

柔軟関節ヒューマノイドロボットを用いた 物理的な対人インタラクションの解析

Analysis of Physical Interaction between Human and Flexible Joint Robot

池本 周平^{†‡}

Shuhei Ikemoto

港 隆史[‡]

Takashi Minato

石黒 浩^{†‡}

Hiroshi Ishiguro

[†] 大阪大学 (Osaka Univ.), [‡] JST ERATO

1 はじめに

ロボットの関節の柔軟性は、物理的な対人インタラクションを安全に行う上で大きな利点となる。特に、従来の電気モータと減速器を組み合わせた大きな機械的インピーダンスを有するロボットでは困難な、動作中のロボットに人間が接触するタスクにおいて、ロボットの関節の柔軟性は複雑な制御を行うことなくインタラクションを実現し、人間から加えられる力に対して自然な応答を可能にする特長となる。そのため、柔軟関節ヒューマノイドロボットを用いることにより、物理的インタラクションによる人間からロボットへのオンライン動作教示や、人間とロボットの協調作業¹⁾、ロボットによる能動的な物理的に接触を伴うインタラクション等、現在までに行うことが非常に困難であったタスクを容易に扱える可能性がある。

Fig.1に本研究で用いるロボットCB2を示す²⁾。CB2は全身に56自由度を有する多自由度柔軟関節ヒューマノイドロボットであり、首から下の各関節が空気圧アクチュエータによって駆動されている。それにより、首から下の各関節は空気の圧縮性によって小さい機械的インピーダンスを有しており、動作中の物理的インタラクションの実現が容易であるという特長を有する。

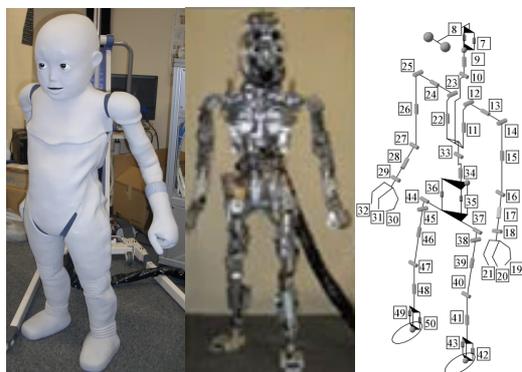


Fig.1 CB2 (The robot actuated by pneumatic actuators).

物理的な人間 - ロボット間インタラクションの評価において、タスクの成否に加え、人間がそのインタラ

クションを主観的に良好に感じるか否かが重要であると考えられる。タスクの成否については、人間 - ロボット間での力の授受と、それによるロボットの状態変化で評価できると考えられる。しかし、この人間の主観的評価の要因となる物理量については明らかにされていない。

そのため、まず人間およびロボットの状態変化の関係性を明らかにし、人間の主観的評価を含めた物理的インタラクション評価のための指標を確立することが非常に重要である。

そこで本研究では、関節に柔軟性を有するロボットと人間の物理的インタラクションに注目し、そのインタラクションの解析を行い、人間 - ロボット間の物理的インタラクションに現れる物理的特徴を明らかにすることを目的とする。特に、柔軟関節ヒューマノイドロボットが座っている状態から人間がロボットの両手を持って引き起こすインタラクションを扱い、その際のロボットおよび人間の姿勢の変化に注目して解析を行う。

2 CB2 制御システム

人間とロボットの接触を伴うインタラクションを実現するために、本研究では Fig.2 に示す制御システムを構築した。

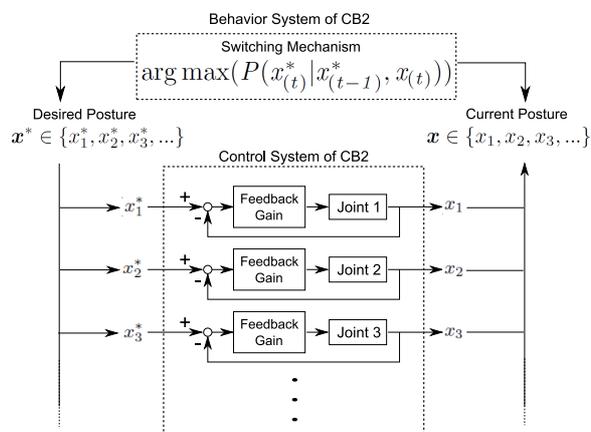


Fig.2 Control system for uprising interaction.

従来の電気モータと減速器を組み合わせたロボットは大きい機械的インピーダンスを有するため、人間が

ら加えられる力に応じて各関節角を受動的に変化させることが困難である．これに対し，本研究で用いるロボットは空気圧アクチュエータによって駆動させるため，各関節は外力に対する柔軟性を有し，人間の力に応じて各関節角を受動的に変化させることが容易に実現できる．しかし，空気圧アクチュエータは，その応答にむだ時間を含む大きな遅れが存在し，強い非線形性を有することが知られている．それにより，単純な閉ループ制御では，安定で応答の良い制御を行うことが困難である．この問題点に対し，本研究では制御中にフィードバックゲインを変更し，非線形性に対処するゲインスケジューリング制御によって角度制御する制御システムを実装した．

また，物理的インタラクションにおいてロボットは，人間から加えられる力に対して柔軟に姿勢を変化させることが重要であり，ある時刻における正確な目標姿勢の実現は重要ではない．この点に対し，空気圧アクチュエータの柔軟性は，ロボットの目標姿勢を離散的に切り替えた際の動作の滑らかさに寄与すると考え，本研究ではロボットの動作を離散的な姿勢の切り替えで表現するシステムとした．

Fig.2 のシステムにおいて，引き起こしインタラクションを実現した際の各パラメータの設定の手順を以下に示す．

1. 初期姿勢の設定
2. 外乱の無い状態で立位を維持できる最終目標姿勢とゲインの設定
3. 初期姿勢から最終姿勢に到達するまでの中間目標姿勢の設定
4. 各姿勢を角度制御の目標値とし，それらを切り替えるタイミングを調節することで引き起こしインタラクションを実現する

Fig.3 に上記の手順によって実現した引き起こしインタラクションの連続写真を示す．このとき，各姿勢およびゲインは試行錯誤により決定した．また，Fig.2 において $\arg \max(P(x_{(t)}^* | x_{(t-1)}^*, x_{(t)}))$ で表される姿勢切り替え機構については，時刻 t における次の目標姿勢への切り替えを行うか否かを時刻 $t-1$ における目標姿勢，時刻 t における姿勢を用いた条件式で判断する機構として実装した．そのため，ロボットの動作は，人間がロボットに力を加え，その姿勢を変化させることによって開始される．

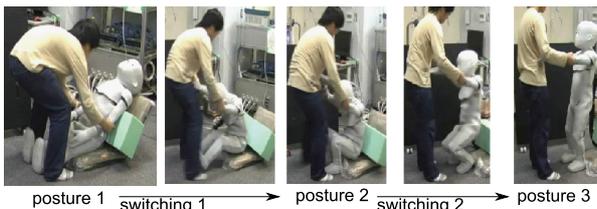


Fig.3 Uprizing interaction.

Fig.3 において，posture 1，posture 2，posture 3 は，それぞれ初期姿勢，中間目標姿勢，最終目標姿勢

を表しており，それらの切り替えによって引き起こしインタラクションを実現している．また，初期姿勢と中間姿勢，および中間姿勢と最終姿勢の間は離散的に目標姿勢が変化するが，関節の柔軟性によって関節角が急激に変化することなく，滑らかな動作を実現できることを確認した．

3 インタラクティブな運動の解析

引き起こしインタラクションの際の人間およびロボットの姿勢データを採取するために，本研究ではモーションキャプチャシステムおよびポテンショメータを用いる．ここで，両センサのデータは同期して取得でき，モーションキャプチャシステムのサンプリング周波数は 60Hz であり，ロボット制御システムのサンプリング周波数は 100Hz である．

ロボットを引き起こす被験者は 2 名であり，内 1 名がロボットの動作を熟知している熟練者，他 1 名がロボットの動作について説明を受けた初心者である．それらの被験者が各 5 回の試行を行い，各被験者における成功と失敗の試行を比較する．また，モーションキャプチャシステムによる姿勢計測に用いるマーカ配置は，被験者の両肩，両手先にそれぞれ 1 つ，両肘にそれぞれ 2 つ，腰に 2 つ，背に 1 つの配置とし，被験者の上半身の姿勢の変化を計測した．

4 解析結果

4.1 姿勢変化ノルムの導入

本研究では特に，引き起こしインタラクション時の被験者およびロボットの姿勢変化に注目する．そこで，得られた計測結果から以下の特徴を計算した．

1. ロボットの各関節角を基底としたロボットの姿勢空間 X を定義し，その空間において現在時刻と 1 時刻前のデータの距離をロボットの姿勢変化ノルム a として算出する．このとき，姿勢空間 X の定義には，Fig.1 の自由度配置図における関節番号 8 ~ 10，19 ~ 21，30 ~ 32 のデータを除いた 34 自由度の関節角データを用いた．

$$a_{(t)} = \| \mathbf{x}_{(t)} - \mathbf{x}_{(t-1)} \|_2 \quad (1)$$

$$\mathbf{x} \in X$$

2. 各マーカの 3 次元位置を基底とした被験者の姿勢空間 Y を定義し，その空間において現在時刻と 1 時刻前のデータの点の距離を被験者の姿勢変化ノルム b として算出する．このとき，姿勢空間 Y の定義には，肘に取り付けたマーカのデータにノイズが多かったため，肘のマーカ以外のデータを用いた．

$$b_{(t)} = \| \mathbf{y}_{(t)} - \mathbf{y}_{(t-1)} \|_2 \quad (2)$$

$$\mathbf{y} \in Y$$

4.2 相互相関値による引き起こしインタラクションの評価

前述の手順によって算出される被験者およびロボットの姿勢変化ノルムは，被験者およびロボットの姿勢

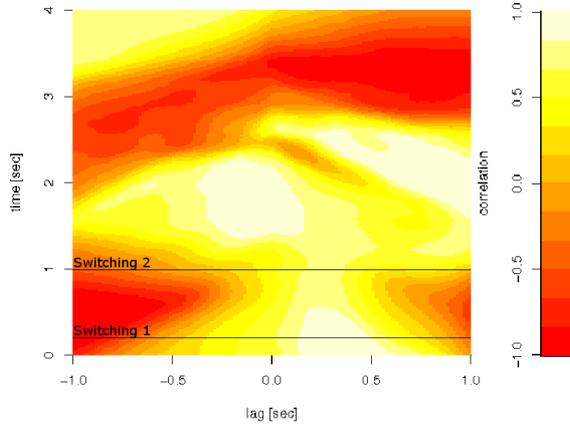
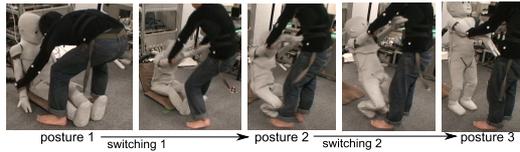


Fig.4 Result of smooth interaction by an expert

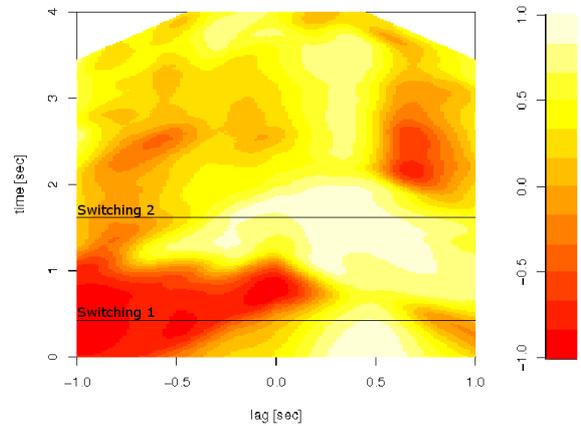
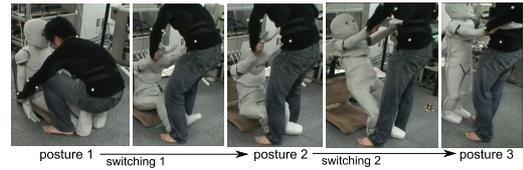


Fig.5 Result of smooth interaction by a beginner

変化速度に相当する値である．そのため，それらの値の間に強い相関が見られる場合は，被験者とロボットが同期して姿勢を変化させていることを意味する．2節で説明した制御システムにおいて，目標姿勢の切り替えタイミングは現時刻の姿勢，および目標姿勢を参照することによって行われる．よって，引き起こしインタラクションを開始するためには被験者がロボットに力を加え，ロボットの姿勢がそれに対して受動的に変化する必要がある．その後，ロボットの目標姿勢が切り替わり，ロボットの姿勢が能動的に変化し始める．よって，引き起こしの初期には被験者の姿勢変化に対しロボットの姿勢が遅れて変化すると考えられる．また，能動的にロボットの姿勢変化が生じることにより，その時間遅れが小さくなると考えられる．

そこで本研究では，被験者およびロボットの姿勢変化の時間遅れが連続的に変化し，次第に小さくなることを円滑な引き起こしインタラクションであると考え， $\{x_{(t)}|t = t_r \sim t_r + t_n\}$ と $\{y_{(t)}|t = t_h \sim t_h + t_n\}$ の間の相互相関値に注目する．ここで， t_n は相互相関値を算出するために用いるデータの時間幅である．またパラメータ t_l を $t_l = t_r - t_h$ で定義される被験者およびロボットのデータ間の注目する時間幅の差とし，このパラメータを変化させて相互相関値を計算した．このとき， $t_r \geq 0$ ， $t_h \geq 0$ であり，ロボットが人間の一方のデータに時間遅れを加えるため，一方が0以外の値のとき他方を0とする条件とした．

Fig.4に熟練者による引き起こし，Fig.5に初心者による円滑な引き起こし，Fig.6に初心者による円滑ではない引き起こし，およびFig.7に初心者による引き起こし失敗時の連続写真，およびそのデータを解析した結果を示す．ここで，円滑な引き起こしかどうかは主観的に判断し，引き起こし失敗は最終姿勢である立位に達することができなかった場合とした．Fig.4，Fig.5，Fig.6，Fig.7において x 軸， y 軸はそれぞれ t_l ， t を表

し，そのときの相互相関値は色の濃淡で表わされる．また， $t = 0$ は被験者がロボットの手を持ち，引き起こし始めた時間であり，switching 1 および switching 2 の直線はそれぞれの連続写真における目標姿勢切り替えタイミングを表している．

Fig.4，Fig.5，Fig.6，Fig.7において，インタラクション開始時には $t_l > 0$ に正の強い相関が現れている．これは被験者の姿勢変化ノルムの変化に対してロボットの姿勢変化ノルムの変化が遅れて生じることを意味し，2節で説明した制御システムがインタラクション開始時のロボットの姿勢変化を参照して目標姿勢を切り替えることに起因すると考えられる．初心者による引き起こしに比べ熟練者の引き起こしの開始時に強い相関の現れる t_l が小さいことは，熟練者がロボットの動作を初心者よりも詳しく理解しており，ロボットの能動的動作と同期して引き起こしインタラクションを始めるためと考えられる．

円滑な引き起こしインタラクションの結果である Fig.4，Fig.5 では，正の相関を保ったままインタラクションが進行する．それに対し，円滑でない引き起こしインタラクションの結果である Fig.6，Fig.7 では，相互相関値の減少，正負反転を生じている．これは円滑な引き起こしインタラクションでは，被験者の姿勢変化に伴うロボットの姿勢変化に対しロボットが動作を開始し，ロボットが被験者の動作に追従するように動作しているのに対し，円滑でない引き起こしインタラクションではロボットの動作は被験者の動作に追従していないためであると考えられる．また，円滑な引き起こしインタラクションの結果では， $t_l \approx 0$ における相関が強くなる．これは被験者の姿勢変化とロボットの姿勢変化の間の時間差が減少することを表し，被験者とロボットの動作が次第に同期するためであると考えられる．

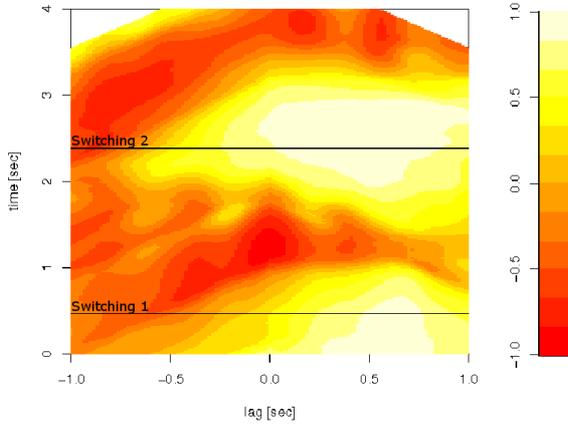
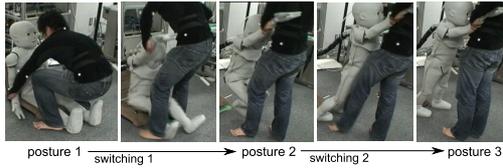


Fig.6 Result of nonsmooth interaction by a beginner

以上の結果により、ロボットと被験者の動作が次第に同期することが円滑な引き起こしインタラクションの特徴であると考えられる。一方、正の相関が見られる t_l が連続的に変化せず、負の相関が現れる場合に円滑でない引き起こし、あるいは引き起こしが失敗するインタラクションであると考えられる。

5 考察

4節において示した結果において見られた、熟練者に比べ、初心者のインタラクション開始時に生じる強い相関が現れる t_l が大きくなる現象は、人間間の物理的インタラクションにおいても、互いに相手の動作を十分に知った状況と十分に知らない状況の間で生じると考えられる。また、円滑な引き起こし時の解析結果に見られた人間 - ロボット間の姿勢変化の同期現象についても、2者間で物理的インタラクションの目標、相手の意図を理解している場合に生じると考えられる。

また、本研究で扱った引き起こしインタラクション以外の物理的インタラクションとして、一方が他方の手を引いて誘導するタスク、2者が同一の物体を移動させる共同作業のタスクを考えると、これらのタスクについても相手の動作、その意図を十分に知りえない状況において同様の姿勢変化が現れる時間の遅れ、およびインタラクションの進行に伴う同期が生じると考えられる。よって、それを確認するため、引き起こし以外の物理的インタラクションについて扱うことが課題と言える。

本研究で扱った姿勢変化ノルムの変化は2者間の力のやり取りによって生じる位置エネルギー、運動エネルギーの変化によって生じると言える。そのため、力センサ、床反力センサを導入し、物理的インタラクションにおける本質的な物理量によって、その評価方法を確立することも重要な課題と言える。

また、ロボットが人間の働きかけに対して受動的に

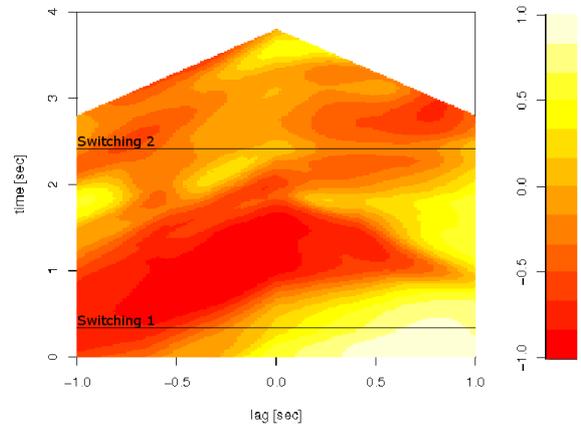
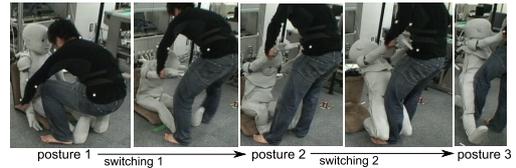


Fig.7 Result of failed interaction by a beginner

応答することに加え、能動的に人間に働きかけることが必要な物理的インタラクションの場合は、4節と同様の解析を行うことで、ロボットの受動的動作と能動的動作の切り替えの間で強い相関が現れる t_l の正負が反転すると考えられる。これは物理的インタラクションにおけるターンテイキングであると考えられ、円滑なターンテイキングを実現するための要因を解析により明らかにすることが物理的インタラクションを行うコミュニケーションロボットの行動を実装する上で重要であると考えられる。

6 おわりに

本研究では人間がロボットを引き起こすインタラクションに注目し、被験者およびロボットの姿勢変化の間の相互相関によって、円滑なインタラクションと円滑でないインタラクションの間に特徴的な違いが見られることを示した。また、考察において引き起こし以外の物理的インタラクションにおいても、その特徴的な違いが現れると考えられることを述べた。

本研究は、人間 - ロボット間の物理的インタラクションにおいて、人間、ロボットの双方があるタスクを成功させるための情報の授受を円滑に行えるためのロボットの制御システムの構築を目標としており、今回示した結果は、ロボットの受動的動作と能動的動作の切り替えタイミングが重要であることを示唆するものである。

- 1) K. Yokoyama, H. Handa, T. Isozumi, Y. Fukase, K. Kaneko, F. Kanehiro, Y. Kawai, F. Tomita and H. Hirukawa: Cooperative Works by a Human and a Humanoid Robot, IEEE International Conference on Robotics & Automation, September 14-19, 2003
- 2) 石黒 浩, 港 隆史, 吉川 雄一郎, 野田 智之, 池本 周平: 社会的共創知能, 第 25 回日本ロボット学会学術講演回, 3B14, 2007