

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

並木 明夫 中坊 嘉宏 石井 抱 石川 正俊

Sensory-Motor Fusion Grasping System Using High Speed Sensory Feedback

Akio NAMIKI, Yoshihiro NAKABO, Idaku ISHII, and Masatoshi ISHIKAWA

東京大学大学院工学系研究科

E-mail : namik@k2.t.u-tokyo.ac.jp

URL : <http://www.k2.t.u-tokyo.ac.jp/~sfoc/>

Abstract: In most conventional manipulation systems, changes in the environment can not be observed in real time because sensory processing is too slow. As a result the system is powerless under dynamic changes or sudden accidents. To solve this problem we have developed a grasping system using high speed sensory feedback. This is a multi-fingered hand-arm with a hierarchical parallel processing system and a high speed vision system called SPE-256. The most important feature of the system is the ability to process sensory feedback at high speed, that is, in about 1 ms. By using an algorithm with parallel sensory feedback in this system, grasping with high responsiveness and adaptiveness to dynamic changes in the environment is realized.

Key Words: grasping, sensory-motor fusion, high speed visual feedback, hierarchical parallel architecture

1. はじめに

人間の手は優れた把握能力を持っており、環境の状態に応じた複雑なタスクを実現することができる。これは一つには、人間が環境の変化を瞬時に判断する優れた認識能力を持っているためである。このことは、実環境で動くマニピュレーションシステムにおいても、認識能力の高速化が必要になることを示している。

このような考えのもとに、従来より、実時間でセンサフィードバック、特に実時間視覚フィードバックを用いた把握システムの研究が行われてきた^{1),2)}。これらのシステムでは、視覚センサとして CCD カメラを用いているために、視覚処理はビデオフレームレート 30Hz 以下のレートで行われていた。これに対して、ロボット制御に必要な処理レートは 1kHz とされており³⁾、視覚処理のレートは制御レートに比べて大幅に低いものとなっていた。このため、センシングの結果を直接的に把握制御に用いることができず、環境の変化に対して敏速に対応することができなかった。

一方、近年、ハードウェア的に並列化されたデバイスに基づいた高速視覚システムの研究⁴⁾と、そのロボット制御への応用の研究⁵⁾が進められている。このような高速視覚システムを用いることによって、従来の視覚システムにおける処理の遅れの問題が解決され、実時間で視覚情報を把握制御に用いることが可能となる。

このような背景のもとで、我々は、高速視覚によって実現される環境変化に対する高い応答性能と、把握システムにおいて要求される多様な環境に対応した汎化能力を両立させるために、視覚を含む複数の高速センサフィードバックを用いた階層並列情報処理システムを構築した^{6),7)}。また、このシステム上で、動的に変化する把握環境に対応した高速な把握・操り動作を実現した。本論文では、本システムのアーキテクチャと、その上で行った把握実験について説明し、その有効性について議論する。

2. 階層並列高速センサフィードバックアーキテクチャ

一般に、実環境で動作するシステムでは、多数のセンサとアクチュエータを実時間で扱うことが要求され、これらを効率的に処理するためには階層並列分散構造が有効であることがいわれている。これに関して、Albus は人間をモデルとした階層並列処理モデルを提案しており⁸⁾、Brooks は、センサとアクチュエータが直結されたモジュールを階層的に積み重ねたシステム構造として、サブサンクションアーキテクチャを提案している⁹⁾。しかし、これらのモデルは一般的な指針を示してはいるが、システムの構築方法に具体性が欠けるために、実際に階層並列構造を構築するためには、別に新たな指針が必要とされる。

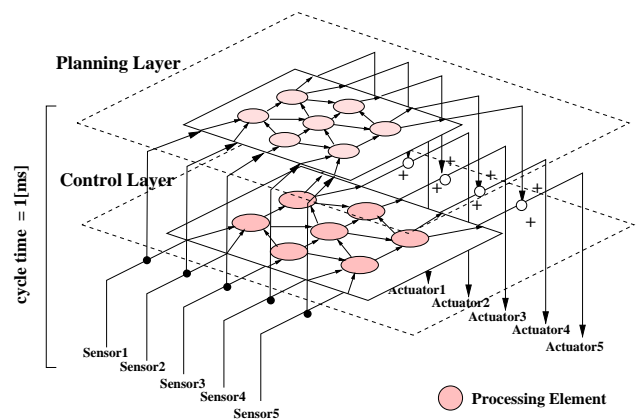


Fig. 1 Hierarchical Parallel Architecture Based on High-speed Sensory Feedback

この問題に対して、本システムでは特にセンサフィードバックの高速性を重視することにし、処理の高速性を保証した階層並列アーキテクチャを構築する。この概念図を Fig.1に示す。これは、高速センサフィードバックを基本要素とした階層並列構造であり、全てのフィードバック演算がサイクルタイム

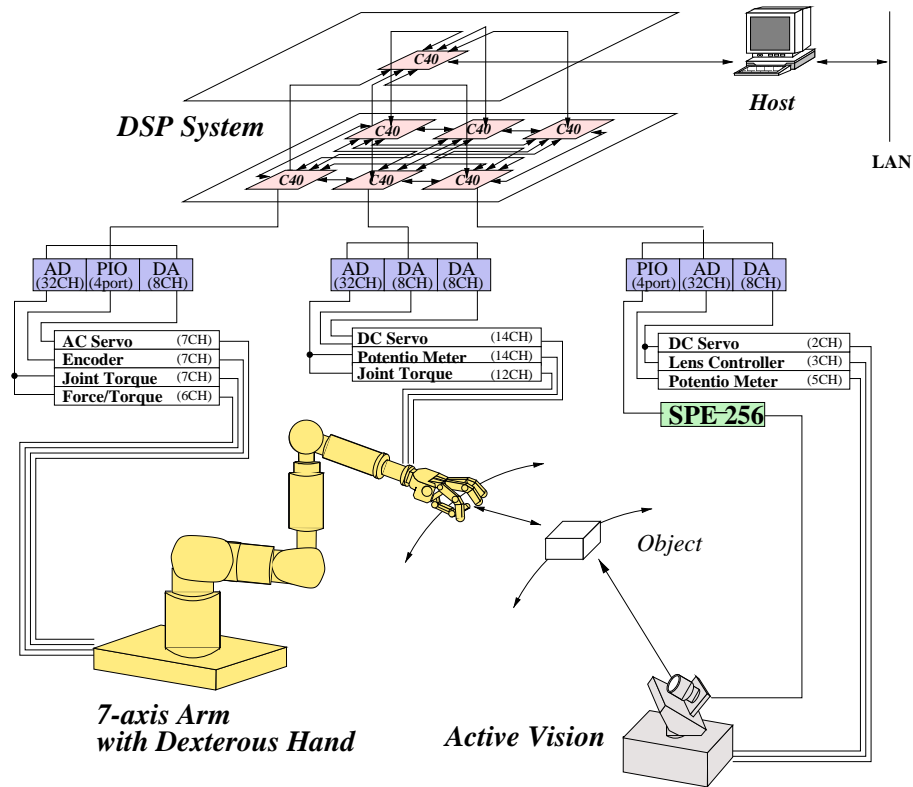


Fig. 2 Architecture of 1ms Sensory-Motor Fusion System

1ms という高速なレートで処理される。

ここでの階層並列構造は処理時間ではなく、処理の内容によって構成されるものであり、様々な環境に対応した多様な行動を生成するために用いられる。階層間のサイクルタイムの違いは存在せず、全ての処理の高速性が保証されるために、多様な環境変化に対して俊敏な対応能力が実現される。

なお、このアーキテクチャではフィードバックのサイクルタイムを 1ms としているが、これは、ロボットなどの機械システムを機械的共振をおこさずに安定に制御するために必要なサイクルタイムとして知られている³⁾。本システムでは、把握システムの安定性を保証するために、全てのセンサフィードバックを 1ms に統一することになっている。

3. 1ms 感覚運動統合システム

第2節で提案したアーキテクチャに基づいた把握システムとして、1ms 感覚運動統合システムを構築した。このシステムは、視覚を含む全てのセンサフィードバックを約 1ms のサイクルタイムで処理する能力を持っている。その処理結果は直接マニピュレータ制御に用いられるために、環境の変化に対する敏速な行動が実現される。

Fig.2 にシステムアーキテクチャを、また、Fig.3 にシステムの全体像を示す。システム全体は、DSP サブシステムとアクティブビジョンサブシステム、ハンドアームサブシステムの3つの要素から構成されている。

3.1 DSP 階層並列情報処理サブシステム

DSP サブシステムは、TMS320C40 (Texas Instrument Ltd.) を階層並列的に並べたマルチプロセッサシステムであ



Fig. 3 1ms Sensory-Motor Fusion System

り、センサフィードバックを 1ms のサイクルタイムで処理するための主要部分となる。

TMS320C40 は 275 MOPS の計算能力を持つ浮動小数点 DSP であり、高い実時間演算能力を持つ。また、6つの外部通信ポート (転送速度: 20 Mbyte/sec) を持っており、マルチプロセッサ構成に適している。本サブシステムは、7つの C40 を 1対1 に接続することで、通信のボトルネックが最小になるように構成されている。

また、各 C40 は I/O を通じて直接 ロボットシステムと接続されている。これらの I/O ポート としては多数のセンサ情報に対応するために、A/D 変換器 (12bit・64CH)、D/A 変換器 (12bit・24CH)、デジタル IO (8bit・8ポート) が

用意されている。これらは、各 DSP に分散して配置されているので、I/O ボトルネックを小さく抑えることができる。

3.2 アクティブビジョンサブシステム⁵⁾

アクティブビジョンサブシステムは、視覚情報処理を 1ms のサイクルタイムで実現するための中心となる部分であり、高速視覚処理を行うビジョンチップシステム SPE-256 と視線を変更するための 2 軸アクチュエータ部分からなる。

SPE-256 は $16 \times 16 = 256$ 個の PE(Processing Element) と、 16×16 素子の PIN フォトダイオード (PD) アレイによって構成されている。全ての PD は PE と一対一に結線されており、その出力は全画素並列に取り出されて処理される。また、各 PE は 24bit のレジスタを持つ 4 近傍接続の SIMD 型プロセッサであり、AND, OR, XOR 等の基本的なデジタル演算が可能なプロセッサである。この PD と PE の一体化構造により、入力画像の各画素に対して完全並列な処理が可能となり、従来のビデオフレームレート (30Hz) の限界を超えた高速な視覚処理が可能となる。この SPE-256 はビジョンチップのスケールアップモデルであり、現在、次世代のモデルとして、集積化を進めたビジョンチップ S³PE の開発が進められている⁴⁾。

一方、アクチュエータ部は 2 軸 (チルト, パン) の自由度を持っており、視線を任意の方向に制御して、SPE-256 の可視範囲を広げたり、移動物体への追従を実現するために用いられる。

SPE-256 とアクチュエータの制御には、DSP サブシステムの中で専用の DSP が 1 つ割り当てられ、全てのインストラクションと制御指令はその DSP から送られる。

3.3 ハンドアームサブシステム

ハンドアームサブシステムは、高速なマニピュレーションを実現するための中心となる部分であり、4 本指・14 自由度の多指手を装着したマニピュレータである。

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

一方、アーム部 (三菱重工製) は 7 関節 7 自由度を持つ冗長マニピュレータである。センサとしては、各関節にエンコーダが、また、手首には 6 軸力覚センサが装備されている。

DSP サブシステムとの通信は、ハンドとアームのそれぞれに対して専用に DSP が割り当てることによって行われる。

4. 高速把握行動

第 2 節で議論した階層並列高速センサフィードバックアーキテクチャに基づいて、高速把握アルゴリズムを開発した。

このアルゴリズムの方針は、センサフィードバックの高速性を利用することで、予測や補間などの処理を用いずに、複雑なタスクを高速に実現することである。この方針に基づいて構成した高速把握アルゴリズムを Fig. 4 に示す。これは、高速センサフィードバックを並列に並べることによって構成

されており、アクティブビジョン、アーム、ハンドの 3 つの部分に関する処理に一つずつ DSP を割り当てることで実現されている。以下では、各要素ごとに詳しく説明する。

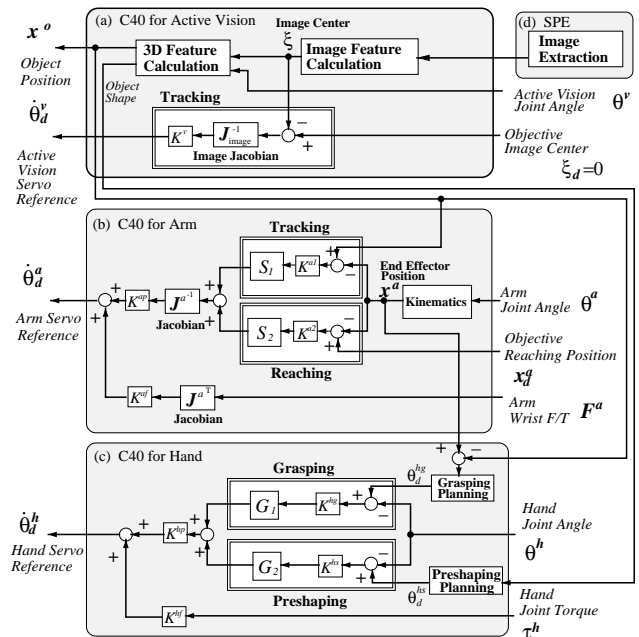


Fig. 4 Algorithm of High Speed Grasping

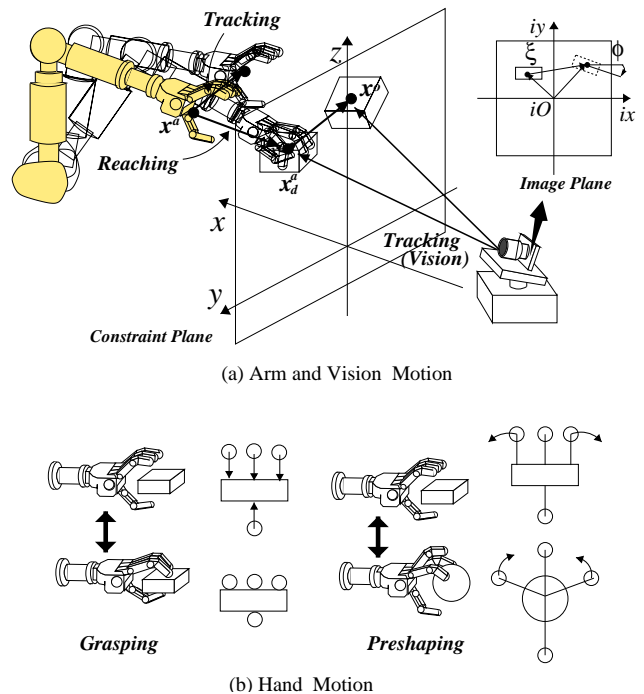


Fig. 5 Motion of High Speed Grasping

4.1 アクティブビジョンのためのセンサフィードバック

アクティブビジョン制御用の DSP では、(1) 高速視覚処理と (2) ターゲットトラッキング の 2 つの処理が実行される。処理のブロック図を Fig.4(a) に、その動作を Fig.5(a) に示す。

まず、高速視覚処理については、最初に、SPE-256を用いた対象画像の抽出が行われる¹⁰⁾。次に、この抽出画像に対して、画像重心 $\xi = [\xi_{ix}, \xi_{iy}]^T \in \mathbf{R}^2$ と傾き角度 $\phi \in \mathbf{R}$ 、大きさ等の画像特徴量が計算される。最後に、これらの画像特徴量を用いて、対象の位置 $x^o \in \mathbf{R}^3$ や姿勢、対象の大きさや形状などの3次元パラメータの計算が行われる。これらの画像特徴量計算と3次元パラメータの計算はDSP上で行われる。

ここで、現状では、アクティブビジョンは単眼であるために、画像だけでは3次元パラメータは計算することは困難である。そこで、対象の動きがあらかじめ与えた拘束平面上に拘束されるものと仮定して、その平面パラメータを用いることで計算を行っている。拘束平面はFig.5(a)に示すように、向い合せに配置したアームとビジョンの中間に配置した。

一方、ターゲットトラッキングは、視線を動的に変化させることで、高速に移動する把握対象を常に視野内に収めるために実行される。これは、対象の画像重心 ξ の目標位置誤差をフィードバックすることによって実現される⁵⁾。

4.2 アームのためのセンサフィードバック

アーム制御用のDSPでは、(1)対象の動きに対するトラッキング行動と、(2)把握位置へのリーチング行動、の2つの処理が実行される。これらの動作の処理内容をFig.4(b)に、その様子をFig.5(a)に示す。

トラッキング行動の目的は、対象位置 x^o と手先位置 $x^a \in \mathbf{R}^3$ の位置誤差を一定に制御することで対象の動きを相殺し、把握に適した環境を保持することである。一方、リーチング行動の目的は、手先の位置 x^a を把握に適した目標位置 $x_d^a \in \mathbf{R}^3$ に近づけることである。ここでは、その目標値 x_d^a は外部から与えている。

アーム全体の行動はこれらの動作を重ね合わせることで実現される。ただし、それぞれの行動に、お互いに直交する行列 S_1 、 S_2 を掛けることによって、トラッキング行動を拘束平面に水平な方向(Y,Z軸方向)、リーチング行動を拘束平面と直交する方向(X軸方向)に分配しており、相互の干渉は存在しない。

これらの位置制御に加えて、手首の力覚センサの値 $F^a \in \mathbf{R}^6$ を返すことで、コンプライアンス制御を行っている。また、ここでは手先の位置のみについて説明しているが、姿勢角成分3自由度に関しても同様の処理を行っている。

4.3 ハンドのためのセンサフィードバック

ハンド制御用のDSPでは、(1)指を対象に近づけて把握するグラスピング行動と、(2)対象の形状に合わせてハンドの形状を変化させるプリシェーピング行動が実行される。これらの処理をFig.4(c)に、その動作をFig.5(b)に示す。

ここでは、グラスピングを各指を対象表面に対して直交した方向に指を近づける動作とし、一方、プリシェーピングを対象表面に対して水平な方向へ動かす指の動作として、ハンドの最終的な動作はこれらを重ね合わせることで実現した。Fig.4(c)において、それぞれの動作の目標位置誤差に掛けられている係数行列 G_1 、 G_2 は動作を分離するための行列である。これらはお互いに直交しているため、重ね合わされた動

作に干渉は存在しない。

また、グラスピングの目標値 $\theta_d^{hg} \in \mathbf{R}^{14}$ は、対象と手先の位置誤差 $x^o - x^a$ の関数として決定されているため、グラスピング動作とリーチング動作は同期して行われる。

一方、プリシェーピングの目標値 $\theta_d^{hs} \in \mathbf{R}^{14}$ は、高速視覚によって認識された対象の形状によって決定される。ただし、現状の設定では、視覚が単眼であることと、その解像度が低いことのために、複雑な対象の形状を認識することは困難である。そこで、本システムでは、対象を直方体と球の2つに限定することにして、円形の画像が認識された場合には把握対象は球であり、長方形の画像が認識された場合には把握対象は直方体であると仮定して、あらかじめプリシェーピングの目標値を決定した。

また、これらの位置制御に加えて、関節トルク $\tau^h \in \mathbf{R}^{14}$ をフィードバックしてコンプライアンス制御を行っている。

4.4 把握実験

対象としては、直方体と球の2種類の物体を用意し、それを人間の手で自由に動かすことにした。また、リーチング行動の目標値 x_d^a は、つかむ、離すという2つの動作を繰り返す周期関数として与えた。

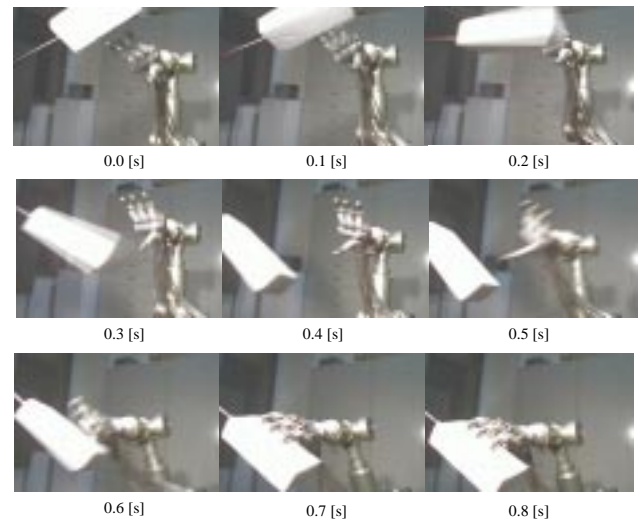


Fig. 6 Experimental Result: Grasping of a Hexahedron

Fig.6とFig.7に、サイクルタイムを1.5msとしたときの実験結果を、0.1sごとの連続写真にして示す。

Fig.6は、直方体に対する把握行動の結果を示している。最初の0.0sから0.4sでは、アームのトラッキング動作の様子が示されている。次に、0.5sからリーチングとグラスピングが開始され、0.8sで把握を完了している。

一方、Fig.7は、球体に対する把握行動の結果を示している。最初の0.0sから0.5sでは、画面上を左から右に移動する白球を追従するアームのトラッキングの様子が示されている。0.6sからリーチングとグラスピングが開始され、0.8sで把握が完了している。

また、これらの結果では明示されていないが、プリシェーピングも常に行われており、対象物体の変更に対応して把

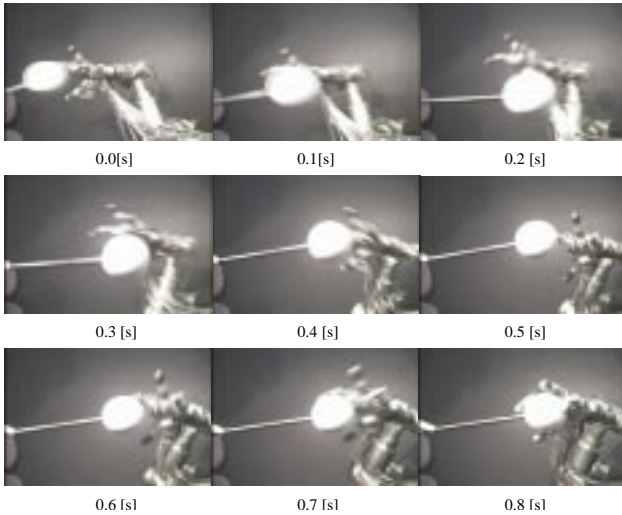


Fig. 7 Experimental Result: Grasping of a Sphere

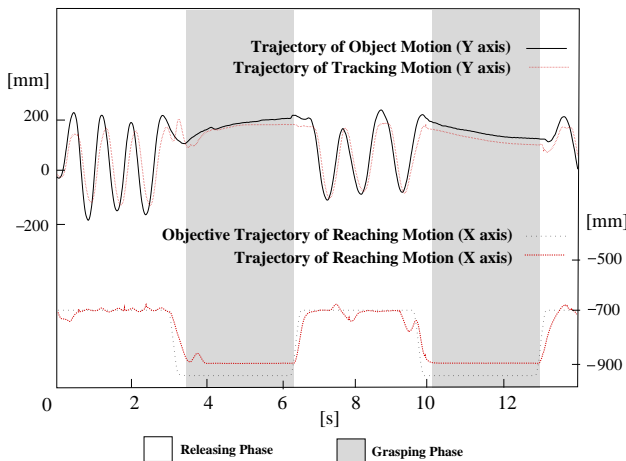


Fig. 8 Feedback Response of High Speed Grasping

握形状が変更される。

次に、Fig.8 に手先と把握対象の軌道を表示する。このグラフの上部には、対象位置 x^o と手先位置 x^a の Y 座標の時間経過が表示されており、トラッキング動作の応答に対応している。これより、視覚によって認識される対象の動きに対して敏速に追従している様子が見える。

一方、下部には、リーチング目標軌道 x_d^a と手先位置 x^a の X 座標の時間経過が表示されており、リーチング動作の応答に対応している。これより、目標軌道に従って、つかんだり、放したりを繰り返している様子が見える。また、トラッキングとリーチングが独立して行われる様子も示されている。

また、Fig.8における斜線部分は、ハンドが対象を把持している状態を表している。この部分の軌道の変化を見ると、物体が安定に把持されている様子が見える。これは、指と手首の力覚センサを用いたコンプライアンス制御による。

以上で行った実験では、把握対象を人間が動かしているために、その軌道は規則性が低く、その動きを予測することは困難である。従来のシステムでは、この予測不可能性がシステムの追従能力を向上させる上での妨げになっていたが、本

システムでは、高速センサフィードバックを用いることでこの問題を克服し、高速把握を実現している。

5. 障害物の高速回避行動

次に、高速把握アルゴリズムの応用の一例として、視覚を用いた障害物の回避行動を実現する。これは、Fig.9(a) に示すように、把握物体に障害物が接近して来た場合に、把握物体を引き離して衝突を回避するような行動である。

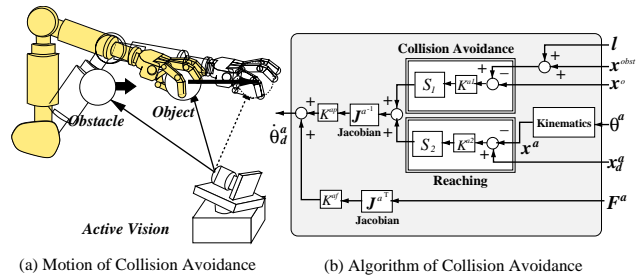


Fig. 9 Algorithm of Collision Avoidance

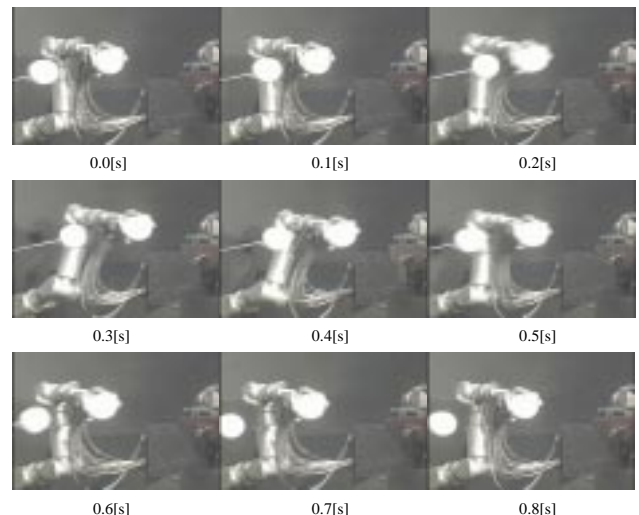


Fig. 10 Experimental Result: Collision Avoidance

回避動作を、高速把握アルゴリズムにおけるアームのトラッキング動作の代わりに、障害物から把握対象を一定の距離だけ引き離すような回避動作に対応したセンサフィードバックを追加することで実現した。これに関して、Fig.9(b) にアームの制御ブロック図を抜き出して表示する。ここでは、把握対象の位置 x^o と障害物物体の位置 $x^{obst} \in R^3$ の差のフィードバックを追加することで回避制御を行っている。なお、 $l \in R^3$ は対象と障害物の間のとるべき距離ベクトルを表している。

Fig.10 に回避行動の結果を 0.1s ごとの連続写真にして表示する。これを見ると 0.2s の時点で障害物が把握物体に近接したことが認識され、0.2s から 0.3s の間で把握物体を障害物から横に引き離す行動が実現されている。その後の 0.4s から 0.8s では、障害物が除かれるのに対応して把握物体をもとの位置に戻している。ここでは、結果として回避行動は約 0.1s という短時間で実現されている。

6. 人間との握手

高速把握アルゴリズムのもう一つの応用例として、人間との握手を実現した。これは、人間の手の動きを視覚によって認識し、その位置にハンドを持っていき、柔らかく握りながら握手するというタスクである。これは、高速な視覚フィードバックによる人間の手の位置の認識と、カフィードバックによる柔らかな力制御という、センサフィードバックの融合によって実現される。

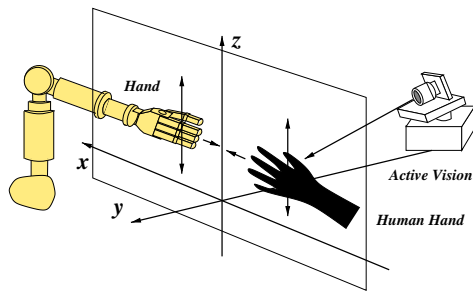


Fig.11 Motion of Handshaking

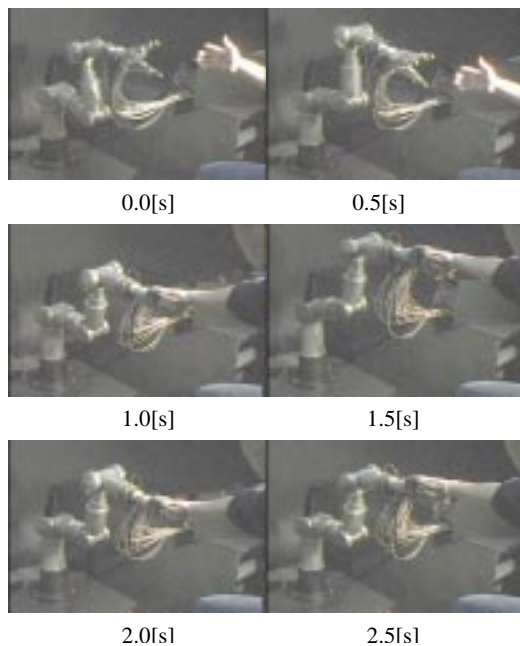


Fig.12 Experimental Result: Handshaking

握手タスクは、第4節で説明した高速把握行動とほとんど同じアルゴリズムで実現される。ただし、人間の手の位置がよく観測できるように、アクティブビジョンをハンドアームの向きと 90° 直交した位置に配置しており、拘束平面はXZ平面とした。この様子をFig.11に示す。この平面上で、Z軸方向の動きをトラッキングに、X軸方向の動きをリーチングにそれぞれ対応させた。リーチングでは、人間が手を差し出すのに同期して行われるように目標値を計算した。

Fig.12に実験結果を0.5sごとの連続写真にして示す。まず、0.0sから0.5sでは、人間の手がZ軸方向に上下するの

に対して、ハンドの位置が追従している様子を表している。次に1.0sでお互いが手を突き出して握手が実現されている。その後の1.5sから2.5sでは、人間が上下に手を振るのに追従して、ハンドを上下に振っている様子が示されている。

これらの結果は、高速センサフィードバックによって、人間の動作に対応した安全なロボット制御が実現できる可能性を示している。

7. まとめ

本論文では、高速センサフィードバックに基づく階層並列処理構造を用いることで、環境の変化に対する高い応答性能を持つ把握システムを構築した。このシステム上で把握実験を行い、高速かつ予測不可能な動きをする対象に対する高速な把握動作や障害物回避、握手を実現した。これらの成果は、センサフィードバックの高速化が実環境のマニピュレーションで有効なことを示している。

現在、高速センサフィードバックを汎用的なマニピュレーションタスクに対応させるためのアルゴリズムの研究と、フィードバックの応答性能を高めるためのシステム開発を進めている。また、把握・操りのほかの様々なアプリケーションに対しても、高速センサフィードバックの応用を進めている^{11), 12)}。

参考文献

- 1) P.K. Allen, B. Yoshimi, and A. Timucenko. Real-time visual servoing. *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp. 2376-2384, 1991.
- 2) W. Hong and J.E. Slotine. Experiments in hand-eye coordination using active vision. *Proc. 4th Int. Symp. on Experimental Robotics (ISER'95)*, 1995.
- 3) 垣本. ロボット工学ハンドブック, V.2.2 ソフトウェアサーボの実現, pp. 532-534. コロナ社, 1990.
- 4) 小室, 鈴木, 石井, 石川. 汎用プロセッシングエレメントを用いた超並列・超高速ビジョンチップの設計. *電子情報通信学会論文誌*, Vol. J81-D-I, No. 2, pp. 70-76, 1998.
- 5) 中坊, 石井, 石川. 超並列・超高速ビジョンを用いた1msターゲットトラッキングシステム. *日本ロボット学会誌*, Vol. 15, No. 3, pp. 105-109, 1997.
- 6) 並木, 中坊, 石井, 石川. 高速視覚を用いた把握行動システム. *ロボティクス・メカトロニクス '98 講演会講演論文集*, 1998.
- 7) 並木, 中坊, 石井, 石川. 高速視覚を用いた多指ハンドによる物体操作. 第16回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 699-700, 1998.
- 8) J.S. Albus. Outline for a theory of intelligence. *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. 21, No. 3, pp. 473-509, 1991.
- 9) R.A. Brooks. A robust layered control system for a mobile robot. *IEEE J. Robotics and Automation*, Vol. RA-2, No. 1, pp. 14-23, 1986.
- 10) I. Ishii, Y. Nakabo, and M. Ishikawa. Target tracking algorithm for 1ms visual feedback system using massively parallel processing vision. *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 2309-2314, 1996.
- 11) Y. Nakabo and M. Ishikawa. Visual impedance using 1ms visual feedback system. *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 2333-2338, 1998.
- 12) 大脇, 中坊, 並木, 石井, 石川. 視触覚モダリティ変換を用いたリアルタイム実環境仮想接触システム. *電子情報通信学会論文誌*, Vol. J81-D-II, No. 5, pp. 918-924, 1998.