

# 直接教示を用いた複数ヒューマノイドロボットによる 接触を伴う組手の振り付け手法

福谷友理 (東大附属中等) ○宇野友季子 佐藤啓宏 池内克史 (東京大学)

## 1. はじめに

ロボットを操作しやすくするための研究が盛んに行われている。宇宙ロボットアームや手術ロボットでは、厳しい環境下でもオペレータの意図通りに制御できるインターフェースが開発の焦点である。ヒューマノイドロボットを操作しやすくする手法としては、Choreonoid[1]やV-Sido[2]等の振り付け用ソフトウェアが開発され、専門知識が無いユーザでもロボットの操作が可能になった。画面上の3DCADモデルを操作する方法や、モーションキャプチャから動作をマッピングする方法によって動作指令を入力し、動力学シミュレータと連携することで力学的に安定な動作を生成している。

FAで使われるロボットアームには、人が直接動かして位置決めを行う直接教示が用いられてきた。アームと操作対象の物体の位置関係を視認できるので直感的に操作でき、物体把持や操作の際に接触状態を確認しながら微妙な調整を行うことができるという利点がある。一方、3DCGアニメーションや物理シミュレータの入力のために、人型パペットを用いる入力インターフェースが実用化されている。QUMARION[3]は、エンコーダのような関節センサを備えたパッシブ型パペットであり、今夏クリエイタ向けに販売が開始された。Yoshizakiら[2]は、サーボモータの角度読み取り機能を利用して、小型ヒューマノイドロボットをアクチュエータを備えたアクティブ型パペットとして用いることを提案した。物理シミュレーションモデルを用いて重力補償することで姿勢保持と容易な入力を実現しており、これを無重力教示と呼んでいる。

本研究では、まずヒューマノイドロボットに直接教示を適用して、自立バランスや腕振りなどのダイナミックなロボット自身の動作を生成する手法を提案する。物理シミュレータは用いずに簡素なアルゴリズムで姿勢保持と軽い力で操作できる仕組みを実装し、代わりにGUIボタン操作でロボットの関節の柔らかさの状態をユーザが積極的に変更できるようにした。これにより動作実行時の全身バランスを実際に確認しながら姿勢の入力ができるようになり、片足立ちや海老蹴りのように難しい動作の振り付けが可能となった。

つぎに直接教示の応用として、複数のロボットによる接触を伴う組手の振り付け手法を提案する。剛体のように制御されたロボット同士が接触すると、衝撃を吸収しきれずに簡単に倒れてしまう。そこで、ロボットの動作中も直接教示中と同様に関節の角度・負荷・速度を取得できるようにして、ロボットからロボットへの教示によって接触の部位とタイミングを調べる仕組みを作った。接触が起こるタイミングに、接触部位の関節をコンプライアンス制御を用いて柔らかく制御するようにして、衝撃を逃がせるようにした。ロボット

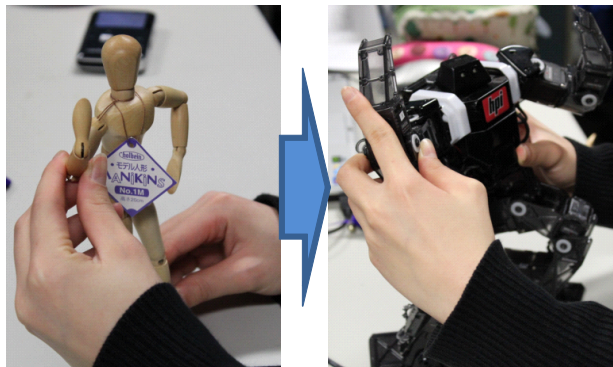


図1. ヒューマノイドロボットの直接教示

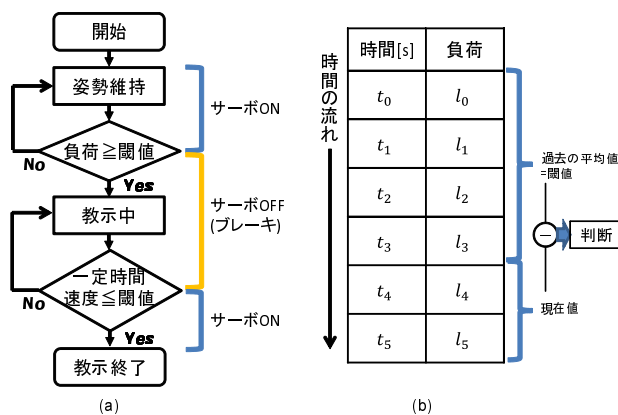


図2 柔らかさ制御アルゴリズム(a) フローチャート (b) 閾値



図3. GUI ボタンによる制御モード切り替え

の動作のばらつきや、ロボット同士の相対的な位置姿勢やタイミングのずれ等の影響を吸収するために、ロボット単体の練習によって誤差の影響を調べる枠組みを提案し、誤差を配慮した衝突制御を行うことで複数ロボットによる組手が実現できることを実験結果に示す。

## 2. ヒューマノイドロボットの直接教示

### 2-1 柔らかさ制御アルゴリズム

図1に示すように、デッサン人形と同じくヒューマノイドロボットも、全身の姿勢を維持したまま、変更したい関節のみを調節出来るようにしたい。人形が扱いやすいのは、芯に針金が入っていて姿勢維持しつつ、変更したい関節のみを変更することができるためである。ヒューマノイドロボットにおいても姿勢維持と姿勢変更を同時に行えるようにするため、図2に示すよ

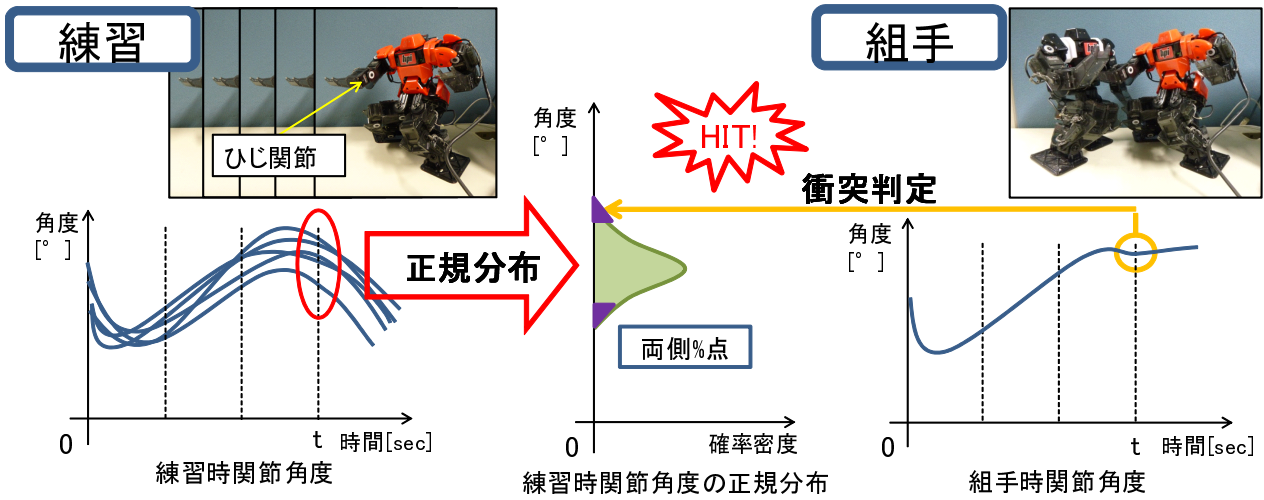


図4. 練習時の関節情報をもとに確率的に行う衝突判定

うなアルゴリズムを考案した。

制御の流れを図2(a)に示す。ロボットの関節を構成するサーボモータには、ON、OFF、ブレーキの3種類のモータ制御モードがある。ロボットは初め姿勢維持のため全身の関節はONモードで固定されている。そこへ人間が姿勢を変えようとロボットの関節に力を加えると大きな負荷がかかることを利用し、負荷が閾値よりも大きくなったら教示開始だと判断し、関節をブレーキモードに緩める。人間が教示を終えるとモータは動かされないため、速度が一定時間閾値を下回ったら教示終了と判断し、姿勢維持のために関節をONモードで固定させる。

閾値を一定値とすると、重力の影響でロボットの姿勢によって負荷が変化するので挙動が変化してしまう。この解決のために、図2(b)のように過去数フレームの計測値の平均から随時閾値を変更し、過去と現在の値の差分の大きさで動的に制御する。

## 2.2 GUIによる制御モード切り替え

図3に制御モード切替用GUIボタンの実装例を示す。左から、サーボモータのON/OFF、全関節ブレーキモード、単発の姿勢送信、連続姿勢送信、単発の姿勢受信、柔らかさ制御アルゴリズムによる連続姿勢受信といった機能を、ユーザはボタンによって選択できる。ブレーキモードは、大幅な姿勢変更に便利である。

このようにGUIボタンの操作によって、ロボットの大幅な姿勢変更や微調整などの制御モードを状況に応じて選択できるようにすると、ユーザはロボットの動作やバランスを適時実機を使って実際に確認しながら振り付けることができる。この方法は、とくにキーボードの入力に適している。

## 3. 複数ロボットによる組手の振り付け

### 3.1 練習による接触部位とタイミングの安定な取得

直接教示を用いて2台以上のロボットを同一の空間で同時に振り付けると、相対座標を目視で確認しながら動作を生成出来るので、群舞などの演出を作ることが出来る。しかし、組手のようにロボット同士が一部接触する場合、その衝撃によりバランスを崩して転倒

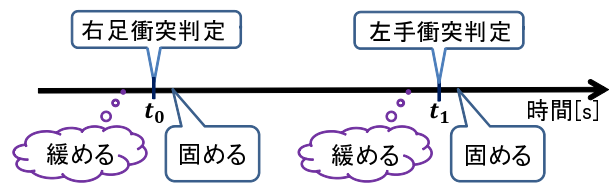


図5. 関節を緩めるタイミング

するなど予測できない動作が起こる。これを防ぐために、接触の起こる関節とタイミングを調べ、衝突の起こりうる時間のみ、コンプライアンス制御を用いて関節を柔らかく制御して衝撃を逃がすようにする。ところが組手開始の時間や位置のずれによって、衝突時の接触箇所や度合にばらつきが生じる。これを解決するため、組手と同じ動作を衝突のない単体で何度も行う練習をし、その関節情報が正規分布をなすとみなして誤差の大きさを推定する。

図4に示す方法で衝突判定を行う。まず練習として、ロボットごとに単体で数回同じ動作を行い、全関節のモータの角度・負荷・速度を記録する。読み込んだ関節情報は、各時間、関節において正規分布であると見なして衝突判定の基準とする。次に、組手として複数のロボットで接触が起こるまでの動作を行い、その際の関節情報を各ロボットそれぞれに読み込む。その組手時の値が練習時の正規分布の両側%点よりも外れた値をとる場合、接触していると判断する。安定な判定結果を得るために角度・負荷・速度の項目のうち2つ以上が外れ値だった場合に、衝突と見なす。

### 3.2 衝撃制御

この衝突判定結果を基に、関節を柔らかくする部位とタイミングを制御する。例えば図5の場合、 $t_0$ 秒目に右足に衝突判定が出たとする。衝撃吸収と姿勢維持のため、 $t_0$ の少し前から右足の関節を緩め、 $t_0$ の少し後に関節を固定する。衝突判定の出た関節と時間にロボットそれぞれにコンプライアンス制御のパラメータ調整を行い柔らかくすることで、接触の衝撃を和らげて姿勢を保つことが出来る。

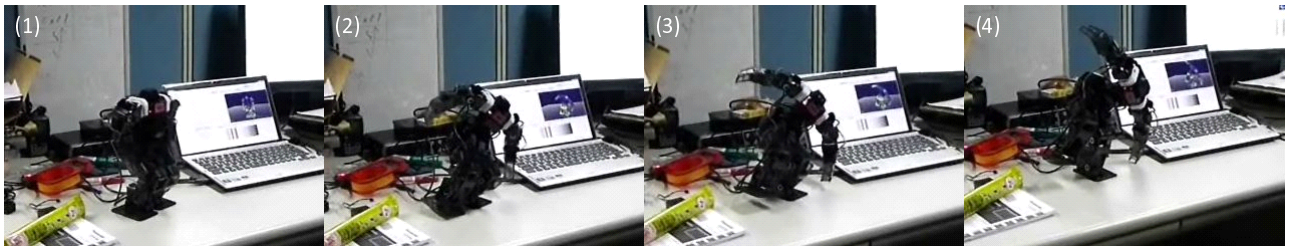


図 6．直接教示による片足立ちの振り付け．(1) 直立．(2) 左手で重心を下げる．(3) 両手でバランスを取る．(4) 左足で片足立ち．



図 7．直接教示による海老蹴りの振り付け．(1) びんの背後に立つ．(2) 両手を振り上げる．(3) 勢いよく前のめり．(4) 両手を床に付く．(5) 右足でびんを蹴る．(6) 右足を蹴り上げる．

## 4. 実験

### 4.1 実験環境と実装

本研究では、hpi 社の小型ヒューマノイドロボット GR-001 とロボット振り付け用ソフトウェア Choreonoid および G-ROBOT プラグインを実験環境として用いた。

### 4.2 バランスの難しい動作

図 6, 7 に、直接教示を用いて片足立ちや海老蹴りといったバランスの難しい動作を振り付けた結果を示す。ヒューマノイドロボットの姿勢を作る場合、自立のために重力や摩擦力の影響を考慮する必要があるため、バランス調整のための姿勢の微調節が必要である。そこで、人間の手先の力加減による微調節が可能な直接教示が有効であった。

### 4.3 複数ロボットによる接触を伴う組手

提案手法を用いて、黒と赤の 2 台のロボットによる組手を振り付けた結果を図 8 に示す。図 9 は黒いロボット、図 10 は赤いロボットのデータのグラフであり、練習 5 回分の (a) 角度 (c) 負荷 (e) 速度を示している。赤い矢印は衝突のタイミングを表す。(b) 角度の正規分布 (d) 負荷の正規分布 (f) 速度の正規分布と、組手時の計測値との比較により衝突判定をしている様子を示している。正規分布の適当に定めた両側 1% 点より外にとった組手の関節情報が 2 種類以上あったので、これらの関節はこの時間に衝突していると判定した。衝突判定結果を基に関節を緩めて衝撃を逃がす制御をしたところ、図 8 のような接触を伴う組手を実現することが出来た。

練習の試行は手間と時間が掛かる問題があるが、ロボットのばらつきを含んだ挙動を把握でき、ある程度安定に動作する組手の実行結果を振り付けられることが確認できた。

## 5. おわりに

本研究では、ヒューマノイドロボットに直接教示を適用する手法を提案し、バランスの難しい動作の生成に適していることを示した。ロボット同士が接触しながら演舞する組手を、直接教示と練習の枠組みを用いて安定に実現出来る手法を提案した。

ヒューマノイドロボット振り付け用ソフトウェアにおける共通の課題として、ロボットとその周りの環境の相互作用を正確に予測して動作を生成することが困難だという点が挙げられる。直接教示を用いると、相互作用の影響を含んだ計測値を取得して教示データに出来るので、複雑な環境でのロボットの安定な動作生成に役立つ可能性がある。今後は、躰道のようなアクロバティックな動作生成も出来るようにする予定である。

### 謝辞

本研究は科研費 MEXT/JSPS 23240026 の助成を受けたものである。また (独) 科学技術振興機構協定事業 未来の科学者養成講座最先端研究を取り入れたジュニア科学者育成プログラムの協力を受けた。本研究を進めるにあたり、ご助言頂いた電気通信大学工藤俊亮先生ならびに産業技術総合研究所中岡慎一郎先生に感謝致します。

### 参考文献

- [1] 中岡 慎一郎, 三浦 郁奈子, 森澤 光晴, 金広 文男, 金子 健二, 梶田 秀司, 横井 一仁: “ヒューマノイドロボットのコンテンツ技術化に向けて-クリエイターによる多様な表現の創出が可能な二足歩行ヒューマノイドロボットの実現-”, Synthesiology, Vol. 4, No. 2, pp.80-91, 2011.
- [2] W. Yoshizaki, Y. Sugiura, A. C. Chiou, S. Hashimoto, M. Inami, T. Igarashi, Y. Akazawa, K. Kawauchi, S. Kagami, M. Mochimaru: “An Actuated Physical Puppet as an Input Device for Controlling a Digital Manikin,” the ACM CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI2011), pp.637-646, 2011.
- [3] “開発中の「QUMA」技術を応用した 3D モーションキャプチャ装置を公開”, <http://www.softether.co.jp/jp/news/110721.aspx>.

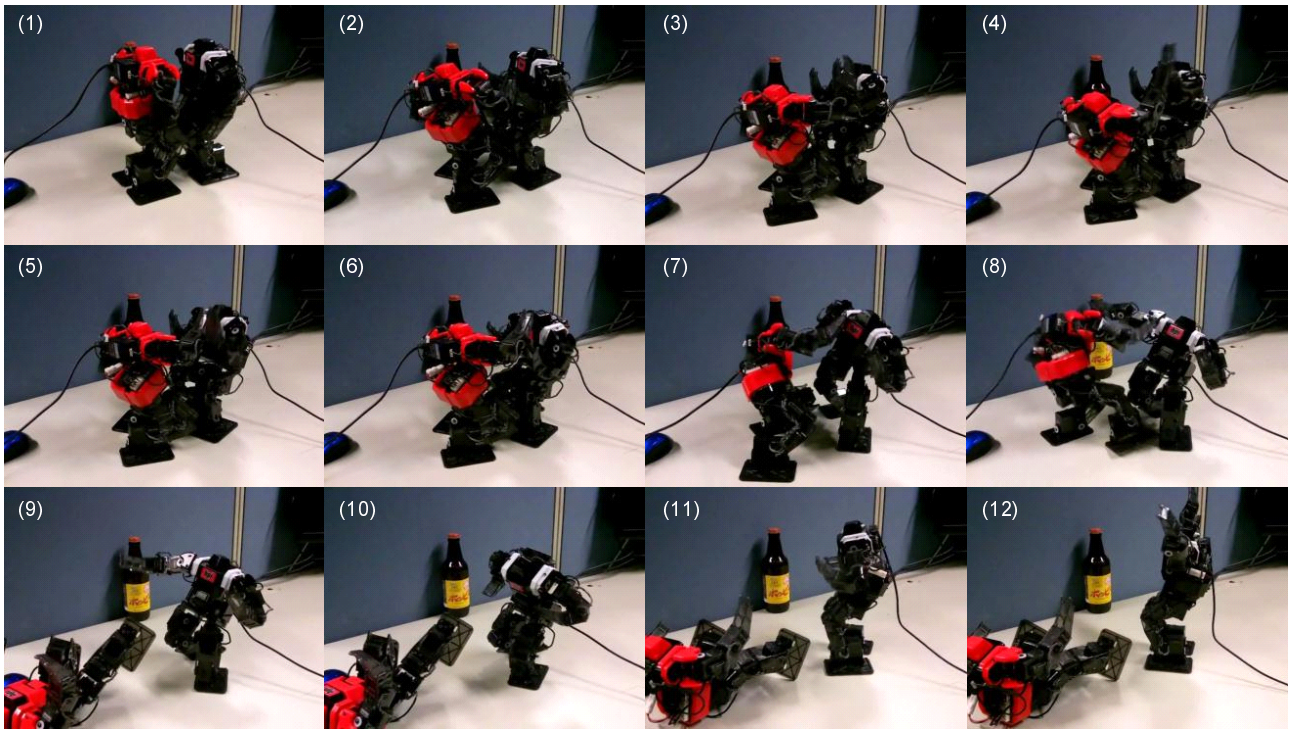


図 8 . 2 台のヒューマノイドロボットによる格闘組手の実演. (1) 試合開始. (3) 赤いロボットが右手で殴りかかる. (4) 黒いロボットは左手で柔らかく受け流す. (6) 黒いロボットが攻勢に転じる. (7) 右手で突きを繰り返す. (9) 赤いロボットを押し倒す. (12) 勝利のポーズ.

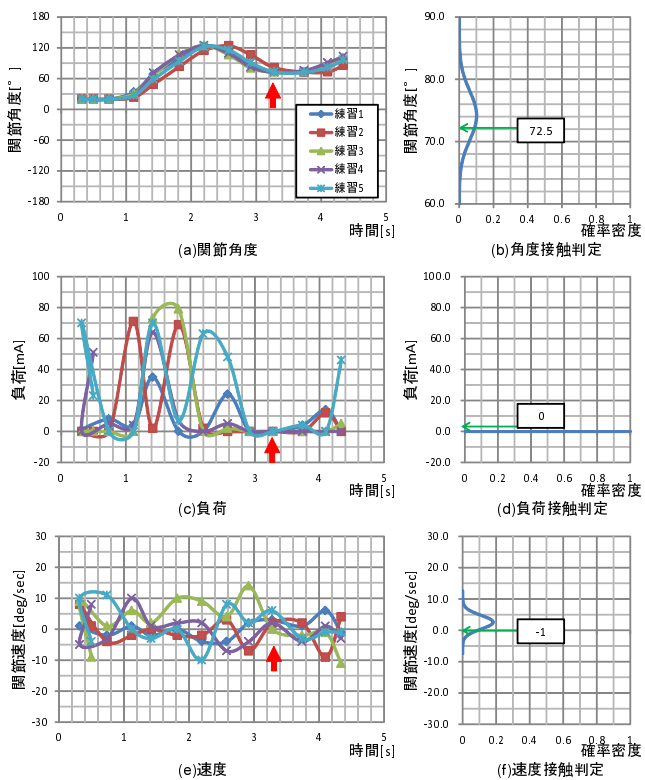


図 9 . 黒いロボットの左腕の角度・負荷・速度と衝突判定

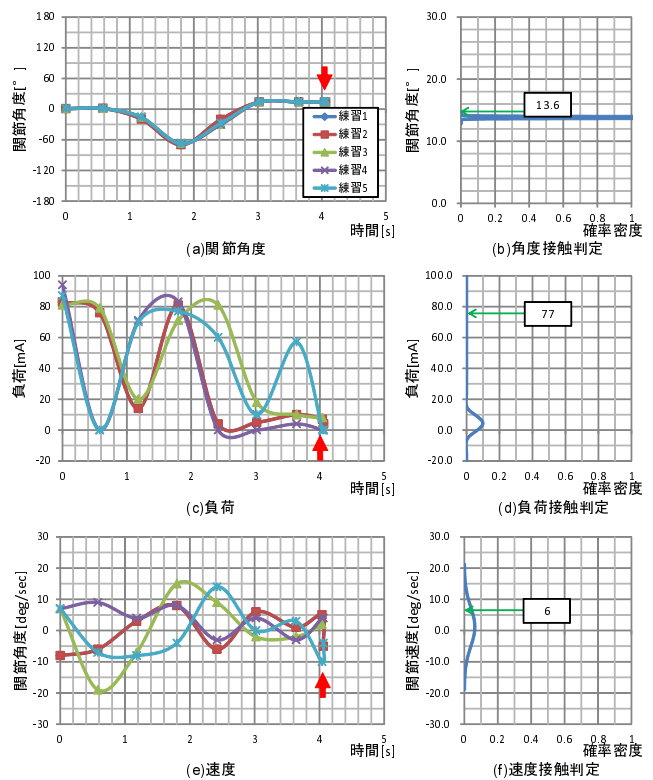


図 10 . 赤いロボットの右肘の角度・負荷・速度と衝突判定