

## 論文の内容の要旨

論文題目 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

氏 名 白井 拓磨

本研究は等身大サイズのヒューマノイドロボットの実応用を目指した研究として、実環境下での継続的な作業を実現することを目的にその体内制御システムプラットフォームの構成方法を論じたものである。目的の達成において問題となる実環境下での作業で発生し得る多種の障害要因について、これまでのヒューマノイドロボットにおける運用実績から整理を行い、その中で従来の体内制御システムの構成方法に課題があることを示した。ヒューマノイドロボットではその狭小な身体内に全てのシステム構成要素を収めるといった特異性から、特に熱・振動・衝撃・電磁ノイズといったシステム障害に結びつく要因に対して厳しい環境にある一方で、システムを構成するデバイス類の多くは汎用製品や自動車向け製品を流用していることが多く、信頼性や制御性能を低下させる一因となっていた。

こうした脆弱性の存在によって、ヒューマノイドロボットの継続的な作業が阻害されていたため、上記の障害要因に対する対策を前提とした体内制御システムのプラットフォームを設計する必要があると考えた。この設計において、性能・信頼性・設計/運用・展開・テストの5カテゴリについて15項目に渡るシステム設計要件・評価項目を定義した。上記評価項目について従来システムの検証を行うことで、既知問題点について致命的問題・機能制約問題・開発効率問題の3カテゴリに整理されることを示し、これら問題を解消するための開発指針を与えた。

また、ヒューマノイドロボットの動作面においても作業継続が困難となる失敗要因として、環境中に置かれた物体との接触時に生じる反力に対して応答が遅れる、あるいは応答ができないといった外乱の存在によって転倒・衝突破損してしまうことが度々見られた。これは、従来の体内制御システムのプラットフォームでは、外乱の発生をセンサ情報から知覚し、それを回避する関節角度軌道を生成してフィードバックすることでようやく応答としての関節動作が生じるが、素早い動作が必要となる作業においてはこの応答が十分に早くないためである。

この問題に対しては、関節の制御則をトルク制御化し応答動作軌道の生成を待たずに物理的な作用によって関節の柔らかい応答動作を可能とする方法が解決策として挙げ

られる。しかしながら、この方法は単純に従来の制御システムへの組込みを行うことを考える場合、運動計画系において生成された緻密な関節軌道と、柔らかさを持たせたことによる実関節軌道のずれをどのように補償するかという問題を生じる。また、トルク制御系の性能を十分に活用するためには従来用いられてきた1000Hzのサーボ制御周期を向上することが効果的であることを、アクチュエータモデルを用いて示したが、既存システム構成では制御周期の向上に限界があることを示した。同時に、制御周期の高速化に伴って制御周期のジッタ値が大きく影響し始めることに触れ、その値の上限値について導出を行った。上記問題を解決するには、体内制御システムの構成方法として従前の分散型制御システムに対して、低遅延な分散システム通信系によって接続することが必要となる。

以上の考察の元、本研究ではヒューマノイドロボットのための体内分散通信制御系の構成方法を提案する。本研究の提案する制御システムの主要構成要素として「実時間プロセッサによる分散型ベクトル制御モータドライバ」「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」「即応的反射行動アーキテクチャに基づいた実行系システム」の3要素を挙げた。

まず、「実時間プロセッサによる分散型ベクトル制御モータドライバ」について、低遅延実時間実行機構を有するD-RMTPを導入し、その概要について説明を行った。D-RMTPの機能を活用したResponsive Taskによって高周期低ジッタサーボ演算機構を実現し、単軸の試験機におけるステップ応答実験によってその性能の検証を行った。その結果、目標に設定した制御周期と低ジッタ性能が達成され、それにより制御性能が向上することを実証した。

また、D-RMTPによる分散型モータ制御を実現するために高速な通信機構を備えたRMTP-02D基板（図1）を独自に開発した。この基板ではハードウェアロジックとして実装されたベクトル制御器を搭載しており、プロセッサ処理のサポートを行う。また6軸力センサや衝撃センサといったヒューマノイドロボットに搭載される各種デバイス用のインターフェースが搭載されており、同時にこれらデバイス用ドライバについてもFPGA内のハードウェアロジックで実装することで、実時間性の高い処理を可能とした。

次に「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」について、分散化されたシステムにおいてノード間の通信系構成は通信品質に重要な影響を持つことを考

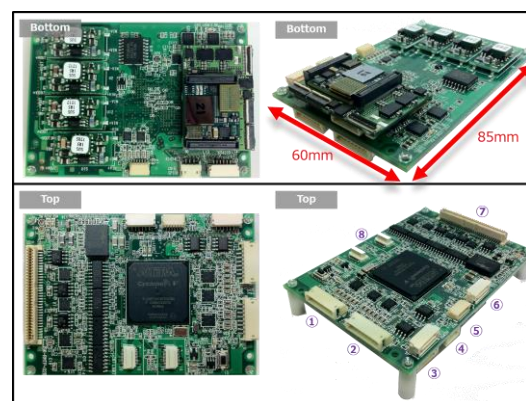


図 1

慮し、その中で実時間性能を最重要通信特性と設定した。

さらにこの実時間性能を達成するための通信モデルの設計において通信の同期形態と接続形態に着目してマルチプロトコル対応な通信リンクを構成することが重要であることを述べた。受信処理がパケットの受信と同時に進行される同期通信モデルについて、RPC型通信モデルを採用することで従前の通信フォーマットとの互換性を維持しつつ、低遅延なコマンドの送受信が実現可能であることを示した。また、受信処理が受信ノード側の任意タイミングで行われる非同期通信モデルとして、データストリームモデルを採用した。多ノード間において多種のデータ種別について行われる通信についてはデータストリームモデルを利用することで、システム側の負荷が低減され、結果、通信処理が低遅延化されることを示した。

さらにこれらの通信モデルを、プロセッサへ負荷をかけないFPGA上のハードウェアロジックとして実装するために、Light RPC型プロトコル、分散型共有メモリプロトコルを利用することについて述べ、さらにヒューマノイドロボットのシステム内で利用価値のある数種のプロトコルについて全てハードウェアロジックとして実装を行った。

このマルチプロトコル構成についてその通信頻度とパケット長を参考に通信優先度を決定し、優先度の高いプロトコルが先んじて送受信されるためのデータフロー制御機構を設計し実装を行うことで低遅延通信系を構成した。この通信システムは新しく物理層に採用した光アクティブ型コネクタの効果が大きく影響しており、光通信化によって実時間性能、データレートと耐ノイズ性の大幅な品質向上が達成された。

最後に「即応的反射行動アーキテクチャに基づいた実行系システム」について、生物の反射系を規範として、外乱に対して物理的な作用によって素早く応答する関節トルク制御を最短ループ経路によって行う即応的動作制御系と、本

来のタスクを実現するために知覚情報を元に最適な身体運動軌道の生成を最適ループ経路にて行う身体運動計画系に分けて構成を行った（図2）。

最短ループ経路を実現するために、制御システムを3階層のサブシステムで構成し、中間層に位置するシステムにおいて関節トルク制御を行う構成とした。2つの制御ループフローを適切に処理するために、中間層制御システムのトルク制御において計算トルク法をベースとした動力学演算を行う参照トルク生成モジュールを構成し、実時間で演算可能な制御ループに組み込んだ。動力学モデルではアクチュエータモデルも組み込むことにより、関節トルク出力の誤差要因となる高減速比減速機の損失を補償し、より柔

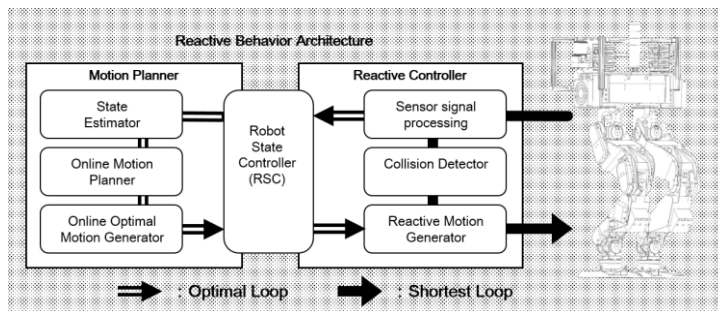


図 2

軟な関節動作を実現している。

また、関節のトルク制御に伴う運動軌道の計画時からの誤差を補償するために、脚型ロボットについてオンラインで逐次的に歩行軌道の修正を行う動作生成器を構成し、上位制御系の身体運動実行系システムに組み込んだ。これによって、トルク制御による柔軟な関節動作を実現しつつ、転倒を回避する高度なバランス制御を両立するための制御プラットフォームを構成することが可能となった。

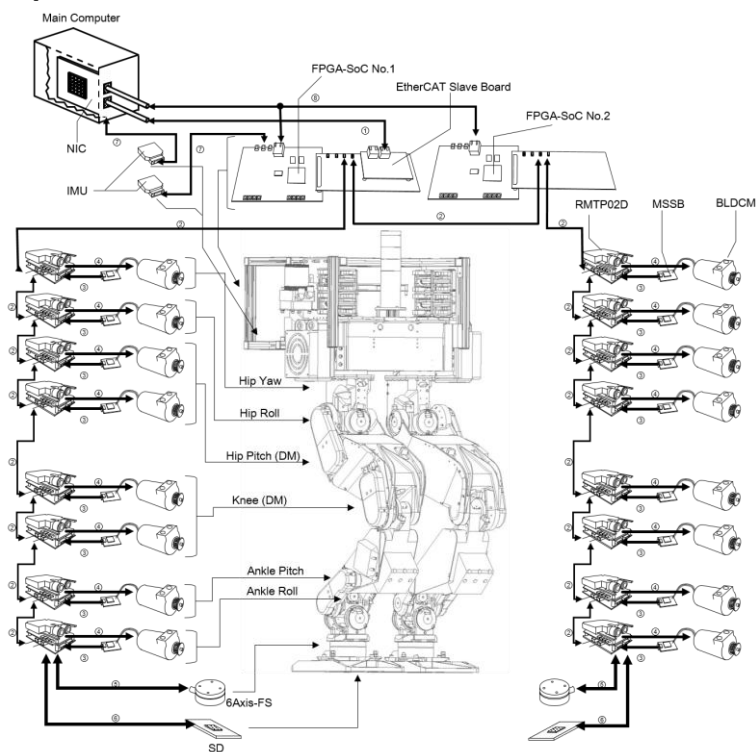


図 3

本研究は既存のインターフェース規格によってその構成方法に制約が生じていた従前の制御システムについて、ヒューマノイドロボットにおけるトータルパッケージを考慮した設計要件を定義し、ハードウェア構成・ソフトウェア構成の両側面から論じたものである。光通信化による高い通信品質とマルチプロトコル対応な低遅延通信機構を有する独自のモータ制御モジュールを開発することで、この設計要件に沿ったデザインを実現することが可能となり、既存のシステム構成が構造的に抱える信頼性に関連した致命的な問題について改善できることを示した。また、即応的反射行動アーキテクチャに基づいたトルク制御ベースによる高速応答行動を可能とすることで衝撃外乱に対して物理的な作用による柔らかい緩和動作を実現しつつ、オンライン動作計画器によってタスクの継続も合わせて継続させることを提案した。これらは、既存のヒューマノイドロボットの制御システムと置換する形で設計・実装を行うことで、本研究で提案したシステム構成の有用性について実証を行っている（図3）。

新規に開発されたシステムであるが、過去に蓄積されてきたシステムの資産については互換性を維持する形で接続・内容することが可能であり、実利用において有用性が高いと考える。実環境下での運用を目指した構成であり、これまで限定的であった屋外でのヒューマノイドロボットの実験・実応用を促進するという点において波及効果が高い研究と言える。