

## 審査の結果の要旨

論文提出者氏名 白井 拓磨

本論文は、「高速応答行動可能なロボットのための体内分散通信制御系に関する研究」と題し、等身大ヒューマノイドロボットが実環境下において継続的にタスク実現することを目指して、事前に予期することが困難な外乱に伴う転倒・衝撃によるロボットの障害発生を抑制するための体内制御システムプラットフォーム構成方法について明らかにする論文であり、全7章からなる。外乱によるバランスの崩れや過負荷に対して、それをロボットが搭載する各種センサから即座に知覚し、さらに高速に応答行動指令を実行する機能を持たせることで障害発生を抑制することが可能になると考えられる。人体では単に運動による転倒回避を行っているのみではなく、筋肉の粘弾性体としての特性を利用して関節動作にしなやかさを持たせることで外乱自体の緩和を行っていることに着目し、転倒回避運動制御能力と外乱抑制制御能力の両立がヒューマノイドロボットの活用の場の拡大において重要であると考え、それを実現するための体内分散通信制御システムプラットフォームの構成方法について論じたものである。

第1章「序論」では、研究の背景及び目的について述べ、ヒューマノイドロボットが作業続行不可能となる致命的システム障害の発生要因とその課題について過去の例を元にまとめ、本研究が目指すべき体内制御システム構成について述べ、本論文の構成を示している。

第2章「高速応答行動を可能とする体内分散通信制御系の設計要件と評価項目」では、制御システムの設計において指針となる設計要件について整理し、ロボットの基本制御則としてセンサレスでのトルクベース化を実現することでシステム頑健性を高めることについて述べている。これらを達成するために制御システムのタスク処理機構に要求される定性的な実時間性能について制御モデルを元に導き、その性能を達成するための通信機構とプロセッサの双方の構成方法について述べている。

第3章「分散型センサを接続可能な実時間ベクトル制御モータドライバの開発」では体内分散制御系において末端ノードとなるモータドライバについて、本研究で必要となる実時間モータ制御性能とセンサ情報を低遅延で体内ネットワークに接続するためのセンサドライバを統合した構成方法について述べ、さらにその性能について単軸試験機において検証を行っている。このモータドライバは既存の大出力モータドライバの構成を踏襲した FPGA ハードウェアロジックにてベクトル制御を行うが、ソフトウェア的処理が必要となるサーボ制御並びに異常検出処理を行う組み込みプロセッサについては実時間プロセッサ D-RMTP 及びその低遅延周期実行スレッド機能を利用することによって、トルクベース制御化で要求される実時間性能が達成される構成であることを示している。また、モータドライバに通信処理モジュールと統合されたハードウェアロジックベースのセンサデバイスドライバを組み込み、取得センサ情報を低遅延で体内ネットワークに直接送信することによって、体内システム全体での応答高速化、取り扱いデータ種別の多様化が可能となる構成方法について示している。

第4章「マルチプロトコル対応多ノード間低遅延体内分散通信系の開発」では、アクティブ光コネクタと FPGA をベースとした高速通信機構の開発を行い、通信系がデータレート、低遅延性、データアクセス性において設計要件を満足することをシミュレーション及び実験にて検証している。この提案通信機構は、通信

処理をハードウェアロジックによって並列処理することを特徴としており、特にモータ制御等の低遅延性を要求される処理についてプロトコルレベルでハードウェアと紐づけることによって汎用の通信規格では達成が困難な低遅延性能を達成していることを示している。また、本研究で提案する通信機構と既存ヒューマノイドロボットで採用される通信規格の通信遅延に着目した比較を行い、提案通信機構の必要性について明らかにしている。

第5章「ヒューマノイドロボットにおける高速応答動作を実現する実行系システムの開発」では、システムが外乱入力に対して即座に応答を行うために制御周期に応じた3階層のサブシステムで構成することについて述べた。上位計算機においては外乱による姿勢変化に対してオンラインで動作修正を行うためのトルク制御則を考慮した実時間身体運動最適化制御実行系を構成し、中間層システムにおいて逆動力学演算を介して上位系指令と統合される高速トルク制御ループを構成することを提案し実装を行っている。提案システムは分散型システムであることを活用してロボットの身体構成に対応して拡張することが可能となっており、脚型ロボットにおいてそのシステム構成例を示している。

第6章「ヒューマノイドロボットにおける衝撃外乱に対する高速応答行動実験」では、本研究で提案される分散型制御システムの構成方法に則った実ロボットにおけるシステム構成を示し、腕型ロボットにおいてトルク制御による衝撃外乱の緩和動作実験を行うことで、高速動作時の衝突においても撃力を緩和する高い制御応答性を有することを示している。また、脚型ロボットにおいて関節のしなやかさを付加した提案システムの歩行制御系が従来行われていた転倒回避動作の達成を可能とした上で、さらに衝突外乱下においてもしなやかさを活用した緩和動作と転倒回避動作が両立することを定量的な実験によって示している。

第7章「結論」において、各章で述べた内容をまとめ、本研究を総括し、今後の課題と展望を述べている。

以上、本論文は、ヒューマノイドロボットがしなやかさを獲得するための関節制御則トルク制御化において、体内分散制御システムが満たすべき制御タスク処理機構の実時間性能評価を行い、それを達成するために、分散通信系ではプロトコルレベルで関連付けられたハードウェア処理機構を有する通信機構の構成方法を、また制御実行系ではオンラインでの動作修正と衝撃緩和動作を両立するための階層型システム構成方法を示し、実機において提案システムの実験、評価を行ったものとなっており、知能機械情報学上貢献するところ少なくない。

よって本論文は博士（情報理工学）の学位請求論文として合格と認められる。