

仮想空間における上肢伸長感覚の誘発要因の分析

SUN HONG^{†1} 柴田史久^{†1} 木村朝子^{†1}

概要：安価なヘッドマウントディスプレイ (Head mounted display; HMD) の登場に伴い、人工現実感 (Virtual Reality; VR) はより身近なものとなってきた。VR 技術に関する研究の中で、最近身体拡張の研究が注目を集めている。本研究では仮想空間において腕を伸ばす行為に着目した。この腕を伸ばすという行為によって、仮想空間内において移動せずに遠くのもの进行操作するといった様々な動作を行うことが可能になると考えられる。一方で、仮想空間において腕が伸びたと感じる要因 (視覚刺激, 触覚刺激, 自己所有感) については不明瞭である。そこで本稿では、この上肢伸長感覚 (腕が伸びる感覚) に着目し、実験を通して上肢伸長感覚が発生する要因の確認と分析を行った。

キーワード：HMD, 人工現実感, 身体拡張, 上肢伸長感覚

1. はじめに

安価なヘッドマウントディスプレイ (Head mounted display; HMD) の登場により、人工現実感 (Virtual Reality; VR) 技術はより身近なものとなってきた。VR 技術を活用することで、現実世界をコンピュータの中で疑似的に再現したり、現実では不可能な動作や演出を表現することもできる。現在、VR 技術を活用した研究が多く存在するが、その中でも人間の認知の範囲を拡張する身体拡張に関する研究が活発化してきている。

身体拡張技術は、これまでも様々な身体部位に関する研究が行われてきた[1,2]。その中でも、今回私たちは、腕 (上肢) に着目した。上田らは、ユーザの腕や手を壁面に投影することで、壁面に投影されたユーザから離れた対象物体を直観的に操作することができるシステムを提案している[3]。このように、身体拡張技術を利用することで、仮想空間において腕を伸ばして遠くのもの进行操作するといった多彩なインタラクションを行うことが可能となると考えられる。もし、このとき実際に自身の腕が伸びたような身体感覚が得られれば、インタラクションそのものがより自然で現実感のあるものとなると考えられる。本論文では、この実際に自身の腕が伸びたような身体感覚を「上肢伸長感覚」と呼ぶこととする (図 1)。

しかしながら、仮想空間において腕が伸びたと感じる要因については不明瞭である。そこで本稿では、この上肢伸長感覚に着目し、実験を通して上肢伸長感覚が発生する要因 (視覚刺激, 触覚刺激, 自己所有感) の確認と分析を行った。



図 1 仮想空間での上肢伸長 (イメージ)

Figure 1 Extension of virtual arm.

2. 関連研究

VR 技術を利用することで、身体 (特に腕や手) を拡張する研究が多く行われている。

仮想の指を伸ばす研究として、小川らは仮想の手の指を伸縮させながらピアノを演奏することができるシステム“えくす手”を開発した[5]。この研究ではピアノを弾く動作を行うと同時に伸縮した指でピアノを弾く映像を提示することより錯覚が発生し、体験者の手が変形したような感覚を与えることができる。また、森ら[6]は、HMD を通して指が伸縮する映像を提示すると同時に指に触覚刺激を与えることで指が伸縮する感覚を発生させられることを確認した。

仮想の腕を伸ばす研究も数多く行われている。曾我部ら[8]は仮想空間において腕の伸縮感覚を誘発する研究を行った。この研究では、ぶら下がりにより体験者の手首にかかる負荷の変化、つまり腕の筋肉の伸縮感覚を視覚提示とリンクさせることにより、腕が伸縮する感覚を与えることを実現した。

また、伸長させた身体に対する身体所有感に関する研究も多数行われている。Roger ら[7]は伸長させた仮想の指を切断するといった表現を行うことで、伸長させた指の自己所有感を確認している。Konstantina ら[9]も同じように、体験者の伸長した腕のモデルが切断された際に、体験者が驚愕反応を示したことで、伸長した腕に対する自己所有感を確認した。

^{†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

このように、上肢伸長感覚に関する研究や伸長した腕に対する自己所有感に関する研究は多数存在するが、腕を自由に動かせる状態での上肢伸長感覚に関する研究は見られない。

そこで本研究では、前腕を自由に動かせる状態での上肢伸長感覚や伸長した腕に対する自己所有感について調査を行う。

3. 実験準備

3.1 実験環境

実験で用いるシステム構成を図 2 に示す。VR 映像の提

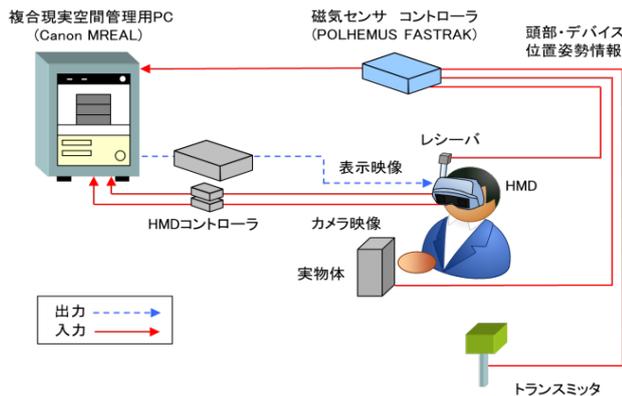


図 2 システム構成

Figure 2 System configuration.



図 3 VR 空間の部屋

Figure 3 Virtual Room in VR space.

示には、ビデオシースルー型 HMD (Canon, HM-A1) および MR Platform System を用いている。今回は、現実世界の体験者の腕の映像を仮想世界に反映させることができるように、敢えてビデオシースルー型の HMD を利用した。また、被験者の頭部、及び腕の位置姿勢情報を磁気センサ (POLHEMUS, 3SPACE FASTRAK) によって取得することで、実世界座標系と仮想世界座標系を整合させ、腕の動きを検出している。

また、本研究で利用した仮想の部屋のモデルは、図 3 に示す通りで、サイズは W13.2m×D8.3m×H2.5m である。

3.2 仮想上肢の伸び率

仮想の腕は、現実の腕を完全に伸ばした状態から 40cm 曲げた状態を基準とし、基準からの腕の伸びに比例して、一定比率 (伸び率) となるように伸長させる (図 4)。ここでは、仮想の腕の伸び率を以下の式で定義する。

$$\text{伸び率} = \frac{\text{仮想の腕が伸びる長さ}}{\text{実際の手の移動距離}} \quad \text{式(1)}$$

4. 予備実験 1：上肢の外観が自己所有感に与える影響の確認

4.1 実験目的と方法

上肢伸長感覚を発生させるには、仮想空間に提示される仮想の腕に対する自己所有感が必須である。予備実験 1 では、仮想空間における腕の表現方法を変えることで、自己所有感が変化するかを確認する。

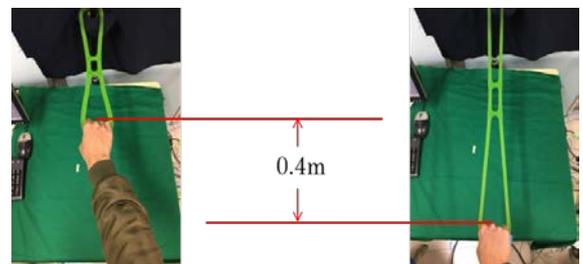
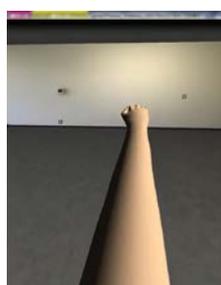
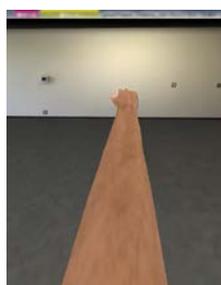


図 4 腕の移動距離

Figure 4 Moving distance of arm.



(a) 腕のモデル
(テクスチャなし)



(b) 体験者の腕のテクスチャ
を腕のモデルに貼付



(c) 体験者の腕の画像そのものを
引き伸ばしたもの

図 5 予備実験 1 で提示した仮想の腕の表現

Figure 5 Virtual arm expression used in preliminary experiment 1.

表 1 予備実験 1 の結果

Table 1 Result of preliminary experiment 1.

	自己所有感 (人)		
	○	△	×
腕のモデル (テクスチャ無し)	0	1	8
腕のモデル (実験協力者の腕のテクスチャ)	0	1	8
実験協力者の腕の映像	9	0	0

○：感じる，△：どちらとも言えない，×：感じない



図 6 実世界の背景
 Figure 6 Background of real world.



図 7 ゴムチューブ
 Figure 7 Rubber tube.



(a) 実物体を押すときの反力
 (b)



(b) 弾力のある実物体で腕が引っ張られる感覚 1



(c) 弾力のある実物体で腕が引っ張られる感覚 2

図 8 予備実験 2 で提示した力覚刺激

Figure 8 Reaction force stimulus used in preliminary experiment 2.

実験で提示した腕の表現方法は図 5 に示す 3 種類である。図 5 (a) はモデリングソフトを利用して作製した腕のモデル，図 5 (b) は腕のモデルに体験者自身の腕の画像をテクスチャとして貼り付けた表現，図 5 (c) は被験者の腕そのままの映像を仮想空間に表示 (Augmented Virtuality) する表現である。被験者の腕を仮想空間に取り込むためには，HMD から得られる体験者視点画像から腕領域のみを抽出する必要がある。今回は実背景に紺色の布を配置し (図 6)，色情報をもとに腕部分を抽出した。

被験者は 20 代の男性 8 名，女性 1 名で，仮想の腕の伸び率は実際の腕の伸びの 25 倍とした。予備実験の手順は以下の通りである。

- (1) 3 種類の表現方法からランダムに一つ選択する
- (2) 腕の曲げ伸ばしに合わせて，(a) で選択した仮想の腕を伸長させる
- (3) 自己所有感の有無を回答させる
- (4) 3 種類全ての視覚表現で(1) ~ (3)を行う

4.2 結果と考察

予備実験 1 の結果を表 1 に示す。体験者の腕の画像そのものを画像処理で引き伸ばしたものを提示した際に，自己所有感が最も高くなることが示唆される。テクスチャなしの腕のモデルと体験者の腕のテクスチャを腕のモデルに貼付したものと自己所有感の差は確認されず，いず

れも自己所有感は得られなかった。体験者からは，体験者の腕の画像そのものを提示した場合に「自分の腕の特徴があったため，自己所有感があった」というコメントが得られた。以上のことから，腕や手の形が被験者自身のものと感じられる方が，自己所有感が増すと考えられ，被験者の腕を画像処理で引き伸ばした場合，被験者自身の腕をそのまま提示しているため，自己所有感が高くなったのではないかと考えられる。

5. 予備実験 2：力覚刺激が上肢伸長感覚に与える影響の確認

5.1 実験目的と方法

森ら [6] によれば，上肢伸長感覚を表現するためには何らかの触覚刺激を与える必要がある。そこで，予備実験 2 ではどのような力覚刺激を付与することで上肢伸長感覚が発生する，またはしやすくなるのかを確認する。

実験で提示した力覚刺激は図 8 に示す 3 種類である。具体的には，図 8 (a) は実物体を押すときの反力，図 8 (b), (c) は弾力のある実物体で腕が引っ張られる感覚である。図 8 (a) の実物体は段ボール箱を使用し，弾力のある実物体には市販のトレーニング用ゴムチューブ (ALINCO マルチチューブ・ミディアム) (図 7) を利用した。

図 8 (a) の実物体を押す触感では，腕を伸ばす際に箱を押させることで反力を提示した。図 8 (b) では，体験者と

表 2 予備実験 2 の結果
 Table 2 Result of preliminary experiment 2.

	伸びた感覚 (人)		
	○	△	×
実物体を押す	0	3	2
腕が引っ張られる 1	3	1	1
腕が引っ張られる 2	3	2	0

○：感じる，△：どちらとも言えない，×：感じない

実験者がゴムチューブの両端を把持し，それを実験者が引っ張ることで，体験者の腕が前方に引っ張られる感覚を提示した．図 8 (c) では，机に固定されたゴムを被験者が引っ張っておき，その状態から腕を伸ばすことで，ゴムの弾性力により腕が引っ張られる感覚を提示した．また，予備実験 1 の結果を踏まえ，提示する視覚刺激には，予備実験 1 で評価の高かった実際の腕を使用した．

被験者と仮想の腕の伸び率は予備実験 1 と同じで，実験手順は以下の通りである．

- (1) 3 種類の力覚刺激からランダムに一つ選択する
- (2) 仮想の腕を伸長させるときに選択した力覚刺激を提示
- (3) 上肢伸長感覚の有無を回答させる
- (4) 3 種類の力覚刺激全てで，(1)～(3)を行う．

5.2 結果と考察

実験結果を表 2 に示す．表より，腕が引っ張られる感覚を提示した場合の方が，腕が伸びた感覚を得られること，引っ張り方はいずれの方法でもよいことが分かる．また，被験者から「ゴムの縮んでいく力と伸びる感覚が合っている」というコメントがあったことから，弾性のない紐ではなくゴムチューブを利用したことで，ゴムチューブの弾性力の変化が仮想空間の腕が伸びていく感覚と同期し，腕が伸びる感覚を増強したのではないかと考えられる．

6. 実験 1：上肢伸長感覚をより誘発させる仮想腕の伸びの率調査

6.1 実験目的と方法

本実験では，仮想空間内での腕の伸び率が上肢伸長感覚に及ぼす影響を分析し，上肢伸長感覚を効果的に与えることができる伸び率を確認する．

実験では，5 倍 (2m)，10 倍 (4m)，15 倍 (6m)，20 倍 (8m)，25 倍 (10m)，30 倍 (12m) の 6 通りの伸び率を採用した．括弧内は仮想空間内での伸長後の腕の長さを表している．これら 6 種類の伸び率を適応させた場合について，サーストンの一対比較法を用いて比較した．疲労による影響をなくするため 3 試行毎に約 90 秒程度の休憩を入れた．被験者は 20 代の男性 9 名，女性 1 名で，実験手順は以下の通りである．

- (1) 6 種類の伸び率からランダムに 2 種類を選択
- (2) それぞれの伸び率を用いて仮想の腕を伸長させる
- (3) どちらがより強く上肢伸長感覚を得られたかを回答させる
- (4) 6 種類すべてのパターンの組み合わせ全 15 試行に対し (1)～(3)を行う

6.2 結果と考察

実験から得られた結果を図 9 に示す．図より伸び率が 20 倍の場合に最も上肢伸長感覚が強いことがわかる．また，5 倍と 10 倍の 2 種類とその他 4 種類の伸び率との間に有意差を確認した．20 倍と比較して，25 倍や 30 倍の上肢伸長感覚が低かった理由としては，「長く伸びるほど自分の腕の先が見えにくくなり，腕が自分のものでない感じがした」といったコメントから，自己所有感が減少したためではないかと考えられる．

7. 実験 2：上肢伸長感覚により知覚された上肢伸長距離の計測

7.1 実験目的と方法

実験 2 では，仮想の腕とゴムチューブによる力覚提示により，被験者が知覚した手の先端の位置と実際の手の位置の差を計測することで，被験者がどの程度自身の腕が伸びたと感じているのかを分析する．

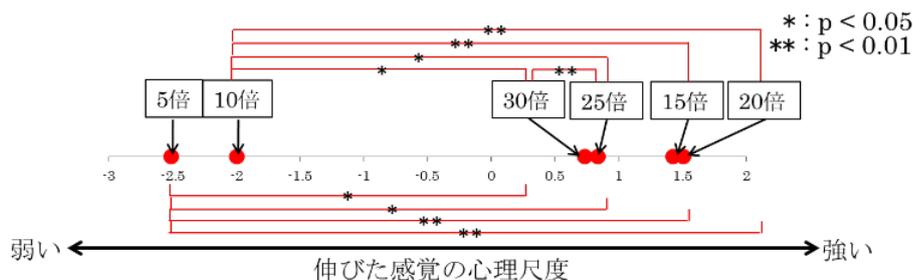


図 9 実験 1 の結果
 Figure 9 Result of experiment 1.



図 10 左手の腕置きと分度器

Figure 10 Experimental setup using protractor.



図 11 実験 2 の体験風景

Figure 11 Scene form experiment 2.

実験 1 の結果より、25 倍と 30 倍の間、15 倍と 20 倍の間にあまり差が見られないことがわかる。そこで、これらの伸び率の間にどの程度の差があるかを調べるため、この 4 種類の伸び率を用いて実験を行う。また、体験者が知覚した腕の先の位置と実際の腕の先の位置との差の計測には小川ら[5]と同様の手法を用いた。具体的には、図 10 に示す分度器を図 11 の左手の位置に配置し、被験者が知覚した手の先端の位置を反対側の手で指さしさせる。この指差した角度を計測することで、三角測量の原理により、被験者が知覚した手の先端の位置を計算するという方法である。

仮想の腕の表現方法と力覚刺激は実験 1 と同じである。被験者は 20 代の男性 7 名で、実験手順は以下の通りである。

- (1) 左手人差し指を分度器の 90 度の位置に置く
- (2) 4 種類の伸び率からランダムに一つ選択する
- (3) 選択した伸び率で仮想の腕を 3 回伸長させる
- (4) 右手の指先があると感じている位置を左手で指し示させる
- (5) 人差し指の角度を計測、指差した位置を計算
- (6) 4 種類全ての伸び率で(1)～(4)を行う

7.2 結果と考察

本実験の結果を図 12 に示す。グラフから実験 1 の結果と同様に 20 倍 (8m) の時に最も上肢伸長感覚を得ていることが分かり、1.2m 以上腕が伸びたと感じていることが分かる。その他の伸び率においても約 1m 弱程度腕が伸びた感覚が発生していることがわかった。

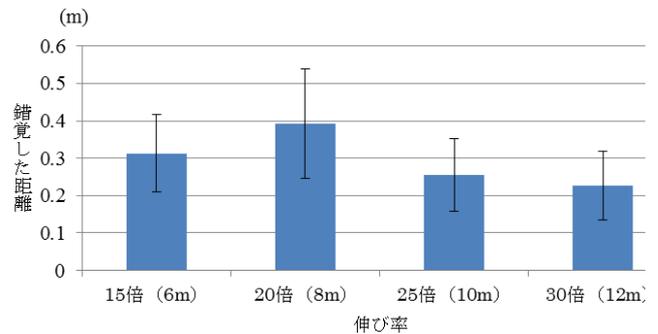


図 12 実験 2 の結果

Figure 12 Result of experiment 2.

8. むすび

本研究では、仮想空間での上肢伸長感覚（腕が伸びる感覚）に着目し、仮想空間内で伸びた腕を提示する際、どのような視覚刺激、または力覚刺激を提示した際に上肢伸長感覚を与えることが可能か実験を通して確認・分析した。その結果、以下のことがわかった。

- (1) 仮想の腕を提示する際、ユーザ自身の腕の映像を用いることで自己所有感が増し、上肢伸長感覚が強くなる
- (2) 腕を伸長させる際、ゴムのような弾性力を持つもので牽引する力覚の提示を行うことで上肢伸長感覚が強くなる
- (3) 腕の伸長率が大きすぎると自己所有感を失うため、伸び率は実際に腕を伸ばした距離の 15～20 倍が効果的
今後の展望としては、ゴムの弾性力による上肢伸長感覚への影響の確認、上肢伸長感覚に影響を与えると思われる新たな要素の検討などを計画している。

謝辞

実験に協力された牧田麗矢氏に感謝する。本研究の一部は、科研費・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] Dhruv Jain, Misha Sra, Jingru Guo, Rodrigo Marques, Raymond Wu, Justin Chiu and Chris Schmandt: "Immersive Scuba Diving Simulator Using Virtual Reality," In Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology, pp. 729-739, 2016.
- [2] 早川裕彦, サライジム・ハマドヤメン, フェルナンド・チャリス, 南澤孝太, 舘暉: テレイグジスタンスの研究(第 87 報)―空中における身体拡張感のための飛行型テレイグジスタンスシステムの提案―, 第 21 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 14E-04, 2016.
- [3] 上田雄太, 浅井唯貴, 榎本龍一, 新明拓也, 武村紀子, 岩井大輔, 佐藤宏介: タブレット駆動型身体拡張インタフェース～スタンドアローン型 ExtendedHand～, インタラクシオン 2016, pp. 1004-1009, 2016.
- [4] Matthew Botvinick and Jonathan Cohen; "Rubber hands 'feel'

touch that eyes see,” *Nature*, 391.6669, p. 756, 1998.

- [5] 小川奈美, 伴祐樹, 櫻井翔, 鳴海拓志, 谷川智洋, 廣瀬通孝: えくす手: 変調バーチャルハンドへの即応的な身体所有感の生起による身体拡張システム, *インタラクション* 2016, pp. 1022-1027, 2016.
- [6] 森光洋, 小鷹研理: 自己接触錯覚の原理を用いた指が伸縮する感覚を誘発する装置の考案(第二報), *インタラクション* 2016, pp. 211-213, 2016.
- [7] Roger Newport and Catherine Preston: “Pulling the finger off disrupts agency, embodiment and peripersonal space,” *Perception*, 39.9, pp. 1296-1298, 2010.
- [8] 曾我部愛子, 森光洋, 小鷹研理: ぶらさがりによる自重変化を利用した腕が伸縮する感覚の誘発, *インタラクション* 2016, pp. 478-480, 2016.
- [9] Konstantina Kilteni, Jean-Marie Normand, Maria V. Sanchez-Vives and Mel Slater: “Extending body space in immersive virtual reality, A very long arm illusion,” *PLoS ONE*, 7.7, pp. 1–15, 2012.