VRにおける身体図式キャリブレーション —前腕における収縮方向も含む広範囲での特性調査—†

鈴木 涼*¹・望月 典樹*²・大山 英明*³・中村 壮亮*²

没入型 VR システムでは、バーチャル身体が実身体と異なる場合に、その操作性が低下するという問題がある。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、実身体に適合されている身体図式をバーチャル身体に形状へと更新する身体図式キャリブレーションについて VR 技術を用いた手法を提案してきた。しかし、既存研究では身体図式更新の特性調査は伸長方向の狭い範囲に限定されていた。そこで、特性調査をさらに進めるため、本論文では収縮方向の特性調査はもとより、更新の限界なども明らかにするべく広範囲での身体図式更新の特性調査を行った。結果として、身体図式キャリブレーションは両方向で対称的な特性を示し、極度に变化させた場合では更新の効果が低下した。

キーワード：身体図式，身体イメージ，位置覚，バーチャルリアリティ

1. はじめに

バーチャルリアリティ（VR）において、現実感をより高めるためには、ユーザの動作そのものを入力システムとしてバーチャル身体に反映し、手を伸ばして掴む、足を動かして歩き回るといった操作が模擬されることが理想とされる。実際、アミューズメント施設でのゲーム、外科手術や製造作業の研修などには、バーチャル空間でアバタを操作するケースが広がりつつある。また将来は、遠隔の人型ロボットを実身体同様に操作して、災害救助や点検作業を行うテレグジスタンスも期待される。このとき、意図的に自身の身体寸法よりも大きくしたアバタを操作したり、複数のユーザが同じロボットを使用したりすることから、ユーザは必ずしも自身と同寸法のアバタや遠隔ロボットを操作するわけではない。しかし、バーチャル身体が身体寸法が実身体と異なると、実身体と同様に操作することが難しくなる [1]。

バーチャル身体操作性低下に対するアプローチとして、遠隔ロボット操作においては、幾何学的に視野角と眼間距離を設計することで自然な空間として提示するスケーリングと呼ばれる手法が提案されている [2]。しかし、スケーリングには操縦者とスレーブロボットが非相似形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る。

これに対して著者らは、操作性低下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、実身体に適合している身体図式をバーチャル身体のものへと変更する「身体図式キャリブレーション」を提案し、研究を進めてきた [3–5]。

身体図式の可塑性に関する研究は、道具等を使用して身体図式が伸長していることを確認しているものが多く [6, 7]、収縮させているものは少ない。我々の「身体図式キャリブレーション」に関する研究も、身体図式の変更を伸長方向に対してのみ行い、バーチャル身体の実身体に対する比率（提示寸法比）も 1.0～1.5 倍の間に限定していた。本論文では、収縮方向に対しても身体図式の変更を試み、さらには様々な提示寸法比で実施することで、より網羅的に基礎特性を調査する。さらに、自然な身体成長が伸長方向のみであることから、身体図式の変化の方向に非対称性があることが主張されている研究があるが [8]、伸長と収縮の両方向について、身体図式更新の特性を解析することで、この主張の妥当性を検証する。なお、身体図式の変更フローおよび評価方法、実験手順は先行研究に沿ったものである。

2. 身体図式更新の既存研究

2.1 身体図式とは

身体図式とは、視覚、聴覚、体性感覚（皮膚感覚および固有受容感覚）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イメージと呼ばれる。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イメージが想起されるため、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 [9]。また、身体図式は静的ではなく動的な性質があり、継続的に更新されるものであり、更新に際しては視覚的な空間知覚と体性感覚的な空間知覚に関する情報の統合が重要とされている [10]。

† Body Schema Calibration for VR: Research on the Characteristics in Wide Range Included Direction of Contraction Regarding Forearm
 Ryo SUZUKI, Noriki MOCHIZUKI, Eimei OYAMA,
 and Sousuke NAKAMURA

*1 法政大学 大学院理工学研究科

Graduate School of Science and Engineering, Hosei University

*2 法政大学 理工学部 電気電子工学科

Department of Electrical and Electronic Engineering, Faculty of Science and Engineering, Hosei University

*3 産業総合研究所

Advanced Industrial Science and Technology

図 1 体性感覚入力から脳の身体図式を通して想起される身体イメージ

2.2 バーチャル身体の操作性と能動的な身体図式更新

人間の動作は、自身の身体形状に合致した身体図式が基盤となっている。そのため、自分自身と身体形状の異なるバーチャル身体を操作する場合、身体図式がバーチャル身体に適したものではないため、操作性の低下につながる可能性が考えられる。そこで、バーチャル身体の操作性向上のため、自身の身体に合致したもののからバーチャル身体に合致したものへと身体図式を能動的に更新する必要があると考える。

2.3 身体図式更新に関する既存研究

身体図式は通常、身体の成長に合わせて徐々に更新されていく。このような自然発生的な身体図式の変更は高精度ではあるが長時間を要する。

一方で、身体図式の更新を能動的に引き起こすことも可能であり、RHI (Rubber Hand Illusion) [11] や VHI (Virtual Hand Illusion) [12]、音による錯覚 [13] といったものや、自己身体ではないが道具使用の場合に身体図式が延長されるといったものの [6, 7] が報告されている。これらでは、短時間で身体図式の更新が可能であるが、いずれも更新現象の存在報告に近く、実用的なレベルでの身体図式の更新量が得られているとは言い難かった。

そこで、著者らは、短時間かつ量的に十分な身体図式の更新を可能とすべく、バーチャル空間内での運動により寸法変更後の身体と体性感覚とを紐づけることで身体図式を更新するという「身体図式キャリブレーション」を提案した [3-5]。「身体図式キャリブレーション」では、目標とする身体寸法更新量の約 50% まで到達しており、VHI での固有受容感覚ドリフト量約 15% よりも正確度が高い。

以上の身体図式を変更する各方法について、生起条件、更新時間、正確度、精度、更新対象の特徴をまとめたものを表 1 に示す。

3. 手法

3.1 身体図式キャリブレーションの方法

身体図式の学習には、運動実行による体性感覚入力を何かしらの教師信号と紐づけることが必要であり、本研究では身体寸法が直接分かる視覚情報としている。学習時間の短縮において

は、視覚情報の遮断により体性感覚に基づく身体イメージ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、身体イメージの教師信号に正確な身体映像を利用できなくなり、身体図式の正確度が低下してしまう。そこで著者らは、以下の 2 つの学習過程を含むハイブリッド学習手法を考案した [3]。なおこの際、身体図式を変更する対象は右前腕とした。

- (a) 変更目標の身体イメージ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ことで、身体イメージの教師信号を正しく認識するよう矯正する学習過程
- (b) 身体映像は遮断した状態で、変更目標の身体イメージ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、身体イメージと体性感覚との紐づけを促進するメインの学習過程

この 2 つの要件を満たす流れを図 2 に沿って説明する。

まず、VHI [12] を参考に視触覚同期刺激を提示し、バーチャル身体に対する身体所有感を高める。具体的には、図 3 のように実空間とバーチャル空間の双方で同位置に存在するスティックを使用し、実身体およびバーチャル身体の右腕（指、手、前腕）に対して擦るといった過程を 30 s 程度行う。

次に図 4 のように、バーチャル空間に設置したランダムで出現するスイッチをバーチャル身体の右手中指で押す動作（スイッチングタスク）を繰り返して行わせる。この時、変更目標を提示寸法比として設定し、その提示寸法比になるまでスイッチの押下回数（Score）に従って、バーチャル身体の右前腕を徐々に変形させ、肘から手首の方向へ伸長、または反対の方向へ収縮させていく。また一定間隔でバーチャル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、目標とする身体イメージに合致したバーチャル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。

3.2 評価方法

身体図式は脳内モデルであるため、直接測定することは困難である。そこで、体性感覚入力に伴い身体図式より出力される身体的位置姿勢情報が確実に利用される動作において、間接的に身体図式の変化を捉えることとした。これは、鏡で視認した目標に対して、視認できない手の指先を一致させるタスク [14] を基にしている。

具体的には、目標位置を視覚提示する手段として、バーチャル空間のみに存在する三角錐状のオブジェクトを用意し、身体映像を視覚遮断した状態で実身体の右手中指先端を三角錐の先端に一致させるポインティングタスクを課題として設定した。この時、三角錐先端の座標および実身体の右手中指先端の座標、右腕各部の位置を記録することで、その関係から身体イメージを間接的に評価する。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

表 1 身体図式を変更する各方法の特徴

	Occurrence condition	Learning time	Accuracy	Precision	Target
Growth of body	× <i>Naturally</i>	× <i>Long</i>	○ <i>High</i>	○ <i>High</i>	○ <i>Own body</i>
Tool-use	○ <i>Actively</i>	○ <i>Short</i>			× <i>Other object</i>
RHI/VHI/Auditory illusion			× <i>Low</i>	× <i>Low</i>	○ <i>Own body</i>
Body schema calibration			△ <i>Middle</i>	○ <i>High</i>

図 2 身体図式変更のフロー

をポインティング位置 B と呼称する。また意図した形状への身体図式の変化を観測するために、身体図式を変更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、式 (1) のように、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。

図 3 スティックによって身体所有感を高めるプロセス

(a) Virtual body is displayed

(b) Virtual body is not displayed

図 4 スイッチングタスク

図5 ポインティングタスクと身体図式変化量の計算

図6 実験システム

Measured Dimensional Ratio =

$$\frac{EV_x}{ActualRightForearmLength} + 1 \quad (1)$$

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5に示す。

3.3 システム構成

身体図式キャリブレーションに基づき、構築したシステムの概要を図6に示す。詳細は以下の通りである。

被験者の上半身には反射マーカを取り付け、Optitrack製の光学式カメラFlex 13（解像度1280×1024、精度：1mm以下、遅延：8.3ms、最大フレームレート：120FPS）を6台とMotive 1.10.1からなるモーションキャプチャシステムで取得した位置姿勢情報をバーチャル空間上のアバタの動作に反映する。バーチャル空間の情報はHMD（Head Mounted Display）のOculus lift CV1（解像度：2160×1200、視野角：110°、リ

フレッシュレート90Hz）を被験者に装着し、視覚提示する。バーチャル空間は、実空間と同等の広さである幅約7m、高さ約3m、奥行き約8mの部屋に机、棚等を配置し、模倣した空間とすることで寸法感覚を一致させる。また、スイッチと三角錐オブジェクトをバーチャル空間に配置し、両方の表示を切り替え可能としている。スイッチが存在している場合はスイッチングタスクを被験者に与え、スイッチを押すたびにバーチャル身体の寸法が変更される。また、三角錐が存在している場合はバーチャル身体を非表示にした状態で、前節で述べたポインティング位置と指先位置の差分を測定する機能が有効になる。なお、本実験システムでは、システム上の誤差を防ぐためのキャリブレーションは行っていない。

4. 実験

4.1 実験手順

本実験では、身体図式キャリブレーションの前後において評価過程のポインティングタスクを行う。ただし、実験条件を揃

図7 ポインティングタスクにおける被験者への指示

えるためにタスク中はあご置きを使用して被験者の頭部を固定した。

スイッチング回数は200回とし、30回ごとに30sの休憩を取らせた。また、バーチャル身体表示・非表示の切り替えは、表示でのスイッチング4回のあと、非表示でのスイッチング1回という間隔で繰り返した。加えて、非表示時において10s以内にスイッチが押されなかった場合は、スイッチングエラーとしてカウントし、自動的にバーチャル身体を表示して動作を続行させた。さらに、スイッチング回数が100回に差し掛かった際に提示寸法比となるよう、1回につき全変化量の1/100だけ寸法比を変化させた。実行回数が100回を超えた後は、提示寸法比に固定して動作を続行させた。なお、ここでの提示寸法比は、バーチャル身体前腕における肘から手首に沿った1軸のみのスケールを相対的な倍率で変化させたものとし、前腕の縦横比および世界座標系は変化させない。

また、評価時のポインティングタスクでは、図7を表示し、バーチャル身体でなく被験者自身での感覚で指先を合わせるよう指示した。

4.2 実験結果

伸長方向および収縮方向への身体図式の変更について、提示寸法比を0.6～1.4倍（0.1刻み）に0.4倍、1.6倍、1.8倍を加えた計12通りの実験を行った。被験者は、先行研究の9名という人数を基に、今回の実験で同意を得られた健常者7名（22～23歳、男性、右利き）を対象とした。

まず、各提示寸法比に対する実測寸法比の結果を図8に示す。提示寸法比の増加に伴い、実測寸法比も増加しているように見えるものの、提示寸法比1.6、1.8においては値が飽和していることが観察できる。

また、提示寸法の変化量 ΔP （提示寸法比-1.0）と実測変化量 ΔM （実測寸法比-1.0）を用いて、実測変化量比 R_{pm} を

$$R_{pm} = \frac{\Delta M}{\Delta P} \times 100 [\%] \quad (2)$$

と求め、図9にその結果を示す。全体的に伸長方向、収縮方向共に提示寸法比の約60%前後まで変化しているように見て取れるが、提示寸法比1.8では約30%までの変化に留まっている。

それから、各提示寸法比におけるバーチャル身体非表示で

図8 全被験者の提示された各寸法比に対する更新後の寸法比の平均と標準偏差

図9 各提示寸法比における実測変化量比

図10 身体非表示時でのスイッチングエラー回数の平均と標準偏差

のスイッチングエラー回数の平均と標準偏差を図10に示す。ここで、提示寸法比12水準を要因とする一元配置分散分析を行ったところ、スイッチングエラー回数について有意差は認められなかった（ $F(11, 72) = 1.92$, $p = 0.0909$ ）。

図8、9の傾向を踏まえて、3領域（ $0.4 \leq x \leq 1.8$, $0.4 \leq x \leq 1.6$, $0.6 \leq x \leq 1.4$ ）に分け、単回帰分析を行ったところ、提示寸法比 $0.6 \leq x \leq 1.4$ のとき最も強い正の相関（ $r = 0.901$, $p = 1.31 \times 10^{-21}$ ）が見られた（図11）。

次に、伸長方向と収縮方向で身体図式の変更の特性が異なるかどうかを調査した。提示寸法比0.6～0.9および1.1～1.4を、実身体に対する提示寸法の変化率0.1～0.4と考え、実身体に対

図 11 各実測寸法比と指定した領域での単回帰モデル

図 12 伸長方向および収縮方向における実測寸法の変化率

する実測寸法の変化率を伸長方向と収縮方向でそれぞれ分けたものを図 12 に示す。伸長方向 ($r = 0.650$, $p = 4.25 \times 10^{-5}$), 収縮方向 ($r = 0.678$, $p = 2.80 \times 10^{-5}$) とともに正の相関が見られた。また、傾きに関する対応ありの t 検定をした結果、有意差は認められず ($t(60) = 0.311$, $p = 0.757$, $d = 0.118$, $power = 0.0785$), 相関係数の差の検定においても有意差は認められなかった ($z = 0.114$, $p = 0.912$)。

4.3 考察

本研究では、提示寸法のパターンを増やし、伸長方向および収縮方向に向けた身体図式の変更を適用した。その結果、提示寸法比の増加に伴って実測寸法比も単調増加したが、実身体との寸法差が大きい提示寸法では、実測寸法比が小さくなる傾向が見られた。つまり、本手法における身体図式の変更では、ある寸法を境に身体図式の変化が徐々に小さくなり、一定以上変化しなくなるか、実測寸法比がさらに下がるのではないかと考えられる。

これは、バーチャル身体の見目から推定する物理量が実際と異なることが原因である可能性がある。例えば、実身体の前腕の寸法が 1.6 倍に伸長したとすると、腕自体の質量も 1.6 倍に増加すると予想される。しかし、実際に伸長しているのはバーチャル身体のみで、実身体の質量に変化はない。これにより、視覚情報から予測する質量と、実際の知覚との間のミスマッチによる大きさ重さ錯覚 (Size-Weight Illusion) [15] に似た現象が生じ、身体図式の変化に影響した可能性がある。

腕を動かす場合において発生する慣性モーメントの知覚情報

が身体図式に影響している可能性も考えられる。実際、棒を振ることで棒の長さを知覚している例がある [16]。また、同じ長さの棒であっても付けた錘が手から遠いほど棒が長く感じられることが明らかになっている [17]。しかし、今回の場合は実身体における慣性モーメントが変わらず働いているため、視覚に対して自身の寸法が長く感じなかったのではないかと考えられる。

なお、実験結果から導出した更新方向ごとの単回帰分析をした結果、今回の被験者数では十分な検定力 0.8 を満たすことができなかったが、提示寸法比 0.6 から 1.4 の範囲では、伸長方向と収縮方向への変化に違いがあるとは言えないことが分かった。よって、両方向における線形特性は対称的である可能性が示唆された。この結果は、身体図式更新に非対称性があるという文献 [8] の主張とは異なるが、[8] の研究は左示指を右手で保持した状態で、右上腕の腱を振動させると肘の伸展または屈曲の感覚が想起され、保持された指の伸長または収縮が起きているように感じ、それが身体図式に影響するかを調査したというものであり、外部刺激によって伸長または収縮が引き起こされているという点で本実験とは異なっている。身体図式ではないが、視覚、聴覚、体性感覚の多感覚統合によって変化するという点でメカニズムが似ている近位空間 (peripersonal space) [18] の可塑性に関しては、能動的な動作によって収縮方向の変化が確認されている [19]。つまり今回の結果は、バーチャル身体の操作という自発的な行為により、伸長方向だけでなく、収縮方向に対しても、身体図式の変更が可能であることを示したものと考えられる。

また、実測変化量はいずれの場合も 100% を満たしていないが、これは長時間適合していた実身体の身体図式の記憶が残っているからなのではないかと考えられる。目標の寸法まで身体図式を更新するにはまだ至らないが、提示寸法を目標寸法よりも高く設定し身体図式キャリブレーションを行うことで、実用で操作するバーチャル身体に身体図式を適合させることも可能である。しかし、バーチャル身体を操作する時との寸法が異なるという状況になるため、その操作性に関しては今後の検証が必要である。あるいは、今回は被験者あたり 1 日の中で 1 種類の実験のみ行っているため、睡眠も含めるなど数日間に渡る長期的な実験を行った場合には、100% の変化量に近づく可能性も考えられる。

ここで、実際に操作するバーチャル身体を平均的な寸法と仮定し、人体寸法のデータベース [20] を基にすると、平均前腕長へ身体図式を更新するには、0.87~1.19 倍の更新量を満たすことが必要である。本実験結果を見ると、提示寸法比を目標よりも高く設定することでその更新量は達成可能であると言える。そのため、バーチャル身体の寸法が平均の範囲内であれば、実用場面において身体図式キャリブレーションを適用することで、操作性の向上が期待できる。

それから、提示寸法比ごとのスイッチングエラー回数には規則性が確認できず、提示寸法の変化が大きい場合でも顕著な結果はあらわれなかったため、提示寸法比がスイッチングタスクの難度に影響する可能性は低いと考えられる。

以上のことから、本手法を適用した身体図式の変更におい

て、実測寸法比は提示寸法比に対して単調増加する範囲があるが、その範囲を超えると頭打ちするような特性があり、実測変化量比も減少すると考えられる。また、伸長方向と収縮方向への変更は、提示寸法比 0.6 から 1.4 の範囲において対称的な特性であることが示唆された。

今回の実験結果では、提示寸法比 1.0 時に実測寸法比の平均値が 1.09 と正の方向に寄っている。この平均値の t 検定では $t(6) = 2.38$, $p = 0.0547 > 0.05$ となり 1.0 との差があるとは言えなかったが、あくまでも統計に基づいたものである。また、本研究では、伸長方向および収縮方向への身体図式の更新特性やスイッチングエラー回数に関しても、統計分析に留めている。

5. まとめ

本論文では、以前より著者らが取り組んでいる「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」に関して、提示寸法比 0.4 から 1.8 において効果を検証した。その結果、実測寸法比は提示寸法比の増加に伴い単調増加して頭打ちするような特性が得られ、実測変化量比の減少傾向も確認された。また、収縮方向への身体図式の変更においても、伸長方向と対称的な効果がある可能性があることが示された。よって、本手法における身体図式の変更に関して、伸長方向および収縮方向には対称性があり、バーチャル身体を極端に変化させた場合では効果が減少することが示唆された。

今後は、本手法を脚部に対して適用した場合の特性を検証する。また、実身体と寸法が異なるバーチャル身体の操作において、本手法を適用した際の操作効率を調査する。さらに、身長・前腕長などの身体パラメータと更新特性との関係の調査、実測寸法比を提示寸法比に限りなく近づける手法や、身体図式の変化をリアルタイムに測定する手法も今後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: “テレイグジスタンス・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 型テレイ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] 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 J.*, Vol.10, No.3, pp. 903-911, 2014.
- [4] 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.
- [5] 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. 17-00022, 2017.
- [6] A. Maravita and A. Iriki: “Tools for the body (schema),” *Trends in Cognitive Sciences*, Vol.8, No.2, pp. 79-86, 2004.
- [7] L. Cardinali, F. Frassinetti, C. Brozzoli, C. Urquizar, A. C. Roy, and A. Farné: “Tool-use induces morphological updating of the body schema,” *Current Biology*, Vol.19, No.12, pp. R478-R479, 2009.

- [8] F. De Vignemont, H. H. Ehrsson, and P. Haggard: “Bodily Illusions Modulate Tactile Perception,” *Current Biology*, Vol.15, No.14, pp. 1286-1290, 2005.
- [9] H. Head and G. Holmes: “Sensory Disturbances From Cerebral Lesions,” *Brain*, Vol.34, Nos.2-3, pp. 102-254, 1911.
- [10] Y. Iwamura: “Hierarchical somatosensory processing,” *Current Opinion in Neurobiology*, Vol.8, No.4, pp. 522-528, 1998.
- [11] M. Botvinick and J. Cohen: “Rubber hands ‘feel’ touch that eyes see,” *Nature*, Vol.391, p. 756, 1998.
- [12] M. Slater, D. Perez-Marcos, H. H. Ehrsson, and M. V. Sanchez-Vives: “Towards a digital body: The virtual arm illusion,” *Frontiers in Human Neuroscience*, Vol.2, No.6, 2008.
- [13] A. Tajadura-Jimenez, A. Väljamäe, I. Toshima, T. Kimura, M. Tsakiris, and N. Kitagawa: “Action sounds recalibrate perceived tactile distance,” *Current Biology*, Vol.22, No.13, pp. R516-R517, 2012.
- [14] C. Prablanc, J. F. Echallier, E. Komilis, and M. Jeannerod: “Optimal response of eye and hand motor systems in pointing at a visual target,” *Biological Cybernetics*, Vol.35, No.2, pp. 113-124, 1979.
- [15] A. Charpentier: “Experimental study of some aspects of weight perception,” *Archives de Physiologie Normales et Pathologiques*, Vol.3, pp. 122-135, 1891.
- [16] M. T. Turvey: “Dynamic touch,” *American Psychologist*, Vol.51, No.11, pp. 1134-1152, 1996.
- [17] H. Y. Solomon and M. T. Turvey: “Haptically perceiving the distances reachable with hand-held objects,” *J. of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, Vol.14, No.3, pp. 404-427, 1988.
- [18] L. Cardinali, C. Brozzoli, and A. Farné: “Peripersonal Space and Body Schema: Two Labels for the Same Concept?,” *Brain Topography*, Vol.21, Nos.3-4, pp. 252-260, 2009.
- [19] S. F. Lourenco and M. R. Longo: “The plasticity of near space: evidence for contraction,” *Cognition*, Vol.112, No.3, pp. 451-456, 2009.
- [20] 生命工学工業技術研究所編: 設計のための人体寸法データ集, 日本出版サービス, 1996.

(2020 年 7 月 25 日 受付)

(2021 年 3 月 1 日 採録)

[問い合わせ先]

〒184-8584 東京都小金井市梶野町 3-7-2

法政大学 理工学部 電気電子工学科

中村 壮亮

TEL: 042-387-6230

E-mail: snakamura@hosei.ac.jp

著者紹介

鈴木 涼 [非会員]

2018 年法政大学理工学部電気電子工学科卒業。2020 年同大学理工学研究科電気電子工学専攻修士課程修了。同年 4 月株式会社ダイフクに入社、現在に至る。

もちづき のりき
望月 典樹 [正会員]

2013 年中央大学理工学部電気電子情報通信工学科卒業。2015 年中央大学大学院理工学研究科電気電子情報通信工学専攻修士課程修了。ソフトバンク株式会社、株式会社ロビットを経て、2019 年法政大学大学院理工学研究科電気電子工学専攻博士課程中退。同年より法政大学理工学部電気電子工学科教務助手。現在に至る。バーチャルリアリティ、人間拡張に関する研究に従事。

おおやま えいめい
大山 英明 [非会員]

1987 年東京大学大学院工学系研究科航空学専門課程修了。同年通産省工業技術院機械技術研究所入所。2001 年産業技術総合研究所知能システム研究部門主任研究員。テレグジスタンスロボット、学習制御、サービスロボット、災害対応ロボット、AR 技術、遠隔作業支援技術の研究に従事。2007～2008 年内閣府総合科学技術会議政策統括官（科学技術政策担当）付参事官（情報通信分野）付。2008～2010 年内閣府総合科学技術会議科学技術連携施策群「次世代ロボット連携群」主監補佐。日本ロボット学会、計測自動制御学会、日本バーチャルリアリティ学会の会員。

なかむら そうすけ
中村 壮亮 [正会員]

2005 年東京大学工学部電気工学科卒業。2007 年同修士課程修了。株式会社エリジオンを経て、2012 年同博士課程修了。2012 年中央大学助教。2016 年法政大学理工学部電気電子工学科専任講師。2018 年同准教授。現在に至る。人間拡張・人間支援ロボット等の人間支援技術、それを支える電力基盤の研究に従事。博士（工学）。計測自動制御学会、日本知能情報ファジィ学会、日本ロボット学会、電気学会、日本機械学会、IEEE などの会員。

Body Schema Calibration for VR: Research on the Characteristics in Wide Range Included Direction of Contraction Regarding Forearm

by

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

Abstract:

It is difficult for humans to manipulate their virtual body in the immersive virtual system when its size is different from the real body. The authors assumed that this problem is caused by misfit of the body schema and have been working on the research of body schema calibration, which is the method to update the body schema to fit the virtual body. However, in the previous research, the survey of the basic characteristics of updating body schema has been limited to a narrow range in the extension direction. Therefore, in this paper, we have dealt with updating body schema in wider range in both extension and contraction direction, in order to clarify not only the characteristics of updating in the contraction direction but the limits of update. The results showed symmetry characteristics of body schema update in both directions, while the update effect deteriorated in case of extreme changes.

Keywords: body schema, body image, position sense, virtual reality

Contact Address: **Sousuke NAKAMURA**

Department of Electrical and Electronic Engineering, Faculty of Science and Engineering, Hosei University
3-7-2 Kajino-cho, Koganei-shi, Tokyo 184-8584, Japan
TEL: +81-42-387-6230
E-mail: snakamura@hosei.ac.jp