

# 提案書

このような大規模なシステムを従来の方法で操作するのは非常に困難である。例えば、膝を曲げたままの歩行が従来の二足歩行の方法であるが、これは人間と比べ16倍も非効率である[1]。また、その巨大なボディサイズのため、重カトルクがアクチュエータの物理的限界をすぐに超過してしまう。実際、膝を曲げる角度が増すに従い、下肢のアクチュエータにかかる実効トルクも大きくなる。こういった事由から、人間により近い動作が重要視されてくる。

しかし、人間らしい歩行の達成に使われる技術の大部分において、いまだ足首関節への多大な補償トルク、または、腰の動きや腕振り等の補償運動が要され、結果的に余分なエネルギー消費につながる。先行研究[2]において、腕振りは、四足歩行からの進化の名残ではなく、人間の歩行におけるエネルギー経済性にとって欠かせない要素であることが指摘されている。腕振り動作を伴わなくても、普通の方法での歩行の特性には影響を及ぼさない。人間らしい歩行を達成させるために腕振り運動を採用するのは、当事実に照らし合わせても、整合性に欠けているといえるかもしれない。

この点を考慮し、ヒューマノイドロボットの新タイプのメカニズムと適切な歩行プロセスフローを提案する[3] (付録を参照ください)。重心(CoG)の移行、もしくはトルクの補償により、ゼロモーメントポイント(ZMP)をサポートエリアへと移動させる従来の方法とは異なり、新たな方法では、バランス保持のために、サポートエリアをZMPの位置へ移行させる。それにより、上体が左右に動く距離の短縮、下肢のアクチュエータが要するトルクの低減、またZMP補償の重複作業の低減も可能になる。動画[4]では、ロボットの歩行はゆっくりではあるが、バランスが保たれた、人間の歩行時の特徴が見られる。

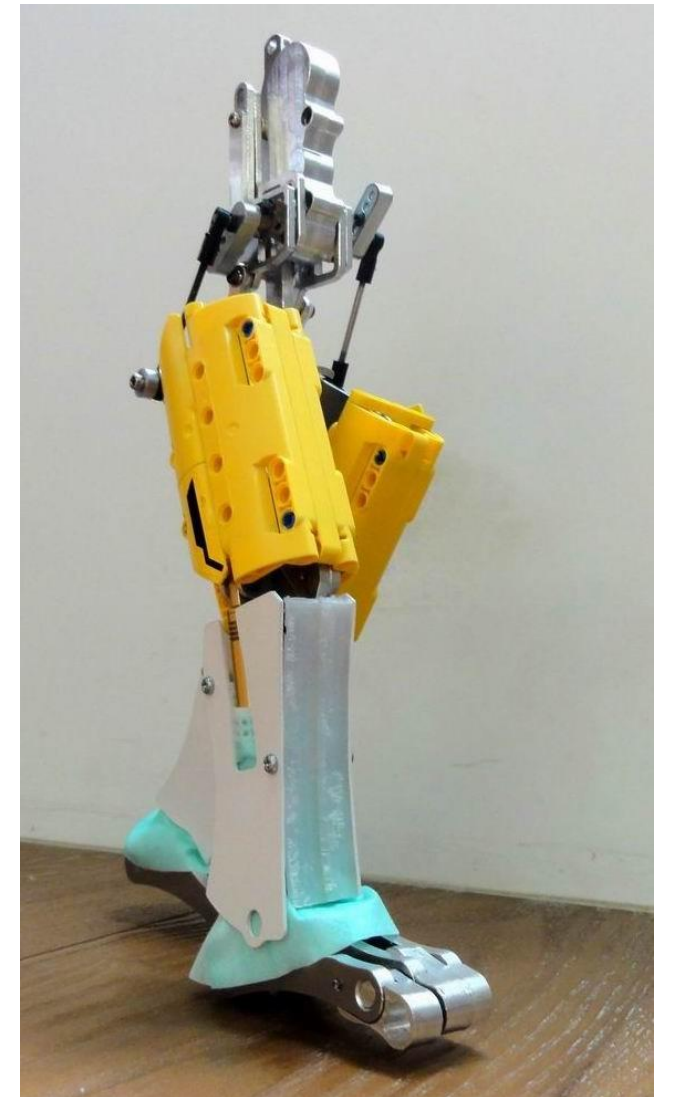


図1 自己調整メカニズムを有すロボットの試作品

しかし、上記技術だけでは、地面の状態が予期できないなかで、どれだけこの巨大ロボットが耐え得るかどうかの確証はまだ十分に得られない。地面の状態によっては、この身長18メートルのロボットを転倒させてしまう可能性も出てくる。したがって、成熟度の高い電子制御を考慮するだけでなく、第一歩目の足接地位置に対応するためにも、自己調整メカニズムを有す技術の使用が必要とされよう。自己調整メカニズムは開発段階にある(図1)。当メカニズムは現在、踵接地から爪先離地までの角度変化を自動処理できる能力を有す。さらに、より人間らしい動作に関する知識[3]もかなり成熟している。ガンダム・グローバル・チャレンジに、これら技術が採用されることを願っている。

## 参考文献

- [1] Collins S, Ruina A, Tedrake R and Wisse M, "Efficient bipedal robots based on passive-dynamic walkers," *Science*, vol. 307, no. 5712, pp. 1082-1085, 2005.
- [2] Steven H. Collins, Peter G. Adamczyk and Arthur D. Kuo, "Dynamic arm swinging in human walking," *Proceeding of the Royal of Society, Biological Sciences*, vol. 276, pp. 3679-3688, 2009.
- [3] Ming-Hsun Chiang, Fan-Ren Chang, "Anthropomorphic design of the human-like walking robot," *Journal of Bionic Engineering*, vol. 10, pp. 186–193, 2013.
- [4] <http://youtu.be/YGYM-oy7kls>

## 人間らしく歩行するロボットの擬人化設計

Ming-Hsun Chiang, Fan-Ren Chang

台湾国立大学電子工学学部(台湾、台北)10617

### 抄録

本稿では、ヒューマノイドロボットのメカニカル設計の新たなコンセプトを紹介する。膝を伸ばし、踵接地、爪先離地の特性を伴う、人間の歩行により適した新たな構造を用いたヒューマノイドロボットの構築を目的とする。人間の骨格からヒントを得てヒューマノイドロボット用に擬人化骨盤を作成した。従来のヒューマノイドロボットと比較し、当該擬人化骨盤を用いた当ロボットは、上体の重心を、骨盤傾斜運動により調節できることから、人間らしい歩行において、足首関節が要するトルクおよび速度変動を低減する。より詳細な足のメカニズム分析により、固定長の倒立振子を使って二足歩行の動力学が説明でき、それにより可変長の倒立振子システムにおける重複作業を回避させられるため、エネルギー節約にもつながる。今回提案する新たな構造により、ヒューマノイドロボットはより人間に近い歩行が可能になる。

**キーワード:** ヒューマノイドロボット、擬人化ロボット、メカニカル設計、人間らしく歩行する、踵接地、爪先離地

著作権©2013、吉林大学、Elsevier Limited and Science Press出版、無断複写・転載を禁じます。

doi: 10.1016/S16726529(13)60214-0

### 1. はじめに

ヒューマノイドロボットは、人間との高い相同性から、人間の日常生活における実用に適していることが多くの技術論文で指摘されている。今日、多くの研究グループにより、それぞれ独自のヒューマノイドロボット開発の技術が生み出されてきている。なかでもホンダのASIMO<sup>[1]</sup>は最も有名で、そこで使われている技術は、数々の研究グループから広く参照されている。床反力制御、目標ゼロモーメントポイント(ZMP)<sup>[2]</sup>制御、着地位置制御により、ASIMOは安定した歩行、走り、階段登り等が可能である。しかし、ASIMO固有の構造、特に、骨盤を欠いた構造では、人間らしい歩行は難しい。歩幅の大きい歩行、または早足歩行中、歩行スパンが、膝を伸ばした歩行で可能なスパンよりも大幅に長いことから、ASIMOの全般的な身長は低くなってしまふ。身長が低くなると、そもそもの目的であった、人間相手の活動には向かない。この点からも、ヒューマノイドボットが、人間のように、膝を伸ばして歩けることの重要性が強調されよう。膝を伸ばして歩行できるヒューマノイドロボットの開発において、早稲田大学のWABIAN-2R<sup>[3]</sup>、および産業技術総合研究所(AIST)のHRP-4C<sup>[4]</sup>が非常に優れた結果を得ている。この二つの例は、人間らしい歩行において、バランス保持のためには、2自由度(DOF)を有す腰部補償運動が不可欠であることを証明している。しかし、膝を伸ばしての歩行には、

バランスを保つために、足首関節<sup>[5]</sup>に大きなトルクがかかり、また急激な速度変化を要することから、エネルギー消費が増す。

関節への負担となる、急激な速度変化を低減するために、本研究では、骨盤傾斜の運動を行う擬人化骨盤を用いたが、早稲田大学のWABIAN-2R研究グループ<sup>[6]</sup>では、これは歩行において無益であると考えてきた。動作分析を元にして、骨盤傾斜の運動は、上体の重心(COG)を必要に応じて調整することで、人体やヒューマノイドロボットの歩行を助け、それによりZMPがサポートエリアにより容易に留まることができると我々は考えた。結果的に、加速を生じることでエネルギーを消費してしまうZMP制御への依存が低減できると考えた。速度変化が少なければ、消費エネルギーも低減されるからである。

従来型二足歩行ロボットの大半は、3次元倒立振子モデルに基づいており、振子の長さは可変かつ制御可能で、ロボットの重心の高さが一定の値となるようされている。しかし、人間の二足歩行は、一連の落下と回復の連続である。その違いは、後者においては、支持脚の長さ変化がごく僅かなため、エネルギー消費が少ないことである。

Corresponding author: looka330@gmail.com

E-mail: Ming-Hsun Chiang

人間の歩行を真似て、我々は、可変倒立振子の代わりに、固定長の倒立振子を使用し、二足歩行の動力学を説明する。小型ヒューマノイドロボットを製作し、本稿で上記アイデアを証明する。

### 2 設計コンセプト

今日、膝を伸ばした、踵接地、爪先離運動により、人間に近い歩行ができるヒューマノイドロボットはいくつか存在するが、それらはまだ、二足歩行を達成させるため、足首関節での多大なトルク補償、または、腰部の動き、腕振り等、いくつかの補正運動を必要としている。これら方法の大半が、速度の急速な変化<sup>[5]</sup>によりZMP補償を行っている。我々は、人体の骨格を理解することからヒントを得たヒューマノイドロボットの制作を目指している。人間により近い歩行ができるロボットを制作し、歩行中のトルク補償、または補償運動への依存を低減させることを目標とする。



図1. 擬人化骨盤を有すロボットの写真

表1. 本稿で使われるロボットの主要な仕様

| 重量および寸法 | 値        |
|---------|----------|
| 重量      | 3.5 (kg) |
| 身長      | 531 (mm) |
| 幅       | 288 (mm) |
| 奥行き     | 169 (mm) |

#### 2.1 メカニカル設計の概要

図1は、我々が本研究で開発したロボットである。素材の軽量さと剛性のため、ロボットの外骨格には、アルミ合金を基礎素材として使用した。表1には、当ロボットの主要な仕様が記載されている。表2は、当ロボットの自由度(DOF)配置である。地面に設置した、回転方向付き慣性座標系により、各関節の動作が示される。図2および表2で見られるよう、当ロボットは、骨盤に一つの3-DOF腰部、一つの3-DOF体幹部、一対の3-DOF股関節、5-DOF両脚、および5-DOF両腕を備えている。骨盤後方の3-DOF腰部関節は、ロール軸、ヨー軸、ピッチ軸から成る。これら3つの軸は互いに垂直であり、正中矢状面の線と交差して、股関節より高い位置にある。すなわち、下半身の前頭面が、上半身の前頭面の前にある。この特徴は、ロボットの歩行時に、軌道方向への補償の必要性を低減させる。さらに、ロボットの直立時、両膝間の距離は、二つの股関節間の距離よりも狭くなければならない。この特徴は、ロボットの歩行時、前頭面における補償の必要性を低減させる。現在あるロボットは、股関節の伸展可動域(ROM)が広いが、人間の股関節伸展ROMは15°<sup>[7]</sup>程度である。本稿のロボットは、当該科学的事実に沿って設計されている。

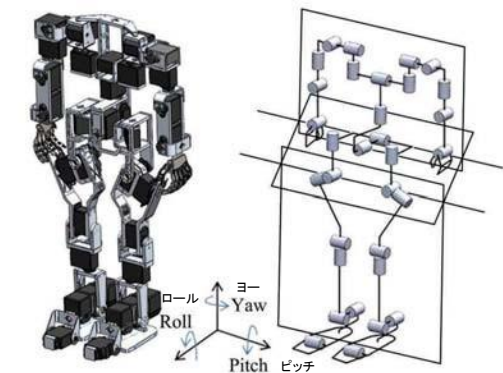


図2. 自由度(DOF)配置

表2. DOF割り当て

| 部位  | 合計 32 DOF        |
|-----|------------------|
| 腕   | 2腕 x 4 = 8 DOF   |
| 手   | 2手 x 1 = 2 DOF   |
| 体幹部 | 1体幹部 x 3 = 3 DOF |
| 腰部  | 1腰部 x 3 = 3 DOF  |
| 股関節 | 2股関節 x 3 = 6 DOF |
| 脚   | 2脚 x 5 = 10 DOF  |



2.2 骨盤の詳細

図3は、人間の骨盤の上面図および正面図である。この図に見られるように、寛骨臼は、骨盤の両側下前面で陥凹面になっている。大腿骨頭は寛骨臼で骨盤にはまり込み、股関節を形成している。仙腸関節は、骨盤の上方後部で腸骨と仙骨をつないでいる。

仙腸関節の運動は、前部骨盤の傾斜と、後部骨盤の傾斜を含む。脊椎の運動を考慮に入れると、人間は骨盤を、ヨー、ロール、ピッチの3方向に動かすことができる。骨盤のこれら関節の各相対的なポジションから、擬人化骨盤の断面図が図4のように

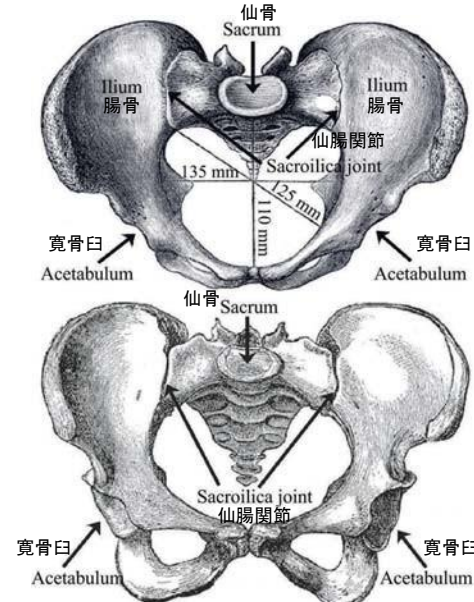


図3 人間の骨盤の上面図および正面図 (スケッチは参考文献[9]より引用)

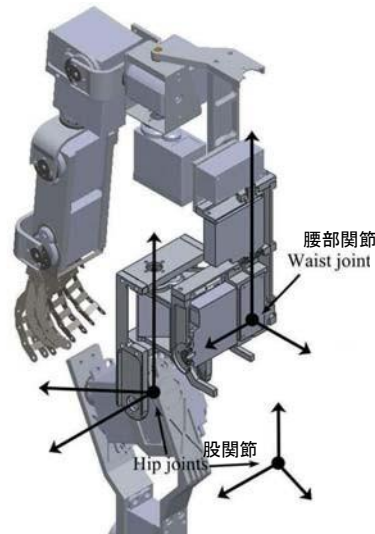


図4 擬人化骨盤の断面図

設計された、設計を簡略化するため、脊椎と仙腸関節の機能を3-DOF腰部関節に統合した。腰部関節は、両股関節の中間点の上方後部側面に位置している。このような擬人化骨盤を有するロボットの長所は、歩行の際、ZMPが支持足領域に容易に留まっていられるため、トルク補償への依存が低減できる点である。

3. 人間らしい歩行における骨盤の機能性

人間らしい歩行における骨盤の機能性を以下に述べる。

(1)レバーアームの形成: 図5aは、従来型ロボットが、片方の股関節を屈曲すると、持ち上げる脚には重力による落下トルクがかかる様子を示している。図5bは、擬人化骨盤を有するロボットを、支持脚の股関節が支柱となるテコに見立てた図である。上体が、持ち上げる脚に対する反トルクとして機能する。この設計により、片脚で体を支えるフェーズにおいては、従来型ロボットよりも安定したバランスが保持できる。

(2)上体のCOG位置が変えられるDOFの追加: 歩行ロボットが、両脚で立ちゼロ加速状態にあるとき、そのZMPは支持多角形領域内にあるが、足裏域からは出てしまう。このような状況は、人間らしい歩行において、ロボットが片脚支持状態への移行前に、ZMPを前足へ補償する際の主要な技術的課題となっている。従来型ロボット(図6a)と比較し、擬人化骨盤を有するロボットには、骨盤に傾斜を生じさせることで、上体の直立状態の保持を同時に可能とさせることで(図6b)、上体のCOGの位置を移動させられるようにDOFが追加的されている。ZMPの位置もそれに応じて変動することは承知している。

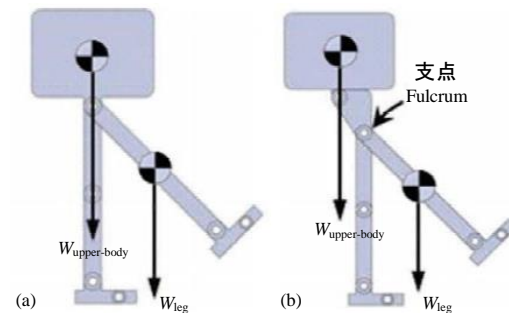


図5 片方の股関節の屈曲。(a)従来型ロボットの上げた脚にかかる重力が、落下トルクを生む;(b)擬人化骨盤により、上体の重量が、上げる足のカウンターウェイト(釣り合いおもり)となる。

歩行ロボットが、両脚支持状態にあるとき、従来型ロボットは、片側の股関節屈曲で歩行し、もう一方の股関節は伸展している。本研究のロボットは、両股関節の屈曲、前部骨盤の傾斜で歩行する。過去に、研究者たちが、前部骨盤傾斜の運動と走りの関連性に注目したことがある<sup>[9]</sup>。研究者たちはさらに、人間は走っているときでも、その股関節伸展柔軟性の平均は約17.4°程度であることも発見した。しかし、従来型ロボットの股関節伸展可能範囲は、人間のそれよりもかなり大きく設計されている。従来型歩行用ロボットが人間の機能とはかなりかけ離れて設計されていることが明らかである。人間および擬人化骨盤を有すロボットは、前部骨盤傾斜の運動と、爪先離地とを適正に用いることができるため、ZMPを前足に容易に移行させられる。従来型ロボットでは、トルク補償を使う方法でなければ、この動作が容易にはできない。歩行の際にロボットが必要とするより大きなトルク補償に伴い、エネルギーも多く消費される。

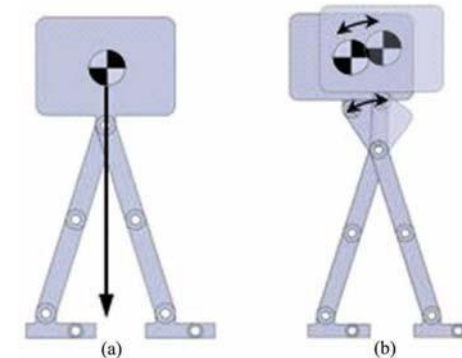


図6 両脚支持状態。(a)従来型ロボットの上体位置の変動は困難である;(b)擬人化骨盤を有すロボットには、上体位置を変動できるDOFが追加されている。

2.4 立位時の骨盤傾斜

人間のCOGは、臍よりも少し下<sup>[10]</sup>、仙骨の前方、第二仙椎あたりの高さにある。この事実に従い、当ロボットのCOGは立位時に、腰部関節の前方で腰部関節と同じ高さに来るように設計されている。擬人化骨盤を有すロボットの欠点は、直立時に、従来のロボットよりも後方に転倒しやすい点である(図7a)。しかし、この問題点は、図7bに示されるよう、前部骨盤傾斜の運動により容易に解決可能である。図7bのポジションは、立位時の骨盤傾斜(Standing Pelvic Tilt, SPT)と呼ばれ、人間のそれと同様である<sup>[11]</sup>。

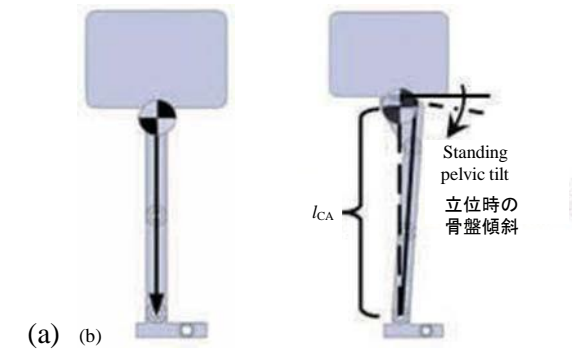


図7 立脚 (a)直立立位時におけるCOGの地面への投影点は、従来型ロボットの場合、足裏領域内にある;(b)擬人化骨盤を有すロボットの場合、DOGの投影点は、骨盤傾斜の動作により足裏領域内に留めることができる。

3 ロボットの歩行

二速歩行を表現するために用いる可変長運動は以下の方程式で表すことができる。

$$\begin{cases} ml^2\ddot{\theta} - mgl\sin\theta + 2ml\dot{\theta} = f \\ [m\ddot{l} + mg\cos\theta - ml\dot{\theta}^2 = f \end{cases} \quad (1)$$

ここでは、 $m$ はロボットの質量、 $l$ はCOGから圧力中心(Center Of Pressure, COP)までの距離、 $g$ は重力による加速、 $f$ は床反力、 $\theta$ は均衡位置と振り子との間の角度、 $\tau$ は支点軸にかかるトルクをそれぞれ表す。さらに、足首関節と足指関節との間の垂直距離に関するより詳細な分析を行えば、可変長倒立振り子の問題は、固定長倒立振り子の問題に置き換えられるようになろう。歩行パターンはCOPの切り替えに基づいている<sup>[12]</sup>。一步のサイクルを成し遂げるために、ロボットは4つのステージを経る。そのすべてのステージにおけるCOGの初期ポジションは、回復ステージを除き、比較的高い位置にある。詳細は以下に述べる。簡略化するため、下述する状況は、ゼロ加速の状況下にあることとする。

第1ステージでは、図8aに示されるよう、遊脚を持ち上げる。遊脚の重さは、COGが足指ピッチ軸の上を越えるまでの間、ロボットを前傾させるトルクを生じさせる。ピッチ方向足首関節が支点軸となり、 $l_{CA}$ (COGから足首関節)は振り子の長さである。当ステージにおけるCOGの高さは、

$$l_{CC} = l_{CA}(1 - \cos\theta_1) \quad (2)$$

で求められる数値分低くなる。このステージにおけるスイング角度は



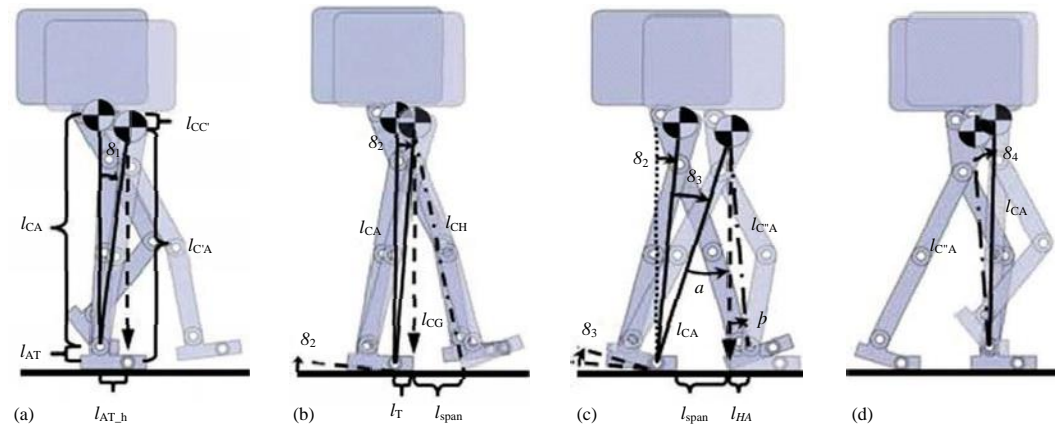


図8 (a)スイング脚の持ち上げステージ; (b)爪先離地・踵接地ステージ; (c)爪先離地・足裏全体着地ステージ; (d)回復ステージ(薄い色の部分は、各ステージの終わり、および次のステージの始まりを表す)

$$\theta_1 = \sin^{-1} \left[ \frac{l_{AT\_h}}{l_{CA}} \right] \quad (3)$$

で表され、ここでの  $l_{AT\_h}$  は足首関節と足指関節の間の平行距離である。第2ステージは、図8bにあるように、爪先離地と、踵接地である。このステージにおける支点軸は足指関節へと移行する。足首関節と足指関節との間の垂直距離  $l_{AT}$  が、 $l_{CC}$  と等しくなるよう設計された場合、このステージでの振子の長さは、 $l_{CA}$  と等しくなる。支持足首関節のピッチ角度は、 $\delta_1$  で固定される。ロボットは、支持足指関節のピッチ軸を回転させ、それによりCOGが下がり続ける。この動作はCOGが支持脚の爪先先端上を越えるまで続き、遊脚の踵接地が同時に起こらなければならない。このステージにおける倒立振子スイングの角度は、支持足指関節の回転角度と等しく、

$$\theta_2 = \sin^{-1} \left[ \frac{l_T}{l_{CA}} \right] \quad (4)$$

で表される。ここでの  $l_T$  は、足指の長さを表す。接地点からCOGまでの距離は

$$l_{CH} = \sqrt{l_{span}^2 + l_{CG}^2} \quad (5)$$

に等しく、ここでの  $l_{span}$  はスパン長、 $l_{CG}$  はCOGから地面までの垂直距離である。第3ステージは、図8cに示されるように、支持脚の交代である。このステージでの支点軸は後脚の足指関節と、もう一つは前脚の踵接地点である。爪先離地の動作は、前足全体が接地するまで続く。

このステージにおける倒立振子スイングの角度である  $\delta_3$  は、当ステージにおいては、支持足指関節の回転角度に等しい。この瞬間、COGの地面への投影点は、前脚足裏の範囲内になければならず、

$$l_{CA} \sin(\theta_2 + \theta_3) > l_T + l_{span} \quad (6)$$

で表される。したがって、

$$\theta_3 > \sin^{-1} \left[ \frac{l_T + l_{span}}{l_{CA}} \right] - \theta_2 \quad (7)$$

となり、 $a$  は  $\delta_2 + \delta_3$  と等しく、 $b$  は

$$J < \tan^{-1} \left[ \frac{l_{HA}}{l_{CA} \cos(\theta_2 + \theta_3) - l_{AT}} \right] \quad (8)$$

で表され、ここでの  $l_{HA}$  は、踵と足首関節との間の平行距離である。前脚の足首関節からCOGまでの長さは、

$$l_{CA'} = [l_{CA} \cos(\theta_2 + \theta_3) - l_{AT}] \sec(J) \quad (9)$$

で示される。第4ステージは、図8dで示されるように、回復である。後脚が上がりスイングが始まる。前脚の長さ、 $l_{CA'}$  は  $l_{CA}$  へと伸長される。回転角度  $\delta_4$  は、

$$\theta_4 = \sin^{-1} \left[ \frac{l_{HA}}{l_{CA'}} \right] \quad (10)$$

で表すことができる。支持脚により、COGは高い位置に押し上げられる。一歩は、以上の4段階により構成される。ステージ1,2,3,4、が、他方の脚で、5,6,7,8というように繰り返されることで、歩行のサイクルが完成する。

#### 4 考察

倒立振子の長さを定数化することで、動力学方程式の微分項である  $l$  は消える。数式(1)は以下のように帰着される。

$$\begin{cases} ml^2 \ddot{\theta} - mgl \sin \theta = f \\ [mg \cos \theta - ml \dot{\theta}^2 = f \end{cases} \quad (11)$$

方程式(1)と比較して、方程式(11)では、固定長倒立振子においては、必要となるトルクが少なくなることがわかる。一定補償エネルギー制御<sup>[13]</sup>の観点から、すべての歩行サイクルに投入するエネルギーは

$$E_{in} = \int f l_{span} dt \quad (12)$$

で表され、ここでの  $f$  は、後脚の倒立振子支持軸に沿った、地面を蹴る力を示す。方程式(11)および(12)により、固定倒立振子が要するエネルギーは少なくて済むことが示されている。また、第1から第3ステージにかけて、固定倒立振子は、可変長システムよりも要するエネルギーが少ないことがわかり、

$$\int f l dt, \quad (13)$$

として知られている。ここでの  $F$  は、倒立振子の回転支点軸に沿ったエネルギーを表し、 $l$  は支持脚の実際の長さを表す。第3節での原理によれば、一つの歩行サイクルにおける各関節の角度には、正の値が与えられる。本稿では、各ステージにかかる時間は一秒に設定する。各関節角度の情報は一秒ずつ与えられている。MATLABの関数近似を用いて、データセットの概算値を求めた。骨盤と股関節における角度の変化は、それぞれ図9と図10に示されている。従来型ロボットでは、股関節の屈曲・伸展角度は通常、脚のスイング角度として与えられているが、骨盤の傾斜は脚のスイング角度に影響を及ぼす。実際には脚のスイング角度は、股関節の屈曲(図10)から、骨盤の傾斜角度(図9)を差し引いた角度で

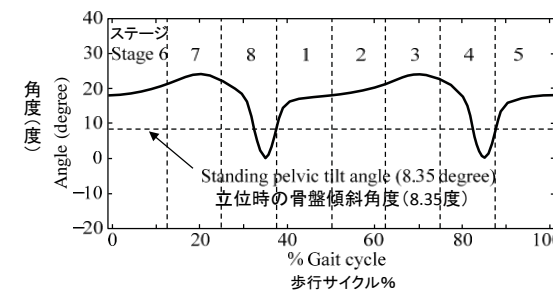


図9 歩行1サイクルにおける矢状面でのロボットの骨盤傾斜

あり、その数値が図11に示されている。図11の曲線に類似する曲線は、歩行研究分野<sup>[14-17]</sup>における多くの技術的出版物でよく見かける。図12は、歩行サイクル<sup>[17]</sup>における人間の股関節の角度である。

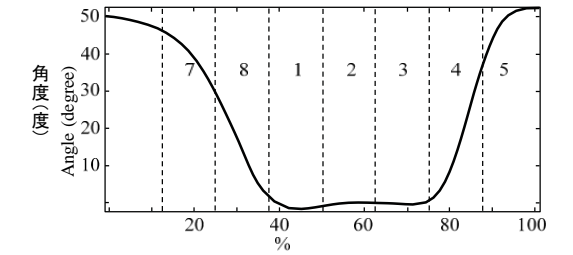


図10 歩行1サイクルにおけるロボットの股関節屈曲

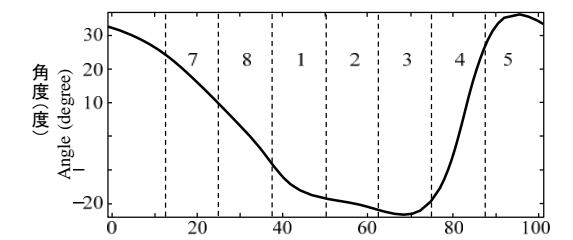


図11 歩行1サイクルにおける矢状面でのロボットの脚の動き

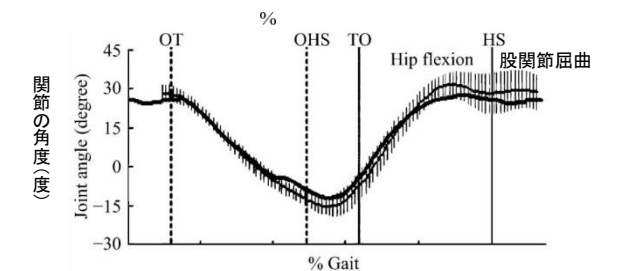


図12 歩行1サイクルにおける人間の股関節の角度<sup>[17]</sup>

#### 5 運動ギャラリー

図13は、我々のロボットが、ピッチ(骨盤傾斜)、ロール(骨盤傾斜)、ヨー(骨盤旋回)を含めた、いくつかの骨盤の運動を見せるため、簡単なダンスをしている図である。

図14は、本ロボットがどのように一連の歩行サイクルをこなすかを図示している。この歩行状況では、COGの地面への投影点をZMPとしている。すなわち、ロボットは、上述ステージにおいて、トルク補償をまったく使わず、歩行スパンを継続するのである。この図から、ロボットが、人間らしい膝を伸ばした、爪先離地、踵接地の動作が可能であることがわかる。

図15は、踵接地と爪先離地を最大限の角度で操作した様子である。図14と図15から、爪先離地と踵接地とが重複する時間があることが見て取れる。



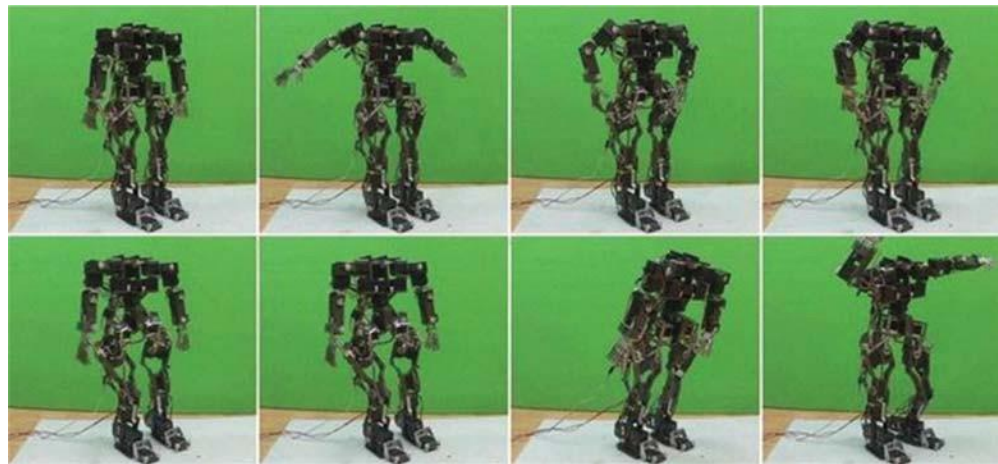


図13 簡単なダンスの動作

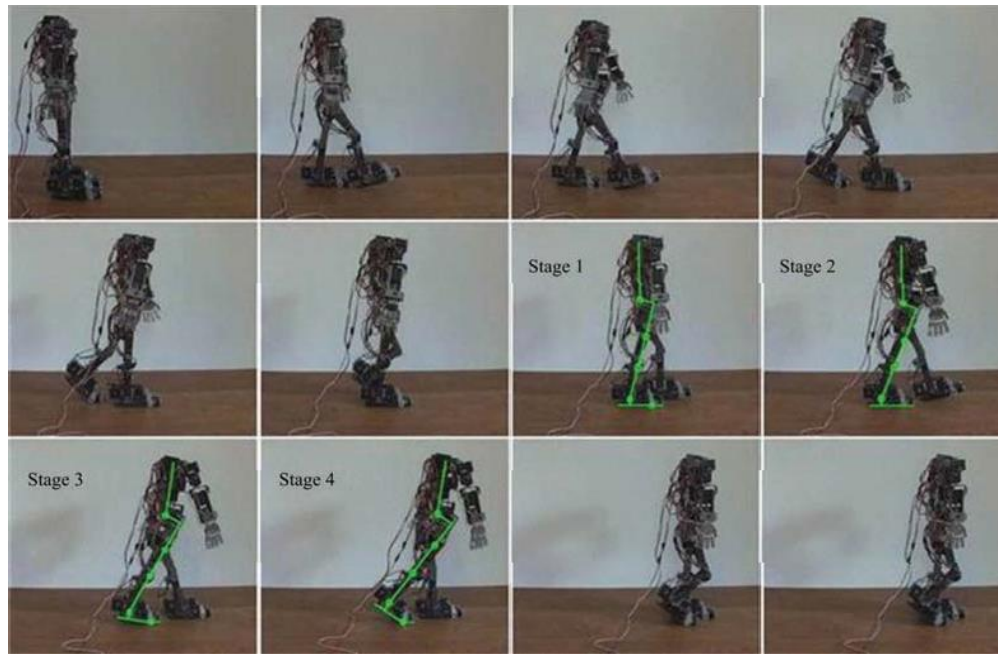


図14 通常歩行の動作

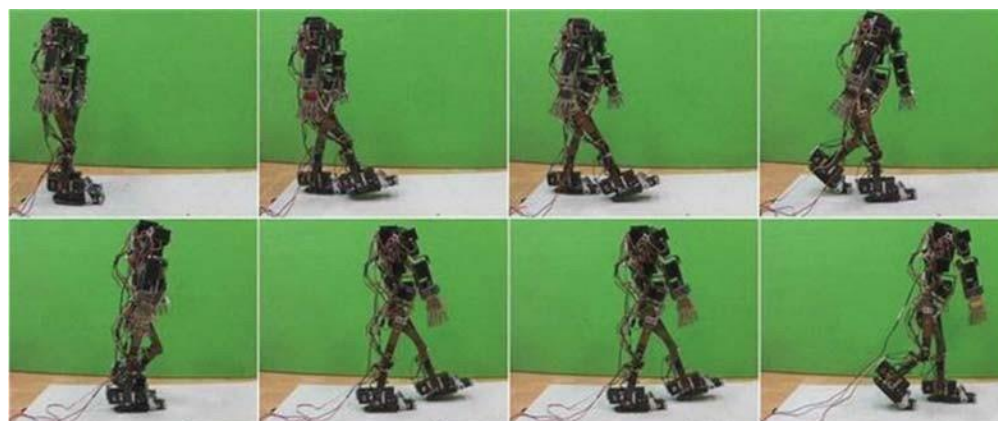


図15 ほぼ限界の角度での踵接地・爪先離地による歩行動作

## 6 まとめ

従来型ロボットに関しては、両脚と片脚支持との間に起こる急激なサポートエリアの変化から、歩行中、ロボットが後脚を持ち上げる前に、ZMPを前脚へ補償できるようにすることが、人間らしい歩行達成における主要な技術的問題のひとつとなっている。人体骨格にヒントを得て、擬人化骨盤および矢状面での骨盤傾斜の動作を、ヒューマノイドロボットの設計とその歩行に際し考慮すべきであると考えられる。擬人化骨盤に固有な構造により、片脚を上げた時でもZMPを容易にサポートエリア内に保持できる。また、擬人化骨盤は、その傾斜にDOFを与えることにより、軌道方向に沿ったZMPの変動ができる。そのため、ZMPが支持足裏の領域に容易に留まることができ、ZMP補償に要する重複作業が低減できる。上記コンセプトを統合することで、本稿におけるロボットは、膝を伸ばした、爪先離地、踵接地の特徴を備えた人間らしい歩行が可能となった。それに加え、省エネの点でも優れている。さらに、従来型ロボットと比較して、ZMP制御が容易になる。ZMP補償に関する開発は現在、成熟期を迎えており、我々が提案するコンセプトにより、ロボットの間人らしい歩行は新たな局面を迎えるであろうと確信している。

## 参考文献

- [1] Hirai K, Hirose M, Haikawa Y, Takenaka T. The development of Honda humanoid robot. *Proceeding of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Leuven, Belgium, 1998, 1321–1326.
- [2] Vukobratovic M, Brovac B, Surla D, Stokic D. *Biped Locomotion: Dynamics, Stability, Control and Application*, Springer-Verlag, New York, USA, 1990.
- [3] Ogura Y, Shimomura K, Kondo H, Morishima A, Okudo T, Momoki S, Lim H, Takanishi A. Human-like walking with knee stretched, heel-contact and toe-off motion by a humanoid robot. *Proceeding of the 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robot and Systems (IROS)*, Beijing, China, 2006, 3976–3981.
- [4] Kaneko K, Kanehiro F, Morisawa M, Miura K, Nakaoka S, Kajita S. Cybernetic Human HRP-4C. *Proceeding of the 2009 IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, Paris, France, 2009, 7–14.
- [5] Omer A, Ghorbani R, Lim H, Takanishi A. Semi-passive dynamic walking for humanoid robot using controllable spring stiffness on the ankle joint. *Proceedings of the 2009 4th International Conference on Autonomous Robots and Agents*, Wellington, New Zealand, 2009, 681–685.
- [6] Kondo H, Ogura Y, Shimomura K, Momoki S, Okubo T, Lim H, Takanishi A. Emulation of human walking by biped humanoid robot with heel-contact and toe-off motion. *Journal of Robotics and Mechatronics*, 2008, **20**, 739–749.
- [7] Lee H M, Moroz A. Physical Therapy, [2013-03], [http://www.merckmanuals.com/professional/special\\_subjects/rehabilitation/physical\\_therapy\\_pt.html](http://www.merckmanuals.com/professional/special_subjects/rehabilitation/physical_therapy_pt.html)
- [8] Gray H. The Pelvis, [2013-03], <http://www.bartleby.com/107/58.html>
- [9] Schache A G, Blanch P D, Murphy A T. Relation of anterior pelvic tilt during running to clinical and kinematic measures of hip extension. *British Journal of Sports Medicine*, 2000, **34**, 279–283.
- [10] Elert G. Center of Mass of a Human, [2013-03], <http://hypertextbook.com/facts/2006/centerofmass.shtml>
- [11] Gajdosik R, Simpson R, Smith R, DonTigny R L. Pelvic tilt. Intratester reliability of measuring the standing position and range of motion. *Journal of the American Physical Therapy Association*, 1985, **65**, 169–174.
- [12] Lou X, Li W, Zhu C. Planning and control of COP-switch-based planar biped walking. *Journal of Bionic Engineering*, 2011, **8**, 33–48.
- [13] Lou X, Guo R, Zhu C. An orbit based control for biomimetic biped walking. *Proceeding of IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, Guilin, China, 2009, 19–23.
- [14] Lou X, Xu W. Planning and control for passive dynamics based walking of 3D biped robots. *Journal of Bionic Engineering*, 2012, **9**, 143–155.
- [15] Xiang Y, Arora J S, Abdel-Malek K. Optimization-based prediction of asymmetric human gait. *Journal of Biomechanics*, 2011, **44**, 683–693.
- [16] Lister S J, Jones N B, Spurgeon S K, Scott J J A. Simulation of human gait and associated muscle activation strategies using sliding-mode control techniques. *Journal of Simulation Modeling Practice and Theory*, 2006, **14**, 586–596.
- [17] Fernandez J W, Pandy M G. Integrating modeling and experiments to assess dynamic musculoskeletal function in humans. *Experimental Physiology*, 2006, **91**, 371–382.