

「脳を創る」

平成11年度採択研究代表者

石川 正俊

(東京大学大学院情報理工学系研究科 教授)

## 「感覚運動統合理論に基づく「手と脳」の工学的実現」

### 1. 研究実施の概要

本研究は、人間の優れた「手と脳」の基本的機能を、工学的に実現可能とする新たな実時間感覚運動統合理論を提案し、本研究で設計・開発する視触覚を有する高速ロボットシステム上でその有効性を実証することを目的とする。特に、人間の「手と脳」の有する感覚運動統合機能と感覚系・運動系の持つ動特性の関連に注目し、センサ系とアクチュエータ系の動特性を考慮した実時間感覚運動統合理論を構築し、それに基づき工学的な「手と脳」システムを実現するものである。

このような研究方針のもとに、平成11年度は、平成12年度に引き続き、実時間感覚運動統合システム、能動的感覚運動統合学習理論、実時間視覚情報処理、実時間触覚情報処理、脳型情報処理LSI、高速アーム、高速ハンドの各研究グループに分かれて基礎的な理論に関する研究を行った。また、基礎的な実験データを得るための予備実験システムの構築を開始し、そのための各方式についての検討を行った。さらに、計算機環境やLSI開発環境等のシステム開発環境の整備を実行した。各研究グループごとの研究実施の概要は以下の通りである。

#### 1. 実時間感覚運動統合システムの研究

双眼・双腕を備えた実時間感覚運動統合システムの開発を行った。特に、腕、眼などの各システム構成要素を並列に制御するための制御システムの開発を行った。また、システム上で複雑なタスクを実行するための、階層並列情報処理モデルに関する研究を行った。

#### 2. 能動的感覚運動統合学習理論の研究

「手と脳」のための実時間感覚運動統合理論の研究を行った。特に、感覚系、運動系、情報処理系などの感覚運動統合システムを構成する各要素のダイナミクスに注目し、それらの有する拘束条件を考慮した上でシステムを設計するための方法論に関する研究を行った。

#### 3. 実時間視覚情報処理の研究

1 msの高速なレートで情報処理が行える超並列高速視覚処理システムの開発を行った。平成12年度は、平成11年度までに開発した単眼トラッキングシステム

を両眼化に関して研究を行った。

#### 4．実時間触覚情報処理の研究

「手と脳」のための感覚運動統合理論に対応した、実時間触覚情報処理の研究を行った。特に高速かつ器用な操りを可能とするため、可動部を有する多指ハンド上に実装可能な、高密度空間解像度を持つ分布型触覚センサの構築を、新素材の導入、超並列触覚情報処理システムの開発の2点から検討を行った。

#### 5．脳型情報処理LSIの研究

感覚運動統合理論のための脳システムの開発を行った。人間の脳に近い演算能力を実現するために、市販のDSP類では実現困難なスペックである200Mb/sのデータ通信速度と1 GFLOPS程度の演算能力を目指して、動的再構成可能なネットワーク機能を持ったマルチDSPシステムの開発を行った。

#### 6．高速アームの研究

感覚運動統合理論を検証するための、高速アクチュエータシステムに関する基礎的な研究を行った。特に、非力なアクチュエータを用いて高速な動作を実行するための制御手法に関する理論的な研究を行った。

#### 7．高速ハンドの研究

感覚運動統合理論を実証するために、人間並みの軽量性・高速性を有する多指ハンドシステムに関する研究を行った。特に軽量性・高速性を追及するために、高速性を生み出すためのアクチュエータの駆動原理に関する研究を行った。また、高速動作を行わせたときの把握動作に関する理論的研究を行った。

## 2．研究実施内容

### 研究グループA

研究課題：感覚運動統合システムの開発、実時間視覚情報処理システムの開発、高速アームの開発

#### 1．センサフィードバックに基づく階層型並列情報処理モデルの構築

センサフィードバックに基づく階層型並列処理によって、環境の変化に高い応答性能を持つ多指ハンドの把握・操りを実現した。まず、高速センサフィードバックの把握・操りタスクにおける役割を考察し、その結果に基づき、センサフィードバックに基づく階層型並列処理モデルを提案した。次に、このモデルに基づき、把握行動と物体操作、障害物回避の3つのタスクを統合した視覚センサフィードバックアルゴリズムを考案した。最後に、このアルゴリズムを、センサフィードバックを1msのサイクルタイムで実行する能力を持つ1ms感覚運動統合システム上に実装することで、動的かつ予測不可能な動きをする高速運動物体に対する把握や操りを実現した。このアーキテクチャでは予測や学習などの高次の処理が省かれているが、実験の結果より、このような簡略

なアルゴリズムでも、環境に対する高い適応能力を持つ把握行動が実現できることがわかった。

## 2．力学的エネルギーの蓄積と放出を利用した高速マニピュレーションの基礎研究

ロボットに多く用いられる電磁モータは重量出力比が小さいので高い減速比を持つ減速器が必要となり、高速な運動の実現を妨げている。一方、DDモータのように減速機構を省いた場合、モータのサイズが大きくなり、ハンドやリストのようなエンドエフェクタ部分では用いられない。このように、軽量化と高出力、高速化を同時に実現することは困難であり、何らかの回避するための手法が必要となる。そこで、この問題を解決する一手法として、力学的エネルギーの蓄積と放出を利用した行動生成手法を提案した。これは、関節の弾性要素を利用して、アクチュエーションを蓄積と放出の2段階に分けて行うもので、蓄積の段階でエネルギーを十分にためることで高速な運動が実現可能となる。シミュレーションにより、その有効性を確かめた。

## 3．感覚運動統合システムの開発

双眼・双腕を備えた実時間感覚運動統合システムの開発を行った。特に、マルチプロセッサに対応して、各システム構成要素を並列に制御するための制御システムの開発を行った。結果として各要素の基本的な動作は確認できた。システム全体で統合した動作を実現するために、次年度も継続して研究を行うこととした。

## 4．感覚運動統合システムの設計理論に関する研究

実環境に対応した感覚運動統合システムの設計方針として、(1)環境の動特性に対応するためのセンサフィードバックの高速性、(2)環境の多様性に対応するためのセンサフュージョン、(3)環境の複雑性に対応するための階層型並列構造、の3つの要素を挙げ、それらの要素を統合したシステムアーキテクチャを提案した。また、既存の感覚運動統合システムを提案したアーキテクチャの観点から解析しなおすことで、システムの問題点を明らかにした。

## 5．双眼トラッキングシステムの開発

平成11年度までに開発した単眼トラッキングシステムを両眼化を行った。結果として、3次元自由空間を任意に動く対象を1msのサンプリングで認識し、トラッキングすることが実現できた。トラッキングアルゴリズムの改良を行うために研究を次年度にも継続することとした。

## 研究グループB

### 研究課題：脳型情報処理LSIの設計・開発

#### 1．動的再構成CDMAネットワークの検討

高速に通信可能な階層並列システムを構成するために、ネットワークの再構成機能、融通性、高速性を、スペクトラム拡散原理に基づくCDMA方式を用いて実現することとした。今年度は、このシステム設計を行い、機能と拡散符号などの仕様案を作成した。また、トランシーバー回路を設計し、現在試作を行っている。結果として、0.35 $\mu$ m CMOS技術で250Mb/s以上で動作し、4本のラインで1Gb/s以上の性能を実現できる見通しを得た。次年度も継続して研究を行うこととした。

## 2．ロボットの動作モデルの記述と機能シミュレーション

感覚動作統合システムを設計・評価するためにアナログデジタル混載シミュレーション言語によってロボットの動作モデルを記述し、基本的な動作のシミュレーションを行った。

## 3．アダマール変換に基づく脳型処理LSIの開発。

脳型情報処理を行うLSIチップとしてアダマール変換に注目し、それに基づくチップアーキテクチャを考案し、CMOSテストチップの設計を行った。現在試作中であり、次年度も継続して研究を行うこととした。

### 研究グループC

#### 研究課題：高速ハンドの開発

##### 1．高速キャプチャリングシステムの開発

弓矢は発射される瞬間その加速度は150G以上とも言われている。この弓矢の高加速度性に着目し、ばねとワイヤ機構をうまく組み合わせた高加速度キャプチャリングシステムを設計開発した。アイデアのポイントはばねに蓄えられたポテンシャルエネルギーが、アームの運動エネルギーを介して、あらかじめ設定された停止位置で、自動的にハンドの閉動作エネルギーに変換されるメカニズムを考案した点にある。ロボットのプロトタイプを設計試作し最高加速度90Gを実現した

##### 2．ロボットハンドによるRelease and Catch Motion

ロボットハンドが把握している対象物を床に向けて開放し、跳ね返ってきた対象物を再び把握するRelease and Catch Motionの動作戦略について考察し、既存のロボットハンドで把握実験を行った。さらに床面の凹凸さらに高速ビジョンを想定したシミュレーション実験を行った。

### 研究グループD

#### 研究課題：実時間触覚情報処理システムの開発

##### 1．触覚センサ用感圧新素材の試作

従来の感圧素材の欠点であった履歴特性の低減を目的として、触覚センサ用感圧新素材の開発を行った。方法としては、液状感圧ゴム素材を用いた。これ

は、オイル状シリコンゴム中に均一形状の炭素微粒子を混合し触媒を入れ縮合を起し、網目状ゴム構造としたものである。粘度としては印刷インク程度のものを想定している。従来のシート状の素材と同様な利用法、並びに液状特性を生かしたモールド成形等の新たな製作手法を試みた。結果として、ある程度従来製品を上回るものが試作できた。しかし品質の再現性については更なる検討が必要であり、次年度に継続することにした。

## 2．触覚情報処理チップ開発へ向けての基本回路設計

高密度型分布触覚センサを実装する場合の問題点であった配線数の低減を情報処理回路を集積化することで解決をはかることを目的とし、触覚情報処理チップの開発を行った。方法としては、石川グループで開発している視覚チップとのインターフェースを統一することで視触覚情報処理に適したアーキテクチャをとることとした。現在、基本回路の検討と設計を行っており、次年度に研究を継続する予定である。

## 研究グループE

研究課題：能動的感覚運動統合学習理論の研究

### 1．ダイナミクス整合計算モデルの構築

本年度は、感覚運動統合を実現するために「ダイナミクス整合」という概念に基づく計算モデルを構築した。これは、実現すべきタスクの内容、システムの物理的な特性や制御上の制約、制御指令計算に必要な計算時間などに応じて制御指令計算の中身を適応的、能動的に調整するもので、これにより、与えられた条件の下でできるだけ高いパフォーマンスを実現する。本研究では、上記の機能をパフォーマンスを報酬とした強化学習アルゴリズムを用いて実現し、数値実験によりその有効性を検証した。

### 2．視覚・運動変換モデルに関する研究

視覚・運動変換やその学習メカニズムを明らかにするため、手の運動に関する心理実験を行なうとともに、プリズム適応現象を説明する計算モデルを構成し、心理実験の結果にほぼ対応する結果を得た。

## 3．主な研究成果の発表（論文発表）

Masatoshi Ishikawa, Takashi Komuro, Akio Namiki, and Idaku Ishii : 1 ms Sensory-Motor Fusion System, Robotics Research (J.M.Hollerbach and D.E.Koditschek eds. ) pp.359-364, Springer, 2000

Akio Namiki, Yoshihiro Nakabo, Idaku Ishii, Masatoshi Ishikawa : 1 ms Sensory-Motor Fusion System, IEEE Transactions On Mechatronics, Vol.5, No.3, pp.244-252 ( 2000 )

並木明夫、金子真、石川正俊：感覚運動統合理論に基づく「手と脳」の工学的実

現 日本ロボット学会誌、 Vol.18, No.6, pp.47-48 ( 2000 )

A. Iwata, T. Morie, and M. Nagata, Merged Analog-Digital Circuits Using Pulse Modulation for Intelligent SoC Applications ( Invited ) IEICE Trans. Fundamentals, Vol. E84-A, No. 2, pp. 486-496, 2001.

T. Morie, M. Nagata and A. Iwata, An Analog-digital Merged Circuit Architecture Using PWM Techniques for Bio-inspired Nonlinear Dynamical Systems, in Tsutomu Miki, Ed., "Brainware : Bio-Inspired Architecture and its Hardware Implementation" ( FLSI Soft Computing Series-Volume 6 ) Chapter 3, pp. 61-87, Singapore, World Scientific Publishing, 2001.

M. Nagata, J. Nagai, K. Hijikata, T. Morie, and A. Iwata, Physical Design Guides for Substrate Noise Reduction in CMOS Digital Circuits, IEEE J. Solid-State Circuits, Vol. 36, No. 3, pp. 539-549, March 2001.

Sakaguchi Y. Perceptual filling-in at two distinct targets interacts with each other. Investigative Ophthalmology and Visual Science 41 : S442, 2000.