

# Lifting Stabilization Strategyに基づくヒューマノイドの二足歩行

## Bipedal Walking of Humanoid Based on Lifting Stabilization Strategy

○ 前場 友秀(岡山大学) 見浪 護(岡山大学) 矢納 陽(岡山大学)

Tomohide MAEBA, Mamoru MINAMI and Akira YANOUE  
Okayama University, 3-1-1, Tsushimanaka, Kita-ku, Okayama, 7008530

To realize human-like bipedal walking that appears many kinds of gaits including unstable gaits, it is important to keep pose of robot stable regardless of the unstable gaits. In this paper, we propose walking stabilizer named “Lifting Stabilization Strategy” to enhance standing robustness and prevent the robot from falling down. Then, this strategy is applied to walking of humanoid that has strict dynamical model including foot, slipping and bumping. Further, validity of discussed dynamics and strategy has been confirmed through simulation.

*Keywords* : Humanoid, Dynamical model, Bipedal walking, Lifting Stabilization Strategy

### 1 緒言

人類は進化の過程の中で、安定かつ効率的な二足歩行を獲得してきた。人間の二足歩行に着目した場合、2種類の歩行を使い分けられていると考えられる。まず、目で周囲の状況を認識・把握できない場合や滑りやすい路面を歩行する場合を考える。この状況下では、Fig. 1 (a)に示すように膝を曲げ、腰の高さを低く保ち、常に一方の足が面接地状態となるような歩行となる。この歩き方はZero Moment Point [ZMP] と呼ばれる床反力の圧力中心を支持脚の凸包内に保持し続ける戦略 [1, 2] を規範とした制御によって生み出される歩行と非常に類似している。これまでも二足歩行を実現させるためにリミットサイクルを参照した歩行軌道の生成 [3] などのいくつかの手法 [4]-[6] が提案されている。その中でも ZMP に基づいた制御手法は二足歩行を実現させる最も有効な戦略の1つであることが知られており、HONDA 技術研究所の ASIMO [7] を始め、実機によるほとんどのヒューマノイドがこの ZMP 規範の制御に基づいて現実世界における二足歩行を成功させた。ZMP に基づいた歩行の安定性は非常に優れているが、エネルギー消費量が多く、現実世界において目で周囲の環境が認識できない状況というのは極めて稀なケースであると考えられる。

その一方で、目で周囲の環境が把握可能な一般的な状況における私達人間の歩行は、ZMP 規範の歩行とは異なり腰の位置を高く保ち、Fig. 1 (b) に示すような多くの歩容が出現する。さらに前者と比較して、不安定な歩容が存在するにも関わらず私達は安定な二足歩行を実現しており、エネルギー効率も優れている。

ところで、Fig. 1 (b) の歩容を用いた二足歩行を行うヒューマノイドを実現する場合には踵/つま先が区別されている剛体としての足 (foot) を持つモデルが不可欠であり、面接地や点接地など様々な歩容を表現するダイナミクスが必要となる。さらに人間の歩行に近づけるためには、地面に対する足の滑りや地面と足との衝突などを考慮しなければならない。しかし、実際には線形近似や倒立振り子モデルへ置き換えた足 (foot) の無いヒューマノイ

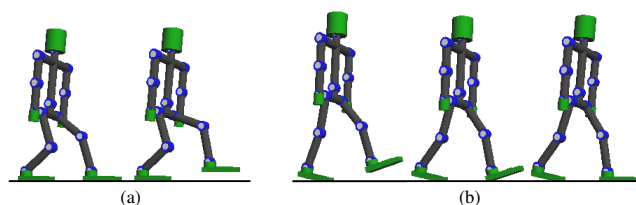


Fig. 1: Human's two kinds of walking patterns

ドのモデルに対する制御器を設計することによって、安定な二足歩行が実現されてきた [8]-[12]。一方で、文献 [13] は足 (foot) の存在が多くの歩容を生み出す効果を持つことについて明確に言及しており、様々な歩容を想定したダイナミクスを提案している。また、文献 [14] では “One-legged hopping robot” に対して、ダイナミクスに含まれる変数の次元を変化させることによってつま先による点接地や足全体の面接地を明確に区別している。ところが、文献 [13] では点接地/面接地の区別の表現方法や足の滑りは考慮しておらず、文献 [14] では二足歩行に対する言及や拡張は行っていない。そして著者らの知る限りでは、近似のない厳密なヒューマノイドのモデルに対して二足歩行を実現した例は存在しない。そのため、本研究の目的の1つは考えられる歩容を明確に表現し、足 (foot) や足の滑り、衝突を含んだ厳密なダイナミクスを持つヒューマノイドの歩行に関する議論を行うことである。著者らは将来「走るロボット」の実現を目指しており、歩行時と比較してより多くの歩容が現れるため、様々な歩容を表現可能なダイナミクスの作成が必須となる。文献 [15] で提案されているすべり摩擦を考慮した拘束運動のダイナミクスは、様々な歩容を一般的な形で表すことができる。本研究でもこのダイナミクスを使用するが、[15] と異なり Newton-Euler 法 [16]-[18] を用いている。

そして、最大の問題は滑りや不安定な歩容の出現によるロボットの転倒防止である。前述したように、著者らは安定な歩行を実現するために最も重要な働きをするのは目から入力される情報であるという仮説を立てている。そのため、本論文では、目から得られる情報を安定化に用いる戦略 “Lifting Stabilization Strategy [LSS]” を提案す

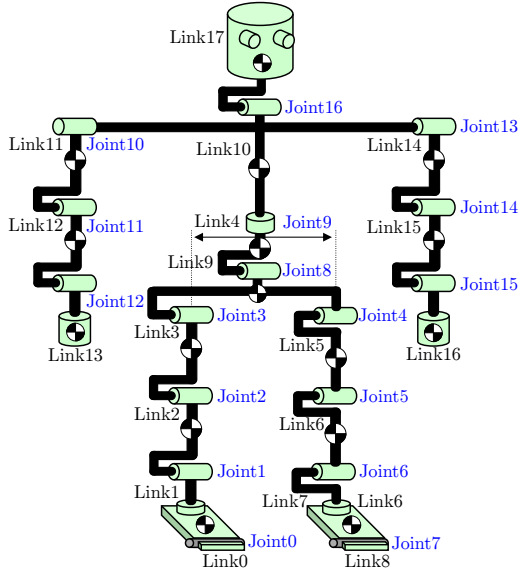


Fig. 2: Model of humanoid robot

る. 提案する戦略の特徴として, 入力トルクの決定に関してヤコビ行列の転置  $J(\mathbf{q})^T$  を利用していることが挙げられる. すなわち, 特異姿勢が生じても入力トルクが計算可能である. そのため, この戦略は単にヒューマノイドの安定化を行うだけではなく, 特異姿勢を回避に重点を置く必要がなくなり, 膝を伸ばし, 腰を高くした状態における二足歩行を可能とする.

## 2 ヒューマノイドの動力学モデル

### 2.1 片足立地モデル

片脚 (支持脚) で立っている状態のヒューマノイドは, 分岐を持つ直列リンク接続のマニピュレータと見なしたモデル化が可能である. 本研究では運動方程式の導出に Newton-Euler [NE] 法を利用している. NE 法は Lagrange 法を適用する場合に不可欠な偏微分の計算を必要とせず, 計算回数も少ないことが知られている. さらに, NE 法は内力の計算も容易に行うことが可能であるというメリットを持ち, 衝突時における内力の解析などに有用である. 本研究で対象とするヒューマノイドのモデル及びリンク・関節の定義を Fig. 2 に示す. このモデルは腰 (Link4) から左脚 (Link5)/胴体 (Link9) への分岐, 胴体 (Link10) から右腕 (Link11)/左腕 (Link14)/頭部 (Link17) への分岐を有する. さらに, Joint9 により腰のひねり動作を考慮しているため, 3次元空間における運動が生じる.

NE 法を用いて運動方程式を導出する際の第 1 の手順として, 順動力学計算に基づき根元のリンクから先端のリンクに向けて各リンクの重心における加速度  ${}^i\dot{\mathbf{s}}_i$  を導出する. そのためまず, 各リンクの原点における加速度  ${}^i\dot{\mathbf{p}}_i$  を求める. 以下では,  $i$  番目のリンクに固定された座標系  $\Sigma_i$  に基づいた解析を行う. Fig. 2 に示すモデルにおいて分岐のある箇所 (Link4 から Link5/Link9 への分岐) を考えると, Link5 及び Link9 には Link4 における角速度および角加速度が伝達されるため, それぞれの原点に

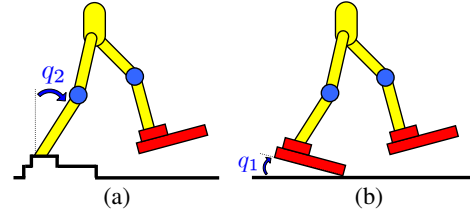


Fig. 3: Phase (I) and (I')

における加速度  ${}^i\ddot{\mathbf{p}}_i$  ( $i = 5, 9$ ) は Link4 の原点における加速度を用いて以下の式で表現できる.

$${}^i\ddot{\mathbf{p}}_i = {}^4\mathbf{R}_i^T [{}^4\ddot{\mathbf{p}}_4 + {}^4\dot{\boldsymbol{\omega}}_4 \times {}^4\dot{\mathbf{p}}_i + {}^4\boldsymbol{\omega}_4 \times ({}^4\boldsymbol{\omega}_4 \times {}^4\dot{\mathbf{p}}_i)] \quad (1)$$

ここで,  $3 \times 3$  の大きさを持つ  ${}^4\mathbf{R}_i$  は  $\Sigma_4$  を基準とした  $i$  番目のリンクの姿勢を表す回転行列であり,  ${}^4\dot{\mathbf{p}}_i$  は Link4 の原点から  $i$  番目のリンクを表す位置ベクトルを示している. そして,  ${}^4\dot{\boldsymbol{\omega}}_4$  と  ${}^4\boldsymbol{\omega}_4$  はそれぞれ Link4 の角加速度と角速度である. Link10 から Link11/Link14/Link17 への分岐点においても同様の計算を行うことで加速度の導出が可能である. 式 (1) を用いると,  $i$  番目のリンクの重心における加速度は以下のように計算できる.

$${}^i\dot{\mathbf{s}}_i = {}^i\dot{\mathbf{p}}_i + \dot{\boldsymbol{\omega}}_i \times {}^i\dot{\mathbf{s}}_i + \boldsymbol{\omega}_i \times (\boldsymbol{\omega}_i \times {}^i\dot{\mathbf{s}}_i) \quad (2)$$

次に, 先端のリンクから根元のリンクに向かって順番に逆動力学計算を行い, 各リンクにおける Newton および Euler の方程式を導出する. 分岐のないリンクに関する Newton/Euler の方程式は式 (3), (4) で表される.

$${}^i\mathbf{f}_i = {}^i\mathbf{R}_{i+1}^{i+1} \mathbf{f}_{i+1} + m_i {}^i\dot{\mathbf{s}}_i \quad (3)$$

$${}^i\mathbf{n}_i = {}^i\mathbf{R}_{i+1}^{i+1} \mathbf{f}_{i+1} + \mathbf{I}_i {}^i\dot{\boldsymbol{\omega}}_i + {}^i\boldsymbol{\omega}_i \times (\mathbf{I}_i {}^i\boldsymbol{\omega}_i) + {}^i\dot{\mathbf{s}}_i \times (m_i {}^i\dot{\mathbf{s}}_i) + {}^i\dot{\mathbf{p}}_{i+1} \times ({}^i\mathbf{R}_{i+1}^{i+1} \mathbf{f}_{i+1}) \quad (4)$$

そして,  $i$  番目のリンクにおける回転関節の運動方程式は回転軸 ( $\Sigma_i$  における  $z$  軸) を表す単位ベクトル  $\mathbf{e}_{zi}$  を用いることにより, 式 (5) として表現できる.

$$\tau_i = (\mathbf{e}_{zi})^T {}^i\mathbf{n}_i + d_i \dot{q}_i \quad (5)$$

その一方で, 前述した Link4 から Link5/Link9 への分岐点における逆動力学計算では, Link4 に Link5 と Link9 から力およびトルクが伝達されるため, Link4 に関する Newton/Euler の方程式及び運動方程式は以下ようになる. また Link4 に関する運動方程式は式 (8) となる.

$${}^4\mathbf{f}_4 = {}^4\mathbf{R}_5^5 \mathbf{f}_5 + {}^4\mathbf{R}_9^9 \mathbf{f}_9 + m_4 {}^4\dot{\mathbf{s}}_4 \quad (6)$$

$${}^4\mathbf{n}_4 = {}^4\mathbf{R}_5^5 \mathbf{n}_5 + {}^4\mathbf{R}_9^9 \mathbf{n}_9 + \mathbf{I}_4 {}^4\dot{\boldsymbol{\omega}}_4 + {}^4\boldsymbol{\omega}_4 \times (\mathbf{I}_4 {}^4\boldsymbol{\omega}_4) + {}^4\dot{\mathbf{s}}_4 \times (m_4 {}^4\dot{\mathbf{s}}_4) + {}^4\dot{\mathbf{p}}_5 \times ({}^4\mathbf{R}_5^5 \mathbf{f}_5) + {}^4\dot{\mathbf{p}}_9 \times ({}^4\mathbf{R}_9^9 \mathbf{f}_9) \quad (7)$$

$$\tau_4 = (\mathbf{e}_{z4})^T {}^4\mathbf{n}_4 + d_4 \dot{q}_4 \quad (8)$$

式 (5), (8) より, Fig. 3 (a) に示されるような片脚で立っている Phase (I) の状態のヒューマノイドを表現する運動

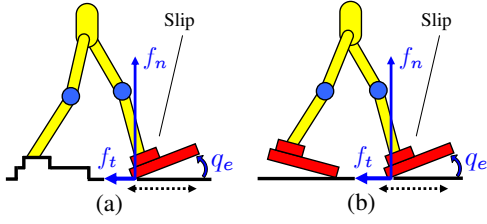


Fig. 4: Phase (II) and (II')

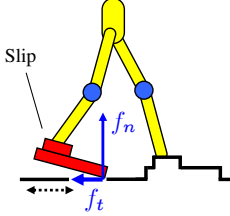


Fig. 5: Phase (IV)

方程式として式 (9) が得られる.

$$M(q)\ddot{q} + h(q, \dot{q}) + g(q) + D\dot{q} = \tau \quad (9)$$

ここで, Fig. 3 (a) は支持脚が面接地の状態を示している. そのため, 関節角度を表す変数の次元は  $\mathbf{q} = [q_2, q_3, \dots, q_{17}]^T$  であり, 支持脚は地面に対して滑りを起こさないと仮定している. また, つま先を表すリンク (Link0) は接地している間において回転運動を生じないものとする. そして,  $M$  は慣性行列,  $h$ ,  $g$  はそれぞれ遠心力/コリオリ力, 重力項を表すベクトル,  $D$  は関節の粘性摩擦係数を表す対角行列  $D = \text{diag}[d_0, d_1, \dots, d_{16}]$ ,  $\tau$  は入力トルクベクトルである. もし Fig. 3 (b) のように Phase (I') として遊脚が接地する前に支持脚の踵が地面から離れる場合, 支持脚の回転を表す変数  $q_1$  が  $\mathbf{q}$  に追加されるため変数の次元が変化し  $\mathbf{q} = [q_1, q_2, \dots, q_{17}]^T$  となる. このように歩容に応じた変数の次元を切り替え, 点接地や面接地の区別を行う.

## 2.2 点拘束を含むモデル

Phase (I) を維持している状態で遊脚の踵が接地した場合, Phase (II) が Fig. 4 (a) のように現れる. Phase (II) は遊脚の踵を地面 ( $\Sigma_W$  の  $z$  軸方向) に対して拘束することで実現できる. この拘束状態は踵の位置ベクトルを  $\mathbf{r}(q)$  し, 式 (10) として定義できる.

$$C_1(\mathbf{r}(q)) = 0 \quad (10)$$

そして, 式 (9) と式 (10) を組み合わせることにより Fig. 4 (a) の状態が表現可能である. また,  $\Sigma_W$  における  $z$  方向以外の自由度は拘束していないため, 拘束されている足の速度と摩擦力の大きさの関係に応じて地面に対する滑りが生じる.

ここで, 拘束運動に関して以下の 2 つの仮定を行う. (i) 抗力  $f_n$ , 地面と足の間作用する摩擦力  $f_t$  は

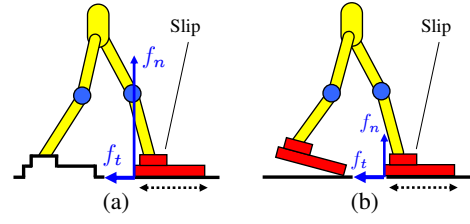


Fig. 6: Phase (III) and (III')

直交する. (ii)  $f_t$  は抗力に比例して決定される:  $f_t = K f_n$  ( $K$  は摩擦係数:  $0 < K \leq 1$ ). 足が滑らない場合  $f_t$  は静摩擦力として作用し, 足が滑っているとき  $f_t$  は動摩擦力として扱うことが可能である. そして, 単一の拘束を含むダイナミクスは以下の式で表現される.

$$\begin{aligned} M(q)\ddot{q} + h(q, \dot{q}) + g(q) + D\dot{q} \\ = \tau + \mathbf{j}_c^T f_n - \mathbf{j}_t^T f_t \\ = \tau + (\mathbf{j}_c^T - \mathbf{j}_t^T K) f_n \end{aligned} \quad (11)$$

ここで,  $\mathbf{j}_c$  と  $\mathbf{j}_t$  は以下のように定義される.

$$\mathbf{j}_c^T = \left( \frac{\partial C_1}{\partial \mathbf{q}^T} \right)^T \left( 1 / \left\| \frac{\partial C_1}{\partial \mathbf{r}^T} \right\| \right), \quad \mathbf{j}_t^T = \left( \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \mathbf{q}^T} \right)^T \frac{\dot{\mathbf{r}}}{\|\dot{\mathbf{r}}\|}. \quad (12)$$

さらに, 式 (10) を時間  $t$  による 2 階微分を行うことで,  $\ddot{q}$  に関する拘束条件が得られる.

$$\left( \frac{\partial C_1}{\partial \mathbf{q}^T} \right) \ddot{q} + \dot{q}^T \left\{ \frac{\partial}{\partial \mathbf{q}} \left( \frac{\partial C_1}{\partial \mathbf{q}^T} \right) \dot{q} \right\} = 0 \quad (13)$$

ここで, 式 (11), (13) における  $\ddot{q}$  が一致すれば, 式 (13) の解と式 (10) の  $\mathbf{q}$  は一致する. この関係は拘束運動の間, 常に維持されなければならない. 最後に式 (11), (13) を行列形式で表した以下の式が点拘束を表現するダイナミクスとなる.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} M(q) & -(\mathbf{j}_c^T - \mathbf{j}_t^T K) \\ \frac{\partial C_1}{\partial \mathbf{q}^T} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q} \\ f_n \end{bmatrix} \\ = \begin{bmatrix} \tau - h(q, \dot{q}) - g(q) - D\dot{q} \\ -\dot{q}^T \left\{ \frac{\partial}{\partial \mathbf{q}} \left( \frac{\partial C_1}{\partial \mathbf{q}^T} \right) \right\} \dot{q} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (14)$$

さらに, Fig. 5 は前足が面接地, 後足がつま先で接地している状況である. これは Phase (II) において前足と後足を入れ替えた場合に等しいので, この Phase (IV) の状態も式 (14) で表すことが可能である.

## 2.3 面拘束を含むモデル

Phase (II) または (II') において前足のつま先が接地し, 前足全体が面接地状態となった時に Fig 6 に示される状況となる. この状態を表現するために式 (10) で定義され

る  $C_1$  に加え、地面に対する前足の角度を  $0$  に保持するための拘束条件  $C_2(\mathbf{r}(\mathbf{q})) = 0$  を考慮しなければならない。ここで、 $C_2(\mathbf{r}(\mathbf{q})) = q_e = q_1 + \dots + q_7 = 0$  である。すなわち、面接地状態における拘束条件は以下の式で表現可能である。

$$\mathbf{C}(\mathbf{r}(\mathbf{q})) = \begin{bmatrix} C_1(\mathbf{r}(\mathbf{q})) \\ C_2(\mathbf{r}(\mathbf{q})) \end{bmatrix} = \mathbf{0} \quad (15)$$

そして、拘束運動によって発生する抗力  $f_n$  ( $C_1$  に対応) とトルク  $\tau_n$  ( $C_2$  に対応) を含めた式が式 (11) の導出と同じ手順で以下のように求められる。

$$\begin{aligned} M(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{g}(\mathbf{q}) + D\dot{\mathbf{q}} \\ = \boldsymbol{\tau} + (\mathbf{j}_c^T - \mathbf{j}_t^T K) f_n + \mathbf{j}_r^T \tau_n \end{aligned} \quad (16)$$

ここで、 $\mathbf{j}_r$  は以下の式で定義される。

$$\mathbf{j}_r^T = \left( \frac{\partial C_2}{\partial \mathbf{q}^T} \right)^T \left( 1 / \left\| \frac{\partial C_2}{\partial \mathbf{q}^T} \right\| \right) \quad (17)$$

さらに、式 (10) を時間  $t$  による 2 階微分し、式 (16) と組み合わせることによって、面接地を表現する以下のダイナミクスを得る。

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} M(\mathbf{q}) & -(\mathbf{j}_c^T - \mathbf{j}_t^T K) & -\mathbf{j}_r^T \\ \partial C_1 / \partial \mathbf{q}^T & 0 & 0 \\ \partial C_2 / \partial \mathbf{q}^T & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{q}} \\ f_n \\ \tau_n \end{bmatrix} \\ = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\tau} - \mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) - \mathbf{g}(\mathbf{q}) - D\dot{\mathbf{q}} \\ -\dot{\mathbf{q}}^T \left\{ \frac{\partial}{\partial \mathbf{q}} \left( \frac{\partial C_1}{\partial \mathbf{q}^T} \right) \right\} \dot{\mathbf{q}} \\ -\dot{\mathbf{q}}^T \left\{ \frac{\partial}{\partial \mathbf{q}} \left( \frac{\partial C_2}{\partial \mathbf{q}^T} \right) \right\} \dot{\mathbf{q}} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (18)$$

## 2.4 ダイナミクスの統合

本章で述べた式 (9), (14) は式 (18) の一部であると見ることが可能である。すなわち、式 (18) は全てのダイナミクスを含んでいると言える。本論文では状態 (I)–(IV) において、地面に対する支持脚の滑りや両足が空中にある状態の歩容を考慮していないが、変数の次元や拘束条件を変更することによって式 (18) はこれらの歩容も表現することが可能である。

Table 1 は考えられる全ての歩容を足の接地状態別に表したものである。支持脚 (S.F.) および遊脚 (L.F.) に対して、それぞれ面接地 (S), 点接地 (P), 空中 (F) の状態を考えている。変数に関しては回転関節のみではなく、Link0 の変位  $y_0$  および  $z_0$  を  $\mathbf{q}$  に含めることによって、式 (18) のダイナミクスは支持脚の滑りや両足が空中にある状態 (ジャンプ動作) も表現可能である。

Table 1: Possible states of humanoid's walking

S.F.	L.F.	State variables	Constraint
(Stop)			
S	F	$\mathbf{q} = [q_2, \dots, q_n]$	Nothing
S	P	$\mathbf{q} = [q_2, \dots, q_n], f_n$	$C_1 = 0$
S	S	$\mathbf{q} = [q_2, \dots, q_n], f_n, \tau_n$	$C_1, C_2 = 0$
P	F	$\mathbf{q} = [q_1, \dots, q_n]$	Nothing
P	P	$\mathbf{q} = [q_1, \dots, q_n], f_n$	$C_1 = 0$
P	S	$\mathbf{q} = [q_1, \dots, q_n], f_n, \tau_n$	$C_1, C_2 = 0$
(Slip)			
S	F	$\mathbf{q} = [y_0, q_2, \dots, q_n]$	Nothing
S	P	$\mathbf{q} = [y_0, q_2, \dots, q_n], f_n$	$C_1 = 0$
S	S	$\mathbf{q} = [y_0, q_2, \dots, q_n], f_n, \tau_n$	$C_1, C_2 = 0$
P	F	$\mathbf{q} = [y_0, q_1, \dots, q_n]$	Nothing
P	P	$\mathbf{q} = [y_0, q_1, \dots, q_n], f_n$	$C_1 = 0$
P	S	$\mathbf{q} = [y_0, q_1, \dots, q_n], f_n, \tau_n$	$C_1, C_2 = 0$
(Air)			
F	F	$\mathbf{q} = [y_0, z_0, q_1, \dots, q_n]$	Nothing
F	P	$\mathbf{q} = [y_0, z_0, q_1, \dots, q_n], f_n$	$C_1 = 0$
F	S	$\mathbf{q} = [y_0, z_0, q_1, \dots, q_n], f_n, \tau_n$	$C_1, C_2 = 0$

## 3 歩容の状態遷移

Figure 7 は二足歩行時の歩容の変化を示している。分岐の存在する箇所に関しては、先に条件が満たされた方に遷移する。この状態遷移に関して重要なことは完全に式 (9), (14), (18) で表現されるダイナミクスの解に依存している点である。それ故に、歩容の遷移を予測することは困難であり、ロボットの初期姿勢、地面の形状、印加される入力に大きく依存する。

### 3.1 面接地から点接地への遷移

本節では Phase (I) または (II) において、後足の踵が地面から離れる条件について考える。この判定には式 (3), (4) で得られる力  ${}^2\mathbf{f}_2$  及びトルク  ${}^2\mathbf{n}_2$  を用いる。まず、 ${}^2\mathbf{f}_2$  と  ${}^2\mathbf{n}_2$  の座標系を  $\Sigma_2$  から世界座標  $\Sigma_W$  へ変換し、 ${}^W\mathbf{f}_2 = {}^W\mathbf{R}_2 {}^2\mathbf{f}_2$ ,  ${}^W\mathbf{n}_2 = {}^W\mathbf{R}_2 {}^2\mathbf{n}_2$  を得る。そして、 ${}^W\mathbf{f}_2$  の  $z$  軸への射影及び  ${}^W\mathbf{n}_2$  の  $x$  軸への射影をそれぞれ単位ベクトル  $\mathbf{e}_x$ ,  $\mathbf{e}_z$  を用いて導出する。

$${}^W f_{2z} = (\mathbf{e}_z)^T {}^W \mathbf{f}_2, \quad {}^W n_{2x} = (\mathbf{e}_x)^T {}^W \mathbf{n}_2 \quad (19)$$

これらの力・トルクが足の両端に作用していると仮定するとき、 ${}^W f_{2z}$  と  ${}^W n_{2x}$  は Link1 に対して Fig. 8 に示すように作用する。ここで、踵/つま先に作用している力の合計をそれぞれ  $F_R$ ,  $F_F$  と定義すると、以下の式が得ら

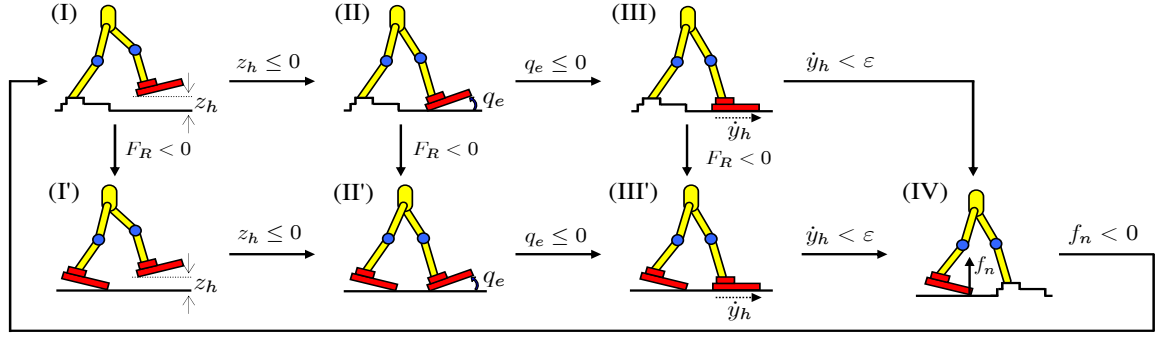


Fig. 7: Phase and gait transition

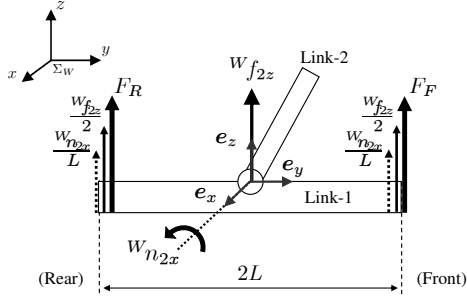


Fig. 8: Force and moment act on Link1

れる。

$$F_R = \frac{Wf_{2z}}{2} - \frac{Wn_{2x}}{L}, \quad F_F = \frac{Wf_{2z}}{2} + \frac{Wn_{2x}}{L} \quad (20)$$

従って、 $F_R$  の値が負となった時 Link1 はつま先周りに回転を始める。すなわち、踵が地面から離れる。そのため、 $F_R < 0$  が歩容切り替えのための条件式である。

### 3.2 衝突時のダイナミクス

足が地面に接地した瞬間には、足の地面との衝突を考慮する必要がある。ここでは、文献 [13] で述べられている手法を用いて衝突時のダイナミクスを導出する。まず、式 (11), (16) で表現される拘束状態を表す運動方程式をそれぞれ積分する。

$$M(q)\dot{q}(t^+) = M(q)\dot{q}(t^-) + (j_c^T - j_r^T K)F_{im} \quad (21)$$

$$M(q)\dot{q}(t^+) = M(q)\dot{q}(t^-) + j_r^T I_r \quad (22)$$

ここでは、衝突の前後において角速度のみが変化するものと仮定した。式 (21) は地面と踵の衝突 ( $\Sigma_W$  における  $z$  方向)、式 (22) はつま先と地面との衝突 ( $\Sigma_W$  における  $x$  回りの回転運動による衝突) を示している。 $\dot{q}(t^+)$  と  $\dot{q}(t^-)$  はそれぞれ衝突前後の角速度である。また、 $F_{im} = \lim_{t^- \rightarrow t^+} \int_{t^-}^{t^+} f_n dt$  と  $I_r = \lim_{t^- \rightarrow t^+} \int_{t^-}^{t^+} \tau_n dt$  はロボットに作用する衝突時の力積である。一方で衝突後は以下の式を満たすように運動が行われる。

$$\frac{\partial C_1}{\partial q} \dot{q}(t^+) = 0, \quad \frac{\partial C_2}{\partial q} \dot{q}(t^+) = 0 \quad (23)$$

以上に示した式 (21)–(23) より、衝突前後の角速度の関係を表すダイナミクスが以下のように得られる。

$$\begin{bmatrix} M(q) & -(j_c^T - j_r^T K) \\ \frac{\partial C_1}{\partial q^T} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}^+ \\ F_{im} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M(q)\dot{q}^- \\ 0 \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$\begin{bmatrix} M(q) & -j_r^T \\ \frac{\partial C_2}{\partial q^T} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}^+ \\ I_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M(q)\dot{q}^- \\ 0 \end{bmatrix} \quad (25)$$

## 4 Lifting Stabilization Strategy

LSS の目的は頭部の位置を一定の高さに保ち、転倒を避けることである。本論文ではヒューマノイドが物体を見ながら歩行を行い、世界座標における物体の位置  $r_{obj}(t)$  と頭部の位置  $r_h(t)$  との偏差  $\delta\psi(t)$  が既知であるという仮定の下で Fig. 9 に示す LSS を提案する。

偏差  $\delta\psi(t)$  が既知である時、頭部位置を所望の位置に収束させるために必要な力  $f_v$  は以下の式で得られる。

$$f_v(t) = K_v \delta\psi(t) \quad (26)$$

$K_v$  は P 制御に必要な任意の比例ゲインを示しており、 $K_v = \text{diag}[k_{vx}, k_{vy}, k_{vz}]$  である。そして、 $f_v(t)$  の実現に必要なトルクを以下の式から導出する。

$$\tau_v(t) = J_v(q)^T f_v(t) \quad (27)$$

ここで  $J_v(q)$  は支持脚から頭部までのヤコビ行列である。入力トルクの決定にヤコビ行列  $J_v(q)$  の転置を用いているため、特異姿勢が発生した場合においても  $\tau_v(t)$  の存在が補償されているという利点を有している。すなわち、この戦略は腰の位置が高い状態や膝を伸ばした姿勢における二足歩行の実現を可能としている。

## 5 シミュレーション

質量 15 [kg], 全長 1.6 [m] のヒューマノイドモデルを作成し LSS の有効性を示す。本研究においてシミュレー

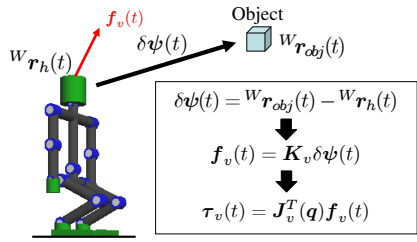


Fig. 9: Concept of Lifting Stabilization Strategy

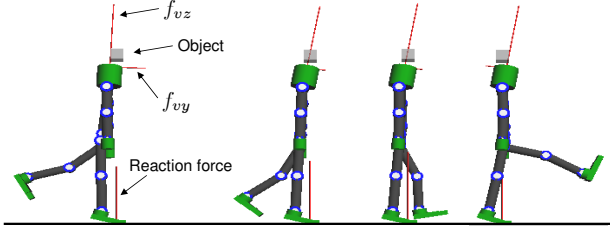


Fig. 10: Screen-shot of simulation

シミュレーションプログラムは“Borland C++ Builder Professional Ver. 5.0”を用いて作成し、ヒューマノイドの3D画像表示には“OpenGL”を使用した。

支持脚はつま先による接地を考え、安定性を評価するために遊脚(Link6)には外乱として周期関数  $4.0 \cos(\pi t)$  を入力し往復振動を行わせた。物体を  $\mathbf{r}_{obj}(t) = [0, 0, 1.7]^T$  の位置に固定し、 $\mathbf{K}_v = \text{diag}[0, 100, 5000]$  の下で式(27)の入力を印加した。シミュレーション結果として、式(10)、(11)が得られた。Figure 10はシミュレーションの状況を示し、地面から受ける抗力及び転倒を防ぐために加えられるべき  $\mathbf{f}_v$  の成分を描画している。一方、Fig. 11は頭部と物体の位置の  $y, z$  成分を示している。これらの結果より、頭部の位置が一定の範囲に収まっていることが確認され、LSSに転倒防止の効果が期待される。

## 6 結 言

本論文では人間らしい歩容を使用して歩行を行うヒューマノイドの実現についての議論を行った。そして、足の滑りや不安定な歩容の出現によって生じるヒューマノイドの転倒を防ぐための戦略としてLSSを提案し、シミュレーション結果から転倒防止に一定の効果を発揮することを確認した。しかし二足歩行の実現には至らなかったため、今後は二足歩行におけるLSSの有効性を示すことが課題とされる。

## 参考文献

[1] M. Vukobratovic, A. Frank and D. Juricic, “On the Stability of Biped Locomotion,” *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, Vol.17, No.1, 1970.  
 [2] M. Vukobratovic and J. Stepanenko, “On the Stability of Anthropomorphic Systems,” *Mathematical Biosciences*, Vol.15, pp.1–37, 1972.

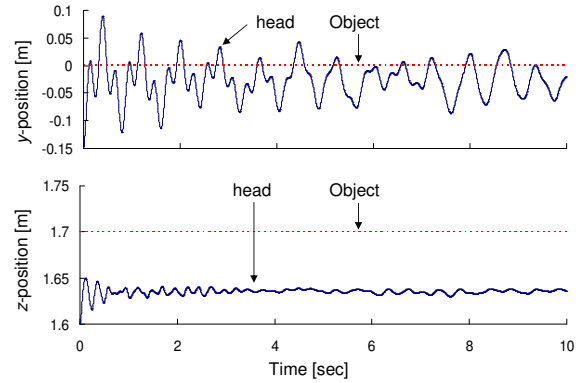


Fig. 11: Position of object  $\mathbf{r}_{obj}(t)$  and head  $\mathbf{r}_h(t)$

[3] Y. Harada, J. Takahashi, D. Nenchev and D. Sato, “Limit Cycle Based Walk of a Powered 7DOF 3D Biped with Flat Feet,” *Proc. of International Conference on IROS*, pp.3623–3628, 2010.  
 [4] S. Colins, A. Ruina, R. Tedrake and M. Wisse, “Efficient Bipedal Robots Based on Passive-Dynamic Walkers,” *Science*, Vol.307, pp.1082–1085, 2005.  
 [5] J. Pratt, P. Dilworth and G. Pratt, “Virtual Model Control of a Bipedal Walking Robot,” *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.193–198, 1997.  
 [6] R.E. Westervelt, W.J. Grizzle and E.D. Koditschek, “Hybrid Zero Dynamics of Planar Biped Walkers,” *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol.48, No.1, pp.42–56, 2003.  
 [7] K. Hirai, M. Hirose, Y. Haikawa and T. Takenaka, “The development of the Honda Humanoid robot,” *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.1321–1326, 1998.  
 [8] S. Kajita, M. Morisawa, K. Miura, S. Nakaoka, K. Harada, K. Kaneko, F. Kanehiro and K. Yokoi, “Biped Walking Stabilization Based on Linear Inverted Pendulum Tracking,” *Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp.4489–4496, 2010.  
 [9] H. Dau, C. Chew and A. Poo, “Proposal of Augmented Linear Inverted Pendulum Model for Bipedal Gait Planning,” *Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp.172–177, 2010.  
 [10] S. Kajita and K. Tani, “Study of Dynamic Locomotion on Rugged Terrain-Derivation and Application of the Linear Inverted Pendulum Mode,” *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.1405–1411, 1991.  
 [11] S. Kajita, F. Kanehiro, K. Kaneko, K. Yokoi and H. Hirukawa, “The 3D Linear Inverted Pendulum Mode: A simple modeling for a biped walking pattern generation,” *Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2001.  
 [12] J.H. Park and K.D. Kim, “Biped walking robot using gravity-compensated inverted pendulum mode and computed torque control,” *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol.4, pp.3528–3593, 1998.  
 [13] Y. Huang, B. Chen, Q. Wang, K. Wei and L. Wang, “Energetic efficiency and stability of dynamic bipedal walking gaits with different step lengths,” *Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp.4077–4082, 2010.  
 [14] T. Wu, T. Yeh and B. Hsu, “Trajectory Planning of a One-Legged Robot Performing Stable Hop,” *Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp.4922–4927, 2010.  
 [15] Y. Nakamura and K. Yamane, “Dynamics of Kinematic Chains with Discontinuous Changes of Constraints—Application to Human Figures that Move in Contact with the Environments—,” *Journal of RSJ*, Vol.18, No.3, pp.435–443, 2000 (in Japanese).  
 [16] J.Y.S. Luh, M.W. Walker and R.P.C. Paul, “On-Line Computational Scheme for Mechanical Manipulators,” *ASME J. of DSME*, Vol.102, No.2, pp.69–76, 1980.  
 [17] M.W. Walker and D.E. Orin, “Efficient Dynamic Computer Simulation of Robotic Mechanisms,” *ASME J. of DSME*, Vol.104, pp.205–211, 1982.  
 [18] Tsutomu Mita and Koichi Osuka: “Introduction to Robot Control,” CORONA PUBLISHING CO., LTD., 1989 (in Japanese).