

AnkleおよびHip Strategyに基づく 人型ロボットの反動動作の遷移手法

太田峻 岡本和晃 金宮好和 佐藤大祐 (東京都市大学)

Transitions between Ankle and Hip Strategy Reaction Patterns of a Humanoid Robot

*Shun OTA, Kazuaki OKAMOTO, Yoshikazu KANAMIYA and Daisuke SATO
(Tokyo City University)

Abstract— We suggest CoM interpolating transitions between ankle and hip strategy. In our previous work, we solved the problem of acceleration-sensor based reaction control of a humanoid robot, in response to an impulsive external force. The robot was responding by two reaction patterns, called ankle and hip strategies. Later, we addressed the problem of response to a continuously acting external force via ZMP calculations. In this study, we extend the reaction capability by ensuring smooth transitions between the two reaction patterns.

Key Words: Humanoid balance control, External disturbance, ZMP, Compliance, Reaction Null-Space

1. 緒言

立位姿勢制御法には ankle strategy, hip strategy, step strategy の三段階の対応が存在し [1], 加えられた外力に応じて順に対応を変化させる. Step strategy のみ三次元で考えなければならぬため, 本稿では平面だけで考えられる ankle strategy, hip strategy に関して述べる.

過去の研究では, 加えられた一時的な衝撃に対して, ankle strategy もしくは hip strategy の対応を加速度センサの大きさに応じて判断している [2]. また, これを改善して継続的に働く外力に対し, ZMP を用いてコンプライアンス応答する制御が提案されている [3]. 本稿では ankle strategy から hip strategy へと ZMP に基づいてコンプライアンスに遷移させる制御手法を新たに提案する. また, この手法をミヤチシステム株式会社製小型人型ロボット HOAP-2 に適用し, 動作実験を行った.

1.1 Ankle strategy

人型ロボットにおいて外乱に対するコンプライアンス応答を実現するための必要トルク τ_1 は, ZMP の変位を p , 全体重心の x 座標変位を r_x とおくと以下のように表される. なお g は重力加速度, m は足部を除いた質量を表しており, $m = m_1 + m_2$ である. なお, m_1 は足首から腰関節までの質量, m_2 は腰から上の部分の質量を表す.

$$\tau_1 = mg(p - r_x) \quad (1)$$

Ankle strategy においては Fig.1 (a) のように, 足首から上を 1 リンクとした倒立振子として考える. また外力が加わった後, 直立姿勢へ復元するために, 足首関節にばね-ダンパを仮定し, 制御を行う. Fig.1 (a) 倒立振子モデルの運動方程式から $\dot{\theta}_1$ の指令値を求めると

次式の通りである.

$$\ddot{\theta}_1^{ref} = \frac{1}{I + ml_g^2} (mg(p - r_x) - C_a \dot{\theta}_1 - K_a \theta_1) \quad (2)$$

ここで I は重心周りの慣性モーメント, K_a は ankle strategy におけるばね係数, C_a は ankle strategy におけるダンパ係数, l_g は足部を除いた足首関節からロボット全体重心までの距離である.

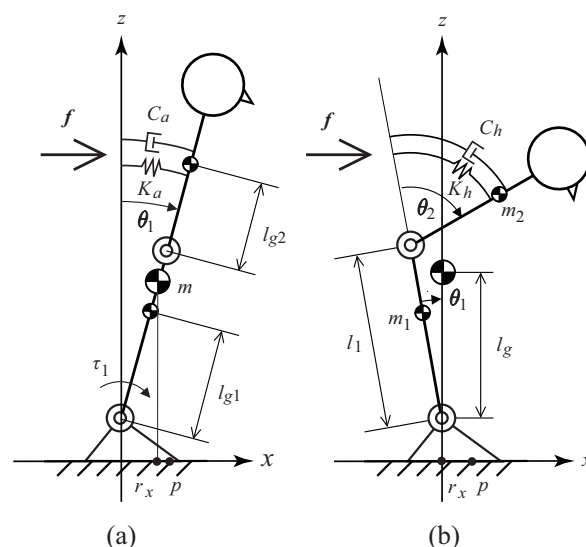


Fig.1 Models for ankle (a) and hip (b) strategies.

1.2 Hip strategy

人型ロボットは足裏が固定されておらず, この点において宇宙ロボットと同じ考えを適用することができる. そこで CoM を z 軸上に固定するため, 反動零空間法 [4] を用いる. 反動零空間法を用いて人型ロボットの足部をベース部, 脚部と胴体部をリンクとして平面 3 リンクマニピュレータをモデル化すると, このモデル

の運動方程式は以下のように表せる．

$$\begin{bmatrix} H_f & H_{fl} \\ H_{fl}^T & H_l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\nu}_f \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_f \\ c_l \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} g_f \\ g_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} J_{cf}^T \\ J_{cl}^T \end{bmatrix} w_c \quad (3)$$

ここで、 $H_f \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ はベース部慣性行列、 $H_{fl} \in \mathbb{R}^{3 \times 2}$ は慣性干渉行列、 $H_l \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$ はリンク部慣性行列、 $\nu_f \in \mathbb{R}^3$ はベース部並進速度と角速度、 $\theta \in \mathbb{R}^2$ はリンク部関節変位、 $c_f \in \mathbb{R}^3$ はベース部遠心力とコリオリ項、 $c_l \in \mathbb{R}^2$ はリンク部遠心力とコリオリ力項、 $g_f \in \mathbb{R}^3$ はベース部重力項、 $g_l \in \mathbb{R}^2$ はリンク部重力項、 $\tau \in \mathbb{R}^2$ はリンク部関節トルク、 $J_{cf}^T \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ と $J_{cl}^T \in \mathbb{R}^{2 \times 3}$ は力変換行列、 $w_c \in \mathbb{R}^3$ は任意のリンクに加わる力とモーメントである．この式からベース部の運動方程式を抜き出し、 $\nu_f = 0$ 、 $c_f \simeq \dot{H}_{fl}\dot{\theta}$ 、 $w_c = 0$ 、床面反力と重力が釣り合うことより、以下の式が導ける．

$$H_{fl}\ddot{\theta} + \dot{H}_{fl}\dot{\theta} = 0 \quad (4)$$

上式を積分すると干渉運動量が一定で積分定数が0、一般解は以下ようになる．

$$H_{fl}\dot{\theta} = 0 \quad (5)$$

ここで H_{fl} から x , z 軸の成分を取り除き、モーメントのみを考慮 ($H_{fl} \in \mathbb{R}^{1 \times 2}$) すると次の式が導ける．

$$\dot{\theta} = bn \quad (6)$$

b は任意のスカラー、 n は H_{fl} の零空間ベクトルである ($n \in \mathcal{N}\{H_{fl}\}$)．Fig.1 (b) のモデルから n は

$$n = \begin{bmatrix} -m_2 l_{g2} C_{12} \\ (m_1 l_{g1} + m_2 l_1) C_1 + m_2 l_{g2} C_{12} \end{bmatrix} \quad (7)$$

と表せる．ここで $C_1 = \cos \theta_1$ 、 $C_{12} = \cos(\theta_1 + \theta_2)$ である．Eq. (6)、Eq. (7)、 $b = 1$ のより関節速度の関係は次式として表せる．

$$\dot{\theta}_1^{ref} = \frac{-m_2 l_{g2} C_{12}}{(m_1 l_{g1} + m_2 l_1) C_1 + m_2 l_{g2} C_{12}} \dot{\theta}_2^{ref} \quad (8)$$

ここで θ_1^{ref} は足首関節変位の指令値、 θ_2^{ref} は腰関節変位の指令値を意味する．

Hip strategy の場合は腰関節に仮想ばね-ダンパをおく．Eq. (2) と同様に $\ddot{\theta}_2$ の指令値を求めると次式の通りである．

$$\ddot{\theta}_2^{ref} = \frac{1}{I_2 + m_2 l_{g2}^2} \left(mg(p - r_x) - C_h \dot{\theta}_2 - K_h \theta_2 \right) \quad (9)$$

ここで I_2 は腰関節周りの慣性モーメント、 K_h は hip strategy におけるばね係数、 C_h は hip strategy におけるダンパ係数、 l_{g2} は腰関節からロボットの腰から上の部分の重心までの距離、そして m_2 はロボットの腰から上の部分の質量を表す．

2. 反動動作の遷移手法

前章までで、ZMP を用いて ankle strategy、hip strategy とともにコンプライアンス応答制御を実現することができた [3]．ただし、これらの独立した姿勢制御では動的に変化する外乱に対応することができない．よって、連続的に与えられる外乱の最終的な大きさがわからないものと仮定して、ankle strategy から hip strategy へと連続的に姿勢戦略を変化させる手法を用いる．

ここで Fig.1(a) からわかるように ankle strategy は外乱が大きくなるほど CoM が x 方向へ増加し続けるのに対し、hip strategy は外乱の大きさに関係なく CoM の x 方向の位置が変化しない．

よって Fig.2 にあるように x 軸で接地しているベース部を支持多角形 (Base of Support) といい、ZMP の変位 p がこの範囲内であつロボットが転倒しない変位までは ankle strategy を継続し、それ以降は hip strategy へと切り替える．

しかし、切り替える際の CoM 座標は Fig.2 にあるように ankle と hip strategy でそれぞれ異なっている．よって hip strategy に切り替える直前の ankle strategy の CoM と hip strategy に切り替え直後の CoM を補間する必要がある．これらの関係をまとめた図が Fig.2 である．図中で点線で描かれたものが ankle strategy、実線で描かれたものが hip strategy を表す．両者の CoM を表す記号上に描かれた矢印が補間される経路を示している．本章では外乱が加わった際のこの CoM 補間を用いた姿勢戦略の切り替えに関して述べる．

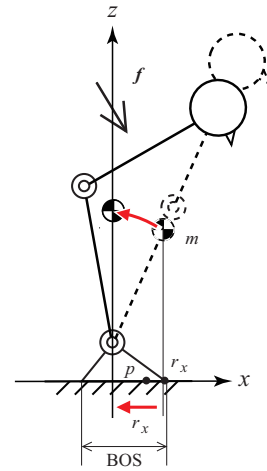


Fig.2 Transition between ankle and hip strategies.

まずシステムの全体の重心座標の速度 \dot{r} は次式によって表される．

$$\dot{r} = J_c \dot{\theta} \quad (10)$$

ここで J_c は重心ヤコビ行列であり、重心ヤコビ行列と干渉慣性行列 H_{fl} の間には次の関係がある．

$$J_c = \frac{1}{m} H_{fl} \quad (11)$$

ここから x 方向の CoM の速度だけを取り出すと

$$\dot{r}_x = J_{cx} \dot{\theta} \quad (12)$$

となり，重心ヤコビ行列は

$$J_{cx} = \begin{bmatrix} r_z & k_m l_{g2} C_{12} \end{bmatrix} \quad (13)$$

と表すことができる．ここで k_m は $k_m = m_2/m$ を意味する．したがって，Eq. (12) で θ の解から次式が求まる．

$$\dot{\theta} = J_{cx}^+ \dot{r}_x + b n \quad (14)$$

ここで J_{cx}^+ は J_{cx} の疑似逆行列である．

3. 遷移手法の制御

Eq. (7) と Eq. (13) から Eq. (14) は次式として表される．

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} = \frac{\dot{r}_x^{ref}}{r_z^2 + (k_m l_{g2} C_{12})^2} \begin{bmatrix} r_z \\ k_m l_{g2} C_{12} \end{bmatrix} + b \begin{bmatrix} -m_2 l_g C_{12} \\ (m_1 l_{g1} + m_2 l_1) C_1 + m_2 l_{g2} C_{12} \end{bmatrix} \quad (15)$$

上式ならびに Eq. (8) より hip strategy において足首関節 θ_1 は Eq. (16) によって制御する．

$$\dot{\theta}_1^{ref} = \frac{r_z}{r_z^2 + (k_m l_g C_{12})^2} \dot{r}_x^{ref} + k_w \frac{-m_2 l_g C_{12}}{(m_1 l_{g1} + m_2 l_1) C_1 + m_2 l_{g2} C_{12}} \dot{\theta}_2 \quad (16)$$

ここで k_w は係数である． k_w は前式で二項の干渉を抑制する働きを持つ．

Eq. (16) の制御式を用いることによって，ankle strategy から hip strategy へと CoM を補間して切り替えることが可能であるが，急激に足首関節を動作させるとモータに大きな負荷がかかり危険である．よって，姿勢戦略の切り替えに関しては切り替えてから任意の時間は腰関節に関しては k_w ，足首関節に関しては CoM の x 方向をそれぞれ五次補間法を用いて計算している．

ここで CoM の補間に関して具体的には Eq. (15) と Eq. (16) において次式を用いる．

$$\dot{r}_x^{ref} = K_p (r_x^d - r_x) \quad (17)$$

ここで r_x^d は CoM x 方向の目標変位であり，この値を最終目標まで五次補間法を用いて計算する．なお，最終目標は hip strategy が CoM を z 方向に固定する制御を行っているため，直立状態の x の値となる．これは Fig.1 では z 軸上 ($x = 0$) を意味する．

これまでの制御の流れをまとめたものが Table 1 である．Ankle strategy から hip strategy，その後 hip strategy から ankle strategy へと戻る 1 サイクルを表したものである．この 1 サイクルを五段階に分けて番号を振った．なお，五段階のうちの最後 (phase V) は次のサイクルの最初 (phase I) を意味している．表中における AH transition は ankle strategy から hip strategy への遷移を意味し，HA transition は hip strategy から ankle strategy への遷移を意味する．また表中の r_x^{init} は直立状態の r_x を意味し，表右端の Variable of transition は姿勢戦略切り替え時の基準となる変数を意味する．

4. 実験

Ankle strategy では Eq. (2) を用いて，hip strategy では足首関節に Eq. (16)，hip strategy の腰関節については Eq. (9) をそれぞれ用いて実験を行った．実験条件として 60 s の間 HOAP-2 本体を 3 度手で押してセンサの値を取得した． k_w ， r_x^d の補間時間は 1 s とした．また，ankle strategy から hip strategy への切り替えは $p > 45$ mm とした．なお，Fig.4 からわかるように hip strategy で外力を加えた後，この外力を取り除くと振動してしまう．よって hip strategy から ankle strategy への切り替えには振動が収まる 10 s 後に腰関節が直立状態と同じ角度になった際に切り替える制御を行っている．

また，HOAP-2 は各制御式で得られた角速度と角加速度で直接制御することはできない．そこで，それぞれ積分または二階積分して関節の角度変位を求め，こうして求めた変位から実際の制御を行う．Fig.3 で Toe と書かれた線がつま先位置 (58 mm)，Heel と書かれた線がかかと位置 (-40 mm)，Limit と書かれた線が ankle strategy から hip strategy へ切り替える基準値 (45 mm) を意味している．本実験では HOAP-2 の重心位置を -20 mm と設定しているが，Fig.4 から ankle strategy 終了後に最大で約 -30 mm ほど後ろに戻り，その後 ankle strategy に切り替わるまで振動を続けている．Fig.6 は Fig.5 の ankle strategy から hip strategy への遷移の 1 サイクルを表したものである．Table 1 と同様に Table 2 に各段階とその段階で採用している姿勢戦略，その戦略の採用時間をまとめた．

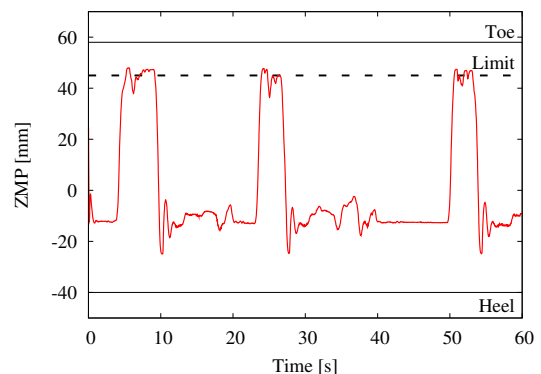


Fig.3 Position of ZMP.

Table 2 Range of the strategies.

Phase	Strategy	Time [s]
I	Ankle	0 - 5.205
II	AH transition	5.205 - 6.205
III	Hip	6.205 - 21.841
IV	HA transition	21.841
V (I')	Ankle	21.841 -

5. 結言と今後の課題

ここまで ankle strategy から hip strategy へと CoM とゲインを補間することで最終的な大きさがわ

Table 1 Motion phases and variable.

Phase	Strategy	θ_1	θ_2	Variable of transition
I	Ankle	Eq. (2)	-	-
II	AH transition	Eq. (16) , Eq. (17) $r_x^d: r_x \xrightarrow{\text{spline}} r_x^{init}$	Eq. (9) $k_w: 0 \xrightarrow{\text{spline}} 1$	p
III	Hip	Eq. (8)	Eq. (9)	-
IV	HA transition	Eq. (2)	-	θ_2
V (I')	Ankle	Eq. (2)	-	-

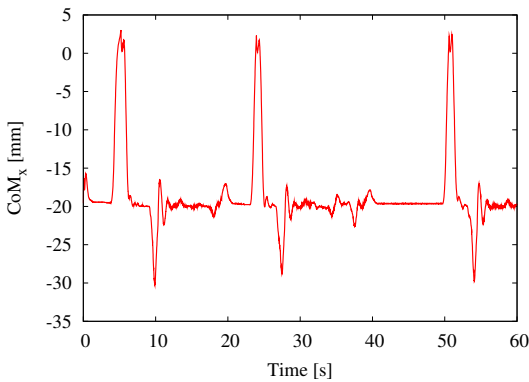


Fig.4 CoM ground projection.

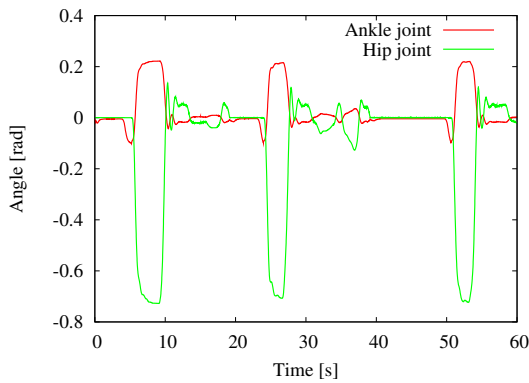


Fig.5 Angle of ankle and hip.

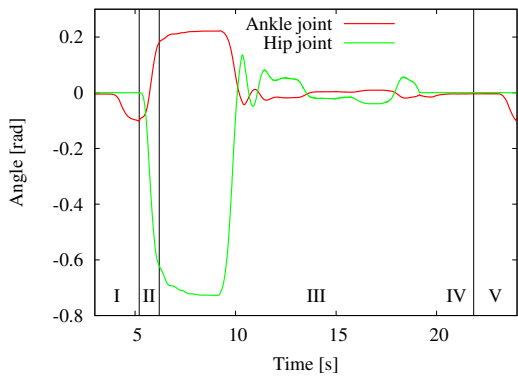


Fig.6 Motion phases during a cycle.

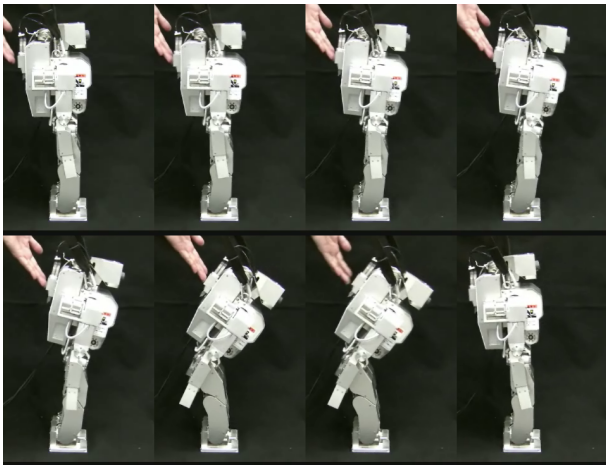


Fig.7 Snapshots from the experiment.

からない連続的に与えられる外乱において姿勢戦略を切り替えることができた．しかし，hip strategy から ankle strategy へ戻る際に直立姿勢の重心よりも後ろに一度戻ってしまうなど振動の問題が生じている．よって今後の課題としては hip strategy から ankle strategy への滑らかな切り替えを実現することが挙げられる．

6. 謝辞

本研究は文部科学省 科学研究費補助金（基礎研究（B），課題番号 20300072）の助成を受けたものである．

参考文献

[1] A. Shumway-Cook, F. B. Horak: “Vestibular Rehabilitation: An Exercise Approach to Managing Symptoms of Vestibular Dysfunction,” *Seminars in Hearing*, vol.10, no.2, pp.196-209, 1989.

[2] A. Nishio, D. N. Nenchev: “Ankle and Hip Strategies for Balance Recovery of a Biped Subjected to an Impact,” *Robotica*, vol.26, pp.643-653, 2008.

[3] 岡本和晃，長尾学，金宮好和，佐藤大祐: “ZMP を用いた平面上の人間型ロボットのコンプライアンス応答制御”，第9回システムインテグレーション部門講演会，2008.

[4] D. N. Nenchev and K. Yoshida: “Impact Analysis and Post-Impact Motion Control Issues of a Free-Floating Space Robot Subject to a Force Impulse,” *IEEE Transactions on Robotics & Automation*, vol.15, no.3, June, pp.548-557, 1999.