



THE VIRTUAL REALITY SOCIETY OF JAPAN

Motion-Less VR : リアル身体とバーチャル身体の姿勢相違を 考慮した運動意図取得手法に関する基礎検討

Research on Motion-Less VR: Basic Study on Acquisition Method of Motion Intention
Considering Postural Difference between Real and Virtual Body

今永尚志¹⁾, 望月典樹²⁾, 大谷拓也³⁾, 中村壮亮²⁾

Takashi IMANAGA, Noriki MOCHIZUKI, Takuya OTANI, and Sousuke NAKAMURA

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

2) 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)

3) 早稲田大学 理工学術院総合研究所 (〒162-0044 東京都喜久井町 17, t-otani@aoni.waseda.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」では, 任意の姿勢で身体が固定された状態において発揮された関節トルクを基に, バーチャル身体の運動が実現される. ここで, リアル身体の姿勢と発揮トルクには依存関係があるうえ, リアル身体とバーチャル身体の姿勢は異なることとなるが, 先行研究では考慮されていない. そこで本研究では, 姿勢に応じた発揮トルクの補正手法の検討を行う.

キーワード: Motion-Less VR, 運動意図取得, 筋骨格モデル, トルク変換

1. はじめに

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定される. 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」という概念を提案している [1][2].

Motion-Less VR では, リアル身体が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発揮トルクを計測し, そこから粘弾性を考慮した剛体リンクモデルでの順動力学を計算することによって運動意図を取得している.

ここで, 人体の構造上, 身体姿勢に応じて最大発揮トルクは異なることが知られている [3][4]. しかしながら先行研究では, リアル身体の固定姿勢について考慮されていない. この場合, リアル身体の固定姿勢によっては, バーチャル身体の姿勢では本来発揮することができないトルクが入力されることや, 発揮することが可能であったトルクが入力不可能となる状況が発生し得る. これは, 自己所有感および自己主体感を損ねることを意味する. そこで本研究では, 右上肢の肘関節を対象として, リアル身体の固定姿勢の影響を考慮した運動意図取得方法の提案を行い, その有効性に関する基礎的な検討を行う.

2. 筋発揮メカニズムと運動意図の関係

筋は収縮要素と呼ばれる能動的な要素と, 受動的な結合組織である並列弾性要素からなる. 筋が発揮する張力は活動張力と呼ばれ, 筋長が自然長のときに最大となり, 自然長

から離れるにつれて低下する [5]. 並列弾性要素による張力は静止張力と呼ばれる. 筋長が自然長以下の場合, 並列弾性要素は緩んだ状態にあり, 静止張力は発生しない. 筋長が自然長を超えると並列弾性要素のたるみが取れ, 長さに応じた静止張力が現れる. これら活動張力と静止張力は合わせて筋張力と呼ばれる. そして筋張力により関節周りにトルクが発生し, 身体の位置が移動することで運動となる.

また, 運動に必要な骨格筋には屈筋と伸筋があり, 屈曲と伸展の運動を実現するために骨格を挟んで反対にそれぞれ接続されている. 肘関節の場合, 上腕二頭筋が屈筋, 上腕三頭筋が伸筋に該当する. 肘関節の屈曲運動では, 中枢神経から運動神経を經由して上腕二頭筋が収縮し, 同時に上腕三頭筋が弛緩する. その結果, 上腕二頭筋が前腕の骨格を引っ張ることで腕が屈曲する. 伸展運動では反対に上腕三頭筋の筋長が収縮し, 同時に上腕二頭筋が弛緩する. その結果, 上腕三頭筋が前腕の骨格が腕を引っ張ることで腕が伸展する.

以上のことから, 関節角度に応じて筋張力は変化し, その影響が屈筋と伸筋の関係性に現れ, 関節角度に応じて最大発揮トルクは変わることとなる. ゆえに, Motion-Less VR において, リアル身体から発揮されたトルクをそのまま用いる場合, バーチャル身体の運動性能が低下してしまう可能性がある.

3. 提案手法

上腕二頭筋における筋骨格モデルを図 1 に示す. 図 1 の a は上腕側の筋の付着点と関節回転軸中心との距離, b は関

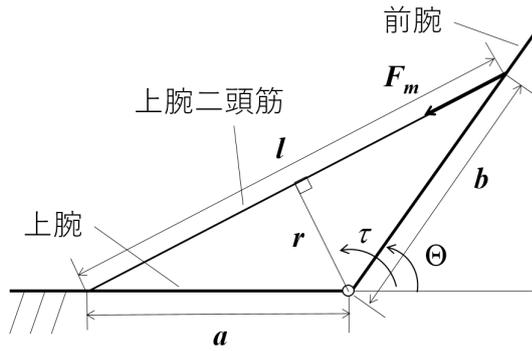


図 1: 上腕二頭筋のモデルの模式図

節回転軸中心と前腕側の筋の付着点との距離, l は上腕二頭筋の筋長, r はモーメントアーム長である. 関節角度 Θ は, 上肢を真っすぐに伸ばした状態を基準として ($0[\text{deg}]$) として, 屈曲方向を正とする. ここで, 関節角度と筋長および関節角度 Θ とモーメントアーム長 r の関係はそれぞれ式 1, 式 2 で表される. ただし, $a = 0.282[\text{m}]$, $b = 0.048[\text{m}]$ とする [6].

$$l = \sqrt{(b \sin \Theta)^2 + (a + b \cos \Theta)^2} \quad (1)$$

$$r = \frac{ab \sin \Theta}{\sqrt{(b \sin \Theta)^2 + (a + b \cos \Theta)^2}} \quad (2)$$

また, 屈曲方向の発揮トルク τ と筋張力 F_m の関係は式 3 で表される [7].

$$\tau = F_m r \quad (3)$$

次に今回用いた筋骨格モデルを, Motion-Less VR におけるリアル身体とバーチャル身体に置き換えて考える. リアル身体とバーチャル身体に筋骨格モデルを図示したときの様子を図 2 に示す. Motion-Less VR が問題なく機能している場合, ユーザは図 2(b) の関節角度 β に肘があると思い込み, 実現した軌道を生み出すトルク τ_{vr} ($= \tau_{ref}$: 目標トルク) に筋張力 F_m を発揮する. しかし, 実際には図 2(a) の関節角度 α に肘があるため, この筋張力 F_m を発揮した際に発揮されるトルク τ_{real} は意図した τ_{ref} とは異なる値となる. Motion-Less VR では, この $\tau_{real} (\neq \tau_{ref})$ をトルクセンサで計測し, バーチャル身体のトルクとして適用するため, リアル身体とバーチャル身体の関節角度の乖離が大きくなるほど, 本来の運動意図とは異なるトルク入力となることが懸念される. そこで, 本手法はこの補正を行うものである.

まず式 3 より, バーチャル身体の関節角度 β におけるモーメントアーム長 r_{vr} と筋張力 F_m から, バーチャル身体の目標トルク τ_{ref} を算出する. しかしながら筋張力 F_m は, 実際には, リアル身体の関節角度 α に依存したモーメントアーム長 r_{real} と発揮トルク τ_{real} から算出されたものである. 従って, リアル身体の実験トルク τ_{real} とバーチャル身体の目標トルク τ_{ref} の関係は式 4 で表される.

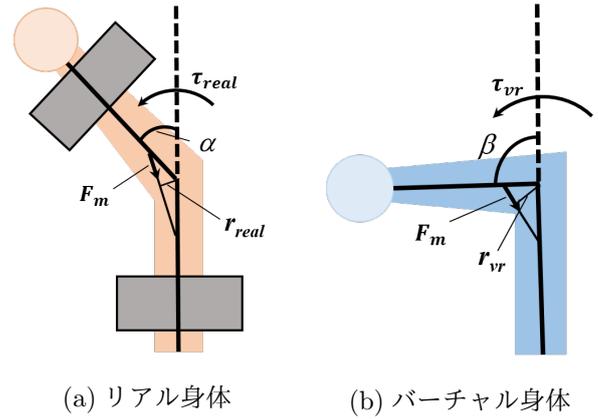


図 2: Motion-Less VR における筋骨格モデルの模式図

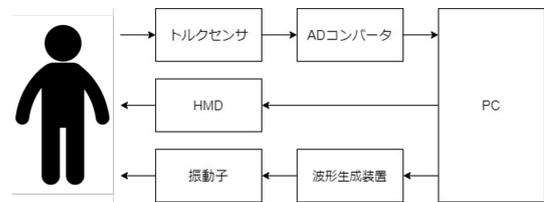


図 3: システム構成

$$\tau_{ref} = \frac{r_{vr}}{r_{real}} \tau_{real} \quad (4)$$

ここで, 2 章で述べたように, 前腕の屈曲運動は上腕二頭筋の筋長の変化がもたらす筋張力が基となっている. 以上のことから, 式 4 より, バーチャル身体に適用する屈曲方向のトルクの補正が実現される.

4. 実験

4.1 システム構成

本実験で使用したシステム構成を図 3 に示す.

4.1.1 リアル身体固定装置

リアル身体の右上肢固定装置を図 4 に示す. 上腕と前腕の側面にアルミ板を押し当てることで右上肢の運動を抑制した. また, 固定姿勢を変更するために関節角度を $9.0[\text{deg}]$ 毎に調節可能な構造とした. さらに, 手掌の姿勢を統一化するため, リアル身体は樹脂製の円柱棒を握らせた.

4.1.2 運動シミュレーションと感覚提示

右上肢を固定し前腕を動かそうとした際に発揮したトルクをトルクセンサが検出し, 剛体リンクモデルでのシミュレーションを行う. なお, モデルの肘関節には関節受動抵抗として, 弾性特性 (式 5) [8] と粘性特性 (式 6)[9] を付与した. 使用したパラメータを表 1 に示す [10].

$$M_k = \exp\{k_1(\theta - k_2)\} - \exp\{k_3(k_4 - \theta)\} \quad (5)$$

$$T_C(\dot{\theta}) = c\dot{\theta} \quad (6)$$

θ : バーチャル身体の肘関節の関節角度 [rad]

$\dot{\theta}$: バーチャル身体の肘関節の関節角速度 [rad/s]

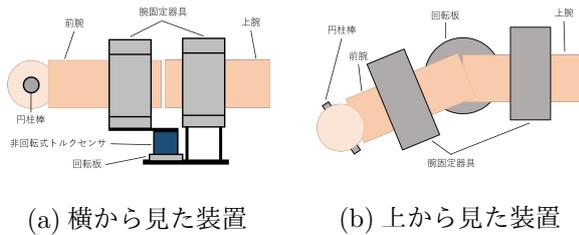


図 4: リアル身体固定装置の模式図

表 1: 弾性および粘性パラメータ

k_1	k_2	k_3	k_4	c
6.9	-0.1	4.6	-1.9	0.8

なお、本実験では固定姿勢以外の影響を取り除くことに加え、自己所有感および自己主体感を損なわないために、HMDを用いて視覚情報を提示した。さらに、深部感覚提示を行うために腱への振動刺激を既存研究 [11] に基づき与えた。刺激箇所は屈伸運動を実現する上腕二頭筋と上腕三頭筋の腱とし、振動周波数 f_B [Hz] (上腕二頭筋)、 f_T [Hz] (上腕三頭筋) はそれぞれ式 7、式 8 となるように設定した。ただし角速度は ω [deg/s] とする。

$$f_B = \begin{cases} 0 & (\omega \geq 0) \\ 29.6\sqrt{|\omega|} & (-11.4 \leq \omega < 0) \\ 100 & (\omega < -11.4) \end{cases} \quad (7)$$

$$f_T = \begin{cases} 0 & (\omega \leq 0) \\ 4.8\omega & (0 < \omega \leq 20.8) \\ 100 & (\omega > 20.8) \end{cases} \quad (8)$$

4.2 実験方法

実験では、被験者の右上肢を固定し実験タスクを行った。実験タスクは、バーチャル身体の右手掌に重りを持たせ、バーチャル身体の指先に指示線を提示した。そして、指示線を初期角度から目標角度までバーチャル身体の肘関節を中心に等角速度で回転させ、指示線に合わせてバーチャル身体を追従させた。目標角度に到達後、指示線に合わせて 5 秒間静止させた。バーチャル身体の初期角度は 66[deg]、目標角度は 96[deg]、指示線の回転速度は 4[deg/s] と設定した。固定姿勢は、右上肢の肘関節のトルク非印可時の姿勢（自然姿勢）が 66[deg] であることから、関節固定角度を屈曲・伸展方向にそれぞれ 27[deg] (36, 63, 90 [deg]) ずつ変更した。バーチャル身体の右手に持たせる重りの質量は実験的に決定し、本実験では、100, 500, 1000[g] の 3 パターンに変更した。そして各関節固定角度に対して、リアル身体の発揮トルクをバーチャル身体に入力する際の補正の有無（補正条件）の 2 パターンの実験を行った。

また、1 回目の実験条件は、関節固定角度、バーチャル

身体に持たせる重りの質量を決定し、補正条件をランダムに設定した。そして、2 回目の実験条件は、関節固定角度とバーチャル身体に持たせる重りの質量を 1 回目と同じ条件にし、補正条件は 1 回目と異なる方を採用した。これを 1 セットとし、関節固定角度条件、重りの質量条件を組み合わせ合わせて合計 9 セット行った。各セットの終了後、被験者にアンケートを行った。アンケートは、1 セットのうちに行った実験タスク 2 回において、1 回目と 2 回目どちらが本来の自分の腕の動きに近いかという内容にした。

4.3 実験結果・考察

本実験は被験者 1 名に対して行った。アンケートの結果、9 セット中 6 セットで、提案手法を用いた場合の方が、本来の自分の手の動きのように感じると答えた。一方で本実験終了後、被験者に感想を聞いたところ、リアル身体で握っている円柱棒の質量と、バーチャル身体で握っている重りの質量が異なっていることによる、感覚の齟齬が生じたと答えた。従って、提案手法を用いることで、従来よりも本来の運動意図がバーチャル身体に反映される可能性が示唆されるが、実験条件や実験タスクの改良をする必要もある。

5. おわりに

本論文では、Motion-Less VR において、リアル身体の固定姿勢に応じた発揮トルクの補正手法の提案を行った。その結果、提案手法を用いることで、従来よりも本来の運動意図に近い運動意図がバーチャル身体に反映されていることが示唆された。

今後は、本論文ではバーチャル身体の屈曲方向の運動のみに補正を加えていたが、伸展方向の運動も同様に補正を加える予定である。そして、伸展方向の補正を加えた提案手法の有効性を示すために、被験者の人数を増やすことに加え、タスクの精査や評価手法の検討を進める。

参考文献

- [1] 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 インターフェース”, 日本バーチャルリアリティ学会第 24 回大会論文集, pp. 6B-09, 2019.
- [2] 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.
- [3] 東登志夫, 鶴崎俊哉, 船瀬広三, 沖田実, 岩永隆一郎, 野口義男, “等尺性収縮時における肘関節角度が肘関節屈筋群の筋疲労と筋出力に及ぼす影響”, 理学療法化学, 19(2), pp. 121-125, 2004.
- [4] Hutchins, E.L.Gonzalez, R.V.&Barr, R.E., “Comparison of experimental and analytical torque-angle relationship of the human elbow joint complex”, Biomed.Sci.Instrum., 29, pp. 17-24, 1993.

- [5] David A.Winter, “バイオメカニクス 人体運動の力学と制御 原著第4版” (長野明紀, 吉岡伸輔訳), ラウンドフラット, pp. 222-246, 2011.
- [6] 内山孝憲, 別所知之, 吉田正樹, 赤澤堅造, “ヒト上肢の関節角度と等尺性の関係”, バイオメカニクス学会編, バイオメカニクス 13, pp. 77-88, 東京大学出版会, 1996.
- [7] 川村貞夫編著, 小澤隆太, 塩澤成弘, 吉岡伸輔, 伊坂忠夫, 平井宏明, 宮崎文夫共著, “身体運動とロボティクス”, コロナ社, pp. 56-75, 2019
- [8] 山田信寿, 田中隆之, “関節の抵抗特性を模擬したダミー骨格”, バイオメカニクス, Vol.18, pp. 175-185, 2006.
- [9] D.T.Davy, and M.L.Andu, “A DYNAMIC OPTIMIZATION TECHNIQUE FOR PREDICTING MUSCLE FORCES IN THE SWING PHASE OF GAIT”, J.Biomechanics, Vol.20, No.2, pp. 177-190, 1982.
- [10] 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, pp. 216-222, 2001.
- [11] J.P.Roll and J.P.Vedel, “Kinaesthetic Role of Muscle Afferents in Man, Studied by Tendon Vibration and Microneurography”, Exp.Brain Res., Vol.48, no.2, pp. 177-190, Jul.1982. バイオメカニクス, Vol.18, pp. 175-185, 2006.