

人型ロボットの未知の不整地への踏み出し動作における 角運動量ダンパに基づくバランス制御

日高 優紀 (東京都市大学), 西澤 佳準 (東京都市大学)

金宮 好和 (東京都市大学)

Balance Control with Angular Momentum Damping When a Humanoid Steps on an Unknown Obstacle

Yuki HIDAKA (TCU), Kajun NISIZAWA (TCU)

and Yosikazu KANAMIYA (TCU)

Abstract: It is shown that contact destabilization after an impact occurring at high-speed, when the robot steps on an obstacle of unknown height, can be avoided by injecting angular momentum damping for a short time interval immediately after the impact. This is done in a straightforward way by making use of the motion from the reaction null-space (RNS).

1. 緒言

人型ロボットが災害地域などで目標の動作をするとき、遊脚が不整地または障害物との衝突が予想される。本稿では人型ロボットが速い踏み出し動作を行った際の未知の段差への衝突に焦点を当てる。

提案する手法は、運動量保存則による、相対角速度と加速度の存在を明らかにした研究結果に基づいている [1]。相対角加速度を利用することにより、角運動量ダンパをシステムに導入し、ロボットが大きな衝撃に耐えられることが示された [2]。浮遊ベースロボットの制御設計における反動零空間法 (RNS) の役割としてベース部に反力などを生じさせることなく、マニピュレータを制御できることが解説された [3]。本研究では速い踏み出し動作を想定しており、Divergent Component of Motion (DCM) [4] に基づいた踏み出し動作を行う。動的な踏み出し動作と衝撃の後にロボットを安定させるために、全身コントローラを使用する [2]。また、DCM 一般化逆行列 (DCM-GI) [5] に基づきレンチの分配を行っていることから繰り返し計算による最適化を用いずに人型ロボットの制御を行っている。

2. 背景

2.1 人型ロボットの運動方程式

人型ロボットの運動方程式は以下のように示す。

$$\begin{bmatrix} \mathbb{M}_C & H_{CM} \\ H_{CM}^T & M_\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathcal{V}}_M \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathcal{C} \\ c_\theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathcal{G}_C \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_c \\ \mathcal{J}_c^T \end{bmatrix} \bar{\mathcal{F}}^c \quad (1)$$

$\theta \in \mathbb{R}^n$ は関節角度ベクトル, $\mathcal{V}_M = [\dot{r}_C^T \ \omega_B^T]^T$ はベースリンクについているマニピュレータの関節を固定した剛体

Composite Rigid Body (CRB) のツイストである。 r_C , $\omega_B \in \mathbb{R}^3$ はそれぞれ重心 (CoM) の位置とベースリンクの角速度を表す。 $\mathbb{M}_C = \text{diag}[ME_3 \ I_C]$ は空間慣性テンソルで M と $E_3 \in \mathbb{R}^3$ はそれぞれロボットの総質量, 単位行列を示す。 $I_C \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ は CRB の慣性テンソルを表す。 $H_{CM} = [0^T \ H_C^T]^T$, $H_C \in \mathbb{R}^{3 \times n}$ CRB の回転運動に対する干渉慣性行列を示す。 $M_\theta \in \mathbb{R}^{n \times n}$ はリンクの慣性行列, $\mathcal{C} = [0^T \ c_m^T]^T$, $c_m = \dot{I}_C \omega_B + \dot{H}_C \dot{\theta} \in \mathbb{R}^3$ と $c_\theta \in \mathbb{R}^n$ は非線形項を表す。 $\mathcal{G} = [-Mg^T \ 0^T]^T$ は重力項で $g = [0 \ 0 \ -g]^T$ は重力加速度を表す。 $\tau \in \mathbb{R}^n$ は関節トルクである。 $\bar{\mathcal{F}}^c \in \mathbb{R}^c$ は先端部の拘束方向のレンチであり, c は接触部の拘束方向の総数である。 $C_c \in \mathbb{R}^{6 \times c}$ は四肢先端部の力とモーメントの接触方向成分を重心へ変換行列, $\mathcal{J}_c \in \mathbb{R}^{c \times n}$ は重心速度およびベースリンクの角速度を各先端部の接触方向成分へ変換するヤコビ行列を表す。

2.2 接触制約

環境との接触を四肢先端部について考えたとき以下のようを表す [6]。

$$\begin{bmatrix} J_c \\ J_m \end{bmatrix} \ddot{q}_M = \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{\mathcal{V}}^m \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \dot{J}_c \\ \dot{J}_m \end{bmatrix} \dot{q}_M. \quad (2)$$

$\dot{q}_M = [\mathcal{V}_M^T \ \dot{\theta}^T]^T$ はロボットの一般化速度である。 $J_{(o)} = [C_{(o)}^T \ \mathcal{J}_{(o)}]$ は系のヤコビ行列である。 $C_m \in \mathbb{R}^{6 \times \eta}$ は C_c の対になる接触部の非拘束方向からなる変換行列, $\eta = n - c$ は非拘束方向の総数を示す。 $\mathcal{J}_m \in \mathbb{R}^{\eta \times n}$ は \mathcal{J}_c の対になる非拘束運動方向のヤコビ行列である。 $\dot{\mathcal{V}}^m$ は四肢先端部の非拘束方向からなる加速度である。

2.3 人型ロボットの運動量

式 (1) の上段より以下のように示す．

$$\dot{L}_C + \mathcal{G} = C_c \bar{\mathcal{F}}^c \quad (3)$$

\dot{L}_C は重心の空間運動量変化率を表す．

$$\dot{L}_C = \begin{bmatrix} \dot{p} \\ \dot{l}_C \end{bmatrix} = \mathcal{A}_M \ddot{q}_M + \dot{\mathcal{A}}_M \dot{q}_M \quad (4)$$

以下に重心回りの空間運動量の行列を示す．

$$\mathcal{A}_M = \begin{bmatrix} M E_3 & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & I_C & H_C \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{6 \times (n+6)} \quad (5)$$

ここで，

$$\dot{p} = M \ddot{r}_C \quad (6)$$

$$\dot{l}_C = I_C \dot{\omega}_B + H_C \ddot{\theta} + \dot{I}_C \omega_B + \dot{H}_C \dot{\theta} \quad (7)$$

CRB の角運動量変化率は以下のように与えられる．

$$\dot{l}_C = I_C \dot{\omega}_B + \dot{I}_C \omega_B \quad (8)$$

2.4 DCM/VRP に基づく運動量

DCM は重心の速度と位置から以下のように表す [4]．

$$r_X = r_C + T_X \dot{r}_C \quad (9)$$

また $T_X = 1/\omega_X = \sqrt{\bar{z}_{vrp}/g}$ である．ここで ω_X は固有角振動数で， \bar{z}_{vrp} は初期の重心の高さと仮定する．Virtual Repellent Point (VRP) は次のように与えられる．

$$r_{vrp} = r_X - T_X \dot{r}_X \quad (10)$$

式 (10) により，式 (6) は次のように書き直せる．

$$\dot{p} = \frac{M}{T_X^2} (r_C - r_{vrp}) \quad (11)$$

2.5 接触レンチの分配

バランス制御のために，接触部のレンチを適切な方法で分配する必要がある．一般的な場合では， $c > 6$ と仮定されるため，無限の解が存在する．無限集合の解は，式 (3) から得ることができる．

$$\bar{\mathcal{F}}^c = C_c^\# (\dot{L}_C + \mathcal{G}) + N(C_c) \bar{\mathcal{F}}_a^c \quad (12)$$

$(\circ)^\#$ は一般化逆行列を表し， $N(\circ)$ は零空間射影行列を示す． $\bar{\mathcal{F}}_a^c$ は拘束条件下における任意の先端部の力とモーメントである．式 (12) の DCM-GI を使用して，両足支持期間のときにレンチを分配する．

2.6 DCM/VRP による踏み出し動作

DCM を用いた踏み出し動作を生成する [4]．ここでは，初期と踏み出し後の状態は静止していると仮定する．まず，踏み出し後の遊脚の位置を目標位置として与えるとき，踏み出し時の目標の VRP は以下に示す．

$$r_{vrp}^{eos} = r_a^{des} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & \bar{z}_{vrp} \end{bmatrix} \quad (13)$$

次に，CoM の初期位置 $r_C(0)$ とステップ期間 T_{step} を与えると，初期の VRP の位置は次のように決定される．

$$r_{vrp}^{init} = \frac{1}{1 - e^{-\frac{T_{step}}{T_X}}} r_C(0) + \frac{1}{1 - e^{-\frac{T_{step}}{T_X}}} r_X^{eos}. \quad (14)$$

ステップ後は DCM の速度を 0 に収束させるため， $r_X^{eos} = r_{vrp}^{eos}$ となる．最後に，目標の DCM 軌道は， $0 \leq t \leq T_{step}$ の間で以下のように決定できる．

$$r_X^{des}(t) = e^{\frac{(t-T_{step})}{T_X}} (r_X^{eos} - r_{vrp}^{init}) + r_{vrp}^{init}, \quad (15)$$

$$\dot{r}_X^{des}(t) = \frac{1}{T_X} (r_X^{des}(t) - r_{vrp}^{init}). \quad (16)$$

2.7 相対角運動量

式 (1) の上段に M_C^{-1} を左から掛けたときを以下に表す．

$$M_C^{-1} H_{CM} \ddot{\theta} + M_C^{-1} (C + \mathcal{G}) = \dot{\mathcal{V}}_C - \dot{\mathcal{V}}_M \quad (17)$$

式中， $\dot{\mathcal{V}}_C \equiv M_C^{-1} C_c \bar{\mathcal{F}}^c$ である．一方で CRB 空間加速度 $\dot{\mathcal{V}}_M$ は運動制御の制約に一致する運動を生成する必要がある．空間加速度の関係の式 (17) は以下のように表す．

$$a_g = \dot{\mathcal{V}}_{CR} - \dot{\mathcal{V}}_{CI}, \quad (18)$$

$$J_\omega \ddot{\theta} = \Delta \dot{\omega} - I_C^{-1} c_m \quad (19)$$

ここで $J_\omega = I_C^{-1} H_C$ である．

$$\Delta \dot{\omega} = \dot{\omega}_C - \dot{\omega}_B \quad (20)$$

$\Delta \dot{\omega}$ は相対角加速度 (RAA) と呼ばれている． a_g は重心の加速度を表す．また $J_\omega \ddot{\theta} = \Delta \dot{\omega} = 0$ の場合は注意が必要である [1]．関節速度の解は，RNS [7] の要素からなる．この解法では，角運動量制御の要素を設計することで，バランス制御に安定性を持たせることができる．

3. 関節加速度

式 (2) と式 (19) からロボットの全身を制御するための関節加速度を求めることができる． $\dot{\mathcal{V}}_M$ ， $\dot{\mathcal{V}}^m$ ， $\Delta \dot{\omega}$ は制御

指令値として使用される．前者の二つは式 (2) に使用され，後者は式 (19) に使用する．制御指令値は入力に依存する関節加速度の成分を決定する．

$$\ddot{\theta} = \ddot{\theta}(\dot{V}_M) + \ddot{\theta}(\dot{V}^m) + \ddot{\theta}(\Delta\omega) + \ddot{\theta}(\ddot{\theta}_u) + \ddot{\theta}(\dot{q}_M) \quad (21)$$

第一優先度の $\ddot{\theta}(\dot{V}_M)$ は，接触の制約から，CRB を制御するために使用される．目標の CRB の並進運動および回転運動は，脚の動きを介して達成される．第二項 $\ddot{\theta}(\dot{V}^m)$ の役割はロボットが片足支持のとき遊脚の目標動作を制御することである．必要に応じてこの成分で目標動作を制御することができる．第三項 $\ddot{\theta}(\Delta\omega)$ の役割は目標の CRB の回転運動に関して干渉慣性を保証することで重心角速度を制御することである．脚部と上半身は最初の二つの成分によって制御されることから，この干渉は腕の動きによってのみ保証できる．さらに，上記の三つの成分に加えて，さらに二つの成分がある．そのうちの一つ $\ddot{\theta}(\ddot{\theta}_u)$ は制御入力 $\ddot{\theta}_u$ に線形に依存する．運動学の冗長性があるとき，この入力は，関節速度/角度の制約を設けるために利用できる．他の一つ $\ddot{\theta}(\dot{q}_M)$ は非線形の状態依存の関節加速度である．上部の関節加速度成分の詳細な導出は省略する．

4. 制御指令値

関節トルク制御は運動と力制御の成分からなる．運動制御の成分は式 (21) から導出され，CRB と遊脚の目標の軌道を追従するための二つの成分がある．関節運動を抑制するために，二つの要素がある．そのうちの一つは，足が未知の障害物に踏み込んだときの衝撃によって起こる不安定性を扱うための角運動量ダンパとして RAA を使用する．もう一つは，冗長性からなる運動を抑制するための関節空間ダンパである．最後に，コントローラの力制御成分は，レンチの分配の解から導出できる．

4.1 遊脚の軌道追従

脚先の加速度指令値は以下とする．

$$\dot{V}_S^{ref} = \begin{bmatrix} \dot{v}_S^{ref} \\ \dot{\omega}_S^{ref} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{v}_S^{des} + K_{v_S} e_{v_S} + K_{p_S} e_{p_S} \\ \dot{\omega}_S^{des} + K_{w_S} e_{\omega_S} + K_{o_S} e_{o_S} \end{bmatrix} \quad (22)$$

このとき $e_{(o)}$ は誤差ベクトル， $K_{(o)}$ はフィードバックゲインで，添字 $v(o)/\omega(o)$ は速度/角速度， $p(o)/o(o)$ は位置/姿勢を表す．

4.2 CRB の運動制御

一般に，式 (22) の制御則は，CRB の軌道を追従するためにも使用できる．

$$\dot{V}_M^{ref} = \begin{bmatrix} \dot{v}_C^{ref} \\ \dot{\omega}_B^{ref} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{v}_C^{des} + K_{v_C} e_{v_C} + K_{p_C} e_{p_C} \\ \dot{\omega}_B^{des} + K_{w_B} e_{\omega_B} + K_{o_B} e_{o_B} \end{bmatrix} \quad (23)$$

このコントローラは，制御入力として VRP を使用する．制御入力は式 (11) から，得られる．

$$\dot{p}^{ref} = \frac{M}{T_X^2} (r_C - r_{vrp}^{ref}) \quad (24)$$

r_{vrp}^{ref} は DCM の制御則を用いて，式 (10) を介して目標の DCM 軌道 ($r_X(t)$ $\dot{r}_X(t)$) から導出される．

$$\dot{r}_X^{ref} = \dot{r}_X^{des} + K_X e_X \quad (25)$$

次に，式 (9) を用いて，以下が得られる．

$$\dot{v}_C^{ref} = \dot{r}_C^{ref} = \omega_X (\dot{r}_X^{ref} - \dot{r}_C) \quad (26)$$

この入力は式 (23) の \dot{v}_C^{ref} を置き換える．

4.3 角運動量ダンパ

RNS から導出された角運動量ダンパは，加速度の項に RNS の解に基づいたシステムを導入できる．

$$J_\omega \ddot{\theta} = -\dot{J}_\omega \dot{\theta}. \quad (27)$$

式 (19) より，系に角運動量ダンパを導入することができる．

$$\Delta\dot{\omega}^{ref} = -D_\omega \Delta\omega = -D_\omega J_\omega \dot{\theta} \quad (28)$$

$D(o)$ は減衰ゲインを示す．ベースリンクの角加速度が与えられると，系の角加速度は以下ようになる．

$$\dot{\omega}_C^{ref} = \dot{\omega}_B^{ref} - D_\omega J_\omega \dot{\theta} \quad (29)$$

$\Delta\omega^{ref}$ は腕部の動きを決定することから過度の腕の動きを避けるために，この制御入力は衝撃が加わっている間またはその直後にのみ使用する．踏み出し中では，関節加速度の制御成分 $\ddot{\theta}(\Delta\omega)$ は単に 0 に設定する．このとき零空間の項 $\ddot{\theta}(\ddot{\theta}_u)$ もそれに依拠して調整する必要がある．最も優先度の低い関節加速度の制御成分は，以下とする．

$$\ddot{\theta}_u^{ref} = -D_\theta \dot{\theta}. \quad (30)$$

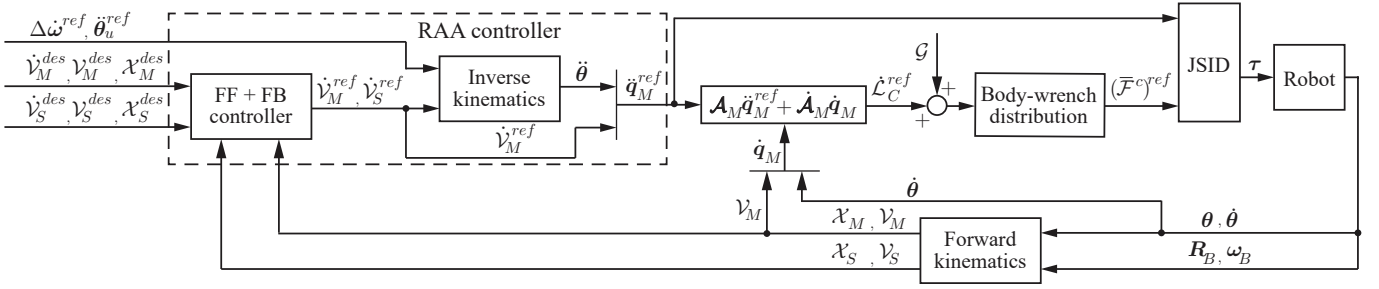


Fig. 1: Block diagram of the whole-body torque controller with RAA control component.

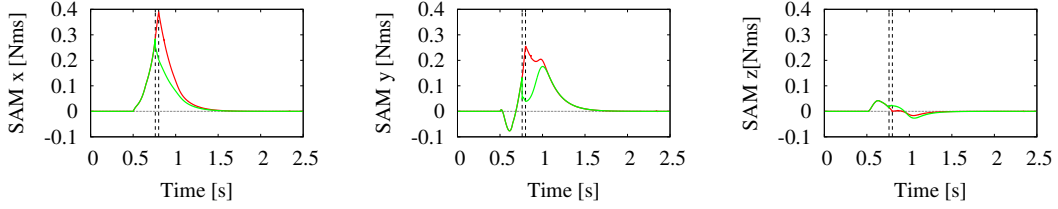


Fig. 2: System angular momentum (SAM) graphs for stepping on a flat ground without angular momentum damping (red color), and an unknown obstacle with angular momentum damping (green color).

4.4 関節トルク制御

上記の制御指令値 $\dot{\mathbf{v}}_M^{ref}$, $\dot{\mathbf{v}}_S^{ref}$, $\dot{\omega}_C^{ref}$ と $\ddot{\theta}_u^{ref}$ を式 (21) に挿入して関節加速度指令値を得ることができる。したがって, $\ddot{\mathbf{q}}_M^{ref} = [(\dot{\mathbf{v}}_M^{ref})^T (\ddot{\theta}^{ref})^T]^T$ である。さらに, 力制御指令値 $(\bar{\mathcal{F}}^c)^{ref}$ は式 (12) から DCM-GI を用いて得られる。式 (12) の零空間の項は, 本稿では使用しない。運動方程式の下段部分から得られる式 (1) の関節トルク指令値は, 以下のように表す。

$$\boldsymbol{\tau} = \mathcal{A}_\theta \ddot{\mathbf{q}}_M^{ref} + \mathbf{c}_\theta + \mathbf{g}_\theta - \mathcal{J}_{cB}^T (\bar{\mathcal{F}}^c)^{ref} \quad (31)$$

ここで $\mathcal{A}_\theta \equiv [\mathbf{H}_{CM}^T \quad \mathbf{M}_\theta]$ である。

$$\mathcal{J}_c^T (\bar{\mathcal{F}}^c)^{ref} = -\mathbf{g}_\theta + \mathcal{J}_{cB}^T (\bar{\mathcal{F}}^c)^{ref} \quad (32)$$

\mathcal{J}_{cB} は, 拘束された運動方向のベースリンクに関するヤコビ行列を表し, \mathbf{g}_θ は関節の重力項を表す。左辺の項は, 重力トルクを補償するが, 干渉項に起因する誤差が起こる。コントローラのブロック線図を Fig. 1 に示す。

5. シミュレーション

提案されたコントローラを, シミュレーションによって検証する。Choreonoid シミュレーション環境 [8] にて, 小型人型ロボット HOAP-2 [9] のモデルを用いる。この環境では, オブジェクトの剛性を定義することができ, 衝撃を処理することから, やや柔軟な足/床の接触を設定した。ステップ長さは 0.15 m であり, 最大ステップ高さは 0.05 m である。脚を上げ, 脚先が最大高さになるまでに 0.21

s, そこから再び床に脚を下げるのは 0.9 s の時間間隔で二つの五次補間で追従される。したがって, $T_{step} = 0.3$ s でステップしている。遊脚の軌道のフィードバックゲインおよび減衰係数は, $K_{ps} = 1000 = K_{os}$, $K_{vs} = 60 = K_{\theta}$, $D = 100 = D_\theta$ としすべてのシミュレーション中で一定とした。

5.1 平面における踏み出し動作

このシミュレーションでは, RAA の制御は使用しない。DCM のフィードバックゲインは, 動作を通して $K_X = 100$ で一定である。ステップさせるために, 上半身の回転のフィードバックゲインの設定に大きく依存している。Table 1 より多項式補間をベースリンクのフィードバックゲインを初期値に戻すまでに, 0.5 s のフェーズを設けている。上半身がステップの間にフィードバックが高い状態が保持され, Table 1 の初期状態から最後まで高いフィードバックゲインで追従された場合, 支持脚のかかと回りの回転が発生する。これは, 早い遊脚の動作によって反作用のモーメントが起こり, 圧力中心 (CoP) が後方に移動するためである。一方, 上半身をコンプライアンス制御にした場合, 受動的な補償として働くことができるため, Table 1 の Swing II フェーズのように上半身のフィードバックゲインを $T_{step}/2$ の時間から下げると, ロボットは転倒を起こさずステップを踏むことができる。このシミュレーションのグラフとスナップショットを Fig. 3 に示し, 遊脚の着地した時間は, $t = 0.8$ s (グラフの破線) である。 x 軸方向の CoP のグラフから, 全体の CoP は支持脚 (左足) のかかとの境界に到達するが, 衝撃後は BoS の中央に移動してい

Table 1: Gain scheduling for dynamic stepping on a flat floor

Phase	Initial	Swing I	Swing II	Post-impact	Final
Time [s]	0 to 0.5	0.5 to 0.65	0.65 to 0.8	0.8 to 1.3	1.3 to 2.5
K_{oB}	300		4	$4 \xrightarrow{spline} 300$	300
$K_{\omega B}$	50		4	$4 \xrightarrow{spline} 50$	50
K_X	100				

Table 2: Gain scheduling for dynamic stepping on a horizontal obstacle

Phase	Initial	Swing I	Swing II	Post-impact I	Post-impact II	Final
Time [s]	0 to 0.5	0.5 to 0.65	0.65 to 0.761	0.761 to 0.791	0.791 to 1.291	1.291 to 2.5
K_{oB}	300		4		$4 \xrightarrow{spline} 300$	300
$K_{\omega B}$	50		4		$4 \xrightarrow{spline} 50$	50
K_X	100			1	$1 \xrightarrow{spline} 100$	100

ることがわかる。

5.2 障害物上への踏み出し動作

次のシミュレーションでは、高さ 0.02 m の未知の平らな障害物に着地した場合を想定する。前項のシミュレーションで動作している途中で、ロボットは障害物に衝突する。衝撃時の速度は 1.045 m/s と速く、結果として、ロボットは、上半身の運動がコンプライアンスであっても、障害物に衝突したときに不安定になる。不安定になる問題は、角運動量ダンパにより腕部での運動を介して解決している。この目的のために、衝撃後のフェーズは二つのフェーズに分割される。RAA 制御は、Table 2 に示す衝撃後の post impact I のフェーズ間で行われる。RAA の制御を長い間用いると腕の回転が過剰になるため、時間は比較的短くする必要があるので、このフェーズでは、ベースリンクの回転のフィードバックゲインは、低い値に保つ必要がある。さらに、衝撃時の z 軸方向の CoM の誤差による大きな入力为了避免するために、衝撃の直後に DCM のフィードバックゲインを $K_X = 1$ に下げる必要がある。post impact I フェーズの後には、post impact II フェーズがあり、この期間でフィードバックゲインを初期値に戻し、転倒を回避している。グラフとスナップショットを Fig. 4 に示し、遊脚の着地時間は、 $t = 0.761$ s (グラフの破線) である。また System Angular Momentum (SAM) の成分を前項のシミュレーションの結果とともに Fig. 2 に示す。腕部の運動がこれらの成分の最小化に関係していることがわかる。

6. 結言

角運動量ダンパを導入することにより、ロボットが未知の障害物上に踏み出すとき衝突後の転倒を回避できること

が示された。相対角加速度 (RAA) を含む全身制御コントローラが使用した。今後は、段差が床より低い場合や正面衝突などの異なる環境での遊脚の衝突を考える。

参考文献

- [1] D. N. Nenchev. The Momentum Equilibrium Principle: Balance Control With Relative Angular Momentum/Velocity (accepted). In *IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robotics*, 2018.
- [2] R. Hinata and D. N. Nenchev. Balance stabilization with angular momentum damping derived from the Reaction Null-Space (accepted). In *IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robotics*, 2018.
- [3] D. N. Nenchev. Reaction Null Space of a multibody system with applications in robotics. *Mechanical Sciences*, 4:97–112, 2013.
- [4] J. Engelsberger, C. Ott, and A. Albu-Schaffer. Three-dimensional bipedal walking control using divergent component of motion. In *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 2600–2607, Tokyo, Japan, nov 2013.
- [5] M. Hosokawa, D. N. Nenchev, and T. Hamano. The DCM generalized inverse: efficient body-wrench distribution in multi-contact balance control. *Advanced Robotics*, 32(14):1–15, aug 2018.
- [6] D. N. Nenchev. Differential Kinematics. In Ambarish Goswami and Prahlad Vadakkepat, editors, *Humanoid Robotics: A Reference*, pages 1–47. Springer Netherlands, Dordrecht, 2018.
- [7] 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 and Automation*, 15(3):548–557, jun 1999.
- [8] S. Nakaoka. Choreonoid: Extensible virtual robot environment built on an integrated GUI framework. In *IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII)*, pages 79–85, dec 2012.
- [9] Fujitsu. *Miniature humanoid robot HOAP-2 manual (in Japanese)*. Fujitsu Automation Co., Ltd, 1st edition, 2004.

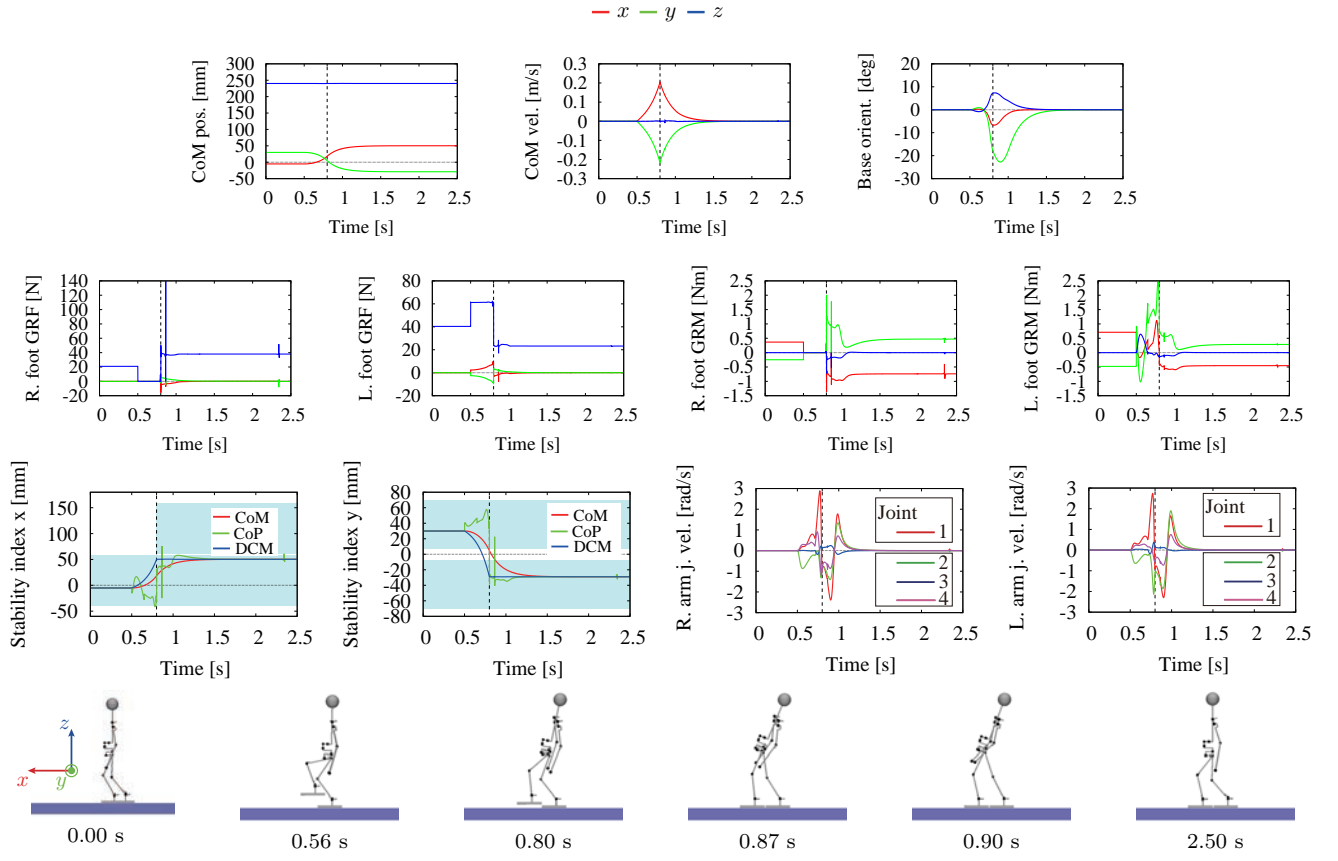


Fig. 3: Dynamic stepping on a flat ground with a compliant upper body.

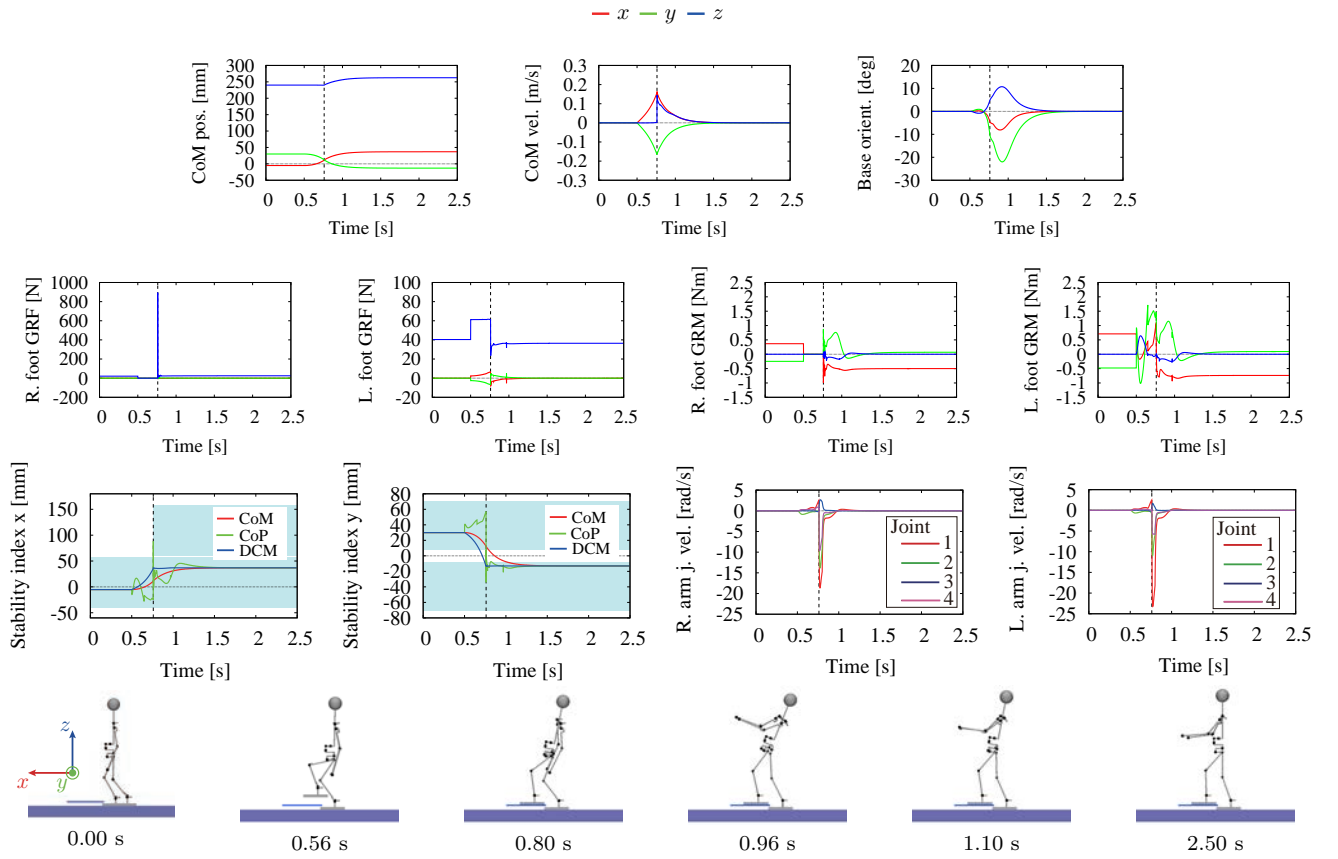


Fig. 4: Dynamic stepping on an unknown obstacle with a compliant upper body and angular momentum damping.