解 説

人型ロボットの歩行制御

Walking Control of a Humanoid Robot

山 本 江* *東京大学

Ko Yamamoto* *The Univ. of Tokyo

1. は じ め に

人型ロボットの歩行制御の研究は古くから行われているが、人間と同程度に安定でロバストな歩行制御はいまだに実現できておらず、現在でも挑戦的課題である。歩行制御がロボティクス、制御工学的に難しい理由として、人型ロボットが

- (1) 多自由度系であり、
- (2) 非線形な力学を有すること、
- (3) 劣駆動浮遊リンク系であること、
- (4) 接触力に関する拘束条件が存在すること、
- (5) 構造可変系であり接触力の拘束条件が不連続に変化すること、

等が挙げられる。

特に上記 (4) と (5) に関連して、足の着地・離床の結果として接触力の拘束条件が変化すると同時に、拘束条件を満たしながら接触力を変化させて足の着地・離床を制御する必要がある。このように因果関係が複雑に交じり合った問題を解く必要があり、これまで数多くの研究が行われてきた。その中でも (1) に関連して低次元なモデルで力学を近似し、さらに (2) に関連して力学を線形化するアプローチが広く用いられてきた。本稿ではまず、低次元な力学モデルとして倒立振り子モデル [1]、重心・ZMP モデル [2] [3] を用いた制御について解説する。

一方で、(3)、(4)、(5) と行くに従って制御の問題としては難しくなり、なかなか統一的方法は確立されていない。2000 年代半ば頃から、拘束条件下における有効な制御方法であるモデル予測制御が応用されるようになってきた [4]。本稿では、その概略を説明する。また、統一な制御則の構築が難しいことから、運動を様々な運動単位に分割し、それらを統合する試みも行われている。接触力に対する拘束条件をどう扱うかが鍵となり、本稿では拘束条件を満たす状態空間上の領域を扱う方法 [5]~[7] について説明し、それに基づいて異種運動を統合する試みを紹介する。

2. 低次元力学に基づく制御

2.1 力学の低次元化と倒立振り子

複雑な全身モデルではなく、低次元化された簡単なモデルを使って人型ロボットの歩行を制御しようという考え方は古くからあり、特に低次元モデルとして倒立振り子が採用されてきた [8] [9]。力学的な低次元化としては、特異摂動法によるモード分解により倒立振り子のモードが得られることが Miyazaki & Arimoto [10] によって示された。Furusho & Masubuchi [11] は各関節にフィードバック制御を適用した場合に倒立振り子のモードが現れることを示した。Kajita ら [1] は、倒立振り子の質点の動きが矢状面のある直線上 (三次元空間ではある平面上) に拘束される場合に運動方程式が線形化されることを示し、これを線形倒立振り子モード (linear inverted pendulum mode) とよんだ。

2.2 倒立振り子の運動

図 1 (a) の倒立振り子の運動方程式は次式のように表せる。

$$\ddot{\theta} = \omega^2 \theta, \quad \omega := \sqrt{\frac{g}{h}} \quad (1)$$

ただし、 θ は振り子の傾き角、 h は振り子の重心までの長さであり、簡単のため $\sin \theta \simeq \theta$ として線形近似した。特に、重心の水平方向の移動量を x_G とすれば、 $x_G = h \sin \theta \simeq h\theta$ であるから、

図 1 倒立振り子モデルと位相平面内の挙動

原稿受付 2017 年 12 月 19 日

*〒 113-8656 文京区本郷 7-3-1

*Bunkyo-ku, Tokyo

図2 倒立振子モデルに基づく歩行制御の基本的な考え方

$$\ddot{x}_G = \omega^2 x_G \quad (2)$$

と書ける。ただし、倒立振子の支持点を $x_G = 0$ とする。状態変数を $\mathbf{x} = [x_G \ \dot{x}_G]^T$ とし状態方程式表現に書き直すと次式が得られる。

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x}, \quad \mathbf{A} := \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \omega^2 & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

この状態遷移行列 $\mathbf{A}$ は固有値として $\lambda = \pm\omega$ を持ち、それぞれに対応する固有ベクトルは $\mathbf{a}_1 = [1 \ -\omega]^T$, $\mathbf{a}_2 = [1 \ \omega]^T$ と選べる。 $\mathbf{a}_1$ が安定モード、 $\mathbf{a}_2$ が不安定モードを表し、 $x_G - \dot{x}_G$ の位相平面における挙動は図1(b)のように表せる。ここで、変換行列

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{\omega} \\ 1 & \frac{1}{\omega} \end{bmatrix} \quad (4)$$

を用いて式(3)を同値変換すると、次式が得られる。

$$\dot{\hat{\mathbf{x}}} = \hat{\mathbf{A}}\hat{\mathbf{x}}, \quad \hat{\mathbf{A}} = \mathbf{T}^{-1}\mathbf{A}\mathbf{T} = \begin{bmatrix} -\omega & 0 \\ 0 & \omega \end{bmatrix} \quad (5)$$

$\hat{\mathbf{x}} = [x_1 \ x_2] = \mathbf{T}^{-1}\mathbf{x}$ とおくと、 x_1 が安定モード、 x_2 が不安定モードに相当する。Takenakaら[12]は、 x_1 を convergent component of motion (CCM), x_2 を divergent component of motion (DCM) とよんだ。

2.3 軌道エネルギー[13]

式(2)の両辺に $\dot{x}_G$ をかけて、整理すると次式が得られる。

$$\frac{dE}{dt} = 0, \quad E := \frac{1}{2} (\dot{x}_G^2 - \omega^2 x_G^2) \quad (6)$$

すなわち、 E が一定であることが導ける。Kajitaら[13]は E を軌道エネルギーとよんだ。図2(a)に位相平面内の挙動と軌道エネルギーの関係を示す。

(1) $E > 0$ のとき、重心は $x_G = 0$ を超えられる

(2) $E < 0$ のとき、重心は $x_G = 0$ を超えられない

(3) $E = 0$ のとき、重心は境界上 (DCM または CCM) を移動する

特に、(3)の性質は古くは Gubina & Hemami [14] によっても指摘されている。

以降、 $+x$ 方向の歩行運動を考えても一般性を失わない。図2(b), (c)に倒立振子モデルに基づく歩行制御の基本的な考え方を示す。図2(b)のように重心の初期状態が $x_G < 0$, $\dot{x}_G > 0$ である場合、 $E > 0$ の範囲に重心があれば $x_G = 0$ を超えて前進することができる。一方で、重心は $x_G = 0$ を超えると無限遠へ発散する。これを防ぐには、図2(c)のように足の着地と同時に支持足を踏みかえて、 x 軸の原点を新たな支持足に再設定すればよい。

支持足の交換は瞬時に行えるとの仮定の下、Kajitaら[13]は先に歩幅を決めて、遊脚着地時に重心位置を調整することで歩行を実現する方法を提案した。一方、Miura & Shimoyama [15]は遊脚の股関節トルクを制御することで歩幅を調整し、歩行を実現する方法を提案した。このように、歩行の実現には重心の安定化と着地位置・タイミングの制御が重要になる。

2.4 Capture Point [16]

重心が現在位置 x_G , 速度 $\dot{x}_G$ で運動している場合、停止するために必要な着地位置 ξ を Prattら[16]は **capture point** (CP) と定義した。CPは次式で与えられる。

$$\xi = x_G + \frac{\dot{x}_G}{\omega} \quad (7)$$

CPに足を着地させた場合、図2(d)のように着地後の座標系で重心はCCM上を原点へ移動し、結果、停止する。

ロボットが外乱を受けたとしてもCPが遊脚の可動範囲内にあれば、そこに足を踏み出すことで転倒を回避できる。一方で、CPが可動範囲の外にある場合は一歩では停止することはできないため、複数歩の足の踏みかえが必要になる。この観点から、CPの考え方は N 歩の踏みかえを考慮

した N -step capturability [17] へと拡張されている。

3. ZMP を入力とした制御とモデル予測制御

3.1 接触力に関する拘束条件と ZMP

人型ロボットと環境との間の接触力には、垂直抗力の非負条件と摩擦力に関する拘束条件が存在する。2 足歩行を扱う場合には、主に床面との接触を考える場合が多い。本稿では基本的な解説を目的とし、水平な床面上に限定して議論する。

床面との接触領域に分布する圧力の中心点は center of pressure (COP) とよばれる。Vukobratović & Stepanenko [18] は圧力分布により発生する合モーメントの水平成分が 0 となる点を zero moment point (ZMP) とよんだ。COP と ZMP は一致する。

3.2 ZMP を入力とした制御 [2] [3]

ZMP を変化させることは床反力の分布を変化させることに等しい。「ZMP を適切に変化させることで重心を安定に制御する」という考え方は水戸部ら [2] によって提案された。重心周りの慣性モーメントを無視すると、重心の水平成分に関する運動方程式は

$$\ddot{x}_G = \omega^2(x_G - x_Z) \quad (8)$$

ただし、 x_Z は床面上に定義された ZMP の位置を示す。これは重心・ZMP モデルとよばれる。式 (2) と比較すると、原点に固定していた倒立振子の支持点を ZMP に置き換えたものとみなせる。すなわち、これは図 3 右のような台車型の倒立振子に相当する [3]。近年では、式 (8) を線形倒立振子モデル (linear inverted pendulum model, LIPM) とよぶことが多い。

状態変数を $\mathbf{x} = [x_G^T \dot{x}_G^T]^T$ 、制御入力を $u = x_Z$ とすれば、式 (8) は以下の状態方程式表現に書き直せる。

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}u, \quad \mathbf{B} := \begin{bmatrix} 0 \\ -\omega^2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

図 3 重心・ZMP モデルと台車型倒立振子

$\mathbf{x}, u$ に関する目標値 $\mathbf{x}_{ref}, u_{ref}$ に対し、以下のような状態フィードバックより重心を安定化することができる。

$$u = u_{ref} + \mathbf{F}(\mathbf{x}_{ref} - \mathbf{x}) \quad (10)$$

目標値 $\mathbf{x}_{ref}, u_{ref}$ の設計法は田崎先生による解説「人型ロボットの運動計画」に詳しい。最も単純な例として、 $\mathbf{x}_{ref} = [x_0 \ 0]^T$, $u_{ref} = x_0$ とおけば、重心を x_0 に安定化させる制御 (レギュレータ) となる。

状態フィードバック・ゲイン $\mathbf{F}$ は最適レギュレータとしても設計できるが、後で説明するように、次式のような CP のフィードバック則として構成すると、安定化領域を大きくとれる。

$$u = u_{ref} + \alpha(\xi_{ref} - \xi) \quad (11)$$

ただし、 α はフィードバックゲインであり、 $\mathbf{F}, \alpha$ の関係は $\mathbf{x}, \xi$ の関係から次式のようになる。

$$\mathbf{F} = \alpha \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{\omega} \end{bmatrix} \quad (12)$$

3.3 モデル予測制御 [4]

ZMP は支持多角形内に存在するという拘束条件が存在するため、制御においてその拘束条件を考慮する必要がある。拘束条件下における有効な制御方法であるモデル予測制御 [19] を用いることが Wieber ら [4] によって提案された。ここでは、最も単純な例として ZMP の制約が次式で与えられている場合を考える。

$$x_{\min} \leq u \leq x_{\max} \quad (13)$$

ただし、 $x_{\min} < 0$, $x_{\max} > 0$ とする。式 (9) を離散化すると、次式を得る。

$$\mathbf{x}[k+1] = \mathbf{A}_d\mathbf{x}[k] + \mathbf{B}_d u[k] \quad (14)$$

現在時刻を $k = 0$ とし、将来の時刻 $k = 1, \dots, n$ における状態の系列

$$\mathcal{X} := [\mathbf{x}[1]^T \ \dots \ \mathbf{x}[n]^T]^T \quad (15)$$

を式 (14) から求めると、以下のようにまとめられる。

$$\mathcal{X} = \mathbf{A}\mathbf{x}[0] + \mathbf{B}\mathcal{U} \quad (16)$$

$$\mathbf{A} := \begin{bmatrix} \mathbf{A}_d^T & \dots & \mathbf{A}_d^{nT} \end{bmatrix}^T, \quad (17)$$

$$\mathbf{B} := \begin{bmatrix} \mathbf{B}_d & \mathbf{O} & \dots & \mathbf{O} \\ \mathbf{A}_d\mathbf{B}_d & \mathbf{B}_d & \dots & \mathbf{O} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{A}_d^{n-1}\mathbf{B}_d & \mathbf{A}_d^{n-2}\mathbf{B}_d & \dots & \mathbf{B}_d \end{bmatrix}, \quad (18)$$

$$\mathcal{U} := [u[0]^T \ \dots \ u[n-1]^T]^T \quad (19)$$

と書ける．状態や入力の系列 $\mathcal{X}, \mathcal{U}$ に関する目標値をそれぞれ $\mathcal{X}_{ref}, \mathcal{U}_{ref}$ として以下のような二次計画問題を解く．

$$\min_{\mathcal{U}} J = \frac{1}{2} \|\mathcal{X}_{ref} - \mathcal{X}\|_Q^2 + \frac{1}{2} \|\mathcal{U}_{ref} - \mathcal{U}\|_R^2$$

subject to 式 (13) (20)

ただし，あるベクトル $\mathbf{x}$ に対し $\|\mathbf{x}\|_W^2 = \mathbf{x}^T \mathbf{W} \mathbf{x}$ は重み付き二乗ノルムを表し， $\mathbf{Q}, \mathbf{R}$ は正定値対称行列である．得られた入力の系列 $\mathcal{U}$ から現在時刻に相当する $u[0]$ を実際の入力として用いる．さらに，設計変数として足の着地位置を含めて二次計画問題を解くことが Herdt ら [20] によって提案されている．拘束条件を考慮する制御法としてモデル予測制御は非常に強力であり，ZMP の拘束だけでなく摩擦の拘束も考慮することができ，また手足の接触を含んだ動作へも適用されている [21]．

4. 拘束条件下の解析と異種運動の統合

4.1 重心安定化領域と最良重心レギュレータ [5]

式 (10) で表せる制御において，フィードバック・ゲイン $\mathbf{F}$ が次式のように与えられている場合を考える．

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} k_P & k_D \end{bmatrix} \quad (21)$$

また，簡単のため $\mathbf{x}_{ref} = \mathbf{0}, u_{ref} = 0$ として，原点への安定化を考えると，フィードバック系は次式のように得られる．

$$\dot{\mathbf{x}} = \tilde{\mathbf{A}} \mathbf{x}, \quad (22)$$

$$\tilde{\mathbf{A}} := \mathbf{A} - \mathbf{B}\mathbf{F} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \omega^2(k_P + 1) & \omega^2 k_D \end{bmatrix} \quad (23)$$

この行列 $\tilde{\mathbf{A}}$ の固有値 $\tilde{\lambda}$ を計算すると

$$\tilde{\lambda} = \frac{\omega^2 k_D \pm \sqrt{(\omega^2 k_D)^2 + 4\omega^2(k_P + 1)}}{2} \quad (24)$$

固有値 $\tilde{\lambda}$ のいずれも負であればフィードバック系は安定であるから，その条件は次式のようになる．

$$k_P < -1, \quad k_D < 0 \quad (25)$$

ここで，ZMP の拘束条件が式 (13) で与えられているとき，実際に発生できる ZMP は次式のようにまとめられる．

$$u = \begin{cases} x_{\min} & (\mathbf{x} \in S_1) \\ -k_P x_G - k_D \dot{x}_G & (\mathbf{x} \in S_2) \\ x_{\max} & (\mathbf{x} \in S_3) \end{cases} \quad (26)$$

ただし， S_1, S_2, S_3 はそれぞれ以下のように定義される領域である．

図 4 ZMP の拘束下における位相平面図

$$S_1 = \{\mathbf{x} \in \mathbb{R}^2 \mid -k_P x - k_D \dot{x} \leq x_{\min}\}$$

$$S_2 = \{\mathbf{x} \in \mathbb{R}^2 \mid x_{\min} < -k_P x - k_D \dot{x} < x_{\max}\}$$

$$S_3 = \{\mathbf{x} \in \mathbb{R}^2 \mid -k_P x - k_D \dot{x} \geq x_{\max}\}$$

これらの関係を図 4 に示す．領域 S_1, S_2, S_3 の境界線 a, b は傾きが $-(k_P/k_D)$ で，それぞれ点 $(-x_{\max}/k_P, 0)$ および $(-x_{\min}/k_P, 0)$ を通る．各領域での重心の挙動は以下のようにまとめられる．

- S_1 では ZMP は $x_{\min}$ に固定され，2 章で述べた支持点が固定された倒立振子の挙動となる．
- S_2 では，式 (10) のとおりの ZMP を発生させることで重心を「局所的に」制御可能である．
- S_3 では ZMP は $x_{\max}$ に固定され，領域 S_1 と同様に支持点が固定された倒立振子の挙動となる．

図 4 に示すように直線 a, b と ℓ_1, ℓ_2 (CCM に一致する直線) がそれぞれ交点 A, B を持つとき，重心が原点に収束する領域は図の灰色で示したような概形となり，立位安定領域と呼ばれる [5]．

Sugihara [5] は，直線 ℓ_1, ℓ_2 と a, b の傾きが等しくなる，すなわち

$$k_D = \frac{k_P}{\omega} \quad (27)$$

のときに立位安定領域が最大となることを示し，式 (25) (27) を満たすフィードバック制御を最良重心レギュレータとよんだ．図 5 のように， ℓ_1, ℓ_2 で囲まれる領域すべてを立位安定領域とできる．式 (27) を式 (21) に代入すると

$$\mathbf{F} = k_P \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{\omega} \end{bmatrix} \quad (28)$$

となり，これは結果的に式 (12) の α を k_P で置き換えたものとなり，CP のフィードバック制御と等価になる．

4.2 最大出力許容集合 (MOA 集合) [7]

最良重心レギュレータは安定化可能領域を最大化できるが，実際の人型ロボットでそのようなレギュレータを正確

図5 最良重心レギュレータを適用した際の位相平面図

に実現することは難しい。重心のフィードバック・ゲイン $\mathbf{F}$ は関節レベルの制御器にも影響を受ける。このため、任意の $\mathbf{F}$ が与えられたとき、ZMP の拘束条件を満たしながら制御を適用できる領域を最大出力許容集合 (maximal output admissible set, MOA 集合) [23] として求める研究がなされている [7]。

以降、式 (14) の離散時間システムを考える。また、 $\mathbf{F}$ を適用した系 $\tilde{\mathbf{A}}_d = \mathbf{A}_d - \mathbf{B}_d \mathbf{F}$ はリアプノフの意味で安定であると仮定する。まず、関連する項目としてリアプノフだ円体と正の不変集合について説明する。 $\tilde{\mathbf{A}}_d$ に関する離散時間のリアプノフ方程式

$$\tilde{\mathbf{A}}_d^T \mathbf{P} \tilde{\mathbf{A}}_d - \mathbf{P} + \mathbf{Q} = 0 \quad (29)$$

の解 $\mathbf{P}$ に対し、以下のリアプノフだ円体が定義される。

$$\mathbf{x}^T \mathbf{P} \mathbf{x} \leq \rho \quad (30)$$

ただし、 ρ は正の定数である。このとき、任意の $\rho > 0$ に対し、リアプノフだ円体は正の不変集合[†]となる。関連研究として、Manchester ら [6] はリミットサイクルに垂直な超平面上にリアプノフだ円体を定義し、引き込み可能領域 (region of attraction) を求めている。

一般に、

$$\mathbf{z} = \mathbf{C} \mathbf{x} \quad (31)$$

として与えられる出力変数に、拘束条件

$$\mathbf{M} \mathbf{z} \leq \mathbf{v} \quad (32)$$

が存在する場合を考える。すべての $k \geq 0$ において拘束条件を満たすような正の不変集合を **CPI 集合** (constraint positively invariant set) とよび、その中でも最大のものを最大 CPI 集合とよぶ [24]。また、 $\mathbf{x}[k] \in O$ のとき、す

べての $k > 0$ に対して拘束条件を満たす場合、集合 O は出力許容 (output admissible) とよばれ、その中でも最大の集合を MOA 集合とよぶ [19]。MOA 集合は正の不変集合となり、最大 CPI 集合と一致する。

$\tilde{\mathbf{A}}_d$ が漸近安定な場合、MOA 集合は有限回の繰り返し計算により、次式の不等式を満たす集合として求められる [24]。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M} \mathbf{C} \tilde{\mathbf{A}}_d \\ \vdots \\ \mathbf{M} \mathbf{C} \tilde{\mathbf{A}}_d^\ell \end{bmatrix} \mathbf{x} \leq \begin{bmatrix} \mathbf{v} \\ \vdots \\ \mathbf{v} \end{bmatrix} \quad (33)$$

ただし、 ℓ は繰り返しの回数であり、 $\mathbf{F}$ によって大きさが決まる。式 (33) では、 $\mathbf{x}_{ref} = \mathbf{0}$ への安定化を考えていたが、目標値 $\mathbf{x}_{ref}, u_{ref}$ と拘束条件 $\mathbf{M}, \mathbf{v}$ が時間関数で与えられている場合に拡張もできる [7] [22]。例として、ZMP に関する拘束条件を考える場合、式 (31) において、 $\mathbf{C} = -\mathbf{F}$ とすればよい。歩行動作を想定し、ZMP の拘束条件に関する MOA 集合を計算した例を図 6 に示す [22]。前進歩行に合わせて時間的に変化するような MOA 集合が計算される。Yamamoto [7] は、ZMP に関する MOA 集合に基づいて転倒可能性を判断し、運動を切り替えることで転倒を防止する制御を提案した。

一方、式 (31) において

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{w} \end{bmatrix} \quad (34)$$

とおけば、 $\mathbf{z}$ として CP を考えた MOA 集合を考えることもできる [25]。図 7 に直立安定化制御における ZMP, CP の拘束に関する MOA 集合の計算例を示す。点線と実線の領域がそれぞれ ZMP, CP の拘束に関する MOA 集合を表す。図から分かるとおり、ZMP の MOA 集合は CP のものよりも小さくなる。転倒判定基準として考えた場合は、ZMP の MOA 集合はより保守的な判定基準を与える。

式 (33) に含まれる $\tilde{\mathbf{A}}_d$ にはフィードバックゲイン $\mathbf{F}$ が含まれるため、MOA 集合は $\mathbf{F}$ に依存する。直感的には、MOA 集合を最大にする $\mathbf{F}$ が最良重心レギュレータであると言える。

4.3 リミットサイクルによる周期的歩行と運動遷移

ここまでの議論では、重心に関する目標値に対する線形な制御を考えてきた。一方、人間が行っているような周期的な歩行を制御するには、リミットサイクルを生成する非線形な制御が有効である。人間の歩行においては central pattern generator (CPG) [26] とよばれるリズム生成器の存在が指摘されており、リミットサイクルを発生させる非線形振動子によってモデル化されている [27] [28]。人型ロボットにおいても、リミットサイクルを利用した制御は古くから提案されており、多くの研究がある [29] [30]。

これらは周期的歩行を実現するものであり、歩き出しや

[†]初期状態に対し $\mathbf{x}[0] \in X$ であれば、すべての $k > 0$ に対し $\mathbf{x}[k] \in X$ となるとき、集合 X を正の不変集合 (positively invariant set) とよぶ。

図6 歩行動作における ZMP に関する MOA 集合 [22]

図7 CP に関する MOA 集合と ZMP に関する MOA 集合 [25]

停止等には別の運動を計画し、ZMP の拘束を満たしながら適切に運動を遷移させる必要がある。例えば、リミットサイクルや追従制御等、異なる運動制御器ごとに MOA 集合を計算しておき、その共通領域において運動を切り替えることで、拘束条件を満たす運動遷移を実現することが考えられる [31]。

上記が制御器の不連続な切り替えによって運動遷移を実現する試みであるのに対し、連続的に制御パラメータを変化させることで、制御器そのものの構造を変化させる試みも行われている。Sugihara [32] は式 (28) に非線形粘性項を加え、そのパラメータを変化させることでリミットサイクルが生成されることを示した。この仕組みは力学変容 (dynamics morphing) とよばれ、運動遷移に応用されている [33]。

5. お わ り に

人型ロボットの歩行制御について、前半では主に倒立振子に代表される低次元化された力学モデルに基づく制御の基礎を解説した。LIPM のようにシステムを線形化することで、線形制御理論を利用できる一方、ZMP に関する拘束条件の扱いが課題となる。後半では、そのような拘束条

件の扱いについて最近の研究動向を踏まえながら解説した。また、本稿では説明の簡略化のために sagittal 面における運動を対象として解説したが、これらの議論は lateral 面を含んだものと容易に拡張できる。

本稿で解説した低次元力学に基づく制御は、別途、全身の運動に変換する必要がある、重心ヤコビアン [34]、分解運動量制御 [35]、operational space formulation [36] 等が用いられる。筆者は、LIPM のフィードバックゲインを重心に関する等価な粘弾性に変換し、それを全身の粘弾性へ分配する方法を提案した [37]。また、コンピュータ・グラフィックスの分野では、全身の力学においてモデル予測制御を行う研究もあり [38]、シミュレーションではあるが完成度の高い歩行制御が実現されている。

歩行制御に関しては、本稿で紹介した以外にも数多くの研究がある。夏の学校 2016 では、多くの文献を読み直す中で改めて歩行制御の難しさと自身の勉強不足を実感したものの、諸先生方からの（厳しい）助言もあり、可能な限り体系立てて歩行制御の基礎を解説した。これから人型ロボットの研究を始める方にとって本稿が役に立てれば幸いである。

謝 辞 夏の学校 2016 の運営に携わっていただいた先生方に感謝します。また、CP と DCM について、大阪大学 杉原先生から助言をいただきました。

参 考 文 献

- [1] S. Kajita and K. Tani: “Study of Dynamic Biped Locomotion on Rugged Terrain: Derivation and Application of the Linear Inverted Pendulum Mode,” Proc. of IEEE ICRA, pp.1405–1411, 1991.
- [2] 水戸部, 矢島, 那須: “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.
- [3] 杉原, 中村: “ZMP-重心モデルと台車型倒立振子モデルのアナロジーによるヒューマノイドロボットの高機動化制御”, 日本ロボット学会誌, vol.24, no.1, pp.74–83, 2006.
- [4] P.B. Wieber: “Trajectory Free Linear Model Predictive Control

- for Stable Walking in the Presence of Strong Perturbations,” Proc. of IEEE-RAS HUMANOIDS, pp.137–142, 2006.
- [5] T. Sugihara: “Standing stabilizability and stepping maneuver in planar bipedalism based on the best COM-ZMP regulator,” Proc. of IEEE ICRA, pp.1966–1971, 2009.
- [6] I.R. Manchester, et al.: “Regions of attraction for hybrid limit cycles of walking robots,” IFAC Proceedings Volumes, vol.18, no.PART 1, pp.5801–5806, 2011.
- [7] K. Yamamoto: “Control Strategy Switching for Humanoid Robots Based on Maximal Output Admissible Set,” Robotics and Autonomous Systems, vol.81, pp.17–32, 2016.
- [8] 山下, 山田, 猪谷: “歩行の基礎的研究”, バイオメカニズム, vol.1, pp.226–234, 1972.
- [9] 江村, 酒井: “反動力によって立位を維持する倒立振子の研究”, バイオメカニズム, vol.2, pp.321–328, 1973.
- [10] F. Miyazaki and S. Arimoto: “A Control Theoretic Study on Dynamical Biped Locomotion,” Journal of Dynamic Systems, Measurements, and Control, ASME, vol.102, pp.233–239, 1980.
- [11] J. Furusho and M. Masubuchi: “Control of a Dynamical Biped Locomotion System for Steady Walking,” Journal of Dynamic Systems, Measurements, and Control, ASME, vol.108, pp.111–118, 1986.
- [12] T. Takenaka, T. Matsumoto and T. Yoshiike: “Real time motion generation and control for biped robot—1st report: Walking gait pattern generation—,” Proc. of IEEE/RSJ IROS, pp.1084–1091, 2009.
- [13] S. Kajita, T. Yamaura and A. Kobayashi: “Dynamic Walking Control of a Biped Robot Along a Potential Energy Conserving Orbit,” IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol.8, no.4, pp.431–438, 1992.
- [14] F. Gubina and H. Hemami: “On the Dynamic Stability of Biped Locomotion,” IEEE Transactions on Biomedical Engineering, vol.21, no.2, pp.102–108, 1974.
- [15] H. Miura and I. Shimoyama: “Dynamic Walk of a Biped,” The International Journal of Robotics Research, vol.3, no.2, pp.60–74, 1984.
- [16] J. Pratt, et al.: “Capture Point: A Step Toward Humanoid Push Recovery,” Proc. of IEEE-RAS HUMANOIDS, pp.200–207, 2006.
- [17] T. Koolen, et al.: “Capturability-based analysis and control of legged locomotion, part 1: theory and application to three simple gait models,” The International Journal of Robotics Research, vol.31, no.9, pp.1094–1113, 2012.
- [18] M. Vukobratović and J. Stepanenko: “On the stability of anthropomorphic systems,” Mathematical Biosciences, vol.15, pp.1–37, 1972.
- [19] Jan M. Maciejowski: モデル予測制御—制約のもとでの最適制御—, 足立, 菅野 訳, 東京電機大学出版局, 2005.
- [20] A. Herdt, et al.: “Online walking motion generation with automatic foot step placement,” Advanced Robotics, vol.24, pp.719–737, 2010.
- [21] 長阪, 福島, 下村: “接触拘束を考慮可能なマルチコンタクト対応スタビライザと一般化逆力学による人型ロボットの全身制御”, ロボティクスシンポジウム講演予稿集, pp.134–141, 2012.
- [22] 山本: “2 足歩行ロボットの軌道追従制御における最大出力許容集合と転倒回避制御への応用”, 日本ロボット学会誌, vol.32, no.7, pp.633–642, 2014.
- [23] E.G. Gilbert and K.T. Tan: “Linear systems with state and control constraints: the theory and application of maximal output admissible sets,” IEEE Transactions on Automatic Control, vol.36, no.9, pp.1008–1020, 1991.
- [24] 平田, 藤田: “外部入力を有する線形離散時間システムに対する拘束条件の解析”, 電気学会論文誌 C, vol.118, no.3, pp.384–390, 1998.
- [25] K. Yamamoto: “Humanoid Motion Analysis and Control based on COG Viscoelasticity,” Advanced Robotics, vol.31, no.7, pp.341–354, 2017.
- [26] U. Bässler: “On the Definition of Central Pattern Generator and its Sensory Control,” Biological cybernetics, vol.54, pp.65–69, 1986.
- [27] G. Taga: “A Model of the Neuro-Musculo-Skeletal System for Human Locomotion: I. Emergence of Basic Gait,” Biological cybernetics, vol.73, pp.97–111, 1995.
- [28] 田川, 大日方, 長谷: “CPG に基づく 3 次元神経筋骨格歩行モデルのフィードバックバランス制御器”, 第 9 回システムインテグレーション部門講演会, pp.849–850, 2008.
- [29] R. Katoh and M. Mori: “Control method of biped locomotion giving asymptotic stability of trajectory,” Automatica, vol.20, no.4, pp.405–414, 1984.
- [30] J. Morimoto, et al.: “A biologically inspired biped locomotion strategy for humanoid robots: modulation of sinusoidal patterns by a coupled oscillator model,” IEEE Transactions on Robotics, vol.24, no.1, pp.185–191, 2008.
- [31] 山本, 志鷹: “ヒューマノイドのリミットサイクル型コントローラにおける最大出力許容集合と運動遷移制御”, 日本ロボット学会誌, vol.34, no.5, pp.331–339, 2016.
- [32] T. Sugihara: “Dynamic Morphing from Regulator to Oscillator on Bipedal Control,” Proc. of IEEE/RSJ IROS, pp.2940–2945, 2009.
- [33] 熱田, 杉原: “力学変容系における制御器の隣接関係に基づく二脚ロボットの自動動作遷移”, 第 17 回システムインテグレーション部門講演会, pp.212–215, 2016.
- [34] 杉原, 中村: “非駆動自由度の陰表現を含んだ重心ヤコビアンによる脚型ロボットの全身協調反力操作”, 日本ロボット学会誌, vol.24, no.2, pp.222–231, 2006.
- [35] 梶田, ほか: “分解運動量制御:運動量と角運動量に基づくヒューマノイドロボットの全身運動生成”, 日本ロボット学会誌, vol.22, no.6, pp.772–779, 2004.
- [36] O. Khatib, et al.: “Whole-Body Dynamic Behavior and Control of Human-Like Robots,” International Journal of Humanoid Robotics, vol.01, no.01, pp.29–43, 2004.
- [37] 山本: “ヒューマノイドの構造可変性を陽に考慮した粘弾性分配制御”, 日本ロボット学会誌, vol.35, no.2, pp.160–169, 2017.
- [38] U. Muico, et al.: “Contact-aware nonlinear control of dynamic characters,” ACM Transactions on Graphics, vol.28, no.3, 2009.

山本 江 (Ko Yamamoto)

2004 年東京大学工学部機械情報工学科卒業。2009 年 6 月同大学院情報理工学系研究科知能機械情報学専攻博士課程修了。東京工業大学産学官連携研究員, 名古屋大学助教を経て 2014 年から東京大学大学院工学系研究科機械工学専攻助教。2016 年 9 月から同大学院特任講師, 2017 年 11 月から同大学院情報理工学系研究科知能機械情報学専攻 准教授となり現在に至る。博士 (情報理工学)。2012 年 10–12 月までスタンフォード大学客員研究員。ヒューマノイド・ロボティクス, 人の流れのモデル化と制御, 医療ロボティクス等の研究に従事。日本機械学会, IEEE の会員。(日本ロボット学会正会員)