



引っ張り動作による前腕の皮膚変形計測に基づいた アバタの腕の伸縮

Stretching avatar arm based on stretch gesture detection with forearm skin deformation

小山裕雅¹⁾, 中村文彦¹⁾, 木村朝子¹⁾, 柴田史久¹⁾

Yuga KOYAMA, Fumihiko NAKAMURA, Asako KIMURA, and Fumihisa SHIBATA

1) 立命館大学大学院 情報理工学研究科 (〒 567-8570 大阪府茨木市岩倉町 2-150, koyama@rm2c.ise.ritsumei.ac.jp)

概要: 本研究では, 前腕の引っ張り動作を用いてアバタの腕を伸縮する手法を開発した. 前腕の引っ張り動作に伴う皮膚変形を反射型光センサによる計測と機械学習によって認識し, 認識結果を基にアバタの腕を伸長・収縮した. 本手法がリーチング課題におけるパフォーマンス・身体認知に与える影響を検証する実験を行った. 実験結果から, 前腕を引っ張る動作による腕の伸縮は身体所有感・行為主体感・腕の伸縮感を誘発できると示された一方で, 自身の身体の変化に関する感覚は弱まる可能性が示唆された.

キーワード: 身体拡張, 引っ張り動作, 皮膚変形, 反射型光センサ

1. はじめに

バーチャルリアリティ (Virtual Reality; VR) を用いて身体を編集した際のインタラクション手法や人間の能力について研究が進められており, 長い腕を持つアバタを使用した際の知覚の検証 [1] などが試みられている. また, 編集された身体に対して身体所有感 (その身体, またはその身体の一部が自己に帰属する感覚)・行為主体感 (まさに自分が運動を引き起こしている感覚) が生じるか研究されており, 人間の生得的な身体と異なる構成を持つアバタでも, 視覚・触覚や視覚・運動の同期した多感覚刺激の提示によって, 身体所有感や行為主体感を誘発できることが示されている.

伸縮する腕を用いた VR 環境でのインタラクションが研究されている. 腕の伸縮時に前腕に対する皮膚伸長刺激の提示によって身体所有感が強まることが報告されている [2]. また, 手の移動距離や手の加速度や瞬間的な伸縮などに基づいて腕の伸長方法を変えた場合の身体所有感やタスクパフォーマンスについて検証した研究 [3] では, 手の移動距離に応じた手の伸長が身体所有感・行為主体感・タスクパフォーマンスを最も向上することが示された. 即ち, 腕の伸長する方法によって身体認知やタスクパフォーマンスが変化することが示唆されている. しかし, 先行研究では, 腕の伸長がシステムによって既定された状況においてのみ比較しており, ユーザ自身が能動的に腕の伸縮を制御した場合については調べられていなかった.

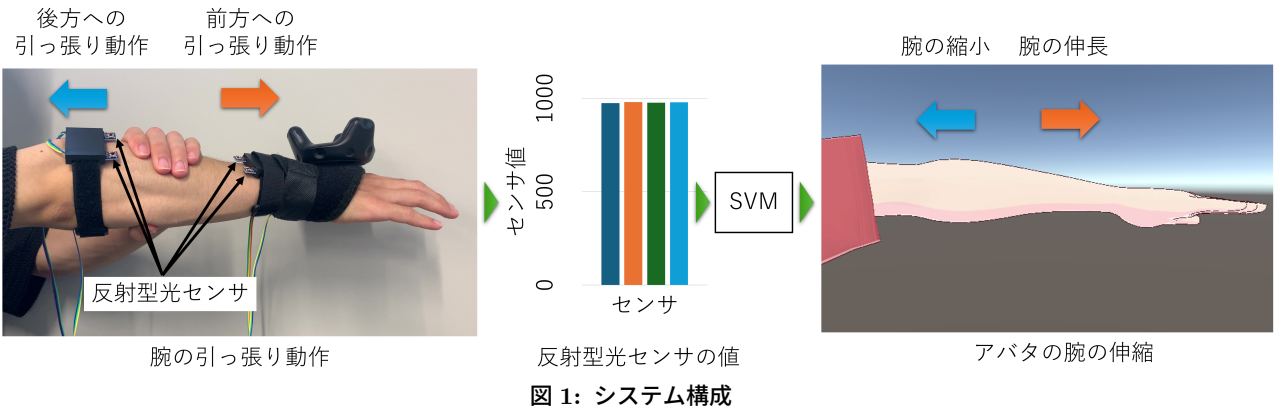
本研究では, ユーザが能動的に身体編集を行うために, 引っ張り動作を用いてアバタの腕を伸縮する方法を提案する. 引っ張り動作とは, 片方の前腕をもう片方の腕で手か肘の方向に引っ張る動作を示す. 我々は, 反射型光センサによる皮膚上のジェスチャ認識手法 [4] を利用した腕の伸縮手法を開発した. 本手法を用いたリーチングタスクにおける

タスクパフォーマンスとアバタへの身体認知に与える影響を検証するために, 実験を行った. 実験では, コントローラのレイキャストによる選択手法・コントローラのボタンによる腕の伸縮を用いた選択手法・Go-Go Interaction 法 [5] による腕の伸縮を用いた選択手法・本手法の比較を行った. 実験結果から, 本手法により身体所有感・行為主体感・腕が伸縮する感覚を生起できる可能性が示されたが, 自身の身体が変化する感覚は弱まる可能性が示唆された.

2. 引っ張り動作によるアバタの腕の伸縮

本研究では, ユーザが能動的にアバタの腕を伸縮する方法として, 引っ張り動作 (片方の前腕をもう片方の腕で手または肘の方向に引っ張る動作) を用いる. 先行研究 [2] では, 前腕に対して腕の伸長と対応した剪断力の提示によって身体化を誘発できることが示されており, 腕の伸縮時に自身で前腕を引っ張ることで自身の腕が伸縮している感覚や自身で腕の長さを制御している感覚の向上が期待できる.

引っ張り動作の認識には, 反射型光センサによる皮膚変形の計測に基づくジェスチャ認識手法 [4] を用いる. 反射型光センサは発光ダイオードとフォトトランジスタから構成され, センサから皮膚表面までの距離に応じてセンサ値が変化する. 反射型光センサを手首と肘付近に取り付け, 引っ張り動作時に生じる皮膚変形を計測する. センサ値に引っ張り動作のラベルを付与した訓練データを機械学習することで反射型光センサの値から引っ張り動作を認識する. 本研究では, アイドル状態 (何もしていない状態)・前方への引っ張り動作・後方への引っ張り動作の 3 状態を分類する. 引っ張り動作の認識結果に基づき, アバタの腕の長さを伸縮する. 前方への引っ張り動作であれば腕の長さを伸長し, 後方への引っ張り動作であれば腕の長さを収縮する.



3. 実装

我々は引っ張り動作によりアバタの腕を伸縮するシステムを開発した(図1)。本システムは皮膚変形計測デバイスと、引っ張り動作認識に基づくアバタの腕を伸縮を行うソフトウェアで構成された。ソフトウェアはUnity 2021.3.26f1を用いて実装し、頭部装着型ディスプレイとしてHTC VIVE Pro Eyeを用いた。

皮膚変形計測デバイスは反射型光センサ(SG-105, Kondenshi)4個とマイクロコンピュータ(Arduino Nano Every)から構成された。反射型光センサ2個が固定されたバンドを2個作成し、手首と前腕の肘付近に取り付けた。

引っ張り動作認識に基づくアバタの腕の伸縮を行うソフトウェアではセンサ値から引っ張り動作の認識を行った。まず、コンピュータがマイクロコンピュータから反射型光センサの値を受け取った。反射型光センサの値を線形カーネルを用いたサポートベクターマシン(SVM)によって機械学習した。SVMは4個の反射型光センサの値からアイドル状態・前方への引っ張り動作・後方への引っ張り動作の3状態を識別した。識別結果を基にアバタの腕の長さを伸縮した。腕の長さが増える量 l は現在時間から前フレームの時間の差と係数 ψ の積として計算した。前方への引っ張り動作時には、腕の長さに腕の長さの変化量 l を加算し、後方への引っ張り動作時には変化量 l を減算した。

4. 実験

本実験では、本手法がリーチングタスクにおけるタスクパフォーマンスとアバタの身体化感覚に与える影響を検証した。実験参加者はバーチャルオブジェクトに対するリーチングタスクを行い、身体化感覚に関する質問に回答した。本実験ではタスク完了時間と質問への回答を評価した。実験参加者はVirtual Embodiment Questionnaire (VEQ) [6]と、腕の伸縮感覚、腕の伸縮制御、自身による腕の伸縮に関する質問を7つ加えた計19個の質問(表1)を1~7の7段階評価で回答した。実験参加者は男性10名と女性2名の計12名(平均年齢:23.3歳,標準偏差:1.0歳,最大:25歳,最小:22歳)が実験に参加した。

実験参加者は、コントローラのレイキャストによる選択手法(条件A)、コントローラのボタンによる腕の伸縮を用

表 1: 実験に用いた質問

Q1	仮想身体が自分の身体のように感じられた。
Q2	仮想の身体部位が自分の身体部位のように感じられた。
Q3	仮想身体は人間らしさがあると感じた。
Q4	仮想身体が自分に属するものと感じた。
Q5	仮想身体の動作が、まるで自分自身の動作のように感じた。
Q6	仮想身体の動作を、自分でコントロールしている気がした。
Q7	仮想身体の動作を、自分で引き起こしている気がした。
Q8	仮想身体の動作が、自分自身の動作と一致していた。
Q9	自分自身の身体の形や見かけが変化した気がした。
Q10	自分自身の体重に変化があった気がした。
Q11	自分自身の身長に変化があった気がした。
Q12	自分自身の体の横幅に変化があった気がした。
Q13	現実の腕が伸びたり縮んでいたかのように感じた。
Q14	自分がバーチャルの腕の長さを制御していた。
Q15	バーチャルの腕を伸ばしている時、自分自身によって腕を伸ばしているように感じた。
Q16	バーチャルの腕を伸ばしている時、誰かから腕を伸ばされているように感じた。
Q17	バーチャルの腕がそれ自体の意思を持っているかのように感じた。
Q18	バーチャルの手が複数あるように感じた。
Q19	仮想身体を見ていた位置に自分の身体があるように感じた。

いた選択手法(条件B)、Go-Go-Interaction法による腕の伸縮を用いた選択手法(条件C)、引っ張り動作による腕の伸縮を用いた選択手法(条件D)、の4条件でタスクを行った。条件Aでは、アバタの腕は伸縮せず、アバタの手から

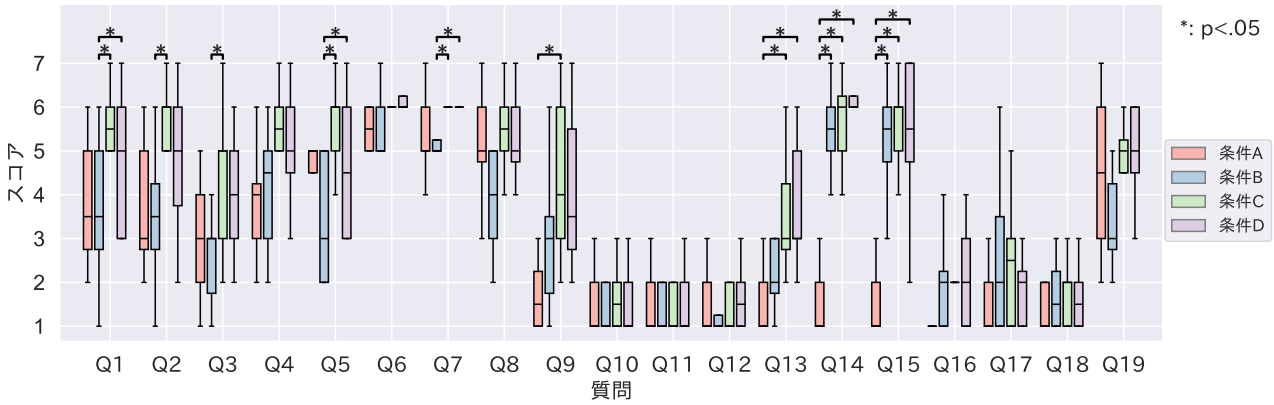


図 2: 各質問項目の結果

出るレイによって選択した。条件 B, 条件 C, 条件 D では、アバタの腕が伸縮し、アバタの手でバーチャルオブジェクトに触れることにより選択した。条件 B ではコントローラのボタン入力によりアバタの腕の伸縮を行った。条件 C では Go-Go Interaction 法 [5] と同様の手法でアバタの腕の伸縮を行った。頭と腕の距離 d が 30cm 以下であれば腕の長さに変化はなかったが、30cm 以上となった場合、腕の長さに $130(d - 30)^2$ を加算した。条件 D では本論文で提案した手法でアバタの腕の伸縮を行った。

リーチングタスクでは、実験参加者は近・中・遠距離に出現するバーチャルオブジェクトに触れるタスクを行った。バーチャルオブジェクトは、実験参加者の正面方向 -80° から 80° 、奥行き方向 0.25m から 1.00m までの近距離範囲、1.00m から 1.75m までの中距離範囲、1.75m から 2.50m までの遠距離範囲のそれぞれの範囲内に 8 個まで出現させ、合計で 24 個出現させた。オブジェクトの現れた位置は各範囲内のランダムな位置であった。バーチャルオブジェクトの出現する高さは 0.90m だった。バーチャルオブジェクトを選択すると消え、すぐに次のオブジェクトが出現し、24 個のオブジェクトを選択するとタスクが終了した。

実験前に、実験者が内容について実験参加者に説明した。実験者は実験参加者に椅子に座り、頭部に HMD を装着するように指示した。実験参加者は条件 A・条件 B では VIVE コントローラを持ち、条件 C では VIVE トラッカーを右手に取り付け、条件 D では右手に VIVE トラッカーを、右前腕に皮膚変形計測デバイスを装着した。条件 D では、まず、引っ張り動作の訓練データの収集と識別器の構築を行い、実験参加者にアバタの腕を伸縮する練習を行わせた。そして、実験参加者はリーチングタスクを開始した。リーチングタスク終了後、実験参加者は表 1 の質問に回答した。実験参加者はリーチングタスクを各条件をランダムな順番で行った。

5. 結果

図 3 に各条件におけるタスク完了時間の結果を示す。繰り返しのある 1 元配置分散分析を行ったところ、条件の間の有意差が認められた ($F(3) = 13.894, p < .001$)。Bonferroni 補正を用いた事後検定を行った結果、条件 A と条件 B の

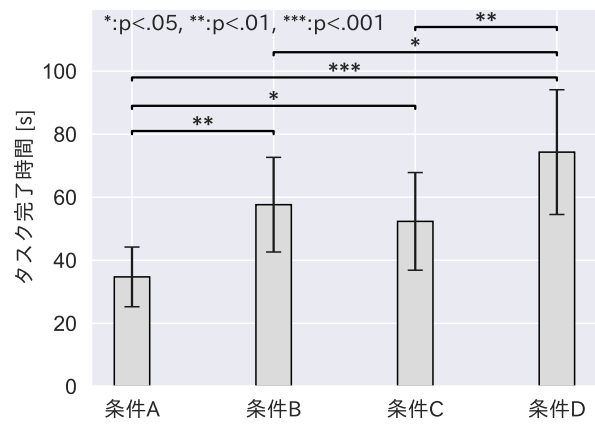


図 3: タスク完了時間の結果

間 ($p = .003$)、条件 A と条件 C の間 ($p = .031$)、条件 A と条件 D の間 ($p < .001$)、条件 B と条件 D の間 ($p = .045$)、条件 C と条件 D の間 ($p = .005$) に有意差が見られた。

図 2 に各条件の各質問項目の結果を示す。各質問項目でフリードマン検定を行ったところ、 $Q6 \cdot Q10 \cdot Q11 \cdot Q12 \cdot Q17 \cdot Q18$ 以外で条件の間の有意差が認められた ($Q1: \chi^2(3) = 21,429, p < .001, Q2: \chi^2(3) = 15.827, p = 0.001, Q3: \chi^2(3) = 16.344, p < .001, Q4: \chi^2(3) = 13.272, p = 0.004, Q5: \chi^2(3) = 15.75, p = 0.001, Q7: \chi^2(3) = 12.758, p = 0.005, Q8: \chi^2(3) = 9.7212, p = 0.021, Q9: \chi^2(3) = 18.682, p < .001, Q13: \chi^2(3) = 23.74, p < .001, Q14: \chi^2(3) = 22.212, p < .001, Q15: \chi^2(3) = 15.708, p = 0.001, Q16: \chi^2(3) = 13.225, p = 0.004, Q19: \chi^2(3) = 12.115, p = 0.007$)。Bonferroni 補正を用いた事後検定を各質問項目で行ったところ、 $Q1$ の条件 B と条件 C の間 ($p = .020$)、 $Q1$ の条件 B と条件 D の間 ($p = .046$)、 $Q2$ の条件 B と条件 C の間 ($p = .032$)、 $Q3$ の条件 B と条件 C の間 ($p = .031$)、 $Q5$ の条件 B と条件 C の間 ($p = .021$)、 $Q5$ の条件 B と条件 D の間 ($p = .043$)、 $Q7$ の条件 B と条件 C の間 ($p = .036$)、 $Q7$ の条件 B と条件 D の間 ($p = .016$)、 $Q9$ の条件 A と条件 C の間 ($p = .048$)、 $Q13$ の条件 A と条件 C の間 ($p = .033$)、 $Q13$ の条件 A と条件 D の間 ($p = .022$)、 $Q14$ の条件 A と条件 B の間 ($p = .018$)、 $Q14$ の条件 A と条件 C の間 ($p = .022$)、 $Q14$ の条件 A と条

件 D の間 ($p = .021$), Q15 の条件 A と条件 B の間 ($p = .028$), Q15 の条件 A と条件 C の間 ($p = .018$), Q15 の条件 A と条件 D の間 ($p = .038$) に有意差が認められた。

タスク完了時間の結果から、条件 A と条件 B・条件 C・条件 D の間に有意な時間差が見られた。これは、腕の伸長に時間がかかったからだと考えられる。また、条件 B と条件 D の間に有意な差が認められた。実験参加者から、条件 D において引っ張り動作を続けることによって疲労するという内観報告があった。そのため、引っ張り動作による腕の伸縮が難しかったことが考えられる。今後、腕を伸縮させる速度についての検討や、引っ張り動作を行うときの力と速度を対応付けた腕の伸縮手法についての検討を行う。

身体所有感に関する質問 Q1~Q4 では、条件 B と条件 C・条件 D の間に有意差が見られたことから、腕の引っ張り動作や Go-Go Interaction 法はコントローラのボタン押下よりも伸縮する腕に対して身体所有感を誘発しやすいことが示唆された。一方で、Q1 のみで条件 B と条件 D の間に有意差が認められたことから、腕の引っ張り動作は Go-Go Interaction 法よりも伸縮する腕に対する身体所有感を誘発しにくい可能性がある。今後、身体所有感を強める引っ張り動作と腕の伸縮の対応付けの手法について検討する。

行為主体感に関する質問 Q5~Q8 の結果では、Q5 と Q7 において条件 B と条件 C・条件 D の間に有意差が見られたことから、引っ張り動作や Go-Go Interaction 法によってボタン押下よりも高い行為主体感を達成できたことが示唆された。

容姿に関する質問では、Q9 の結果のみ条件 A と条件 C の間に有意差が認められた。条件 D は中央値は条件 A・条件 B よりも高かったが、条件 C よりも低かった。他の腕の伸縮に関する質問 Q13 と Q15 では条件 D が条件 A・条件 B・条件 C より高いスコアを示したことから、本手法によって腕が伸縮していた感覚が生じていたことが考えられる。しかし、自身の身体の変化に関する質問において条件 D が条件 C よりもスコアが低かったことから、引っ張り動作による腕の伸縮は自身で腕の長さを制御している感覚によってユーザが自身の身体そのものが変化している感覚が弱くなった可能性がある。今後、本結果の要因について調査を行う。

腕の伸縮に関する質問 Q13-Q16 の結果から、本手法である条件 D が他の条件よりも腕の伸縮している感覚が強いことが示唆された。一方で、Go-Go Interaction 法やボタン押下による腕の伸縮との差は大きくないことが示されている。今後、本手法を評価するための実験デザインやタスクについて再度検討する。

6. むすび

本研究では、ユーザが引っ張り動作を用いてアバタの腕の伸縮を制御する手法を提案した。我々は、皮膚変形に基づいてジェスチャを認識する手法 [4] を引っ張り動作の検出に適用した。我々は反射型光センサを 4 個用いた皮膚変形計測デバイスを開発した。開発したデバイスから得られた

センサ値と引っ張り動作を機械学習することで、何もしていない状態と前方への引っ張り動作と後方への引っ張り動作を分類した。認識した引っ張り動作に基づき、アバタの腕の伸縮を制御した。

実験では、リーチングタスクにおいてタスク完了時間と身体化感覚に与える影響を検証した。コントローラのレイキャストを用いた選択手法・コントローラのボタンによる腕の伸縮を用いた選択手法・頭と手首の間の距離に基づく腕の伸縮を用いた選択手法・引っ張り動作による腕の伸縮を用いた選択手法での比較を行った。実験結果から、本手法により身体所有感・行為主体感・腕が伸縮する感覚を生起できる可能性が示されたが、自身の身体が変化する感覚は弱まる可能性が示唆された。今後、本実験から得られた知見を基に、本手法の改良と評価手法について検討する。

謝辞 本研究は、JSPS 科学研究費 (24K20823) の助成を受けて行われた。

参考文献

- [1] 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*, Vol. 7, No. 7, pp. 1–15, 07 2012.
- [2] Yilong Lin, Peng Zhang, Eyal Ofek, and Seungwoo Je. Armdeformation: Inducing the sensation of arm deformation in virtual reality using skin-stretching. In *Proceedings of the CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '24, pp. 1–18, 2024.
- [3] 中川航太郎, 井上康之, Harin Hapuarachchi, 杉本麻樹, 稲見昌彦, 北崎充晃. 伸長する腕に対する身体性の獲得: 伸長実装法による違い. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 27, No. 4, pp. 341–351, 2022.
- [4] Masa Ogata, Yuta Sugiura, Yasutoshi Makino, Masahiko Inami, and Michita Imai. Senskin: Adapting skin as a soft interface. In *Proceedings of the 26th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '13, p. 539–544, 2013.
- [5] Ivan Poupyrev, Mark Billinghurst, Suzanne Weghorst, and Tadao Ichikawa. The go-go interaction technique: non-linear mapping for direct manipulation in vr. In *Proceedings of the 9th annual ACM symposium on User interface software and technology*, pp. 79–80, 1996.
- [6] Daniel Roth and Marc Erich Latoschik. Construction of the virtual embodiment questionnaire (veq). *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 26, No. 12, pp. 3546–3556, 2020.