

ビジュアルフィードバックによるヒューマノイドの歩行安定化

—動力学的干渉による腕の自発的励振と歩行効率向上効果—

Stabilization Strategy of Humanoid's Walking by Visual Feedback

—Spontaneous Arms' Swinging for Walking by Dynamical Coupling and its Efficiency-enhancing Effects—

○ 小林洋祐 (岡山大) 学 前場友秀 (岡山大) 正 見浪 譲 (岡山大)
正 矢納 陽 (岡山大) 正 松野隆幸 (岡山大)

Yosuke KOBAYASHI, Okayama University, kobayashi2@suri.sys.okayama-u.ac.jp
Tomohide MAEBA, Okayama University, maeba@suri.sys.okayama-u.ac.jp
Mamoru MINAMI, Okayama University, minami@suri.sys.okayama-u.ac.jp
Akira YANOU, Okayama University, yanou@suri.sys.okayama-u.ac.jp
Takayuki MATSUNO, Okayama University, matsuno@suri.sys.okayama-u.ac.jp

Biped locomotion created by a controller based on ZMP known as reliable control method looks different from human's walking on the view point that ZMP-based walking does not include tipping-over state. However, the walking control that does not depend on ZMP is vulnerable to turnover. Therefore, we propose walking stabilizer based on visual feedback to enhance standing robustness and prevent the robot from falling down. Simulation results indicate that this stabilizer helps stabilize pose and bipedal walking even though ZMP is not kept inside convex hull of supporting area. Moreover, we point out that arms begin to swing asymmetrically by dynamical coupling among body links without input torques and verify the effects of the arms' swing on the walking.

Key Words: Bipedal walking, Visual feedback, Arms' swing, Dynamical coupling

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し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。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 を規範とした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。

このように、上記の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 [1] 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 [2] 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、著者ら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 [1], [2] 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 [6] の概念に基づいて提案する。この戦略は文献 [7], [8] 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。提案する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をシミュレーションにより示す。さらに、過渡状態から定常状態に渡る歩行において腕が自発的に励振する現象を動力学的干渉に基づいて検証し、腕の運動が歩行に及ぼす影響を考察する。

2. 歩容の動力学モデル

ヒューマノイドの関節構成は図 1 のようになっており、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]) は表 1 の値とする。また、足の裏の形状は 0.26 [m] \times 0.10 [m] の長方形とした。本報では文献 [3] 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 [4], [5] を利用したダイナミクスの数値計算を行った。しかし、図 1 に示すモデルは分岐を持つという点において文献 [3] とは異なっている。

図 2 のような歩容を表す運動方程式は式 (1) となる。

$$\mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{g}(\mathbf{q}) + \mathbf{D}\dot{\mathbf{q}} = \boldsymbol{\tau} + \mathbf{j}_{c_z}^T f_{n_z} - \mathbf{j}_t^T f_t + \mathbf{j}_r^T \tau_n + \mathbf{j}_{c_y}^T f_{n_y} \quad (1)$$

$\mathbf{M}(\mathbf{q})$ は慣性行列、 $\mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ 、 $\mathbf{g}(\mathbf{q})$ はそれぞれ遠心力/コリオリ力の項および重力項を表すベクトル、 \mathbf{D} は関節の粘性摩擦係数を表す対角行列、 $\boldsymbol{\tau}$ は入力トルクベクトル、 \mathbf{q} は関節角度ベクトルである。そして、 f_{n_z} 、 f_t 、 τ_n 、 f_{n_y} はそれぞれ抗力 (Σ_W の z 方向)・摩擦力・拘束トルク・抗力 (Σ_W の y 方向) である。また、 \mathbf{j}_{c_z} 、 \mathbf{j}_t 、 \mathbf{j}_r 、 \mathbf{j}_{c_y} は以下の式で定義されるベクトルである。

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

$$\mathbf{j}_r^T = \left(\frac{\partial C_2}{\partial \mathbf{q}^T} \right)^T \left(1 / \left\| \frac{\partial C_2}{\partial \mathbf{r}^T} \right\| \right), \quad \mathbf{j}_{c_y}^T = \left(\frac{\partial C_3}{\partial \mathbf{q}^T} \right)^T \left(1 / \left\| \frac{\partial C_3}{\partial \mathbf{r}^T} \right\| \right)$$

C_1, C_2, C_3 はそれぞれ、接地脚の踵を地面に拘束 ($z_h = 0$)・接地脚の回転を拘束 ($q_e = 0$)・進行方向に対する接地脚の運動を拘

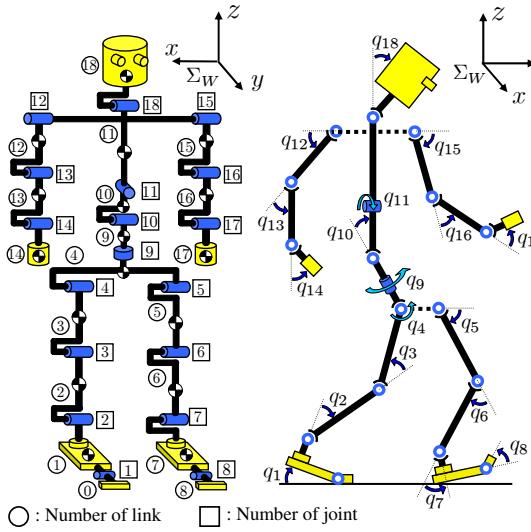


Fig. 1 Definition of humanoid's link, joint and angle

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	0.5
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	

○ : Number of link □ : Number of joint

Fig. 2 Example of walking gaits

(a)

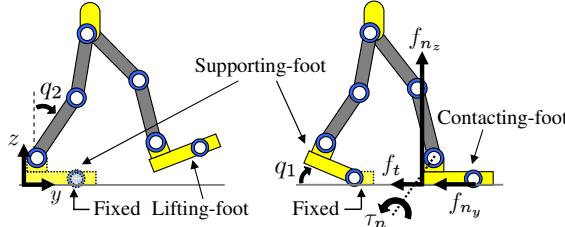


Fig. 2 Example of walking gaits

束 ($y_h = \text{一定}$) という条件を意味し, Σ_W に基づく接地脚の踵の位置ベクトルを $\mathbf{r}(\mathbf{q})$ と定義したとき以下の式で表現される.

$$\mathbf{C}(\mathbf{r}(\mathbf{q})) = \begin{bmatrix} C_1(\mathbf{r}(\mathbf{q})) \\ C_2(\mathbf{r}(\mathbf{q})) \\ C_3(\mathbf{r}(\mathbf{q})) \end{bmatrix} = \mathbf{0} \quad (2)$$

条件 C_3 は接地脚の進行方向の速度 y_h が一定速度未満となり, 動摩擦力が静摩擦力に移行したとき考慮される. また, 接地脚の進行方向の力 f_y が静摩擦力を上回った場合, すなわち $|f_y| > |f_t|$ のとき条件 C_3 を外して, 接地脚は進行方向に滑りを生じる. 一方で, 支持脚には 2 通りの接地状態を考える. 図 2 (b) のようにつま先立ちのとき, 関節角度ベクトルは $\mathbf{q} = [q_1, q_2, \dots, q_{18}]^T$ と定義されるのに対して, 図 2 (a) に示す面接地状態のときには $\mathbf{q} = [q_2, q_3, \dots, q_{18}]^T$ として区別を行った.

式 (1) と時間 t で 2 階微分した式 (2) を連立させることにより, 以下に示すダイナミクスを得る.

$$\begin{bmatrix} M(\mathbf{q}) & -(j_{c_z}^T - j_t^T K) & -j_r^T & -j_{c_y}^T \\ \partial C_1 / \partial \mathbf{q}^T & 0 & 0 & 0 \\ \partial C_2 / \partial \mathbf{q}^T & 0 & 0 & 0 \\ \partial C_3 / \partial \mathbf{q}^T & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{q}} \\ f_{n_z} \\ \tau_n \\ f_{n_y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau - h(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) - g(\mathbf{q}) - D\dot{\mathbf{q}} \\ -\dot{\mathbf{q}}^T \left\{ \frac{\partial}{\partial \mathbf{q}} \left(\frac{\partial C_1}{\partial \mathbf{q}^T} \right) \right\} \dot{\mathbf{q}} \\ -\dot{\mathbf{q}}^T \left\{ \frac{\partial}{\partial \mathbf{q}} \left(\frac{\partial C_2}{\partial \mathbf{q}^T} \right) \right\} \dot{\mathbf{q}} \\ -\dot{\mathbf{q}}^T \left\{ \frac{\partial}{\partial \mathbf{q}} \left(\frac{\partial C_3}{\partial \mathbf{q}^T} \right) \right\} \dot{\mathbf{q}} \end{bmatrix} \quad (3)$$

本報では図 3 に示す 11 種類の歩容を想定し, 条件に応じて切り替えている. これらの歩容は全て式 (3) のダイナミクスにおいて, 状態変数の次元と拘束条件を適切に選択することで表現可能である. 表 2 に各歩容に対応した状態変数の次元と拘束条件の組み合わせを示す.

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)	$\mathbf{q} = [q_2, q_3, \dots, q_{18}]^T, f_{n_z}, f_{n_y}$	$C_1, C_3 = 0$

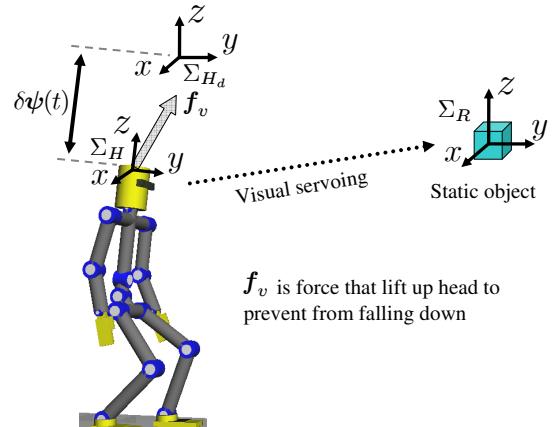


Fig. 4 Concept of visual feedback

3. ビジュアルフィードバックによる歩行

本章ではビジュアル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(図 4)を提案し, 安定な歩行の実現を行う.

3.1 姿勢安定化戦略

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 ${}^H T_R$ 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_{H_d} の関係 ${}^R T_{H_d}$ を用いることによって, Σ_{H_d} と Σ_H の偏差 ${}^H T_{H_d}$ が以下の式

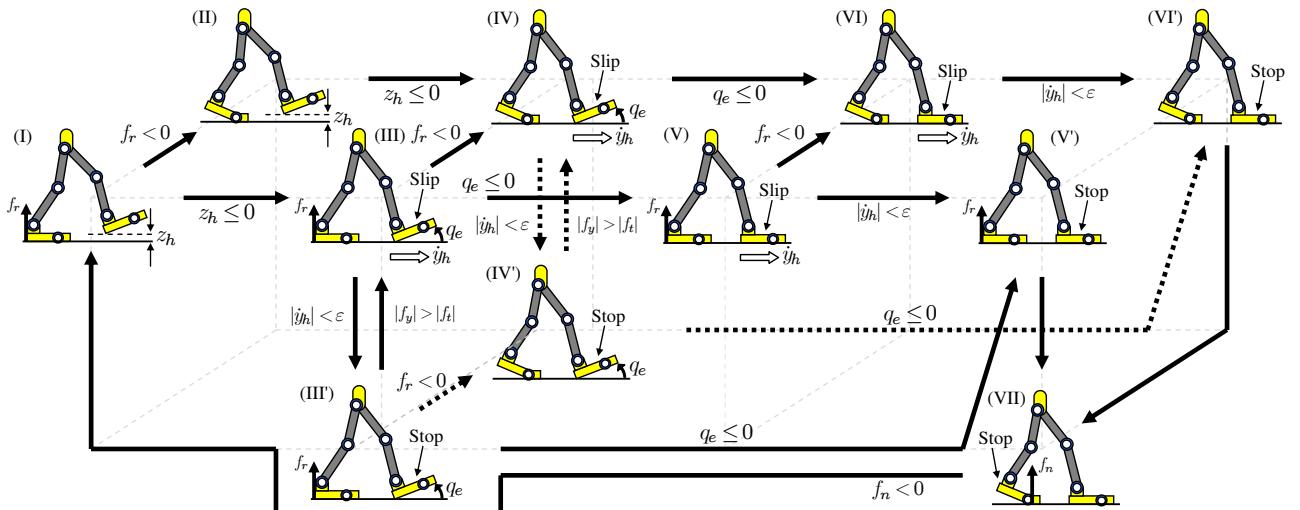


Fig. 3 States and gait transition

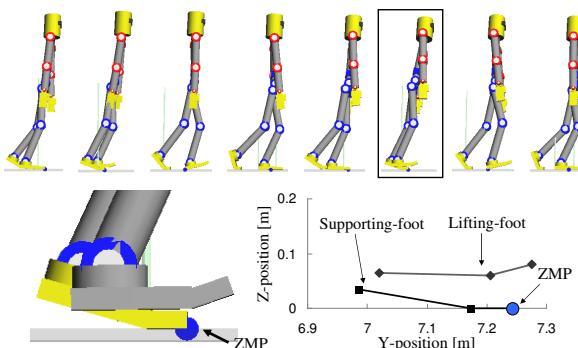


Fig. 5 Screen-shot of walking simulation

によって計算できる.

$${}^H\boldsymbol{T}_{H_d}(\boldsymbol{\psi}_d(t), \boldsymbol{\psi}(t)) = {}^H\boldsymbol{T}_R(\boldsymbol{\psi}(t)) \cdot {}^{H_d}\boldsymbol{T}_R^{-1}(\boldsymbol{\psi}_d(t)) \quad (4)$$

式(4)において、 ${}^H\mathbf{T}_R$ は文献 [7], [8] で提案されている手法によって計測可能だが、本研究では ${}^H\mathbf{T}_R$ を画像認識から得るではなく、真値が計測されたことを仮定して与えている。そして、 $\delta\psi(t) = \psi_d(t) - \psi(t)$ として定義される偏差を最小とするために、関節に入力するべきトルクを以下の式で与える。

$$\boldsymbol{\tau}_h(t) = \boldsymbol{J}_H(\boldsymbol{q}) \boldsymbol{K}_p \delta \boldsymbol{\psi}(t) \quad (5)$$

ここで、 $\mathbf{J}_H(\mathbf{q})$ は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。式(5)によって頭部が目標値に引張り上げられ、頭部・重心位置の低下や転倒を防止する。ここで、 $\tau_{th}(\mathbf{t})$ 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。

3.2 二足歩行の例と安定性

3つの制御器を用いて歩行を実現させた。制御器1は前節で示した式(5)であり、フィードバックゲインを $K_p = diag[20, 290, 1100]$ と設定した。制御器2は遊脚を前に踏み出させるために $\tau_5 = 20 \cos\{2\pi(t - t_1)/1.85\}$ を遊脚の股関節(joint-5)に与える。ここで t_1 は図3において状態(V')または(VI')から状態(VII)へ遷移し、支持脚と接地脚が入れ替わる時刻である。制御器3である式(6)は胴体のroll角(joint-11)を振動させる入力を意味する。

$$\tau_{11} = \begin{cases} \alpha \sin \{2\pi(t - t_1)/1.85\} & (\text{右脚支持}) \\ -\alpha \sin \{2\pi(t - t_1)/1.85\} & (\text{左脚支持}) \end{cases} \quad (6)$$

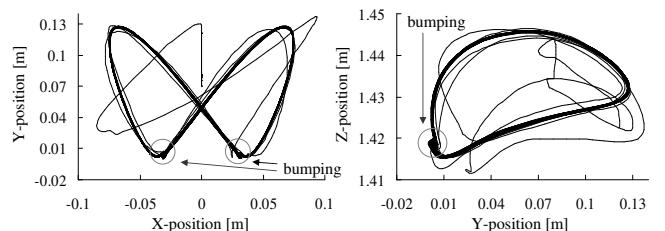


Fig. 6 Motion trajectory of neck

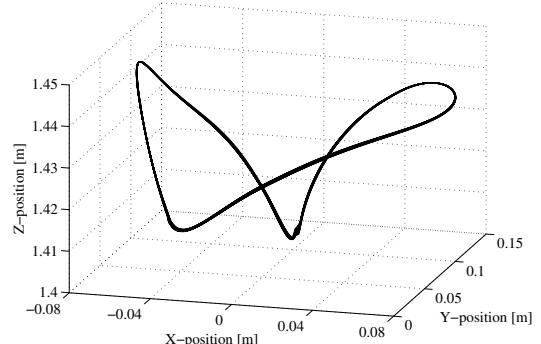


Fig. 7 Motion trajectory of neck in steady state

ただし、支持脚のつま先 (joint-1)・両腕 (joint-12, joint-13, …, joint-17) に対する入力は常に 0 とした。制御器 1 のみ姿勢のフィードバックを含んでおり、他は歩行を生成するフィードフォワードである。

$\alpha = 50$ の場合ヒューマノイドは図 5 に示すように歩行し、図 3 の状態 (II) のような ZMP が支持脚の先端に位置する転倒状態の歩容も現れた。図 6 に初期状態から 200 歩の歩行後までにおける link-18(首部分) の原点の軌道を表す。 $x = 0$ で表現される平面に関して対称な形状となっていることから、左右の運動の対称性が読み取れる。そして、図 6 の軌道を 3 次元空間で表示したものを図 7 に示す。ただし、過渡応答部分と考えられる 0 歩目から 20 歩目を表す軌道を排除している。地面との衝突による影響は軌道上に現れているが、定常状態においてはリミットサイクルへ収束したと考えられる。図 5 は変数の次元が変化したり滑りを生じる歩行であるが、ビジュアルフィードバックに歩行を安定とする一定の効果があるということが確認された。

4. 動力学的干渉に基づく腕の励振運動

図 5 に示す歩行における両腕の角度 (q_{12}, q_{15}) の推移を図 8 に示す。腕に入力トルクを印加していないにも関わらず両腕が非

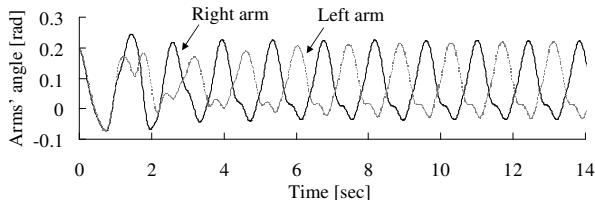


Fig. 8 Arms' swing with τ_{11}

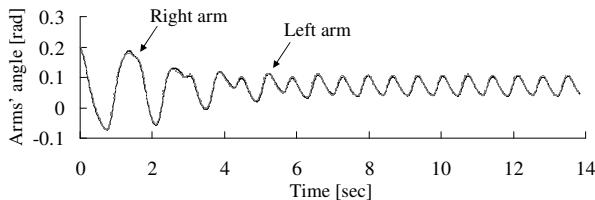


Fig. 9 Arms' swing without τ_{11}

対称に振動していることが読み取れる。これは歩行運動によって生じる全身の動力学的干渉が要因であると考えられる。その一方で、式(6)の制御器を使用しない場合には腕の運動が図9のように変化した。図8と比較して腕の振動が約72%減少し、非対称な運動とはならなかった。以下ではこの要因についての考察を行う。

4.1 腕の自発的励振

本節では式(6)で表される制御器の有無によって、胴体部分から伝達される動力学的干渉がどのように変化するのかを調べる。ここで、動力学的干渉とは慣性行列の非対角要素が与えるトルクを意味する。

まず、慣性行列 $\mathbf{M}(\mathbf{q})$ の第(9, 11)要素 $M_{9,11}$ に角加速度 \ddot{q}_{11} を乗じた値、すなわち胴体の roll 角の運動(joint-11)が胴体の yaw 角(joint-9)に与える干渉トルクを図10に示す。これは、式(6)の入力に yaw 角を励振させる効果があることを示している。roll 角の励振が直接腕の運動に作用するのではなく、一旦 yaw 角の運動を誘発する。次に、慣性行列 $\mathbf{M}(\mathbf{q})$ の第(12, 9)要素 $M_{12,9}$ に角加速度 \ddot{q}_9 を乗じた値、すなわち胴体の yaw 角の運動(joint-9)が右上腕(joint-12)に与える干渉トルクを図11に示す。式(6)によって誘発された yaw 角の運動が干渉として腕の運動を生じさせている。

直立状態では joint-9 と joint-12 または joint-15 の向きは互いに直交しているため、図10, 11のような動力学的干渉を示すことはない。しかし、歩行運動における様々な姿勢の変化がこれらの干渉をもたらしたと言える。

4.2 歩行効率向上効果

本節では腕の励振運動の有無や大きさが歩行に与える影響を調べるために、平均時速 [km/h] と平均歩幅 [m] を比較する。

Table 3 Relation of arms' swing and walking

	Without τ_{11}	With τ_{11} ($\alpha = 50$)	With τ_{11} ($\alpha = 100$)
Speed	2.181	2.145	2.057
Stride	0.432	0.434	0.445

著者らのシミュレーション環境においては腕の振りが大きくなるほど時速は小さくなるが、歩幅は増加するという結果となった。

5. 結 言

本報ではまず、支持脚及び接地脚の面接地/点接地および滑りの有無に応じて11種類の歩容を考え、各歩容に対して拘束運動や変数の次元の変化を利用してモデル化を行った。そして、ZMP規範の歩行とは異なる自然な歩行を実現するために歩行時

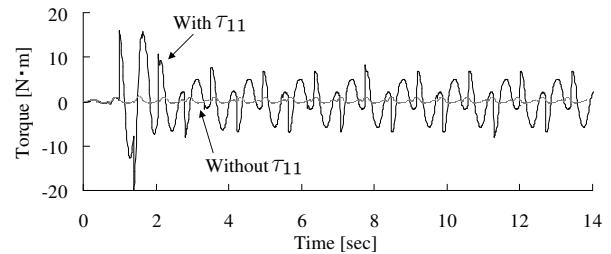


Fig. 10 Dynamical coupling between roll angle and yaw angle

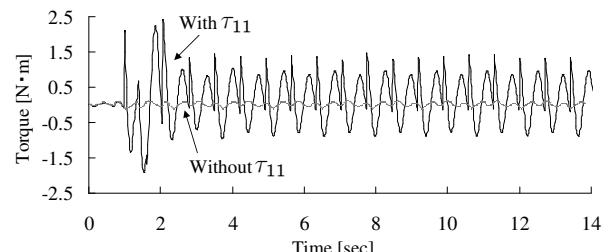


Fig. 11 Dynamical coupling between yaw angle and arm

に生じる足の滑りや衝突、不安定な歩容によって生じる重心・頭部位置の低下及び転倒を防止するためにビジュアルフィードバックによる姿勢安定化を提案した。

また、歩行中に観測された腕の運動に着目し、胴体の roll 角を周期的な振動で回転させた場合には、その運動が yaw 角や腕に動力学的な干渉として伝達されることを示した。すなわち著者らの解析において、腕の励振を自発的に生じさせるためには胴体の roll 角方向の運動が不可欠であるという結論に至った。

文 献

- [1] 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.
- [2] 中村 仁彦, 山根 克, “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, pp.435–443, 2000.
- [3] 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*, pp.2877–2884, 1995.
- [4] 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, pp.69–76, 1980.
- [5] M.W. Walker and D.E. Orin, "Efficient Dynamic Computer Simulation of Robotic Mechanisms," *ASME Journal of Dynamics Systems, Measurement, and Control*, Vol.104, pp.205–211, 1982.
- [6] N. Hogan, "Impedance Control; An Approach to Manipulation, Parts I–III," *ASME Journal of Dynamics Systems, Measurement, and Control*, Vol.107, No.1, pp.1–24, 1985.
- [7] 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*, pp.5210–5217, 2011.
- [8] 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*, pp.6228–6233, 2010.