

平成 21 年 5 月 29 日現在

研究種目：若手研究（B）
 研究期間：2007～2008
 課題番号：19760287
 研究課題名（和文） ロバスト I 予見制御とそのヒューマノイドロボットの歩行パターン生成への応用
 研究課題名（英文） Robust I Preview Control and its Application to Biped Walking Pattern Generation of Humanoid Robots
 研究代表者
 國松 禎明（KUNIMATSU SADA AKI）
 熊本大学・大学院自然科学研究科・助教
 研究者番号：30379309

研究成果の概要：

ヒューマノイドロボット（人型 2 足歩行ロボット）が歩行している際には、Zero Moment Point（ZMP）が支持多角形（片足支持の際は足裏領域）の範囲内に存在していることが知られている。したがって、この ZMP が支持多角形内に存在できるように重心軌道を作成する必要がある。しかし、従来は支持多角形内に留まることを陽に考慮した重心軌道の生成方法は開発されていなかった。そこで本研究では、誤差の最大値を直接評価できる予見制御を提案し、それをを用いて理論的に転倒防止を保証可能な重心軌道生成法を開発した。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,500,000	0	1,500,000
2008年度	1,400,000	420,000	1,820,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,900,000	420,000	3,320,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・制御工学

キーワード：I ノルム，歩容生成，ヒューマノイドロボット

1. 研究開始当初の背景

近年、ホンダの ASIMO に代表されるようにヒューマノイドロボット（人型 2 足歩行ロボット）の研究が盛んに行われている。一般にロボットが動歩行を行う際には Zero Moment Point（以後 ZMP）を適切に制御することで実現されている。この ZMP とは、歩行中にロボットの重心と慣性力によるモーメントがゼロになる路面上の点であり、ロボットが転倒せずに歩行を行っている際には、この ZMP が支持多角形の範囲内にあることが知られ

ている。ただし、支持多角形とはロボットの接地点集合が作る凸包のことであり、ヒューマノイドロボットにおいて、片足のみが接地している場合にはその足裏領域、両足を接地している場合には両足の足裏領域から作られる凸包である。

ヒューマノイドロボットでは、重心は滑らかに変化するが、ZMP は片足支持から両足支持に以降する際にステップ状に変化する。また、重心の変化に対して ZMP の変化は遅れて現れることが知られている。ところで、ステ

ップ参照入力に対して追従することを目標とする通常のサーボ系では、ステップ入力印加後から少し遅れて出力がそれに追従するが、目標 ZMP を参照入力として用いた場合、通常のサーボ系とは因果関係が逆転しているため実現することができない。そこでこの問題を解決するため、ヒューマノイドロボットのオンライン歩行パターン生成の一つとして、参照入力の未来の情報を事前に活用する予見制御が適用されている。

従来の方法では、誤差の 2 乗和平方根（以後、 l_2 ノルム）を評価関数とした最適予見制御が用いられていた。しかし、この方法では誤差の最大値を評価できないため、支持多角形内に留まることが可能な ZMP の存在を必ずしも保証できない。実際、歩行計画を途中で変更した場合には、ヒューマノイドロボット・HRP2 が転倒することが確認されており、このことは目標 ZMP を途中で変更した際にはロバスト性がないことを意味する。したがって、路面状況に応じて突発的に求められる障害物回避や緊急停止などといった動作を実現することは、緊急停止の一部動作を除いてほとんど実現できていない。上記のように突発的に発生する歩行計画変更を実現するために、まず、歩行中の各タイミングにおいて転倒しない歩幅変更の限界を知る必要があるが、現在までに報告されている方法では、すべての歩行変更パターンを計算したマップを持つことによって転倒するか否かを判定している。しかし、このマップを用いる方法では条件を変更するたびに新しいマップが必要となり、原理的には無限のパターンを持つ必要があることになる。したがって、歩行中に安定したオンライン歩行計画変更を実現するまでには至っていない。

2. 研究の目的

ヒューマノイドロボットが転倒しないためには、目標 ZMP と目標 ZMP を実現するような重心軌道より計算される整形後の目標 ZMP（以後、整形 ZMP）との誤差を支持多角形の範囲内に収める必要があるが、これは誤差の最大値ノルム（以後、 l_1 ノルム）が支持多角形から決まるしきい値以内となることに等しい。そこで本研究では、歩行中に安定したオンライン歩行計画変更を実現するために、 l_2 ノルムの代わりに l_1 ノルムを評価関数とする予見制御系を考え、 l_1 予見制御則の導出と、それを用いたヒューマノイドロボットのオンライン歩行パターン生成を目指す。

3. 研究の方法

各年度ごとに 3 つの課題を設定し、研究を行った。

(1) 2007 年度

l_1 ノルムを評価関数とする予見制御問題：

l_1 ノルムは、離散時間の線形時不変自律系に対して既知の初期値から LMI (Linear Matrix Inequality) 最適化問題を解くことによって得られるため、これを予見制御系に適用し、対象とする信号に関する l_1 ノルムの計算方法を明らかにした。それをもとに、状態フィードバックによる最適 l_1 予見制御則の解法を与えた。

ロバスト l_1 性能を評価関数とする予見制御問題：

上記の手法は、予見部の未来軌道や状態の情報が初期値の形として集約されるため、制御性能がその初期値に大きく依存する。しかし、歩行計画を変更する際に新たな初期値となる状態を正確に得ることは難しい。そこで、初期値をポリトープ型の集合として扱うことで、その初期値集合に対する l_1 ノルムの最悪値（ロバスト l_1 性能）を計算する問題を定式化し、その解法を明らかにした。それをもとに、状態フィードバックによる最適ロバスト l_1 予見制御則の解法を与えた。

ヒューマノイドロボットのオンライン歩行パターン生成への応用：

目標 ZMP を実現するような重心軌道を生成するために、目標 ZMP を参照入力、整形 ZMP を制御出力として制御系を構成する。このとき、目標 ZMP に整形 ZMP を追従させるような問題がヒューマノイドロボットのオンライン歩行パターン生成問題となる。上記 および で得られた結果をこの制御系に適用することで、 l_1 予見制御則およびロバスト l_1 予見制御則を設計し、シミュレーションにてその有効性を確認した。

(2) 2008 年度

l_1 予見制御の改良：

2007 年度の結果を用いて得られる l_1 ノルムの上界値には保守性が存在していたため、真値と上界の間には若干の隔たりが存在していた。そこで、その保守性を低減する手法を開発した。また、実際には l_1 ノルムがあるしきい値以下で保たれていれば歩行の安定性は保証されるため、 l_2 ノルムを評価関数に入れることで、収束性も考慮できるようにした。混合 l_2/l_1 予見制御も提案した。

ロバスト l_1 予見制御の改良：

2007 年度で得られたロバスト l_1 予見制御則は、大きな保守性が存在するために実用的ではなかった。そこで、上記と同様の手法を用いることで保守性を

低減化し、実用に耐えうる設計法を提案した。

ヒューマノイドロボットのオンライン歩行パターン生成への応用：

上記 および で得られた結果をヒューマノイドロボットのオンライン歩行パターン生成へ応用し、突然の歩行パターン変更を伴うシミュレーションにおいて、提案手法の有効性を確認した。

4. 研究成果

本研究では、以下の3つ成果を得た。

(1) l_1 予見制御

l_1 ノルムを評価関数とする予見制御を離散時間自律系の初期値問題として定式化し、 l_1 ノルムの上界を最小化する予見制御則が、LMI 最適化問題の解として与えられることを示した。

上記 では、 l_1 ノルムの上界を求める方法に保守性が存在していたため、最適 l_1 予見制御則を用いた場合でも、実際の l_1 ノルムより少し大きくなる場合があった。そこでこの問題を解決するため、予見制御を用いた場合に現れる出力の特徴を利用して、BMI (Bilinear Matrix Inequality) 最適化問題として定式化した。つぎに、BMI 変数を交互に固定することでLMIに帰着させて解くアルゴリズムを与え、この繰り返しLMIアルゴリズムが極所最適解に収束することを示した。また、初期値として上記の解を用いることで、で与えられる上界より保守性の少ない値が得られることを示し、シミュレーションにて真値に近い値が得られることを示した。

(2) 初期値に対してロバストな l_1 予見制御

l_1 予見制御は、予見部の未来軌道や状態の情報が初期値の形として集約されるため、制御性能がその初期値に大きく依存する。そこで、初期値をポリトープ型の集合として扱うことで、その初期値集合に対するロバスト l_1 性能の上界を最小化する予見制御則が、LMI 最適化問題の解として与えられることを示した。上記 では、ロバスト l_1 性能の上界を求める方法に大きな保守性が存在していたため、最適ロバスト l_1 予見制御則を用いた場合でも、実際のロバスト l_1 性能より大きくなっていった。そこでこの問題を解決するため、 l_1 予見制御と同様の方法でBMI 最適化問題として定式化し、繰り返しLMIアルゴリズムを用いて解が得られることを示した。そして、この繰り返しLMIアルゴリズムが極所最適解に収束することも示した。また、初期値として上記の解を用いることで、

で与えられる上界より保守性の少ない値が得られることを示した。

(3) 混合 l_2/l_1 予見制御

l_1 ノルムをあるしきい値以下に保ちつつ、 l_2 ノルムの上界を最小化する予見制御則が、LMI 最適化問題の解として与えられることを示した。

上記の方法で求めた混合 l_2/l_1 予見制御則には保守性が存在していたため、 l_1 予見制御と同様の方法で BMI 最適化問題として定式化し、繰り返しLMIアルゴリズムを適用することで、より保守性の少ない上界が得られることを示した。また、シミュレーションにて真値に近い値が得られることを示した。

(4) ヒューマノイドロボットのオンライン歩行パターン生成への応用

上記(1)から(3)で得られた結果をヒューマノイドロボットのオンライン歩行パターン生成へ応用し、突然の歩行パターン変更(つまり、突然の予見軌道変更)を伴うシミュレーションを行った。各制御則を適用した結果は以下の通りである。

l_1 予見制御則とロバスト l_1 予見制御則を用いた場合は、歩行パターンの変更直後において、目標ZMPと整形ZMPとの誤差の最大値が従来法の l_2 予見制御則を用いる場合よりも大幅に減少することを確認した。これによって、 l_2 予見制御則の使用では転倒してしまうような場合でも、転倒を理論的に防止できるため、 l_1 ノルムを評価関数とすることの有効性が示された。ただし、整形ZMPの目標ZMPへの収束性が悪くなることを確認した。

混合 l_2/l_1 制御側を用いる場合には、歩行パターン変更直後において、誤差の最大値を設定値以下に保ちつつ、収束性も大幅に改善されることを確認した。これによって、転倒を防止しつつ、回復速度も速くなるため、 l_1 予見制御と l_2 予見制御の両長所を取り入れたことの有効性が示された。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計1件)

Sadaaki Kunimatsu, Takahiro Fukuda, Makoto Kumon and Mitsuaki Ishitobi, Robust l_1 -infinity Preview Control for Biped Walking Pattern Generation, Artificial Life and Robotics, Vol. 14,

2009 (掲載決定), 査読有り.

[学会発表](計5件)

Sadaaki Kunimatsu, Takahiro Fukuda, Makoto Kumon and Mitsuaki Ishitobi: Mixed $l2/l$ -infinity Preview Control for Biped Walking Pattern Generation; SICE Annual Conference 2009, 2009年8月発表決定(査読有り), 福岡.

Sadaaki Kunimatsu, Takahiro Fukuda, Makoto Kumon and Mitsuaki Ishitobi: Robust l -infinity Preview Control for Biped Walking Pattern Generation; The Fourteenth International Symposium on Artificial Life and Robotics 2009, 2009年2月7日, 査読有り, 大分.

國松 禎明, 福田 敬大, 公文 誠, 石飛 光章: l 予見制御を用いた2足歩容生成; 第27回計測自動制御学会九州支部学術講演会, 2008年11月29日, 沖縄.

Sadaaki Kunimatsu, Takahiro Fukuda, Makoto Kumon and Mitsuaki Ishitobi: l -infinity Preview Control for Biped Walking Pattern Generation; SICE Annual Conference 2008, 2008年8月21日, 査読有り, 東京.

福田 敬大, 國松 禎明, 石飛 光章: l 制御を用いた2足歩行ロボットの歩行パターン生成; 日本機械学会九州支部九州学生会 第39回学生員卒業研究発表講演会, 2008年3月18日, 福岡.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

國松 禎明 (KUNIMATSU SADA AKI)

熊本大学・大学院自然科学研究科・助教

研究者番号: 30379309