

# 1ms 感覚運動統合システムにおける高速並列分散処理

## High-speed Parallel Distributed Processing in 1ms Sensory-Motor Fusion System

○ 並木 明夫 (東大) 中坊 嘉宏 (東大) 石井 抱 (東大) 正 石川 正俊 (東大)

Akio NAMIKI, Yoshihiro NAKABO, Idaku ISHII, Masatoshi ISHIKAWA, University of Tokyo

**Abstract:** To realize robotic manipulation tasks in the real world in which there are dynamic changes, sudden accidents or uncertainty of parameters, we have developed a high-speed sensory processing system called 1ms sensory-motor fusion system. This system consists of three parts: a hierarchical parallel sensory processing system with multi-DSPs, an active vision with the parallel processing vision system called SPE-256, and a multi-fingered hand-arm system like a human hand. On this system a grasping algorithm is implemented making use of multiprocessing and multithread programming. As a result the ability to process sensory feedback at high speed, that is, in about 1ms is realized. Experimental results about grasping of an moving object at high speed are presented.

**Key Words:** sensory-motor fusion, multi-DSP processing system, active vision, dextrous hand-arm, multiprocessing and multithread, grasping

### 1. はじめに

実環境で動作するマニピュレーションシステムでは、環境パラメータをあらかじめ知ることのできないといった未知性や、観測誤差やモデル化誤差によって生じる不確実性を補償する多角的な認識能力が必要とされる。また、それらの環境パラメータは作業中に動的に変化し、多くの場合はその変化を完全に予測することは困難であり、環境の変化に遅延なく追従する高速な認識能力も必要とされる。

このように、実環境に対応するためには、計画された環境の下で動作するマニピュレーションシステムとは異なり、高度なセンサ情報処理能力をもつシステムが必要になる。しかし、従来開発されてきた多くのシステムでは、機構部分の構成と制御指令の計算アーキテクチャに重点が置かれており、センシングとセンサ情報処理アーキテクチャに重点を置いて開発されたシステムは少なかった。

このような背景のもとに、我々は、高速なセンサ情報処理機能を持つ汎用マニピュレーションシステムとして、1ms 感覚運動統合システムを開発した [1]。本システムは、高速なセンサ情報処理能力を重視して設計されたシステムであり、結果として、視覚を含む全てのセンサフィードバックを約 1ms のサイクルタイムで実行する能力を実現することができた。本論文では、このシステムの構築方針、構成要素、その能力について説明する。

### 2. 1ms 感覚運動統合システムの設計方針

本システムの目的は、高速なセンサ情報処理能力を用いることによって、実環境における様々な問題、例えば、パラメータの不確実性や、パラメータの動的な時間変化、等を克服するマニピュレーションを実現することである。このため、次の 2 つの設計方針に基づいてシステム構築を行うことにした。

#### (1) センサフィードバックの高速化 (サイクルタイム 1ms)

環境の変化に対する高い応答性能を実現するために、内界センサと外界センサによる全てのセンサフィードバックの高速処理を実現する。特に、全てのセンサフィードバックを 1ms のサイクルタイムで実現することを目標とする。これは、ロボットなどの機械システムを機械的共振をおこさずに安定に制御するために必要とされる周波数として知られている。

#### (2) センサフィードバックの階層並列化

高速センサフィードバックによって実現される高応答なマニピュレーションを、多様な環境状態や複雑な作業目的に対応させるために、複数のセンサフィードバックの階層並列処理が可能なシステム構造を採用する。また、その階層並列構造は、環境の変化や作業目的の変化に対応できるように、可変で柔軟性の高いものとする。

### 3. 1ms 感覚運動統合システム

Fig.1 (a) に、構築したシステムのアーキテクチャを示す。これは、DSP 階層並列情報処理システム、アクティブビジョン、多指ハンド、アームの 4 つのサブシステムを統合したものとなっている。

このうち、DSP 階層並列情報処理システムは、浮動小数点 DSP である TMS320C40 (Texas Instrument Ltd. 製、処理速度:275MOPS、データ転送速度:120Mbyte/sec) を階層並列的に並べたマルチプロセッサシステムであり、センサフィードバックを 1ms のサイクルタイムで処理するための主要部分となる。その階層並列構造は、7 つの C40 を 1 対 1 に接続することで、通信のボトルネックが最小になるように構成されている。また、多数の I/O (A/D 変換器 (12bit・64CH)、D/A 変換器 (12bit・24CH)、デジタル IO (8bit・8 ポート)) を複数の DSP にできる限り分散して配置することで、I/O のボトルネックを小さく抑えている。

一方、アクティブビジョン部は、高速視覚処理を行うビジョンチップシステム SPE-256 と視線を変更するための 2 軸アクチュエータ部分からなる。このうち、SPE-256 は  $16 \times 16 = 256$  個の PE (Processing Element) と、 $16 \times 16$  素子の PIN フォトダイオード (PD) アレイによって構成されている。各 PE は 24bit のレジスタを持つ 4 近傍接続の SIMD 型プロセッサであり、PD と一対一に結線されている。そのため、入力画像の各画素に対して完全並列な処理が可能となり、従来のビデオフレームレート (30Hz) の限界を超えた高速な視覚処理 (1kHz 以上) が可能となる。

また、ハンド部 (三菱重工製) は、3 本の指と親指が対向した構造を持つ、人間の手に似た多指ハンドであり、各関節は DC サーボモータによってワイヤを通して遠隔駆動される。また、各関節ごとに、関節角計測用のポテンショメータと歪みゲージを用いた力覚センサが装備されている。

最後に、アーム部 (三菱重工製) は、7 関節 7 自由度を持つ冗長マニピュレータであり、各関節にエンコーダが、また、手首には 6 軸力覚センサが装備されている。

### 4. 1ms 感覚運動統合システム上での並列分散処理

本システムでは、開発言語として Parallel C (3L Ltd. 製) を用いている。この処理系は、リアルタイムのプロセス管理機能を持つマイクロカーネルを備えており、厳密なリアルタイム制御を容易に実現することができる。また、C40 同士の通信機能やマルチスレッドもサポートしているので、並列処理にも適している。言語仕様としては、ANSI C に準拠した C 言語であるため、従来のアセンブラを使ったソフトウェア開発に比べて効率的に作業を進めることができるという利点も持つ。開発は上位のワークステーション上で行われ、作成された実行ファイルは DSP 上にダウンロードされてから始動する。

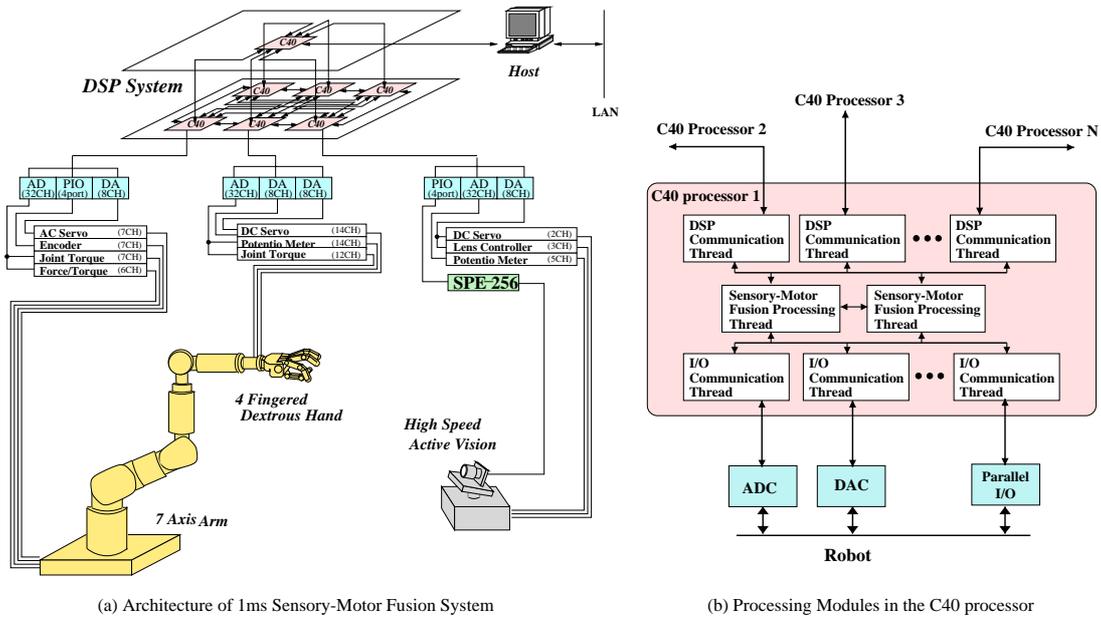


Fig.1 1ms 感覚運動統合システムのアーキテクチャ

また、システムソフトウェアは、Parallel C のマルチプロセス機能とマルチスレッド機能を利用することで実現されている。Fig.1 (b) に、この様子を示す。これは、一つの DSP 上で実行されるプロセスの内容を示している図であり、プロセス内部で、主処理スレッドと I/O 通信スレッド、DSP 通信スレッドの 3 種類のスレッドが平行して実行されている。このうち、I/O スレッドは I/O を通じてロボットとの通信処理を実現するものであり、DSP 通信スレッドは、他のプロセッサとの通信処理を行うスレッドである。また、各スレッドは、共有メモリを通してデータを共有することで通信を行っている。このような構成を取ることで、I/O 処理、通信処理と主処理を並列化することができ、I/O や通信のオーバヘッドを最小限に抑えることが可能となる。

5. 高速把握実験

構築したシステムの有効性を示すために、高速かつランダムな軌道を描きながら移動する物体に対する把握行動を実現した。対象となる直方物体を人間の手で自由に動かすことで、高速で複雑な対象の動作を実現した。

Fig.2 にアクティブビジョンを中心にして、把握の挙動を 0.2s おきに示した連続写真を示す。ここでは、対象の動きに対して、アクティブビジョン、ハンドが共に高速に追従し (0.0s ~ 1.0s)、最終的に把握が実現されている (1.2s ~ 1.6s) 様子が示されている。

また、Fig.3 に、同じ把握行動をハンドアームを中心にして、0.4s おきに示した連続写真を示す。ここでは、0.0s から 2.0s までは、対象をつかむまでの把握動作が示され、2.0s 以降は把握後の挙動が示されている。把握後の挙動を見ると、対象の傾きを任意に変化させているにもかかわらず、ハンドアームは対象の動きに追従して把握状態が保持され続けている。これは、視覚フィードバックによる対象追従と手先や手首に装備した力覚センサフィードバックを用いたコンプライアンス制御が融合した形で実現されている。

6. ま と め

本論文では、実環境マニピュレーションの実現を目的として構築された 1ms 感覚運動統合システムについて、そのシステムアーキテクチャとそれ上の並列分散処理構造を説明した。また、このシステムを用いることで、移動物体に対する高速把握実験を行い、その有効性を示した。

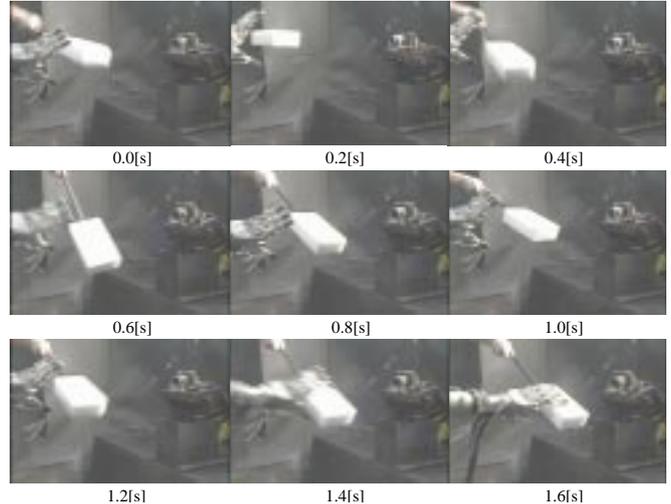


Fig.2 実験結果: アクティブビジョン中心視点

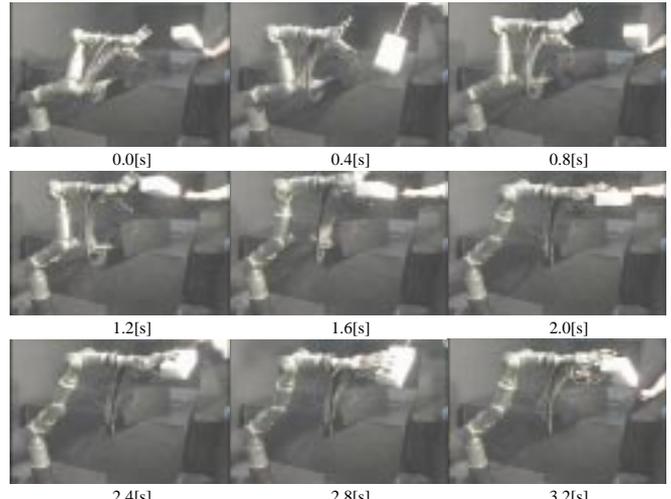


Fig.3 実験結果: ハンドアーム中心視点

参考文献

[1] 並木, 中坊, 石井, 石川. 高速センサフィードバックを用いた感覚運動統合把握システム. 第 4 回ロボティクスシンポジウム, 1999.