



Motion-Less VR の研究： 五指・多自由度運動の実現に向けた基礎開発

Research on Motion-Less VR: Basic Development for the Realization of Five-Finger, Multi-DOF Motion

望月典樹¹⁾

Noriki MOCHIZUKI

1) 日本工業大学 先進工学部 (〒 345-8501 埼玉県南埼玉郡宮代町学園台 4-1, mochizuki.noriki@nit.ac.jp)

概要: Motion-Less VR は、実身体の運動を必要としない VR システムである。このシステムでは、固定された実身体の関節トルクを計測し、動力学に基づいてバーチャル身体の運動を生成したうえで、その結果を感覚器にフィードバックする。これにより、実環境による空間的・物理的な制約を受けずにバーチャル身体の操作が可能となる。本研究では、実身体に近い多自由度の手指運動を実現するため、全手指を対象に屈伸・内外転運動を可能とする装置の開発を行う。

キーワード: モーションレス VR, 手指運動, 運動意図取得, センシング

1. はじめに

VR (Virtual Reality) の現実感を高めるためには、バーチャル環境からの力覚提示が不可欠であり、そのために力覚ディスプレイが開発されている。力覚ディスプレイの方式は、再現する現象に応じて「環境再現型」と「姿勢再現型」に大別される [1]。環境再現型は、バーチャル環境で接触する対象の形状を実環境に再現する、または接触時に対象の形状に対応する位置に接触子を移動させることで、身体に反力を提示する方式である。この方式では、実物体に接触することで自然な力覚が再現されるが、表現可能な形状には限界がある。また姿勢再現型は、バーチャル物体に接触した際の姿勢を再現するように身体に外力を加える方式である。この方式では、形状の表現力は高いものの、力覚を提示できる部位は限定的である。さらに、姿勢再現型は「接地型」と「非接地型」に分類される。接地型は重量に制限がないため、大型のアクチュエータによる力覚提示が可能であるが、装置の位置が固定されるため、身体移動や大きな姿勢変更は制限される。一方、非接地型は装置を身に纏うことができ、移動や姿勢変更が自由に行えるものの、身体を完全に停止させるほどの力を提示する装置は重くなり、装着が困難である。これらの力覚ディスプレイはどれも、図 1 の例のように、動いている身体を停止させる方向に力を加えることで力覚を提示する。

一方、外部刺激によって動いていない身体に運動感覚が生じる現象 (運動錯覚) について、近年活発に研究が行われている [2, 3]。また、著者は実身体を固定した状態で動かそうとした際の関節トルクを運動意図として取得し、本来発生するはずだった運動を力学シミュレーションにより生成することでバーチャル身体を操作する Motion-Less VR システム (以降, ML システム) を提案している [4, 5]。した

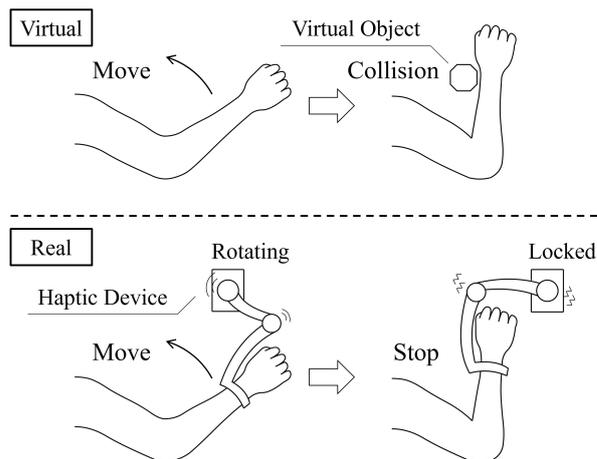


図 1: Current VR presents haptic feedback by stopping a moving body.

がって、ML システムに運動錯覚を取り入れることで、身体運動を伴わずにバーチャル身体を動かし、その動きに応じた運動感覚がフィードバックされるシステムを実現できると考えられる。その場合、図 2 のように、止まっている身体を動かす方向に刺激を提示することによって、その強弱から力覚表現が可能になると考えられる。これにより、バーチャル身体の移動や姿勢変更が自由に行えるとともに、表現力の高い力覚提示を実現できる可能性がある。

ここで、バーチャル環境内の物体との相互作用において上肢が担う役割は大きい。特に手指は、物を掴む、押す、引く、回すといった基本的な動作の基盤となっており、これらの動作を正確かつ自然に実行できることは、現実感の高い VR システムの実現において重要である。そこで、ML システムに運動錯覚を取り入れることによる力覚表現の実現も

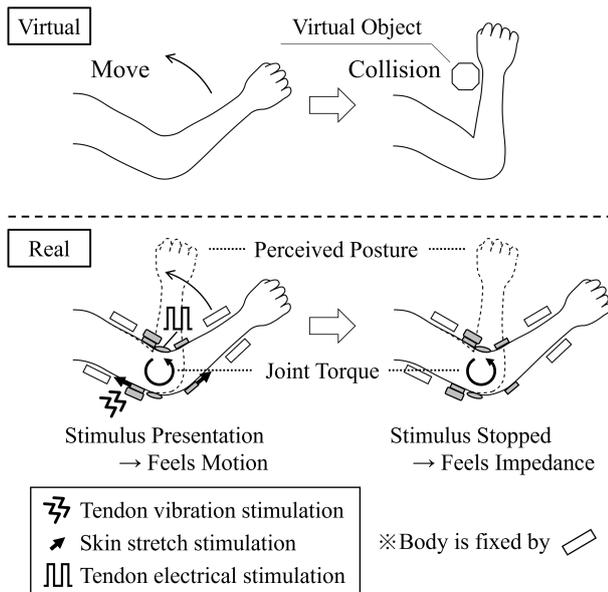


図2: Motion-Less VR presents haptic feedback by stopping the stimulus.

視野に入れ、本研究では手指に焦点を絞り、五指の屈伸・内外転運動を実現する ML システムの開発を行う。

2. 開発システム

ML システムは、機械的な固定による実身体の運動の抑制、関節トルクの計測による運動意図の取得、力学シミュレーションによるバーチャル身体の運動の生成、バーチャル身体の運動に応じた感覚情報の提示といった機能で構成される。

2.1 運動の抑制

まず、手指の運動を抑制するために五指を機械的に固定する。この時、各指節を手動で固定とした場合、その作業に時間を要する上、自身で両手を固定することができなくなる。そのため、固定状態と解放状態を自動的に切り替え可能であることが望ましい。加えて、指節の太さには個人差があるため寸法を調節できる必要がある。さらに、手指は可動部位が密集しているため固定機構は小型であることが求められる。

そこで本研究では、熱可塑性樹脂の状態変化を用いた固定機構によりこれらを実現する。固定機構の構造図を図3に示す。固定機構は熱可塑性樹脂、ヒーター、圧縮ばね、シリンダ、ピストン、ロッド、コンタクトで構成される。シリンダ内部は圧縮ばねに纏わりつくように熱可塑性樹脂が充填されている。熱可塑性樹脂が、シリンダ末端に取り付けられたヒーターにより加熱されて一定の温度を超えると、ピストンが圧縮ばねから力を受けてロッドが押し出される。この状態で、コンタクトを指節に押し当てると太さに応じて圧縮ばねの長さが決まり、シリンダの冷却により熱可塑性樹脂が凝固することで固定される。なお、熱可塑性樹脂には常温で凝固、60℃付近で融解するポリカプロラクトン (TPCL-100A, 株式会社ティーファブワークス社) を用い

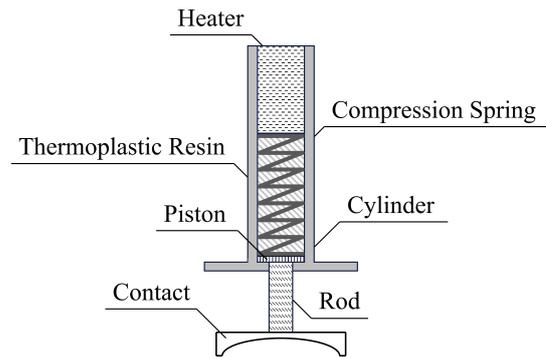


図3: Structure of fixation mechanism using thermoplastic resin.

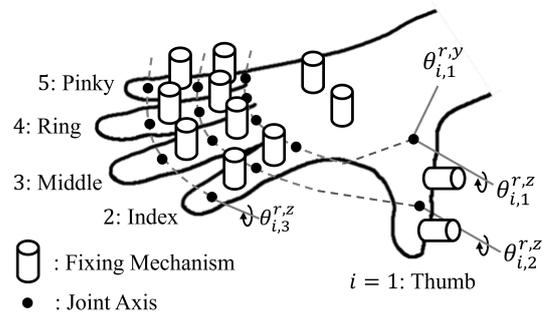


図4: Layout of the fixing mechanism and definition of joint axis.

る。また、シリンダはアルミ (A2017) とし、ピストンおよびロッドは熱伝導率の低いステンレス (SUS304) とすることで、人体まで熱が伝わりにくいよう工夫を施す。

ここで、固定機構の配置を図4に示す。本研究では、示指・中指・薬指・小指の基節と中節の上面、母指の基節と末節の上面、および手背に固定機構を配置する。また、指腹および手掌は常時装置に接触している状態とする。これにより、PIP 関節および MP 関節の屈伸運動を抑制する。なお、MP 関節の内外転運動については、固定機構から受ける力により生じる摩擦力によって抑制することとする。また、DIP 関節は PIP 関節の動作と概ね連動するため、固定しないものとする。

2.2 運動意図の取得

ML システムでは、運動意図として関節トルクを計測して用いる。このとき、計測に用いられるトルクセンサは関節トルクが発生する軸上に配置する必要がある。しかしながら、中指と薬指の MP 関節の屈伸軸は表面に露出していない。そこで、屈伸軸周りの関節トルク $\tau_{i,j}^{r,z}$ (i : 指を表す番号, j : 指節・関節を表す番号) については圧力センサ (FSR400 SHORT, Interlink Electronics 社) を各節の指腹および指背に配置し、式1より力からトルクを計算する方法で得る。センサの配置を図5に示す。

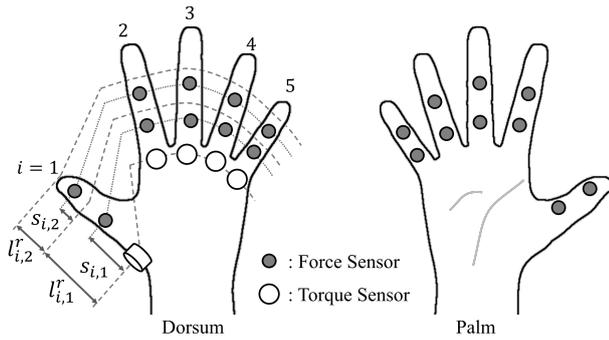


図 5: Layout of sensors and definition of dimensions.

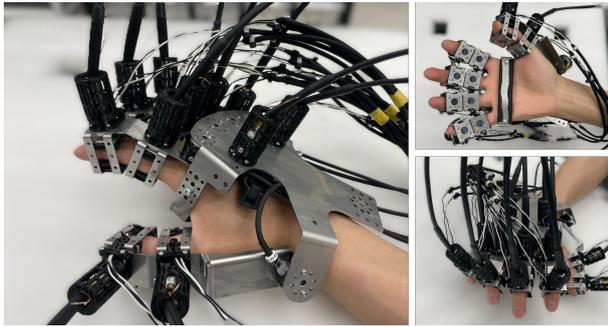


図 6: Appearance of the developed device.

$$\begin{aligned} T_{i,1}^{r,z} &= F_{i,1}s_{i,1} + F_{i,2} \cos \theta_{i,2}^r (l_{i,1}^r + s_{i,2} \cos \theta_{i,2}^r) \\ T_{i,2}^{r,z} &= F_{i,2}s_{i,2} \end{aligned} \quad (1)$$

なお、各節の角度（指を伸ばした状態を 0deg）および長さを変数とする。図 4、図 5 の通り定義し、各変数の値は装置の設計値とする。また、内外軸周りの関節トルク $\tau_{i,j}^{y,r}$ については、親指は CM 関節軸上、その他は MP 関節軸上の何れも手背側にトルクセンサ（歪みゲージ BF350-3HA を使用して 4 ゲージ法で製作）を設置して得る。

ここで、末節に圧力センサを配置していない理由は前節と同様である。なお、センサからの信号は増幅回路および AD コンバータを介してコンピュータに取り込む。各センサは一定の力やトルクを加えた際の電圧を測定して校正する。

開発した装置の外観を図 6 に示す。装置により運動を抑制しつつ、運動意図を取得することが可能となる。

2.3 運動の生成

計測された関節トルク $\tau_{i,j}^r$ を基に、指を模した剛体リンクモデルにおいて順動力学を計算することでバーチャル身体の運動を生成する。このとき、モデル各部の長さ $l_{i,j}^v$ は平均値 [6] とし、質量 $m_{i,j}$ ・慣性モーメント $I_{i,j}$ ・重心 $G_{i,j}$ については違和感が少なくなるよう実験的に調節した値を用いる。また、モデルの各関節には、先行研究 [4] と同様に粘弾性を付与し、 $\tau_{i,j}^r$ より粘弾性トルク $\tau_{i,j}^k \cdot \tau_{i,j}^c$ を差し引いたバーチャル身体の関節トルク $\tau_{i,j}^v$ から、バーチャル身体の関節角度 $\theta_{i,j}^v$ を求める。なお、回転可能な関節軸以外は位

置関係が変化しないように固定とする。物理演算は 3D ゲーム開発環境 Unity 搭載の物理エンジンで行い、力学計算の時間刻み幅は 2.5[ms]、重力の影響を受けるものとする。

2.4 感覚情報の提示

バーチャル身体の運動の結果は HMD (Meta Quest 2, Meta 社) を用いて視覚提示する。このとき、映像の生成には物理演算と同様に Unity を用いる。なお、将来的には皮膚伸長刺激や腱振動刺激による運動感覚提示、腱電気刺激による力覚提示、指先への振動刺激による触覚提示の機能を組み込むこととする。

3. 評価実験

開発したシステムの動作を確認するために、1 名の被験者に対して 2 種類の評価実験を行う。

3.1 評価実験 1：各指の独立操作

まず、装置を装着した状態で各指をそれぞれ独立に操作できるか確認する。実験者は屈曲させる指を指示し、被験者は指示通りに固定された指に力を入れる。発揮した力に応じてバーチャル身体が動くため、その様子を録画する。

3.2 評価実験 2：各指の同時操作

続いて、装置を装着した状態で複数の指を同時に操作することが可能であるか確認した。実験者はグー・チョキ・パーの形式で手指の形状を指示し、被験者は指示された形状になるよう固定された各指に力を入れる。実験 1 と同様に、発揮した力に応じてバーチャル身体が動くため、その様子を録画する。

4. おわりに

本研究では、五指の屈伸・内外軸運動を実現する Motion-Less VR システムの開発を行った。今後は評価実験によりバーチャル身体各指の独立操作および同時操作が可能か確認したうえで、運動感覚を提示する機能を組み込み、力覚表現の実現可能性について、バーチャル物体の把持などの動作により検証を行っていく予定である。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 JP24K17244 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] 梶本裕之：触覚・力覚ディスプレイ，知能と情報，Vol. 19, No. 4, pp. 326–332, 2007.
- [2] G. M. Goodwin, D. I. McCloskey, and P. B. C. Matthews: Proprioceptive illusions induced by muscle vibration: contribution by muscle spindles to perception?, Science, Vol. 175, No. 4028, pp. 1382–1384, 1972.
- [3] D. F. Collins, K. M. Refshauge, G. Todd, and S. C. Gandevia: Cutaneous receptors contribute to kinaesthesia at the index finger, elbow, and knee, Journal of Neurophysiology, Vol. 94, No. 3, pp. 1699–1706, 2005.

- [4] 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.
- [5] 望月典樹, 今永尚志, 中村壮亮:Motion-Less VR の研究: 上肢 2 自由度運動を可能とするシステムの開発と基礎評価, 計測自動制御学会論文集, Vol. 57, No. 9, pp. 418-420, 2021.
- [6] 人体寸法データベース 1991-92, AIST, <https://www.airc.aist.go.jp/dhrt/91-92/data/list.html>