

前額面内の外乱に対する人間の姿勢運動戦略に基づく 人型ロボットのバランス制御

吉田祐貴 竹内孝平 佐藤大祐 金宮好和（東京都市大学）

1. 諸言

人型ロボットが人間の環境などに進出するために、最も考慮すべきは安全性である．安全性を高めるための方法の一つとして、転倒を防ぐことが挙げられる．

過去に我々は人間の姿勢運動戦略である Ankle strategy と Hip strategy[1] に基づいた、人型ロボットのバランス制御を研究してきた [2]-[4]．しかし、対応できる外乱が前後方向だけであった．

そこで、我々は人間が側面からの外乱を受けたときの姿勢運動戦略を人型ロボットに取り入れることを目指す．人間が側面から外乱を受けたときの動作は、すでに研究されているが [5]-[8]、姿勢運動戦略にどのようなものがあるか、はっきりと述べられていない．また、HOAP-1 を用いてバランス制御を行っている研究もある [9]、しかし、人間の側面から加わる外乱に対する動作ではなく、前後方向の運動制御に用いている Ankle strategy と Hip strategy の動作を応用しているものであった．

本論文では、人間が側面からの外乱を受けたときの姿勢運動戦略をモーションキャプチャを用いて調べる．そして得られた人間の姿勢運動戦略である Frontal-plane ankle strategy と Lift-leg strategy を人型ロボットに取り入れることでロボットの姿勢回復手法を提案する．

人体反応を、ロボットを正面方向から見た前額面における平面モデルとして捉え、人型ロボット富士通オートメーション社製の HOAP-2 で実現をする．

2. 人間の姿勢運動戦略

人間が肩側面に垂直に外乱を受けた場合、どのように姿勢維持を行うのかモーションキャプチャ[10]を利用し、調査を行った．実験方法は被験者に自然体で立ってもらい、右肩を側面から様々な力で押す．このとき被験者には必要な場合を除き、踏み出しは行わないようにと指示している．その結果を図 1 に示す．そして、四つの姿勢運動戦略があることがわかった．(a) は Frontal-plane ankle strategy, (b) は Lift-leg strategy, (c) は Cross-leg step strategy, (d) は Side-step strategy である．

3. 人型ロボットによる Frontal-plane ankle strategy

始めに、外乱は衝撃力と継続的に加わる外乱に分類できると考えられるが、本論では継続的に加わる外乱に対する人型ロボットのバランス制御の手法を述べる．

本節では、Frontal-plane ankle strategy によるバランス制御を実現する方法を示す．なお、Frontal-plane ankle strategy に基づく衝撃に対するバランス制御は実現できているが、本論では取り扱わない．

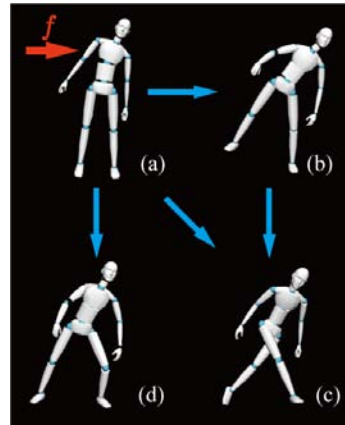


図 1 横からの外乱における人間の姿勢運動戦略．

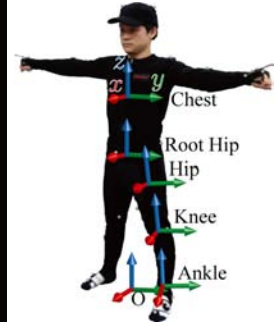


図 2 モーションキャプチャの座標系．

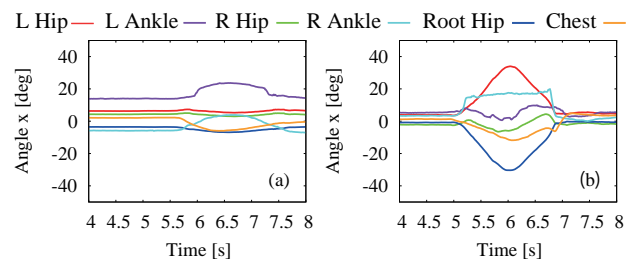


図 3 人間の各関節の角度（凡例の R と L は、R が右半身、L が左半身を意味する）: (a) Frontal-plane ankle strategy, (b) Lift-leg strategy．

図 2 にモーションキャプチャの座標系を示す．また、図 3 (a) に人間が Frontal-plane ankle strategy を行ったときの x 軸周りの体幹部と下半身の関節の角度を示す．図 3 (a) を見ると主に足首関節を利用している．股関節は比較的動きが小さく、足首関節と逆位相になっており、また両脚の動作は、ほぼ同相であることがわかる．そして、上半身の関節も使っている．

Frontal-plane ankle strategy を HOAP-2 に適用するためには足首、股関節、上半身の運動が必要であるが、HOAP-2 の上半身に関節がないため上半身の動作は考慮しない．そのため、足首、股関節を使って Frontal-plane ankle strategy を HOAP-2 に適用する．

Frontal-plane ankle strategy は、図 4 (a) のように人型ロボットを足首から上を 1 リンクとした倒立振り子として考える．外乱が加わった後、直立姿勢へ復元するために、足首関節に仮想ばね-ダンパを仮定し、制御を行う．倒立振り子モデルの運動方程式は式 (1) と表せる．

$$I\ddot{\theta} + C_p\dot{\theta} + K_p\theta - mgl_g \sin \theta = \tau \quad (1)$$

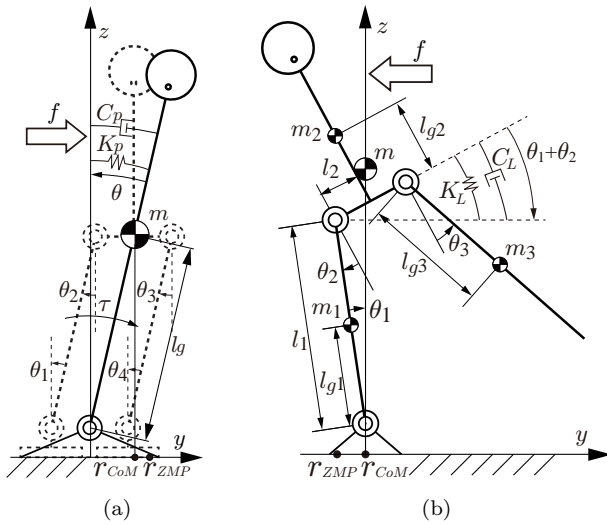


図4 モデル図: (a) Frontal-plane ankle strategy, (b) Lift-leg strategy.

I は $I = I_g + ml_g^2$ を表し, I_g は重心周りの慣性モーメント, θ はジョイントの角度, l_g は足首関節からロボット全体の重心までの距離, K_p, C_p はそれぞれ, ばね定数, ダンパ係数, τ は関節のトルク, m はロボット全体の質量, g は重力加速度である.

HOAP-2 における各関節はハイゲイン制御によって行われており, 重力による影響は無視できる. そこで, 倒立振子の運動方程式から足首関節の指令値 $\dot{\theta}_a^{ref}$ を求めると式 (2) となる.

$$\ddot{\theta}_a^{ref} = (\tau - C_p \dot{\theta} - K_p \theta) / I \quad (2)$$

また, 外乱によって生じるトルク τ は y 軸方向の ZMP (Zero Moment Point) [11] の変位 r_{ZMP} と全体重心の変位 r_{CoM} を用いて以下のように表される [4].

$$\tau = mg(r_{ZMP} - r_{CoM}) \quad (3)$$

ここで, 両脚の動作が同相となるように, 両足首 (θ_1, θ_4) には式 (2) の指令値を入力する. また股関節が足首関節と逆位相となるように, 股関節 (θ_2, θ_3) は足首関節の指令値の負の値を入力する.

4. 人型ロボットによる Lift-leg strategy

本節では Lift-leg strategy によるバランス制御の手法を述べる.

図 3 (b) に人間が Lift-leg strategy を行ったときの x 軸周りの体幹部と下半身の関節の角度を示す. 図 3 (b) を見ると支持脚 (左) 股関節と腰を主に利用している. 次に支持脚足首を見ると股関節と逆の位相であることがわかる. そして, 遊脚 (右) 股関節に大きな動作は見られない. また, 上半身の角度が変化しているが HOAP-2 にそれに対応する関節がないこと, また下半身の運動によって補えると考え, 胸と遊脚の動作は考慮しない.

Lift-leg strategy は, 図 4 (b) のモデルを用いて制御を行う. 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. そこで全体の重心を z 軸上に固定するため, 反動零空間法 [12] を用いる.

一般的な人型ロボットの運動方程式を式 (4) に示す.

$$\begin{bmatrix} H_f & H_{fl} \\ H_{fl}^T & H_l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_f \\ c_l \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G_f \\ g_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} J_{gf}^T \\ J_{gl}^T \end{bmatrix} W_g + \begin{bmatrix} J_{ef}^T \\ J_{el}^T \end{bmatrix} W_e \quad (4)$$

ここで $H_f \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$ はベース周りにおけるシステム全体の慣性行列, $H_{fl} \in \mathbb{R}^{6 \times n}$ は慣性干涉行列, $H_l \in \mathbb{R}^{n \times n}$ はリンク部慣性行列, $v \in \mathbb{R}^6$ はベース部の並進速度と角速度, $\theta \in \mathbb{R}^n$ はリンク部関節変位, $C_f \in \mathbb{R}^6$ はベース部遠心力とコリオリ項, $c_l \in \mathbb{R}^n$ はリンク部遠心力とコリオリ項, $G_f \in \mathbb{R}^6$ はベース部重力項, $g_l \in \mathbb{R}^n$ はリンク部重力項, $\tau \in \mathbb{R}^n$ はリンク部関節トルク, $W_g \in \mathbb{R}^6$ は床面反力のレンチ, $W_e \in \mathbb{R}^6$ は任意のリンクに加わるレンチ, $J_{\{ \}}$ は力変換行列である.

式 (4) からベース部の運動方程式を抜き出す. この時 $v = 0$, $C_f \approx \dot{H}_{fl} \dot{\theta}$, $G_f = J_{gf}^T W_g + J_{ef}^T W_e$ として積分し, H_{fl} の零空間射影に代入すれば, H_{fl} の零空間 $\dot{\theta}$ が得られる.

$$\dot{\theta} = (U - H_{fl}^+ H_{fl}) \zeta \quad (5)$$

ここで U は単位行列, H_{fl}^+ は H_{fl} の擬似逆行列, $\zeta \in \mathbb{R}^n$ は任意のベクトルである.

ここで拘束条件として前述の通り遊脚の制御は行わないため, θ_3 一定とし, このモデルの自由度は 2 自由度 ($n = 2$) となる. そのため, 制御する関節は支持脚足首 θ_1 と支持脚股関節 θ_2 となり, $\theta = [\theta_1 \ \theta_2]^T$ とする. また, リンクの運動による足部の z 軸方向の並進の影響は重力によって保証されるものとし, x 軸周りの影響は無視できるものとする ($H_{fl} \in \mathbb{R}^{1 \times 2}$).

干涉慣性行列 H_{fl} の並進成分は, システム全体の CoM 座標から導出できる. ここでは $H_{fl} = [H_{fl1}, H_{fl2}]$ とする (H_{fl} の詳細は付録 A を参照). 得られた干涉慣性行列を式 (5) に代入し, H_{fl} の零空間, 式 (6) を得る. b は任意のスカラーである.

$$\dot{\theta} = b[-H_{fl2} \ H_{fl1}]^T \quad (6)$$

式 (6) より関節速度の関係は式 (7) として表せる. この関節速度の関係を利用することで全体の重心を y 方向に変位することなく制御できる.

$$\dot{\theta}_1 = -H_{fl2}/H_{fl1} \dot{\theta}_2 \quad (7)$$

実機において上式をそのまま利用すると誤差の蓄積によって重心が移動してしまう. そこで重心位置のフィードバックを加えた式 (8) を実機実験では使用する.

$$\dot{\theta}_1^{ref} = \dot{\theta}_1 - K_f(r_{CoM} - r_{CoM}^{des}) \quad (8)$$

K_f はフィードバックゲイン, r_{CoM}^{des} は重心位置の目標位置である.

Lift-leg strategy では足首関節の制御を式 (8) によって行い, 股関節から上を倒立振子として制御を行う. 倒

表 1 各姿勢運動戦略における制御式 .

Phase	Strategy	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	Variable of transition
I	Frontal-plane ankle	Eq. (2)	$-\theta_1$	θ_1	$-\theta_1$	r_{CoM}
II	Lift-leg	Eq. (8)	Eq. (9)	-	-	
III	Transition	Eq. (10) $K_w: 0 \xrightarrow{\text{spline}} 1$	Eq. (11) $K_t: 10 \xrightarrow{\text{spline}} 140$	Eq. (11) $K_t: 10 \xrightarrow{\text{spline}} 140$	Eq. (12) $K_t: 10 \xrightarrow{\text{spline}} 140$	θ_1
IV (I)	Frontal-plane ankle	Eq. (2)	$-\theta_1$	θ_1	$-\theta_1$	

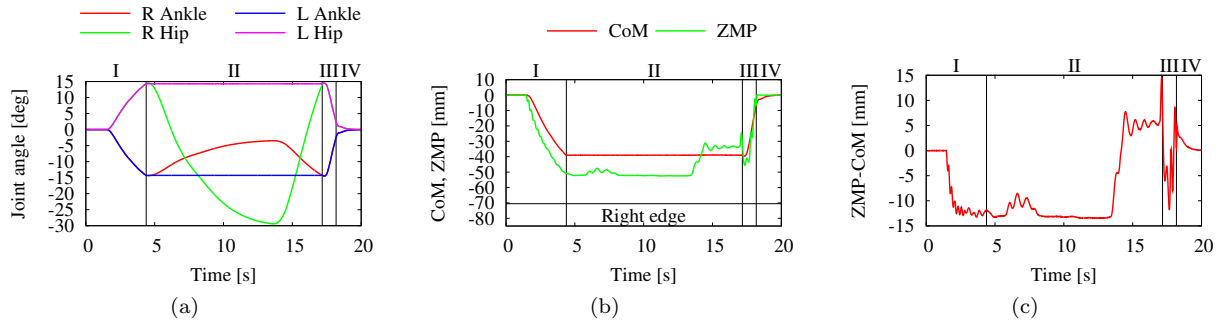


図 5 統合した Frontal-plane ankle strategy と Lift-leg strategy の実験結果: (a) 関節角度, (b) y 軸方向の ZMP と CoM の変位 (Right edge は HOAP-2 の右足裏の右端の位置 (-70.5 mm) を意味する.), (c) ZMP と CoM の差 .

立振子の運動方程式から θ_2 の指令値 $\ddot{\theta}_2^{ref}$ を求めると式 (9) となる .

$$\ddot{\theta}_2^{ref} = (\tau - C_L(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) - K_L(\theta_1 + \theta_2))/I \quad (9)$$

I は $I = I_{g2} + ml_{g2}^2$ を表し, I_{g2} は上半身の重心周りの慣性モーメント, l_{g2} は股関節から上半身の重心までの距離である . K_L, C_L はそれぞればね定数, ダンパ係数である . また τ は式 (3) から求める .

5. Frontal-plane ankle strategy と Lift-leg strategy の統合

継続的な外乱に対するバランス制御では Frontal-plane ankle strategy と Lift-leg strategy を遷移させる必要がある . Frontal-plane ankle strategy から Lift-leg strategy への切り替えの条件は重心位置によって判断する . Lift-leg strategy では重心位置を支持脚の真上に留めるため, Frontal-plane ankle の制御中に支持脚足裏の中心に全体重心が到達したとき Lift-leg strategy の制御に切り替える .

次に Lift-leg strategy から Frontal-plane ankle strategy への切り替えの条件は支持脚足首関節 θ_1 の角度によって判断する . Lift-leg strategy から Frontal-plane ankle strategy への切り替え時の角度の閾値を θ_1^{th} とする . Lift-leg strategy の制御中に $\theta_1 = \theta_1^{th}$ となったときに Frontal-plane ankle strategy に切り替える . しかし, Lift-leg strategy から Frontal-plane ankle strategy の切り替え時に股関節が足首関節の負の値と一致しないことがシミュレーションで確認された . Frontal-plane ankle strategy では足首関節の負の値を股関節に入力するため, 切り替え時に大きな速度が生じてしまう . 理由として指令値が速度になっていること等が考えられ

る . そこで遷移相を設けることでこの問題を解決する . 以下に遷移時の各関節の速度指令値を示す .

$$\dot{\theta}_1^{ref} = (1 - K_w)\dot{\theta}_1^{(t)} + K_w \int \ddot{\theta}_a^{ref} dt \quad (10)$$

$$\dot{\theta}_i^{ref} = -K_t\{\theta_i - (-\theta_1)\} \quad (i = 2, 3) \quad (11)$$

$$\dot{\theta}_4^{ref} = -K_t(\theta_4 - \theta_1) \quad (12)$$

$\dot{\theta}_1^{(t)}$ は遷移 (transition) の瞬間の足首関節の速度, $\ddot{\theta}_a^{ref}$ は式 (2) の角加速度指令値である . K_w は任意の時間で 0 から 1 に五次のスプラインで変化する係数, K_t は任意の時間で 10 から 140 に五次のスプラインで変化するフィードバックゲインであり, 次元は 1/s である .

これまでの制御の流れをまとめたものを表 1 に示す . Frontal-plane ankle strategy から Lift-leg strategy, その後 Frontal-plane ankle strategy へと戻る 1 サイクルを表したものである . この 1 サイクルを四段階に分けて番号を振った . なお, 四段階のうちの最後 (phase IV) 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 .

5.1 実験

HOAP-2 を左肩から押し Frontal-plane ankle strategy と Lift-leg strategy が統合できているか実験を行った . HOAP-2 は位置制御によって動作するため, 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ができない . そこで, それぞれ積分または二階積分することで関節の角度変位を制御に用いる . K_w, K_t の補間時間は 1 s, Frontal-plane ankle strategy から Lift-leg strategy への切り替えの条件である重心位置と式 (8) の r_{CoM}^{des} を -39 mm, Lift-leg strategy から Frontal-plane

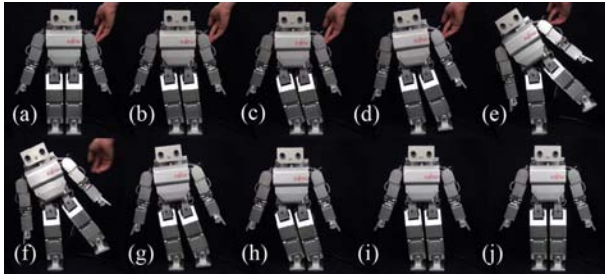


図 6 統合した Frontal-plane ankle strategy と Lift-leg strategy の実験の様子: (a)-(c) は Frontal-plane ankle strategy, (d)-(g) は Lift-leg strategy, (h) は Lift-leg strategy から Frontal-plane ankle strategy への遷移, (i)(j) は Frontal-plane ankle strategy である。

ankle strategy への切り替えの条件である支持脚足首関節角度 θ_1^{th} は -14.28 deg とした。実験で用いたゲインはそれぞれ, $K_p = 2 \text{ Nm/rad}$, $C_p = 5 \text{ Nm}\cdot\text{s/rad}$, $K_L = 1.15 \text{ Nm/rad}$, $C_L = 2.9 \text{ Nm}\cdot\text{s/rad}$, $K_f = 0.5 \text{ rad/s}\cdot\text{m}$ とした。

図 5 に実験のデータを示す。また, 図 6 に実験の様子を示す。1 s から 4 s 付近は Frontal-plane ankle strategy による制御, 4 s から 17 s 付近は Lift-leg strategy による制御, 17 s から 18 s 付近は Lift-leg strategy から Frontal-plane ankle strategy への遷移の制御, 18 s から 20 s は Frontal-plane ankle strategy の制御である。(a) は関節角度, (b) は y 軸方向の ZMP と CoM の変位, (c) は入力である ZMP と CoM の差を表している。(a) を見ると円滑に各制御が切り替わっており, 動作も不安定になっていない。

6. 結言と今後の課題

人間が側面から外乱を受けたとき, どのような姿勢運動戦略をとるかモーションキャプチャを用いて調べ, その結果 Frontal-plane ankle strategy, Lift-leg strategy, Side-step strategy, Cross-leg strategy があることがわかった。そして, Frontal-plane ankle strategy と Lift-leg strategy を人型ロボットに取り入れることができた。今後の課題は衝撃に対する Lift-leg strategy の実現と三次元モデルを用いた Step の実現が挙げられる。

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。また, 論文の執筆のために手伝って頂いた方々に心より感謝する。

参考文献

- [1] A. Shumway-Cook and 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, K. Takahashi and D. N. Nenchev: “Balance Control of a Humanoid Robot Based on the Reaction Null Space Method,” *Proc. of the 2006 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, Oct. 9 – 15, 2006, Beijing, China, pp. 1996–2001.
- [3] D. N. Nenchev and A. Nishio: “Ankle and Hip Strategies for Balance Recovery of a Biped Subjected to an Impact,” *Robotica*, vol. 26, pp. 643–653, June 2008.

- [4] Y. Kanamiya, S. Ota and D. Sato: “Ankle and Hip Balance Control Strategies with Transitions,” in *Proc. of the 2010 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA)*, May. 3 – 7, 2010, Anchorage, Alaska, USA, pp. 3446 – 3451.
- [5] S. Rietdyk, A.E. Patla, D.A. Winter, M.G. Ishac, C.E. Little: “Balance recovery from medio-lateral perturbations of the upper body during standing” in *J. of Biomechanics*, vol. 32, pp. 1149–1158, 1999.
- [6] A. M. Wing, S. Clapp, R. Burgess-Limerick: “Standing stability in the frontal plane determined by lateral forces applied to the hip,” in *Gait and Posture*, vol. 3, no. 1, pp. 38–42, March. 1995.
- [7] J. L. Patton, M. J. Hilliard, K. Martinez, M.-L. Mille, M. W. Rogers: “A Simple Model of Stability Limits Applied to Sidestepping in Young, Elderly and Elderly Fallers,” in *Proc. of the 28th IEEE Int. Conf. on Engineering in Medicine and Biology Society*, Aug. 30 2006–Sept. 3 2006 New York City, USA, pp. 3305–3308.
- [8] K. Iqbal, H. Hemami, S. Simon: “Stability and control of a frontal four-link biped system” in *IEEE Trans. on Biomedical Engineering*, vol. 40, no. 10, pp. 1007–1018, Oct. 1993.
- [9] A. Carmona, L. Molina-Tanco, M. Azuaga, J. A. Rodriguez and F. Sandoval: “Online absorption of mediolateral balance disturbances for a small humanoid robot using accelerometer and force-sensor feedback,” in *Proc. of the 2007 IEEE/ASME Int. Conf. on Advanced intelligent mechatronics*, Sept. 4 – 7, 2007, Canarias, Tenerife, Spain, pp. 1–6.
- [10] OptiTrack: <http://www.naturalpoint.com/optitrack/>
- [11] M. Vukobratovic and B. Borovac: “Zero Moment Point. Thirty Five Years of its Life,” *Int. J. Humanoid Robot*, vol. 1, no. 1, pp. 157–173. 2004.
- [12] D. N. Nenchev, K. Yoshida, P. Vichitkulsawat and M. Uchiyama: “Reaction null-space control of flexible structure mounted manipulator systems,” *IEEE Trans. on Robot. Autom.*, vol. 15, no. 6, pp. 1011–1023, Dec. 1999.

付録 A 干渉慣性行列 H_{fl} の導出

干渉慣性行列 H_{fl} の並進成分は, システム全体の重心位置から導出できる。図 4 (b) のモデルから y 軸方向の重心位置を求め, それを時間微分することで重心ヤコビアン J_c を求める。干渉慣性行列 H_{fl} と重心ヤコビアン J_c 間には式 (13) の関係が存在する。

$$H_{fl} = mJ_c \quad (13)$$

式 (13) から H_{fl} の各成分 H_{fl1}, H_{fl2} を求めると以下となる。

$$H_{fl1} = m_1 l_{g1} C_1 + m_2 (l_1 C_1 - 2l_2 S_{12} - l_{g3} C_{123}) + m_3 (l_1 C_1 - l_2 S_{12} + l_{g2} C_{12}) \quad (14)$$

$$H_{fl2} = m_2 (-2l_2 S_{12} - l_{g3} C_{123}) + m_3 (-l_2 S_{12} + l_{g2} C_{12}) \quad (15)$$

ここで $S_i = \sin \theta_i$, $C_i = \cos \theta_i$ ($i = 1, 2$), $S_{12} = \sin(\theta_1 + \theta_2)$, $C_{12} = \cos(\theta_1 + \theta_2)$, $C_{123} = \cos(\theta_1 + \theta_2 - \theta_3)$ である。