

東京大学大学院
情報理工学系研究科 教授

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 」

研究期間：平成11年11月1日～平成16年10月31日

1. 研究実施の概要

人間の脳は、従来から開発されてきたコンピュータとは異なり高い順応性を持つ。これは、脳が神経系からなる閉じた系ではなく、非常に多くの感覚器から外界からの情報を得て、多数の運動制御機能を用いて外界に働きかけるという開放系であり、外界との情報のやりとりを通じて適応能力や学習能力を高めていくことができるためである。

人間の感覚運動統合機能の中でも特に重要な役割を果たすものに「手と脳」の関係がある。「手は外に現れた脳髄である」という言葉が存在するように、手は脳の機能と深い関わりを持っており、視覚や触覚などの様々な感覚系と運動系の統合を超並列的に処理する脳の機能と、優れたアクチュエータであると同時に優れたセンサでもある手の有する感覚運動統合機能の密接な統合によって実現されている。本研究の目的は、このような「手と脳」のもつ感覚と運動の統合機能に注目して、実環境に対する柔軟な認識・行動の実現が可能な工学的な脳型処理システムを構築することである。

本研究では、感覚と運動の統合における新しい設計概念として、「ダイナミクス整合」を提案する。ダイナミクス整合とは、システムを構成する要素であるセンサ系、処理系、アクチュエータ系の時間特性を整合させる、という概念であり、従来の機能面での統合とは異なる、時間特性からみた統合について考えるものである。一般に、工学システムのセンサやアクチュエータは、人間と比較して非常に速い処理能力や応答特性を持つので、工学システムに最適なダイナミクスの整合を実現することで、人間を超える高速度での認識行動システムを構築することが可能となる。

以上のコンセプトのもとに、工学的感覚運動統合システムの構築、それを構成する各要素（高速センサ、高速アクチュエータ、並列処理系）の開発、感覚運等統合理論の研究を行った。最終的に、人間を超える高速な認識行動能力を持つ「手と脳」システムを開発し、キャッチングやバッティングなどのデモを、人間を超える性能で実現し、その有効性を示した。各グループの研究概要は以下の通りである。

1.1. 「手と脳」における感覚運動統合システムの研究（東大石川グループ）

視覚や触覚などのセンサ、ハンドやアームなどのアクチュエータを階層分散構造で統合する感覚運動統合システムを構築した。開発したシステムは、他のサブグループの研究成果を統合するためのテストベッドとなるものであり、様々な把握・操りタスクに適用することで、システムや感覚運動統合理論を検証するのに用いた。特に、高速で正確な動作が必要で、従来では実現が難しかった、動的マニピュレーションに適用し、その有効性を示した。

(1) 感覚運動統合システムの開発

センサとアクチュエータ、処理系の各動特性を考慮した設計を行うことで、投げる・捕る等の動的な操りタスクを目的とした新たな高速マニピュレーションシステムを開発した。開発したシステムを把握タスクに適用した。

(2) 軽量高速多指ハンドの開発

従来の鈍重なマニピュレーションシステムを高速化し、人間と同様にアクチュエータとセンサを通して実時間でインタラクティブに環境と触れ合うことのできる高速マニピュレーションシステムを目標として、高速ロボット多指ハンドを開発した。具体的には、ハンドの運動では大出力が必要であるのは瞬時であることに着目して、瞬時トルクが最大となるようにアクチュエータを新たに設計することで、従来の同レベルのアクチュエータでは不可能な高速かつ精密な動きを実現した。また、人間の手の構造、把握可能性を考察することでアクチュエータを適切に配置し、3本指8自由度の小型軽量高速ロボットハンドシステムを開発した。結果として、ハンド部の重量が約800g程度の軽量性と約0.1秒で各関節を180度も開閉できる高速性を実現することができた。

(3) 高速キャッチング

対象を高速にロボットハンドで捕獲するための新たな手法として、「ダイナミックアクティブキャッチング」を提案した。これは、指先などによって瞬時に力を与えることで、一瞬で対象の姿勢や位置を変えて安定な位置で把握するという捕獲手法である。瞬間的に対象の姿勢を変えることで、様々な位置や姿勢で落ちてきた対象を、ハンドに適した位置で安定に捕獲することが可能となる。提案した手法を、球と円柱のそれぞれに対して適用した。約1[m]の高さから落下する円柱を、3本指をうまく用いて回転させることにより、把握しやすい姿勢まで操作してから捕獲することに成功した。

(4) 高速バッティング

スポーツ時に見られる人間の高度な視覚情報処理や運動技能の解明は、高速性を要求されるロボットの軌道計画や行動制御などに役立つと考え、そのタスクの一例として野球のバッティングを多関節マニピュレータにおいて実現した。具体的には、バッティングタスクを、バットを高速に振り切る動作とバットの芯で正確に捉える動作に分離し、これを達成するようにセンサ情報と時間変数を陽に組み込んだハイブリッドな軌道生成を行った。この軌道は高速な視覚フィードバックによりリアルタイムに更新され、対象の予測が困難な場合でもタスクが実現される。よってビジョンがボールを認識してからスイングを開始するまでに0.1s程度という非常に厳しい条件のもと、高速な視覚フィードバックによりマニピュレータはバットの芯付近で打撃に成功している。

1.2. 「手と脳」における脳型情報処理の集積化の研究（広大岩田グループ）

人間の能力を超える脳型情報処理システムを構築することを目標とする。特に、神経ネットワークが学習によって最適な情報伝達経路を形成している点に注目し、状況に対応して動的に再構成可能な並列分散ネットワーク構造を持つ工学的脳を実現することを目標として研究を行った。

脳型情報処理システムで扱うデータは、イメージセンサからの画像のように大容量なデータから小規模ながら即時性の必要なデータが存在し、これらを転送先の求められる制約(サンプリング(動作)周波数など)に合ったリアルタイム通信が必要となる。また、外界の環境変化に伴ってデータパスが切り替わっても、全てのリアルタイム性を保持できる柔軟さも必要となる。更に、ロボット制御において伝送路の増加はアクチュエータ系への負荷といった物理的な問題をまねくため、少ない伝送路によるネットワーク構築が求められる。そこで、本研究では、有線による高速シリアル通信にCDMA方式による多重化を行った。

高度なロボット制御に適したネットワークを構築するため、2段階の同期方法(コード同期とチップ同期)と受信回路を提案した。そして、その受信回路を0.25umCMOSデジタルプロセスにおいて転送レート2Gbps、7多重で動作することを目標に設計・試作を行った。測定により提案する2段階の同期システムの動作を確認し、7多重の2.7Gchip/sでデータの受信を確認した。CDMAシリアル通信チップを搭載したインタフェースボードを試作し、これを用いたマルチDSPプロセッシングシステムのプロトタイプの試作を行い、ロボットのブレイン(制御機構)実現の基盤技術を確立した。

1.3. 「手と脳」における超高速メカニズムの研究（広大金子グループ）

世界最高加速度を実現する超高速ロボットメカニズムの研究開発と、高速で運動する動体を捕獲する場合の力学的観点からの枠組を構築することを目的とし、次の研究を行った。

(1) 100Gキャプチャリングシステムの開発

弓矢のような高加速度を実現するために、ばねに蓄えられたポテンシャルエネルギー

を、アームの運動エネルギーを介して、ハンドの閉動作エネルギーに変換するメカニズムを考案した。試作したハンドにおいて、最高加速度 90G を実現した。

(2) Dynamic Force Closure

高速および高加速度で運動する物体を把握する場合、ロボットハンドと物体間の滑りゼロで物体を停止させることは不可能であり、必ず両者の間で滑りが発生する。このような動体捕獲に関して、動体をハンドで捕獲する際のクーロン摩擦に基づく滑り量を指標とする Dynamic Friction Closure という概念を提案した。

(3) Dynamic Preshaping

高速ロボットハンドが対象物を捕獲する際には、対象物に適した指形状を生成・維持しつつ対象物にアプローチ(Preshaping 動作)することが捕獲成功率の向上において重要なキーとなる。ここでは、ワイヤ駆動方式の高速ロボットハンドが対象物を捕獲する場合の Dynamic Preshaping 問題を定義し、高加速度条件下におけるダイナミックシミュレーションによる最適パラメータの導出を行った。

1.4. 「手と脳」のための実時間触覚情報処理の研究 (電通大下条グループ)

「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。指ハンドに触覚機能を付与する場合、ハンド全体を覆うような人工皮膚感覚の実現が望ましい。このような触覚センサの条件としては、薄型で、広い面積を覆え、柔軟性があり、自由曲面にも対応でき、法線・接線方向力の検出が可能であり、耐久性が必要となる。本研究では、このような条件を満たす触覚センシングシステムの開発を目的として、次の研究を行った。

(1) 自由曲面型触覚センサ

液状硬化型感圧ゴム素材を開発し、ディッピング手法により触覚を必要とする指等の自由曲面状にも感圧膜を構成可能な手法を開発した。また、従来の感圧素材の欠点であった履歴特性の低減を目指した。

(2) 法線・接線方向力の検出

3次元構造電極と液状硬化型感圧素材を用いた法線・接線力触覚センサを開発した。

(3) 高速度型触覚センサ

1ms の高速応答性を有する視覚センサに対して、視覚との応答速度の整合性をたもつため、応答時間 1ms 以内の高速性をもつ触覚センサを開発した。

(4) 触覚情報処理用 LSI の開発

高密度分布型触覚センサで問題となる多数センサからの配線処理方式に関して、触覚情報処理用 LSI を開発し、局所情報処理を行わせると共に、伝送機能を持たせることで解決を図った。

1.5. 「手と脳」のための能動的感覚運動統合学習理論の研究 (電通大阪ログループ)

「実時間感覚運動統合を実現するための基礎計算理論の構築、および、人間の感覚運動統合機構の理解を目的として、「感覚運動統合実現のためのアルゴリズムの構築」と「手の運動にかかわる行動実験、および、手の運動の性質を説明する計算モデルの構築」の二つの観点から研究を行なった。

(1) ダイナミクス整合の学習による実現

「ダイナミクス整合」とは、感覚系、情報処理系、運動系のそれぞれの動特性が揃っていることを意味する。本研究では、システムパフォーマンスを報酬として処理系のパラメータを変更する強化学習系を用いてダイナミクス整合を実現する方式を提案した。

(2) 信頼度に基づくオンライン型強化学習アルゴリズムの提案

オンライン型強化学習システムでは、知識に基づく最適な行動と環境構造を学ぶため

の探索行動のバランスが重要である。本研究では「信頼度」に基づく行動選択法を提案した。「信頼度」とは環境に対する知識を自身がどの程度信頼しているのかを表す主観的な尺度であり、この尺度を用いて両行動のバランスを取ることを可能とした。

(3) 運動のばらつきからみた手先運動軌道の検討

人間の手先軌道の計算理論の一つに「終点分散最小化仮説」がある。これは、脳は運動指令のノイズの影響が運動終点に及ぼす影響が最小になるような軌道を選択しているという仮説である。本研究では、様々なノイズに対して数値実験でこの仮説を検証した。結果として、この仮説がロバストに成立するものではないことを示した。また、脳の神経活動や筋活動のノイズ特性を正確に推定することが重要であることを示した。

(4) 生体の物理的特性を考慮した運動指令生成機構の検討

到達運動の手先軌道を決める上でアクチュエータである筋の性質、および、神経系が生成しうる指令波形の性質が与える影響について、筋骨格系モデルにより検討した。結果として、単一パルスから成る運動指令でもベル型の速度波形が得られることがわかった。また、二つのパルスで、十分小さな誤差で躍度最小軌道が再現できることがわかった。以上の結果は、「手先軌道が曲がるのはなぜか」という問題に対する新しい答えとして「脳が構成する運動指令の自由度が低いため」という可能性を示唆するものである。

(5) 3次元視線計測装置の開発とそれを用いた運動中の視線計測

眼球運動計測装置と3次元位置計測装置を組み合わせることで頭部の動きと両眼眼位を同時計測することにより、注視位置を実時間で推定する装置を開発した。

1.6. 「手と脳」のための実時間視覚情報処理の研究 (広大石井グループ)

視覚システムの高速化に対応した高速なジェスチャー認識システムを構築した。特に、十分な視覚システムの高速化並びにロボットハンドの高速化、つまり「手と脳」システムの高速化により、人間の能力を上回るジェスチャー行動を実現した。

(1) ジャンケンロボットシステム

ビジョンシステムが高速になると人間が高速と感じるような手の動きがスローモーションのように見え、どんな手を出すかをジェスチャー終了前に知ることができる。人間の指先の開閉時間は0.15s~0.20s程度であるので、これより速く指の状態を認識し、人間が手を出し終わる前にロボットの指の開閉を実現すれば、必ず勝つことが可能となる。そこで、高速ビジョンと高速ハンドを用いてジャンケンロボットを開発し、その有効性を実証した。

(2) バッティングシステム

人間の視覚及び動作を大幅に超える高速バッティングシステムを開発を行った。これは、バネの弾性エネルギーの瞬時放出によるフィードフォワード的な制御により、0.05sでの高速スイングを実現するものであり、1000fpsを超える2台の高速ビジョンを用いた実時間3次元軌道予測アルゴリズムを用いることにより、時速50km(=14m/s)以上で飛翔するピンポン玉の打撃に成功している。またmsレベルでの打撃制御を可能とすることにより、高速飛翔物体に対する±10度の誤差程度での左右打ち分け動作を実現した。

2. 研究構想

2.1. 「手と脳」システム

「手は外に現れた脳髄である」という言葉が存在するように、脳の機能と深い関わりを持っている。このような「手と脳」の機能は、視覚や触覚などの様々な感覚系と運動系の統合を超並列的に処理する脳の機能と、優れたアクチュエータであると同時に優れたセンサでもある手の有する感覚運動統合機能の密接な統合によるものであり、全体として調和のとれた柔軟性の高い認識・行動機能を実現している。

本研究では、「手と脳」の有するこのような感覚運動統合機能の可能性を探求し、実環境に対する柔軟な認識・行動の実現に向けて、人間と同等の機能、あるいはそれを超えた機能を実現する工学的な「手と脳」ロボットシステムを構成論的に体系化することが目的である。

2.2. ダイナミクス整合 —人間をロボットに適した形で「模倣」する—

人間とロボットでは、システムを構成するセンサやアクチュエータ、処理システム、構造などにおいて、原理や素材等の物理特性が全く異なるために、人間の統合機能を真似て、そのままロボットで実現しても、望みのパフォーマンスを達成できないということがしばしば起き得る。本研究では、この問題を解決するための新しいコンセプトとして「ダイナミクス整合」を提案する。ダイナミクス整合とは、システムを構成する要素であるセンサ系、処理系、アクチュエータ系の時間特性を整合させてから、感覚運動統合処理を行うことを意味する。

人間の感覚系や処理系はそれほど速くはなく、運動系においても動きに遅れがある。これは、スポーツなどの一部の例外を除いて、一般の生活上では高速度での認識と行動の統合を必要としていないためであると考えられる。一方、ロボットなどの工学システムでは、人間を超えるような高速性や高精度が求められることがしばしばありうる。このような高速ロボットでは、人間と同じ時間レベルでの感覚運動統合を行っていたのでは、十分なパフォーマンスが得られない。センサやアクチュエータの処理速度や応答速度を人間以上に向上させ、ダイナミクスの整合が成立するように感覚運動統合アルゴリズムにも修正を加える必要がある。一般に、ロボットのセンサやアクチュエータは、人間よりも数倍から数百倍まで高速化が可能であるので、ロボットにおいては、人間と比較して高速度の領域でダイナミクスの整合を行うことが可能であり、結果として、人間を超える高速度での認識行動システムを構築することが期待できる。

2.3. 階層並列分散構造

「ダイナミクス整合」に加えて、大量かつ多様なセンサの情報処理とそれに即した実時間での行動制御を実現するための、膨大な数の同種素子の相互作用に基づき並列に情報処理を進める「超並列性」と、感覚系と運動系を含めたシステム全体を合目的的な形で統御するためのコンセプトとしての「能動性」、さらには実世界に対応した様々な行動を同時に実現可能とするための行動の「階層的並列構造」に注目し、分散処理構造を持つ「手と脳」システムを構築する。

2.4. 研究構想

研究を進めるに当たり、情報処理理論・アルゴリズムという観点からだけではなく、センサ、アクチュエータ、集積化デバイスなどのアーキテクチャ・ハードウェア面という観点までの設計・開発を包括した構成論的なアプローチで研究を行う。理論構築、システム構築、機能実現の3つに大きく分けて研究を進め、最終的には、高いレベルでの「ダイナミクス整合」を実現し、人間を超える高速性を持つロボットハンドシステムを開発する。

(1) 実時間感覚運動統合理論の構築

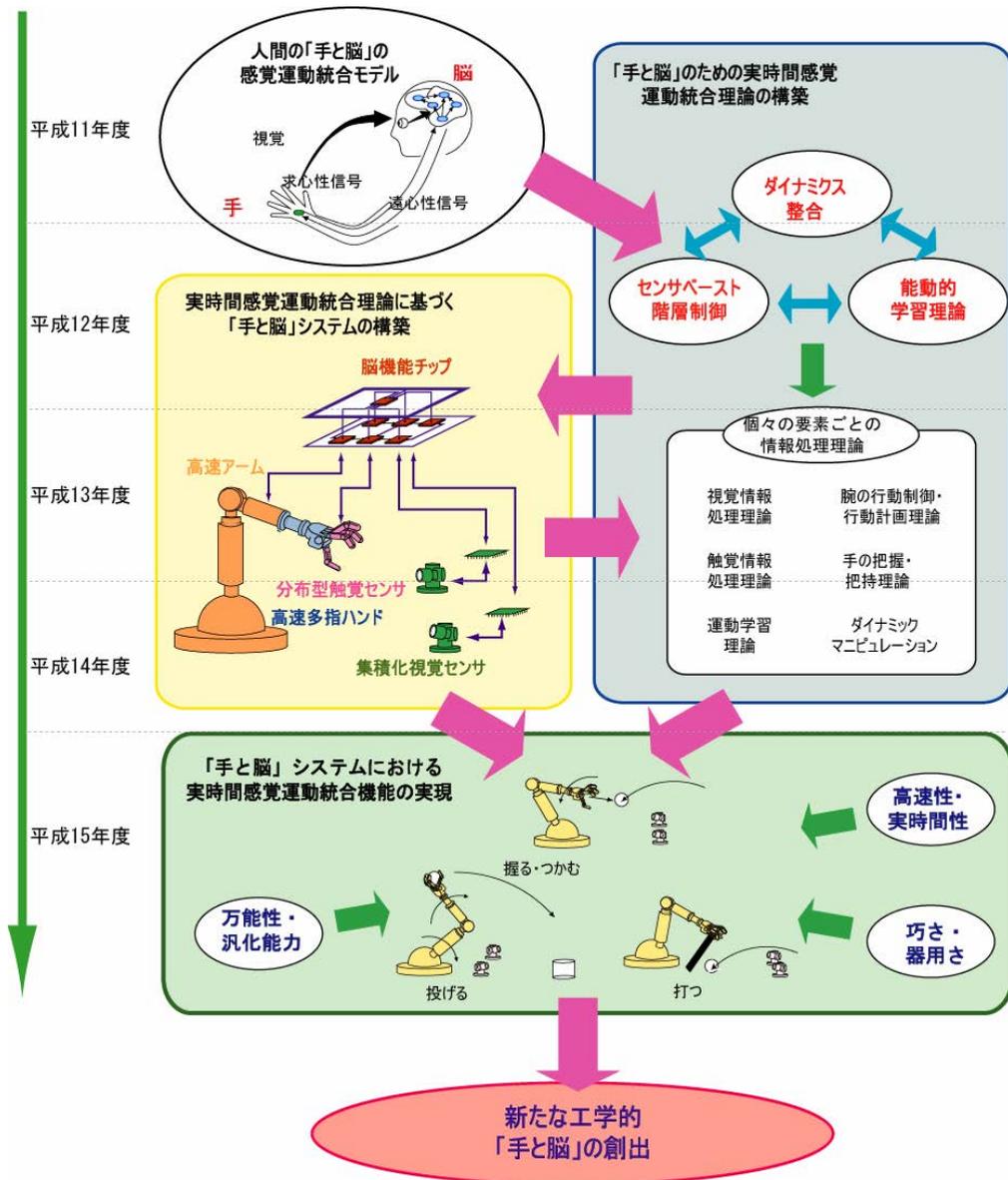
- (A) センサベースト階層並列的制御理論の構築：リーチング，プリシェーピング，グラスピング，インピーダンス制御などの「手と脳」を実現する上での行動を合目的的に統合するために，センサ情報処理を階層的並列的に行う実時間行動統合理論を構築する。
- (B) 「手と脳」の工学的実現に向けたシステム設計理論の構築：感覚運動統合理論，行動統合理論を基に，現状のセンシング，アクチュエータ，集積化デバイス技術に即し，ダイナミクス整合に基づくシステム設計理論を構築する。特に，提案する設計理論をもとに，視触覚情報を統合し，様々な行動を統合可能とする「手と脳」システムの仕様を決定する。
- (C) 感覚運動統合のための能動的学習理論の構築：「手と脳」のための感覚運動統合理論に対応して，能動的学習メカニズムに関する理論的および実験的研究を行う。特に，運動制御における注意や能動的認識の働きを重視した感覚情報処理および運動制御のアルゴリズムを構築し，感覚系，運動系，高次処理系を整合的に機能させるための手法を考案する。

(2) 感覚運動統合理論に基づく「手と脳」システムの構築

- (A) 高速多指ハンドの設計・開発：「手と脳」のための感覚運動統合理論に基づいて，高速多指ハンドを設計・開発する。特に高速かつ器用な操りの実現を目的とし，各種センサの装備と動作の高速性を重視した多指ハンド及び多指ハンド制御理論を構築し，その有用性を検証する。
- (B) 実時間視覚処理システムの設計・開発：「手と脳」のための感覚運動統合理論に基づいて，実時間視覚情報処理の研究を行う。特に，汎用ビジョンチップデバイスを搭載するための能動的プラットフォームを設計・開発する。これに関連して，集積化超並列処理構造に対応した高速視覚情報処理理論の研究を行い，「手と脳」の工学的実現における実時間視覚情報処理の有用性を検証する。
- (C) 実時間触覚処理システムの設計・開発：「手と脳」のための感覚運動統合理論に基づいて，実時間触覚情報処理の研究を行う。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を構築し，高速多指ハンドに対応した実時間触覚情報処理アルゴリズムを開発する。
- (D) 脳型情報処理 LSI の設計・開発：「手と脳」のための感覚運動統合理論に基づいた脳型情報処理 LSI の設計・開発を行う。特に半導体集積化技術と整合性があり，感覚運動統合機能に対応してセンサ，アクチュエータとの接続を容易とする，パルス変調方式を用いたアナデジ融合回路を中心とした感覚運動統合脳型情報処理 LSI を開発し，それに関連した脳型情報処理アルゴリズムの開発を行う。

(3) 「手と脳」システム上での実時間感覚運動統合機能の実現

- (A) サブシステムの統合による「手と脳」システムの構築：(2) で開発された，各システムを統合し，その動作を検証する。
- (B) 実時間感覚運動統合機能の検証：構築した「手と脳」システム上で，実時間感覚運動統合理論に基づく具体的ないくつかのアルゴリズムを実装し，その動作パフォーマンスを検証する。特に，本事業で提案する「手と脳」のための実時間感覚運動統合理論が，(1) 高速性，(2) 器用さ，(3) 行動に対する汎化能力を同時に可能にし，従来にはない新たな実時間感覚統合機能が「手と脳」システムで実現されることを検証する。



3. 研究成果

3. 1. 「手と脳」における感覚運動統合システムの研究（東大石川グループ）

（1）研究内容及び成果

視覚や触覚などのセンサ、ハンドやアームなどのアクチュエータを階層分散構造で統合する感覚運動統合システムを構築した。開発したシステムは、他のサブグループの研究成果を統合するためのテストベッドとなるものであり、様々な把握・操りタスクに適用することで、システムや感覚運動統合理論を検証するのに用いた。特に、高速で正確な動作が必要で、従来では実現が難しかった、動的マニピュレーションに適用し、その有効性を示した。本報告では、これまでに得られた主要な結果について述べる。

（A） 感覚運動統合システムの開発

（A1） 研究の目的

近年、視覚センサの処理能力の向上に伴い、視覚フィードバックを用いた動的制御の研究が注目を集めている。我々は、従来から高速視覚を備えた把握システムの開発を進めてきたが、視覚センサの認識精度とアクチュエータの応答性能が低かったために、高速視覚の認識結果を有効に利用するのが困難となり、実現可能なタスクも限られたものとなっていた。この問題を解決するために、センサとアクチュエータ、処理系の各動特性を考慮した設計を行うことで、投げる・捕る等の動的な操りタスクを目的とした新たな高速マニピュレーションシステムを開発した。ここでは、開発したシステムの設計コンセプトとその構成について説明する。また、動的に変動する対象に対する把握実験の結果について報告する。

（A2） システムの設計指針

リアルタイムシステムの持つべき性質として、「ダイナミクス整合」が提案されている。これは、「物理的・計算的制約条件のもとで、システムの最大パフォーマンスが得られるように、感覚系、処理系、運動系の各要素の動特性が配置されている状態」として定義されている。そこで、単純なセンサフィードバックにおいてダイナミクス整合が成立するための条件を考えると、感覚系・処理系・運動系の直列結合が参照信号のダイナミクスと等しいことである。この条件は、実世界の情報をセンサから入力してアクチュエータを通して出力する、一種のフィルタ設計とみなすことができるので、結果として、センサからアクチュエータへの情報の流れに関して、情報の欠落と伝達の遅れを小さくすることが設計の主眼となることがわかる。具体的には、システムの各要素は次の条件を満たすことが必要となる。

- 高速センサ情報処理(感覚系): センサ処理時間による伝達の遅れを小さく抑える。
- センサフュージョン(感覚系): 複数のセンサから多角的な認識を行うことにより情報の欠落を防ぐ。
- 階層並列処理機構 (処理系): 参照信号の様々な動特性に対応した柔軟な計算能力を実現する。
- 高速アクチュエーション(運動系): 認識結果に応じて、対象に対して遅れることなく作用力を与える。
- 多自由度アクチュエータ(運動系): 対象に対して任意の作用力を与える。

(A3) システム構成

前節の設計指針に基づき、高速マニピュレーションシステムを構築した。システムの構成を図 1-1 に、システムの性能を表 1-1 に示す。

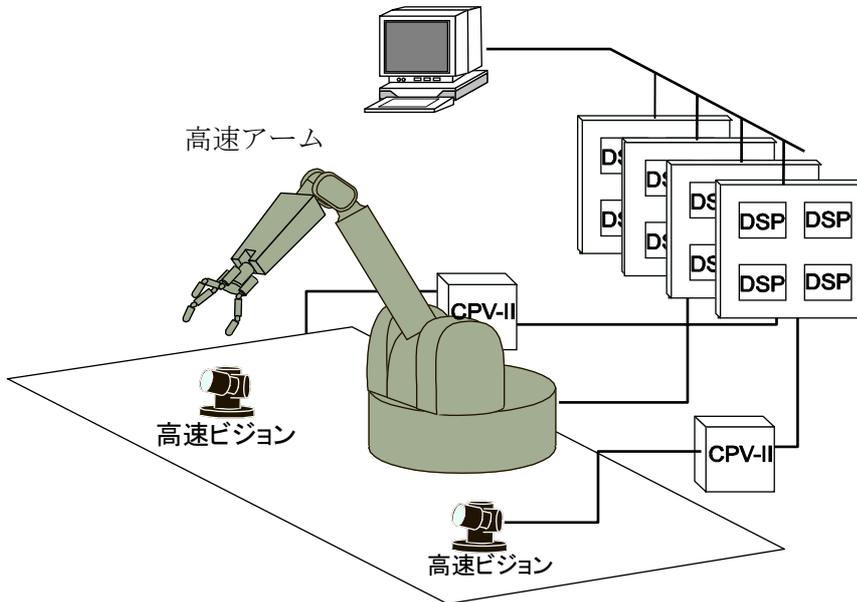


図 1-1 感覚運動統合システム

表 1-1 感覚運動統合システムの性能

	プロセッサ	DSP (TMS320C6701)
階層並列処理システム	プロセッサ数	16 個
	浮動小数点計算	16 GFLOPS
	処理速度	1ms (1 制御演算)
	自由度	2 自由度×2 セット
高速アクティブビジョン	最大回転速度	525 rad/s
	最大回転トルク	0.955 Nm
	画素数	128×128
	階調	8bit
	自由度	4 自由度×2 セット
高速アーム	手先速度	6 m/s
	手先加速度	58 m/s ²
	最大手先力	26N
	アーム長	0.9m
	最大肘伸展運動	6m/s

- 階層並列処理システム

16 個の DSP(TMS320C6701:Texas Instrument Inc.)からなるマルチプロセッサシステムであり、合計 16[GFLOPS]の高速な浮動小数点演算能力を実現している。各 DSP に非干渉化されたセンサフィードバック演算を割り当てることで、厳密で安定性の高いリアルタイム制御を実現することができる。また、実時間の制約が緩い処理に関しては、ホストの PC 上で行うことで、計算負荷を分散している。
- 高速アクティブビジョンシステム

列並列ビジョン(CPV)システムを搭載した 2 自由度アクティブビジョンである。視覚センサ部は、128×128 画素・8bit 階調の画像を用いて、領域分割・モーメント検出などの初期視覚処理を 1ms 程度で実現する能力を持つ。アクチュエータ部は、チル

ト・パンの2自由度を持つDDモーターからなり、最大速度525[rad/s]で動作可能であるので、高速に移動する対象に対して十分な追従能力を持つ。2台のアクティブビジョンを用いて立体視を行うことで、3次元視覚情報が計算される。

- 高速アーム (米 Barrett Technology Inc.)
ワイヤ駆動の4軸マニピュレータである。高出力・低減速なアクチュエータを用いるとともに、全アクチュエータを台座付近に配置して手先慣性を小さくすることで、最高速度6[m/s]・最高加速度58[m/s²]の高速な動作を実現する。
- 高速ハンド
本プロジェクトで開発した瞬時高出力アクチュエータを用いた3本指8自由度を有する多指ハンドである。詳細については次章で記述する。

(A4) 把握実験

システムの性能をテストするために、球を人間の手で自由に動かし、それに対して手先を追従させながら、周期的につかみ・離すというタスクを実現した。制御アルゴリズムとしては、球と手先の位置誤差に基づくPD制御を用いることにした。結果を図1-2に示す。0.0~0.1秒時にはハンドは対象に一定距離を保ちながら追従している。次に、約0.2秒時に把握動作を開始し、約0.4秒時に終了している。これより視覚フィードバックに基づき、高速な把握動作が実現されていることが示されている。

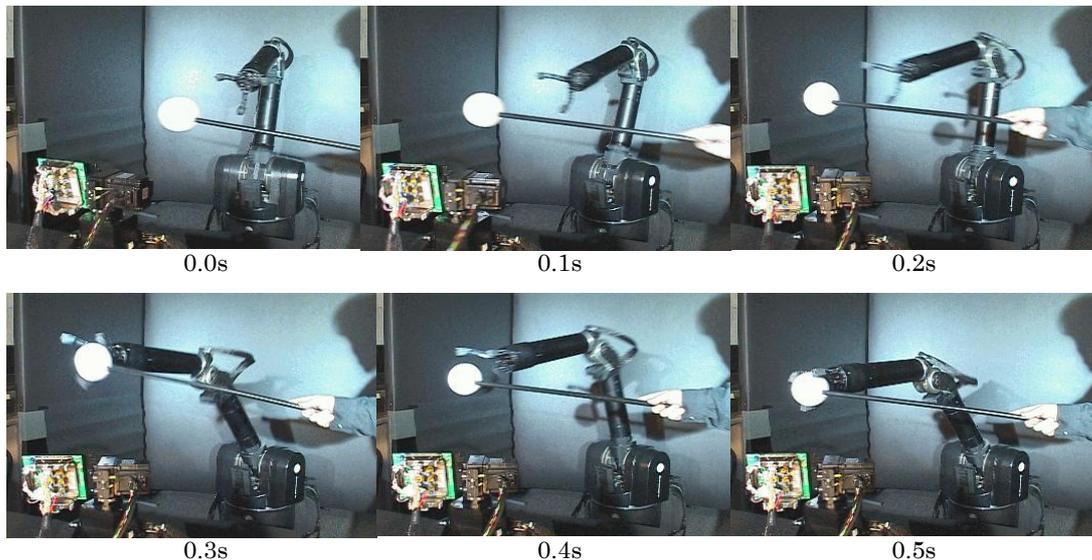


図 1-2 高速把握

(B) 高速ロボットハンドの開発

(B1) 研究の目的

従来、様々なタイプの多指ハンドの開発が進められてきたが、その多くは静的な把握や、準静的な運動に対して設計されており、ダイナミックで高速な運動を行なわせるには能力が不十分な場合が多かった。運動能力の高いものも開発されているが、システムの重量が大きくなってしまい、ロボットアームに搭載して使用するのは困難であった。この問題を解決するために、我々は、高速な運動に耐えうるアーム搭載型の軽量高速多指ハンドシステムを開発した。

(B2) 軽量高速多指ハンドモジュール

開発したハンドの図面を図2-1に示す。各指の名称は左から、左親指(Left Thumb)、人指指(Index Finger)、右親指(Right Thumb)とする。また、人間の手^{カパンディ}を参考に、各指の関節を、曲げ方向の指先から、指節間関節(IP)、中手指関節(MP)、横方向を大菱中手関節(TM)と呼ぶ。

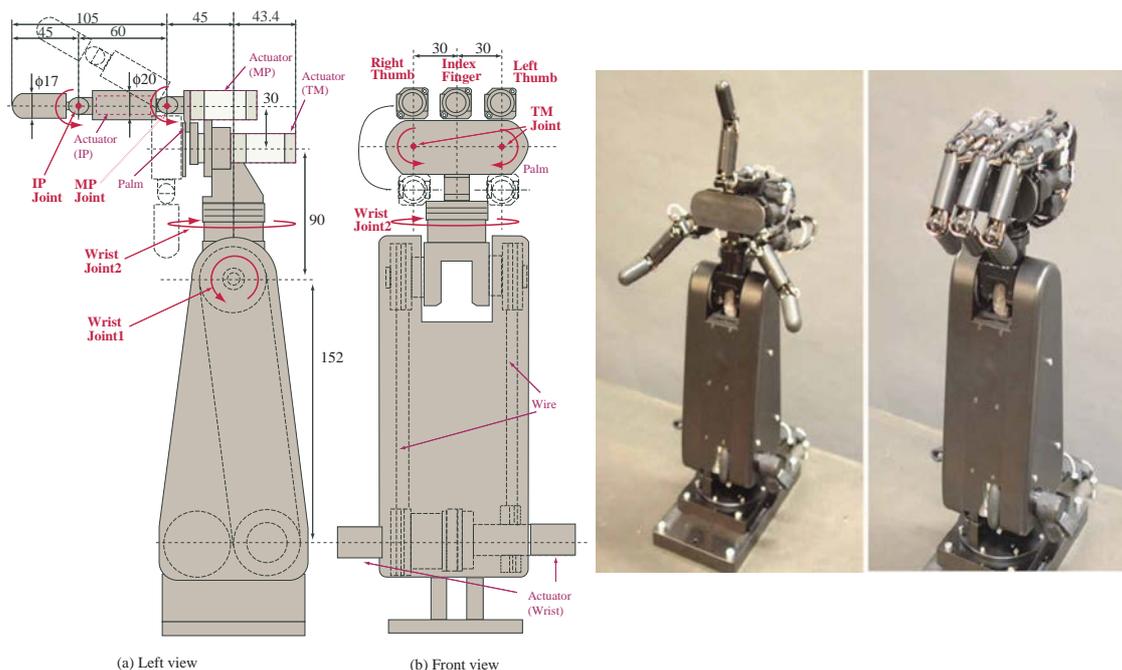


図 2-1 高速多指ハンドモジュール

アームに搭載して動的な操作を行なうために、最大でも **1kg** 以下となるように軽量化を図った。そのため、指本数と自由度に関しては、できる限り削減することとした。指の本数に関しては、外乱に安定な把握が可能な最小本数である 3 本とした。動的操作でも、3 つの **Virtual Finger** で通常操作の 5 割近くが可能であることが示唆されており、十分であると考えられる。また、自由度に関しては、中指が 2、左右の指が 3、合計 8 自由度とした。本来、任意の位置姿勢への操りには 9 自由度が必要であるが、中指の横方向への回転は、接続するアームの手首関節の動作でカバーすることとして省略した。指配置に関しては、球形物体、柱形物体の両方の把握に対応できるようにした。3 本指のうち、名称の通り、左右の指は親指の機能を果たす。人間の親指の自由度 (5 自由度) には及ばないが、**TM 軸** に大きな可動範囲を与えることで、様々な把握形態に対応できるようにした。

リスト部分は、差動構造による屈曲伸展軸(WJ1)と内転外転軸(WJ2)を持ち、最大回転速度 **300[rpm]**、最大トルク **12[N]** の高出力が出せるように設計した。リスト部は、掌で衝撃の吸収を効率よく行なう、または、指先に大きな速度をかける場合に用いられる。ハンド部とは独立した機構を持つため、取り外すことも可能である。

IP 関節と MP 関節には、歪みゲージを装備し、力センサへ対応できるようにした。また、高速視覚センサを用いて制御できるように、制御装置を開発した。

(B3) 高速アクチュエータ

俊敏で高速な運動を実現するためには、速度と加速度がともに高い必要がある。このうち、加速度に関しては、アクチュエータの高出力化と機構の軽量化を同時に行わねばならない。一般に、高加速度が必要とされるのは瞬間的であり、定格出力よりも最大出力を重点的に上げることで対応可能だと考えられる。そこで、0.1 秒以内で指を開閉することを目標として、アクチュエータを設計した。0.1 秒の値は、具体的なタスクに対応しているわけではないが、動的な操りには十分な値であると考えた。

以上のことから、バックラッシュレスかつ軽量のハーモニックドライブ減速機をベースにして、出力軸の軸受を 4 点支持ベアリングに置き換えるなどの小型化と軽量化を行うことで、新たな軽量減速器を開発した。また、集中整列巻きのボビンレスコイルとコアの分割化に

より、従来市販品に対し約 1.5 倍以上の巻線密度を持つ高出力サーボモータを開発した。エンコーダに関しては、軽重量材料の採用と薄肉構造及び高密度構造により軽量と小型化を図った。結果として、瞬時トルク／重量比に関して従来市販品の約 3.5 倍以上の能力を持つ軽量アクチュエータを実現することができた。速度・トルク・電流性能を図 2-2 に示す。これより、高速回転時でも出力トルクはほとんど下がることがなく、理想的な出力特性を持つことがわかる。

アクチュエータの性能を表 2-1 に、ハンドの性能を表 2-2 に示す。

表 2-1 アクチュエータ性能

関節	指先	指付根, 掌旋回
タイプ	ブレシレス DC	ブレシレス DC
減速比	50	50
最高角速度[rad/s]	30	30
最大トルク[Nm]	0.245	1.71
最大電流[A]	1.5	6.25
最大出力[W]	8	53
重量 [g]	25	60

表 2-2 ハンド部分性能

最高指先速度[m/s]	4.5 (*1)
最大指先力[N]	28.5 (*2)
指本数・自由度	3 本・8 自由度, リスト 2 自由度
重量 [g]	約 800g 以下

(*1) IP 軸が 0 度で, IP, MP が共に最大回転速度の場合

(*2) IP 軸が 90 度で, MP 軸が最大トルクを発生した場合

(B4) 性能評価

各軸で PD フィードバック位置制御を行い, 180 度のステップ応答 (TM 軸は 90 度) の応答を図 2-3 に示す。MP 軸は, 180 度の回転を約 0.1 秒程度で, IP 軸は, わずかに遅れて約 0.12 秒程度で達成していることがわかる。TM 軸は, 90 度回転を約 0.07 秒程度で達成している。また, 最大速度までの立ち上がりは, IP・MP 軸では 0.01 秒, TM 軸でも約 0.02 秒程度しかかかかっていない。これより, 単に回転速度が高速なだけではなく, 俊敏な運動特性も達成することができた。

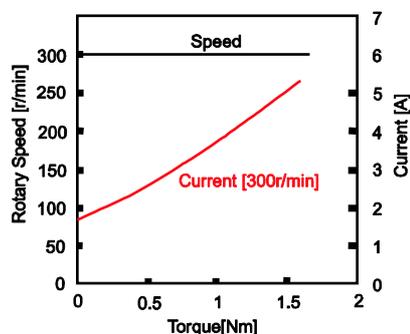


図 2-2 速度ートルク

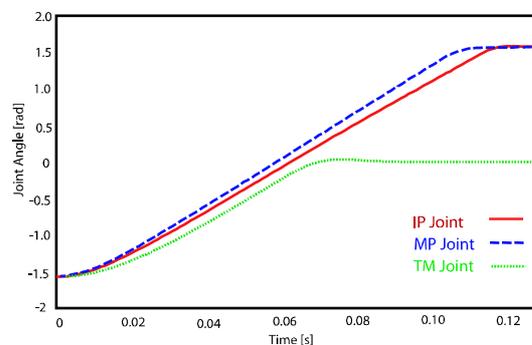


図 2-3 ステップ応答

(B5) 把握形態

従来提案されている把握パターンを参考に、パワーグリップ、精密把握、パワーと精密の中間形態の3つの大分類と、それに含まれる小分類の把握パターンについて、把握が可能であることを確認した。これら様々な形で把握できることが、必ずしも必須とされるわけではないが、把握パターンが豊富なことは、把握能力を向上させることにつながると考えられる。結果を図 2-4 に示す。

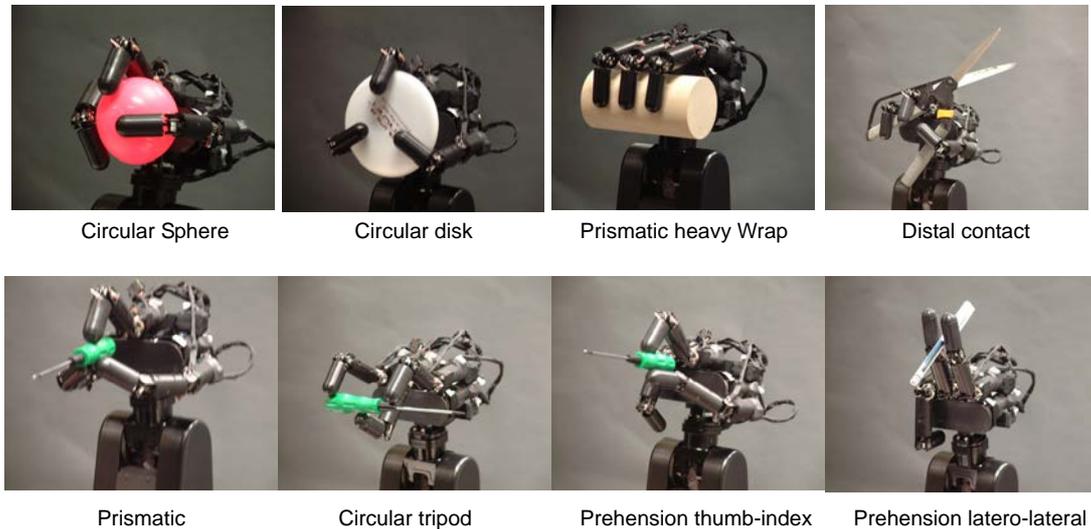


図 2-4 把握形態

(B6) まとめ

高速な操り動作のために開発した軽量高速ハンドについて紹介した。今後の展開としては、さらなる軽量化 (500g 以下) と、自由度を増やす (各指 4 自由度×4 本程度) こと、また、モジュール化を進め、メンテナンス性を上げることが考えられる。

(C) 高速多指ハンドによる能動的捕獲戦略

(C1) 研究の目的

従来、様々な多指ロボットハンドの開発が進められてきたが、その多くは静的・準静的な把握や運動を得意とする一方、高速で動的な操りを行なうことを苦手としていた。その理由としては、このような操作がハンドの運動能力及びセンシング能力の両面で極めて高い能力を要求するのに対し、従来のシステムが十分な能力を持っていなかったことが挙げられる。これに対し、サイクルタイム 1 [ms] の高速視覚システムを用いた視覚フィードバック制御を適用することで、従来では困難であった動的な操り動作の実現を目指し、研究を行なってきた。本稿では、ハンドとセンサに高速性を要求する動的操作の一例として、落下する円柱状物体のキャッチング動作を取り上げ、そのキャッチング戦略と実験結果について述べる。

(C2) 柱状物体のキャッチング

今回把握対象とする円柱状物体の場合、その姿勢に応じて安定な把握位置が変化するため、球の場合と比較してより複雑な把握戦略が求められる。ここでは、軽量高速多指ハンドを用い、落下する対象の 3 次元重心位置と姿勢の情報をフィードバックできるものとして、3 本指でキャッチングするための戦略について考察する。

ハンドの構造と力の釣り合いの面から考えて、最終的な把握の形態は中央の指に対して両脇の指を 180 [deg] 対向させた形で、挟み込んで把握することが望ましい。以下、(1)落下する対象にハンドが接触するまでの相(接触相)と、(2)接触してから最終的な把握形態まで対象の姿勢を操作する相(姿勢操作相)の 2 段階に分け、(2)→(1)の順に述べる。

ここで、簡単のために、キャッチング対象である円柱状物体について 1. 半径と長さが既知の一様な円柱である, 2. 中心軸が地面に水平な姿勢で落下する, 3. 落下途中ではどの方向にも回転しない, との仮定を置くこととする。

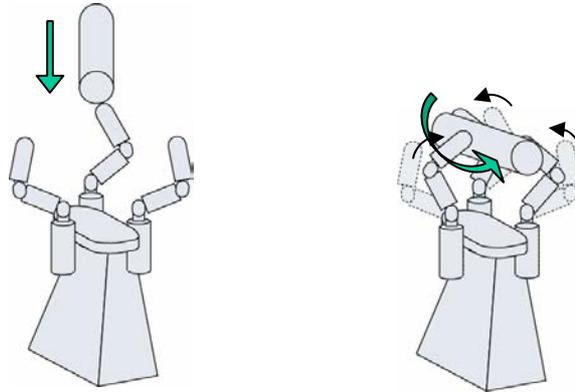


図 3-1 能動的キャッチング

(C3) 姿勢操作相

図 3-2 左に水平面上の運動における力学モデルを示す。まず、対象が初め水平面内において傾き θ を持った状態から、最終状態($\theta = 0$)まで操作しつつキャッチングをするための戦略について述べる。ただし、対象の重心 G がハンド中心と重なる場合について考える。

それぞれの指を $F1, F2, F3$ と名付け、指と対象は点接触するとみなす。まず、対象に対して回転速度 ω を得るために、 $F1$ によって力積 P_1 を与える。しかしこれだけでは回転速度とともに重心の並進速度を得てしまうから、これを打ち消すために同時に反対側から $F2$ によって力積 P_2 を与える必要がある。すると、重心 G の速度を v として

$$P_1 - P_2 = Mv$$

$$I\omega = a \cos \theta P_1 + b \cos \theta P_2$$

と書ける。ただし M は円柱質量, I は鉛直軸回りの円柱の慣性モーメント, a, b はそれぞれ中心軸上における $F1$ の接触点と $F2$ の接触点の重心 G からの距離を表す。ここで $P_1 \cong P_2 \equiv P$ とし, 幾何的条件から $a + b = D / \cos \theta + 2R \tan \theta$ (D は指の間隔, R は円柱半径)であることを用いると,

$$v = 0$$

$$\omega = (D + 2R \sin \theta) \frac{P}{I}$$

と表すことができる。ところで、ここまで重心がハンド中心に重なる場合について考えてきたが、そうでない場合にも同様に計算することにより上式と同様の結果が得られる。つまり、対象の重心がどこにあっても、2つの指によって同じ大きさの力積 P を与えれば、一定の ω が得られるということである。ただし、この場合回転中心は重心位置になるから、うまくハンド中心で回転させさせるためには、重心位置をハンド中心に合わせる必要がある。

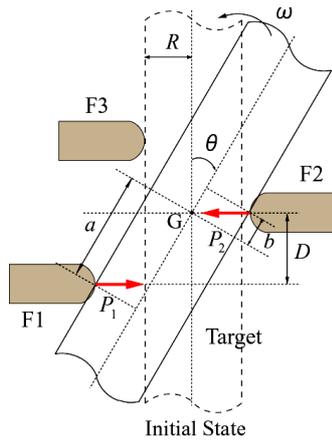


図 3-2 姿勢操作相

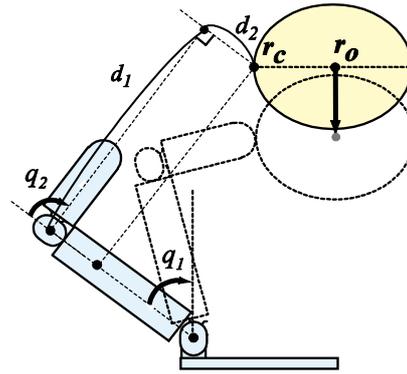


図 3-3 接触相

(C4) 接触相

ハンドを落下してくる対象に接触させるために、仮想接触点を用いて導出した特徴量を基にして、フィードバック制御を行なう。仮想接触点とは、指に接触する仮想的な対象面を考えることで、その対象を仮に把握しているとみなすものである。ここでは、指と対象の距離が最小である点を仮想接触点と定義し、仮想接触点と対象の距離を接触距離と呼ぶ。図 3-3 にハンドの指が運動する鉛直平面内において、その面内で力学モデルを示す。輪切りにされた対象の切口面の重心を r_o 、関節角ベクトルを q とすると、接触距離 d は

$$d = d(q, r_o)$$

と、 q と r_o の関数として書き表される。両辺の微分から、

$$q_d = q + J^{-1}(\Delta d - G\Delta r_o)$$

として、接触距離の誤差 Δd から指令関節角度ベクトル q_d を計算できる。ここで J と G は、それぞれ q と r_o に関するヤコビアンである。また $-G\Delta r_o$ は対象の動きの分の補償項である。

上記のアルゴリズムにより、まず F1 および F2 が対象に衝突することで力積を与え、対象に回転速度を与える。一方 F3 はあらかじめ最終形態の位置に待機させておき、回転してきた対象を受け止める。同時にそのまま F1 と F2 によって挟み込むことで、最終的に把握が可能となる。

(C5) キャッチング実験

実際に対象として直径 50 [mm]、長さ 200 [mm]、重さ 60[g] の発泡スチロール製円柱を使用し、軽量高速多指ハンドを用いてキャッチング実験を行なった。実験システムの概略を図 3-4 に示す。視覚システムには、CPV-II(高速列並列ビジョンシステム)を使用した。CPV-II は多様な初期視覚処理を約 1 [ms] のサイクルタイムで実行することが可能である。これを搭載したアクティブビジョンを 2 台用意し、1 次、2 次画像モーメントから対象の 3 次元重心位置、姿勢を計算した。対象は中心軸が地面に対し水平となる姿勢で、約 1 [m] の高さから落下させた。水平面内での角度は様々に変化させたが、落下途中では回転せず、その重心位置がハンド中心位置に重なるよう位置を調節した。

傾き θ を約 50 [deg] として対象を落下させたときの、キャッチングの瞬間を図 3-6 に連続写真で示す。各指が対象の姿勢に合わせて適切に動作し、2 本の指によって回転をかけて姿勢を操作し、把握する様子が分かる。図 3-5 に、円柱の鉛直方向高さ、水平方向の傾き θ の時間応答を示す。これより、約 45 度の回転を 30ms で実現していることがわかる。

試行を繰り返した結果、円柱の傾き θ が 45 度以内であれば、成功率は約 50% 以上で

あることがわかった。失敗の主な原因は、縦方向の回転を考慮していないためと思われる。

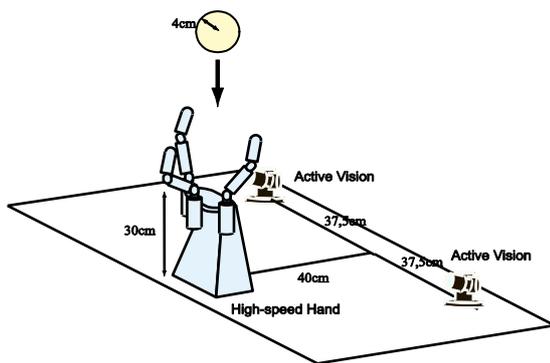


図 3-4 実験システム

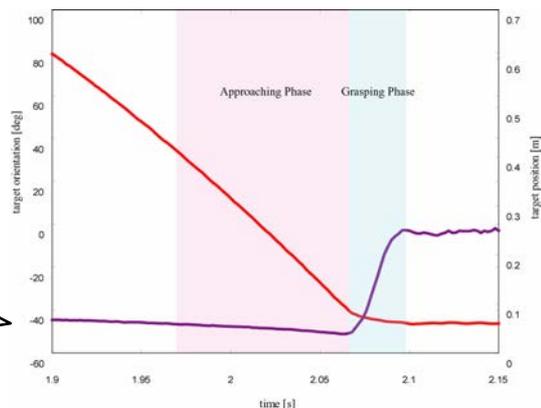


図 3-5 時間応答

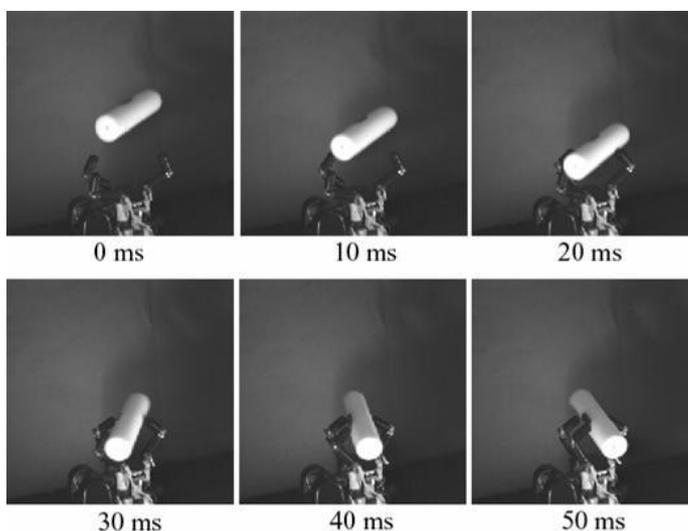


図 3-6 実験結果（連続写真）

(C6) まとめ

落下する円柱状物体のロボットハンドによるキャッチング動作を取りあげ、そのキャッチング戦略と実験結果について示した。今後の展開としては、厳密なモデル化を進めるとともに、他の様々な動的操作に対しても拡張することが考えられる。

(D) 高速バッティング

(D1) 研究の目的

従来のロボットマニピュレーションは静的あるいは準静的な操り動作が多く、低速の作業が中心に行われてきた。その理由としては、動的なマニピュレーションを行うのに十分な能力（運動速度やセンシング速度）を、従来のシステムが持っていなかったことが挙げられる。そのため、打つ・投げる・回すなど対象との間に生じるダイナミクスを積極的に利用した高速動作を実現するのは困難であった。これに対して我々は、高速ロボットシステムを構築することでバッティングやキャッチングなどのダイナミックマニピュレーションの研究を行ってきた。本節では、ランダムに投げられたボールを打ち返すバッティング動作について述べる。

(D2) ハイブリッド軌道生成

ボールの速度に関わらず高速なスウィングを実現するために、バットを素早く振り切る高速な動作とバットの芯で捉える正確な動作を統合するリアルタイム軌道生成アルゴリズムを採用する。前者のスウィング動作 (SW モード) としては時間関数で表される軌道として与えることにした。後者のヒッティング動作 (HT モード) は、視覚フィードバック制御でマンピュレータの軌道をリアルタイムで補正するようにした。これはマンピュレータの軌道をセンサ情報からダイレクトに決定することに対応し、対象の位置の関数として表現される。結果として両者を組み合わせた軌道生成関数は

$$\mathbf{q} = \mathbf{f}(\mathbf{r}_o, t)$$

と表される。ここで \mathbf{r}_o は対象の位置、 t は時間である。よって、SW モードと HT モードの関節変数は以下ようになる。

$$\mathbf{q} = \begin{cases} SW \mathbf{q}(t) \\ HT \mathbf{q}(\mathbf{r}_o, t) \end{cases}$$

ここで HT モードに時間変数が入っているが、これは現在の時刻において SW モードの関節がどのように動いているか把握するための項であり、SW モードの時間変数とは意味が異なることに注意する。

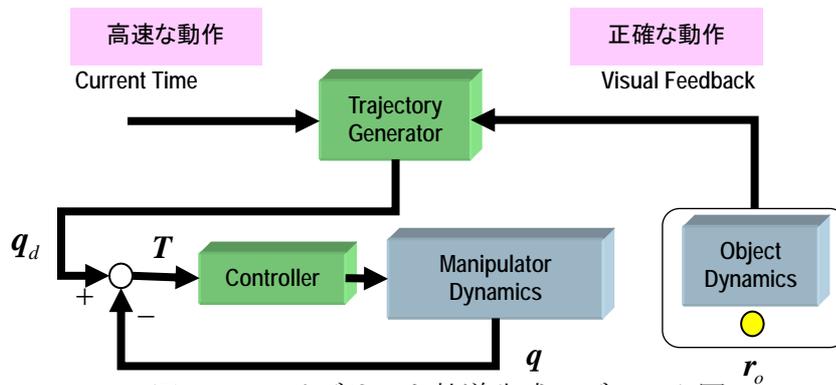


図 4-1 ハイブリッド軌道生成 ブロック図

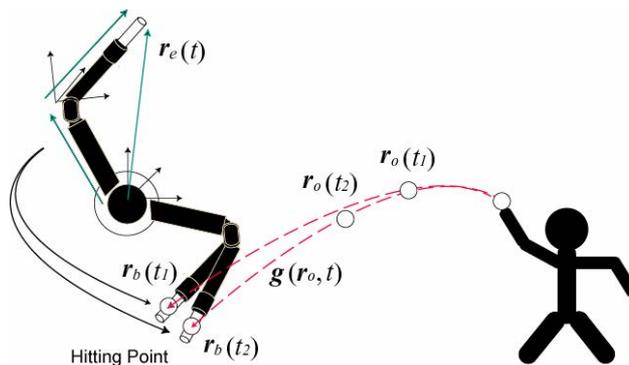


図 4-2 ハイブリッド軌道生成

ここでは、軌道生成関数 \mathbf{f} として時間の多項式を取り上げる。

$$\mathbf{q}(t) = \sum_i \mathbf{k}_i t^i$$

このとき、係数 \mathbf{k}_i は次のようになる。

$$\mathbf{k}_i = \begin{cases} SW \mathbf{k}_i = constant \\ HT \mathbf{k}_i(\mathbf{r}_o) \end{cases}$$

よって、軌道を決定する問題は係数 k_i を求める問題に帰着する。この係数の具体的な決め方は次節で述べる。

(D3) バッティングアルゴリズム

アームの軌道を次のように決定する。まずはボールの位置 r_o を計測し、ある関数 g を用いて打撃点 $r_b(t) = g(r_o(t))$ を予測する。そして、その打撃点を境界条件とするアームの軌道 q を決定する。この操作をサイクルタイム(1ms)毎に繰り返すことで、打撃が可能となる(図4-2参照)。

今、SWモードの自由度をベース座標近くに、HTモードの自由度を手先近くに集中させる。すると、手先位置 r_e は次式で表される。

$${}^{SW}r + T \quad {}^{HT}r = r_e$$

ただし、 ${}^{SW}r$ と ${}^{HT}r$ はそれぞれの座標系で表現されたベクトルであり、 $T = T({}^{SW}q)$ は姿勢変換行列である。動作開始時刻を $t = 0$ 、打撃時刻を $t = t_b$ とする。関節角に関する拘束条件は次式となる。

$$\begin{aligned} q(0) &= q_s \\ q(t_b) &= q_b = l^{-1}(r_b) \end{aligned}$$

ただし、 q_s 初期関節角、 l は順運動学演算である。また、打撃点生成関数に関する拘束条件は

$$g(r_b) = r_e = r_o$$

となる。これは、打撃時刻に手先位置とボール位置と打撃点が一致することを表している。つまり、SWモードの軌道係数 ${}^{SW}k_i$ は

$${}^{SW}q(t_b) = {}^{SW}q_b(r_b(0))$$

によって求まる。このように値を決定することで、定数 ${}^{SW}k_i$ は試行毎に各々のボール軌道に適した値となる。時刻 t におけるHTモードの軌道係数 ${}^{HT}k_i$ は

$${}^{HT}q(t_b) = {}^{HT}l^{-1}(T^{-1}(r_b(t) - {}^{SW}r(t)))$$

によって求まる。ここで、 ${}^{HT}l$ はHTモードの順運動学演算である。以上より、マニピュレータの軌道が決定する。

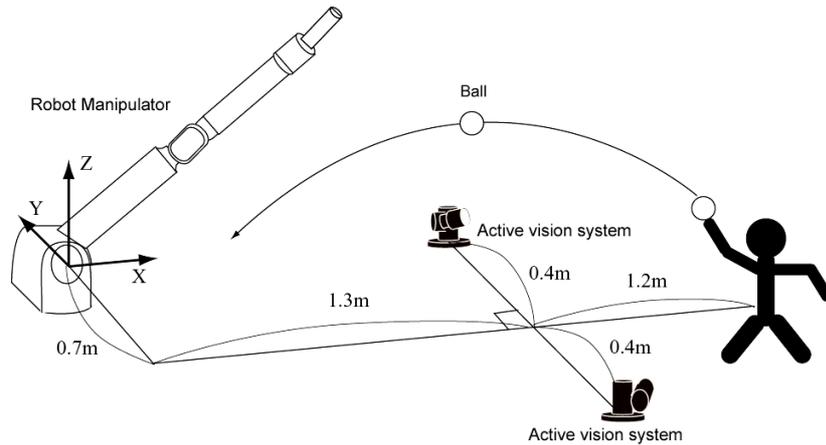


図 4-3 実験システム

(D4) 実験

図 4-3 のように約 2.5m 離れた位置から半径 4.5cm の発泡スチロールのボールをアームに向かって人間が投げた。ボールを認識できる時間は 0.3s 程度なので、あらかじめテイクバックした状態から振り切るという動作を行った。ボールの速度は 6~8 m/s であり、バットの速度は約 5 m/s である。今回の実験では、逐次的にボールの位置をプロットし、最小自乗近似により関数のあてはめを行って予測軌道を求めた。x,y 方向は 1 次関数、z 方向は 2 次関数で近似した。また、簡単のため、4 関節のうちの第 2 軸を固定とした。センサが情報を取得してからアームのアクチュエータに指令を与えるまでのサイクルタイムは 1 ms とした。パラメータの設定として、初期姿勢を

$$\mathbf{q}_s = \left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{5}, -\frac{3\pi}{4}, \frac{\pi}{12} \right], \quad \text{終端姿勢を } \mathbf{q}_t = \left[\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{5}, \frac{\pi}{6}, \frac{\pi}{12} \right], \quad \text{打撃時間を } t_b = 0.23 \text{ s},$$

$$t_e = 0.83 \text{ s} \text{ と設定した。}$$

図 4-6 に関節角の時間応答を示す。高速な視覚フィードバックにより目標軌道が補正され、かつ高速アームが補正された軌道に追従していることがわかる。図 4-4 にボールとアームの 3 次元的な動きを示す。視覚フィードバックによる打撃点の補正により、打撃点で正確にボールと衝突していることがわかる。図 4-5 に打撃可能範囲を示す。赤色の領域が打撃可能範囲であり、縦方向約 1m、横方向約 80cm 程度の領域であり、この範囲にボールが投げ込まれば、どのような軌道の球であっても、打ち返すことが可能である。

アームの高速性によりスウィング開始後も軌道を補正でき、また打撃時間 t_b を短くで

きる。またビジョンの高速性により r_o が高速に計算できる。これはボール位置を多数計算できることに相当し、予測軌道の誤差を少なくすることができる。従って、ビジョンがボールを認識してから 0.1s 以内にスウィングを開始するという条件のもと、高速な視覚フィードバックにより打撃点の補正がうまくいき、結果として高速にスウィングしながらバットの芯付近に当てることに成功している。成功率は約 90% 程度である。図 4-7 にバッティングの様子を 30ms 間隔の連続写真で示す。

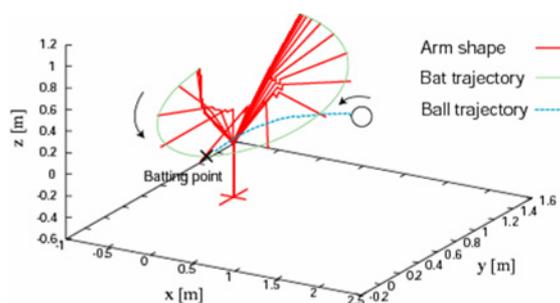


図 4-4 実験結果

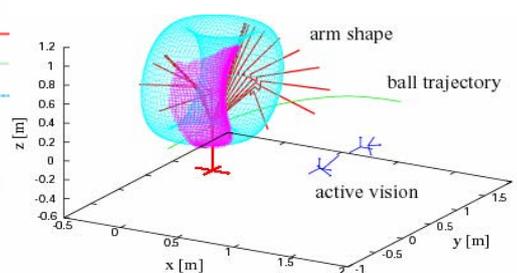


図 4-5 打撃可能範囲

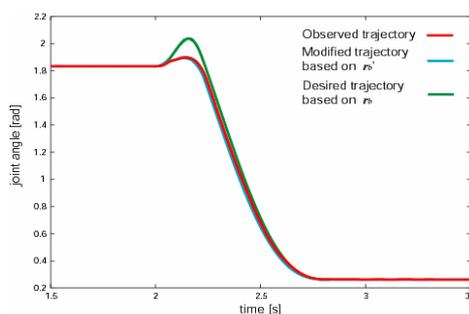
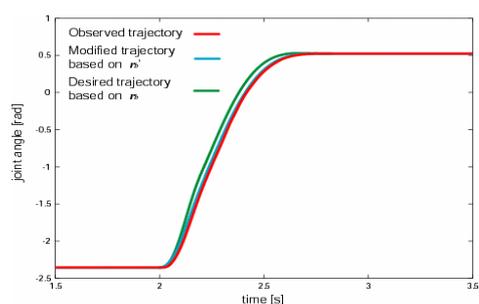


図 4-6 関節角時間応答

(D5) まとめ

高速性を利用したバッティングアルゴリズムを提案し、実験によりその有効性を確認した。今後の展開としては、アームのダイナミクスを考慮した軌道計画・打撃直後のボール速度ベクトルの制御・ロボットハンドにバットを握らせての実験などが考えられる。

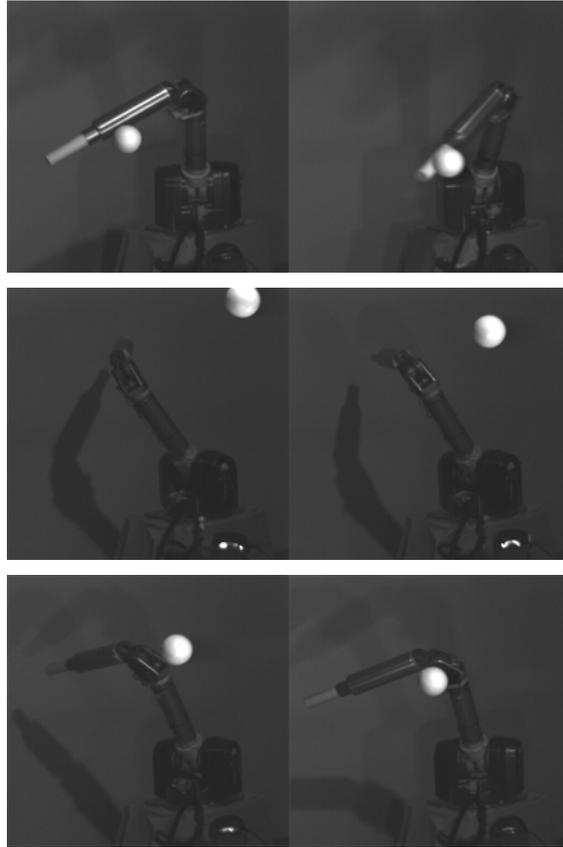


図 4-7 連続写真

(2) 研究成果の今後期待される効果

本研究の特徴は、各諸要素を人間の機能・従来工学システムの能力をはるかに超えたレベルで構築し、最終的な工学的システムを、人間を超えるレベルで実現することを目指す点にある。このようなアプローチで行ってきた研究はこれまでにはなく、その研究の進展は現在の技術のブレークスルーになる可能性があるものとされ、学界だけでなく産業界からも注目を集めている。

例えば、従来、自動化が困難とされてきた分野(労働集約型産業；医療，農林魚業等)に応用することで、作業の機械化が促進され、産業構造の改革に繋がることが考えられる。また、老人・障害者等の社会的弱者に対する補助システムとして用いることで、よりヒューマンフレンドリーなシステムの実現が可能となる。このように、本研究は、人間における最も重要な機能といえる「手」を対象としているために、その成果は多くの分野へ適用できることが期待される。

また、産業用途では、これ以上のコストダウンに限界のある産業用ロボットに対して、高速視覚フィードバックを用いた適応性と高速性を付与することにより、パフォーマンスの向上を実現するブレークスルーを提供するものであり、ロボット単体で様々な作業用途に対応できるような汎用性を持たせることで、結果としてコスト・パフォーマンスを極端に向上させるものである。このことは低賃金労働者による労働集約型産業に対抗しうるロボット技術、あるいは剛体以外の対象(柔らかい物体、動く物体)を扱えるロボット技術等の展開が期待できる。現在、世界をリードする日本のロボット技術に新たな展開の可能性を与えることが期待される。

3.2. 「手と脳」における脳型情報処理の集積化の研究（広大岩田グループ）

(1) 研究内容及び成果

(A) CDMA送受信チップの開発の位置づけ

複数のプロセッサ、ビジョンセンサ、アクチュエータで構成された高度なロボット制御には構成要素間のリアルタイム通信が極めて重要となる。一言でリアルタイム通信と言っても、ロボット制御で扱うデータには様々な性質があり、それらはハードリアルタイム性（即応性）とソフトリアルタイム性の2つに大別できる。

ハードリアルタイム性が求められるデータは制御コマンドや演算タスクといった制御系データであり、必ず時間制約を守らないと価値がないという性質を持つ。データサイズは非常に小さい。一方、ソフトリアルタイム性が求められるデータは画像データや音声データといったセンサ系のデータであり、データサイズが非常に大きく、レイテンシよりもスループットが要求される。ロボットにおいて、これらの性質の異なるデータを同時に通信することは難しい課題である。しかも、伝送路の増加は物理的な負荷のために機械系の動作の妨げとなるため、少ない伝送路が要求される。

TDMA(Time Division Multiple Access)通信でネットワークを実現した場合、大量のデータパケットに埋もれた形で重要な制御信号を通信する必要がある。そのため、正確なレイテンシが保証できず、ハードリアルタイム性を実現すること、また、状況に応じて各データのバンド幅が動的に変化するのに柔軟に対応することも困難と考えられる。そのため、ハードリアルタイム性データとソフトリアルタイム性データで伝送路を分けた設計となる。

本研究では、それらの問題を解決するために有線通信に CDMA (Code Division Multiple Access)方式による多重化を取り入れた。CDMA は同一線路で符号という複数の仮想チャンネルが扱うことができ、同時刻に複数のチャンネルを持ち得る。有線通信に CDMA 方式による多重化を導入した研究はいくつかある。その1つとして、バスラインを集中定数コンデンサと見なして多重化を行った例があるが、これはインピーダンス整合が困難であり多重反射の影響等のために伝送レートが 100Mbps 程度に制限される。高速通信を実現するために Point-to-Point 接続のシリアル通信に CDMA 方式の多重化を取り入れた例があるが、送信回路と受信回路のタイミングを合わせる同期システムに問題がある。ここでは2段階の同期方法(コード同期とチップ同期)を提案し、0.25umCMOS 技術によって送受信チップを開発した。

(B) 同期方法

CDMA は直交した符号を割り当てることで多元接続を図る方式である。符号を持つ直交性により重なった周波数軸および時間軸上での多元接続が可能となる。送信器からビットデータを複数ビットからなる符号へ符号変調して多重化を行った波形を出力する。受信器では符号変調を行った同じ拡散符号を同じタイミングで再度掛け合わせることで復調が行われる(図1)。

[拡散符号]

CDMA 通信で扱う符号を選ぶとき、相互相関特性と自己相関特性の2つの相関特性が重要となる。相互相関特性は符号間の干渉(直交性)を示し、エラービット率に大きく影響する。相互相関関数は次式で表すことができ、使用する符号間の値が0となるような符号を選択するのが理想である。

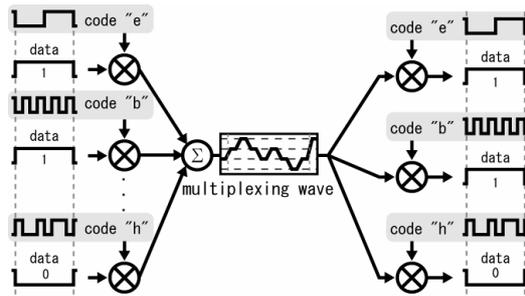


図1 CDMAの動作原理

$$r_{ij} = \sum_{n=1}^N Y_i(n) \cdot Y_j(n)$$

自己相関特性は、符号がずれたときの類似性を示し、同期に用いる符号においては重要な特性となる。自己相関関数は次式で表すことができ、シフト量が0のとき(k=0)のみ高い相関値が得られる符号が同期に最適である。

$$r_i(k) = \sum_{n=1}^N Y_i(n) \cdot Y_i(n+k)$$

有線によるCDMA通信で扱う符号の長さは比較的短くなる。符号長が短い場合、相互相関特性と自己相関特性の両立は極めて困難となる。次に、この問題を解決した提案手法について説明する。

[提案する同期方法]

本チップでは相互相関を得るために完全直交符号であるウォルシュ符号を採用した。表1に使用した符号長8のときのウォルシュ符号を示す。ウォルシュ符号は相互相関が良いが、同期に最適な自己相関特性を持った符号が存在しない。ピークとなる山がなだらかなため精度の高い同期が実現できない、ピークが2つあるために間違っただ箇所同期が取れるといった問題を含む。

表1 符号長8のウォルシュ符号

Name	Code
“a”	1 1 1 1 1 1 1 1
“b”	0 1 0 1 0 1 0 1
“c”	0 0 1 1 0 0 1 1
“d”	0 1 1 0 0 1 1 0
“e”	0 0 0 0 1 1 1 1
“f”	0 1 0 1 1 0 1 0
“g”	0 0 1 1 1 1 0 0
“h”	0 1 1 0 1 0 0 1

そこで、図2(a)に示すように符号の相関関数同士を掛け合わせることで同期に最適な相関関数を作り出した。符号“c”の自己相関関数は図2(a)上段、符号“e”の自己相関関数は図2(a)中段のようになる。この2つの相関関数を掛け合わせると相関関数“i”のように同期には最適な相関関数が得られる。この相関関数を用いることで提案する2種類の同期、ビット同期とチップ同期を実現する。

まず、ビット同期では逆拡散を行うスタートポイントを粗に探索し、伝送波形の位相と逆拡散符号の位相とのずれが1チップ区間に収まるように機能する。これは相関関数“i”と予め定めた閾値とを比較し、閾値よりも高い相関値が得られるポイントを探すことで実現する。

チップ同期ではビット同期で保証した1チップ区間内の位相ずれから外れないように監視、修正する。ここでは図2(b)に示すように相関関数“i”を1チップ区間左シフトした相関関数“j”から1チップ区間右シフトした相関関数“k”を引くことで得られる相関関数“l”を利用し、この値が0となるように動作させることで実現する。

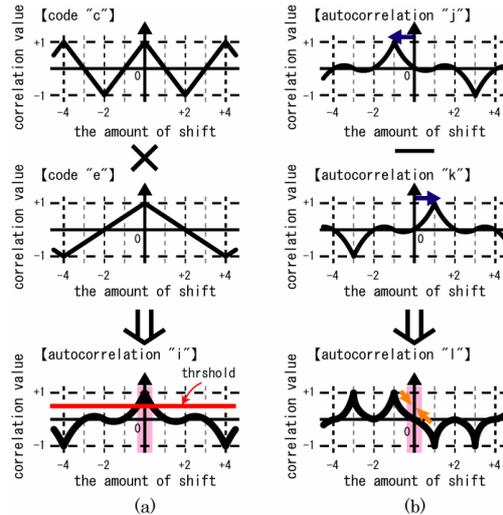


図2 同期に用いる相関関数

(C) 受信回路

図3に受信回路のブロックダイアグラムを示す. Wave Samplerはリングオシレータより出力された位相の異なる8相のクロックを用いて符号長(8つ)分の差動受信波形をインタリーブしてサンプリングする. 提案する2種類の同期, コード同期とチップ同期はリングオシレータとWave Samplerの間に設けたMUX回路と電圧制御遅延回路でクロック位相を制御することで実現する. これについては後で詳しく説明する. Wave Samplerは2つのS/H(Sample and Hold)回路とソースフォロアバッファ回路からなり, S/H回路をマスタースレーブ型に動作させる事で波形が安定している時間を延ばす工夫を施した.

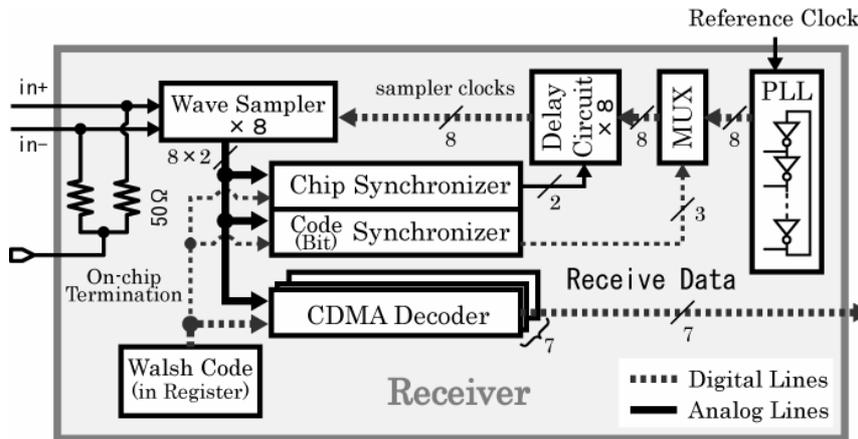


図3 CDMA シリアル受信チップのブロック図

[CDMA 復調回路(CDMA Decoder)]

CDMA の復調回路の構成を図4に示す. 復調回路の構成は相関器とコンパレータで分けられる. 相関器では伝送波形と逆拡散符号との相関演算を行う. 伝送波形と逆拡散符号との乗算演算は2x2のクロスバースイッチで差動信号のパスを切り替えることで実現している. パス切り替えした符号長分の差動信号をアナログ加算回路により加算することで相関値を算出する. 算出結果は送信器で拡散されたビットデータが"1"の場合には図2(a)の相関関数"e"や"e"のようになり, ビットデータが"0"の場合には相関関数が"e"や"e"がX軸で反転した形となる. 受信したデータが"0"か"1"は相関器の結果をコンパレータ回路で判定する. ここでは差動入力, 差動リファレンスの4入力コンパレータを用いた.

[コード同期回路(Code Synchronizer)]

コード同期回路の構成を図5に示す. 2つの相関器と, ギルバートセル乗算器, 比較器, MUX 制御回路, MUX 回路で構成される. 図4に出てきた相関器を2つ用いて符号”c”と”e” (表1参照)の相関演算を行い, その出力結果をギルバートセル乗算器(A)で掛け合わせる. このギルバートセル乗算器の出力結果は相関関数”i”に示すような値となる. この結果とある閾値との比較をコンパレータで行い, MUX 回路を制御することでコード同期を実現している. MUX 回路はクロック位相が1チップ区間ずつシフトするように切り替える機能を有している. 制御回路は相関関数”i”の値が閾値よりも低い場合にはMUX回路を動作させて8相全てのクロック位相が1チップ区間ずつシフトするように動作させ, 逆に”i”の値が閾値よりも大きい場合には MUX 回路の切り替えを止めてチップ同期への切り替えを行う. これにより伝送波形の位相と逆拡散符号の位相のずれを1チップ区間に収める.

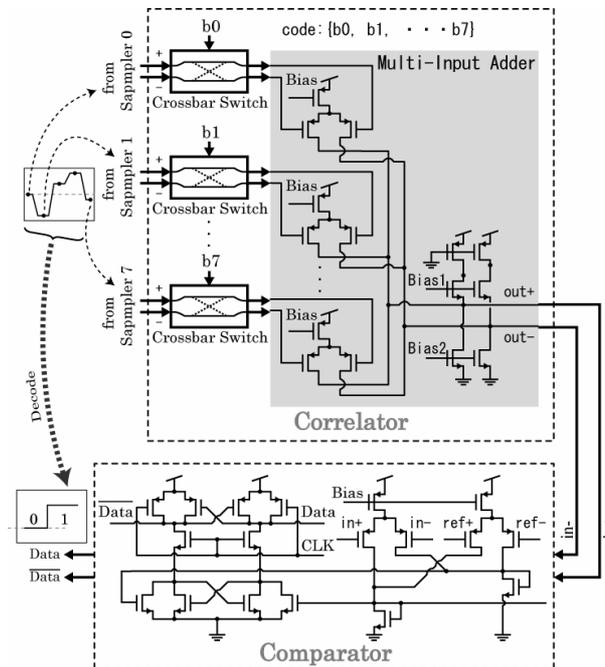


図4 CDMA 復調回路のブロック図

[チップ同期回路(Chip Synchronizer)]

チップ同期回路の構成も図5に示している. 4つの相関器と2つのギルバートセル乗算器, ループフィルタ, 遅延回路で構成される. 4つの相関器と2つのギルバートセル乗算器(B)と(C)の出力はそれぞれ図2の相関関数”j”と”k”を演算するのに用いている. 2つのチップ同期回路の構成も図5に示している. 4つの相関器と2つのギルバートセル乗算器, ループフィルタ, 遅延回路で構成される. 4つの相関器と2つのギルバートセル乗算器(B)と(C)の出力はそれぞれ図2の相関関数”j”と”k”を演算するのに用いている. 2つのギルバートセル乗算器の差動出力を交互に接続して電流による減算を行うことで相関関数”l”を得て, ループフィルタを通して遅延回路の制御電圧 (Cnt+, Cnt-) を制御することで正確な同期ポイントになるようクロックの位相修正を行う. チップ同期回路の構成と Wave Sampler を含めて DLL(Delay-Locked Loop)として機能する. コード同期時の制御電圧 (Cnt+, Cnt-) は一定電圧に固定している. この制御は2つのスイッチ(SW1, SW2)で行っており, コード同期とチップ同期との切り替えは CntSW スイッチにより制御している.

(E) 受信チップ測定結果

受信チップで提案する同期システムの測定結果を図7に示す。図7（左下）はコード同期時のシステムクロック波形を示す。コード同期時には位相を1チップ区間ずつシフトさせて逆拡散のタイミングを探索するため、8相の位相の異なるクロック波形が重なって見える。図7（右下）はコード同期からチップ同期へ移行したときのシステムクロック波形を示す。ここではクロック波形の位相が1つに定まり、1つの250MHzのパルス波形のみが見える。この時のクロックジッタは60psであった。図7（上中央）に、クロックの遅延時間を制御するコントロール電圧波形（Cnt+, Cnt-）を示す。コード同期時には固定値（1.9V, 0.7V）にしているが、チップ同期に切り替わると最適な遅延時間へと調整するように電圧が変化していることがわかる。

7つのビットデータを符号拡散して多重化を行い、7多重2.7Gchip/sの動作実験を行った。測定した復調波形を図8に示す。図8（右）は多重に用いた7つのビットデータのパターンで、それらを符号拡散して多重化し、波形発生器AGW710から発生させた波形が図8（中）である。1符号あたりの振幅は100mVp-p、最大振幅は800mVp-pである。この多重化された波形を受信回路に入力して、各符号チャネルにより復調された結果が図8（左）である。7つの符号から入力したビットデータのパターンが得られたことが分かる。この動作時の消費電力は264mWであった。

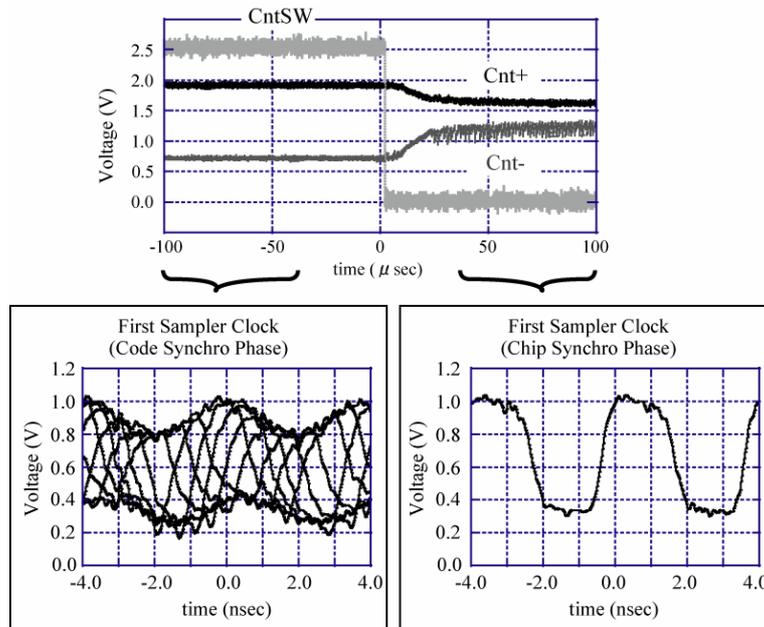


図7 同期システムの測定波形

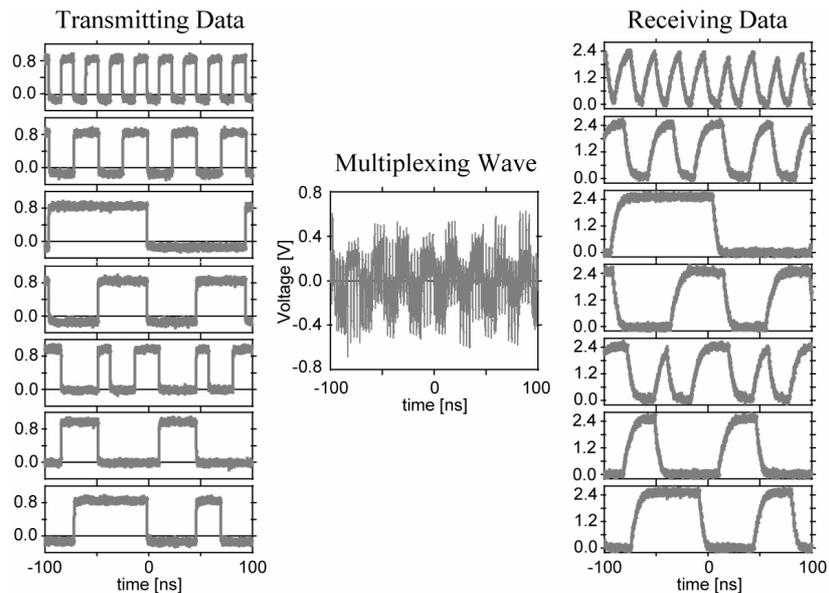


図8 7多重 2.7Gchip/s の動作実験時の測定波形

前述の受信回にCDMA送回路を搭載した送受信チップを設計試作した. 図10にチップ写真を示す. チップサイは4mmx4mmである.

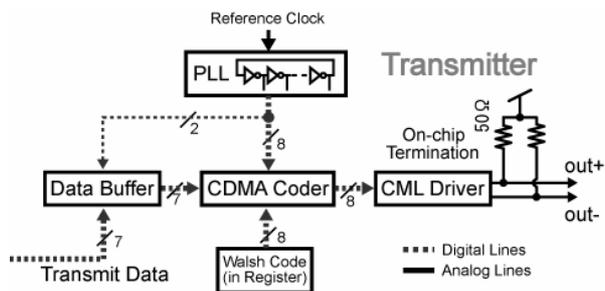


図9 送信回路の構成

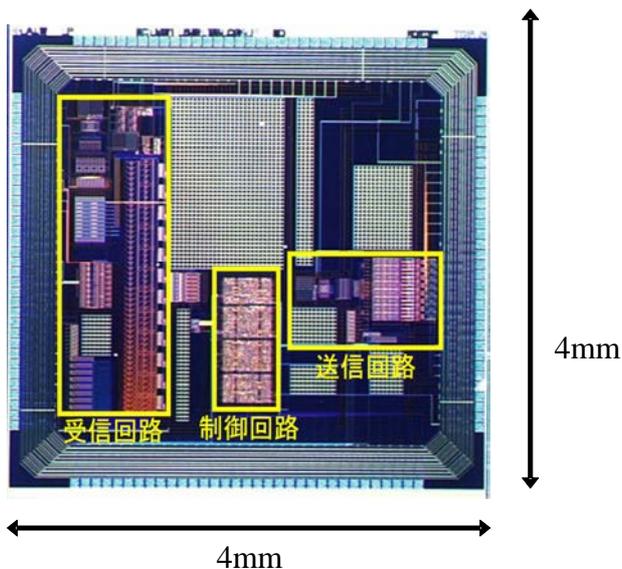


図10 CDMA送受信チップのチップ写真

(F) インタフェースボード

CDMA シリアル送受信チップを2チップ搭載した、CDMA通信ボードを試作した。図9にCDMA通信ボードと周辺の接続図を示す。マルチDSP搭載プロセッサシステム（SDS社 S-RTPステーション）のDSPボードにSADインタフェースコネクタで接続することにより、CDMA方式による2ノードとの通信を可能にするように設計した。また、デモ用にCamera Linkで市販のカメラと接続して画像データを取り込み、切換データ転送できるように設計した。図10にボードの写真を示す。

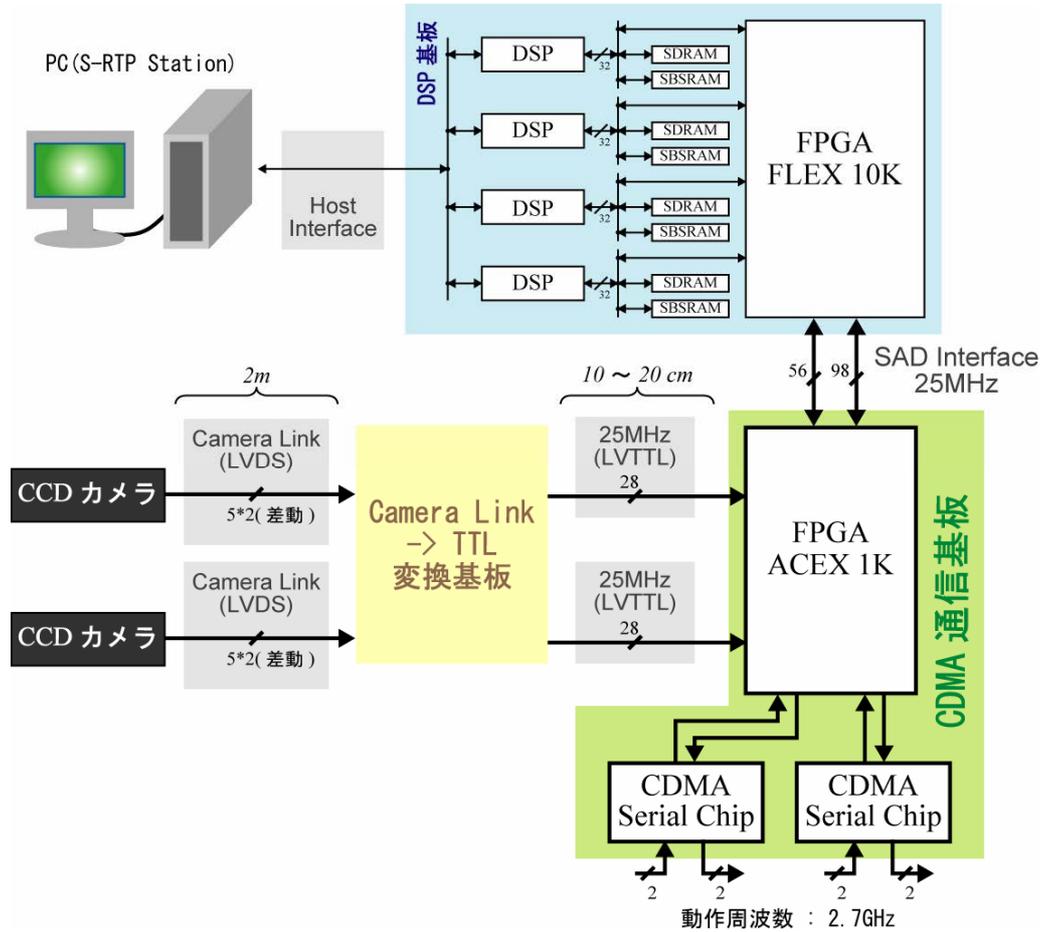


図 11 CDMA通信ボードと周辺ブロック図



図 12 CDMA通信ボードの写真 left: DSPボードと接続, right: ボード単体

(G) まとめ

高度なロボット制御に適したネットワークを構築するため、2段階の同期方法（コード同期とチップ同期）と受信回路を提案した。そして、その受信回路を 0.25 μ m CMOS デジタルプロセスにおいて転送レート 2Gbps、7多重で動作することを目標に設計・試作を行った。測定により提案する2段階の同期システムの動作を確認し、7多重の 2.7Gchip/s でデータの受信を確認した。CDMA シリアル通信チップを搭載したインタフェースボードを試作し、これを用いたマルチ DSP プロセッシングシステムのプロトタイプを試作を行い、高度なロボットのブレイン（制御機構）実現の基盤技術を確立した。

(2) 研究成果の今後期待される効果

同種の CDMA 通信チップでは 2.7Gbps で 2 多重のものが報告されているが、本研究で、これを大きく上回る 7 多重を実現している。将来のロボットに要求される処理能力の向上に対処するのに、少ない本数の伝送路で控高速かつ融通性の高いネットワークを実現する技術とキーとなる通信チップを実現できた。このことは次世代のロボットの基盤技術として極めて重要な位置づけを有しており、本プロジェクトでロボットの手と眼と脳の処理ダイナミクスと整合したロボット内情報通信ネットワークを実現できたことは、独創的な成果であり、今後の研究と実用化に大きなインパクトを与えるものである。

3.3. 「手と脳」のための高速メカニズムの研究（広大金子グループ）

(1) 研究内容及び成果

(A) 研究のねらい

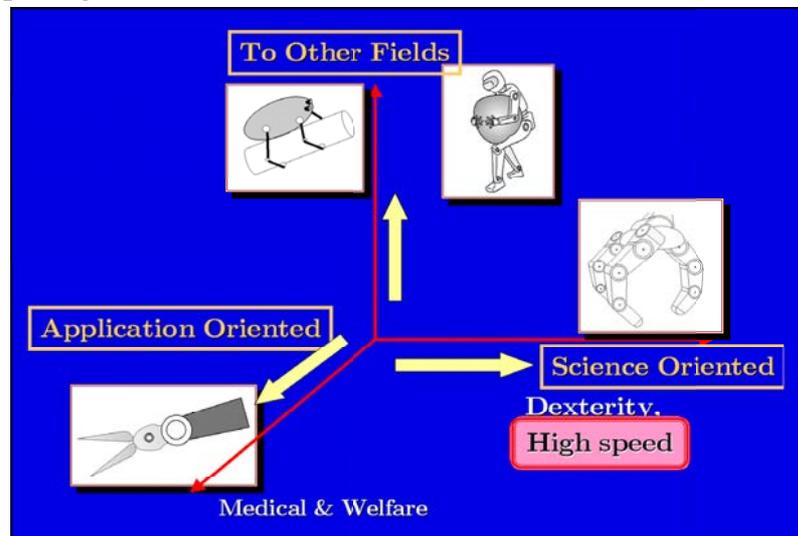


図1. 多指ロボットハンドに関する研究の方向性

多指ロボットハンドの研究は、器用性・高速性等の科学技術の追求，医療・福祉分野等におけるアプリケーション，および多脚歩行ロボット・ヒューマノイドロボット等他の機構への応用という3つの枠組みに分けることができる（図1）．本研究では，この中で，高速性並びに高応答性に焦点を絞り，高速ビジョンからの情報を利用することを想定した上で，世界最高加速度を実現する超高速キャプチャリングシステムの研究開発と，高速で運動する動体を捕獲する場合の力学的観点からの枠組を構築することを研究目的としている．

(B) 100Gキャプチャリングロボットの設計及び基礎実験

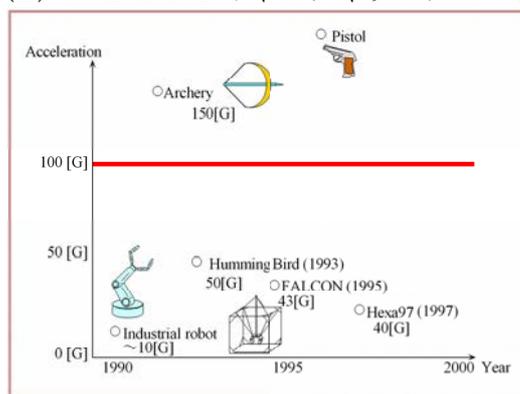


図2. 従来ロボットの加速度マップ

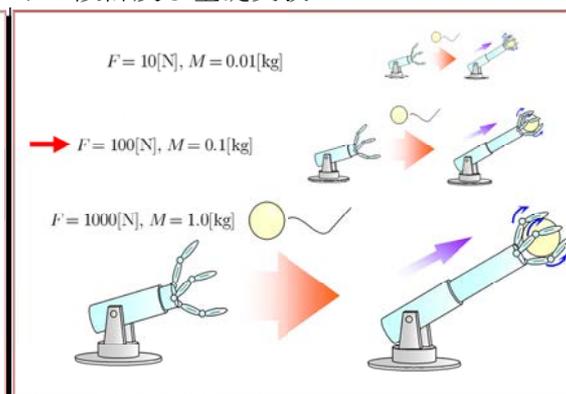


図3. スケール効果

【100Gキャプチャリングロボットの設計】図2は，従来開発されたロボットが実現可能な加速マップを示している．本研究では，従来最高加速度50[G]の2倍，つまり100[G]を目標としたロボットを設計開発する．アーチェリーの弓矢は，150[G]以上の高加速度で打ち出すことができると言われている．このような高加速度が作り出せる背景としては，弓矢が非常に軽量であること，それに加えて非常に大きな弾性エネルギーを利用していることが上げられる．このアーチェリーの機構を参考にして弓矢をロボッ

トアーム，弓の弦をバネ要素とみだてて，高速キャプチャリングシステムを設計する．

加速度 α ，瞬発力 F ，アームとハンドの質量 M とすると $\alpha = F / M$ より加速度 $100[G]$ を実現するためには様々な組み合わせが考えられる．いま F と M の組み合わせを (M, F) で表すと，例えば $(1[kg], 1000[N])$ ， $(0.1[kg], 100[N])$ ， $(0.01[kg], 10[N])$ などが $100[G]$ を実現する組み合わせとなる．瞬発力 $100[kgf]$ のバネを必要とする第一番目の組み合わせは，きわめて危険で実現はかなりむづかしいし，第三番目の組み合わせはバネの瞬発力としては手頃であるがハンドとアームを $10[g]$ で設計しようとするマイクロロボットの大きさになってしまう．以上の点を踏まえ，研究室仕様として設計上適した第二番目の組み合わせを採用した．

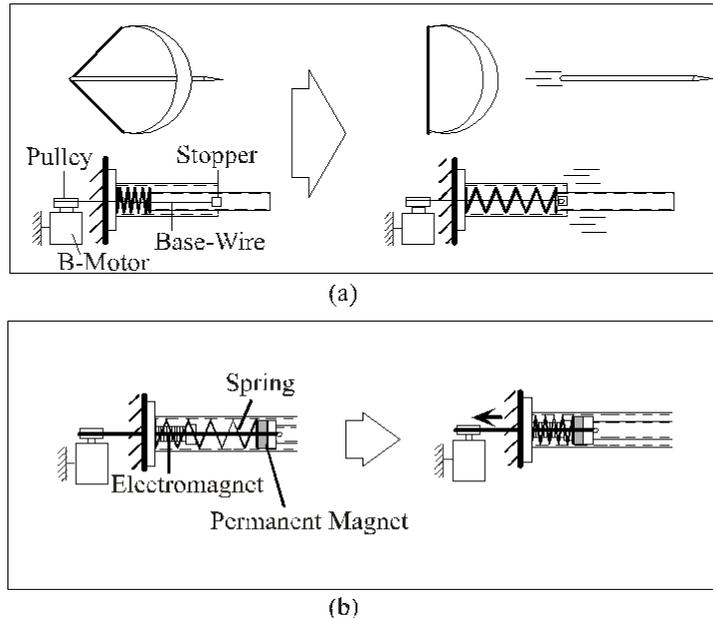
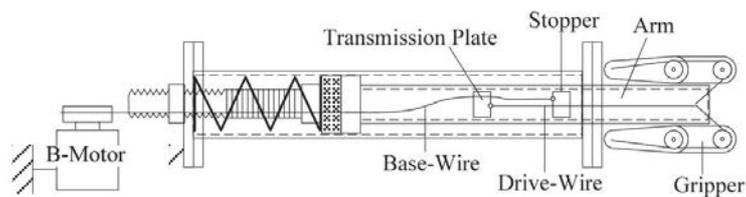
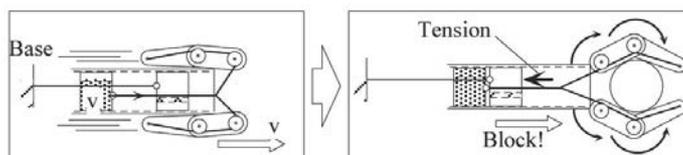


図 4. アーム駆動機構

アーチェリーの場合には，弦を離すと弓は飛び出してしまふ．ロボットの場合，アームが飛び出してしまふのを防ぐため，図 4 (a) のようにアームにベースワイヤを固定し，このベースワイヤの長さをベースモータで調整することにより，アーム停止位置を調整する．図 4 (b) はバネが圧縮された状態を保持する機構である．アームの根元側には永久磁石，ベース側に電磁石をそれぞれ取り付ける．永久磁石を電磁石に吸着させた後，ベースワイヤ長をあらかじめアーム停止位置まで緩めておく．この状態がいわゆる Ready 状態である．外界センサ等により，捕獲可能領域内に対象物が検出されると，電磁石の極性を反転しバネエネルギーを一気に開放する．電磁石の極性を反転した瞬間，電磁石による反発力がバネの瞬発力に加算されるため，大きな瞬間加速度が期待できる．運動エネルギーを得たアームは，事前に規定されたベースワイヤ長のところで急激にブレーキがかかる．なにも工夫を施さなければブレーキによってアームの運動エネルギーは熱に変わる．ブレーキによってアームの運動エネルギーを熱にしてしまうのではなく，ハンドの閉動作の運動エネルギーに変換し，エネルギーの節約と高速把握動作を同時に達成する機構として，図 5 に示すアーム／ハンドカップリング機構を提案する．



(a) Ready State of the Capturing System



(b) Operation Modes

図 5. アーム/ハンドカップリング機構

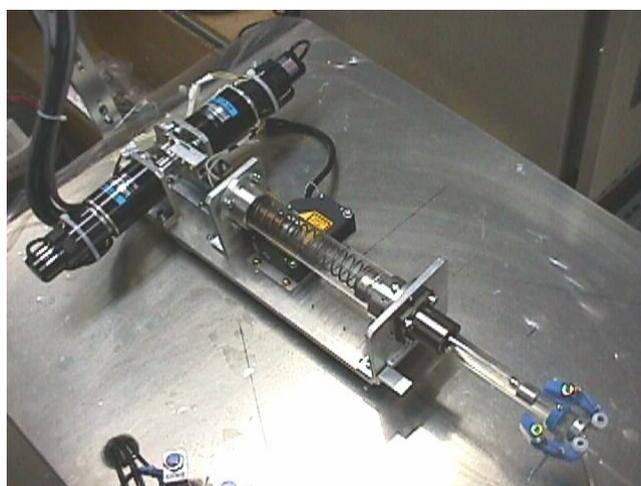


図 6. 高速キャプチャリングシステム

ハンドは、コントロールワイヤー一本でハンドの開閉が行えるソフトグリップ(広瀬ら, 1983)を改良したものを採用し、ワイヤ張力がゼロの場合にハンドが初期姿勢に戻るように各関節にはバネを取り付けた。図5にアーム/ハンドカップリング機構の基本構造を示す。この機構のポイントは、アームが規定長さ(ベースワイヤ長によって決まる)に到達したとき、ベースワイヤとコントロールワイヤが力学的に干渉する機構になっている点である。この力学的干渉を実現するため、ベースワイヤとコントロールワイヤにはそれぞれストッパーとエネルギー伝達板が取り付けられている。ここで、ベースワイヤ先端に取り付けられたストッパーはアームの停止位置に合わせてあらかじめ設定されているものとする。アームが発射されると、ハンドはアームと一体になって前方に加速されるため、ハンド駆動用のコントロールワイヤの他端に固定された伝達板も前方に動きはじめる。伝達板がストッパーに接触すると、ストッパーも前方に押し出される。ストッパーに固定されたベースワイヤに緩みがなくなった瞬間から、アーム・ハンド系が保有する並進運動エネルギーはハンドを閉じる運動エネルギーに自動的に伝達されはじめる。これがアーム/ハンドカップリング機構である。これにより、バネの蓄積エネルギー → アーム・ハンド系の並進運動エネルギー → ハンド閉動作の運動エネルギーと時間遅れなしに伝達され、この機構は、エネルギー源の節約(軽量化)と高速把握動作の両方を実現する上できわめて本質的な機構である。

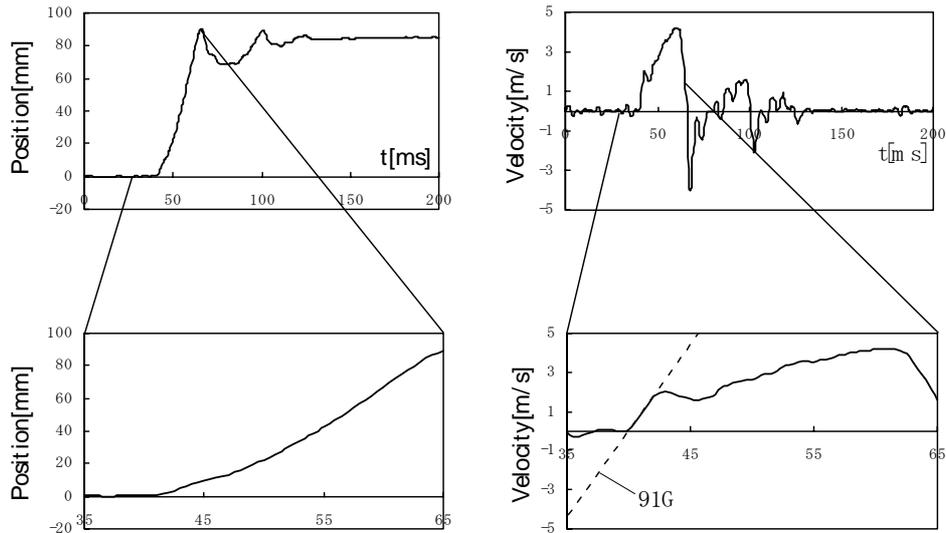


図7. アーム位置と速度

【検証実験】 前述の設計に基づき、高速キャプチャリングシステム（図6）を開発し、検証実験をおこなった。図7に示すように、開発したシステムにより、アーム並進運動において、世界最高加速度となる $90.9[G]$ を達成した。一方、図8に、自然落下してバウンドしたボールに対する捕獲実験の様子を示す。ここでは、動作信号がロボットに送られてから、わずか $50[ms]$ での捕獲に成功している。なお、ハンドの閉動作は $30[ms]$ 以内で行われることも確認できた。また、高速ビジョンからの情報を利用した動体捕獲実験を実施した。高速キャプチャリングシステムと同様の機構をもつハンドを汎用アームに取り付け、 $1ms$ ビジョンを用いて、高さ $1[m]$ 付近から自由落下するボールを捕獲する実験を行った（図9）。ボールは直径 $30[mm]$ で光の反射率の高い黄色のゴム製のボールを用いる。落下してくるボールを $1ms$ ビジョンセンサで感知し、位置情報を $1ms$ でフィードバックしながら、随時ボールがハンドの高さまで落下する時間を計算し、タイミングを計って捕獲動作を行い、 10% 程度の成功率ながら動体捕獲に成功した。

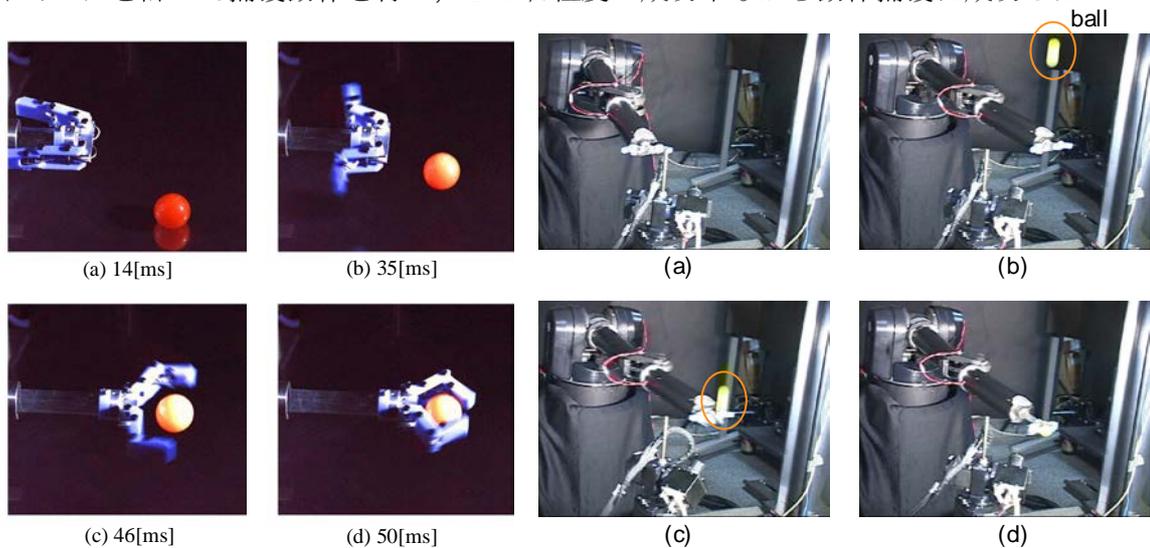


図8. ボール捕獲実験

図9. 高速ビジョンを使った動体捕獲実験

(C) Dynamic Force Closure – グリッパ内における球状動体の振る舞い –

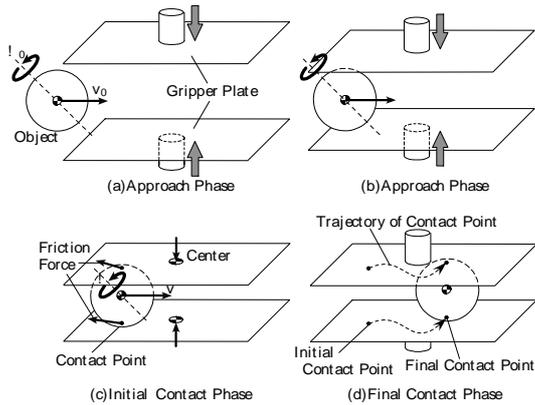


図 10. グリッパによる球状動体の捕獲

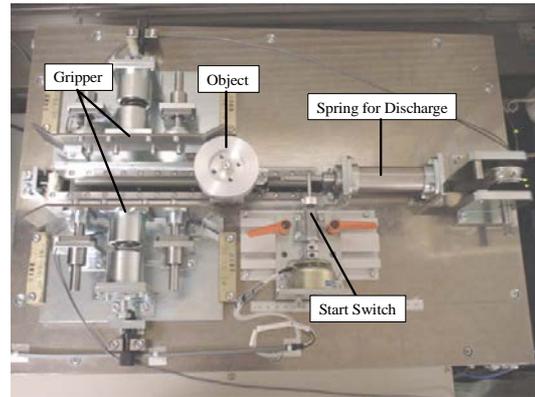


図 11. 回転円盤の捕獲実験装置

開発した高速キャプチャリングシステムのように高速および高加速度で運動する物体を把握する場合、ロボットハンドと物体間の滑りゼロで物体を停止させることは不可能であり、必ず両者の間で滑りが発生する。そのため、動体を確実に把握するためには、ロボットハンドのサイズを検討する上で、ハンド内における動体の振る舞いを考察する必要がある。このような動体捕獲に関して、動体をハンドで捕獲する際のクーロン摩擦に基づく滑り量を指標とする **Dynamic Friction Closure** という概念を提案した (図 10)。ここでは、“動体をグリッパ内で完全に静止させることができる”とき **Dynamic Friction Closure** が成立している”と定義し、はじめに問題を 2 次元に限定して円柱物体に対する初期運動エネルギーと滑り量との関係を解析的に導出し、初期運動エネルギーが等しい場合でも、回転運動エネルギーと並進運動エネルギーの分配により滑り量が異なることを示した。さらに、対象物の回転および並進速度の内、小さい方の速度は大きい方の速度が同等の速度に減少するまで保持されるという興味深い法則を発見した。解析および数値シミュレーションによって得られたこれらの法則を、開発した 2 次元検証装置により、実験的に検証し、解析解の妥当性を確認した (図 11)。一方、捕獲問題を 3 次元化し、グリッパに内における球状動体の並進運動方向と回転運動軸方向との関係を導出し、遷移図として示した (図 12)。ここでは、一般的に動体が停止する前には、並進運動方向と回転軸方向が必ず直交するという性質を導出した。

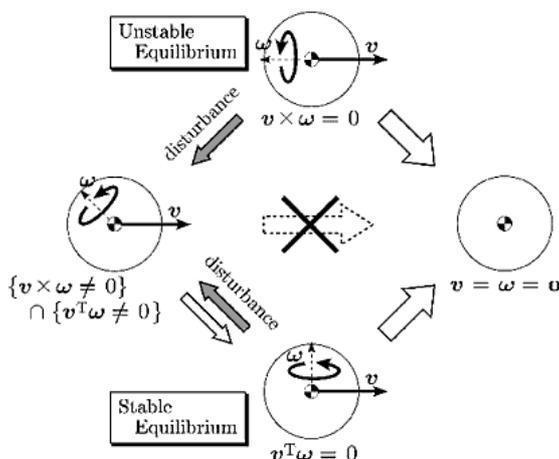


図 12. 状態遷移図

$$M(\theta)\ddot{\theta} + h(\dot{\theta}, \theta) = \tau^{\text{wire}} + \tau^{\text{spring}}$$

$$= T N(\theta, p^a, r) + K(k)\theta$$

図 13. パラメータ依存性

(D) **Dynamic Preshaping** –高速ワイヤ駆動キャプチャリングハンドの設計指針確立に向けて–

前述の通り，ワイヤ駆動方式の採用により世界最高加速度 $90.9[G]$ を達成する高速キャプチャリングシステムを開発した．このような高速ロボットハンドが対象物を捕獲する際には，対象物に適した指形状を生成・維持しつつ対象物にアプローチ(Preshaping動作)することが捕獲成功率の向上において重要なキーとなる．従来，Preshaping を取り扱った研究では主に静的条件下を想定し，高速・高加速度条件下においては議論されていない．高速捕獲動作中のロボットハンドの指姿勢を考えた場合，指リンク系に対する慣性力が支配的となる．ここでは，ワイヤ駆動方式の高速ロボットハンドが対象物を捕獲する場合の **Dynamic Preshaping** 問題を全ての指リンクが対象物と同時に接触する目標姿勢を実現するための機構パラメータ設計問題(図13)と定義した．プーリ位置，プーリ半径から生成されるワイヤリング，関節バネ分配，質量分布によるリンク姿勢の影響を定式化し，高加速度条件下におけるダイナミックシミュレーションによる最適パラメータの導出を行った(図14)．最後に，検証装置としてパラメータ可変型ワイヤ駆動ロボットハンドを設計開発し，シミュレーションにより獲得された最適機構パラメータの妥当性を実験的に確認した(図15)．

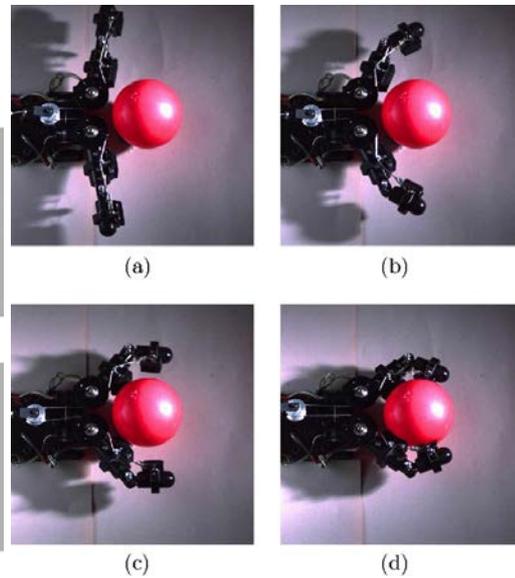
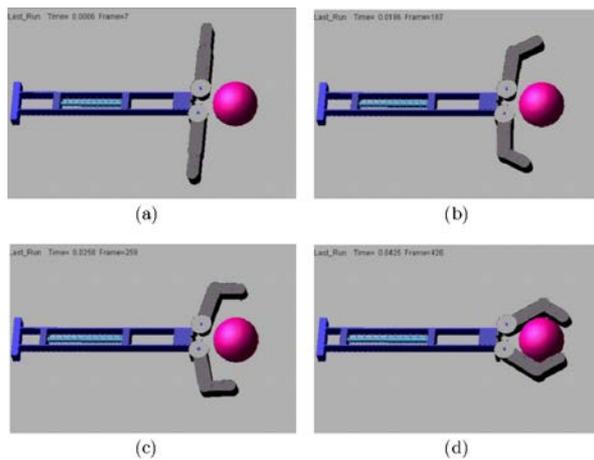


図 14. 高加速度条件下を想定したキャプチャリングシミュレーション

図 15. 高速捕獲実験

3.4. 「手と脳」のための実時間触覚情報処理の研究（電通大下条グループ）

(1) 研究内容及び成果

「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う。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を構築し、高速多指ハンドに対応した実時間触覚情報処理アルゴリズムを開発する。

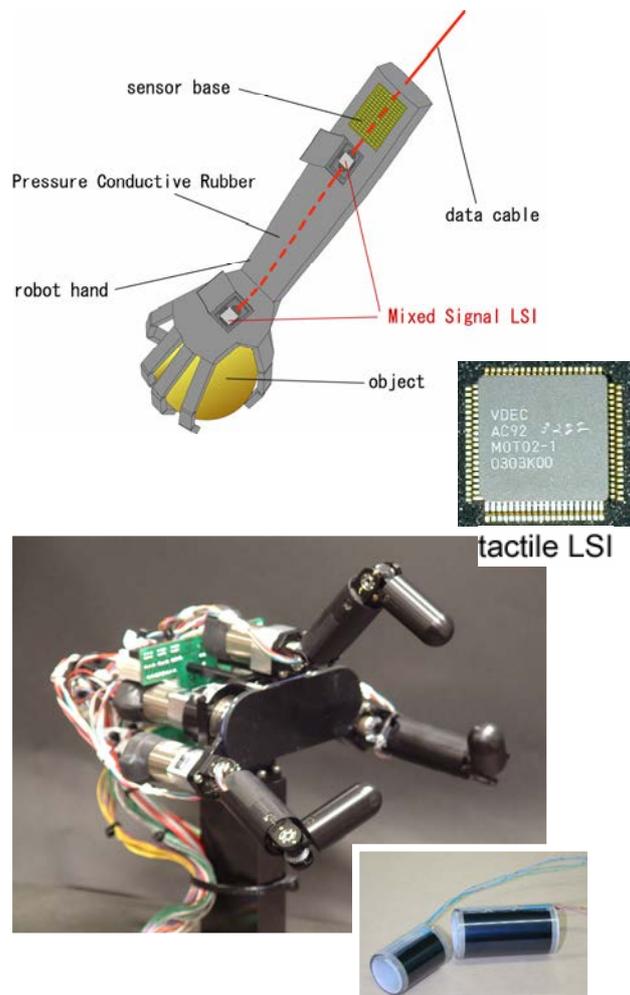
多指ハンドに触覚機能を付与する場合、ハンド全体を覆うような人工皮膚感覚の実現が望ましい。

このような触覚センサの条件としては、薄型で、広い面積を覆え、柔軟性があり、自由曲面にも対応でき、法線・接線方向力の検出が可能であり、耐久性が必要となる。本研究では、このような条件を満たす触覚センシングシステムの開発を目的としている。

従来のほとんどの触覚センサは、法線方向力のみを検出が可能であり、接線方向力の検出はできない、シート状の触覚センサであるため展開図が2次元で表せない3次元自由曲面には触覚センサを装着することができない、また触覚センサに多数存在する配線の処理が困難であるなど解決すべき問題点が数多くある。また、感圧素材として

用いている感圧導電ゴム(以後 PCR)は、柔軟で薄く大面積化が可能、加工が容易、低消費電力、安価などの多くの優れた特徴を持つ一方で、負荷時と除荷時における応答が異なるヒステリシスが存在するという欠点があり、その克服が望まれていた。本研究ではこれらの問題解決のため、以下に課題に対して研究開発を行った。

1. 自由曲面型触覚センサ：液状硬化型感圧ゴム素材を開発し、ディッピング手法により触覚を必要とする指等の自由曲面状にも感圧膜を構成可能な手法を開発した。また、従来の感圧素材の欠点であった履歴特性の低減を目指した。
2. 法線・接線方向力の検出：3次元構造電極と液状硬化型感圧素材を用いた法線・接線力触覚センサの開発を行った。
3. 高速度型触覚センサ：1ms の高速応答性を有する視覚センサに対して、視覚との応答速度の整合性をたもつため、応答時間 1ms 以内の高速性をもつ触覚センサの開発を行った。
4. 触覚情報処理用 LSI の開発：高密度分布型触覚センサで問題となる多数センサからの配線処理方式に関して、触覚情報処理用 LSI を開発し局所情報処理を行わせると共に、伝送機能を持たせることで解決をはかる。



(A) 自由曲面への触覚センサの形成

(A1) 液状硬化型感圧導電性ゴムの開発

ヒステリシスの低減及び自由曲面に対して感圧膜を形成することを目的とし、液状 PCR を開発した。液状 PCR は、液状のシリコーンゴム中に黒鉛粒子を混合し、触媒により縮合を起こさせ、網目状ゴム構造としたものである。粘度は調整が可能であり、印刷インク程度である。PCR は、シリコーンゴムに導電体である黒鉛粒子を均一に分散させたものであり、黒鉛粒子相互の接触面及び黒鉛粒子を取り巻くシリコーンゴムとの界面には摩擦が働く。この摩擦による影響により PCR の変形が除荷時と負荷時で異なり、PCR の加圧力と抵抗値の関係にはヒステリシスが存在する。従来の PCR に使用されている黒鉛粒子は、 $40\mu\text{m}$ 程度であり、形状は球状のものから楕円状のものが含まれる不均一なものであった。そこで本研究では、液状 PCR に使用する黒鉛粒子を微少な均一な球状に変更し、摩擦による影響を抑え、ヒステリシスの低減をはかった。

(1) 液状硬化型 PCR 設計パラメータ：液状硬化型 PCR の設計パラメータとして、(1)シリコーンゴムと黒鉛粒子の成分比率、(2)PCR の膜厚、(3)使用する電極のギャップの 3 つを設定した。測定システムは、PCR 上に設置した加圧板を、加振機を用いて加圧し、その時の加圧力と PCR の抵抗値を記録するものである。

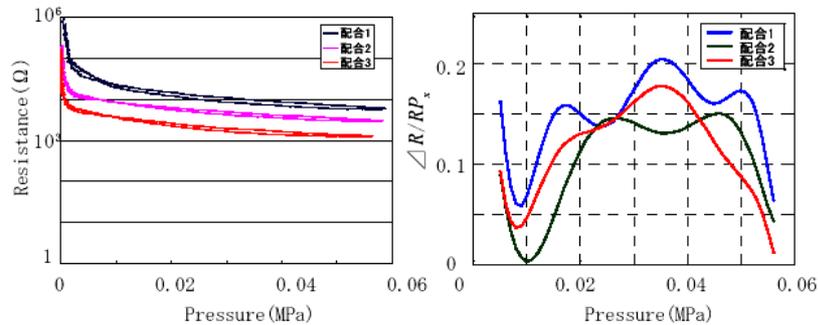


図1 配合による感圧特性とそのヒステリシス

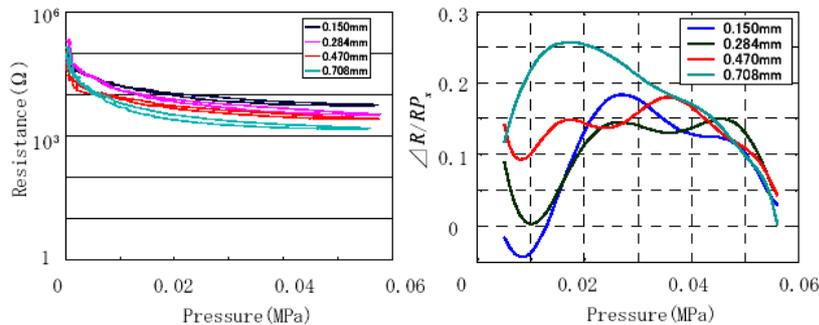


図2 膜厚による感圧特性とそのヒステリシス

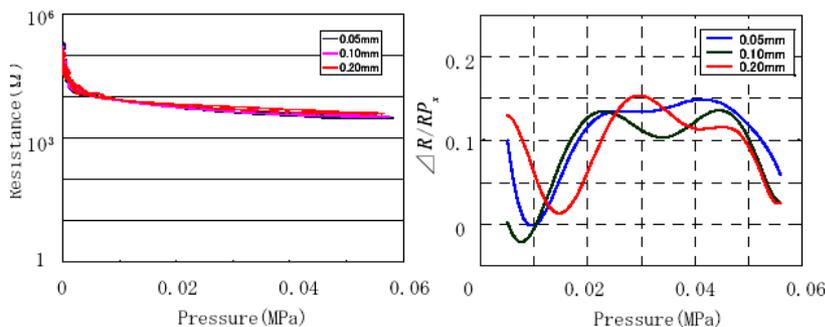


図3 電極間隔による感圧特性とそのヒステリシス

(2) ヒステリシスの評価法： ヒステリシスを評価する指標として、本実験では圧力 P_x 時の加圧過程の抵抗値, 減圧過程の抵抗値 RT_x の差 ΔR を求め, $\Delta R/RT_x$ を用いる. 感圧特性計測の結果から圧力と抵抗値の関係式を多項式近似により求める. さらにその多項式から RP_x , RT_x を求め, 各圧力における $\Delta R_x/RT_x$ を計算した.

(3) 成分比率による感圧特性の違い： 配合の異なる 3 種類の液状 PCR の感圧特性の計測を行った. 計測結果を図 1 に示す. 黒鉛粒子の比率が大きいほど, 同じ圧力下において低い抵抗値を示す. これは, ゴム中に含まれる黒鉛粒子が多いほど同圧力下での黒鉛粒子の接触数は多くなるため, 抵抗値が小さくなるものといえる. 各配合とも従来の PCR に比べ応答が安定し, ヒステリシスの低下が確認できる.

(4) 膜厚による感圧特性の違い： 膜厚 4 種類の液状 PCR シートを用い実験を行った. 計測結果を図 2 に示す. 膜厚が増すほど同一圧力下において低い抵抗値を示すことが確認できた. これは, 外力によって生じた変形の絶対値が, 膜厚が厚いほど大きく, その結果加圧領域の PCR 中の黒鉛粒子の接触数が多くなるためであると考えられる.

(5) 電極ギャップによる感圧特性の違い： 3 種類のギャップのストライプ電極を用いた. 計測結果を図 3 に示す. 測定には 3 種類の液状 PCR を使用した. 測定結果はギャップが大きくなるほど同一圧力下において高い抵抗値を示した. 但し, ギャップによる抵抗値上昇は僅かであり, 感圧特性に与える影響は小さい.

本測定を通して, 液状 PCR は, ヒステリシスが従来の PCR に比べ改善していることを確認した. またヒステリシスに関しては設計パラメータによる大きな違いはない結果が得られた.

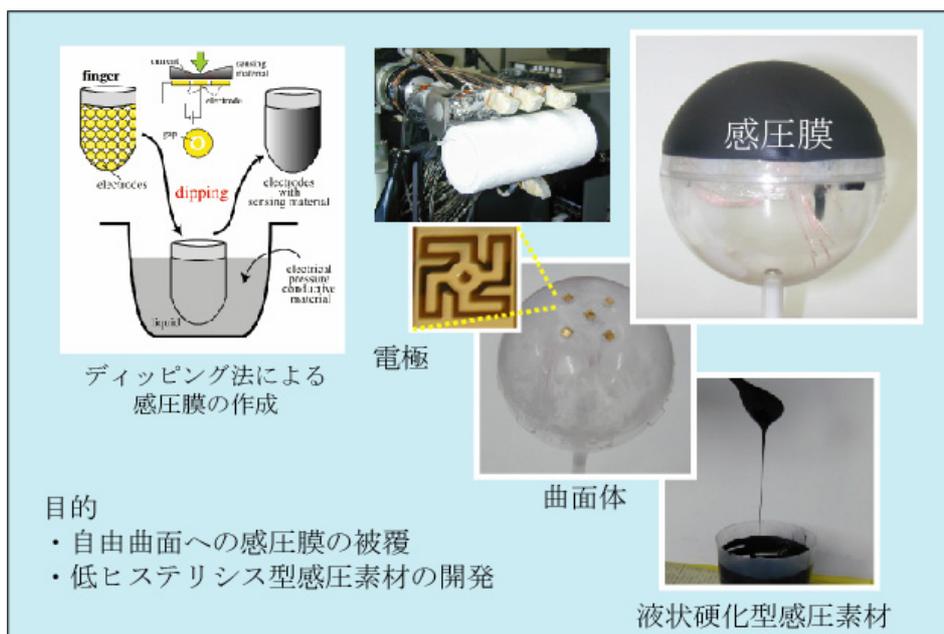


図 4 液状硬化型感圧素材の開発

(A2) ディッピングによる感圧膜形成

液状 PCR の最大の特徴は自由曲面に対して感圧膜を形成できることである. 自由曲面の例を図 4 に示す. アクリル製半球型の表面に卍型の電極を貼り付け, この上を PCR で覆うことにより触覚センサを形成した. ディッピングによる作成手順を次に示す. (1) 電極を貼り付けた半球を(2)液状 PCR に浸し, (3)十分馴染ませたのち引き上げ, (4)自然乾燥させる. 完全に乾燥するまでには 2 日程度の時間を要する. 図はこの手順で作成した乾燥後のものである. 黒い部分が PCR であり, 数 mm の厚さでほぼ一様に曲面を覆っている. 厚さは液状 PCR の粘度により調節が可能である.

(B) 多方向力検出型触覚センサの開発

触覚センサに求められる機能の1つに法線・接線方向力の検出があげられる。本研究では法線・接線方向力を定量的に検出することを目的として、図5左に示すようにV字溝を彫り、その両面に電極を配置し、左右の電極の出力から法線方向力(FN)、接線方向力(FT)を検出する触覚センサユニットを開発した。触覚センサユニットに力が作用した時、V字溝に配置した加圧子には、垂直抗力 N_A , N_B と摩擦力 f_A , f_B が作用する。すると力の釣り合いよりFN, FTを求めることができる。面A, Bの触覚センサから得られる出力は、面に垂直に働く力と摩擦力によるものである。しかし、センサ出力から面に垂直に働く力に起因する出力と摩擦力に起因する出力に分離することはできない。PCRは、外力によって生じた体積変化によりゴム内部の黒鉛粒子が相互に接触し、抵抗値が低下するゴムである。摩擦力ではPCRにはせん断ひずみが生じる。しかし、体積変化が生じないため、ゴムの抵抗値変化は面を垂直に押す力によって引き起こされるものと考えられる。

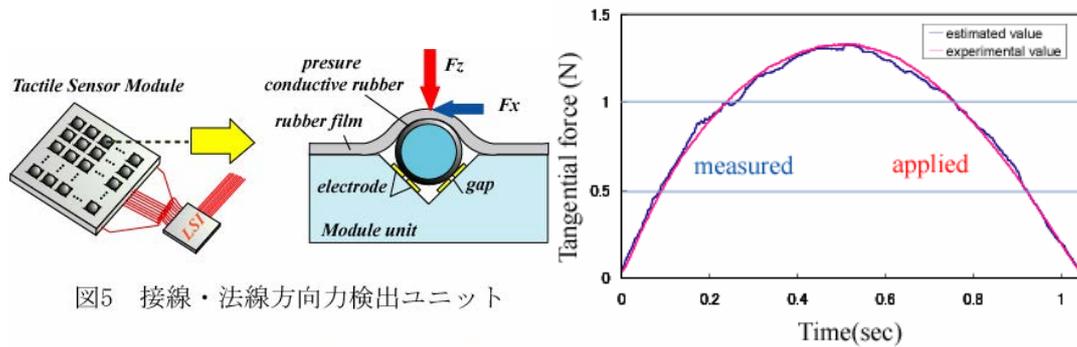


図5 接線・法線方向力検出ユニット

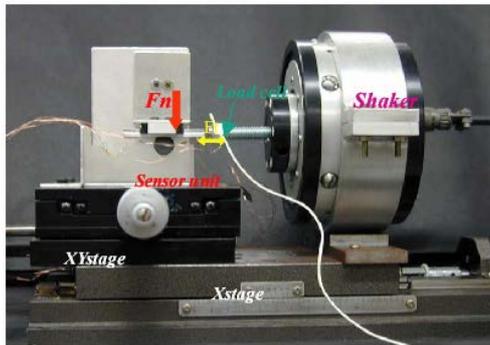


図6 接線・法線方向力実験装置

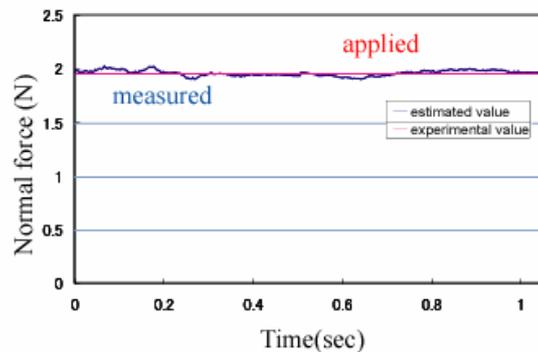


図7 法線方向・接線方向力実験結果

(B1) 法線・接線方向力検出実験

アクリルにV字溝を彫り、その両面にギャップ電極を配置し、V字溝に加圧子をはめ、触覚センサユニットを作成し、FNとFTを検出する実験を行った。加圧子には扇形状と円柱形状のものを用いた。また、ディッピングにより感圧膜を形成した加圧子をV字溝にはめ、FNとFTを計測する実験を行った。

(B2) 実験システム及び実験方法

実験システムを図6に示す。XYステージ上に触覚センサユニットを配置する。加圧子はスライドレールに固定されており、触覚センサユニットに対してFNとFTを独立して加えることが可能である。FNは重りを用いて一定荷重とし、FTを加振機により変化させた。

測定はセンサユニットのキャリブレーションを行い、圧力とセンサ抵抗値の間の近似式を多項式近似により得る。しかし、感圧特性にはヒステリシスが存在する。そこで面A, Bそれぞれの加圧、減圧について近似式を求める。ここでV字溝に配置する加圧子

の接触を考える．扇形状の加圧子の場合は面接触となり，円柱形状の加圧子の場合は線接触となる．V字溝の両面に均一に圧力を加えるためには，接触面全体の感圧膜の膜厚が一定であることが必要となる．ディッピングでは，膜厚が均一な感圧膜を形成することは困難であるため，ディッピングした加圧子に関しては円柱形状のみを実験に用いた．

(B3) 実験結果

表面にディッピングにより感圧膜を形成した円柱(φ13)形状の加圧子を用いた実験結果を示す．図7は加えられた力を計測し，FNとFTの計算値と，FNとFTの実験値である．図より本手法により精度良くFN及びFTが推定できる事が分かる．同様にシート状の液状感圧ゴムと円柱及び扇形状の加圧子で実験を行った．以上の実験結果として各実験時における二乗平均誤差及び相対誤差は，各実験とも法線・接線方向力とも二乗平均誤差で0.02N程度，相対誤差で1%程度で推定可能であることを確認した．

(C) 高速度型触覚センサの開発

本センサは薄型のシート状で，物体が接触したときの接触位置及びその力を計測する．センサの構造を図8に示す．センサはPCRを導電性フィルムでサンドイッチ状にはさみ，電極を図の黒塗り部分で示すように形成したものである．PCRはカーボン含有し，加圧点において抵抗値が減少する性質を持つ．膜厚は0.52mmである．導電性フィルムはPETフィルム上にカーボン微粒子をコーティングしたもので均一な抵抗膜が形成されている．膜厚は0.12mmである．導電性フィルムの電極は銀ペーストをスクリーン印刷の手法で均一に塗布し，熱で硬化させることで形成したものである．

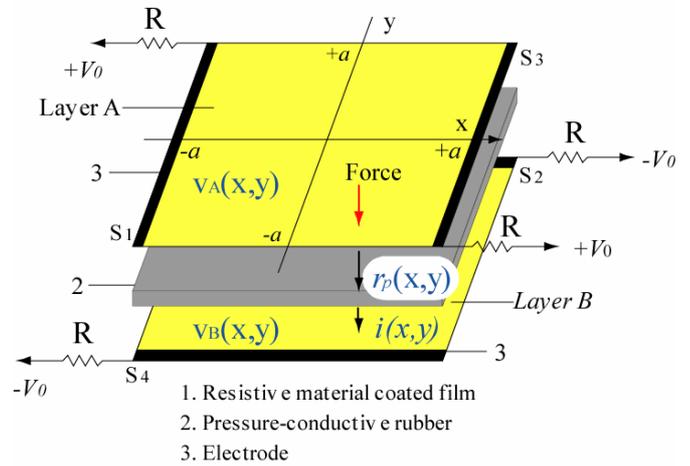


図8 高速応答型触覚センサの構造

(C1) 測定原理

本センサの測定原理について説明する．図8より表層(A層)および裏層(B層)は，それぞれ抵抗Rを通して電圧源 V_0 ， $-V_0$ に接続されている．センサ上に力が加えられると，加圧部分のPCRの抵抗値 r_p が低下し，A層からB層へ電流 $i(x, y)$ が流れる．すると，導電性フィルムの表面抵抗 r により，A層及びB層に電圧分布 $v_A(x, y)$ ， $v_B(x, y)$ が生ずる．するとキルヒホフの電流則，電圧則から方程式を立てると

$$\nabla^2 v_A = ri \quad \left(\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) \quad (1)$$

となる．この方程式の境界条件は，境界上での電流の流れを考えて，それぞれ，

$$\left(\frac{\partial v_A}{\partial n} \right)_{S_2} = \left(\frac{\partial v_A}{\partial n} \right)_{S_4} = 0, \quad (v_A)_{S_1} = V_0 + \frac{R}{r} \int_{S_1} \left(\frac{\partial v_A}{\partial x} \right) ds,$$

$$(v_A)_{S_3} = V_0 + \frac{R}{r} \int_{S_4} \left(\frac{\partial v_A}{\partial x} \right) ds \quad (2)$$

となる。今、センサの形状を正方形と考えると、まず A 層から B 層への電流 $i(x, y)$ の 1 次モーメントは

$$I_x = \iint_D x \cdot i(x, y) dx dy \quad I_y = \iint_D y \cdot i(x, y) dx dy \quad (3)$$

となる。(1)式を代入し、グリーンの定理を適用すると、(2)式より、

$$I_x = a \left(\frac{1}{R} + \frac{2}{r} \right) ([v_A]_{S_1} - [v_A]_{S_3}) \quad I_y = a \left(\frac{1}{R} + \frac{2}{r} \right) ([v_B]_{S_2} - [v_B]_{S_4}) \quad (4)$$

全電流は外付けの抵抗 R を流れる電流から計算でき、

$$I = \iint_D i(x, y) dx dy = \frac{2V_0 - [v_A]_{S_1} - [v_A]_{S_3}}{R} \quad (5)$$

(4)式を(5)式で除すと x, y 軸方向の電流分布 $i(x, y)$ の中心位置が求まる。つまり、センサに流れる全電流と導電性フィルムの電極電位から電流分布の中心位置が求まることになる。ここで A 層、B 層の導電性フィルムの表面抵抗 r に比して rp がそれほど低くならなければ $i \propto f(p)$ と考えられ、電流密度の中心位置は荷重分布の中心位置となる。今回、試作したセンサにおいては検出回路に定電流回路を組み込むことで、全電流で除すという処理を省略した。

(C2) 特性計測実験

試作したセンサの特性計測実験を行った。時間応答特性を調べるため、インパルスハンマによりセンサに直接撃力を加え、そのときの位置出力を計測した。その結果を図 9 に示す。位置出力の立ち上がり時間を測定すると、撃力が加わった瞬間から一定の値になるまでの時間は約 0.6ms、センサの反応する最小荷重が入力されてからでは約 0.1ms である。また最小荷重以上では荷重の変動による位置出力の変化は見られなかった。

センサの感圧特性計測結果より、センサの測定可能な最小圧力は 0.04MPa である。また、実験結果には加減圧時にヒステリシス特性が観察される。これは PCR が粘弾性体の性質を持っていることが原因であると考えられる。

位置精度について、1 点加圧での位置出力を計測した。加圧点は X, Y 方向の位置出力が 0V の原点を基準に X, Y 方向それぞれ 0.5mm ずつ ± 5 mm の範囲で移動した点に設定した。位置出力誤差の最大値は、それぞれ 0.16mm(1.6%)、0.21mm(2.1%)、標準偏差はそれぞれ 0.1mm(1.0%)、0.1mm(1.0%)であった (括弧内はセンサ長に対する相対誤差)。誤差の原因としては導電性フィルムのカーボンの不均一が考えられる。図 10 には本センサを高速ロボットハンドに取り付けたところを示す。

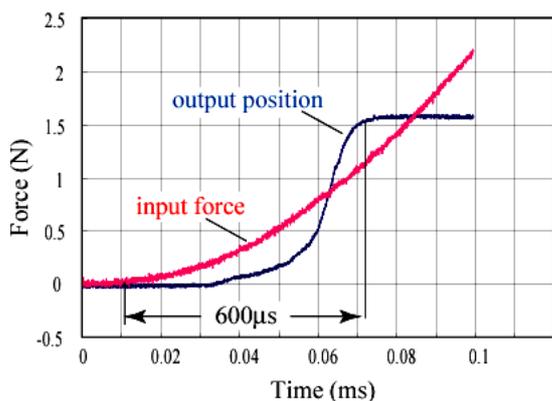


図9 インパクト荷重に対する位置出力時間

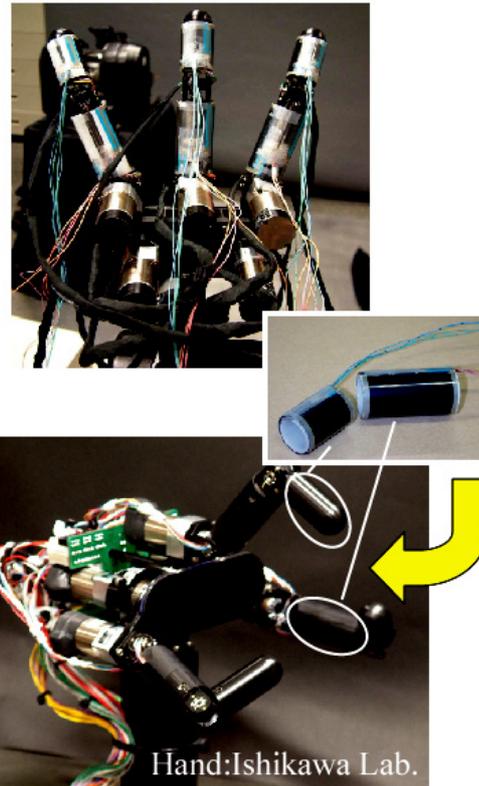


図10 高速3本指ハンドに取り付けたところ

(D) 触覚情報処理用 LSI の開発

本研究では、PCR と行列状の配線網を用いた二次元分布型圧力センサアレイを触覚センサとして使用する。このようなセンサアレイでは、圧力分布の計測データがアナログ信号として検出され膨大な数の配線によって伝送されるため、配線処理が大きな問題となる。そこで、触覚センサ付近に圧力分布情報の検出回路とデジタル信号への変換回路を設け、情報を圧縮して伝送し省配線化を図る。図 11 にその概念図を示す。実装上の観点から、これらの情報処理回路は単一の LSI として集積することが望ましい。このような LSI は、アナログ回路や AD 変換器、デジタル回路やメモリや CPU などを 1 チップに混載したミックスドシグナル LSI となる。本研究では、 64×64 のセンサアレイ上の圧力分布を 1 kHz で取得することを目標としている。これを実現するために、まずセンサの動作原理を詳細に解析すると共に、検出回路に必要な回路素子の試作と測定を行なった。次に、専用シミュレータと視覚化ソフトウェアを作成し、これに実測した回路素子のパラメータを入力して、動作検証と性能評価を行なった。最後に、集積化に適した回路構成を提案してシミュレーションを行ない、その結果をもとに設計方針を示した。

(D1) 圧力検出の基本原理

本論文で使用する触覚センサは圧力によって抵抗値の変化する素材である PCR を用いて構成されている。図 12 に示すようにセンサ基盤表面に露出した一対の電極が行列状の配線によって接続されており、この上に PCR を配置する事で、電極間が可変抵抗によって接続された状態となる。よってこの抵抗値の変化を電気信号の変化として検出することで、圧力分布情報を取得することができる。しかし、このようなセンサの構造では、ある点のセンサ抵抗値を測定するために電流を流すと、その周辺の抵抗を回り込む電流によって測定結果に誤差が生じてしまう。そこで、この回り込み電流を遮断しつつ測定を行なうための特殊な検出回路が必要となる。図 13 にその回路を示す。検出回路はオペアンプとアナログスイッチによって構成されている。回路が安定であれば、オ

ペアンプの両入力端子の電圧が等しくなるため、センサアレイのコンダクタンス $G_s(i, j)$ とは無関係に配線電位 $V_x(i), V_y(j)$ が決定する。この状態を零電位状態と呼ぶ。時刻 k において、一本の配線を選択して固定電圧 V_{fix} を与え、それ以外の配線には基準電圧 V_{ref} を与える。零電位状態が成立すれば、各センサエレメントを流れる電流 $I_s(i, j)$ は、

$$I_s(i, j = k) = G_s(i, j)(V_{fix} - V_{ref})$$

$$I_s(i, j \neq k) = G_s(i, j)(V_{ref} - V_{ref})$$

となる。つまり、選択した配線に接続された抵抗にのみ電流が流れる状態となる。このとき、キルヒホッフの法則により以下の式が成立する。

$$I_s(i, k) = V_{fix-ref} G_s(i, k) = V_{out-ref}(i, k) G_r$$

$$G_s(i, k) = \frac{V_{out-ref}(i, k)}{V_{fix-ref}}$$

以上より、選択配線を $K=0, 1, 2 \dots$ と順次走査することで、出力電圧 $V_{out}(i, k)$ からセンサコンダクタンス $G_s(i, k)$ を算出することができる。理論的には以上の式によって回路の動作が表現できる。しかし、実際にはオペアンプのオフセット電圧によって大きな誤差が発生するおそれがある。

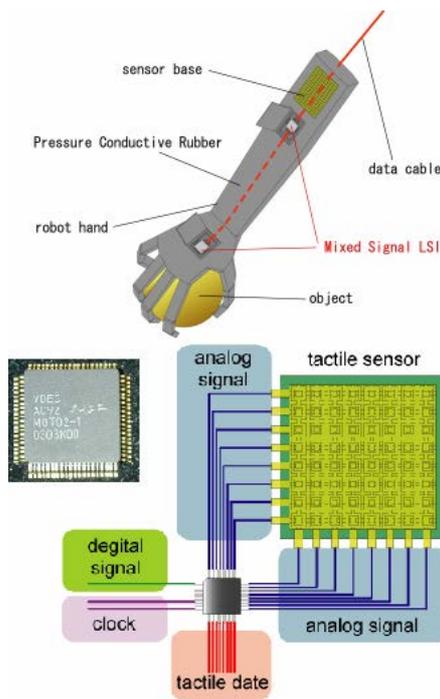


図11 触覚情報処理用LSIの開発

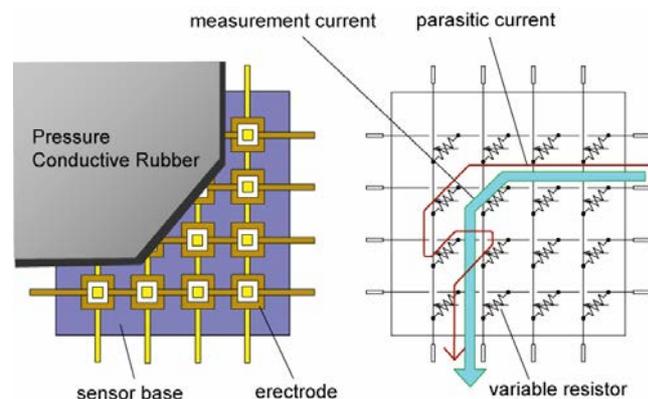


図12 センサアレイのモデルと電流の回り込み

(D2) 基本素子の集積回路化

集積回路の設計は、統合開発環境として Cadence ICFB4.46 を、電子回路シミュレータとして HSPICE を用いた。半導体製造プロセスは rohm0.35 μ である。集積したオペアンプは 3.3V の単電源で動作し、電源電圧範囲内での入力と出力が可能な rail-to-rail オペアンプである。試作した LSI の写真を図 14 に示す。1 個の LSI に AD 変換器、カウンタ、3つのオペアンプが集積されている。カウンタは 1.67V \sim 3.3V、オペアンプは 0.85V \sim 3.3V、AD 変換器は 1.51V \sim 3.3V の範囲内での動作を確認している。10 個の

LSI に集積されたオペアンプのオフセット電圧を測定した結果、平均で約 $\pm 1.2\text{mV}$ のオフセット電圧が生じていることがわかった。この素子を用いて零電位法回路を構成した場合のオフセット電圧の影響を、シミュレーションによって明らかにする。

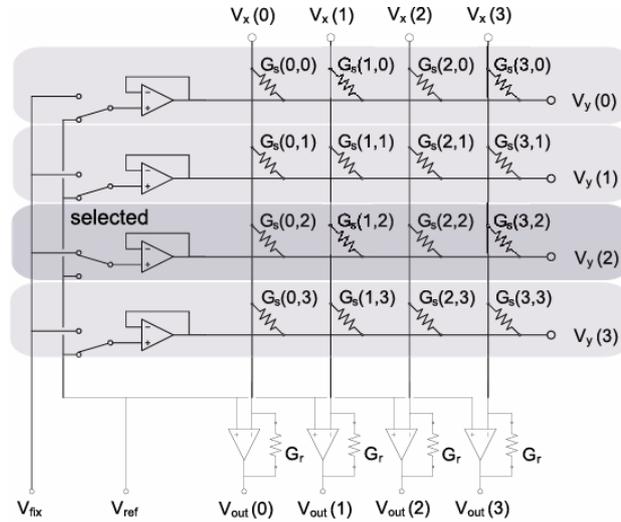


図13 ゼロポテンシャル方による回り込み電流の阻止

(D3) シミュレーションによる検証

本研究では、零電位法回路を評価するために、専用の電子回路シミュレータを開発した。この結果、オフセット電圧による測定誤差への影響が大きいことが明らかになった。センサ電位差を大きくすることで誤差は小さくなるが、このためには大電流を供給する必要がある。信号処理用 LSI はこのような用途には適さないため、オフセット電圧の抑制によって誤差の発生を防ぐ必要がある。

実際のセンサシステムでは、検出した電流値を AD 変換する際のキックバックノイズや、同一チップ上のデジタル回路の動作ノイズが影響するおそれがある。そこで高速動作時のノイズに強い、集積回路用の零電位法回路を設計した。

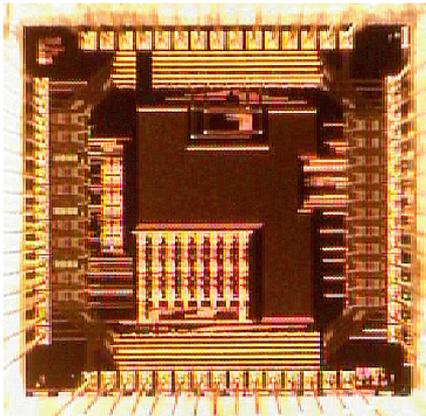


図14 試作したLSI

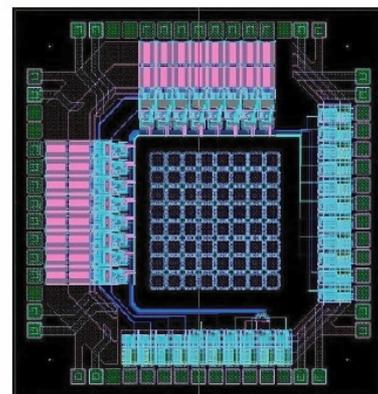


図15 LSIのレイアウト図

(D4) 集積回路用検出回路の提案と検証

集積回路用の零電位法では、各部の制御回路をデジタル化することで性能向上を図っている。オペアンプによって実現されていた機能をデジタル回路によって代替し、少ない占有面積で高速な AD 変換を実行する方式を提案する。まず、オペアンプの構成要素を電流出力バッファ・差動増幅器・位相補償キャパシタの 3 つに分割して考える。これらを、電流出力 DA 変換器・コンパレータ・予測フィルタによって、それぞれ置き換えることができる。このようなデジタル方式では、零電位状態が実現された状態で AD 変換を同時に実行できるという利点が存在する。

以上の回路構成で、シミュレーションによる動作検証をおこなった。予測フィルタは単純なデジタル回路によって構成可能な Δ 変調を採用した。その結果、入力信号と検出値が完全に一致している等の結果が得られ、この回路が正常に動作することを数値解析的に明らかにすることができた。

以上、触覚情報処理用 LSI の開発のために、検出回路を構成する基本素子を集積して測定結果を示した。また、零電位法専用の電子回路シミュレータを作成し、オフセット電圧が誤差に及ぼす影響などを定量的に解析し、設計指針を得た。これらの結果をもとに、制御回路のデジタル化によって零電位状態の実現と AD 変換を同時に実行する方式を提案し、シミュレータによってその動作を確認した。新型の零電位法回路を集積した LSI のレイアウトを図 15 に示す。一つの LSI によって 8x8 のセンサアレイに対応可能となっている。触覚情報処理用 LSI の最終的な回路構成は図 16 のようになる。検出回路とプロセッサエレメントと分散メモリを列並列に配置し、オーバーサンプリングによってセンサ上の圧力分布情報をメモリ上に転写する構造となっている。取得した情報に対するランダムアクセスや簡易 DSP などの機能を実現できる。これによって接触物体の輪郭抽出や重心検出などの演算処理も実現可能であると考えられる。

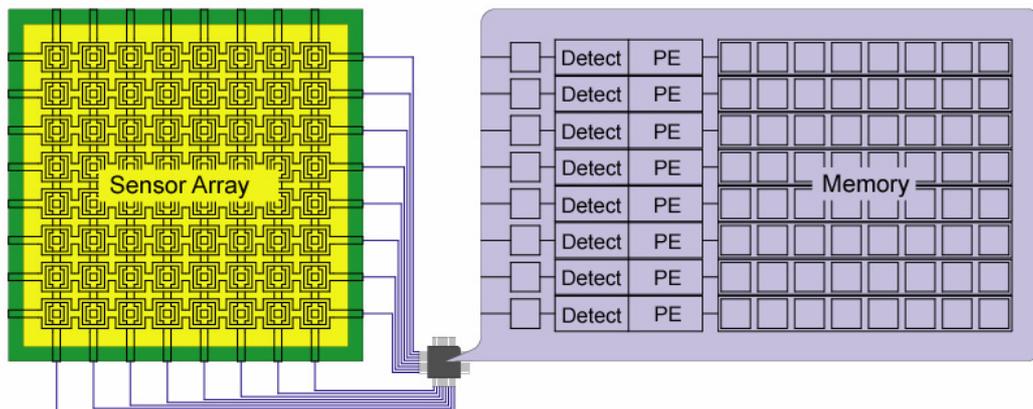


図 16 触覚センサアレイとミックスドシグナル LSI

(2) 研究成果の今後期待される効果

【国内外の研究の中での位置づけ】

ロボット用触覚スキンの研究としては、導電性繊維を用いた稲葉らの研究がある。面状で柔軟性は高いが、自由曲面に密着した装着は困難であり接線方向力は検出できない。また、Tekscan 社、Interlink 社が開発した FSR(Force Sensing Resistor)を用いたものがあるが、これらは接線方向力を検出できない。またセンサ基板として伸縮性のないフィルムを用いているため、三次元自由曲面に装着はできない。その他、篠田らの研究として、マイクロ触覚センサアレイ等を用いたものがある。独創的で興味深い研究であるが、これは研究段階であり、実用に供するには微小化・薄型化・センシング密度の向上等、さらなる研究を必要とすると思われる。

本研究で開発した触覚センサは、高密度薄型で自由曲面にも構築可能であり、また従来にない接線方向力も検出可能で廉価でありなど、その応用可能性は広いと考える。また視・触覚チップレベルからセンサ情報の統合を目指した研究は見あたらない。

【成果と今後期待される効果】

- センシング素材は、液状であるため複雑な形状表面にも薄い感圧ゴム膜を形成できる。表面のみを用いて全身を柔軟で薄いゴム膜で覆えるため、ロボット内部構造に関わらず装着が可能である。
- センシング素材は、従来の感圧ゴムで問題になっていたヒステリシス特性が少なく薄型、軽量で成形・加工性が良く、耐久性もあり、省電力・廉価である。
- 法線・接線方向力のみならず、および回転力など多軸力の検出が可能となる。
- 触覚情報処理用 L S I を開発による局所的情報処理、及びセンサからの多数配線の低減、併せて検出部と制御部のペアによる使い易さの向上をはかる。
- ロボットの全身を覆うようなセンシティブスキンの開発により、身体接触状況による外界認識が可能となる。また滑りの検出による把持制御、接触作業における動作制御、人間とロボット等との皮膚感覚を通したインターフェースなど高度なロボット制御への応用が期待される。またウェアラブル機器での入力装置など触覚情報の獲得は近未来型自動化機器においてその高性能化には必要不可欠なものである。
- また、視覚チップと開発する触覚チップとのデータ様式・インターフェースを共通化することによる、視・触覚センサ情報の統合を行う。
- 今回提案した触覚システムは、複雑な形状にもセンシング面が構成可能で、かつ制御回路の L S I と組み合わせることで、従来適当な触覚入力機器がなかったこの分野での標準的な入力機器になりえる。
- 視・触覚センサ融合・統合の研究開発に対し有用なアルゴリズムと道具立てを提供する。

3.5. 「手と脳」のための能動的感覚運動統合学習理論の研究（電通大阪口グループ）

（1）研究内容及び成果

本グループの研究目的は、「手と脳」に関する実時間感覚運動統合を実現するための基礎計算理論の構築、および、それを進める上で参考になる人間の感覚運動統合機構の理解である。

上記目的を達成するために、本グループでは「感覚運動統合実現のためのアルゴリズムの構築」と「手の運動にかかわる行動実験、および、手の運動の性質を説明する計算モデルの構築」の二つの観点から研究を行なってきた。以下では、主たる五つの研究テーマについてその内容と成果を説明する。

（A）ダイナミクス整合の学習による実現

本プロジェクトでは、「ダイナミクス整合」をキーワードに実時間感覚運動統合のメカニズムを議論してきた。「ダイナミクス整合」とは、感覚運動システムが効果的に機能するためには、感覚系（センサ）、情報処理系、運動系（アクチュエータ）のそれぞれの周波数特性が揃っていることを意味し、本プロジェクトでは、そのような整合性がとれてこそ感覚運動統合システムは有効に機能する、と主張してきた。

ダイナミクス整合を考慮してシステムを設計するには、感覚系、処理系、運動系やシステムが扱う対象の時間応答特性を事前に知っておく必要がある。このとき、感覚系（センサ）や運動系（アクチュエータ）の特性がデバイスの仕様から容易に判断できるのに対し、処理負荷によって時間特性が変化する情報処理系やシステムの扱う対象について、事前にその特性を正確に見積もることが難しい。そこで、本研究では、システムをオンラインで動作させてそのパフォーマンスが向上する方向に処理系のパラメータを動的に変更する方式を提案した。具体的には、システムパフォーマンスを報酬とする強化学習系を用いてシステム内部の処理パラメータを学習により決定する方式を構成し、その振舞いを数値実験により検証した。

この数値実験では、2次元空間内を運動する対象を移動カメラで追跡する視覚追跡課題を題材とした（図1 a）。このシステムにおいて、情報処理系は「物体の将来の軌道を予測する」処理と「カメラ軌道を計画する」処理を担う。軌道予測をより遠い将来まで行なうと、カメラを効率的に動かすことができるために追跡パフォーマンスの向上が見込める。しかし、軌道予測処理の負荷増大のためにカメラ制御がおろそかになって追跡対象を見失ってしまうとは意味がないため、追跡対象の特性に応じて予測処理の負荷を調節する必要がある。そこで、本システムでは、軌道予測処理の深さをシステムパラメータとした系を構成して実験を行なった。

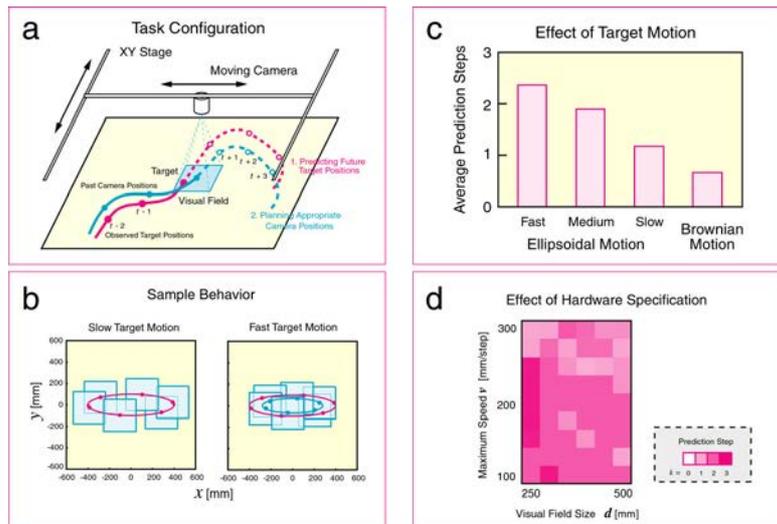


図1 ダイナミクス整合を実現する強化学習アルゴリズムの数値実験

図1 b – dに結果の一部を示す. この例では, 図bは回転運動する物体を追跡したときのカメラ軌道の例を, 図c, dは学習の結果得られたシステムパラメータの値を表している. これらの結果から, 規則的なルールに従って高速で動く物体に対しては軌道予測段数を増やす一方, 予測しても意味のないランダム運動する物体に対しては軌道予測をほとんど行なわないという行動選択ルールを獲得していることが読み取れる. すなわち, このシステムは, センサ・アクチュエータの制約の下で, 追跡すべき対象の特性に合わせて情報処理系の処理内容を変化させていることになる.

(B) 信頼度に基づくオンライン型強化学習アルゴリズムの提案

前項で述べたように, 効果的な感覚運動統合システムを学習によって実現するには, システムパフォーマンスを評価基準としてシステムの動作を適応的に向上させていくことが望ましく, そのための手段としてオンライン型強化学習は有用な方法である. 行動決定に利用する知識を環境内で動作しながら学習するオンライン型強化学習システムは, 知識に基づく最適な行動に加えて, 環境構造を学ぶための探索行動を行なうことが必要である. そして, これら2種類の行動をいかにバランスさせるかという問題 (exploration-exploitation balance) は重要な問題としてこれまで議論されてきた.

この問題に関連して, 本研究では「信頼度」という概念に基づく新しい行動選択法を提案した. 「信頼度」とは環境に対する知識を個体自身がどの程度信頼しているのかを表す主観的な尺度で, 「自己の知識に対する自信の強さ」を表すものである. 提案したアルゴリズムでは, この尺度に利用して, 知識を信頼する場合は最適行動の比重を上げる一方, 逆の場合は探索行動の比重をあげるという形で, 行動決定の規範を動的に変更する.

この方式は, 例えば, 行動決定ルールとして広く用いられている Boltzmann 選択法における温度パラメータ T を, 価値関数に対して定義された信頼度指数 $R(s)$ でおきかえることにより実装できる. 信頼度指数 $R(s)$ は状態 s での価値関数がどの程度誤差を含んでいるかを示す指標で, その値が大きいくほど誤差が大きい (価値関数が信頼できない) ことを意味する. したがって, 温度パラメータを信頼度指数でおきかえることにより, 状態に対する価値関数が信頼できないときに, 等価的に温度パラメータの値を大きくし, 行動のランダム性を高くする (探索行動の比重を高める) ことができる.

以上で述べた方式の有効性を示すために数値実験を行なった. 図2に結果の例を示す. 図aは大規模な迷路問題を解いたときの学習曲線で, 左側が従来の Boltzmann 選択法によるもの, 右側が提案した手法によるものである. 横軸は学習したエピソード数, 縦

軸は各エピソードにおいてゴールに到達するのに要したステップ数（ただし対数目盛）である。赤い実線は 30 回実験を行なったときの中央値，黒い実線は四分位，破線は最低・最高値を表している。

二つのグラフを比較すると以下のことが読み取れる。まず，学習中盤までは従来法の方がエピソードあたりのステップ数が少ない。一方，従来法ではステップ数が最適値に近づくにつれてステップ数の減少速度が（対数目盛上で）徐々に低下するのに対し，提案方法ではほぼ一様に減少し続ける。そのために，提案方法は従来法を追い抜き，最終的に少ないエピソード数で最適ステップ数に到達する（この図からは読み取りにくい，両者の差は統計的に有意である）。この結果には，学習初期には探索行動が多いが，学習が進むと最適行動の比重を高めるという提案した方法の特徴がよく現れている。

図 b は，学習途中で環境の性質が変化する条件で実験を行なったときの結果を示したものである。上段はゴールに到達するまで要したコスト（罰），下段は行動選択確率のエントロピーをそれぞれ学習エピソード数の関数として示したもので，左右列はそれぞれ従来法と提案法の結果である。この課題では，環境は 5000 エピソード間隔で変化するが，そのうち，3000 エピソードのあいだ（図の赤い縦帯の部分）は環境中のコスト分布が連続的に変化し，残りの 2000 エピソードのあいだ（白い縦帯の部分）は環境が一定に保たれている。左右の図を比較すると，提案方法では，環境が変化する時間帯で

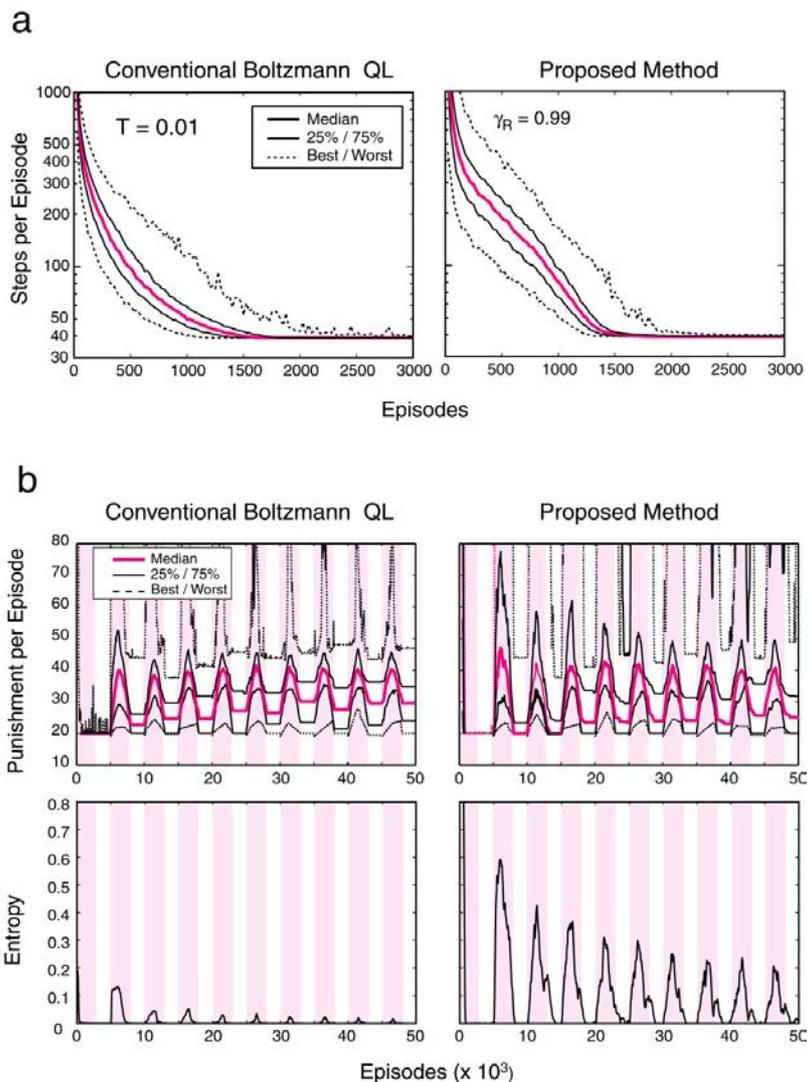


図 2 信頼度に基づく行動選択アルゴリズムの振舞い

のコスト変動が大きい一方、環境が一定である時間帯では従来法よりもコストが小さい。これは、提案方法では、環境変化を検出すると信頼度指数が大きくなるため、探索的行動の比重を上がり、無駄な行動が増えるためである。環境変化に際して探索行動の比重が高くなる様子は、行動選択確率のエントロピーの振舞い（下段の図）を見ても明らかである。しかし、その代償により環境が一定であるフェーズでは少ないコストで問題を解くことができる。

このように、提案した方式では、学習の進み具合や環境の変化に応じて探索的行動の比重を動的に変化させ、効率的に学習を進めていくことができる。

本報告では詳細を割愛するが、このほかにも、信頼度に基づいてメタパラメータを動的に変化させる方法、信頼度に基づいてモジュール切替え・生成を行なうモジュール学習、また、自分の能力にあった課題を自ら選ぶことで次第に能力を向上させていく自己組織的学習アルゴリズムを構築した。

(C) 運動のばらつきからみた手先運動軌道の検討

以上で説明してきた二つの項目は学習アルゴリズムに関するテーマに関するものであったが、以下で述べる三つの項目は、人間の手の運動制御メカニズムの理解に向けた計算モデルと実験に関するものである。

ある位置（始点）から別の位置（目標）まで手を動かす状況を考えたとき、二つの点のあいだで手先が描く軌道の可能性は無限にある。しかし、現実に人間の手先が描く軌道は「ほぼ直線の経路」「ほぼ対称的なベル型速度波形」という特徴を有する。なぜ人間の手先軌道はこのような性質をもつのかという問いに対して、これまでにいくつかの計算理論が提案されてきた。

そのような理論の一つに「終点分散最小化仮説」と呼ばれるものがある。これは、運動指令にノイズが載っているという前提の下で、脳はノイズの影響が運動終点に及ぼす影響が最小になるような軌道を選択しているという考え方である。この仮説は、単純な評価関数の下で広範囲の現象を説明できることから、運動制御の研究分野において注目を集めてきた。

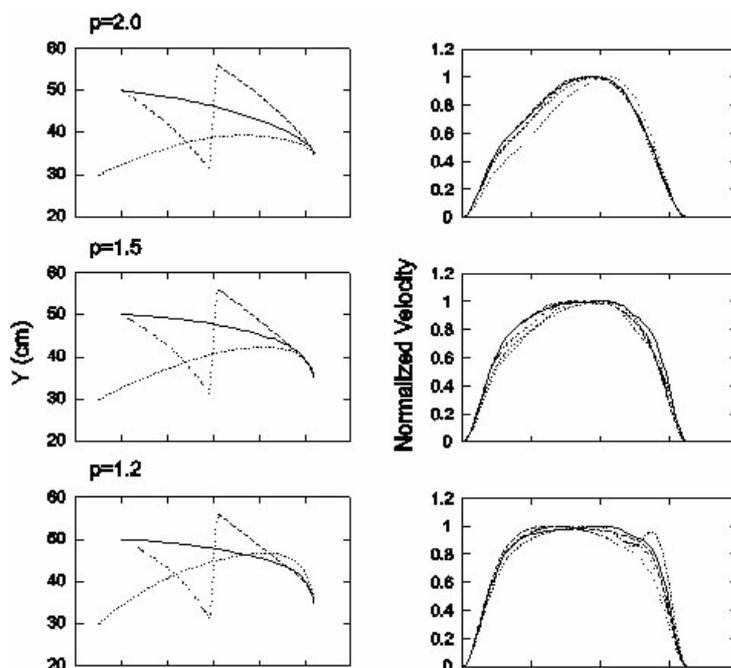


図3 終点分散最小軌道のべき乗パラメータ依存性

この理論における重要な仮定に「運動指令に載るノイズの大きさはもとの運動指令の大きさに比例する（正確には、ノイズの分散は指令の絶対値の 2 乗に比例する）」というものがある。ここで、分散のべき乗の値を p という記号で表すと、神経生理データから推定される p の値は 1 から 3 の範囲で様々な値が報告されていて、この仮説が前提としている $p = 2$ である仮定を支持する決定的な実験データはこれまでに報告されていない。

そこで、本研究では、 p が 2 以外の値をとったときに生成される軌道がどのような性質を示すかを数値実験により検討した。図 3 にその結果の例を示す。

この図は、水平面内の上肢到達運動について、 p の値が 2.0, 1.5, 1.2 である場合の軌道をそれぞれ示している。この図より、 $p=2$ の場合は「ほぼ直線の経路」「左右対称のベル型速度波形」という特徴が再現されるが、 p の値が 1 に近づくほど経路の湾曲が強くなり、また、ベル型の速度波形が崩れていくことが読み取れる。すなわち、終点分散最小化仮説から生成される軌道形状は、ノイズの性質を決めるべき乗パラメータ p に依存して大きく変化する。

本研究の結果は、終点分散最小化仮説がロバストに成立するものではないことを指摘するとともに、この仮説の真偽を検証するには、脳の神経活動や筋活動のノイズ特性を正確に推定することが重要であることを示している。

(D) 生体の物理的特性を考慮した運動指令生成機構の検討

脳の運動制御メカニズムを議論する上で、これまで計算理論は見通しのよい議論を提供してきた。しかし、その一方で、計算理論研究は、現実の脳がどのようにしてその問題の解を得ているのかという問い（すなわち、Marr のいうアルゴリズム・表現の問題）に明確に答えているとはいえない。前項で議論した軌道生成の問題を例にとれば、計算理論は運動の結果である軌道の特徴を説明することには成功しているが、脳が目標や軌道をどのように表現し、運動指令をどのようにして生成しているかについて具体的な答えを与えていない。このことを考えると、感覚運動統合メカニズムの理解を進めるためには、計算理論だけでなく、アルゴリズム・表現の研究も進めていく必要があるといえる。

このような問題意識の下で、本研究では、到達運動の運動指令をどのようにして構成すればよいかという問題について研究を行なった。特に、運動指令（ひいては手先軌道）を決める上でアクチュエータである筋の性質、および、神経系が生成する指令波形の性質が与える影響について検討した。

この検討を進めるに際し、本研究では、「初期の運動指令は表引きのような形で決定される」「運動指令は基本波形の重ね合わせにより形成される」「軌道の形状は筋の力学的特性に依存している」という基本的な作業仮説をおいた。そして、Hill 型の筋モデルと 2 関節 6 筋型の腕モデルから構成される筋骨格系モデルを構成し、これにさまざまな運動指令を加えて、結果として生じる軌道の形状を観測した（最初に軌道の形状を与えて運動指令を求めるのではなく、まず運動指令を与えて結果として生じる軌道の形状を検討した点がポイントである）。以下では、この検討を通じて得られた二つの結果を説明する。

最初の検討では、運動指令として矩形波状の信号を用いたときにどのような軌道が生成されるかを調べた。その結果まず明らかになったことは、単一パルスから成る運動指令を筋に与えると、一般に（必ずしもきれいとはいえないが）ベル型の速度波形が得られることである。このことは、「ベル型の速度波形」という特徴が、手先軌道の特別な性質というよりも、むしろ筋というアクチュエータを用いた結果として必然的に生じる性質であることを示唆している。

また、二つのパルスから成る運動指令のうち、生成される軌道が躍度最小軌道と最も近くなるものを求めたところ、十分小さな誤差で躍度最小軌道が再現できることがわか

った。この結果は、人間の手先軌道を再現する上で運動指令自体のなめらかさが不要であること示している。

このほか、ある目標への運動を実現する運動指令と別の目標への運動を実現する運動指令を組み合わせ、それら二つの目標の中間点への運動が実現できるか（すなわち、運動指令の補間が可能か）を調べる実験を行なった。これは、先に述べた表引きによる運動指令生成の可能性を検証する上で重要な試みである。筋骨格系のダイナミクスは非線形性が強いので、一般にはこのような補間が成立するとは考えられず、また、それだけにそのような可能性を実験的に検討する試みはこれまで行なわれていなかった。ここでは、そのような制約を理解した上で、実際にどの程度補間ができるかを具体的に検証した。

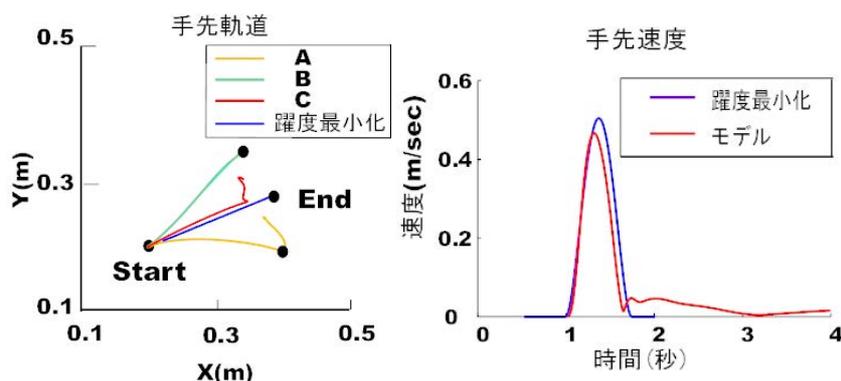


図4 矩形波状の運動指令による手先軌道の生成

結果の例を図4に示す。左図で赤い曲線は、目標A（黄色の曲線）と目標B（緑色の曲線）への運動指令を組み合わせるときに生成された手先経路であり、右図はそのときの速度波形を示したものである。この結果から、二つの運動指令を組み合わせる指令を出力すると、正確には目標に到達しないものの、手先はほぼ目標に向けて動くことがわかる。表引きによる運動指令生成機構は運動前半に弾道的成分に対する指令だけを生成できれば十分である（それ以降の軌道はフィードバック制御によって決定されると考えられる）ことから、この結果は、運動指令の補間が現実的に十分可能であることを示している。

最初の検討では、矩形波状の指令波形という枠の中で軌道の性質について議論したが、矩形波という制約を天下一りに設定して運動指令の性質を議論することには限界がある。そこで、次の検討では、運動指令波形を系統的に表現・操作できる表現体系として wavelet 変換に着目し、wavelet 基底を基づいて運動指令を構成し、軌道の性質を調べた。具体的には、1) 実際の軌道を実現する関節トルクから運動指令を逆算して求める、2) 得られた運動指令を離散 wavelet 展開して wavelet 係数を求める、3) 得られた wavelet 係数に一定の処理（例えば、時間解像度の高い成分を取り除き低時間解像度成分だけを残す）を加える、4) 処理した wavelet 係数から運動指令を再構成する、5) 再構成した運動指令から関節トルクを求め、腕モデルを動かして手先軌道を求める、という作業を種々の処理に対して行ない、結果として得られる軌道の性質を調べた。

図5 a に wavelet 係数分布の例を示す。この図は、Harr 基底を用いたときの結果で、図の濃淡が係数の大小を表す。この図を見ると、運動開始・終了時を除くと、運動指令の主要な成分は D3 レベル以上（時間単位として 40msec 以上）にあることがわかる。

次に、図5 a の赤い枠内の成分（時間解像度が低い成分）だけを残し、他の成分はすべて0として運動指令を再構成したときの、運動指令波形、手先速度波形、手先経路をそれぞれ図5 b, c, dに示す。図5 bを見るとわかるように、時間解像度の高い成分

を取り除くことで、運動指令は階段状の波形になる（点線が元の運動指令、実線が再構成した運動指令）。しかし、その効果は手先速度の変化や軌道経路には現れず、手先軌道にはほとんど変化が生じない。これは、筋がもつローパスフィルターとしての性質が高解像度成分の効果を打ち消したためであると考えられる。この結果からもわかるように、脳が生成する運動指令に滑らかさは必要ではなく、また、運動指令を構成する上で細かい時間波形は重要な意味をもたない。

しかし、このようにして係数の一部分をゼロにして再構成した運動指令の範囲（すなわち、自由度が制約された運動指令空間）の中では、目標での到達誤差をゼロにするという要請を必ずしも満たせなくなる。そこで、このような制約の下で終点誤差を最小にするような運動指令を探索してみた。図 5 e, f は、そのようにして求めた運動指令から得られた手先速度波形と手先経路である。図中の点線はトルク変化最小仮説による軌道、実線は再構成した運動指令による軌道（赤い曲線は D5 と A5 の成分を用いた場合、青い曲線は A5 成分のみを用いた場合の軌道）である。この結果から、限られた自由度の下で生成された手先軌道は「やや外側に湾曲する直線」という人間の手先軌道の特徴を再現することがわかる。軌道計画研究では「手先軌道が曲がるのはなぜか」という議論があるが、以上の結果は、この問題に対する新しい答えとして「脳が構成する運動指令の自由度が低い」という可能性を示唆するものである。

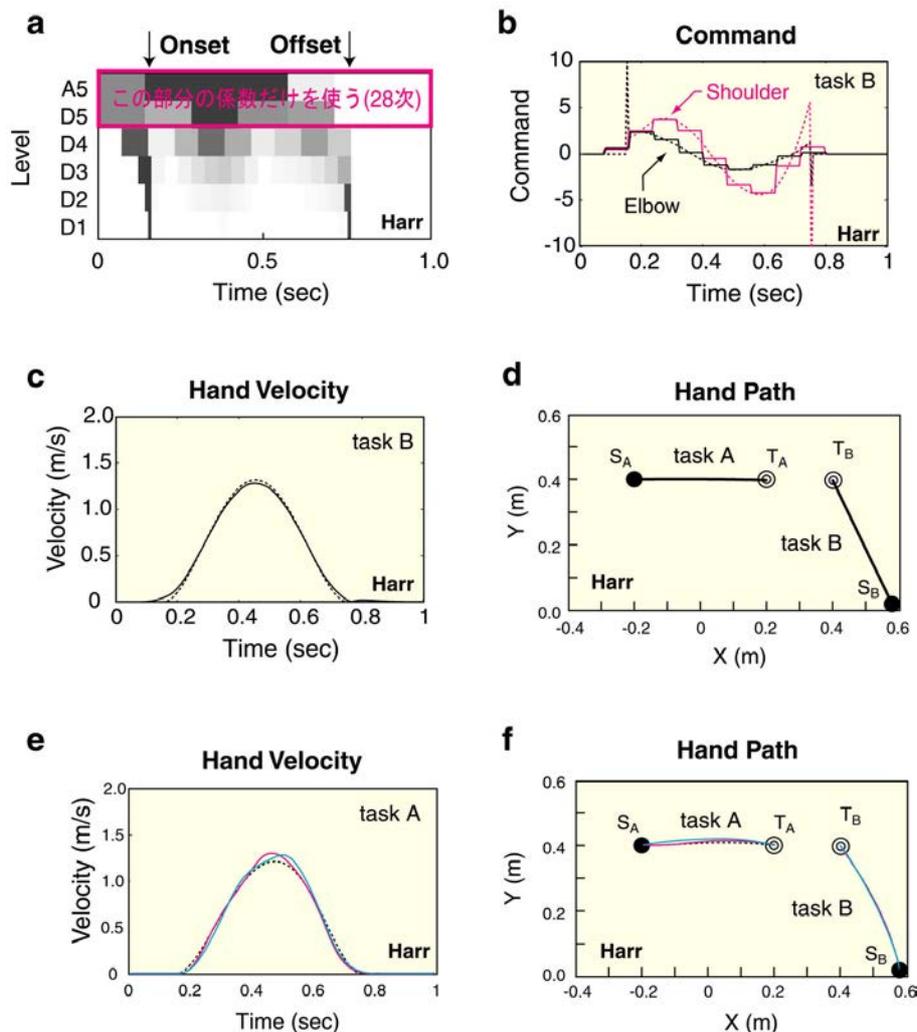


図 5 wavelet 変換を用いた運動指令の操作と軌道の特徴

(E) 3次元視線計測装置の開発とそれを用いた運動中の視線計測

手の運動における感覚運動統合を考えるうえで視覚の働きは重要である。視覚は、運動目標を捉えることに加えて運動中の手の動きを捉える機能を担い、これにより手先は正しく目標に導かれる（視覚フィードバック）。しかし、その一方で、脳内の視覚情報処理にかかる時間は運動制御の時間スケールに対しては遅いため、視覚情報を使って手の動きを実時間フィードバック制御することは不可能である。例えば、運動中に視覚情報を乱したとき、その影響が運動に現れるには 100-150msec 程度の遅れが生じることが実験的に明らかにされている。このように反応の遅い視覚情報を運動制御に生かすため、脳は視覚系を能動的なセンサとして使っている（すなわち、運動に必要な情報を適切なタイミングで入手する）と考えられる。

このような能動的な視覚情報獲得の機序を理解するには、運動を行なう際に眼がいつどこを見ているかを知ることが重要である。そのため、本研究では、身体の動きと同時に両眼の視線（注視点）をリアルタイムで計測する装置を構築し、身体の動きと視線の動きの時空間的關係を明らかにすることを計画した。

眼球運動を計測するには種々の方式があり、すでに既製品がいくつも販売されている。しかし、これらの製品にはそれぞれ一長一短があり、上記の目的にうまく適合したものは現状では見あたらない。例えば、計測結果の時空間分解能が高い装置の多くは装置や被験者の頭部を固定して使用することを前提としており、運動に伴う視線の動きを計測するには適していない。一方、「アイカメラ」と呼ばれる頭部にセンサを搭載するタイプの製品では、頭部の動きは拘束されないが、時空間分解能の点で十分な性能をもったものが少ない。

本研究では、頭部にセンサを搭載するタイプであり、十分な時間分解能を持ち、かつ両眼同時計測可能であるという条件を満たす眼球運動計測装置を購入し、これと3次元位置計測装置を組み合わせることで頭部の動きと両眼眼位を同時に計測することにより、3次元空間における注視位置を実時間で推定する装置を開発した。この装置では、位置計測装置により手の動きを測定できるため、これにより手と注視点の時空間關係を調べることができる。

この種の計測装置は、その原理を数式で記述するのは簡単であっても実際に動作させるには難しく（市販の眼球運動計測装置を使ってカタログスペックに近い精度でデータを取得するのが難しいことはこの分野の研究者では常識である）、この装置においてもそうであった。本研究では、センサの設置方法やキャリブレーション法などについて改良を重ねた結果、手が届く範囲で数 cm 程度の精度で注視位置を推定できるようになった。被験者がこの装置を装着している様子を図6に示す。この写真からわかるように、被験者は眼の画像を撮影するカメラモジュールを噛んで支えながら計測を行なう。これは歯形を介してカメラモジュールを固定することで、頭が動いてもカメラと眼の位置關係が崩れないようにするための工夫である。

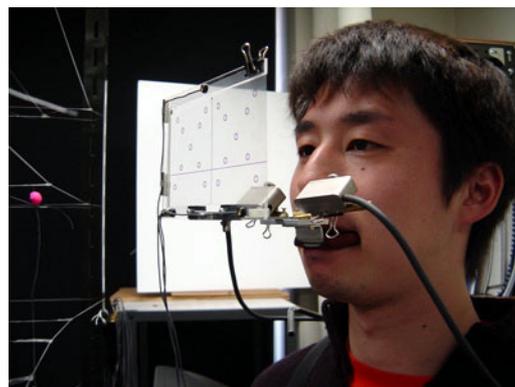


図6 歯形を用いた眼球運動計測装置の固定

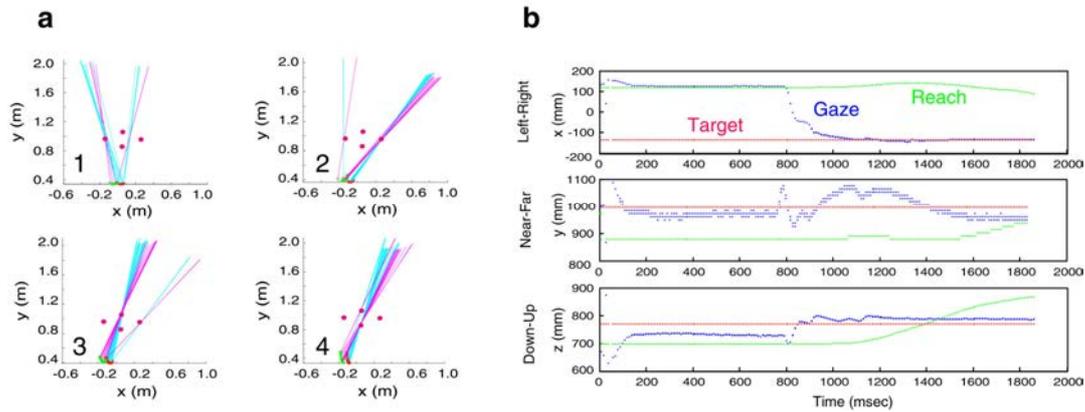


図7 視線計測結果の例

図7に本装置を使って得たデータの一例を示す. 左図は, 四つの視覚目標 (図中の赤い点) を順番に注視した場合の左右の視線 (青と紫の直線) を示したものである. 一方, 右図は, 目標までの到達運動を行なったときの注視位置と手先位置の時間変化を表したものである. この図より運動に先立って目標を注視する眼球運動が生じていることが読み取れる.

ここに示したデータはまだ予備的なもので, 研究期間中には論文として公表できるような整った結果を得るには至らなかった. しかし, 今後のこの実験を継続して行ない, 手と眼の動きの関係を定量的に明らかにしていく必要がある.

(2) 研究成果の今後期待される効果

上記の五つのテーマについて, それぞれ今後の展開見込みについて述べる.

(A) ダイナミクス整合の学習による実現

本研究では, 学習方式の原理を提案したうえで, その有効性を検証するために人工的な問題を設定して数値実験を行なった. しかし, 現実のシステム設計における条件や要請はケースごとに大きく異なるため, この方式が実際にどの程度の効力をもつのかは, 実際に個々の問題に適用して初めて明らかになると考えられる. したがって, そのような場面での性質を調べてみるのが今後の課題である.

(B) 信頼度に基づくオンライン型強化学習アルゴリズムの提案

信頼度の概念は, 元来, 人間の行動を説明するための概念として提案されたものである. 本研究ではこの考え方を「工学的な強化学習アルゴリズム」として再定式化したうえで, 数値実験によりその有効性を検証した.

「人間の優れた性質を工学的なシステムに応用する」という言葉をよく耳にするが, これは「云うは易し, 行なうは難し」の典型例である. 「人間のもつこの機能は有用そうだ」と思っても, それを哲学としてだけでなくアルゴリズムとして実装し, その有用性を示すことは簡単ではない. しかし, その考え方が真に有用なものとして世の中に受け入れられるためには, このような作業を行なってその性質を客観的に評価することが不可欠である.

本研究では, このような点に留意して研究作業を行なった. 今後もこのような“biologically-inspired”あるいは“psychologically-inspired”アルゴリズムを構築して, その工学的有効性を問う試みを続けていきたいと考えている.

(C) 運動のばらつきからみた手先運動軌道の検討

運動のばらつきの原因は、つきつめれば物理現象である神経活動のゆらぎにある。そして、「終点分散最小仮説」は「脳は物理的ゆらぎから逃れることはできないが、その影響を最小に抑えて運動目標を最もよく達成できる運動指令を選択している」と主張した。この仮説の原著論文では「信号依存性ノイズ」の意味が強調されているが、この仮説の意味は、むしろ、軌道の幾何学的特徴の説明に終始していた軌道計画研究を「目標を達成するにはどのように運動指令が最適か」という視点に引き戻した点にあったといえる。

このような視点に立てば、運動のばらつきの研究において次に取り組むべき課題は、脳はどのようにしてばらつきを減少させるのか（つまり、最適な運動指令を見いだすのか）という問題である。「ゆらぎの影響を最小に抑える指令を求める」という最適化を個別の運動において行なうことは不可能であるから、そのような指令の選択は、運動を繰り返す中で学習的に行なわれると考えられる。運動指令生成の問題はそのような学習メカニズムを明らかにして初めて完結するのであり、したがって、そのような学習メカニズムの研究が今後の重要な研究課題となる。

(D) 生体の物理的特性を考慮した運動指令生成機構の検討

本研究では、運動指令が構成される方法・アルゴリズムに焦点をあてて研究を行ない、その結果、到達運動に必要な運動指令は矩形波を組み合わせることで十分実現できることなど、人間の運動の特徴を再現するのに必要な運動指令の条件について新たな知見を得ることができた。この結果をふまえ、次に明らかにすべきことは、このような基本波形が脳のどこで形成され、また、合成されているのかという問題である。

視覚系が目標を捉えてから腕が動き出すまでのあいだに、脳内では、視覚野、頭頂連合野、運動前野、一次運動野を経て運動指令が計算されると考えられている。しかし、この経路のどの部分において、視覚がもたらした位置情報が時間波形である運動指令に変換されるのかという問いに対する答えははまだ得られていない。この問題を解決するには、生理学的知見と対応関係が明瞭なモデルをたたき台にして議論する必要がある。そのためにはアルゴリズム・表現レベルの研究が必須である。今後は、上の問題を解決することを目標として、運動指令が形成されるメカニズムについて、生理学者と協力しながら研究を進めていきたい。

(E) 3次元視線計測装置の開発とそれを用いた運動中の視線計測

本研究では、光学式の3次元位置計測装置とビデオ画像処理による眼球運動計測装置を組み合わせることで、頭の位置を拘束しない条件での視線計測を行なうことができた。しかし、これらの装置は大がかりである上、被験者の装着感もよいとはいえず、被験者が自然な状態で（実験装置を意識せずに）運動課題を行なえるというにはほど遠い条件でしか実験ができなかった。今後、広範囲の運動を対象にして運動と視線の関係を計測するためには、被験者への身体的・心理的負担の小さな視線計測装置の開発が望まれる。

3.6. 「手と脳」のための実時間視覚情報処理の研究（広大石井グループ）

(1) 研究内容及び成果

人間の能力を遥かに上回る高速な「手と脳」システムの実例として、ジャンケンロボット、および高速バッティングロボットを開発し、これらのシステムの有効性を検証した。

(A) ジャンケンロボット

ビジョンシステムが高速になると人間が高速と感じるような手の動きがスローモーションのように見え、どんな手を出すかをジェスチャー終了前に知ることができる。本研究ではこのことを利用し、人間の行動が始まると同時に機械もまたジェスチャー認識を開始し、人間の行動の最終状態が予測できた時点で行動に移ることで、人間の行動終了前に必ず勝つ手を出すようなジャンケンロボットを開発した。

(A1) 人間の指先の動き解析

人間の指を高速に動かした際の指の開閉時間を高速ビデオカメラで計測した様子、グーからパーに指を開閉した際の指先位置変化や指先速度、加速度を図1に示す。これらの結果から、開閉運動の途中段階において最終的な手の形状が予測できることがわかり、また指が完全に開くまでに要する時間は最速で0.15s～約0.20sであった。

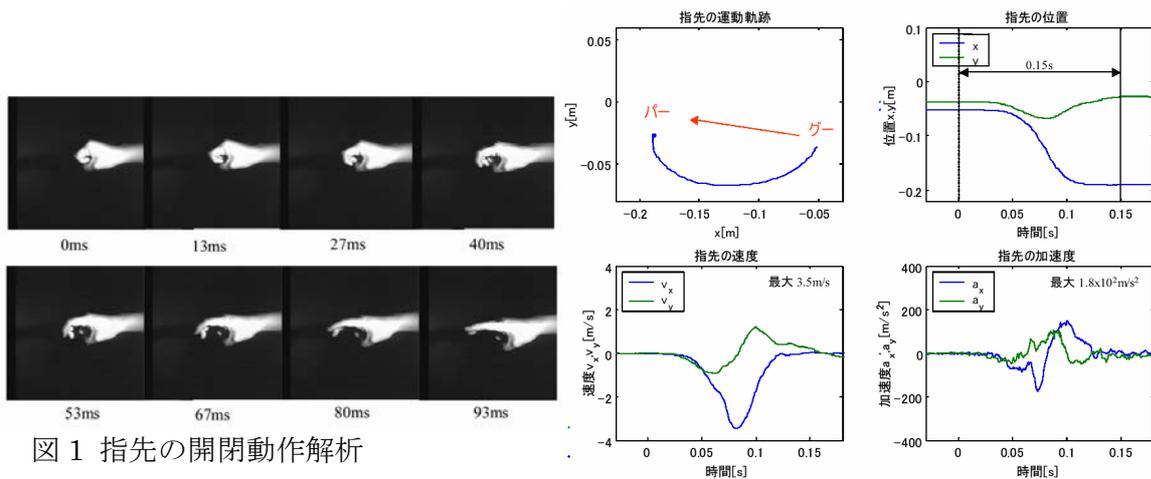


図1 指先の開閉動作解析

(A2) 知的画素選択機能による高速メガピクセルモーションキャプチャ

知的画素選択機能を有する MmVision (Mega-pixel and milli-second Vision) とは「一般に画像特徴量を計算する際に全ての画素情報を同時に必要としない」という前提のもとで、処理に必要な画像情報のみを切り出すことで、通信・処理ボトルネックを解消する考えである。これによりビジョンシステムの高空間解像度かつ高速実時間性を両立することが可能となる。本システムではこの考えに基づき、画素単位でのランダムアクセスが可能な 1024×1024 画素を持つ CMOS イメージャと汎用プログラミングが可能な DSP が搭載されている FastCom Technology 社 iMVS-155 を用い、認識アルゴリズムを実装した高速ビジョンシステムを構築した。



図 2 iMVS-155

(A3) 高速ロボットハンド

人間の指の開閉速度(約 0.15s 程度)以上での高速な指の開閉を可能とした 5 自由度 5 本指ハンドを開発した。モータの最大回転数は 7000rpm, 最大トルクは 16mNm である。指の関節数は 3 であり, これらの関節はリンク構造により接続されている。指を閉じた状態から開いた状態, 開いた情報から閉じた状態, いずれの場合についても, 指の開閉が約 0.1s で実現され, 人間の指よりも高速に開閉することが可能である。



図 3 高速ロボットハンド

(A4) ジャンケンロボットシステム

解析結果より, 人間に必ず勝つジャンケンロボットを実現するためには人間の指先の開閉時間 $T_h(0.15s \sim 0.20s)$ 以内に, 指の状態を高速に認識するための高速視覚システム, 及び指の開閉を高速に可能とするロボットハンドを設計すれば良い。これに基づき, 高速メガピクセルビジョンと高速開閉ロボットハンドを有するジェスチャーロボットシステムの開発を行った。図 4 にその概要を示す。このシステムは, 高速メガピクセルビジョンで手及び指の動作認識を行い, その情報をもとに高速ロボットハンド及びロボットアームを制御する構成となっている。

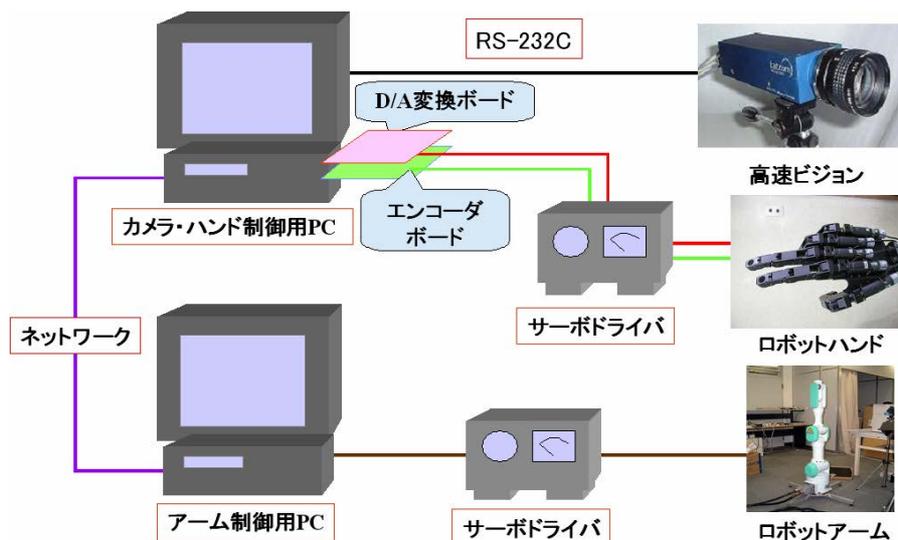


図4 ジャンケンロボットのシステム構成

(A5) 実験結果

開発したロボットを用いて、人間のジェスチャーに対しジャンケンを行った実験結果を図5に示す。このように人間の高速な動作に対しても、人間のジェスチャー行動終了時にはロボットが必ずジャンケンに勝つことができる。このように視覚と同時にロボットハンドが高速化すると、人間を超えた高速な認知・行動が実現でき、必ず勝つジャンケンロボットといった従来にはない新たなインタラクションが可能となる。

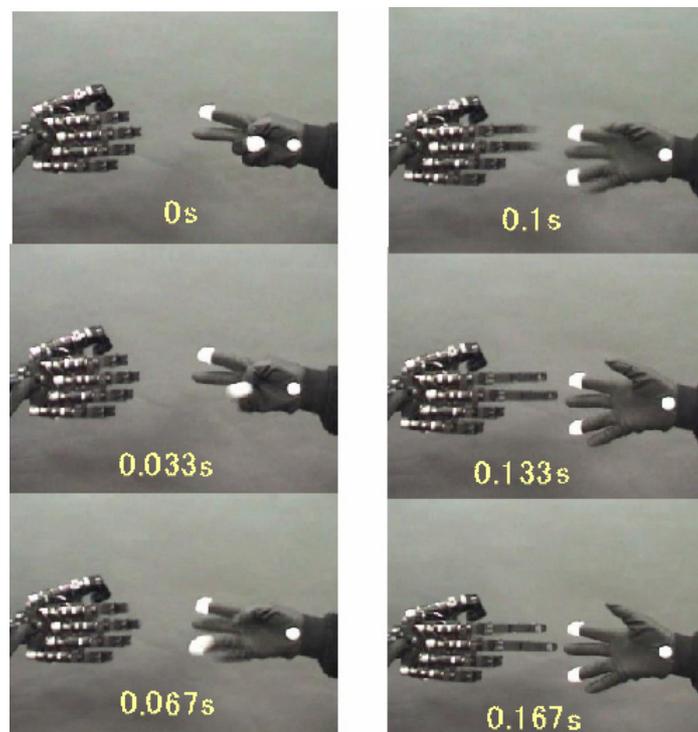


図5 必ず勝つジャンケンロボット

(B) バッティングロボット

もう1つの「手と脳」システムの実例として、人間の視覚及び動作能力を超越する、超高速バッティングロボットの開発を行った。

(B1) バッティングロボットシステム

打撃用高速マニピュレータ、高速三次元軌道予測システム、制御用PCから構成される高速バッティングロボットシステムを開発した。

打撃用高速マニピュレータは、バネの弾性エネルギーの瞬時放出によるフィードフォワード的な制御により0.05sでの高速スイングを実現している。可動範囲は中心位置から±50[mm]、最高速度は1500[mm/s]である。動作原理としては、電磁クラッチをかました状態でモータを回転させ、その蓄積エネルギーを回転力とし、スイングを行うものである。また、(1-2)で開発した高速ビジョンシステムを2台用い、ビジョンシステムに実時間三次元軌道予測アルゴリズムを実装することで、高速に飛翔するボールの軌道を正確に予測する三次元軌道予測システムを開発した。

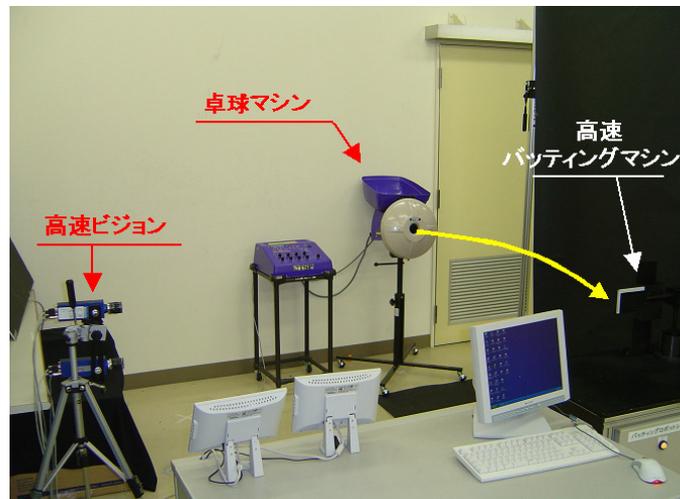


図6 システム構成

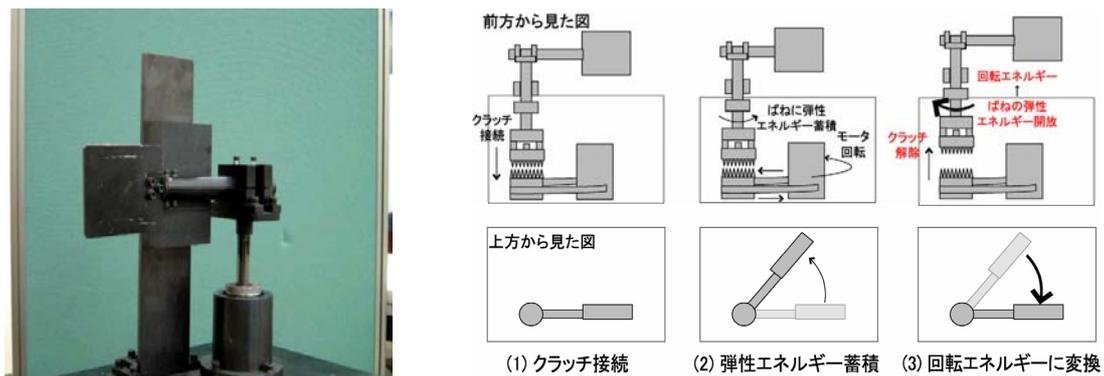


図7 打撃用高速マニピュレータ

(B2) 高速打撃実験

開発したバッティングロボットの高速性・有効性を検証するため、打撃実験を行った。実験では、打撃ツール部分中心より2m前方から14m/s(約50km/h)で投球されたピンポン球(直径4cm)に対し打撃を行った。打撃実験の写真およびピンポン球変位の時間推移を図8に示す。これらの結果より、ほぼ反対方向に対して15m/sの速度で打ち返されており、非常に高速な飛翔物体に対して高速な打撃が実現されていることを確認した。

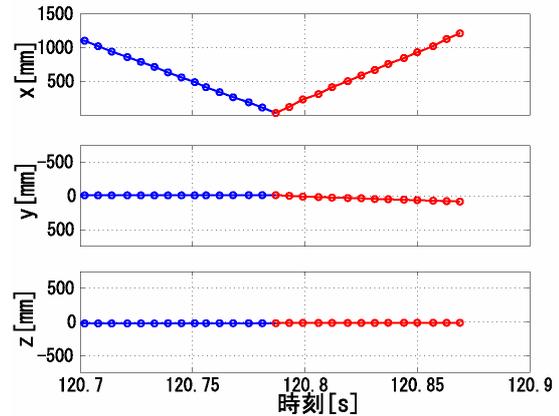
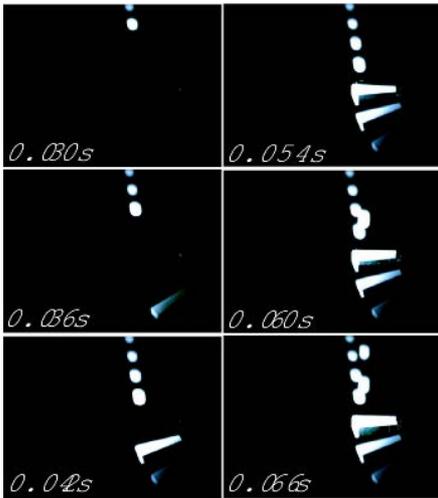


図 8 高速打撃実験

(B3) 左右打ち分けバッティング実験

実際の運動では、ボールの空気抵抗などの影響から放物運動に対して誤差が生じる。本研究ではこのような誤差をリアルタイムに補正し、より正確な軌道捕捉をすることで左右打ち分けバッティングを実現した。実験では、打撃ツールの斜め 45 度より投球された時速 25km/h のボールに対して、1) 左方向へ 30 度、2) 正面方向、3) 右方向へ 30 度の 3 種類の方向についての打ち分け動作を確認した。

打撃実験を 10 回試行した場合について、目標打撃角度と実際の打撃角度の関係および実験の様子を図 9 に示す。誤差範囲は目標角度の前後 10 度以内に収まっており、これらの実験結果より、ms レベルでの打撃タイミング制御が方向制御型の打撃において有効であることを確認した。

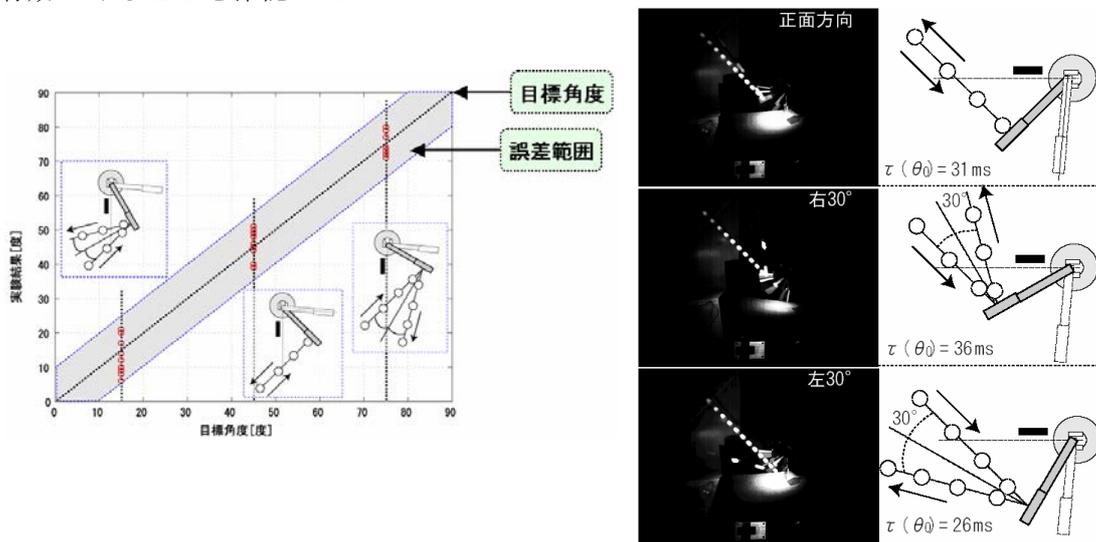


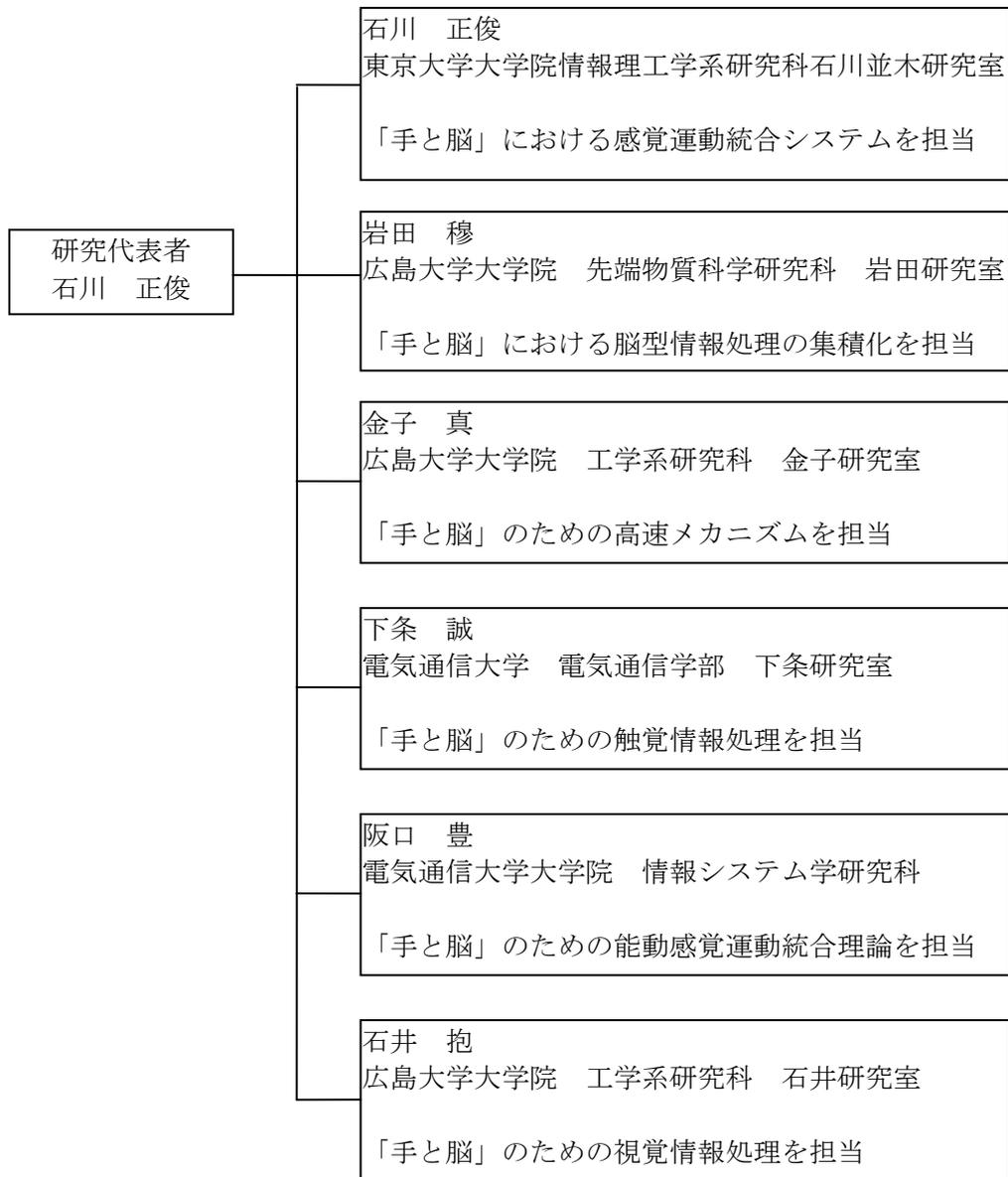
図 9 左右打ち分けバッティング実験

(2) 研究成果の今後期待される効果

「手と脳」システムの高速度化は、本研究で示したアプリケーションシステム以外にも、基板部品装着診断技術のような産業応用、構造物のダイナミクスセンシングなどの社会基盤応用、医用診断分野、農業分野への応用など、様々な分野に革新的な技術を提供できる可能性を秘めるものと考えられる。

4. 研究実施体制

(1) 体制



(2) メンバー表

1. 石川研究グループ

氏名	所属	役職	担当する研究項目	参加時期
○石川 正俊	東京大学大学院情報理工学系研究科	教授	1. 研究全体の統括 2. 「手と脳」における感覚運動統合システムの研究	H11,11~H16,10
並木 明夫	同上	講師	高速アームの開発	H12,4~H16,10
小室 孝	同上	助手	視覚情報処理システムの開発	H11,11~H16,10
鏡 慎吾	同上	助手	視覚情報処理システムの開発	H11,11 ~ H15,3, H15,7~H16,10
尾川 順子	同上	博士	感覚運動統合理論	H12,4~H16,10
渡辺 義浩	同上	博士	視覚情報処理システムの開発	H14,4~H16,10
鵜飼 賀生	同上	修士	視覚情報処理システムの開発	H14,4~H16,10
笠原 裕一	同上	修士	高速アーム制御実験	H14,4~H16,10
妹尾 拓	同上	修士	高速アーム制御実験	H14,4~H16,10
テオドルス	同上	修士	視覚情報処理システムの開発	H14,4~H16,10
大西 政彦	同上	修士	高速アーム制御実験	H16.4~H16.10
駒井 崇志	同上	修士	高速アーム制御実験	H16.4~H16.10
塩形 大輔	同上	修士	高速アーム制御実験	H16.4~H16.10
デービス アンチェリー	同上	修士	視覚情報処理システムの開発	H16.4~H16.10
葎本 香太郎	同上	修士	視覚情報処理システムの開発	H16.4~H16.10
今井 睦朗	同上	修士	高速アーム制御実験	H14,4~H16,5
岸本 渉	同上	修士	高速アーム制御実験	H13,4~H16,3
竹内 大介	同上	修士	高速アーム制御実験	H14,4~H16,3
竹本 征人	同上	修士	高速アーム制御実験	H14,4~H16,3
山野 高将	同上	修士	視覚情報処理システムの開発	H14,4~H16,3
奥 寛雅	同上	博士	高速アーム制御実験	H11,11~H15,3
新開 誠	同上	修士	視覚情報処理システムの開発	H13,4~H15,3

藤村 英範	同上	修士	視覚情報処理システムの開発	H12,4~H14,3
成瀬 誠	同上	助手	「手と脳」における実時間視覚情報処理の研究	H12,9~H13,3
村井 源	同上	修士	高速アーム制御実験	H11,11~H13,3
中坊 嘉宏	東京大学大学院工学系研究科	博士	「手と脳」における高速アームの研究	H11,11~H12,3
橋本 浩一	東北大学大学院情報科学研究科	教授	視覚情報処理理論の研究	H12,9~H16,10
アルバロ カシネリ	東京大学大学院情報理工学系研究科	CREST 研究員	視覚情報処理システムの開発	H14,4~H16,10
坂本 麗子	同上	研究補助員		H11,11~H16,10

2. 岩田研究グループ

氏名	所属	役職	担当する研究項目	参加時期
○岩田 穆	広島大学先端物質科学研究科	教授	「手と脳」における脳型情報処理の集積化の研究	H11,11 ~ H16,10
佐々木 守	同上	助教授	脳型情報処理のためのチップ間通信網の開発, 設計.	H15,4 ~ H16,10
汐崎 充	同上	博士	脳型情報処理チップアーキテクチャ設計, LSI 設計評価	H12,4 ~ H16,10
小野 将寛	同上	博士	脳型情報処理アーキテクチャ・機能設計, 評価	H12,4 ~ H16,10
佐々木 寛弥	同上	博士	脳型情報処理アーキテクチャ設計・評価	H14,4 ~ H16,10
向井 徹	同上	修士	チップ間通信 I/O 回路の設計・評価	H14,4 ~ H16,10
部谷 圭彦	同上	修士	高速アナログ回路設計・評価	H14,4~H16,3
片山 光亮	同上	博士	脳型情報処理システムアーキテクチャ,	H11,11 ~ H15,3
前田 智晃	同上	修士	アナログインタフェース回路設計	H13,4~H15,3
森江 隆	同上	助教授	脳型情報処理アルゴリズム, アーキテクチャ設計	H11,11 ~ H14,3

永田 真	同上	助手	脳型情報処理 LSI システム設計	H11,11 ~ H14,3
斎藤 航	同上	修士	脳型情報処理アルゴリズム評価	H12,4~H14,3
今村 俊文		修士	画像処理 LSI アナログ信号処理回路設計, 評価	H12,4~H14,3
山本 美子		修士	画像処理 LSI アナログ信号処理回路設計, 評価	H12,4~H14,3
安藤 博士	同上	博士	脳型情報処理チップアーキテクチャ設計	H11,11 ~ H13,3
吉川 泰正	同上	修士	脳型情報処理アナログ回路設計評価	H12,4~H13,3
村越 健一	同上	修士	画像処理 LSI 設計	H12,4~H13,3
中本 裕之	同上	修士	脳型情報処理 VLSI 設計	H11,11~12,3
武田 憲明	同上	修士	脳型情報処理 VLSI 設計	H11,11~12,3
藤井 敏美	同上	技術員	脳型情報処理 LSI 設計, 評価	H12,4~H15,3

3. 金子研究グループ

氏名	所属	役職	担当する研究項目	参加時期
○金子 真	広島大学工学研究科	教授	「手と脳」における多指ハンドの機構部設計・統括	H11,11 ~ H16,10
東森 充	同上	助手	多指ハンドの制御アルゴリズム	H14.8~H16.10
村上 義博	同上	技官	多指ハンドの回路設計・実験	H13,4~H16,10
川原 知洋	同上	博士	多指ハンドの開発	H14,4~H16,10
徳田 寛一	同上	修士	多指ハンド制御実験	H15,4~H16,10
西尾 祥一	同上	修士	多指ハンドの制御アルゴリズム	H15,4~H16,10
原田 学	同上	修士	多指ハンドの制御アルゴリズム	H15,4~H16,10
榊上 浩和	同上	修士	多指ハンドの制御アルゴリズム	H15,4~H16,10
溝井 敏幸	同上	修士	多指ハンド制御実験	H15,4~H16,10
加藤 一樹	同上	修士	多指ハンドの開発	H15,4~H16,10
木村 麻伊子	同上	修士	多指ハンドの開発	H16,4~H16,10
湯谷 政洋	同上	修士	多指ハンドの制御	H16,4~H16,10

丁 憲勇	同上	修士	アルゴリズム 多指ハンドの開発	H16,4~H16,10
辻 敏夫	同上	教授	多指ハンドの制御 アルゴリズム	H11,11~H16,3
小林 洋平	同上	修士	多指ハンドの制御 アルゴリズム	H14,4~H16,3
竹中 麗香	同上	修士	多指ハンド制御実 験	H14,4~H16,3
広本 真志	同上	修士	多指ハンドの制御 アルゴリズム	H14,4~H16,3
松永佐斗志	同上	修士	多指ハンドの開発	H14,4~H16,3
野田 聡	同上	修士	多指ハンドの制御 アルゴリズム	H13,4~H15,3
坂根 彰	同上	修士	多指ハンドの制御 アルゴリズム	H13,4~H15,3
藤田 真治	同上	修士	多指ハンドの制御 アルゴリズム	H14,4~H15,3
原田 研介	同上	助手	多指ハンドのソフ ト試作	H11,11~H14,3
佐嶋 俊彦	同上	修士	多指ハンドの開発	H12,4~H14,3
水野 彰彦	同上	修士	多指ハンドの開発	H12,4~H14,3
岩原 誠	同上	修士	多指ハンドの開発	H12,4~H14,3
高橋 恒介	同上	修士	多指ハンドの制御 実験	H12,4~H14,3
堀江 竜太	同上	修士	多指ハンドの制御 実験	H13,4~H14,3
城野 淳	同上	修士	多指ハンドの制御 実験	H13,4~H14,3
後藤 孝夫	同上	修士	多指ハンドの制御 実験	H13,4~H14,3
澄田 康光	同上	修士	多指ハンドの制御 実験	H13,4~H14,3
白井 達也	同上	博士	多指ハンドの実験	H11,11~H13,3
西山 淳	同上	修士	多指ハンドの回路 設計・実験	H11,11~H13,3
澤田 光史	同上	修士	多指ハンドの実験	H11,11~H13,3
別所 良治	同上	修士	多指ハンドの実験	H11,11~H13,3
村上 満	同上	修士	多指ハンドの実験	H11,11~H13,3
向井 健文	同上	修士	多指ハンドの実験	H11,11~H12,3
堀内 ルミ	同上	研究補助 員	多指ハンド評価に 関する実験	H14,4~H16,10

4. 下条研究グループ

氏名	所属	役職	担当する研究項目	参加時期
○下条 誠	電気通信大学 電気通信学部	教授	触覚センサとその 情報処理アルゴリ ズムの研究開発	H11,11 ~ H16,10
明 愛国	同上	助教授	情報処理アルゴリ ズムの開発	H13,4 ~ H16,10
金森 哉吏	同上	助手	触覚センサの開 発・実験	H13,4 ~ H16,10
島田茂伸	電気通信大学 SVBL	非常勤研 究員	触覚センサ用情報 処理 LSI 開発	H16,4 ~ H16,10
岩下貴司	電気通信大学 電気通信学部	修士	触覚センサ用情報 処理 LSI 開発	H15,4 ~ H16,10
谷保勇樹	同上	修士	触覚センサの開 発・実験	H15,4 ~ H16,10
長澤 俊	同上	修士	触覚センサ用情報 処理 LSI 開発	H16,4 ~ H16,10
飛田和輝	電気通信大学 SVBL	研究員	触覚センサ用情報 処理 LSI 開発	H14,4~H16,3
牧野了太	電気通信大学 電気通信学部	修士	触覚センサの開 発・実験	H14,4~H16,3
安彦成泰	同上	修士	触覚センサの開 発・実験	H15,4~H16,3
鎌田 賢	茨城大学工学 部	助教授	触覚情報処理アル ゴリズムの開発	H11,11 ~ H13,3
大瀧 保広	同上	助手	触覚情報処理アル ゴリズムの開発	H11,11 ~ H13,3

5. 阪口研究グループ

氏名	所属	役職	担当する研究項目	参加時期
○阪口 豊	電気通信大学 大学院情報シ ステム学研究 科	助教授	感覚統合と運動制 御にかかわる行動 実験と計算モデル の構築	H11,11 ~ H16,10
石田 文彦	同上	助手	視覚と運動の統合 に関わる行動実験 と計算モデルの構 築	H14,5 ~ H16,10
和田克巳	同上	博士	運動制御モデルの 構築	H14,10 ~ H16,10
井口 尚彦	同上	博士	運動学習に関する 計算モデル	H14,4 ~ H16,10
藤原 護	同上	修士	動的知覚メカニズ ムに関する心理実 験	H13,4~H16,3
村上 敏之	同上	修士	運動制御モデルの 構築	H14,5~H16,3
遠藤 さやか	同上	修士	視線計測システム	H14,5~H16,3

平山 雄介	同上	修士	の構築と実験 眼球運動に関する 行動実験	H14,4~H15,3
内田 一樹	同上	修士	自己組織的学習に 関する計算モデル	H14,4~H15,3
関根 道昭	同上	助手	注意のメカニズム に関する心理実験	H12,4~H14,3
田中 亮子	同上	修士	運動のタイミング 制御に関する心理 実験	H12,4~H14,3
杉浦 勇樹	同上	修士	能動的感覚統合の モデルの構築	H12,4~H13,3
山川 泰明	同上	修士	能動的感覚統合シ ステムの構築	H12,4~H13,3
平野 千恵	同上	研究補助 員	感覚統合と運動制 御に関わる心理実 験	H11,11 ~ H16,10

6. 石井研究グループ

氏名	所属	役職	担当する研究項目	参加時期
○石井 抱	広島大学 工学研究科	助教授	「手と脳」における 実時間視覚情報処 理の研究	H11,11 ~ H16,10
河内洋一郎	広島大学工学 部第2類	学部	「手と脳」システム の実時間視覚情報 処理	H16.4 ~ H16.10
杉山克彦	同上	学部	高速視覚情報処理 の研究	H15,4~H16,3
窪園宗寛	同上	学部	高速視覚情報処理 の研究	H15,4~H16,3
木村麻伊子	同上	学部	高速視覚情報処理 の研究	H15,4~H16,3

5. 研究期間中の主な活動

(1) ワークショップ・シンポジウム等

年月日	名称	場所	参加人数	概要
H15,12/19	SICE SI 部門講演会 オーガナイズドセッション CREST 石川 プロジェクト:感覚運動統合理論に基づく 「手と脳」の工学的実現	東海大学 代々木校舎	発表者: 12名 聴衆: 約 60人程度	CREST 研究成果の外部 発表
H13,12/20	SICE SI 部門講演会 オーガナイズドセッション CREST 石川 プロジェクト:感覚運動統合理論に基づく 「手と脳」の工学的実現	神戸市産 業振興セ ンター	発表者: 7 名 聴衆: 約 60人程度	CREST 研究成果の外部 発表
H14,5/11	2002 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Tutorial Session Innovative Sensory-Motor Fusion Opens a New Robotic World	Crystal Gateway Marriott Hotel, Washingt on D.C.	発表者 6 名	Organizers: Masatoshi Ishikawa and Makoto Kaneko
H13,12/21	SICE SI 部門講演会 オーガナイズドセッション CREST 石川 プロジェクト:感覚運動統合理論に基づく 「手と脳」の工学的実現	名古屋工 業大学	発表者: 6 名 聴衆: 約 60人程度	CREST 研究成果の外部 発表

6. 主な研究成果物, 発表等

(1) 論文発表 (国内 12 件, 海外 22 件)

1. M. Shimojo, A. Namiki, M. Ishikawa, R. Makino, K. Mabuchi, A tactile sensor sheet using pressure conductive rubber with electrical-wires stitched method, *IEEE Sensors Journal*, Vol.4, No.5, pp.589- 596 , 2004.
2. Akio Namik, Koichi Hashimoto, Masatoshi Ishikawa: Hierarchical Control Architecture for High-speed Visual Servoing, *The International Journal of Robotics Research*, October 2003, vol. 22, no. 10, pp. 873-888(16)
3. K. Hashimoto : A review on vision-based control of robot manipulators, *Advanced Robotics*, Vol.17, No.10, pp.969-991 (2003)
4. Makoto Kaneko, Mitsuru Higashimori, Reika Takenaka, Akio Namiki, and Masatoshi Ishikawa : The 100G Capturing Robot -- Too fast to see, *IEEE/ASME Trans. on Mechatronics*, Vol.8, No.1, pp.37-44 (2003)
5. Sakaguchi, Y.: Visual field anisotropy revealed by perceptual filling-in, *Vision Research*, 43, 2029-2038, 2003.
6. Akio Namiki, Takashi Komuro and Masatoshi Ishikawa: High-speed sensory-motor fusion for robotic grasping, *Measurement Science and Technology*, Vol. 13, No. 11, pp. 1767-1778, 2002
7. 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
8. K. Katayama and A. Iwata: "A High-Resolution CMOS Image Sensor with Hadamard Transform Function", *IEICE Trans. Fundamentals*, vol. E86-A, NO.2, pp. , Feb. 2003.
9. K. Katayama, M. Nagata, T. Morie and A. Iwata, "An Hadamard Transform Chip Using the PWM Circuit Technique and Its Application to Image Processing", *IEICE Trans. Electron.*, vol.E85-C, NO.8, pp. 1596-1603, Aug. 2002.
10. Makoto Kaneko, Mitsuru Higashimori, Reika Takenaka, Akio Namiki, and Masatoshi Ishikawa : The 100G Capturing Robot -- Too fast to see, *IEEE/ASME Trans. on Mechatronics*, Vol.8 No.1, pp.37-44 (2003)
11. Iwata, T. Morie, and M. Nagata: Merged Analog-Digital Circuits Using Pulse Modulation for Intelligent SoC Applications, *IEICE Trans. Fundamentals*, Vol. E84-A, No. 2, pp. 486-496, 2001.
12. Kensuke Harada, Makoto Kaneko, Toshio Tsuji : Active Force Closure for Multiple Objects, *Journal of Robotics Systems*, vol.19, no.3, 2002
13. Makoto Kaneko, Naoki Kanayama, and Toshio Tsuji : Vision-Based Active Sensor Using a Flexible Beam, *IEEE/ASME TRANSACTIONS ON MECHATRONICS*, vol. 6, no. 1, pp. 1-11, 2001.
14. Sakaguchi, Y., Akashi, Y. and Takano, M.: Visuo-motor adaptation to stepwise and gradual changes in the environment: Relationship between consciousness and adaptation, *Journal of Robotics and Mechatronics*, 13, 601-613, 2001.
15. Sakaguchi, Y.: Target/surround asymmetry in perceptual filling-in, *Vision Research*, 41, 2065-2077, 2001.
16. Masatoshi Ishikawa, Takashi Komuro, Akio Namiki, and Idaku Ishii : 1ms Sensory-Motor Fusion System, *Robotics Research (J.M.Hollerbach and D.E.Koditschek eds.)*, pp.359-364, Springer, 2000
17. Akio Namiki, Yoshihiro Nakabo, Idaku Ishii, Masatoshi Ishikawa: 1ms Sensory-Motor Fusion System, *IEEE Transactions On Mechatronics*, Vol.5, No.3, pp.244-252 (2000)
18. 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.
19. 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.
 20. 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.
 21. Sakaguchi Y. Perceptual filling-in at two distinct targets interacts with each other. Investigative Ophthalmology and Visual Science 41: S442, 2000.
 22. M. Shimojo, M. Shinohara, Y. Fukui, Human Shape Recognition Performance for 3D Tactile Display, IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics, Part A, Vol.29, No.6, pp.637-644, 1999.
 23. 東森充, 金子真, 単一ワイヤ駆動ロボットハンドの Dynamic Preshaping, 日本ロボット学会誌, Vol.23, No.1, 2005.
 24. 東森充, 城野淳, 金子真, ダイナミックキャッチングにおける球状物体の状態遷移, 日本ロボット学会誌, Vol.22, No.6, pp.739-745, 2004.
 25. 尾川順子, 阪口豊, 並木明夫, 石川正俊: 感覚運動統合システムにおけるダイナミクス整合の適応的獲得, 電子情報通信学会誌, Vol.J87-D-II, No.7, pp.1505-1515 (2004)
 26. 並木明夫: マニピュレーション技術の新展開: ブレークスルーのシナリオ -高速マニピュレーションの実現に向けて-, 日本ロボット学会誌, Vol. 20, No.2, pp.149-150, 2002
 27. 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)
 28. 金子真, 佐嶋俊彦, 原田研介, 辻敏夫: 触覚微分器, 日本機械学会学会論文集 (C編), vol. 68, no. 666, pp. 447-453, 2002.
 29. 原田研介, 川嶋大雅, 金子真: 重力平衡する対象物の転がりによる操り, 日本ロボット学会誌, vol.20, no.2, pp164-172, 2002
 30. 白井達也, 金子真, 原田研介, 辻敏夫: 対象物の引き剥がし支援動作 (DAM) の発見とロボットハンドへの応用, 日本ロボット学会誌, vol.20, no.1, pp57-64, 2002
 31. 金子真, 原田研介, 辻敏夫: Envelope Family 操りの十分条件, 日本ロボット学会誌, vol. 19, no. 7, pp. 63-73, 2001.
 32. 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)
 33. 石井抱, 石川正俊: 高速ビジョンのための Self Windowing, 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol.J82-D-II, No.12, pp.2280-2287, 1999
 34. 並木明夫, 石川正俊: 視触覚フィードバックを用いた最適把握行動, 日本ロボット学会論文集, Vol.18, No.2, pp.261-269, 2000

(2) 口頭発表 (内容が重複しているものは除く. 国際学会発表を優先.)

① 招待, 口頭講演 (国内 86 件, 海外 50 件)

1. A. Namiki, Y. Imai, M. Kaneko, M. Ishikawa: Development of a High-speed Multifingered Hand System, International Conference on Intelligent Manipulation and Grasping (Genoa, Italy, 2004.7.1-2) / pp.85-90
2. T. Senoo, A. Namiki, and M. Ishikawa: High-Speed Batting Using a Multi-Jointed Manipulator, 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2004) (New Orleans, USA, 2004.4.26-5.1) / pp.1191-1196
3. Y. Imai, A. Namiki, K. Hashimoto, and M. Ishikawa : Dynamic Catching Using a High-Speed Multifingered Hand and a High-speed Vision System, 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2004) (New Orleans, USA, 2004.4.26-5.1) / pp.1849-1854 , Best Vision paper Award finalist
4. A. Namiki, Y. Imai, T. Senoo, and M. Ishikawa : Dynamic Manipulation Using High-speed Multifingered Hand-Arm System - Grasping, Catching, and Batting -, 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2004) (New Orleans)/ Video Proceedings, No.L
5. M. Shiozaki, Toru Mukai, Masahiro Ono, Mamoru Sasaki and A. Iwata, A 2Gbps and 7-multiplexing CDMA Serial Receiver Chip for Highly Flexible Robot Control System," Symposium on VLSI Circuits, Digest of Technical Papers, pp.194-197, June 2004
6. M. Higashimori , M. Kimura , I. Ishii , and M. Kaneko : Basic Consideration on Preshaping for Capturing a Rotational Object, Proc. of the ISARC 2004 21st International Symposium on Automation and Robotics in Construction, pp.250-255, Jeju, Korea, Sep. 23, 2004.
7. M. Higashimori, A. Jono, and M. Kaneko: Dynamic Behavior of a Sphere Object Sandwiched in Parallel Grippers, ICAM'04 The 4th International Conference on Advanced Mechatronics, MP2-A-2, pp.235-240, Asahikawa, Oct. 4, 2004.
8. M. Kaneko and M. Higashimori: Design of 100G Capturing Robot, Proc. of the ISORA 2004 10th International Symposium on Robotics and Applications, Paper No.: ISORA-30, Seville, Spain, Jun.30, 2004.
9. Makoto Shimojo, Masami Shinohara, Michiyo Tanii, Yutaka Shimizu, An approach for direct manipulation by tactile modality for blind computer users: Principle and practice of detecting information generated by touch action Computers Helping People with Special Needs, Springer (Klaus Miesenberger, Joachim Klaus, Wolfgang Zagler, Dominique Burger 'Eds.) , pp.753-760, 2004.
10. Atsushi Iwashita, Makoto Shimojo, Development of a Mixed Signal LSI for Tactile Data Processing, IEEE SMC 2004 (Int. Conf. on Systems, Man and Cybernetics), Vol.CD-ROM, 2004.
11. Akio Namiki, Yoshiro Imai, Masatoshi Ishikawa, and Makoto Kaneko : Development of a High-speed Multifingered Hand System and Its Application to Catching, 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (Las Vegas, 2003.10.30) / pp.2666-2671
12. Makoto Kaneko, Mitsuru Higashimori, Akio Namiki, and Masatoshi Ishikawa: The 100G Capturing Robot -Too Fast To See-, Proc. of 11th Int. Symp. on Robotics Research (Siena , 2003.10.22) / W.2A-2
13. Akio NAMIKI, Yoshiro IMAI, Masatoshi ISHIKAWA, Makoto KANEKO, Hiroshi KAMEDA, and Junji KOYAMA : Dynamic Catching Using a Ultra-High-Speed Multifingered Hand System, 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Taipei, 2003.9.17) / Video Proceedings,

Abstracts & References, pp.28-29

14. Akio NAMIKI, Masatoshi ISHIKAWA : Robotic Catching Using a Direct Mapping from Visual Information to Motor Command, 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Taipei, 2003.9.17) / pp.2400-2405
15. Mitsuru Higashimori, Makoto Kaneko, and Masatoshi Ishikawa : Dynamic Preshaping for a Robot Driven by a Single Wire, 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Taipei, 2003.9.16) / pp.1115-1120
16. M. Higashimori, M. Kaneko, and M. Ishikawa: Dynamic Preshaping for a Robot Driven by a Single Wire, IEEE Proc. of Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.1115-1120, 2003.
17. M. Higashimori and M. Kaneko: Design of Joint Spring for Dynamic Preshaping, In Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.2101-2106, 2003.
18. M. Kaneko, M. Higashimori, A. Namiki, and M. Ishikawa, The 100G Capturing Robot -Too Fast To See-, Proc. of 11th Int. Symp. on Robotics Research, W.2A-2, 2003.
19. 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)
20. K. Katayama and A. Iwata: "Pulse Coupled Neural Network using Coupled Phase Locked Loop", International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA), pp. 853-856, Xi'an, October 7-11, 2002
21. K. Katayama and A. Iwata: "A High-Resolution Hadamard Transform Chip", International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM), pp.372-373, Nagoya, September, 17-19, 2002.
22. M. Kaneko, M. Higashimori, R. Takenaka, A. Namiki, and M. Ishikawa: The 100G Capturing Robot -Too Fast To See-, Proc. of the Eighth Int. Symp. on Artificial Life and Robotics, Vol.1, pp.291-296, 2003. (Oita, Jan 24-26).
23. M. Kaneko, K. Harada, and T. Tsuji: Dynamic Friction Closure, Proc. of 2002 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.1584-1589, 2002.
24. M. Kaneko, T. Tsuji, and M. Ishikawa: The Robot That can Capture a Moving Object in a Blink, Proc. of 2002 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.2485-2491, 2002.
25. M. Kaneko, R. Takenaka, and M. Ishikawa: The Capturing Robot with High Acceleration, 8th International Symposium on Experimental Robotics (ISER'02) #023, 2002.
26. Makoto Shimojo, Ryota Makino, Akio Namiki, Masatoshi Ishikawa, Takafumi Suzuki, Kunihiko Mabuchi : A Sheet Type Tactile Sensor using Pressure Conductive Rubber with Electrical-Wires Stitches Method, 2002 IEEE Sensors (Orlando, 2002.6.15)
27. Sakaguchi, Y.: Contrast dependency of orientation filling-in, Proceedings of 2nd Annual Meeting of Vision Sciences Society (VSS-2002), 73, 2002.
28. Akio Namiki, Masatoshi Ishikawa : Sensory-Motor Fusion Architecture Based on High-Speed Sensory Feedback and Its Application to Grasping and Manipulation Proceedings of the 32nd International Symposium on Robotics (Soul, 2001.04.19)
29. Iwata, T. Morie, and M. Nagata: Merged Analog-Digital Circuits Using Pulse Modulation for Intelligent SoC Applications, IEICE Trans. Fundamentals, Vol. E84-A, No. 2, pp. 486-496, 2001.
30. Iwata, T. Morie, and M. Nagata: Bio-Inspired VLSIs Based on Analog/Digital

- Merged Technologies (Invited), Extended Abstracts of the 2001 Int. Conf. Solid State Devices and Materials (SSDM2001), pp. 88-89, Tokyo, Sept. 26, 2001.
31. Makoto Kaneko: Tactile Differentiator, IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 4023-4028, 2001. (Seoul, May 21-26)
 32. Makoto Kaneko: Analysis on Detaching Assist Motion (DAM), IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp. 3028-3033, 2001. (Seoul, May 21-26)
 33. M. Shimojo, R. Ikeda, A. Namiki, M. Ishikawa, T. Suzuki, K. Mabuchi: Tactile Sensor using Pressure Conductive Rubber with Electrical-Wires Stitches Method, Proc. of 3rd European-Asian Congress on Mechatronics, (CD-ROM), (2001)
 34. Sakaguchi, Y. and Takano, M: Learning to Switch Behaviors for Different Environments: A Computational Model for Incremental Modular Learning, Proceedings of 2001 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA-2001), 383-386, 2001.
 35. Sakaguchi, Y.: Contrast dependency of orientation filling-in, Proceedings of First Asian Conference on Vision (ACV-2001), 62, 2001.
 36. Sakaguchi, Y.: Inter-target interaction of perceptual filling-in, Proceedings of 1st Annual Meeting of Vision Sciences Society (VSS-2001), 125, 2001.
 37. Akio Namiki, Masatoshi Ishikawa: Sensory-Motor Fusion Architecture Based on High-Speed Sensory Feedback and Its Application to Grasping and Manipulation Proceedings of the 32nd International Symposium on Robotics
 38. Iwata, M. Nagata, N. Takeda, M. Homma, and T. Morie, Pulse Modulation Circuit Architecture and its Application to Functional Image Sensors, Proc. IEEE International Symposium on Circuits and Systems 2000, #0113-4, pp. II-301-304, May. 2000.
 39. K. Katayama, M. Nagata, T. Morie, and A. Iwata, A High-Resolution Hadamard Transform Circuit Using Pulse Width Modulation Technique, Extended Abstracts of the 2000 Int. Conf. Solid State Devices and Materials (SSDM2000), pp. 366-367, Sendai, Aug. 30, 2000.
 40. M. Kaneko, T. Shirai, K. Harada, and T. Tsuji, Grasp Strategy Simplified by Detaching Assist Motion (DAM), Preprints of 7th International Symposium on Experimental Robotics, pp.137-146, 2000.
 41. M. Kaneko, T. Shirai, and T. Tsuji, Detaching and Grasping Strategy Inspired by Human Behavior, Proceedings of the 13th ROMANSY, pp.121-130, 2000.
 42. T. Niki, M. Shimojo, A Development of Simple Haptics Display, IEEE Int. Conf. on Systems, Man, and Cybernetics, pp.1001-1006, 2000.10.9
 43. T. Niki, M. Shimojo, Simple Haptics Display and Object Data Design, IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, 2000.11.2
 44. Masatoshi Ishikawa, Takashi Komuro, Akio Namiki, and Idaku Ishii : 1ms Sensory-Motor Fusion System (Invited), Int. Symp. of Robotics Research, pp.291-296, 1999
 45. Idaku Ishii and Masatoshi Ishikawa: A Line Extraction Algorithm for High Speed Vision, Fourth Asian Conf. on Computer Vision, pp.330-335, 1999
 46. M.Kaneko, K.Harada, and T.Tsuji, "A Sufficient Condition for Manipulation of Envelope Family", IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation., 2000
 47. Tatsuya Shirai, Makoto Kaneko, Kensuke Harada, Toshio Tsuji, "Enveloping Grasp with a New Detaching Strategy", Ninth International Conference on Advanced Robotics, pp.167-172, 1999
 48. K.Harada, M.Kaneko, and T.Tsuji, "Rolling Based Manipulation for Multiple Objects", IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, 2000
 49. K.Harada and M.Kaneko "Neighborhood Equilibrium Grasp for Multiple

- Objects", IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, 2000
50. K.Harada, M.Kaneko, K.Furutera, and T.Tsuji, "Active Force Closure for Multiple Objects", Int. Symp. on Advances in Robot Kinematics(ARK), 2000
 51. 塩形大輔, 並木明夫, 石川正俊: 高速ロボットハンドによる物体の動的保持, 第22回ロボット学会学術講演会 (岐阜, 2004.9.17) / 予稿集, 3J13
 52. 妹尾拓, 並木明夫, 石川正俊: 高速バッティングロボットシステムの性能評価, 第22回ロボット学会学術講演会 (岐阜, 2004.9.15) / 予稿集, 1D25
 53. 並木明夫, 今井睦朗, 石川正俊: 高速多指ハンドによる能動的捕獲戦略, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2004(ROBOMECH '04) (名古屋, 2004.6.20) / 2A1-L1-9
 54. 大西政彦, 並木明夫, 橋本浩一, 石川正俊: 柔軟な指先を持つ高速ハンドによる捕球動作の実現, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2004(ROBOMECH '04) (名古屋, 2004.6.20) / 2A1-L1-10
 55. 笠原裕一, 並木明夫, 小室孝, 石川正俊: 高速マニピュレーションのための多眼ビジュアルフィードバックシステム, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2004(ROBOMECH '04) (名古屋, 2004.6.20) / 2P2-L1-50
 56. 鶴飼賀生, 並木明夫, 石川正俊: モーメント特徴量を利用した高速ビジョンによる実時間3次元形状認識, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2004(ROBOMECH '04) (名古屋, 2004.6.20) / 2P1-H-61
 57. 妹尾拓, 並木明夫, 石川正俊: 高速打撃動作におけるマニピュレータのオンライン軌道生成, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2004(ROBOMECH '04) (名古屋, 2004.6.19) / 1P1-H-14
 58. 東森充, 丁憲勇, 金子真, 石井抱, 並木明夫, 石川正俊: 二重旋回機構を備えた高速4本指ロボットハンド, 第22回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 3J22, 岐阜, 2004.
 59. 西尾祥一, 東森充, 金子真: Dynamic Preshaping を考慮したワイヤ駆動キャプチャリングロボット, 第22回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 3J23, 岐阜, 2004.
 60. 原田学, 東森充, 石井抱, 金子真: 多リンクロボットハイジャンプ, 第22回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 2K12, 岐阜, 2004/9/16.
 61. 下条誠, 仁木亨: 高速応答が可能な可搬型ハプティクスディスプレイの開発 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol.J87-D-II, No.5, pp.1133-1141, 2004.
 62. 武田直人, 金子真, 石井抱: 高速バッティングマシンを用いた打ち分け動作, (社)日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2004 (名古屋, 2004.6.20) / 講演論文集, 2A1-H-19
 63. 今井睦朗, 並木明夫, 橋本浩一, 石川正俊, 金子真, 亀田博, 小山順二: 高速多指ハンドと高速視覚によるダイナミックキャッチング, 第9回ロボティクスシンポジア(那覇, 2004.3.9) / pp.517-522
 64. 並木明夫, 石川正俊: 高速視覚と多指ハンドアームを有する実時間感覚運動統合システム, 第4回計測自動制御学会 システムインテグレーション部門講演会 (東京, 2003.12.19) / pp.109-110
 65. 笠原裕一, 並木明夫, 小室孝, 石川正俊: 多眼高速ビジョンを用いた把握システム, 第4回計測自動制御学会 システムインテグレーション部門講演会 (東京, 2003.12.19) / pp.111-112
 66. 鶴飼賀生, 並木明夫, 石川正俊: 高速ビジョンと能動的照明装置を用いた3次元形状認識, 第4回計測自動制御学会 システムインテグレーション部門講演会 (東京, 2003.12.19) / pp.113-114
 67. 今井睦朗, 並木明夫, 橋本浩一, 石川正俊: 高速多指ハンドによる柱状物体のキャッチング動作, 第4回計測自動制御学会 システムインテグレーション部門講演会, (東京, 2003.12.19) / pp.121-122
 68. 妹尾拓, 並木明夫, 石川正俊: 多関節マニピュレータを用いた高速打撃動作の

- 研究, 第 4 回計測自動制御学会 システムインテグレーション部門講演会, (東京, 2003.12.19) / pp.123-124
69. 東森 充, 原田 学, 石井 抱, 並木 明夫, 石川 正俊, 金子 真: ジャンピング動作のためのインピーダンス設計に関する基本的考察, 第 4 回計測自動制御学会 システムインテグレーション部門講演会, (東京, 2003.12.19) / pp.129-130
 70. 石川 正俊, 並木 明夫: 感覚運動統合理論に基づく「手と脳」の工学的実現, 第 4 回計測自動制御学会 システムインテグレーション部門講演会, (東京, 2003.12.19) / pp.131-132
 71. 並木 明夫, 石川 正俊, 金子 真, 亀田 博, 小山 順二: 軽量高速多指ロボットハンドの開発, (社) 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2003 (函館, 2003.5.24) / 講演論文集, 1P1-1F-G3
 72. 今井 睦朗, 並木 明夫, 橋本 浩一, 石川 正俊: 高速多指ハンドによる動的捕球動作の実現, (社) 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2003 (函館, 2003.5.24) / 講演論文集, 1P1-1F-G2
 73. 下条誠, 金森克彦, 明愛国, 金森哉史, 石川 正俊: 液状感圧ゴムを用いた自由曲面型触覚センサの開発, (社) 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2003 (函館, 2003.5.24) / 講演論文集, 1A1-3F-B3
 74. 並木 明夫, 石川 正俊: 視覚情報から運動指令へのダイレクトマッピングによる捕球動作の実現, (社) 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2003 (函館, 2003.5.25) / 講演論文集, 2A1-1F-C5
 75. 汐崎充, 向井徹, 小野将寛, 佐々木守, 岩田穆, 融通性の高いロボットブレインを実現する CDMA 方式有線通信チップ, 計測自動制御学会 システムインテグレーション部門講演会,
 76. 小野将寛, 汐崎充, 佐々木守, 岩田穆 (広島大学), 強化学習を用いた対戦相手適応型戦略モデル, 電子情報通信学会 信学技報, NC2003-44, 横浜, 2003 年 7 月
 77. 小野将寛, 汐崎充, 佐々木守, 岩田穆 (広島大学), 強化学習による対戦相手適応型戦略モデル, FIT2003 第 2 回情報科学技術フォーラム, G-008, 札幌, 2003
 78. 東森, 原田, 石井, 並木, 石川, 金子: ジャンピング動作のためのインピーダンス設計に関する基本的考察, 計測自動制御学会 システムインテグレーション部門講演会論文集, pp.129-130, 2003.
 79. 東森, 西尾祥一, 金子真: Dynamic Preshaping -定式化と単一ワイヤ駆動式ロボットへの応用-, 第 21 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 3E1A, 2003.
 80. 東森, 城野, 金子: ダイナミックキャッチングにおける球状物体の状態遷移, 第 21 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 3E21, 2003.
 81. 金子, 原田, 湯谷, 東森, 石井: Jumping & Capturing Robot -インピーダンスに準拠した脚設計-, 第 21 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 2G16, 2003.
 82. 東森, 城野, 金子: 3D Dynamic Friction Closure に関する基本的考察, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2003 講演論文集, 1P1-1F-F2, 2003.
 83. 金子, 溝井, 東森: Dynamic Friction Closure の実験的考察, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2003 講演論文集, 1A1-1F-G5, 2003.
 84. 東森, 西尾, 金子: 単一ワイヤ駆動式ロボットの Dynamic Preshaping, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2003 講演論文集, 1A1-1F-G4, 2003.
 85. 井口 尚彦, 阪口 豊, 石田 文彦: 終点分散最小軌道は生体ノイズ特性に依存する, 日本神経回路学会第 13 回全国大会講演論文集, 82-83, 2003.
 86. 阪口 豊: プリズム適応における視覚情報の役割, 第 13 回日本神経回路学会全国大会, 200-201, 2003.
 87. 和田 克己, 阪口 豊: 主動筋と拮抗筋の同時収縮に関する考察, 計測自動制御学会 第 4 回システムインテグレーション部門講演会論文集, 119-120, 2003.

88. 阪口 豊：到達運動の計算モデル研究とその課題，日本視覚学会 2004 年冬季大会，シンポジウム招待講演。
89. 尾川 順子，並木 明夫，石川 正俊：学習進度を反映した割引率の調整，電子情報通信学会 ニューロコンピューティング研究会(一般セッション・非線形問題研究会，日本神経回路学会共催)(札幌，2003.2.4)／講演論文集，pp.73-78
90. 並木明夫，今井睦朗，石川正俊：捕球動作のための視覚フィードバック制御，計測自動制御学会 システムインテグレーション部門講演会（神戸，2002.12.20）／講演論文集，Vol.2，pp.219-220
91. 並木 明夫，石川 正俊：視覚情報に基づくオンライン軌道生成による捕球タスクの実現，日本ロボット学会創立 20 周年記念学術講演会（大阪，2002.10.14）／講演論文集，3M23
92. 今井睦朗，並木明夫，橋本浩一，金子真，石川正俊：視覚フィードバックを用いた高速ハンドシステムの開発，日本ロボット学会創立 20 周年記念学術講演会（大阪，2002.10.14）／講演論文集，3E 11
93. 並木 明夫，亀田 博，小林 清人，坂田 順，金子 真，石川正俊：軽量高速ロボット指モジュールの開発，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'02（松江，2002.6.9）／講演論文集，2P2-F04
94. 汐崎 充，藤井 敏美，片山 光亮，小野 将寛，岩田 穆：「ロボット制御のための柔軟な CDMA 方式シリアル通信ネットワークの構成法」，信学会 ICD 研究会，信学技報 Vol. 102 No. 399，ICD2002-115，2002 年 10 月
95. 片山光亮，岩田穆：「結合フェーズロックトループ回路を用いたパルスカップルドニューラルネットワークの実現」信学会 NC 研究会，信学技報 Vol. 102 No. 98，NC2002-1，2002 年 5 月
96. 東森充，竹中麗香，金子真，並木明夫，石川正俊：100G キャプチャリングシステム -Dynamic Preshaping-，計測自動制御学会 システムインテグレーション部門講演会（神戸，2002.12.20）／講演論文集，Vol.2，pp.215-216
97. 竹中麗香，東森充，金子真，並木明夫，石川正俊：100G キャプチャリングシステム -高速ビジョンを使った動体捕獲-，計測自動制御学会 システムインテグレーション部門講演会（神戸，2002.12.20）／講演論文集，Vol.2，pp.217-218
98. 金子，城野，辻：Dynamic Friction Closure(実験的考察)，ロボティクス・メカトロニクス講演会'02 講演論文集，2P2-F12，2002.
99. 金子，竹中，東森，石川：100G キャプチャリングシステムと高速ビジョン，情報処理学会研究報告，vol.2002，no.102，pp.35-38，2002.
100. 下条誠，金森克彦，明愛国，金森哉吏，石川正俊：高密度型触覚センサの開発 -液状感圧ゴムを用いた自由曲面型触覚センサの開発-，計測自動制御学会 システムインテグレーション部門講演会（神戸，2002.12.20）／講演論文集，Vol.2，pp.211-212
101. 内田 尚彦，阪口 豊：学習曲線の時間変化に着目した自己組織的強化学習アルゴリズム(2)，電子情報通信学会技術研究報告，NC2002-234，2003.
102. 井口 尚彦，阪口 豊：パルス型細胞モデルに基づく signal dependent noise 発生機構の検討，電子情報通信学会技術研究報告，NC2002-176，2003.
103. 遠藤さやか，阪口豊：運動制御解析にむけた 3 次元視線計測システム，計測自動制御学会 システムインテグレーション部門講演会（神戸，2002.12.20）／講演論文集，Vol.2，pp.209-210
104. 平山 雄介，阪口 豊：眼球運動に着目した情動解析の試み，計測自動制御学会 システムインテグレーション部門講演会（神戸，2002.12.20）／講演論文集
105. 内田 尚彦，阪口 豊：学習曲線の時間変化に着目した自己組織的強化学習アルゴリズム，第 12 回日本神経回路学会全国大会論文集，1-4，2002.

106. 井口 尚彦, 阪口 豊: 運動指令伝送路増強に基づく運動安定化モデルに関する考察, 第 12 回日本神経回路学会全国大会論文集, 327-330, 2002.
107. 村上 敏之, 阪口 豊: 筋特性に基づく上肢到達運動の運動指令生成モデル, 第 12 回日本神経回路学会全国大会論文集, 339-342, 2002.
108. 柴沼満, 灘谷演, 石井抱: 高速ビジョンに基づく実時間ジェスチャー認識システム, 計測自動制御学会 システムインテグレーション部門講演会 (神戸, 2002.12.20) / 講演論文集, Vol.2, pp.213-214
109. 橋本 浩一, 並木 明夫, 石川 正俊: ビジョンベースドマニピュレーションのための視覚運動アーキテクチャ, 計測自動制御学会 システムインテグレーション部門学術講演会 (名古屋,2001.12.21) / SICE SI-2001 講演論文集, pp.137-138
110. 並木 明夫, 中坊 嘉宏, 石川 正俊: ダイナミクスの整合に基づく高速マニピュレーション, 計測自動制御学会 システムインテグレーション部門学術講演会 (名古屋,2001.12.21) / SICE SI-2001 講演論文集, pp.153-154
111. 中坊 嘉宏, 並木 明夫, 石井 抱, 石川 正俊: 2 台の高速ビジョンを用いた 3 次元トラッキング, 計測自動制御学会 システムインテグレーション部門学術講演会 (名古屋,2001.12.21) / SICE SI-2001 講演論文集, pp.161-162
112. 並木明夫, 中坊嘉宏, 石川正俊: 高速視覚を用いたダイナミックマニピュレーションシステム, 第 19 回日本ロボット学会学術講演会 (東京,2001.9.19) / 予稿集, pp.389-390
113. 中坊嘉宏, 並木明夫, 石井抱, 石川正俊: 2 台の高速アクティブビジョンを用いた 3 次元トラッキング, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'01(高松,2001.6.10) / 講演論文集, 2A1-C1
114. 今村俊文, 山本美子, 麥田憲司, 長谷川尚哉, 馬場祥宏, 森江隆, 永田真, 岩田穆: エッジ検出機能を持つ CMOS イメージセンサを用いた高速ライントレーサ, 第 19 回日本ロボット学会, 1F33, 2001 年 9 月, 東京大学(東京).
115. 金子真 (広島大学): Dynamic Friction Closure, 計測自動制御学会システムインテグレーション部門学術講演会予稿集, 2001. (名古屋, 12 月 20 日-22 日)
116. 金子真 (広島大学): 100G キャプチャリングシステムへの挑戦. 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集, 2001. (香川, 6 月 8 日-10 日)
117. 白井達也 (鈴鹿工業高等専門学校): 非接触相を伴うマニピュレーション. 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集, 2001. (香川, 6 月 8 日-10 日)
118. 下条 誠, 金森 克彦, 石川 正俊: 低ヒステリシス型液状感圧ゴムの開発, 第 19 回日本ロボット学会学術講演会, pp.1211-1212, 2001
119. 下条 誠, 金森 克彦, 石川 正俊: 高密度型触覚センサの開発, 計測自動制御学会 システムインテグレーション部門学術講演会, pp.159-160, 2001.
120. 井口尚彦, 阪口 豊: 運動の安定化に関する一考察, 電子情報通信学会技術研究報告, NC2001-, 2002.
121. 和田克己, 阪口 豊: 骨格筋モデルに基づく到達運動制御メカニズムの考察, 電子情報通信学会技術研究報告, NC2001-, 2002.
122. 宮下英三, 阪口 豊: 上肢到達運動遂行中のサル運動野神経細胞活動の動力学パラメータによる定量化, 第 24 回日本神経科学・第 44 回日本神経化学合同大会予稿集, 256, 2001.
123. 阪口 豊, 高野 光雄: 内部モデルの信頼度に基づく強化学習のアルゴリズム, 第 11 回日本神経回路学会全国大会, 103-104, 2001.
124. 尾川 順子, 阪口 豊, 並木 明夫, 石川 正俊: 多様な制約に対するダイナミクス整合の学習, 第 19 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 711-712, 2001.
125. 阪口 豊, 高野 光雄: 環境変化への適応と文脈切替え, 第 16 回生体・生理工学

シンポジウム論文集, 157-160, 2001.

126. 藤原 護, 阪口 豊: 盲点領域における動刺激のフィリングイン, *Vision*, 13, 193-194, 2001.
127. 並木明夫, 石川正俊: 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, 第17回日本ロボット学会学術講演会, 草津(立命館大学), pp.1209-1210, 2000.
128. 並木明夫, 石井抱, 石川正俊: 視力覚フィードバックを用いた小型作業支援ツールの開発, *ロボティクス・メカトロニクス'00 講演会論文集*, 2P2-76-101, 2000.
129. 尾川 順子, 阪口 豊, 並木 明夫, 石川 正俊. ダイナミクス整合にもとづく感覚 運動統合--ターゲットトラッキングにおける戦略の学習--電子情報通信学会技術研究報告, NC2000-169, 2001.
130. 池田立一, 下条誠, 並木明夫, 石川正俊, 満洲邦彦, ワイヤ埋込方式触覚センサの開発, 第17回日本ロボット学会学術講演会, 草津(立命館大学), 2000年9月12日
131. 阪口 豊. 目標の位置や性質が知覚的フィリングインに与える影響. 第23回日本神経科学大会第10回日本神経回路学会大会合同大会抄録集: 100, 2000.
132. 阪口 豊, 高野 光雄. 強化学習と教師あり学習を組み合わせたプリズム適応のモデル, 電子情報通信学会技術研究報告, NC2000-169, 2001.
133. 白井達也, 金子 真, 原田研介, 辻 敏夫: 「拡張自己姿勢変形動作の提案と把握動作への応用」 第17回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.173-174, 1999
134. 原田, 金子, 古寺, 辻: 「複数対象物の Active Force Closure」 第17回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 373-374, 1999
135. 棚橋ひとみ, 渋谷惇夫, 下条誠: 感圧導電性ゴムを用い頭圧分布の計測法, *日本繊維製品消費科学会*, Vol.40, No.9, pp.57-62, 1999.
136. 安河内建, 阪口 豊: 注意の動きに着目した図地反転知覚のモデル, 電子情報通信学会技術研究報告, NC99-177, 2000.

② プレス発表

- 平成15年12月17日, 高速バッティングロボットシステムの開発
- 平成14年10月7日, 超高速ロボットハンドの開発

(3) 特許出願 (国内1件, 海外0件)

① 国内

発明者: 下条誠, 岩下貴司, 牧野良太

発明の名称: 法線・接線方向力の検出を可能とする2次元分布型力センサ

出願番号: 特願 2003-323425号

出願日: 平成15年9月16日

(4) 新聞報道等

① 新聞報道

- 2003.10.18, 新聞夕刊 (毎日新聞) : 高速バッティング
- 2003.10.18, 新聞朝刊 (朝日新聞, 読売新聞, 産経新聞, 日本経済新聞, 日経産業新聞, 日刊工業新聞, 日本工業新聞) : 高速バッティング
- 2002.10.09, 新聞朝刊 (朝日新聞, 毎日新聞, 産経新聞, 日経産業新聞, 日刊工業新聞, 日本工業新聞) : 高速ロボットハンド

② テレビ報道

- 2004.06.25, テレビ朝日 野球その素晴らしき世界
- 2004.05.05, 日本テレビ ニュース
- 2004.05.02, NHK ふれあいロボット広場
- 2004.04.24, NHK サイエンスゼロ
- 2003.12.19, フジテレビ めざましTV
- 2003.12.17, 日本テレビ ニュースプラス1
- 2003.12.17, NHK ニュース, TBS ニュース, TV 朝日ニュース
- 2003.12.16, TV 東京 ガイアの夜明け
- 2003.5, NHK2003年鉄腕アトムはつくれるか
- 2003.4, NTV 所さんの目がテン!
- 2002.10, TBS ニュース 23

③ 雑誌記事

- 週刊アスキー (2004.10) : CREST シンポジウム, 高速キャッチング
- 月刊アスキー4月号(2004.4): バッティング
- OplusE Vol.24, No.11, P.1197 : 高速ロボットハンド
- D&M 日経メカニカル 2002年11月号(no.578) P25 : 高速ロボットハンド

④ 受賞

- 2004 年, International Conference on Robotics and Automation, Best Vision Paper Award Finalist, Yoshiro Imai, Akio Namiki, Koichi Hashimoto, and Masatoshi Ishikawa : Dynamic Catching Using a High-Speed Multifingered Hand and a High-speed Vision System, 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2004) (New Orleans, USA, 2004.4.26-5.1) / pp.1849-1854
- 2003 年, 計測自動制御学会学術奨励賞(研究奨励賞), 東森充, 竹中麗香, 金子真, 並木明夫, 石川正俊 : 100G キャプチャリングシステム -Dynamic Preshaping-, 計測自動制御学会 システムインテグレーション部門講演会論文集, Vol.2, pp.215-216, 2002.
- 2003 年, 計測自動制御学会システムインテグレーション部門 奨励賞, 並木明夫, 今井睦朗, 石川正俊 : 捕球動作のための視覚フィードバック制御, 計測自動制御学会 システムインテグレーション部門講演会 (神戸, 2002.12.20) / 講演論文集, Vol.2, pp.219-220,
- 2003 年, 6th Japan-France Congress on Mechatronics and 4th Asia-Europe Congress on Mechatronics, Paper Award, Makoto Shimojo, Ryota Makino, Hironori Ogawa, Takafumi Suzuki, Akio Namiki, Takashi Saito, Masanari Kunimoto, Masatoshi Ishikawa, and Kunihiko Mabuchi : Development of a System for Experiencing Tactile Sensation from a Robot Hand by Electrically Stimulating Sensory Nerve Fiber, 6th Japan-France & 4th Asia-Europe Mechatronics Congress (Saitama, Japan, 2003.9.11) pp. 471-476
- 2003 年, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス部門 ROBOMECH 賞受賞, 下条 誠, 牧野了太, 小川博教, 鈴木隆文, 並木 明夫, 斎藤 敬, 石川正俊, 満洲邦彦 : ロボットハンドからの接触感覚を触覚神経経路により提示するシステムの開発, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'02(松江,2002.6.10)/講演論文集, 2P2-E08
- 2001 年, 日本ロボット学会論文賞, 並木明夫, 石川正俊: 視触覚フィードバックを用いた最適把握行動, 日本ロボット学会誌, Vol.18, No.2, pp.261-269 (2000),
- 2000 年, 日本ロボット学会学術奨励賞, 並木明夫, 中坊嘉宏, 石井 抱, 石川正俊 : 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(仙台, 1999.3.31)/予稿集, pp 1-6,

7. 結び

5年間という長期に渡る研究プロジェクトであったが、終わりを迎える今、非常に短かったように感じられる。研究を進めてく上で、様々な新しい知見が得られたり、試作したシステムが予想以上の驚くような性能を実現できたりと、次から次へと興味深い課題や結果が導かれるように現れ、我々の研究意欲をかき立ててくれた。個人的な感想で恐縮であるが、十分に研究を楽しむことができた5年間であった。

プロジェクト開始した1999年当時、我々東大のグループでは、高速ビジョンシステムを利用したロボットマニピュレータの制御に着手した状態であった。高速視覚をロボット制御に適用した結果は、実際に見ると想像を超えたインパクトがあり、より深く研究を進める必要があると感じられた。一方で、視覚以外の部分は旧来の技術そのままであり、性能面で不満の残るものであった。また、研究を進めていくと、どうも視覚だけを高速化したのではダメで、計算アルゴリズムなどの処理系、アクチュエータなどの運動系、視覚以外の感覚系など、構成する全ての要素を高速化し、かつバランスのとれたシステム設計を行う必要があることが、強く感じられるようになった。その場合、人間をただそのまま真似るのではなく、工学システムに適した形で統合する設計思想や設計理論を考える必要があるのではないかと思われた。

まさに、このようなことを考えていたときに、CREST事業に採択されたことは非常に幸運なことであった。CRESTプロジェクトのもとに、ロボットを構成する主要な要素に関して、その道の第一線の研究者に集まっていただき、非常に強力な研究チームを組むことができた。最終的に、脳システム、アーム、ハンド、視覚、触覚の各要素に関して、従来のレベルを超える高性能なシステムを実現することができた。同時に、人間の感覚運動統合機能から認識・制御について、いくつかの独自の視点からみたアルゴリズムを提案することができた。これらの成果は、従来をはるかに超える性能を持つということで高い評価を得ることができたと自負している。

特に、ロボットハンドに関しては、平成14年9月に東京大学で記者会見を開いて発表を行った。発表と実演は多くの記者の強い関心を集めたようであり、取材の結果は多くのTV、新聞に掲載されることとなった。平成15年12月には、高速バッティングの記者会見を開いて発表を行った。実演においては、実質150球もの球を打ち返すことに成功し、高い信頼性を持つことを実証することができた。これらは、新聞やテレビなどで広く一般の方にも研究成果を知らせることができた。

5年間を終えて思うことは、ロボットの性能は、まだ人間を部分的にしか追い越していないということである。近年、ロボット研究は盛んであるが、理論面やソフトウェア面に多くが流れてしまっているように感じている。ハードウェアにおけるブレークスルーなしには、早晚限界に行き着いてしまい、ロボット研究そのものが停滞してしまうことを危惧しており、ブレークスルーを産み出すハードウェアの技術と、理論やアルゴリズムの技術をバランス良くやっていく必要があると思う。

ハードウェアを高性能化するためには、どうしてもお金がかかってしまう。特に、カスタマイズされた試作品は、設計などの初期費用がかかるために、高額になりがちであり、それが研究のネックになることが多々ある。今回のプロジェクトでは、CREST事業の制度や予算運用面で非常に柔軟であることに何度も助けられた。非常に幸せな研究環境においていただけたことを心から感謝している。

本研究は、幸運にも継続研究が認められ、更なる研究の機会を与えられた。この機会を生かして、新しいチャレンジをしていきたいと考えている。最後に、このような機会を与えて頂いた領域「脳を創る」総括甘利俊一先生をはじめ領域アドバイザーの委員の先生方、また研究を強力にサポートしていただいた科学技術振興機構の皆様に深く感謝の意を表したいと思います。



2000年1月29日 CRESTチームミーティング（熱海）にて