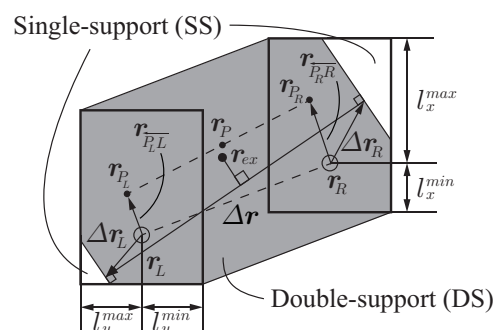


○濱野 峻秀 (東京都市大学), 宮原 笙 (東京都市大学), 金宮 好和 (東京都市大学)

○ Takahide HAMANO (TCU), Sho MIYAHARA (TCU), and Yoshikazu KANAMIYA (TCU)

1. 緒言

しかし，DCM 擬似逆行列による分配を行った場合に，歩行動作を実現できないという問題点が生じた [5]．これは，DCM 擬似逆行列を用いた場合に支持脚のモーメントが過大となっていたことが原因であると考えられる．そこで，[5] ではこの問題を解決するために，Virtual Repellent Point (VRP) による重み付き擬似逆行列を用いた VRP 擬似逆行列による歩行動作を実現したが DCM 擬似逆行列による分配手法で実現されている未知の外乱に対するバラン



ス動作の実現や、支持脚にかかる過大なモーメントに対する十分な検証が行われていない。以上より本稿では、VRP 擬似逆行列を用いた分配手法の提案と、DCM 擬似逆行列による分配手法との比較を行う。

2.1 接触レンチの分配

$$\mathcal{F}_C = \mathbf{C}_c \bar{\mathcal{F}}^c \quad (1)$$
$$(\bar{\mathcal{F}}^c) = C_c^{-W_x} \mathcal{F}_C + N(C_c) \bar{\mathcal{F}}_a^c \quad (2)$$

$C_c^{-W_X} \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$ は重みにより補正のかかった接触方向からベースリンクにレンチを変換する重み付き擬似逆行列であり、DCM 擬似逆行列と呼ぶ。ここで、 W_X は DCM 擬似逆行列の重みを示す。また、 $N(o)$ は零空間射影行列であり、第二項は C_c に対する内力を示す。二点接触状態における垂直抗力の分配は以下の式で示される [4]。

$$w_{kz}^f = s_k \begin{bmatrix} \Delta r_x & \Delta r_y & 0 \end{bmatrix} (\mathbf{r}_X - \mathbf{r}_k^{ds}) \quad (3)$$

ここで、 $k \in \{R, L\}$ を示し、左右の脚を表す。また、 $\mathbf{r}_X \in \mathbb{R}^3$ は DCM を示しており、以下の式により定義される。

$$\mathbf{r}_X = \mathbf{r}_C + T_X \dot{\mathbf{r}}_C \quad (4)$$

$\mathbf{r}_C \in \mathbb{R}^3$ は重心位置を示す。また、 $T_X = 1/\omega_X = \sqrt{\bar{z}_{vrp}/g}$ であり、 ω_X は固有角振動数を示し、 g は重力加速度、 \bar{z}_{vrp} はロボットの初期の重心の高さ示す。 $\mathbf{r}_k^{ds} = \mathbf{r}_k + \Delta \mathbf{r}_k$ は Fig. 1 のような任意に設定可能な両脚支持領域を示し、 $\Delta \mathbf{r}_k$ は各足首から見たそれぞれに設定した両脚支持領域を示す。本稿では、支持領域は任意に設定可能な定数として扱い、 $\Delta \mathbf{r}_k$ は以下の領域で設定できる。

$$l_h^{min} \leq \Delta r_{kh} \leq l_h^{max}, h \in \{x, y\} \quad (5)$$

DCM 擬似逆行列を用いたレンチの分配では、式 (5) を用いることにより分配の支持領域を拡大させることで、継続的な外乱に対してバランス動作を取ることが可能である。ここで式 (3) において設定した両脚支持領域と分配指標が一致した場合に重みが 0 となり解が存在しない特異点となることに注意する必要がある。

2.2 DCM 擬似逆行列の問題点

式 (3) より DCM 擬似逆行列のコンセプトとして $\mathbf{r}_X - \mathbf{r}_k^{ds}$ が小さくなると大きな力が分配される。例えば、 $\Delta \mathbf{r}_k = \mathbf{0}$ のとき、支持領域は両足首間として設定され、足首と DCM の距離が近い脚に大きな力が分配される。また、CoP に対して静的安定となるように力の分配が行われる。また、式 (4) より、DCM は重心の位置と速度により決定される一方で、加速度成分を考慮することはできない。ここで DCM 擬似逆行列は CoM のダイナミクスに基づき、平面上において以下の式で示される。

$$\ddot{\mathbf{r}}_g = \frac{1}{T_X^2} (\mathbf{r}_g - \mathbf{r}_p) \quad (6)$$

ここで $\mathbf{r}_g \in \mathbb{R}^2$ は重心の地面への投影点、 $\mathbf{r}_p \in \mathbb{R}^2$ は CoP を示す。このとき DCM ダイナミクスは式 (4) および式

(6) より次のように表わされる。

$$\dot{\mathbf{r}}_{ex} = \frac{1}{T_X} (\mathbf{r}_{ex} - \mathbf{r}_p) \quad (7)$$

$$\mathbf{r}_{ex} - \mathbf{r}_p = T_X (\dot{\mathbf{r}}_g - T_X \ddot{\mathbf{r}}_g) \quad (8)$$

ここで $\mathbf{r}_{ex} \in \mathbb{R}^2$ は DCM の地面への投影点である extrapolated CoM (xCoM) [7] を指す。式 (8) より、 $\dot{\mathbf{r}}_g = \mathbf{0}$ 、 $\ddot{\mathbf{r}}_g = \mathbf{0}$ となるような静的な状態において、DCM と CoP が一致する。そのため、安定時における分配は CoP に対する分配となるため、静的に安定する。一方で、 $\dot{\mathbf{r}}_g \neq \mathbf{0}$ 、 $\ddot{\mathbf{r}}_g \neq \mathbf{0}$ となる場合では、 $\mathbf{r}_{ex} - \mathbf{r}_p \neq \mathbf{0}$ となり、xCoM と CoP の間にオフセットが生じる。このとき、力の分配が xCoM により行われることから、xCoM と CoP の差をモーメントにより補おうとする。よって、DCM 擬似逆行列による分配を行うと、このオフセットの影響により、脚先にモーメントが発生することが考えられる。

3. VRP 擬似逆行列の提案

前章において、DCM 擬似逆行列による分配では DCM と CoP のオフセットにより、脚先にモーメントが発生することを述べた。そこで本章では、この脚先のモーメントを抑制できる分配手法の提案を行う。提案手法では地面から重心に向けた並進力の発生する点である Centroidal Momentum Pivot (CMP) [8] を考慮する。本手法では、CMP に重心高さを考慮した VRP を指標とした VRP 擬似逆行列を用いる。ここで VRP は以下のように示される。

$$\mathbf{r}_{vrp} = \mathbf{r}_X - T_X \dot{\mathbf{r}}_X \quad (9)$$

$\mathbf{r}_{vrp} \in \mathbb{R}^3$ は VRP を示す。なお、VRP 擬似逆行列による重みの決定方法は、式 (3) において、 \mathbf{r}_X を \mathbf{r}_{vrp} と置き換えることにより実現することが可能である。

4. 人型ロボットのバランス制御

4.1 人型ロボットの空間運動量変化率

式 (1) において空間ダイナミクスに基づくボディレンチ \mathcal{F}_C は以下の式で示される。

$$\mathcal{F}_C = \dot{\mathcal{L}}_C + \mathcal{G}_C = C_C \bar{\mathcal{F}}^c \quad (10)$$

ここで、 $\mathcal{L}_C = [\mathbf{p}^T \mathbf{l}_C^T]^T \in \mathbb{R}^6$ は空間運動量、 $\mathbf{p} \in \mathbb{R}^3$ は並進運動量、 $\mathbf{l}_C \in \mathbb{R}^3$ は重心回りの角運動量を示す。また、 $\mathcal{G}_C = [-M\mathbf{g}^T \mathbf{0}^T]^T \in \mathbb{R}^6$ 、 $\mathbf{g} = [0 \ 0 \ -g]^T$ は重力加速度を示し、 M はロボットの全質量を示す。ここで、人型ロ

ボットの空間角運動量変化率は以下の式で示される。

$$\dot{\mathbf{L}}_C = \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{p}} \\ \dot{\mathbf{L}}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M\ddot{\mathbf{r}}_C \\ \mathbf{I}_C\dot{\boldsymbol{\omega}}_B + \mathbf{H}_C\ddot{\boldsymbol{\theta}} + \dot{\mathbf{I}}_C\boldsymbol{\omega}_B + \dot{\mathbf{H}}_C\dot{\boldsymbol{\theta}} \end{bmatrix} \quad (11)$$

ここで、 $\mathbf{I}_C \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ は人型ロボットの全関節を固定した剛体 (Composite Rigid Body: CRB) [9] としての重心回りの慣性テンソルを表し、 $\mathbf{H}_C \in \mathbb{R}^{3 \times n}$ は干渉慣性行列を示す。また、 n は関節自由度である。ここで、CRBの角運動量変化率を $\dot{\mathbf{L}}_C$ として表すと、式 (11) 下段より以下となる。

$$\dot{\mathbf{L}}_C = \mathbf{I}_C\dot{\boldsymbol{\omega}}_B + \dot{\mathbf{I}}_C\boldsymbol{\omega}_B \quad (12)$$

ここで、 $\boldsymbol{\omega}_B \in \mathbb{R}^3$ はベースリンクの角速度を示す。

4.2 コントローラ

式 (9) および式 (11) の上段より、VRP を用いた並進運動量変化率指令値は以下の式で示される。

$$\dot{\mathbf{p}}^{ref} = \frac{M}{T_X^2}(\mathbf{r}_C - \mathbf{r}_{vrp}^{ref}) \quad (13)$$

$$\mathbf{r}_{vrp}^{ref} = \mathbf{r}_X - T_X\dot{\mathbf{r}}_X^{ref} \quad (14)$$

また、DCM の速度指令値は以下とする。

$$\dot{\mathbf{r}}_X^{ref} = \dot{\mathbf{r}}_X^{des} - K_X(\mathbf{r}_X - \mathbf{r}_X^{des}) \quad (15)$$

式 (15) において $K_X \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ はフィードバックゲインを示す。ここで、外乱の加わっている際には重心にダンパの性質を持たせるため、アドミタンス制御を適用することで、VRP を指標としたバランス動作を実現する。アドミタンス制御を行う際には $\mathbf{r}_X^{des} = \mathbf{r}_C$ とすることで制御を行う。このとき式 (15) は以下ようになる。

$$\dot{\mathbf{r}}_X^{ref} = (1 - K_X T_X)\dot{\mathbf{r}}_C \quad (16)$$

このとき式 (14) は次のように書き換えられる。

$$\mathbf{r}_{vrp}^{ref} = \mathbf{r}_C + K_X T_X^2 \dot{\mathbf{r}}_C \quad (17)$$

以上より、空間ダイナミクスに基づく先端部のレンチ制御は式 (11) および式 (13) より以下の式で表わされる。

$$(\bar{\mathcal{F}}^c)^{ref} = \mathbf{C}_c^{-W_{vrp}} \left(\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{p}}^{ref} \\ \dot{\mathbf{L}}_C^{ref} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -M\mathbf{g} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \right) \quad (18)$$

ここで、 W_{vrp} は VRP 擬似逆行列の重みを示している。

5. シミュレーション

Choreonoid [10] を使用した動力学シミュレーションを行う。Fig. 2 に示す HOAP-2 [11] をモデルとした各脚部6

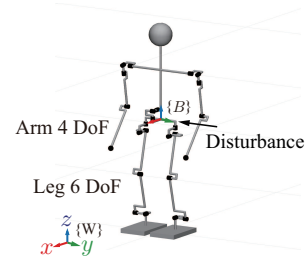


Fig. 2: The model used in the simulations. This configuration is used as the initial configuration in the reactive motion task simulation.

自由度、各腕部4 自由度の人型ロボットモデルを使用する。

各足裏の領域は $(l_x^{max}, l_x^{min}) = (58, -40)$ mm および、 $(l_y^{max}, l_y^{min}) = (31.5, -31.5)$ mm である。

5.1 DCMと VRP による分配の比較

DCM および VRP 擬似逆行列を用いた分配手法の比較を行う。シミュレーションでは分配指標以外のシミュレーション条件は全て同じものを使用し、Fig. 2 のようにモデルの腰部に外乱を与え、両脚支持状態から片脚支持状態へと遷移する lift-leg を行った。式 (3) で定めたレンチの分配領域は足首間として設定し、ロボットの左腰部に $(0, -6, 0)$ N の外乱を $t = 1$ s から $t = 3$ s まで与えた。シミュレーション結果を Fig. 3 に示す。図中における灰色と赤色の領域は、両脚支持および片脚支持の状態をそれぞれ示し、破線で囲まれる時間において外乱が加えられている。また、左右の列で DCM と VRP それぞれの結果を示している。Fig. 3 では左脚の支持力が 0 N となると両脚支持から片脚支持への遷移が行われている。ここで支持状態の遷移の時間に着目すると DCM では 2.1 s で切り替わるが、VRP では 1.7 s で支持状態が切り替わる。よって、VRP を使用した場合のほうが、DCM を使用した場合と比較して、力の分配が早く行われることがわかる。また、左右の足首関節に生じるモーメントは、接触レンチの分配を行っている間において VRP の方が小さな値を示している。よって、VRP では脚先にかかるモーメントを抑えることができる。

5.2 大きな外乱に対するバランス動作

前項では二つの分配手法の比較を行い、VRP 擬似逆行列では脚先のモーメントが抑制できることを示した。よって VRP を指標とした分配では、より大きな外乱に対するバランス制御を行うことが期待される。そこで本章では、VRP を指標とした大きな外乱に対するバランス動作を実現する。シミュレーションでは、前項と同様にレンチの分配領域を足首間に設定し、ロボットの左腰部に $(0, -13, 0)$

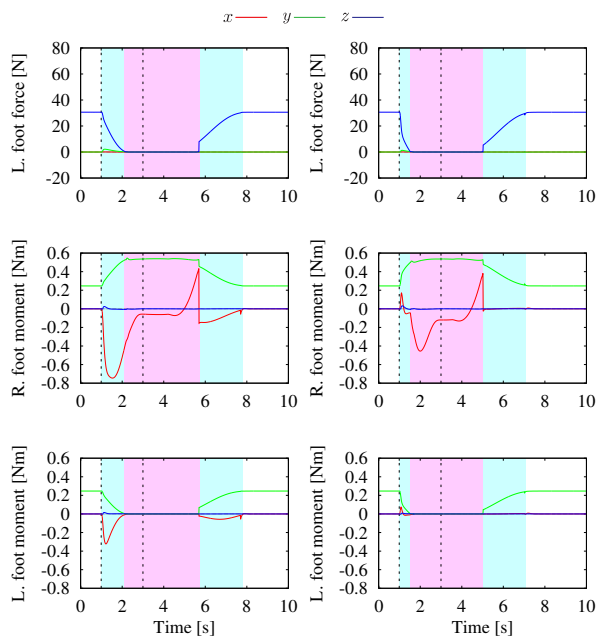


Fig. 3: Reactive task under an unknown disturbance acting at the base. The graphs on the left/right hand side display results from simulations with a DCM/VRP method.

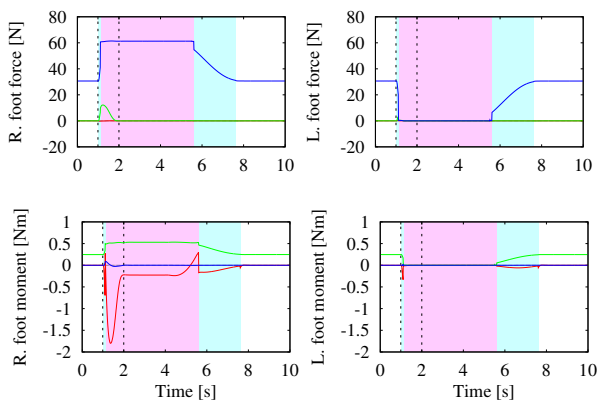


Fig. 4: Reactive VRP-GI based wrench distribution in response to a significantly larger disturbance.

N の外乱を $t = 1$ s から $t = 2$ s まで与えた。シミュレーション結果を Fig. 4 に示す。結果より、左右の足の力の分配により両脚支持状態から片脚支持状態への遷移が行われ、バランス動作を実現できていることが確認できる。一方で、DCM 擬似逆行列を用いた場合には、足部の回転によりバランス動作を達成できないことが確認された。よって、VRP 擬似逆行列を用いたバランス動作では、DCM 擬似逆行列を用いた場合には対応できない大きな外乱に対するバランス動作を達成できることがわかる。

6. 結言

VRP 擬似逆行列と DCM 擬似逆行列を指標とした接触レンチの分配に関して、外乱に対するバランス動作によっ

て比較を行った。シミュレーションでは、VRP を指標とした場合には DCM と比較して、脚先にかかるモーメントを抑制できることを確認した。また、VRP を指標とした場合の方が大きな外乱に対応できることも確認された。しかし、VRP を指標とした場合では接触状態の切り替えが早く行われるため、ロボットに対して継続的な力が長く加わった場合に、片脚支持の状態が続くことが考えられる。片脚支持中に外乱を受けると、両脚支持状態に比べてロボットが不安定になることが考えられる。そのため、継続的な外乱に対しては両脚支持状態を保つことが望ましく、DCM 擬似逆行列を用いることが適切である。そこで今後の課題として、未知の外乱に対する DCM および VRP 擬似逆行列の指標の区別を行うことや、継続的な外乱に対するバランス動作に対して、支持領域を可変とすることで外乱に合わせた支持状態の遷移を行うことを挙げる。

参考文献

- [1] S. Hyon. Compliant terrain adaptation for biped humanoids without measuring ground surface and contact forces. *IEEE Transactions on Robotics*, 25(1):171–178, feb 2009.
- [2] 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*, 40(3):457–472, 2016.
- [3] S. Kajita, M. Morisawa, K. Miura, S. Nakaoka, K. Harada, K. Kaneko, F. Kanehiro, and K. Yokoi. Biped walking stabilization based on linear inverted pendulum tracking. In *Intelligent Robots and Systems (IROS), IEEE/RSJ International Conference on*, pages 4489–4496, 2010.
- [4] M. Hosokawa, D. N. Nenchev, and T. Hamano. The DCM generalized inverse: efficient body-wrench distribution in multi-contact balance control. *Advanced Robotics*, 2018.
- [5] 宮原 笙, 金宮 好和, . ”CRB 角運動量および VRP 擬似逆行列に基づく全身制御による動的二足歩行”. 第 36 回日本ロボット学会学術講演会, 2018.
- [6] A. Albert. *Regression and the Moore-Penrose pseudoinverse*. Mathematics in Science and Engineering. Elsevier, Burlington (MA), 1972.
- [7] A. L. Hof, M. G. Gazendam, and W.E. Sink. The condition for dynamic stability. *Journal of Biomechanics*, 38:1–8, 2005.
- [8] 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*, 24:1013–1032, 2005.
- [9] M. W. Walker and D. E. Orin. Efficient dynamic computer simulation of robotic mechanisms. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control* 104,(205), 1982.
- [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 edition, 2004.