

論文の内容の要旨

論文題目 積算状態推定に基づくヒューマノイドロボットの継続的
タスク実行システムの構成法
氏 名 熊谷 伊織

本研究はヒューマノイドロボットが災害対応行動をはじめとした未知環境における長時間の継続的タスク実行を安定して行うための基盤となるロボットシステムの構成法に関する研究をまとめたものである。

従来のヒューマノイドロボットのシステムでは移動行動や物体操作行動といったタスク毎にシステムを構築することが一般的であった。このようなシステムではタスク毎に定められた動作モデルから推定された状態に基づいて認識・動作制御が行われていたが、ロボットが継続して異なるタスクを実行していく上ではタスク間での状態の再利用性が課題となっていた。そこで本研究では、ロボットが故障なく継続して様々なタスクを遂行するためのシステムを構成する上で、長時間のタスク実行中や異なるタスク間における認識・動作制御の連続性を確保するために、変化がタスクに依存する状態を時間積算することでタスクに依存しない状態として使用すると共に他のタスクで再利用可能な形で記憶する積算状態推定に着目した。その上で、継続的タスク実行システムに必要な要素として関節トルクの積算に基づく関節温度推定を用いた負荷軽減制御手法と、速度誤差モデルの積算による高速高精度な自己位置推定に基づく移動中認識実行モデルを適用可能な周囲環境情報の相補的積算手法からなる自律系を、動作計画を提示する認識補助機能によって操作性を向上した遠隔指示システムと統合し、継続的タスク実行システムを構成した。更に提案する継続的タスク実行システムによって、搭乗型移動体の操作、物体操作、不整地歩行といった異なる種類のタスクをヒュー

マノイドロボットが統一的に扱うことが可能になることを実証することで、処理、タスク及び時間の継続性が実現されることを示した。

第 1 章「序論」では研究背景として近年のヒューマノイドロボット研究を俯瞰し、本研究において目標とする未知環境において移動行動や物体操作行動などをまとめた広義のタスクを人間の指示を受けながら継続して実行していくための基盤となるロボットシステムが災害対応行動をはじめとした実環境におけるヒューマノイドロボットの運用に重要であることを述べた。

第 2 章「積算状態推定に基づく継続的タスク実現可能なロボットシステム」ではヒューマノイドロボットの継続的タスク実行に必要な要素を時間の継続性、タスクの継続性及び処理の継続性として整理し、災害対応ロボット競技会を題材として実用されているヒューマノイドロボットシステムにおける継続性実現のための問題点について議論した。更に既存のタスク毎に構築されたシステムにおける長時間のタスク実行中や異なるタスク間における認識・動作制御の連続性に関する課題を解決する上で、タスクに変化が依存する状態を積算し、タスクに依存しない状態として推定・記憶する積算状態推定が重要であることを述べた。更に本研究が解決すべき具体的な課題として、時間の継続性に関する課題である未知環境や外乱による長時間動作の困難性、タスクの継続性に関する課題であるタスク間の認識・動作計画の不連続性、そして処理の継続性に関する課題であるロボットの認識・遠隔操作による待ち時間を挙げた。そしてそれらの課題を解決するための要素技術として、本研究では時間、関節負荷の積算による間接温度制御、速度分布の積算による高速高精度な自己位置推定とそれに基づく周囲環境点群積算を備えた積算状態推定に基づく自律系を提案し、行動計画結果を提示することで操作性を向上する遠隔指示系と統合することにより継続的タスク実現可能なロボットシステムを構成することを述べた。

第 3 章「関節トルク積算による温度推定を用いた関節負荷制限制御法」ではヒューマノイドロボットが長時間の高負荷タスクを実行するための関節負荷軽減制限制御法について述べた。ヒューマノイドロボットが高負荷タスクを行う上で事前に計画することが困難な外乱や内力に対する適応行動を行うために、負荷指標としてロボットの関節トルクを積算することで得られる関節温度に着目し、得られた関節の熱モデルから関節温度がハードウェアによって決まる上限温度を超えないための関節出力上限をオンラインで決定する手法を提案した。この関節出力上限の決定法は関節温度が上限温度を超えないことを理論的に保証可能である点が重要である。更に関節トルク制御器を用いて上限トルクを超えないような負荷軽減制御を行うことで関節の故障なく長時間及び瞬間的高負荷行動が可能となることを示し、長時間の負荷が発生するヒューマノイドロボットによる着座行動実験や瞬間的後負荷の発生する乗り込み動作実験によりその有用性を実証した。

第 4 章「自己位置推定と周囲環境積算の細粒度相補的統合法」では必要な実行周期に応じて自己位置推定と周囲環境点群積算の処理を細分化し相補的に統合することにより、ヒューマノイドロボットの移動中においてもオンボードの計算機で高速高精度な自己位置推定と密な周囲環境点群生成を実現する手法を提案した。まず高速な自己位置推定として、ヒューマノイドロボットの移動時の速度誤差が正規分布でモデル化出来ることに着目し、ロボットモデルに基づく幾何計算、慣性センサ及び視覚情報から得られるビジュアルオドメトリの誤差を見積もるとともにパーティクルフィルタによってそれらの推定結果を統合することで高速な自己位置推定結果を取得する手法を示した。次に得られた推定結果を用いてレーザセンサから得られるレーザスキャンを積算することでレーザ点群を生成し、そこから一定の高さの仮想レーザスキャンを切り出して 2 次元 SLAM を適用することで高精度の自己位置姿勢補償が可能であることを示した。更にこの高精度な自己位置推定結果を基準として用いることで、ヒューマノイドロボットに搭載されたオンボードの計算機でもレーザ点群から高精度かつ密な周囲環境点群を積算することができることを示し、それを用いて周囲環境に応じた移動計画が行えることをヒューマノイドロボットの歩行計画実験を通して実証した。

第 5 章「自己状態を提示する認識補助機能を備えた遠隔指示システム」では災害環境をはじめとした劣悪な通信環境下においても使用可能な認識補助機能を備えたヒューマノイドロボットの遠隔指示システムについて述べた。車の運転操作行動を例として、ヒューマノイドロボットが周囲環境から自律的に車の運転経路を選択するためのローカルプランナを提案するとともに、車の移動経路をオペレータに提示する認識補助機能によりオペレータの操作性を向上させることが可能であることを実証した。更に劣悪な通信環境において使用可能な通信機能を備えた遠隔指示システムを構成し、実環境におけるヒューマノイドロボットの車運転操作タスクを通してその有用性を示した。

第 6 章「積算状態推定を用いたヒューマノイドの継続的タスク実現」では統合実験を通して未知環境下における積算状態推定を用いた移動経路計画・動作計画の補正による継続タスク実行システムの有用性を評価した。自己状態と周囲環境点群の積算によって移動中の認識・動作計画の精度が向上することで移動中認識実行モデルによるタスク実行とタスク中における適応的な動作補正が可能となり、ロボットの停止時間を削減するとともに複数のタスクを継続して行うことが可能となったことが実環境における評価実験から実証された。また提案するシステムが異なる移動形態においても適用可能であることを車の自律運転行動を例として示した。

第 7 章「結論」では本研究の成果をまとめ、学術的貢献として内力の蓄積による関節故障や不正な遠隔操作の防止による時間の継続性の実現、異なるタスク間の状態推定の再利用性向上によるタスクの継続性の実現、及び認識補助機能を用いた定性的指示と移動中認識動作モデルによる処理の継続性の実現を達成したことを述べた。

以上、これを要するに本論文は未知環境においてヒューマノイドロボットが人間の指示を受けながら長時間継続して複数のタスクを実行するためのロボットシステムの構成法を、タスクに応じて変化する状態を積算しタスクに非依存な状態として推定・記憶する積算状態推定の考え方に基づいて時間、タスクおよび処理の継続性に関する課題を解決することにより明らかにしたものである。

災害対応ロボット競技会におけるヒューマノイドロボットの実運用例を踏まえた分析から、ヒューマノイドロボットの継続的タスク実行システム実現のために解決すべき課題として、時間、タスクおよび処理の継続性の実現が挙げられていた。本研究では、まず関節トルクを積算して得られる関節温度に着目することでモータの焼損を防ぎ長時間高負荷行動に対応可能となった関節負荷軽減制御手法を提案するとともに、認識補助機能を備えた遠隔操作系によりオペレータの操作性を向上することで時間の継続性を実現した。次に速度分布を積算する自己位置推定により異なる移動形態における認識・タスク実行の継続性を確保し、積算周囲環境点群によって異なるタスク間の遷移におけるロボットの停止時間を削減することでタスクの継続性を実現した。さらに積算状態推定に基づく移動中認識実行モデルにより継続的認識機能の品質を向上し、自律動作計画をオペレータに提示する遠隔指示自律統合システムにより遠隔操作の待ち時間を削減することで処理の継続性を実現した。

以上の成果によりオペレータの指示に基づいて移動しながら認識・動作計画・動作制御を同時に行っていくために必要であった処理の継続性、タスクの継続性及び時間の継続性を実現する継続的タスク実行システムの構成法が明らかになった。このことは近年需要が高まっている災害対応行動をはじめとした未知環境において、ヒューマノイドロボットが異なるタスクを実現することを可能にするためのロボットシステム基盤を提案したという点から、ヒューマノイドロボットの実用性向上に対する貢献になるといえる。