ヒューマノイドのための走行パターンの生成

長崎 高 巳^{*1} 梶 田 秀 司^{*2} 横 井 一 仁^{*2}
金 子 健 二^{*2} 比留川 博 久^{*2} 谷 江 和 雄^{*2}

Running Pattern Generation for a Humanoid Robot

Takashi Nagasaki^{*1}, Shuuji Kajita^{*2}, Kazuhito Yokoi^{*2}, Kenji Kaneko^{*2},
Hirohisa Hirukawa^{*2} and Kazuo Tanie^{*2}

We propose a method of running pattern generation for a humanoid robot using the dynamics of a simple inverted pendulum. A dynamic simulation using a model of an actual humanoid robot shows that the robot can perform running by applying a generated pattern with slight modifications. From the simulation we evaluate the required performance of actuators for a real running robot.

Key Words: Running Robot, Humanoid Robot

1. 緒 言

ヒューマノイドロボットは多くの関心を集めている研究課題であり、複数の研究プロジェクトが進行中である [5] [8] [9] [13]. これらは主要な課題として、2足歩行に焦点を当てており、すでに再現性のある動的2足歩行が実現されている。このような多くの成功例を見ると、走るヒューマノイドを実現できるのではないかという疑問が自然と湧いてくるのではないだろうか。

走行とは歩行と同様に前方へ移動する運動であるが、移動速度の違いだけでなく、歩行では片足もしくは両足が常に地面に接して上体を支持するのに対して、走行では足が地面から離れて上体が宙に浮いた期間（滞空期）があること、上体の支持が常に片脚で行われること（接地期）が異なっている。ヒューマノイドに走行させることができれば、移動速度の向上、滞空期を利用して障害物や地面の窪みを飛び越えるような新たな移動手法の獲得などが期待される。

走行ロボットについては、これまでも様々な研究が行われている。なかでも Raibert のグループは、1~4脚、二次元、三次元走行と幅広く研究を行った [10] [11]. 彼らのロボットは、全体の質量に対して脚の質量が小さくなるような設計となっており、「質量を持つ上体とバネの特性を持つ無質量脚」という単純なモデルでロボットの特性を近似することを可能とした（多脚

についても仮想的な脚を考えることで同様なモデルに帰着している）。そのモデルをもとに、着地位置を制御する制御則で走行を実現した。Ahmadi と Buehler はエネルギー効率の点から1脚の走行について研究している [1]. また玄らはバネを備えた受動関節を持った走行ロボット「Kenken」を開発した [6].

一方、池田らはロボットの低次元モデルを前提としない Raibert と異なる方式の走行を提案した [7]. 走行動作を特徴量と名付けた重心位置、重心周りの角運動量、足首周りの角運動量の値を制御することで得る方式である。池田らはすでにこの制御方式を用いて二次元走行を実現しており、三次元走行への拡張と、恐竜型のロボットへの適用に取り組んでいる。

ヒューマノイドを走行させる取り組みは、近年いくつかのグループで行われようになった。このうち Gienger らは、歩行することに加えてジョギング（滞空距離が短い走行を意味する）することもできるヒューマノイドを目的として「Johnnie」を製作した [3]. 彼らは人間の歩行や走行を遊脚・着地・支持・つま先立ち・離床に分解し、それぞれのフェーズごとに重心や遊脚の足首関節などの代表点について軌道を用意し、フィードバック線形化をもとにしたコントローラによって走行動作を実現する手法を提案している。また出村らは、「賢聖ちゃん2号」の開発を進めている [2].

我々の研究も走行可能なヒューマノイドの実現を目指すものであるが、従来研究とは異なるアプローチをとる。すなわち、従来研究が走行できるロボットの開発に主眼をおいているのに対して、実在のヒューマノイドロボットを出発点として、これに走行を行わせるための制御方法を検討するのである。実在するロボットとして「人間協調・共存型ロボットシステム研究プロジェクト (HRP)」[8] において研究プラットフォームとして用いら

原稿受付 2002年5月9日

^{*1}筑波大学大学院

^{*2}産業技術総合研究所

^{*1}Graduate School of Systems and Information Engineering, University of Tsukuba

^{*2}National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

Fig. 1 Humanoid robot HRP-1 and running simulation

れている「HRP-1」(Fig. 1)を対象とする。HRP-1は走行用に設計されたものではないので、関節は位置制御を基本としバネ等の受動要素も含まない。さらに、人間と協調したり、人間の代役として様々な作業をする必要上、上半身に多くの自由度を持ち分布的な質量構成となっている。近い将来に開発されるヒューマノイドロボットもその多くがこのような特性を持つと考えられる。

本研究では走行専用のロボットを開発するのではなく、ヒューマノイドロボットの機能拡張として走行をとらえる。そこで、与えられたハードウェアをそのまま用いて走行を実現するための関節運動パターンを作り出す方法について考察する。さらに、得られたパターンを用いた動力学シミュレーションによって、走行に必要なパワーや関節速度を定量的に算出し、要求されるハードウェア特性を見極める。以上が本論文の目的である。

以下では、第2章で位置制御される無質量脚の倒立振子のダイナミクスをもとにした走行パターン生成法を、第3章では分布質量系に対応させるためのパターンの修正法を示した後、HRP-1が走行する際に求められる具体的な性能を算出する。第4章では前章の結果をもとに走行に必要なパワーについて基本的な考察を行う。

2. 倒立振子モデルに基づく走行パターン

初めに、ヒューマノイドを単一質量の倒立振子とみなして、走行パターンを計画する。以下ではロボットから見て前方を x 軸、左方を y 軸、上方を z 軸とする右手座標系を採用する。

2.1 跳躍の実現

質量 m と脚長 l が可変な脚を持つロボットを考える (Fig. 2)。ここでは l を正弦波で変化させる。

$$l = l_0 + \alpha \sin \omega t \quad (1)$$

l_0, α, ω は中立の脚長、正弦波の振幅、角速度である。

このロボットを床に立て置いたとき、足が床と接している間はロボットは床反力 F_z を受ける。

$$F_z = m(\ddot{l} + g) = m(-\alpha\omega^2 \sin \omega t + g) \quad (2)$$

g は重力加速度である。 $\alpha\omega^2 > g$ であると、式 (2) より求められる F_z はある点で負となる (Fig. 3 下の破線)。ロボットは

Fig. 2 A model for take off

Fig. 3 Lift off sequence

Fig. 4 Two leg model

床に接着されていないので、 F_z が負となるとロボットは床から離れ、空中に飛び出す (Fig. 2(b), Fig. 3 上の太線)。離陸後ロボットの重心は自由落下運動する。Fig. 3 で定義する離陸時間 ϕ_A 、離陸する瞬間の速度 $\dot{z}_A$ は次のように求められる。

$$\phi_A = (1/\omega) \sin^{-1}(g/\alpha\omega^2) \quad (3)$$

$$\dot{z}_A = \alpha\omega \cos \omega\phi_A = \sqrt{(\alpha\omega)^2 - (g/\omega)^2} \quad (4)$$

2.2 連続した跳躍運動

2脚であるヒューマノイドに定常な跳躍運動を行わせるため、2脚の倒立振子モデルを考える (Fig. 4)。

Fig. 5 に生成した跳躍運動パターンの半サイクルを示す。質量 m は A で離陸、B で着地、A' で再び離陸する (太線)。右脚の脚長 l_R は、S-A-C-C'-B' (破線)。左脚の脚長 l_L は、D-B-A'-D' (細線) と変化させる。A で離陸するよう S-C では、 l_R を式 (1) と同様に、

$$l_R = l_0 + \alpha \sin \omega t \quad (5)$$

とする。着地は離陸点 A と同じ高さの B にすれば、滞空時間

Fig. 5 Continuous hopping pattern

T_{flight} は,

$$T_{flight} = 2\dot{z}_A/g \quad (6)$$

である。着地の前後では、質量 m の速度と加速度を連続的に変化させて、なめらかな着地を行いたい。このために左脚の脚長 l_L を、 $D-B-A'-D'$ で、

$$l_L = l_0 + \alpha \sin \omega(t - \phi_{delay}) \quad (7)$$

$$\phi_{delay} \equiv T_{flight} - 2\left(\frac{\pi}{2\omega} - \phi_A\right) \quad (8)$$

のように変化させる。着地点 B からは、質量 m は左脚に支持され、 A' で離陸する。よって接地時間 $T_{support}$ は、

$$T_{support} = (\pi/\omega) + 2\phi_A \quad (9)$$

となる。同様にして $C'-B'$ においては、 l_R を、

$$l_R = l_0 + \alpha \sin \omega(t - 2\phi_{delay}) \quad (10)$$

$$\phi_{delay} \equiv T_{flight} - 2\left(\frac{\pi}{2\omega} - \phi_A\right) \quad (11)$$

のように変化させる。左脚支持の間 ($B-A'$)、右足は地面と衝突してはならないので、 $C-C'$ では、 l_R を適当な関数で補完する。

接地時間 $T_{support}$ 、滞空時間 T_{flight} は、 α 、 ω のみで定まる。実際に軌道を生成する場合は、希望する接地時間、滞空時間を与え、式 (3)、(4)、(6)、(9) を用いて数値計算を行い、 α 、 ω を求める。

2.3 Sagittal, Lateral面の運動

進行方向の運動についても、倒立振り子モデルに基づいて計画する。Fig. 6 は *Sagittal-plane* における倒立振り子を表したものである。接地期においてはロボットは床反力を受けるが、それによる転倒モーメント τ_y は、 $\tau_y = 0$ となるのが望ましい。この条件より床反力と重心位置との関係が導かれる。

$$\frac{F_x}{F_z} = \frac{x}{z} \quad (12)$$

z 、 F_z は跳躍運動の軌道で決まるので、式 (1)、(2) を用いて、接地期における進行方向の運動方程式は、

$$\ddot{x} = \frac{1}{m} F_x \quad (13)$$

$$= \frac{-\alpha\omega^2 \sin \omega t + g}{l_0 + \alpha \sin \omega t} x \quad (14)$$

Fig. 6 Horizontal balance

Fig. 7 Horizontal motion

ただし、 $\frac{\pi}{\omega} - \phi_A < t < \frac{2\pi}{\omega} + \phi_A$ 。

Fig. 7 は連続する二つの接地期を含む *Sagittal-plane* における倒立振り子の運動を示したものである。式 (14) から、接地期の進行方向の運動は、初期条件 (着地時の状態) で決定されることが分かる。そこで初期条件のうち容易に変更が可能な着地距離 x_i を用いて、走行速度の制御を行うこととする。このために、Raibert のフィードバック則 [11] を用い、式 (15) により着地距離を制御することとした。

$$x'_i = -\frac{\dot{x}_f T_{support}}{2} - k_x(\dot{x}_f - \dot{x}_d) \quad (15)$$

ここで、 $\dot{x}_d$ は目標速度。 k_x はフィードバックゲインである。

フィードバックゲイン k_x は以下のように定める。式 (14) を積分すれば、接地期の初期状態 ($x_i, \dot{x}_i$) と最終状態 ($x_f, \dot{x}_f$) の関係が次式のように求まる。

$$x_f = \Phi(x_i, \dot{x}_i, T_{support}) \quad (16)$$

$$\dot{x}_f = \dot{\Phi}(x_i, \dot{x}_i, T_{support}) \quad (17)$$

しかし式 (14) を解析的に積分するのは困難であるので、目標速度付近で線形化できるとして、定常状態との差で表現する、

$$\begin{pmatrix} \Delta x_f \\ \Delta \dot{x}_f \end{pmatrix} = J_\Phi \begin{pmatrix} \Delta x_i \\ \Delta \dot{x}_i \end{pmatrix} \quad (18)$$

ここで、

$$J_\Phi \equiv \begin{pmatrix} \Delta\Phi/\Delta x_i & \Delta\Phi/\Delta \dot{x}_i \\ \Delta\dot{\Phi}/\Delta x_i & \Delta\dot{\Phi}/\Delta \dot{x}_i \end{pmatrix} \quad (19)$$

は、数値計算で求める。接地期の最終状態と次の接地期の初期状態の関係は、

$$\begin{pmatrix} \Delta x'_i \\ \Delta \dot{x}'_i \end{pmatrix} = K \begin{pmatrix} \Delta x_f \\ \Delta \dot{x}_f \end{pmatrix} \quad (20)$$

$$K \equiv \begin{pmatrix} 0 & -T_{support}/2 - k_{\dot{x}} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (21)$$

である。ここでは、前述の式 (15) と、滞空期に水平速度が変化しないことを用いた。

式 (18), (20) から、一步ごとの状態変位は、

$$\begin{pmatrix} \Delta x'_i \\ \Delta \dot{x}'_i \end{pmatrix} = K J_{\Phi} \begin{pmatrix} \Delta x_i \\ \Delta \dot{x}_i \end{pmatrix} \quad (22)$$

で表せる。離散系のシステム安定条件から、

$$|\lambda| < 1, \quad \det(\lambda I - K J_{\Phi}) = 0 \quad (23)$$

を満たす必要がある。フィードバックゲイン $k_{\dot{x}}$ は、式 (23) を満たせばよい。

Lateral-plane の運動についても、同様に求める。

3. ヒューマノイドロボットへの適用

3.1 シミュレーション条件

生成した走行パターンを用いて、走行シミュレーションを行う。実在のヒューマノイドとして HRP-1 を対象とし、それと等価なパラメータを用いる。HRP-1 は、身長 160 [cm]、胴の幅 60 [cm]、バッテリーを含む重量が 117 [kg] で、両脚で 12 自由度、両腕で 16 自由度、頭と両手にそれぞれ 1 自由度を持つ。

動力学シミュレータは、HRP で開発された OpenHRP を用いた [4]。ロボットのデータには、ヒューマノイドの動力学パラメータとリンクの形状に加えてサーボモータのロータの慣性の効果も含まれる。なお、ロボットの足裏と床との衝突は完全塑性衝突とする。シミュレーションにおいてロボット全体の重心はロボット内に固定されるとみなした。倒立振子の質点をロボットの腰関節に、倒立振子の足先をロボットの足首関節に割り当てると、ロボットは Fig. 7 のように倒立振子と同じ動きとなる。ロボットの各関節は PD 制御されるので、関節角度および関節角速度を逆運動学を解いて求め目標値とする。

$$\tau = k_p(\theta_d - \theta) + k_v(\dot{\theta}_d - \dot{\theta}), \quad (24)$$

ここで、 $(\theta_d, \dot{\theta}_d)$ 逆運動学を解いて得られる関節の目標値、 $(\theta, \dot{\theta})$ は実際の関節の状態、 (k_p, k_v) はフィードバックゲインである。

3.2 走行パターンの修正

目標速度を 3.3 [m/s] (11.9 [km/h]) とする走行パターンを作成した。パラメータの詳細は Table 1 に示す。

実際にこのパターンを用いてシミュレーションを行うと、走行速度とは無関係に、1 回の着地について 2 回地面と足裏が衝突 (重心高さと同脚長が一致) する現象が起こった (Fig. 8)。この原因は、走行パターンが単一質点の倒立振子を想定して作られているのに対して、ヒューマノイドのモデルは多関節の剛体であり、その差が無視できないことによると考えられる。このため走行パターンが想定している高さまで跳躍できず、早めに着地してしまう。この着地についても足裏と床面が完全塑性衝突となっているので、その後の運動は式 (2) に従う。着地のタイミングが早まったことで式 (2) で求められる床反力 F_z が

Table 1 Simulated running pattern

$\dot{x}_d$	3.3 m/s
$T_{support}$	0.18 s
T_{flight}	0.12 s
l_0	0.654 m
ω	24.2 rad/s
α	0.0296 m
$k_{\dot{x}}$	0.24 m/(m/s)

Fig. 8 Unexpected touchdown

Fig. 9 Modified hopping pattern

$F_z < 0$ となり、ロボットが再び宙に浮いて、2 度目の衝突が起こる。

希望の着地を得るには、

- 希望するタイミングで着地するように、着地時刻の脚長を調整する。
- 着地のあとに再び上体が浮かないように、床反力 F_z が $F_z > 0$ となる条件を考慮して元の軌道に戻す。

というように軌道の修正を行えばよい。具体的には Fig. 5 を Fig. 9 のように C-H において l_R を、

$$l_R = l_0 + \sum_{n=0}^5 \gamma_n t^n \quad (25)$$

とする。式 (25) の五次式の係数 γ_n は、Fig. 9 の C, H で位置、速度が連続となること、F, G での脚長を適切に与えることで求める。もとの軌道との接続点となる H は着地のあとに再び上体が浮かないように選ぶ。Fig. 10 に修正後の軌道によ

る跳躍のシミュレーションで得られた重心の軌道と脚長を示す。軌道の修正により着地のタイミングが改善されている。

ロボットの速度が上昇してくると別な問題が生じる。速度が 0.3 [m/s] を超えるとロボットの進行方向が左右に振れる。これは脚の運動で yaw モーメントが発生するためである。yaw モーメントを補償するために、次のように腕振り動作を加える。

$$x_{arm} = k_{arm} x_{foot} \quad (26)$$

ここで、 x_{foot} は足首のロボット重心に対する変位、 x_{arm} は手首のロボット重心に対する変位である。 k_{arm} を負の値とすることで、ロボットの同じ側の脚と腕が前後反対に動くことになり、yaw モーメントの補償ができる。ここでは $k_{arm} = -0.6$ とした。Fig. 11 に腕振り動作を行った場合と行わなかった場合の重心における yaw 軸まわりの角運動量を示す。腕振りを行わなかった場合の値が途切れているが、その時点ですでに転倒が始まっている。

これらの修正を加えることで、走行が可能となった。走行の様子を Fig. 12 に、速度の目標パターンと、シミュレーション結果によるロボットの速度を Fig. 13 に示す。実際の速度 (2.9 [m/s]) が、目標速度 (3.3 [m/s]) に比べ遅くなっているが、これは接地期に置いて床と足裏とで滑りが生じているためと考えられる。

3.3 必要エネルギー

走行において主に使われる関節は、腰・膝・足首の pitch 軸である。前節のシミュレーションで加速を終え速度が定常となった場合での関節の角速度、トルク、パワーを Fig. 14~16 に示す。それぞれのグラフにおいて細線は右脚、太線は左脚のデータを

表している。縦の破線は、接地期、滞空期の切り替わりを示す。腰の上部の横線は、細線が右脚支持、太線が左脚支持で、線のない区間が滞空期に対応する。Table 2 は Fig. 14~16 から絶対値の最大値をまとめたものである。パワーについては、平均と絶対値の平均も求めた。接地期、滞空期の全体では加速、減速がないのでパワーの平均の合計はほぼゼロになっている。

4. 走行エネルギーについての考察

前章で求めたように、走行には大きなパワーが必要であった。走行ヒューマノイドを実現のためには消費パワーを減らすことが大きな課題である。ここでは検討の初めとして得られたデータの評価を行う。

まずヒューマノイドの歩行と比較する。同じヒューマノイドモデルを 0.5 [m/s] で歩行させた場合に関節に要求される性能は Table 3 である。走行と歩行での各項目の比を Table 2 の括弧の中に示す。関節角速度の比が $2.5\sim 3.3$ であることは、速度が6倍になったことに比べれば小さい。これは走行では、走行サイクルに対して復帰時間の占める割合が大きいことによる。一方、関節トルクの比は $5.8\sim 10$ 、関節の最大パワーでは $24\sim 65$ と大きく、HRP-1 がこの要求を満たすことはできない。

次に、2章で検討した単純な倒立振りモデルの消費するパワーについて考察する。Fig. 17 は *Sagittal-plane* の運動で、ロボットのアクチュエータが発生するパワーを示したものである。接地期の前半ではロボットは減速し、アクチュエータが負のパワーを発生する。接地期の後半では逆に加速するので、正のパワーを発生することになる。滞空期については、無質量脚を想定

Fig. 10 Modified trajectory

Fig. 11 Effectiveness of swing arms

Fig. 12 Snapshots of the running simulation

Fig. 13 Running speed of the simulation

Fig. 14 Joint speed

Fig. 15 Joint torque

しているため負荷が作用せずパワーは発生しない。HRP-1の体重と脚長のパラメータを用いて、倒立振子モデルが3.3[m/s]で定常走行するときのパワーを求めると、絶対値の平均が948[W]、ピークが2,460[W]となった。ヒューマノイドの走行で消費されるエネルギーは、重心を前方へ送り出すためと、遊脚の復帰など脚の相対的な運動に用いられる。走行が自身の体を前方へ移動させる行為であるから、前者が本質的に走行に必要なパワーであり、それ以外は副次的なものである。倒立振子モデルから求められる走行パワーは重心運動のためのパワーを示しているため、走行に必要なパワーの理想的な下限と捉えることができる。前章のシミュレーションの結果（絶対値の平均：腰・膝・足首関節の合計で2,883[W]、ピーク：足首関節のピークを採用して

Fig. 16 Joint power

Table 2 Actuator requirement for running at 2.9[m/s]

speed [rad/s]	hip	knee	ankle
peak of abs.	9.57 (2.8)†	12.1 (3.3)	8.93 (2.4)
torque [Nm]	hip	knee	ankle
peak of abs.	1770 (8.4)	1450 (5.8)	1150 (10)
power [W]	hip	knee	ankle
peak of abs.	6620 (44)	7350 (24)	8740 (65)
average of abs.	857 (28)	1560 (19)	466 (16)
average	-17.3	260	-246

† Parenthesized numbers indicate the increasing ratio from the walking at 0.5 [m/s] shown in Table 3.

Table 3 Actuator requirement for walking at 0.5[m/s]

speed [rad/s]	hip	knee	ankle
peak of abs.	3.37	3.71	3.59
torque [Nm]	hip	knee	ankle
peak of abs.	211	249	113
power [W]	hip	knee	ankle
peak of abs.	151	301	135
average of abs.	30.1	82.5	29.9

Fig. 17 Power of simple model running

8,740[W])と比較すると、絶対値の平均、ピークともに3倍程である。このことから、消費エネルギーについて、走行軌道全体、局所的なピークとも大幅に改善する余地があることが分かる。

5. 結 言

本論文では、まず走行パターンの生成法を提案した。単純な倒

立振子のダイナミクスをもとに走行軌道を計画するものであるが、わずかな修正を加えることで、多リンクで構成されるヒューマノイドに適用できる。このことを、動力学シミュレータを用いた走行シミュレーションで示した。次に現実のヒューマノイドのパラメータのパラメータを用いてのシミュレーションにより、主要なアクチュエータでどの程度厳しい性能が要求されるかを試算した。その結果は現状のヒューマノイドでの走行が不可能であることを示しているものの、具体的な数値としてそれを示し、開発の目安を提示したことに意義があると考ええる。実際の走行ヒューマノイドを設計には、さらに軌道や動力の検討が必要であり、特にエネルギー消費の少ない走行パターンが求められる。

参 考 文 献

- [1] M. Ahmadi and M. Buehler: "The ARL Monopod II Running Robot: Control and Energetics," Proc. of the 1999 ICRA, pp.1689-1694, 1999.
- [2] K. Demura et al.: "KENSEI-Chan: Toward a Running Humanoid," Proc. of IEEE-RAS Int. Conf. on Humanoid Robots, pp.437-442, 2001.
- [3] M. Gienger et al.: "Toward the Design of a Biped Jogging Robot," Proc. of the 2001 ICRA, pp.4140-4145, 2001.
- [4] H. Hirukawa, F. Kanehiro and S. Kajita: "OpenHRP: Open Architecture Humanoid Robotics Platform," Intr. Symposium

- on Robotics Research (ISRR), Melbourne, Nov. 2001.
- [5] K. Hirai, M. Hirose, Y. Haikawa and T. Takenaka: "The Development of Honda Humanoid Robot," Proc. of the 1998 ICRA, pp.1321-1326, 1998.
- [6] 玄, 上條, 美多: "1脚走行ロボット-Kenken-による走行実験", 第19回日本ロボット学会学術講演会講演論文集, pp.203-204, 2001.
- [7] 池田, 岩谷, 栗瀬, 美多: "脚式ロボットの走行制御-動物の運動解析に基づく走行の実現", システム制御情報学会誌, vol.14, no.5, pp.233-243, 2001.
- [8] H. Inoue, S. Tachi, Y. Nakamura, K. Hirai, et al.: "Overview of Humanoid Robotics Project of METI," Proc. Int. Symp. Robotics, pp.1478-1482, 2001.
- [9] K. Nishiwaki, T. Sugihara, S. Kagami, F. Kanehiro, M. Inaba and H. Inoue: "Design and Development of Research Platform for Perception-Action Integration in Humanoid Robot: H6," Proc. Int. Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.1559-1564, 2000.
- [10] R.R. Playter and M.H. Raibert: "Control of a Biped Somersault in 3D," Proc. of IFToMM-jc International Symposium on Theory of Machines and Mechanisms (in Nagoya, Japan), pp.669-674, 1992.
- [11] M. Raibert: Legged Robots that Balance. MIT Press, 1986.
- [12] D. Winter: "Moments of Force and Mechanical Power in Jogging," Proc. of the 1999 ICRA, pp.368-374, 1993.
- [13] J. Yamaguchi, E. Soga, S. Inoue and A. Takanishi: "Development of a Bipedal Humanoid Robot -Control Method of Whole Body Cooperative Dynamic Biped Walking-, " Proc. of the 1999 ICRA, pp.368-374, 1999.

長崎高已 (Takashi Nagasaki)

1973年9月19日生。2000年筑波大学大学院システム情報工学研究科入学。現在に至る。ヒューマノイドの走行の研究に従事。

(日本ロボット学会学生会員)

横井一仁 (Kazuhito Yokoi)

1961年11月11日生。1986年東京工業大学大学院機械物理工学専攻修了。博士(工学)。1986年工業技術院機械技術研究所に入所。1995~1996年スタンフォード大学客員研究員。2001年産業技術総合研究所知能システム研究部門主任研究員。神奈川工科大学連携大学院助教授、東京工業大学非常勤講師併任。人間協調・共存型ロボットシステムプロジェクトに従事。IEEE、日本機械学会会員。

(日本ロボット学会正会員)

比留川博久 (Hirohisa Hirukawa)

1959年1月15日生。1987年神戸大学大学院自然科学研究科システム科学専攻博士課程修了。学術博士。同年通産省工業技術電子技術総合研究所入所。1994~1995年米国スタンフォード大学計算機科学科客員研究員。2001年改組により独立行政法人産業技術総合研究所知能システム研究部門ヒューマノイド研究グループ長。ロボットの動作計画アルゴリズム、ネットワークロボティクス、ヒューマノイドロボット等の研究に従事。

(日本ロボット学会正会員)

梶田秀司 (Shuuji Kajita)

1961年1月26日生。1985年東京工業大学大学院修士課程修了(制御工学専攻)。同年通産省工業技術院機械技術研究所に入所。2足歩行ロボット等の動的制御技術の研究に従事。1996年2月より1年間米国カリフォルニア工科大学客員研究員。2001年より組織改変に伴い独立行政法人産業技術総合研究所主任研究員。現在に至る。1996年3月東京工業大学より学位取得(工学博士)。1996年度計測自動制御学会論文賞受賞。計測自動制御学会、IEEE (Robotics and Automation Society) の会員。

(日本ロボット学会正会員)

金子健二 (Kenji Kaneko)

1965年9月22日生。1990年慶應義塾大学大学院理工学研究科電気工学専攻修士課程修了。同年工業技術院機械技術研究所(現、産業技術総合研究所)に入所。現在知能システム研究部門主任研究員。工学博士。ヒューマノイドの経済産業省国家プロジェクトに従事。日本機械学会、電気学会などの会員。

(日本ロボット学会正会員)

谷江和雄 (Kazuo Tanie)

1946年11月6日生。1971年3月早稲田大学大学院理工学研究科修士課程修了。同年4月通産省工業技術院機械技術研究所入所。2001年4月より独立行政法人産業技術総合研究所知能システム研究部門部門長。筑波大学大学院システム情報工学研究科教授(連携大学院)。早稲田大学理工学総合研究センター客員教授等併任。工学博士。IEEE-RAS President-Elect, 日本機械学会フェロー, 計測自動制御学会などの会員。

(日本ロボット学会正会員)