

Visual-Lifting Stabilizationに基づく二足歩行の動的形状変更能力

○小林洋祐 見浪護 矢納陽 前場友秀 (岡山大学)

Dynamic Reconfiguration Capability of Bipedal Walking Based on Visual-Lifting Stabilization

*Y. Kobayashi, M. Minami, A. Yanou and T. Maeba (Okayama University)

Abstract— In this paper, we propose a new index of dynamic manipulability for humanoid robot to estimate dynamic ability to change configuration by using remaining redundancy, while prior task is being controlled, e.g., face and eyes being directed to some object. Several indexes have been proposed so far to measure static and dynamical capability of robot manipulator. For example, Dynamic Manipulability (DM) ellipsoid describes a distribution of hand acceleration produced by normalized joint torque. On the other hand, Reconfiguration Manipulability (RM) ellipsoid denotes a distribution of each link velocity produced by joint angular velocity. This paper shows new index of Dynamic Reconfiguration Manipulability (DRM) combined DM and RM, and we have adopted the DRM to a humanoid robot, exhibiting how the DRM indicates directly the configuration-changeability of walking humanoid robot.

Key Words: Dynamic Reconfiguration Manipulability, Humanoid robot, Bipedal walking

1 緒言

ヒューマノイドのダイナミクスは強い非線形性や複雑な干渉を有するため取り扱いが難しい。そのため、線形倒立振子などへ近似するなど計算を単純化して制御器の設計を容易にすることによって所望の運動を実現することが多い^{1)~8)}。ヒューマノイドの歩行に関する研究も幅広く行われており、その中でも Zero-Moment Point (ZMP) を参照することによる歩行制御は有力かつ現実的な手法であることが知られている。ZMP を支持多角形の凸包内⁹⁾,¹⁰⁾ に留めようとする制御によって多くのヒューマノイドの実機が現実世界における歩行を達成した。ZMP を用いない手法としては、引き込み領域の内側へ歩行軌跡を留めることに重点を置いた手法^{11)~13)}があり、これは入力トルクを決定するためにリミットサイクルを参照する手法¹⁴⁾を含む。これらの議論において、モデル化や制御器設計は単純化された二足歩行モデルが対象であり、足 (foot) を含むモデルの作成や足の滑りなどが歩行に与える影響の議論は避けられる傾向にある。その一方で、文献¹⁵⁾ は足 (foot) の存在によって多様な歩容が生成されることを明確に指摘し、様々な歩容を含む歩行モデルを作成している。また、足が接地している状況は拘束運動としてモデル化が可能であり、文献¹⁷⁾ は代数方程式に基づいて物体が環境と接触しながら運動を行っている状態を滑り摩擦を含めて表現し、ヒューマンフィギュアへの応用を提案している。これらの文献と同様に、著者は可能な限り詳細に導出されたダイナミクスに基づいた議論を行う。本研究と文献¹⁵⁾,¹⁷⁾ の観点は共通しているが、各歩容のダイナミクスを状態変数の次元の変化に基づいて導出しているという点が異なっている。つまり、状態変数の次元が運動の結果に応じて変化する (足の拘束状態や路面上の滑り運動に影響を与える)。このような運動の次元が時変である系に対する制御器の設計や安定性の判別を議論している報告はない。

そして、本報では ZMP に依存しない歩行の実現を考える。すなわち、ZMP が支持多角形の境界上に存在

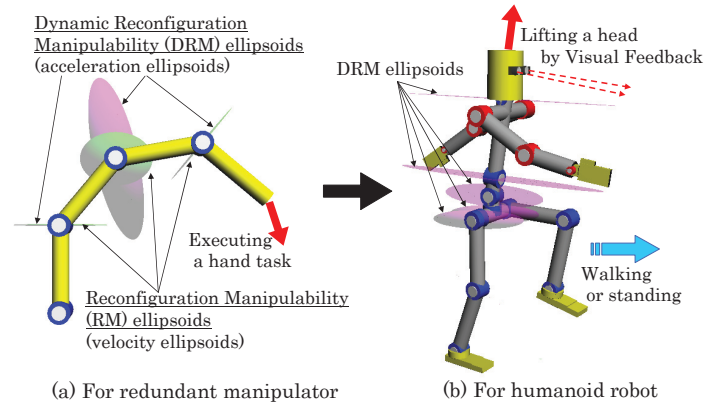


Fig. 1: Applications of dynamic reconfiguration manipulability

し、転倒状態となる歩容を含んだ人間らしい「自然」な歩行である。しかし、ヒューマノイドが転倒状態となっているときの歩容は不安定となる。このような問題に対して、著者らはビジュアルフィードバックによる姿勢安定化戦略をインピーダンス制御²³⁾ の概念に基づいて行う。この戦略は文献²⁴⁾,²⁵⁾ において提案されている“visual pose estimation”を利用しており、ヒューマノイドが固定目標物体を実時間で認識し、その結果得られる頭部の位置/姿勢の目標値と実際の位置/姿勢の偏差をフィードバックすることにより、直立および歩行状態における姿勢安定化を行う。

また人間は、歩行中に頭部の姿勢を固定したまま腰を動かすことができる。つまり、前方にある対象物を見ながら障害物を避けることができる。この人間の振る舞いは、歩行や注視といった第1のタスクを実行した結果から生じる冗長性利用である。それゆえに、本報ではヒューマノイドの動的な冗長性について議論するための概念として動的回避可操作性 (Dynamic Reconfiguration Manipulability, DRM) を提案する。DRM は、マニピュレータの手先にどの程度自由に加速度を発生させることができるかを表す動的可操作性 (Dynamic

Manipulability)²⁶⁾ の概念と冗長マニピュレータの手先に速度タスクが与えられた場合の中間リンクにどの程度自由に速度を発生させることができるかを表す回避可操作性 (Reconfiguration Manipulability)²⁷⁾ の概念を結びつけたものである。この概念により、手先に加速度タスクが与えられた場合に入力トルクによって中間リンクにどの程度自由に加速度を発生させることができるかを指標化できる。この指標をヒューマノイドに適用することにより、頭部の高さを保持した状態で腰部の動的な形状変更のしやすさを表すことができ冗長性利用の目安となる。そこで、本報ではビジュアルフィードバックによる姿勢安定化戦略を用いることで、姿勢安定化や支持多角形の凸包内に ZMP を留めない二足歩行の実現に一定の効果があること、及びビジュアルフィードバックを含む歩行において頭部に与える力の大きさの違いによる動的変更能力の違いについてシミュレーションにより示す。

2 動的回避可操作性

2.1 リンク動的可操作性

リンク動的可操作性楕円体は、マニピュレータのハンドにタスクが与えられていない場合、あるリンクの先端がどの方向にどれだけ加速度を出せるのかを表すものである。各リンクの動きやすさを関節トルクを用いて考える。マニピュレータの運動方程式は一般的に

$$M(q)\ddot{q} + h(q, \dot{q}) + g(q) + D\dot{q} = \tau \quad (1)$$

で表わされる。ここで、 $M(q) \in R^{n \times n}$ は慣性行列、 $h(q, \dot{q}) \in R^n$ は遠心力、コリオリ力を表す項、 $g(q) \in R^n$ は重力を表す項、 $D = \text{diag}[d_1, d_2, \dots, d_n]$ は粘性抵抗行列であり、 $\tau \in R^n$ は入力トルクベクトルである。一方、第 i リンク先端の速度 $\dot{r}_i \in R^m$ と角速度 $\dot{q} \in R^n$ の関係は次式のように表される。

$$\dot{r}_i = J_i(q)\dot{q} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

ここで、 $J_i(q) \in R^{m \times n}$ は 0 の成分を含んだヤコビ行列 $J_i = [\tilde{J}_i, 0]$ として表される。式 (2) を微分することで、

$$\ddot{r}_i = J_i(q)\ddot{q} + a_{ri}(q, \dot{q}) \quad (3)$$

$$a_{ri}(q, \dot{q}) = \dot{J}_i(q)\dot{q} \quad (4)$$

が得られる。 $a_{ri}(q, \dot{q})$ は q と r_i を表す 2 つの座標系空間の関係が非線形であることに起因する加速度と解釈できる。ここで、 a_{ri} というリンク先端の加速度の一部を関節トルクによって実現できる加速度成分とできない成分に分解すると、

$$\begin{aligned} a_{ri} &= J_i J_i^+ a_{ri} + (I - J_i J_i^+) a_{ri} \\ &= J_i M^{-1} M J_i^+ a_{ri} + (I_n - J_i J_i^+) a_{ri} \end{aligned} \quad (5)$$

が得られる。式 (5) において J_i^+ はヤコビ行列 J_i の擬似逆行列であり、 I_n は $n \times n$ 単位行列である。ここで、

$$\tilde{\tau} \triangleq \tau - h(q, \dot{q}) - g(q) - D\dot{q} + M J_i^+ a_{ri} \quad (6)$$

$$\ddot{r}_i \triangleq \ddot{r}_i - (I_n - J_i J_i^+) a_{ri} \quad (7)$$

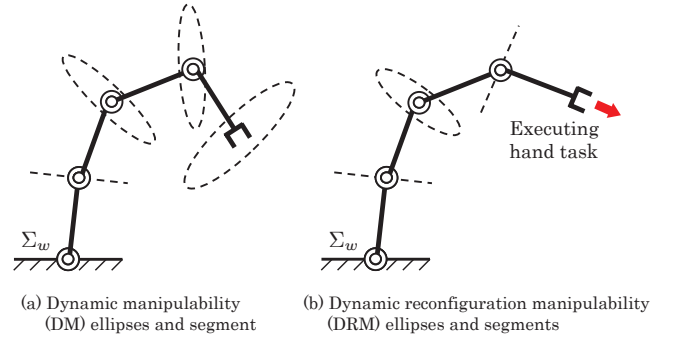


Fig. 2: Dynamic manipulability and dynamic reconfiguration manipulability

によって新たな変数 $\tilde{\tau}$ と $\ddot{r}_i$ を導入すると式 (1), (3), (5), (6), (7) より

$$\ddot{r}_i = J_i M^{-1} \tilde{\tau} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (8)$$

という関係が得られる。ここで、ユークリッドノルム $\|\tilde{\tau}\| \leq 1$ と制約をすると、次式の様に表せる。

$$\ddot{r}_i^T [J_i (M^T M)^{-1} J_i^T] \ddot{r}_i \leq 1, \text{ and } \ddot{r}_i \in R(J_i) \quad (9)$$

これは、 $\|\tilde{\tau}\|$ が $\|\tilde{\tau}\| \leq 1$ を満足するような関節トルク $\tilde{\tau}$ を用いて実現し得る各リンクの先端加速度 $\ddot{r}_i$ の全からなる集合を考えると、それは式 (9) で表され、 $J_i(q)$ の値域空間の次元を持つユークリッド空間内の楕円体となる。

2.2 動的回避可操作性

マニピュレータのハンドにタスクが与えられた場合 ($i = n$) の形状変更能力の良し悪しを考える。その場合のリンク動的可操作性楕円体のことを動的回避可操作性楕円体と呼ぶ。ハンド目標加速度 $\ddot{r}_{nd}$ がタスクとして与えられる場合、 $\ddot{r}_{nd}$ を実現するための $\tilde{\tau}$ は式 (8) より次式の様に求まる。

$$\ddot{r}_{nd} = J_n M^{-1} \tilde{\tau} \quad (10)$$

式 (10) の $\tilde{\tau}$ について解くと、

$$\begin{aligned} \tilde{\tau} &= (J_n M^{-1})^+ \ddot{r}_{nd} \\ &\quad + [I_n - (J_n M^{-1})^+ (J_n M^{-1})] {}^1l \end{aligned} \quad (11)$$

${}^1l \in R^n$ は任意ベクトルである。式 (10) の右辺第一項は $\ddot{r}_{nd}$ を実現する $\tilde{\tau}$ の中で $\|\tilde{\tau}\|$ を最小にする解を与える。また第二項は、第一項による $\ddot{r}_{nd}$ の実現には無関係にマニピュレータの形状を変更する関節トルクを与える。 $(J_n M^{-1})^+ \ddot{r}_{nd}$ による形状変化が原因となって障害物との干渉が発生する場合、障害物回避を行いつつ $\ddot{r}_{nd}$ を実現できるかどうかは、任意ベクトル 1l の $(J_n M^{-1})$ の零空間への直交射影 $[I_n - (J_n M^{-1})^+ (J_n M^{-1})] {}^1l$ に依存して決まる。

目標タスクの次に優先する動的回避タスクを、第一動的回避サブタスクと呼び、左肩添え字の “1” で表す。冗長自由度が多い場合には、複数のサブタスクを実行できる可能性がある。第一サブタスクが第 i リンクに与えられる場合、その回避要求加速度を ${}^1\ddot{r}_{id}$ で表す。式 (10) と式 (12) より次式を得る。

$$\begin{aligned} {}^1\ddot{r}_{id} &= J_i M^{-1} (J_n M^{-1})^+ \ddot{r}_{nd} \\ &\quad + J_i M^{-1} [I_n - (J_n M^{-1})^+ (J_n M^{-1})] {}^1l \end{aligned} \quad (12)$$

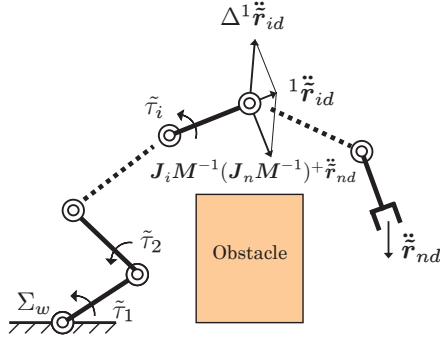


Fig. 3: Obstacle avoidance of intermediate links

ここで、以下のように定義する.

$$\Delta^1 \ddot{\mathbf{r}}_{id} \triangleq \ddot{\mathbf{r}}_{id} - \mathbf{J}_i \mathbf{M}^{-1} (\mathbf{J}_n \mathbf{M}^{-1})^+ \ddot{\mathbf{r}}_{nd} \quad (13)$$

$${}^1 \mathbf{\Lambda}_i \triangleq \mathbf{J}_i \mathbf{M}^{-1} [\mathbf{I}_n - (\mathbf{J}_n \mathbf{M}^{-1})^+ (\mathbf{J}_n \mathbf{M}^{-1})] \quad (14)$$

$\Delta^1 \ddot{\mathbf{r}}_{id}$ を第一動的回避ベクトル, ${}^1 \mathbf{\Lambda}_i$ を第一回避行列と呼ぶ. 式 (13) の関係を Fig.3 に示す. $\ddot{\mathbf{r}}_{nd}$ により第 i リンクに発生する加速度 $\mathbf{J}_i \mathbf{M}^{-1} (\mathbf{J}_n \mathbf{M}^{-1})^+ \ddot{\mathbf{r}}_{nd}$ に対して第一回避要求加速度 $\Delta^1 \ddot{\mathbf{r}}_{id}$ を実現するには, $\Delta^1 \ddot{\mathbf{r}}_{id}$ を $\tilde{\tau}_1, \tilde{\tau}_2, \dots, \tilde{\tau}_i$ により発生させる必要がある. そこで, 式 (13) は次式の様に表せる.

$$\Delta^1 \ddot{\mathbf{r}}_{id} = {}^1 \mathbf{\Lambda}_i {}^1 \mathbf{l} \quad (15)$$

${}^1 \mathbf{\Lambda}_i$ は ${}^1 \mathbf{l}$ の射影行列である. $\ddot{\mathbf{r}}_{nd}$ が与えられるとき, $\Delta^1 \ddot{\mathbf{r}}_{id}$ を通して $\forall \ddot{\mathbf{r}}_{id} \in R^m$ を実現できるかどうかは, ${}^1 \mathbf{\Lambda}_i$ に依存しており, ${}^1 \mathbf{\Lambda}_i$ により $\forall \Delta^1 \ddot{\mathbf{r}}_{id}$ の実現の可能性が判定できる. 式 (15) より $\Delta^1 \ddot{\mathbf{r}}_{id}$ を実現する ${}^1 \mathbf{l}$ を求めると次式となる.

$${}^1 \mathbf{l} = {}^1 \mathbf{\Lambda}_i^+ \Delta^1 \ddot{\mathbf{r}}_{id} + (\mathbf{I}_n - {}^1 \mathbf{\Lambda}_i^+ {}^1 \mathbf{\Lambda}_i) {}^2 \mathbf{l} \quad (16)$$

${}^2 \mathbf{l}$ は ${}^1 \mathbf{l}$ と同様に ${}^2 \mathbf{l} \in R^n$ を満たす任意ベクトルである. ここで新たな入力 ${}^1 \mathbf{l}$ が $\|{}^1 \mathbf{l}\| \leq 1$ なる制約のもとに, $\Delta^1 \ddot{\mathbf{r}}_{id}$ が動ける範囲は次式で表される.

$$\Delta^1 \ddot{\mathbf{r}}_{id}^T ({}^1 \mathbf{\Lambda}_i^+)^T {}^1 \mathbf{\Lambda}_i^+ \Delta^1 \ddot{\mathbf{r}}_{id} \leq 1 \quad (17)$$

$\text{rank}({}^1 \mathbf{\Lambda}_i) = m$ のとき, 式 (17) は m 次元の楕円体を表す. そのときの必要十分条件は

$$\Delta^1 \ddot{\mathbf{r}}_{id} = {}^1 \mathbf{\Lambda}_i {}^1 \mathbf{\Lambda}_i^+ \Delta^1 \ddot{\mathbf{r}}_{id}, \quad \Delta^1 \ddot{\mathbf{r}}_{id} \in R^m, \quad (18)$$

が成り立つことである. 一方, $\text{rank}({}^1 \mathbf{\Lambda}_i) = p < m$ のとき, $\Delta^1 \ddot{\mathbf{r}}_{id}$ は R^m を満たさないで, その場合は $\Delta^1 \ddot{\mathbf{r}}_{id}$ は $\Delta^1 \ddot{\mathbf{r}}_{id}^*$ として表され, 式 (17) は次のように示される.

$$\begin{aligned} (\Delta^1 \ddot{\mathbf{r}}_{id}^*)^T ({}^1 \mathbf{\Lambda}_i^+)^T {}^1 \mathbf{\Lambda}_i^+ \Delta^1 \ddot{\mathbf{r}}_{id}^* &\leq 1 \\ (\Delta^1 \ddot{\mathbf{r}}_{id}^* = {}^1 \mathbf{\Lambda}_i {}^1 \mathbf{\Lambda}_i^+ \Delta^1 \ddot{\mathbf{r}}_{id}) \end{aligned} \quad (19)$$

式 (19) は r 次元の楕円体である. これらの楕円体は Fig.2(b) のように示される.

2.3 動的回避可操作形状値 (DRMSI)

この章では DRM を比較するための指標について考える. 行列 $\mathbf{\Lambda}$ の特異値分解により,

$${}^1 \mathbf{\Lambda}_i = {}^1 \mathbf{U}_i {}^1 \mathbf{\Sigma}_i {}^1 \mathbf{V}_i^T \quad (20)$$

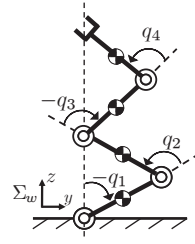


Fig. 4: 4-link manipulator

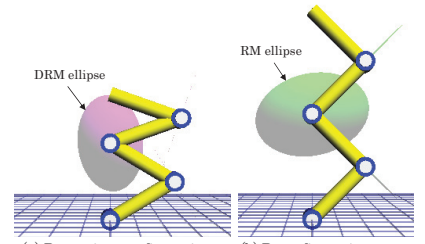
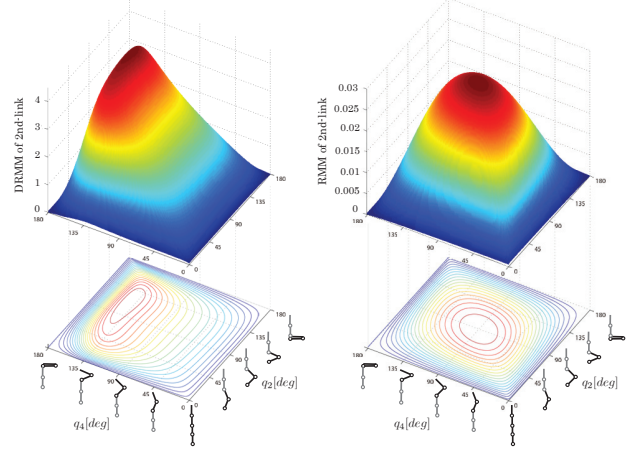


Fig. 5: Shapes of manipulator



(a) 2nd-link-DRMM distribution (b) 2nd-link-RMM distribution

Fig. 6: 2nd-link DRMM and RMM distribution

$${}^1 \mathbf{\Sigma}_i = \begin{matrix} & r & n-r \\ \begin{matrix} r \\ m-r \end{matrix} & \begin{bmatrix} {}^1 \sigma_{i1} & 0 & \\ & \ddots & 0 \\ 0 & & {}^1 \sigma_{ir} & 0 \\ & 0 & & 0 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (21)$$

ただし, ${}^1 \mathbf{U} \in R^{m \times m}$, ${}^1 \mathbf{V} \in R^{n \times n}$ は直交行列であり, r は ${}^1 \mathbf{\Lambda}_i$ の特異値に 0 を持たない数であり, かつ $\sigma_{i,1} \geq \dots \geq \sigma_{i,r} > 0$ である. 第 i リンクの動的形状変更能力は次の式で表される.

$${}^1 w_i = {}^1 \sigma_{i1} \cdot {}^1 \sigma_{i2} \cdots {}^1 \sigma_{ir} \quad (22)$$

本論文では, 関節トルクによって第 i リンク先端に任意の方向へ加速度を発生できる度合を w_i 動的回避可操作度 (Dynamic Reconfiguration Manipulability Measure, DRMM) として定義する. 第 i リンク先端の楕円体の体積は以下のように求められる.

$${}^1 V_{DRi} = c_m \cdot {}^1 w_i \quad (23)$$

$$c_m = \begin{cases} 2(2\pi)^{(m-1)/2} / [1 \cdot 3 \cdots (m-2)m] & (m : \text{odd}) \\ (2\pi)^{m/2} / [2 \cdot 4 \cdots (m-2)m] & (m : \text{even}) \end{cases} \quad (24)$$

マニピュレータ全体のリンクについて動的形状変更能力を考慮するために動的回避可操作形状値 (Dynamic Reconfiguration Manipulability Shape Index, DRMSI) を次のように定義する.

$${}^1 W_{DR} = \sum_{i=1}^{n-1} a_i {}^1 V_{DRi} \quad (25)$$

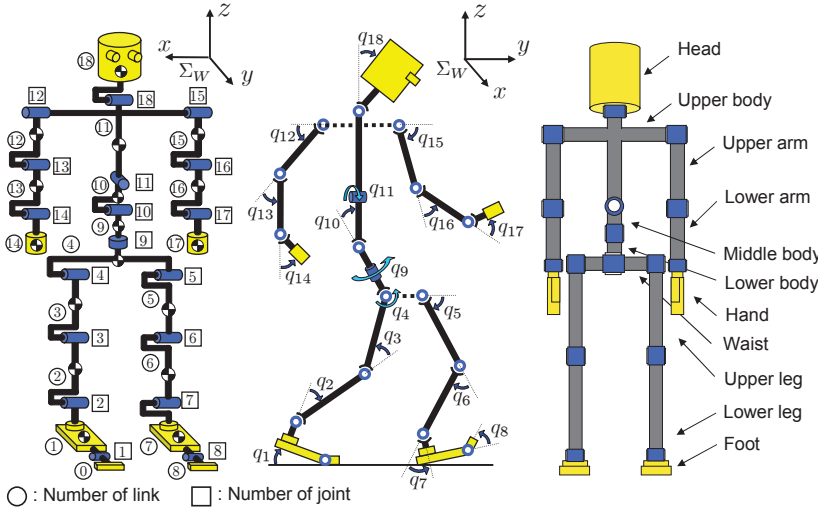


Fig. 7: Definition of humanoid's link, joint and angle number

ちなみに、線分の長さや楕円の面積に比べ楕円体の体積を大きくするため、特異値を 100 倍した。 a_i は Fig. 2(b) のような 2 次元平面のロボットでは次のように表される。

$$a_1 = a_{n-1} = 1[m^{-1}], a_{2,3,\dots,(n-2)} = 1[m^{-2}] \quad (26)$$

2.4 計算例

この節では Fig. 4 の 4 リンクマニピュレータに対して提案する DRM を適用する。各リンクの長さ、質量はそれぞれ 0.3[m], 1.0[kg] とし、粘性抵抗は 2.0[N·m·s/rad] とする。このシミュレーションでは、第 2 リンク先端と手先が常に $y = 0$ にあるものとする。つまり、 q_2 と q_4 が与えられたときに $q_1 = -q_2/2.0$, $q_3 = -(q_2+q_4)/2.0$ となる。Fig. 5(a), (b) は Fig. 6 において DRMM または回避可操作度 RMM が最大値となったときのマニピュレータ形状と、それぞれの形状に対する DRME と RME を示したものである。Fig. 6 において、第 2 リンクの RMM は $q_2 = 90^\circ$, $q_4 = 90^\circ$ のとき最大となり、DRMM は $q_2 = 118^\circ$, $q_4 = 141^\circ$ のとき最大となっている。

3 ヒューマノイドの動力学モデル

ヒューマノイドの関節構成は Fig. 7 のようになっており、文献¹⁸⁾を基に寸法（リンクの長さ l_i [m]・リンクの質量 m_i [kg]・関節の粘性摩擦係数 d_i [N·m·s/rad] は Table 1 の値とする。本報では、文献¹⁹⁾と同様にヒューマノイドを直列リンク接続のマニピュレータと見なして、Newton-Euler 法^{20), 21)}を利用したダイナミクスの数値計算を行った。しかし、Fig. 7 で示すモデルは分岐を持つという点において文献¹⁹⁾と異なっている。本報のモデルはつま先を含んだ足、腕、胴体などから構成される 18 自由度の剛体モデルである。脚がサジタル面に限定されながらも、その平らな足裏と蹴り力によって様々な歩容が現れる。本論文では、リンク 1 とリンク 2 を含んだ脚を支持脚、リンク 7 とリンク 8 を含んだ脚を遊脚または接地脚と呼ぶ。

3.1 片足接地モデル

片足接地の運動方程式は式 (1) と同様である。ここで、支持脚にすべりが発生しない面接地であれば関節角度は $\mathbf{q} = [q_2, q_3, \dots, q_{18}]^T$ のようになると考える。この歩

Table 1: Physical parameters

Link	l_i	m_i	d_i
Head	0.24	4.5	0.5
Upper body	0.41	21.5	10.0
Middle body	0.1	2.0	10.0
Lower body	0.1	2.0	10.0
Upper arm	0.31	2.3	0.03
Lower arm	0.24	1.4	1.0
Hand	0.18	0.4	2.0
Waist	0.27	2.0	10.0
Upper leg	0.38	7.3	10.0
Lower leg	0.40	3.4	10.0
Foot	0.07	1.1	10.0
Total	1.7	63.8	

容は Fig. 8 (I) に示されている。遊脚が接地する前に支持脚のかかとが地面から離れたときは Fig. 8 (II) のようになり変数 q_1 が $\mathbf{q}$ に加えられ、 $\mathbf{q} = [q_1, q_2, \dots, q_{18}]^T$ として表される。この状態でのつま先のトルク τ_1 は常に 0 である。つまり、非ホロノミック拘束であり、転倒状態である。

3.2 拘束状態を含んだモデル

遊脚が地面に接触した場合、Fig. 8 (III), (IV) のような状態が現れる。これは地面に対する接地脚の位置 z_h または角度 q_e が拘束されていることを示す。足は垂直方向にのみ拘束されるので y 方向への運動をもつ。つまり、接地した場合の足の速度に依存して接地脚は前または後ろ方向に滑る。足の位置拘束と角度拘束は C_1 , C_2 としてそれぞれ定義する。これらの拘束は接地脚のかかともしくはつま先の位置を意味する $\mathbf{r}(\mathbf{q})$ を含む式 (27) によって示される。

$$\mathbf{C}(\mathbf{r}(\mathbf{q})) = \begin{bmatrix} C_1(\mathbf{r}(\mathbf{q})) \\ C_2(\mathbf{r}(\mathbf{q})) \\ C_3(\mathbf{r}(\mathbf{q})) \end{bmatrix} = \mathbf{0} \quad (27)$$

ここで、 C_3 は接地脚が滑らないための拘束 (y_h が一定) であり、Fig. 8(III), (IV) に示す。この拘束は足の滑り速度 $\dot{y}_h$ が十分小さい値 ε よりも小さくなった場合 $|\dot{y}_h| < \varepsilon$ に起こる。これは、摩擦力が動摩擦から静止摩擦力に変わったことを意味する。一方、接地脚に作用する力 f_y が f_t を超える、つまり $|f_y| > |f_t|$ となると静止摩擦から動摩擦に変わり、滑り始める。そのとき、外力 f_{n_z} , f_{n_y} 、摩擦力 f_t と外トルク τ_n を含んだロボットの運動方程式は C_1 , C_2 , C_3 に対応して次のように表される。

$$\begin{aligned} \mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{g}(\mathbf{q}) + \mathbf{D}\dot{\mathbf{q}} \\ = \boldsymbol{\tau} + \dot{\mathbf{j}}_{c_z}^T f_{n_z} - \dot{\mathbf{j}}_t^T f_t + \dot{\mathbf{j}}_r^T \tau_n + \dot{\mathbf{j}}_{c_y}^T f_{n_y} \end{aligned} \quad (28)$$

ここで $\dot{\mathbf{j}}_{c_z}$, $\dot{\mathbf{j}}_t$, $\dot{\mathbf{j}}_r$, $\dot{\mathbf{j}}_{c_y}$ は次のように定義される。

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{j}}_{c_z}^T &= \left(\frac{\partial C_1}{\partial \mathbf{q}^T} \right)^T \left(1 / \left\| \frac{\partial C_1}{\partial \mathbf{q}^T} \right\| \right), \quad \dot{\mathbf{j}}_t^T = \left(\frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \mathbf{q}^T} \right)^T \frac{\dot{\mathbf{r}}}{\|\dot{\mathbf{r}}\|} \\ \dot{\mathbf{j}}_r^T &= \left(\frac{\partial C_2}{\partial \mathbf{q}^T} \right)^T \left(1 / \left\| \frac{\partial C_2}{\partial \mathbf{q}^T} \right\| \right), \quad \dot{\mathbf{j}}_{c_y}^T = \left(\frac{\partial C_3}{\partial \mathbf{q}^T} \right)^T \left(1 / \left\| \frac{\partial C_3}{\partial \mathbf{q}^T} \right\| \right) \end{aligned}$$

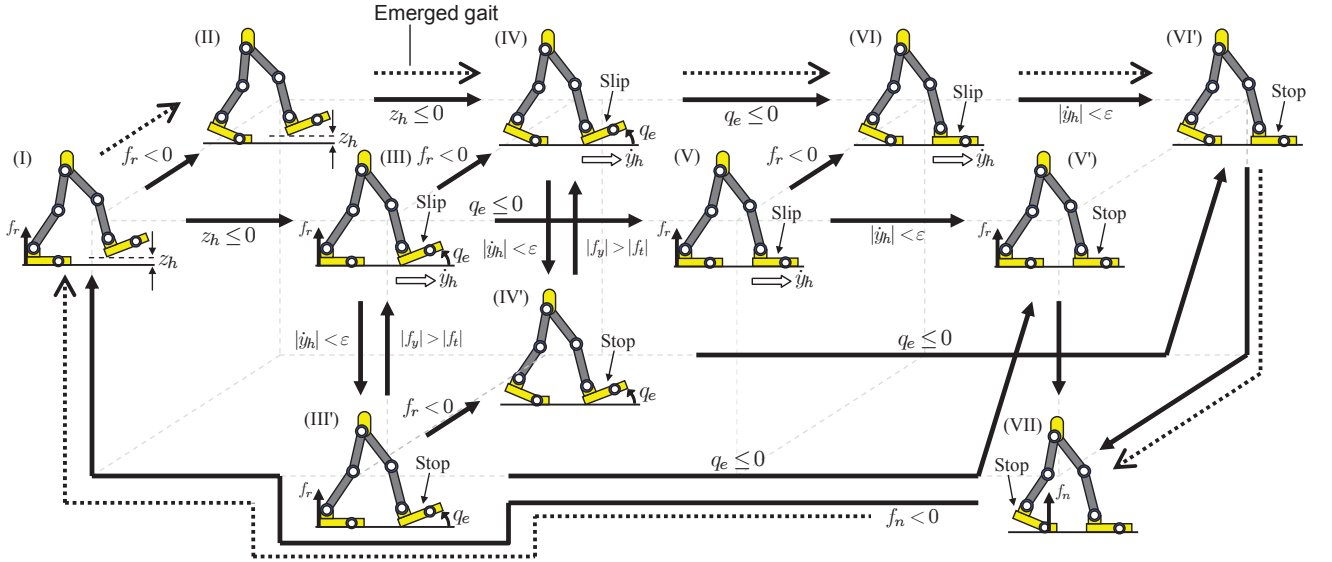


Fig. 8: State, gait's transition and emerged walking gait

Table 2: Possible states for humanoid's walking

State	State variables	Constraint
(I)	$\mathbf{q} = [q_2, q_3, \dots, q_{18}]^T$	Nothing
(II)	$\mathbf{q} = [q_1, q_2, \dots, q_{18}]^T$	Nothing
(III)	$\mathbf{q} = [q_2, q_3, \dots, q_{18}]^T, f_{n_z}$	$C_1 = 0$
(III')	$\mathbf{q} = [q_2, q_3, \dots, q_{18}]^T, f_{n_z}, f_{n_y}$	$C_1, C_3 = 0$
(IV)	$\mathbf{q} = [q_1, q_2, \dots, q_{18}]^T, f_{n_z}$	$C_1 = 0$
(IV')	$\mathbf{q} = [q_1, q_2, \dots, q_{18}]^T, f_{n_z}, f_{n_y}$	$C_1, C_3 = 0$
(V)	$\mathbf{q} = [q_2, q_3, \dots, q_{18}]^T, f_{n_z}, \tau_n$	$C_1, C_2 = 0$
(V')	$\mathbf{q} = [q_2, q_3, \dots, q_{18}]^T, f_{n_z}, \tau_n, f_{n_y}$	$C_1, C_2, C_3 = 0$
(VI)	$\mathbf{q} = [q_1, q_2, \dots, q_{18}]^T, f_{n_z}, \tau_n$	$C_1, C_2 = 0$
(VI')	$\mathbf{q} = [q_1, q_2, \dots, q_{18}]^T, f_{n_z}, \tau_n, f_{n_y}$	$C_1, C_2, C_3 = 0$
(VII)	$\mathbf{q} = [q_2, q_3, \dots, q_{18}]^T, f_{n_z}, f_{n_y}$	$C_1, C_3 = 0$

次の2点は簡単な物理法則である。(i) f_{n_z} (地面に対する拘束力), f_t (地面に対する摩擦力) が直交している。(ii) f_t の値が f_{n_z} に依存している $f_t = K f_{n_z}$ (K は定数: $0 < K \leq 1$). さらに, 式 (27) を時間 t で2階微分すると $\ddot{\mathbf{q}}$ についての拘束式が得られる。

$$\left(\frac{\partial C_i}{\partial \mathbf{q}^T} \right) \ddot{\mathbf{q}} + \dot{\mathbf{q}}^T \left[\frac{\partial}{\partial \mathbf{q}} \left(\frac{\partial C_i}{\partial \mathbf{q}^T} \right) \right] \dot{\mathbf{q}} = 0 \quad (i = 1, 2, 3) \quad (29)$$

式 (27) の拘束の下, 式 (28), (29) での $\ddot{\mathbf{q}}$ は同一の時間で一致する。そして接触が続いている間, $\ddot{\mathbf{q}}$, f_{n_z} , τ_n , f_{n_y} が維持される¹⁷⁾。Fig. 8 に示すように接触パターンが状態変数の次元の変化を作り, 次元の変化が接触パターンを変える。本報では, Fig. 8 に示す歩行中に起こりうる11種類の歩容を想定し, 条件に応じて切り替えている。これらの全ての歩容は式 (28), (29) のダイナミクスにおいて表現可能である。それぞれの歩容変数と次元の組み合わせを Table 2 に示す。

3.3 衝突

遊脚が地面に接触したとき衝突を考慮する必要がある。ここでは, 完全非弾性衝突によって表される衝突

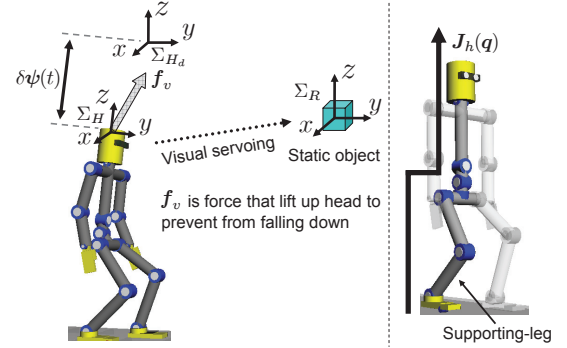


Fig. 10: Concept of Visual Lifting Stabilization

15) であると想定する。

4 Visual Lifting Stabilization

4.1 フィードバックによるトルク生成

本節では, 視覚情報に基づくフィードバックを用いたヒューマノイドの姿勢安定化戦略 (Fig. 10) を提案する。まず, ヒューマノイドの頭部に固定された座標系 Σ_H に対する固定目標物体 Σ_R の位置/姿勢をビジュアルサーボにより計測する。この両者の関係を同次変換行列 ${}^H\mathbf{T}_R$ として定義する。そして, 目標物体と任意に与えた頭部の目標値 Σ_{Hd} の関係 ${}^R\mathbf{T}_{Hd}$ を用いることによって, Σ_{Hd} と Σ_H の偏差 ${}^H\mathbf{T}_{Hd}$ が以下の式によって計算できる。

$${}^H\mathbf{T}_{Hd}(\psi_d(t), \psi(t)) = {}^H\mathbf{T}_R(\psi(t)) \cdot {}^{Hd}\mathbf{T}_R^{-1}(\psi_d(t)) \quad (30)$$

ここで, ${}^H\mathbf{T}_R$ は文献²⁴⁾, ²⁵⁾ で提案されている手法によって計測可能であるが, 本報では ${}^H\mathbf{T}_R$ を画像認識から得るのではなく, 真値が計測されたことを仮定している。そして, $\delta\psi(t)$ を最小とするために, 関節に入力すべきトルクを以下の式で与える。

$$\boldsymbol{\tau}_h(t) = \mathbf{J}_h(\mathbf{q})^T \mathbf{K}_p \delta\psi(t) \quad (31)$$

ここで, $\mathbf{J}_h(\mathbf{q})$ は Fig. 10 に示すように支持脚から頭部までのヤコビ行列, $\mathbf{K}_p$ は比例ゲインを表している。このトルクによって頭部が目標値に引っ張り上げられ, 頭部・重心位置の低下や転倒を防止する。ここで, $\boldsymbol{\tau}_h(t)$

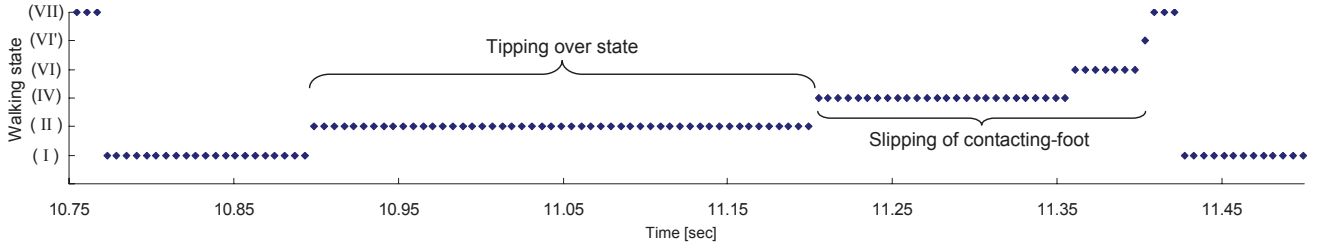


Fig. 9: State transition of walking in one step

中の支持脚つま先のトルクは0とし、つま先立ち状態では転倒状態を意味する。遊脚が前方で接地しても接地脚の進行方向の滑りが増大する場合には転倒する。

4.2 フィードフォワードによるトルク生成

$\tau_h(t)$ の入力トルク以外に 2 つのトルクを加える。遊脚 (joint-5) を前に振り出すために $\tau_t(t) = [0, \dots, 0, \tau_{t5}, 0, \dots, 0]^T$ を与え、ロール角への回転を生じるために腰関節 (joint-11) へ $\tau_w(t) = [0, \dots, 0, \tau_{w11}, 0, \dots, 0]^T$ を与える。 τ_{t5} と τ_{w11} は人間の歩行周期に近くなるよう次のように設定した。

$$\tau_{t5} = 20 \cos \{2\pi(t - t_1)/1.85\}, \quad (32)$$

$$\tau_{w11} = \begin{cases} 50 \sin \{2\pi(t - t_1)/1.85\} & (if \text{ Right leg}) \\ -50 \sin \{2\pi(t - t_1)/1.85\} & (if \text{ Left leg}) \end{cases} \quad (33)$$

ここで t_1 は、状態 (V) または状態 (VII) から状態 (VII) へ歩容が遷移し、支持脚と接地脚が入れ替わる時刻である。

4.3 統合されたコントローラ

式 (31), (32) と (33) によって表されるトルク入力を 1 つにまとめて、 $\tau(t) = \tau_h(t) + \tau_t(t) + \tau_w(t)$ をコントローラとする。

5 二足歩行の例

シミュレーション環境はプログラム作成のため “Borland C++ Builder Professional Ver. 5.0” を用い、表示には “OpenGL Ver. 1.5.0” を用いた。尚、サンプリングタイムは 3.0×10^{-3} [sec]、地面の摩擦係数は $f_t = 0.7f_{n_z}$ である。

5.1 人間らしい安定な歩行例

この章では、安定な歩行を実現するために試行錯誤的に比例ゲイン $K_p = \text{diag}[20, 290, 1100]$ と設定した。そのときの歩行の様子を Fig. 13(a) に示す。歩行結果は、平均歩幅 0.43[m] であり、平均時速 2.15 [km/h] である。ヒューマノイドのダイナミクスによって発生する歩容の遷移を Fig. 9 に示す。本シミュレーションではヒューマノイドは Fig. 8 の “Emergent gait” に示す状態遷移 (I) $\rightarrow$ (II) $\rightarrow$ (IV) $\rightarrow$ (VI) $\rightarrow$ (VI') $\rightarrow$ (VII) $\rightarrow$ (I) $\rightarrow$... のように歩行した。この遷移は Fig. 8 に示す全ての起こりうる状態の中から閉ループのダイナミクスによって選択されたものである。ヒューマノイドの首部分 (link-18 の起点) の軌跡を 3 次元表示したものを Fig. 11 に示す。ただし、過渡応答部分と考えられる 20 歩目までを除いており、地面との衝突による影響は軌道上に表れているが、定常状態においてはリ

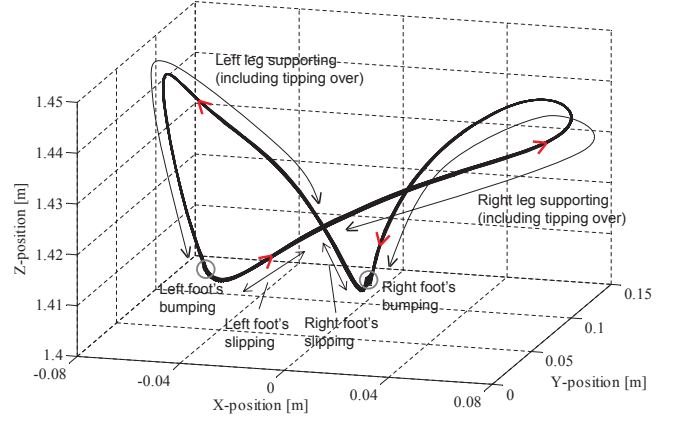


Fig. 11: Emerged limit cycle [(x, y, z) trajectory of neck]

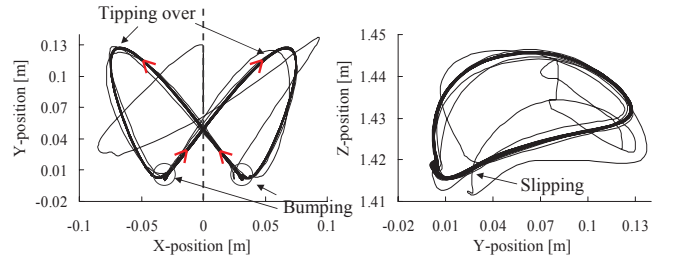


Fig. 12: Motion trajectory of neck

ミットサイクルに収束したと考えられる。そこで、初期形状から 200 歩目までの首の軌跡を x - y 平面と y - z 平面に分けたものを Fig. 12 に示す。左側のグラフでは、破線から右側と左側が線対称になっており、上半身のロール方向への回転により首と肩が y 軸方向にも振動していることが見て取れる。右側のグラフは y - z 平面での首の軌跡であるが、衝突を含む歩容によって首は上下方向に加えて前後方向に振動していることが分かる。これらの図はビジュアルフィードバックによって、転倒状態、衝突、滑りを含む歩行が安定化されていることを意味している。

5.2 動的回避可操作性に基づく分析

この節では 3 種類の比例ゲインによる歩行の違いを動的回避可操作性を適用して考察する。高ゲイン ($K_p = \text{diag}[20, 290, 1100]$)、中ゲイン ($K_p = \text{diag}[20, 290, 950]$)、低ゲイン ($K_p = \text{diag}[20, 290, 900]$) とする。ヒューマノイドは Fig. 13(a), (b), (c) のようにそれぞれ歩行した。楕円体は見やすさのためにスケールアップしている。Fig. 13 において、(a)-1, (b)-1 (c)-1 では支持脚が面接地しているため膝関節に DRM 楕円体が見られない（厳密には線分は存在している）。つまり、変数の次元は $q = [q_2, q_3, \dots, q_{18}]^T$ となっている。それ以外では、点

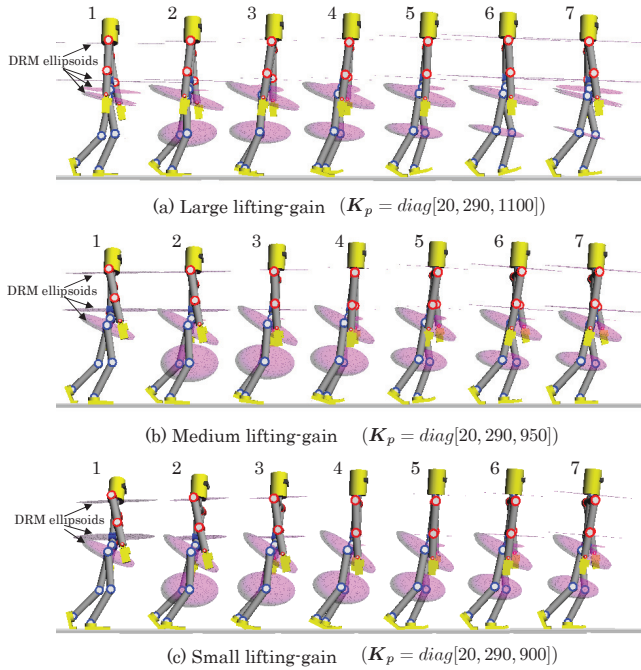


Fig. 13: Screen-shot of bipedal walking with DRM ellipsoids

接地であり $\mathbf{q} = [q_1, q_2, \dots, q_{18}]^T$ となっているため膝関節にも楕円体が見られる（厳密には楕円である）。また、13(c)の形状は(a)と比べ腰を落とした形状であるので、DRM楕円体の体積は(c)の方が大きい。Fig. 14とFig.16からも、比例ゲインが大きいほど楕円体の体積の総和を表したDRMSIが小さくなっていることが確認できる。これは、(c)の形状変更能力が(a)の形状より大きいことを意味しているが、(c)の歩行は人間らしい歩行とは言い難い。Fig.15とFig.17は回避可操性楕円体の体積の総和を表すRMSIを表しているが、比例ゲインが大きいほど一歩におけるRMSIの最大-最小の幅が大きくなっている。

6 結言

本論文では、冗長性利用のための動的な形状変更能力を評価する指標（動的回避可操性）を提案し、4リンクマニピュレータでの簡単な数値例を示し、ヒューマノイドロボットの二足歩行に適用した。滑り動作を含む二足歩行の状態遷移は7種類の歩容で記述され、それぞれの状態でのダイナミクスはN.E.法によって計算された。そして、Visual Lifting Stabilizationがヒューマノイドの姿勢安定化に一定の効果を示すことを確認した。歩行結果に表れた歩容遷移はヒューマノイドの動作に依存して選択された。さらに、人間のように腰の位置を高く保つ歩行よりも、腰を落とした二足歩行の方が高い動的形状変更能力を持っていることが確認できた。

参考文献

- 1) 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, *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 4489/4496 (2010)
- 2) H. Dau, C. Chew and A. Poo: Proposal of Augmented Linear Inverted Pendulum Model for Bipedal

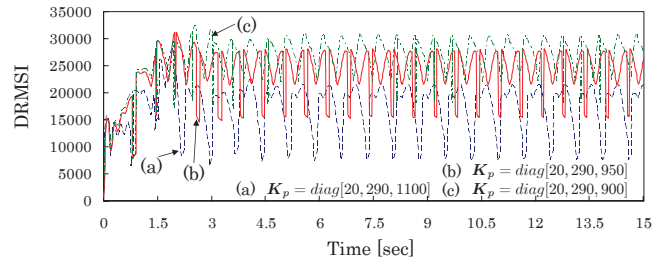


Fig. 14: DRMSI until $t = 15.0[s]$

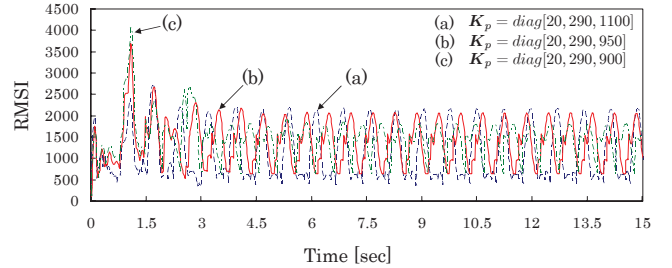


Fig. 15: RMSI until $t = 15.0[s]$

Gait Planning, *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 172/177 (2010)

- 3) S. Kajita and K. Tani: Study of Dynamic Locomotion on Rugged Terrain-Derivation and Application of the Linear Inverted Pendulum Mode, *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1405/1411 (1991)
- 4) 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, *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 239/246, (2001)
- 5) J.H. Park and K.D. Kim: Biped walking robot using gravity-compensated inverted pendulum mode and computed torque control, *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 4, 3528/3593 (1998)
- 6) P.B. Wieber: Trajectory free linear model predictive control for stable walking in the presence of strong perturbations, *Proceedings of International Conference on Humanoid Robotics*, 137/142, (2006)
- 7) P.B. Wieber: Viability and predictive control for safe locomotion, *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 1103/1108, (2008)
- 8) A. Herdt, N. Perrin and P.B. Wieber: Walking without thinking about it, *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 190/195 (2010)
- 9) M. Vukobratovic, A. Frank and D. Juricic: On the Stability of Biped Locomotion, *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, Vol. 17, No. 1, 25/36, (1970)
- 10) M. Vukobratovic and J. Stepanenko: On the Stability of Anthropomorphic Systems, *Mathematical Biosciences*, Vol. 15, 1/37, (1972)
- 11) S. Collins, A. Ruina, R. Tedrake and M. Wisse: Efficient Bipedal Robots Based on Passive-Dynamic Walkers, *Science*, Vol. 307, 1082/1085 (2005)
- 12) J. Pratt, P. Dilworth and G. Pratt: Virtual Model Control of a Bipedal Walking Robot, *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 193/198 (1997)
- 13) 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, 42/56 (2003)

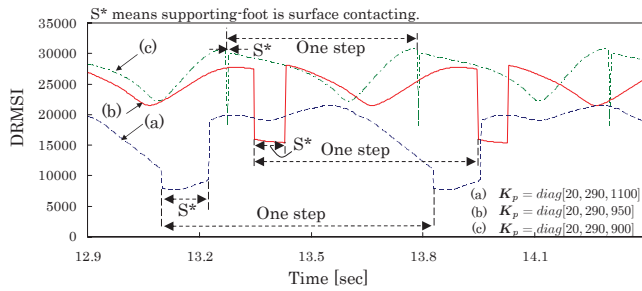


Fig. 16: DRMSI around $t = 13.5[s]$

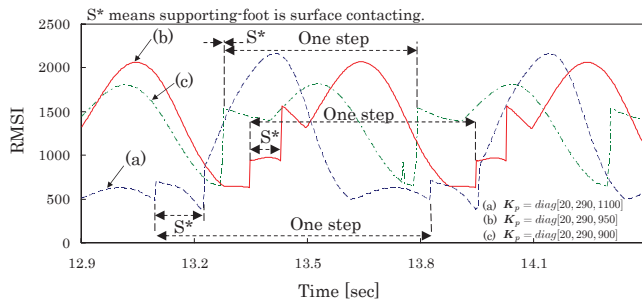


Fig. 17: RMSI around $t = 13.5[s]$

- 14) Y. Harada, J. Takahashi, D. Nenchev and D. Sato : Limit Cycle Based Walk of a Powered 7DOF 3D Biped with Flat Feet, *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 3623/3628 (2010)
- 15) Y. Huang, B. Chen, Q. Wang, K. Wei and L. Wang : Energetic efficiency and stability of dynamic bipedal walking gaits with different step lengths, *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 4077/4082 (2010)
- 16) T. Wu, T. Yeh and B. Hsu : Trajectory Planning of a One-Legged Robot Performing Stable Hop, *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 4922/4927 (2010)
- 17) 中村, 山根 : 拘束条件が不連続に変化するリンク系の動力学—環境と接触しながら運動するヒューマンフィギュアへの応用—, *日本ロボット学会誌*, Vol. 18, No. 3, 435/443 (2000)
- 18) M. Kouchi, M. Mochimaru, H. Iwasawa and S. Mitani : Anthropometric database for Japanese Population 1997-98, Japanese Industrial Standards Center (AIST, MITI), (2000)
- 19) Y. Fujimoto and A. Kawamura : Three Dimensional Digital Simulation and Autonomous Walking Control for Eight-Axis Biped Robot, *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2877/2884 (1995)
- 20) J.Y.S. Luh, M.W. Walker and R.P.C. Paul : On-Line Computational Scheme for Mechanical Manipulators, *ASME Journal of Dynamics Systems, Measurement, and Control*, Vol. 102, No. 2, 69/76 (1980)
- 21) M.W. Walker and D.E. Orin : Efficient Dynamic Computer Simulation of Robotic Mechanisms, *ASME Journal of Dynamics Systems, Measurement, and Control*, Vol. 104, 205/211 (1982)
- 22) T. Mita and K. Osuka : Introduction to Robot Control, CORONA PUBLISHING CO., LTD., (1989) (in Japanese).
- 23) N. Hogan : Impedance Control; An Approach to Manipulation, Parts I–III, *ASME Journal of Dynamics Systems, Measurement, and Control* Vol. 107, No. 1, 1/24 (1985)
- 24) W. Song, M. Minami, F. Yu, Y. Zhang and A. Yanou : 3-D Hand & Eye-Vergence Approaching Visual Servoing with Lyapunov-Stable Pose Tracking, *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 5210/5217 (2011)
- 25) F. Yu, W. Song and M. Minami : Visual Servoing with Quick Eye-Vergence to Enhance Trackability and Stability, *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 6228/6233 (2010)
- 26) T. Yoshikawa : Dynamic Manipulability of Robot Manipulators, *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 2, No. 1, 113/124 (1985)
- 27) 見浪, 内藤, 朝倉 : 冗長マニピュレータの回避可操作性, *日本ロボット学会誌*, Vol. 17, No. 6, 887/895 (1999)