

### Motion-Less VRの研究：リアル・バーチャル身体間の姿勢相違を考慮したアバター制御手法の検討

今永, 尚志 / IMANAGA, Takashi

---

(出版者 / Publisher)

法政大学大学院理工学研究科

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

法政大学大学院紀要. 理工学研究科編

(巻 / Volume)

63

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

5

(発行年 / Year)

2022-03-24

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00025316>

# Motion-Less VR の研究： リアル・バーチャル身体間の姿勢相違を考慮した アバター制御手法の検討

Reserch on Motion-Less VR: A Study of Avatar Control Method  
Considering Posture Difference Between Real and Virtual Bodies

今永尚志

Takashi IMANAGA

指導教員 中村壮亮

法政大学大学院理工学研究科電気電子工学専攻修士課程

In conventional VR systems, the movements of the real body are directly reflected in the movements of the virtual body, so the movements of the virtual body are limited to those that can be performed by the real body. In contrast to this, a VR system called “Motion-Less VR” has been proposed to realize free movement of the virtual body without moving the real body. However, in Motion-Less VR, the joint torque depends on the fixed posture, which is different from the motion intention that the user originally wants to output.

In order to solve the problem, this paper proposes a method to control the virtual body by performing muscle contraction as in normal conditions, independent of the fixed posture, and conducts evaluation experiments of the method.

**Key Words** : virtual reality, motion interface, motion intention, EMG measurement

## 1. 序論

従来の VR システムでは、リアル身体での運動をそのままバーチャル身体の動きに反映させるため、バーチャル身体の動作はリアル身体で実行可能なものに限られる。これに対して著者らは、リアル身体を動かすことなくバーチャル身体での自由な運動を実現する「Motion-Less VR」というシステムを提案している [1][2]。Motion-Less VR では、リアル身体を機械的に固定し、固定された状態において運動を実行しようとした際に生じる関節トルク計測し、関節に粘弾性を付与した剛体リンクモデルでの順動力学計算により、バーチャル身体の運動を生成する。またバーチャル身体の運動の結果は HMD (Head Mounted Display) より視覚フィードバックされる。Motion-Less VR の概念図を Fig.1 に示す。

先行研究 [2] では、上肢 2 自由度運動を実現するシステムを開発し、バーチャル身体の操作性に関する基礎的な評価を行った。しかしながら、バーチャル身体の一定の運動性能は確認されたものの、通常の身体と同等の運動性能までは至らなかった。この原因の一つとして、リアルの身体が固定されていることが考えられる。

ここで運動とは、脳からの運動指令が筋肉に伝わり、筋肉が収縮することで実行される。そして筋収縮に伴

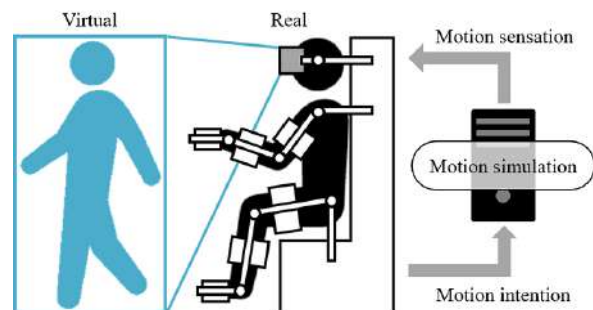


Fig. 1 Concept of the “Motion-Less VR”

い生じた筋張力により、関節にはトルクが発生して身体的位置変化として現れる。したがって、身体が固定されている場合、バーチャル身体で任意の位置まで身体を動かそうとしても、固定されているリアルの身体位置からの運動指令となっているため、ユーザの想定した動きとは異なると考えられる。また関節トルクが身体姿勢に依存して変化するため、身体固定時と開放時では関節トルクが異なる。これらの要因から、現在の Motion-Less VR では、バーチャル身体の運動は本来の運動とは意図通りにならないと考えられる。身体が固定されたことによる運動指令の変化は、身体固定により生じた感覚フィードバックを減らす、または、筋

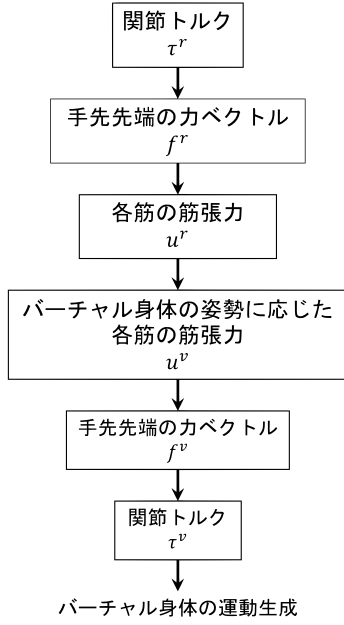


Fig. 2 Torque convert flow

収縮とバーチャル身体の操作の対応を学習により紐づけることで考慮することができる。関節トルクの姿勢依存を考慮するためには、リアル身体で得られた関節トルクをバーチャル身体の姿勢に応じた関節トルクに変換する必要がある。

そこで本研究では、関節トルクの姿勢依存を考慮することに着目し、通常的身體同様の筋収縮を行い、バーチャル身体の制御手法を提案し、Motion-Less VRの操作性能の向上を目指す。

## 2. 提案手法

### (1) 姿勢変換手法の流れ

リアル身体で得られた関節トルクをバーチャル身体の姿勢に応じた関節トルクに変換するために、関節トルクのもとになる筋収縮で発生する筋張力を媒介として、関節トルクの変換を行う。関節トルクの変換の流れをFig.2に示す。

最初にトルクセンサによって得られた関節トルク（運動意図）を、固定された身体姿勢にもとづいてヤコビ行列を用いて手先の先端の力ベクトルとする。次に手先先端の力ベクトルから3対6筋モデル[3]に基づいて各筋の筋張力を算出する。得られた各筋の筋張力をバーチャル身体の姿勢に応じて回転させたもとの、バーチャル身体の姿勢に応じた各筋の筋張力として扱う。そして各筋の筋張力を合計したものを力ベクトルとし、ヤコビ行列を用いて得られたトルクをバーチャル身体の動力学計算に用いる。

### (2) 各筋の筋張力の推定

力ベクトルから各筋の筋張力の推定方法について具体的に説明する。最初に得られた力ベクトルをFig.3出

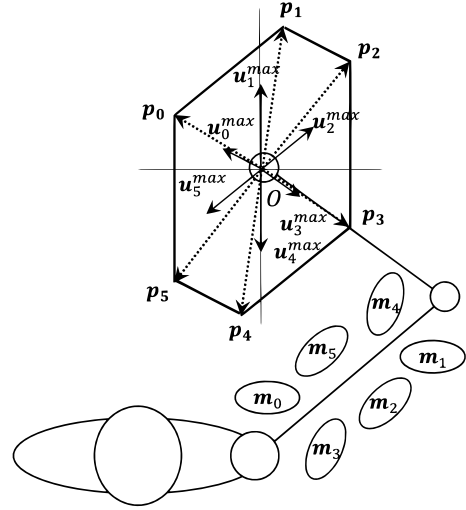


Fig. 3 Output distribution

力分布[4]上にプロットすると、力ベクトルは式(1)で表現される。

$$\begin{aligned}
 \mathbf{f}^r &= s\mathbf{p}_b^r + t\mathbf{p}_c^r \\
 b &= (a + 1) \bmod 6 \\
 c &= (a + 2) \bmod 6 \\
 (0 \leq s) \cap (0 \leq t)
 \end{aligned} \tag{1}$$

式(1)を満たす $a$ を求めることで、力ベクトルが出力分布のどの領域に属するのかが判定することができる。

続いて、得られた力ベクトル $\mathbf{f}^r$ を延長して、出力分布と交差したベクトルを $\mathbf{f}^r$ とする。 $\mathbf{p}_b^r, \mathbf{p}_c^r, \mathbf{f}^r, \mathbf{f}^r$ からユーザが発揮した各筋の収縮力ベクトル $\mathbf{u}_a^r \sim \mathbf{u}_f^r$ を求めると式(2)となる。

$$\begin{aligned}
 \mathbf{u}_a^r &= \frac{|\mathbf{f}^r - \mathbf{p}_c^r|}{|\mathbf{p}_c^r - \mathbf{p}_b^r|} \times \frac{|\mathbf{f}^r|}{|\mathbf{f}^r|} \times \mathbf{u}_a^{\max} \\
 \mathbf{u}_b^r &= \frac{|\mathbf{f}^r|}{|\mathbf{f}^r|} \times \mathbf{u}_b^{\max} \\
 \mathbf{u}_c^r &= \frac{|\mathbf{f}^r|}{|\mathbf{f}^r|} \times \mathbf{u}_c^{\max} \\
 \mathbf{u}_d^r &= \frac{|\mathbf{f}^r - \mathbf{p}_c^r|}{|\mathbf{p}_c^r - \mathbf{p}_b^r|} \times \frac{|\mathbf{f}^r|}{|\mathbf{f}^r|} \times \mathbf{u}_d^{\max} \\
 \mathbf{u}_e^r &= \mathbf{u}_f^r = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{2}$$

以上で算出された各筋の筋張力をもとにトルク変換を行う。

## 3. 出力分布の測定

出力分布は被験者の筋力によって異なる。したがって、先述したトルク変換手法の評価実験の予備実験として、各筋の筋張力を推定する際に使用する出力分布を被験者ごとに測定する必要がある。

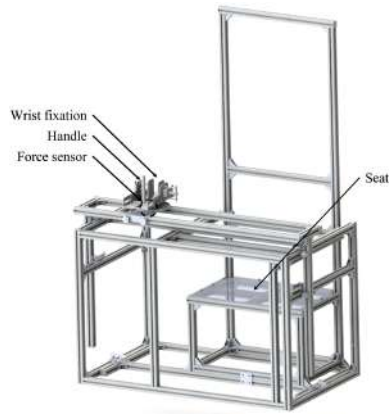


Fig. 4 Output distribution measurement device

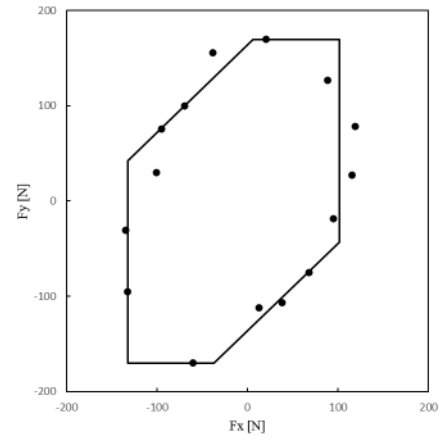


Fig. 5 Output distribution measurement

### (1) 実験システム

出力分布を測定するために、リアル身体の機械的な固定と手先先端にかかる力の計測を同時に実現する装置を開発した。開発した装置の外観を Fig.4 に示す。装置は大きく着座部、手首固定部、ハンドルで構成されており、手首固定部の下部には、3 軸力覚センサ (F3G-500N, Forsentek Co.) が配置されている。手先先端にかかる力の計測には、被験者ハンドルを握り、ハンドルに力が加えられる。そしてハンドルに加えられた力は手首固定部を伝わり、3 軸力覚センサに加えられ、力を計測する。また身体固定の姿勢を変更可能とするため、手首固定部は回転し、高さ調節および手首固定部の位置が可変構造となっている。

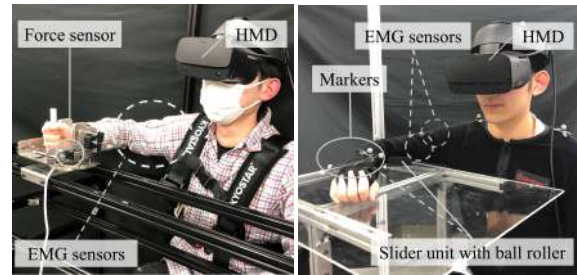
### (2) 実験方法

最初に被験者の肩、肘の角度をそれぞれ 0 [deg], 90 [deg] となるように固定する。次に被験者は任意の方向に手先の最大発揮を行い、力センサで得られた値を xy 平面にプロットする。そして大域的アルゴリズムの bashin hopping 法を用いることで式 (3) に示す出力分布の特性を備えた六角形を算出する。測定する任意の方向は Table1 に示す。

$$\begin{aligned}
 u_0^{max} + u_3^{max} &= |p_1 - p_2| = |p_4 - p_5| \\
 u_1^{max} + u_4^{max} &= |p_2 - p_3| = |p_5 - p_0| \\
 u_2^{max} + u_5^{max} &= |p_3 - p_4| = |p_0 - p_1| \\
 &|p_1 - p_2| \quad || \quad |p_4 - p_5| \\
 &|p_2 - p_3| \quad || \quad |p_5 - p_0| \\
 &|p_3 - p_4| \quad || \quad |p_0 - p_1|
 \end{aligned} \tag{3}$$

### (3) 結果

実験は被験者 4 名に対して行った。測定した力ベクトルと作成した出力分布の一例を Fig.5 に示す。Fig.5 の点は計測した力ベクトルを表す点、実線は計測して得られた出力分布を表す。



(a) ML condition

(b) MC condition

Fig. 6 Environment for each condition

## 4. トルク変換手法評価実験

前項の得られた出力分布をもとにトルク変換手法を組み込み評価実験を行う。比較として、通常の運動、従来の Motion-Less VR およびトルク変換手法を組み込んだ Motion-Less VR の 3 条件において、同一のタスクを課し、タスク中の表面筋電位を測定し、比較した。

### (1) 実験システム

Motion-Less VR を実現するために、実験では身体の機械的な固定と力ベクトルの計測を同時に行うことができる出力分布測定装置を用いた。従来の Motion-Less VR は関節トルクを測定し、そのままバーチャル身体の入力トルクとした。しかしながら出力分布測定装置で得られる力ベクトルであるため、バーチャル身体に入力するトルクは測定された力ベクトルとヤコビ行列の積によって計算されたものを使用した。また通常の運動を表現するためにモーションキャプチャを用いて、リアル身体の運動をバーチャル身体に反映した。Fig.6 の (a) に Motion-Less VR 条件 (従来手法およびトルク変換手法)、(b) にモーションキャプチャ条件の環境を示す。

また剛体リンクモデルの順動力学計算の際、人体の関節に弾性と粘性を付与した。人体の関節には弾性と粘性はそれぞれ式 (4), (5) で表現される [5]。ただし  $k_1 \sim k_4$  は弾性トルク係数、 $c$  は粘性トルク係数、 $\theta$  は関節

Table1: 手先の最大発揮力目標角度

Target angle [deg]														
13.4	33.3	55.1	83.1	104.0	124.9	141.8	163.4	192.7	215.7	250.5	276.5	289.7	312.2	348.8

Table2: Joint viscoelasticity parameters of the model

	$k_1$	$k_2$ [rad]	$k_3$	$k_4$ [rad]	$c$ [Nmdots/rad]
shoulder	1.55	-0.72	1.48	-0.660	1.60
elbow	3.96	-0.700	3.14	-1.73	0.800

角度 [rad],  $\dot{\theta}$  は関節角速度 [rad/s] である.

$$\text{弾性} \quad \tau_e = e^{k_1(\theta-k_2)} - e^{k_3(k_4-\theta)} \quad (4)$$

$$\text{粘性} \quad \tau_v = c\dot{\theta} \quad (5)$$

順動力学計算の際には肩および肘で計測された関節トルク  $\tau$  から粘弾性トルク  $\tau_e$ ,  $\tau_v$  を差し引いた  $\tau'$  を計算に用いる. これにより人体の関節の挙動が模擬される. なお, 各係数は Table2 のように設定する.

$$\tau' = \tau - (\tau_e + \tau_v) \quad (6)$$

## (2) タスク

実験では, HMD (Oculus Rift S, Facebook 社) を介して視覚提示された目標に対してバーチャル身体の手首の姿勢を追従させるタスクを課した. 目標は, バーチャル身体の正面となるように設定し, その地点から水平宝庫に半径 0.1 [m] で時計回りに 4 周回転させた. また目標の移動速度は, 最大角速度を 30 [deg/s], 角加減速度を 10 [deg/s<sup>2</sup>] とした.

## (3) 計測と信号処理

タスク中の表面筋電位は筋電計 (FreeEMG1000, BTS 社) を用いてサンプリングレート 1000 [Hz] で測定した. 表面筋電位の測定部位は三角筋前部 ( $u_0$ ), 上腕三頭筋外側頭 ( $u_1$ ), 上腕三頭筋長頭 ( $u_2$ ), 三角筋後部 ( $u_3$ ), 上腕筋 ( $u_4$ ), 上腕二頭筋長頭 ( $u_5$ ) とした. 筋電測定後はハイパスフィルタ, 全波整流, 移動平均, 正規化の処理を施したものを評価に用いた. ただし, ハイパスフィルタの遮断周波数は 60 [Hz], 移動平均は後方 150 点, 正規化は各筋ごとに最大電位を 100 [%] とした.

## (4) 結果と考察

本実験は出力分布測定実験を行った被験者 1 名に対して実施した. なお Motion-Less VR の 2 条件は, 身体固定による運動指令の変化の影響を排除するために, 学習過程として事前にタスクを 1 度行った.

各条件における表面筋電位の結果を Fig.7 に示す. Fig.7 より, Motion-Less VR の 2 つの条件およびモー

ションキャプチャ間の筋電位に差はなかった. ただし, 本実験の被験者が 1 名であることから, 十分なデータ量とは言えない. また, モーションキャプチャの条件とも概ね筋電位に差はなかったため評価タスクが良くないと考えられる. 今後は被験者を増やし評価タスクを改善したうえで, 厳密な評価を行っていく.

また被験者に実験の感想を聞いたところ, 「自身の思い通りに動いているが, モーションキャプチャ条件に比べて力が必要」という回答があった. この要因の一つとして, 被験者の出力した力ベクトルの大きさに対して, 最大出力の割合でトルク変換を行っているためであると考えられる. また, 本実験では出力分布は被験者が測定したものを使用したが, 粘弾性のパラメータは既存論文のものを用いた. したがって, 被験者によっては弾性に負けないように手先の出力を大きくしたため, 力が必要としたとも考えられる. 今後は粘弾性のパラメータを被験者に適合することも検討する.

## 5. 結論

本研究では, Motion-Less VR におけるバーチャル身体の実験性能の向上を目的として, 身体固定姿勢に依存せず通常の運動時と同様の筋収縮を行い, バーチャル身体の制御手法を提案し, 比較実験を行った. その結果として, 被験者が 1 名ということもあり, 従来の Motion-Less VR の手法との変化は見られなかった. 今後は被験者を増やしかつ実験のタスクを見直し, また粘弾性のパラメータを被験者に適用したうえで, Motion-Less VR の実験性能の向上を目指す.

**謝辞:** 本研究の遂行にあたり, 中村壮亮准教授には大変多くのご指導を賜りました. 深く感謝申し上げます. 教務助手望月典樹先生には, 研究を進めていく中で, 日ごろから多くのアドバイスを頂きました. 深くお礼申し上げます. また, 被験者実験に協力及び快諾頂きました研究室の皆様へ感謝申し上げます. 最後に, 日々楽しく話して励まし合った同研究室の同期の友人, 並びに学生生活を支えてくださった両親に心から感謝申し上げます.

## 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.1-10, 2021

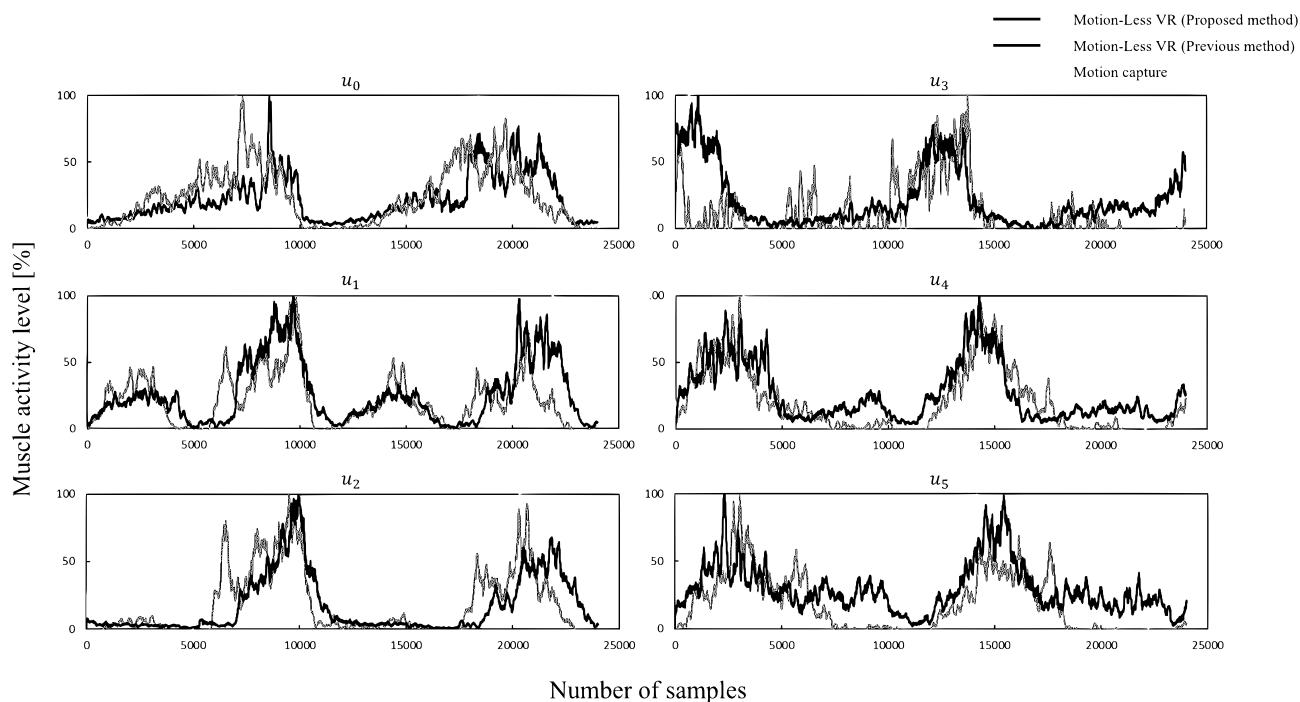


Fig. 7 EMG activity level for each condition

- [2] 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, 2021
- [3] 大島徹, 藤川智彦, 熊本水頼, “一関節筋および二関節筋を含む筋座標系による機能別実効筋力評価 -筋力と四肢先端の出力”, 精密工学会誌, Vol.65, No.12, 2007.
- [4] 大島徹, 藤川智彦, 熊本水頼, “一関節筋と二関節筋の協調による四肢の力出力分布特性 -関節トルクによる力出力分布との相違”, 精密工学会誌, Vol.73, No.4, 2007.
- [5] 萩原直道, 山崎信寿, “身体の構造製薬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.216-222, 2001.