

「情報社会を支える新しい高性能情報処理技術」

平成 15 年度採択研究代表者

松井 俊浩

(独立行政法人産業技術総合研究所デジタルヒューマン研究センター センター長代理)

「ヒューマノイドのための実時間分散情報処理」

## 1. 研究実施の概要

本プロジェクトは、ヒューマノイドロボットの性能および信頼性の向上のため、従来少数のプロセッサによる集中制御を行っていたのを、30 以上のプロセッサによる分散制御を実現することを目的とする。それによって、処理能力のスケラブルな拡張が可能になり、並列処理活用することで低消費電力で従来以上の処理性能が得られる。プロセッサをセンサやアクチュエータの近くに配置することで、信号線の延長を大幅に削減し、高い信頼性が得られる。一方、従来モノリシックなプロセスで制御可能であったものを分散化させるため、通信およびマルチプロセス(スレッド)を実時間化し、優先度や資源割り当て等を行う基盤ソフトウェアが必要になる。

従って、本研究は、次の三つから構成される。①**RMTP の設計・開発**：実時間性にすぐれたマルチスレッド向きアーキテクチャ、低クロックでも性能を発揮するための並列性、実時間通信チャネルを備えたプロセッサを作成する、②**実時間基盤ソフトウェア**：Linux-2.6 を拡張して優先度に基づく実時間スケジューリングを可能にし、プログラムの実行時間を静的に予測する技術の研究。③**ロボット実証**：認識、対話、歩行、経路計画などの機能をモジュールに構成することで分散化し、並列処理を活用して性能向上を図る。

## 2. 研究実施内容

【RMT-LSI グループ(山崎 信行)】

### 1. $\mu$ RMTP の設計及び実装

2004 年度までに設計した  $\mu$  RMTP の半導体ベアチップ、パッケージ実装、評価ボードへの実装を行った。 $\mu$  RMTP には、以下に述べるリアルタイム計算、リアルタイム通信、コンピュータ制御、ロボット向き制御 I/O 各機能を System-on-a-chip として実装している。

- ・ リアルタイム処理機能：*RMT PU*
- ・ リアルタイム通信機能：*Responsive Link*
- ・ コンピュータ用周辺機能：PLL(1GHz, クロック制御機構)、PCI-X, IEEE1394(AV-Link), RS-232C(2ch), 32bit DMAC (12ch), 256bit DMAC (1ch), DDR SDRAM I/Fs (128/32bit),

ROM I/F, 汎用バス I/F

- 制御用周辺機能 : PWM generators (32bit, 100MHz, 9ch), PWM input (32bit, 2ch), Pulse counters (32bit, A, B, Z 相, 9ch)

$\mu$  RMTPは、バックエンド設計までを慶應義塾大学で行い、ファブリケーションは、0.13  $\mu$ m LV-FSG(CMOS 8層銅配線)プロセスでの製造を TSMC に委託した。ゲート数は約 14M ゲート、ダイサイズは  $9,980\text{ }\mu\text{m} \times 9,980\text{ }\mu\text{m} = 99.6\text{mm}^2$ 、Core 電圧 1.0V、I/O 電圧 3.3V (5V tolerant)、ピン数 1004 ピンである。消費電力は、ソフトウェアとハードウェアの電力制御機構により 0.1~4W と可変である。以下に、レイアウト図とチップ写真を示す。

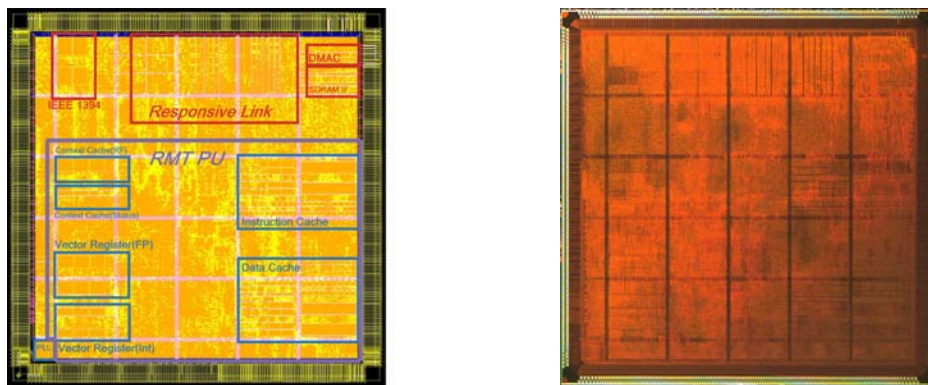


図1  $\mu$  RMTP のダイとレイアウト

## 2. $\mu$ RMTP の評価ボードの設計及び実装

$\mu$  RMTPの動作テストと性能評価を行い、ソフトウェア開発の効率化のために  $\mu$  RMTP の通常パッケージ (SiP 化しないことを意味する)及び PCI 評価ボードを作成した。パッケージのサイズは  $4.0\text{cm} \times 4.0\text{cm}$  であり、アルミニウムのヒートスプレッダで放熱する。評価ボードは、PCI フルサイズの 12 層基板で作成し、DC-DC 電源(2.5V, 1.0V)、ブート ROM、Responsive Link コネクタ(RJ45 x 2)、64bit 3.3V PCI エッジ、SO-DIMM x 2、RS-232C x 2、全信号線を計測するための Mictor コネクタ x 11 等を配置している。以下にパッケージと PCI 評価ボードを示す。



図2  $\mu$  RMTP のパッケージと PCI 評価ボード

### 3. $\mu$ RMTP のクロス開発環境の設計及び実装

$\mu$  RMTP のクロス開発環境の設計及び実装を行った。 $\mu$  RMTP の ISA は MIPS の上位互換であるが、GNU の GCC と binutils をベースにし、 $\mu$  RMTP のネイティブコード（マルチスレッド命令、ベクトル命令等）を出力できるように設計を行った。

#### 【基盤ソフトウェアグループ(石川裕)】

2004年度に引続き、RMTPクロックレベルシミュレータレベルを用いたLinux-2.6カーネルの移植を行なった。クロックレベルシミュレータの実行速度は500Hzと実機の100MHzの20万分の1であり、複雑なLinuxコードの検証には長時間を要する。クロックレベルシミュレータで2ヶ月間実行後（実機での25秒の実行に相当）に、カーネルが予期せぬ状態に陥る現象でハングした。この後は、実機が使えるようになるまでデバッグ作業が出来なくなった。3月に実機が稼働し、現在、論理設計バグを回避する方法を検討しながら移植を進めている。

Shi-Linux 実時間 Linux カーネルは、従来、8259A 割り込みコントローラに接続されているPIT(Programmable Interval Timer)を利用していた。このために、周期を短くすると spurious interrupt が発生していた。本現象は、マニュアルに書かれている仕様であり、回避できない現象であることが判明したため、Local APIC timer による割り込みに変更し、この問題を解決した。

プログラム実行時間の静的予測を行うツールに関しては、今まで、GCC Version 3を使用していたが、GCC Version 4に移行した。これにより、高位中間コードであるTREEを利用できるようになり、プログラムの解析が容易になった。2004年度版では、レジスタを使用する簡単なプログラムの見積りが可能であったが、これをキャッシュを含めた解析を行なうようにした。キャッシュ解析では、プログラムの断片（基本ブロック）毎に実機上で動くようなコードを生成し、基本ブロック毎に実行時間を解析する。さらに、メモリアクセスパターンを求めることにより、メモリアクセスを見積り、全体の実行時間を解析するという手法を採用した。XScale プロセッサにおいて、行列計算の実行時間を予測すると、問題サイズが16KBのときに実測値の106%、128KBのときに実測値の102%の所要時間となることが予測できた。本手法は、プロセッサの仕様が明らかである限り多様な応用が可能であり、RMTPでのWCETも十分な精度で予測できると考えられる。

#### 【ロボット実証グループ(松井俊浩・比留川博久)】

$\mu$  RMTP の分散実時間制御機能を活用し、自立型等身大ヒューマノイドロボットに搭載することが可能なアンプ機能を備えた小型の関節制御ノードを開発する。図3は、分散型小型ドライバを各リンクに搭載した自立型等身大ヒューマノイドロボットのイメージ図である。



図3 分散型小型ドライバを各リンクに搭載した自立型等身大ヒューマノイドロボット

狭隘な関節部にモーターと共に実装するため、極限的な小型化が必要になる。従来のドライバは、エンコーダ用のセンサ基板、駆動制御用の基板、モータに電流を流すモータ駆動基板が独立して存在していたため、各基板間のアイソレーション／相互間の信号の送受信に、数多くの IC を必要とし、小型化への大きな障害になっていた。関節ノードの小型化のため、回路①：駆動制御回路部（ファームウェアによる DC/AC モータの切替、制御）、回路②：センサ回路部（モータロータの回転角検出）、回路③：モータ駆動回路（パワー素子：FET を介してモータに電流を供給）を一体の 1 つの回路と考え、これらの回路を、2 枚の基本構成基板にまとめることにより、回路の簡略化と小型化を実現することとした。図 4 に、分散型小型ドライバの構成図を示す。

MPU ボードには、駆動制御演算を行うと同時に体内ネットワークを構成するためのチップが組み込まれたマイクロプロセッサ（MPU）を搭載している。実装の検討と評価のため、従来型の DSP を MPU に用いるものと  $\mu$ RMTP を用いるもの、2 種類を開発する。2005 年度は、従来型 DSP 版を製作した。また、モータ駆動基板を設計する際に、PWM のより精密な制御が必要であることが認識され、 $\mu$ RMTP の再設計に反映させることとした。

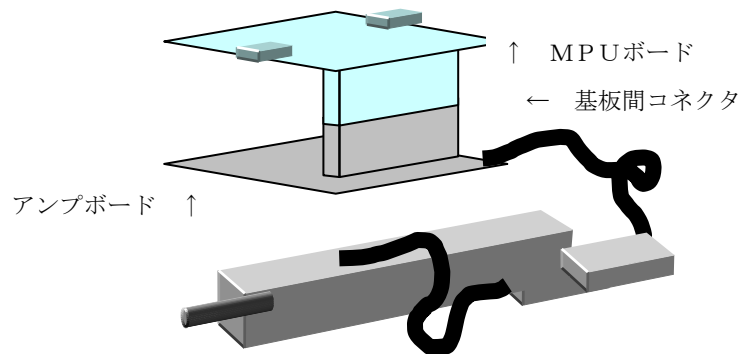


図4 分散型小型ドライバ構成図

### 3. 研究実施体制

RMT-LSI グループ（山崎 信行）

- ①研究分担グループ長：山崎 信行（慶應義塾大学、助教授）
- ②研究項目：研究実施項目：実時間通信・処理・制御用システムオンチップの研究開発

基盤ソフトウェアグループ（石川 裕）

- ①研究分担グループ長：石川 裕（東京大学、助教授）
- ②研究項目：実時間オペレーティングシステムと開発環境の開発

ロボット実証グループ（松井俊浩・比留川博久）

- ①研究分担グループ長：比留川 博久（産業技術総合研究所、グループリーダー）
- ②研究項目：研究実施項目：ヒューマノイドロボットの分散制御系の研究

### 4. 主な研究成果の発表

(1) 論文（原著論文）発表

- 小林秀典,山崎信行,“資源制約を持つ拡張インプリサイタスクの実時間スケジューリング”, 情報処理学会論文誌コンピューティングシステム, Vol. 46, No.SIG 16, pp. 69 - 84, 2005.
- T. Itou and N. Yamasaki, “Design and Implementation of the Multimedia Operation Mechanism for Responsive Multithreaded Processor,” Journal of Robotics and Mechatronics, Vol. 17, No. 4, pp. 456-462, August, 2005.
- N.Yamasaki,“Responsive Multithreaded Processor for Distributed Real-TimeSystems”, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol. 17, No. 2, pp. 130-141,2005.