

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 永松 祐弥

本論文は、「多形態多自由度ロボットにおける体内分散実時間制御システムの設計実現法に関する研究」と題し、多自由度化が進むロボットにおいて、動作制御のフィードバック遅延が行動実現目標に与える影響を明らかにし、多形態ロボットに展開して遅延を低減する合理的な体内制御システムの設計・実装・実証評価の過程で、先端技術に追従して発展させてゆく設計実現法を論じたもので、全7章からなる。

第1章「序論」では、研究の背景と目的について述べ、実時間性および展開実用性の要件を満たすロボット体内制御システムの設計実現法について論じ、本論文の構成について述べている。

第2章「多自由度ロボットの動作制御系に求められる実時間環境適応性能」では、多自由度ロボットの環境適応行動実現に向けたフィードバック遅延の課題と体内制御システムに求められる実時間性能要件を分析した上で、先端半導体技術を取り入れてロボット技術を継続発展させる設計実現の在り方を示している。制御回路系の本来の性能をFPGAで引き出しロボットに適した実時間性を追求する子細適応法、ロボット体内制御システムの共通構造定義と機能統合実装に基づき性能と多形態展開性を両立する統合節減法、およびロボット実証を通して細部の動的評価と仕様更新を繰り返す実地進展法の3点に分けて、本研究の提案手法を述べている。

第3章「体内分散実時間ネットワークを形成する小型高信頼な感覚駆動通信系」では、分散ネットワークを構成するモータ制御モジュールと中枢全身制御系における基幹通信インタフェースのそれぞれに関して、実時間性を満たす通信プロトコルの設計および小型高信頼なモジュール化設計の手法を述べ、応用設計実装事例とともにその効果を示している。過酷なロボット体内ネットワークに欠かせない誤り検出符号化手法を適切に選択した高効率な通信プロトコルを、時間確定的な論理回路として低遅延・低ジッタに実装する手法を示している。FPGAと低次インタフェース回路による小型高信頼化設計手法を、光伝送物理層と8b/10b符号化を利用した高速シリアル通信ネットワークや、最新の計算機に搭載されるEthernet・USBインタフェース中継の実装へ応用し、低遅延なデータ転送性能を評価している。

第4章「階層アーキテクチャ設計に基づく低遅延全身応答のための組込中間自律系」では、全身フィードバック制御の実装を、中央計算機に加えて組込中間層も導入して展開することで低遅延化する手法を述べ、これを実現する組込計算機設計実装と組込高速演算の手法を示している。FPGAとGPUを活用したマルチSoC組込中間層計算機の開発事例を交えながら、ロボット制御回路系に重要となる電源・通信回路の高品質設計や組込ファームウェアのオンライン複製展開の要件を分析している。ハードウェアアクセラレーション技術を用いて、行列計算を多用するロボット動作制御を組込計算機で高速実行する手法を与え、通信ネットワークと合わせてその低遅延応答性能を評価している。

第5章「多形態多自由度動作制御における組込高速演算を交えた全身階層協調系」では、中央計算機・組込中間層計算機・分散制御ノードから構成される多階層分散制御システム全体で低遅延なフィードバック動作制御を実行するための、データ転送および制御計算の構造化手法を述べている。分散制御ノードのローカルフィードバックに基づく位置サーボ制御や関節トルク制御において、FPGAを用いた低遅延応答回路実装が

追従性と安定性に大きく貢献することを示している。全身フィードバック制御実装に向けて、非同期ソフトウェア構造によるミリ秒単位の大きな遅延の課題を分析し、多形態ロボットに共通の実装で同期フィードバック制御機構を提供するプラットフォームを提案している。FPGAによる順運動学計算アクセラレーションを用いたアドミタンス制御実装の実例を通して、組込中間層計算機を用いた全身フィードバック制御低遅延化の有用性を示している。

第6章「体内分散実時間制御システムの応用戦略と行動実装評価の実現」では、本研究で提案される体内分散実時間制御システムの設計実現法に則って、多形態多自由度ロボットの環境適応行動を実現する戦略を述べ、フィードバック遅延の低減による行動実現の可能性を定量評価している。ギア駆動型大出力ヒューマノイド・腱駆動型筋骨格ヒューマノイド・多リンク飛行ロボット・連続跳躍ロボットの、それぞれ特性の異なる多自由度ロボットでの実証実験を通して、精密性と柔軟性の両立により、衝撃的な環境接触を伴う打撃作業や跳躍着地をはじめとした行動応用が実現されることを示している。

第7章「結論」において、各章で述べた内容をまとめることで本研究を総括し、その成果と貢献を述べている。

以上、これを要するに、本論文は、多自由度ロボットの体内制御システムにおいて、先端半導体技術を取り入れ、細部に至る実証評価と仕様更新を繰り返して、ハードウェアが本来有する性能を徹底して引き出すことで加速的な進化を促す設計実現法が、精密性と柔軟性を兼ね備えたロボットの環境適応行動実現に欠かせないことを示し、多形態ロボットに共通構造で合理的に展開可能な体内分散実時間制御システムの設計実現法を明確化したもので、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。