ヒューマノイドロボットの全身動作と足の着地位置の同時計画*

原田 研 介^{*1}, 森 澤 光 晴^{*2}, 三浦 郁奈子^{*1}
中岡 慎一郎^{*2}, 金 子 健 二^{*1}, 梶 田 秀 司^{*2}Simultaneous Whole-Body/Foot-Place Planning
for Full-Body Humanoid RobotsKensuke HARADA^{*3}, Mitsuharu MORISAWA, Kanako MIURA,
Shin-ichiro NAKAOKA, Kenji KANEKO and Shuuji KAJITA^{*3} National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST),
1-1-1 Umezono, Tsukuba-shi, Ibaraki, 305-8568 Japan

This paper proposes a method for simultaneously planning the whole-body-motion and the foot-place for a humanoid robot dynamically walking on the flat ground. As constraint conditions imposed on the planner, we consider the differential equation of the robot's motion. To solve this constraint, we use the real-time walking pattern generator. We randomly sample the configuration space to search for the path connecting the start and the goal configurations. When sampling the configuration space, a few milestones are sequentially connected to the parent milestone. To show the effectiveness of the proposed method, we show an experimental result where the humanoid robot HRP-2 avoids the obstacle dynamically walking on the ground.

Key Words: Motion Planning, Humanoid Robot, Biped Gait, Random Sampling

1. は じ め に

ヒューマノイド研究の究極的な目標は、日常生活においてヒトの代わりに働くロボットを実現することである。この目標を実現するために、ヒューマノイドロボット(以下、ヒューマノイドと略記)はセンサで得られた環境の情報を基に、目的とするタスクを自動的に計画しなくてはならない。しかしながら、他のロボットシステムとは異なり、ヒューマノイドは2足でバランスを維持するという厳しい拘束条件を満たしながら、動作しなくてはならない。本論文では、動的に歩行するヒューマノイドがリンクの干渉を避けながら目的とするタスクを実現するような動作を計画する手法を研究する。

本研究で提案する動作計画手法を示す例として、図1に示すような、ヒューマノイドが目的地まで歩いて移動する問題を考える。この例では、現在地と目的地の間にゲートが存在する。ゲートの高さが高い時、ヒューマノイドはゲートを潜って直線的に歩くことで、目的地に到達できると考えられる。しかしながら、ゲートの高さが低くて潜るのが困難になると、ヒューマノイドはゲートの脇を避けて歩くことで、目的地に行かな

Fig. 1 Motion of humanoid robot avoiding obstacle

くてはならない。このような環境の変化に対応するためには、ヒューマノイドが動歩行しつつ、足の着地位置と上体の関節軌道を同時に計画するような動作計画が必要である。しかしながら、従来までこのような手法は提案されていなかった。

ヒューマノイドが動歩行を実現するために、ZMP(Zero Moment Point)を規範とした歩行パターンジェネレータが提案されてきた。これらの手法では、常微分方程式を解くことで、与えられたZMP軌道に対してヒューマノイドの重心軌道が導出される。ZMPを規範とした歩行動作生成において、実時間で歩行動作を生成する手法が研究されている^{(2)~(4)(8)(9)}。

* 原稿受付 2010年3月23日。

^{*1} 正員, (独)産業技術総合研究所知能システム研究部門
(〒305-8568 つくば市梅園1-1-1)。

^{*2} (独)産業技術総合研究所知能システム研究部門。

E-mail: kensuke.harada@aist.go.jp

これらの手法では、センサ情報に基づいて適応的に足の着地位置を変更するために、常微分方程式を実時間で解くことで得られた動作軌道を、現在実行している動作軌道にスムーズに接続させる。本論文では、この実時間歩行動作生成手法をオフラインの動作計画に用いることで、ヒューマノイドの足の着地位置と上体の関節軌道の同時計画を実現する。

ここで、動歩行するヒューマノイドの足の着地位置と上体の関節軌道を同時に計画することを考える。ヒューマノイドの動作計画としてランダムサンプリングに基づく手法が提案されてきた⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾⁽¹⁴⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾。それに対して、近年ランダムサンプリングに基づく **Kinodynamic** な動作計画が提案されている⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾。これらの手法では、システムの動特性を考慮するため、各マイルストーンが動特性を表現する微分方程式の解軌道によって接続される。本論文では、足の着地位置と上体の関節軌道の同時計画を実現するために、各マイルストーンが **ZMP** と重心の位置関係を表す微分方程式の解軌道によって接続される。ここで、実時間歩行パターンジェネレータ⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁹⁾においては、数歩の歩行動作の軌道を生成した上で、現在実行している動作軌道に接続させている。このため、提案する **Kinodynamic** な動作計画は、マイルストーンを追加するときに、一旦数個のマイルストーンを追加した上で、最初に追加したマイルストーンが干渉フリーであることが確認されると、残りのマイルストーンを消去する。

以上のような考察を元に、本論文では動歩行するヒューマノイドの足の着地位置と上体軌道の同時計画手法を提案する。この同時計画手法は、ランダムサンプリングに基づく動作計画手法に実時間歩行動作生成を適用することで実現される。本論文では、第2章で関連研究を述べた後、第3章で動作計画手法の概要を示す。

2. 関 連 研 究

ヒューマノイドの歩行動作生成:

ヒューマノイドの歩行パターンジェネレータにおいて、多くの研究者が **ZMP** を用いている。高西ら⁽¹⁾は **FFT** を適用することで、目標とする **ZMP** を実現するような上体軌道を導出した。従来多くの手法はオフラインで歩行動作を生成するものであったのに対して、2000 年前後より実時間で歩行パターンを生成する手法が提案されてきている。これまで、微分方程式の数値解を用いる手法⁽⁹⁾、フィードバック制御系を用いる手法⁽²⁾、微分方程式の解析解を用いる手法⁽³⁾などが提案されている。更に、実時間で足の着地位置を変更す

る手法が **Morisawa** ら⁽⁴⁾や **Sugihara** ら⁽⁸⁾ によって提案されている。

干渉回避計画:

ランダムサンプリングに基づく動作計画として、**Kavraki** ら⁽²¹⁾ は **Probabilistic Roadmap (PRM) Planner** を提案した。また、**Kuffner** ら⁽¹⁶⁾ は 1 ステップで動作計画が完了する **RRT** と呼ばれる手法を提案した。また、マイルストーンを結ぶエッジの干渉チェックを計画の最後のフェーズで行うことで動作計画自体を高速化する試みが行われている⁽²⁰⁾⁽¹⁹⁾。さらに、これらの手法は幾何学的に閉ループが存在する系や⁽¹⁷⁾、速度や加速度を考慮した系⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾にも適用されている。

一方、近年ヒューマノイドの動作計画に関する研究が行われている。**Kuffner** ら⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾ は静的バランスを満足するような動作を計画し、それを動特性を考慮したものに变换する手法を提案した。**Chestnutt** ら⁽¹²⁾ は足の着地位置を計画する **Heuristic** な手法を提案した。**Stilman** ら⁽¹³⁾ は対象物を移動する動作の計画を行った。**Yoshida** ⁽¹⁴⁾ はロボットの形を **Bounding Box** でモデル化し、全方位移動ロボットの動作計画手法をヒューマノイドに適用した。**Harada** ら⁽²²⁾ は先に歩行動作生成とランダムサンプリングを基にした動作計画を組み合わせた手法を提案した。これに対して、静的なバランスを満足しつつ、近年足の着地位置と全身の関節軌道を同時に計画する研究が行われている。**Hauser** ら⁽⁶⁾ は複数ステップから構成される動作計画法を用いて、不整地を歩くヒューマノイドの歩行動作を計画した。また、**Sanada** ら⁽⁵⁾ は **RRT** を規範とした障害物回避手法を提案した。

しかしながら、動歩行するヒューマノイドに対して、足の着地位置と全身動作を同時に計画する研究は行われていない。これに対して、著者らは前報⁽²³⁾において、非実時間の歩行パターンジェネレータを用いて不整地上での動作計画を行った。しかし、実時間の歩行パターンジェネレータを用いていなかったため、4.5 節で述べるような問題点を抱えていた。それに対して、本論文では、解析解ベースの実時間の歩行パターンジェネレータ⁽³⁾⁽⁴⁾をオフラインの動作計画に適用することで、足の着地位置と上体の関節の同時計画を実現する。そして、提案する手法を障害物回避問題に適用する。

3. 概 要

3.1 状態空間 図2に本研究で用いるヒューマノイドのモデルを示す。 ξ_* をロボットのリンクに固定された座標系の位置 p_* と姿勢 ϕ_* から構成される

Fig. 2 Model of HRP2 Humanoid Robot

6次元ベクトルとする。これらの変数に対して、添え字 Fj, Hj ($j=r, l$), B, G はそれぞれ足、手、腰及びロボットの重心を表す。

ロボットの3次元幾何モデルは予め与えられており、リンクの干渉をチェックするために用いる。また、ヒューマノイドのコンフィグレーションは腰の位置/姿勢 (ξ_B) と各関節の回転角 (θ) から構成される。ここで、次のような座標変換を考える。

$$(p_G, \phi_B, \xi_{Fr}, \xi_{Fl}, \xi_{Hr}, \xi_{Hl}, \theta_r) = f(\xi_B, \theta) \quad (1)$$

ここで、 θ_r は胴体や首の関節角から構成されるベクトルである。式(1)で定義される変数のうち、手の位置/姿勢については目標軌道を予め与えるものとする。手の位置/姿勢に関する目標軌道は、絶対座標系から見た値を与えることもできるし、腰や胸に固定された座標系から見た値を与えることもできる。これにより、コンフィグレーション空間の次元は次のように減少する。

$$q = (p_G, \phi_B, \xi_{Fr}, \xi_{Fl}, \theta_r) \in C \quad (2)$$

ここで、 C はヒューマノイドのコンフィグレーション空間を表し、 $C_{free} \subset C$ は接地している足以外のリンクが他のリンクや環境と干渉しない部分空間を表す。ここで、本論文で提案する動作計画手法は、式(2)で表せ、かつ各脚が最低でも6自由度を有するようなロボットシステム一般に適用できる。

3.2 歩行動作生成 提案する動作計画手法では、逐次的に歩行動作を生成しながら、干渉を避ける動作を計画する。このために、本論文では ZMP を規範と

Fig. 3 Overview of online walking pattern generation

した実時間歩行パターンジェネレータをオフラインでの動作計画に用いる。

式(2)で定義される変数のうち、ロボット重心の水平面内での位置は、ロボットがバランスを維持するように決定されなくてはならない。 $p_G = (x_G, y_G, z_G)$ を重心の位置、 $p_Z = (x_Z, y_Z, z_Z)$ を ZMP の位置とする。また、 $x-y$ 平面が水平面に一致すると仮定する。ロボットの質量が重心に集中すると仮定すると、ロボットの動作は次の微分方程式に支配される。

$$\ddot{x}_G = \frac{g}{z_G - z_Z} (x_G - x_Z), \quad (3)$$

$$\ddot{y}_G = \frac{g}{z_G - z_Z} (y_G - y_Z). \quad (4)$$

式(3), (4)において、上記仮定の下で ZMP が支持多角形の内部に含まれる限り、ロボットはバランスを維持することができる。

図3を用いて実時間歩行パターンジェネレータ⁽³⁾⁽⁴⁾の概要を示す。図3(a)に示すように、ヒューマノイドが直進しながら歩くための ZMP 軌道が与えられていると仮定する。この ZMP 軌道を式(3), (4) 代入することで重心軌道を導出する。次に、左に歩く方向を変更する場合、左に歩くための ZMP 軌道を用いて、重心軌道を計算する。そして、図3(b)に示すように、この重心軌道を直進する重心軌道に滑らかに接続させる。

ここで、文献⁽³⁾⁽⁴⁾では、式(3), (4)の解析解を用い、重心軌道と一部の ZMP 軌道を同時に計画することで、滑らかな軌道の接続を行い、実時間での歩行動作の生成を実現している。また、重心軌道を計画する際、3歩分の ZMP 軌道を用いている。これは、高速で歩い

ているロボットを1歩で止めるのが困難であることから分かるように、1歩分のZMP軌道を用いて計算すると、重心速度に対する境界条件を設定するのが困難になるためである。

また、文献⁽³⁾では各両脚支持期の最初で軌道の再計算と接続を行うのに対して、文献⁽⁴⁾では軌道を5msおきに逐次計算している。それに対して、本論文ではオフラインでの動作計画が目標であるため、サンプリング時間毎に歩行動作を計画するのではなく、文献⁽⁴⁾の手法を用いて各単脚支持期の最初に軌道の接続を行う。

4. 動作計画

次に本章では、動歩行するヒューマノイドの足の着地位置と全身動作を同時に計画する手法について説明する。

4.1 アルゴリズムの概要 図4に動作計画の概要を示す。初期コンフィグレーション q_{init} と目標コンフィグレーション q_{goal} が与えられているとする。初期コンフィグレーションと目標コンフィグレーションにおいて、ロボットは静止してバランスが維持されていると仮定する。この時、動作計画では初期コンフィグレーションを根に持つコンフィグレーションの木 T を構築する。まず、木の中で枝を追加するマイルストーン（親マイルストーンと呼ぶ）を選択する。そして、親マイルストーンの近傍をランダムに探索することで、新たなマイルストーン（子マイルストーンと呼ぶ）を定義する。子マイルストーンに干渉が生じていないなら、これを親マイルストーンに接続し、木 T に含める。次に、子マイルストーンが干渉することなしに目標マイルストーンと接続できるかどうかをチェックする。もし、目標マイルストーンとの接続が確立すると、初期コンフィグレーションと目標コンフィグレーションを結ぶパスが得られる。このアルゴリズムをAlgorithm 1にまとめる。なお、本節で示したアルゴリズム自体は文献⁽¹⁹⁾のものに目標コンフィグレーションを根とする木を省略したものであり、アルゴリズムの収束性については、文献⁽¹⁹⁾と同様である。次節以降で提案するアルゴリズムの特徴的な点を説明する。

Algorithm 1 $PLANNER(q_{init}, q_{goal})$

Install q_{init} as the root of T

Repeat s times

EXPAND-TREE

$\tau \leftarrow \text{CONNECT-GOAL}$

If $\tau \neq \text{nil}$, then return τ

Return failure

ここで、関数 EXPAND-TREE については次節で、CONNECT-GOAL については次々節で説明する。

Fig. 4 Overview of motion planning method

4.2 木の成長 次に、前節で示した概要のうち、木を成長させるフェーズに着目する。2足歩行は単脚支持と両脚支持の繰り返しである。また、右足支持の単脚支持期の後には左足支持の単脚支持期が来る。提案する動作計画では、木を成長させる際に、この特徴を用いる。

図4(a)を用いて動作計画に用いる木を定義する。単脚支持期が始まる時点でのコンフィグレーションを用いて各マイルストーンを定義する。ここで、先ほど述べた2足歩行の特徴により、マイルストーン m に対して、右足支持のもの m^r と左足支持のもの m^l の2種類のマイルストーンが定義できる。 m_i^r を右足支持の第 i 番目のマイルストーンとする。このマイルストーンの親となるマイルストーンは以下のように定義できる。

$$m_j^l = \text{parent}(m_i^r) \quad (5)$$

ここで、関数 $\text{parent}(*)$ はマイルストーン $*$ の親となるマイルストーンを表す。式(5)は右足支持の単脚支持期の後には左足支持の単脚支持期が来て、左足支持の単脚支持期の後には右足支持の単脚支持期が来ることを表す。

木を成長させるアルゴリズムの概要を図4(b)に示す。まず、ランダムに親マイルストーンを木 T から選択する。この親マイルストーンが右足支持 m_j^r なら、このマイルストーンに接続する子マイルストーンの右足の位置/姿勢 ξ_{Fr} は親と同じ値にする。逆に、親マイルストーンが左足支持 m_j^l なら、左足の位置/姿勢 ξ_{Fl} を同じ値にする。

木を成長させる際、子マイルストーンをロボットがバランスを維持できるように設定するために、式(3)、(4)を考慮しなくてはならない。ここで、各マイルストーンは単脚支持期が始まる時点でのコンフィグレーションにより定義したため、子マイルストーンにおける重心の水平面内の位置は実時間歩行パターンジェネレータを用いることで計算できる。実時間歩行パターンジェネレータでは3歩分の動作軌道を計算したように、動作計画においては親マイルストーンに子マイルストーンを接続させる際、余分に二つのマイルストーンを定義して、親マイルストーンから直列に三つのマイルストーンを接続させる。ここで、ロボットは3番目のマイルストーンにおいて停止するように設定する。そして、子マイルストーンに干渉が生じていないなら、このマイルストーンを木 T に含めて、余分に定義した二つのマイルストーンは消去する。最後に、木を成長させるアルゴリズムを Algorithm 2 にまとめる。

Algorithm 2 EXPAND-TREE

```

Repeat until a new milestone has been generated
  Pick a milestone  $m$  from  $T$  at random with probability  $\pi(m)$ 
  If  $m = m^r$  then,  $j = r$ 
  else then,  $j = l$ 
  Exclude  $\xi_{Fj}$  from  $\hat{q}$ 
  For  $i = 1, 2, \dots$  until a new milestone has been generated
    Sample  $\hat{q}$  uniformly at random from  $B(m, \rho/i)$ 
    CONNECT-THREE-MILESTONES( $m$ )
    ( $x_G, y_G$ ) trajectory  $\leftarrow$  ONLINE-WPG
    If firstly added milestone is collision free then
      Install  $q$  in  $T$  as a child of  $m$ 

```

ここで、 $\pi(m)$ は probability distribution を表し、 $B(m, \rho/i)$ は m の半径 ρ/i の近傍を表す⁽¹⁹⁾。また、ONLINE-WPG は実時間歩行パターンジェネレータを表す。また、関数 CONNECT-THREE-MILESTONES(m) については後の章で詳しく述べる。

4.3 ゴールとの接続 子マイルストーンが木に追加されると、次に子マイルストーンが目標マイルストーンと接続できるかどうかをチェックする。図4(c)に目標マイルストーンとの接続を試みる手法の概要を示す。

子マイルストーンと目標マイルストーンの距離が ρ 以下である場合、これらのマイルストーンの間に二つのマイルストーンを挿入し、目標マイルストーンも含めて合計三つのマイルストーンに対して実時間歩行パターンジェネレータを用いることで、子マイルストーンと目標マイルストーンの間のロボットの動作軌道が得られる。この動作軌道において干渉が生じていないなら、初期マイルストーンと目標マイルストーンを結ぶパス τ が得られる。このアルゴリズムを Algorithm 3 にまとめる。

Algorithm 3 CONNECT-GOAL

```

 $m \leftarrow$  most recently added milestone
If  $d(m, m_{goal}) < \rho$  then
  INSERT-TWO-MILESTONES( $m, m_{goal}$ )
  ( $x_G, y_G$ ) trajectory  $\leftarrow$  ONLINE-WPG
  If two inserted and goal milestones are collision free then
     $\tau \leftarrow$  path connecting  $q_{init}$  and  $q_{goal}$ 
  Return TEST-PATH( $\tau$ )

```

ここで、 $d(m, m_{goal})$ は m と m_{goal} の距離を表す⁽¹⁹⁾。また、関数 TEST-PATH(τ) については次章で説明し、関数 INSERT-TWO-MILESTONES(m, m_{goal}) については次々章で詳しく述べる。

4.4 パスの干渉チェック 初期マイルストーンと目標マイルストーンを結ぶパス τ が得られると、Algorithm 3 において関数 TEST-PATH(τ) で示すように、パス τ の干渉チェックを行う。これは、パス τ に含まれるマイルストーンに対して、初期マイルストーンからスタートして各マイルストーンに対して順次実時間歩行パターンジェネレータを適用することで、マイルストーンを結ぶエッジにおけるロボットの動作軌道を導出する。この動作軌道に対して、文献⁽¹⁹⁾のエッジに対する干渉チェック手法を適用する。そして、初期マイルストーンから目標マイルストーンまで干渉が無い動作軌道が得られると、動作計画はこの軌道を解として返し、終了する。

4.5 議論 本節では、本論文で提案するアルゴリズムのうち、いくつかの点において議論する。まず、Algorithm 2 や 3 において、CONNECT-THREE-STEPS(m) や INSERT-TWO-STEPS(m, m_{goal}) という関数を導入した。これらは、実時間歩行パターンジェネレータをオフラインの動作計画に用いるために便宜上導入した関数である。CONNECT-THREE-STEPS(m) はマイルストーン m に直列に三つのマイルストーンを接続させる関数であり、INSERT-TWO-STEPS(m, m_{goal}) はマイルストーン m と m_{goal} の間に二つのマイルストーンを挿入させる関数である。まず、CONNECT-THREE-STEPS(m) は四つ以上のマイルストーンを接続させる関数に置き換えることができ、INSERT-TWO-STEPS(m, m_{goal}) は三つ以上のマイルストーンを挿入させる関数に置き換えることが出来る。ただ、マイルストーンの数が増えるに従って、歩行パターンジェネレータでの計算量が増えるため、その分だけ動作計画に時間がかかるようになる。

ここで、 $F_{ij}, i = l, r, j = 0, \dots, 3$ を足の水平面内での位置と水平面の法線周りの回転角から構成される3次元ベクトルとする。図5(a)にはマイルストーン m_j^i の近傍をサンプルすることで、子マイルストーンを追加する様子を示している。図に示すように、子マイルス

Fig. 5 Functions CONNECT-THREE-STEPS and INSERT-TWO-STEPS

トーンにおいては、基準となる位置/姿勢から見た右足の位置/姿勢をランダムにサンプルする。そして、この基準となる位置/姿勢からの変位を保つように、二つ目のマイルストーンを接続する。そして、三つ目のマイルストーンにおいては、ロボットが静止するように設定した。また、図5(b)には親マイルストーンと目標マイルストーンの間には二つのマイルストーンを挿入する様子を示している。ここで、 $F_{11} = (F_{10} + F_{12})/2$ と設定した。

図5には、 $\hat{q}$ を決定する方法についても示している。特に、マイルストーンを結ぶエッジにおける $\hat{q}$ については、スプライン補間により導出している。最後に接地する足の鉛直方向の位置と水平面に含まれる軸周りの回転については、足が環境に接地するように決定した。

最後に、本論文では歩行パターンジェネレータとして実時間のパターンジェネレータを用いた。これにより、親マイルストーンに子マイルストーンを追加する際に木全体について考慮する必要がなくなる。逆に言うと、オフラインの歩行パターンジェネレータでは、初期姿勢と目標姿勢が与えられた際にこれらを結ぶ歩行動作を導出するため、本論文で提案する動作計画においてオフラインの歩行パターンジェネレータを用いると、子マイルストーンを追加する度に、親マイルストーンから初期マイルストーンまで返り、これら全てを使って歩行動作を生成しなくてはならなくなる。ま

Fig. 6 Overview of numerical example

た、これは子マイルストーンに依存して、既に存在する木のエッジの形状が変わることを意味し、エッジの干渉チェックを行う際に問題が生じることになる。それに対して、実時間の歩行パターンジェネレータを用いると、これらの問題は生じない。

5. 実験結果

本章ではヒューマノイド HRP-2 のモデルを用いて動作計画を行い、その結果を基に実機で実験した結果を示す。HRP-2 は合計 30 自由度を持つヒューマノイドで身長は $h = 1.54[\text{m}]$ である。ここで、動作計画の実装は MPK (Motion Planning Kit)⁽²⁴⁾を参考にして行い、その際一部の関数として OpenHRP 上で実装したものを利用した。

動作計画を行った環境を図6に示す。図に示すように、ロボットの前に障害物があり、ロボットは障害物を避けて前方に歩かなくてはならない。その際、足の2次元の着地位置を計画すると同時に腰の2自由度の関節角も同時に計画する。このような動作計画を 2GHz PC を用いて行った結果、計算時間として 10 秒程度を要した。図7, 図8に実験結果を示す。図に示すように、ロボットが障害物を回り込みながら上体も同時に使って障害物を避け、前方に歩く動作が得られた。

6. おわりに

本論文では動歩行するヒューマノイドに対して足の着地位置と上体の関節軌道を同時に計画する問題について述べた。実時間歩行パターンジェネレータを用いて、コンフィグレーション空間内でランダム探索を行うことで、このような動作計画を実現させた。提案する手法の有効性を、ヒューマノイド HRP-2 が足の着地位置と上体の関節を同時に利用することで障害物を避ける動作により検証した。

ここで、本論文で提案する手法では、各マイルストーンは単脚支持期が始まった時点でのロボットのコ

Fig. 7 Walking motion of HRP-2 avoiding obstacle(Side view)

Fig. 8 Walking motion of HRP-2 avoiding obstacle(Front view)

ンフィグレーションによって定義され、マイルストーン間のコンフィグレーションについては歩行パターンジェネレータの設定に依存している。つまり、床に置かれた障害物を跨ぎ超えるような動作は提案する動作計画によっては得られないことになる。このような場

合を含めるように動作計画を修正することは今後の課題である。また、より複雑な環境に対して動作計画を行うことも今後の課題である。

最後に、本研究を進めるにあたって貴重な議論をいただいた産業技術総合研究所の横井一仁氏と吉田英一氏に感謝する。

文 献

- (1) A. Takanishi, H. Lim, M. Tsuda, and I. Kato, Realization of Dynamic Biped Walking Stabilized by Trunk Motion on a Sagittally Uneven Surface, *Proc. of IEEE International Workshop on Intelligent Robots and Systems (IROS '90)*, pp.323-330, 1990.
- (2) S. Kajita, F. Kanehiro, K. Kaneko, K. Fujiwara, K. Harada, K. Yokoi, and H. Hirukawa, Biped Walking Pattern Generation by using Preview Control of Zero-Moment Point, *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 1620-1626, 2003.
- (3) K. Harada, S. Kajita, K. Kaneko, and H. Hirukawa, An Analytical Method on Real-Time Gait Planning for a Humanoid Robot, *Proc. of IEEE-RAS/RSJ Int. Conf. on Humanoid Robotics*, 2004.
- (4) M. Morisawa, K. Harada, S. Kajita, S. Nakaoka, K. Fujiwara, F. Kanehiro, K. Kaneko, and H. Hirukawa, Experimentation of Humanoid Walking Allowing Immediate Modification of Foot Place Based on Analytical Solution, *Proc. of 2007 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, 2007.
- (5) M. Sanada, E. Yoshida, and K. Yokoi, Passing under Obstacles with Humanoid Robots -Step Motion Planning for Sideway Passing under Motion-, 8th Domestic Conference of SI Dept. of SICE, 2007 (In Japanese).
- (6) K. Hauser, T. Bretl, J.-C. Latombe, Non-gaited Humanoid Locomotion Planning, *Proc. of IEEE Int. Conf. of Humanoid Robots*, 2005
- (7) K. Hauser, T. Bretl, K. Harada, and J.-C. Latombe, Using motion primitives in probabilistic sample-based planning for humanoid robots, *Workshop on Algorithmic Foundations of Robotics (WAFR)*, 2006.
- (8) T. Sugihara and Y. Nakamura, A Fast Online Gait Planning with Boundary Condition Relaxation for Humanoid Robots, *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation(ICRA'05)*, 2005.

- (9) S. Kagami, K. Nishiwaki, T. Kitagawa, T. Sugihara, M. Inaba, and H. Inoue, A Fast Generation Method of a Dynamically Stable Humanoid Robot Trajectory with Enhanced ZMP Constraint, *Proc. of IEEE International Conference on Humanoid Robotics*, 2000.
- (10) J. Kuffner, K. Nishiwaki, S. Kagami, M. Inaba, and H. Inoue, Motion Planning for Humanoid Robots Under Obstacle and Dynamic Balance Constraints, *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, 2001.
- (11) J. Kuffner, K. Nishiwaki, S. Kagami, M. Inaba, and H. Inoue, Motion Planning for Humanoid Robots, *Int. Symposium of Robotics Research (ISRR'03)*, 2003.
- (12) J. Chestnutt, M. Lau, J.J. Kuffner, G. Cheung, J. Hodgins, and T. Kanade, Footstep Planning for the ASIMO Humanoid Robot, *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, 2005
- (13) M. Stilman and J.J. Kuffner, Navigation among movable obstacles : Real-time reasoning in complex environments, *Int. J. of Humanoid Robotics*, 2(4), 2005
- (14) Eiichi Yoshida, Humanoid Motion Planning using Multi-Level DOF Exploitation based on Randomized Method, *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, 2005.
- (15) Eiichi Yoshida, I. Belousov, C. Esteves, and J.-P. Laumond, Humanoid Motion Planning for Dynamic Tasks, *Proc. of IEEE-RAS Int. Conf. on Humanoid Robot*, 2005.
- (16) J.J. Kuffner and S.M. Lavalley, RRT-Connect: An Efficient Approach to Single-Query Path Planning, *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, 2000.
- (17) S.M. Lavalley and J.J. Kuffner, Randomized Kinodynamic Planning, *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, 1999.
- (18) R. Kindel, D. Hsu, J.C. Latombe, S. Rock, Kinodynamic Motion Planning Amidst Moving Obstacles, *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, 2000.
- (19) G. Sanchez and J.C. Latombe, A Single-Query Bi-Directional Probabilistic Roadmap Planner with Lazy Collision Checking, *Int. Symposium of Robotics Research (ISRR'01)*, 2001.
- (20) R. Bohlin and L.E. Kavraki, Path planning using lazy PRM, *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, 2000.
- (21) L.E. Kavraki, P. Svestka, J.C. Latombe, and M. Overmars, Probabilistic Roadmaps for Path Planning in High-Dimensional Configuration Spaces, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 12(4), 1996.
- (22) K. Harada, S. Hattori, H. Hirukawa, M. Morisawa, S. Kajita, and E. Yoshida, Motion Planning for Walking Pattern Generation of Humanoid Robots, *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, 2007.
- (23) K. Harada, M. Morisawa, S. Nakaoka, K. Kaneko, S. Kajita, Kinodynamic Planning for Humanoid Robots walking on Uneven Terrain, *Journal of Robotics and Mechatronics*, 21(3), pp.311-316, 2009.
- (24) <http://robotics.stanford.edu/mitul/mpk/>