

対称歩行制御

Symmetric Walking Control

○玄相昊*, 江村超*

○Sang-Ho Hyon*, Takashi Emura*

*東北大学

*Tohoku University

キーワード: 2脚歩行ロボット (biped walking robot), 大域的安定性 (global stability), ハイブリッドシステム (hybrid system), ハミルトニアンシステム (Hamiltonian system) 対称軌道 (symmetric orbit)

連絡先: 〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉01 東北大学大学院工学研究科 バイオロボティクス専攻
玄相昊, Tel.: (022)217-6969, Fax.: (022)217-6967, E-mail: sangho@ieee.org

1. Introduction

1.1 Background

歩行の数学的な正体は、紛れも無く非線形周期軌道である。ただし、天体物理で主に研究されてきた通常の連続な単一力学系とは異なり、衝突や複数のダイナミクスから構成されるハイブリッド力学系におけるハイブリッド周期軌道であるが、その存在性や安定性の議論はまだあまりされていないようである¹⁾。歩行ロボットはその性質上、車輪型ロボットとは違い、転倒回避を常に意識しながら目標とする移動を達成することが要求される。そのため、歩行における最大の関心事が転倒であるとするならば、その安定性を理論的に保証しておくことは工学上必要不可欠である。この点、長年にわたって主流を占めてきたZMP安定判別法は歩容設計においても大きな役割を担ってきたが²⁾³⁾⁴⁾、それ自体は安定歩行の必要条件でもなく、単にワールド座標系での目標軌道への追従を確実に

に保証するための条件であるので、今後はその目標軌道をよりグローバルな安定性の視点に立って設計しうる新たな指標が必要と思われる。なお、最近、ZMPに依存せずに運動量を直接の制御対象として歩容を設計しようという試みもあるが、これはモデルマッチング制御であるため、ターゲットモデル（あるいは縮小系ダイナミクス）をどのように安定性やエネルギー効率を考慮して設計するかという問題が残されている⁵⁾。

これに関して、McGeerに始まる一連の受動歩行ロボットの研究は、自然でエネルギー効率の高い歩行を設計するための非常に良いモチベーションを与えたが⁶⁾、その安定領域は広くないため、安定性やロバスト性をいかに改善するかという問題が残されている。

1.2 動的脚ロボットの統一的な制御戦略

本論文では、ZMPに依存しないより広義の歩行安定性の定義から出発し、安定性を確実に保証し

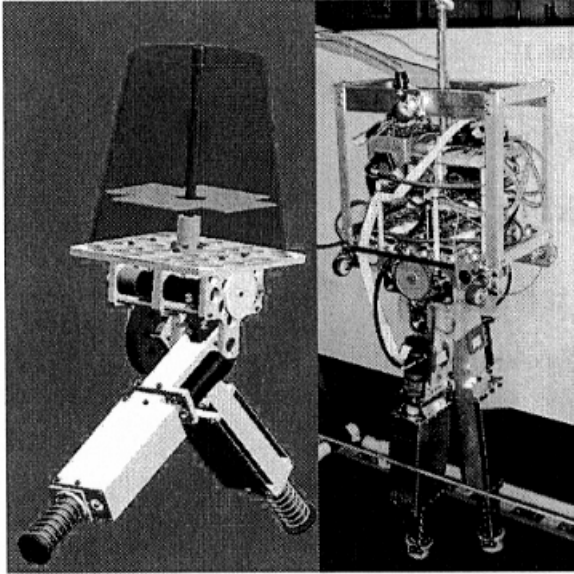


Fig. 1 SkipperII

つつ制御入力の意味で最適な歩行を得ることを目指すために、次の3段階の制御戦略を提案する。

- (1) 配位空間を有界領域に閉じ込めることで不変集合を得る。
- (2) 不変集合内の再帰的軌道に対して周期制御およびエネルギー制御を施すことで、ある目標状態を通過する漸近安定な周期軌道を得る。
- (3) 安定な周期軌道に対して適応制御を施し、制御入力を最小化する。

次節以降でこの各ステップに沿って制御則が構成されていくが、ここで概略を述べておく。まず、Step 1では、対称性をうまく利用することで脚の座標に関する配位空間をある有界領域に閉じ込める。第2節で述べる解の不変性に関する有益な定理に基づき、ある特殊な拘束歩行制御則を第3節で導く。制御則は「対称歩行制御」(Symmetric Walking Control, 以下、SWC)として定式化される⁷⁾。

次に、Step 2ではStep 1で得られた準周期軌道やカオス軌道に対してエネルギーレベルや周期を制御することで、望ましい運動状態を達成する。実際、第4節で上体を利用した新しい歩行速度制御則を提案し、これをFig. 1に示す2脚ロボット Skipper IIに適用する。

Step 3では(1)および(2)で用いた制御入力の大きさを下にパラメータ適応制御を行い、制御入力を小さくする。バネなどの受動要素をモデルに組み込むなど、駆動方式の再検討も含む。

以上のような制御戦略は著者らが1脚走行ロボット⁸⁾で提案したアプローチのいわば散逸系バージョンである。そこではStep 1で「エネルギー保存制御」が導出され、Step 2で「遅延フィードバック制御」、そしてStep 3でバネ剛性適応制御がそれぞれ導出され、最終的に漸近安定な準受動1脚走行(制御入力为零に収束する走行)が得られた。

このようにして得られる制御は必然的に階層構造を有することになる。つまり、転倒安定性を保証する基本的な制御を最下位で行い、その上で具体的な移動目標を達成する上位制御を行う階層構造となっている。以上のような階層制御によって、転倒安定性を常に保証しつつ目標とする移動を達成することが可能となる。さらに、後で見るように制御則が非常に簡潔であるため、安価なマイコン上で実時間で達成することが可能である。

2. 不変性原理と周期解の安定性

本節では安定歩行に有用ないくつかの概念と定理をまとめる。 n -自由度の脚モデルの運動は複数の連続力学系と離散力学系から構成される自律ハイブリッド力学系として記述できる。以下に、歩行の安定性を議論するための重要な概念を示すが、紙面上の都合から、 n 次元多様体 M 上の単一自律

系に関してのみ示す:

$$\dot{x} = F(x) \quad (1)$$

ここで $x \in M$ は状態, $F: M \rightarrow TM$ は連続なベクトル場とする.

まず, 歩行において重要な集合を定義する. $x(t)$ を(1)の解とする. *positively invariant set* M_I とは

$$x(0) \in M_I \Rightarrow x(t) \in M_I, \quad \forall t \geq 0 \quad (2)$$

を満たす集合である. もし $n \rightarrow \infty$ で $t_n \rightarrow \infty$ となる点列 $\{t_n\}$ が存在し, $x(t_n) \rightarrow p$ as $n \rightarrow \infty$ となるとき, 点 p は $x(t)$ の ω -極限点と呼ばれる. $x(t)$ の全ての ω -極限点の集合は $x(t)$ の ω -極限集合と呼ばれる.

不変集合は有界性の重要な結果である. 実際, 次が成り立つ⁹⁾.

Lemma 2..1 解 $x(t)$ が有界で $t \geq 0$ において $N \subset M$ に属しているとき, その ω -極限集合 L^+ は空でないコンパクトな不変集合である. さらに,

$$x(t) \rightarrow L^+ \text{ as } t \rightarrow \infty$$

が成り立つ.

この補題の条件はあとでSWCにおいて緩和される. この補題は, 再帰的軌道(reccurent orbit)や周期軌道に関連している. 最も重要な定理はBirkhoffとPoincaéによる¹⁰⁾.

Theorem 2..1 (Birkhoff) コンパクトな不変集合に含まれるいかなる軌道も再帰的である. また, いかなるコンパクト不変集合もある再帰的軌道の閉包である.

Theorem 2..2 (Poincaré) 系がハミルトニアンでエネルギーのレベル集合がコンパクトであるとする. このとき, そのレベル集合を出発するほとんど全ての解は再帰的である.

さらに, コンパクト集合においては, 次の強力な不変原理が利用できる⁹⁾.

Theorem 2..3 (LaSalle) $\Omega \subset M$ を(1)に関して *positively invariant* なコンパクト集合とする. $V: M \rightarrow R$ を連続的に微分可能な関数で, Ω 上で $\dot{V}(x) \leq 0$ とする. $M_I = \{x \in \Omega \mid \dot{V}(x) = 0\}$ の最大不変集合とする. このとき, Ω 上の全ての解は $t \rightarrow \infty$ で M_I に接近する.

最後に閉軌道の軌道安定性を定義する¹¹⁾. $\phi_t(x)$ を系(1)のフローとする.

Definition 2..1 (漸近軌道安定性) 開集合 $N_1 \subset M$ と $\gamma \in N_2 \subset N_1$ であるような開集合 N_2 が存在し, すべての $t > 0$ に対して $\phi_t(N_2) \subset N_1$ が成り立ち, 全ての $x \in N_2$ に対して

$$\lim_{t \rightarrow \infty} d(\phi_t(x), \gamma) = 0 \quad (3)$$

を満たすとき, 閉軌道 γ は漸近軌道安定と呼ばれる. ここで, $d(x, \gamma)$ は x と γ 上の点間の最小距離である.

残念ながら, 一般的な非線形閉軌道に関しては, 解軌道に関するほぼ完全な情報を必要としない安定性定理は未だ見出されていない.

3. 対称歩行制御

Fig. 2に示したような, 質量 M_G の質点と無質量で長さ L_G の脚から成る最も原始的な振り型2脚ロボットモデルを考える. これは系 Σ_1 (右足接地) と系 Σ_2 (左足接地) からなるバイモーダルハイブリッド系であり, それらは切替条件のもとで交互に時間発展する. 系 Σ_1 においては, 支持脚角度を θ_1 とし, 遊脚角度を θ_2 とする. 系 Σ_2 では座標が入れ替わる.

系 Σ_1 での状態変数を $x_1 := (\theta_1, \dot{\theta}_1)^T$ と置くと, 解は次の保存系に従って時間発展する.

$$\dot{x}_1 = F_1(x) = \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \frac{g}{r_G} \sin \theta_1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

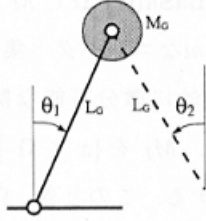


Fig. 2 Simple pendulum-like biped model

遊脚はいかなるダイナミクスももたない。もし遊脚が着地することである終端条件

$$x_1 \in \Pi_1 := \{x_1 | S_1(x_1) = \theta_1 - \theta_{1-} = 0\} \quad (5)$$

が満たされたとき、次の衝突方程式に従って解がジャンプし、支持脚交換が起こる。

$$x_{2+} = \begin{bmatrix} \theta_{2+} \\ \dot{\theta}_{2+} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta_{1-} \\ \cos(2\theta_{1-})\dot{\theta}_{1-} \end{bmatrix} \quad (6)$$

そして、系 Σ_2 は新しい初期値 x_{2+} から時間発展する。

3.1 歩行の安定規範

歩行における二つの重要な安定規範を与える。 ϕ_t を系 Σ_1 および Σ_2 の解を時間的に接続した軌道とする。

Definition 3.1 (歩幅有界性) 軌道 ϕ_t は

$$\phi_t \in D_{\bar{\theta}} = \{x \mid |\Theta \circ x| < \bar{\theta}\} \quad (7)$$

を満たすとき、 $\bar{\theta}$ に関して歩幅有界 *stride bounded by $\bar{\theta}$* と呼ばれる。ただし、 Θ は x の支持脚座標への投影であり、 $\bar{\theta} (0 < \bar{\theta} < \pi/2)$ は支持脚角度の限界である。

本定義は配位空間の有界性を定義しているだけで、接空間の有界性には何も言っていない。しかし、(4) のように、系がハミルトニアンであるような特殊な場合、この定義はただちに状態空間全体の有界性を意味する。

γ を周期的な解 ϕ_t とするとき、これを単に歩容 (gait) と呼ぶこととすると、次が歩容の安定性を定義する。

Definition 3.2 (歩容行安定性) 歩容 γ が $\bar{\theta}$ に関して歩幅有界かつ γ が標準的な意味で漸近安定 (Definition 2.1) であるとき、歩容 γ は漸近安定であるという。

3.2 対称歩行制御

本節では 1.2 節の **Step 1** に従い、歩幅有界を保証する制御則を導出する。系 (4) および (5) では支持脚交換がいつ生じるのか、まだ特定しない。しかし、遊脚の終端値 x_{2-} は次期支持脚の初期値 x_{1+} であるため、歩幅有界性を満たすためには、遊脚にある条件を課さなくてはならない。とくに、Fig. 2 のモデルでは脚長 L_G が一定であるため、着地時には必ず $\theta_1 + \theta_2 = 0$ の関係式が満たされる。したがって、最も単純な拘束は脚の角度に対称条件を課すことである。すなわち、対称拘束

$$y = h(x) = \theta_1 + \theta_2 = 0 \quad (8)$$

を出力関数として選び、出力零化制御を施し、支持脚交換則を

$$x \in \Pi := \{x \mid |\Theta \circ x| - \theta_{sw} = 0\} \quad (9)$$

で与える。ここで $\theta_{sw} (0 \leq \theta_{sw} < \bar{\theta})$ は支持脚交換角度 (一定値) である。今後、(8) と (9) を合わせて対称歩行制御 (SWC) と呼ぶ。本制御の元では速度拘束条件

$$\dot{y} = \dot{h}(x) = \dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 = 0 \quad (10)$$

も満たされることになることに注意されたい。

この制御拘束は新しいものではない。人間が歩行中に脚をスイングするとき、遊脚は支持脚の角度がほぼ対称になっていることは直感的に理解できる。実際に、同様な拘束は簡単な歩行ロボット

のおもちゃでも採用されている。ただし、拘束されているのは関節角度であり、脚の絶対角ではない。Van der Linde と Grizzle はこのアイデアを取り入れ、安定性解析を行っている¹²⁾¹³⁾。とくに Grizzle は対称条件を使って縮退化系を導出することで、着地衝突まで考慮した安定性を議論している。しかしながら、この対称条件を歩行の転倒安定性の観点から議論した研究はこれまでに無い。

もし脚長が可変の場合、次の拘束条件を考えることが出来る。

$$y = h(x) = \theta_1 + \theta_2 = 2\theta_n. \quad (11)$$

これは対称軸をシフトしたもので、 θ_n と脚長を変化させることで歩幅も可変となる。さらに本式は、いわゆる *Foot Placement Algorithm*¹⁴⁾¹⁵⁾ に対称条件を付加したものである。我々のロボット (Fig. 1) は脚長可変であり、 θ_n を時変とすることで安定性定理を拡張することができるが、本論文では零対称軸のみに絞って議論する。

3.3 SWCの特性

対称拘束 (8) および切替則 (9) により、 θ_1 は領域 $|\theta_1| \leq \theta_{sw}$ に制限される。さらに、状態空間の有界性を示すことが出来る。Fig. 3 はそれを効果的に示している。これは力学系 (4) の衝突 (5) を考慮しない場合と考慮する場合における、 ϕ_t の相軌道を描いたものである。系 (4) の原点は不安定平衡点 (*saddle*) であることに注意されたい。分離枝は相空間を安定多様体と不安定多様体に分割する。この平衡点回りのフローは、それ単体のままでは歩行において何の意味もなさないが、二つ以上組み合わせることで意味のある軌道を作ることが出来る。これが本図に示すハイブリッド軌道である。

領域 I では、 θ_1 は単調増加する (前進歩行)。着地衝突を無視すれば保存系となり、切替則のもと、解は領域 I において全く同一の軌道を描きつづける。これはパーコフ可逆系 (*Birkhoff-Reversible*

System) における対称軌道 (*Symmetric Orbit*) である¹⁶⁾。この対称軌道は孤立周期軌道ではないことに注意されたい。すなわち、初期値に応じて近傍にいくらかでも多くの対称軌道が存在する。実際に、領域 I 内の全ての点が対称軌道上にある。これは単一力学系における中心多様体のフローの挙動に似ている。このようなパーコフ可逆系が有する KAM-like な安定性は SWC の有益な特性であり、詳しい議論はまたの機会にする (1脚ホッピングロボットについては¹⁷⁾を参照)。

実際には衝突方程式 (5) によって速度が減少する。一旦解が分離枝と切替角で囲まれた領域 II あるいは領域 IV に入ると、解はこの領域から出ることができず完全に捕らえられてしまい、最終的に ω -極限集合: $L^+ = (\theta_{sw}, 0) \cup (-\theta_{sw}, 0)$ に同時に収束する。ここで同時にと言ったのは、状態が L^+ に近づけば近づくほど、無限解の切替が生じるという意味においてである。この現象はハイブリッド・オートマタでは *Zeno* と呼ばれている¹⁾。しかし実際には、そのようなロジックの問題はともかく、ロボットは運動エネルギーを全て失い、両脚支持の状態で停止することになる。この例からわかるように、 ω -極限集合は初期値に抛らず、大域的に漸近安定である。

以上の性質は次のように定式化できる。

Lemma 3.1 系 (4) の解は制御則 (8) および (9) のもとで有界である。

Proof. (8) および (9) のもとで配位が有界であることは明らか。したがって、速度の有界性を言わなくてはならない。その鍵は対称性による制御ハミルトニアン (*Controlled Hamiltonian*) の保存である。系 (8) においては、着地時以外は次が成立する。

$$H_c := H \Big|_{h(x)=0} = \frac{1}{2} J_G \dot{\theta}_1^2 + M_G L_G g \cos \theta_1 = \text{const.} \quad (12)$$

ここで $J_G = M_G L_G^2$ 。これは、対称性を課すことである種の第一積分が現われ、それを不変とする

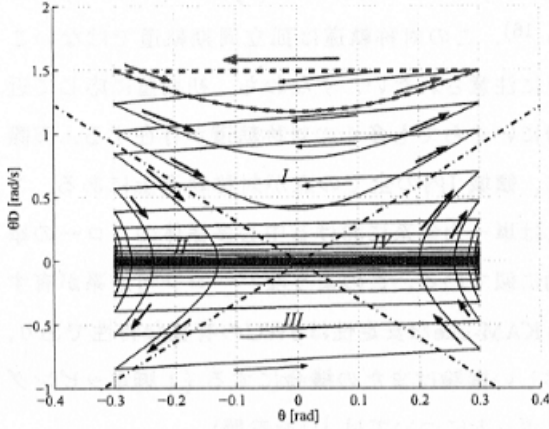


Fig. 3 Phase portrait of simple pendulum-like biped under SWC with $\theta_{sw} = 0.3$. The solution starting from $(\theta(0), \dot{\theta}(0)) = (-0.3, 1.5)$ converges asymptotically to the limit set (solid blue line). If there is no dissipation at leg exchange, it becomes symmetric orbit (bold dashed red line). Dashed-dotted line indicates separatrix.

不変多様体が生成されることを意味している。本式と (9) により、速度空間の有界性が結論付けられる。

Theorem 3.1 支持脚交換時にエネルギー損失がある場合、SWCの大域的な不変集合は安定なハイブリッド ω -極限集合である。エネルギー損失がある場合は、対称軌道あるいはその他の再帰軌道である。

Proof. 閉ループ系の解は Lemma 3.1 より有界である。 H_c を準正定関数とすると、 $\dot{H}_c \leq 0$ が成り立つ。ここで不等式は着地衝突を考慮するときだけ成立する。したがって、Lemma 3.1 と Theorem 2.3 により定理の最初の主張が証明される。2 つめの主張は Theorem 2.1 による。 ■

3.4 例：コンパス型 2 脚ロボット

SWC を Fig. 4 に示すコンパス型 2 脚ロボットに適用する。一般化座標を $q := [\theta_1, \theta_2]^T \in S^2$ に

とると、運動方程式は次式で与えられる。

$$J(q)\ddot{q} + H(q, \dot{q}) = Su \quad (13)$$

where

$$J(q) = \begin{bmatrix} (M+2m)L^2 + m(L-b)^2 & -mbL \cos(\theta_1 - \theta_2) \\ -mbL \cos(\theta_1 - \theta_2) & mb^2 \end{bmatrix}$$

$$H(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} mbL \sin(\theta_1 - \theta_2) \dot{\theta}_2^2 - (M+2m)Lg \sin \theta_1 \\ -mbL \sin(\theta_1 - \theta_2) \dot{\theta}_1^2 + mgb \sin \theta_2 \end{bmatrix}$$

$$S = \begin{bmatrix} -1 & 1 \end{bmatrix}^T$$

状態変数を $x := [q, \dot{q}]^T \in S^2 \times R^2$ 、制御入力を $u = \tau \in R^1$ とおくと、系は次式で表現できる。

$$\dot{x} = f(x) + G(x)u$$

$$= \begin{bmatrix} \dot{q} \\ -J^{-1}H \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -J^{-1}S \end{bmatrix} u \quad (14)$$

出力関数を (8) と選ぶと、相対次数は 2 となる。実際、

$$\ddot{y} = L_f^2 h(x) + L_g L_f h(x)u, \quad (15)$$

が成り立ち、次のフィードバック+フィードフォワード制御を適用する。

$$u = \frac{1}{L_g L_f y} (-L_f^2 h(x) + K_p y + K_d \dot{y}) \quad (16)$$

ここで $K_p > 0$ と $K_d > 0$ はフィードバックゲインである。 $L_g L_f y$ は大域的に可逆である。

Fig. 5 にシミュレーション結果を示す。Fig. 5(a) は着地衝突のない理想的な場合の結果であり、Fig. 5(b) は衝突がある場合の結果である。 ω -極限集合は $L^+ = (\theta_{sw}, -\theta_{sw}, 0, 0) \cup (-\theta_{sw}, \theta_{sw}, 0, 0)$ である。また、対称軌道 γ は $(\theta_{sw}, -\theta_{sw}, A, -A) \cup (-\theta_{sw}, \theta_{sw}, -A, A)$ を通過する。ここで A は初期角速度である。下の二つのグラフは元来のハミルトニアン（全力的エネルギー）と、次式で計算される制御ハミルトニアン (Lemma 3.1) の時間推移である。

$$H_c := H \Big|_{h(x)=0} = \frac{1}{2} J_G \dot{\theta}_1^2 + (M+2m)Lg \cos \theta_1.$$

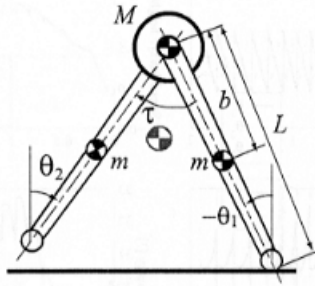


Fig. 4 Compass-like biped robot

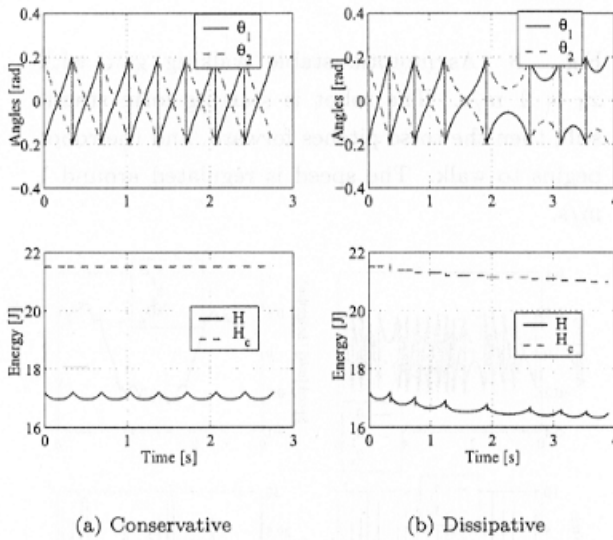


Fig. 5 Simulation results of compass-like biped walking with the parameters: $M = 5, m = 1.2, L = 0.4, b = 0.2$, and the switching angle $\theta_{sw} = 0.2$. (a): symmetric walking gait. (b): dissipative walking gait. In both cases, the controlled Hamiltonian H_c is piece-wise constant during one walking cycle

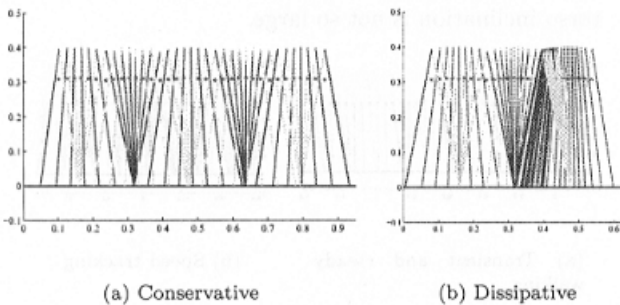


Fig. 6 Animations for Fig. 5(a) and Fig. 5(b)

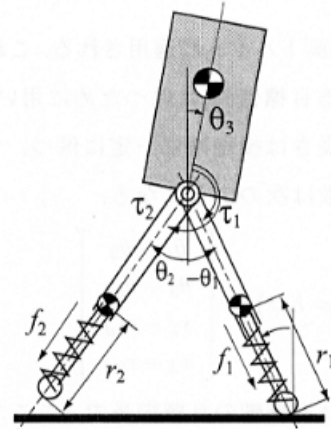


Fig. 7 Model of *skipper II*: 5-link biped robot with torso

ここで $J_G = (M + 2m)L^2 - 2mbL$. 両者とも, 制御ハミルトニアン H_c は区分一定であることがわかる. Fig. 6に対応するアニメーションを示す.

4. 胴体傾斜によるロバスト歩行速度制御

前節でSWCの受動的な安定性を見た. 本節ではFig. 1に示すような胴体と伸縮型脚を有する5リンク2脚ロボットにSWCを適用する. 本ロボットは歩行や走行などの様々な平面運動を実現するために開発された¹⁸⁾. 各関節は低減速比の電気サーボモータによって駆動される. センサとしては各関節のエンコーダ, ジャイロと傾斜系を組み合わせた姿勢センサ, 脚の接地スイッチを用いている. 本ロボットは人間のように真っ直ぐ上に伸びた胴体を有しているが, あとで見るように, 胴体の傾斜がエネルギーの制御に重要な役割を持つ. 数学モデルは Fig. 7に定義されている. 一般化座標として $q := [\theta_1, \theta_2, \theta_3, r_1, r_2] \in S^4 \times R$ をとり, 制御入力として股関節トルクおよび脚力 $u := [\tau_1, \tau_2, f_1, f_2] \in R^4$ をとる.

4.1 SWCの実装

SWCは遊脚トルク τ_2 に適用される。これは胴体の姿勢をある目標値 θ_{3d} に保つために用いられる。また、脚の長さは接地期に一定に保つ。したがって、出力関数は次のようになる。

$$y = h(x) = \begin{bmatrix} \theta_1 + \theta_2 \\ \theta_3 - \theta_{3d} \\ r_1 - r_{1d} \\ r_2 - r_{2d} \end{bmatrix} \quad (17)$$

ここで r_{1d} は支持脚の目標脚長で、ここでは脚に取り付けたバネの中立長さとしている。一方、 r_{2d} は θ_2 に比例するように伸縮する(省略)。

4.2 歩行速度制御

非零の θ_{3d} (胴体傾斜の目標値)は歩行速度あるいはエネルギー制御に利用することができる。基本的には、次のような比例制御則を用いることができる。

$$\theta_{3d} = K_v(\dot{x}_d - \dot{x}) \quad (18)$$

ここで \dot{x} は水平速度であり、 \dot{x}_d はその目標値、 K_v は歩行速度ゲインである(可変ゲインも可能)。本制御により、入力エネルギーが自動的に散逸エネルギーとバランスすることになる(これがリミットサイクルの発生要件である)。

Fig. 8に速度制御のシミュレーション例を示す。ロボットは最初静止しており、徐々に胴体を傾斜させながら前進する。歩行速度が目標値に近づくに従って、胴体傾斜は徐々にある一定値に収束することになる。歩行速度指令は任意である。例えば、Fig. 9には速度追従制御のシミュレーション結果が示されている。ここで歩行速度は $+0.5 \text{ m/s}$ から -0.5 m/s 、そしてまた $+0.5 \text{ m/s}$ に切り替えている。胴体の傾斜は加速と正定時間に影響するが、加速には限界がある。胴体の実効最大傾斜は $\pm\pi/2$ であり、このときエネルギーの最大変化を得ることができる。また、股関節から胴体重心位置までの距

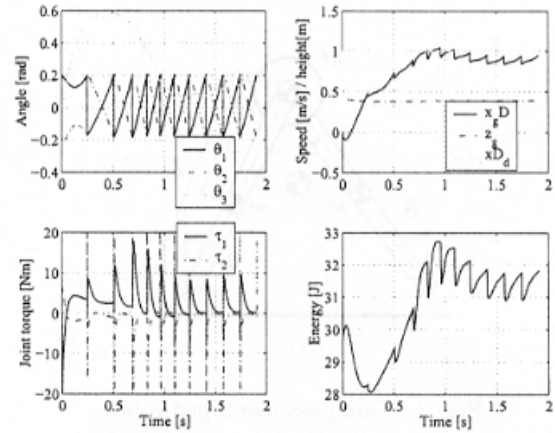


Fig. 8 Asymptotic stable walking gait with $\dot{x}_d = 1 \text{ m/s}$. The robot is starting from standstill, then the torso pitches forward, and the robot begins to walk. The speed is regulated around 1 m/s .

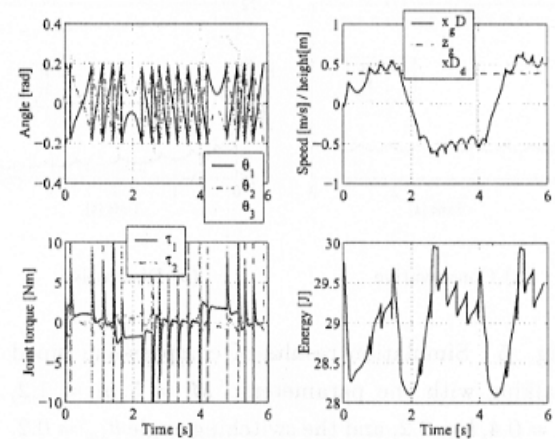


Fig. 9 Speed tracking walking with $\dot{x}_d = 0.5 \rightarrow -0.5 \rightarrow 0.5 \text{ m/s}$. Comparing with Fig. 8, the torso inclination is not so large.

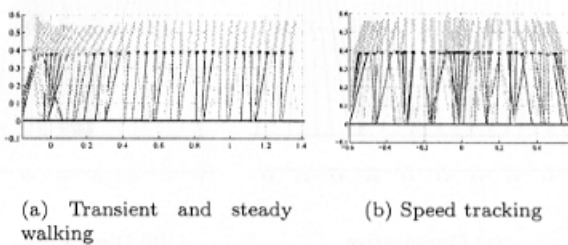


Fig. 10 Animations of two kinds of speed controlled walking corresponding to Fig. 8 and Fig. 9.

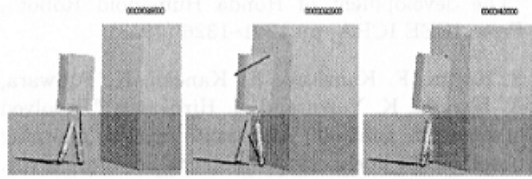


Fig. 11 A robustness test: during the steady walking of 0.5 m/s, the robot impacts with the wall. However, the robot never falls. It just decreases energy and stops. If the wall is removed, then it begins to walk again.

離が長いほどより多くのエネルギー変化を得ることができる。なお、切り替え角 θ_{sw} が大きいほど、より多くのエネルギー変化率を得ることができるが、同時に着地衝突も大きくなり、定常歩行速度偏差も大きくなることもわかっている。 θ_{sw} と θ_{3d} の最適な関係式を得ることも可能である。

Fig. 10(a)とFig. 10(b)に対応するアニメーションを示す。図には歩行中の重心とZMPの推移も記されている。図より、ZMPが支持点よりわずかに前方に移動するところが確認できるが、これは胴体制御の加速によるものである。

4.3 外乱ロバスト性

実機に制御則を適用する前に精密なシミュレータを構築し、様々な外乱に対するロバスト性などの評価を行うことが有効である。シミュレータは DADS® と SIMULINK® を用いる。

一例として、Fig. 11 と Fig. 12 に外乱ロバスト性について調査したシミュレーション結果を示す。本シミュレーションでは、最初ロボットは目標速度 0.5 m/s の定常歩行を行っているが、その途中で突然壁にぶつかる設定になっている。速度の時間変化からわかるように壁のせいでロボットは大きな外乱を受ける。しかしこの大きな外乱に対してもロボットは転倒せず、単に停止するだけである。そして壁が取り除かれるとロボットはまた目標ス

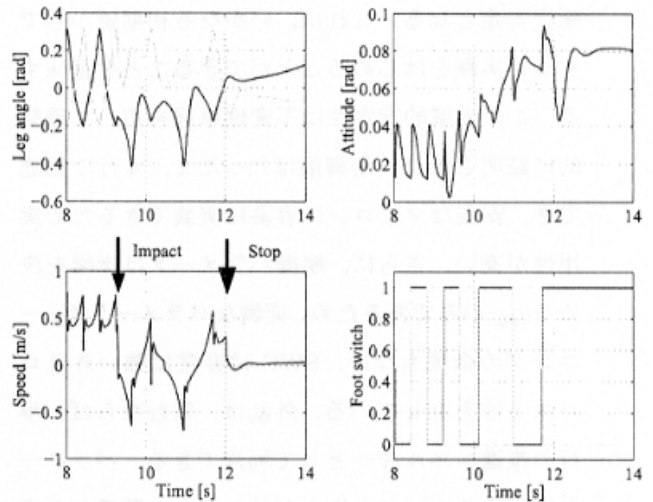


Fig. 12 Time evolution of some state variables during the robustness test (Fig. 11): After the impact at 9.23 s, the walking speed is decreasing and finally converging to zero around 12.5 s (left bottom). Since the commanded speed is fixed to 0.5 m/s in this example, the attitude of the torso still increases (right top). Drift of the leg angles indicates the slipping of the supporting foot against the ground (left top).

ピードに向けて歩き出す。これはSWCの強力な受動性を示している。受動性は対人安全制御においてとくに重要である。これは通常の軌道追従制御ではサポートしていない機能である。さらに、たとえば歩行速度を零に設定した場合、未知の外乱に対してもロボットは停止することができる。その整定時間は外乱の大きさに依存する。あるいは、外乱を歩行の推進エネルギーとして利用することができる。この場合、ロボットは床の上で押されて転がるタイヤのような挙動を示すことになる。

5. まとめ

胴体傾斜制御と組み合わせたSWCにより、足首トルクがなくてもロボットが転倒せず、力学的エネルギーと歩行速度を制御することが可能となった。領域 $D_{\bar{g}}$ から出発するいかなる解も安定なハ

イブリッド ω -極限集合あるいは周期解に大域的に漸近安定となる。これは、いかなる初期値からでも歩行実験をはじめることができることを意味する。この大域的安定性は不変性原理を用いて理論的に証明された。制御則はたった2, 4行で記述でき、安価なマイコンに容易に実装できるため実用性が高い。さらに、制御パラメータは歩幅を決める θ_{sw} のみであるため、面倒なパラメータチューニングの余地もない。SWCは非常に強い外乱ロバスト性を有している。外乱は、望むならば、歩行の推進エネルギーとして利用できる。パラメータに対するロバスト性もゲインの大小関係から容易に導くことができる。SWCはヒューマノイドロボットの最下層の制御レベル（つまり最優先制御レベル）で常にアクティブとすべき「オートパラランサー」としての機能を持っている。エネルギー効率・地点追従など、その他の上位の目標を定め、制御則を追加すればよい。

強力な安定性とロバスト性により、SWCはいかなる構造の2脚ロボットに対しても大きな修正なく適用可能である。実際、足首と受動膝関節、胴体を有する5リンクの人間型モデルにSWCを適用することで、たった4行の簡単な制御則で安定な歩行を得ている⁷⁾。ただ、ここでは胴体傾斜だけでなく足首トルクも利用することで効果的にエネルギー制御を行っている。

参考文献

- 1) A. Matveev and A. Savkin: *Qualitative theory of hybrid dynamical systems*, Control Engineering, Birkhauser (2000).
- 2) J. Yamaguchi, A. Takanishi and I. Kato: "Development of a biped walking robot compensating for three-axis moment by trunk motion", Proc. IEEE/RSJ IROS, pp.561-566 (1993).
- 3) S. Hyon, D. Aoyagi, S. A. Setiawan, J. Yamaguchi and A. Takanishi: "Physical interaction between human and a bipedal humanoid robot - realization of human-follow walking -", Proc. 16th Annual Conference of RSJ, pp. 951-952 (1998 in Japanese).
- 4) K. Hirai, M. Hirose, Y. Haikawa and T. Takenaka: "The development of Honda Humanoid Robot", Proc. IEEE ICRA, pp.1321-1326 (1998).
- 5) S. Kajita, F. Kanehiro, K. Kaneko, K. Fujiwara, K. Harada, K. Yokoi and H. Hirukawa, "Resolved momentum control: humanoid motion planning based on the linear and angular momentum", Proc. IEEE/RSJ IROS (2003).
- 6) T. McGeer: "Passive dynamic walking", International Journal of Robotics Research, vol.9, no.2, pp.62-82 (1990).
- 7) S. Hyon and T. Emura, "Symmetric walking control and its application to five-linked anthropomorphic biped", Proc. of Annual Conference on Biomechanism, pp.207-210 (2004 in Japanese).
- 8) S. Hyon and T. Emura, "Energy-preserving control of passive one-legged running robot", Advanced Robotics, vol.18, no.4 (2004).
- 9) H. Khalil, *Nonlinear Systems*, 2nd ed. Prentice Hall (1996).
- 10) Arnold, *Mathematical methods of classical mechanics*, Springer (1978).
- 11) M. Hirsh and S. Smale, *Differential Equations, Dynamical Systems, and Linear Algebra*, Academic Press (1974).
- 12) R. van der Linde: "Actively controlled ballistic walking", Proc. the IASTED International Conference Robotics and Applications (2000).
- 13) J. Grizzle, G. Abba and F. Plestan: "Asymptotically stable walking for biped robots: Analysis via systems with impulse effects", IEEE Trans. Automatic Control, vol.46, pp.51-64 (2001).
- 14) H. Miura and I. Shimoyama: "Dynamic walk of a biped", International Journal of Robotics Research, vol.3, pp.60-74 (1984).
- 15) M. Raibert, *Legged Robots That Balance*, MIT Press (1985).
- 16) J. Lamb and J. Roberts: "Time-reversal symmetry in dynamical systems: A survey", Physica D, vol.112, pp.1-39 (1998).
- 17) R. Altendorfer, D. E. Koditschek and P. Holmes, "Toward factored analysis of legged locomotion models", Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.37-44 (2003).
- 18) S. Hyon and T. Emura: "Running control of a planar biped robot based on energy-preserving strategy", Proc. IEEE ICRA, pp.3791-3796 (2004).