

令和 4 年 5 月 23 日現在

機関番号：12601

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2020～2021

課題番号：20K23340

研究課題名（和文）運搬物体と路面に応じた踏破性獲得に基づく外乱下でのヒューマノイドの適応移動計画

研究課題名（英文）Robust Navigation for Humanoids Under Disturbances Based on Traversability Map Depending on Carrying Objects and Footholds

研究代表者

小椎尾 侑多 (Kojio, Yuta)

東京大学・大学院情報理工学系研究科・特任助教

研究者番号：30886065

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究は、砂利や土などの不整地や障害物がある複雑環境における、運搬物や路面状況に応じたヒューマノイドの自律的移動の実現を目的とした。物体運搬中のある地点が踏破可能かどうかをロボットが試行錯誤的に学習し記憶することで、未知環境において与えられたゴール地点まで移動できるようになる。また、試行錯誤の段階で受ける未知外乱への自律的対処法を明らかにした。様々な実機実験によりそれらの有効性を検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ヒューマノイドロボットは人間に代わって重労働や危険作業を行うことが期待されているが、実用化にはいまだほど遠い。本研究は、そのような事前に予想できない環境における、ヒューマノイドの安定移動および物体運搬実現を目指した研究である。本研究により、操作者がロボットに目標ゴール地点のみを与えるだけで、物体抱え運搬および台車や一輪車を用いた運搬が実現できるようになったことを確認した。また、屋外環境における移動性能検証も行った。

研究成果の概要（英文）：This research aims to realize autonomous locomotion for humanoids in complex environments with uneven terrain and obstacles such as gravel and sand, depending on the transported object and road surface conditions. The robot is able to move to a given goal point in an unknown environment by learning and memorizing, through trial and error, whether a certain location can be traversed or not. We have also clarified how the robot autonomously deals with unknown disturbances during the trial-and-error phase. The effectiveness of these methods was verified through various experiments with real robots.

研究分野：ヒューマノイド

キーワード：適応移動計画 安定化制御 物体運搬

1. 研究開始当初の背景

(1) 本研究の着想に至った経緯

筆者は、アメリカの DARPA が主催した災害救助を模したロボット競技会の 2015 年決勝戦に参加した。ロボットの種類に関する規定はなかったものの参加チームのほとんどは二足歩行ヒューマノイドで参加し、ヒューマノイドの汎用性の高さを改めて実感した一方、競技内容はドア開けやレバー操作など人間からすると簡単なタスクにもかかわらず競技結果は人間の代替として期待できると言えるものではとてもなかった。実際に、転倒し競技を一時中断せざるを得ないロボットが相次ぎ、一度も人間の物理的介入なく競技できたのはわずか 1 チームだけであったが、それでも全タスクは完遂できておらず、転倒防止優先で動作は遅く保守的なものとなっていた。この経験を受けて筆者は、ヒューマノイドの実用化のためにバランス制御技術が大きく欠けていると感じ、修士課程では歩行制御およびバランス制御に取り組み、踏み出しによる転倒回避や足場から力を受けやすい例として水中歩行を実現した。しかし、ヒューマノイドの安定化自体が難しいため、こうした安定化制御だけに特化した研究が行われがちではあるが、本来のヒューマノイドの役割は移動や転倒回避ではなく、人間に代わって作業を行うことであり、作業を見据えた研究が必要である。筆者は、従来の安定化制御では作業動作生成法との統合が困難であることを指摘し、博士課程ではそれらの統合を前提とした手法・システムの研究に取り組み、外乱下での自律作業安定化を実現した。筆者はこれまで、作業の構成要素を直立状態での物体操作とそれを繋ぐ移動としていた。しかし、作業の中には、物体を両腕に抱えた運搬や台車に乗せて運ぶといった移動が主な目的となる作業もある。その道具を用いた運搬作業においても、外乱対応や未知環境での自律適応移動に関する研究が未熟であることに気づき、本研究の着想に至った。

(2) 関連研究の動向

ヒューマノイドに対する期待から、等身大ヒューマノイドが世界中で開発されてきたが、DARPA の競技会での課題を受け、その研究は国内外でさらに活発化している。しかし、依然これらのヒューマノイドは研究用プラットフォームとして使用されており、一般向けに製品化されているものはない。Boston Dynamics 社の新型 Atlas は雪中歩行や後方宙返りなど高いバランス性能と運動性能を示しているが、同社で現在量産販売予定であるのは四足歩行ロボットである Spot のみであり、等身大ヒューマノイドの実用化には未だ課題が多いと考えられる。昨今の状況を受け、特に物流業界におけるロボットの需要は急増すると考えられる。車輪ロボットでは実用化への動きが現実的になっているが、人間の代わりに果たすのに適しているヒューマノイドによる実環境における物体運搬に関する研究はまだなされていない。

2. 研究の目的

本研究は、未知環境でかつロボットに対し未知外力が発生するような状況下で、ヒューマノイドがそれらに適応しながら多様な物体の安定移動を実現することを目的とする。その目的を達成するための構成要素として、(i) 未知外力に対する安定化制御、(ii) 目的地まで誘導する移動計画、(iii) 運搬状況および環境の認識・適応、が考えられる。ヒューマノイドは身体的に転倒しやすく、未知外力がある環境でも転倒しないよう安定化制御に関する研究はこれまでで多くなされてきた。しかし、これらの研究では、ロボットの周辺はおおよそ平坦であるとしていて、溝や壁などがある環境に対応していない場合が多い。また、ロボットの想定モデルからずれる運動はすべて外乱として扱っており、運搬物体の物理特性誤差や斜面の認識誤差などまで外乱として扱ってしまうため所望タスクの継続性を損なわせてしまっていた。障害物がある環境でロボットに対する外乱が少ないという想定で移動計画する研究や、運搬物体の物理特性をオンラインで推定する研究もなされているが、それらと安定化制御にはトレードオフの関係があり統合は困難であった。これに対し筆者は、すべての統合を前提とした手法・システムが必要であるとし、着地可能領域を考慮したオンライン歩容生成および長期的外乱適応制御を提案した。本研究は作業を行うための移動計画にさらに焦点を当て、構成要素 (ii)、(iii) に主に取り組む。

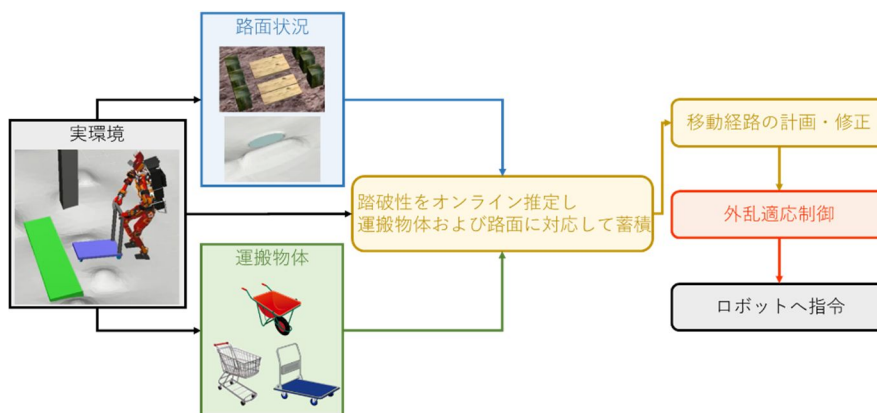


図 1 外乱下で物体運搬するヒューマノイドの適応移動実現システム

3. 研究の方法

本研究が構想する外乱下で物体運搬するヒューマノイドの適応移動実現システムを図1に示す。これまでヒューマノイドの移動計画では、ヒューマノイドの移動能力を活かせるよう、どこに足を着くかを厳密に計画していた。しかし、台車や一輪車などの車輪付きの物体運搬時に運搬物体の経路を計画する一方、ヒューマノイド側で着地位置まで決定してしまうのは過拘束であるだけでなく、移動のロバスト性悪化にもつながる。そこで、本研究では運搬物体の経路のみを陽に計画し、それに追従するようなロボットの着地位置を、外乱状況を考慮してオンラインで生成する方法を提案する。また、ヒューマノイドの物体運搬では、物体に応じて踏破可能な路面に大きく違いが生じ、多様な環境において多様な物体を運ぶ状況を事前に把握することは困難であることに着目し、踏破性をオンラインで推定し運搬物体および路面に関連させた踏破性を蓄積する運搬物体と路面に応じた踏破性獲得法を提案する。本研究は、バランス制約が厳しいヒューマノイドにおいて、巧みに外乱に対処しつつ自身の構造変化と周辺環境への自律適応を可能にするという点で、これまでにない成果が期待できると考える。本研究では、まず、踏破性蓄積のための路面状況識別方法を明らかにする。段差や溝、スロープなどの差異を見分けるための高さ・勾配情報を用いた形状認識法、および同形状でも泥やコンクリート、水などの差異を見分けるための物体認識法を提案し、それぞれの特徴に基づいて路面状況を学習・記憶することで、未知環境に次第に順応できるようになる。また、学習した路面記憶からロボットが着地可能な領域を識別し、オンライン外乱適応歩容生成に用いる。次に、運搬物体の分類法を明らかにする。抱え上げ運搬か押し動作運搬、台車の自由輪か固定輪、など運搬方法および運搬物体に応じて移動形態が異なる。本研究ではこれを操作性と呼び、操作性に応じて移動経路を計画する。本研究の初年度までにこれらの実装を目標とする。次年度は、まず、踏破性のオンライン推定法を提案する。視覚情報によるロボット自身および周辺の現在状態とロボットの行動意思と関連付けることで踏破できているかを把握できると考える。これにより推定された踏破性を、初年度に提案した運搬物体および路面認識に応じて蓄積する踏破性マップを構築する。最後に、人間が運んで欲しいものと運んで欲しいゴールのみを指令するだけで、その後は人間の介入なく未経験な屋外でもタスクを遂行できるようになることを、等身大ヒューマノイドを用いた実験により実証する。

4. 研究成果

本研究により得られた成果として以下の4つが挙げられる。

(1) 運搬物推定・環境認識誤差にロバストな移動制御

これまでのヒューマノイド研究では、環境を認識してそれに応じて歩容を決定する際には、ロボットの動的な現在状態が考慮されていないことが多かった。これは、足場という離散的な制約を考慮しつつ、ロボットのバランス制約を扱う最適化問題をリアルタイムに解くことが困難なためである。筆者はこれに対し、ロボットのバランス制約の解析解に利用し、また、足場制限を幾何問題に落とし込むことで、それら両方を考慮した歩容を1[ms]未満で高速に求める方法を提案した。さらに、ロボットの移動戦略として、全身揺動も行えるようにした。足場の変化に応じて外乱対応が変化する様子を図2に示す。ロボットの前方に足場がある場合は踏み出しにより外乱対応する一方、足場が制限されている場合は腕を振ることで転倒を回避することができる。これは足場が大きく制限される災害現場などで特に有用であると考えられる。物体運搬などで腕を動かすことができない場合など状況に応じて運動に制限を与えることも可能である。

環境を認識して移動する場合、認識および自己位置の推定の誤差は避けられない。そこでそれらの誤差にロバストな遊脚軌道生成および足先力制御を行った。認識誤差が数[cm]であるのに対し、高さ方向に9[cm]の誤差を意図的に与えた場合も歩行を継続できることを確認した。また、運搬物の変化は予期せぬ斜面などの影響により物体から受ける未知外力に対しても、ロボットの重心状態に対する外乱オブザーバを適用することで対応できるようになった。



図2 足場に応じた歩容変化。左: 踏み出しによる転倒回避。右: 前方に足場がないため上半身を揺動することで転倒回避。

(2) 運搬状況に応じた踏破性マップの更新

(1)の制御により未知環境での物体運搬の試行錯誤が可能となった。まず、ロボットは高さ情報のみを用いて踏破可能で最短のルートを探査する。しかし、当初は踏破可能と判断した場所でも踏破できない場合が当然現れる。その際に、その位置を踏破不可能として記憶することで新た

なルートを再探索する．ここで、踏破性は運搬物に依存することに注意して、分類した運搬物ごとに踏破性マップを保存する．踏破マップのレイヤーは以下の3つからなる：(i) 勾配レイヤー、(ii) 高さレイヤー、(iii) 物体レイヤー．物体レイヤーは勾配や高さのような形状情報ではわからない踏破性を、物体ラベル情報を用いて補正するレイヤーである．ロボットはゴール地点に到着するまでの間、踏破不可能な場所を見つける度にこれらのレイヤーの判断基準を変更することで踏破性マップを更新する．このように踏破性マップが学習されると、初見の環境でもスムーズにゴール地点まで物体運搬することができるようになる．ただし、本研究では実環境におけるこの検証を十分に行うことができなかった．本研究の後続の研究でまず取り組むことが期待される．一輪車運搬中の踏破性マップ更新の様子を図3に示す．



図3 一輪車運搬中の踏破性マップ更新の様子

(3) 高周期オンライン環境認識によるロバスト移動システム

環境に素早く適応するためには環境認識処理の高速化が不可欠である．そこで本研究では、足場環境を凸包に処理することで、ローレベルの制御器での計算コストを下げた．認識された着地可能領域の例を図4に示す．具体的には、ロボットの視覚センサから得られた環境情報を蓄積し、未観測地点については周囲の情報を用いて推定する．蓄積した情報を2.5次元情報へ変換し、着目した画素を中心とした足平サイズの領域を考慮して、環境の凸性、勾配、遊脚軌道を妨げる障害物の有無、をもとに着地可能か否かを判断する．その後、得られた二値画像を凸多角形集合に変換する．ローレベルの制御器では平面上の着地位置のみを決定し、その後、所望着地位置周辺の高さおよび姿勢を、環境情報を用いて更新する．これにより計算コストを大きく下げることができる．以上により、これまで低周期で扱っていた環境情報が高速に扱えるようになり、(1)の制御と合わせて環境に合った咄嗟の対応ができるようになった点が大きな成果であるといえる．

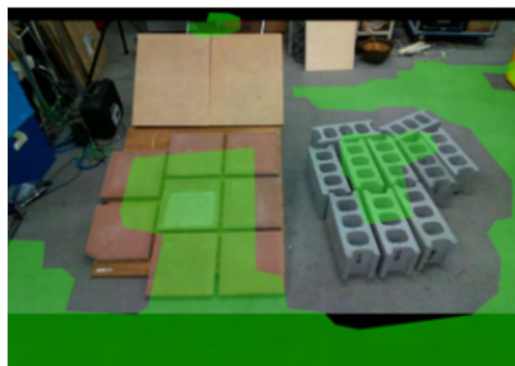


図4 着地可能領域認識

(4) 屋外実験検証

実環境での移動性能を評価するため、大学構内の屋外移動実験を行った．その様子を図5に示す．ロボットに搭載されたバッテリーの稼働限界までロボットは転倒せず歩行を継続することができた．また、芝生や土、木の根の上でも踏破することができることを確認した．屋外での歩行を実現できるヒューマノイドは世界的にもまだまだ少なく、ヒューマノイド研究の発展に貢献するものと考えられる．



図5 屋外での移動実験検証

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 Kojio Yuta, Omori Yuki, Kojima Kunio, Sugai Fumihito, Kakiuchi Yohei, Okada Kei, Inaba Masayuki	4. 巻 5
2. 論文標題 Footstep Modification Including Step Time and Angular Momentum Under Disturbances on Sparse Footholds	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Robotics and Automation Letters	6. 最初と最後の頁 4907 ~ 4914
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/LRA.2020.3004796	査読の有無 有
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1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 小椎尾 侑多, 大森 悠貴, 小島 邦生, 菅井 文仁, 垣内 洋平, 岡田 慧, 稲葉 雅幸
2. 発表標題 足場が限られた環境における着地可能領域を考慮した即応歩容生成
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'20 講演論文集
4. 発表年 2020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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------