

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—

細川雅弘 (都市大) 白井智史 (都市大) 金宮好和 (都市大) 佐藤大祐 (都市大)

1. 緒言

本論文では、人間のバランス維持戦略に基づき人型ロボットに自律したバランス維持動作を実現させることを目的とし、特に左右の足のレンチの分配が必要な動作について扱う。

先行研究として、人間工学の分野においては、Rietdyk らは人間が外乱を受けたときの前額面の動作について解析し、その動作の一つである load/unload strategy において左右の足のレンチの比が異なることを述べている [1]。これは解析した直立状態において、前額面では重心に対して左右の足の位置が等しくならず、左右の足のレンチが対称とならないためである。また、我々はより大きな外乱を受けたときの動作として、lift-leg strategy が存在することを挙げ、それらを人型ロボットに適應させ実現してきた [2]。しかし、load/unload strategy の特徴である左右の足へのレンチの分配が考慮されていなかった。

左右の足のレンチの分配に関する研究例として、梶田らが歩行動作において、重心を目標軌道へ追従させつつ目標 ZMP への追従をさせるため、左右の足のレンチの分配を利用した [3]。これによりレンチの分配ができることが述べられているが、各足の位置と目標の ZMP との関係を分配指標としているため、ZMP の目標軌道を設定する必要がある。そのため、歩行動作などの随意運動における左右の足のレンチの分配は可能であるが、未知の外乱に対するバランス動作などの不随意運動における分配は考慮されていなかった。Hyon らは未知の外乱に対して左右の足の力を分配したが点接触を仮定しているためレンチを考慮できておらず、また重心の静的状態から求まる CoP を力の分配の指標としているため動的安定性までは考慮できず突発的な外乱には不十分である [4]。

一方で、Pai らは動作解析により素早い重心移動など動的な動作をするとき、静的安定性の指標である ZMP に代わる動的安定性の指標として、extrapolated CoM (xCoM) が優れていると述べた [5]。また、Pratt らは動的な歩行の踏み出し位置に Capture Point を用いている [6]。文献 [5][6] より Capture Point は xCoM と等しく、Englsberger らはそれらを平面から三次元へと拡張した Divergent Component of Motion (DCM) の制御を実現した [7][8]。しかし繰り返し計算による手法により関節トルクを求めているため、各足のレンチの分配はできているが計算コストが高く、Wensing らは繰り返し計算を減らしている [9]。

そこで本稿では、新たに提案する DCM 擬似逆行列によるレンチの左右の足への分配により、以下の三つの利点を示す。

1. 人間の動作解析結果と同様に、バランス動作にお

いて左右の足のレンチを分配する。

2. 左右の足へレンチを分配するとき、DCM を指標とし突発的な未知の外乱に対応する。

3. 繰り返し計算を用いず、計算コストを減らす。

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。

$$\begin{bmatrix} \mathbb{M}_B & \mathcal{H}_{B\theta} \\ \mathcal{H}_{B\theta}^T & M_\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathcal{V}}_B \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathcal{C}_B \\ \mathbf{c}_\theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathcal{G}_B \\ \mathbf{g}_\theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathcal{F}_{ext} \\ \boldsymbol{\tau} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathcal{P}_c \\ \mathcal{J}_c^T \end{bmatrix} \bar{\mathcal{F}}^c \quad (1)$$

$\mathbb{M}_B \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$ は B 部回りの系全体の慣性行列、 $M_\theta \in \mathbb{R}^{n \times n}$ はリンクによる各関節の慣性行列、 $\mathcal{H}_{B\theta} \in \mathbb{R}^{6 \times n}$ は B 部とリンク部の干渉慣性行列、 $\mathcal{C}_B \in \mathbb{R}^6$ は B 部にかかる系全体の非線形項、 $\mathbf{c}_\theta \in \mathbb{R}^n$ はリンクによる各関節の非線形項、 $\mathcal{G}_B \in \mathbb{R}^6$ は B 部にかかる系全体の重力項、 $\mathbf{g}_\theta \in \mathbb{R}^n$ はリンクによる各関節の重力項、 $\mathcal{V}_B \in \mathbb{R}^6$ は B 部の空間速度、 $\mathcal{F}_{ext} \in \mathbb{R}^6$ 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、 $\boldsymbol{\tau} \in \mathbb{R}^n$ は関節トルク、 $\mathcal{P}_c \in \mathbb{R}^{6 \times c}$ 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、 $\mathcal{J}_c \in \mathbb{R}^{c \times n}$ は B 部から各先端部までの接触方向成分のヤコビ行列、 $\bar{\mathcal{F}}^c \in \mathbb{R}^c$ 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

式 (1) を用いて逆動力学より関節トルクは以下となる。

$$\boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{\tau}^c + \boldsymbol{\tau}^m + \mathbf{c}_\theta + \mathbf{g}_\theta \quad (2)$$

$$\boldsymbol{\tau}^c = -\mathcal{J}_c^T \bar{\mathcal{F}}^c$$

式 (2) の右辺において、第一項 $\boldsymbol{\tau}^c$ は先端部の接触方向成分の力とモーメントによるバランス制御、第二項 $\boldsymbol{\tau}^m$ は先端部における非接触方向の運動制御を担う。我々は第二項において、反動零空間法に基づいた運動制御をしており [10]、両足支持状態では両手先、片足支持状態では遊脚と両手先の先端部を制御する。

3. DCM と運動量変化率に基づくバランス制御

先行研究において、ロボット全体を Composite Rigid Body (CRB) と扱うことができ、CRB の運動量よりバランス制御をしている [11]。本章では先行研究より CRB の運動量変化率を求め [7]、次章において式 (1) よ

り接触方向のレンチを求める [11]．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．

$$f_C = f_I + f_G = \dot{p} + mge_z \quad (3)$$

$f_C \in \mathbb{R}^3$ 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，式 (3) 中の f_C が求まる [7]．したがって，運動量変化率は最終的に以下となる．

$$\dot{p} = f_I = f_C - f_G = m\omega^2(r_C - r_{vrp}) \quad (4)$$

$$r_{vrp} = r_X - \frac{1}{\omega} \dot{r}_X \quad (5)$$

$$r_X = r_C + \frac{1}{\omega} \dot{r}_C \quad (6)$$

$r_{vrp} \in \mathbb{R}^3$ 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．

$$r_{vrp}^{ref} = r_X - \frac{1}{\omega} \dot{r}_X^{ref} \quad (7)$$

$$\dot{r}_X^{ref} = \dot{r}_X^{des} - K_X(r_X - r_X^{des}) \quad (8)$$

$K_X \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ は DCM のフィードバックゲインを示す．式 (4) 式 (7) 式 (8) より，運動量変化率の指令値は以下となる．

$$\dot{p}^{ref} = m\omega^2(r_C - r_{vrp}^{ref}) \quad (9)$$

角運動量変化率の指令値は以下とし，初期姿勢を維持するものとする．

$$\dot{l}_B^{ref} = I_B \dot{\omega}_B^{des} + K_{d\omega} e_\omega + K_{p\omega} e_O \quad (10)$$

$l_B \in \mathbb{R}^3$ は B 部の角運動量， $I_B \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ は系全体の慣性テンソル， $e_\omega \in \mathbb{R}^3$ ， $e_O \in \mathbb{R}^3$ は B 部の角速度および姿勢の誤差を示す． $K_{d\omega} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ ， $K_{p\omega} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ はそれぞれ B 部の角速度および姿勢のフィードバックゲインを示す．式 (10) によって DCM への影響が生じるが，今回は少ないため本稿では考慮していない．

4. 各足部の接触レンチの算出

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

$$\mathcal{P}_c \bar{\mathcal{F}}^c = \mathcal{G}_B + \dot{\mathcal{L}}_B^{ref} - \mathcal{F}_{ext} \quad (11)$$

$\mathcal{L}_B = [p^T \ l_B^T]^T$ は B 部回りの運動量を示す．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．また比較対象として，繰り返し計算による接触レンチの算出手法について述べる．

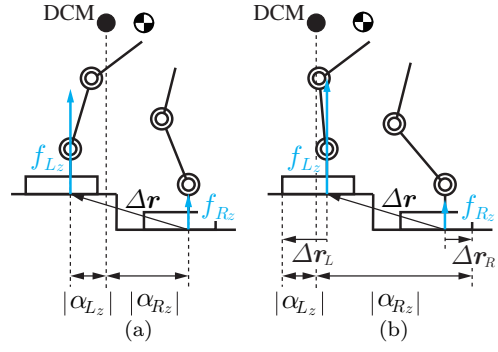


図1 式 (13) における DCM と各足の重みの大きさの関係．(a) は足先間を両足支持状態としたとき，(b) は両足支持状態を足裏外側まで拡大したときの力と重みの関係を示す．

4.1 DCM 擬似逆行列の提案

本節では，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．式 (11) 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．

$$(\bar{\mathcal{F}}^c)^{ref} = \mathcal{P}_c^{-W} (\mathcal{G}_B + \dot{\mathcal{L}}_B^{ref} - \mathcal{F}_{ext}) \quad (12)$$

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

$\mathcal{P}_c^{-W} \in \mathbb{R}^{c \times 6}$ 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．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，図 1 (a) 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．したがって，各足の重み行列を以下とする．

$$W_k = \text{diag}(|\alpha_{k_x}| \ |\alpha_{k_y}| \ |\alpha_{k_z}| \ |\alpha_{k_z}| \ |\alpha_{k_z}| \ 1) \quad (13)$$

$$\begin{bmatrix} \alpha_{k_x} \\ \alpha_{k_y} \\ \alpha_{k_z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \Delta r_y & \Delta r_z \\ \Delta r_x & 0 & \Delta r_z \\ \Delta r_x & \Delta r_y & 0 \end{bmatrix} (r_X - (r_k + \Delta r_k))$$

$$\Delta r = r_L - r_R$$

$\alpha_k \in \mathbb{R}^3$ はそれぞれ各足の重みを示し，添字は $k \in \{R, L\}$ を示す．式 (13) 中のモーメントの重みは，各足の CoP $r_{P_k} = [-m_{k_y}/f_{k_z} \ m_{k_x}/f_{k_z}]^T$ の関係式より f_{k_z} への重み α_{k_z} が打ち消されることで，力の分配による各足の CoP への影響を打ち消す役割がある． $f_k \in \mathbb{R}^3$ ， $m_k \in \mathbb{R}^3$ は各足の力，モーメントを示す． $\Delta r_k \in \mathbb{R}^3$ は任意の追加領域を示し，例えば図 1 (b) のように足裏の外側までを与えることで，(a) では足先の上に DCM があるときに片足に分配されることを避け，足裏の外側まで分配できる重みを決定できる．

4.2 繰り返し計算による二次計画問題

本節では，ステップ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．最適変数を接触部に加わる接触レンチ $\bar{\mathcal{F}}^c$ とし，関節トルクの最

小化と各足の CoP の誤差の最小化を目的関数とする．また、式 (11) を等式制約に設定する．

ここで、滑りを抑制するためには、各足の接触レンチは次式に示すように摩擦円錐内に存在しなければならないことは一般的に知られている．

$$\sqrt{f_x^2 + f_y^2} \leq \mu f_z, \quad f_z \geq 0$$

しかし、摩擦円錐を最適化問題の制約条件に考慮すると、二次錐計画問題となってしまうため計算コストが増加してしまう．そこで、摩擦円錐を線形化し、摩擦多角錐として制約条件に考慮する [12]．

以上より、本稿で用いる二次計画問題を以下に示す．

$$\min_{\bar{\mathcal{F}}^c} \quad c_c + c_P \quad (14)$$

$$\text{s.t.} \quad \mathcal{P}_c \bar{\mathcal{F}}^c = \mathcal{G}_B + \dot{\mathcal{L}}_B^{ref} - \mathcal{F}_{ext} \quad (15)$$

$$\mathcal{C}_{poly} \mathcal{Q}^T \bar{\mathcal{F}}^c \leq \mathbf{0} \quad (16)$$

目的関数である式 (14) は以下のように定義される．なお、 $c_P = c_{P_R} + c_{P_L}$ とする．

$$c_c = (\bar{\mathcal{F}}^c)^T \mathcal{J}_c^T \mathbf{W}_c \mathcal{J}_c \bar{\mathcal{F}}^c$$

$$c_{P_k} = (\mathcal{P}_{P_k} \bar{\mathbf{m}}_k^c - \mathbf{r}_{P_k}^{des})^T \mathbf{W}_{P_k} (\mathcal{P}_{P_k} \bar{\mathbf{m}}_k^c - \mathbf{r}_{P_k}^{des})$$

拘束数 c の内、 c_f 、 c_m をそれぞれ力およびモーメントに関する数、 p を摩擦多角錐の稜線の数とすると、 $\mathcal{C}_{poly} \in \mathbb{R}^{p \times c_f}$ は摩擦多角錐を表す行列、 $\mathcal{Q} \in \mathbb{R}^{c_f \times c_f}$ は直交行列であり、 $\mathbf{W}_{(o)}$ はそれぞれの目標関数における重み、また、 $\mathcal{P}_{P_k} \in \mathbb{R}^{2 \times c_{m_k}}$ は、接触部に加わるモーメントを二次元平面に射影する行列である．式 (15) は、等式制約である静力学の接触レンチの釣り合いの式である．式 (16) は、不等式制約である摩擦多角錐を表す．

5. 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．二次計画問題は QuadProg++ を用いる．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．全高 500 mm、足首間 78 mm、総質量 6 kg であり、各脚の初期関節角度は $\theta_k = [0 \ 0 \ -30 \ 60 \ -30 \ 0]^T$ とした．各節において任意の追加領域 Δr_k については、繰り返し計算による手法と比較するときは図 1 (b) のように足首から足裏の外側、lift-leg strategy をするときは図 1 (a) のように $\mathbf{0}_3$ とする．また、座標軸 xyz はそれぞれロボットの前、左方、上方とし、両手先は初期位置を維持するものとする．各フィードバックゲインは $\mathbf{K}_X = \text{diag}(1500 \ 1500 \ 1500)$ 、 $\mathbf{K}_{d\omega} = \text{diag}(30 \ 30 \ 30)$ 、 $\mathbf{K}_{p\omega} = \text{diag}(50 \ 50 \ 50)$ とする．

5.1 提案手法と繰り返し計算による手法の比較

提案した DCM 擬似逆行列による手法と繰り返し計算による手法のシミュレーション結果を比較する．また、レンチの分配を確認するため重みなしの擬似逆行列も比較対象とする．初期状態から右足へと DCM を移動させたときを比較するために、五次の多項式補間により 5 s から 7 s までに DCM を y 軸の負方向に 35

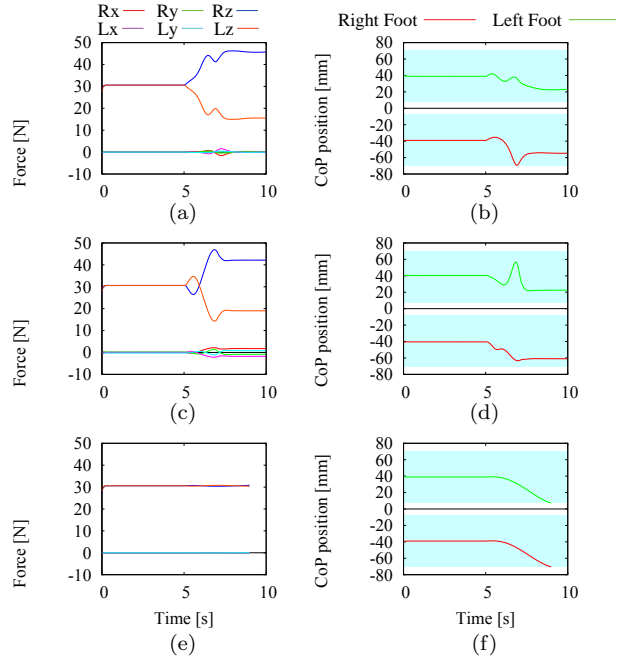


図 2 提案した DCM 擬似逆行列による手法と繰り返し計算による手法と重みなし擬似逆行列の比較．(a)(b) 提案手法、(c)(d) 繰り返し計算による手法、(e)(f) 重みなし擬似逆行列．また、図中の水色の領域は各足裏の領域を示す．

mm 移動させる．また、繰り返し計算による手法における CoP の目標値は初期値とする．

シミュレーション結果を図 2 に示す．ただし、図 2 (e)、(f) は重みなしの擬似逆行列を用いたものであり、レンチの分配をしていないことにより転倒しているため 9 s までのシミュレーション結果とする．図 2 (e) と比較して図 2 (a)、(c) は左右の足へレンチが分配されていることが確認できる．このレンチの分配により、図 2 (b)、(d) では、図 2 (f) と比較して各足の CoP の動きが小さくなっていることが分かる．さらに、図 2 (b)、(d) を比較すると、静止後の CoP は提案手法のほうが内側にあることから安定しているといえる．図 2 (a)、(c) を比較すると、静止後は、提案手法は z 軸方向の力が大きく分配されており、その他の力は (a) のほうが小さいことがわかる．これは繰り返し計算による手法は、トルクや各足の CoP の誤差を最小化していることが各足のレンチの分配に大きく影響しているためである．

今回の目的である分配は達成されており、また繰り返し計算における安定性を補償する各足の CoP については、提案手法のほうが静止後に内側にあることより、提案手法の有用性が判断できる．

5.2 応用例：不随意運動におけるバランス動作

人間の前額面におけるバランス動作として、左右の足の力の分配により load/unload strategy から lift-leg strategy へと切り替わっていることを述べた [1][2]．また、提案手法の利点として、突発的な未知の外乱に対応できることを述べた．本章ではこれらの確認として、不随意運動である外乱を与えたときの動作を行う．

条件として、人間の動作解析の結果より [1] と同様

に腰部に y 軸方向の外乱を与え、前述した二つのバランス維持動作となることを確認する。このとき、今回は外乱を与えている最中を reflex phase、与えた後を recovery phase として区別し、reflex phase においてはロボットの負荷を減らすためにアドミタンス法を用いる。式 (6) 式 (8) より $r_X^{des} = r_C$ とすることで、ゲインを切り替えずに速度成分のみにし、能動的なアドミタンス法とする。また、レンチが完全に片足に分配されたときに、片足支持状態に切り替える。

4.0 s から 6.5 s まで 20 N 与えた際のシミュレーション結果を図 3 に示す。図 3 中、(a), (b) は足先の位置、(c), (d) は足先の力、(e), (f) は脚の関節トルクを示す。図 3 (a), (b) より、両脚支持状態から左脚が遊脚となり足をあげ片脚支持状態となり、左足を下ろした後に両足支持状態に戻っていることが確認できる。このときの切り替わるタイミングとして、図 3 (c), (d) よりすべての力が右足に滑らかに分配され左足が地面から非接触状態となっているため load/unload strategy から lift-leg strategy への切り替えができていることが確認できる。さらに、着地時にレンチが各足へと再分配され DCM が初期状態に戻った後に等しい分配に戻っており、以上より提案した左右の足へのレンチの分配手法がバランス維持動作として適用できていることが分かる。また着地時の力は滑らかに切り替わっていないが、再分配により両足支持状態に切り替えられていることから問題はない。図 3 (e), (f) より strategy の切り替え時および遊脚の着地時においてもトルクが滑らかに与えられていることがわかる。

以上より、提案手法が未知の外乱に対しても応用可能であることが確認できる。

6. 結言

本稿では足部へのレンチの分配手法として、繰り返し計算を必要としない DCM 擬似逆行列について提案し有用性について述べた。これにより未知の外乱に対しても各足へのレンチの分配が可能となり、シミュレーションにおいて人間と同様のバランス維持動作である load/unload strategy と lift-leg strategy を実現した。

参 考 文 献

- [1] S. Rietdyk, A. E. Patla, D. A. Winter *et al.*: “Balance recovery from medio-lateral perturbations of the upper body during standing” *J. of Biomechanics*, vol. 32, no. 11, pp. 1149–1158, 1999.
- [2] 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.
- [3] S. Kajita, M. Morisawa, K. Miura *et al.*: “Biped walking stabilization based on linear inverted pendulum tracking,” in *Proc. of 2010 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Syst.*, Oct 2010, pp. 4489–4496.
- [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] Y.-C. Pai and J. Patton: “Center of mass velocity-position predictions for balance control,” *J. of Biomechanics*, vol. 30, no. 4, pp. 347–354, 1997.

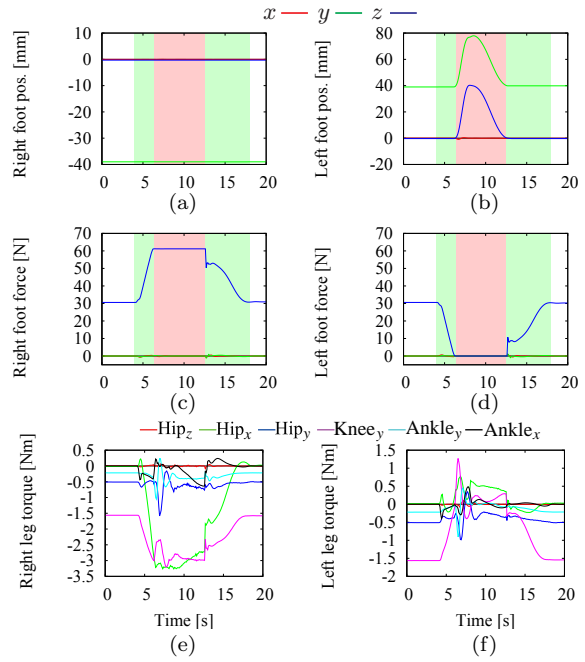


図 3 提案手法を用いた外乱を与えた際の load/unload strategy と lift-leg strategy . 図中の緑色の領域は load/unload strategy , 赤色の領域は lift-leg strategy の区間を示す .

- [6] J. Pratt, J. Carff, S. Drakunov *et al.*: “Capture point: a step toward humanoid push recovery,” in *Proc. of 2006 6th IEEE-RAS Int. Conf. on Humanoid Robots (Humanoids)*, Dec 2006, pp. 200–207.
- [7] 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, April 2015.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 大川涼平, 村松雄基, 田口翔一 ほか: “反動零空間法に基づく人型ロボットにおける重心と冗長運動を考慮したモーション・フォース制御”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2014 論文集, 3A1-E08, 2014.
- [11] B. Henze, M. A. Roa, and C. Ott: “Passivity-based whole-body balancing for torque-controlled humanoid robots in multi-contact scenarios,” *The Int. J. of Robotics Research*, vol. 35, no. 12, pp. 1522–1543, 2016.
- [12] 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.
- [13] S. Kajita and F. Kanehiro: “Resolved momentum control: Humanoid motion planning based on the linear and angular momentum,” in *Proc. of 2003 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Syst.*, pp. 1644–1650, 2003.