

平成21年6月22日現在

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2006～2008

課題番号：18300070

研究課題名(和文) ヒューマノイドによる物体搬送作業のための作業計画

研究課題名(英文) Task and motion planning for object manipulation by a humanoid robot

研究代表者

吉田 英一 (YOSHIDA EIICHI)

独立行政法人産業技術総合研究所・知能システム研究部門・主任研究員

研究者番号：30358329

研究成果の概要：ヒューマノイドの等身大・双腕の特徴を活かし、全身を使って大型の多面体の物体を持ち上げずに傾け、その頂点で支えて器用かつ安定に操作することを目指す「ピボット動作」を対象として、作業計画手法を構築した。まず、障害物との干渉がない搬送物体の移動経路が導出されれば、これをピボット動作の繰り返しにより実現可能であることを示した。次に、安定性・操作性など力学的指標を考慮したヒューマノイドの全身によるピボット動作生成手法を示した。これをもとに、自由経路のネットワークを表す操作ロードマップを作成し、必要に応じて持ち替えを行いつつ目標位置に物体を搬送する作業計画手法を開発し、実機実験で実証した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	5,400,000	1,620,000	7,020,000
2007年度	4,200,000	1,260,000	5,460,000
2008年度	3,500,000	1,050,000	4,550,000
総計	13,100,000	3,930,000	17,030,000

研究分野：ロボット工学

科研費の分科・細目：情報学，知覚情報処理・知能ロボティクス

キーワード：ヒューマノイド，作業計画，運動計画，ロボット，マニピュレーション

1. 研究開始当初の背景

ヒューマノイドは、その高い全身運動機能を利用して、サービスや人間の代替など、さまざまな応用の実現が期待されている。特に、大型物体や重力物の操作は、車輪型ロボットなど他のロボットでは困難であり、ヒューマノイドに適する作業である。

(1) 物体操作形態

これまで、ヒューマノイドロボットによる

物体操作作業として、押し作業や持ち上げ作業が提案されていたが、押し作業は操作の正確性、また持ち上げ作業は安全性の面で問題があった。

(2) 力学指標や持ち替えを考慮した作業計画
また、ヒューマノイドの単体運動計画手法、また力学的制約を考慮せず、幾何的・あるいは運動学的に物体操作を計画する手法は提案されていたが、力学的な指標まで含めたヒューマノイドの全身運動による物体操作の

作業計画はほとんど行われていなかった。

さらに、障害物等が環境に多数存在する場合でも柔軟に対応できるように、操作している物体を一旦離し、持ち替えてから作業を行うことも求められていたが、ヒューマノイドにこれを適用した例はなかった。

このように、安全かつ制度の高い作業手法と、物体操作時の安定性などの力学的指標と持ち替えまで含めたヒューマノイドの作業計画手法の構築が求められていた。

2. 研究の目的

(1) 物体操作計画手法の構築

本研究では、全身を用いた大型物体操作計画として、多面体の頂点で物体を支えることにより、器用で安定な操作が期待できる「ピボット動作」に注目する。

これまで、ピボットにより対象物を任意の目標位置に移動させる運動計画手法については研究が行われていなかった。

そこで、まずこの操作手法の持つ特性を解析し、これを利用して運動計画を行う手法を構築する。

(2) 力学指標や持ち替えを考慮したヒューマノイド全身作業計画手法の構築

(1) で構築した手法で目的位置までの物体操作軌道を、ヒューマノイドの全身運動で実現する必要がある。そのためには、安定性などの力学指標を考慮した全身運動計画が必要である。そこで、一般化逆運動学を適用し、動的安定を保ちつつヒューマノイドの全身運動により物体操作を計画する手法を導出する。

さらに、複数の把持形態に対してこの運動計画手法を適用し、これを合成して持ち替えを行いつつ物体を目的位置まで搬送する作業計画手法を開発する。

3. 研究の方法

(1) Small-time controllability の解析によるピボット操作の解析

衝突がない物体の移動経路が導出されれば、これをピボット動作の繰り返しにより実現可能であることを「small-time controllability (STC)」という性質を用いて示す。

(2) 非ホロノミック制約を用いた運動計画アルゴリズムと操作ロードマップの生成

ヒューマノイドが全身で対象物を保持して操作を行う場合、物体の進行方向はロボットとの関係に制約を受ける。安定性や双腕で

の操作性、視認性を考慮し、物体と進行方向と保持するロボットの正面方向が一致させる非ホロノミック拘束を適用する。近年進展が著しい効率的な「サンプリング運動計画手法」にこの性質を適用し、衝突のない経路のネットワークに対応する「操作ロードマップ」を生成する。

(3) 力学的指標を考慮した全身物体操作運動計画手法の導出

ヒューマノイドの動的安定性、手先の操作性を考慮した全身運動による物体操作動作を、優先度付き一般化逆運動学の枠組みを利用して生成する。

(4) 持ち替えを含む物体操作計画の構築

ロボットの可動範囲を表すロードマップを、ピボット動作を対象として、複数の異なる把持状態について求め、遷移可能な状態で結合して「合成ロードマップ」を作成する。これを利用して、障害物が存在する環境で必要に応じて持ち替えて物体を搬送する経路を導出する手法を構築する。

(5) ヒューマノイド実機による実証実験

上記で提案した物体操作作業計画手法の有効性を検証するため、等身大ヒューマノイドロボットの実機により検証実験を行う。

4. 研究成果

(1) Small-time controllability の解析によるピボット操作の解析

図 1 左上にあるように、あるシステムがある状態 q から移動するとき、近傍 V から出ずに、その内部に含まれる η のどこにでも移動できるとき、その性質を「Small time controllability (STC)」という。この性質が成り立つとき、次のように自由空間 C_{free} 上の任意の障害物との干渉のない経路 τ (図 1 右上) をその移動法により近似できる。経路 τ 上に最も近い障害物との距離に収まる近

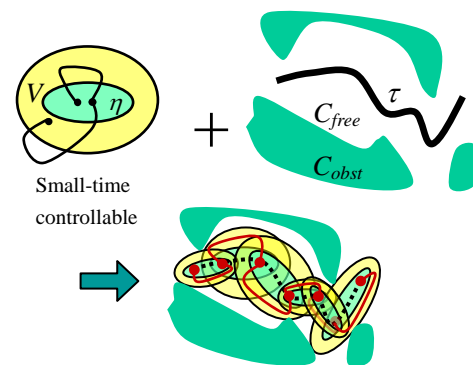


図 1 Small-time controllability

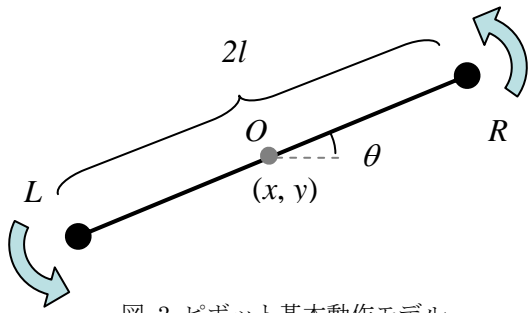


図 3 ピボット基本動作モデル

傍 V を取れば、図 1 下に示すように、移動法が STC であれば、障害物に衝突せずに、 τ 上の $v \in V$ の範囲に移動できる。これを τ に沿って繰り返せば、障害物に衝突せずに目標位置に到達可能となる。

ピボット動作で多面体を移動させる際、物体を支える頂点は移動のために最低 2 点必要であり、これは図 2 のように端点で回転する線分でモデル化できる。図 2 で平面上の位置・姿勢 (x, y, θ) で示されるの物体の中心点 O が、右端・左端を中心とする回転移動するかを示す速度ベクトルを R, L とする。これらに Lie 代数を適用し、それらを組み合わせた Lie 括弧式により導出されるベクトル $[L, R]$ の次元が 3 次元のとき、図 2 でモデル化されるピボット動作は Small-time controllable となることを示した [3][4]。

(2) 非ホロノミック制約を用いた運動計画アルゴリズムと操作ロードマップの生成

ここでは、近年発展が著しいサンプリング運動計画手法を用いて運動計画を行うこととする。これは、コンフィギュレーション空間 C 上の自由空間 C_{free} においてランダムに姿勢をノードとしてサンプリング後、それらを結ぶグラフとしてロードマップを形成し、衝突のない経路を探索する手法である。代表的な手法として、RRT (Rapidly-exploring random tree) や PRM (Probabilistic RoadMap) があげられる。

物体と進行方向と保持するロボットの正面方向が一致するように操作させる制約として、効率的な計算法が提案されている非ホロノミック制約を導入し、以下の方針で運動計画アルゴリズムを構築した [3][4]。

- ロボットの移動法として、非ホロノミック拘束に基づく移動法のひとつ、Reeds and Shepp の車輪型ロボットを用いる。
- ロボットが障害物に干渉せずに移動できる経路の集合を示す「操作ロードマップ」を構築する。
- ロードマップに基づいて、図 1 における C_{free} 上の経路 τ を求める。
- 導出された経路を、ピボット動作で実現する。

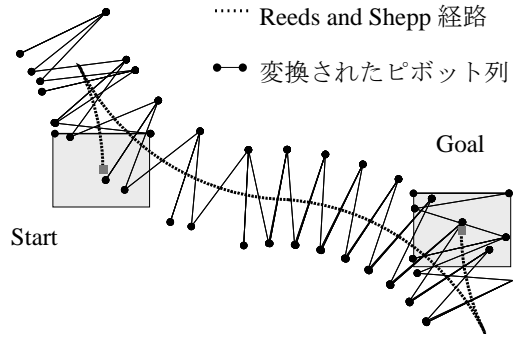


図 2 Reeds and Shepp 経路と変換されたピボット列

Reeds and Shepp の車輪型ロボットの移動法は、直線と円弧からなり、後退を許す局所経路である。これは、車輪型ロボットの最短経路移動法であり、解析的に経路が求められる。これをサンプリング運動計画の局所移動法として用いることで、 C_{free} 上の経路を計画することができる。この移動法も STC の性質を有することが知られている。ピボット動作も STC の性質を有するので、直線と円弧からなる Reeds and Shepp 経路を、図 2 の線分の中心点 O の基本経路としてピボット動作列に変換すれば、導出されたピボット動作列も STC である。

図 3 は、与えられた初期・目標位置と、それを結ぶ Reeds and Shepp 経路 (点線)、さらにそれをピボット動作列に変換したものを示している。

(3) 力学的指標を考慮した全身物体操作運動計画手法の導出

ヒューマノイドは、非常に多くの自由度 (通常 30 以上) を持つばかりでなく、二足歩行における安定性も維持する必要があるため、これらを考慮した運動計画法が求められる。ヒューマノイドの安定歩行動作には、通常 ZMP (Zero Moment Point) が安定規範として用いられる。これは、動力学を考慮した床面上の重心に相当する点であり、歩行中に接地している足がなす支持多角形内にこの点があれば安定となる。

そこでまず、一般化逆運動学手法を拡張し、手先に求められる軌道を達成しつつ、必要に応じて踏み出し動作を行える全身運動制御種手法を提案した [5]。具体的には、手先に求められる動作と動的に安定な踏み出し動作を同時に達成するため、ZMP を規範とする歩行動作生成手法を、一般化逆運動学の枠組みにタスクのひとつとして統合した。

(1), (2) で計画した物体の経路から、物体操作を実現する両手先の軌道を導出し、[5] の

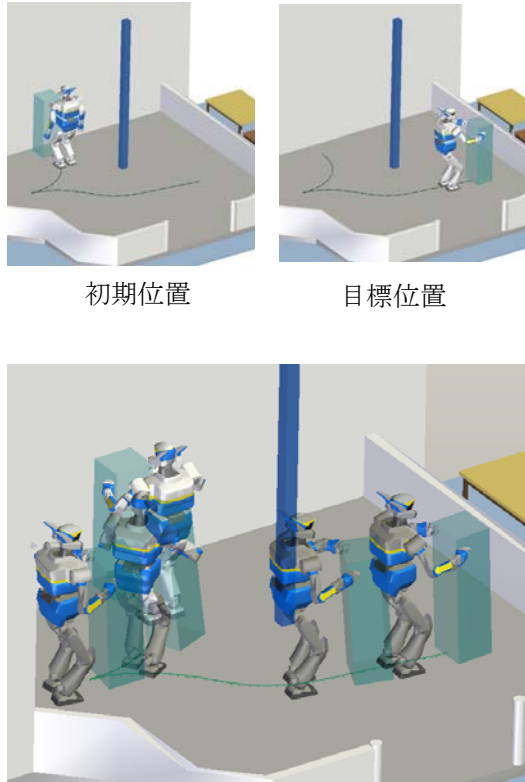


図 4 全身運動による大型物体操作経路

全身運動制御手法を適用して、ヒューマノイドの全身動作を生成する手法を構築した[2]. これにより、状況に応じ手と同時に足を踏み出すなど、機能別の関節の割り当てなしに、柔軟かつ自然に動的な全身運動を生成することができる. 図 4 はその計画結果の例を示したものである. 与えられた初期位置から、ピボット動作で障害物を回避しつつ目標位置に物体を全身運動で搬送する軌道が計画されていることがわかる. また壁に近い初期値から物体を移動させるため、後退を許す Reeds and Shepp 移動方法の利点も活かされていることが分かる.

(4) 持ち替えを含む物体操作計画の構築

単一の把持形態に対応する干渉のない経路のネットワークを表現する操作ロードマップを、複数組み合わせることで合成ロードマップを求め、持ち替えを含む物体搬送経路の計画手法を構築した[1]. 具体的には、まず物体のみの経路を計画し、次にロボットを考慮して持ち替えポイントの候補を算出した. 図 5 に示すように、ある把持点では不可能な経路を別の把持点に持ち替えることにより達成できるようになる.

このようなロードマップ切り替え手法

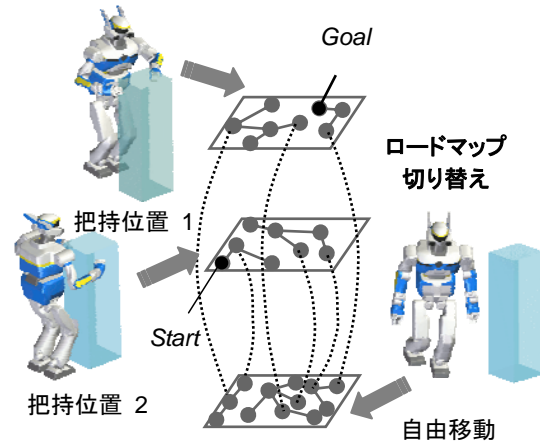


図 5 ロードマップ切り替えによる持ち替えを含む物体搬送計画

に、(1)~(3)までの成果である、力学的指標を考慮したヒューマノイドの全身動作生成手法と組み合わせ、障害物が存在する環境で、必要に応じて持ち替えを行いつつ目標位置まで物体を搬送する方法を実装し、シミュレーションにより有効性を検証した(図 6).

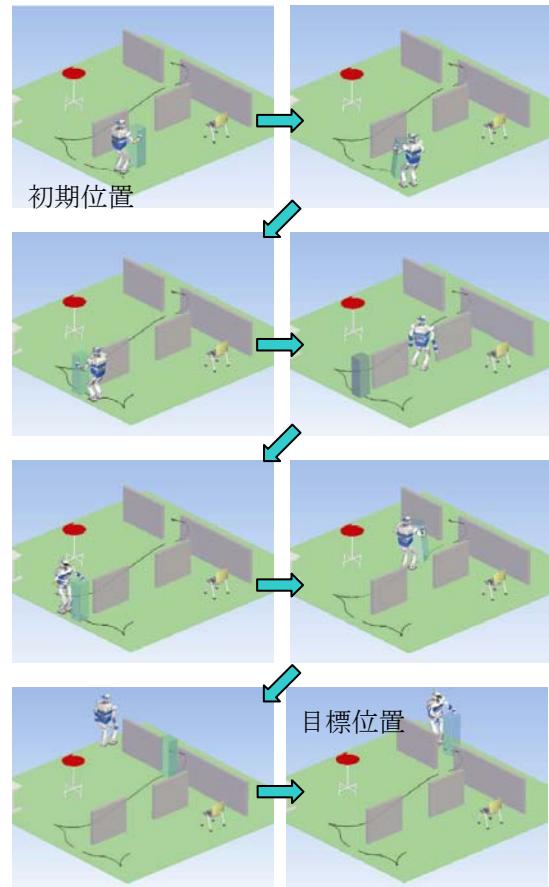


図 6 持ち替えを含む搬送計画結果

(5) ヒューマノイド実機による実証実験

構築した物体操作計画手法の有効性を実証するため、等身大のヒューマノイドロボット HRP-2 の実機を用いて実証実験を行った。図 7 は、図 4 で計画した全身動作による物体操作を実機ヒューマノイドにより実行したものである。物体操作の軌道は 5.1m と長いものであるが、障害物（ここでは洋服掛け）を回避しつつ、図 4 に示した目標位置へ、10% 程度の誤差で搬送することができた。これにより、提案する全身運動による搬送計画手法の有効性が検証された。



図 7 全身運動による物体搬送計画の実証実験

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計 5 件)

- [1] 吉田英一, M. Poirier, J.-P. Laumond, O. Kanoun, F. Lamiroux, R. Alami, 横井一仁, “Regrasp Planning for Pivoting Manipulation by a Humanoid Robot,” Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA’09), 2467-2472, 2009, 査読有
- [2] 吉田英一, M. Poirier, J.-P. Laumond, O. Kanoun, F. Lamiroux, R. Alami, 横井一仁, “Whole-Body Motion Planning for Pivoting Based Manipulation,” Proc. IEEE Int. Conf.

on Robotics and Automation (ICRA’08), 3181-3186, 2008 査読有

- [3] 吉田英一, M. Poirier, J.-P. Laumond, R. Alami, 横井一仁, “ピボット動作を用いたヒューマノイドによる全身物体操作”, 2007 年日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2007, 査読無
- [4] 吉田英一, M. Poirier, J.-P. Laumond, R. Alami, 横井一仁, “Pivoting Based Manipulation by Humanoids: a Controllability Analysis,” Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robotics and Systems (IROS’07), 1130–1135, 2007, 査読有
- [5] 吉田英一, O. Kanoun, C. Esteves, J.-P. Laumond, “Task-driven support polygon reshaping for humanoids,” Proc. IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (Humanoids ’06), 208-213, 2006, 査読有

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

6. 研究組織

(1) 研究代表者

吉田 英一 (YOSHIDA EIICHI)

独立行政法人産業技術総合研究所・知能システム研究部門・主任研究員

研究者番号：30358329

(2) 研究分担者

横井 一仁 (YOKOI KAZUHITO)

独立行政法人産業技術総合研究所・知能システム研究部門・研究グループ長

研究者番号：40358304

(3) 連携研究者

Jean-Paul Laumond,
LAAS-CNRS (フランス)
Senior Researcher

Rachid Alami
LAAS-CNRS (フランス)
Senior Researcher