

ロボット工学に基づく二足歩行制御の構成論的理解

大阪大学 杉原知道

人の運動を、筋・骨格・脳神経等の身体構成要素の結合系がなす内界の力学ではなく、むしろ身体と外界がなす力学系の冗長性、劣駆動性、構造可変性等に着目し、そのような系がとる合目的振る舞いととらえることで、運動制御系がもつべきメカニズムを数学的必然性に基づいて説明することができる。このような考え方は、ロボットを歩かせるための制御器設計問題へのアプローチとしてロボット工学では自然に行われている。一方、人の運動原理を理解するための糸口としては、必ずしも有効に採用されてはいないようである。本講演では、人の身体科学、運動制御を理解する上で基礎となる数理を説明し、講演者自身による最近の関連研究を紹介する。

1. 人の運動をロボット工学の立場から見る

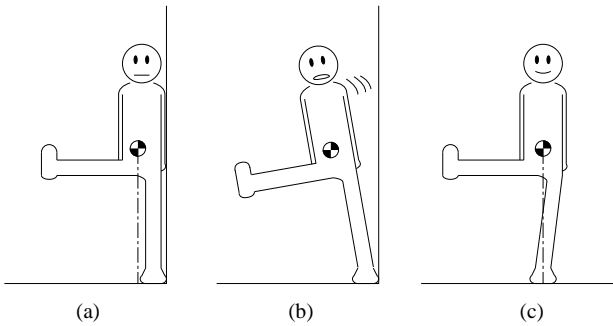


図 1 (a) のような姿勢をとり続けることはできない。必ず (b) のように倒れてしまう。片足で立つためには、(c) のように地面についた足の真上に重心が乗らなければならない。

図 1(a) のような姿勢をとり続けることはできない。必ず同図 (b) のように倒れてしまう。片足で立つためには、同図 (c) のように、地面についた足の真上に重心が乗るようにしなければならない。このことを、数学的に証明してみよう。

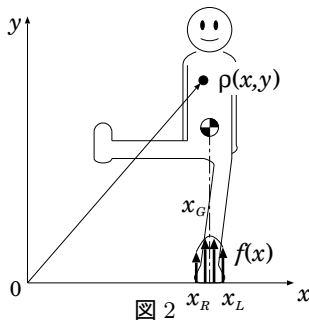


図 2

【証明】

図 2 のように座標系をとる。ただし、支持足は地面上の水平な面についているものとし、紙面に垂直な方向の成分については考えない。座標 (x, y) における身体の密度を $\rho(x, y)$ 、座標 $(x, 0)$ において足裏にかかる圧力を $f(x)$ とおく。今、重力加速度を g とし、全身が静止しているとする、全身に働く重力と、地面から受ける反力の釣り合いより、次式が成り立つ。

$$g \iint_V \rho(x, y) dx dy = \int_{x_R}^{x_L} f(x) dx$$

ただし、 V は全身の質点集合、 x_R, x_L はそれぞれ支持足の右端、左端を意味する。同様に、全身に働く重力モーメントと、地面から受ける反力モーメントの釣り合いより、次式が成り立つ。

$$g \iint_V \rho(x, y) x dx dy = \int_{x_R}^{x_L} f(x) x dx$$

ここで、重心の x 座標 x_G は、その定義より、

$$x_G = \frac{\iint_V \rho(x, y) x dx dy}{\iint_V \rho(x, y) dx dy}$$

である。これらの式より、

$$x_G = \frac{\int_{x_R}^{x_L} f(x) x dx}{\int_{x_R}^{x_L} f(x) dx}$$

が言える。ここで x_R, x_L の間の領域で、任意の x に対し常に $f(x) \geq 0$ であるので、次式が成り立つ。

$$x_R F \leq \int_{x_R}^{x_L} f(x) x dx \leq x_L F$$

ただし $F = \int_{x_R}^{x_L} f(x) dx$ とおいた。上記二式より、

$$x_R F \leq x_G F \leq x_L F$$

明らかに $F > 0$ なので、全身が釣り合いの状態では静止しているならば、

$$x_R \leq x_G \leq x_L$$

でなければならない（証明終）

もう一つ別の例として、図 3(a) のように、両足立ち状態から右足を持ち上げた後に再びその場に右足を下ろす運動を考えよう。多くの人が難く行えるこの振る舞いを力学的観点から説明することは、実はそれほど簡単なことではない。

両足に均等に反力がかかっている状態から瞬間的に右足を持ち上げると、図 1(b) と同じように倒れ始めてしまう。これを防ぐために、人は、足を上げる直前に重心を左足に向けて無意識に加速する。右足を持ち上げ

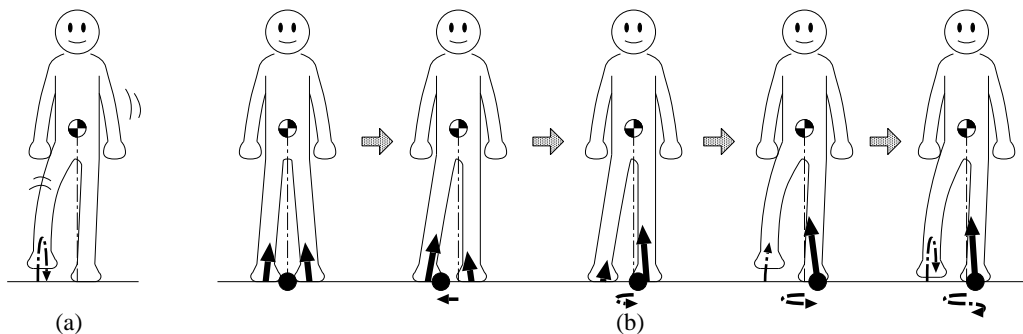


図3 (a) 右足を上げて元の場所に戻す。(b) 簡単な動作だが、左右足裏にかかる反力と反力中心は複雑に変化する。

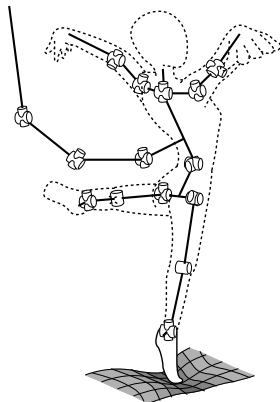


図4 人の身体は大自由度劣駆動構造可変系。胴体は大きさも重さもない関節で空中から吊られているようなもの。

るには右足裏の反力を0にしなければならないが、重心を左足に向けて加速するには右足裏の反力を増やさなければならない。足裏にかかる圧力中心に着目すると、両足の真中から一度右足側に振られた後に、素早く左足に移ることになる。つまり、この一連の動作中、足裏反力および反力中心は図3(b)のように変化する(太い実線の矢印が反力、黒丸が反力中心を表す)。このような何気ない動作の中でも、人はこのように矛盾をはらんだ複雑な制御をしているのである。

筋肉や神経などの身体の一部だけに注目しても、また、そうした部品からなる精密な身体メカニズムに考えを及ぼしても、上記のような事柄を理解する近道には必ずしもならない。人の運動をロボット工学の立場から見ることの意義は、ここにある。

2. 人は大自由度劣駆動構造可変系

ロボット工学的な考え方に基づけば、人の身体の力学は、「大自由度系」「劣駆動系」「構造可変系」の三つのキーワードによって特徴づけられる。これらを一つずつ説明していこう。

先に述べたように、身体の一部を筋肉や神経という単位ではなく、図4のように、可動部(関節)とそれらをつなぐ剛体(リンク)から成るリンク系として考える。人の関節は、必ずしも回転中心が明確でなく、骨同士が接触したまま滑ったり転がったりするものも多いが、今はリンク間のおおよその相対運動方向を決めるものとしてこのように近似する。また人の骨は非常に硬いので、全体の運動を考える上でリンクの

しなりや伸縮等の変形は無視してよい。数え方にも依るが、人の身体には大雑把に言って片腕、片脚にそれぞれ6~7個ずつ、首、胴体に3個くらいずつ、全部で30~50個、指などを含めればもっと多くの関節がある。一般的な生活家電の自由度がせいぜい1~3、工業用加工機械の自由度が1~7であることを考えれば、桁違いの大自由度系であると言える。

関節は筋肉によって駆動される。これも数え方によるが、人の筋肉はおおよそ1000本あると言われる[1]。関節の数に比べて随分多いと感じられるのではないだろうか。実際、一つの関節を動かすために複数の筋肉が協調して力を発生することは、よく知られている。しかし今はそのような筋肉の協調については気にせず、それらを与える合力と等価なトルクを発生するモータが、関節ごとに一つずつ取り付けられているとしよう。

ところで図4には不思議な箇所——腕や脚に加え、胴体を空中から吊っているリンクと、それらをつなぐ関節がある。もちろんこのような関節は実際には存在しないが、大きさも重さもなく、モータもついていない仮想的な関節で胴体が空中に結合され、並進・回転6自由度を持つことを表現している。これらの関節を、便宜的に仮想関節と呼ぼう。数十個のモータを持つにも関わらず、仮想関節の存在によって、全自由度に対しモータが原理的に最低でも6個不足する。モータ数が自由度より少ない系は劣駆動系と呼ばれる。人は本質的に劣駆動系なのである。

仮想関節を制御する鍵は、物体に力を加えると力を加えた側にも同じ大きさの反力が加えられるという、いわゆる作用反作用の法則にある。各モータで発生した力は身体を伝播し、地面を押す力となるが、それに対し地面から「押し返される」ことではじめて人は運動できる。あたかも神(仏?)の手に引っ張られているかのような力を、地面と身体との接触点を介し反力として得るわけである。

地面からの反力は無尽蔵に得られるわけではない。「押し返される」ことはあっても、「引っ張り返される」ことは決してない。すなわち垂直抗力は必ず非負になる。また、剪断力が最大静止摩擦力を越えることはない。冒頭の例で見た通り、接触点の分布が許容される反力の範囲を決め、しかも接触点の分布は運動に伴って頻繁に変化してしまう。これが、人が意図する運動を実現するに当たって複雑な制御を行わざるを得ない理由である。接触点をまた関節と見なし、地面と身体とで

リンク系を成していると考えれば，その構造が可変であるという見方もできる．このような系は構造可変系 [2] と呼ばれる．

以上のことは，全て人（および人型ロボット）の運動方程式に表れる．一般的には，これは次のように表される [3] ．

$$\begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{12}^T & H_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau \end{bmatrix} + \sum_{k=1}^{N_C} \begin{bmatrix} J_{k1}^T \\ J_{k2}^T \end{bmatrix} f_k \quad (1)$$

$$\nu_k^T f_k \geq 0, \quad \|f_k - (\nu_k^T f_k) \nu_k\| \leq \mu_k \nu_k^T f_k \quad (2)$$

ただし， H_{ij} ($i = 1, 2, j = 1, 2$) は慣性行列， q_1 は体幹の位置と姿勢を表す 6 次元の変数， θ は全関節変位をまとめたもの， b_i ($i = 1, 2$) は遠心力・コリオリ力・重力等， τ は全関節に働くモータトルク， J_{ki} ($i = 1, 2$) は k 番目接触点に関するヤコビ行列， f_k は k 番目接触点において働く反力， N_C は接触点の数， ν_k は k 番目接触点における単位法線ベクトル， μ_k は k 番目接触点における摩擦係数¹である．先に述べた通り，関節数 (θ の次元) は通常 30 ~ 50 であり，慣性行列も全体で (関節数+6) × (関節数+6) の大きな，しかも三角関数を多数含んだ行列となる．また，右辺第 1 項 (駆動力項) で τ 以外の成分が 0 になっているところに劣駆動系の特徴が現れている．またこれも先に述べた通り，構造可変系の性質から，接触点は運動中に頻繁に生成・消滅する．したがって J_{ki} や，そこに発生する f_k も不連続に変化する．不等式 (2) は，接触力に課せられる制約条件を表している．

まとめると，大自由度劣駆動構造可変系である人の運動原理は，

1. 多数のモータが協調し，
2. 接触点を介して地面に力を作用させ，
3. その反作用として受けた反力が（仮想関節も含めた）全身に加速度を与え，
4. 加速度が速度を，速度が姿勢をそれぞれ変化させ，
5. さらに地面と身体との接触点分布が変化する

という，モータで発生する力と運動との因果関係が極めて複雑なサイクルで説明される．

3. 現在の人型ロボット制御方法

人がどうやって自分自身を制御しているのかを，脳神経や筋肉の活動計測に基づいて要素還元論的に説明するのではなく，力学的観点から制御器が持っていなければならない機能を議論する，すなわち構成論的に理解することが，ロボット工学に基づいて人をとらえるパラダイムの本旨である．リンク系として表現された人は，その模造物である人型ロボットと区別されない．この意味で，構成論的な人の制御メカニズムの理解は，人型ロボットの制御器設計とほぼ同じ問題になる．ただし，前節で記したような因果関係の複雑さから，制御器の設計方法は難易度の高い問題であり，解法も一通りではない．

¹ 簡単のために，最大静止摩擦係数＝動摩擦係数としている．

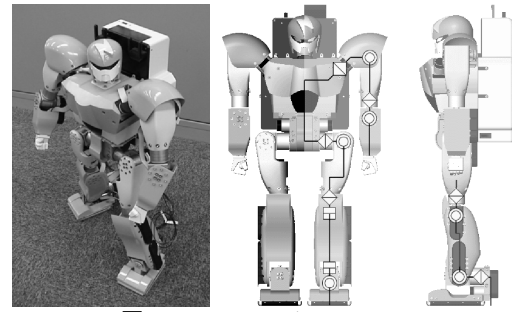


図 5 小型人型ロボット mighty

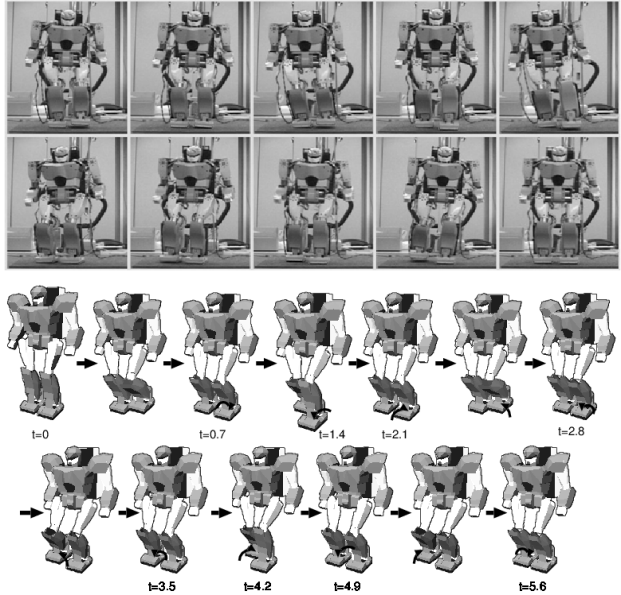


図 6 (上) mighty でダンスステップ．(下) 運動軌道設計のための踏み替えタイムチャート．

人型ロボットの起源は古く，紀元前にはすでに人型機械が作られていたという記録がある．線引きが難しいのでどれを最初の人型ロボットと呼ぶべきか悩ましいが，論文として最初に著されたのは，早稲田大の加藤ら [4] による WABOT-1 と言われる．1996 年，本田技研の平井ら [5] が発表した P2 は，数十個のモータやセンサ，計算機，バッテリーまで搭載しながら滑らかで安定感のある動きを披露し，研究を大いに活性化させた．筆者にとっても，当時人型ロボット研究を志した矢先に大きな衝撃を受けたことを憶えている．不思議なもので，一つ成功例が報告された途端，設計図が流出したわけでもないのにあちこちで人型ロボットが発表されはじめた．筆者も 1998 年に東京大学で長阪憲一郎氏（現・ソニー）を中心とした H5[6] の開発に参加し，その後 2003 年に中村仁彦教授の指導の下で mighty を，2005 年には後輩の山本江氏（現・名古屋大学助教）と一緒に magnum[7] を，それぞれ開発した．

図 5 に mighty の外観と関節配置を示す．関節数 20 個で，人型ロボットとしてはそれほど自由度が大きいものではないが，それでも仮想関節の 6 自由度を足して 26 自由度の立派な大自由度系である．

このロボットに，図 6 に示すようなダンスステップを踏ませたことがある．同図下のように踏み替えのタイムチャートを先に作っておき，それと地面からの反力が

整合するような全身の目標軌道を時刻の関数として計画し、後は、動作開始からの経過時間に従って読み出した目標姿勢になるようモータ角度を制御する、という方法であった。目標軌道計画は、数学的には不等式制約条件下での二点境界値問題の部類に入る。それなりに難しい問題であるが、定式化を工夫して解くことはできる [8]。背景には、各モータをどのタイミングでどのように動かせば良いのか予め求めておけば、大自由度にまつわる難しさを大きく低減することができ、また比較的単純な角度制御だけで実現できる、という考え方がある。現在の人型ロボットの多く [9, 10, 11, 12, 13] が同様の方法で制御されている。

この方法には大きな弱点がある。軌道を時刻の関数として計画するには、動き出して何秒後に身体のどこが地面と衝突するか、事前に正確に分かっていることが必要なのである。歩きながら注意深く観察すると、世界は驚くほど変化に富んでおり、事前に全ての情報を知るなど不可能ということに気付くだろう。にもかかわらず、我々は多少のことでは転んだりせず歩行を継続できる。根本的に制御方法が違っているのである。目標軌道が不要な制御器は、どうすれば設計できるだろうか。

4. 重心-反力中心モデル

運動方程式 (1) を実際に求めるためには、人 (ロボット) の質量分布と仮想関節を含む姿勢が正確に分かっていなければならない。当然ながら仮想関節にはエンコーダ等を取り付けることはできないため、加速度計や角速度計を用いた体幹部姿勢の高精度推定技術 [14] が必要になる。ロボット質量特性の同定 [15] も簡単な計算ではない。それ以上に難易度が高いのが J_{ki} の計算で、なぜならば 3 章で述べた通り、どの時刻にどこに接触点が現れるかを前もって知ることはほとんど不可能だからである。したがって、この詳細な運動方程式に基づいて制御器を設計することは、絶望的なまでに難しい。

この困難さに挑む切り口を考えるために、式 (1) をもう少し注意深く眺めてみよう。駆動力が 0 となっている行は、実は次と等価である。

$$m(\ddot{\mathbf{p}} + \mathbf{g}) = \mathbf{f} \quad (3)$$

$$(\mathbf{p}_Z - \mathbf{p}) \times \mathbf{f} + \mathbf{n}_Z = \mathbf{n} \quad (4)$$

ただし $\mathbf{p} = [x \ y \ z]^T$ は重心の位置ベクトル、 $\mathbf{g} = [0 \ 0 \ g]^T$ は重力加速度ベクトル ($g = 9.8[\text{m/s}^2]$)、 $\mathbf{f} = [f_x \ f_y \ f_z]^T$ は全外力の合力、 $\mathbf{p}_Z = [x_Z \ y_Z \ z_Z]^T$ は反力中心 (地面から受ける全反力の圧力中心、この点まわりのトルク (力のモーメント) の水平成分が 0 となることから Zero-Moment Point=ZMP [16] とも呼ばれる)、 $\mathbf{n}_Z = [0 \ 0 \ T_Z]^T$ は反力中心まわりに働く全反トルク、 \mathbf{n} は重心まわり角運動量変化率である。ここで、前後方向を x 軸、左右方向を y 軸、鉛直方向を z 軸とした。

式 (4) は、良く知られているように不可積分な非ホロノミック拘束条件であるが、ここでは運動中の重心まわり角運動量変化は、重心の並進による反力中心ま

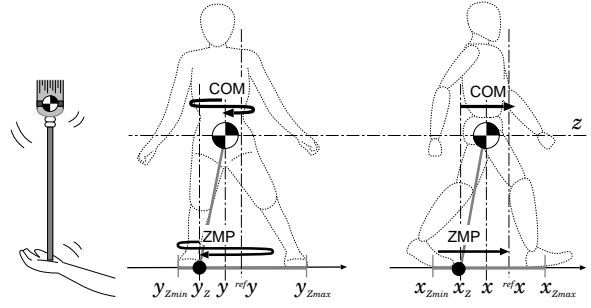


図 7 全身の振る舞いを重心と反力中心の巨視的な関係 逆さにしたほうきの先端と支点の関係で近似する。

わりの角運動量変化に比べて無視できると仮定しよう。 n_Z の水平方向成分がともに 0 となることに注意すれば、式 (3) を代入することで近似的に次式を得る [17]。

$$\ddot{x} = \omega^2(x - x_Z) \quad (5)$$

$$\ddot{y} = \omega^2(y - y_Z) \quad (6)$$

$$\omega \equiv \sqrt{\frac{\ddot{z} + g}{z - z_Z}} \quad (7)$$

これは、あたかも図 7 左に示す逆さにしたほうき (倒立振り子と呼ばれる) のように、反力中心を操作量として重心が制御可能であること、およびこの重心と反力中心との巨視的な関係こそが不安定性の根源であることを示唆している (残りの関節に関する局所的な力学は、適切な局所フィードバックを施せば安定化は難しくない [18, 19])。

さらに、接触点においては十分な摩擦が働くと仮定し、式 (2) のうち垂直抗力に関する条件のみ考える。これを、反力中心 \mathbf{p}_Z は接触点群が作る領域 (支持領域) 内にしか存在できない、という制約に読み替えよう²。支持領域は、ある水平面上の二次元凸領域となるが、簡単のため、図 7 のように前後方向と左右方向に投影・分離できるとして次のように表す。

$$x_{Zmin} \leq x_Z \leq x_{Zmax} \quad (8)$$

$$y_{Zmin} \leq y_Z \leq y_{Zmax} \quad (9)$$

以上で得たモデルを、重心—反力中心モデルと呼ぼう。

5. 力学変容による二脚運動の統一的理解

重心—反力中心モデルによって、とりわけ大自由度にまつわる難しさが大きく低減する。重心も反力中心も、また支持領域も 3 次元世界と直接的に結びついているので、理解は容易である。一方、劣駆動系、構造可変系にまつわる難しさは依然として残っている。また一口に (二脚) 運動と言っても、両足を踏ん張って倒れないようにする、倒れそうになったら咄嗟に足を踏み出す、あるいは交互に足を踏み替えて移動するなど様々であり、さらにこれらの運動をどのように遷移すれば良いのか、というもう一段上位の議論も必要になる。結局のところ、現在の支持領域内で反力中心を

²このことは、冒頭に示した例と同様の論理で証明できる

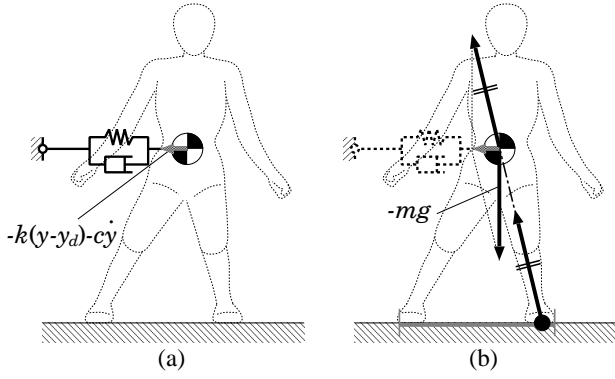


図 8 安定化の基本は復元力．(a) 空中のある点にはばね・ダンパでつながっていれば、復元力が働く．(b) 実際には、これと等価な反力を反力中心の操作によって得る．重力を打ち消す力も含まれることに注意．

操作し、姿勢を変化させ、それによって支持領域が変形する、というサイクルの中に、個々の運動制御器をどう組み込むかが問題になる．

最も基本となる、立位を維持（安定化）する制御から考えよう [20]．安定化の基本は復元力である．仮に重心が空間中のある点とばねでつながっているならば、その点からの重心のずれを補償するように復元力が働く．ばねだけだと振動してしまうが、図 8 (a) のようにダンパも一緒に繋がっているならば振動は減衰する．

簡単のために y 軸方向の運動のみを考えよう．仮に点 y_d と重心がばね定数 K [N/m] のばね、ダンパ定数 C [N/(m/s)] のダンパでつながっているならば、重心には次のような力 f_y が加えられる．

$$f_y = -K(y - y_d) - C\dot{y} \quad (10)$$

これを式 (3) の y 成分に代入すれば、次式が得られる．

$$m\ddot{y} = -K(y - y_d) - C\dot{y} \quad (11)$$

もちろん、このような f_y を与えてくれるばね・ダンパは実際には存在せず、地面の蹴りによって ^{あたか} 恰もこのようなばね・ダンパがあるかのような効果を得るのである．天下り的だが、反力中心の目標位置 \tilde{y}_Z を次の式で与えよう³．

$$\tilde{y}_Z = y_d + k_1(y - y_d) + k_2\dot{y} \quad (12)$$

$y_Z = \tilde{y}_Z$ として式 (6) に代入すれば、次式を得る．

$$\ddot{y} = -\omega^2(k_1 - 1)(y - y_d) - \omega^2 k_2 \dot{y} \quad (13)$$

式 (13) と (11) を見比べれば、この制御が、ばね定数 $K = m\omega^2(k_1 - 1)$ [N/m]、ダンパ定数 $C = m\omega^2 k_2$ [N/(m/s)] であるばね・ダンパを重心につないだことに相当するとわかるだろう．

y_Z は制約条件 (9) を満たさなければならないので、

³ このような制御を行うためには、センサを使って $y - y_d$ や \dot{y} の情報を獲得することが必要で、それ自体も難しい問題をはらんでいるが、いまはこれらは計測可能であるとする．

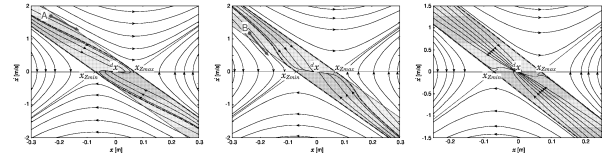


図 9 制御器による重心の振る舞いの違い．(左) ばねが弱過ぎる場合．図の点 A からスタートした場合、頑張れば安定化できるのにこの制御器では倒れてしまう．(中) ばねが強過ぎる場合．点 B からスタートした場合、放っておけば安定化できるのにこの制御器では倒れてしまう．(右) 適切なばねを選んだ場合．物理的に安定化できる可能性のある状態からスタートした場合、必ず安定化される．

\tilde{y}_Z を次のように修正して与える．

$$y_Z = \begin{cases} y_{Z\max} & (\tilde{y}_Z > y_{Z\max} \text{ のとき}) \\ \tilde{y}_Z & (y_{Z\min} \leq \tilde{y}_Z \leq y_{Z\max} \text{ のとき}) \\ y_{Z\min} & (\tilde{y}_Z < y_{Z\min} \text{ のとき}) \end{cases} \quad (14)$$

この結果何が起こるのかを、相図を使って説明しよう．

相図は次のような意味を持っている．式 (12) (14) のように反力中心を決めると、式 (6) に従って \ddot{y} が決まる．つまり、ある y と \dot{y} の組に対して \ddot{y} が自動的に決まり、それが微小時間の間に積分されて \dot{y} 、 y が更新され、また新たな \ddot{y} が自動的に決まる．この繰り返しは重心の振る舞いである．横軸に y 、縦軸に \dot{y} をとってこの振る舞いをプロットしていくと、さながら海流図のような絵ができ、インクを一滴たらすようにある初期状態 (y, \dot{y}) を与えたら、その後の軌跡が海流のって浮かび上がるわけである．

図 9(左) は、設定したばね定数が弱過ぎる場合の相図である．濃い灰色の領域は、 (y, \dot{y}) がその内部からスタートした場合安定化される、つまり最終的にちゃんと y_d に辿り着く領域（安定領域）を表している．図中の点 A からスタートした場合、実は頑張れば踏み止まれるのだが、このばねでは弱過ぎるために y_d からどんどん遠ざかって倒れてしまう．図 9(中) は逆に、設定したばね定数が強過ぎる場合の相図である．図中の点 B からスタートした場合、実は放っておけば倒れずに済むのだが、ばねが強過ぎるために勢い余って倒れてしまう．適切なばね定数を選べば⁴、安定化できる可能性のある状態からスタートした場合、必ず安定化できることが分かった．図 9(右) の相図はその一例を示したものである．なお、このときの安定領域の外は、どのようなばねを設定したとしてもそのままでは物理的に安定化できない領域であり、重心の状態がここに陥った場合、足を踏み出さなければならない．次にこの足の踏み出し制御 [21] を考えよう．

図 9(右) をもう一度見てみると、ばね定数を最適なものに選んだ場合、安定領域は支持領域の両端を通る 2 本の直線のみによって定まっていることが分かる．例えば重心の状態 (y, \dot{y}) が図 10(左) の点 C にあるとき、このままでは矢印を辿って倒れていってしまうが、倒

⁴ 「適切なばね定数」を選ぶ方法の説明は元の文献 [20] に委ねるが、定性的に言えば、「重力によって倒れる動きをキャンセルする」ような値が最適である．

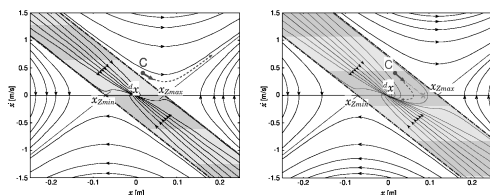


図 10 足の踏み出しと重心の振る舞い．(左) 安定領域外の点 C からスタートすると、このままでは重心は矢印をたどって倒れてしまうが、(右) 足を踏み出して点 C を含むよう安定領域を変形してやれば再び安定化できる．

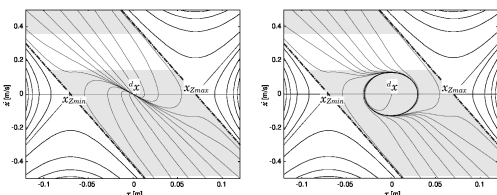


図 11 立位制御から自励振動への変化の様子．立位制御器 (左) を徐々に変形して周期的な重心の揺動を自律的に起こすと、相図の中に円 (楕円) が現れる (右) ．

れる側にある足を少し踏み出して同図 (右) のように安定領域を上げ点 C を中に取り込めば、安定化することができる．もちろん話はそれほど簡単ではなく、1 章の例で見たように、踏み出し制御では一時的に安定な状態を自ら崩す、矛盾をはらんだ複雑な制御が求められる．緊急時における故意の不安定化、そして安定領域を拡大した後の安定化への無撞着な復帰が必要となる．詳しくは元の文献 [21] を参照されたい．

緊急時でなく、自らの意志で足を踏み替えて移動するにはどうすれば良いだろうか．関節角がなす身体の内部空間が有界であるのに対し、外部空間はほぼ無限の広がりを持つから、定常歩行は自ずと左右足を交互に踏み替える周期的な運動になる．一つところに立ち続ける制御と、足を交互に踏み替える制御 [22] は、明らかに性質を異にする．立位維持できている場合、重心は平衡安定状態にあり、このとき反力中心は重心の直下、すなわち両足の間にある．これも 1 章の例で見た通り、このままでは片足を持ち上げることができない．反力中心が両足裏を交互に往復し、かつ転倒せずに継続する非平衡安定状態を形成する必要がある．

復元力を発生するばね係数はそのままに、ダンパ要素を徐々に変化させて、あるところを境に符号反転するように設定すると、その境目に安定な自励振動 (リミットサイクル) を生じさせることができる．相図の上では円 (楕円) が現れる．この様子を図 11 に示す．リミットサイクルから離れたところでは、元の立位制御の安定領域が保持されていることが分かる．

この振動に同期して、両足の昇降を制御したい．同期と言うからには、振動の位相情報をどこからか得なければならない．一方、足を持ち上げるタイミングは、反力中心が足裏に入っているか否かという空間的情報に基づいて判定する必要がある．この空間的情報を含む位相情報は、反力中心の位置と重心の速度から定義するのが合理的であることが分かった．以上の詳細は元の文献 [22] を参照されたい．

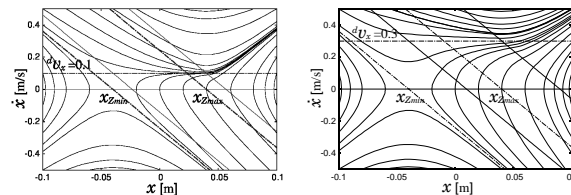


図 12 平衡安定系から速度追従系へと変化した様子．

いよいよ歩行による移動 [23] を議論しよう．両足の踏み替えにおいて非平衡安定状態 (安定リミットサイクル) を形成する必要があったのは、立位安定状態において重心の直下に接触点がなかったからである．一方、身体を側方から見た面に投影すると、立位安定状態において重心直下に接触点がある (図 7 参照) ．したがって、前後方向の移動においては新たに非平衡安定状態を形成する必要はない．これまで議論した通り、支持領域の変形は、反力中心との整合さえとってやれば、左右方向の運動における周期的な踏み替えによって勝手に起こる．新たに考えるべき問題は、これまで空間上のある点まわりで重心を安定化していた制御器を、点ではなくある目標速度に追従させるように変形すること、およびそれを継続できるよう足の着地位置を決定することである．これらは実はそれほど難しい．前者の問題は、ばね要素を無くせば (つまり式 (13) において $k_1 = 1$ とすれば) 解決する．後者の問題は、先に議論した転倒防止のための足踏み出し位置決定方法がそのまま応用できる．

筆者は、以上の立位制御、緊急時の踏み出し、定常的な両足踏み替え、歩行を含む様々な運動と、それらの間の遷移までも統一的に表現できるような制御器設計の枠組を提案し、力学変容と名付けた．個々の運動における特徴的な振る舞いを予め同一の制御器に埋め込んでおき、運動指令 (重心の目標位置や速度) に応じて自動的にそれらの要素を活性化させる仕組みである．図 13 のように、力学系全体の幾何学的構造が変容するさまを感じて頂ければ幸いである．ロボットへの実装においては、不整地への適応や腕部の協調、障害物の回避など解決すべき問題が幾つかあるが、詳細な軌道計画なしで様々な運動をロバストに実現する基盤技術になると期待している．

6. 構成論的方法で人の運動制御理解に迫る

前章の議論は全てロボットの制御に関するものであり、「このような運動を行うためには制御器はこのようない力学性質を持っていなければならない」という演繹的思考に終始していた．リンク系として表現された人は人型ロボットと区別されない、という立場からすれば、本当に上記の演繹が正しいならば、それは人においても言えていなければならない．ロボットのために設計した制御器が、人の振る舞いまでも良好にモデル化できるだろうか．実際の人の運動を観察・計測し、このことを確認することで、構成論的方法による人の運動理解の議論は閉じる．本章では、このような試みとして筆者らが現在行っている研究 [24] を紹介する．

例えば式 (14) で示した立位制御器が人の振る舞い

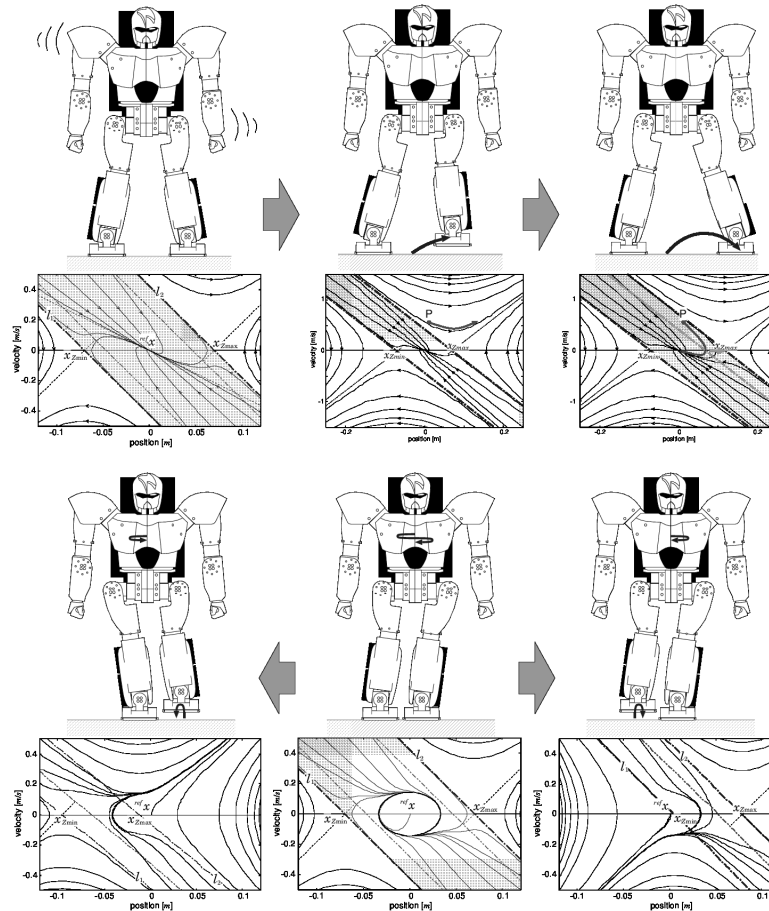


図 13 力学変容—両足立ち，踏み出し，歩行などの運動を統一する制御の枠組み．

をモデル化できるか否かは，人の運動軌跡を多数取得し，それらから式 (14) におけるパラメータを同定すれば判別できる．しかし，同定に十分な数と種類の運動軌跡を得るのはそれほど容易なことではない．精度を高めるためには，相図上のできるだけ広い領域から軌跡を採取する必要がある．しかし，人の運動制御系においては無意識下で常に強力な安定化器が機能しており，図 14 のように，通常観察されるのは安定平衡点近傍のごく狭い領域のものでしかない．このため，計測には工夫を要する．

運動計測実験のセットアップを図 16 に示す．安定平衡点から離れ，時には不安定な軌跡を得るために，理論上の相図から振る舞いを予測し，補助器具を用いて通常ではなかなかとらない状態まで重心を加速することで，様々な軌跡を得た．その際，加速フェイズの軌跡は反力情報等から特定し除去した．

20 代の健康な男性を被験者として，実際に計測した結果を図 17 に示す．定性的には図 9 との類似が見られる．実際に最小二乗法を施すと，ある運動軌跡群に対しては図 18 のように良好な結果が得られた．一方，図 19 のように良好でない結果を示す運動軌跡群もあり，全ての運動軌跡群に対する制御器同定はまだ行っていない．実験時の統制条件や制御器モデルの見直しを図っているところである．

同様に，重心の左右揺動と両足の交互踏み替えの結果も図 20 に示す．遅めの周期で振動している際には相

図上の重心の軌跡は楕円に近い．一方，周期が短くなると振動の両端が楕円から双曲線に近い形状になる．前章で紹介した制御器では，安定な自励振動が生じているときに相図上に楕円状のリミットサイクルが発現することのみ述べた．実は復元力を決定するばね係数を上げていくと，理論上も振動の両端が双曲線になることが分かっている．したがって，これらの運動においてもモデルとの定性的な一致が見られる．制御器同定は今後行う予定である．

これらの結果から，ロボット工学を起点とした構成論的方法は，人の運動制御を理解するためのアプローチとして有望であると言えよう．運動実験プロトコルや制御器モデルの検討を重ねることで，同定結果の信頼度を向上し，より多くの運動を扱えるようにする試みを，現在も継続中である．

7. おわりに

本稿で紹介した方法は，たとえば筋肉や神経の活動を計測することなしに，それらが構成している制御器の部分ないし全体を数学的に演繹できるか，という問いに答えるものである．

歩行のようなリズム的な運動の発現に当たっては，脊髄内部の神経振動子 (Central Pattern Generator: CPG) と呼ばれる素子が寄与していることが知られており，その数学モデルを用いて歩行シミュレーションを行った例 [25, 26, 27] も多くある．しかしこれらの研

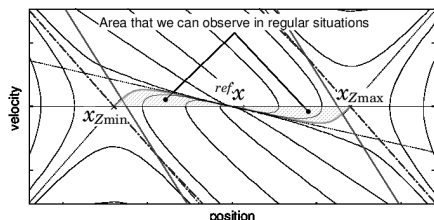


図 14 通常観察される人の運動は、安定平衡点近傍のごく狭い領域のもの。

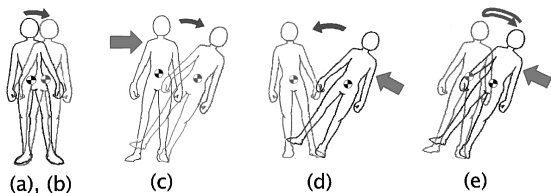
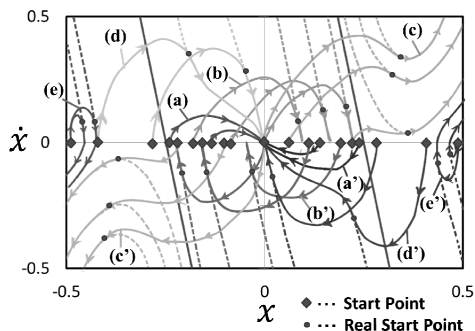


図 15 安定平衡点から離れた運動軌跡を得るために、理論上の相図から振る舞いを予測し、所望の初期状態まで重心を加速する予備動作を各試行に付加する。

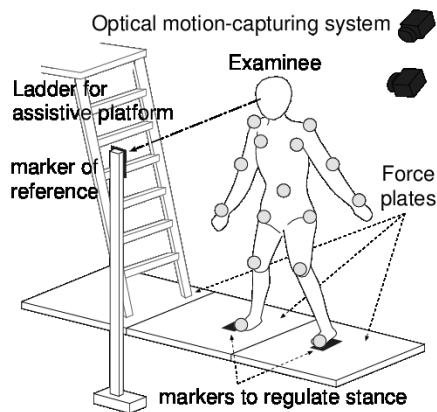


図 16 運動計測実験のセットアップ。相図上の広い範囲の運動軌跡を得るために、補助器具を用いて重心を加速する。

究は、なぜそもそもこのような振動素子が制御に必要なのか、数十個もの素子がどのように協調し、全体として意味のある振る舞いを実現しているのか、振動的でない振る舞いの制御器とどう並立しているのか、などの問いに答えるものではなかった。このように考えると、敢えて人の運動制御系を部品に分解せず、数学的あるいは力学的必然性に従って考察を行うことの有効性がご理解頂けるだろう。

人の運動の軌跡のみを眺めるのではなく、それを出した制御器の性質・構造を同定できれば、医療診断、スポーツやリハビリテーション等における新たな評価

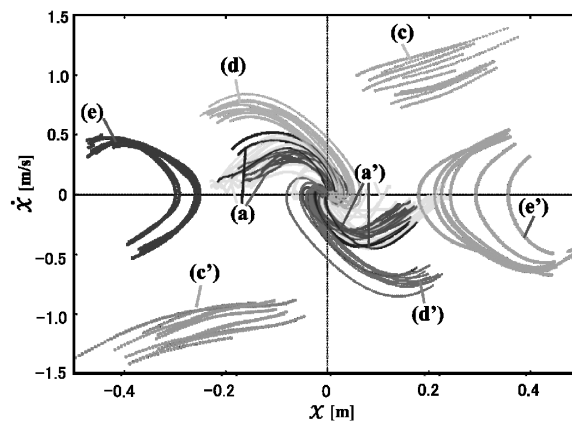


図 17 立位制御運動の計測結果。

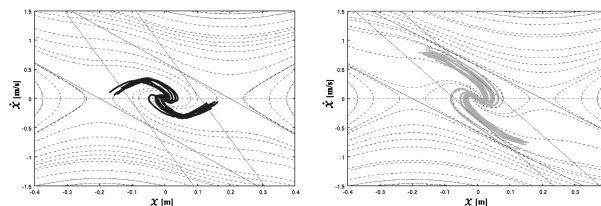


図 18 計測結果に最小二乗法を施し同定された力学系の相図。これらの結果では同定結果は比較的良好である。

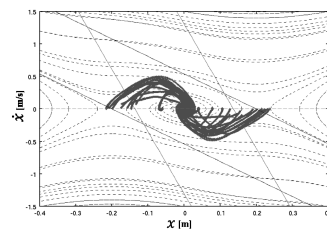


図 19 別の運動軌跡群で同定した（あまり良好でない）結果。

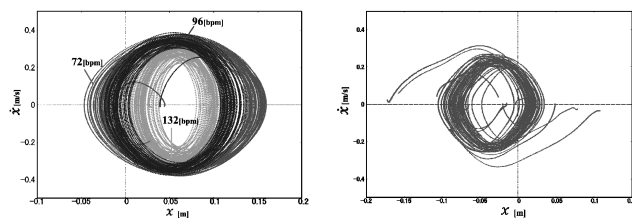


図 20 (左) 重心の揺動、(右) 両足交互踏み替えの計測結果。

基準の策定につながる可能性がある。また、この方法によって人の運動制御モデルを数学的に陽な形で得ることは、人をループに含むシステムを定量的に議論する上で有用である。この技術によって、義肢装具、ヒューマンインタフェースから生産システム・社会システムまで幅広く含む人工物の解析・設計に貢献したい。

謝辞

本研究は、科学研究費補助金若手研究 (A) 「力学変容系としての人の運動理解と次世代人型ロボット制御の基盤構築」(課題番号:22680018) (研究代表者: 杉原知道) の支援を受けた。

運動計測に当たっては、東京大学情報理工学系研究科知能機械情報学専攻サイバー・ビヘイビアスタジオをお借りし、同専攻中村・高野研究室の中村仁彦教授、

鮎澤光氏, 池上洋介氏, 村井昭彦氏ほか多くの方々に
ご協力頂いた。ここに謹んで謝意を示す。

参考文献

- [1] Akihiko Murai, Katsu Yamane, and Yoshihiko Nakamura. Modeling and Identification of Human Neuromusculoskeletal Network Based on Biomechanical Property of Muscle. In *Proceedings of the 30th IEEE/EMBS Annual International Conference*, pp. 3706–3709, 2008.
- [2] Yoshihiko Nakamura and Katsu Yamane. Dynamics Computation of Structure-Varying Kinematic Chains and Its Application to Human Figures. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 16, No. 2, pp. 124–134, 2000.
- [3] Yasutaka Fujimoto and Atsuo Kawamura. Simulation of an Autonomous Biped Walking Robot Including Environmental Force Interaction. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, Vol. 5, No. 2, pp. 33–41, 1998.
- [4] 加藤一郎. 2 足歩行ロボット (WABOT-1) の開発. バイオメカニズム学会 (編), バイオメカニズム, 第 2 巻, pp. 173–174. 東京大学出版会, 1973.
- [5] Kazuo Hirai. Current and Future Perspective of Honda Humanoid Robot. In *Proceeding of the 1997 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 500–508, 1997.
- [6] 長阪憲一郎, 近野敦, 西脇光一, 北川知伸, 杉原知道, 稲葉雅幸, 井上博允. ダイナミックヒューマノイド H5 の開発. 第 16 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 837–838, 1998.
- [7] Tomomichi Sugihara, Kou Yamamoto, and Yoshihiko Nakamura. Hardware design of high performance miniature anthropomorphic robots. *Robotics and Autonomous System*, Vol. 56, pp. 82–94, 2007.
- [8] Tomomichi Sugihara and Yoshihiko Nakamura. Boundary Condition Relaxation Method for Stepwise Pedipulation Planning of Biped Robots. *IEEE Transaction on Robotics*, Vol. 25, No. 3, pp. 658–669, 2009.
- [9] A. Takanishi, Y. Egusa, M. Tochizawa, T. Takeya, and I. Kato. Realization of Dynamic Walking Stabilized with Trunk Motion. In *Proceedings of ROMANSY 7*, pp. 68–79, 1988.
- [10] 長阪憲一郎. 動力学フィルタによる人間型ロボットの全身運動生成. 博士論文, 東京大学大学院工学系研究科, 2000.
- [11] Shuuji Kajita, Fumio Kanehiro, Kenji Kaneko, Kiyoshi Fujiwara, Kensuke Harada, Kazuhito Yokoi, and Hirohisa Hirukawa. Biped Walking Pattern Generation by using Preview Control of Zero-Moment Point. In *Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics & Automation*, pp. 1620–1626, 2003.
- [12] Ken'ichiro Nagasaka, Yoshihiro Kuroki, Shin'ya Suzuki, Yoshihiro Itoh, and Jin'ichi Yamaguchi. Integrated Motion Control for Walking, Jumping and Running on a Small Bipedal Entertainment Robot. In *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 3189–3914, 2004.
- [13] Toru Takenaka, Takashi Matsumoto, and Takahide Yoshiike. Real Time Motion Generation and Control for Biped Robot – 1st Report: Walking Gait Pattern Generation –. In *Proceedings of 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1084–1091, 2009.
- [14] Ken Masuya, Tomomichi Sugihara, and Motoji Yamamoto. Design of Complementary Filter for High-fidelity Attitude Estimation based on Sensor Dynamics Compensation with Decoupled Properties. In *Proceedings of 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 606–611, 2012.
- [15] Ko Ayusawa and Yoshihiko Nakamura. Identification of Standard Inertial Parameters for Large-DOF Robots Considering Physical Consistency. In *Proceedings of 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 6194–6201, 2010.
- [16] M. Vukobratović and J. Stepanenko. On the Stability of Anthropomorphic Systems. *Mathematical Biosciences*, Vol. 15, No. 1, pp. 1–37, 1972.
- [17] 水戸部和久, 矢島克知, 那須康雄. ゼロモーメント点の操作による歩行ロボットの制御. 日本ロボット学会誌, Vol. 18, No. 3, pp. 359–365, 2000.
- [18] 宮崎文夫, 有本卓. 特異摂動法による多自由度二足歩行系の解析. 計測自動制御学会論文集, Vol. 15, No. 4, pp. 498–504, 1979.
- [19] 古荘純次, 森塚秀人, 増淵正美. 局所フィードバックの概念を考慮した 2 足歩行の低次元モデル. 計測自動制御学会論文集, Vol. 17, No. 5, pp. 596–601, 1981.
- [20] Tomomichi Sugihara. Standing Stabilizability and Stepping Maneuver in Planar Bipedalism based on the Best COM-ZMP Regulator. In *Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Robotics & Automation*, pp. 1966–1971, 2009.
- [21] Tomomichi Sugihara. Reflexive Step-out Control Superposed on Standing Stabilization of Biped Robots. In *Proceedings of the 2012 IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (to appear)*, pp. –, 2012.
- [22] Tomomichi Sugihara. Consistent Biped Step Control with COM-ZMP Oscillation Based on Successive Phase Estimation in Dynamics Morphing. In *Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Robotics & Automation*, pp. 4224–4229, 2010.
- [23] Tomomichi Sugihara. Biped Control To Follow Arbitrary Referential Longitudinal Velocity based on Dynamics Morphing. In *Proceedings of the 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1892–1897, 2012.
- [24] Daishi Kaneta, Nobuyuki Murai, and Tomomichi Sugihara. Visualization and Identification of Macroscopic Dynamics of a Human Motor Control Based on the Motion Measurement. In *Proceedings of the 2012 IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (to appear)*, pp. –, 2012.
- [25] Gentaro Taga. Self-organized control of bipedal locomotion by neural oscillators in unpredictable environment. *Biological Cybernetics*, Vol. 65, pp. 147–159, 1991.
- [26] Osamu Katayama, Yasuo Kurematsu, and Shinzo Kitamura. Theoretical Studies on Neuro Oscillator for Application of Biped Locomotion. In *Proceedings of the 1995 IEEE International Conference on Robotics & Automation*, pp. 2871–2876, 1995.
- [27] 長谷和徳, 山崎信寿. 神経振動子と遺伝的アルゴリズムを用いた 実 2 足歩行類似運動の生成. 計測自動制御学会論文集, Vol. 33, No. 5, pp. 448–454, 1997.