

# 受動歩行からヒューマノイドロボット歩行に向けて

(大阪大学工学研究科) 荻野 正樹, 春名 正樹, 俵 和史  
細田 耕, 浅田 稔

## 1 はじめに

従来の二足歩行を実現するためのアプローチでは, ZMP (Zero Moment Point) を規範として関節角, 関節角速度の目標軌道を生成し, それに追従させるというアプローチが典型的であった<sup>5)</sup>. Honda のヒューマノイドロボット<sup>4)</sup> は, そのアプローチの一つの完成型であると考えられている. しかし, Honda のロボットの歩行は非常にロバストであるが, 一方で身体の持つ動特性をいかしきれていないという指摘もされている<sup>10)</sup>.

最近, 従来手法と対極のアプローチとして, 身体構造の動特性を利用した歩行を実現するという観点から受動歩行が注目されている. 受動歩行とは, 単純な構造のロボットが緩い傾斜のついた坂をアクチュエータなしに下りていく歩行形態である (McGeer<sup>6)</sup>). 受動歩行が特徴的であるのは, 入力トルクを必要とせずにロボット自身の動力学特性のみを利用しているというエネルギー的な側面の他に, 二足歩行が力学的に安定な状態であることを示したことにある. Garcia ら<sup>3)</sup> は 2次元シミュレーション上で簡単な 2リンクモデルを使い, 坂の傾斜角度を変化させることにより, 安定な歩行から 2周期の歩行, カオス的な歩行, 不安定な歩行へと移行することを示した. また, 大須賀ら<sup>9)</sup> は実ロボットにおいても, 同様の現象が現れることを示している.

受動歩行の中には動学的に安定な状態が存在することから, 受動歩行が可能なロボットに少しの制御と小さい入力トルクを加えることにより, 二足歩行が簡単に実現されることが期待される. 最近では受動歩行ロボットに単純な制御を加えることにより, 平地で歩かせる試みも始まっている. 浅野ら<sup>1)</sup> はロボットが坂にあるときに重力から受ける力と同じ力がリンクにかかるように, 各関節に仮想重力としてトルクを加え, 平地での歩行を実現している. また, 小野ら<sup>8)</sup> は, 膝

関節の屈曲角度に比例したトルクを股関節に加えることにより安定な歩行形態が現れることを示している.

しかし, これらの研究で用いられたモデルは脚だけ, すなわち下半身だけからなるものであり, 上半身を持ったロボットにおいて受動歩行がどのように応用できるかについての研究はまだ行われていない. そこで本研究では, 最も単純な受動歩行モデルに上半身をつけ加えた場合に, 与える制御をできるだけ簡単にして歩行を実現することを試みた. また, そのときに加えるトルクを最小限に抑えるために, ロボットの身体構造のパラメータを変化させ, トルクに与える影響を調べた.

以下, 2章では本研究で用いたロボットのモデルと, 上半身を支持するための制御について述べる. 3章では2章で導入した制御則のもとで, 上体の姿勢, 床との衝突の粘弾性, 脚底の形状, 関節受動抵抗などを変化させた場合の, 上半身の維持に必要なトルクの変化について述べる.

## 2 上半身を持つ受動歩行ロボット

### 2.1 歩行ロボットモデル

受動歩行のもっとも単純なモデルは膝なしの脚 2本からなる 2リンク構造である. 本研究ではこのモデルを拡張し, 上半身として腰部に 1リンクを加えた 3リンクからなるモデルを考え, 運動は 2次元平面内に制限した (図 1). モデルのリンクの長さ, 質量の設定を表 1 に示す. なお, 以下のシミュレーションでは, 力学計算は Articulated Body Method 法<sup>2)</sup> によって行い, 床はバネ・ダンパーモデルによって近似した. シミュレーションの時間刻み幅は 0.2 [msec] とした. また, 遊脚と支持脚がすれ違うときの遊脚と地面との衝突は無視した.

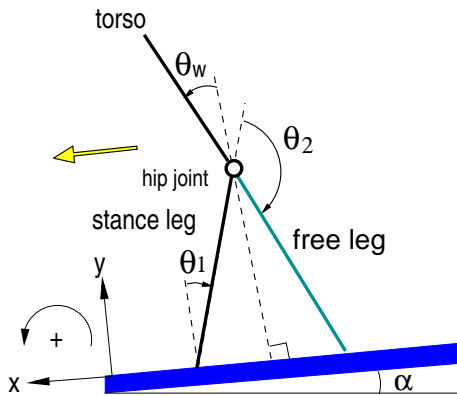


図 1: 上体を持った受動歩行モデル

表 1: モデルのパラメータ

パラメータ	記号	値
脚の長さ [m]	$l_f = 2r_f$	0.6
脚の幅 [m]	-	0.03
脚の質量 [kg]	$m_f$	1.0
上体の長さ [m]	$l_b = 2r_b$	0.5
上体の幅 [m]	-	0.08
上体の質量 [kg]	$m_b$	3.0

## 2.2 上半身を支持するためのトルクの導入

脚だけからなる受動歩行ロボットは、各リンクに適切な初期条件（角度，角速度）を与えれば緩い坂を安定に歩行することができる。しかし、図1のモデルで上半身の重心を様々に変化させて安定に歩くような初期条件の全探索を行ったところ、重心位置が腰部よりも高い場所にあるときには安定な歩行が可能となる初期値を発見することはできなかった。そこで、簡単な制御を加えることによって安定な歩行を実現し、必要となるトルクをできるだけ小さくするための方策を探ることにした。

上半身を支持するために、以下のような簡単な PD 制御によるトルクを支持脚と上体の間に加えた。

$$\tau = -k_v \dot{\theta}_w + k(\theta_{wd} - \theta_w) \quad (1)$$

ここで、 $k_v, k$  は制御ゲインであり、 $\theta_{wd}$  は  $\theta_w$  の目標値である。また、支持脚は遊脚が地面に衝突した瞬間に入れ替えることにしている。

## 2.3 安定な歩行への収束

この制御則の下でロボットに適当な初期条件を与えると、ロボットは受動歩行と同様の歩行を行う。受動歩行には、ロボットの構造を適切に決めてやれば、それに対して初期条件によらず一つの安定な歩行へ収束する<sup>3)</sup> という特徴があるが、本研究で用いたモデルも安定な収束点を持つ。

図2に様々な初期値を与えたときの歩行の収束の様子を示す。グラフの横軸，縦軸はそれぞれ1脚支持期から2脚支持期になった瞬間の遊脚，支持脚の角速度を示している。

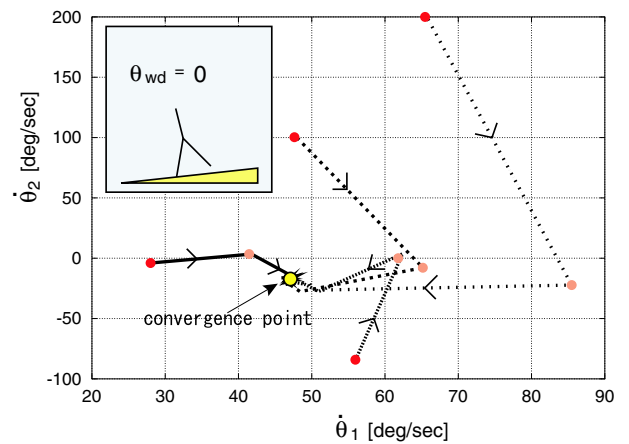


図 2: 安定な歩行周期への収束

## 3 身体特性を変化させることによる上体支持トルクの抑制

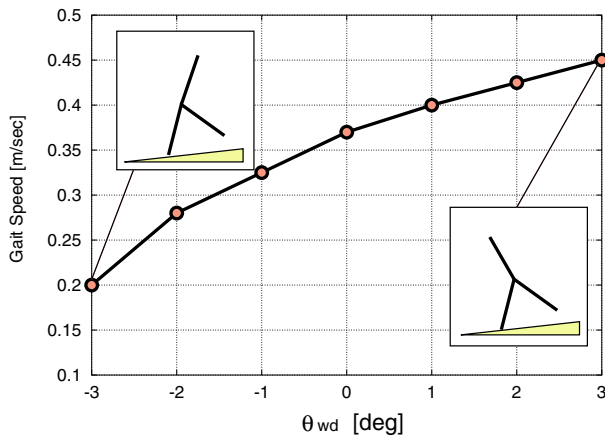
前章で導入した上体支持トルクをできるだけ抑制することができれば、実際にロボットに適用する場合にもエネルギー的に効率のよい歩行を実現する上で有用である。以下では(1)上半身の姿勢，(2)脚底の粘弾性定数，(3)脚底の形状，(4)関節受動抵抗，の4つの身体の構造パラメータを変化させ、その受動歩行，上体支持トルクへの影響を調べた。

### 3.1 上体の姿勢

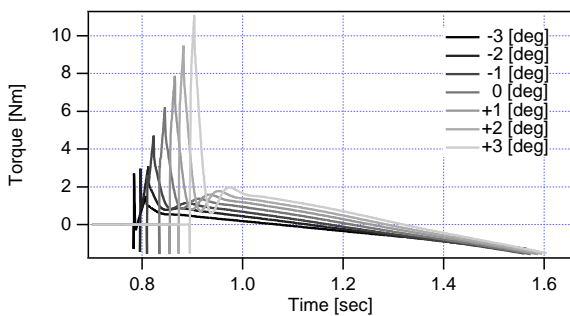
受動歩行は全身の力学的な特性に依存するため、上半身の姿勢に応じて異なる安定歩行状態に収束する。それにともない、上体支持トルクがどのように影響を

受けるかを調べた．計算機による実験では，式 (1) の制御則で  $\theta_{wd}$  を  $-3$  [deg] から  $+3$  [deg] まで変化させ， $\theta_{wd}$  の値ごとに安定な歩行が可能となるリンクの角速度の初期値を探索した．なお，床の傾斜角度は  $1$  [deg] としている．

図 3 に上体の姿勢を変化させたときの歩行の変化を示す．図 3 (a) は，上半身の姿勢と安定な歩行速度の関係を示している．図に示されるように，前傾姿勢では歩行速度が速くなり，逆に後傾姿勢では歩行速度は遅くなった．図 3 (b) にそれぞれの姿勢における一歩行間の上体支持トルクの時間推移を示す．後傾姿勢になるほど上体支持トルクが小さく抑えられている．これは歩行速度が遅くなり床衝突時の腰部加速度の  $y$  方向の変化が小さくなったためであると考えられる．



(a) 歩行速度



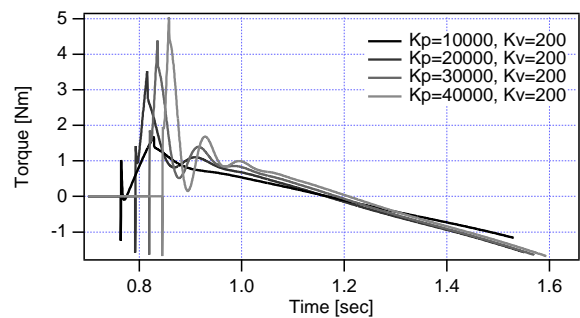
(b) 上体支持トルク

図 3: 上体の姿勢と歩行速度・上体支持トルクの変化

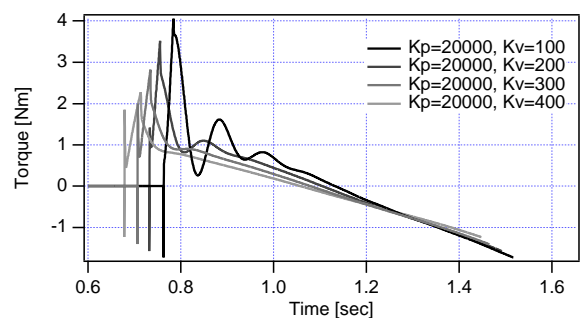
### 3.2 脚底の粘弾性定数

上体支持トルクの時間プロファイルを見てみると，床との衝突時のトルクが非常に大きいことが観察される．これは遊脚と地面との衝突によって大きな加速度が発生する腰部に上半身を追従させるため，大きなトルクを必要とするためであると考えられる．この加速度の変化をできるだけ小さくするために床との接触モデルの弾性定数，粘性定数を変化させて上体支持トルクへの影響を調べた．

計算機実験では，床の弾性定数，粘性定数のそれぞれ一方を固定してもう一方の変数を変化させ，それぞれの粘性定数，弾性定数の組に対して歩行が可能となる初期値の探索を行った．なお，床の傾斜角度は  $1$  [deg] とし，式 (1) の制御則の  $\theta_{wd}$  は  $-1$  [deg] としている．



(a) 弾性定数による影響



(b) 粘性定数による影響

図 4: 床の弾性定数，粘性定数を変化させたときの歩行間の上体支持トルクの変化

図 4 に様々な弾性定数，粘性定数の組における一歩行間の上体支持トルク時間推移を示す．弾性定数が小さく，粘性定数が大きい衝突条件の方が，衝突時の上体

支持トルクを小さく抑えられていることがわかる．一方で，衝突時以外では上体支持トルクは弾性定数，粘性定数の変化をほとんど受けていないことがわかる．実際に実機を製作するときには，足裏に衝撃吸収材を貼るなどして衝突時の衝撃を和らげることが上体支持トルクを抑えることに有効であることが示唆される．

### 3.3 足底の形状

歩行時の腰部  $x$  方向の加速度を抑えるためには，歩行時に  $x$  方向に何らかのブレーキがかかることが必要である（考察参照）．脚底の形状によって支持脚の受ける床反力の方向が変わり，腰部の加速度が変化することが期待される．そのようなことを期待して足底を円弧にし，その半径を様々に変化させて歩行への影響を調べた．

計算機実験では，円弧は 100 点からなる点集合として近似し，それぞれの点について床との衝突条件を考えることで床との接地を実現した．円弧の長さは 0.16[m] で固定とし，その条件の下で円弧の半径を 0[m] から 1.2 [m] まで変化させた．床の傾斜角度は 1[deg] とし，式 (1) の制御則の  $\theta_{wd}$  は -1[deg] としている．

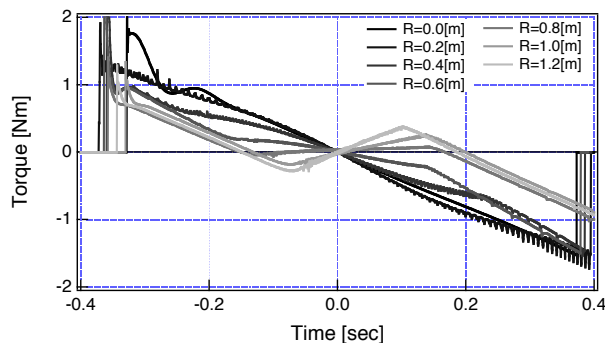


図 5: 足底を円弧にしたことによる上体支持トルクの変化

結果を図 5 に示す．ただし，横軸にはトルクが 0 となる時間を基準とした時間をとっている．図に示すように足底の円弧の半径が大きくなるにしたがい，上体支持トルクが小さく抑えられている．

### 3.4 関節受動抵抗

ヒトでは腱などの関節受動抵抗受動が歩行に重要な役割を果たしていることが指摘されている．歩行ロボットでも，2 章で導入した上体支持トルクもバネを利用

することで抑えることができる可能性がある．そこで，3.3 節のロボットモデルの関節に線形なバネ成分を導入することによる歩行，上体支持トルクへの影響について調べた．

足底に円弧（半径 0.8[m]）がついたモデルにおいて，上半身と脚の間に次のような弾性モーメントを発生する線形受動抵抗を取り付けた．

$$\tau = -k_p\theta \quad (2)$$

ここで， $k_p$  は弾性係数であり， $\theta$  は上半身と脚がなす角度（脚と上半身が一直線上にある時を基準とする）である．このとき， $k_p$  を 0 [N/rad] から 6 [N/rad] まで変化させ，それぞれの  $k_p$  で歩行が可能となる初期角速度の探索を行った．

図 6 に歩行周期，歩行速度の変化を示す．弾性係数が大きくなればなるほど，歩行の速度は上がり，また歩行周期は短くなっていた．

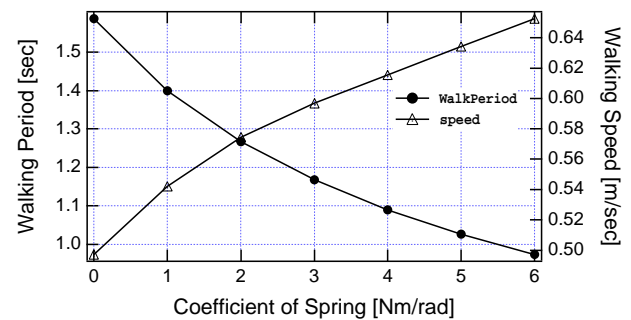


図 6: 受動抵抗による歩行周期，歩行速度への影響

図 7 に上体支持トルクの変化を示す．受動抵抗成分を持たないモデルと比較すると，受動抵抗成分が大きくなるにつれて衝突時の衝撃による上体支持トルクが小さくなっている一方，衝突以外での上体トルクは逆に増加している傾向があることがわかる．

## 4 考察

3 章の結果から，上体支持トルクを抑えるためには，上半身を後傾姿勢にし，床との衝突を柔らかくし，適切な曲率の脚底を取り付ければよいという結果が得られた．これらの傾向についての定性的な理解を得るための解析を 4.1 節，4.2 節で述べる．また，ヒトにおける関節受動抵抗の役割との比較を 4.3 節で述べる．

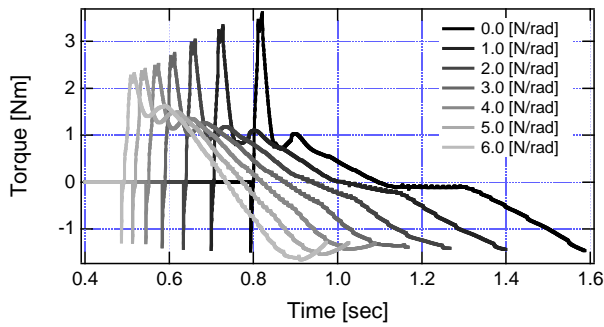


図 7: 線形バネを取り付けた場合の上体支持トルクへの影響

#### 4.1 上体支持トルクと腰部の加速度の関係

上体支持トルク  $\tau_w$  は腰回りに発生する回転モーメントを補償しているが、この回転モーメント  $M_b$  は慣性力  $-m_b a_h$  と重力項  $m_b g$  からなる。すなわち、

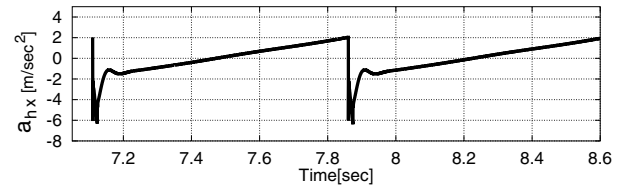
$$M_b = r_b \times (-m_b a_h + m_b g), \quad (3)$$

ここで、 $a_h$  は腰部の加速度、 $r_b$  は腰部から上半身の重心までのベクトルである。他のパラメータは表 1 に示した通りである。式 (3) は以下のように展開できる。

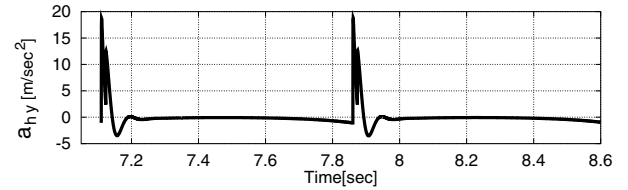
$$M_b = -m_b r_b \{ \cos \theta_w (a_{hx} + g \sin \alpha) - \sin \theta_w (a_{hy} - g \cos \alpha) \}, \quad (4)$$

ここで、 $a_{hx}$ ,  $a_{hy}$  は腰部の加速度の  $x$  成分、 $y$  成分であり、 $\alpha$  は坂の傾斜角である。図 8 に 2 歩行間の腰部の加速度の  $x$ ,  $y$  方向成分と上体支持トルクをそれぞれ示す。図より衝突時には加速度の  $y$  方向の成分が  $x$  方向の成分に比べて非常に大きく、それ以外のときは  $y$  方向の成分は、 $x$  方向の成分に比べて非常に小さくなっていることがわかる。このことと式 (3) から、 $M_b$  は、衝突時には  $a_{hy}$  によって、それ以外の時は  $a_{hx}$  に依存することが推測される。すなわち、上体支持トルクは衝突時には腰部の  $y$  方向の加速度によって、それ以外の時は腰部の  $x$  方向の加速度によって決まっているといえる。

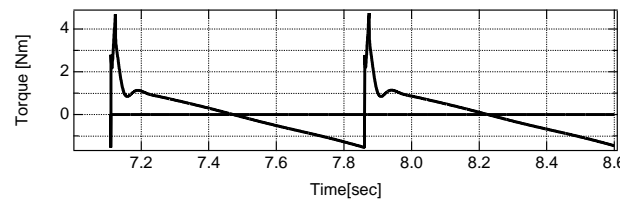
以上の解析は実験結果をよく説明できる。例えば、図 3 (b) の結果を見ると、パラメータの変化によって、衝突時の上体支持トルクのみが大きく変化しており、衝突時以外の上体支持トルクはほとんど変化していない。これは変化させたパラメータが衝突時の衝撃の強さ、すなわちロボットの腰部加速度の  $y$  方向成分に大きな影響を持つが、衝突時以外の腰部の加速度には影響しないためである。



(a) 腰部の  $x$  方向の加速度



(b) 腰部の  $y$  方向の加速度



(c) 上体支持トルク

図 8: 腰部の加速度と上体支持トルク

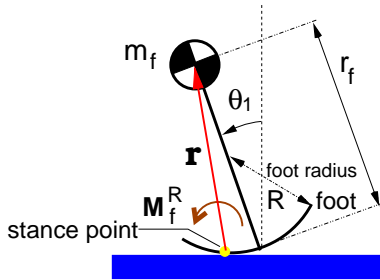
#### 4.2 倒立振り子モデルと受動歩行

3.3 節の実験では脚底の形状を変化させることで上体支持トルクの時間変化が大きく変化する結果が得られた。この結果は図 9(a) のように支持脚を倒立振り子としてモデル化することで説明することができる。このモデルの接地点周りの角運動量  $M_f^R$  は以下のように計算できる。

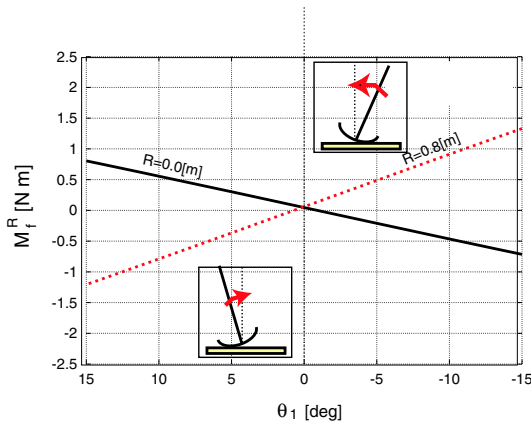
$$\begin{aligned} M_f^R(R, \theta_1) &= r(R, \theta_1) \times m_f g \\ &= m_f g \sin \theta_1 (r_f - R), \end{aligned} \quad (5)$$

ここで、 $r$  は接地点からモデルの重心までのベクトルであり、 $r_f$  は振り子の長さ、 $R$  は足底の半径である。この式が示すように、角運動量は足底の半径  $R$  とモデルの傾き角度  $\theta_1$  の関数となっている。 $R$  が  $r_f$  よりも大きいときには、 $\theta_1$  が負であれば接地点周りの角運動量は反時計回りの向きとなり、正であれば時計回りの向きとなる。そのため、角運動量はモデルの傾き  $\theta_1$  が

0 となるようにはたらくことになる．図 9(b) に  $R$  が 0.0[m] と 0.8[m] のときの  $\theta_1$  と  $M_f^R$  の関係を示す．



(a) 倒立振り子モデル



(b) 倒立振り子モデルにはたらくモーメント

図 9: 支持脚の倒立振り子モデル

このように足底の円弧の半径が倒立振り子の重心半径よりも大きい場合には振り子が鉛直方向にあるときに安定点となるため，支持脚が鉛直方向を通り過ぎるときに歩行にブレーキがかかり，腰部の加速度が小さく抑えられる．前節の考察から，上体支持トルクは腰部の加速度と正の相関があるので，適切な円弧の半径を選べば上体支持トルクも小さく抑えられる．3.3 節の実験結果 (図 5) では，円弧の半径が 0.8[m] のときに腰支持トルクがほぼ 0 に抑えられていることがわかる．

### 4.3 関節受動抵抗と受動歩行

ヒトの歩行においては，腱などの関節受動抵抗が重要な役割を持っていることが指摘されている．山崎<sup>13)</sup>は剛体特性と関節抵抗によって決まる振り運動の周期が，生物の歩行のそれと一致することを示し，提案す

る多重振り子モデルによって，ヒト歩行の解析だけではなく，絶滅動物の歩行の復元も行っている．また，青木ら<sup>11)</sup>は死体から測定したデータをもとに，ヒトの各関節の関節受動抵抗の特性をモデル化し，さらに受動歩行を利用することによって歩行における関節受動抵抗の役割についての考察を行っている．これらの研究を通して，関節受動抵抗は関節可動域の制限を行い，脚の剛体特性にあった歩行運動を発生させることによって歩行を効率化していることが示されている．

腱などの弾性要素は，主に，

- 関節の可動域を狭めることによって，歩行の周期を決定する．
- 筋と協調的に働くことによりエネルギー的に有利な状態を形成する．

という二つの点で歩行などの運動の効率化に役立っていると考えられている．今回の結果では，本研究で用いたロボットモデルにおいても，関節受動抵抗が歩行周期を決定する重要な要因であることが明らかとなった．しかし，上半身支持トルクの出力についてはむしろ関節受動抵抗によって増加するという結果が得られ，二つ目の役割については明らかとはならなかった．これについては以下のような理由が考えられる．

東京大学の久保らはヒト歩行中の腓腹筋の筋線維と腱の長さを測定し，脚の接地直後に筋と腱の複合体全体は伸張しているにもかかわらず，筋線維の長さはほとんど変化していないことを報告している<sup>12)</sup>．筋は等尺性収縮時に最大トルクを出す性質を持つため，出力エネルギーを腱の弾性エネルギーとして蓄えることで，効率よく筋の特性を利用していると考えられている．今回の探索では，モータはどのような角速度においても任意のトルクを発生できると仮定したために 2 番目の性質が現れなかった可能性がある．モータの出力トルクに角速度依存の制限を加えることで関節受動抵抗の二つ目の利点が現れるかもしれない．

## 5 まとめ

本研究では，受動歩行からヒューマノイドロボットの歩行への一段階として，二次元シミュレータ上で簡単なモデルを用いて上半身を持つロボットにおける受動歩行の可能性を考察した．その結果，アクチュエーターの入力なしに上半身を支持することはできないものの，単純なフィードバック制御則を導入することによって上半身をもつロボットでも受動歩行様の歩行が

可能であることを示した。さらに，上半身の姿勢，足底の硬さ，足底の形状などの構造パラメータを工夫することによって，入力すべき上体支持トルクを小さく抑えられる可能性を示した。

## 参考文献

- [1] Asano, F. Yamakita, M. and Furuta, K.: "Virtual passive dynamic walking and energy-based control laws", In Proceedings of the 2000 IEEE/RSJ int. conf. on Intelligent Robots and Systems, pp. 1149-1154, 2000.
- [2] Featherstone, R.: "The calculation of robot dynamics using articulated-body inertias", The International Journal of Robotics Research, vol. 2, no. 1, pp. 13-30, 1983.
- [3] M. Garcia, Chatterjee, A. Ruina, A. and Coleman, M.: "The simplest walking model: stability, complexity, and scaling", Journal of Biomechanical Engineering, Vol. 120, pp. 281-288, April 1998.
- [4] Honda: "Honda humanoid robot specifications", Honda Worldwide Site at <http://world.honda.com/robot>, 2000.
- [5] Li, Q. Takanishi, A. and Kato, I.: "Learning control of compensative trunk motion for biped walking robot based on zmp stability criterion", In Proceedings of the 1992 IEEE/RSJ int. conf. on Intelligent Robots and Systems, pp. 597-603, 1992.
- [6] McGeer, T.: "Passive walking with knees", 1990 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, 3, Cincinnati, pp.1640-1645, 1990.
- [7] McMahon, T. A.: "Muscles, Reflexes, and Locomotion", Princeton University Press, Princeton, New Jersey, pp. 192-198, 1984.
- [8] Ono, K. Takahashi, R. Imadu, A. and Shimada, T.: "Self-excitation control for biped walking mechanism", In Proceedings of the 2000 IEEE/RSJ int. conf. on Intelligent Robots and Systems, pp. 1149-1154, 2000.
- [9] Osuka, K. and Kirihara, K.: "Development and control of new legged robot quartet III - from active walking to passive walking-", In Proceedings of the 2000 IEEE/RSJ int. conf. on Intelligent Robots and Systems, pp. 991-995, 2000.
- [10] Pratt, J.: "Exploiting Inherent Robustness and Natural Dynamics in the Control of Bipedal Walking Robots." PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology, Department of Computer Science, 1999.
- [11] 青木, 山崎: "直立2足歩行における関節受動抵抗の意義", バイオメカニズム 14, 東京大学出版会, pp. 59-65, 1998.
- [12] 久保, 川上, 福永: "ヒト歩行中の筋繊維動態", 第16回バイオメカニズムシンポジウム 前刷, バイオメカニズム学会, pp235-242, 1999.
- [13] 山崎: "身体運動のシミュレーション", バイオメカニクス数値シミュレーション, 日本機会学会編, コロナ社, pp. 190-228, 1999.

---

### 連絡先

〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1

大阪大学大学院工学研究科

知能機能創成工学専攻

荻野 正樹

E-mail: [ogino@er.ams.eng.osaka-u.ac.jp](mailto:ogino@er.ams.eng.osaka-u.ac.jp)

Tel: 06-6877-5111 内線 3381

FAX: 06-6879-7348