

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 ～伸長・収縮方向における回帰モデルでの評価～

Body Schema Calibration under Virtual Reality: The Evaluation using Regression Model in The Direction of Extension and Contraction

望月 典樹^{*1} 鈴木 涼^{*1} 大山 英明^{*2} 中村 壮亮^{*1}
Noriki Mochizuki Ryo Suzuki Eimei Oyama Sousuke Nakamura

^{*1} 法政大学

Hosei University

^{*2} 産業技術総合研究所

National Institute Advanced Industrial Science and Technology

In the immersive virtual reality system, when the shape of the virtual body is parted from the real body, there is a problem that its operability deteriorates. The authors assumed this is caused by misfit of the body schema which is an internal model in the brain realizing the body position, because it is initially tuned up to the real body instead of virtual body. Thus, the authors have proposed a method called body schema calibration using VR technology to change the body schema adapting to the real body so as to fit the virtual body. In this paper, we newly evaluated two regression models based on the result of body schema calibration to the direction of extension and contraction. As a result, two-piece linear regression model was more suitable than the linear regression model. And it was suggested that the changing characteristics of the body schema are different in the direction of extension and contraction.

1. はじめに

VR (Virtual Reality) とは、コンピュータで人工的に生成した情報をあたかも現実であるかのように感じさせる技術である。[館 10]によれば、理想的な VR が満たすべき最も特徴的な要点は、コンピュータで生成した仮想空間が、

- (a) 人間にとって自然な 3 次元空間を構成している
- (b) 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
- (c) 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る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。これらの 3 要素を有した VR システムを構成する場合、人の動作そのものを入力として、仮想身体を操作することが現実感を高めることに適していると考えられる。例えば、仮想空間内でのコミュニケーション、エンタテインメントに用いられるアバターや、テレプレゼンスで用いられる遠隔操作ロボットが挙げられる。しかし、仮想空間内の仮想身体の手身寸法が実身体と異なると、実身体と同様に操作をすることが難しくなる[渡邊 09]。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」について提案し、研究を進めてきた[Nakamura 14] [依田 15] [望月 17]。

これまで身体図式の変更は、身体形状を伸長および収縮する方向に対して試みてきたが、開発過程の都合から、両者で被験者および実験環境を統一出来ていなかった。そこで本論文では、伸長・収縮の両方向に対して同一条件下で身体図式の変更を実施し、得られた結果を線形回帰モデルに当てはめることで比較検討を行う。

2. 仮想身体の操作における問題とその原因

仮想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制御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[柳田 02]。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。また、実空間を近似した仮想空間において、仮想的な遠隔ロボットを操縦する訓練を行い、遠隔ロボットへの一体化の度合いを高める手法が提案されている[大山 94]。しかし、この手法は訓練のために適切な動作パターンの選択法や訓練回数・時間の設定法を欠いており、さらに、災害地における瓦礫の落下など、遠隔地の環境が動的に変化した場合に、必ずしも対応できる保証はない。

2.1 身体図式と仮想身体の乖離が主要因である仮説

身体図式とは、「自分の身体の姿勢や動きを制御する際に働く無意識のプロセス」と定義される。例えば、「カップを持つ」という行為では、カップの大きさや位置を知覚し、自分の身体図式と照合した上で、手の形や伸ばす位置を決定している。一方で、

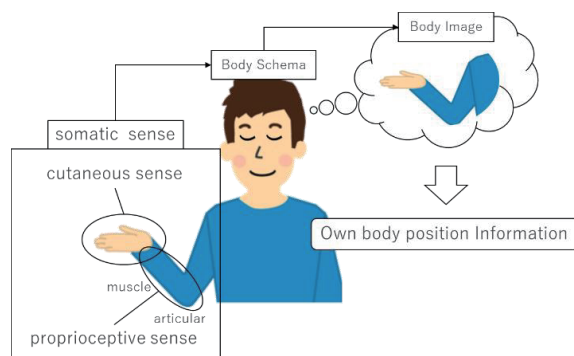


図 1 Body image recalled through body schema
in the brain from somatosensory inputs.

連絡先: 望月 典樹

法政大学大学院 理工学研究科 電気電子工学専攻

〒184-8584 東京都小金井市梶野町 3-7-2

090-9130-8887

mono.gmlab@gmail.com

身体イメージは「自分自身の身体について意識的に持つ表象」と定義される。これは客観的に想像した自身の姿であり、人間は身体図式からその時々において身体イメージを生成している[Head 11]。上記のイメージを図1に示す。

身体図式を形成するには、視覚、聴覚、体性感覚(皮膚感覚および深部感覚)などの知覚情報が必要になる。特に、視覚的な空間知覚と触力覚的な空間知覚に関する情報の統合が重要である[Iwamura 98]。また、生成された身体図式は日々の体験や経験によって維持され、リアルタイムに更新されている。

人間の動作は身体図式が基盤となっている。つまり、自分自身と身体形状の異なる仮想身体を操作する場合、身体図式が仮想身体に適したものになっておらず、その結果として操作性の低下が生じている可能性が考えられる。

2.2 身体図式の変更事例

身体図式は通常、成長に合わせて変化した身体に合致するように徐々に更新されていく。一方で、急激な身体変化に対しては身体図式の変更は行われ難く、事故などで身体を欠損した際には幻肢が生じる場合がある[Bromage 74]。これらの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。

また、能動的に身体図式が更新された事例としては、RHI[Botvinick 98]やVHI[Slater 08]、音による錯覚[Tajadura 12]が報告されている。しかし、これらは短時間での身体図式の変更が認められるもののその精度は低い。

これに対して、著者らが考案した「身体図式キャリブレーション」は、仮想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手法であり、短時間で高精度に身体図式を変更することができる[Nakamura 14][依田 15][望月 17]。

3. 身体図式キャリブレーションとその評価方法

3.1 身体図式キャリブレーション

身体図式は、運動の際に身体像と体性感覚情報を統合することで学習される。正確な身体像は仮想空間において自身が操作する仮想身体である。ここで、仮想身体を表示している場合、自身の身体像は視覚によって認知できるため、体性感覚に基づいた身体像が意識されず、身体図式変更の所要時間が増大すると考えられる。すなわち、短時間で変更するためには、仮想身体映像を遮断して、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、仮想身体は身体像の正確な教師信号となるため、仮想身体を常時遮断している状況では、正確な身体像を学習することが困難となり、身体図式の確度が低下する。そこで我々は以下の2つの学習過程をハイブリッドで行う手法を提案している。なお、身体図式を変更する対象は右前腕に設定している。

- 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

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、実空間と仮想空間の両者に存在するMRスティックを使用し、実身体及び仮想身体の右腕に触れ、視触覚同期刺激を提示することで、仮想身体に対する自己所有感を高め、VHI

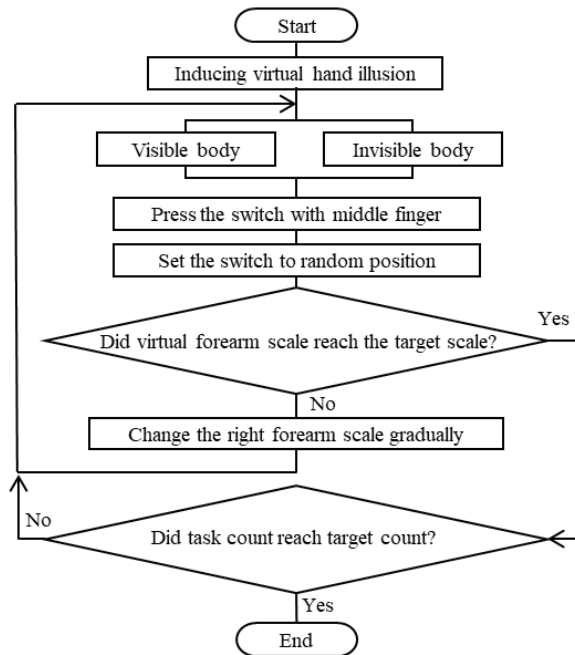


図2 The flow of changing body schema.

の状態を作り出す。仮想空間には仮想スイッチを設置し、スイッチを右手中指で押す動作(スイッチングタスク)を、実身体の運動による仮想身体で繰り返し行わせる。この時、仮想スイッチは押されるたびにランダムな位置に移動する。そして目標の身体イメージは実身体の寸法に対する倍率である寸法比として設定し、提示寸法比になるまで、仮想スイッチを押した回数に従って、仮想身体の前腕を徐々に肘から手首、または手首から肘の方向へ線形的に変形させていく。また、一定のスイッチング回数ごとに仮想身体を視覚提示しない状態でスイッチングをさせ、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できるものとした。なお目標とする身体イメージに対応する仮想身体を提示した状態での運動機会を確保するために、目標の寸法に達した後も十分な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、[Prablanc 79]をもとに、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、その位置関係から間接的に身体図式の変化を捉えることとした。具体的には、目標位置を視覚提示する手段として仮想コーン(仮想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仮想コーンの先端に一致させるポインティングタスクなる課題を設定した。この時、仮想コーン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。

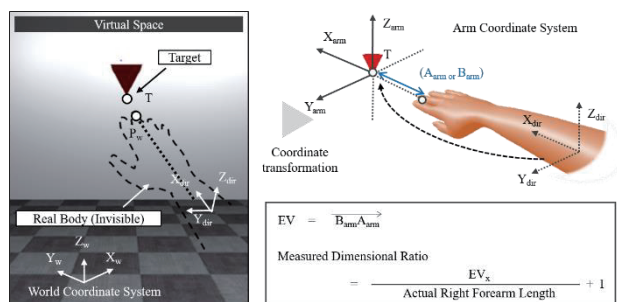


図 3 Pointing task and calculation of the updated level of body schema.

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 $\vec{B_{arm}A_{arm}}$ 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。

4. 実験システム

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4に示す。詳細は以下の通りである。

被験者の上半身にはマーカーを取り付け, モーションキャプチャで取得した位置姿勢情報を仮想空間上のアバタの動作に反映する。仮想空間の情報はHMD(Head Mount Display)を被験者に装着し, 視覚提示する。仮想空間は, 実空間を模倣した空間とすることで現実感を向上させる。また, 仮想スイッチと仮想コーンを仮想空間に配置し, 両方の表示を切り替え可能としている。仮想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仮想身体の寸法が変更さ

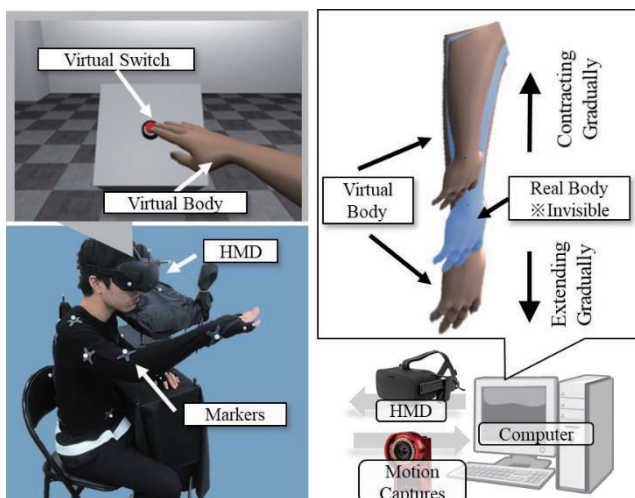


図 4 Experiment system.

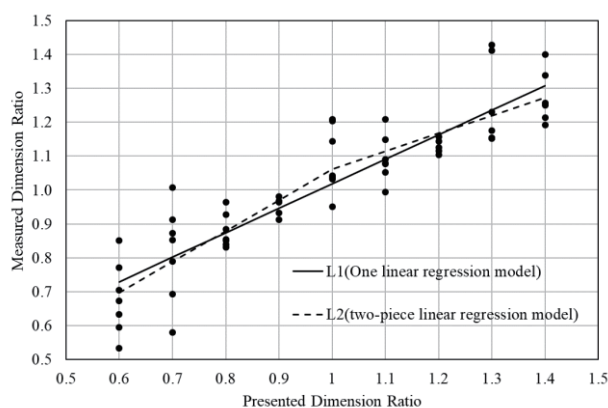


図 5 Experiment result.

れるようになっている。また仮想コーンが存在している場合は仮想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っている。

5. 実験・考察

提案手法による伸長方向および収縮方向への身体図式の変更について, 健康者 7 名 (22~23 歳, 男性, 右利き) に対して, 提示寸法比を 0.6~1.4 倍 (0.1 刻み) として 9 通りの実験を行った。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。

各提示寸法比に対する実測寸法比, およびその直線回帰と折れ線回帰の結果を図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。なお直線回帰モデルL1は, 伸長方向と収縮方向の変化を1つの直線で表したものであり, 折れ線回帰モデルL2は提示寸法比 1.0 から伸長方向と収縮方向で直線の傾きを独立させて表したものである。

ここで各回帰モデルに対して, AIC(Akaike's Information Criteria)を求めたところ, L1は $AIC=-106.7$, L2は $AIC=-109.3$ となり, L2の方がモデルとして適しているという結果になった。このことから, 身体図式の変更に関して, 伸長方向と収縮方向とでは特性が異なる可能性が示唆された。またL2の傾きは, 伸長方向で 0.53, 収縮方向で 0.90 となり, 収縮方向の方がより高い効果が得られている。これは通常の成長過程で, 現在よりも小さい身体図式での動作を経験しているため, それが適応のしやすさに影響した可能性が考えられる。

6. 結論

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, 伸長方向と収縮方向の両方向に対して同一条件下での適用を試み, 得られた結果に対する直線回帰モデルと, 方向別に直線を分離させた折れ線回帰モデルとを比較した。その結果, 伸長方向と収縮方向とでは, 身体図式の変更特性が異なる可能性が示唆された。今後は, 身体図式の変更限界に関する調査や, 本手法を適用した際の仮想身体の実操作性能について評価を行っていく予定である。

参考文献

- [Botvinick 98] M.Botvinick and J.Cohen:Rubber hands ‘feel’ touch that eyes see, Nature, Vol.391, pp.756, (1998)
- [Bromage 74] P.R.Bromage and R.Melzack:Phantom limbs and the body schema, Canadian Anaesthetists Society Journal, Vol.21, No.3, pp.267-274, (1974)
- [Head 11] H.Head and G.Holmes:Sensory Disturbances From Cerebral Lesions”, Brain, Vol.34, No.2, pp.102 - 254, (1911)
- [Iwamura 98] Y.Iwamura : Hierarchical somatosensory processing”, Current Opinion in Neurobiology, Vol.8, No.4, pp.522-528, (1998)
- [Nakamura 14] S.Nakamura, N.Mochizuki, T.Konno, J.Yoda, and H.Hashimotoa: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)
- [Prablanc 79] 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)
- [Slater 08] 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, No.6, (2008)
- [Tajadura 12] A.Tajadura-Jimenez, A.Valjamae, I.Toshima, T.Kimura, M.Tsakiris and N.Kitagawa : Action sounds recalibrate perceived tactile distance, Current Biology, Vol.22, No.13, pp.516-517, (2012)
- [大山 94] 大山英明, 常本直貴, 前田太郎, 舘暲:仮想環境へのテレイグジスタンスのための一手法”, 日本ロボット学会誌, No.8, pp.1175-1182, (1994)
- [舘 10] 舘暲:バーチャルリアリティ学, 2010.
- [望月 17] 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)
- [柳田 02] 柳田康幸, 舘暲: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)
- [依田 15] 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)
- [渡邊 09] 渡邊孝一, 川上直樹, 舘暲: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)