

VRにおける身体図式キャリブレーション： 非接地状態での下腿部の伸張に対する特性調 査

谷地, 友樹也 / YACHI, Yukiya

(出版者 / Publisher)

法政大学大学院理工学研究科

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

法政大学大学院紀要. 理工学研究科編

(巻 / Volume)

63

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

5

(発行年 / Year)

2022-03-24

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00025312>

VR における身体図式キャリブレーション:非接地状態での 下腿部の伸張に対する特性調査

BODY SCHEMA CALIBRATION IN VIRTUAL REALITY: CHARACTERISTICS OF LOWER LEG EXTENSION
UNDER NON-GROUND CONTACT

谷地 友樹也

Yukiya YACHI

指導教員 中村壮亮

法政大学大学院理工学研究科電気電子工学専攻博士修士課程

It is difficult for humans to operate their virtual bodies, whose shapes are parted from the real body in the immersive virtual system. Authors assume this problem is caused by misfit of the body schema, and has proposed body schema calibration, the method of updating the body schema to the virtual body. In this paper, by extending the lower leg to various sizes, the characteristics in the non-grounded state were investigated.

Key Words : Body schema, Embodiment, Motor Learning, Virtual reality, Telexistence

1. はじめに

(1) VR とは

VR (Virtual Reality) とはコンピュータで人工的に生成した情報を現実であるかのように感じさせる技術である。この VR が理想的な VR として満たすべき特徴的な要点は次のとおりである。

コンピュータの生成する人工環境 (バーチャル空間) が、

(1) 人間にとって自然な 3 次元空間を構成している

(2) 人間がその中で、環境との実時間の相互作用をしながら自由に行動できる

(3) その環境と使用している人間とがシームレスになっていて環境に入り込んだ状態が作られている

ということである。これらをそれぞれ、「3 次元の空間性」、「実時間の相互作用性」、「自己投射性」と呼び、VR の三要素をなす。自己投射性とは、人間の体性感覚や前庭感覚というような自己受容感覚と、眼や耳で観察する VR 空間の視聴覚情報に矛盾なく実現することである。VR とは、これらの三要素を有したシステムを構成して、人間が実際の環境を利用しているのと本質的に同等な状態でバーチャル空間を利用することを狙った技術である。[1]

(2) VR 生成のための基本構成要素

前節では理想的な VR を構成する要素について述べたが、本節では VR を生成するシステム (VR システム) における構成要素について述べる。我々が現実を感じるのは感覚入力の統合の結果であり、さらにその入力

分の運動出力に応じて動的に変化することによってである。

出力システムとは、我々の感覚入力を模擬するための仕組みであり、すなわちディスプレイのことである。Oculus rift やヘッドホンがこれに該当する。

また入力システムとは、運動系を介してユーザからシステムへ伝わる情報の流れを司る要素である。通常のコンピュータシステムではマウスやキーボード相当する。VR システムの場合、人の動作そのものが入力される必要があると考えると、当てはまるのは複数の光学式カメラと反射マーカールからなるモーションキャプチャシステムが考えられる。

そして、出力システムと入力システムをつなぐ第三の要素が、シミュレーションシステムである。このシミュレーションシステムとはバーチャル空間そのものであり、物体同士がぶつかる際の物理現象などを再現する必要がある。つまり表面上の現実感だけでなく、深層的な現実感を生成するためのリアルタイムシミュレーションの仕組みが必要である。

以上の三要素が円滑にループすることにより、VR システムは成り立ち、現実感を生成する本質的部分となっている。

(3) バーチャル身体操作における問題点

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、災害救助や点検作業を行うテレグジスタンスへの応用も期待される。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、バーチャル身体は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[2]。

バーチャル身体は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[3]。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 [4][5][6]。

(4) 本研究の目的

身体図式の可塑性に関する研究は、道具等を使用して上半身の身体図式の更新を確認しているものや、 [7][8]、我々の「身体図式キャリブレーション」に関する研究のように身体図式変更を上半身に対してのみ行う研究はみられるが下半身に対しての研究は行われていない。本論文では、下半身の中でも下腿部に限定して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、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 [9]、本論文では伸長方向に限定して特性調査を行い、特性を解析することで、下腿部において上肢との特性を比較し、検証する

2. 身体図式の更新と既存研究

(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 [10]。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。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 [11]。

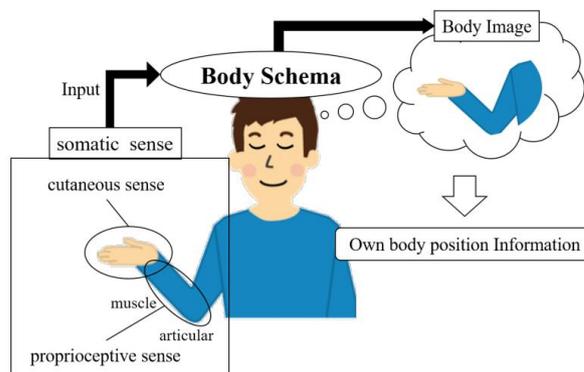


図 1 体性感覚から脳の身体図式を通して想起される身体イメージ

(2) 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。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る、以下に我々が提案する身体図式キャリブレーション以外のその関連研究を紹介する。

① RHI

RHI(Rubber Hand Illusion) とは、ラバーハンド（ゴム製の義手）と自分の手を並べて置き、衝立によって自分の手は視覚的に遮蔽されラバーハンドだけが見える状態の時に、両方の手をブラシなどで同期して撫で続ける（体性感覚刺激を提示する）と、自分の手が撫でられている感触がラバーハンドから感じられるようになるという現象である [12]。

② VHI

[13] では、多感覚間の関係が適切な刺激が提示されると、仮想肢体が自己身体の一部に感じられるということを示すために、ラバーハンドの代わりに仮想腕を用いて RHI と同様の実験が実施された。評価は主観アンケートと固有受容感覚ドリフト量、仮想腕を回転させた時の筋電位によって行われた。結果としては、RHI と同様の傾向になり、さらに錯覚の強さと筋活動量の間に相関があることが示された。

③ 音による錯覚

聴覚と体性感覚の統合によっても身体図式が変更することを示唆した研究もある [14]。この研究では、右腕を徐々に横に伸ばしながら床表面をタップし、スピーカーによって実際にタップした位置よりも離れた位置からタップ音を聴くことで、右腕が長くなってよう感じるというものである。

④ 道具の使用

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が、[7] の実験で報告されている。この実験では、サルに熊手を持たせて餌を手前に引き寄せるように仕向けたところ、手を操作する時と同じ脳活動であったことが確認された。つまり、道具が心理的に手の延長になったことを示唆している。また、これは手に持った熊手を眺めているだけでは起きず、能動的接触によって起こっている。

(3) 本研究の位置づけ

前節で紹介したような身体図式の更新では、何れも腕や手など、上肢に対しての身体図式更新しか報告されておらず、身体のほかの部位に対しての報告はなされていない。また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、上肢でその妥当性を示してきた。

そこで本研究では短時間かつ量的に十分な身体図式の更新を可能とする「身体図式キャリブレーション」を用いて下肢身体においてもその特性を明らかにする。

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 2.1 に示す。

Table 2.1: 身体図式を更新する各方法の特徴

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

3. 手法

(1) 身体図式の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わ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、身体図式の確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 [5]。なおこの際、身体図式を変更する対象は右下腿部とした。(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[13] 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、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足に対して擦るといった過程を 30 秒程度行う。次に図 3 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足の親指で押す動作 (スイッチングタスク) を繰り返し行わせる。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下腿部を徐々に変形させ、膝から足裏の方向へ伸長させていく。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が実際に押されるような挙動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。

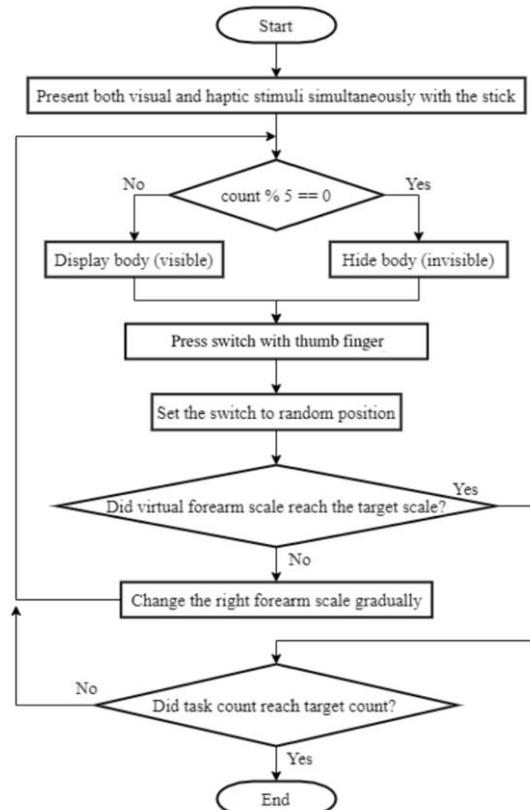


図 2 身体図式変更のフロー

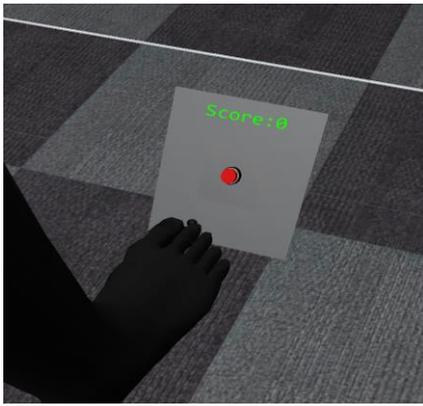


図3 スイッチングタスク

(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の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 [15] 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足親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足親指の座標、右足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、膝から足裏に向かう方向を x 軸正方向、膝から足の裏に向かう方向を z 軸正方向、XZ 平面の法線方向を y 軸正方向として足座標系を定義する。そして座標変換により足座標系におけるポインティング位置 A_{leg} 、 B_{leg} をそれぞれ求める。この時、 B_{leg} から A_{leg} へのベクトル $\rightarrow B_{leg}A_{leg}$ 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足の長さで正規化を行い、右足の実寸に対する寸法比 (実測寸法比) という形に変換する。

$$\text{Measured Dimensional Ratio} = \frac{EV_x}{\text{Actual Lower Leg Length}} + 1 \dots (1)$$

この値が身体図式の変化の評価指標となる。

4. 下腿部に対する身体図式キャリブレーション

(1) 評価方法

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、更新した身体図式更新の効果が弱まらないようにタスク中は、高めの椅子に座ってもらい足を地面と接地しないようにした。スイッチング回数は 200 回とし、30 回ごとに 30 秒の休憩を取らせた。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 10 秒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、バーチャル身体左足における膝から足裏に沿った 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、太もも部分の縦横比および世界座標系は変化させない。

(2) 実験結果

伸長方向への下肢身体図式の変更について、健常者 1 名 (22~23 歳、男性、右利き) に対して、提示寸法比を 1.0 ~ 1.4 倍 (0.1 刻み) に実験を行った。

各提示寸法比に対する実測寸法比を図 4 に示す。

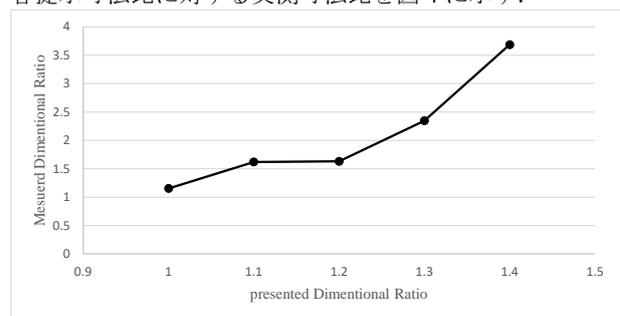


図4 提示された各寸法比に対する被験者の寸法比

下肢身体の伸長方向に対する身体図式の変更では、定時寸法比が上がるごとに寸法比が増加していく傾向が確認できる。

(3) 考察

本研究では、下肢身体の伸長方向に対して身体図式の変更を適応した。結果として上肢身体で行った時と同様の特性が得られたが、更新後の寸法比が上肢身体時に比べ、高くなる傾向があることが分かった。

これは上肢身体に比べ下肢身体は目から遠いため普段から意識的に動かすことが、少ないことや上司に比べ細

かい普段ボタンを押すような正確性を問う動きをしないことなどが原因だと考えられる。

また提示寸法比が増加するほどリアルな身体はより足を持ち上げ、足を曲げることで適応していくが、上肢に比べ曲げることへの違和感が大きいため、違和感を持ったのではないかと考えられる。

5. 結論

本研究において、既存の身体図式キャリブレーションを下肢身体に対して適用した。今後は収縮方向への適用や下肢身体においてより良い身体図式キャリブレーションの手法を検討するなど研究を進めていきたい。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、中村壮亮先生には研究への取り組み方のご指導や、研究分野の正しい方向性を示していただき、また悩んで研究が進まない時なども相談に乗っていただきました。深く感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 舘暲, 佐藤誠, 廣瀬通考:「バーチャルリアリティ学」, 日本バーチャルリアリティ学会, 2011.
- [2] 渡邊孝一, 川上直樹, 舘日章: 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(3), pp.391-394 (2009)
- [3] 柳田康幸, 舘日章: 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(1), pp.69-78(2002)
- [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(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(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(851), pp.17-22(2017)
- [7] H.Maravita, A.Iriki : Tools for the body (schema) ; Trends in Cognitive Sciences, Vol.8(2), pp.79-86(2004)
- [8] L.Cardinali, F.Frassinetti, C.Brozzoli, C.Urquizar, A.C.Roy, A.Farne : Tool-use induces morphological updating of the body schema ; Current Biology, Vol.15(24), pp.1286-1290(2009)
- [9] F de Vignemont, H.H.Ehrsson, P.Haggard : Bodily Illusions Modulate Tactile Perception ; Current Biology, Vol.14(3), pp.404-427(2005)
- [10] H.Head and G.Holmes : Sensory Disturbances From Cerebral Lesions ; Brain, Vol.34(2), pp.102-254 (1911)
- [11] Y.Iwamura : Hierarchical somatosensory processing; Current Opinion in Neurobiology, Vol.8(4), pp.522-528(1998)
- [12] M.Botvinick and J.Cohen : Rubber hands feel touch that eyes see ; Nature, Vol.391, pp.756(1998)
- [13] M.Slater, D.Perez-Marcos, H.H.Ehrsson and M.V.Sanchez-Vives : Towards a digital body: The virtual arm illusion ; Front Hum Neurosci, Vol.2(6), (2008)
- [14] A.Tajadura-Jimenez, A.Valjamae, I.Toshima, T.Kimura, M.Tsakiris and N.Kitagawa : Action sounds recalibrate perceived tactile distance ; Current Biology, Vol.22(13), pp.516-517 (2012)
- [15] Prablanc.C., Echallier.J.F., Komilis.E. and Jean-nerod.M : Optimal response of eye and hand motor systems in pointing at a visual target ; Biological Cybernetics, Vol.35(2), pp.113-124(1979)
- [16] A. Charpentier : Experimental study of some aspects of weight perception ; Archives de Physiologie Normales et Pathologiques, Vol.3, pp.122 - 135(1891)
- [17] M.T.Turvey : Dynamic touch ; American Psychologist, Vol.51(11), pp.1134-1152(1996)
- [18] H.Y.Solomon, M.T.Turvey : Haptically perceiving the distances reachable with handheld objects. ; J Exp Psychol Hum Percept Perform, Vol.14(3), pp.404-427(1988)
- [19] L.Cardinali, C.Brozzoli, A.Farne : Peripersonal Space and Body Schema: Two Labels for the Same Concept? ; Brain Topography, Vol.21(3-4), pp.252-260(2009)
- [20] S.F.Lourenco, M.R.Longo : The plasticity of near space: evidence for contraction ; Cognition, Vol.112(3), pp.451-456(2009)