



ユビ：指先力入力システムによる環境と全身の力相互作用の実現

平尾悠太郎^{1),*}, 橋本健^{2),*}

Yutaro Hirao and Takeru Hashimoto

1) 奈良先端科学技術大学院大学 情報科学領域 (〒 630-0192 奈良県生駒市高山町 8916 番地-5, yutarohirao@gmail.com)

2) ソニーコンピュータサイエンス研究所 (〒 141-0022 東京都品川区東五反田 3 丁目 14-13, hashimoto@csl.sony.co.jp)

概要: 筆者らは指先の力をエンドエフェクタの目標点の運動へ変換し、逆運動学でアバタを動かすシステムを開発してきた。これに対し本研究では力入力を目標力に置き換え、逆動力学によって各関節トルクを算出し、起き上がりや歩行など環境との力の相互作用を要する全身運動を実現した。この新しい操作方法を人が習得できるかを検証するため、歩行を題材に、強化学習で最適方策を学習し、それを人が模倣して制御する方法を探る。

キーワード: 身体性, 触覚, 全身インタラクション, アバタ, 力入力インタフェース

1. はじめに

2025 年現在, ロボットやバーチャル身体などのアバタを通して, 遠隔地や VR 空間の物体, 事象をリアリティをもって見聞きできるようになってきた。しかし, VR 空間での身体的インタラクションにおいては未だ多くの課題が残されている。VR 研究の文脈における身体的自己認知や身体的インタラクションといった身体性の研究はこれまで主にユーザの身体動作をトラッキングし, アバタの形態学的に対応した部位への運動へと変換する, モーションキャプチャ (mocap) 技術を対象として行われてきた。mocap 技術は, ユーザが物理世界で慣れている自身の身体制御則 (身体図式) をほぼそのまま用いることが可能であるため, 特に身体操作においては適応が早く直感的に行えるという利点がある。一方で mocap 技術では外部カメラやトラッカーなどが必要であり, また身体運動を可能とする十分な空間を確保する必要もあるため, 普及において環境的 (機材的・空間的) ハードルがある。さらに mocap 技術には, 身体に障がいを抱えるユーザが十分に活用できないという身体的制約も存在する。これら操作面における課題に加え, 全身を用いた触覚的インタラクションにも多くの課題がある。これまでの触覚研究ではワイヤやロボットアームなどを用いて物理的に力触覚を再現する手法が主であった。しかしこれらの手法では提示できる力触覚の強さと, デバイスの複雑さや重量, ユーザの可動範囲などがトレードオフとなってしまう実用化は限定的であった。また, 人の認知特性を利用して主に視覚刺激によって疑似的に触覚を提示する手法も研究されているが, 触覚フィードバックなしで提示可能な触覚の表現力には限界がある。このように, 全身に対して触知を含んだ身体的インタラクションを実現するには触覚提示技術の表現力と有用性という潜在的なトレードオフが存在する。

これに対し筆者らは, 指先の力入力をアバタの手や足といったエンドエフェクタの目標点の運動へ変換し, 逆運動学でアバタを動かすシステムを開発してきた [1]。当システムは指先の力入力をアバタの任意の身体部位にマッピングするため, 狭い空間や身体的特徴などの環境的・身体的制約の多様性を吸収できる。さらに当システムは, 力入力と目標質点の運動の関係を運動方程式によって記述することで, バーチャル物体の触覚的特性 (例えば重さや硬さなど) やアバタの身体的特性 (腕の長さや重さなど) を触覚として表現することが可能である。しかし, 今までは四肢の目標点 (エンドエフェクタ) のみで物理現象が考慮されており, アバタはエンドエフェクタの位置に対して逆運動学によってアニメーションで追従しているだけであった。すなわち, エンドエフェクタに連動する身体部位の関節トルクは考慮されておらず, そのため, 例えばものを押すときに足を踏み込んで踏ん張ったり, 手をついて寝た状態から立ち上がったような, エンドエフェクタからの外力が各関節に波及して全身動作に影響するといったインタラクションは不可能であった。

この課題に対し本研究では, 力入力をエンドエフェクタの目標力に置き換え, 逆動力学によって各関節トルクを算出することで, 起き上がりや歩行など環境と全身との力の相互作用を要する全身運動を実現するシステム, ユビ (YUBI: Your Universal Body Interface) を提案し, ユビによって可能となる身体-環境特性知覚の設計空間について体系的に論じる。本研究のコントリビューションは以下の通りである。

- 「力-運動変換」「De novo マッピング」「逆動力学による環境-多関節力学インタラクション」を同時に実現する新たなインタラクション基盤, ユビの提案。
- ユビによって可能となる身体-環境間インタラクションの設計空間の提示。

*: 共同筆頭著者

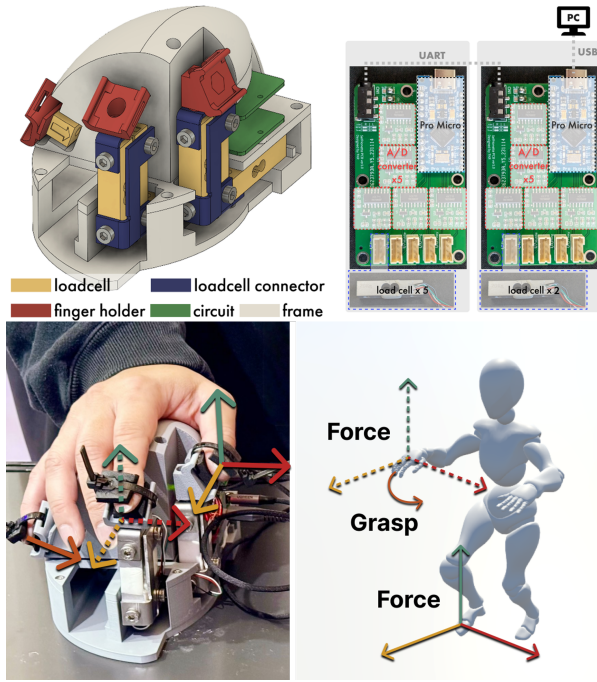


図 1: 左上：デバイス構成．右上：システム構成．
下：力入力とエンドエフェクタの目標力対応．

2. ユビのシステム構成

2.1 指先力入力装置

装置の外観と構成部品を図 1 に示す．YUBI は全身アバタを操作するために両手用の指先力入力装置を用いており、それらは鏡像対称となっているため、以下では片手のものについて説明する．指先力入力装置にはユーザの指の力を検知するための力センサが内蔵されている．指一本に対して上下左右前後の 3 軸方向の並進力を検知するために、1 軸ロードセル 3 本を金属部品で垂直に接続し、三分力計を構成している．現状では、親指と人差し指が 3 軸の力の入力を可能にし、小指で 1 軸の力入力が可能にしている．各ロードセルからのアナログ信号は Avia semicon 社の HX717 チップによって 320Hz でデジタル信号に変換され、専用基板からシリアル通信で PC へ力の値が送られる．使用時は、再利用可能な結束バンドと高反発ウレタンフォームを用いて、使用者の指を快適かつ確実に力センサに固定している．

2.2 アバタの運動の生成手法

従来手法では、ユーザが指先で加える 3 自由度の力に対応するアバタ四肢末端の 3 自由度の運動にマッピングし、末端を質点として目標位置へ追従させる逆運動学 (IK) で全身の運動を生成してきた．質点モデルの質量や粘性を調整することで緩慢さや機敏さといった運動の質感は操作できるものの、末端が受けた反力は全身へ伝播せず、たとえば壁を手で押し込んでも足裏までは反力が伝達しない．そのため、人間が実際に行うような足場の踏み替えや体幹の協調といった全身的な力調整戦略が誘発されず、アバタの「全身性」を十分に引き出せなかった．本研究では、指先の力から四肢の末端力という入出力の関係は保ちつつ、制御系

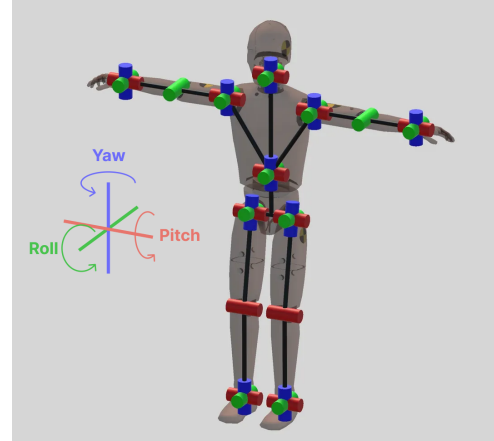


図 2: 人型アバタの関節自由度

を逆運動学 (Inverse Kinematics) から逆動力学 (Inverse Dynamics) へ置き換え、アバタ全身を構成する各関節が発生すべきトルクを算出することで末端で生じる物理作用を全身に伝達する．これにより、ユーザの指先から生じた力が仮想環境内での反力として身体各部へ戻り、足裏と地面の摩擦を介した姿勢再調整や運動連鎖が自然に発現すると考えられる．結果として、外界との物理的相互作用を伴う全身のアバタ操作を実現できる．

アバタ操作の一例として、ヒト型のアバタを操作するときの実装について説明する．本研究では、Unity が提供する物理演算 API である `ArticulationBody` クラスを用いてヒト型アバタの全身リンク系を階層構造として構築した．各リンクは図 2 に示すとおり独立した関節自由度 (DoF) と回転軸を備え、人体関節の運動範囲を再現している．

上肢および下肢の末端効果器に与えたい目標力ベクトル $\mathbf{F}_i$ ($i \in \{\text{LA, RA, LL, RL}\}$: 左腕・右腕・左脚・右脚) を関節トルク $\boldsymbol{\tau}_i$ に変換する際には、全身を一括で扱うのではなく **四肢ごとに独立したヤコビアン $\mathbf{J}_i(\boldsymbol{\theta}_i)$** を用いる．したがって各肢での関係式は以下のように与えられる．

$$\boldsymbol{\tau}_i = \mathbf{J}_i^T(\boldsymbol{\theta}_i) \mathbf{F}_i, \quad i \in \{\text{LA, RA, LL, RL}\} \quad (1)$$

算出した $\boldsymbol{\tau}_i$ を各 `ArticulationBody` インスタンスに与え、四肢それぞれが外力に対してリアルタイムに応答するよう制御している．また、頭部姿勢はヘッドマウントディスプレイ (HMD) から取得した回転行列を頭部リンクに直接マッピングし、ユーザ視線とモデル頭部の向きを同期させた．これにより、全身運動と視点操作を統合したインタラクティブなアバタ制御環境を実現している．

3. ユビによって可能となる身体-環境間インタラクションの設計空間

本節では、Borràs & Asfour が提案した多点接触における操作一身体移動 (loco-manipulation) の姿勢状態分類に基づき [2]、ヒト型アバタの四肢をエンドエフェクタとした場合の、環境 (不動物体) や物体 (可動物体) との接触点数

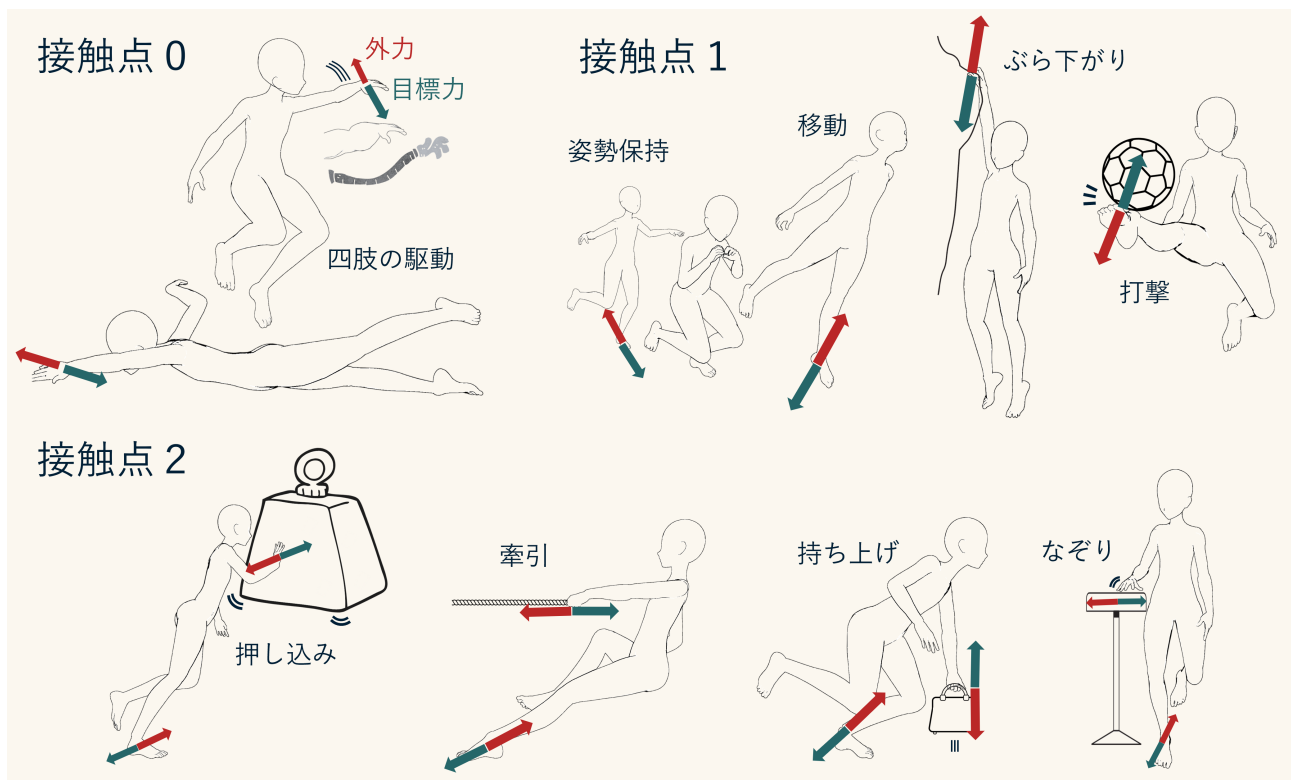


図 3: ユビによって可能となる身体-環境間インタラクション

に応じて、ユビが提示する身体-環境インタラクションの設計空間を体系的に整理する（図 3）。

まず、接触点がゼロ点、たとえばアバタが宙に浮いている状況では、逆動力学的を用いて四肢を駆動させ、操作部位の慣性モーメントや弾性力を提示できる。これによりアバタの質量、形状、弾性などを表現し得る。さらに空間の媒質に着目すると、例えば水中では四肢運動を利用した遊泳など特殊な移動形態が実現し、運動抵抗の変化を通じて空間媒質の粘性や密度を提示できる。

接触点が一点の場合、その対象が地面（環境）であれば、支持点への重心一致による姿勢保持、地面反力を利用した移動、あるいは身体捻転を介した回転運動などが実現可能であり、地面の弾性、粘性、摩擦係数、形状などを提示できる。同様に、壁面との一点接触では、ぶら下がり動作に加えて移動・回転運動が可能となり、壁の物理特性を知覚させる。さらに、空中で物体と一点接触した場合には、ユーザは把持物体の移動、投擲、打撃などの操作が可能となる。これにより対象物の重さや形状、形状や弾性などの表現が可能となる。

二点以上の接触が生じると、身体-物体-環境間の力相互作用を考慮した複雑な動作が可能となる。接触点が一点のみの場合、体重による荷重はすべてその一点に集中する。対照的に、接触点が二点以上ある場合は、一方で体重を支持し、他方でより精緻な力操作を独立して行うことが可能となる。たとえば、物体の持ち上げや押し引き、表面のなぞり操作などでは、一点接触時に推定できる慣性情報に加

え、硬さ、粘性、粗さ、摩擦係数といったより多様な触覚情報を提供できる。以上のように、接触点数を基軸として整理することで、ユビが実現し得る身体-環境インタラクションの多様なデザイン空間が明確となり、アバタ制御手法の選択や提示触覚の設計に指針を与える。

謝辞 本研究は、科研費若手研究（24K20818, 25K21242）、JST ムーンショット型研究開発事業 JPMJMs2013 の助成のもと遂行された。

参考文献

- [1] Takeru Hashimoto and Yutaro Hirao. Selfrionette: A fingertip force-input controller for continuous full-body avatar manipulation and diverse haptic interactions. In *Proceedings of the 37th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp. 1–14, 2024.
- [2] Júlia Borrás and Tamim Asfour. A whole-body pose taxonomy for loco-manipulation tasks. In *2015 IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems (IROS)*, pp. 1578–1585. IEEE, 2015.