

スイッチング制御を用いたヒューマノイドロボットの立位姿勢保持

前田紘希[†] 加藤昇平[†]

[†]名古屋工業大学

1 はじめに

人の体格を模して作られたヒューマノイドロボットは、人間と同様の生活環境に馴染みやすく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て支持脚多角形が小さいため、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]に基づいて制御パラメータを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。

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の計算手順を示す。まず、PID 制御により目標重心位置を達成するための目標重心速度を算出する。次に、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。そして、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を制御する。従来研究 [5] では目標重心位置はロボットの初期位置で固定であったが、本研究では次節で述べるバネダンパモデルを用いて目標重心位置を制御する。

2.1 目標重心位置制御

目標重心位置制御ではロボットの振動を抑制するために下式のバネダンパモデルを用いる。

$$m\ddot{z} = -kz - D\dot{z} \quad (1)$$

$$\Delta z = -\frac{D\dot{z} + m\ddot{z}}{k} \quad (2)$$

m はロボットの質量、 z はロボットの初期位置を基準とした重心の z 軸座標で、 \dot{z} 、 \ddot{z} は重心の z 軸方向の速度と加速度である。また、 k 、 D はバネ定数とダンパ定数である。本手法では単位時間あたりの重心位置の変化量を求めるために、式 (1) を変形した式 (2) を用いる。

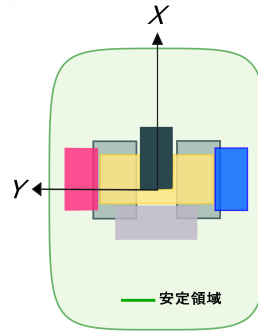


図 1: ZMP 安定領域

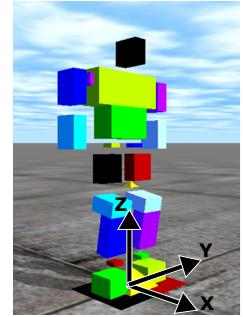


図 2: KHR-2HV

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目標姿勢になるまで制御を行う。しかし、本研究では立位姿勢において特定の目標姿勢ではなく、ロボットの安定指標に基づいた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、目標姿勢まで制御することで生じ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 安定領域内では立位姿勢保持制御をオフにする。ZMP 安定領域は図 1 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用意に変更可能であるためである。超楕円は下式で表現される。

$$\left| \frac{x}{a} \right|^n + \left| \frac{y}{b} \right|^n = 1 \quad (3)$$

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 安定領域がない状態となり、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[6] を用いて最適化する。

制御手順は、まず ZMP を算出し ZMP 安定領域内に存在するか判定する。次に ZMP が ZMP 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 ZMP 安定領域内に存在しない場合、目標重心位置制御に基づいて立位姿勢保持制御を行う。

4 複数外乱を用いた実験

物理シミュレータ Open Dynamics Engine(ODE)[7]を用いて実験を行った。ロボットモデルは近藤科学のKHR-2HV[8](図2)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。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。提案手法であるスイッチング制御+目標重心位置制御(手法A)と、従来手法のスイッチング制御のみ(手法B)、また目標重心位置制御のみ(手法C)、そしてスイッチング制御と目標重心位置制御ともになし(手法D)の4パターンで実験を行った。シミュレーション時間は2500ステップ(2.5秒)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1010ステップまで500ステップ毎に合計3つ与えた。このとき、外乱方向はランダムに設定し、外乱の大きさは一つの外乱を与えたときにKHR-2HVが制御なしの状態転倒する最小の大きさの0.7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。同じ設定の外乱を用いて4手法を比較する。外乱方向を変化させながら100試行実験した。

4.1 実験結果と考察

実験結果を表1に示す。表1では手法Dが転倒11回で最も悪い結果となった。続いて手法B(従来手法)が転倒9回となった。目標重心位置制御有りでは手法A(提案手法)、手法Cとも転倒8回となり最も良い結果となった。図3は外乱方向が137,184,51[deg]の試行におけるZMPの軌跡である。なお、軌跡はx軸成分とyをそれぞれ分割してプロットした。提案手法は初期においてx軸方向(前後方向)の変化が若干大きく

表1: 手法毎の転倒回数

手法	A	B	C	D
スイッチング制御	有	有	無	無
目標重心位置制御	有	無	有	無
転倒回数	8	9	8	11

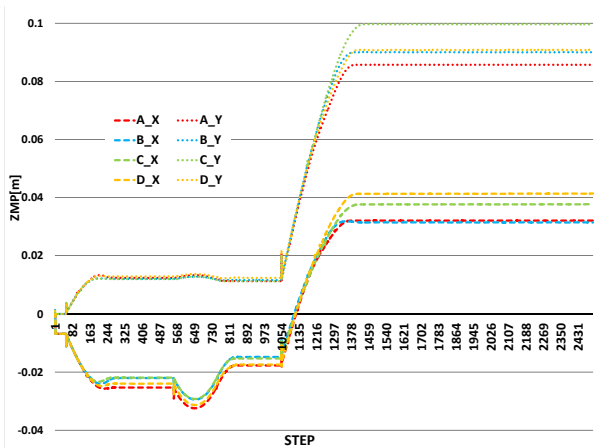


図3: ZMPの軌跡

なっているものの、後半では変化が小さく比較的良い結果となっている。また、y軸方向(左右方向)の変化は全体的に小さく良い結果となっている。

5 おわりに

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、ZMP安定領域に基づいて立位姿勢保持制御をオートスイッチングする手法を提案した。これに加えて、立位姿勢保持制御で用いる目標重心位置にバネダンパモデルを導入して振動吸収を試みた。実験により、複数外乱に対して目標重心位置制御を用いることで転倒確率の改善が確認された。しかしながら、目標重心位置制御を用いた場合、スイッチング制御の有無による改善がほとんど見られない。そのため、ZMP安定領域を用いた場合にZMPに応じて段階的にスイッチングする、ZMP安定領域を支持脚多角形に従って動的に変形させ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形状をより精査すべきと考える。本実験はシミュレーションによるものであったため、実機での有効性も検証していく。

参考文献

- [1] 梶田秀司. 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, Vol. 20, No. 3, pp. 229–232, 2002.
- [2] 丸山淳一, 松原崇充, Joshua G.Hale, 森本淳. 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, Vol. 27, No. 5, pp. 527–537, 2009.
- [3] 杉原知道, 中村仁彦. 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, No. 3, pp. 26–27, 2006.
- [4] 長坂憲一朗, 稲葉雅幸, 井上博允. 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] 前田紘希, 加藤昇平, 中村宗広. 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. FIT2015, Vol. 14, No. F-006, 2015.
- [6] J. A. Nelder and R. Mead. A simplex method for function minimization. *Computer Journal*, Vol. 7, No. 4, pp. 308–313, 1965.
- [7] R. Smith et al. The Open dynamics engine, open source library for simulating rigid body dynamics. <http://ode.org>.
- [8] 近藤科学株式会社. KHR-2HV <http://www.koj-m.sakura.ne.jp/ode/>.