



Motion-Less VR の研究：二軸性関節における 運動意図の取得に向けた基礎開発

Research on Motion-Less VR: Basic Development for the Acquisition of Motion Intention of Biaxial Joints

望月典樹, 中村壮亮

Noriki MOCHIZUKI, and Sousuke NAKAMURA

法政大学 理工学部 (〒 184-8584 東京都小金井市梶野町 3-7-2, hge@hosei.ac.jp)

概要: リアル身体での運動を必要としない身体没入型 VR システム「Motion-Less VR」は、身体固定状態における運動意図の取得と感覚情報の提示で実現される。先行研究では、システムのプロトタイプを行い、示指三関節の屈伸運動において一軸性の実装例を示した。本稿では、部位拡張に向けて、手首の掌背屈・橈尺屈運動の意図を取得する装置を開発し、二軸性関節における Motion-Less VR の実現可能性を検証する。

キーワード: Motion-Less VR, モーションインタフェース, 運動意図取得, 運動感覚提示

1. はじめに

VR (Virtual Reality) は、コンピュータで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り、VR システムは入力装置、シミュレータ、出力装置で構成される。

このとき、システムの現実感を高めるためには、リアル身体の代替であるバーチャル身体を、ユーザが自然かつ自由自在に動かせることが望ましい。そのためには、ユーザが出力する運動の意図を適切に取得し、その運動を実行した結果として、本来ユーザに入力されるであろう感覚情報を十分に提示する必要がある。

そこで、多くの VR システムでは、入力装置にモーションキャプチャを用いてリアル身体での運動の結果を取得し、運動に伴い体内で自然に生じる体性感覚や前庭感覚に加えて、出力装置に HMD (Head Mounted Display) を用いることで運動に応じたバーチャルな視覚情報を提示するという方式が採用されている。

しかしながら、入力装置にモーションキャプチャを用いる場合、リアル身体とバーチャル身体的位置や姿勢が一致することとなるため、バーチャル身体での運動はリアル身体で実行可能なものに制限される。例えば、リアル空間が狭い場合、広大なバーチャル空間を歩行動作のみでは移動することができない。

これに対して、Redirected Walking [1] と呼ばれる手法や Locomotion Interface [2] といった装置が提案されている。しかしながら、これらは依然としてリアル身体での運動を必要とするため、実行可能な動作は多少なりともリアル環境による制限を受ける。

一方、リアル身体での運動を伴わずに運動意図を取得する方法として、つもり制御 [3] や Brain Computer Interface [4] といった技術が存在する。しかしながら、何れも取得可能

な運動意図が限定的であるうえ、リアルタイム性に欠けるため、バーチャル身体での操作性は低いものと推察される。

これらを踏まえ著者らは、リアル身体での運動を必要としない身体没入型 VR システム「Motion-Less VR」を提案し、その実現を目指して研究を進めてきた [5] [6]。Motion-Less VR は、リアル身体での運動の抑制、力学に基づく運動意図の取得、運動意図に応じた感覚情報の提示の三機能からなる。なお、類似の研究として、リアル身体が固定された状態での発揮力をバーチャル身体での運動の角速度に対応させるとともに、視覚と振動刺激の提示を試みた事例 [7] がある。しかしながら、[7] では力学から乖離した方法で運動意図の解釈がなされているため、リアル身体と同等の操作性が担保できている可能性は低いと考える。

ここで、先行研究 [5] では Motion-Less VR の概念提案を行い、示指三関節の屈伸運動をもって一軸性の多関節運動の実装例を示した。そこで本稿では、部位拡張の一環として、手首の掌背屈運動および橈尺屈運動の意図を同時に取得する装置を開発し、二軸性関節における Motion-Less VR の実現可能性について基礎的な検証を行う。

2. 手首の Motion-Less VR を実現するシステム

2.1 運動の抑制および運動意図の取得

はじめに、手首における Motion-Less VR の実現に向けて、掌背屈・橈尺屈運動に関して、リアル身体での運動の抑制と運動意図の取得を行う装置を開発した。装置はハンドル、非回転式トルクセンサ、身体固定モジュールからなる。装置の構造を図 1 に示す。

ユーザは、装置後部から腕を通し、装置先端部にあるハンドルを把持する。このとき、手首の回転軸がトルクセンサの計測軸と同軸となるよう、ハンドルの位置調整を行う。

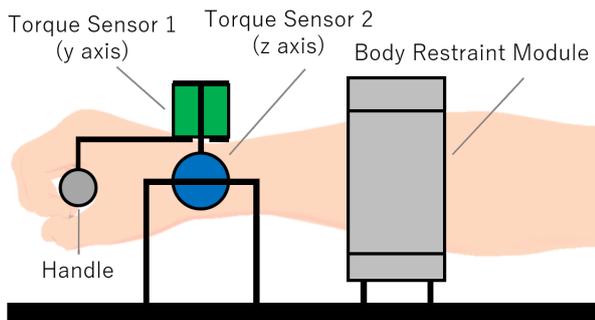


図 1: 開発した装置の構造

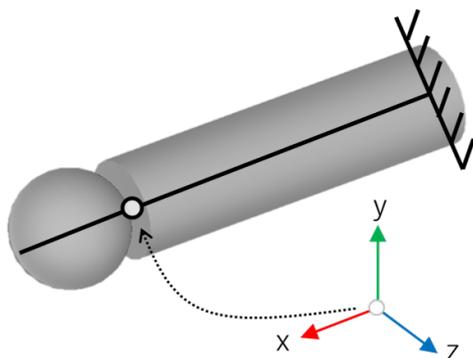


図 2: 手首の剛体リンクモデル

その後、前腕の上下左右より身体固定モジュールを押し当てる。これにより、手首と前腕の運動の抑制が実現される。また、その状態でユーザが発揮した掌背屈方向および撓尺屈方向の関節トルク（発揮トルク）は、非回転式トルクセンサ 1・2 にそれぞれ伝達され、センサインタフェースボードを介してコンピュータに取り込まれる。

2.2 運動シミュレーション

計測した発揮トルクは、剛体リンクモデルでの順動力学による運動のシミュレーションに用いる。モデルの形状は、図 2 の通り手首以降を球体で近似した簡易的なものとする。モデルの各パラメータを表 1 に示す。なお、回転座標系は、手首の中心を原点として、指先を水平に伸ばした状態で手首から指先に向かう方向を x 軸正方向、掌から手の甲に向かう方向を y 軸正方向、 xy 平面の法線方向（左手系）を z 軸正方向とする。

ここで、人体の関節には受動的な抵抗が存在し、力学において弾性と粘性で表現される。弾性は関節可動域の表現と運動の効率化、粘性は運動の安定化の役割をそれぞれ担っており、剛体リンクモデルにおける身体運動を考える上で欠かせないものである。

一般に、関節の弾性は式 1 に示す非線形関数で表現され [8]、粘性は線形関数の式 2 が用いられる [9]。そこで、剛体リンクモデルの関節にこれらの粘弾性特性を付与し、順動力学の計算を行う。なお、式 1 の係数 $k_1 - k_2$ は手首の弾性を実測した研究 [10] より、掌背屈および撓尺屈に対してそれぞれ設定する。また、式 2 の係数 c は、筋骨格モデルに基

表 1: 剛体リンクモデルのパラメータ

parameter	value
diameter of sphere [m]	0.04
mass [kg]	0.345
moment of inertia (y and z -axis) [kg/s^2]	6.71×10^4

表 2: 関節受動抵抗のパラメータ

coeff.	palmar/dorsal flexion	radil/ulnar flexion
k_1	2.8	3.9
k_2	1.1	-0.1
k_3	3.7	4.2
k_4	-1.2	-0.5
c	0.5	0.5

づく上肢の動作生成を試みた研究 [9] を参考に設定する。各係数の設定値を表 2 に示す。

$$T_K = e^{k_1(\theta - k_2)} - e^{k_3(k_4 - \theta)} \quad (1)$$

$$T_C = c\dot{\theta} \quad (2)$$

θ : 関節角度 [rad]

$\dot{\theta}$: 関節角速度 [rad/s]

2.3 運動意図に応じた感覚情報の提示

運動シミュレーションの結果はバーチャル身体手首にリアルタイムで反映し、その映像を HMD (Oculus Rift CV1, Facebook 社) を用いて視覚提示する。また同時に、手首の運動に関与する腱に対して振動刺激を与え、深部感覚への情報提示を試みる。

一般に、腱に対して振動刺激を提示することで、深部感覚にあたる筋紡錘の神経発火が促され、伸長方向への筋長変化にあたる信号が神経に入力されることが分かっている [11]。この現象に基づき、主導筋とは反対の筋に付随する腱に対して振動刺激を与え、運動感覚の提示を試みた事例がこれまでに多数報告されている [12] [13]。また、提示する振動の周波数と知覚される運動の角速度には、ある範囲において対応関係があることも知られている [14] [15]。

本稿では、手首の上下左右に振動子（バイプロトランスデューサ Vp210, Acoupe Laboratory 社）を取り付け、運動意図に応じた振動刺激を提示する。振動子の取り付け位置を図 3 に示す。また振動周波数は、尺屈運動について振動周波数と知覚角速度の関係を記録した研究 [15] を参考に、運動角速度に応じて式 3, 4 の関係でリアルタイムに切り替える。なお、式 3, 4 の係数 a は 11.5 とし、最大周波数 f_{max} は 100[Hz] に制限する。

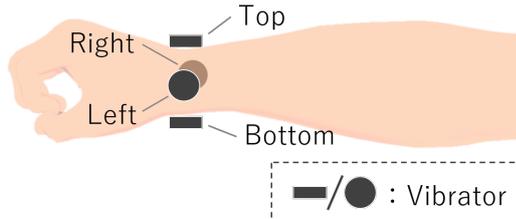


図 3: 振動子の取り付け位置

$$f_p, f_d = \begin{cases} f_{max}, 0 & (a\dot{\theta}_z \leq -f_{max}) \\ a\dot{\theta}_z, 0 & (-f_{max} < a\dot{\theta}_z < 0) \\ 0, 0 & (a\dot{\theta}_z = 0) \\ 0, a\dot{\theta}_z & (0 < a\dot{\theta}_z < f_{max}) \\ 0, f_{max} & (f_{max} \leq a\dot{\theta}_z) \end{cases} \quad (3)$$

$$f_r, f_u = \begin{cases} f_{max}, 0 & (a\dot{\theta}_y \leq -f_{max}) \\ a\dot{\theta}_y, 0 & (-f_{max} < a\dot{\theta}_y < 0) \\ 0, 0 & (a\dot{\theta}_y = 0) \\ 0, a\dot{\theta}_y & (0 < a\dot{\theta}_y < f_{max}) \\ 0, f_{max} & (f_{max} \leq a\dot{\theta}_y) \end{cases} \quad (4)$$

- $\dot{\theta}_z$: バーチャル身体手首の掌背屈運動の角速度 [rad/s]
- $\dot{\theta}_y$: バーチャル身体手首の撓尺屈運動の角速度 [rad/s]
- f_p : 手首上部の振動子の周波数 [Hz]
- f_d : 手首下部の振動子の周波数 [Hz]
- f_r : 手首右部の振動子の周波数 [Hz]
- f_u : 手首左部の振動子の周波数 [Hz]

3. 基礎実験

手首における Motion-Less VR の実現可能性を検証するために、開発したシステムを用いて操作性に関する基礎的な実験を行った。

3.1 実験タスク

実験では、HMD を介して視覚提示される目標線に、手の姿勢を追従させるタスクを課した。目標線は、関節可動域の中間姿勢 p_0 を開始姿勢として、掌背屈と撓尺屈を組み合わせた四種類の姿勢 (p_1, p_2, p_3, p_4) にそれぞれ 3 秒間かけて到達するように、手首を中心に回転させた。各姿勢の詳細を表 3 に示す。なお、到達順は p_1, p_2, p_3, p_4 とし、 p_4 へ到達した後は p_0 へ戻るものとした。また、実験ではバーチャル身体手首の姿勢を示す目印を表示した。実験タスクのイメージを図 4 に示す。

3.2 実験結果・考察

初期検討として、被験者 1 名に対して 1 回実験を行った。操作性の指標として、目標線とバーチャル身体手首それぞれの x 軸の単位方向ベクトルを記録した結果を図 5 に示す。

表 3: 目標線の姿勢 [deg]

posture	palmar/dorsal flexion	radil/ulnar flexion
p_0	-5.00	-15.0
p_1	50.0	-25.0
p_2	-55.0	-25.0
p_3	-55.0	10.0
p_4	50.0	10.0

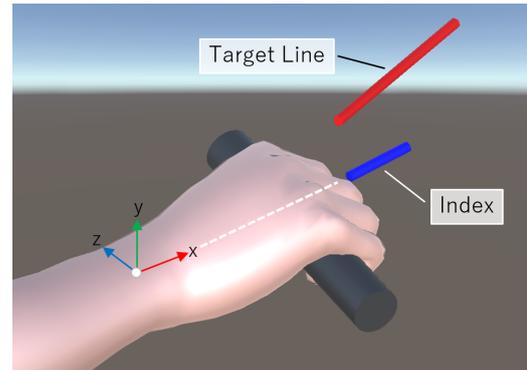


図 4: 実験タスクのイメージ

図 5 より、目標線に対してバーチャル身体手首の姿勢をある程度追従させることができていることが確認できる。一方で、バーチャル身体の姿勢変化は、目標線の動きと比較して振動を含んでいることも見て取れる。この原因として、運動シミュレーションにおいて、関節に付与した粘弾性のパラメータが適切でないことが考えられる。

また、実験終了後に被験者に感想を聞いたところ、「概ね意図通りに動かすことができた」「自分の身体が動いている感覚があった」との回答があった。これらについては、実験タスクや評価指標の精査をしたのち、被験者を増やしての実験を行い、検証していく必要がある。

4. おわりに

本稿では、リアル身体での運動を必要としない身体没入型 VR システム「Motion-Less VR」の部位拡張に向けて、手首における掌背屈・撓尺屈運動の意図を取得する装置を開発し、取得した運動意図に応じて視覚と腱振動刺激を提示するシステムを構築した。システムの操作性を評価するための基礎的な実験として、バーチャル身体手首での目標追従タスクを実施したところ、ある程度の追従性能が確認され、二軸性関節における Motion-Less VR の実現可能性が示唆された。今後は実験内容の精査を行い、厳密な評価を実施していく予定である。

参考文献

- [1] S. Razzaque, Z. Kohn and M. C. Whitton. "Redirected walking. In Proceedings of EUROGRAPHICS", Vol. 9, pp. 105-106, Manchester, UK, 2001.

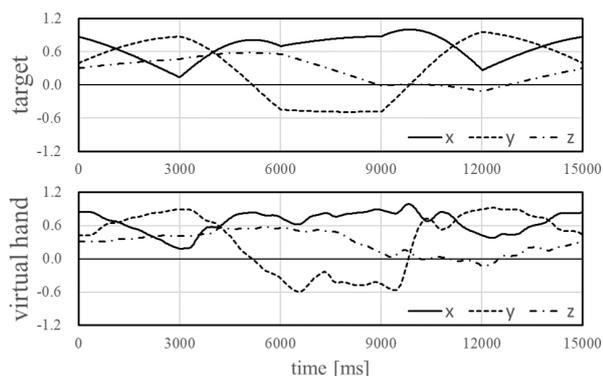


図 5: 追従タスクの実験結果

- [2] R. Darken, W. Cockayne and D. Carmein, "The Omni-directional Treadmill: A Locomotion Device for Virtual Worlds", Proceedings of UIST'97, 1997.
- [3] M. Niwa, S. Okada, S. Sakaguchi, K. Azuma, H. Iizuka, sH. Ando and T. Maeda, "Detection and Transmission of "Tsumori": an Archetype of Behavioral Intention in Controlling a Humannoid Robot, Proceedings of 20th International Conference on Artificial Reality and Telexistence (ICAT2010), pp. 1-3, December, 2010, Adelaide, Australia.
- [4] G. Pfurtscheller, C. Neuper, C. Guger, W. Harkman, H. Ramoser, A. Schlögl, B. Obermaier and M. Pregegnier, "Current trends in Graz braincomputer interface (BCI) research.", IEEE T Rehabil Eng, Vol. 8, pp. 216-219, 2000.
- [5] 望月 典樹, 中村 壮亮, "Motion-Less VR: リアル身体の運動を必要としない全身没入型 VR インタフェース", 第 24 回日本バーチャルリアリティ学会大会, 6B-09, 2019.9, 東京.
- [6] N. Mochizuki, S. Nakamura, "Development of Immersive VR Interface of Finger Motion without Restriction of Real Environment", The 2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2019), WePS2.69, 2019.
- [7] 田中 叡, 牛山 奎悟, 高橋 哲史, 梶本 裕之, "腱振動刺激による運動錯覚を用いた動かないハプティックインタフェース (第 2 報) —心理実験による評価", 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2020.
- [8] D.T. Davy, M.L. Audu, "A dynamic optimization technique for predicting muscle forces in the swing phase of gait", Journal of Biomechanics, Vol. 20, Issue 2, pp. 187-201, 1987.
- [9] 荻原 直道, 山崎 信寿, "身体の構造制約に基づく自然な上肢リーチング動作の生成", 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 67, No. 659, pp. 2314-2320, 2001.
- [10] 山崎 信寿, 田中 隆之, "関節の抵抗特性を模擬したダミー骨格", バイオメカニズム, Vol. 18, pp. 175-185, 2006.
- [11] G. M. Goodwin, D. I. McCloskey, P. B. Matthews, "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.
- [12] E. Tidoni, G. Fusco, D. Leonardis, A. Frisoli, M. Bergamasco and S M. Aglioti, "Illusory movements induced by tendon vibration in right- and left-handed people", Exp Brain Res 233, pp. 375-383, 2015.
- [13] D. Hagimori, S. Yoshimoto, N. Sakata and K. Kiyokawa, "Tendon Vibration Increases Vision-induced Kinesthetic Illusions in a Virtual Environment", 2019 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR), pp. 952-953, 2019.
- [14] J. P. Roll, J. P. Vedel, and E. Ribot, "Alteration of proprioceptive messages induced by tendon vibration in man: a microneurographic study", Exp. Brain Res., Vol. 76, No. 1, pp. 213-222, Jun., 1989.
- [15] C. Blanchard, R. Roll, J. P. Roll, A. Kavounoudias, "Differential Contributions of Vision, Touch and Muscle Proprioception to the Coding of Hand Movements", PLoS One, Vol. 8, No. 4, pp. 1-11, 2013.