

# 反動零空間法を用いた回転台上での 人型ロボットの全身モデルを用いた外乱に対するバランス制御

中村拓真（東京都市大学） 金宮好和（東京都市大学）

## 1. 緒言

近年、人型ロボットの生活環境への進出が期待されている．そのため、周辺環境や自身の安全性を考慮しバランスを取りながら作業を行うことが求められる．また人間の生活環境には様々な足場があることから不安定な足場でもバランス制御が行えることが求められる．過去に”Acrobot”等の名前で研究されていた [1][2]．これらのロボットは不安定な足場上の人型ロボットの簡易モデルと考えることができる．研究の大部分は、不安定な領域の近傍でのスイングアップ運動制御および安定化制御に焦点を当てられていた．人型ロボットは、前者のスイングアップ動作を必要としない．よって後者の安定化制御を参考にした．同様に簡易モデルを用いた不安定な足場での制御は反動零空間法（Reaction Null-space: RNS）を用いることで安定化させられることが示されている [3]．一方で人型ロボットのバランス制御に関しては、リアクションホイールを有した線形倒立振り子 [4] や Centroidal Moment Pivot [5], Capture Point [6], Virtual Repellent Point [7] などのバランスの安定指標の研究から、重心回りの角運動量とその変化率の制御が重要である．人型ロボットの重心回りの角運動量（System Angular Momentum: SAM）はすべての関節を固定した剛体（Composite Rigid Body : CRB）としての角運動量（CRB Angular Momentum: CRB-AM）と関節の運動による角運動量（Coupling Angular Momentum: CAM）の和で表されることがわかっている [8]．

本稿では不安定な足場で人型ロボットのバランス維持を目的とする．不安定な足場のモデルとしてダンバ設置した回転台（Balance Board: BB）を考える．Acrobotを制御する際、重心とリンク部の干渉慣性を減らすことで安定化させることが示されている [2]．同様に重心とリンク部の干渉慣性を発生させない運動生成法として RNS が提案されている．このことから、RNS を用いることで回転台上でバランス維持を行えると考えられる．以上より人型ロボットの全身モデルを用いて相対角速度 [8] および相対角加速度 [9] に基づく RNS を用いて回転台上でバランス維持が可能であることを示す．相対角加速度を用いた場合においては外乱に対してもバランス維持できることを示す．

## 2. 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、重心、ベースリンクおよび関節空間それぞれの運動方程式で構成された次式となる．

$$\begin{bmatrix} \mathbb{M}_C & \mathbf{H}_{CM} \\ \mathbf{H}_{CM}^T & \mathbf{M}_\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{v}}_C \\ \dot{\boldsymbol{\theta}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathcal{C} \\ \mathbf{c}_\theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathcal{G} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \boldsymbol{\tau} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbb{C}_c \\ \hat{\mathcal{J}}_c^T \end{bmatrix} \bar{\mathcal{F}}^c \quad (1)$$

式 (1) の上段は以下で表される．

$$\begin{bmatrix} M\mathbf{E}_3 & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{I}_C & \mathbf{H}_C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{v}}_C \\ \dot{\boldsymbol{\omega}}_B \\ \dot{\boldsymbol{\theta}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{c}_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -M\mathbf{g} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \mathbb{C}_c \bar{\mathcal{F}}^c \quad (2)$$

式中、 $\mathbf{v}_C \in \mathbb{R}^3$  は重心の速度、 $\boldsymbol{\omega}_B \in \mathbb{R}^3$  はベースリンクの角速度、 $\dot{\boldsymbol{\theta}} \in \mathbb{R}^n$  は関節速度、 $\mathbb{M}_C \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$  は重心回りの系全体の慣性行列、 $M$  はロボットの質量、 $\mathbf{I}_C$  は重心回りの慣性テンソル、 $\mathbf{H}_{CM} \in \mathbb{R}^{6 \times n}$  は CRB とリンク部の干渉慣性行列、 $\mathbf{H}_C \in \mathbb{R}^{3 \times n}$  は CRB とリンク部の回転方向の干渉慣性行列、 $\mathbf{M}_\theta \in \mathbb{R}^{n \times n}$  はリンクによる各関節の慣性行列、 $\mathbf{c}_m = \dot{\mathbf{I}}_C \boldsymbol{\omega}_B + \dot{\mathbf{H}}_C \dot{\boldsymbol{\theta}} \in \mathbb{R}^3$  は非線形項、 $\mathbf{c}_\theta \in \mathbb{R}^n$  はリンク部の非線形項、 $\mathbf{g} \in \mathbb{R}^3$  は重力加速度、 $\boldsymbol{\tau} \in \mathbb{R}^n$  は関節トルク、 $\mathbb{C}_c \in \mathbb{R}^{6 \times c}$  は先端部の力とモーメントの接触方向成分を重心の力およびベースリンクのモーメントへ変換する行列、 $\hat{\mathcal{J}}_c \in \mathbb{R}^{c \times n}$  は拘束方向のヤコビ行列である．ただし、ヤコビ行列は重心を基準としたものを記号 ( $\hat{\cdot}$ ) を用いて区別した． $\bar{\mathcal{F}}^c \in \mathbb{R}^6$  は先端部の拘束方向レンチである．また、 $n$  はロボットの自由度、 $c$  は先端部の拘束方向の数を示す．重心回りの運動量変化率は  $\dot{\mathcal{L}}_C \in \mathbb{R}^6$  は以下となる．

$$\dot{\mathcal{L}}_C = \mathbb{M}_C \mathcal{V}_M + \mathbf{H}_{CM} \dot{\boldsymbol{\theta}} + \mathcal{C} \quad (3)$$

先端部が環境と接触し先端部速度を  $\mathbf{0}$  とした場合、運動学は以下のように考えることができる．

$$\mathbb{C}_c^T \mathcal{V}_M + \hat{\mathcal{J}}_c \dot{\boldsymbol{\theta}} = \mathbf{0} \quad (4)$$

## 3. 相対角速度および相対加角速度に基づく バランス維持動作

### 3.1 相対角速度に基づくバランス維持動作

系全体の運動量  $\mathcal{L}_C \in \mathbb{R}^6$  は以下のように表される．

$$\mathcal{L}_C = \mathbb{M}_C(q) \mathcal{V}_C = \mathbb{M}_C \mathcal{V}_M + \mathbf{H}_{CM} \dot{\boldsymbol{\theta}} \quad (5)$$

$\mathcal{V}_C = [\mathbf{v}_C^T \boldsymbol{\omega}_C^T]^T \in \mathbb{R}^6$  である．式 (5) より以下の関係を得る．

$$\mathbf{H}_{CM} \dot{\boldsymbol{\theta}} = \mathbb{M}_C \mathcal{V}_C - \mathbb{M}_C \mathcal{V}_M \quad (6)$$

左から全体に  $\mathbb{M}_C^{-1}$  をかけることで以下を得る．

$$\mathbb{M}_C^{-1} \mathbf{H}_{CM} \dot{\boldsymbol{\theta}} = \mathcal{V}_C - \mathcal{V}_M \equiv \Delta \mathcal{V} \quad (7)$$

式 (7) より並進、回転成分をそれぞれ抜き出すと以下のように表される．

$$\mathbf{0} = \mathbf{v}_{C_R} - \mathbf{v}_{C_I} \quad (8)$$

$$J_\omega \dot{\theta} = \omega_C - \omega_B \equiv \Delta\omega \quad (9)$$

式中  $J_\omega = I_C^{-1} H_C$ ,  $\Delta\omega \in \mathbb{R}^3$  は相対角速度であり,  $v_{C_R} = v_{C_I} = v_C$  である.

RNS は干渉運動量が 0 となるような運動であるため, 式 (9) を用いる場合,  $J_\omega \dot{\theta} = 0$  となれば良い. 以上より相対角速度に基づく RNS を用いる場合  $\Delta\omega$  は以下とする必要がある.

$$\Delta\omega = 0 \quad (10)$$

### 3.2 相対角加速度に基づくバランス維持動作

式 (1) の上段は加速度の関係として以下のように表せる.

$$M_C^{-1} H_{CM} \ddot{\theta} + M_C^{-1} (C + G) = \dot{v}_C - \dot{v}_M \quad (11)$$

式中  $\dot{v}_C = M_C^{-1} C_c \bar{F}^c$  である. 式 (12) より並進, 回転成分は以下となる.

$$a_g = \dot{v}_{C_R} - \dot{v}_{C_I} \quad (12)$$

$$J_\omega \ddot{\theta} = \Delta\dot{\omega} - I_C^{-1} c_m \quad (13)$$

式中,  $a_g \in \mathbb{R}^3$  は重心加速度,  $\Delta\dot{\omega} \in \mathbb{R}^3$  は相対角加速度である. また, 相対角加速度に基づく RNS を用いる場合, 角速度ダンパが必要であることから相対角加速度は以下で与える [9].

$$\Delta\dot{\omega} = -D_\omega J_\omega \dot{\theta} \quad (14)$$

$D_\omega \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$  はダンパゲインである.

## 4. 回転台上でのバランス制御

回転台上で衝撃力に対してバランス維持できることを示す. Choreonoid [11] を用いて動力学シミュレーションを行う. シミュレーションモデルは人型ロボット HOAP-2 [12] をもとに作成した Fig. 1 (a) に示すスケルトンモデルを使用した. 使用した人型ロボットのモデルおよび初期姿勢を Fig. 1 に示す. わずかに減衰された回転台上に置かれたロボットを考える. 足と回転台の摩擦は無視し滑らないとする. 初期状態では回転台の回転軸と重心の位置に偏差があるため不安定である. 回転台には  $x$  軸,  $y$  軸周りの回転関節を設置し, 2 自由度を有している.

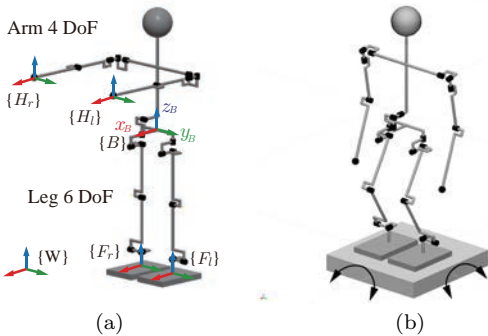


図 1 (a): シミュレーションモデル (b): 初期状態.

### 4.1 速度次元での制御

シミュレーション時間は 10 s, シミュレーション周期は 1 ms とした. シミュレーション開始から 3 s 間で重心位置を回転台の回転軸上に移動させた. 両足を 6 軸拘束とし, 両手先は制御を行わなかった. 関節速度指令値は拘束方向を第一優先, 相対角速度制御を第二優先とし以下で与えた.

$$\dot{\theta}^{ref} = -J_c^+ C_c^T v_M^{ref} + \bar{J}_\omega^+ (\Delta\omega^{ref} - \dot{\omega}) \quad (15)$$

式中  $\dot{\omega} = -J_\omega J_c^+ C_c^T v_M^{ref}$  であり,  $\bar{v}^c = 0$  として省略した. 式 (10) より  $\Delta\omega^{ref} = 0$  とした.  $v_M^{ref}$  は  $(v_M^{des})^T = [(v_C^{des})^T (\omega_B^{des})^T]^T$  および P 制御を用い以下で与えた.

$$v_M^{ref} = \begin{bmatrix} v_C^{ref} \\ \omega_B^{ref} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_C^{des} + K_{r_C} e_{p_C} \\ \omega_B^{des} + K_{O_B} e_{O_B} \end{bmatrix} \quad (16)$$

フィードバックゲインは  $K_{r_C} = 30$ ,  $K_{O_B} = 3$  とした.

シミュレーションのスナップショットを Fig. 2 に, シミュレーション結果を Fig. 3 に示す. Fig. 5 (a), (b) より重心の位置およびベースリンクの姿勢の誤差が収束していることがわかる. Fig. 5 (e) より初期状態では回転台の回転軸と重心の位置に偏差があり不安定であるため, シミュレーション開始直後から回転台が回転していることがわかる. シミュレーション開始から約 5 秒で安定していることがわかる. Fig. 5 (f), (g), (h) より,  $\omega_B$  および  $\omega_C$  は同様の運動となっており,  $\Delta\omega$  がほぼ 0 となっていることがわかる. 以上より相対角速度に基づく RNS を用いることで回転台上でバランスを維持することができた. 相対角速度に基づく RNS は, ロボットの CoM が回転台の回転中心上からずれた際の不安定状態を安定化するために適用される.

また, 実機実験を行う際, ベースリンクの姿勢および角速度はロボットの IMU から得られると仮定すると, 回転台の回転を考慮せずにバランス維持を行うことができる.

### 4.2 衝撃に対するバランス制御

シミュレーション条件は速度次元のものと同様とした. 外乱を 5 s から 50 ms 間,  $x$  軸方向に 10 N,  $y$  軸方向に 10 N 加える. また, ロボットにコンプライアンスを持たせるため逆動力学を解いて制御トルクを与えた. 運動制御を加速度で与える必要があるため 式 (4) を微分したものを第一優先, 式 (14) を第二優先として解くことで関節加速度指令値を以下のように与える.

$$\ddot{\theta}^{ref} = -J_c^+ (C_c^T \dot{v}_M^{ref} + \dot{C}_{cC}^T v_M) + \bar{J}_\omega^+ (\Delta\dot{\omega}^{ref} - \dot{\omega}) + \bar{N} (\ddot{\theta}^u)^{ref} \quad (17)$$

式中  $\bar{N} = N(J_c)N(\bar{J}_\omega^+)$  とした. 式 (14) より  $\Delta\dot{\omega}^{ref} = -D_\omega J_\omega \dot{\theta}$  とした. また  $\dot{v}_M^{ref}$  は  $(\dot{v}_M^{des})^T = [(\dot{v}_C^{des})^T (\dot{\omega}_B^{des})^T]^T$  および PD 制御を用い以下で与えた.

$$\dot{v}_M^{ref} = \begin{bmatrix} \dot{v}_C^{ref} \\ \dot{\omega}_B^{ref} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{v}_C^{des} + K_{v_C} \dot{e}_{p_C} + K_{r_C} e_{p_C} \\ \dot{\omega}_B^{des} + K_{\omega_B} \omega_B^{err} + K_{O_B} e_{O_B} \end{bmatrix} \quad (18)$$

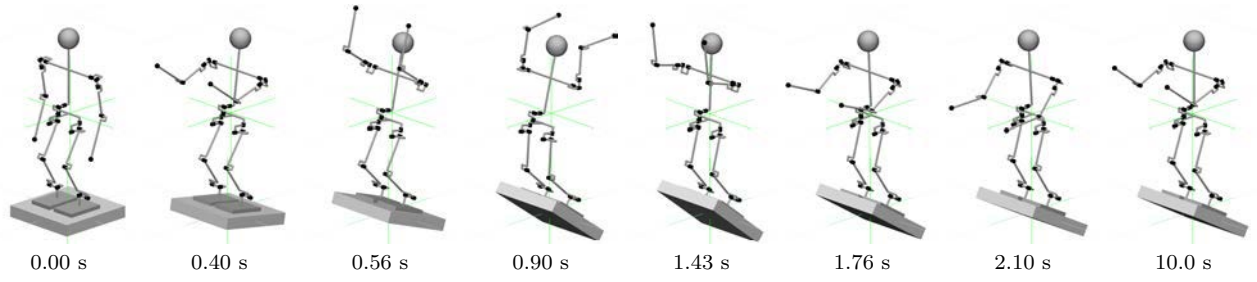


図2 回転台上で速度次元で制御した場合

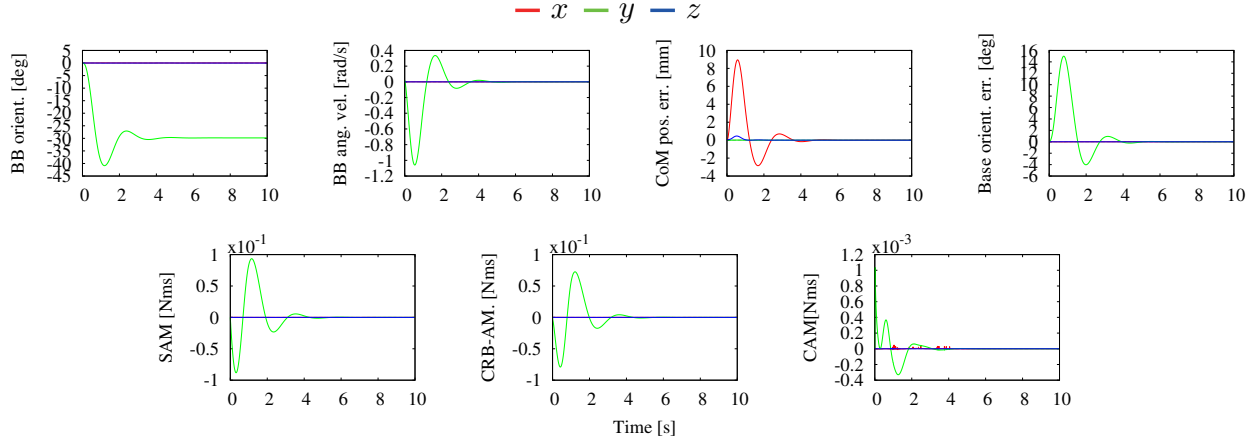


図3 回転台上で速度次元で制御した場合のシミュレーション結果

$N(\mathcal{J}_c)N(\bar{\mathcal{J}}_\omega^+)(\ddot{\theta}^u)^{ref}$  は冗長運動を抑制するための項であり  $(\ddot{\theta}^u)^{ref}$  は式 (19) で与えた。

$$(\ddot{\theta}^u)^{ref} = -K_\theta \dot{\theta} \quad (19)$$

重心にかかる力，ベースリンクにかかるモーメントは DCM 擬似逆行列を用いて環境と接触している先端部へ分配される。

$$(\bar{\mathcal{F}}^c)^{ref} = \mathbb{C}_c^{-1} W_{DCM} (\dot{\mathcal{L}}_C^{ref} + \mathcal{G}_C) \quad (20)$$

空間運動量変化率  $\dot{\mathcal{L}}_C^{ref} \in \mathbb{R}^6$  は以下で与えられる。

$$\dot{\mathcal{L}}_C^{ref} = \begin{bmatrix} M\dot{\mathbf{v}}_C^{ref} \\ \mathbf{I}_C\dot{\boldsymbol{\omega}}_B^{ref} + \mathbf{I}_C\boldsymbol{\omega}_B \end{bmatrix} \quad (21)$$

式 (1) を用いて逆動力学を解くことにより関節トルクを以下のように求める。

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{H}_{CM}^T \mathcal{V}_M^{ref} + \mathbf{M}_\theta \ddot{\boldsymbol{\theta}}^{ref} + \mathbf{c}_\theta + \mathbf{g}_\theta - \mathcal{J}_c^T (\bar{\mathcal{F}}^c)^{ref} \quad (22)$$

シミュレーション結果を Fig. 5 に，スナップショットを Fig. 4 に示す。Fig. 5 (a), (b) より 5 s よりロボットに外乱が加わり回転台の姿勢が大きく変化していることがわかる。Fig. 5 (c), (d) より外乱が加わった直後に大きく重心位置および  $B$  の姿勢に大きな誤差が発生しているが約 7 s までに収束しており，衝撃力に対してもバランスを維持できている。角速度が発生しているが  $\Delta\omega$  は  $\omega_B$  と比べて十分に小さく RNS の制御が行えている。

表1 フィードバックゲイン。

Time	0 to 5	5 to 6.05	6.05 to 15
$K_{r_C}$	100	10	100
$K_{v_C}$	25	5	25
$K_{O_B}$	100	7	100
$K_{\omega_B}$	25	5	25
$\mathbf{D}_\omega$	300		
$K_\theta$	100		

## 5. 結言

本稿では，相対角速度に基づいた RNS を用いることで回転台上での人型ロボットのバランス維持を行った。速度次元および加速度次元の制御それぞれにおいて回転台上でバランス維持できることを示した。また，加速度次元の制御においては，衝撃が加わった際にもバランス維持が行えることを示した。

今後の課題として，より不安定な足場で制御を行うことである。これはマットのような地面を想定しおり，このような地面でバランスを維持できれば，より汎用性のあるコントローラを設計できると考えている。

## 参考文献

- [1] T. Hoshino, M. Matsudaira, K. Furuta, “Stabilization of 2-D Inverted Pendulum Using Vision Sensor”, 34th SICE Annual Conf., pp. 53-54, 1995.
- [2] H. Hashiguchi, S. Arimoto, T. Sakamoto, “Generation of 3-D Motion of Under-Actuated Gymnastics Robots Having two Free Joints”, In IEEE/RSJ Int'l. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp. 2889-2894, 2007.

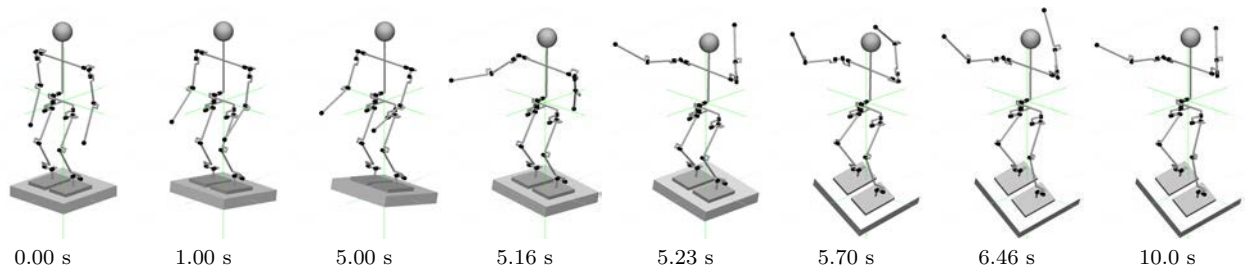


図4 回転台上でロボットに衝撃を与えた際のバランス制御

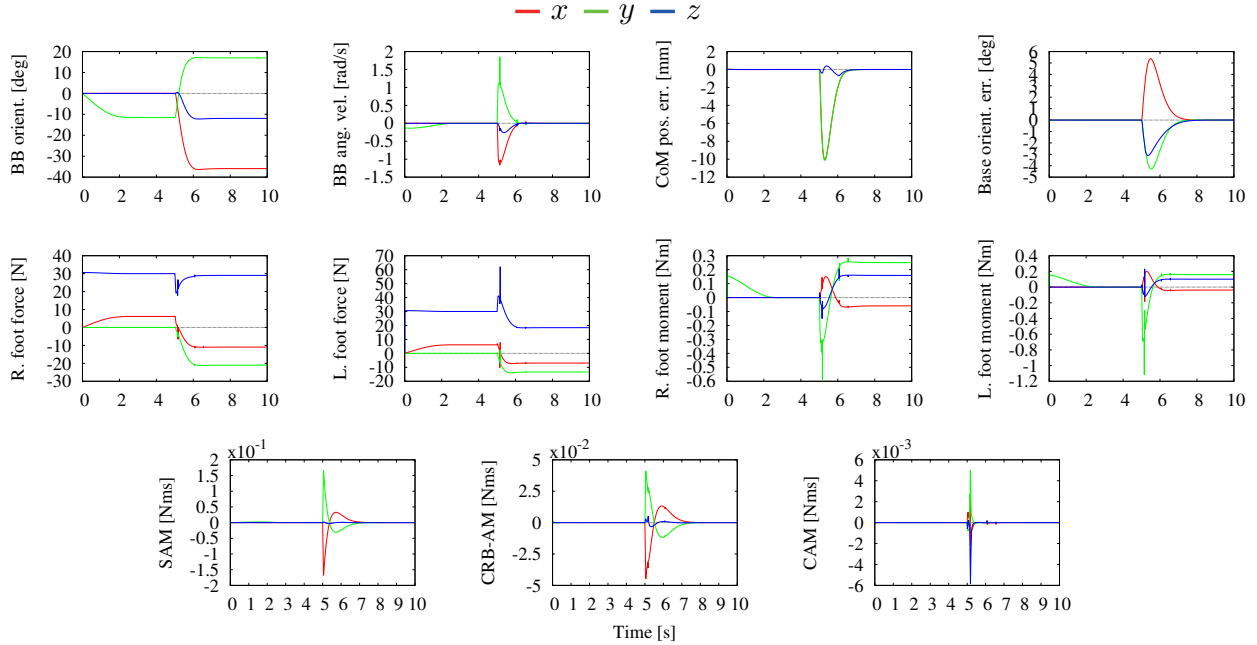


図5 回転台上でロボットに衝撃を与えたシミュレーション結果.

- [3] K. Tamegaya, Y. Kanamiya, M. Nagao et al., “Inertia-Coupling Based Balance Control of a Humanoid Robot on Unstable Ground”, In IEEE-RAS IntI. Conf. on Humanoid Robots, pp. 151-156 2008.
- [4] Jerry E Pratt. “Exploiting inherent robustness and natural dynamics in the control of bipedal walking robots.”, PhD thesis, MIT, 2000.
- [5] M. B. Popovic, A. Goswami, and H. Herr. “Ground reference points in legged locomotion: Definitions, biological trajectories and control implications.”, The IntI. Journal of Robotics Research, pp. 1013-1032, dec 2005.
- [6] J. Pratt, John Carff, S. Drakunov, and A. Goswami. “Capture point: A step toward humanoid push recovery.”, In IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, pp. 200-207, dec 2006.
- [7] J. Englsberger, C. Ott, and A. AlbuSchaffer. “Three-dimensional bipedal walking control using Divergent Component of Motion.”, In IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 2600-2607, nov 2013.
- [8] D. N. Nenchev, “Balance Control With Relative Angular Momentum/Velocity”(to be presented), Annual Conference of the Robotics Society of Japan , 2018.
- [9] 日向遼太郎, 金宮好和 “反動零空間法に基づいた角運動量ダンパによる人型ロボットのバランス維持”(to be presented), 日本ロボット学会学術講演会 , 2018.
- [10] M. Hosokawa, D. N. Nenchev and T. Hamano, “The DCM Generalized Inverse: Efficient Body-Wrench Distribution in Multi-Contact Balance Control”(to be published), Advanced Robotics, 2018.
- [11] Shin’Ichiro 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.
- [12] 富士通: “小型ヒューマノイドロボット「HOAP2」取扱説明書”, 富士通オートメーション株式会社 , 07 版 , 2004.