

## 平成 16 年度科学研究費補助金（基盤研究（S））研究状況報告書

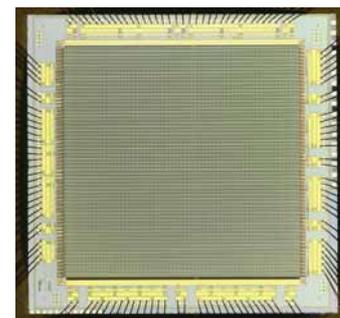
ふりがな	いしかわ まさとし					
研究代表者氏名	石川 正俊		所属研究機関・部局・職		東京大学・大学院情報理工学系研究科・教授	
研究課題名	和文	分散ネットワーク構造を有する超高速認識行動システム				
	英文	Ultra-High-speed Sensory-Motor System Based on Distributed Network Architecture				
研究経費	平成14年度	平成15年度	平成16年度	平成17年度	平成18年度	総合計
16年度以降は内約額 金額単位：千円	10,000	8,100	30,300	31,010	13,290	92,700
研究組織（研究代表者及び研究分担者）						
氏名	所属研究機関・部局・職	現在の専門	役割分担（研究実施計画に対する分担事項）			
石川 正俊	大学院情報理工学系研究科・教授	センサ情報処理	研究の総括・アーキテクチャ設計の研究			
並木 明夫	大学院情報理工学系研究科・講師	ロボティクス	高速センサフィードバックの研究			
小室 孝	大学院情報理工学系研究科・助手	集積化知能	階層並列型処理システムの研究			
鏡 慎吾	大学院情報理工学系研究科・助手	集積化知能	分散ネットワーク設計の研究			
当初の研究目的（交付申請書に記載した研究目的を簡潔に記入してください。）						
<p>近年、自動化システムの大規模化に伴って、多数のセンサとアクチュエータを分散ネットワーク上で結合し、環境の変化に有機的かつ高速に应答する大規模な認識・行動システムの必要性が高まっている。しかし現状ではセンサ、アクチュエータなどの高速性に問題があり、また分散ネットワーク上の情報統合、リコンフィギャラブルシステムなどの理論的な基盤とハードウェア技術の未整備という問題があつて、未だこれらは実現されていない。そこで本研究では、このような分散ネットワーク構造に基づいた大規模な高速リアルタイム認識・行動システムを開発し、環境変動に応じて有機的に再構成される新しい階層型統合モデルの構築を目的とする。</p> <p>研究代表者らは、これまでに階層型の感覚運動統合モデルを「センサフュージョン」という概念として定義し、この考えに基づいてロボットハンド、アーム、アクティブビジョンを同時に、視覚を含めて 1ms という従来にない高速なサイクルタイムで制御する 1ms 感覚運動統合システムを開発し、またビジョンチップと呼ぶ超高速集積化視覚処理チップを開発して、高速視覚フィードバックの有効性を実証した。本研究では、研究代表者らのこれらの研究実績をもとに、これまでの階層型統合モデルに基づく高速センサフィードバックを、より大規模な分散ネットワーク構造に拡張するため、新たな情報統合理論を打ち立て、システムアーキテクチャを拡張することを目的とする。具体的には基盤技術として i) 階層並列構造による感覚運動統合、ii) 認識と行動の超高速性、iii) 分散ネットワーク構造、の 3 つを明らかにしたうえで、最終的にこれらを統合し、多数のセンサとアクチュエータをネットワーク上で結合した、実環境に高速かつ柔軟に対応する認識・行動システムを実現する。</p>						

これまでの研究経過（研究の進捗状況について、必要に応じて図表等を用いながら、具体的に記入してください。）

## 1. 認識と行動の超高速性の実現

### 1.1 PE 結合機能を持つ高速デジタルビジョンチップの開発

研究代表者らは、これまでに、センサと処理回路を 1 チップに収めたビジョンチップシステムを開発してきた。しかし、各プロセッシングエレメント(PE)の演算能力やメモリサイズが小さいなどの問題があり、複雑な視覚処理を行う上で問題になっていた。この問題を解決するために、複数の PE を結合してブロック化することができるビジョンチップを開発した。試作したチップを右図に示す。0.35  $\mu\text{m}$  CMOS プロセス、エリアサイズ 5.4mm $\times$ 5.4mm の中に 64 $\times$ 64 画素が搭載されている。PE を結合してブロックを作ることで、多ビット演算を容易にし、モーメント特徴量などのグローバル特徴の計算などを高速に行うことが可能となった。

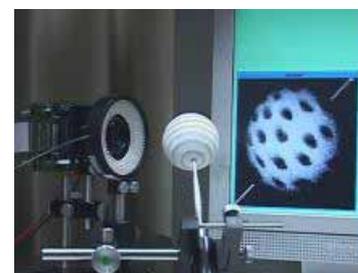


### 1.2 ソフトウェア A-D 変換によるビジョンチップの高感度化

一般に高速ビジョンシステムは、光を蓄積する時間が短いので、通常ビジョンに比べると感度に劣るという問題があった。そこで、画素ごとにプログラマブルな PE を持つというビジョンチップの構造を利用して、受光素子(PD)を PE でソフトウェア的に制御することにより、A-D 変換の特性をプログラマブルに変更することで、広いダイナミックレンジを実現した。結果として、高速性と高感度を両立した視覚処理が可能となった。

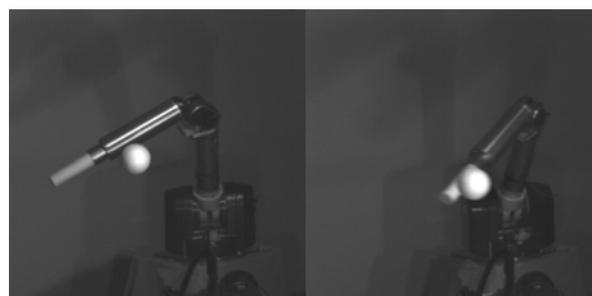
### 1.3 マルチターゲットトラッキングアルゴリズムの開発

複数の対象をリアルタイムで追跡するために、2 分探索アルゴリズムを利用したマルチターゲットトラッキングアルゴリズムを開発した。このアルゴリズムを対象上の複数の特徴点に適用することで、対象の回転方向や回転速度の実時間計測を実現した。右図に実験の様子を示す。回転する球の上の特徴点をリアルタイムで追跡し、それらの動きから球の回転を計測している。これにより、例えば、飛んでくるボールの回転情報から軌道を予測したりすることが可能になると期待される。



## 2. 階層並列構造による感覚運動統合の実現

分散ネットワーク構造に対応して、多数のセンサシステムと多数のロボットシステムを実時間で接続するために、16 個の DSP(TMS320C6701)を用いた並列分散処理システムを開発した。また、開発したシステムの上で動作する実時間並列制御のソフトウェア環境を開発した。この環境では、タスク切替、軌道生成、行動制御などの各モジュールを定義することで、それらのモジュールを統合した階層並列処理が実現される。この並列分散処理システムに、多数のロボットシステムを接続して、視覚を用いたダイナミックキャッチング、バッティングなどのデモンストレーションを行った。右図にバッティングの様子を示す。高速分散処理により、変化する球に対しても高速な打撃を実現している。なお、アームやハンドなどのメカニズムは別プロジェクトにて開発したものであり、本研究ではそれらを制御する並列分散システムの開発を行っている。



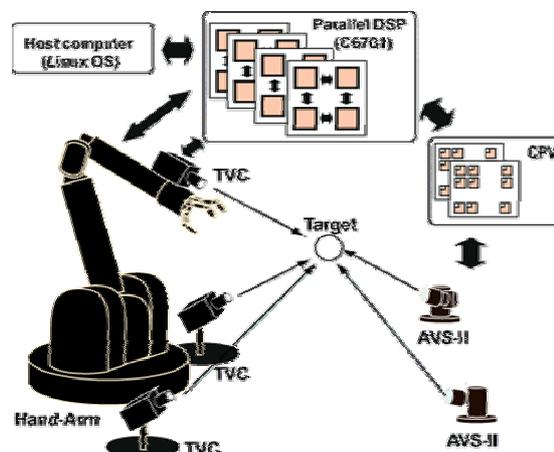
## 3. 分散ネットワーク構造の実現

### 3.1 多眼ビジュアルフィードバックシステム

視覚を多数用意し、様々な角度から計測することで、オクルージョンの問題を回避し、また、複数物体の同時トラッキング、視野の拡大を実現することを目指して、多眼ビジュアルフィードバックシステムを構築した。構築したシステムを右図に示す。マニピュレータの手先や外部など、視覚を多様な位置に配置することで、対象追跡能力の向上を実現した。

### 3.2 通信遅延を考慮したセンサ選択手法

多数のセンサ群の中から、各センサの精度と通信遅延の大きさをも考慮したセンサ選択手法を開発した。information form と呼ばれる形式のカルマンフィルタを用いて、遅れて到着する観測情報を統合可能なセンサフュージョンアルゴリズムを構成し、これをベースとすると各センサがもたらす情報量が単純な形で計算できることを示した。

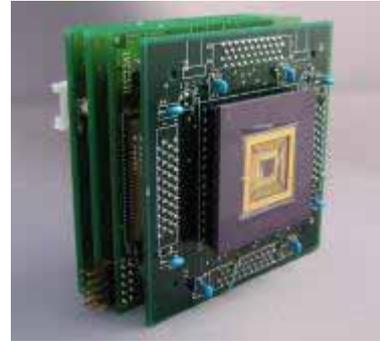


特記事項（これまでの研究において得られた、独創性・新規性を格段に発展させる結果あるいは可能性、新たな知見、学問的・学術的なインパクト等特記すべき事項があれば記入してください。）

本研究は、多数のセンサとアクチュエータをネットワーク上で結合した、実環境に高速かつ柔軟に対応する認識・行動システムを実現することを目標としている。これまでの成果において、特に顕著な学術的なインパクトとして、次のことが挙げられる。

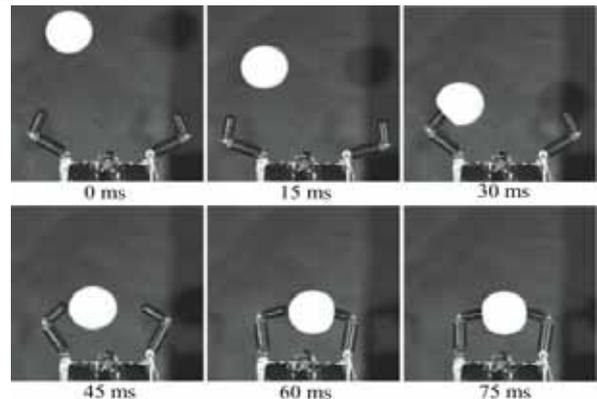
### 1. 超高速ビジョンチップシステムによる高度視覚情報処理システムの開発

本研究では、認識の高速化を実現するために、超並列超高速ビジョンチップシステムの開発を行っている。超並列・超高速ビジョンチップシステムは、フォトディテクタとプロセッシングエレメントを1つのLSIに集積化することで、画像転送のボトルネックをなくし、完全並列演算を実現することで、視覚処理の高速化を行うものである。本研究では、単にLSIチップの設計・開発を行うだけではなく、ビジョンチップの制御を行うコントローラの開発、上位システムとのインターフェースの開発、並列演算処理を行うためのソフトウェア開発環境の開発などを行い、全体として単体で動作する高度視覚情報処理システムの開発を目指している。右図は、ビジョンチップシステム、コントローラボードを一体化したビジョンチップシステムである。本研究のように、デバイスから、制御、ソフトウェアまで含めたシステム開発を行い、実際のアプリケーションに応用した例はこれまでに見当たらない。



### 2. 並列分散処理システムを用いた高速ロボット制御の実現

本研究では、認識行動の高速化のための並列分散処理システムの開発を行っている。現在までに開発されたシステムは、16個のDSP(TMS320C6701)を備えており、多数のロボットシステムを接続するために、IOとして、DIO256bit、A/DとD/A、パルスカウンタをそれぞれ48CHずつ備えている。これらのI/Oに、高速視覚システム2台、2自由度アクティブビジョン2台、4自由度ワイヤ駆動高速ロボットアーム2台、10自由度高速ロボットハンドユニット2台を接続して、実時間でのセンサフィードバック制御を実現している。これらを用いて、上述のバッティングタスクの他に、右図に示すような、視覚フィードバック制御されたロボットハンドによる落下球の捕球などのデモンストレーションで、人間を超える高速性と精密性を実現している。このような、多数のセンサ・アクチュエータを統合したシステムについてはこれまでに例がなく、方法論も確立されていない。これに対して研究代表者は、階層型感覚運動統合モデルに基づく超高速センサフィードバックを基盤とし、これを分散ネットワーク構造に拡張して新たな統合モデルを提案することで、このような並列分散処理システムを実現している。



このように本研究はビジョンチップによる超高速視覚処理や超高速マニピュレーションなど、他の研究に類をみない基盤技術要素を含むものであり、これらを統合した大規模リアルタイム制御の研究は、理論や設計コンセプトを含めていまだほとんど研究されておらず、本研究が先駆的な役割を果たすと期待できる。また、このようなシステムを実際に構築するためにはセンサ、アクチュエータ、ネットワークについてデバイスレベルからシステムレベルまでの幅広い知見と開発力が必要となるが、これらを有して実際に様々なシステム開発の実績をもつ研究グループは研究代表者ら以外に見当たらない。

また、本研究で実現される基盤技術は、ネットワークを通じて大規模に展開する高度知能化システムへの道筋をつけるものであり、同時に日常環境での安全かつ柔軟な運用が必要な分野で応用が見込まれる。例えばFA分野では従来を大幅に上まわる超高速生産ラインが、医療福祉分野では分散型人間支援ロボット環境が、またITSでは自動化交通システム、危険回避システムなどの幅広い分野での応用が見込まれ、本研究の意義は高いものである。

研究成果の発表状況 (この研究費による成果の発表に限り、学術誌等に発表した論文(発表予定のものを記入することも可能。)の全著者名、論文名、学協会誌名、巻(号)、最初と最後のページ、発表年(西暦)及び国際会議、学会等における発表状況について記入してください。)

(学術論文誌)

1. Takashi Komuro, Shingo Kagami, Masatoshi Ishikawa: A Dynamically Reconfigurable SIMD Processor for a Vision Chip, IEEE Journal of Solid-State Circuits, Vol. 39, No. 1, pp. 265-268 (2004)
2. Takashi Komuro, Idaku Ishii, Masatoshi Ishikawa and Atsushi Yoshida : A Digital Vision Chip Specialized for High-speed Target Tracking, IEEE transaction on Electron Devices, Vol.50, No.1, pp.191-199 (2003.1)
3. 小室孝,鏡慎吾,石川正俊:ビジョンチップのための動的再構成可能な SIMD プロセッサ,電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol.J86-D-II No.11, pp.1575-1585 (2003)
4. 渡辺義浩,小室孝,鏡慎吾,石川正俊:ビジョンチップのためのマルチターゲットトラッキングとその応用,電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol.J86-D-II No.10, pp.1411-1419 (2003)
5. 鏡 慎吾,小室 孝,藤村 英範,石川 正俊:ディジタルビジョンチップのためのソフトウェア A-D 変換手法,映像情報メディア学会誌,Vol.57, No. 3, pp. 385-390 (2003)
6. Akio Namiki, Takashi Komuro, Masatoshi Ishikawa : High Speed Sensory-Motor Fusion Based on Dynamics Matching, Proceedings of the IEEE, Vol.90, No.7, pp.1178-1187 (2002)
7. 奥 寛雅,石川 正俊:キロヘルツオーダーで応答可能な高速ビジョンチップ用可変焦点レンズの構造,光学,vol. 31, no. 10, pp. 758-764, 2002 年
8. 並木明夫,石井抱,石川正俊:高速センサフィードバックに基づく把握行動,日本ロボット学会誌,Vol.20, No.7, pp.47-56 (2002)

(解説論文)

1. K. Hashimoto : A review on vision-based control of robot manipulators, Advanced Robotics, Vol.17, No.10, pp.969-991 (2003)
2. 鏡 慎吾,石川 正俊:分散リアルタイムセンシングによる高速動作獲得技術,情報処理,Vol.44, No. 1, pp. 34-39 (2003)
3. 小室 孝,並木明夫,石川正俊:多機能な目,映像情報メディア学会誌,Vol.56, No.3, pp.356-359 (2002)

(招待講演)

4. 石川 正俊,小室 孝:ビジョンチップ応用の新展開(特別招待講演),電子情報通信学会集積回路研究会(東京,2003.7.24) / 電子情報通信学会技術研究報告,Vol.103, No.216, ICD2003-43, pp.25-30
5. 石川 正俊,小室 孝,鏡 慎吾:ディジタルビジョンチップの新展開(特別招待講演),電子情報通信学会集積回路研究会,電子情報通信学会技術報告,ICD2002-39, pp.23-28 (2002.7.25)

(国際学会発表(査読付))

1. Shingo Kagami, Takashi Komuro, Masatoshi Ishikawa : An Advanced Digital Vision Chip and Its System Implementation, SICE Annual Conference 2003 (Fukui, 2003.8.5) / Proceedings, pp.2512-2515
2. Yoshihiro Watanabe, Takashi Komuro, Shingo Kagami, Masatoshi Ishikawa : Vision Chip Architecture for Simultaneous Output of Multi-Target Positions, SICE Annual Conference 2003 (Fukui, 2003.8.5) / Proceedings, pp.2591-2594
3. Shingo Kagami, Takashi Komuro, Masatoshi Ishikawa : A Software-Controlled Pixel-Level A-D Conversion Method for Digital Vision Chips, 2003 IEEE Workshop on Charge-Coupled Devices and Advanced Image Sensors (Elmau, 2003.5.17)
4. Takashi Komuro, Shingo Kagami, Masatoshi Ishikawa : A High Speed Digital Vision Chip with Multi-grained Parallel Processing Capability, 2003 IEEE Workshop on Charge-Coupled Devices and Advanced Image Sensors (Elmau, 2003.5.15)
6. Akio NAMIKI, Masatoshi ISHIKAWA : Robotic Catching Using a Direct Mapping from Visual Information to Motor Command, Proc. 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.2400-2405, 2003
7. Akio Namiki and Masatoshi Ishikawa : Vision-Based Online Trajectory Generation and Its Application to Catching, Second Joint CSS/RAS International Workshop on CONTROL PROBLEMS IN ROBOTICS AND AUTOMATION (Las Vegas, Nevada, 2002.12.14)
8. K. Hashimoto : A visuomotor control architecture for high-speed grasping, Workshop on Visual Servoing at 2002 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, (Lausanne, Switzerland, October 1, 2002)