

重力場を巧みに利用した動的2足歩行

(人間に近い歩行への挑戦)

佐 野 明 人*

1. はじめに

近年、原子炉などの保全、惑星探査などの幅広い分野で移動ロボットに対する要求が高まり、歩行ロボットに関する多くの研究が行われている。4足歩行ロボットは、機構がそれほど複雑にならないことおよび安定性の点から歩行研究の中心になっており、極限作業ロボットプロジェクトでも実証機として4足歩行ロボットが製作された。一方、人間が行動するのと同じ空間を移動する際には、2足歩行は非常に魅力的な移動方法であり、最も適した方式と言える。しかし、2足歩行は本質的には不安定であり、多足歩行に比べ安定性の面でその制御が非常に難しくなる。

一言に歩行と言ってもその種類は無数にある。しかし、人間の自然な歩行にできるだけ近い歩行をロボットで実現することが、われわれ研究者の一つの夢である。筆者は、以前ある学生の歩行時の胴体速度を測定したことがある。そのとき得られた速度パターンは、重力場における倒立振子のそれと類似していた。動物の歩行は、倒立振子として前方へ倒れ込む動作を繰り返す行い、重力場を巧みに利用することで高いエネルギー効率を得ている。本稿では、このようなタイプの歩行を目指した研究を紹介し、歩行のロバスト性を考慮した動歩行制御方式について、筆者が行ってきた研究に基づいて解説する。

2. 人間に近い自然な歩行

2.1 動歩行の実現

歩行は静歩行および動歩行の二つに分けることができ、その制御方法が大きく異なってくる。全重心の水平面への垂直投影点が支持多角形の内部を通過する場合、静的安定性が保たれていると言い、静的安定性が保持できない時期を持つ歩行が動歩行と呼ばれる。人間や動物が通常行っている歩行は、ほとんどすべて動歩行である。こ

のような動歩行の研究は、従来それほど手がつけられておらず、実際に歩行ロボットを用いてその制御方式の有効性を確認している研究は数えるほどである^{1)~6)}。

動歩行の実現には、まず歩行システムに対して安定化制御を行う必要があるが、次に示すような動歩行の特徴が、その制御を難しくしている。一つは、動歩行では、本質的に不安定な歩行システムが、その不安定な状態を繰り返すことで全体として安定性を保っている点にある。もう一つは、歩行システムがマニピュレータとは異なり絶対的な固定点を持たず、自重や静止摩擦力などによって発生する床反力によって床面に保持されている点にある。また、その支持点が脚の切換えによって変化する。

歩行制御方式を考えると、次のような二つの階層に分けることができる。

(1) 上位レベル 胴体部の速度変化を決定したり、各脚の爪先軌道を具体的に設計するレベル。このレベルでは、物資を輸送する移動機械としての歩行を目指すのかあるいはエネルギー効率の高い歩行を目指すのかによって異なった結論が得られる。たとえば、歩行ロボットを輸送機械として捉えた場合、胴体速度を一定に保持する歩行がやはり望まれる⁷⁾。一方、重力場を利用した歩行は、エネルギー効率が高く一つの理想の方式である。梶田ら⁸⁾は、位置エネルギー保存形軌道なるものを提案している。

(2) 下位レベル 各関節の制御方式をどのようにするかを決定するレベル。実際に、歩行ロボットを用いて実験を行う際には、必ず検討しなければならないレベルである。ロボットの構造、センサの種類・性能などを十分考慮して、適切な制御方式を選定しなければならない。一般には、各関節における高ゲインの局所位置フィードバックが行われてきた。その主な理由は、制御系のロバスト性を確保し歩行の安定性を増すためである。しかし、この方式を全ての関節に適用すると、爪先の滑りなどの問題をしばしば引き起こす結果となり、滑らかな歩行を実現するという点では、決して優れた制御方式とは言えない。

原稿受付 1993 年 1 月 23 日

Dynamic Biped Walking by Using Skillfully a Gravity Field (Challenge to a Human Walking)

* 電気通信大学

2.2 重力場の巧みな利用

人間の自然な歩行は、重力場を巧みに利用しており、倒立振子として前方へ倒れ込む動作を繰り返すことによって行われる。McGeerの研究^{8),9)}は、その意味で一つの本質を捉えている。彼は図1に示すような玩具に見られるようなアクチュエータを持たない歩行機械を製作している。このロボットは、Sagittal平面（進行方向を含む床面に垂直な平面）内で見ると2足とみなせる。初期モデルは、膝関節がないもので玩具と大差不いように思われた。しかし、改良型では膝関節を有しており、膝の逆折れ防止用の機構を持っているものの、やはりアクチュエータのない構造となっている。Passive Walkingと名付けられた歩行は、重力効果のみを利用し、前進運動や脚の前方への振り出し動作を巧妙に実現している。Passive 故に動き始めたら転倒しないように祈るしかないが、その歩き方は人間の自然な歩行に極めて近い。筆者が国際会議に出席した際、会場に持ち込まれたそのロボットは、見事に即席のスロープを下り降りた。

日本では、いくつかの先駆的な研究がある。山下⁹⁾は、人間の歩行における倒立振子の運動の重要性を最初に指摘した。宮崎¹⁰⁾は、特異摂動法を用いて歩行システムの運動方程式から倒立振子モードが抜き出せることを示し、支持点まわりの角運動量によって歩行運動を説明している。古荘¹¹⁾⁻¹³⁾も、閉ループシステムの支配モードを考えることにより、倒立振子モードを持つ低次モデルを導いている。

実際のロボットを使った研究としては、下山⁴⁾、古荘¹¹⁾⁻¹²⁾、伊藤¹⁴⁾および梶田⁵⁾が、足首が自由回転となる歩行ロボットを用いて、倒立振子的な歩行について検討してきた。このタイプの歩行は、支持脚足首にあらかじめ目標角度を与えて、局所位置フィードバック制御した歩行と比べて、重力場に逆らわない自然なものである。

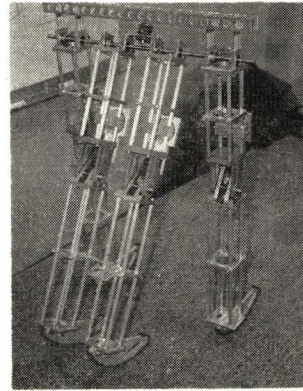


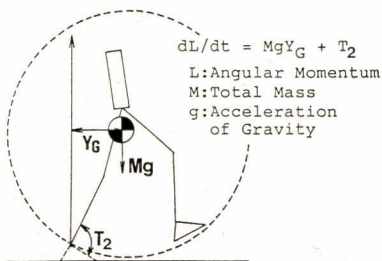
図1 膝関節を有する Passive ロボット
(後方より撮影)

3. 角運動量規範形制御

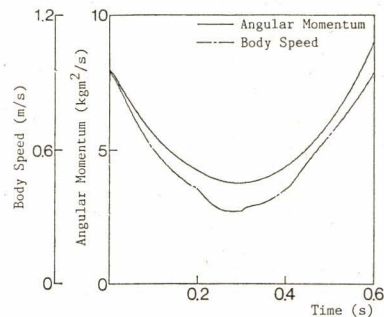
3.1 足首トルクによる角運動量制御

支持脚足首を完全に自由回転とした歩行は、一つの理想の姿であるものの、歩行の安定性や再現性を考えた場合、やはり何等かの制御則のもとで支持脚足首トルクを使うことが必要である。たとえば、人間の歩行を高速写真および筋電図などを用いて解析した研究においても、支持脚足首関節での繊細な制御が報告されている¹⁵⁾。そこで、本章では、歩行システムが持つ角運動量を制御することを目的として、支持脚足首トルクの使用を考える。

ロボットを各関節の角度や角速度のみに注目して制御すると、歩行全体での滑らかでリズムカルな動きを実現することが難しい。そこで、歩行全体の様子を大局的に表わしている角運動量¹⁶⁾を制御量として、直接フィードバックすることを考える^{6),17)}。図2(a)に示す単脚支持状態において、破線で囲まれたリンク部分の支持脚足首まわりの角運動量について考えてみる。ニュートンの角運動量保存則からわかるように、システムが持つ



(a) 単脚支持状態のロボット



(b) 角運動量および胴体速度の時間変化
(b) 角運動量および胴体速度の時間変化

図2 支持脚足首まわりの角運動量

角運動量は、外力モーメントである重力効果 MgY_G と支持脚足首トルク T_2 によってのみ変化し、遊脚の振りや支持脚膝の曲げ伸ばしなどの内力モーメントの影響は受けない。図2(b)は、支持脚足首トルクを使わず、他の関節に対しては局所位置フィードバックを適用した場合のシミュレーション結果である。図にはその時の角運動量の時間変化が実線で示されている。図からわかるように、角運動量は滑らかな曲線を描いて変化している。比較のために、胴体速度の時間変化を一点鎖線で示す。胴体速度は、角運動量とともに制御量の有力な候補の一つである¹⁸⁾。しかし、図からわかるように、遊脚の振りなどの影響を受け胴体速度は複雑に変化している。したがって、胴体速度を制御量として用いる際には、このような複雑な目標胴体速度を準備しない限り、無駄なエネルギーを使うことになる。したがって、角運動量を制御量として選んだ。

制御入力に関しては、重力効果が重心位置に関係し、それほど急激に変化させられないことから、支持脚足首トルクを用いることになる。そこで、下位レベルの支持脚足首関節に対するトルク目標値 T_{ref} を次のように与えることにする。ただし、足底が浮き上がらない範囲に制限される。

$$T_{ref} = K_1(L_{ref} - L) + \bar{T}(Y_G) \quad (1)$$

ここで、

L_{ref} : 目標角運動量 (kgm^2/s)

L : 歩行ロボットが持つ角運動量 (kgm^2/s)

K_1 : 比例フィードバックゲイン (Ns/kgm)

\bar{T} : バイアストルク (Nm)

3.2 目標角運動量関数の設計

本節では、式(1)に示す目標角運動量 L_{ref} をいかに選ぶかについて考える⁶⁾。2.2節で述べたように、重力場に逆らわない自然な歩行という観点から、目標角運動量関数は倒立振子の角運動量変化を基礎として選ぶことにする。図3(a)に、支持脚足首トルクを使わなかった場合の角運動量変化を実線で示す。また、基本角運動

量関数を次のように定義する:

$$L(Y_G) = \alpha f(Y_G) + L_0 \quad (2)$$

ここでは、 L_0 最小角運動量である。この関数は、 $\alpha=1$ のとき実線で示す角運動量変化となる。また、図には α が0.5の場合を一点鎖線で、0の場合を破線で示した。 $\alpha=0$ は角運動量一定歩行を意味するが、これを実現するためには、重力効果による支持脚足首まわりのモーメントを足首トルクによって完全に相殺しなければならない。しかし、あまり大きな足底を持たない歩行ロボットではその実現は困難であり、またエネルギー効率の点からも良い歩行とは言えない。この基本角運動量関数を使う場合、 α および L_0 が設計パラメータとなる。

図3(b)は、1歩区間における目標角運動量関数を示したものである。縦軸に角運動量を取り横軸には全重心の位置がとってある。図3(c)に示すような三つの相からなる歩行を考えている。Ⅲ相は、従来のロボットによる歩行では一般には採用されていない。この相では、単脚支持状態にあり爪先まわりで倒立振子的に回転する。Ⅲ相を持つ歩行では、回転中心が足首から爪先へと変化するため、Ⅰ相およびⅡ相しか持たない歩行と比べて胴体部の上下動が少なくなり、その結果、支持脚切換え時の角運動量損失も減少する。したがって、歩行を継続していく上では非常に重要な相であり、人間の自然な歩行においても、このように爪先まわりで回転する相が現れるのが普通である。ただし、この時期、角運動量の制御は不可能なので、目標角運動量は与えられていない。次に、目標角運動量関数の設計方法を具体的に説明する。

(Step 1) 最小角運動量 L_0 を決定する。安定に歩行を継続するためには、 L_0 はある程度大きな正の値である必要があり、 L_0 によって平均歩行速度がほぼ決定される。

(Step 2) Π_a 相に対する係数 α_a の決定。 Π_a 相はシステムが負の重力効果を受け角運動量が減少する時期なので、角運動量をさらに減少させる方向に支持脚足首トルクを用いることは望ましくない。一方、足首からか

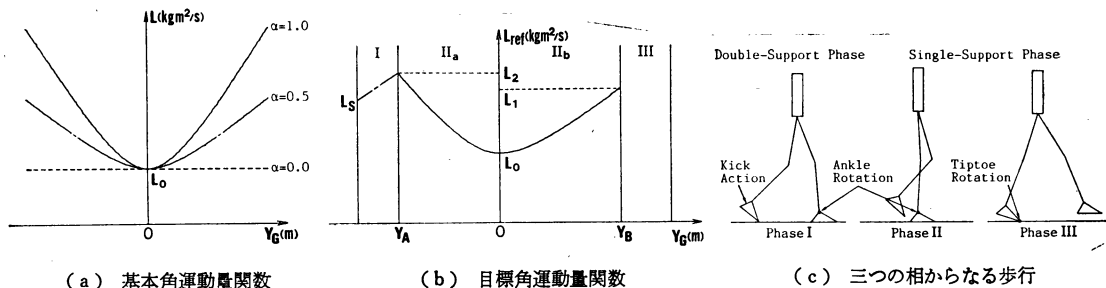


図3 角運動量規範形制御

かともまでの距離は長くないので、足首トルクによって角運動量の減少をそれほど防ぐこともできない。以上のことを考慮して、実験では $\alpha_a=0.8$ とした。

(Step 3) Π_b 相に対する係数 α_b の決定。 Π_b 相は角運動量が増加する時期であり、支持脚足首トルクをまったく使わず、自由回転状態にすると、 Π_b 相の後半では歩行速度が急速に上昇する。速度変動の大きな歩行は望ましくないので、角運動量の増加をある程度抑えた関数を選ぶ必要がある。実験では、以上の観点および正負両方向への制御効果をもたせるため $\alpha_b=0.5$ とした。

(Step 4) I 相と Π_a 相および Π_b 相と III 相の切換えの時期は、重心位置 Y_A および Y_B によって適当に決定する。

(Step 5) I 相の目標角運動量は、各ステップの I 相のスタート時に歩行ロボットが持っている角運動量 L_s と L_2 を直線でつなぐことで、実験中に生成する。

4. 両脚支持期におけるトルク配分制御

両脚支持期では、システムが拘束されることによって自由度が低下し入力冗長となる。この冗長性が制御を複雑にしている面もあるが、逆にこれを利用した巧みな制御も可能である。さらに、両脚支持期は、単脚支持期に比べ支持点によって囲まれる面積が広く安定性が高い。成清ら¹⁹⁾は、両脚支持期における運動制御を拘束空間における固有値指定問題として扱っている。また、美多ら²⁰⁾は、拘束条件付最適レギュレータを適用している。本章では、単脚支持期の初期角運動量を目標の値に収束させることを目的として、両脚支持期の角運動量を制御することを考える²¹⁾。

図4に示す7リンクモデルに対して、拘束条件式 $h(t, \theta) = [h_1^T, h_2^T, h_3^T]^T = 0$ を考える。 $h_1(\theta) = 0$ は、前脚足底を床面に拘束する条件式であり、 $h_2(\theta) = 0$ は、後脚爪先を点Bに固定するための拘束条件式であり、 $h_3(t, \theta) = 0$ は、局所位置フィードバックされる三つの関節（前脚膝、前脚腰および後脚膝）が、ほぼ目標値に従って動くために導入された拘束条件式である。ここで、ラグランジェの未定乗数 \mathbf{F} を導入し、拘束条件式を満たす運動方程式を次のように表すことにする。

$$A\ddot{\theta} + B(\theta)f(\dot{\theta}) + g(\theta) = E^T \mathbf{F} + Du \quad (3)$$

ここで、

$$E(\theta) = \left(\frac{\partial h}{\partial \theta} \right), \quad u = [T_2, T_5, T_7]^T$$

T_2, T_5 および T_7 は、それぞれ前脚足首、後脚腰および後脚足首トルクである。また、 \mathbf{F} は次のように与えられる。

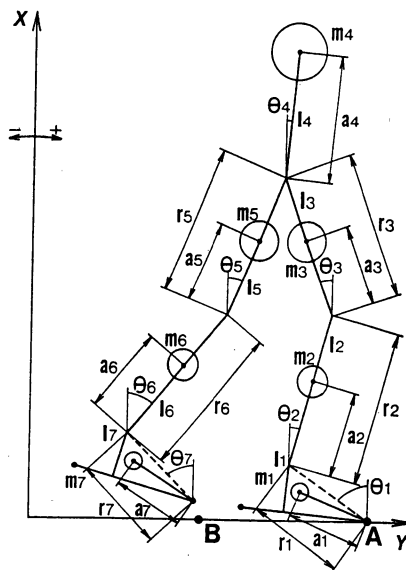


図4 7リンクモデル

$$\mathbf{F} = (EA^{-1}E^T)^{-1} \{ EA^{-1}(Bf + g) - EA^{-1}Du - \dot{E}\dot{\theta} \} \quad (4)$$

本章では、次式に示すように、希望の角運動量変化率 $\dot{L} = K_2(L_{ref} - L)$ が与えられたときに、歩行ロボットの外形に応じた適切なトルク配分を考える。

$$T_i = f_i(\dot{L}, \theta) \quad (i=2, 5, 7) \quad (5)$$

まず、式(3)に式(4)を代入することにより次式を得る。

$$\ddot{\theta} = -P(\theta)f(\dot{\theta}) - Q(\theta)g(\theta) - H(\theta)\dot{E}\dot{\theta} + R(\theta)u \quad (6)$$

ここで、

$$\begin{aligned} H(\theta) &= A^{-1}E^T(EA^{-1}E^T)^{-1}, \\ Q(\theta) &= A^{-1} - HEA^{-1}, \\ P(\theta) &= QB, \quad R(\theta) = QD \end{aligned}$$

前脚足首まわりに関する歩行ロボットの角運動量 L は、次のように表すことができる。

$$L = v^T(\theta)\dot{\theta} \quad (7)$$

ただし、 $v(\theta)$ は角度ベクトル θ によって変化する6次元ベクトルである。上式の両辺を時間について微分して、式(6)を代入し微小項を無視して整理すると、角運動量変化率 \dot{L} (kgm^2/s^2) は近似的に次のように表される。

$$\dot{L} = \alpha T_2 + \beta T_5 + \gamma T_7 + \delta \quad (8)$$

ここで、

$$[\alpha, \beta, \gamma] = v^T R, \quad \delta = -v^T Qg$$

式(8)において、 α, β および γ はそれぞれ前脚足首トルク T_2 、後脚腰トルク T_5 および後脚足首トルク T_7 の角運動量変化率に対する効果係数となっている。また、

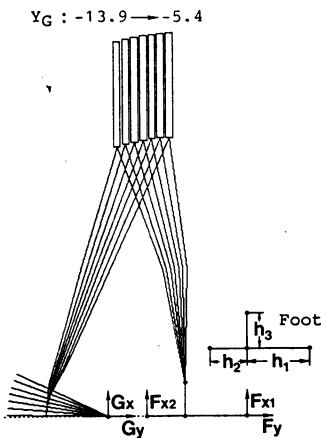


図5 両脚支持期における外形変化

δ (kgm^2/s^2) は重力の角運動量変化率への効果を表している。図5のように外形(前脚足首が原点)が変化する場合、後脚腰トルクは角運動量の増減にはあまり寄与しない(β の絶対値が小さい)ので、その目標値を零(自由回転状態)とすることで、前後の足首関節のトルク配分問題を考える。

図6は、横軸に前脚足首トルクを縦軸に後脚足首トルクがとってある。図中に角運動量変化率一定の等高線が描かれている。ただし、負の値は角運動量が減少することを意味する。さらに、制約条件(支持点が浮かない条件および滑らない条件)を満たす許容領域がハッチングで示されている。許容領域の境界上では次の条件のいずれかが成立している。

$$(A) \quad F_{x1} = n_1, \quad (B) \quad F_{x2} = n_2$$

$$(C) \quad \frac{F_y}{F_{x1} + F_{x2}} = \mu_1, \quad (D) \quad \frac{G_y}{G_x} = \mu_2$$

ただし、シミュレーションでは、 $n_1 = 10 \text{ N}$, $n_2 = 70 \text{ N}$, $\mu_1 = \mu_2 = 0.1$ とした。また、記号に関しては図5参照。図からわかるように、ロボットの外形に応じて許容領域が大きく変化している。また、角運動量変化率一定の等

高線は左下に向かって移動している。各外形での角運動量の制御性について見ると、初期外形では角運動量を増加させることが不可能である。一方、中間外形および終端外形では正負両方向に角運動量制御が可能であり、その許容領域も広がっている。最後に、関節トルクの絶対値の総和を最小とする評価を導入することで、前後脚の足首トルクの配分を行った。

5. 歩行ロボットによる3次元動歩行

筆者の研究室で開発した2足歩行ロボットの外観を図7に示す。総重量 27.5 kg, 全高 1.02m の 10 自由度を有する人間型ロボットである。質量バランスをできるだけ人間のそれに近づけている。足底圧および足首トルクセンサを装備し、姿勢角や胴体速度などを検出する各種センサを搭載しており、これらのセンサ情報を用いて、動歩行時における角運動量などを比較的正確に求めている。3次元歩行を実現するには、Lateral 平面(進行方向に垂直な平面)内の運動制御および Sagittal 平面内の運動と Lateral 平面内の運動との同期についても考えなければならないが、詳しくは文献(6)を参照されたい。動歩行実験の結果、歩幅 30cm, 平均歩行速度 0.3m/s の滑らかでかつ胴体速度の変動の小さい3次元動歩行を実現した。

6. おわりに

人間の自然な歩行は、重力場を巧みに利用しており、繊細な力制御が行われている。本稿では、支持脚足首トルクを用いて歩行ロボットの角運動量を制御することによって、単純な倒立振り運動と比べて速度変動の小さい安定性の高い歩行が実現できることを示した。この歩行は、人間の歩行に見られるような爪先まわりで回転する相も持っている。この角運動量を規範とした歩行制御方式は、歩行のロバスト性を向上させるものであり、強引な制御による無理な歩行をさせず、あくまでも倒立振り

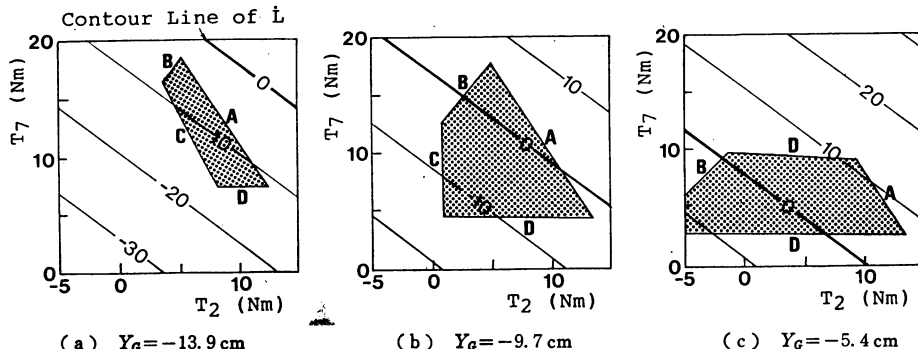


図6 角運動量変化率と許容領域

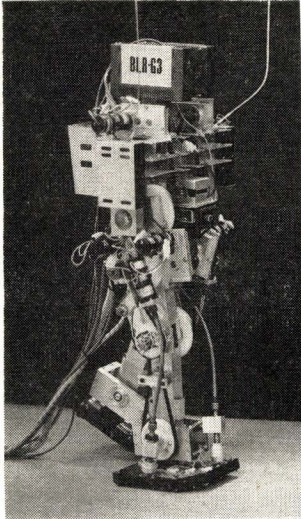


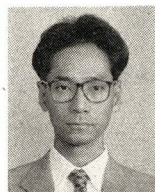
図7 2足歩行ロボット BLR-G3
(動歩行時の様子)

として前方へ倒れ込む動作の繰り返しを基本としている。

現在までに作られた2足歩行ロボットは、どれも独創的であり研究者のロボットへの思い入れがうかがえる²²⁾。歩行ロボットの開発は、様々な分野の技術を総合して成し得るものであるが、機械工学からのアプローチの重要性を実感している研究者は、筆者を含めて少なくないと思う。本学会で2足歩行ロボットが特集されたのは、10年前の1983年である²³⁾。10年後の2003年にどんな歩行ロボットが出現しているか楽しみである。本稿が、これから研究される方々の一助となれば幸いである。

参考文献

- 1) M. H. Raibert : Legged Robots That Balance, The MIT Press (1986).
- 2) 高西, 石田, 山崎, 加藤 : 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, 3-4, pp. 325-336 (1985).
- 3) T. McGeer : Passive Walking With Knees, Proc. of 1990 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Cincinnati, 3, pp. 1640-1645 (1990).
- 4) 下山 : 竹馬型2足歩行ロボットの動的歩行, 日本機械学会論文集, C編, 48-43, pp. 1445-1454 (1982).
- 5) 梶田, 小林 : 位置エネルギー保存形軌道を規範とする動的2足歩行の制御, 計測自動制御学会論文集, 23-3, pp. 281-287 (1987).
- 6) 佐野, 古荘 : 角運動量制御による2足歩行ロボットの3次元動歩行, 計測自動制御学会論文集, 26-4, pp. 459-466 (1990).
- 7) 佐野, 古荘, 後藤 : 速度および加速度センサを用いた4足歩行ロボットの胴体速度制御, 日本機械学会論文集C編, 56-529, pp. 2460-2467 (1990).
- 8) T. McGeer : Principles of Walking and Running, Advances in Comparative and Environmental Physiology 11, Mechanics of Animal Locomotion. R. McN. Alexander, ed. Berlin, Springer-Verlag (1992).
- 9) 山下, 山田, 猪谷 : 歩行の基礎的研究, バイオメカニズム(人工の手足の研究) 東大出版会, pp. 226-234 (1972).
- 10) 宮崎, 有本 : 二足歩行のダイナミクスの制御理論的考察, 計測自動制御学会論文集, 14-4, pp. 428-433 (1978).
- 11) 古荘 : 動的2足歩行ロボットの制御(その低次モデルおよび階層制御策), 日本ロボット学会誌, 1-3, pp. 182-190 (1983).
- 12) J. Furusho and M. Masubuchi : Control of a Dynamic Biped Locomotion System for Steady walking, ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 108 pp. 111-118 (1986).
- 13) J. Furusho and M. Masubuchi : A Theoretically Motivated Reduced Order Model for the Control of Dynamic Biped Locomotion, ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 109, pp. 155-163 (1987).
- 14) 細江, 武市, 熊井, 伊藤 : 高ゲインフィードバックによる2足動歩行の安定解析, 計測自動制御学会論文集, 22-9, pp. 948-954 (1986).
- 15) 森本, 笠原, 土屋 : 高速度カメラを含む高精度歩行分析システムによる足部を中心とする下肢機能の解析, バイオメカニズム5, pp. 159-167 (1980).
- 16) 古荘, 山田 : 角運動量を考慮した2足歩行ロボットの動的制御(両脚支持期に蹴りを行う歩行), 計測自動制御学会論文集, 22-4, pp. 451-458 (1986).
- 17) A. Sano and J. Furusho : Realization of Natural Dynamic Walking Using The Angular Momentum Information, Proc. of 1990 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Cincinnati, 3, pp. 1476-1481 (1990).
- 18) J. Furusho and A. Sano : Sensor-Based Control of a Nine-Link Biped, The International Journal of Robotics Research, 9-2, pp. 83-98 (1990).
- 19) 成清, 小林, 伊藤, 細江 : 二足歩行系の両脚支持期の制御について, 電気学会論文誌C, 103-12, pp. 281-286 (1983).
- 20) 川野, 松井, 新郷, 美多 : 二足歩行ロボットの拘束条件付運動制御, 日本ロボット学会第1回学術講演会予稿集, pp. 183-186 (1983).
- 21) 佐野, 古荘, 伊神 : 両脚支持期における2足歩行システムのトルク配分制御, 計測自動制御学会論文集, 26-9, pp. 1066-1073 (1990).
- 22) 舟橋, 小川, 後藤, 小島 : 二足歩行機械の脚機構の総合(第1報, 足関節軌跡創成機構の総合, 第2報, 足首駆動機構の総合), 日本機械学会論文集, C編, 50-455, pp. 1285-1297 (1984).
- 23) 日本ロボット学会誌, 2足歩行ロボット特集号, 1-3 (1983).



佐野明人 (Akihito SANO)

1963年生。1985年岐阜大学工学部精密工学科卒業。1987年同大学大学院工学研究科精密工学専攻修士課程修了。同年岐阜大学工学部機械工学科助手。1992年10月より電気通信大学機械制御工学科助手。1992年名古屋大学博士(工学)。2脚・4脚ロボットの動歩行制御, マニピュレータのロボスタ制御に関する研究に従事。1991年度日本機械学会賞研究奨励賞受賞。日本機械学会, 計測自動制御学会の会員。(日本ロボット学会正会員)