

ZMP 安定領域に基づくヒューマノイドロボットの立位姿勢保持スイッチング制御

Standing Balance Switching Control for Humanoid Robots based on ZMP Stable Region

前田 紘希 † 加藤 昇平 † 中村 宗広 †
Hiroki Maeda Shohei Kato Munehiro Nakamura

1 はじめに

ヒューマノイドロボットは人間と同様に 2 足歩行によって移動するため、ロボット専用のインフラを整備することなく利用できるというメリットがある。しかし、ヒューマノイドロボットは全高に対し支持脚多角形が狭いため、立位姿勢から転倒しやすい。この問題を解決する方法として姿勢制御が用いられる。ロボットの姿勢制御とは、予期せぬ外乱に対して身体を適切に動かすことで再び安定状態に収束させる制御であり、ロボットが未知環境でタスクを遂行する上で必要不可欠である。本研究ではヒューマノイドロボットの安定な立位姿勢保持を目的とし、Zero Moment Point (ZMP) [1] に基づいて関節制御パラメータを動的に変更し姿勢制御をオートスイッチングする手法を提案する。姿勢制御には丸山らが提案した体幹コンプライアンス制御 [2] を実装する。また、関節制御にはフィードバック制御である PID 制御を用いる。

2 体幹コンプライアンス制御

本研究で用いる体幹コンプライアンス制御では次の手順で制御を行う。まず、倒立振子に基づく重心速度制御法 [3] により、目標重心速度を実現するための目標 ZMP を算出する。次に目標 ZMP に追従するよう ZMP 補償制御 [4] を用いることでヒューマノイドロボットの重心制御を行う。そして PID 制御によって最終的な関節角度の操作量を調節する。

3 安定指標に基づくオートスイッチング

立位姿勢保持制御ではヒューマノイドロボットが特定の目標姿勢になるまで制御を行う。しかし、本研究ではロボットの安定指標に基づいて比較的安定な姿勢までの制御を行う手法を提案する。これにより目標姿勢まで制御しているときに発生するオーバーシュートを抑制し、その上で素早く安定姿勢を保持できると考えられる。また、ロボットに対して複数方向から外乱が発生した場合にも外乱を増幅させる制御を抑制することができると考えられる。

提案手法では安定指標である ZMP の位置によって図 1 に示すようなヒューマノイドロボットが安定姿勢かどうか判定する。安定姿勢と判定される ZMP の範囲を ZMP 安定領域と呼び、ZMP 安定領域内では PID ゲインを 0 にして立位姿勢保持制御をオフにする。PID ゲインの ZMP 安定領域は図 2 に示すような超楕円を使用する。これはヒューマノイドロボットの支持脚多角形をほぼ包含しており、また少ないパラメータ数で形状を容易に変更可能であるためである。超楕円は式 1 で表すことができる。

$$\left| \frac{x}{a} \right|^n + \left| \frac{y}{b} \right|^n = 1 \quad (1)$$

a, b はそれぞれ x, y 方向の半径であり、 n によって曲率半径が変化する。また、 $a = b = 0$ のとき、ZMP 安定領域なしの状態となり、常に姿勢制御を行う従来手法と同様になる。ZMP 安

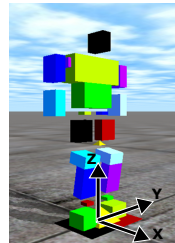


図 1 KHR-2HV

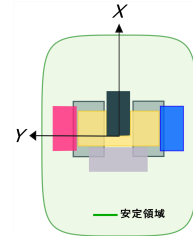


図 2 ZMP 安定領域

定領域はロボットごとに異なり経験的に求めることは困難であるため、多点探索手法である NMS [5] を用いて最適化する。

制御手順としては、まず ZMP を算出し ZMP が安定領域内に存在するか判定する。次に ZMP が安定領域内に存在する場合、立位姿勢保持制御をオフにする。また、ZMP が安定領域内に存在しない場合、PID ゲインを用いて立位姿勢保持制御を行う。

4 最適化実験

物理シミュレータ Open Dynamics Engine (ODE) [6] を用いてシミュレーション実験を行った。ロボットモデルは近藤科学の KHR-2HV [7] を使用した。本研究の立位姿勢保持制御では KHR-2HV の下肢全 10 自由度を制御する。また、PID ゲインと ZMP 安定領域を同時に最適化した。最適化では ZMP 安定領域のパラメータ数 3 と PID ゲインのパラメータ数 4 の合計パラメータ数 7 を同時に最適化する。最適化に用いた目的関数 E を次式に示す。

$$E = S + G \quad (2)$$

$$S = \sum_{t=0}^U \left| \mathbf{P}(t) + \sqrt{\frac{h}{g}} \dot{\mathbf{P}}(t) + \sqrt{h} \ddot{\mathbf{P}}(t) \right|^2 \quad (3)$$

$$G = U - T_{fall} \quad (4)$$

目的関数 E は 0 を最適値とし、 S と G で構成される。最適化では目的関数 E が最小となるパラメータを探索する。 $\mathbf{P}(t)$ は時刻 t のロボット全体の重心を床面に正射影した点、 h, g はロボットの重心位置の z 軸における値と重力加速度である。 S はロボットの重心の位置と速度、加速度から導出され、重心位置が高ければ重心速度の影響が大きくなる。 U はシミュレーション時間、 T_{fall} はロボットが転倒するまでの時間を表している。

本実験ではシミュレーション時間を $U = 1500$ ステップとする。また、シミュレーション内で時間が 1 ステップ進むことと現実で時間が 0.001 秒進むことが等価であるとすると。外乱はシミュレーション開始 10 ステップ後にロボットの重心位置に瞬時にひとつ与えた。KHR-2HV は左右対称なロボットであるため、本実験では左方向からの外乱で安定性を評価した。外乱方向はロボットの前方向からの外乱を $0[\text{deg}]$ とし、反時計回り

† 名古屋工業大学, Nagoya Institute of Technology

に 45[deg] 刻みで 180[deg] まで与えた．また，外乱の大きさはいずれも，ひとつの外乱を与えたときにロボットが制御なしの状態ですぐ倒れる最小の大きさとした．比較として，ZMP 安定領域のパラメータを $a = b = 0$ にして ZMP 安定領域を用いない従来手法の制御も行った．

5 実験結果と考察

最適化結果は $n = 477.735, a = 36.946, b = 22.367$ となった．実験結果を表 1 に示す．表 1 は外乱方向ごとの評価値 E と安定指標 ZMP の積分値を示している．また，図 3 は特に顕著な差が出たロボット左前方 45[deg] からの外乱時における重心位置の時系列データである．表 1 では全体的に提案手法である

表 1 評価値 E と $\int ZMP dt$

外乱方向	評価値 E		$\int ZMP dt [m]$	
	安定領域あり	安定領域なし	安定領域あり	安定領域なし
0	0.11342	0.11729	18.86298	19.28747
45	0.16862	0.21724	84.12495	87.11181
90	0.57648	0.70966	191.57333	231.85426
135	0.37990	0.52098	176.24793	190.95398
180	0.16131	0.16203	8.42695	15.46065
平均	0.27994	0.34544	95.84723	108.93363
標準偏差	0.19503	0.25767	85.63593	98.85171

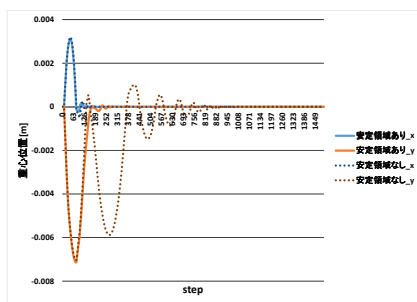


図 3 外乱方向 45[deg] における重心変化

ZMP 安定領域ありのほうが良い結果となっている．このことから ZMP 安定領域を設けることで ZMP 安定領域なしの従来手法より高い性能が出せることがわかった．

図 3 より， x 軸， y 軸方向のそれぞれ 50 ステップ，70 ステップ付近に見られる重心位置のピークはあまり変わらないことがわかる．また， y 軸方向の変化において，ZMP 安定領域ありの場合約 270 ステップで収束しているが，ZMP 安定領域なしの場合は振動して収束までに約 900 ステップかかっている．これはオーバーシュートな制御を行ったことで修正する制御が瞬間的に大きくなり，ロボットがバランスを崩したためである．また ZMP 安定領域ありの場合，ZMP 安定領域を設定したことで多少の姿勢の乱れを許容し，姿勢変化に対する過剰反応を抑制したものと思われる．

6 複数外乱を用いた実験

本実験では複数方向からの外乱を連続してロボットに与え，評価を行った．また，実験環境は最適化実験と同様にし，各パラメータは最適化実験時に得られたものを使用した．シミュレーション時間は $U = 2500$ ステップとした．外乱はシミュレーション開始 10 ステップ後，その後 1510 ステップまで 500 ステップ毎に与えた．また，外乱方向はロボットの前方向から時

計回りに 90[deg] 間隔で与えた．このとき，外乱の大きさはひとつの外乱を与えた時にロボットが制御なしの状態ですぐ倒れる最小の大きさの 0.9 倍とした．これは転倒回避不可能な外乱となるのを防ぐためである．また，比較として ZMP 安定領域を用いない従来手法での制御も行った．

7 複数外乱を用いた実験結果と考察

実験結果を図 4 に示す．本実験では ZMP 安定領域ありでは

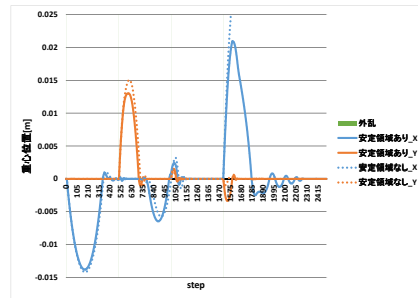


図 4 複数外乱時の重心変化

転倒しなかったが，ZMP 安定領域なしでは最後の外乱後に転倒した．このことは x 軸方向の重心変化を見てもわかる．また， x, y 軸方向ともに ZMP 安定領域ありのほうが重心変化が全体的に少なく，安定していることがわかる．このことから，ZMP 安定領域ありのほうが ZMP 安定領域なしに比べ複数方向からの連続した外乱に強いといえる．

8 まとめと今後の課題

本稿ではヒューマノイドロボットの立位姿勢の安定化を目的とし，立位姿勢保持制御において ZMP に基づいて安定領域を用いる手法を提案した．ZMP 安定領域を設定することによって安定姿勢付近でのノイズを許容し，過剰な制御を抑制することができた．しかしながら，従来手法からの性能向上が僅かであるため，ZMP 安定領域を用いた場合に ZMP に応じて段階的に PID ゲインを設定するなど改善の必要がある．また，ZMP 安定領域の設定方法や安定領域の基本の形状に関してより適切なものにする必要がある．本実験ではシミュレーションのみであったため，実機での有効性も検証したい．

参考文献

- [1] 梶田：“ゼロモーメントポイント (zmp) と歩行制御”，日本ロボット学会誌，20, 3, pp. 229–232 (2002).
- [2] 丸山, 松原, J. G.Hale, 森本：“強化学習を用いたヒューマノイドロボットによる転倒回避ステップ動作の学習”，日本ロボット学会誌，27, 5, pp. 527–537 (2009).
- [3] 杉原, 中村：“レートジャイロの非積分型フィードバックによるヒューマノイドロボットの体幹姿勢安定化”，日本ロボット学会学術講演会予稿集，3, pp. 26–27 (2006).
- [4] 長坂, 稲葉, 井上：“体幹位置コンプライアンス制御を用いた人間型ロボットの歩行安定化”，日本ロボット学会学術講演会予稿集，pp. 1193–1194 (1999).
- [5] J. A. Nelder and R. Mead: “A simplex method for function minimization”, Computer Journal, 7, 4, pp. 308–313 (1965).
- [6] R. S. et al. The Open dynamics engine, open source library for simulating rigid body dynamics. <http://ode.org>.
- [7] 近藤科学株式会社. KHR-2HV <http://www.koj-m.sakura.ne.jp/ode/>.