



# バーチャルリアリティにおける身体図式キャリブレーション ～収縮方向に関する基礎特性の評価～

望月典樹<sup>1)</sup>, 鈴木涼<sup>1)</sup>, 大山英明<sup>2)</sup>, 中村壮亮<sup>3)</sup>

1) 法政大学大学院 理工学研究科 (〒 184-8584 東京都小金井市梶野町 3-7-2, hge@hosei.ac.jp)

2) 国立研究開発法人産業技術総合研究所 (〒 305-8568 茨城県つくば市梅園 1-1-1, eimei.oyama@aist.go.jp)

3) 法政大学 理工学部 (〒 184-8584 東京都小金井市梶野町 3-7-2, hge@hosei.ac.jp)

**概要:** 没入型 VR システムでは, 仮想身体の形状が実身体と異なるとその操作性が低下する. これに対して著者らは, その原因が身体定位を実現する脳内モデルである身体図式の乖離にあると仮定し, これを実身体から仮想身体の形状に変更する手法を提案してきた. しかし先行研究における身体図式の変更は, 身体形状を伸長させる方向に限定されていた. そこで本論文では, 身体形状を収縮させる方向に関して腕部での特性を新たに導出した.

**キーワード:** 身体図式, 仮想身体操作, Virtual Hand Illusion, テレイグジスタンス

## 1. はじめに

コンピュータで生成した情報を現実であるかのように感じさせる VR (Virtual Reality) の技術領域では, 人間への情報提示に関する方法論という観点でみると, 知覚や認知などの脳機能を踏まえた検討が不可欠であり, 人間を含めたシステムという位置付けで研究が行われている. 一般に VR システムでは, 感覚情報の提示とユーザ情報の取得が並列かつ同時に行われる必要がある. これらの実現によりユーザは, 仮想空間内の身体 (以降, 仮想身体) を操作することで, 仮想空間とインタラクションすることが可能になる. また近い将来の実現が期待される完全没入型の VR システムでは, 仮想空間で扱われる情報が実空間と同程度となり, 仮想身体をあたかも自分の身体のように扱うことが可能になると予想される.

### 1.1 仮想身体操作における問題とその原因

VR の特徴として, 実空間に存在しない物体を生成することや, 起こり得ない状況を意図的に発生させられるといった利点がある. これは仮想身体に対しても例外ではなく, 例えば自身と寸法が異なるアバターやテレプレゼンス用の遠隔ロボットなど, 操作対象の物理特性を容易に変更することができる. この利点を活かすことで, エンタテインメントやコミュニケーションツールといった一般的な用途から, 遠隔ロボットによる災害支援や医療などの特殊用途にまで応用が期待されている. しかしながら, ユーザが実身体と形状の異なる仮想身体を操作する場合, その操作性が低下し, 意図した動作が実現できなくなるといった問題が報告されている [1].

これに対するアプローチとして, 遠隔ロボットを操作する場面においては, 実身体とロボットのサイズ感が同等になるよう視野角と眼間距離を調整するスケーリングと呼ばれる手法 [2] や, 仮想身体を遠隔ロボットの形状とせず実身体と同様のものとし, その身体での動作結果を変換器にかけロボットの動作を決定するという, 拡張テレプレゼンスを用いた手法 [3] が考えられる. しかし, スケーリングについては実身体と仮想身体が非相似系で異なる場合に身体の一部しか整合させることができないという欠点があり, 拡張テレプレゼンスでは, 実身体の動作と遠隔ロボットの動作の対応関係を網羅する必要があるという点で実用的でないという問題がある.

そこで著者らは, 操作性低下の根本的な原因が身体図式の乖離にあると考え, 実身体に適合している身体図式を仮想身体のものへと変更する “身体図式キャリブレーション” という概念について研究を進めてきた [4][5][6].

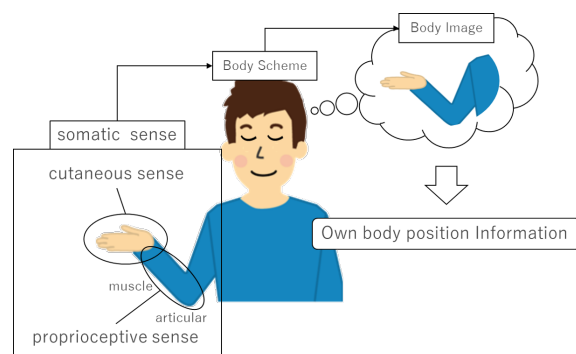


図 1: Body image recalled through body schema in the brain from somatosensory inputs.

Noriki MOCHIZUKI, Ryo SUZUKI, Eimei OYAMA, and Sousuke NAKAMURA

表 1: Feature of each method for changing of body scheme.

	Occurrence Condition	Learning Time	Accuracy	Precision	Target
Growth of body / Loss of body	× <i>Naturally</i>	× <i>Long</i>	○ <i>High</i>	○ <i>High</i>	○ <i>Own body</i>
Tool-use		○ <i>Short</i>			× <i>Other object</i>
Auditory illusion	○ <i>Actively</i>		× <i>Low</i>	× <i>Low</i>	○ <i>Own body</i>
<b>Proposed method</b>			△ <i>Middle</i>	○ <i>High</i>	

## 1.2 身体図式の変更による仮想身体の操作性向上の展望

身体図式は、視覚や体性感覚などの感覚入力により、身体の状態に関する情報（形状、寸法、位置姿勢など）を出力する脳機能であり、これが意識に上ったものは身体像と呼ばれる。図 1 に示すように、身体図式に基づき皮膚感覚や固有受容感覚などの体性感覚入力から身体像が想起されるため、視覚入力を断っても身体各部の位置姿勢を把握することができる [7]。なお身体図式は、行為に伴う感覚情報の脳内統合を通して学習・構築される。

ここで、実身体と形状の異なる仮想身体を操作する場合、実身体と身体図式を転用出来ないことが仮想身体操作性低下を招くと考えられる。これは、仮想身体と実身体とを切り離して別物として認識している状況である。従って、何らかの方法で、仮想身体に適合するように身体図式を変更できれば、仮想身体をあたかも自分の身体であるように操作できることとなり、操作性の向上が期待できる。

## 1.3 身体図式の変更事例と先行研究

身体図式は、視認した自己身体映像が身体像の教師信号として体性感覚と紐づけられることで学習されると考えられている [8][9][10]。学習によって身体図式が変化する例には、自然発生的なもので身体の成長 [11] や欠損 [12]、能動的なもので音による錯覚 [13] があり、さらに道具使用時に自己身体外に延長されるといった報告もある [8][14]。しかし、これらの研究報告は何れも現象確認に留まっているため、仮想身体に対して身体図式を適合させる方法として、VR システムに身体図式を変更する機能を実装するためには、実用を意識した検討が必要となってくる。特に上記用途では、自己身体に関する身体図式の変更が能動的、短時間、高精度、高精度に実現可能であることが求められる。

そこで著者らは、身体寸法の変化を無意識的に知覚させる VR 情報を視覚提示した状態において、仮想物体に触れる運動を行わせることにより、寸法変更後の身体と体性感覚との紐づけを促進させて身体図式を変更するという手法を提案し、その有効性を示してきた [4][5][6]。著者らがこれまでに提案した手法の位置付けを表 1 に示す。

## 1.4 本論文の目的

先行研究では、身体図式キャリブレーションに関して、身体寸法を伸長する方向における検討を進めてきたが、収縮方向についての知見は現時点で得られていない。そこで本論文では、身体寸法を収縮する方向への身体図式の変更について基礎検討を行う。

## 2. 収縮方向への身体図式変更とその評価方法

### 2.1 身体図式の変更手法

まず身体図式は、身体像の教師信号を体性感覚と意識的に紐づけることで学習されるため、運動実行による体性感覚入力が第一に必要となる。また学習時間を短くするためには、視覚情報の遮断により体性感覚に基づく身体像を意識させることが有効である。一方で、視覚情報を常時遮断した場合、教師信号に正確な身体映像を利用できなくなり、身体図式の精度が低下してしまう。そこで著者らは、以下の二つの学習過程を含むハイブリッド学習手法を考案した。なおこの際、身体図式を変更する対象は右前腕とした。

- 変更目標の身体像に合致した身体映像が視覚提示された状態で運動を行う学習過程
- 身体映像は遮断した状態で、変更目標の身体像に合致した指先位置のみを間接的に視覚提示し、そこから想起される身体映像を教師信号として、体性感覚主導の学習を行う過程

上記 2 要件を満たすフローは図 2 の通りである。まず、実空間と仮想空間の双方に存在する MR (Mixed Reality) スティックを実身体と仮想身体の右腕に接触させ、視覚同期刺激を提示して仮想身体に対する自己所有感を高める (Virtual Hand Illusion[15] を誘発させる)。次に、ランダムで出現する仮想スイッチを仮想身体の手先で押す動作 (以降、スイッチングタスク) を繰り返す。この時、変更目標を実身体に対する比率 (以降、提示寸法比) で設定し、その提示寸法比になるまで、仮想スイッチの押下回数に従って、仮想身体の手先を首から肘の方向に徐々に収縮させていく。また一定間隔で仮想身体を視覚提示しない状態でのスイッチングを行わせる。なお成功失敗の判定は仮想スイッチの変形と移動によって視認可能とする。そして、目標とする身体像に合致した仮想身体を提示した状態での学習機会を十分に確保するために、目標到達後も一定回数のスイッチングを行わせる。

### 2.2 身体図式変更の評価方法

身体図式は脳内モデルであるため、出力された身体位置姿勢情報を直接測定するのは困難である。そこで体性感覚入力に伴い身体図式から出力される身体位置姿勢情報が確実に利用される動作において、その位置関係から間接的に身体図式の変化を捉える。具体的には、身体映像を視覚遮

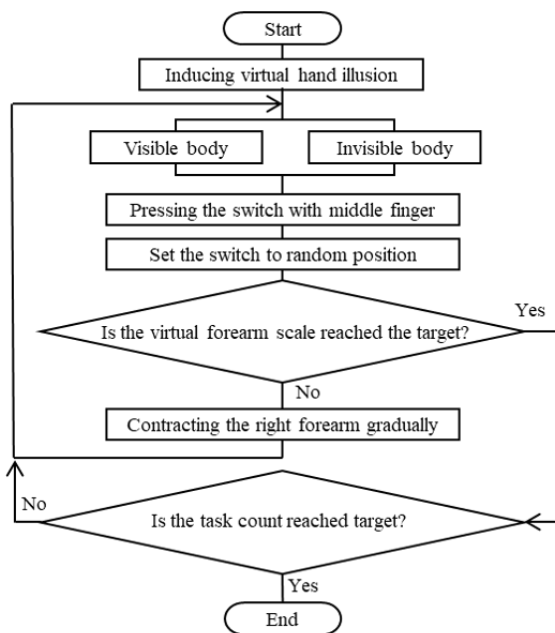


図2: The flow of changing of body schema.

断した状態で、仮想空間に設置した視認可能な目標位置へ指先を一致させるタスク（以降、ポインティングタスク）を設ける。このタスクをスイッチングタスクの前後に実施することで、指先位置の関係から身体図式の変化を推定することが可能である。本論文ではスイッチングタスク前に測定した指先位置をポインティング位置  $A$ 、スイッチングタスク後に測定した指先位置をポインティング位置  $B$  と呼称する。本評価手法は [16][17] から着想を得て考案したものである。

また意図した形状への身体図式の変化（今回は手首から肘に向かう方向への右前腕の収縮）を観測するために、身体図式を収縮させる方向の成分のみを抽出する処理を施す。評価指標の導出過程を以下に説明する。

まず目標位置を原点、肘から手首に向かう方向を  $x$  軸正方向、掌から手の甲へ向かう方向を  $z$  軸正方向、 $XZ$  平面の法線方向を  $y$  軸正方向として腕座標系を定義する。そして座標変換により腕座標系におけるポインティング位置  $A_{arm}$ 、 $B_{arm}$  をそれぞれ求める。この時、 $B_{arm}$  から  $A_{arm}$  へのベクトル  $\overrightarrow{B_{arm}A_{arm}}$  を  $EV$  とすると、 $EV$  の  $x$  成分が身体図式の変化量に該当する。また変更目標を比率で設定して

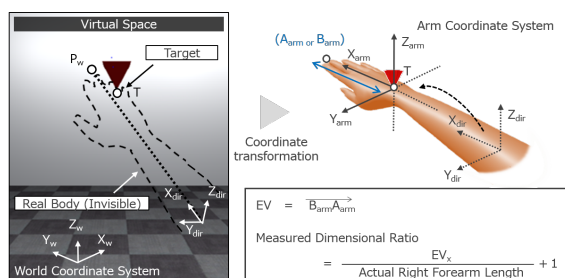


図3: Pointing task and calculation of the updated level of body schema.

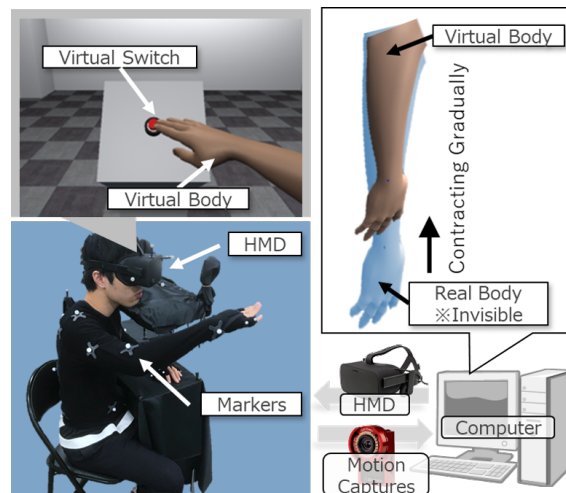


図4: Experiment system.

いるため、比較が容易にできるよう次元を合わせる必要がある。そこで変化量  $EV$  の  $x$  成分に対して実際の右前腕の長さで正規化を行い、右前腕の実寸に対する寸法比（実測寸法比）という形に変換する。この値が身体図式の変化の評価指標となる。ここで、ポインティングタスクおよび評価指標の導出手順のイメージを図3に示す。

### 3. 実験・考察

提案手法による収縮方向への身体図式の変更について、その有効性を検証するために、コンピュータ、モーションキャプチャ、HMD（Head Mount Display）からなる実験システム（図4）を構築し、健康者5名（22～23歳、男性、右利き）に対して、提示寸法比を0.7倍、1.0倍の2通りとして実験を行った。なおハイブリッド学習の実現のため、仮想身体を表示させた状態でのスイッチング4回と、非表示状態でのスイッチング1回を交互に行わせた。また提示寸法比は100回で目標値となるよう線形変化させ、目標値にて200回まで継続させた。

提示寸法比に対する実測寸法比の平均・標準偏差および  $t$  検定を行った結果を図5に示す。提示寸法比に応じて実測寸法比が同方向に変化していることが確認できる。また提示寸法比0.7倍と1.0倍の間には有意差（ $p = 3.16 \times 10^{-2} < 0.05$ ）が認められた。これにより提案手法による収縮方向への身体図式の変更可能性が示唆された。また提示寸法比0.7における身体図式の変化率は、目標値に対して約70%となっており、先行研究における伸長方向への身体図式の変更（約50%）と比較して高い効果が表れている。これは、先行研究から実験システムをハードウェアとソフトウェアの両面において高性能化したことによる影響、もしくは人間の何かしらの適応能力の性質が反映されたものである可能性が考えられる。

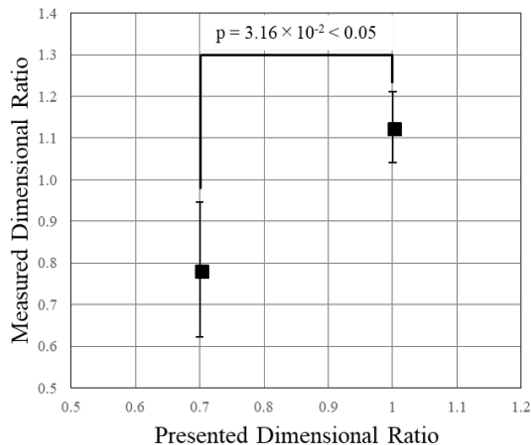


図 5: Experiment system.

#### 4. まとめ

本論文では、以前より著者らが取り組んでいる“VR システムにおける身体図式キャリブレーション”の実現に向けて、収縮方向への身体図式の変更に関して、提案手法の有効性を実験を通して検証した。その結果、目標値に対して約 70%の身体図式の収縮が確認され、提案手法の有効性が示唆された。今後は、手法自体の効果向上や身体図式の変更限界に関する検討、脚部に適用した際の影響の調査などを行っていく予定である。

#### 参考文献

- [1] 渡邊孝一, 川上直樹, 館 暉: テレグジスタンス・マスタスレーブシステムにおける操縦者とスレーブロボットとの間の寸法不一致の影響, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 14, No. 3, pp. 391–394, 2009.
- [2] 柳田康幸, 館 暉: HMD 型テレグジスタンスシステムの頭部運動時における視野角不整合の影響, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 7, No. 1, pp. 69–78, 2002.
- [3] 大山英明, 常本直貴, 館 暉, 井上康之: VR 環境と実環境の重ね合わせの一手法, 日本ロボット学会誌, Vol. 12, No. 2, pp. 272–281, 1994.
- [4] S. Nakamura, N. Mochizuki, T. Konno, J. Yoda, and H. Hashimoto: Research on Updating of Body Schema Using AR Limb and Measurement of the Updated Value, IEEE Systems Journal, Vol. 10, No. 3, pp. 903–911, 2014.
- [5] 依田淳也, 中村壮亮, 昆野友樹, 望月典樹, 橋本秀紀: AR 肢体を用いた身体位置感覚更新が運動軌道に与える影響の評価, 日本機械学会論文集, Vol. 81, No. 829, pp. 15–00249, 2015.
- [6] 望月典樹, 中村壮亮, 橋本秀紀: バーチャルリアリティにおける身体図式キャリブレーションに触力覚フィードバックが及ぼす影響, 日本機械学会論文集, Vol. 83, No. 851, pp. 17–22, 2017.
- [7] H. Head and G. Holmes: Sensory Disturbances From Cerebral Lesions, Brain, Vol. 34, No. 2, pp. 102–254, 1911.
- [8] A. Iriki, M. Tanaka and Y. Iwamura: Coding of modified body schema during tool use by macaque postcentral neurons, Neuroreport, Vol. 7, No. 14, pp. 2325–2330, 1996.
- [9] Roschin V. Y., Frolov A. A., Burnod Y. and Maier M. A.: A neural network model for the acquisition of a spatial body scheme through sensorimotor interaction, Neural Computation, Vol. 23, No. 7, pp. 1821–1834, 2011.
- [10] Fuke S., Ogino M. and Asada M.: Acquisition of the head-centered peri-personal spatial representation found in VIP Neuron, IEEE Transactions on Autonomous Mental Development, Vol. 1, No.2, pp. 131–140, 2009.
- [11] Bushnell E. and Boudreau J.: Motor development and the mind: The potential role of motor abilities as a determinant of aspects of perceptual development, Child Develop, Vol. 64, No. 4, pp. 1005–1021, 1993.
- [12] Bromage R. P. and Melzack R.: Phantom limbs and the body schema, Canadian Anaesthetists Society Journal, Vol. 21, No. 3, pp. 267–274, 1974.
- [13] Tajadura Jimenez A., Valjamae A., Toshima I., Kimura T., Tsakiris M. and Kitagawa N.: Action sounds recalibrate perceived tactile distance, Current Biology, Vol. 22, pp. 516–517, 2012.
- [14] Cardinali L., Brozzoli C., Urquizar C., Salemme R., Roy A. C. and Farne A.: When action is not enough tool-use reveals tactile-dependent access to body schema, Neuropsychologia, Vol. 49, No. 13, pp. 3750–3757, 2011.
- [15] Slater M., Perez-Marcos D., Ehrsson H. H., Sanchez-Vives M. V.: Towards a Digital Body: The Virtual Arm Illusion, Front Hum Neurosci, Vol. 2, No. 6, 2008.
- [16] Oyama E., Maeda T., Tachi S., MacDorman K. F. and Agah A.: On the use of forward kinematics models in visually guided hand position control - analysis based on ISLES model, Neurocomputing, Vol. 44, pp. 965–972, 2002.
- [17] Prablanc C., Echallier J. F., Komilis E. and Jeannerod M.: Optimal response of eye and hand motor systems in pointing at a visual target, Biological Cybernetics, Vol. 35, Issue 2, pp. 113–124, 1979.