

腱振動刺激による運動錯覚を用いた VR用3自由度操作インタフェース（第2報） —力検出による操作と運動錯覚提示の統合—

田中 叡^{1,2,a)} 梶本 裕之^{1,b)}

概要：バーチャルリアリティ（VR）においてユーザの実際の運動を計測してアバタに反映するという現在主流の方式では、転倒の危険など様々な問題が生じる。そのため実際に身体を動かす必要のない VR システムが研究されており、中でも筆者らは固定された入力装置と腱振動刺激による運動錯覚現象を組み合わせたシステムを提案している。しかし以前の段階では運動錯覚の提示手法が未完成であったため、本稿では以前に提案された力検出によるアバタ操作に加え、アバタ上肢の運動のうち2自由度を、関節角速度に比例した加速度振幅の運動錯覚により提示するシステムを提案する。しかし提案システムを操作してもらう簡易的な予備実験を行った結果、運動錯覚の不安定さや不自然な感覚が示唆されたため、今後は運動錯覚提示手法のさらなる改良が必要である。

1. はじめに

バーチャルリアリティ（VR）における重要な要素の一つが、ユーザの入力によってアバタを操作するインタフェースである。しかし現在利用されている VR システムは、ユーザが実際に行った身体運動を計測してアバタに反映するのが大半である。この方式は極めて自然な運動感覚（自身の身体が動いている感覚）が得られるものの、転倒や衝突の危険など身体運動に伴う様々な問題が生じる。それを解決するため、実際に身体を動かさずともアバタを操作可能なインタフェースが研究されており、例えば望月らはユーザの身体を物理的に固定した状態で発揮される関節トルクを計測し、それに基づいたアバタ操作と感覚フィードバックを行うシステムを提案している [1]。

このような身体運動を必要としない VR を実現する試みの中で、筆者らは身体を固定した状態で力検出による操作を行うとともに、運動感覚を錯覚として提示するインタフェースを開発している [2], [3]。これは骨格筋の腱に対して経皮的に振動刺激を加えると当該の筋が伸長するような運動感覚が生じるという現象（腱振動刺激による運動錯覚）[4] を応用し、アバタの動きを錯覚として提示するものである。中でも筆者らの前稿 [3] では、身体を装置に固定す

ることによる不快感や煩雑さを避けるため、環境に固定されたジョイスティック状の装置による力入力によりアバタ上肢の3次元的な操作を行い、同時に運動錯覚の提示を行うシステムを提案している。しかし、前稿の段階では入力装置について述べたのみであり、運動錯覚の提示手法に関しては未完成であった。そこで本稿では前稿のシステムを拡張し、アバタ上肢の運動を腱振動刺激による運動錯覚によって提示するシステムについて述べる。

2. 提案手法

2.1 システム構成

提案するシステムの全体像を図1に示す。本システムは、環境（机など）に固定されたジョイスティック型の入力デバイスと、ユーザの身体に装着された4台の振動提示装置から構成される。システムの構成は図2のとおりである。

入力デバイスの構成は前稿 [3] と同一である。デバイスは3個のロードセルを組み込んだ台座と、ジンバル機構上に搭載されたスティック部から構成され、台座では3点で力を検出することで、計算によりスティック部にかかる並進力のX,Y,Z成分を求めることができる。またスティック部はジンバル機構により3次元的な回転を許すとともに、ポテンショメータにより姿勢を計測する。

運動錯覚の提示には、こちらも前項 [3] と同様のウェアラブル型振動刺激デバイスを用いる。本デバイスはボイスコイル型振動子（Vp408, アクウヴ・ラボ）を波形生成・

¹ 電気通信大学

² 東京大学

^{a)} tanaka@kaji-lab.jp

^{b)} kajimoto@kaji-lab.jp

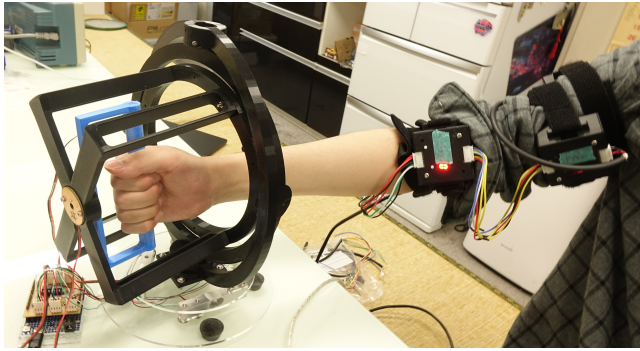


図 1 提案システムの全体図

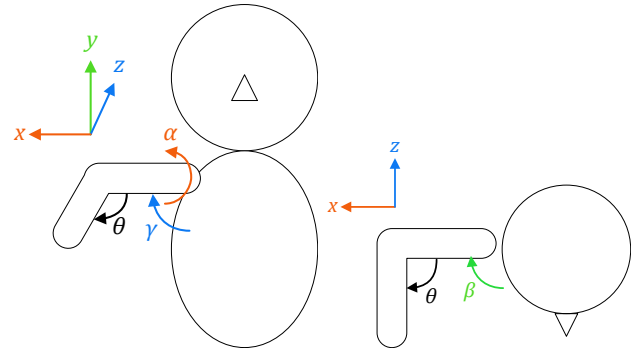


図 3 関節運動の定義

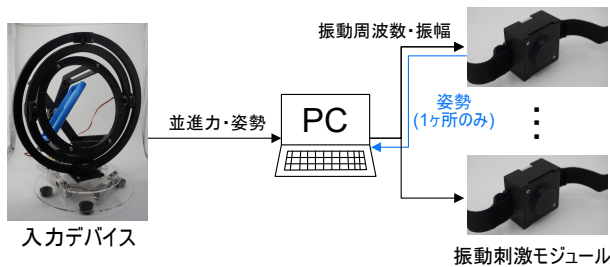


図 2 システム構成

駆動回路を一体化したものであり、PC からの RS-485 シリアル通信で指示された振幅・周波数で振動刺激を提示することができる。また加速度センサ・ジャイロセンサを搭載しており、Madgwick フィルタ [5] を用いて計測値を統合することで 3 次元的に姿勢推定が可能である。

2.2 力検出によるアバタ操作

入力デバイスで検出された力は仮想仕事の原理に基づいて、図 3 に示すアバタの関節トルク (肘関節の伸展・屈曲 θ 、肩関節の外旋・内旋 α および伸展・屈曲 β) に変換され、各関節はトルクに比例した角速度 (比例定数 $10.0 [\text{rad/s} \cdot \text{Nm}]$) で回転される。ただし関節角は $-\pi/2 \leq \theta, \alpha, \beta \leq \pi/2$ に制限される。手の回転はポテンショメータで検出されたスティックの角度をそのまま反映する。

ただし上肢は本来 7 自由度であり、手の位置と姿勢の 6 自由度が固定されている場合でも肘の上げ下げが可能であるため、ロードセルによる力検出とポテンショメータによる角度検出のみでは 7 自由度すべてを操作できない。そこで肩関節の外転・内転 (肘の上げ下げ) γ に関しては、振動提示デバイスの加速度・ジャイロセンサから推定された現実の姿勢を反映する。

アバタの姿勢は VR 用フレームワーク StereoKit を用いて描画される (図 4)。現時点では 2 次元の PC 画面に表示しているが、将来的にはヘッドマウントディスプレイ (HMD) の利用を予定している。

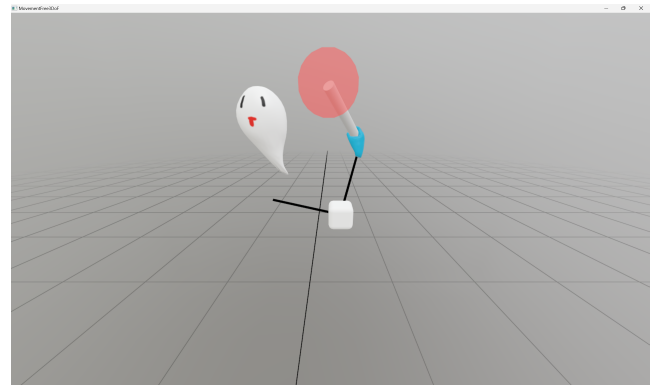


図 4 提示される映像

2.3 運動錯覚の提示

本システムでは振動子の装着や錯覚の制御に関する技術的な困難のため、肘と肩の屈曲・伸展という 2 自由度に限定して錯覚として提示する。そのため、振動提示装置は肘の運動に関与する上腕二頭筋 (biceps brachii, BB) と上腕三頭筋 (triceps brachii, TB)、肩の運動に関与する大胸筋 (pectoralis major, PM) と三角筋 (deltoid, D) という 2 対の筋の腱付近に計 4 台を装着する。

錯覚を提示する際は、対応する関節の角速度に比例した加速度振幅の振動で刺激を行う。具体的には、各筋の振動刺激デバイスに指令する加速度振幅は

$$A_{BB} = \begin{cases} 0 & (a\dot{\theta} < 0) \\ A_{\max} & (a\dot{\theta} > A_{\max}) \\ a\dot{\theta} & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (1)$$

$$A_{TB} = \begin{cases} 0 & (-a\dot{\theta} < 0) \\ A_{\max} & (-a\dot{\theta} > A_{\max}) \\ -a\dot{\theta} & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (2)$$

$$A_{PM} = \begin{cases} 0 & (a\dot{\beta} < 0) \\ A_{\max} & (a\dot{\beta} > A_{\max}) \\ a\dot{\beta} & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (3)$$

$$A_D = \begin{cases} 0 & (-a\dot{\beta} < 0) \\ A_{\max} & (-a\dot{\beta} > A_{\max}) \\ -a\dot{\beta} & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (4)$$

と表される。ただし $A_{\max}$ は最大振幅 5.0 [G], a は比例定数 3.0 [G · s/rad] である。

3. 予備実験

提案システムの実現可能性を確認するために実施した簡易的な予備実験を実施した。予備実験は 1 人の参加者にシステムを実際に操作してもらい、コメントを得るというものであった。その結果「腕を持ち上げるときは運動感覚があった」、すなわち運動錯覚は一時的には生じたものの常時得られたわけではなかったというコメントが得られ、運動錯覚が安定的に提示できていないことが示唆された。また、振動に伴う不自然な感覚などのため、実際に腕を動かしている感覚はあまり感じられないというコメントも得られた。

4. おわりに

本稿では、現在の VR においてユーザの身体が動くことによる様々な問題を解決すべく、前稿 [3] に引き続き、力入力によるアバタの操作と腱振動刺激による運動錯覚提示を統合した VR システムについて述べた。提案システムは自由な回転を許しながら 3 次元の力検出が可能な入力デバイスと、振動子や加速度・ジャイロセンサを内蔵した振動刺激デバイスから構成される。アバタの操作は検出された力を関節トルクに変換することで行い、不足する自由度には現実の姿勢を反映する。運動錯覚の提示は、関節の角速度に比例した加速度振幅の振動刺激によって行われる。システムの評価としては、現時点では 1 人の参加者による予備実験を行ったのみであり、運動錯覚の不安定さや感覚の不自然さが示唆されている。そのため、今後は運動錯覚の提示手法を改良し、安定的かつ自然な運動感覚の提示を目指す。また現時点では 3 自由度中の 2 自由度しか運動感覚を提示できないことなどの改善を行い、詳細な性能評価実

験も行っていく予定である。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 JP21J22873 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] 望月典樹, 中村壮亮: リアル身体での運動を伴わない身体没入型 VR インタフェース「Motion-Less VR」の提案と基礎検討, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 26, No. 1, pp. 76–85 (2021).
- [2] Tanaka, S., Ushiyama, K., Takahashi, A. and Kajimoto, H.: Movement-free virtual reality interface using kinesthetic illusion induced by tendon vibration, *Haptics: Science, Technology, Applications*, Lecture notes in computer science, Vol. 12272 LNCS, Springer International Publishing, Cham, pp. 316–324 (2020).
- [3] 田中 颯, 梶本裕之: 腱振動刺激による運動錯覚を用いた VR 用 3 自由度操作インタフェース, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, pp. 2P2–Q06 (2024).
- [4] Goodwin, G. M., McCloskey, D. I. and Matthews, P. B.: The contribution of muscle afferents to kinaesthesia shown by vibration induced illusions of movement and by the effects of paralysing joint afferents, *Brain*, Vol. 95, No. 4, pp. 705–748 (1972).
- [5] Madgwick, S. O. H., Harrison, A. J. L. and Vaidyanathan, A.: Estimation of IMU and MARG orientation using a gradient descent algorithm, *IEEE Int. Conf. Rehabil. Robot.*, Vol. 2011, p. 5975346 (2011).