



# 映像に基づく運動体感の自動生成に関する研究

## 第 3 報：逆力学による力推定に基づく体感振動の提示

赤井峻真<sup>1)</sup>, 昆陽雅司<sup>1)</sup>, 田所諭<sup>1)</sup>

Ryoma Akai, Masashi Konyo, and Satoshi Tadokoro

1) 東北大学 情報科学研究科 (〒 980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-01, konyo@rm.is.tohoku.ac.jp)

**概要:** 本稿では映像内の人物の動作により生じる力に基づいて振動刺激を自動生成し、力に応じて生成した振動刺激が運動体感に一致するかを確かめる。姿勢推定ライブラリを用いて人物の骨格を追い、逆力学を用いて関節に生じる力を推定する。力を知覚インテンシティに対応付け、振動刺激を生成する。被験者実験で他の変数に基づいて生成した振動刺激と比較し、提案手法の有効性を検証する。

**キーワード:** スポーツ・健康, 力覚・体性感覚, 提示

### 1. 緒言

近年、スマートフォンの普及や動画配信プラットフォームの整備などにより、動画が主流なメディアとなっている。スマートフォンのカメラを用いて手軽に動画を撮影することができるため、誰でも動画クリエイターになることができ、動画配信プラットフォームにはさまざまな動画が投稿されている。動画アプリから手軽に動画を視聴することができるため、動画サービスの利用も定着してきている [1]。

また、スポーツなどの体の動かし方を学習する場面で動画が活用されている。例えばダンスでは、ダンスの動画教材や、プロダンサーの動画などが投稿されている。そのため、初心者は上手な人の動画を見ながら振付を覚えることができる。熟練者は未習熟者の動きの不備を指摘することができるが、初心者は動画だけで動きの微妙な違いに気づくことは難しい。ダンスは複合的な動きであり、全身が動くため、体幹など特定の部位の動きを視覚だけで追いかけることは容易ではない。

そこで、動作を理解しやすくするために、視覚情報以外にも人の動作に関する情報を付与する技術が求められる。第 1 報 [2] では跳躍動作に合わせて効果音から生成した振動刺激をつけると映像の迫力・臨場感が増すことが確認された。第 2 報 [3] では動画内の人物の運動に合わせて自動で振動体感を生成することを目的として、特定の部位の動きから振動体感を生成する手法を提案した。肩から見た腰の相対速度あるいは相対加速度から振動体感を生成したとき、経験者と初心者の違いが少しわかりやすくなるという結果が得られた。相対速度と相対加速度では、結果に明確な違いが見られず、改善の余地があった。特に、運動で感じる負荷は動かす関節や重力の影響を受けるため、結果として生じる速度や加速度がそのまま負荷の大きさに対応するとは限らない。そこで本報では体に生じる力に着目し、振動刺激を用いて運動体感を表現する。

本研究の目的は、誰でも手軽に動作の体感付きコンテンツを作るために、動画内の人物の運動に合わせて自動で振動体感を生成することである。体に生じる力を推定し、生成した振動刺激が運動体感と一致するかを検証する。

誰でも手軽に動画内の人の動作を抽出するために、AI を用いて動画から簡単に人の骨格の動きを推定する手法 [4] を利用する。これまで人の動きを計測する際にはモーションキャプチャを用いたり、身体に多数の慣性センサを取り付ける方法が一般的であった。しかし、これらの方法は、コストや手間がかかり、簡単に計測することができない。

動きの大きさを正確に振動刺激で提示するためには、運動をヒトの知覚量に比例させて提示することが必要である。本研究では振動の知覚量を算出するために、高周波振動の知覚インテンシティモデル [5] を利用する。体に生じる力に関係づけた知覚インテンシティに基づき振動刺激を生成する手法を提案する。

### 2. 提案手法

動画内の人物の動きに合った振動刺激を生成する方法として、映像から運動を抽出し、運動に比例した知覚インテンシティを生成し、その知覚インテンシティをもとに振動刺激を生成する手法を提案する。

映像から運動を抽出する方法として、人の骨格推定ライブラリである BlazePose [4] を用いる。骨格推定では骨格の位置を得ることができる。図 1 に得られた骨格の一例をプロットした。逆力学を用いて関節に働く力を計算するために、[6] のリンクモデルを使用した。リンクモデルを図 2 に示す。表 1 に各部位の質量比 [6] を示す。図 3 に示す内分比 [7] を用いて、骨格推定で得られた位置からリンクモデルの各部位の重心位置を求めた。図 3 内の赤い点が骨格推定で得られた位置、青い点がリンクモデルの各部位の重心位置である。そして、重心位置から重心の加速度を求めた。加速度を求める際、Savitzky-Golay フィルタ [8] を用いて

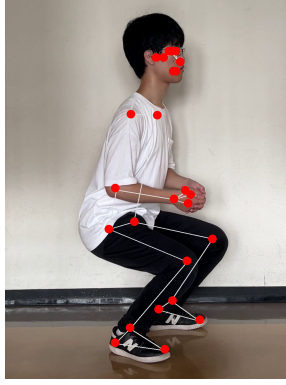


図 1: Landmarks estimated by BlazePose[4].

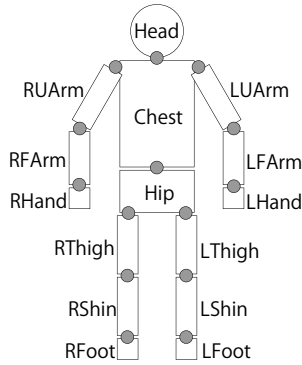


図 2: Link model to calculate inverse dynamics[6].

平滑化および微分をした。並進運動の運動方程式を用いて、各部位を動かす関節に働く力を計算した。2つの関節で部位  $i-1$  と  $i+1$  と接続している部位  $i$  の並進の運動方程式は式 1 となる。

$$m_i \ddot{\mathbf{x}}_{g_i} = m_i \mathbf{g} + \mathbf{f}_i - \mathbf{f}_{i+1} \quad (1)$$

ここで、 $m_i$  は部位  $i$  の質量、 $\mathbf{x}_{g_i}$  は部位  $i$  の重心の位置ベクトル、 $\mathbf{g}$  は重力加速度ベクトル、 $\mathbf{f}_i$  は部位  $i-1$  と部位  $i$  をつなぐ関節に作用する力、 $\mathbf{f}_{i+1}$  は部位  $i$  と部位  $i+1$  をつなぐ関節に作用する力である。

末端の部位に力が作用していない場合、式 1 の  $\mathbf{f}_{i+1}$  が 0 となり、部位  $i-1$  と部位  $i$  をつなぐ関節に作用する力  $\mathbf{f}_i$  が求められる。逐次解くことで各関節に作用する力が求められる。

振動波形生成の流れは以下のとおりである。動きの大きさをとらえたいため、力の絶対値をとり正規化した。力と知覚インテンシティの関係は、線形にした場合 (図 4(a)) と、力の 1.7 乗を知覚インテンシティにした場合 (図 4(b)) の 2 種類を用意した。物理的刺激の大きさと実際の知覚する強さの関係を示したスティーブンスのべき法則 [9] によると、力に対応するべき乗の指数は 1.7 である。そこで、力と知覚インテンシティの関係を調べるために関係が線形のもの とべき乗のものを用意した。提示する振幅変調波は元信号のセグメントごとのインテンシティの総和を式 2[5] から周波数 200 Hz における振幅に変換した。

表 1: Mass of each part[6].

部位	質量比	部位	質量比
Head	0.069	Hip	0.187
Chest	0.302	RThigh	0.110
RUArm	0.027	RShin	0.051
RFArm	0.016	RFoot	0.011
RHand	0.006	LThigh	0.110
LUArm	0.027	LShin	0.051
LFArm	0.016	LFoot	0.011
LHand	0.006		

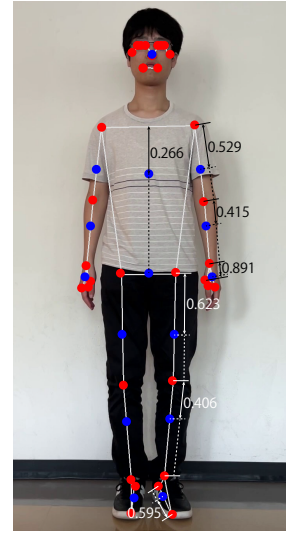


図 3: The relationship between the center of gravity of each part in the link model and landmark estimated by BlazePose.

$$A = A_T(f) I_{total}^{\frac{1}{2\alpha(f)}} \quad (2)$$

ここで、 $A(f)$  は周波数  $f$  における振動の振幅、 $A_T(f)$  は  $f$  における振動検出閾の振幅、 $I_{total}$  は元信号のセグメントごとのインテンシティの総和、 $\alpha(f)$  は周波数依存性を表す指数パラメータである。

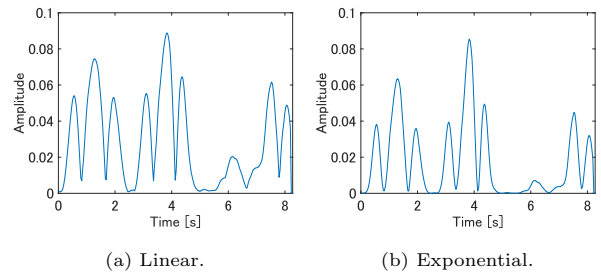


図 4: The relationship between force and intensity.

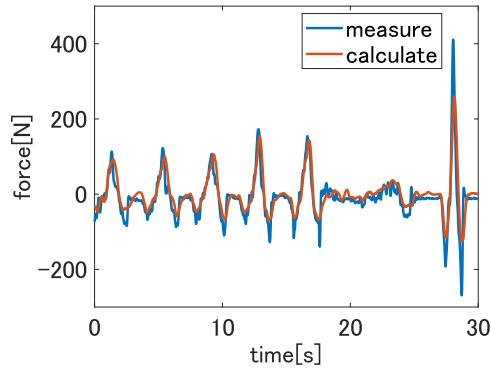


図 5: Comparison of ground reaction force.

### 3. 評価

2. 章の方法で求めた力が妥当かを確かめるための評価を行った。床反力について、提案手法で求めた結果をフォースプレートで計測した結果と比較した。フォースプレートはテック技販の M3D-FP を使用し、左右のスリッパのかかととつま先の 4 か所に設置した。

スリッパを履いた被験者にスクワットの動作をさせ、フォースプレートで床反力を計測しながらその様子を撮影した。2. 章の方法で求めた床反力と、フォースプレートで計測した床反力を比較した。比較したグラフを図 5 に示す。測定値（青線）と計算値（赤線）を比較すると、極値のタイミングはほとんど一致することが確認された。ただし、計算により求めた床反力は計測値よりも極値が小さいところも見られた。

### 4. 実験

#### 4.1 実験概要

力に基づいて生成した振動刺激により運動体感が提示できているかを検証するため、スクワットを対象とし、主観評価を行った。被験者は 20 代の男性 6 名である。

動作速度を変えて 3 回スクワットを行っている動画を用意した。2. 章で述べた手法を用いて、床反力に基づいて振動刺激を生成し動画に付与した。動作によって生じる力のみを振動刺激に反映させたいので、重力項は取り除いた。比較対象として、重心の速度、加速度それぞれに基づいて振動刺激を生成した。また、変数と知覚インテンシティとの関係を線形またはべき乗にした。生成した振動刺激の条件を表 2 に示す。

動画は被験者の前に置かれた液晶モニターで表示した。外部の音を遮断するためにイヤホンからピンクノイズを流した。振動を提示するバイブレーターはフォスター電機社 639897 アクチュエーターを用いる。振動は USB オーディオインターフェース (Roland, Rubix24)、オーディオアンプ (S.M.S.L, SA-36A PRO) を介して出力する。

実験では、振動を付与した動画を提示し、動作を行ったときの体感と似ている順に並べ替えさせた。順位が決まるまで動画を自由に再生させ、また被験者自身で動画内の動作を行うことを許可した。その後、1 位と 6 位に選んだ動

表 2: Conditions.

項目	条件
FE	力, べき乗
FL	力, 線形
AE	加速度, べき乗
AL	加速度, 線形
VE	速度, べき乗
VL	速度, 線形

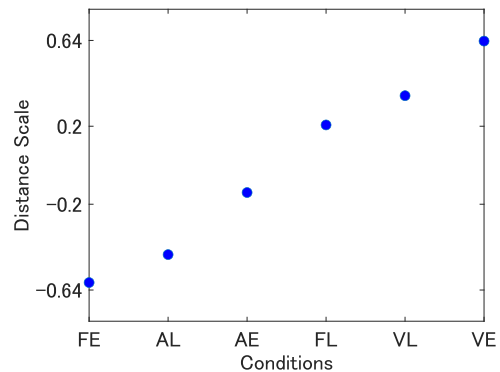


図 6: The result of the ranking experiment.

画について、動作体感と提示した振動の体感が似ているか 7 段階のリッカート尺度 (1:まったくそう思わない, 2:そう思わない, 3:あまりそう思わない, 4:どちらでもない, 5:少しそう思う, 6:そう思う, 7:とてもそう思う) に小数点第 1 位までつけて回答させた。

#### 4.2 実験結果

品質の良さの順位は近似的に正規分布に従う [10] ことを考慮し、条件ごとの順位を正規化順位法 [10] により正規スコアに変換し平均をとった距離尺度のプロットを図 6 に示す。1 位から 6 位までの正規スコアは、1 位 1.27, 2 位 0.64, 3 位 0.2, 4 位 -0.2, 5 位 -0.64, 6 位 -1.27 である。

重心の速度に基づいて生成した振動刺激が順位が高い傾向が見られた。床反力の 1.7 乗を知覚インテンシティにした条件が最も順位が低かった。

また、1 位と 6 位の動画についてのリッカート尺度での評価を表 3 に示す。いずれの被験者も 1 位にした条件は 6 以上と回答していて、動作体感と提示した振動の体感が似ていると感じていた。一方、6 位にした条件は動作体感と提示した振動の体感が似ていないと感じている被験者が多かった。条件 AE と VL は 1 位にも 6 位にもなっており、似ていると感じている被験者がいる一方で似ていないと感じている被験者もいた。力のべき乗を知覚インテンシティにした条件 FE は 3 人の被験者が 6 位としており、似ていないかどちらでもないという回答が得られた。

表 3: The result of the Likert scale.

被験者	順位			
	1		6	
	条件	評価	条件	評価
a	AE	6.0	AL	1.5
b	VL	6.3	FE	3.0
c	VL	7.0	AE	2.4
d	VE	6.4	VL	1.0
e	VL	6.5	FE	4.5
f	VE	6.0	FE	2.3

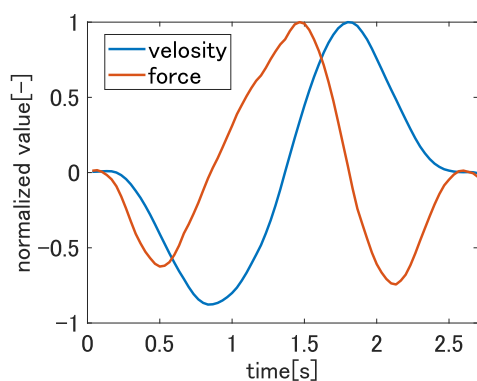


図 7: Comparison velocity of the center of gravity and ground reaction force.

#### 4.3 考察

スクワット 1 回の重心の速度と床反力の比較を図 7 に示す。速度は動き始めや動作が止まるときは小さく、動作の途中で大きくなる。一方で床反力は、重力項が除かれており、動き始めや動作が止まるときに大きく、力がつりあう動作の途中で小さくなる。実験結果は、被験者は速度に基づく提示に対して高評価を与えており、動画の動きの印象に一致するものを自然と判断したと考えられる。そのため、エンタテインメントとして動画を演出する際は速度に基づく提示が受け入れられやすいと考えられる。

一方で、力の評価は低い傾向になったが、これは動画を見ているだけでは力の様子は見えにくく、動画だけで運動に必要な力を判断できていない可能性を示している。スポーツの練習など動作を覚える際には対象動作を行うために必要な力を理解することが必要な場面がある。そこで力に基づいた振動刺激を提示することで、実際に動作に必要な力の強弱やタイミングを教示できる可能性がある。

#### 5. 結言

本研究では、誰でも手軽に動作の体感付きコンテンツを作るために、動画内の人物の運動に合わせて自動で振動体

感を生成することを目的として、動作により生じる力から振動体感を生成する手法の提案した。動画内の人の動きから推定した骨格の位置から逆動力学を用いて求めた床反力が、フォースプレートで計測した床反力とほとんど一致していることがわかった。生成した振動刺激が動作の体感と一致するかを被験者実験で検証したが、速度から生成した振動刺激の方が動作の体感と一致することが確認された。

今後の展望としては、力に基づいて生成した振動刺激を活用できる場を模索する予定である。スポーツの練習など力の入れ方を学習する場面で提案手法が有効か検証したい。

#### 参考文献

- [1] Nielsen, "TOPS OF 2023: DIGITAL IN JAPAN," [https://www.netratings.co.jp/news\\_release/2023/12/Newsrelease20231220.html](https://www.netratings.co.jp/news_release/2023/12/Newsrelease20231220.html), (Accessed on 2024/03/08).
- [2] 赤井峻真, 松原亨, 昆陽雅司, 田所諭, "映像に基づく運動体感の自動生成に関する研究-第 1 報: 姿勢推定に基づく跳躍動作の体感生成-", 第 28 回日本バーチャルリアリティ学会, 2023
- [3] 赤井峻真, 昆陽雅司, 田所諭, "映像に基づく運動体感の自動生成に関する研究-第 2 報: 体感振動の生成によるダンス動作の技能差の表現-", ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, 2024
- [4] V. Bazarevsky, I. Grishchenko, K. Raveendran, T. Zhu, F. Zhang, and M. Grundmann, "BlazePose: On-device Real-time Body Pose tracking," 2020 <https://doi.org/10.48550/arXiv.2006.10204>, (Accessed on 2024/03/08).
- [5] S. Bensmaïa, M. Hollins, and J. Yau, "Vibrotactile intensity and frequency information in the Pacinian system: A psychophysical model," *Perception Psychophysics*, vol.67, no.5, p.828–841, 2005
- [6] 阿江通良, 湯海鵬, 横井孝志, "日本人アスリートの身体部分慣性特性の推定", *バイオメカニズム*, pp.23–33, 1992
- [7] C. R., C. CE, M. JT, R. H, and Y. JW, "Investigation of inertial properties of the human body," *Air Force Aerospace Medical Research Lab Wright-Patterson AFB OH: Technical report*, 1975
- [8] A. Savitzky, and M. J. E. Golay, "Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures," *Anal. Chem.*, vol.36, no.8, pp.1627–1639, 1964
- [9] S. Stevens, "The psychophysics of sensory function," *Am Sci*, p.226–253, 1960
- [10] 佐藤信, "官能検査入門", 日科技連出版社, 1978