

人型ロボットの被衝撃時の角運動量変化率による ICP 移動量を最小化したステップ動作

宮田明典 (東京都市大学) 金宮好和 (東京都市大学)

1. 緒言

人型ロボットのバランス制御は、多自由度系の制御が難しさから、繰り返し計算による最適化など様々なアプローチが研究されてきた [1]。一方で、線形倒立振子 [2] といった簡易化されたモデルに基づき、Divergent Component of Motion (DCM) [3] や Centroidal Moment Pivot (CMP) [4] といった動的指標に関する研究が盛んに行われている。これはロボットにおける接触力と重心の運動の関係を位置で表すことのできる指標であるため、平地での歩行動作から、階段の昇降など様々な場面でこの指標が用いられている [3][5]。文献 [6] では、Virtual Repellent Point (VRP) を指標とした VRP 擬似逆行列が、非繰り返し計算での両足のレンチ分配に有用であることが示唆されている。またロボットが想定していなかった外乱が加わった際に、バランス維持のためのステップ回数の指標である N step capturability にも活用されている [7]。Griffin らは 0 ステップで姿勢維持ができない場合でのバランス制御として、繰り返し計算による最適化を用いたステップ距離の最小化手法 [8] を提案しているが、全身の動作は最適化により生成されるものとなっている。ステップ時に要求される動作時間が短いことを考えると、全ての制御に繰り返し計算による最適化を用いることで、計算コストが大きな問題になると考えられる。

本稿では、簡易モデルに基づいた動的安定指標を利用し、角運動量変化率を利用したステップ動作でのバランス制御手法について提案する。この手法では、DCM を 2 次元平面上で表した Instantaneous Capture Point (ICP) [7] の移動量の最小化によるステップ幅の削減を繰り返し計算による最適化で行う。しかしロボットの制御は重心運動量に基づくバランス制御 [9] から、角運動量変化率により Base of Support (BoS) から CMP を出すことで ICP の移動が抑えられ、非繰り返し計算で達成される。また本稿理論のステップによって、狭い空間でもバランスを維持できることをシミュレーションにより確認する。

2. 動的安定指標

ICP は以下のように定義される。

$$\mathbf{r}_{ex}(t) = \mathbf{r}_g(t) + \frac{\dot{\mathbf{r}}_g(t)}{\omega} \quad (1)$$

本稿では、ロボットの重心高さを初期位置から動かさないことを想定しているため、重心の振る舞いは x - y 平面上のみで考えられる。よって $\mathbf{r}_{ex} \in \mathbb{R}^2$ を ICP, $\mathbf{r}_g \in \mathbb{R}^2$ を重心の地面投影点とする。また $\omega = \sqrt{g/\bar{z}_{com}}$ とし、 g を重力加速度、 \bar{z}_{com} を初期の重心高さとする。また ICP の速度は CMP を定義することで以下のように表

される。

$$\dot{\mathbf{r}}_{ex} = \omega(\mathbf{r}_{ex} - \mathbf{r}_{cmp}) \quad (2)$$

式中、 $\mathbf{r}_{cmp} \in \mathbb{R}^2$ は CMP とする。CMP は地面から重心への並進力が発生する点と定義される。これは重心にモーメントがかかっている場合、足裏の Center of Pressure (CoP) と別の位置に仮想的に存在する点である。したがって、CMP 位置は以下のように表される。

$$\mathbf{r}_{cmp} = \mathbf{r}_p + \frac{1}{f_{r_z}} \mathbb{S}_2^\times \mathbf{m}_t \quad (3)$$

式中、 $\mathbf{r}_p \in \mathbb{R}^2$ を CoP 位置、 f_{r_z} を z 方向反力の総和、 \mathbb{S}_2^\times を $(-1, 1)$ の歪対称行列、 $\mathbf{m}_t \in \mathbb{R}^2$ を地面からの x, y 軸周りに反モーメントとする。式 (2) から、ICP の速度は CMP との位置関係から定まり、直線的な軌道を取ることがわかる。また ω が常に正であることから CMP から離れるほど速くなる。これは連続的な動きを考えると、CMP から力を受け ICP が加速しているとも取れる。以上から、ICP の軌道は時間 t における CMP 位置を用いて式で表すことができ、式 (2) の微分方程式を解くことで以下となる。

$$\mathbf{r}_{ex}(t) = e^{\omega t}(\mathbf{r}_{ex}(0) - \mathbf{r}_{cmp}(t)) + \mathbf{r}_{cmp}(t) \quad (4)$$

3. 人型ロボットの全身制御

3.1 浮遊ベースロボットの運動方程式

本制御では重心位置およびベースリンクの姿勢を制御するため、以下の運動方程式を用いる [10]。

$$\begin{bmatrix} \mathcal{A}_M \\ \mathcal{A}_{\theta M} \end{bmatrix} \ddot{\mathbf{q}}_M + \begin{bmatrix} \mathcal{C}_B \\ \mathcal{C}_\theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathcal{G}_C \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \boldsymbol{\tau} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathcal{C}_{cC} \\ \hat{\mathcal{J}}_c^T \end{bmatrix} \bar{\mathcal{F}}^c \quad (5)$$

上段はロボットを剛体と仮定した場合の空間運動方程式、下段は関節空間の運動方程式を表す。本運動方程式では、一般化速度 $\dot{\mathbf{q}}_M \in \mathbb{R}^{6+n}$ が重心速度 $\dot{\mathbf{r}}_C \in \mathbb{R}^3$ 、ベースリンクの角速度 $\boldsymbol{\omega}_B \in \mathbb{R}^3$ 、関節速度 $\dot{\boldsymbol{\theta}} \in \mathbb{R}^n$ で表される。式中、 $\mathcal{A}_M \in \mathbb{R}^{6 \times (6+n)}$ を空間運動の干渉慣性行列、 $\mathcal{A}_{\theta M} \in \mathbb{R}^{n \times (6+n)}$ を関節空間での干渉慣性行列、 $\mathcal{C}_M \in \mathbb{R}^6$ を重心とベースリンクに関わる非線形項、 $\mathcal{C}_{\theta M} \in \mathbb{R}^n$ を各リンクに関わる非線形項、 $\mathcal{G}_C \in \mathbb{R}^6$ を重心にかかる重力、 $\boldsymbol{\tau} \in \mathbb{R}^n$ を関節トルク、 $\mathcal{C}_{cC} \in \mathbb{R}^{6 \times c}$ を先端部拘束方向から重心への変換行列、 $\hat{\mathcal{J}}_c \in \mathbb{R}^{c \times n}$ を重心から先端部拘束方向へのヤコビ行列、 $\bar{\mathcal{F}}^c \in \mathbb{R}^c$ を拘束方向接触レンチとする。また、 n をロボットの関節数、 c を先端部における拘束数とする。人型ロボットの入力関節トルクは、式 (5) の下段により計算される。

Output: $(\overline{\mathcal{F}}^c)^{ref}$

式中, $\mathcal{F}_C^{ref} = \dot{\mathcal{L}}_C^{ref} + \mathcal{G}_C$ で重心にかかるレンチ, $W_X \in \mathbb{R}^{c \times c}$ を VRP を指標とした重み行列, $\bar{\mathcal{F}}_a$ を内力項とし, 本稿では内力は制御せず $\bar{\mathcal{F}}_a = 0$ とする.

4. 最適化によるステップ戦略

4.1 ステップ位置の最適化

ステップ位置を決定するため, 外乱を受けた直後の CMP 位置とそれによる ICP の軌道に注目する. 遊脚が移動している間, CMP 位置を一定に保つように制御を行うことで, 式 (4) より定めたステップ時間 T_{step} での ICP 位置を推定できる. 推定された ICP 最終位置に CMP および CoP をおけるような位置を足の着地点に決定することで, 外乱に対するバランス維持を達成する. さらに, ICP の移動量を削減するため, ICP の動きが外乱直後に配置する CMP の位置により変化することに着目し, これが最小化されるような初期 CMP 位置を設定することで, ステップ幅の最小化をはかる. 最適化変数は CoP と CMP の位置とし, ステップ位置決定の目的関数と制約条件を以下のように設定する.

$$\begin{aligned} \min_{r_p, r_{cmp}} \quad & W_A \| (r_{cmp}(0) - r_p(0)) \|^2 + \\ & W_B \| (r_{ex}(T_{step}) - r_{cmp}(T_{step})) \|^2 + \\ & W_C \| (r_{cmp}(T_{step}) - r_p(0)) \|^2 \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \text{s.t.} \quad & r_p^{min} \leq r_p(0) \leq r_p^{max} \\ & r_{cmp}^{min} \leq r_{cmp}(0) \leq r_{cmp}^{max} \end{aligned} \quad (16)$$

式中, W_A, W_B, W_C は最初化重みである. 第一項では CoP と CMP の差を最小化しており, 重心周りのモーメントの発生を抑えている. 第二項では ICP の最終位置と CMP の最終位置の差を最小化し, 第三項では初期 CoP 位置と CMP の最終位置の差を最小化している. この二つの項により, 結果的にステップ幅を抑える動きをもつ. 2 節で述べたように, ICP の移動量を抑えるには初期 CMP が ICP 位置に近いほど効果的であると言える. 従って, BoS 内にしか配置できない CoP から, 重心周りにモーメントを生じさせることで, 支持境界を越え CMP を ICP に近い位置に配置する. 最適化で求まった CMP の最終地点から, 図 1 のように足首下と CMP の距離をオフセットとした地点をステップ位置とする. 制約条件は, CoP 位置が脚の支持領域内に収まること, また重心周りに過剰なモーメントを必要としないよう, CMP に制限範囲を課すことを目的として設定されている.

4.2 ICP 運動学によるバランス制御指令値

Step phase 中は, ICP が CMP 位置により決定される軌道通りに動くことが理想であると言える. そのため, ステップ間の CMP 指令値は ICP の PI フィードバックを考慮し, 式 (2) を r_{cmp} について解くことで以下のように与える.

$$r_{cmp}^{ref} = r_{ex} - \frac{1}{\omega} (\dot{r}_{ex}^{ref} + K_{pX} e_{ex} + K_{iX} \int e_{ex})$$

式中 $K_{pX} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$, $K_{iX} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ をそれぞれ ICP フィードバックの比例, 積分ゲインとする. ここから, 並

進運動量変化率指令値 $\dot{p}^{ref} \in \mathbb{R}^3$ は CMP と重心の関係から以下とする.

$$\dot{p}^{ref} = M(\omega^2(r_C - r_{cmp}^{ref}) - g) \quad (17)$$

さらに, シミュレーション中には, 外乱を受けている最中である reflex phase, 外乱が抜け足を踏み出して耐える step phase, ベースリンクの姿勢をフィードバックし上半身を初期の体勢に近づける recovery phase の三通りに分ける. とくに Step phase 中には, CMP を BoS 外に出すため, 最適化から求めた CoP と CMP の初期位置から重心周りモーメントを発生させる. よって角運動量変化率指令値 $\dot{l}_C^{ref} \in \mathbb{R}^3$ を以下とする.

$$\dot{l}_C^{ref} = \begin{cases} I_C \dot{\omega}_B^{ref} + \dot{I}_C \omega_B & \text{if reflex, recovery} \\ f_{rz}(r_{cmp}(0) - r_p(0)) & \text{if step} \end{cases}$$

ベースリンクの姿勢は以下のように指令する.

$$\dot{\omega}_B^{ref} = \dot{\omega}_B^{des} + K_{p\omega_B} e_{\omega_B} + K_{d\omega_B} e_{\omega_B} \quad (18)$$

式中, $K_{p\omega_B}, K_{d\omega_B} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ をベースリンクの比例, ダンパゲイン, $e_{\omega_B}, e_{\omega_B} \in \mathbb{R}^3$ をベースリンクの姿勢, 角速度誤差とする. 最適化により決定された CMP と CoP 位置から, Step phase 中のロボットの接触力を計算するまでの流れを Algorithm 1 にまとめる.

5. シミュレーション

シミュレーション環境は Choreonoid [11] を使用し, Fujitsu 社製 HOAP-2 [12] のパラメータに基づいた図 2 に示すスケルトンモデルを利用した. また床面は完全に凹凸のない平地としている. 外乱はベースリンクに対し z 軸に 50 mm の地点に, $[60 \ 10 \ 0]^T$ N を 50 ms の間加えた. またステップ時間 T_{step} は 0.2 s とした. 最適化重みはそれぞれ $A = 0.01, B = 5, C = 3$ とした. フィードバックゲインは, reflex で $K_{pX} = 1$,

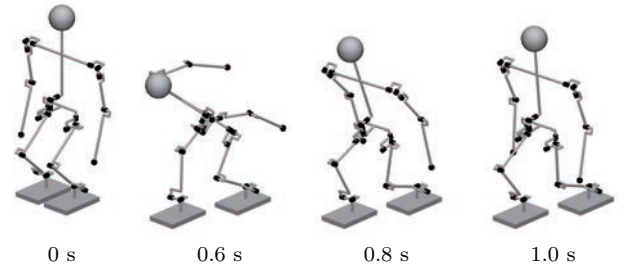


図3 シミュレーションの様子.

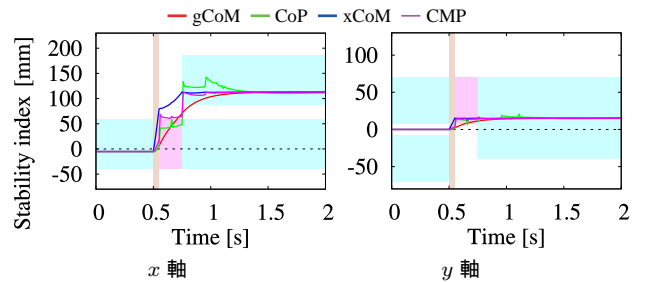


図4 x, y 各軸の動的指標の軌跡.

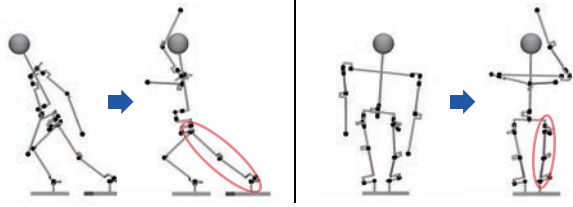


図5 重心周りモーメントを入力しない場合．

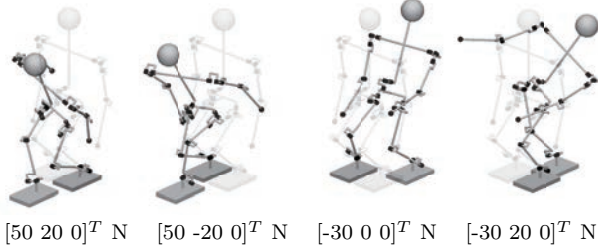


図6 多方向の外乱に対するステップ生成．

$K_{iX} = 0$, step で $K_{pX} = 20$, $K_{iX} = 0.1$, recovery で $K_{pX} = 100$, $K_{iX} = 0$ とし, ベースリンク姿勢は reflex phase のみ, $K_{p\omega_B} = 20$, $K_{d\omega_B} = 5$ とした．

図3にシミュレーション中のステップの様子を示す．また図4には重心と各動的安定指標のグラフを示す．グラフ中のオレンジの領域で外乱を受けており, 赤い領域でステップを行っている．グラフにおける $gCoM$ と $xCoM$ は重心の地面投影点と ICP を表している．図4のグラフより, ステップ後の重心位置が安定しており, バランスが維持できていることがわかる．また重心周りの角運動量変化率により, CMP が BoS の外にあるのに対し, CoP を内側に収まっていることが確認できる．同様な外乱条件下で, 角運動量変化率を発生させない場合の動作は図5のようになった．支持脚の関節が特異点に入っており, ステップ位置がより離れていることがわかる．このことから, CMP がステップ開始時の ICP 位置に近づけられていることで動作中の ICP の加速を抑え, 耐えられる外乱が大きくなっている．

さらに, このステップ位置は外乱直後の ICP の位置により決定されるため, 外乱の方向が斜め前や後方に変わったとしても, 図6のように柔軟に対応できることがシミュレーションより確認できた．

しかし, 本稿の手法におけるバランス制御では, y 軸方向の許容外乱が小さいことが問題としてあげられる．まず理由の一点として, 人を模した形状の足では x 軸に比べ y 軸方向の幅が小さいことから, 許容できる各足モーメントが小さい点である．二点目に, ICP に最も近い脚を支持脚とすると, y 軸方向外乱ではクロスステップのような動作になり遊脚が特異点に入りやすいことである．このような単ステップで達成できない問題の対処方法として, N step capturability [7] を利用した複数ステップを行うことが挙げられる．

6. 結言

本稿では, 動的安定指標を用いた最適化により, 外乱を受けた際のステップによるバランス維持戦略手法を提案し, 定式を用いた非線形繰り返し計算による制御シミュレーションにおいてこれを確認した．その結果, 重

心周りのモーメントにより CMP を ICP に近づけることで, ステップ幅の最小化を達成することができた．また最適化によるステップ位置の決定により外乱方向に対応したステップを生成することが確認できたが, y 軸方向の外乱への対応が難しく, 複数歩のステップが必要だと考えられる．

参考文献

- [1] S. Kuindersma, R. Deits and M. Fallon et. al.: Optimization-based Locomotion Planning, Estimation, and Control Design for the Atlas Humanoid Robot. In *Autonomous Robots*, vol. 40, pp.429-455, March, 2016.
- [2] S. Kajita, F. Kanehiro and K. Kaneko et. al.: The 3D linear inverted pendulum mode: a simple modeling for a biped walking pattern generation. In *IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Syst. (IROS)*, pp.239-246, August, 2001.
- [3] J. Engelsberger, C. Ott, A. Albu-Schaffer.: Three-dimensional bipedal walking control using Divergent Component of Motion. In *IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Syst. (IROS)*, pp. 2600-2607, 2013.
- [4] R. J. Griffin, A. Leonessa and A. Asbeck.: Ground Reference Points in Legged Locomotion: Definitions, Biological Trajectories and Control Implications. In *The Int. J. of Robotics Res.*, Vol. 24, pp.1013-1032, 2005.
- [5] J. Engelsberger, T. Koolen, and S. Bertrand et. al.: Trajectory generation for continuous leg forces during double support and heel-to-toe shift based on divergent component of motion. In *IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Syst. (IROS)*, pp.4022 - 4029, September, 2014.
- [6] M. Hosokawa, D. N. Nenchev, and T. Hamano.: The DCM generalized inverse: Efficient body-wrench distribution in multi-contact balance control (to be published). In *Advanced Robotics*, 2018, doi: 10.1080/01691864.2018.1503095.
- [7] T. Koolen, T. d Boer, J Rebuta.: Capturability-based analysis and control of legged locomotion, Part 1: Theory and application to three simple gait models. In *The Int. J. of Robotics Res.*, Vol. 31, pp.1094-1112, 2012.
- [8] R. J. Griffin, A. Leonessa and A. Asbeck.: Disturbance Compensation and Step Optimization for Push Recovery. In *IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Syst.*, pp.5385-5390, 2016.
- [9] D. E. Orin, A. Goswami, and S. H. Lee.: Centroidal dynamics of a humanoid robot. In *Autonomous Robots*, vol. 35, pp. 161-176, 2013.
- [10] B. Henze, M. A. Roa, C. Ott.: Passivity-based whole-body balancing for torque-controlled humanoid robots in multi-contact scenarios. In *The Int. J. of Robotics Res.*, pp.1522-1543, October, 2016.
- [11] S. Nakaoka.: Choreonoid: Extensible virtual robot environment built on an integrated GUI framework. In *IEEE/CISE Int. Symposium on System Integration (SII)*, pp.79-85, December, 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.