2 足ヒューマノイドロボットの膝関節伸展型 歩行パターン生成アルゴリズム*

小 椋 優^{*1}, 林 憲 玉^{*2}, 高 西 淳 夫^{*1}

Stretch Walking Pattern Generation for a Biped Humanoid Robot

Yu OGURA^{*3}, Hun-ok LIM and Atsuo TAKANISHI

^{*3} Graduate School of Science and Engineering, Waseda University,
3 4 1 Ookubo, Shinjuku ku, Tokyo, 169-8555 Japan

This paper describes a knee stretch walking for the biped robot having three degrees of freedom (DOF) in each ankle, one DOF in each knee, three DOF in each hip and two DOF in the waist. Firstly, the initial parameters, foot and waist trajectories and a knee joint trajectory of the supporting leg, are given. Secondly, the motion pattern of the swing leg is generated by inverse kinematics. Finally, the roll motion of the waist is used to avoid the singularity of the swing leg. Also, a compensatory motion algorithm is discussed in this paper, which cancels moments generated by the motion of the legs. Through stretch walking simulations, the effectiveness of the stretch walking pattern generation method is confirmed.

Key Words: Humanoid Robot, Biped Walking Robot, Stretch Walking

1. はじめに

近年ヒューマノイドロボットは、人間と共存可能なロボットの1つの形として、また人間のパートナーとしての活躍が期待され、多くの研究者・研究機関によって盛んに発表されている。著者ら早稲田大学の研究グループにおける2足ヒューマノイドロボットの研究としては、1973年に開発されたWABOT-1に始まり、下肢機構とその歩行制御に注目したWAP・WLシリーズ¹⁾を用いた研究を経て、1996年よりWABIANシリーズを用いた研究が行われている。これまでに、腰と体幹の協調によるモーメント補償軌道算出アルゴリズムを開発し、全身運動を伴う歩行²⁾、オンラインパターン生成³⁾を用いた視覚・聴覚からの追従歩行⁴⁾等を実現している。また本田技研工業はP1, P2, P3⁵⁾を経てASIMO⁶⁾を登場させた。ASIMOは安定した歩行動作、階段昇降のみならず、視覚によるジェスチャー認識や、視覚・音声情報のローカルマップへの取り込みも行い、現在既に“受付係”等の用途として、他企業への貸し出しもされている。産業技術総合研究所は「人間協調・共存型ロボットシステム研究開発プロジェクト(HRP)」のもと、HRP-2P⁷⁾を開発した。HRP-2Pは、

人間と共同で机の持ち運び作業や、仰向けの状態からの起き上がり等を実現している。

さて、これらの安定した2足動歩行を実現している研究においては、ロボットの歩行パターン生成に、Vukobratovic⁸⁾によって提唱されたZMP (Zero Moment Point) の概念が用いられており、この概念が歩行パターン生成に有効であることは実証されていると言えるだろう。

しかしながら、これらの2足歩行ロボットの実現している歩行は、主に腰を落として膝関節を曲げた状態での歩行であり、人間のような膝を伸ばした歩行、すなわち膝関節の伸展位を伴った歩行は実現されていない。その主な理由は、これまでの2足ヒューマノイドロボットの下肢の自由度構成と軌道の導出方法にある。これらのロボットの殆どにおいて、下肢機構として片足6自由度、計12自由度が備えられている。またその下肢軌道は、腰と足先軌道の相対的な位置と姿勢6自由度の逆運動学を算出することによって導出されている。この場合、膝関節伸展位が特異姿勢となるため、膝関節が伸びきらない範囲において、歩行パターンが生成されることが必要とされる。

人間は、上記の2足ヒューマノイドロボットより多くの自由度を持ち、これを有効に使うことによって、多彩な運動を行っていると考えられ、定常歩行において膝関節は伸びきる、もしくはその近傍で制御されていることが観察される。2足ヒューマノイドロボットが膝関節の伸展位を伴う歩行を可能にすることは、人

* 原稿受付 2003 年 8 月 11 日。

^{*1} 正員、早稲田大学理工学部、ヒューマノイド研究所、理工学総合研究センター(〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1)。

^{*2} 正員、神奈川工科大学システムデザイン工学科(〒243-0292 厚木市下荻野1030)。

E mail: uogura@ruri.waseda.jp

間らしさの追求、膝関節所要トルクの低減、人間の歩行運動の解明等、非常に大きなメリットがあると言えるだろう。

今回著者は、人間の歩行解析資料¹⁰⁾¹¹⁾を参考にし、2足ヒューマノイドロボットが、定常歩行において、人間のような歩行パターンを可能にすることを目指して、人間の下肢自由度構成に近いハードウェアの設計とパターン生成アルゴリズムの開発を行った。中でも、これまで2足ヒューマノイドロボットにおいてあまり取り上げられていない腰の回旋運動に着目した。

本稿において、はじめに新しい2足ヒューマノイドロボットの下肢リンク機構を提案する。これは片足7自由度、腰に2自由度を備える。次にこれを用いることによって膝関節の伸展位を伴う歩行パターンの生成方法について述べる。

2. 2足ヒューマノイドロボットの下肢機構

提案する2足ヒューマノイドロボットの下肢機構を図1に示す。この中で、従来にない新しい自由度機構として、以下の2つについて説明する。

2.1 腰2自由度 定常歩行中における人間の腰の回旋運動は、図2に見られるように、前額面内（ここではロール軸周りと定義する）、および水平面内（ヨー軸周りに）において観察される。矢状面内（ピッチ軸周りに）の運動は図3のスティック線図よりほとんど観察されない。これより、人間の歩行運動を2足ヒューマノイドロボットで再現するためには、上体の姿勢に依らずに少なくとも腰のロール軸、ヨー軸周りの運動が必要であることがわかる。

また著者らは、次のような仮説を立てている。図4に人間の骨盤周辺図を示す。定常歩行中において、2枚の寛骨は互いにずれながら運動をしていると言われている¹²⁾。これは、恥骨結合という2枚の寛骨の結合部が機械的にはクランク機構のような役割を果たすた

Fig. 1 Configurations of DOF

Fig. 2 Human's pelvis and knee motion¹⁰⁾

Fig. 3 Stick diagram of human leg motion

めにおくる運動である。この運動にしたがって、股関節の運動は相対的な2自由度系とみなすことが出来るのではないだろうか。

腰部ロール軸、ヨー軸は、左右股関節の midpoint で直交することが望ましい、その理由は、腰の旋回運動による上体の位置変位が最も小さいため、運動学解析が最も簡略化できるためである。

2.2 足関節ヨー軸 従来の2足歩行ヒューマノイドロボットの足関節はロール軸、ピッチ軸の2自由度で構成されている。しかし人間の機構は、手首と同じように足関節にヨー軸を含む3自由度を有し、膝関節1自由度、股関節3自由度の合計片足7自由度と見なすことができ、これを有効に利用していると考えられる。これによって、膝が曲がっている場合において、足先と腰の位置・姿勢に依らずに膝の向きを変えることができるため、汎用性の求められる2足ヒューマノ

Fig. 4 Pelvis of a human

イドにとって非常に大きな利点となる。その例として、狭い場所での移動や障害物を避けながらの屈伸、はしごを登る場合や馬乗りになる姿勢をとる場合、等が考えられる (図5)。

3. 膝関節伸展型歩行パターン生成

3.1 脚関節角度導出 従来の2足ヒューマノイドロボットの研究において、その下肢の関節角度は、足先と腰の相対的な位置・姿勢の6自由度逆運動学を算出することによって導出されていた。確かにこの手法は、足先から見た腰の位置・姿勢 (またはその逆) を任意に設定できるという点において、理にかなった方法であり、実際にこれを用いて歩行パターンを生成し、安定した歩行が実現されている。しかしながら、この場合、膝関節伸展位において、その関節角速度が無限大の値をとることになる特異姿勢に陥ってしまう。

そこで、本研究において、立脚期と遊脚期で関節角度導出方法を切り替えることによって、膝の伸展位

を可能にする方式を考案した。本方式においては、立脚膝関節の関節角度はあらかじめ任意に設定され、膝関節において特異点は定義されないことになる。このため、立脚足先から見た腰の位置の垂直方向成分 (腰高さ) は立脚膝関節に従属的な要素とするため設定されない。また、遊脚が特異姿勢近傍にある場合は、膝関節は固定され、代わりに腰のロール運動が用いられる。座標系を図6に示し、以下その詳細について述べる。

- (1) 初期パラメータとして、足先軌道、腰軌道、立脚時の膝関節角度が与えられる。腰軌道は2次元の水平方向運動・3次元の姿勢より成る。
- (2) 立脚足先と腰の相対位置 (P_{wx}, P_{wy}) ・姿勢 $E_w \in R^3$ より、立脚股関節の水平面内の位置 (P_{hlx}, P_{hly}) が、腰部中心から立脚股関節までの長さ l_{hl} を用いて式 (1) のように算出される。

$$\begin{bmatrix} P_{hlx} \\ P_{hly} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{wx} \\ P_{wy} \end{bmatrix} + [E_{wx} \quad E_{wy}] \begin{bmatrix} 0 \\ l_{hl} \end{bmatrix} \dots (1)$$

また、立脚の脛部・大腿部の長さ l_{sl} , l_{tl} および立脚膝関節角度 θ_{k1} より、立脚の足関節から股関節までの長さ d_{hl} も式 (2) のように算出される。

$$d_{k1} = \sqrt{l_{sl}^2 + l_{tl}^2 - 2l_{sl}l_{tl}\cos(\theta_{k1})} \dots (2)$$

これらより、立脚足先から見た腰高さは、式 (3) のように記述される

$$P_{hlz} = \sqrt{|d_{hl}|^2 - (P_{hlx}^2 + P_{hly}^2)} \dots (3)$$

腰と遊脚足先の相対6自由度より遊脚各関節角度の逆運動学解を算出する。このとき遊脚膝関節角度の解が算出されない (足が届かない) もしくはその角速度が制限値を越えた場合 (特異点近傍)、遊脚膝関節はその角速度制限値内に収まるように固定され、立脚股関節を中心として腰部をロール回りに回転させる。これによって、設定された遊脚の足先軌道が自由度の縮退無く実現される。このとき遊脚股関節の位置

P_{h2} は次の式 (4) で表現される連立方程式の解として算出される。

Fig. 5 Advantages of 7-DOF legs

Fig. 6 Coordinate frames

$$\begin{cases} |P_{h2} - P_{r2}| = \sqrt{l_{s2}^2 + l_{t2}^2 - 2l_{s2}l_{t2}\cos(\theta_{k2})} \\ |P_{h2} - P_{h1}| = l_{h1} + l_{h2} \\ (P_{h2} - P_{h1}) \cdot E_x = 0 \end{cases} \quad \dots (4)$$

- (3) 両股関節位置が決定すると最終的な腰の位置・姿勢（必要ならば腰のヨー軸方向の運動を加えた後）が決定される。これより、両脚の各関節角度を決定することができる。

このアルゴリズムを図 7 に示す。腰の 2 自由度機構によって、上体の姿勢に依らない腰のロール軸、ヨー軸の運動が可能となる。また必要があれば、足関節ヨー軸を含む片足 7 自由度の機構によって、膝の向きを変えることができる。

3.2 歩行パターン生成 2 足歩行ロボットが安定した動的な歩行を実現するためには、ZMP が立脚

Fig. 7 Generation of lower-limb motion pattern

の支持多角形内に存在するような歩行パターンが生成される必要がある。下肢の運動により発生する非補償モーメントは、腰の水平方向の運動によって補償することができる。この ZMP 安定判別規範に基づく歩行パターンは図 8 に示すアルゴリズムによって生成される。

- (1) 足先軌道、腰軌道が設定され、足先軌道に基づいて設定 ZMP 軌道が決定される。
- (2) 下肢および上体の運動によって発生する設定 ZMP におけるモーメントが計算される。
- (3) 線形化された 2 足歩行ロボットのモデルより、高速フーリエ変換・逆高速フーリエ変換を用いてモーメント補償軌道の近似解が求められる。
- (4) 求められた近似解を厳密モデルに代入し、設定 ZMP におけるモーメントをエラーモーメントとしてフィードバックし、下肢および上体の発生するモーメントに加え、再計算を行う。エラーモーメントが許容値以下であれば、歩行パターンとして出力する。

本アルゴリズムの詳細については参考文献²³⁾⁴⁾を参照されたい。

4. シミュレーション

4.1 シミュレーションモデルの質量配置 著者らは現在、前述の下肢機構を持つ 2 足ヒューマノイドロボットを開発中であり、全長 1500mm、全重量 50 kg を設計仕様として掲げている。この仕様を基に図 9、表 1 に示すモデルが決定され、歩行シミュレーションが行われた。本研究においては、ヒューマノイドロボ

Fig. 8 Compensatory motion pattern generation

Fig. 9 Mass distribution

Table 1 Weight of members

Position	Weight kg	Position	Weight kg
M_R_FOOT	0.644	M_L_SHI	1.950
M_R_AK	1.846	M_L_THI	3.400
M_R_AKB	0.182	M_L_THB	0.196
M_R_SHI	1.930	M_L_TH	1.226
M_R_THI	3.380	M_PEL	2.095
M_R_THB	0.196	M_PUB	1.776
M_R_TH	1.228	M_TRK	10.300
M_L_FOOT	0.644	M_R_ARM	8.500
M_L_AK	1.844	M_L_ARM	8.500
M_L_AKB	0.182	TOTAL	50.019

ットのモデルは質点の集合として仮定している。また腰の水平方向運動のみによって下肢および上体の発生するモーメントを補償する方式を採っており、上体の姿勢は一定である。そのため、上体の質量配置は近似化されている。

4.2 生成された歩行パターンの比較 図 10 に従来の歩行パターンと、膝関節伸展型歩行パターンの比較を示す。これらは生成された歩行パターンの順運動学解をスティック線図として表示させたものであり、どちらも 5 歩、歩幅 0.3m、歩速 0.96/step、足上げ高さ 0.04m である。比較のため、従来の歩行シミュレーションは、膝関節伸展型と同じ最大膝関節角速度 (170deg/s) を持つように、腰高さ 0.52m 一定のもとで行われた。また、図 2 において、一般的な人間の立脚期はほぼ 0% から 60% と言われている。そこでこのグラフを式 (5) のように近似し、膝関節伸展型の立脚時膝関節パターン (θ_{k1}, θ_{k2}) としてこれを設定した。なお、伸展時を 0deg、屈曲時を -180deg としている。

$$\theta_{k1,k2} = -10 \left(1 + \sin \left(\frac{2\pi}{T} t \right) \right) \text{deg} \quad (5)$$

{T=Time of support phase (0.96s)}

また、図 11 に従来の歩行パターンと膝関節伸展型における 1 歩行周期中の膝関節と腰ロール軸の角度パターンを示す。これらは図 2 との比較のため、立脚期が時間軸の 10% から 60% になるようにプロットされている。従来の手法による膝関節角度パターンは、ほぼ -100deg から -60deg の間で生成されているが、伸展型はほぼ 40deg から 0deg の間で生成されていることが確認できる。これらの結果より、新しく提案された膝関節伸展型歩行パターンが、従来に比べて非常に人間により近いパターンとなっていると言える。

しかしながら、人間の観察結果と比べた場合、この新しい歩行パターンが人間の歩容とほぼ同様であるとはまだ言うことができない。最も大きな違いは、立脚期と遊脚期が入れ替わる時、グラフ上の 8.7sec において見ることができる。この時遊脚の膝部は、人間の場合屈曲しているのに対し、生成された歩行パターンでは伸展状態にある。

この違いは、足先軌道の生成方法が人間のそれと

(a) Current walking pattern

(b) Knee stretch walking pattern

Fig. 10 Comparison of two walking patterns

(a) Current pattern

(b) Knee stretch type patterns

Fig. 11 Simulation results

異なっているためと考えられる。本研究において、足先軌道は、足先の離地状態・接地状態・それらの中間点を、速度・加速度の連続性を考慮して、6次ないし7次関数によって補完することで生成されている。対して図3の足先軌道に着目してみると、人間の場合、踵接地・爪先離地を伴って、定常歩行を行っている。

また図12に膝関節伸展型歩行パターンの歩幅変更による比較を示す。1歩0.05mの場合、グラフの形状は人間のそれと非常に近いものになっているが、歩幅を伸ばすにつれて、遊脚期における膝伸展が発生してしまうことが分かる。人間の踵接地、爪先離地をどのように2足ヒューマノイドロボットに適用するかは今後の課題となるだろう。一方で、歩幅の増加に従い、腰部ロール軸は、遊脚の伸展位近傍でのパターン生成を助ける働きをしていることも確認できる。

Fig. 12 Knee and waist patterns with respect to step lengths

4.3 所要トルクの算出 適切なニュートン・オイラー法を用いることによって、生成されたパターンと2足ヒューマノイドの機械モデルより、各関節の所要トルクが算出できる。従来の歩行パターンと提案する膝関節伸展型パターンの、立脚期における膝関節所要トルクの算出結果を図13に示す。膝を曲げた状態で歩行を行う従来の歩行パターンに比べ、新しい歩容による膝関節にかかるトルクは、全域にわたってほぼ50%以下になっていることがよく分かる。

5. 結論と展望

人間の歩容に近い歩行パターンの実現を目指した新しい2足ヒューマノイドロボットの下肢機構として、足関節3自由度、膝関節1自由度、股関節3自由度、腰部2自由度をもつ機械モデルを提案した。また、立脚と遊脚で関節角度導出方法を切り替えること、立脚の膝関節角度を設定すること、遊脚の膝伸展時の特異点を腰のロール運動を用いて克服することを用いて、膝関節の伸展位を伴った歩行パターン生成方法を考案した。またこの歩行パターンがZMP安定判別規範の基で生成されることをソフトウェアシミュレーションで確認した。

Fig. 13 Comparison of torque

今後は提案した下肢機構を持つ実機を用いた実証実験を行う予定である。また、新たな足先軌道生成についても研究を行い、2足ヒューマノイドロボットのより人間に近い歩行運動を目指す。

謝辞

本研究は早稲田大学ヒューマノイド研究所のもとで行われ、本研究の一部は、NEDO (新エネルギー・産業技術総合開発機構)の援助を受けて行われました。ここに感謝の意を表します。また、本研究を進める過程で3次元CADを御提供頂いたソリッドワークス・ジャパン (株)、本研究のコンソーシアムへの参加企業に対しても感謝の意を表します。

参考文献

- (1) 高西淳夫, 石田昌巳, 山崎芳昭, 加藤一郎, “2足歩行ロボット WL-10RD による動歩行の実現” 日本ロボット学会誌, 日本ロボット学会, 3巻4号, pp67-78, 1985
- (2) 山口仁一, 高西淳夫, 加藤一郎, “上体運動により3軸モーメントを補償する2足歩行ロボットの開発”, 日本ロボット学会誌, 日本ロボット学会, vol. 11, pp581-586, 1993
- (3) J. Yamaguchi, E. Soga, S. Inoue, A. Takanishi, “Development of a Bipedal Humanoid Robot - Control Method of Whole Body Cooperative Dynamic Biped Walking,” Proc. IEEE Int. Conference on Robotics and Automation, pp. 368-374, 1999.
- (4) H. Lim, Y. Kaneshima, and A. Takanishi, “Online Walking Pattern Generation for Biped Humanoid with Trunk,” Proc. IEEE Int. Conference on Robotics and Automation, pp. 3111-3116, 2002.
- (5) Y. Ogura, Y. Sugahara, Y. Kaneshima, N. Hieda, H. Lim and A. Takanishi, “Interactive Biped Locomotion Based on Visual/Auditory Information,” Proc. IEEE Int. Workshop on Robot and Human Interactive Communication, pp. 253-258, 2002.
- (6) K. Hirai, M. Hirose, Y. Haikawa, and T. Takenaka, “The Development of Honda Humanoid Robot,” Proc. IEEE Int. Conference on Robotics and Automation, pp. 1321-1326, 1998.
- (7) Y. Sakagami, R. Watanabe, C. Aoyama, S. Matsunaga, N. Higaki and K. Fujimura, “The intelligent ASIMO: System overview and integration,” Proc. IEEE/RSJ Int. Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 2478-2483, 2002.
- (8) K. Kaneko, F. Kanehiro, S. Kajita, K. Yokoyama, K. Akachi, T. Kawasaki, S. Ota, and T. Isozumi, “Design of Prototype Humanoid Robotics Platform for HRP,” Proc. IEEE/RSJ Int. Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 2431-2436, 2002.
- (9) M. Vukobratovic and J. Stepanenko, “On The Stability of Anthropomorphic Systems,” Mathematical Biosciences Vol. 15, pp. 1-37, 1972.
- (10) P. E. Klopsteg, et. al. 荻島秀男 監訳, “人間の手足,” 医歯薬出版, 1975
- (11) 中村隆一, 斎藤宏, “基礎運動学 第4版,” 医歯薬出版, 1976
- (12) 吉田勲持, “構造医学の原理 (基礎編) - ヒトの直立と歩行から -,” エンタープライズ, 1991.