

相対角加速度を用いた角運動量ダンパによる 人型ロボットの連続前方跳躍

西澤佳隼（東京都市大学） 金宮好和（東京都市大学） 佐藤大祐（東京都市大学）

1. 緒言

人型ロボットが人間の動きを模倣することは、人型ロボットの開発に大きく寄与する。しかし、跳躍のようなダイナミックな動作における運動中の安定性など、いまだ課題は多い。Pratt らが提唱した Capture Point (CP) は、線形倒立振子で単純化した人型ロボットを、軌道エネルギーが零となる点であり、外乱下においても CP に着地をすることで転倒を回避することができる [1]。Engelsberger らは Divergent Component of Motion (DCM) に基づく三次元の歩行制御を実現した [2]。重心回りに発生する角運動量とその変化率の制御は非常に重要であり、Otani らは跳躍動作で上体によるバランス制御を試みている [3]。しかし、骨盤を含む上半身の運動の物理的な意味合いがこれまで明確化されていなかった。一方で金宮らは、人型ロボットの角運動量保存則における平衡関係を人型ロボットのバランス制御に応用し、干渉角運動量によって系全体の角運動量と剛体の角運動量の差分である相対角運動量を制御する手法を提案している [4]。またこれを加速度次元で行い、RAA (Relative Angular Acceleration) コントローラとよんでいる [5]。

本稿では、人型ロボットにて片足支持からの跳躍動作を行い、上半身により前述の相対角運動量を制御し、系全体の角運動量をダンピングすることで着地時の転倒を回避する。そして前方への跳躍と着地を支持脚を切り替えながら複数回繰り返し、連続跳躍を行う。

2. 跳躍における状態変化

本稿における跳躍動作は以下の五つに分類される。
片足支持相 片足支持の状態
離陸相 片脚支持で目標重心速度まで加速する状態
空中相 いずれの脚も設置していない状態
着地相 支持脚を切り替え片脚着地した状態
初期化相 着地後、上体姿勢を初期化し、片脚支持相と一致させる状態

3. 角運動量制御

跳躍時に発生する角運動量により Center of Pressure (CoP) が足部先端に遷移し、転倒する場合があるため、この角運動量を制御することにより転倒を抑制する。また腕部および上体による干渉運動量を利用し、空中相におけるベースリンクの姿勢制御を行う。

3.1 角運動量の関係式と変化率

人型ロボットは複数のリンクによって構成される浮遊ベースのロボットであり、その系全体の角運動量 (System Angular Momentum: SAM) は、全身を剛体と

仮定した際の角運動量 (Composite Rigid Body Angular Momentum: CRB-AM) と、リンクの運動による発生する干渉角運動量 (Coupling Angular Momentum: CAM) の和より成り立つ。以下に人型ロボットの角運動量の関係式を示す。

$$l_C = I_C \omega_B + H_C \dot{\theta} \quad (1)$$

式中、 $l_C \in \mathbb{R}^3$ は SAM、 $I_C \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ は CRB の慣性行列、 $\omega_B \in \mathbb{R}^3$ はベースリンクの角速度、 $H_C \in \mathbb{R}^{3 \times n}$ は干渉慣性行列、 $\theta \in \mathbb{R}^n$ はロボットの関節角、 n は人型ロボットの関節数である。

角運動量制御を実行するために角運動量変化率を与える。式 (1) より角運動量変化率は以下となる。

$$\dot{l}_C = I_C \dot{\omega}_B + H_C \ddot{\theta} + c_m \quad (2)$$

式中、 $c_m = \dot{I}_C \omega_B + \dot{H}_C \dot{\theta}$ は非線形項である。空中相では、角運動量は保存されるため角運動量変化率は零となる。一方、床面と接触している場合には SAM をダンピングすることで転倒の原因となる CoP の遷移を抑制することができ、角運動量変化率指令値を以下とする。

$$\dot{l}_C^{ref} = -D_l l_C = -D_l (I_C \omega_B + H_C \dot{\theta}) \quad (3)$$

式中、 D_l は角運動量のダンピングゲインである。

3.2 相対角加速度

I_C が正定行列であることを考慮し、式 (2) の両辺に I_C^{-1} をかけ、加速度次元で表すと以下ようになる。

$$J_\omega \ddot{\theta} + J_\omega \ddot{\theta} = \dot{\omega}_C - \dot{\omega}_B \equiv \Delta \dot{\omega} \quad (4)$$

式中、 $J_\omega = I_C^{-1} H_C$ 、 $\omega_C = I_C^{-1} l_C$ であり、 $\Delta \dot{\omega}$ を相対角加速度と定義する [5]。関節加速度により相対角加速度を制御することができる。

3.3 相対角加速度指令値

空中相においては、接触点を用いたベースリンクの姿勢を与えることができない。式 (4) よりリンクの運動がベースリンク角速度 ω_B に干渉することを利用し、上半身を用いて空中でのベースリンク姿勢制御を行う。前節より空中相での相対角加速度指令値は以下となる。

$$\Delta \dot{\omega}^{ref} = -\dot{\omega}_B^{ref} - J_\omega \ddot{\theta}_m - \dot{J}_\omega \dot{\theta} \quad (5)$$

式中、 $\ddot{\theta}_m \in \mathbb{R}^n$ は脚部運動を与える関節加速度である。離陸相、着地相では SAM のダンピングを行う。

$$\Delta \dot{\omega}^{ref} = -\dot{\omega}_B^{ref} - J_\omega (\ddot{\theta}_c + \ddot{\theta}_m) - D_l \omega_C - \dot{J}_\omega \dot{\theta} \quad (6)$$

$\ddot{\theta}_c \in \mathbb{R}^n$ は CRB の運動を与える関節加速度である．また各相対角加速度指令値におけるベースリンクの制御指令値は以下を与える．

$$\dot{\omega}_B^{ref} = \dot{\omega}_B^{des} + K_{\omega_B} e_{\omega_B} + K_{o_B} e_{o_B} \quad (7)$$

式中， e_{ω_B} ， e_{o_B} はベースリンクの角速度と姿勢の誤差を示す． K_{ω_B} ， K_{o_B} はフィードバックゲインである．相対角加速度制御を行う関節加速度解は以下となる．

$$\ddot{\theta}_{l_C} = \bar{J}_\omega^+ \Delta \dot{\omega}^{ref} \quad (8)$$

式中， $\bar{J}_\omega = J_\omega N(\mathcal{J})$ ，また $\mathcal{J} \in \mathbb{R}^{12 \times n}$ は脚部のヤコビ行列， $N(\circ)$ は零空間射影行列を示す．相対角加速度制御は，脚部運動の制御で使用しない冗長自由度，つまり腕部を含む上半身の自由度によって実行される．

4. 重心制御および着地位置制御

離陸相において目標重心軌道は五次の補間式により滑らかに与えられる．また，着地時の脚先の目標位置は [1] より CP とし，空中相において離陸相に用いた脚ではない脚を移動させる．着地相において [2] より DCM に基づくバランス制御を行う．重心の安定後，同様の制御により連続で前方跳躍する．

5. 関節加速度

RAA コントローラ [5] を用いて関節加速度を与える．与える関節加速度により実行するタスクを以下に示す．

$\ddot{\theta}_c$: CRB の運動の制御

$\ddot{\theta}_m$: 遊脚の制御

$\ddot{\theta}_{l_C}$: 相対角加速度の制御

$\ddot{\theta}_u$: 関節速度ダンパおよび関節限界

脚部で床面との接触を考慮しつつ，腕部で角運動量制御を行う関節加速度を与える．この際の四つのタスクに対して優先度を考慮し，零空間行列による非干渉化を行う．その優先度は以下とする．

$$\ddot{\theta}_c \succ \ddot{\theta}_m \succ \ddot{\theta}_{l_C} \succ \ddot{\theta}_u \quad (9)$$

ただし空中相において，外界との接触点を持たず，重心の制御ができないため， $\ddot{\theta}_c$ の成分は用いない．また初期化相において相対角加速度制御を行う冗長自由度を持たないため， $\ddot{\theta}_{l_C}$ の成分は用いない．

6. シミュレーション

前述した制御手法を小型人型ロボットに適用し，連続跳躍を行う．片足支持の状態から前方へ跳躍し，空中で支持脚を切り替え着地する．このとき上半身を用いて相対角加速度を制御し，離陸時，着地時に発生する SAM をダンピングする．また空中では，同様の手法を用いてベースリンクの姿勢を制御する．脚先姿勢は，床面と平行とする．重心の安定後，上半身姿勢を離陸前に戻す．一度目の跳躍は右脚で行い，左足で着地する．二度目の跳躍は左足で跳躍し，右脚で着地する．上記の跳躍動作を三回連続して行った．

図 1 に三度目の跳躍のスナップショットを示す．右脚で跳躍し，空中相で支持客を切り替え左脚で着地している．図 2 にシミュレーション結果のグラフを示す．一度の跳躍における空中相が約 0.15 s で上方への重心

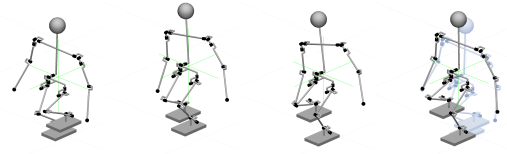


図 1 スナップショット: 三度目の跳躍

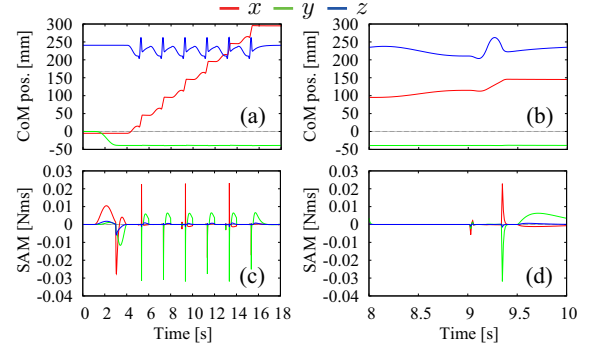


図 2 シミュレーション結果: 左列はシミュレーション全体，右列は三度目の跳躍の前後約 1 秒である．

移動距離が約 30 mm，前方への重心移動距離が約 50 mm である．転倒せず連続前方跳躍をしていることがわかる．(d) において，約 9.3 s のとき着地する．SAM が相対角加速度によってダンピングし，収束している．また 9.5 s 以降の初期化相では角運動量制御を行わないため SAM が生じている．

7. 結言

本稿では，浮遊ベースロボットの角運動量関係に基づいたバランス維持動作の生成手法を跳躍動作に適用した．相対角加速度を制御することにより，跳躍時および着地時に発生する角運動量によって転倒せずに前方跳躍を連続で行うことができた．以上より，提案手法は静的な状態からの跳躍動作において有用性があると示された．今後の課題として，助走を用いる跳躍動作や，重心の安定化する相を持たない連続跳躍動作などより動的な運動の実現が挙げられる．

参考文献

- [1] J. Pratt, J. Carff, S. Drakunov, and A. Goswami, "Capture point: A step toward humanoid push recovery," 2006 6th IEEE-RAS Int. Conf. on Humanoid Robots, pp. 200–207, 2006.
- [2] J. Engelsberger, C. Ott, and A. Albu-Schffer, "Three-dimensional bipedal walking control based on divergent component of motion," IEEE Transactions on Robotics, vol. 31, no. 2, pp. 355–368, 2015.
- [3] T. Otani *et al.*, "Trunk motion control during the flight phase while hopping considering angular momentum of a humanoid," Adv. Robotics, vol. 32, no. 22, pp. 1197–1206, 2018.
- [4] D. N. Nenchev, "The momentum equilibrium principle: Foot contact stabilization with relative angular momentum/velocity," 2018 IEEE-RAS 18th Int. Conf. on Humanoid Robots, pp. 17–24, 2018.
- [5] R. Hinata and D. N. Nenchev, "Balance stabilization with angular momentum damping derived from the reaction null-space," 2018 IEEE-RAS 18th Int. Conf. on Humanoid Robots, pp. 188–195, 2018.