

## 論文の内容の要旨

論文題目 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

氏 名 永松 祐弥

本論文は、多自由度ロボットの環境適応行動実現に向けた鍵を握る全身フィードバック動作制御の応答性向上に主眼を置き、実時間性を満たし多形態ロボットへの合理的な展開に適う体内制御システムの設計実現法を論じるものである。システムの設計・実装・実証評価を繰り返して技術進展を促し応用的な行動実現へと繋げてゆく手法を設計実現法として提案する。高速通信や高速演算の先端技術を取り入れ、ロボットの研究開発の中で生じる実時間性および展開実用性の要求に応じてゆくための、適応的なシステム実装と継続的な開発が重要となることを示す。ロボット技術や実装技術を総合的に俯瞰する本研究ならではの視点から、体内制御システムの設計要件を明確化し、進化を続ける先端技術に追従してゆくロボット研究開発の基盤を提供するものである。

第1章「序論」では、複雑な行動実現が期待されるロボットの多形態化および多自由度化が進み、即応的な環境適応行動実現のために全身フィードバック動作制御の低遅延化が重要な課題となっていることを述べる。その背景を受けた本研究の目的として、低遅延制御を達成する実時間システムの実装評価法、多形態多自由度ロボットへの合理的展開法、およびロボット体内制御システム継続発展に向けた設計実現法の、3手法の体系化を掲げる。

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を分析し、これを解決する合理的な体内制御システムの設計実現法を提案する。行動実現目標の中でも特に衝撃的な環境接触を伴う打撃作業や跳躍着地が挑戦的な課題となる。ヒューマノイドの体内制御システムに見られるCANやEtherCATなどの産業用フィールドバス採用事例を紹介した上で、多自由度ロボットの体内制御システムに適した分散ネットワーク構成を述べる。全身フィードバック動作制御に大きな遅延が生じた場合に、安定性や衝撃的環境接触への対応に問題が生じることを分析する。体内制御システムの要件として、低遅延・低ジッタ・信頼性に基づく実時間性と、小型軽量・低消費電力・汎用性・運用性

に基づく展開実用性を挙げる。背景技術を分析し、成熟したメカトロニクス技術のひとつの派生応用としてシステムを構成する従来型ロボット研究開発の課題を述べた上で、本研究の設計実現法を提案する。本研究の提案手法は、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点から構成される。提案手法に基づいて体内分散実時間制御システムの要素技術となる感覚駆動通信系・組込中間自律系・全身階層協調系の設計手法を示す。

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、多自由度ロボットの体内分散ネットワークに求められるデータ転送性能を分析し、厳しい省スペース要求を伴う多自由度ロボットにおける高速・高信頼な分散ネットワークの構成手法とモジュール設計手法を提案する。誤り検出と診断評価の機能計画に基づく通信プロトコル設計で、プログラマブル論理回路による時間確定的な中継回路として実装することで、物理層ハードウェアが本来提供する性能を引き出してロボット体内制御システムに適した分散ネットワークが構成できることを述べる。高速シリアル通信技術と8b/10b符号化に基づく2.5 Gbpsの高速光通信を実装し、従来用いられてきた最大数十Mbpsの汎用シリアル通信を大きく凌駕するデータ転送性能を示す。汎用性の高い物理層回路を精選してセンサ・アクチュエータの種類や電源電圧範囲に広く対応する回路設計と、高速信号回路・大出力駆動回路の混合に注意した電流・熱伝導の構造設計によって、多形態多自由度ロボットへ適用可能な小型高速通信モータ制御モジュールを開発する。制約を生じずに中央計算機の通信インタフェースを活用する汎用物理層回路とFPGAを組み合わせた構成により、適応的で省スペースな基幹通信インタフェースを実装する。FPGAを活用してGigabit EthernetやUSB High-Speedのインタフェース性能を引き出す小型モジュールと通信プロトコルの実装例を与え、データ交換低遅延化の効果を検証する。

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、中央計算機に加えて組込中間層計算機を導入した相補的なヘテロジニアスアーキテクチャに基づくロボット中枢全身制御系の構成手法とモジュール設計実装手法を提案する。FPGAやGPUによるハードウェアアクセラレーション技術実装を伴う高性能な組込計算機を、低遅延バスで組込分散ネットワークと接続する。中央計算機の実装と比べてデータ交換のオーバーヘッドが削減され、低遅延同期通信や制御周期短縮が可能となる。FPGA SoCおよびGPU SoCを搭載し小型パッケージ化した組込中間層計算機モジュールの実用化設計事例を交えながら、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をはじめとして、高度な組込計算技術および通信技術をロボットに導入するためのモジュール設計要件および実装技術を明確化する。FPGA並列反復計算回路やGPU多並列計算機構による組込ハードウェアアクセラレーションを活用して、ロボットの制御計算に多用される行列演算を高速実行する手法を考察・検証し、FPGA SoC・GPU

SoC・中央計算機のヘテロジニアスアーキテクチャおよびFPGAによる可変データ接続経路で構成した相補的な中枢全身制御系の低遅延応答性能を示す。

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、ロボットの力フィードバック動作制御構造を分析し、組込計算機を交えた体内分散制御システム全体で低遅延フィードバックを実行する手法を提案する。分散制御ノードのローカルフィードバック系は、多階層の体内分散制御システムにおける最も低遅延な環境接触力応答を提供する。分散制御ノードにおける位置制御型・力制御型のそれぞれのアクチュエータ駆動に、FPGAを活用して低遅延で高追従な制御を達成する手法とその効果を述べる。中枢全身制御系における全身フィードバック動作制御では、複雑化する非同期マルチプロセス制御ソフトウェア構造が大きな遅延の要因となる。多様なインタフェースで体内分散ネットワークと接続する計算機において、ポリモーフィズムに基づいた共通構造の実時間周期制御を提供する一般化デバイス制御プラットフォームを提案し、同期プラグイン拡張により低遅延な全身フィードバック動作制御を実現する。動作制御の構造分析に基づいて組込中間層計算機に低遅延フィードバック動作制御を展開する手法を述べる。FPGAやGPUによるハードウェアアクセラレーションと親和性の高い行列演算タスクを抽出することで、組込演算の低遅延化が可能となる。中央計算機で425 usを要する6軸アドミタンス制御の例では、FPGA SoCおよび順運動学計算回路実装によって171 usの低遅延フィードバックが達成される。

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、代表的な多自由度ロボットとして、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・連続跳躍ロボットにおいて、本研究で提案する体内分散実時間制御システムを応用する戦略を述べ、実証評価を通してその効果を検証する。ギア駆動型大出力ヒューマノイドでは、剛性の高いハードウェアと低遅延な力フィードバック制御を組み合わせることで精密性と柔軟性を兼ね備えた動作制御を実現し、衝撃的環境接触を伴う打撃作業や跳躍着地へ応用する。腱駆動型筋骨格ヒューマノイドでは、とりわけ多自由度な分散制御系で短周期に大量のデータを取り扱う実時間制御システムを構成し、応答性の高い干渉駆動を実現する。多リンク飛行ロボットでは、大出力で精密な関節力制御に基づく空中マニピュレーションへ応用する。連続跳躍ロボットでは、姿勢安定化制御の追従性を向上することで安定したホッピングを実現する。

第7章「結論」では、本論文を総括し、本研究の成果と結論、および将来への展望を述べる。

以上、本研究では、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を提案する。先端技術に追従し、子細な実証評価と仕様更新を繰り返すことで、ロボット技術の進化を促し環境適応行動を実現してゆく。多くのロボット研究開発に継承可能なものとして共通構造で提案される手法および実装される要素技術は、次世代のロボット技術発展において広く波及するものと考えている。