

令和 6 年 5 月 26 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H03521

研究課題名（和文）人型ロボットの即応的接触運動生成の理論構築と実機検証

研究課題名（英文）Responsive contact motion generation for humanoid robots

研究代表者

田崎 勇一（Tazaki, Yuichi）

神戸大学・工学研究科・准教授

研究者番号：10547433

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 10,700,000円

研究成果の概要（和文）：人型ロボットは人間の活動環境に対する高い適合性を持つ反面、高重心ゆえの転倒リスクや制御の困難さが利用拡大の障壁となっている。本研究では即応的な多点接触運動や転倒回避制御およびそれに適したロボットハードウェアを開発することで、屋内環境のみならず、市街地や商業施設などの動的な屋外環境へ人型ロボットの活動範囲を拡大することを目的とした。この目的へ向けて、接触系列の近傍探索にもとづく計算コストの低い多点接触計画法、可捕集合のデータベース化にもとづく転倒回避制御法、低慣性脚機構を有した小型二足歩行ロボットの開発を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

学術的意義としては、組み合わせ論的複雑性を呈する接触計画問題に対して、リーズナブルな計算コストで許容可能な品質の接触系列を生成する方法を考案した点がある。可捕性集合を事前計算するアプローチについても一定の価値が認められるものの、実用性の向上に向けては検索コストの低減や環境の変化への対応など課題が残った。社会的意義としては、サービスロボットの利用拡大に向けて、リスクを伴わずに外界に対して積極的に接触することができるロボットの設計論・制御論の確立に一定の貢献ができた。

研究成果の概要（英文）：Although humanoid robots have high compatibility with living environment of humans, difficulty of control and risk of falling due to high center-of-gravity have been a barrier against expansion of its use. The objective of study was to expand the range of activity of humanoid robots not only to indoor but also to dynamic outdoor environments by developing responsive multi-contact motion generation and fall avoidance control techniques together with robotic hardware that is suited to implementing these methods. To this aim, we developed a multi-contact planning method based on the neighbor search of contact sequences, a fall-avoidance control based on the capturability database, and a small bipedal robot equipped with low-inertia leg mechanism.

研究分野：ロボット工学

キーワード：人型ロボット 多点接触 転倒回避

## 1. 研究開始当初の背景

市街地や商業施設における小型サービスロボットの潜在的需要は道案内、清掃、移動広告、警備、荷物搬送など多岐に渡る。しかしながら、整備された屋内環境と異なり、市街環境は不整路面や段差、動障害物が多く存在するため従来の移動ロボットの活動範囲は屋内環境や隔離環境に限られてきた。二足歩行型の移動体は「小さな接地面積に対して乗り越え可能な段差が大きい」「全方向に移動できる」「路面と足が擦らないので路面を傷つけない」「周辺環境に応じて接地面を選択して移動できる」といった多くの利点を有することから市街地での安全な移動に特に適した形態であると言える。その反面、推進自体に高度なバランス制御を要する上、高重心であるために転倒時に自身や周辺に与えるダメージが大きい。このため安全な運用にはロバストな転倒回避制御が不可欠である。また、人型ロボットは全身の自由度を利用して歩行に加えて「荷物を運ぶ」「手すりにつかまる」などの外界との接触を伴う動作を並行して実行できる。しかしながら、潜在的な接触部位の数は組み合わせ論的であるため、積極的に外界と接触する運動を実時間で生成することは未だ難しい。加えて計画外の予期せぬ接触はバランスを失う大きな要因であるため、現行の人型ロボットの運動制御においては「計画できない接触は回避する」ことが原則となっており、このことが人型ロボットの積極的な外界とのインタラクションの妨げになっている。現行の多くの人型ロボットは高減速比のアクチュエータを全身に分散配置する設計論が主流であり、高慣性のため俊敏な脚運動を伴う転倒回避運動の実装は難しい。また、ロボットの運動生成の方法論も計算コストの高いグラフ探索や数理計画法をベースとしたものが多く、時々刻々と変化する実環境に対する即応性に欠いている。このように機械設計、運動制御の両面において重く繊細な設計論となっていることが屋外環境における人型ロボットの活躍に対する大きな障壁となっている。

## 2. 研究の目的

本研究では市街地などの屋外環境で安全な移動が可能な人型ロボットの運動生成・制御システムの実現を目的とする。動的かつ多様な変化を見せる屋外環境中で活動可能な人型ロボットを実現するには、機械設計と制御システム設計の両面において従来の「重く繊細な」設計論から「軽量かつ頑健な」設計論への転換が求められる。この目的の達成に向けて、「多様な接触運動を瞬時に生成可能な運動生成手法の開発」「周辺状況を考慮した転倒回避制御の理論構築」「低慣性と高耐久性を有する脚機構の設計」を三つの柱として、理論的な諸課題と解決法を明らかにすると同時に、これらを統合して開発した人型ロボットシステムを実環境にて評価する。

## 3. 研究の方法

前述の目的を達成するために以下の個別テーマとこれらの統合に取り組んだ。

- ・ 多点接触運動を瞬時に生成可能な新しい運動生成手法の開発
- ・ 多様な路面形状や動障害物に対してロバストに衝突/転倒を回避できる人型ロボットの運動制御手法の理論的検討

- ・ 俊敏な足移動を可能とし，屋外環境の外乱に耐え得る軽量かつ頑健な脚機構の設計・評価

#### 4. 研究成果

##### 4.1. 多点接触運動を瞬時に生成可能な新しい運動生成手法の開発

多点接触運動を短い計算時間で生成するための方法として，接触系列の近傍探索にもとづく方法を開発した．本手法は接触系列と連続軌道の最適化を同時かつ反復的に行うものである．暫定的な接触系列に対し，いくつかの接触の有効・無効状態を切り替えることで得られる系列（近傍系列）を考え，連続軌道のコストを最も低減する近傍系列を新たな暫定系列とする操作を繰り返す．この方法により，事前知識なしで歩行や走行などの周期的な接触系列が自動生成されるだけでなく，手による接触も含む非周期的な系列も生成できることが示された． [Tazaki2022a][田崎 2021]

多点接触運動とは多少関連が低いが，人型ロボットの歩行パターン生成においてかかとからつま先への接触点の遷移を含む人間らしい歩行軌道の生成手法を考案し，シミュレーションで評価を行った．左右の足に対して個別に床反力中心を定義し，左右の脚間の荷重移動とかかとからつま先へ向かって連続的に移動する床反力中心の軌道を表現することで，両足指示期を含む一貫した歩行軌道の最適化法となっている． [Tazaki2022b][花崎 2021]

[Tazaki2022] Y. Tazaki: Fast Multi-Contact Motion Planning Based on Best-Neighbor Search of Contact Sequences, IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, pp.277-284, 2022.

[Tazaki2022] Y. Tazaki, S. Hanasaki, S. Yukizaki, Y. Mitazono, H. Nagano, Y. Yokokohji: A continuous-time walking pattern generator for realizing seamless transition between flat-contact and heel-to-toe walking, Advanced Robotics

[田崎 2021] 田崎 勇一: 重心力学の解析解と微分動的計画法にもとづく多点接触運動生成, 日本ロボット学会第 39 回記念学術講演会, 2C1-01, 2021.

[花崎 2021] 花崎仁実, 田崎勇一, 永野光, 横小路泰義: 人型ロボットのかかと接地・つま先離地による高速歩行のための遊脚軌道の設計, ロボティクス・メカトロニクス 講演会, 1A1-D03, 2021.

##### 4.2. 多様な周辺状況に対応可能な転倒回避制御手法の理論的検討

外乱に対して即応的に反応し，転倒を回避する人型ロボットの運動制御の実現を目指し，従来の可捕性解析の理論を基礎とした転倒回避制御系の開発を行った．具体的には，状態空間を離散化することで非凸な着地可能領域や接地期間に関する非線形性を許容可能な可捕集合の計算手法を考案し，可捕集合をオフラインで計算して制御のメモリに格納することで，制御時に少ない計算コストで着地位置やタイミングを決定する方法を提案した． [Tazaki2021]

可捕集合を事前計算することのデメリットは環境の多様性や変化への対応が困難となることであるが，この点については期間中に十分な検討は行えなかった．

Y. Tazaki Real-time Step Adaptation for Bipedal Robots Utilizing Pre-computation of Capture Regions, 2020 IEEE-RAS 20th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids), 2021.

### 4.3. 俊敏な運動性を備えた人型ロボット実験機の開発と多点接触運動・転倒回避制御の実機評価

多点接触運動や転倒回避運動の実機評価を目的とし、俊敏な脚運動が可能な小型二足ロボットを開発した。各脚に6自由度パラレルリンク機構を採用し、アクチュエータを胴体基部に集約することで脚慣性の大幅な低減を実現した。基礎試験を実施し、転倒回避運動における生み出し動作などを実現するために十分な運動性能を有していることを確認した。残念ながら期間中には実機を用いた転倒回避運動の試験は行えなかった。また、多点接触運動についても実機では実現できなかった。多点接触を伴う運動の実現には、末端の力センサからの接触部位の推定あるいは分布接触センサによる接触検知などの仕組みが必要と考えられ、これらについては継続的に取り組んでいきたい。

田崎勇一 6 自由度パラレルリンク脚機構を有する小型二足ロボットの開発 第2 報, ロボティクス・メカトロニクス 講演会, 1A1-E28, 2023.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 0件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Katayama Sotaro, Murooka Masaki, Tazaki Yuichi	4. 巻 37
2. 論文標題 Model predictive control of legged and humanoid robots: models and algorithms	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Advanced Robotics	6. 最初と最後の頁 298 ~ 315
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/01691864.2023.2168134	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tazaki Yuichi, Hanasaki Satomi, Yukizaki Soh, Mitazono Yugo, Nagano Hikaru, Yokokohji Yasuyoshi	4. 巻 37
2. 論文標題 A continuous-time walking pattern generator for realizing seamless transition between flat-contact and heel-to-toe walking	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Advanced Robotics	6. 最初と最後の頁 316 ~ 328
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/01691864.2022.2120774	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Y. Tazaki
2. 発表標題 Fast Multi-Contact Motion Planning Based on Best-Neighbor Search of Contact Sequences
3. 学会等名 2022 IEEE-RAS 21st International Conference on Humanoid Robots (Humanoids) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 S. Hanasaki, Y. Tazaki, H. Nagano, Y. Yokokohji
2. 発表標題 Running Trajectory Generation Including Gait Transition between Walking Based on the Time-Varying Linear Inverted Pendulum Mode
3. 学会等名 2022 IEEE-RAS 21st International Conference on Humanoid Robots (Humanoids) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Y. Tazaki
2. 発表標題 Real-time Step Adaptation for Bipedal Robots Utilizing Pre-computation of Capture Regions
3. 学会等名 2020 IEEE-RAS 20th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids), 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 花崎仁実, 田崎勇一, 永野光, 横小路泰義
2. 発表標題 人型ロボットのかかと接地・つま先離地による高速歩行のための遊脚軌道の設計
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス 講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 和田鼓太郎, 田崎勇一, 永野光, 横小路泰義
2. 発表標題 複数の観測データの統合による準静止物体を除去した近接点ポーズグラフ地図の構築
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス 講演会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	玄 相昊  (Hyon Sang Ho)  (30344691)	立命館大学・理工学部・教授   (34315)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------