

令和元年6月4日現在

機関番号：15401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K14185

研究課題名（和文）マスタスレーブ二足歩行ロボットのための実時間シミュレータ・ベースト制御技術開発

研究課題名（英文）Realtime Simulator-Based Development of Master-Slave Bipedal Robot Controller

研究代表者

菊植 亮（Kikuuwe, Ryo）

広島大学・工学研究科・教授

研究者番号：90362326

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究課題では非自律型・マスタスレーブ型の二足歩行ロボットのための制御技術の確立を目的とした。このために、2台の力覚提示装置を接続した実時間シミュレータ環境を構築し、このシミュレータをベースとして制御技術の開発を行った。結果として、トルク指令ベースの制御技術群と位置指令ベースの制御技術群が得られた。トルク指令ベースの制御技術群は設計が簡便であり、理論的観点から見通しが良い。一方で位置制御ベースの制御技術群は、重心やZMPの目標起動を適切に設計することで、直感的な操作で安定な歩行が実現できる。これらに加え、不整地において転倒した際に、直立姿勢に復帰するための半自動起き上がり制御則も提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究課題によって得られた各種制御技術は、極限環境下で働く将来の二足歩行ロボットのための基盤制御技術となると期待できる。従来の二足歩行ロボットの歩行の研究は、ロボットに高度な認知・判断機能を要求するものが多かった。それに対してここで得られた技術は比較的単純な物理法則にのみ基づき、認知・判断機能は人間の操作者にゆだねるものであるため、実用化の可能性が高いと考えられる。

研究成果の概要（英文）：This research project aimed to establish control methods for non-autonomous, master-slave type biped robots. We constructed a real-time simulation environment comprising two haptic devices and performed the controller development based on this simulator. We obtained two groups of control techniques; one is of the torque-commanding type and the other is of the position-commanding type. The torque-commanding type is relatively easy to design and straightforward from the control theoretic perspective, while the position-commanding type allows intuitive operation and stable walking with appropriate trajectory design of the center-of-gravity and the zero moment point. In addition to them, we proposed a semi-automatic standing-up control law that can be useful when the robot falls over.

研究分野：機械力学・ロボット工学

キーワード：二足歩行ロボット 実時間シミュレーション マスタスレーブ

1. 研究開始当初の背景

災害現場などの極限環境下で複雑な作業が要求される場合、二足歩行型の人型ロボットが強力なツールになると考えられる。実用的な二足歩行ロボットの実現には様々な技術的障壁があるが、それらは、「(a)ハードウェアに関する技術障壁」、「(b)自律的な動作計画に関する技術障壁」、「(c)姿勢・歩容制御に関する技術障壁」に分類できる。二足歩行ロボットの研究の多くは、自律的な動作生成を前提としており、ユーザーからのリアルタイムの指令に応じて歩容を生成する手法は未探索であった。

2. 研究の目的

本研究課題では人が自らの身体の拡張として利用できる非自律的・マスタスレーブ型二足歩行ロボットのための制御技術を確立することを目指した。将来の技術革新に期待して「(a)ハードウェアに関する技術障壁」を先送りし、非自律化によって「(b)自律的な動作計画に関する技術障壁」を回避したうえで、「(c)姿勢・歩容制御に関する技術障壁」に取り組むというものである。

マスタスレーブ型の二足歩行ロボットにおいて、ロボットの全自由度をユーザーが操作する場合、転倒せずにバランスを維持しながら作業を遂行することは極めて困難である。一方で過剰な自律化は、ユーザーの運動技能の発揮を妨げ、高度な判断能力をロボットに要求することになる。本研究では、マスタスレーブ型二足歩行ロボットにおいて、ユーザーからの実時間の運動指令と自律化されたバランス維持機能を矛盾なく組み合わせる制御技術を確立することを目指した。この目的のために、2台の力覚提示装置（ハプティックデバイス）をマスタデバイスとして用いた実時間シミュレーション環境を構築した。二足歩行ロボットのハードウェアおよび自律機能の開発には敢えて踏み入らず、実時間シミュレータによって基盤制御技術のみを先行的に確立することを目指した。

3. 研究の方法

まず、パソコン1台あたり力覚提示装置2台から構成される実時間シミュレータ環境を構築した。ここで用いた力覚提示装置は並進3自由度のみの比較的安価なもの（Novint社製Falcon）である。C++言語によって二脚ロボットの動力学モデルを構築し、任意の制御則で関節トルクを駆動できるようにした。また、ロボット関節の摩擦力や、足部と地面との接触における摩擦接触力は、研究代表者の独自技術によってモデル化し、シミュレータに実装した。

ロボットなどの剛体どうしの接触を多く含む環境のシミュレーションは、そのシミュレーション技術自体が発展途上である。そのため、シミュレーション技術と制御技術を同時開発することを目指した。なお、この実時間シミュレータはペナルティベースで構築した。通常ペナルティベースのシミュレーションは不安定化しやすいが、力覚提示装置の制御周期（1[ms]）当たり10ステップの時間更新を行うことで、安定性を高めた。

4. 研究成果

まず2016年度においては、トルク指令方式のマスタスレーブ歩行制御則を構築した。

- 足首関節のみで行うバランス維持制御と、足首位置と力覚提示装置の位置を一致させる位置制御を両立する制御アルゴリズムの基本的枠組みを確立した。具体的には、足首にロール軸およびピッチ軸周りのアクチュエータを配置し、それらはバランス維持制御に専従させる。それ以外の関節は、力覚提示装置からの指令にもとづいて制御される。ここで実装したバランス維持制御則は、床反力中心に対する積分制御（I制御）と体幹中心に対する比例微分制御（PD制御）を重ね合わせたものである。
- 自然な歩行を実現するためには、片足支持状態と両足指示状態との間の遷移を、ユーザーが意図したように実現する必要がある。このために、床反力中心位置と体幹中心位置をもとにして制御モードを切り替える手法を考案した。これによって、自然な歩行動作と足踏み動作が可能になった。なお、床反力中心位置は外力にも影響されるが、このときにも自然なモード遷移ができるように改良した手法も構築した。

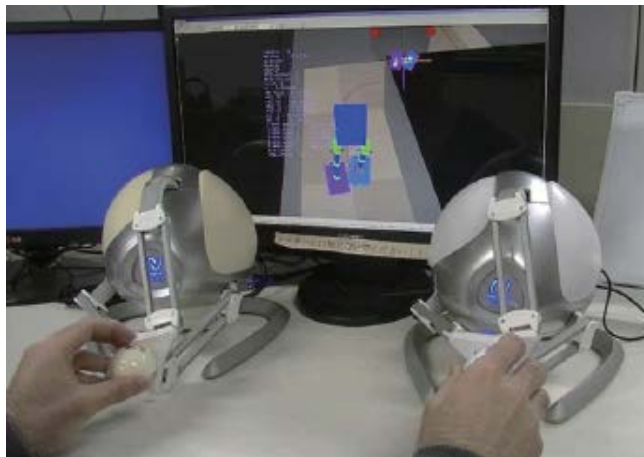


図1：シミュレーション環境

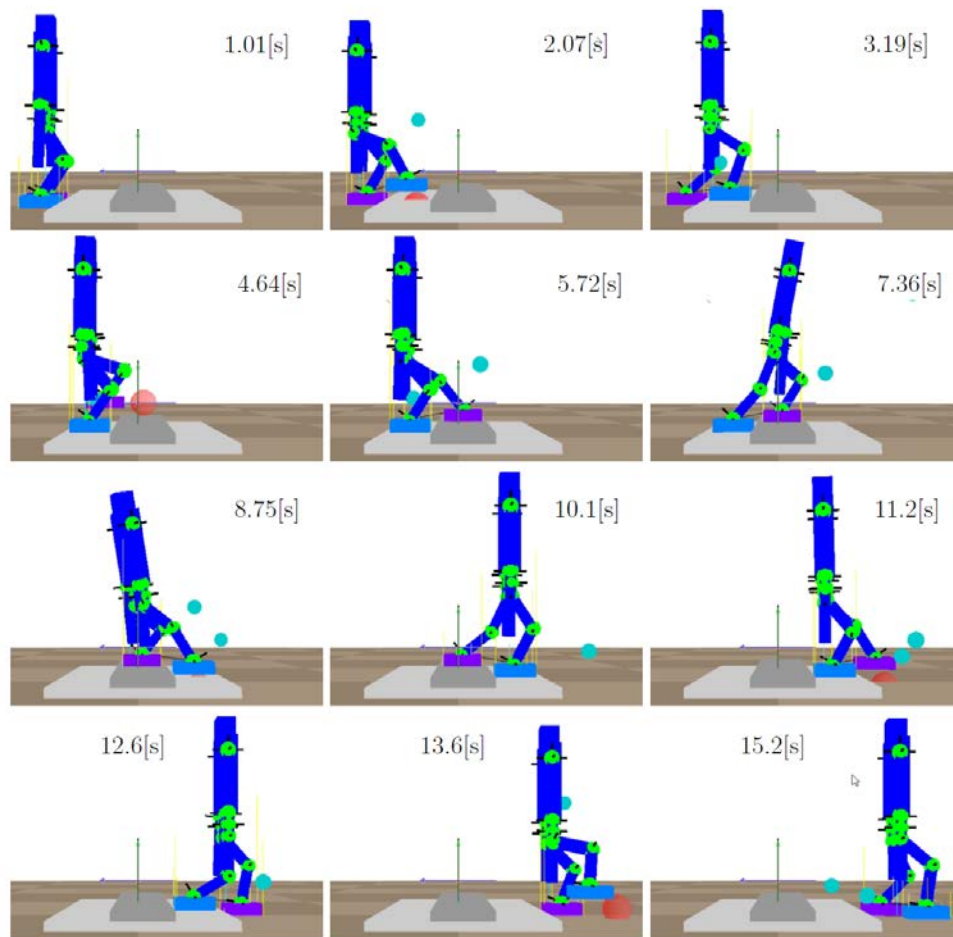


図 2：段差の昇り降り動作

2016 年度に構築したトルク指令ベースの制御則は、体幹からの足首相対位置をマスタデバイスから指令する位置制御と、足首関節におけるバランス制御を、トルク指令の段階で重ね合わせるというものであった。制御理論的に扱いやすく制御系設計が簡便であるため、将来的にさらなる発展の可能性がある。しかしながらこの方法は、必ずしも直感的に操作しやすいものではなく、また、足首関節に負担がかかりすぎる（足首関節のアクチュエータが大きいトルクを発生する必要がある）という難点があった。このため 2017 年度においては、位置指令方式の制御則について検討し、下記の成果を得た。

- マスタデバイスからの指令によって決定された目標 ZMP 軌道を実現するために、重心ヤコビアンを用いて目標重心速度・加速度を算出し、それにあわせて各関節を角度制御するという方針で制御系を構築した。これにより、バランス維持のための負担がすべて足首関節に加わるという問題は解消された。
- 2017 年度の手法では、脚の関節可動域の制限によって、大きい歩幅での歩行が出来ないという難点があった。特に片足支持期において、脚を伸ばして遠いところに遊脚を下ろすことができない状況が発生した。この問題を解決するために、脚自由度の制御タスクに優先度を設けて、可動域限界に近づく関節数にあわせて優先順位の低いタスクから無視するようなアルゴリズムを構築した。具体的には、脚関節が可動域限界に近づいたときに、胴体姿勢の自由度に対する拘束を順次はずしていく方針のアルゴリズムを構築した。その結果、遠くに脚を伸ばすときにはロボットが胴体を自然に傾けるようになり、広い歩幅で歩けるようになった。

なお、マスタデバイスは、常に原点復帰の復元力を発生するようにした。上記の制御則との組み合わせによって、操作者にとって自然で直感的な操作が可能になった。

さらに 2018 年度においては上記の技術を発展させ、操作性の向上や、外乱や不整地への対応のための技術開発に注力した。これにより、下記の成果を得た。

- 両足接地状態において操縦者がマスタデバイスを上に持ち上げたときには、ロボットが重心を移動させ、重心移動が完了してから片足を上げる必要がある。2017 年度までの手法ではこの一連の動作に時間を要したため、ユーザーにとっての操作性が悪いという問題があった。2018 年度には梶田らの予見制御 (2003) および補助 ZMP (2006) にもとづく手法を適用し、ロボットを両足支持状態から片足支持状態へ遷移させる際に、目標 ZMP を一時的

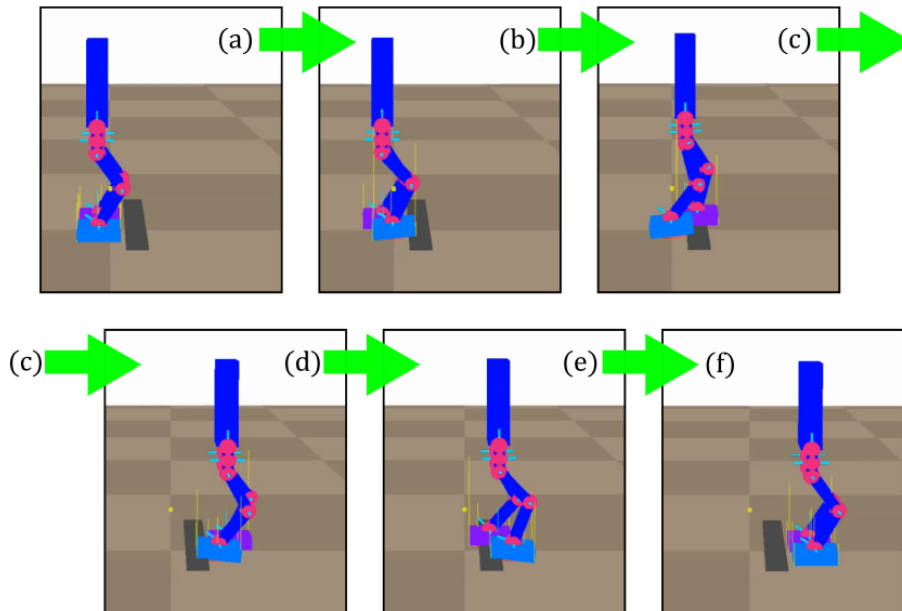


図 3 : 段差の昇り降り動作

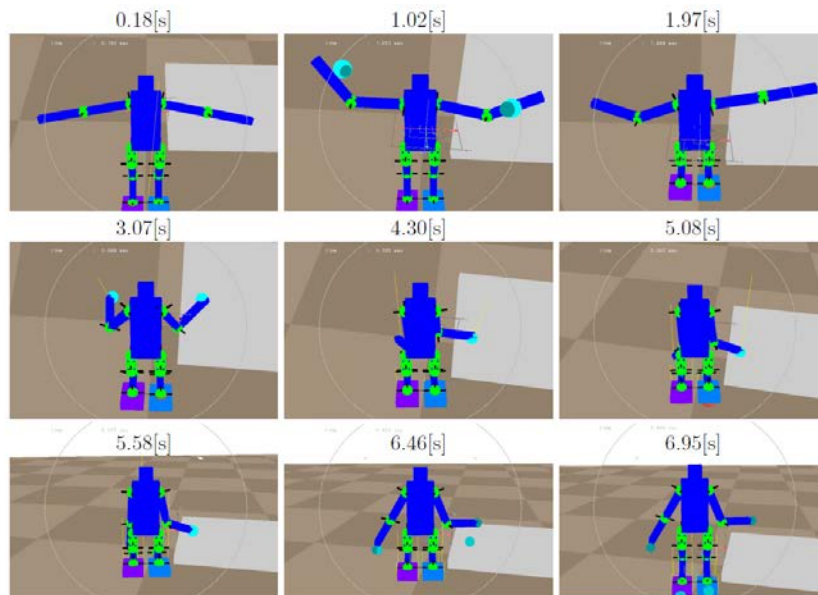


図 4 : 立ち上がり動作

に逆方向へ振ってから重心を移動するアルゴリズムを実装した。これにより、片足支持状態への遷移をすばやく行えるようになり、操作性が向上した。

- ロボットが重量物を把持するとロボットが転倒する可能性が高くなるという問題があった。この問題を解決するために、ロボット本体の重心位置と加速度から算出した ZMP と床反力中心位置の差を、梶田らの予見制御則 (2003) にフィードバックして目標 ZMP を補正する手法を構築した。
- 二足歩行ロボットは鉛直方向の重心位置を一定に保ちながら歩行することが望まれるが、階段を下る際など、重心位置を一定に保ったままでは遊脚の高さを地面に届くまで下げられないことがある。この問題を解決するために、佐藤ら (2011) の仮想スロープを用いた手法をベースにした新しい手法を構築した。片足支持期に目標重心高さを上下させることで、斜面の傾きや段差の高さなどの事前情報なしに、階段やスロープの昇り降りができるようになった (図 2)。なおここでは、足裏の 4 点のロードセルによって床反力を計測する方式を想定した。
- 2017 年度までの手法では、支持脚となるべき足の一部が障害物に乗り上げて傾いた状態でもう一方の足を上げると、バランスを崩すことがあった。適切なモード分けによって参照重心位置を決定することによって、このような場合にもバランスを崩さずに片足支持に移行できるようにする手法を構築した (図 3)。なおここでは、足首の六軸力・トルクセンサによって床反力を計測する方式を想定した。
- シミュレータ内のロボットに腕をとりつけ、自律動作とマスタスレーブ操縦を混合させた

半自動立ち上がり手法を構築した(図4)。提案手法は大きく分けて3つのステップに分けられる。初めに、操縦者が腕を操作しロボットの重心位置を上昇させる。次に重心位置があらかじめ決められた閾値を超えると重心位置が自動的に円弧上に移動する。その間、ロボットが倒れないようにロボットの腕を操縦者が操作することでロボットはしゃがみ込んだ状態に遷移することができる。最後に操縦者がマスタデバイスに搭載されたボタンを介して指令を送ることでロボットは重心位置を上昇させ、直立姿勢に遷移する。本手法における立ち上がりは反動に頼らないため静的な状態を保ちながら任意の速度での立ち上がりを実現する。

- 段差歩行のシミュレーションを高速化するための物理演算手法を開発した。具体的には、障害物側面への接触と障害物上面への接触の2種類に分類することで、計算量を削減する手法を考案した。障害物側面への接触では物体同士のめり込みを避けることが目的であるので、簡単のため接触力はロボットの足の重心に与えられる。また、障害物上面および床との接触では、ロボットの足裏と同形状の仮想的な平板を想定し、ロボットの足と仮想平板の相対位置および相対速度によって接触力が計算されることとした。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計0件)

[学会発表] (計5件)

- ① 安藤智哉, 菊植亮: “マスタスレーブ型2足歩行ロボットの不整地歩行手法: 足裏複数点のロードセルを用いた手法”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2019, 2019年6月発表予定。
- ② 守本一心, 菊植亮: “マスタスレーブ型2足歩行ロボットの段差歩行手法: 足首6軸力センサを用いた手法”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2019, 2019年6月発表予定。
- ③ 渡智史, 菊植亮: “マスタスレーブ操縦に適した二足歩行ロボットの運動制御技術の開発”, 日本ロボット学会学術講演会講演論文集, 1J1-06, 2018年9月。
- ④ 渡智史, 菊植亮: “二足歩行ロボットにおけるマスタスレーブ脚制御とバランス制御の両立, 第2報: 外力の影響を考慮したモードの切手法と各モードにおけるバランス制御則”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2017 講演論文集, 1A1-O12, 2017年05月。
- ⑤ 渡智史, 岩谷正義, 菊植亮: “二足歩行ロボットにおけるマスタスレーブ脚制御とバランス制御の両立”, 第17回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (SI2016) 論文集, pp.204-207, 2016年12月。

[図書] (計0件)

[産業財産権]

- 出願状況 (計0件)
- 取得状況 (計0件)

[その他]

ホームページ等

<http://home.hiroshima-u.ac.jp/kikuuwe/>

6. 研究組織

(1) 研究分担者

なし

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。