

仮想支点を用いた2足歩行ロボットの制御

学籍番号 辻 俊明

指導教員 大西 公平

1 序論

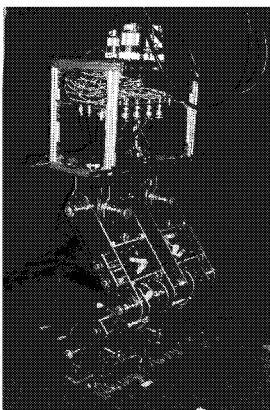
2足歩行ロボットは接地面を離散的に選択することができるため、段差や障害物が存在する人間環境に適応しやすい。今後の2足歩行ロボットの研究では、多様に変化する環境に対していかに自律的に対応し、歩行による移動を実現するかというところに焦点が当てられる。

環境変動に対応するためには環境情報を考慮したリアルタイムでの軌道生成を行わなければならない。本研究では、長期的な視野での軌道計画をリアルタイムで行うために、計算量の小さい線形倒立振子モードを適用した。

しかし倒立振子モードを用いた従来の手法では生成される軌道が倒立振子のモデルに強く制限されるため、多様な動作に対して安定性を保証することができない。そこで本論文では仮想支点 (Virtual Supporting Point) という新しい概念を導入することで、倒立振子モードの単純な軌道計画を適用しながら多様な動作を実現できる手法を提案する。

2 実機の機構とモデリング

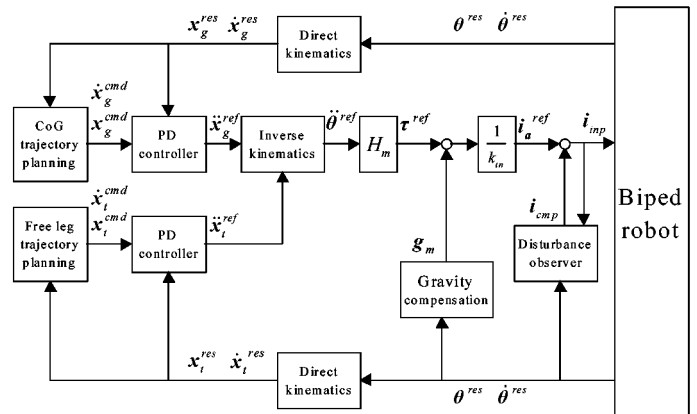
本研究では図1のような3次元2足歩行ロボットを用いた。このロボットは前から見たfrontal平面に4自由度、横方向から見たsagittal平面に6自由度を持つ。このロボットを、体幹をベースリンクとする冗長マニピュレータとして扱い、各リンクの重心に質量を持つ質点系としてモデル化を行った。



⊗ 1: Overview of the biped robot

3 制御系の構成

Fig.2に全制御系を示す. 外乱オブザーバを用いたPD制御により, ロバストな制御系を構成した.



⊠ 2: Block diagram of the total system

4 仮想支点を用いた軌道生成法

本研究では、倒立振りモードを軌道生成のために用いる。従来法では倒立振りモデルの支点は足首関節もしくは足底面上に固定されていたが、本論文では倒立振子の支点を仮想的に移動する手法を提案する。

支点の高さを調整することで倒立振子の時定数が設定できるようになる。支点の水平面の位置を調整することで、倒立振子の軌道を大きく変更することができるようになる。

このように仮想的に移動した倒立振子の支点を仮想支点 (Virtual Supporting Point) と呼び、以後 VSP と省略して用いる。

VSPによって調整された倒立振子のモデルより，歩行の安定性が確保されたロボットの指令重心軌道を与える．ロボットの重心に与えられる加速度は式(1)によって求める．

$$\begin{aligned}\ddot{\mathbf{r}} &= \omega^2 \mathbf{r} \\ \omega &= \sqrt{\frac{g}{h_q + d}}\end{aligned}\tag{1}$$

ここで r :VSPを基準とした重心の水平面上の座標, h_g :重心の高さ, d :VSPの深さ, g :重力加速度である.

歩行の安定指標である ZMP と VSP のモデル上の関係は式 (2) のようになる. ZMP が支持多角形内に収まるよ

うなVSPの位置を設定することで長期的な安定性を考慮した軌道計画が可能となる。

$$\mathbf{Z} = \frac{d}{h_g + d} \mathbf{r} \quad (2)$$

ここで、 $\mathbf{Z}$ はVSPを基準とした水平面上のZMPの位置を表す。

本研究では自在に移動できるVSPの特性を活用し、VSPの位置が連続となるような軌道計画を行う。VSPは片足支持期間には足底面の中心に存在し、両足支持期間に、もとの支持脚から切り替わる次の支持脚の足底面へ一定速度 $\dot{\mathbf{v}}$ で移動する。このときの重心軌道は倒立振子の動力学より、式(3)、式(4)、式(5)によって推定できる。

$$\mathbf{r}_{s1}(t) = \frac{\mathbf{r}_0}{2}(e^{\omega t} + e^{-\omega t}) + \frac{\dot{\mathbf{r}}_0}{2\omega}(e^{\omega t} - e^{-\omega t}) \quad (3)$$

$$\mathbf{r}_d(t) = \frac{\mathbf{r}_0}{2}(e^{\omega t} + e^{-\omega t}) + \frac{\dot{\mathbf{r}}_0}{2\omega}(e^{\omega t} - e^{-\omega t}) + \frac{\dot{\mathbf{v}}}{2\omega}(-e^{\omega(t-\frac{T_s}{2})} + e^{-\omega(t-\frac{T_s}{2})}) + \dot{\mathbf{v}}t \quad (4)$$

$$\mathbf{r}_{s2}(t) = \frac{\mathbf{r}_0}{2}(e^{\omega t} + e^{-\omega t}) + \frac{\dot{\mathbf{r}}_0}{2\omega}(e^{\omega t} - e^{-\omega t}) + \frac{\dot{\mathbf{v}}}{2\omega}(-e^{\omega(t-\frac{T_s}{2})} + e^{-\omega(t-\frac{T_s}{2})}) + \frac{\dot{\mathbf{v}}}{2\omega}(e^{\omega(t-T_d-\frac{T_s}{2})} - e^{-\omega(t-T_d-\frac{T_s}{2})}) + \dot{\mathbf{v}}T_d \quad (5)$$

ここで、 $\mathbf{r}_{s1}$ 、 $\mathbf{r}_d$ 、 $\mathbf{r}_{s2}$ はそれぞれ現在の片足支持期、次の両足支持期、次の片足支持期における重心位置推定値を表し、 T_s 、 T_d はそれぞれ片足支持期間と両足支持期間の長さを表す。 $\mathbf{r}_0$ は $\mathbf{r}$ の初期値、 $\mathbf{v}$ はVSPの水平面上の絶対位置を表す。

倒立振子のモデルによって動作が強く拘束されている従来法と異なり、本論文で提案した軌道計画法では歩幅や歩行周期などの歩行のパラメータを任意に与えることが可能である。また、ZMPとVSPの関係式より、歩行の安定性を保つためのパラメータの操作範囲が明確に計算できるという特徴がある。さらに、倒立振子の支点の位置を連続にすることができるため、支点の切り替わりによる過渡的な誤差が抑えられることで安定性が向上する。

5 シミュレーション

支持脚の切り替えとともに支点の位置も切り替わる従来法による歩行と、VSPが両足支持期に一定速度で移動する提案手法による歩行の結果を比較する。歩行の一般的な安定指標であるZMPの応答値によって両手法の歩行での安定性を比較した。図3より、VSPの位置を連続にする提案法において、ZMPの変動が小さく抑えられていることが確認できた。

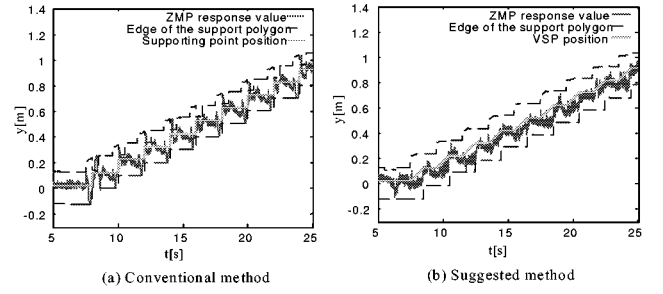


図 3: ZMP response value on travelling direction

6 実験

障害物回避運動に本手法を応用した。ロボットの進行方向0.9m前に長さ約18cm、幅最大4cm、高さ0.6mmの障害物を斜めに置き、ロボットにあらかじめ障害物の位置情報を与えたところ、障害物をまたいで越えることができた。リアルタイムの自律的な軌道計画で歩幅を自在に調整し、多様な動作を実現できることが確認された。

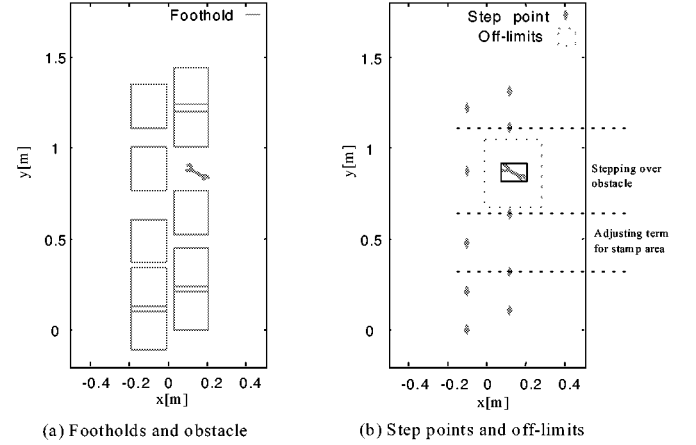


図 4: Stepping over an obstacle

7 結論

本論文では仮想支点 (Virtual Supporting Point) という新しい指標を提案し、2足歩行ロボットの軌道計画に応用した。VSPを応用することにより、ロボットの姿勢を変えることなく倒立振子のモデルを操作できるので、ロボットの機構的拘束を超えたパラメータ設定と、多様な動作に対する安定性の保証が可能になる。また、単純な計算で長期的な歩行の安定性を考慮した軌道計画を行なうことができる。VSPと歩行の安定指標であるZMPの関係を定式化することで、VSPの理論的な安定限界をもとめた。本論文の提案手法では倒立振子のモデルを連続的に操作するので、支点の切り替えによる過渡的な誤差が生じず、安定性が向上する。実験とシミュレーションによって本手法の有効性を確認した。