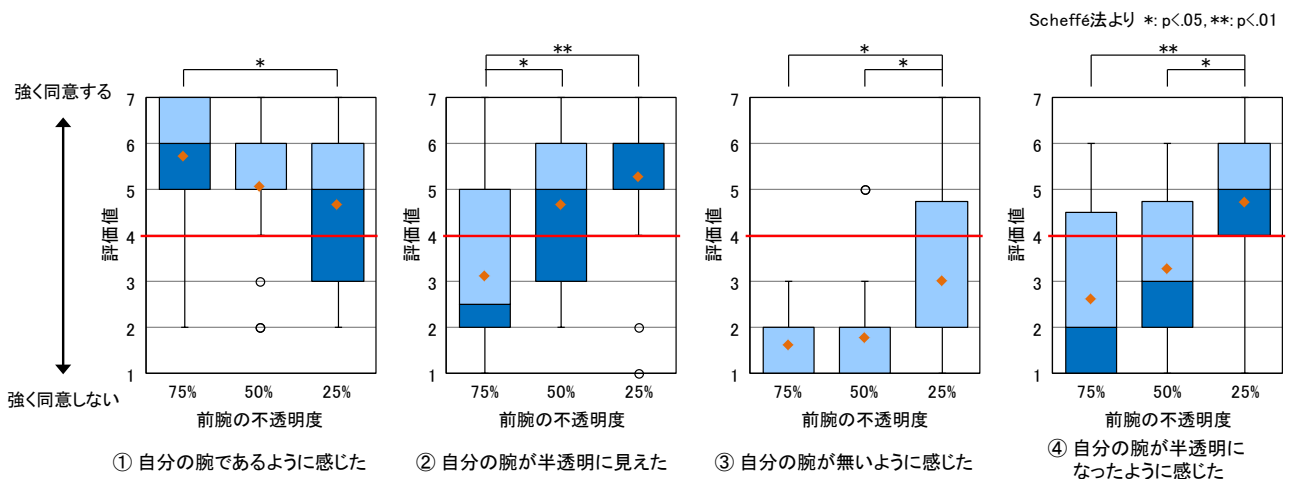


図5 各アンケート結果

認識したことを示唆している。

特に、アンケート④において、不透明度 25%で最も自分の前腕を半透明であると認識している。これは半透明に最も見えている条件で、かつ身体所有感が残っていることで、自分の前腕が半透明であると強く認識した可能性がある。

また、アンケート①でも不透明度 25%では他の条件に比べ、低い評価値を示している。これは、不透明度 25%が他の条件に比べ、前腕がより透明に見えるため、身体が半透明という視覚情報が身体像に影響を与えたと考えられる。先行研究で用いられた仮想身体と比べると、本来であれば身体所有感が非常に強いと思われる。しかし、現実世界の自分の前腕が、不透明度を 25%まで減少させることで身体所有感が減少する傾向が見られたこと。このことは予想外の結果であった。

以上のことから、本研究で使用した視覚刺激において、前腕の不透明度が身体所有感に影響を与えることを示した。また、不透明度を 25%で最も自分の前腕を半透明であると認識することがわかった。

4. 実験 2：前腕での半透明表現が痛覚強度に与える影響の分析

4.1 実験目的

実験 1 では本研究で使用した視覚刺激において、自分の前腕が半透明に見えており、不透明度が身体所有感に影響を与えることを示した。よって、もし身体所有感に影響を与えられているのであれば、先行研究と同様に痛覚にも影響がある可能性がある。

そこで実験 2 では、前腕の不透明度を変化させることで痛覚に影響を与えるのかを確認する。具体的には、MR 空間上で前腕の不透明度を変化させ、半透明になった前腕に痛覚刺激を提示し、その時の痛覚強度を Visual Analog Scale (VAS) 法で評価する。

4.2 評価方法

知覚する痛み強度を評価する方法として、本研究では臨床試験でよく利用される VAS 法を採用する。VAS 法とは、100mm の横線で目盛りを打たず、左端を「痛みなし」右端を「想像できる最大の痛み」とし、知覚した痛みの強度をどの程度に感じるかを被験者が印を付ける手法である [17]。プロットされた印が左端から何 mm の位置かを測定し、その値を痛みの強度とする。なお、自己相関や系列相関による影響がないよう、前試行と比較せずに回答するよう教示した。

4.3 実験条件と手順

実験 2 で用いる視覚刺激は、実験 1 で使用した不透明度 75%、50%、25%の 3 種類に加え、前腕を半透明にしない不透明度 100%と被験者の視界を遮断する非表示の計 5 種類とした。これは、前腕を観察することによる効果と前腕を半透明表現することによる効果をそれぞれ確認するためである。な

お、順序効果の影響を防ぐため、視覚刺激は被験者毎にランダムな順で提示を行った。また、残効による影響を排除するために、各試行で 2 分間のインターバルを設けた。

前腕の置き方は、実験 1 と同様であり、各試行前に前腕の影が視認出来ないことを被験者に口頭で確認した。痛覚の提示は、不透明度の変化が終了したタイミングで行い、事前に痛覚提示のタイミングを被験者に教示した上で実験を行う。被験者は実験 1 と同様の成人 18 名である。なお、実験は各パターン 1 回ずつ行うため、被験者 1 人あたりの試行回数は $1 \times 5 = 5$ 回である。また、被験者には実験を行う前に口頭・文書によるインフォームドコンセントを行い、署名による承諾を得た上で実験を行った。

具体的な実験手順は以下の通りである。

- (1) 前腕中央に刺激提示装置を取り付ける
- (2) テスト刺激を提示する
- (3) 痛みを知覚することができるか確認する
- (4) 2 分間のインターバルを設ける
- (5) 被験者に HMD を装着させる
- (6) 前腕を指定した位置に置かせる
- (7) 前腕の影が見えないかを確認させる
- (8) 視覚刺激のパターンから 1 つをランダムに提示する
- (9) 痛覚刺激を提示する
- (10) 知覚した痛覚強度を VAS 法で回答させる
- (11) 残りの視覚刺激について (4)~(10) を繰り返す

なお (4) で、2 分経過しても刺激提示箇所に痛みやかゆみなどが残っている場合は、その感覚が無くなるまでインターバルを延長した。

4.4 実験結果と考察

【実験結果】

各被験者で、VAS 値を不透明度 100%の条件で正規化し、全体の平均を取った値を図 6 に示す。横軸が不透明度の条件を、縦軸が正規化した VAS 値の平均を表す。エラーバーは標準偏差を表す。

グラフより、前腕の不透明度を減少させることで、知覚する痛み強度も概ね減少する傾向を示した。また、Tukey-Kramer 法により多重検定を行ったところ、不透明度 100%-25%間でのみ有意差 ($p < .05$) が見られた。不透明

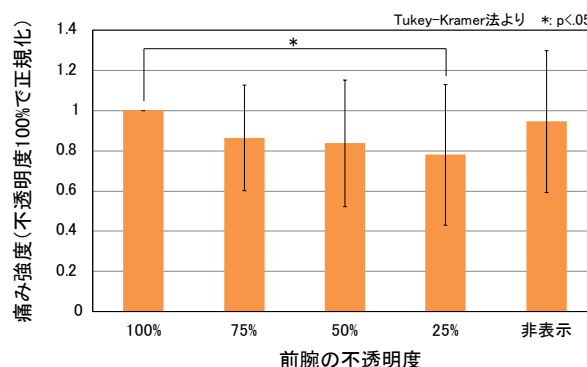


図 6 痛覚刺激に対する VAS 値

度の減少に伴い、痛み強度も減少する傾向であった。なお、なかにはこれとは逆の傾向を示す被験者も数名いた。

【考察】

実験1の結果より、不透明度75%の条件以外で自分の前腕が半透明になったように見えた被験者が多いことから、ある一定以下の不透明度でないと被験者は半透明であると認識できないことが考えられる。一方で、自分の前腕自体が半透明になったと感じるのは不透明度25%の条件のみであった。これは前腕が半透明に見えていて、かつ身体所有感が減少している条件となる。

実験2では、不透明度の減少に伴い、痛みが弱まる傾向を示しており、特に、不透明度25%で顕著な結果となった。このことから、視覚的に半透明に見えていても、身体所有感が変わらなければ、不透明度の変化が痛覚に影響しない可能性が考えられる。また、視界を遮断する非表示の条件では、被験者毎で痛み強度のばらつきが大きい、概ね不透明度100%条件と同様の傾向を示した。よって、視覚的に半透明に見えて、かつ、身体所有感が減少した場合に、痛み強度が弱まる傾向であることがわかった。このことは、先行研究と同様の傾向であった。

5. むすび

本研究では、現実世界の前腕に対して、実時間で不透明度を視覚的に変化させることが可能な半透明表現を用いて不透明度が身体所有感や痛覚に与える影響について確認した。

実験1では、前腕の不透明度の変化が身体所有感に影響を与えるか確認した。具体的には、本実験で使用する視覚刺激が半透明な前腕の表現として適しているか、この視覚刺激によって身体所有感が変化するかを確認した。その結果、簡易的な視覚刺激によって前腕の半透明な表現ができていたことがわかった。また、ビデオシーズルー型HMDを通して見える自分の前腕の不透明度を変化させることで、身体所有感の変化が見られた。よって、半透明な前腕を表現する視覚刺激が身体所有感に影響を与えることを示した。さらに、不透明度の減少に伴い、身体所有感が弱まる傾向を示した。特に、VRに提示された仮想身体ではなく、そもそも身体所有感が強いと考えられる現実世界の前腕に対して、不透明度を変化させることで、身体所有感に変化が見られたことは興味深い結果であった。

実験2では、不透明度の変化によって痛覚に影響を与えるのかを確認した。その結果、前腕の不透明度を減少させることで、知覚する痛み強度が概ね減少する傾向を示した。また、不透明度100%-25%間でのみ有意差が見られたことから、前腕の不透明度を25%以下まで減少させると痛覚に影響を与えることがわかった。

今後は、身体所有感と痛覚の関連性について分析し、異なる痛覚刺激や高度な半透明表現での実験など、MR空間における痛覚に関する更なる知見を得ることを目指す。

参考文献

- [1] 森尚平, 一刈良介, 柴田史久, 木村朝子, 田村秀行: “隠消現実感の技術的枠組みと諸問題～現実世界に実在する物体を視覚的に隠蔽・消去・透視する技術について～”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 16, No. 2, pp. 239 - 250, 2011.
- [2] 李金霞, 齊藤純哉, 森尚平, 池田聖, 柴田史久, 木村朝子, 田村秀行: “隠消現実感技術を用いた映画制作支援システムの開発と運用”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 21, No. 3, pp. 451 - 462, 2016.
- [3] 吉岡奨悟, 森尚平, 柴田史久, 木村朝子, 田村秀行: “隠消現実感における半隠消表示方法の改良”, 第19回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 33B-1, pp. 533 - 536, 2014.
- [4] 古志亘, 高橋藍, 柴田史久, 木村朝子, 田村秀行: “隠消現実感における半隠消表示モデルに関する考察”, 第16回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 14D-2, pp. 322 - 325, 2011.
- [5] 武政泰輔, 亀田能成, 大田友一: “定点カメラ映像を用いた歩行者のための屋外複合現実システム”, PRMU, Vol. 16, No. 2, pp. 239 - 250, 2011.
- [6] 奥本隼, 吉田光男, 梅村恭司: “物体を操作する映像におけるHalf-Diminished Realityの実現”, 電子情報通信学会, 2016.
- [7] 松井和輝, 古川正紘, 安藤英由樹, 前田太郎: “生得的でない身体部位追加のための身体像の伸展”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 20, No. 3, pp. 243 - 252, 2015.
- [8] M. Botvinick and J. Cohen: “Rubber hands 'feel' touch that eyes see,” *Nature*, Vol. 391, No. 6669, p. 756, 1998.
- [9] N. Ogawa, Y. Ban, S. Sakurai, T. Narumi, T. Tanikawa, and M. Hirose: “Metamorphosis Hand: Dynamically Transforming Hands,” *Proceedings of the 7th Augmented Human International Conference 2016*, No. 51, 2016.
- [10] M. Martini, K. Kiltner, A. Maselli, and M. V. Sanchez-Vives: “The body fades away: investigating the effects of transparency of an embodied virtual body on pain threshold and body ownership,” *Scientific Reports*, 5:13948. doi:10.1038/srep13948.
- [11] 田中美帆, 大嶋佳奈, 橋口哲志, 森尚平, 木村朝子, 柴田史久, 田村秀行: “隠消現実感技術を用いた実物体の視覚的消去による触力覚への影響”, 情報処理学会研究報告, Vol. 2017-HCI-171, No. 30, 2017.
- [12] K. Kodaka and A. Kanazawa: “Innocent Body-Shadow Mimics Physical Body,” *i-Perception*, Vol. 8, No. 3, 2017. doi: 10.1177/2041669517706520.
- [13] 本田健治, 高野行夫: “疼痛試験法の実際”, 日本薬理学雑誌, Vol. 130, No. 1, pp. 39 - 44, 2007.
- [14] 赤松幹之: “針の押し込み量をパラメータとした痛覚閾値測定”, 医用電子と生体工学, Vol. 21, No. 6, pp. 465 - 471, 1983.
- [15] 片岡佑太, 橋口哲志, 柴田史久, 木村朝子: “複合現実型視覚提示が痛覚刺激の知覚に及ぼす影響”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 19, No. 2, pp. 275 - 283, 2014.
- [16] IEC/TS 60479-1 Ed. 4.0: “Effects of current on human beings and livestock -Part 1: General aspects,” International Electrotechnical Commission, 2005.
- [17] 嶋田琢磨, 七堂利幸: “Visual Analog Scale (VAS) 運用時における独立記入方式と非独立記入方式の比較”, 鍼灸研究 Journal, Vol. 1, No. 2, 2014.