4 人間型二足歩行ロボット

4-1 二足ヒューマノイドロボットWABIAN-RVの
歩行・補償パターンジェネレーション林 憲玉^{†1,†3}, 高西 淳夫^{†2,†3}

キーワード

ヒューマノイドロボット, 二足歩行, ZMP, 補償軌道, 歩行パターン

1. ま え が き

二足ヒューマノイドロボットは, FAや極限作業ロボットとは異なり, 人間と同じ空間を共有して歩き, かつその環境において人間と協調作業を行うことが求められている。

早稲田大学では, 1973年に故加藤一郎教授を中心に, 世界初の本格的人間型知能ロボットWABOT-1を開発した。本ロボットは, 手足システム, 視覚システム, 音声システムから構成されており, 人間とのコミュニケーションを簡単な日本語の会話で行い, 触覚を有する両手で物体の把握・移動などの作業を行うことが可能である¹⁾。

また, 1986年から1995年までに開発されたWL-12は, 片脚1自由度を一つの油圧式ロータリアクチュエータで駆動し, その駆動に高ゲインの局所位置フィードバック制御を用いた。WL-12は, 平面・段差・斜面などの路面状況への適応歩行を実現し, さらに未知外力, 未知路面への適応歩行なども実現した²⁾。

そして, 人間の下肢機構をモデルとしたWL-13 (1995年) では, アクチュエータとしてACサーボモータを使用した。下肢関節には, 関節剛性を理論的に0から無限大まで可変可能な非線形ばね機構を用いた拮抗駆動方式を採用し, 筋張力制御と関節角度制御を組合せた駆動制御方式により, 関節剛性が可変な拮抗駆動に成功した³⁾。

さらに, 1996年に人間の住環境下で人間の生活を直接支援するヒューマノイドロボットとして, 視聴覚情報取得機能を有する頭部, 胴体および腕部を持つ二足歩行型ヒューマノイドロボットWABIANを開発し, 水平・平坦な路面上において, 上肢固定の動的前進歩行および動的後退歩行, 上肢を振りながらの動的前進・後退を含むダンス, 双腕による動的荷物運搬作業を実現した⁴⁾。

二足ヒューマノイドロボットが人間とのインタラクティ

ブな移動機構を実現するためには, 人間の要求を認識し, 周りの環境に合わせた行動をロボットが自律的に生成することが必要となる。つまり, 触覚・聴覚・視覚などにより得られた情報認識とロボット内部のリアルタイム歩行パターン生成を統合することが, インタラクティブな移動機構を考える上で必要な要素である^{5) 6)}。しかし, 従来の歩行パターンはオフラインで作成しており, 人間の住環境に合わせた様々な歩行を実現することは難しい。

本稿では, 環境情報と人間情報による歩行パターンのオンライン生成の方法について述べる。また, 歩行中に生じるモーメントを補償し, 安定な動歩行を実現する補償軌道算出アルゴリズムについても述べる。

2. WABIAN-RVの機構

二足歩行型ヒューマノイドロボットWABIAN-RVは, 図1に示すように総重量127.4kg, 直立静止状態で全長1.89mである。下肢に片脚6自由度で両脚12自由度, 体幹にピッチ, ロール, ヨー軸の3自由度, 上肢に片腕7自由度で両腕14自由度, 手に各3自由度, 首にはピッチ軸回りに2自由度, ロ

図1 WABIAN-RV

†1 神奈川工科大学 システムデザイン工学科

†2 早稲田大学 理工学部 機械工学科

†3 早稲田大学 ヒューマノイド研究所

"Bipedal Humanoid Robots ; Locomotive and Compensatory Pattern Generation of Biped Humanoid Robot WABIAN-RV" by Hun-ok Lim (Department of System Design Engineering, Kanagawa Institute of Technology, Kanagawa) and Atsuo Takanishi (Department of Mechanical Engineering, Waseda University, Tokyo)

ール, ヨー軸回りに各1自由度で合計4自由度, 眼にはピッチ, ヨー軸の各2自由度で, 全身に合計43自由度を有する.

各関節の駆動方式は眼部以外については, 1自由度につき一つのサーボモータにより減速機を介して直接的に関節を駆動している. 6軸力センサを両足首部に搭載し, 歩行のコンプライアンス制御を行っている. 右手にも6軸力センサを搭載し, 物理的インタラクションを可能としている. 頭部には視覚センサとして両眼部にカラーCCDカメラを搭載し, 追従運動制御を行う際の指令入力としてCCDカメラからの映像を利用するため, カラートラッキングビジョンのボードを2枚搭載している. CPUにはIntel製Pentium III 1GHzを搭載している. D/A変換ボードとして, PC-422Bを3枚使用している. 主要な構造部材には超々ジュラルミン, GIGASおよび炭素繊維強化プラスチックCFRPを用いている.

3. モーメント補償軌道算出アルゴリズム

全身運動時における二足ヒューマノイドロボットの安定性を力学的視点から判定するために, ZMP (Zero Moment Point) 安定判別規範を用いている. まず, ZMPを求める式を導くために, 図2のように座標系を設定する. 運動座標系 $\bar{O}-\bar{X}\bar{Y}\bar{Z}$ において任意の点 P についてのZMP方程式を表すと次式が得られる.

$$\sum_i m_i (\bar{r}_i - \bar{r}_{ZMP}) \times (\ddot{\bar{r}}_i + \ddot{\bar{Q}} - \bar{G}) = 0 \quad (1)$$

ここで, $\bar{Q}$ は絶対座標系に対する運動座標系の原点座標を表す. ZMP方程式 (1) は一般に非線形であるため, このままでは解析的に解を得ることは困難である. そこで, モデルを近似化して補償軌道の近似解を算出し, 繰り返し計算による補償軌道の厳密解を算出する.

二足ヒューマノイドロボットの上肢の全質点を肩部に集中し, 体幹部が3質点, 腰部が1質点の近似モデルとする.

図2 Coordinate Frames

ここで, 被補償モーメントとなる下肢の運動により発生するモーメントを M とおき, 4質点近似モデル化を行うと式 (1) は次のようになる.

$$m_U(\bar{r}_T - \bar{r}_{ZMP}) \times (\ddot{\bar{r}}_T + \ddot{\bar{Q}} - \bar{G}) + m_W(\bar{r}_W - \bar{r}_{ZMP}) \times (\ddot{\bar{r}}_W + \ddot{\bar{Q}} - \bar{G}) = -M \quad (2)$$

ここで, m_U は体幹の質量, m_W は腰の質量を表す.

式 (2) の各モーメント成分が Z 軸方向の運動を共有し, また下肢と体幹が回転型の関節を介して連結していることから非線形かつ干渉な系である. そこで, ロボットは運動中腰高さ一定, また体幹部アームは水平面内を回転し体幹質点は Z 軸方向に関して運動しないものと仮定し, 線形, 非干渉化する.

そしてヨー軸アクチュエータの回転角度を θ_y , 体幹部アームのアームベクトルの長さを R と表す. また, 式 (2) において左辺の既知項を右辺に移動すると, 次の式が得られる.

$$m_T(\bar{z}_T - \bar{z}_{ZMP})\ddot{\bar{x}}_T - m_T(-\bar{g}_z)\bar{x}_T + m_W(\bar{z}_W - \bar{z}_{ZMP})\ddot{\bar{x}}_W - m_W(-\bar{g}_z)\bar{x}_W = -M^*_y \quad (3)$$

$$-m_T(\bar{z}_T - \bar{z}_{ZMP})\ddot{\bar{y}}_T + m_T(-\bar{g}_z)\bar{y}_T - m_W(\bar{z}_T - \bar{z}_{ZMP})\ddot{\bar{y}}_W + m_W(-\bar{g}_z)\bar{y}_W = -M^*_x \quad (4)$$

$$m_U R^2 \ddot{\theta}_y = -M^*_z \quad (5)$$

モーメント補償軌道 $\bar{x}_T \cdot \bar{x}_W \cdot \bar{y}_T \cdot \bar{y}_W \cdot \theta_y$ の近似解を求めるために, 式 (3) ~ (5) を用いて解析的に近似解を得る. そこで, 本アルゴリズムでは, 近似モデルにおける被補償モーメントを腰と体幹にそれぞれ配分することにより, 未知の四つのモーメント補償軌道に対して四つの微分方程式を作る. ピッチ, ロール軸回りのモーメントは下肢軌道およびZMP軌道から算出できるので既知関数となり, さらに定常歩行であるとすれば, ヒューマノイドロボットの各部質点ならびにZMPは運動座標系に関して周期的な相対運動をするので, それぞれ周期関数となる. よって, 式 (3), 式 (4) の左辺も同じく周期関数になる. そこで, これらの式の右辺をそれぞれフーリエ級数展開し, また, 四つの補償軌道をそれぞれ係数未知のフーリエ級数で表し, これらの式の左辺にそれぞれ代入し, 各両辺のフーリエ係数を比較することで補償軌道それぞれのフーリエ係数を求める. そして, これを逆フーリエ級数展開することでピッチ, ロール軸回りのモーメント補償軌道の近似解を得ることができる. ヨー軸のモーメント補償軌道も式 (5) を用いてフーリエ係数比較法で算出する.

上記のように得られた近似解を厳密モデルの式 (1) に代入し, その右辺と比較することで設定ZMPにおけるモーメント誤差を算出し, これらの誤差の符号を反転したものを式 (3) ~ 式 (5) の右辺に蓄積し, 再び計算を行い, モーメント誤差がある許容値以下になるまで繰り返し計算を行う

図3 Calculation of Compensatory Motion

ことで厳密解を得る。

以上において、定常歩行における解法について述べてきたが、一般的な運動に関しても、運動開始および終了の姿勢が同一であれば、運動開始および終了を含む一連の運動を一つの運動周期とし、その前後の停止姿勢の期間を十分に長く取ることで、まったく同様のアルゴリズムによりモーメント補償軌道を算出することができる。モーメント補償軌道算出アルゴリズムを図3に示す。

下肢軌道により発生するモーメントと補償軌道との関係を調べるため、式(1)を体幹運動のピッチ軸回りのモーメントの方程式へ変形すると次のようになる。

$$(\bar{z}_T + z_q)\ddot{y}_T - g\bar{y}_T = \phi(t) \quad (6)$$

ここで、右辺の項 $\phi(t)$ は既知である。式(6)の周波数領域での伝達関数は次のようになる

$$\bar{y}_T(\omega) = \frac{2a}{\omega^2 + a^2} b = \left(\frac{1}{a - j\omega} + \frac{1}{a + j\omega} \right) b \quad (7)$$

ここで、

図4 Trunk Motion to Impulse Moment

$$a = \sqrt{\frac{g}{(\bar{z}_T + z_q)}}, \quad b = -\frac{1}{2g} \sqrt{\frac{g}{(\bar{z}_T + z_q)}}$$

式(7)は ω - 上半平面に極を持つので、負の時間領域 ($t < 0$) で非零、すなわち因果律が成り立たない。式(6)を逆フーリエ変換すると、

$$\bar{y}_T(t) = be^{-a|t|} \quad (8)$$

ピッチ軸回りのインパルス応答は負の時間領域で非零である。強制項であるモーメントは1歩周期に変化していくので、式(8)の形から体幹補償軌道が歩行開始・終了時に影響を及ぼすことがわかる。また歩行速度が増すにつれモーメントの周期が速くなるので、それだけ畳み込みによる補償軌道の影響も顕著に表れることも明らかである。

図4は、直立静止状態にあるWABIAN-RVに対してインパルス状のモーメントを入力した時の補償軌道を示している。あるモーメントに対する補償軌道は、そのモーメントが入力する以前にも軌道を持っている。これは外力モーメントを下肢が発生するモーメントと考えても同じことであり、リアルタイムに足先軌道を変化させる場合の補償軌道は、足先軌道を変化させる以前に補償動作が始まっていることを意味している。

4. オンライン歩行パターン生成

4.1 歩行状態

歩行パターンは大きく三つの歩行状態に分けることができる。

(1) 静止状態

歩行開始前、および歩行終了後の静止した状態である。歩行開始前の静止状態から歩行終了後の静止状態までを1歩行周期として補償軌道は生成される。また、補償軌道はFFTにより求められるため、この静止相には前後最低でも1歩分ずつをとり、補償軌道を1歩行周期ごとの周期関数とする必要がある。

(2) 定常状態

後述する過渡状態を除いたすべての歩行は定常状態である。

(3) 過渡状態

歩行開始時、および歩行終了時の2歩である。これらは静止状態と定常状態の間にあり、同一の歩幅や歩行の方向

であっても、定常状態とは異なる補償軌道を描く。

以上のように、一つの歩行周期は5歩未満の場合はすべてが過渡状態のまま歩行を終了し、5歩以上の場合は前後の2歩ずつを除き、すべての歩行は定常状態となる。連続した歩行を実現するための単位パターンとしては最低でも1歩の定常状態が必要であるため、1歩行周期5歩のパターンを基本パターンとする。

4.2 歩行パターン生成

1歩行周期ごとに生成される歩行パターンから任意の1歩を切出し、接続することで連続した歩行パターンを生成する。パターン生成方法を図5に示し、以下に述べる。

(1) 足先軌道の指定

パターン生成方法の元となっているモーメント補償軌道生成アルゴリズムは、任意の足先軌道および腰軌道に対して補償軌道を生成することができるため、各種パラメータ(腰軌道、足先軌道など)を視覚、音声などにより指定し、パターンを生成する。

(2) 歩行状態の把握

歩行は、静止状態→過渡状態→定常状態→過渡状態→静止状態と遷移することを利用し、フラグにより現在の状態を把握する。

(3) 立脚の把握

定常歩行中は片足ずつのパターンを生成するので、立脚の状態を把握し、それに応じて歩行開始時最初に振り出す足を変更してパターンを生成する。

(4) パターンの生成

パターンは、歩行開始前・終了後の静止状態、歩行開始時・終了時の過渡状態、定常状態の3種類に分類でき、連続した歩行のための単位パターンとしては最低1歩の定常状態が必要である。したがって、全5歩の補償軌道をモーメント補償軌道算出方式により生成する。

(5) 足先軌道の保存

補償軌道生成のために現在・過去・未来の足先軌道が必

要であるので、過去3歩分の足先軌道を保存し、次の計算に当てるものとする。未来については時間軸方向への広がり現在の1歩以内であれば適当に取ることができ、歩幅を0.0mとして補償軌道を計算している。

(6) パターンの出力

生成されたパターンの中で適切な立脚の一步を指定し、単位パターンとして出力する。また、これを保存し、次の1歩分生成時に過去の足先軌道として用いる。

5. む す び

視覚・音声情報によるオンラインパターン生成方式とモーメント補償軌道算出アルゴリズムを二足ヒューマノイドロボットWABIAN-RVに適用し、水平・平坦な路面上で前・後・横・回転歩行を組合せた連続追従歩行を実現した。これらにより、二足ヒューマノイドロボットにおけるリアルタイム性の高い歩行制御および二足ヒューマノイドロボットと人間との相互インタラクションの可能性の基盤を築くことができた。今後、より自律歩行を実現するために、視覚・聴覚センサなどによる路面形状(傾斜度、障害物など)を判断するセンシング技術の開発に期待している。

(2002年9月11日受付)

〔文 献〕

- 1) 加藤, 角尾, 平林ほか: “二足歩行ロボット (WABOT-1) の開発”, バイオメカニズム2, 東京大学出版会, pp.173-184 (1973)
- 2) 山口, 高西, 加藤: “路面形状に偏差のある環境における二足歩行制御—未知の凹凸路面に対する適応歩行実現—”, 日本ロボット学誌, 13, 7, pp.136-143 (1995)
- 3) J. Yamaguchi and A. Takanishi: “Development of a Biped Walking Robot Having Antagonistic Driven Joints Using Nonlinear Spring Mechanism”, Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 185-192 (1997)
- 4) H. Lim and Y. Yamamoto and A. Takanishi: “Stabilization Control for Biped Follow Walking”, Advanced Robotics, 16, 4, pp.361-380 (2002)
- 5) H. Lim, S.A. Setiawan and A. Takanishi: “Online Pattern Generation for Biped Humanoid Robot with Trunk”, Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 3111-3116 (2002)
- 6) S. Setiawan, S. Hyon, J. Yamaguchi and A. Takanishi: “Physical Interaction Between Human and a Bipedal Humanoid Robot -Realization of Human-Follow Walking-”, Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 361-367 (1999)

図5 Real-time Motion Pattern Generation

林 憲玉 (ケンタツ リム) 1990年、早稲田大学大学院理工学研究科修士課程修了。1999年、同大学大学院博士課程修了。同年、同大学理工学部助手。2001年より、神奈川工科大学大学院工学研究科機械システム工学専攻助教授・早稲田大学理工学総合研究センター客員助教授。主として、ヒューマノイド研究に従事。工学博士。

高西 淳夫 (アツオ タカニシ) 1985年、早稲田大学大学院理工学研究科博士後期課程単位取得。同年、同大学理工学部助手。1988年、同大学理工学部専任講師。1990年、同大学理工学部助教授。1997年より、同大学理工学部教授。1990年～1991年、MIT大学機械工学科客員研究員。主として、ヒューマノイド研究に従事。工学博士。