

身体メンタルモデルと身体所有感の変化が痛み知覚に与える影響 The effects of changing the mental model of one's body and sense of body ownership on pain perception

松室 美紀[†], 三浦 勇樹[‡], 柴田 史久[†], 木村 朝子[†]

Miki Matsumuro, Yuki Miura, Fumihisa Shibata, Asako Kimura

[†] 立命館大学情報理工学部, [‡] 立命館大学大学院情報理工学研究科

Ritsumeikan University, College of Information Science and Engineering, Graduate School of Information Science and Engineering

matumuro@rm.is.ritsumei.ac.jp (松室)

概要

我々は視覚的情報を用いて身体メンタルモデルを変化させ、そのような変化が痛み知覚にどのような影響を与えるかを観察した。いくつかの先行研究は、対象が自分の体の一部であるという感覚である身体所有感が痛み知覚に重要であると主張している。本研究では、Mixed Reality 技術を用い、参加者の前腕の透明度を操作し、身体メンタルモデルおよび身体所有感の痛み知覚への影響を検討した。実験の結果、前腕に感じる「実体のなさ」の増加が痛み知覚を減少させていた。

キーワード: 身体所有感, 身体表象, 痛み知覚, Multimodality, Mixed Reality (MR)

1. はじめに

我々は自身の身体表象やメンタルモデルに基づき行動を決定している [1]。身体は、姿勢や筋力、大きさなどの比較的变化しやすい特徴から、骨構造や神経メカニズム、構成要素などの変化しにくい特徴まで、様々な特徴からなる。もし、本来変化しない特徴をメンタルモデルにおいて変化させたならば、その変化に基づき我々の知覚は変化するのだろうか。本研究は、特に痛み知覚に着目し、身体メンタルモデルと知覚の関係を検討する。

1.1 身体所有感

痛み知覚に影響する感覚の1つとして、身体所有感 (sense of ownership) が挙げられる。身体所有感とは、対象を自身の身体の一部として保持している感覚を指す。実際の身体である手足等はもちろんのこと、ラバーハンドイリュージョンのように自身の身体ではないものに身体所有感を抱くことも示されている [2]。

複数の研究者が、身体所有感が低いほど痛みの閾値が高くなる、つまり、痛みを感じにくくなることを示している [3, 4, 5]。例えば、Martini, Kilteni, Maselli, and Sanchez-Vives (2015) は、仮想の前腕を透明にし熱刺激を与える実験を通し、痛みの閾値温度と身体所有感に負の相関関係があることを示している [3]。一方、身体所有感は痛み知覚に影響しないと主張する研究も存在する [6]。

1.2 身体メンタルモデル

我々は、自身の身体メンタルモデルにおける身体素材が痛み知覚に影響すると考える。例えば、もし、自身の肌が鋼鉄でできているならば、叩かれたとしても痛みを感じないだろう。Senna, Maravita, Bolognini, and Parise (2014) は、参加者の手を叩いたときのフィードバック音を、固い石を叩いたときの音にすることで、参加者に自身の手が重く、固くなったような感覚を与えた [7]。また、Martini, Pérez-Marcos, and Sanchez-Vives (2013) は、身体所有感を高めた仮想の腕の肌の色を変えるだけで熱による痛みの閾値が変化することを示した [8]。これらの研究は、身体メンタルモデルを操作して、痛み知覚を変化させることができる可能性を示す。

1.3 目的

前述の通り、身体所有感と身体メンタルモデルが痛み知覚に影響することが示されている。本研究では、Martini et al. (2015) に倣い、参加者の前腕の透明度を操作した [3]。変化する身体を観察した際の感覚と身体所有感、および、電気刺激を与えた際の痛みの程度を取得、分析することにより、痛み知覚に影響する要因を検討した。



(a) 実験の様子 (実際は左腕を使用)
(b) 参加者視点の映像

図1 実験の様子とアルファ値 50%の時に HMD に提示される映像例

2. Mixed Reality

参加者の身体所有感やメンタルモデルを操作するために、多くの先行研究では、ラバーハンドや仮想の身体を使用していた。そのような場合、実験者は事前に身体所有感を高めるための操作を行う必要があり、どれだけ精巧に作成されていても、現在の技術では実際の腕とはなり得ない。本研究では、参加者に「自身の腕が変化している」と感じさせる状況を想定している。そこで、Mixed Reality (MR) 技術を用い、仮想の腕ではなく参加者本人の前腕に操作を加え、その過程を参加者にリアルタイムで観察させた [9]。

MR 技術は、観察者に現実と仮想の世界を重ね合わせて提示することが可能な技術である。参加者自身の前腕を用いているため、参加者の腕の特徴や些細な動き等が観察している前腕にすべて反映される。参加者に自身の前腕が徐々に透明となる過程を観察させ、身体所有感、メンタルモデル、痛みの程度を取得する。

3. 装置

3.1 MR 環境

図1に実験の様子を示す。実験にはビデオ透過型ヘッドマウントディスプレイ (HMD; Canon, HM-A1) と MR プラットフォームシステム (Canon, MP-110) を用いた。HMD に搭載されたカメラから参加者視点の映像を取得し、参加者の前腕部分を抽出し、その透過度 (アルファ値) を変化させ提示した。参加者から見た前腕を図1(b)に示す。実験には次の5種類のアルファ値を用いた: 100% (完全に不透明), 75%, 50%, 25%, 1% (ほぼ透明)。透明度がわかりやすいように、背景は白と黒の縞模様とした。

3.2 電気刺激

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 (CW 回路) によって、交流電流を昇圧した直流電流に変換し、CW 回路から流れる電流を入力ボード (共有電子産業, RBIO-2U) に通してコンピュータ制御した。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。電気刺激の強度は、電圧 320V, 電流 1.8mA とし、パルス幅は 0.15 秒とする。

4. 実験

4.1 方法

4.1.1 参加者

14名の大学生、大学院生が実験に参加した。

4.1.2 指標

参加者の感じた痛みの程度は visual analog scale (VAS) を用いて測定した。左端を「痛みなし」、右端を「想像できる最大の痛み」とした 100mm の線を提示し、参加者が感じた痛みの程度に当てはまる点にバツ印を記入させた。線分の左端からバツ印の交差する位置までの長さを測定する。各参加者の痛みに対する耐性が異なるため、全ての評定値はアルファ値 100%条件 (透明度の操作なし) における評定を 1 とした際の割合に変換して用いた。

先行研究と予備実験に基づき、全 20 項目からなるメンタルモデルを評価するための質問紙を作成した。質問の内容は表1の通りである。

4.1.3 手続き

実験に先立ち、参加者に実験の内容を説明し、参加者の同意を得た。なお本実験は、立命館大学人を対象とする医学系研究倫理審査委員会による審査を通し、実施を承認されている。

実験は質問紙フェーズ、痛み評価フェーズの順で実施された。まず、質問紙フェーズでは、短い教示を受けた後、参加者は図1(a)に示されるように机に非利き手の前腕を乗せ、HMD を装着した。参加者は、加工されていない自身の前腕を観察し、その後、徐々に前腕が透明になっていく様子を観察した。変化が終了した後、そのまま約 10 秒間前腕の観察を続けた。参加者は、実験者による指示を受け、HMD を外し、質

表 1 因子分析の結果

質問項目	因子負荷				
	Ownership ¹	Transparency	Intangibility	Anxiety ²	Weakness
見ている腕が自分の腕であるように感じた	-0.932	-0.167	-0.061	0.166	0.033
見た目が自分の腕に見えなかった	0.800	0.202	-0.057	-0.132	-0.129
見ている腕が自分の腕ではないように感じた	0.736	-0.020	0.422	-0.115	-0.009
腕に存在感がなかった	0.733	0.220	0.323	-0.172	-0.049
見ている腕が現実的だと感じた	-0.723	-0.310	-0.130	0.204	-0.093
腕が半透明になったように感じた	0.244	0.932	0.237	-0.072	0.067
腕が透明に見えた	0.174	0.861	0.226	-0.094	0.105
腕が薄まったように感じた	0.338	0.739	0.339	-0.008	0.112
腕の中をモノが通り抜けそうな感じがした	0.090	0.436	0.834	-0.025	-0.055
腕が空洞になったように感じた	0.137	0.304	0.832	0.008	-0.032
幽霊になったように感じた	0.220	0.188	0.610	-0.137	-0.278
腕に力が入らないような感じがした	0.322	0.045	0.517	-0.434	-0.272
腕を見てゾッとするような恐怖を感じない	-0.069	-0.164	-0.086	0.883	0.161
腕を見ていて気分が悪くなった	0.122	0.021	0.087	-0.804	-0.118
腕を見ていて安心した	-0.250	-0.169	-0.249	0.735	0.234
腕を見ていて落ち着くことができた	-0.185	0.122	0.189	0.390	-0.054
腕が柔らかくなったように感じた	0.062	0.056	-0.095	0.064	0.900
腕に力が入らないような感じがした	0.126	0.115	-0.110	0.055	0.800
腕が軽くなったように感じた	-0.209	-0.023	0.053	0.093	0.509
腕の感覚が鈍くなったように感じた	-0.058	0.102	-0.264	0.232	0.480

¹ [所有感のなさ (less ownership)] への負荷を示しているため、得点を反転させて用いた。

² [不安のなさ (less anxiety)] への負荷を示しているため、得点を反転させて用いた。

問紙に 7 件法で回答した。同様の手続きを全ての透明度において行った。

痛み評価フェーズでも、変化後の前腕を観察するまでの手続きは同様であった。参加者は、そのまま HMD を外すことなく、実験者の合図とともに電気刺激を与えられた。刺激の提示を受けた後すぐに HMD を外し、痛みの程度を記入した。同様の手続きを全ての透明度において行った。各試行、フェーズ間では 2 分以上の十分な休憩が取られた。

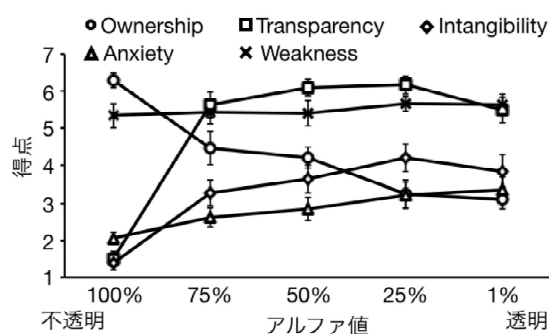


図 2 各条件における各因子の平均点

4.2 結果

痛みの評価が平均から 3SD 以上離れていた 1 名の参加者を分析から除外した。

質問紙の回答を用い、主因子法・バリマックス回転を用い因子分析を行った結果、以下の 5 因子が抽出された。回転後の因子負荷を表 1 に示す。

- Ownership (身体所有感):
観察した腕が自身の腕であるという感覚
- Transparency (透明感):
自身の腕が透明になった感覚

- Intangibility (実体のなさ):
自身の腕が実体を持たないものになった感覚
- Anxiety (不安):
自身の腕を観察することにより感じた不安感
- Weakness (弱々しさ):
自身の腕が弱くなった感覚

各因子の得点は手の透明度の操作により図 2 のように変化する。各因子得点に対する分散分析の結果、weakness を除く全ての因子で透明度の操作の主効果

表 2 各因子の得点間および痛みの知覚との相関

	Ownership	Transparency	Intangibility	Anxiety	Weakness
Ownership					
Transparency	-0.528 ****				
Intangibility	-0.467 ****	0.634 ****			
Anxiety	-0.471 ****	0.166	0.377 **		
Weakness	0.090	0.124	-0.295 *	-0.274 *	
Pain	0.195	-0.357 **	-0.305 *	-0.183	0.072

+ $p < .01$, * $p < .05$, ** $p < .01$, *** $p < .005$, **** $p < .001$

が有意であった (ownership $F(12, 48) = 23.182, p < .001$; transparency $F(12, 48) = 64.927, p < .001$; Intangibility $F(12, 48) = 25.860, p < .001$; anxiety $F(12, 48) = 6.716, p < .001$). Ownership に関しては, 1%と 25%, 50%と 75%を除く全ての組み合わせにおいて得点の差が有意であった ($ps < .05$). アルファ値が 100%の時の transparency の得点は, 他の全ての透明度の条件における得点より有意に小さかった ($ps < .001$). Intangibility 得点に関しては, 100%条件と他の全ての条件, そして, 25%と 75%条件の間の得点の差異が有意であった ($ps < .005$). Anxiety 得点では, 100%条件の得点が 75%条件を除く全ての条件の得点より有意に小さかった ($ps < .01$).

身体所有感, 身体のメンタルモデルと痛みの知覚の関係を検討するため, 相関分析を行った. 各組の相関係数を表 2 に示す. ただし, 1%条件は分析から除外した. 参加者より, 1%条件の際には, 前腕が見えなかった, なくなったように見えたという意見を得たためである. 前腕が見えていない場合は, analgesic effect により, 透明であるが見えている場合とは痛みの知覚の性質が異なると考えられる. 痛みの程度との相関に着目すると, transparency と intangibility の得点は有意な負の相関があった一方, ownership 得点と痛み得点の相関は有意ではなかった.

5. 考察

本研究は視覚的な変化により自身の身体のメンタルモデルを変化させることが可能か, また, 変化したメンタルモデルや身体所有感とは痛みの知覚にどのように影響するかを検討することを目的とした. MR 技術を用い, 参加者自身の前腕の透明度を変化させることにより, 参加者は身体所有感とともに身体のメンタルモデルの様々な側面を変化させた (図 2). そのうち, 痛みの知覚と相関した側面は自身の腕が透明になったという感覚と自身の腕が実体のないものになった感覚の 2 つであった.

5.1 身体所有感

多くの先行研究 [3, 4, 5] で示されている身体所有感と痛み知覚の相関は有意ではなかった. 身体のメンタルモデルの操作にアバタを挟まなかったことがこの違いに関係すると考えられる. 本研究では MR 技術を用い, 参加者自身の前腕を操作した, いわば変身体験である. そのため, 呼吸によるブレや脈拍などの非常に小さな動きであっても, 観察している前腕に正確に反映される. そのような条件下での身体所有感の低下は, 「まるで自分の腕ではないようだ」という, 実際には自身の腕であることを前提とした感覚である. 身体所有感の高低に関わらず, 前腕は自身のものであるため, 身体所有感の痛みの知覚への影響が小さかったと考えられる.

一方で, 先行研究のように仮想の身体を使用する場合, 身体所有感の低下は, 触覚等を利用し高めた身体所有感が減少した [4], または, 身体所有感が十分に上昇しなかった [3, 5] ことを意味する. この場合, 身体所有感が低いということは, 操作や刺激を加えられた前腕はもはや自身のものであるとは捉えられていない. そのため, 先行研究では身体所有感の影響が大きかったと考えられる.

プロジェクション科学の観点から考えると, 本研究は自身の身体表象を自身の身体に投射しているという点で投射にあたり, 先行研究は自身の身体表象をアバタに投射しているという点で異投射に当たる [10]. 今後, 統制された状況でアバタの介在の有無による差異を検討することは, それらの投射の差異を明らかにすることにつながるだろう.

5.2 身体のメンタルモデル

本研究では, 透明度の操作された前腕を観察した際の様々な感覚を取得することにより, 身体のメンタルモデルの変化を調べた. その結果, 自身の腕が透明に

なったという感覚と自身の腕が実体のないものになった感覚が増加するほど痛みの知覚が軽減された。これは知覚へのトップダウン効果により説明される [8, 11]。透明で実体のないもの、例えば、幽霊や空気のようなものは、電気が影響しない、または、痛みを感じないと信じられている。参加者自身がそのようなものになったと感じたため、痛み知覚が軽減されたと考えられる。

本研究の結果は、身体のメンタルモデルを操作することにより、変化したメンタルモデルに沿った知覚の変化が生じる可能性を示す。このトップダウン効果を利用すれば、例えば、身体が固く強い物質に変化したように見せることにより、打撃の痛みが減少する可能性もある。加えて、受動的な知覚のみではなく、能動的な行動、例えば力を強くすることができる可能性も存在し、様々な分野への利用が可能であると考えられる。

文献

- [1] Warren, W. H., (1984) "Perceiving affordances: Visual guidance of stair climbing" *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, Vol. 10, No. 5, pp. 683-703.
- [2] Botvinick, M. & Cohen, J., (1998) "Rubber hands 'feel' touch that eyes see" *Nature*, Vol. 391, No. 6669, p. 756.
- [3] Martini, M., Pérez-Marcos, D., & Sanchez-Vives, M. V., (2014) "Modulation of pain threshold by virtual body ownership" *European Journal of Pain*, Vol. 18, No. 7, pp. 1040-1048.
- [4] Martini, M., Kilteni, K., Maselli, A., & Sanchez-Vives, M. V., (2015) "The body fades away: investigating the effects of transparency of an embodied virtual body on pain threshold and body ownership" *Scientific Reports*, Vol. 5, p. 13948.
- [5] Zanini, A., Montalti, M., Caola, B., Leadbetter, A., & Martini, M., (2017) "Pain during illusory own arm movement: A study in immersive virtual reality" *European Medical Journal*, Vol. 2, No. 2, pp. 90-97.
- [6] Mohan, R., Jensen, K. B., Petkova, V. I., Dey, A., Barnsley, N., Ingvar, M., McAuley, J. H., Moseley, G. L., & Ehrsson, H. H., (2012) "No pain relief with the rubber hand illusion" *PloS one*, Vol. 7, No. 12, p. e52400.
- [7] Senna, I., Maravita, A., Bolognini, N., & Parise, C. V., (2014) "The marble-hand illusion" *PloS one*, Vol. 9, No. 3, p. e91688.
- [8] Martini, M., Pérez-Marcos, D., & Sanchez-Vives, M. V., (2013) "What color is my arm? Changes in skin color of an embodied virtual arm modulates pain threshold" *Frontiers in Human Neuroscience*, Vol. 7, p. 438.
- [9] Kannape, O. A., Smith, E. J. T., Moseley, P., Roy, M. P., & Lenggenhager, B., (2019) "Experimentally induced limb-disownership in mixed reality" *Neuropsychologia*, Vol. 124, pp. 161-170.
- [10] 鈴木宏昭, (2018) "プロジェクション科学の目指すもの" *認知科学*, Vol. 26, No. 1, pp. 52-71.
- [11] Gregory, R. L., (1997) "Knowledge in perception and illusion" *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, Vol. 352, No. 1358, pp. 1121-1127.