

レスポンシブプロセッサを用いた モジュール型ロボットのシステムアーキテクチャの設計

○ 平 哲也 (慶大) 鎌田 展秀 (慶大)
高田 和泉 (慶大) 山崎 信行 (慶大)

A Design of Modular Robot System Architecture using Responsive Processor

* Tetsuya TAIRA (Keio University), Nobuhide KAMATA (Keio University)
Izumi TAKATA (Keio University), Nobuyuki YAMASAKI (Keio University)

Abstract— This paper explains the design of a new system architecture for modular humanoid robot system that could realize real-time performance and data sharing between functional modules. Our proposed system is composed of site-based functional modules, for example, arm-control module, whee-control module and vision module using Responsive Processor and Responsive Link. We also design a prototype robot composed of these site-based functional modules for evaluation.

Key Words: Robot System Architecture, Distributed Real-Time Systems, Parallel/Distributed Control

1. 序章

近年ロボットの開発が盛んに行われており、マニピュレータ、画像処理システム、音声処理システム、人工知能等様々な要素技術が研究・実現している。将来、人間の活動する環境下でロボットが自律的に行動するためには、これらの要素技術から構成されるシステムのリアルタイム性を保証し、モジュール間の円滑な情報共有を実現する必要がある。また、ヒューマノイドロボットのような大規模なロボットの開発において、様々なタスクの実行や機能の追加・変更に対応するには、拡張性・柔軟性を備えたシステムアーキテクチャが必要である。

そこで本研究では、分散制御システムの電子部を構築する際の共通プラットホームを目的として開発されたレスポンシブプロセッサ、レスポンシブリンクを用いて、アーム、駆動システム、視覚システムなどの部位別機能モジュールから構成されるモジュール型ヒューマノイドロボットの分散制御アーキテクチャの設計を行う。

以下では、まず2章で背景と関連研究について述べる。続く3章では提案するロボットシステムアーキテクチャについて説明する。4章で提案するアーキテクチャに基づいたロボットシステムについて述べ、5章で本論文のまとめを行う。

2. 背景と関連研究

現在のロボットシステムでは、1つのプロセッサが全てを制御するということは稀であり、多かれ少なかれ複数のプロセッサによって分散制御を行なっている。ヒューマノイドロボットの分散処理システムの現状と問題点を考えることで、新たな情報処理システムアーキテクチャの設計を行うことを本研究の目的とする。

2.1 システムアーキテクチャの検討

既存のロボットのシステム分割粒度、コントローラの物理的配置、コントローラ間の通信機構に着目し、シス

テムアーキテクチャについて検討を行う。

HRP[1]は、歩行制御とその他の制御を分離した負荷分散型システムである。これらの計算機を腹部に配置し、各部位のデバイスへ配線する構造である。ロボットの構造はセンサやアクチュエータなどのI/Oがシステム内に分散して存在しているため、配線が複雑であり、開発、故障時の対応には相当なコストがかかるという問題点がある。一方、HERMES[2]はアクチュエータ毎にコントローラを置きモジュール化し、共有バスで情報共有するデバイス分散型のシステムである。バス通信は、接続されたモジュール全てのモジュールに非同期にデータを送信でき、柔軟な情報共有を行うことができる。しかしながら、モジュール数の増加に従ってバスの調停が困難になるため、システム全体のリアルタイム性の低下、拡張の制限などの問題点が挙げられる。ASIMO[3]は機能毎に固有の計算機を割り当てバス結合で情報共有を行なう機能分散型システムであり、特にアクチュエータ制御はアーケネットを用いて分散処理を行っている。HRPとHERMESのハイブリッドのようなシステム構成であるが、すべてのアクチュエータの行動計画を1つの計算機で集中的に処理するため、各機能、要素技術を分離して研究・実装を行うのが困難であり、拡張性の点で問題があると考えられる。

以上のシステムの問題点は、システム分割粒度や、コントローラの物理的配置、コントローラ間の通信機構の設計に起因する。そこで、これらの問題点を改善できる設計法を提案する。

2.2 分散制御に関する検討

分散制御を行うためには、まずシステム全体をどのようにして分割するのかを決定する必要がある。その際には、分散制御アーキテクチャ、I/Oの種類/数量、空間的な配置、演算量、通信量、リアルタイム性、消費電力のようなファクターを元にして分割を行う。

一方で、ロボットシステムの重要なファクターとし

て、リアルタイム性がある。一般的にロボットシステムが人間の活動する環境下で自律的に行動するためには、以下のリアルタイム性を実現する必要がある。

- Low-Level な制御タスク：
例: アクチュエータの電流、PWM 制御
ハードリアルタイム処理の必要性
- モジュール間の協調制御タスク：
例: Collision-free な腕の制御
コントローラ間のリアルタイム通信機構の必要性
- 高次な制御タスク：
例: 長期的な行動計画、ナビゲーション
ソフトリアルタイムタスク、ハードリアルタイムタスクを処理するソフトウェアの必要性

システム分割のファクターにはトレードオフの関係になるものも多いが、上述のタスクを実現するためにはリアルタイム性に優先順位をつけ、分割方法を考える必要があると考える。

3. 部位別機能モジュールから構成するシステムアーキテクチャの設計

3.1 設計及び設計方針

従来のシステムで問題点として考えられるリアルタイム性、拡張性、開発性を解決するために、ヒューマノイドロボット用の新しいシステムアーキテクチャを提案する。提案するシステムアーキテクチャの主な設計コンセプトを Table 1 に示す。

Table 1 提案するシステムアーキテクチャのコンセプト

システムの分割粒度	部位別機能モジュールに分割
コントローラの物理的配置	部位別機能毎にモジュール化
ソフトウェアの構成	階層構造の分散制御アーキテクチャ
コントローラ間の通信機構	レスポンシブリンク [4] を用いた実時間通信機構

以降の節では、提案するシステムアーキテクチャのコンセプトについて解説を行う。

3.1.1 モジュール化についての検討

システムのリアルタイム性に着目すると、ロボットの機能に必要なデバイス、リアルタイム性を保証する計算機資源、RT-OS を合わせて 1 つの機能モジュールとして設計し、システム全体を機能モジュールの集合体として構築する手法が適していると考えられる。その際のモジュール化の粒度であるが、開発性やコントローラの物理的配置を考えてみると、既存の研究を大きく改良することもなくシステムに組み込むことができる、画像処理システム、マニピュレータシステム、歩行システムといった人間の部位に相当する部位別機能という粒度が適していると考えられる。部位別機能毎にシステ

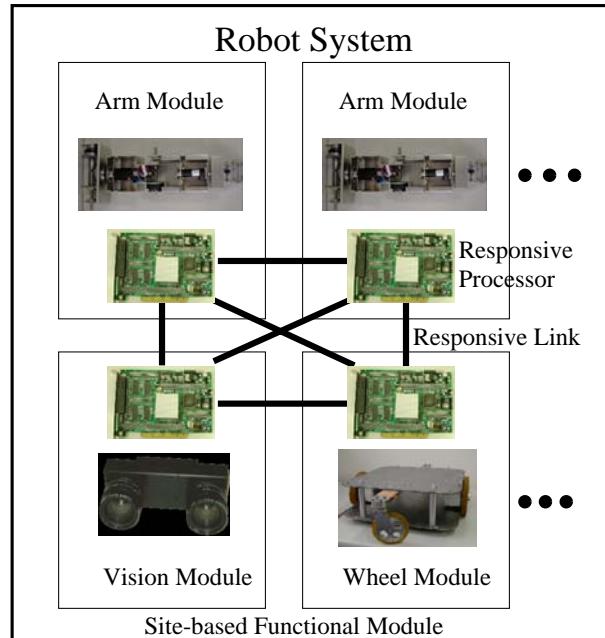


Fig.1 アーキテクチャ構成図

ムを構築できるため、省配線化、電子部の簡略化、故障時の対応が容易であるなどの利点もある。また、消費電力、I/O の種類/数量、空間的な配置のファクターより、部位別機能のコントローラには、多数の制御 I/O やコンピュータ周辺 I/O を搭載したシステムオンチップで、組込み用途であるレスポンシブプロセッサ [5] を用いる。計算機資源や機能モジュールの拡張に物理的制約をほとんど与えない高い拡張性を得るために、モジュール間はレスポンシブリンクを用いてネットワーク結合する。

以上より、提案するシステムアーキテクチャの構成図を Fig.1 に示す。ロボットをある部位ごとに分割・モジュール化し、これを部位別機能モジュールとして定義する。モジュールに含まれる構成要素は次の通りである。

• ハードウェア

- 部位別機能に必要となるセンサ・アクチュエータなどの各種デバイス類
- ローカルデバイスの制御およびシステム管理のための PU、メモリ（レスポンシブプロセッサ）
- モジュール間のデバイス制御やデータ交換のための通信インターフェース（レスポンシブリンク）

• ソフトウェア

- PU 上で動作する、実時間性を必要とするロボット制御のための RT-OS (RT-Frontier [6])
- モジュールのローカルデバイスの制御のため RT-OS に組み込まれたデバイスドライバ
- 各モジュールで提供する機能を実現するためのアプリケーションプログラム

3.1.2 ソフトウェア構成

各部位別機能モジュールを制御するための RT-OS には、レスポンシブプロセッサ上で設計されている分散実時間オペレーティングシステムの RT-Frontier を用いる。RT-Frontier は 1ms を単位時間としたスケジューリングを行うことができ、タスクの実行時間は 100 μ s を単位として管理することが可能である。

高次な行動タスクの実行や新しい機能の追加や変更を容易にするため、システム全体を Fig.2 に示す階層構造の分散制御アーキテクチャに従って設計する [7]。

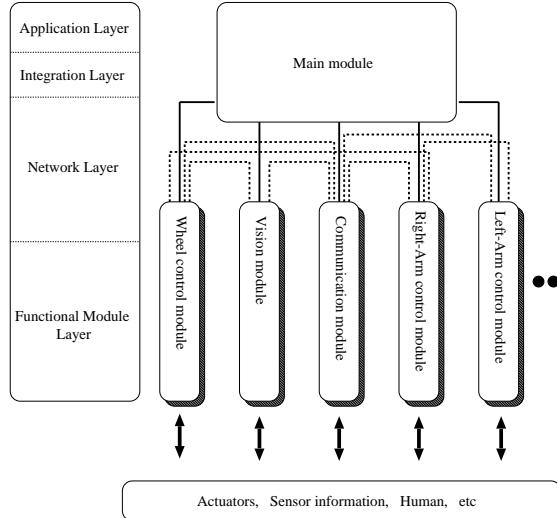


Fig.2 提案するソフトウェアアーキテクチャ

- Application Layer
ロボット全体のアプリケーションやタスクを定義するレイヤ
- Integration Layer
部位別機能モジュールの提供する機能を統合し、システム全体のプランニングやマネジメントを行うレイヤ
- Network Layer
モジュール間の協調制御を実現するネットワークをサポートするレイヤ。メインモジュールと部位別機能モジュール間を接続するグローバルネットワークと、部位別機能モジュール間を接続するローカルネットワークを形成する。
- Functional Module Layer
画像処理システムやアームなどの部位別機能モジュールを提供するレイヤ

ロボットシステムは、提案するアーキテクチャに基づいて 1 つのメインモジュールと複数の部位別機能モジュール群から構成される。

部位別機能モジュールは、EDF スケジューリングを用いたアクチュエータ制御・センサ処理などのタスク処理機構と、後述する通信処理機構から成る。

メインモジュールは部位別機能モジュール間の調停、システム全体としてのプランニング、インタラクション等を行うモジュールとして用いる。メインモジュールは以下の 2 つのパートから成る。

• システム管理パート

周期的に部位別機能モジュールと通信を行い、システムの安定性をハードリアルタイムに保証する。

• 高次な制御タスク管理パート

スレッドプール機構 [8] を用いて対話処理、インタラクション等のソフトリアルタイムタスクを非周期的に処理

3.1.3 モジュール間のリアルタイム通信機構

モジュール間の円滑なデータ共有を実現するために、並列分散制御用のリアルタイム通信規格であるレスポンシブリンクを用いる。レスポンシブリンクは主に制御データなどタイムクリティカルな通信のためのイベントリンクという通信経路を持ち、レイテンシの保証、バンド幅の保証を行う。通信に必要な時間を Table 2 のようにバウンドすることができる。また、レスポンシブプロセッサは 5 対のレスポンシブリンクを備えており、トポロジフリーで柔軟なネットワークを構築でき、計算機資源や機能モジュールの拡張に物理的制約を与えない高い拡張性が実現可能である。

Table 2 イベントリンクの基礎評価

通信速度	40 MBaud
データサイズ	16 Byte
通信遅延	123 usec

以下のように制御用途に応じて同期メッセージである Event Message・非同期メッセージである State Message・Signal の通信メッセージを用いる。

- センサ・アクチュエータや画像処理などの時間駆動系タスクグループは資源予約に基づき実時間通信の QoS を保証する Real-Time Channel Manager[9] を利用し、イベントリンクを用いた State Message により他のモジュールと周期的に通信しながら協調して処理を行う。緊急時にはイベントリンクを用いた Signal を使用することで対応する。
- 音声認識や音源定位などの事象駆動系タスクグループはイベントリンクを用いた Event Message により他のモジュールと通信しながら処理を行なう。

4. アーキテクチャの検討

4.1 プロトタイプロボットの設計と実装

提案するモジュール型ヒューマノイドロボットのシステム構成を Fig.3 に示す。ロボットシステムはメインモジュールと、車輪制御モジュール、腕モジュール(2 個)、視覚モジュール、コミュニケーションモジュールの 5 つの部位別機能モジュールの計 6 個のモジュールから構成される。メインモジュール、車輪制御モジュール、腕モジュールには、レスポンシブプロセッサ、RT-Frontier を用いて実装している。しかしながら、視覚モジュール、コミュニケーションモジュールは多大な計算量を必要とするため、汎用プロセッサと Linux を用いて実装を行っている。今後は開発中である Responsive Multi-threaded Processor[10] を用いて実装する予定である。

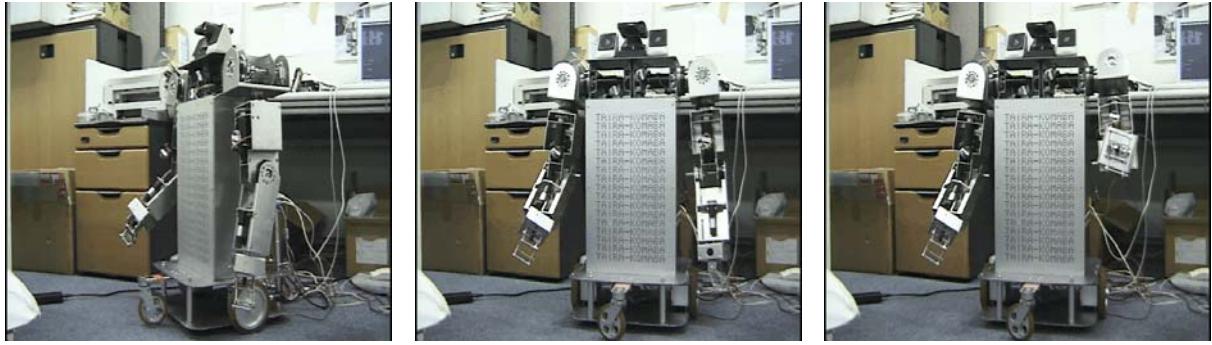


Fig.4 (a) 車輪制御モジュールによる制御 (b):メインモジュールによるプランニング (c):腕モジュールとコミュニケーションモジュールによる協調制御

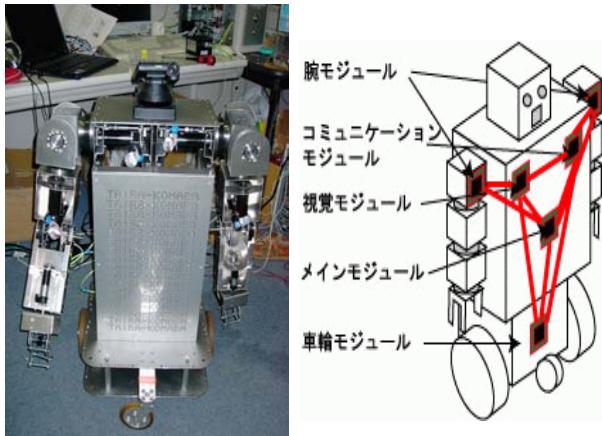


Fig.3 プロトタイプロボット

4.2 プロトタイプロボットによる基礎実験

プロトタイプロボットを用いて Fig.4 に示す基礎的な実験を行った。ロボットが人間の方へ向き、握手を促す行動を示している。メインモジュールからの要求で車輪制御モジュールが人間のいる方向へ向き(a)、人間を確認したら腕モジュールとコミュニケーションモジュールにタスクを要求し(b)、握手を行う(c)アプリケーションである。その際に、メインモジュールのシステム管理パート、車輪制御モジュールと腕モジュールのアクチュエータ制御は 1msec の周期で処理を行い、システムのリアルタイム制御と円滑な情報共有が行えた。

5. まとめ

本論文では、システムのリアルタイム性、モジュール間の円滑な情報共有、柔軟な開発性を実現するために、部位別にハードウェア、ソフトウェアをモジュール化した部位別機能モジュールから構成されるモジュール型ヒューマノイドロボットのシステムアーキテクチャを提案した。また、アーキテクチャに基づいてヒューマノイドロボットを実装し、行動例を示した。今後は数値データに基づく定量評価により、本提案機構およびアーキテクチャの有効性を示していく予定である。

謝辞

ロボットの開発において駒場製作所の駒場武志氏に貴重なご意見を頂きました。ここに深く感謝を表します。

参考文献

- [1] Kenji Kaneko, Fumio Kanehiro, Shuuji Kajita, Kazuhiko Yokoyama, Kazuhiko Akachi, Toshikazu Kawasaki, Shigehiko Ota, and Takakatsu Itozumi: "Design of Prototype Humanoid Robotics Platform for HRP", In IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 2431-2436, 2002.
- [2] R. Bischoff and V. Graefe: "Integrating, Vision, Touch and Natural Language in the Control of a Situation-Oriented Behavior-Based Humanoid Robot", In IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, pp. 999- 1004, 1999.
- [3] Yoshiaki Sakagami, Ryujin Watanabe, Chiaki Aoyama, Shinichi Matsunaga, Nobuo Higaki, and Kikuo Fujimura. "The intelligent ASIMO: System Overview and Integration", In IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 2478-2483, 2002.
- [4] "Responsive Link(IPSJ-TS 0006:2003)", <http://www.itscj.ipsj.or.jp/ipsj-ts/02-06/toc.htm>.
- [5] N. Yamasaki: "Responsive Processor for Parallel/Distributed Real-Time Control", in IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 1238-1244, Oct 2001.
- [6] H. Kobayashi and N. Yamasaki: "RT-Frontier: A Real-Time Operating System for Practical Imprecise Computation", in Proceedings of the 10th IEEE Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium, pp. 255-264, May 2004.
- [7] T. Taira and N. Yamasaki: "Functionally Distributed Control Architecture for Autonomous Mobile Robots", Journal of Robotics and Mechatronics, vol. 16, no. 2, pp. 217-224, 2004.
- [8] <http://www.omg.org/>
- [9] K. Katoh, H. Kobayashi, N. Yamasaki and Y. Anzai: "Elastic Network Management for Flexible and Efficient Real-Time Communication", Proceedings of 18th International Conference on Computers and Their Applications, pp. 80-83, 2003.
- [10] N. Yamasaki: "Design Concept of Responsive Multithreaded Processor for Distributed Real-Time Control", Journal of Robotics and Mechatronics, vol. 16, no. 2, pp. 194-199, 2004.