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

○日向遼太郎 (都市大)　金宮好和 (都市大)

1.　緒言

人型ロボットのバランス制御に関して，Reaction Wheel を有した線形倒立振子モデル [1] を始めとして，Centroidal Moment Pivot [2]，Capture Point [3]，Virtual Repellent Point [4] 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と言える．これらを制御する上で，上半身の運動の役割が重要であることが示唆されている [5]．しかし，ここでは生成された上半身の運動，特に腕の運動の角運動量制御における物理的な意味合いが明確化されていない．

一方で，宇宙ロボットのような浮遊ベースシステムの系全体の角運動量（System Angular Momentum：SAM）は以下二つの成分の和で表せることがわかっている [6]．一つ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）としての角運動量（CRB Angular Momentum：CRB-AM）であり，もう一つはそれに対して関節の運動による干渉運動量（Coupling Angular Momentum：CAM）である．

この SAM，CRB-AM および CAM の平衡関係を人型ロボットのバランス制御に応用し，CAM によって SAM と CRB-AM の差分である相対角運動量（Relative Angular Momentum：RAM）を制御する手法が [7] によって提案されている．この RAM の制御が腕の動作を生成しており，これは物理的根拠に基づいたものとなっている．また，[6] における反動零空間法（Reaction Null-Space：RNS）を RAM の制御によって実現することにより，ロボットの転倒の原因となる支持脚の回転を抑えることができている．

本稿ではこれを加速度次元で考え，外乱に対するバランス維持動作を生成するための制御方法について提案する．その際，角運動量ダンパを用いることによって，このバランス制御のロバスト性を高めることについて確認する．

2.　人型ロボットの運動方程式と運動学

関節自由度 n の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．

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

さらに，この式の上段は以下で表せる．

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

$\mathcal{V}_M \in \Re^6$ は重心速度 $\boldsymbol{v}_C \in \Re^3$ とベースリンクの角速度 $\boldsymbol{\omega}_B \in \Re^3$ を合わせた空間速度，$\boldsymbol{\theta} \in \Re^n$ は関節角度，$\mathbb{M}_C \in \Re^{6\times 6}$ は重心回りの系全体の慣性行列，$\boldsymbol{H}_{CM} \in \Re^{6\times n}$ は CRB とリンクの干渉慣性行列，$\boldsymbol{M}_\theta \in \Re^{n\times n}$ はリンクによる各関節の慣性行列であり，M はロボットの質量，$\boldsymbol{E}$ は単位行列，$\boldsymbol{I}_C \in \Re^{3\times 3}$ は CRB の重心回りの慣性テンソル，$\boldsymbol{H}_C \in \Re^{3\times n}$ は回転方向に対する干渉慣性行列である．$\boldsymbol{c}_m = \dot{\boldsymbol{I}}_C\boldsymbol{\omega}_B + \dot{\boldsymbol{H}}_C\dot{\boldsymbol{\theta}} \in \Re^3$ は非線形項であり，$\mathcal{C} = [\boldsymbol{0}\ \boldsymbol{c}_m^T]^T \in \Re^6$，$\boldsymbol{c}_\theta \in \Re^n$ はリンクによる各関節の非線形項である．$\boldsymbol{g} \in \Re^3$ は重力項であり，$\mathcal{G} = [\boldsymbol{g}^T\ \boldsymbol{0}]^T \in \Re^6$ である．$\boldsymbol{\tau} \in \Re^n$ は関節トルク，$\mathbb{C}_c \in \Re^{6\times c}$ 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，$\mathcal{J}_c \in \Re^{c\times n}$ 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，$\overline{\mathcal{F}}^c \in \Re^c$ は先端部の接触方向成分にかかる力とモーメントを表す．c は先端部の接触方向の数を示す．

重心回りの空間運動量変化率 $\dot{\mathcal{L}}_C \in \Re^6$ は以下となる．

$$\dot{\mathcal{L}}_C = \mathcal{A}_C\ddot{\boldsymbol{q}}_M + \dot{\mathcal{A}}_C\dot{\boldsymbol{q}}_M \quad (3)$$

式中，$\dot{\boldsymbol{q}}_M = [\mathcal{V}_M^T\ \dot{\boldsymbol{\theta}}^T]^T \in \Re^{6+n}$，$\mathcal{A}_C = [\mathbb{M}_C\ \boldsymbol{H}_{CM}] \in \Re^{6\times(6+n)}$ である．$\mathcal{A}_C$ は [5]，[8] にある重心運動量行列を座標変換したものとなっている．

また，先端部速度の接触方向成分が $\boldsymbol{0}$ のとき，以下の順運動学関係が成り立つ．

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

3.　相対角加速度によるバランス維持動作

3.1　相対角加速度の定義

$\mathbb{M}_C$ が正定行列であることから，式 (1) の上段は加速度の関係として以下のように表せる．

$$\mathbb{M}_C^{-1}\boldsymbol{H}_{CM}\ddot{\boldsymbol{\theta}} + \mathbb{M}_C^{-1}\big(\mathcal{C}+\mathcal{G}\big) = \dot{\mathcal{V}}_C - \dot{\mathcal{V}}_M \quad (5)$$

式中，$\dot{\mathcal{V}}_C = \mathbb{M}_C^{-1}\mathbb{C}_c\overline{\mathcal{F}}^c$ である．式 (5) の並進・回転の各成分を以下に示す．

$$\boldsymbol{a}_g = \dot{\boldsymbol{v}}_{C_R} - \dot{\boldsymbol{v}}_{C_I} \quad (6)$$

$$\boldsymbol{J}_\omega\ddot{\boldsymbol{\theta}} = \Delta\dot{\boldsymbol{\omega}} - \boldsymbol{I}_C^{-1}\boldsymbol{c}_m \quad (7)$$

式中，$\boldsymbol{a}_g \in \Re^3$ は重心の加速度を表す．また $\Delta\dot{\boldsymbol{\omega}}$ は相対角加速度（Relative Angular Acceleration：RAA）を表し，以下で定義される．

$$\Delta\dot{\boldsymbol{\omega}} = \dot{\boldsymbol{\omega}}_C - \dot{\boldsymbol{\omega}}_B \quad (8)$$

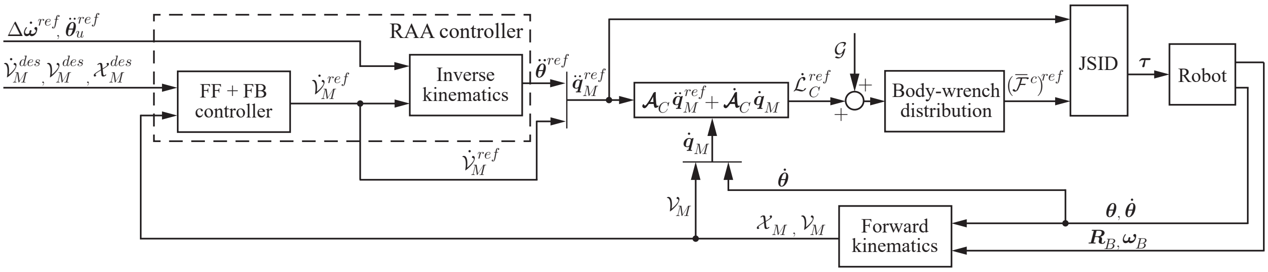
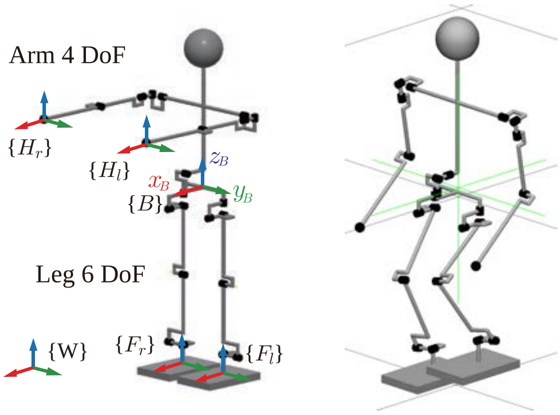


図 1 RAA をを用いた制御のブロック線図．FF および FB はそれぞれ Feedforward と Feedback を意味し，JSID は逆動力学（Joint-Space Inverse Dynamics）を意味する．ベースリンクの回転行列 $\boldsymbol{R}_B$ と角速度 $\boldsymbol{\omega}_B$ は慣性計測装置から得る．



(a) (b)

図 2 (a) 制御対象モデル，(b) 初期状態.

式 (6) では，先端部の力によって受動的（Reactive）に発生する重心加速度 $\dot{\boldsymbol{v}}_{C_R}$ と自らの動作による慣性力によって発生する（Inertial）重心加速度 $\dot{\boldsymbol{v}}_{C_I}$ の差が，重力方向の加速度 $\boldsymbol{a}_g$ となることを示している．$\dot{\boldsymbol{v}}_{C_R}$ が $\boldsymbol{a}_g$ および $\dot{\boldsymbol{v}}_{C_I}$ を補償できることから，Spatial Dynamics を考慮した関節の運動の最適化は，式 (7) から RAA $\Delta\dot{\boldsymbol{\omega}}$ のみを考えれば良い．

3.2 CRB の軌道追従

環境との接触が安定していると仮定すると，目標の CRB の軌道 $\dot{\mathcal{V}}_M^{des} = \left[(\dot{\boldsymbol{v}}_{C_I}^{des})^T \, (\dot{\boldsymbol{\omega}}_B^{des})^T\right]^T$ は，式 (4) の微分を用いて以下の関節角加速度によって実現される．

$$\ddot{\boldsymbol{\theta}} = -\mathcal{J}_c^{+}(\mathbb{C}_c^T \dot{\mathcal{V}}_M^{ref} + \boldsymbol{h}_c) + \boldsymbol{N}(\mathcal{J}_c)\ddot{\boldsymbol{\theta}}_u \qquad (9)$$

$(\circ)^+$ は擬似逆行列，$\boldsymbol{N}(\circ)$ は零空間への射影行列，$\ddot{\boldsymbol{\theta}}_u$ は任意の関節角加速度ベクトルを表し，$\boldsymbol{h}_c = \dot{\mathcal{J}}_c\dot{\boldsymbol{\theta}} + \dot{\mathbb{C}}_c^T\mathcal{V}_M$ である．$\dot{\mathcal{V}}_M^{ref}$ は $\dot{\mathcal{V}}_M^{des}$ および重心位置とベースリンクの姿勢を合わせた空間座標 $\mathcal{X}_M \in \Re^6$ と $\mathcal{V}_M$ との誤差を考慮した PD 制御を用いて，以下で与えられる．

$$\dot{\mathcal{V}}_M^{ref} = \begin{bmatrix} \dot{\boldsymbol{v}}_C^{ref} \\ \dot{\boldsymbol{\omega}}_B^{ref} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\boldsymbol{v}}_C^{des} + K_{v_C}\dot{\boldsymbol{e}}_{p_C} + K_{p_C}\boldsymbol{e}_{p_C} \\ \dot{\boldsymbol{\omega}}_B^{des} + K_{\omega_B}\boldsymbol{e}_{\omega_B} + K_{o_B}\boldsymbol{e}_{o_B} \end{bmatrix} \qquad (10)$$

$\boldsymbol{e}_{p_C}, \boldsymbol{e}_{\omega_B}, \boldsymbol{e}_{o_B} \in \Re^3$ はそれぞれ重心位置，ベースリンクの角速度および姿勢の誤差を表し，$K_{(\circ)}$ はフィードバックゲインを表す．$\boldsymbol{e}_{o_B}$ はベースリンクの姿勢を表す回転行列 $\boldsymbol{R}_B \in \Re^{3\times 3}$ から計算する．人型ロボットの場合，重心加速度指令値に関しては，Divergent Component of Motion（DCM）を用いることが望ましいため [4]，DCM の微分から次のように求めることができる．

$$\dot{\boldsymbol{v}}_C^{ref} = \omega_X\left(\dot{\boldsymbol{r}}_X^{des} + k_X(\boldsymbol{r}_X^{des} - \boldsymbol{r}_X) - \boldsymbol{v}_C\right) \qquad (11)$$

$\boldsymbol{r}_X \in \Re^3$ は DCM の位置，ω_X は DCM ダイナミクスにおける固有振動数，k_X はフィードバックゲインを表す．

3.3 相対角加速度を考慮した運動

式 (9) では先端部の接触状態が安定していることが前提とされていたが，Center of Pressure（CoP）の移動により足が回転する場合などでは，この前提が成り立たない．これに対して [7] と同様に，RAA の制御入力を加えることで解決を試みる．式 (9) を式 (7) へ代入し，$\ddot{\boldsymbol{\theta}}_u$ について解いて再度式 (9) へ代入することで，以下の関節加速度解を得る．

$$\begin{aligned}\ddot{\boldsymbol{\theta}}^{ref} = &-\left(\boldsymbol{E} - \bar{\boldsymbol{J}}_\omega^+\boldsymbol{J}_\omega\right)\mathcal{J}_c^+\mathbb{C}_c^T\dot{\mathcal{V}}_M^{ref} + \bar{\boldsymbol{J}}_\omega^+\Delta\dot{\boldsymbol{\omega}}^{ref} \\ &+ \boldsymbol{N}(\mathcal{J}_c)\boldsymbol{N}(\bar{\boldsymbol{J}}_\omega)\ddot{\boldsymbol{\theta}}_u^{ref} + \ddot{\boldsymbol{\theta}}_{nl}\end{aligned} \qquad (12)$$

式中，$\bar{\boldsymbol{J}}_\omega = \boldsymbol{J}_\omega\boldsymbol{N}(\mathcal{J}_c)$ である．また $\ddot{\boldsymbol{\theta}}_{nl}$ は非線形項に対する関節加速度であり以下で表される．

$$\ddot{\boldsymbol{\theta}}_{nl} = -\left(\boldsymbol{E} - \bar{\boldsymbol{J}}_\omega^+\boldsymbol{J}_\omega\right)\mathcal{J}_c^+\boldsymbol{h}_c - \bar{\boldsymbol{J}}_\omega^+\boldsymbol{I}_C^{-1}\boldsymbol{c}_m \qquad (13)$$

式 (12) における制御入力 $\Delta\dot{\boldsymbol{\omega}}^{ref}$ は式 (8) より $\dot{\boldsymbol{\omega}}_C^{ref}$ と $\dot{\boldsymbol{\omega}}_B^{ref}$ によって決定し，後者は式 (10) の下段となる．前者は系全体の角速度 $\boldsymbol{\omega}_C$ の変化率で，これは系全体の角運動量変化率と同次元のものである．$\dot{\boldsymbol{\omega}}_C^{ref}$ の制御の例として，以下の二つの角運動量ダンパを考える．

$$\dot{\boldsymbol{\omega}}_C^{ref} = -\boldsymbol{D}_\omega\boldsymbol{\omega}_C = -\boldsymbol{D}_\omega(\boldsymbol{I}_C\boldsymbol{\omega}_B + \boldsymbol{J}_\omega\dot{\boldsymbol{\theta}}) \qquad (14)$$

$$\Delta\dot{\boldsymbol{\omega}}^{ref} = -\boldsymbol{D}_\omega\Delta\boldsymbol{\omega} = -\boldsymbol{D}_\omega\boldsymbol{J}_\omega\dot{\boldsymbol{\theta}} \qquad (15)$$

式中，$\boldsymbol{D}_\omega \in \Re^3$ はダンパゲインである．式 (14) は角運動量保存則を考慮して，$\boldsymbol{\omega}_C \to \boldsymbol{0}$，すなわち s AM が零になるよう制御する．式 (15) では反動零空間法（Reaction Null-Space：RNS）を考慮して，$\Delta\boldsymbol{\omega} \to \boldsymbol{0}$，すなわち CAM が零となり，SAM が CRB-AM となるよう制御する．

表 1　ベースリンクの回転運動に関するゲインスケジューリング.

Phase	Pre-impact		Impact	Post-impact 1	Post-impact 2	
Time [s]	0 ∼ 0.4	0.4 ∼ 0.5	0.5 ∼ 0.6	0.6 ∼ 1.1	1.1 ∼ 3.0	3.0 ∼
K_{o_B} (P-gain)	300	300 → 0.01	0.01		0.01 → 300	300
K_{ω_B} (D-gain)	50	50 → 0.001	0.001	0.001 → 5	5 → 50	50

式 (12) では，式 (4) によるタスクを最優先，式 (7) によるタスクを第二優先としている．そのため，RAA の制御は，式 (4) における冗長自由度の運動によって実現される．先端部の接触方向成分に速度が発生し式 (4) の前提が崩れた場合，式 (15) を用いると，その接触方向速度による CAM を抑えるための冗長自由度の運動が計算される．これより，式 (15) を適用した式 (12) は先端部の接触状態を安定化させることが可能であると考えられる [7].

任意の関節加速度ベクトル $\ddot{\boldsymbol{\theta}}_u^{ref}$ は，フィードバックゲイン K_θ を用いて $\ddot{\boldsymbol{\theta}}_u^{ref} = -K_\theta \dot{\boldsymbol{\theta}}$ とすることで関節速度ダンパとして与える．この $\Delta\dot{\boldsymbol{\omega}}^{ref}$ および $\ddot{\boldsymbol{\theta}}_u^{ref}$ の二つの制御入力によって，[7] で示される速度次元の制御との積分性を補償し，等価な動作を得る．

4.　関節トルク制御

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 [9] を用いて環境と接触している先端部のレンチへ分配する．式 (2) よりこの分配は以下で表される．

$$\left(\overline{\mathcal{F}}^c\right)^{ref} = \mathbb{C}_c^{-W_{DCM}}(\dot{\mathcal{L}}_C^{ref} + \mathcal{G}) + \boldsymbol{N}(\mathbb{C}_c)\overline{\mathcal{F}}_u^c \qquad (16)$$

式中，$\mathbb{C}_c^{-W_{DCM}}$ は DCM 擬似逆行列，$\overline{\mathcal{F}}_u^c$ は任意の接触レンチベクトルを表す.

式 (1) の下段より関節トルクは以下で算出される．

$$\boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{H}_{CM}^T \dot{\mathcal{V}}_M^{ref} + \boldsymbol{M}_\theta \ddot{\boldsymbol{\theta}}^{ref} + \boldsymbol{c}_\theta - \boldsymbol{\mathcal{J}}_c^T\left(\overline{\mathcal{F}}^c\right)^{ref} \qquad (17)$$

このトルク制御の流れを図 1 に示す.

5.　シミュレーション

前章で提案したトルク制御を用いて，人型ロボットに外力を加えた際のバランス維持動作の検証を行った．シミュレーションソフトには Choreonoid [10] を使用し，制御対象のモデルは人型ロボット HOAP-2 [11] をスケルトンモデルとして表した図 2 (a) に示すものを用いた．初期状態は図 2 (b) とした．先端部は右足のみが水平な床に 6 軸拘束している（$c = 6$），すなわち片脚立ちの状態で，ベースリンクから 145 mm の場所へ，x 軸方向へ 25 N，y 軸方向へ 5 N の力を 100 ms の間かけた．式 (12) では，重心位置およびベースリンクの姿勢の目標を初期状態とし，フィードバックゲインを $K_{v_C} = 50, K_{p_C} = 300, \boldsymbol{D}_\omega = 100$ とした．またベースリンクの回転運動に関するフィードバックゲインは表 1 に示す．これは衝撃（外力）に対し，ベースリンクの回転運動によるコンプライアンス制御を実現するために設定した．表 1 における右矢印は，値が五次補間によって滑らかに変化していることを示す．

この結果を図 3 に示し，動作の流れを図 4 に示す．外力による支持脚の CoP の移動によって，その先端部である右足に角速度が生じ CAM が発生しているが，式 (4) における冗長自由度となっている他の四肢（左脚および両腕）の運動によってこれを抑制し，SAM が CRB-AM とおおよそ等しい挙動を示している．このことから冗長自由度による角運動量ダンパを用いた RNS の実現によって，先端部の接触状態を安定化させ，バランスを維持することが可能であるといえる．

6.　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提案した．これによって外乱が加わることによって不安定になった先端部の接触状態を，ベースリンクの回転運動によるコンプライアンス制御と，冗長自由度の運動によって安定化させることが，シミュレーションによって実現した．

提案手法における問題点として，継続的な力が加わってしまうと，その間 $\Delta\dot{\boldsymbol{\omega}}^{ref}$ によって四肢が動き続けてしまうことが挙げられる．そのためこの制御では瞬間的な力に対してのみ有効である．この瞬間的な力に対するバランス維持動作の応用例として，回転台上でのバランス維持動作が挙げられる [12].

また足の関節の運動に比べて，腕の関節の運動が大きくなりやすいことが挙げられる．これは腕のリンクの慣性モーメントが小さいことから，腕の運動によって作り出せる CAM は小さいため，$\Delta\dot{\boldsymbol{\omega}}^{ref}$ から算出される腕の運動は，脚の運動に比べて大きくなってしまう．これの解決策として，各リンクが出せる CAM のベクトルと $\Delta\dot{\boldsymbol{\omega}}^{ref}$ の内積を指標として，CAM を作りやすいリンクをより大きく運動させるような「運動の分配」を考慮することが挙げられる．今後の課題として，この運動の分配を重み付き擬似逆行列を使って実現することを考えており，これを用いて，より自然なバランス維持動作の実現を目標とする．

参　考　文　献

[1] J. E. Pratt. *Exploiting inherent robustness and natural dynamics in the control of bipedal walking robots.* PhD thesis, MIT, 2000.

[2] M. B. Popovic, A. Goswami, and H. Herr. Ground reference points in legged locomotion: Definitions, biological trajectories and control implications. *The International Journal of Robotics Research*, 24(12):1013–1032, dec 2005.

[3] J. Pratt, J. Carff, S. Drakunov, and A. Goswami. Capture point: A step toward humanoid push recovery. In *IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots*, pages 200–207, Genoa, Italy, dec 2006.

[4] J. Englsberger, 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, nov 2013.

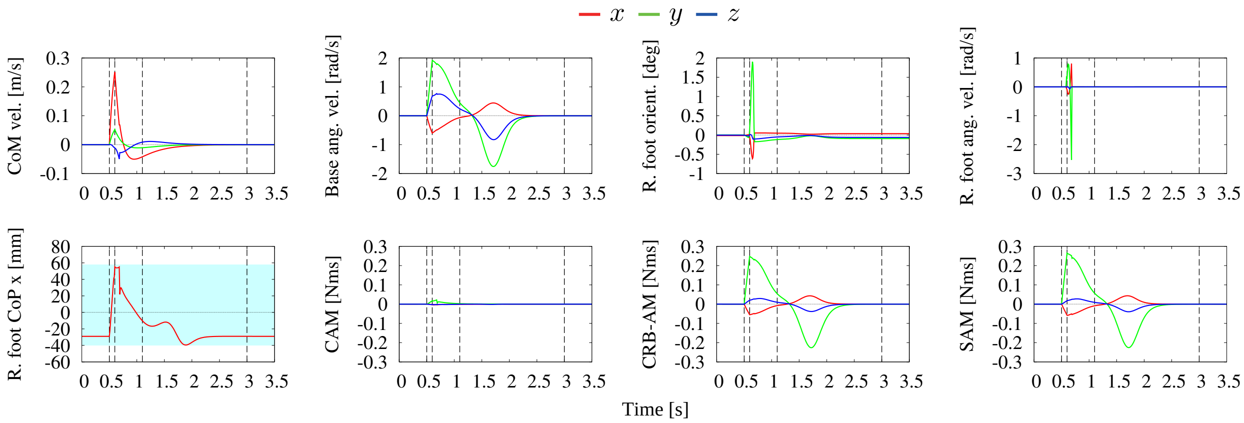


図 3　シミュレーション結果．図中の水色の領域は支持領域を示す．

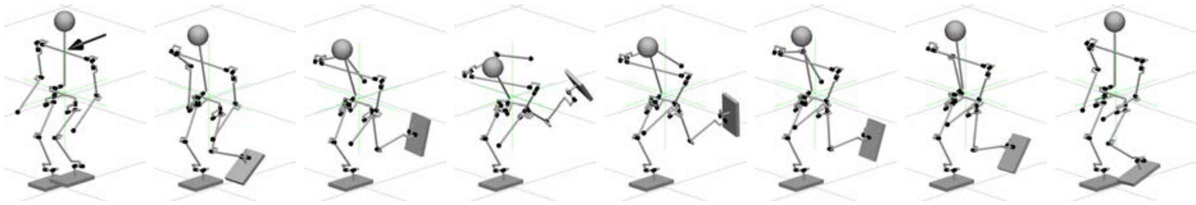


図 4 片脚支持状態で外乱を受けた際の相対角加速度制御を用いたバランス維持動作の流れ．黒の矢印は加える外乱を模式的に表している．

[5] D. E. Orin, A. Goswami, and S. H. Lee. Centroidal dynamics of a humanoid robot. *Autonomous Robots*, 35(2-3):161–176, 2013.

[6] D. N. Nenchev. Reaction Null Space of a multibody system with applications in robotics. *Mechanical Sciences*, 4:97–112, 2013.

[7] Y. Kanamiya. Balance control with relative angular momentum/velocity (to be published). *Annual Conference fo RSJ*, 2018.

[8] D. E. Orin and Ambarish Goswami. Centroidal momentum matrix of a humanoid robot: Structure and properties. In *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS*, pages 653–659, Nice, France, 2008.

[9] 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.

[10] 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.

[11] 富士通: “小型ヒューマノイドロボット「HOAP-2」取扱説明書”, 富士通オートメーション株式会社, 07 版, 2004.

[12] 中村拓真，金宮好和: “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” (to be published), 日本ロボット学会学術講演会, 2018.