

全身行動ヒューマノイドの自律性基盤

加賀美 聡

情報理工学系研究科 COE 連携特任助教授

概要

人間型ロボットにおける自律機能とは、移動や物体操作などである、例えば「隣の部屋に行ってこのコップと同じものを取ってきなさい」という指令をロボットが与えられたとすると、ロボットは a) 環境を観察し、b) 適当な手段で移動し、c) 物体を見つけ出し、d) 把持して運搬する、というタスクを実行する機能を持たなければならない。筆者らのグループではこのようなヒューマノイドロボットの自律性基盤となる視覚認識・行動計画・動作制御の研究を行っている。

1 はじめに

日本はこれから高齢化と少子化が急速に進み、高度の福祉サービスや社会のインフラを支える色々な作業を十分に実施していくためには、人間共存型の知能ロボットの研究開発が不可欠といえる。人間型ロボットは人間の生活する環境で稼働する汎用の形状であると言え、近年盛んに研究が行われている。さらにホンダやソニーの人間型ロボットが発表されるなど、近い将来に人間型ロボットが実世界で活躍することを感じさせている。しかし将来、人間の身近でさまざまな生活支援を可能とする人間型ロボットを実現するためには、その自律機能が重要となってくる。

ここではヒューマノイドロボットが実世界で行動するための移動機能と物体操作機能の自律性について研究を行っている。

< 移動機能 >

高次のインターフェースは「隣の部屋に行きなさい」のように任意の二点間を移動する機能である。指定された場所まで障害物にぶつからず安定かつ早く適切な手法で移動する必要がある。このためには視覚により地形を計測し、経路や移動手法を計画し、全身の自由度を適切に制御しながら歩行する機能が重要となる。ここでは離散的足跡計画手法とオンライン歩行軌道生成に基づく二足歩行機能について述べる。

< 物体操作機能 >

高次のインターフェースは「あのコップを取りなさい」のように任意の物体を把持する機能である。指定された対象を環境にぶつからず、自分の体にもぶつからず、全身の自由度を適切に用いて把持する必要がある。このためには視覚により対象を認識し、対象物の把持箇所を決定し、全身の機構・形状・環境の形状などを拘束条件として動作を計画し、全身の自由度を適切に制御しながら操作する機能が重要となる。ここではランダムイズ計画手法による腕の動作計画手法について述べる。

2 移動の自律機能

(1) 周期にもとづく階層型二足歩行システム
二足歩行の本質的な問題として、常時バランスを保持しつづけ、自己干渉を避け続けながら、与えられた高いゴールを達成しなければならないという点が挙げられる。通常モータのサーボループは 1[kHz] 程度で行われることから、このサーボループ内に高次からの全ての機能をインプリメントするのは現実的ではない。また例えば視覚により障害物が目の前に現れたことを認識してから、歩行中の行動を変更するためにはなるべくレイテンシの小さい構成法が必要となる。そこで筆者らは周期のオーダーに応じて階層システムを構成する手法を提案した。例えば障害物を避けながらゴールまで歩行していくタスクでは、システムは最も高いレベルのタスクから、1) 視覚による地形計測、2) 歩行していく経路の足跡計画、3) 一步周期での三步の歩行軌道生成、4) 自己干渉のチェック、5) ZMP 追従による安定制御、6) モータサーボ、と構成される。

(2) 床面検出

人工環境において平面を検出する機能は非常に有効である。筆者らは三次元部分平面を検出

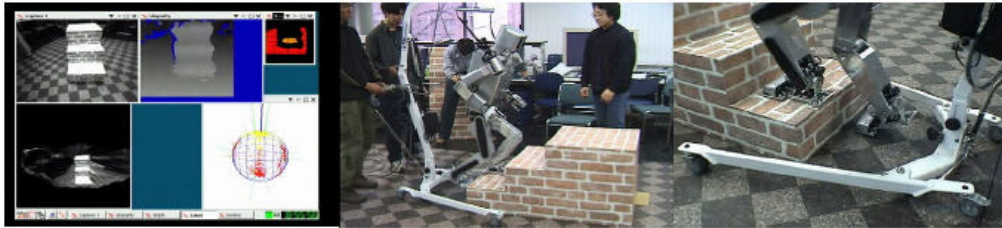


図1 プレーンセグメントファインダによる階段検出結果と爪先を利用した H7 の階段上り

する手法として距離画像からのハフ変換を用いた Plane Segment Finder (PLS) と呼ぶ手法を提案してきた。本手法は 1) 距離画像を生成し, 2) ランダムイズド三次元ハフ変換を行うことにより視野内の最大平面の傾きを検出した後, 3) その平面への距離を再びランダムイズド三次元ハフ変換により検出し, 4) 視野内の各点でその平面に属する点を抽出することにより, 平面領域 (プレーンセグメント) が検出される, というものである。

三次元平面のパラメトリックな表示は以下のように表される。平面から原点へ下ろした垂線の長さ R , x 軸および xy 平面からなす角度 θ , ϕ であらわし, この平面が距離画像上の点 (x_0, y_0, z_0) を通るとすると,

$$R = (x_0 \cos(\theta) + y_0 \sin(\theta)) \cos(\phi) + z_0 \sin(\phi)$$

の関係が成り立つ。平面の抽出するためには, 距離画像上の各点を (R, θ, ϕ) 空間へ投影し, そのピークを検出すればよい。原理的にこの方法は平面が複数に分かれていても検出可能であり, また探索範囲を狭めて (R, θ, ϕ) の部分空間に投影することにより, 計算コストを大幅に狭めることが可能であることが特徴である。

(3) 歩行経路の足跡計画

人間型ロボットは脚を用いて障害物の散らばるような複雑な環境でも人間と同様に行動できることが期待されている。このためにはグローバルなパスプランニングの問題を解く必要があるが, ナビゲーション問題はこれまで主に車輪型のロボットで解かれており, 特に二足ロボットでは有効な解法がこれまで示されていなかった。

筆者らは動的計画法(Dynamic Programming)を用いて, 足の着地位置の遷移可能な候補の集合から, 視覚により得られた地図を探索し, 最

適な足跡計画を行う手法を提案した。

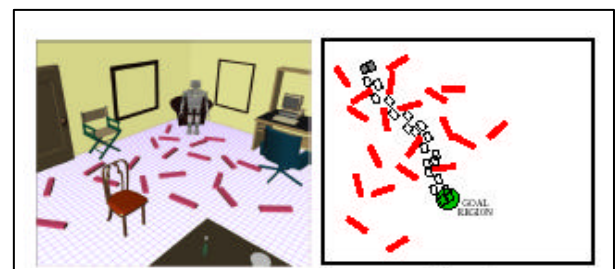


図2 動的計画法による足跡計画結果

(4) 高速歩行軌道生成手法

ヒューマノイドロボットでの歩行実現には, 運動の動力学的安定性を満たす必要がある。これまで歩行実現のための手法として, 適応的に安定性を取る制御的な手法と, ZMP(Zero moment point) と呼ばれる足裏における動的な力の釣り合い点を規範として歩行の全区間を予め安定化する手法, の二つの手法が主に研究されてきた。(* 後者は 1986 年頃に早稲田の加藤教授らのグループにより提案された手法である)。

筆者らは ZMP 規範に基づく高速な歩行軌道生成手法を提案してきた。本手法は入力として歩行運動軌道, 目標 ZMP 軌道を得て, ここから最も重い体幹部を水平に修正することにより, 目標 ZMP 軌道を満たす全身運動軌道を生成するというものである。

本手法は H7 ロボットのシステムを用いて実時間の約 50 倍程度で計算が可能であり, 高速な軌道生成手法である。H7 システムでは実際には三步の軌道を一步ごとに生成しており, そのうちの最初の二歩は上位の指令どおりに歩行し, 三步目はその場で停止する軌道を生成する。これにより, 次の一步を実行している間に,

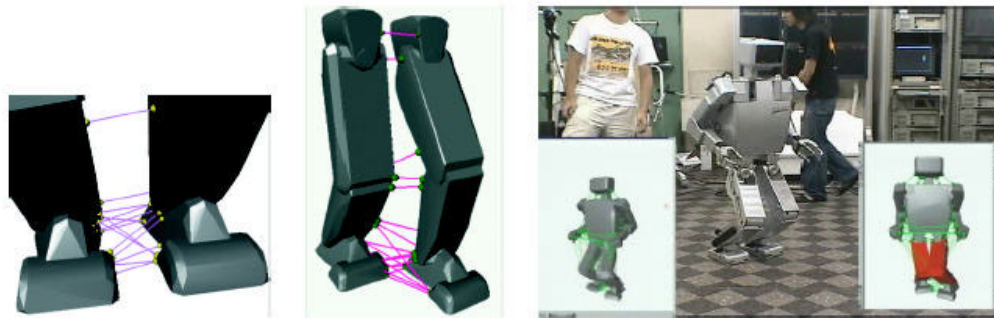


図4 自己干渉チェック

視覚処理や行動計画を行う余裕が生まれ、また次の三步の歩行軌道生成もこの現在の三步の一步目を行う最中に行われる。本システムは上位のシステムの計算が間に合わなかったり、後述の自己干渉チェックにより生成した軌道が実行不能であると判断された場合には、三步目を実行することにより動力学的に安定に停止できるという点で保守的に安全なシステムである。

本軌道生成手法は十分に早いことから、例えば振り上げた足を別の場所に下ろすなどの動作が可能になると考えられる。

(5) 自己干渉チェック

歩行軌道生成手法は運動方程式から導き出されているために、遊脚で立脚を蹴飛ばすような実現不可能な軌道が生成される危険性がある。そこで幾何学的な(自己)干渉をチェックする必要がある。筆者らはロボットの各リンクを保守的に凸多面体に変換することにより、この凸多面体間の干渉を高速に計算する手法を開発した。本手法は二つの凸多面体の最短距離となる特徴点は、これらの物体が連続的に動く時には微小には隣接する特徴点にしか移動しないことを利用している。

H7 システムでは通常の歩行では足リンクの19組の距離をチェックしており、前述の三步の歩行軌道の干渉をチェックするのに要する時間は実時間の百倍よりも高速である。

3 物体操作の自律機能

物体を把持するためには、腕を伸ばしてつかめる場合と、例えば屈むなど全身の自由度をつかって

行う場合がある。腕のみで行える場合には機構的・幾何学的な制約条件で動作を計画すれば良い。しかし全身を用いた運動にはバランスも制約条件となる。

(1) 腕の動作計画

ここでは得られた環境の情報から、環境に干渉せずに、与えられた初期姿勢と終了姿勢を接続する軌道を高速に生成する問題を考える。環境に干渉しない軌道探索法に関しては、現在ランダム探索法の中で最も高速であると考えられている RRT (Rapidly exploring Random Tree)法を用いる。

ロボットの関節角を次元とするコンフィギュレーション空間において、障害物に干渉しない軌道を探索する問題は NP 困難であることが知られ、近年では乱数を利用した高速な空間探索法の研究が広く行われている。RRT 探索法はこのような乱数を用いた高次空間探索法の一つで、平均的に他のアルゴリズムに比較して少ない計算コストで解を発見可能であることが知られている。アルゴリズムの概略を以下に述べる。

- 関節角で張られるコンフィギュレーション空間 C 内の与えられた始点を q_{init} とする
- 空間内の任意の点を乱数により選択する (q とする)
- q_{init} を含む現在の探索木 T 内で q に最も近いノード q_{near} を見つける
- q_{near} から q の向きへある固定距離だけ進んだ点を新しいノード q_{new} とし、この区間での干渉をチェックし、干渉がある場合には 2 行目に戻り、干渉が無ければ T を成長させる。

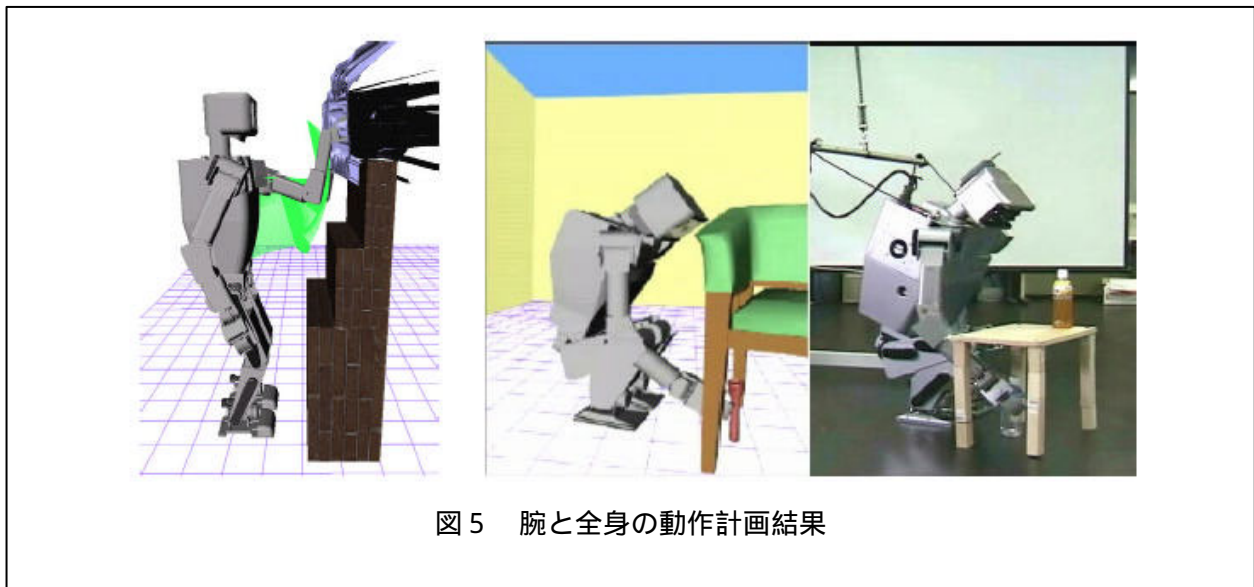


図5 腕と全身の動作計画結果

- 終点 q_{goal} が新しいノードと新しく作成された枝から十分に近くにあるか判定し、近くなければ2行目に戻り、近ければゴールに到達したものととして終了する

この RRT 法は木のノード数に比例した計算コストがかかることが知られており、実際のノード数は問題の複雑さに依存する。また乱数を利用するため毎回計算の結果が異なることから、同様の問題に対しても計算時間は決定的には決まらないという特徴がある。

(2) 全身の動作計画

人間型ロボットは複雑な自由度をもち、さまざまなタスクを行いながら同時に動的な安定を保つ必要がある。これまでモーションプランニングの研究分野では高次元空間における障害物を回避した軌道計画問題に関して数多くの研究がなされてきたが、人間型ロボットは多自由度に加えてバランスの問題を満足する必要があり、新たな研究が必要である。

筆者らはヒューマノイドロボットのような複雑なリンク構造を持つシステムにおいて動的に安定を保ちながら障害物を回避して与えられた初期姿勢と終了姿勢の間の軌道を計画する問題を初めて提案した。本手法ははじめにランダムイズ法と静的安定制限を組み合わせることにより安定性を保証した軌道を生成し、次に ZMP 拘束を用いたフィルターアルゴリズムにより、生成された軌道を動的安定で障害

物を回避したものに交換するというものである。本アルゴリズムは二足のみならずさまざまな形状のロボットに適用可能である。

軌道探索には前述の RRT 探索を用いており、始点と終点の双方から探索木を延ばすことに

より高速に解を探索する。これにより例えばヒューマノイドロボットがバランスを失わずに机の下の対象物を把持するなどの行動が実現された。

4 まとめ

本節では人間環境で行動するヒューマノイドロボットに必要な自律機能について、1) 二足移動機能、2) 物体把持機能、3) 対人機能の3つの機能について筆者らの研究をまとめた。現在ヒューマノイドロボットの研究開発が企業や研究機関において活発に行われており、その進歩は当事者である筆者らから見ても目覚ましい。ヒューマノイドロボットは人間社会で活動するためのもっとも一般的な形状であると考えられるが、人間が行うような多様な作業をロボットに自律的に行わせるためには、今後の研究と開発の対象は数多い。

市販のロボットが購入できる時代になってきたことから、ソフトウェアの研究はハードウェアによる制約はあるにせよ、非常に容易になってきたと考えられる。認識、計画、制御とロボットのソフトウェアにおいて実世界へのハードルは高く、今後の研究が望まれる。