

人型ロボットにおける DCM 擬似逆行列に基づく 未知の外乱に対するバランス制御

細川 雅弘, 濱野 峻秀, 佐藤 大祐, 金宮 好和 (東京都市大学)

Reactive Balance Control Based on DCM-GI for Humanoid Robot

Masahiro Hosokawa, Takahide Hamano, Daisuke Sato, and Yoshikazu Kanamiya (TCU)

Abstract : A control method based on the Divergent Component of Motion (DCM) is used as a balance maintenance method of humanoid robots. However, DCM is a component where the position and velocity of the Center of Mass coupling, so admittance control that is generally used for unknown disturbance cannot be applied. Also, it is necessary to appropriately distribute wrenches of both feet for improving balance maintenance. In this paper, by composing these two problems, realize reactive balance control based on DCM.

1. 緒言

本論文では, 人型ロボットに自律したバランス維持を実現させることを目的とし, 動的なバランス制御が可能となる DCM に基づく制御則を未知の外乱に対して適応させる.

二足歩行ロボットの先行研究において, バランス制御を実現するために両足への力の分配は重要な課題である [1]. 例えば人間の歩行時において, 両脚支持と片脚支持を遷移させるためにレンチの分配が重要となる. したがって, 人型ロボットにおいてもレンチの分配は必要であるが, この分配は最適化問題によりされることが一般的である. 最適化問題においては, 各足における摩擦の制約と Center of Pressure (CoP) の制約によりレンチの分配をすることが多い. 摩擦円錐の制約では接触レンチが摩擦円錐内に収まるように, CoP の制約では CoP が BoS 内に収まるように不等式制約を解くことで, それぞれ滑りと足部の回転が抑制できる. この手法は周期ごとに目的関数を最適化するために, 制約付き凸二次計画問題を用いる [2]. また摩擦円錐を解く際には, 計算コストを減らすために摩擦円錐を多角錐に近似することが一般的である [3].

以上における計算コストを削減するためには繰り返し計算をなくす必要があり, 逆問題を解く手法により実現できる. 文献 [4] では, 擬似逆行列により逆問題を解いている. しかし, 擬似逆行列の解は最小ノルムであるため, ロボットの姿勢に影響を受けず両足に等しく分配してしまう. この分配は, 重心投影点が両足間の中心に存在する直立姿勢のとき以外は静力学と矛盾しており, これにより足を上げる前に転倒してしまう. これらを解決するために静力学を用いて分配を決定する手法が提案されている [5]. しかし各足裏の領域と ZMP の位置関係より分配比を決定するため, 足裏内に ZMP が入ったときに完全に分配される手法であり, 境界線で片脚支持へと切り替わるため, 境界線上では ZMP の保障ができておらず不連続となる可能性がある.

文献 [6] ではこれに対して解決しており, さらに摩擦円錐の制約も考慮に入れた分配法を用いている. しかし, 目標の ZMP を与える必要があるという課題が残っており, これにより外乱など未知の動作に対してレンチの分配をすることができない. 我々の提案手法として現在の Divergent Component of Motion (DCM) を目標値とすることにより, 未知の外乱に対してもレンチの分配が可能となる [7]. 文献 [8] では DCM の床面投影点である Capture Point で目標の ZMP として最良であると述べており, 本手法では力制御であるため各足のレンチまで保証できている.

また, 本来 DCM は三次元空間における動的な歩行動作のために用いられてきた [10][11]. これらは, 最適化により外乱を考慮しており, 逆問題を解く手法では外乱を考慮したものがない. 一般的に外乱に対してバランス維持をする際には, ロボットの負荷を減らすためにアドミタンス制御を用いる. 本来であれば重心速度の制御により実現できるが, DCM は重心の位置と速度を含めた成分であるため速度のみにする必要がある.

以上より本稿では, 未知の外乱に対するバランス維持制御において, DCM を用いることでレンチの分配とバランス維持を逆問題として解くこと可能とし, また分配の際のパラメータである設定した両脚支持領域についてシミュレーションより検証する.

2. 人型ロボットのバランス制御

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, ベース部 (B 部) と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.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_B & \mathbf{H}_{B\theta} \\ \mathbf{H}_{B\theta}^T & \mathbf{M}_\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{v}}_B \\ \ddot{\boldsymbol{\theta}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C}_B \\ \mathbf{c}_\theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{g}_B \\ \mathbf{g}_\theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_{ext} \\ \boldsymbol{\tau} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{p}_c \\ \mathbf{J}_c^T \end{bmatrix} \mathcal{F} \quad (1)$$

$\mathbb{M}_B \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$ は B 部回りの系全体の慣性行列, $\mathbb{M}_\theta \in \mathbb{R}^{n \times n}$ はリンクによる各関節の慣性行列, $\mathbb{H}_{B\theta} \in \mathbb{R}^{6 \times n}$ は B 部とリンク部の干渉慣性行列, $\mathbb{C}_B \in \mathbb{R}^6$ は B 部にかかる系全体の非線形項, $\mathbb{c}_\theta \in \mathbb{R}^n$ はリンクによる各関節の非線形項, $\mathbb{G}_B \in \mathbb{R}^6$ は B 部にかかる系全体の重力項, $\mathbb{g}_\theta \in \mathbb{R}^n$ はリンクによる各関節の重力項, $\mathbb{V}_B \in \mathbb{R}^6$ は B 部の空間速度, $\mathbb{F}_{ext} \in \mathbb{R}^6$ は外乱によって発生した B 部のレンチ, $\theta \in \mathbb{R}^n$ は関節角度, $\tau \in \mathbb{R}^n$ は関節トルク, $\mathbb{P}_c \in \mathbb{R}^{6 \times c}$ は先端部の力とモーメントの接触方向成分を B 部のレンチへと変換する行列, $\mathbb{J}_c \in \mathbb{R}^{c \times n}$ は B 部から各先端部までの接触方向成分のヤコビ行列, $\mathbb{F} \in \mathbb{R}^c$ は先端部の接触方向成分に加わる力とモーメントを示す. また, n は関節数, c は先端部の接触方向の数を示す.

2.2 バランス制御と先端部制御を満たす関節トルク

(1) を用いて逆動力学より関節トルクは以下となる.

$$\tau = \tau_m^{ref} + \mathbb{c}_\theta + \mathbb{g}_\theta - \mathbb{J}_c^T \mathbb{F}^{ref} \quad (2)$$

(2) の右辺において, 第一項 τ_m は先端部における非接触方向の運動制御を担い, 片足支持状態において遊脚の先端部の制御をする.

2.3 摩擦モデル

摩擦円錐およびねじれ摩擦円錐は以下のように示せる.

$$\sqrt{f_{k_x}^2 + f_{k_y}^2} \leq \mu_f f_{k_z}, \quad f_{k_z} \geq 0 \quad (3)$$

$$|n_{k_z}| \leq \mu_n f_{k_z} \quad (4)$$

$k \in \{R, L\}$ は右足または左足, μ_f , μ_n はそれぞれクーロン摩擦係数およびねじれ摩擦係数, $f_{(\circ)}$, $n_{(\circ)}$ は接触力および接触モーメント, $\mathbb{F}_k = [f_k^T \ n_k^T]^T$ は接触レンチを示す.

3. DCM と運動量変化率に基づくバランス維持制御

(1) における上段より Spatial dynamics に基づく制御式は以下となる.

$$\dot{\mathcal{L}}_B + \mathbb{C}_B + \mathbb{G}_B - \mathbb{F}_{ext} = \mathbb{P}_c \mathbb{F} \quad (5)$$

$\dot{\mathcal{L}}_B = [\dot{p}^T \ \dot{l}_B^T]^T$ は空間運動量変化率を示す. バランス維持制御において (5) は重要な役割を示す [12].

3.1 運動量変化率指令値

ロボットの重心の力は, 分解すると以下のように表すことができる.

$$f_C = f_I + f_G = \dot{p} + mge_z \quad (6)$$

$f_C \in \mathbb{R}^3$ は重心にかかる力を示し, 右辺の第一項 $f_I \in \mathbb{R}^3$ は重心の慣性による成分, 第二項 $f_G \in \mathbb{R}^3$ は重心の重力による成分に分解したものであり, それぞれ運動量変化率 $\dot{p} \in \mathbb{R}^3$ と重心にかかる重力項である. また, m はロボット全体の質量, g は重力加速度, $e_z \in \mathbb{R}^3$ は重力の単位方向ベクトルである. 先行研究より, (6) 中の f_C が求まる [10]. したがって, 運動量変化率は最終的に以下となる.

$$\dot{p} = f_I = f_C - f_G = m\omega^2(r_C - r_{vrp}) \quad (7)$$

$$r_{vrp} = r_X - \frac{1}{\omega} \dot{r}_X \quad (8)$$

$$r_X = r_C + \frac{1}{\omega} \dot{r}_C \quad (9)$$

$r_{vrp} \in \mathbb{R}^3$ は Virtual Repellent Point (VRP), $r_X \in \mathbb{R}^3$ は DCM を示す. また, $\omega = \sqrt{g/\bar{z}_{vrp}}$ を示し, \bar{z}_{vrp} は重心の高さの平均値であり, ω が一定となるため DCM の微分方程式に影響しないことが考慮されている. VRP の指令値は誤差動力学より以下となる.

$$r_{vrp}^{ref} = r_X - \frac{1}{\omega} \dot{r}_X^{ref} \quad (10)$$

$$\dot{r}_X^{ref} = \dot{r}_X^{des} - K_X(r_X - r_X^{des}) \quad (11)$$

$K_X \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ は DCM のフィードバックゲインを示す. (7)(10)(11) より, 運動量変化率の指令値は以下となる.

$$\dot{p}^{ref} = m\omega^2(r_C - r_{vrp}^{ref}) \quad (12)$$

3.2 角運動量変化率指令値

空間運動量変化率において運動量と角運動量は干渉する [12]. しかし, 立位状態や歩行動作においてこの干渉は十分に小さいと仮定することができる [13][14]. 角運動量変化率の指令値は以下とし, ダンパ制御のみとする.

$$\dot{l}_B^{ref} = -D_\omega \omega_B \quad (13)$$

$l_B \in \mathbb{R}^3$ は B 部の角運動量, ω_B は B 部の角速度, D_ω はダンパゲインを示す.

4. 各足部の接触レンチの算出

本章では左右の足へのレンチの分配について, 動的安定性を用いた繰り返し計算を必要としない手法を新たに提案

する．前章で求めた空間運動量変化率から (1) の上段より足部の接触レンチとの関係は以下となる．

$$\mathcal{P}_c \mathcal{F} = \mathcal{G}_B + \dot{\mathcal{L}}_B^{ref} - \mathcal{F}_{ext} \quad (14)$$

次節から重み行列を用いて分配条件を操作する逆問題へのアプローチについて記す．

4.1 DCM 擬似逆行列によるレンチの分配

(14) より，新たな提案手法を用いて接触レンチを以下のように求める．

$$\mathcal{F}^{ref} = \mathcal{P}_c^{-W} \left(\mathcal{G}_B + \dot{\mathcal{L}}_B^{ref} - \mathcal{F}_B^{ext} \right) \quad (15)$$

$$\mathcal{P}_c^{-W} = W^{-1} \mathcal{P}_c^T \left(\mathcal{P}_c W^{-1} \mathcal{P}_c^T \right)^{-1}$$

$\mathcal{P}_c^{-W} \in \mathbb{R}^{c \times 6}$ は重みにより補正のかかった接触方向から B 部にレンチを変換する行列の擬似逆行列であり，本稿では DCM 擬似逆行列とよぶ． $W = \text{diag}(W_R, W_L) \in \mathbb{R}^{c \times c}$ は DCM と各足の関係より力を分配するための重み行列を示す．また添字 R, L は右足，左足を示す．

コンセプトとして，各足と DCM の位置関係より例えば z 軸方向の力を考えた際は，Fig. 1 (b) のように DCM が近い足ほど力が大きくなるように重みを決定したい．重み行列を力とモーメントに分解すると以下となる．

$$W_k \equiv \text{diag} \left(w_k^f, w_k^n \right) \quad (16)$$

$w_k^f, w_k^n \in \mathbb{R}^3$ はそれぞれ力とモーメントの重みベクトルである．重みと分配された接触力の関係式は以下となる．

$$\mathcal{F}_k = \text{diag} \left(\text{diag} \left(\text{diag}(w_k^f) \tilde{w}^f \right), \text{diag} \left(\text{diag}(w_k^n) \tilde{w}^n \right) \right) \mathcal{F}_F \quad (17)$$

$w^f = w_R^f + w_L^f, w^n = w_R^n + w_L^n, w^f \tilde{w}^f = w^n \tilde{w}^n = 1$ を示し， \bar{k} は $\bar{k} = L$ のとき $k = R$ のように対となる足を示す．また， $\mathcal{F}_F = \mathcal{F}_R + \mathcal{F}_L$ であり分配された各足のレンチの和である．コンセプトとして，分配の指標である目標 ZMP を DCM の床面投影点とするため [8]，垂直方向成分である z 方向の力を，DCM により分配する．

$$w_{kz}^f = s_k \begin{bmatrix} \Delta r_x & \Delta r_y & 0 \end{bmatrix} (r_X - r_k^{ds}) \quad (18)$$

$r_k^{ds} = r_k + \Delta r_k$ であり，Fig. 1(a) のように Δr_k によって両足支持領域を幾何学的に設定する．したがって， Δr_k は各足裏の領域内に設定する必要があるため以下となる．

$$l_h^{min} \leq \Delta r_{kh} \leq l_h^{max}, h \in \{x, y\} \quad (19)$$

例えば $\Delta r_k = 0$ のとき，各足首間が両足支持領域と決定されるため，DCM が足首に到達した際に両脚支持と片脚支持が切り替わる．

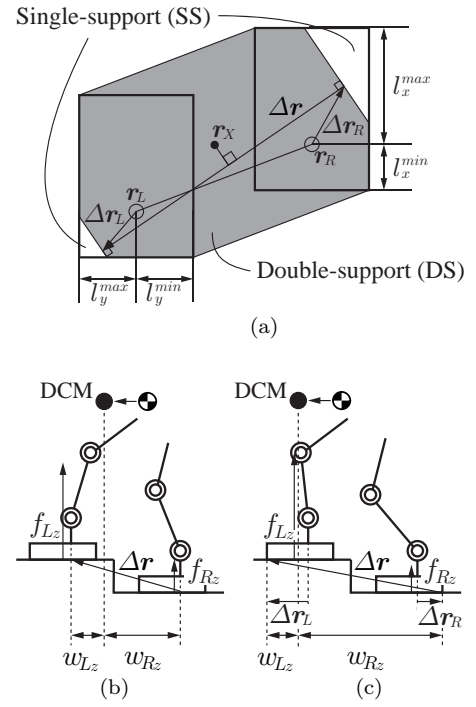


Fig. 1: Geometrical relations pertinent to the wrench distribution policy. (a) The double-support area is specified either by the user or the system, via Δr_k . (b) With Δr_k set at zero, the vertical reactions pass through the ankles. (c) With Δr_k set at the outer vertices, the entire BoS will be covered as a double-support area.

4.2 摩擦円錐の考慮

重みにより分配されたレンチの式 (17) より摩擦円錐 (3) は以下に変形できる．

$$\frac{\sqrt{(w_{kx}^f \tilde{w}_x^f f_{F_x})^2 + (w_{ky}^f \tilde{w}_y^f f_{F_y})^2}}{w_{kz}^f \tilde{w}_z^f f_{F_z}} \leq \mu_f$$

本手法は逆問題を解くため，最適化問題と同様に不等式制約を用いることができない．そのため，上式のように書きなおすことにより，今回は DCM に基づく垂直方向の力の分配による摩擦への影響を最小限にするために，以下の等式から摩擦円錐方程式を解く．

$$\frac{\sqrt{(w_{kx}^f \tilde{w}_x^f f_{F_x})^2 + (w_{ky}^f \tilde{w}_y^f f_{F_y})^2}}{w_{kz}^f \tilde{w}_z^f f_{F_z}} = \frac{\sqrt{f_{F_x}^2 + f_{F_y}^2}}{f_{F_z}}$$

または，

$$(w_{kx}^f \tilde{w}_x^f f_{F_x})^2 + (w_{ky}^f \tilde{w}_y^f f_{F_y})^2 = (w_{kz}^f \tilde{w}_z^f)^2 (f_{F_x}^2 + f_{F_y}^2)$$

式中の右辺は両足の摩擦への影響が等しい状態であり，両足が同時に滑る状態までは制約を満たせる．このとき

$$w_{kx}^f = w_{ky}^f \equiv w_{kh}^f \text{ と仮定すると，}$$

$$(w_{kh}^f \tilde{w}_h^f)^2 (f_{F_x}^2 + f_{F_y}^2) = (w_{kz}^f \tilde{w}_z^f)^2 (f_{F_x}^2 + f_{F_y}^2) \quad (20)$$

これを満たす重みは $w_{k_h}^f \tilde{w}_h^f = w_{k_z}^f \tilde{w}_z^f$ であり, $w_{k_h}^f = w_{k_z}^f$ である.

次にねじれ摩擦について考慮する. 同様に (4) は以下となる.

$$\frac{w_{k_z}^n \tilde{w}_z^n |n_{F_z}|}{w_{k_z}^f \tilde{w}_z^f f_{F_z}} \leq \mu_n$$

この不等式に基づき, ねじれ摩擦を最小限にするために以下の等式から解く.

$$\frac{w_{k_z}^n \tilde{w}_z^n |n_{F_z}|}{w_{k_z}^f \tilde{w}_z^f f_{F_z}} = \frac{|n_{F_z}|}{f_{F_z}}$$

以上を解くと重みは以下となる.

$$w_{k_z}^n \tilde{w}_z^n = w_{k_z}^f \tilde{w}_z^f$$

4.3 CoP の考慮

重みにより分配されたレンチの式 (17) より, 各足における CoP は以下となる.

$$r_{P_k} = \begin{bmatrix} -(w_{k_y}^n \tilde{w}_y^n n_{F_y}) / (w_{k_z}^f \tilde{w}_z^f f_{F_z}) \\ (w_{k_x}^n \tilde{w}_x^n n_{F_x}) / (w_{k_z}^f \tilde{w}_z^f f_{F_z}) \end{bmatrix}$$

以上より, CoP の位置は垂直方向の力の分配に依存することがわかる. これにより, 例えば力抜けた足については CoP が足裏領域限界に向かって移動し, 最終的に足先が回転する. この問題を回避するために, DCM による垂直方向の力の分配による影響を考慮する必要がある. 力の分配による影響を打ち消すために, 以下を仮定する.

$$\begin{bmatrix} -(w_{k_y}^n \tilde{w}_y^n n_{F_y}) / (w_{k_z}^f \tilde{w}_z^f f_{F_z}) \\ (w_{k_x}^n \tilde{w}_x^n n_{F_x}) / (w_{k_z}^f \tilde{w}_z^f f_{F_z}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -n_{F_y} / f_{F_z} \\ n_{F_x} / f_{F_z} \end{bmatrix}$$

以上を解くと重みは以下となる.

$$w_{k_x}^n \tilde{w}_x^n = w_{k_y}^n \tilde{w}_y^n = w_{k_z}^f \tilde{w}_z^f$$

また, CoP の挙動については, 設定した両脚支持領域による影響も受けるため注意が必要である. 分配する系全体のモーメントと分配された各足の力とモーメントの関係式は以下のように表現できる.

$$n_B = \sum_k \left([{}^B r_k^\times] \left(\text{diag} \left(\text{diag}(w_k^f) \tilde{w}^f \right) f_F \right) \right) + n_F$$

式より垂直方向の力の分配が大きいたときは, 各足のモーメントは小さくなる. この垂直方向の力は設定した両脚支持領域により決定される. この関係を Fig. 2 に示す. 図中の黒の矢印は各足の垂直方向の力とそれにより発生する系全体モーメント, 白の矢印は各足のモーメントとそれによ

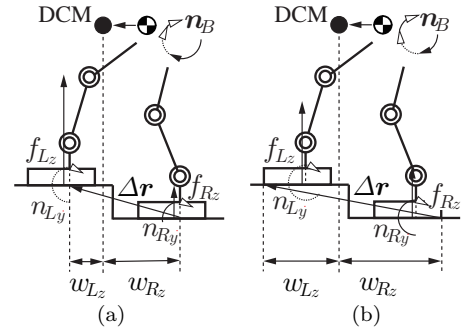


Fig. 2: Relations between vertical foot reactions, tangential reaction moments and the net base moment. (a) A smaller DS area setting yields smaller reaction moments at the feet. (b) A larger DS area setting yields larger reaction moments and increases the possibility of foot roll.

り発生する系全体のモーメントであり, Fig. 2 (a) は両脚支持領域が足首間, Fig. 2 (b) は両脚支持領域が実際の両脚支持領域としたものである. 両脚支持領域を狭めるほど力は分配されやすくなるため, より各足のモーメントは小さくなる. 以上より, 同じ DCM に対して各足のモーメントが抑えられることで, CoP の挙動も抑制することができる. より大きな両脚支持領域を設定したいときは, この CoP による各足の回転の危険性が高まるため, 注意が必要である.

5. 未知の外乱に対するバランス制御

外乱が加わるとき, 外乱に適応した動作をする必要がある. この区間は Reflex phase と呼ばれる. また, 外乱に耐え切った後に, 最終的にロボットは初期の姿勢へと回復する. この区間は Recovery phase と呼ばれる [15]. 本章では DCM に基づくバランス維持において, ハイブリッド制御によりそれぞれの区間にて切り替える.

5.1 Reflex phase

3 章より DCM の制御を用いているため, アドミタンス制御は DCM の性質を考えることで容易に実現できる. バランス維持におけるアドミタンス制御は重心にダンパの性質を持たせることと同義であるため, (9) より DCM は重心位置と速度が干渉した成分であること利用し, $r_X^{des} = r_C$ とすることで以下のように重心位置を打ち消され実現できる.

$$\dot{r}_X^{ref} = \left(E - \frac{1}{\omega} K_X \right) \dot{r}_C \quad (21)$$

この制御則により既存の重心制御のようにゲインを切り替える必要なくアドミタンス制御を実現できる.

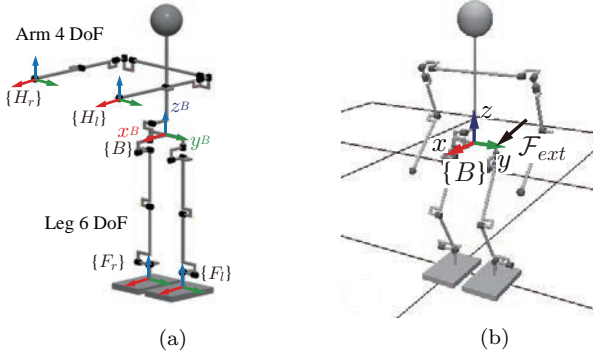


Fig. 3: Models: (a) simulation model and (b) Initial configurations. \mathcal{F}_{ext} is the disturbance applied during the reactive task.

5.2 Recovery phase

Reflex phase から外乱が抜けた時刻 t_{rec} で Recovery phase に切り替わる．切り替え後は目標の DCM を以下とすることで滑らかに DCM 制御へと切り替わる [16]．

$$\mathbf{r}_X^{des} = \mathbf{r}_C + (1 - e^{-\omega(t-t_{rec})})(\mathbf{r}_X - \mathbf{r}_C) \quad (22)$$

上記の \mathbf{r}_X^{des} は時間微分することで 3 章における $\dot{\mathbf{r}}_X$ も求まる．また $\mathbf{r}_X^{des}(t_{rec}) = \mathbf{r}_C(t_{rec})$ であることから，各 Phase が滑らかに切り替わっていることがわかる．

6. シミュレーション

OpenHRP3 を用いて動力学シミュレーションを行う．Fig. 3(a) のように各脚部 6 自由度，各腕部 4 自由度の人型ロボットモデルを使用し，接触数は支持脚の各足 6 自由度とする．各足裏の領域は足首から $(l_x^{max}, l_x^{min}, l_y^{max}, l_y^{min}) = (58, -40, 31.5, -31.5)$ mm である．各ゲインは $\mathbf{K}_X = \text{diag}(30000 \ 30000 \ 30000)$ ， $\mathbf{K}_{dw} = \text{diag}(30 \ 30 \ 30)$ ， $\mathbf{K}_{pw} = \text{diag}(50 \ 50 \ 50)$ とする．初期状態を Fig. 3 を示す．また，DCM 擬似逆行列における両脚支持領域は実際の両脚支持領域と足首間の領域の二通り設定する．したがって実際の両脚支持領域は $\Delta \mathbf{r}_{R_h} = [l_x^{max} \ l_y^{min}]^T$ ， $\Delta \mathbf{r}_{L_h} = [l_x^{min} \ l_y^{max}]^T$ ，足首間では $\Delta \mathbf{r}_{k_h} = \mathbf{0}$ とした．本シミュレーションの目的は未知の外乱に対するバランス維持動作を検証することである．外乱は Fig. 3 (b) のようにロボットの左腰部に $\mathcal{F}_{ext}(0, -20, -20)$ N とする．重心の高さは可変とすることで，DCM の制御が実現できていることも確認する．また \bar{z}_{vrrp} は定数とし，今回は未知の動作となるため初期の高さ 242 mm を用い， $\omega = 0.169$ である．また外乱は $t = 3$ s から $t = 5$ s まで与える．この外乱により左右の足の力がそれぞれ増減し，力が抜けることで遊脚へと切り替わる．したがって，両脚支持から片脚支持，片脚

支持から両脚支持へと遷移することが検証できる¹．

シミュレーション結果とその様子を Fig. 4, Fig. 5 に示す．図中における灰色と赤色の領域はそれぞれ両脚支持である load/unload strategy，片脚支持である lift-leg strategy を示している．また左の列は実際の両脚支持領域，右の列は足首間の領域に設定したものである．

Fig. 4 における (a), (b) より，外乱により z 軸方向にも大きく移動していることが確認できる．また，外乱が抜けた際に発散していないことから，Recovery phase と Reflex phase が滑らかに切り替わっていることも確認できる．Fig. 4 (c) から (f) は DCM 擬似逆行列によるレンチの分配結果を示している．さらに Fig. 4 (g), (h) は CoP を示している．これらより片脚支持へと切り替わる際は両脚支持領域の設定の違いにより，Lift-leg strategy へと切り替わるまでに実際の両脚支持領域では左足の CoP が足裏領域内の限界を超えているが，足首間の領域では安定していることが確認できる．

7. 結言

DCM 擬似逆行列により各足のレンチまで考慮したバランス維持制御を実現した．またバランス維持制御において DCM に基づくアドミタンス制御への切り替えを実現した．さらに両脚支持領域の設定により各足の CoP への影響があることを確認した．今後の展望としてはこの手法を用いて不整地での歩行動作などにも応用できると考えている．そのため内力制御の役割や両脚支持領域の設定方法について検証していくことで改善をしていく．

参考文献

- [1] D. Winter, “Human balance and posture control during standing and walking,” *Gait & Posture*, vol. 3, no. 4, pp. 193–214, 1995.
- [2] P. M. Wensing, H. G. Bin, B. Dariush *et al.*, “Optimizing foot centers of pressure through force distribution in a humanoid robot,” *The Int. J. of Humanoid Robotics*, vol. 10, no. 3, pp. 1350027, 2013.
- [3] T. Bretl and S. Lall, “A fast and adaptive test of static equilibrium for legged robots,” in *Proc. of 2006 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, May 2006, pp. 1109–1116.
- [4] S.-H. Hyon, J. G. Hale, and G. Cheng, “Full-body compliant human–humanoid interaction: balancing in the presence of unknown external forces,” *IEEE Trans. on Robotics*, vol. 23, no. 5, pp. 884–898, Oct. 2007.
- [5] S. Kajita, M. Morisawa, K. Miura *et al.*, “Biped walking stabilization based on linear inverted pendulum tracking,” in *Proc. of 2010 IEEE/RSJ Int.*

¹文献 [17] において同様の実験を行ったが，異なる動力学モデルでありかつレンチの分配をしていない．

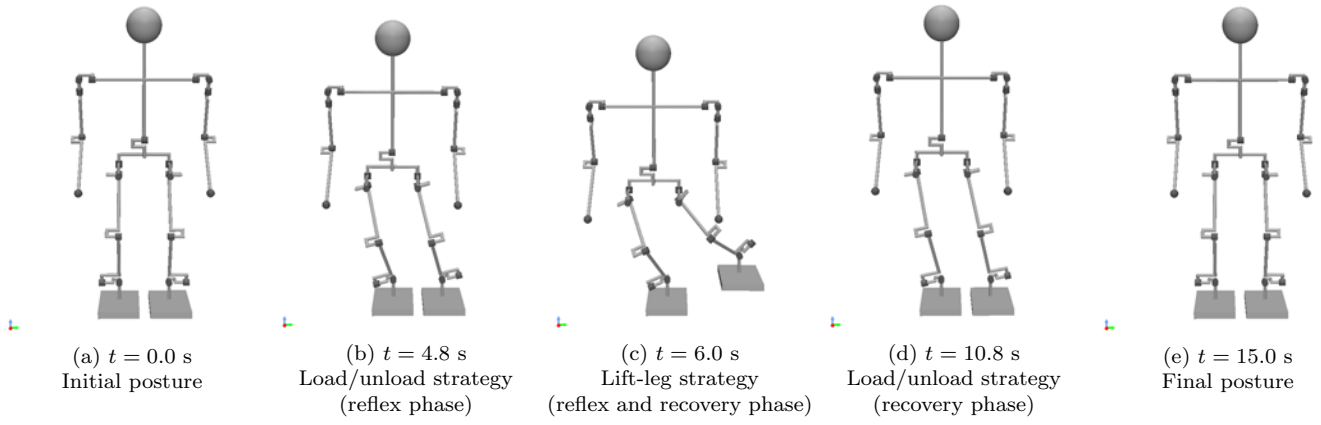


Fig. 5: Motion snapshots from reactive balance control with load/unload and lift-leg strategies with DCM-GI based contact wrench distribution.

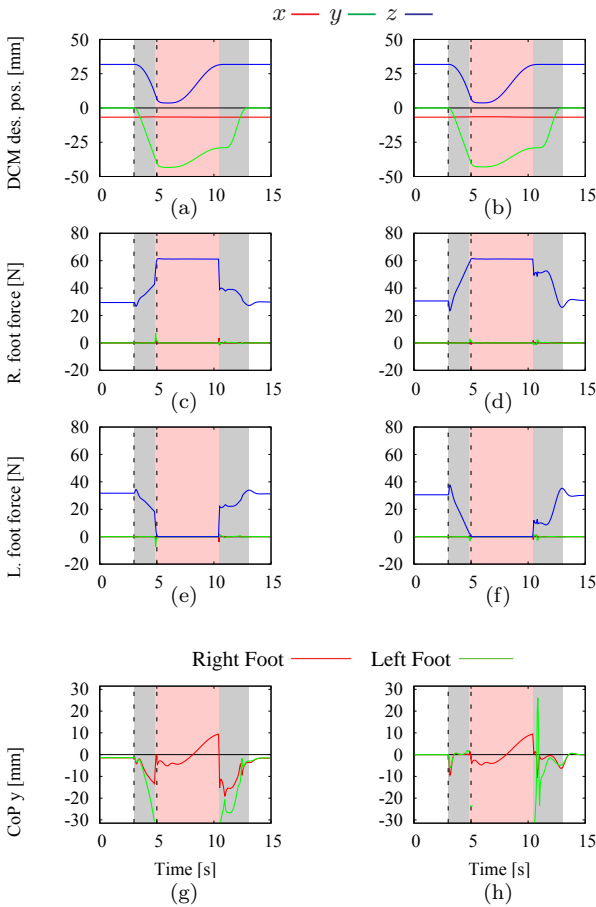


Fig. 4: Reactive task under an unknown disturbance acting at the base/hip (top figure). The left/right columns display results from simulations with a large/small DS area setting. The gray/pink areas signify the load/unload and lift-leg strategies, respectively. The dotted vertical lines determine the time span of the disturbance.

Conf. on Intelligent Robots and Syst., Oct. 2010, pp. 4489–4496.

- [6] Y. Lee, S. Hwang, and J. Park, “Balancing of humanoid robot using contact force/moment control by task-oriented whole body control framework,” *Autonomous Robots*, vol. 40, no. 3, pp. 457–472, 2016.
- [7] 細川雅弘, 白井智史, 金宮好和, 佐藤大祐: “DCM 擬

似逆行列によるレンチの分配法-未知の外乱に対する Lift-Leg Strategy の実現-”, 第 35 回日本ロボット学会学術講演会論文集, 2L1-05, 2017.

- [8] T. Sugihara, “Standing stabilizability and stepping maneuver in planar bipedalism based on the best COM-ZMP regulator,” in *Proc. of 2009 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, May 2009 pp. 1966–1971.
- [9] T. Takenaka, T. Matsumoto, and T. Yoshiike, “Real time motion generation and control for biped robot -1st report: Walking gait pattern generation-,” in *Proc. of 2009 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, Oct. 2009, pp. 1084–1091.
- [10] J. Engelsberger, C. Ott, and A. Albu-Schäffer, “Three-dimensional bipedal walking control based on divergent component of motion,” *IEEE Trans. on Robotics*, vol. 31, no. 2, pp. 355–368, Apr. 2015.
- [11] G. Wiedebach, S. Bertrand, T. Wu *et al.*, “Walking on partial footholds including line contacts with the humanoid robot atlas,” in *Proc. of 2016 IEEE-RAS 16th Int. Conf. on Humanoid Robots (Humanoids)*, Nov 2016, pp. 1312–1319.
- [12] S. H. Lee and A. Goswami, “A momentum-based balance controller for humanoid robots on non-level and non-stationary ground,” *Autonomous Robots*, vol. 33, no. 4, pp. 399–414, 2012.
- [13] M. Popovic, A. Hofmann, and H. Herr, “Angular momentum regulation during human walking: biomechanics and control,” in *Proc. of 2004 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, 2004, pp. 2405–2411.
- [14] H. Herr and M. Popovic, “Angular momentum in human walking,” *J. of Experimental Biology*, vol. 211, no. 4, pp. 467–481, Feb. 2008.
- [15] M. Abdallah and A. Goswami, “A biomechanically motivated two-phase strategy for biped upright balance control,” in *Proc. of 2005 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Apr. 2005, pp. 1996–2001.
- [16] J. Engelsberger, C. Ott, *et al.*, “Bipedal walking control based on capture point dynamics,” *Proc. of 2011 IEEE/RSJ Int. Conf. on Robotics and Automation*, Sep. 2011, pp. 4420–4427.
- [17] Y. Yoshida, K. Takeuchi, Y. Miyamoto *et al.*, “Postural balance strategies in response to disturbances in the frontal plane and their implementation with a humanoid robot,” *IEEE Trans. on Syst., Man, and Cybernetics: Syst.*, vol. 44, no. 6, pp. 692–704, 2014.