

自律行動の誘導に基づく等身大ヒューマノイドの 全身動作のオンライン教示システム

小倉 崇 羽根田 淳 岡田 慧 稲葉 雅幸 (東京大学)

Teaching System of Humanoid by Navigation of Autonomous Actions

*Takashi OGURA, Atsushi HANEDA, Kei OKADA, Masayuki INABA
(The University of Tokyo)

Abstract— This paper presents an on line teaching system for life size humanoid robot. This system uses a combination of autonomous motions for motion navigation. Combination of arms navigation by impedance control, tracking system and walk navigation system by leading hands enables navigate life size humanoid freely without any devices. In this system we do not use the joint angle sequence directly to replay the motion sequence, make motion plans from observed data. In the experiment the operator takes a humanoid robot to a kitchen and hold a kettle using this teaching system, and replayed the motion sequence using the data in a little different environments.

Key Words: Humanoid Teaching System, Direct Teach, Planning, Whole Body Manipulation

1. はじめに

本論文では、等身大ヒューマノイドに適用可能なオンラインでの教示システムについて述べる。例えば Fig.1 に示すような、キッチンなどの生活環境において、ロボットがトレイの把持方法を知らない場合に、即座に動作を教示することができることが様々な環境での利用が期待されるヒューマノイドロボットに必要な不可欠な機能であると言える。特に家庭での利用形態を考慮すると、その教示には熟練なしに容易に教示が行なえること、ロボットの動作中にオンラインで教示可能なこと、ある程度環境が変化しても教示された動作が再現可能であることが特に求められる。

本論文は、まずヒューマノイドロボットに適した教示法について議論し、必要な機能を実現することが可能なシステムの構成を示す。次にそのシステムに最低限必要となる機能について具体的な実装を述べ、等身大ヒューマノイド HRP2 を用いた実験例を示すことでそのシステムの有効性を示し、最後に結論を述べる。

2. 自律行動の誘導と目的再現によるオンライン教示システム

ヒューマノイドの教示に求められるのは、熟練なしに容易に教示が行なえること、ある程度環境が変化しても教示された動作が再現可能であることである。この観点からまず既存の教示法をヒューマノイドロボットに適用した場合の利点と問題点を考察する。

2-1 ヒューマノイドの教示における教示内容

ヒューマノイドのような多様なタスクをこなすことが可能なロボットの場合、まず何を教示するかが問題となり、それに従って、何によって、どのように教示するかがある程度決まってくる。まず、ヒューマノイドに何を教示するかは以下の 5 つレベルを上げることができる。

- 運動そのものの教示



Fig.1 On-line teaching for humanoid robots.

- 運動の補助や修正
- 操作対象や運動の指示
- ロボットの置かれた状況の教示
- 計画や運動のための環境の認識の教示・補助

運動の教示や、運動の修正などにおいては、細かな関節の動きや、姿勢を教示するため、数値的な入力が必要となる一方で、対象の認識や、歩行などの行動レベルでの操作指示や、モード切替のような状況の教示においてはシンボルレベルでの入力が有効である。ヒューマノイドの教示システムを構築する場合、上記すべてに対応する必要がある。そのため、さまざまな入力を受け付けることができることが望まれる。何を用いて教示するかについては、オンラインでの入力が可能なものとして、音声・視覚・人形・ジョイスティック・ロボットの身体などがある。これらは Table 1 に示すように、シンボリックな入力が可能なもの、数値やアナログ的な入力が可能なものの二つに分類することができる。

Table 1 ヒューマノイドの教示デバイスの分類

シンボル入力	音声・ボタン, スイッチ
アナログ入力	ジョイスティック・視覚 マスタスレーブ・身体

2.2 ヒューマノイドのオンライン教示における操作方法

以上の入力のうち, さらに日常生活環境での教示を想定する場合, デバイスレスでの教示が望ましい. そのため, 音声を利用したシンボル入力, 身体を利用した直接的な入力, 視覚を用いた入力のみを用いてヒューマノイドの行動を誘導し, 教示しなければならない.

サーボを切って直接動かす 小型ヒューマノイドにおいては, サーボを切ることで全身の関節角度を自由に動かすことができる状態にし, 直接教示をすることができている. 対象が人間に比較し, 十分小型で, 体重を容易に支えることができれば非常に直感的かつ容易な教示法であるが, 等身大ヒューマノイドにおいてはサーボを切った場合, 教示中にたとえ一部のサーボを落とした状態であっても体を支えることが困難になり, また人間が支えることも難しい.

力制御などによる人間の力になじむ動作 人間の力にある程度ロボットの体をなじませることでロボットを人間の意図したとおりに動かす方法である. サーボを切った場合に比べ, 自重を支えることができること, アクチュエータの特性に依存せず自由に操作感を定めることができることなどに利点があるが等身大ヒューマノイドにも適用可能な教示法であり腱駆動型ヒューマノイドの教示 [2] では腱の張力制御による教示を行なっている. ただし, 誤動作の危険性があり, また, 対象物体を教示したり, 歩行などのフィードバックが必要な制御を含んだ動作の教示は困難である.

2.3 自律行動の誘導と目的の再現

シンボルレベルでの入力はフェーズ切り替えに用い, 実際のオンラインでの入力は, 身体を用いた入力・視覚による入力のみを用いることで, デバイスレスでのオンラインでの教示システムを構築する. まずロボットを自由に誘導する機能 (反射的行動再生器) が必要であり, それによって誘導された動作, 観測結果から, 抽象的なレベルでの指示を解釈し受け取ることができる機能 (目的読み取り器) が必要である. そしてそれぞれを教示データとして蓄える. 再生には観測データを下にしてロボットがその行動を再現できるように, プランナを用いて行動を生成させる (目的再生器). これらすべてを備えたシステムにより環境が異なった場合でも有効な教示が可能になる.

3. 反射的行動再生器

3.1 インピーダンス制御による手先位置姿勢誘導機構

ロボットに対象物の把持点を教示するために, 手先位置姿勢をオンラインで人間の思う通りに動かすことが求められる. 手先に搭載された 6 軸力センサを用い

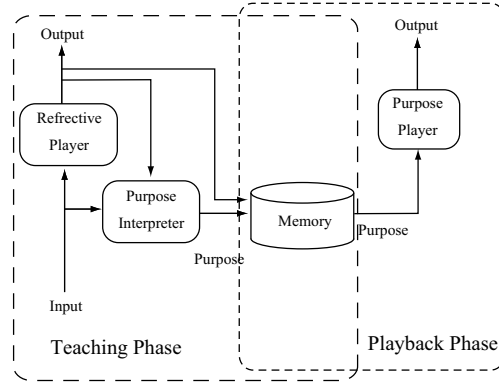


Fig.2 On-line humanoid teaching system using reflective player, purpose interpreter and purpose player.

て, 手先の位置姿勢をインピーダンス制御することで姿勢の維持と, 受動的に動かすことを同時に実現する. eq.(1) に位置指令型インピーダンス制御式を示す.

$$y_t = \frac{F + \frac{M}{\Delta t^2}(2y_{t-1} - y_{t-2}) + D_d \frac{y_{t-1}}{\Delta t} + K_d y_d}{\frac{M_d}{\Delta t^2} + \frac{D_d}{\Delta t} + K_d} \quad (1)$$

ここで y_t は時刻 t における y , y_{t-1} は時刻 $t - \Delta t$ における y , y_{t-2} は時刻 $t - 2\Delta t$ における y を表す. Δt は離散化した単位時間である.

また, 目標点を動的に変更することで, 任意の位置姿勢の状態を保持することができる. $i = 0$ のとき左腕, $i = 1$ のとき右腕, とすし, 両腕の変位を $\Delta y_i = y_{ti} - y_{di} (i = 0, 1)$ とすると,

$$\Delta y_i < Y_{min} \quad (2)$$

となる時間が一定時刻連続した場合, y_{di} を y_{ti} で更新する.

3.2 手先位置の変位による歩行誘導

次に歩行の誘導手法を示す. 筆者らは手先を引くことでロボットの歩行を誘導することを行なってきた [3]. これは腕にかかる力をそのまま歩行速度に変換していたが, 入力である操作者の力と歩行速度の制御に時間遅れがあるために, 操作にずれが生じることがあった. この原因はロボットの状態を出力し, 操作者に伝えていなかったことに原因がある. 本論文では力を即座に手先位置姿勢へと変換することで, ユーザにフィードバックを返す. 手先位置姿勢の変換は前述のインピーダンス制御を用いる. すると歩行速度 V は

$$V = (V_x, V_y, V_\theta) = (K_x \sum_i \Delta y_{xi}, K_y \sum_i \Delta y_{yi}, K_\theta \frac{\sum_i \Delta y_{yi}}{\sum_i \Delta y_{xi}}) \quad (3)$$

などと決定することができる. ここで K_x, K_y, K_θ はそれぞれの移動方向の重みを決定するスカラー値である. 直接力などのセンサ値を入力とするよりも, このような制御を行なうことで, ユーザーへのフィードバックがかかるため, スムーズな誘導が可能になる.

4. 目的読み取り器

人間の教示の目的を読み取り、記憶する。反射的行動再生器がセンサ値から直接的に動作を生成し、即時に行動を実行するのにに対し、ここでは教示のセンサ入力、反射行動のシーケンスからあるシンボルレベルでの目的に変換し、記憶として蓄える。意図の理解は本質的に困難なものが多数であるが、音声などを利用して、フェーズの切り替え、などシンボル入力を行うことで解決する。また、もっとも使われている反射的行動再生器に着目し、その利用が終了した時点で、その再生器に対応する状態を目的とすることができる。例を挙げると、歩行を誘導し、ロボットを居間からキッチンへ連れて行ったとし、キッチンに着いたら教示者はロボットは歩行の誘導をやめる。その瞬間の歩行誘導器に対応する状態、つまり位置情報を目的として記憶する。記憶の形態としてはとしては、シンボルのシーケンスや幾何モデル上での数値データなどがある。

5. 目的再生器

記憶された目的を再生することで記憶したタスクの再生を行なう。ここでは特に移動と把持の再生を行なうための行動プランナについて説明する。

5.1 移動プランナ

移動プランナはロボットの現在位置から目標位置までのロボットの歩行計画を行なう。まず、マップは既知のものとし、スタート地点とゴール地点が与えられる (Fig.3(1))。ロボットの全身を含むような最小のシリンダで近似する。マップをグリッドに切り分け、シリンダモデルとの干渉を計算することでロボットの可動範囲をもとめる (2)。シリンダの経路を導き (3,4,5) ロボットが移動するためのパスを求め (6)。探索にはA*探索を用いた。

5.2 マニピュレーションプランナ

マニピュレーションプランナは把持対象の位置姿勢から、把持計画を行なう。まず、操作対象の画像から相関演算により対象物体を発見する。次にこの物体の把持位置の3次元位置をステレオ視により同定し、逆運動学を用いて目標姿勢を決定する [4]。Fig.4 に画像処理の軌道は障害物のモデルを持っていれば、それに干渉しないような軌道を拘束な探索アルゴリズムを用いて作ることができる [5]。

6. 移動・マニピュレーションを教示再生可能なシステムの評価実験

Fig.5 に実験のためのソフトウェアシステムを示す。まず教示フェーズでは反射的行動再生器である、Head Navigator, Walking Navigator, Arm Navigator の3つを用いて、行動を誘導する。Fig.6 に実験の様子を示す。手先を教示者が引くことで手先位置を自由に誘導することができる。まず歩行モードに切り替え、Walking Navigator によって歩行を誘導し、目的地であるキッチンの前までロボットをつれてゆくことができている。ロボットの停止とともに、腕のみを動かすモードへ切り替え、手先位置の誘導を行なった。これにより、手先の位置姿勢を教示することができる。それと同時に Head

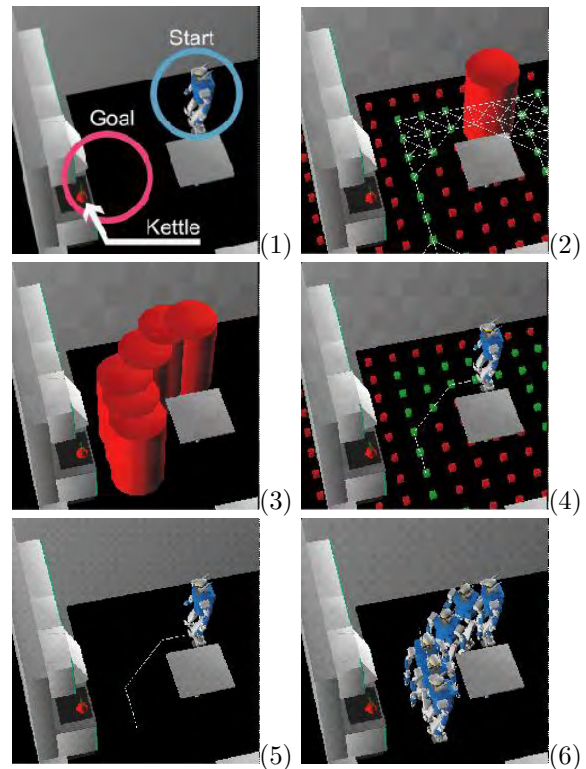


Fig.3 Walking path planner. (1)Start, goal and geometric environmental models, the robot model are given. (2)Then make grid map collision free space. (3),(4) Search the path to the goal using simplified cylinder robot model. The path and motion sequence is shown in (5) and (6).



Fig.4 Image Processing for manipulation. The stereo vision calculates the position of target object.

Navigator により操作対象を発見・記憶する．ここではやかんの把持と、注ぐ動作を教示している．先に述べたような歩行モードとマニピュレーションモードを切り替えることでこの二つを実現している．また、手先のグリッパは、あらかじめゲインを低くしておきグリッパを人間が握ることで、エラーを検出し、グリッパを閉じることでグリッパの開閉を教示している．

Fig.7 にこの教示データを下に、指定位置の赤い物体を把持する計画を立てることで、自己の位置がことなり、障害物がある場合でも教示された動作を再現（目的再現）ができていた様子を示す．先に述べたアルゴリズムにより歩行計画を行い、教示された目的地までの移動を行なっている．ただし、環境のマップ、自己位置は既知とした．次にやかんの把持・注ぎ動作を行なった．まず Fig.4 に示すように、操作対象であるやかんを発見する．ここでは色抽出によりやかんを見つけている．ステレオ視により把持部である取っ手の3次元位置を特定し、把持を行った．

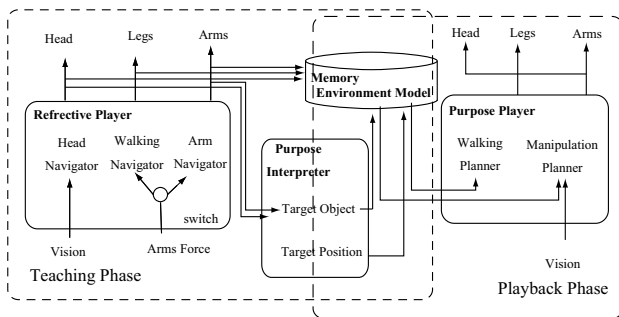


Fig.5 Experimental system.



Fig.7 Play back phase: the robot uses planner for replay the taught motions

7. おわりに

本稿ではヒューマノイドのための簡易で環境が変化しても再現可能なオンラインでの教示システムの構成法について述べた．関節角度レベルの教示と抽象的レベルの組み合わせが必要であることを示し、必要最低限な構成での具体例として、手先位置の誘導、歩行の誘導とその再生法について説明した．また、実験によりこのシステムで行なうことが可能な具体的な教示例としてキッチン環境における歩行の誘導とマニピュレーションの教示実験を行い、このシステムの有効性を示した．今後はロボットが身体のみでなく、道具をうまく活用する動作を教示することが可能なシステムへと発展させてゆく．

参考文献

- [1] 大道武生, 川内直人, 佐々木 沢. 教示システムの現状と動向. 日本ロボット学会誌, Vol. 11, No. 1, pp. 31-35, 1993.
- [2] Ikuo Mizuuchi, Yuto Nakanishi, Tomoaki Yoshikai, Masayuki Inaba, and Hirochika Inoue. Body Information Acquisition System of Redundant Musculo-Skeletal Humanoid. In *The 9th International Symposium on Experimental Robotics*, p. 164, 2004.
- [3] 小倉崇, 岡田慧, 稲葉雅幸. ヒューマノイドの手を引くことで平地・段差を自由に誘導できるシステムの実現. 第22回ロボット学会学術講演会予稿集, p. 1L34, 2004.
- [4] Katsu Yamane and Yoshihiko Nakamura. Natural Motion Animation through Constraining and Deconstraining at Will. *IEEE TRANSACTIONS ON VISUALIZATION AND COMPUTER GRAPHICS*, Vol. 9, No. 3, 7 2003.
- [5] 中井博之, 稲葉雅幸, 井上博允. "rrt-connect planner を用いたロボットの全身行動生成". 日本機械学会ロボティクスメカトロニクス講演会'03, pp. 2P2-1F-C1, 2003.



Fig.6 Teaching phase: the operator leads the robot's hand for navigating walking and manipulation.