

ビジュアルフィードバックのための 1ms 列並列ビジョン (CPV) システム

○中坊 嘉宏(東大) 石川 正俊(東大) 豊田 晴義(浜ホト) 水野 誠一郎(浜ホト)
東京大学大学院工学系研究科 浜松ホトニクス

1ms Column Parallel Vision (CPV) System for Visual Feedback

○Yoshihiro NAKABO, Masatoshi ISHIKAWA, Univ. of Tokyo,
Haruyoshi TOYODA, Seiichiro MIZUNO, Hamamatsu Photonics K. K.
E-mail : nakabo@k2.t.u-tokyo.ac.jp

Abstract: Recently, robot control using a real-time visual feedback has been improved which is called visual servoing. But for such an application, conventional vision systems are too slow because of CCD cameras restricted by video frame rate (NTSC 30Hz, PAL 25Hz). To solve this problem, we have developed a 1ms vision system whose frame rate is far faster than the conventional systems.

Our 1ms vision system has a 128×128 PD array and an all parallel processor array connected each other in column parallel, so that the bottleneck of an image transfer is removed. In this system, a 1ms visual feedback is realized, image feature value is extracted in 1ms cycle-time in an application of visual servoing. We have also developed a high speed Active Vision System (AVS)-II which makes a gaze of vision system to move at high speed. In this paper, we will show a detail of our 1ms vision system and its performance by some experiments.

Key Words: Visual Servo, Visual Tracking, Parallel Image Processing, Active Vision, Robot Vision

1. はじめに

ビジュアルフィードバックによってロボットの高速かつ動的な制御を実現したいという要求が高まっている [1, 2]. 例えば近年注目されているビジュアルサーボでは、画像からリアルタイムに抽出される特徴量をもとにサーボループを構成し、視覚による直接制御を実現している。

ところがこのように制御の高速性を高めていくと、対象やロボットの運動に対応して、センサ、アクチュエータ、制御系を一体としたシステムのダイナミクスについて考慮し、適切に設計することが必要となる。そのためにはビジョンシステムが対象やロボットの高速な動きに追従し、高速な処理と特徴量のフィードバックが実現されなければならない。

これに対して従来のビジョンシステムはこの要求を満たすものとは言えなかった。特に問題となるのは従来のシステムがビデオ信号の利用を前提として設計されている点であり、結果として視覚情報をビデオフレームレート (30Hz) 以上でフィードバックすることは困難であった。これに対してロボットの制御に必要なサーボレートは一般に 1kHz 程度であり、動的な制御を実現する上でこれまでのシステムは充分とは言えなかった。

一方このような問題に対して、我々は、多数の画像センサと処理部を 1 対 1 に接続して 1 チップに集積化した超並列・超高速ビジョンチップを提案し、実際にデバイスの開発を行っている [3]。ただし現状のビジョンチップでは半導体集積化技術に限界があり、いまだ実際のロボットの制御に十分な画素数を実現するには至っていなかった。

またビジュアルフィードバックというタスクを考えると、画像処理だけでなく、システム全体としてタスクに適した構造、仕様となっていることが重要である。これまでこのような超並列・超高速ビジョンシステムについての提案 [4] はあるが、具体的なタスクを想定したシステムを構築し、応用した例はなかった。

このような背景から、本研究では、具体的に高速ビジュアルフィードバックを目的とした超並列・超高速ビジョンシステムの設計と構築を行い、画像については列並列伝送を利用することで 128×128

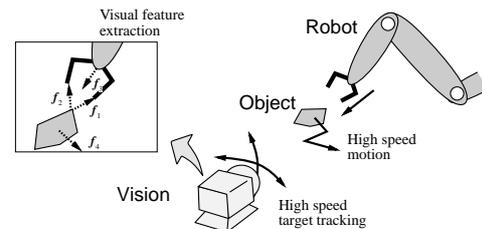


Fig.1 Concept of high speed visual feedback

画素というこれまでにない高解像度を実現した。またビジュアルフィードバックに不可欠な要素として、システムコントローラや特徴量抽出のための専用回路をシステムに組み込み、新しく構築した高速アクティブビジョンに搭載してターゲットトラッキングを行って、高速かつ動的な制御を可能にする新しいビジョンシステムを実現した。

以下ではまずタスクとして想定する高速ビジュアルフィードバックの要点を述べ、次に求められるシステムのモデルと構造、仕様について考察を行う。さらにその実現方法を検討して、その結果をもとに構築した、列並列接続による超並列・超高速ビジョンシステムの詳細を述べる。最後にいくつかの実験によりシステムの評価を行って、その性能と高速制御における有効性を示す。

2. 高速ビジュアルフィードバック

ロボットのフィードバック制御を目的としたビジョンでは、制御に用いる特徴量の抽出がその中心的な役割となる。その結果、いわゆるコンピュータビジョンなどの認識を中心とした静的なビジョンとは異なった、いくつかの特徴を持つことが重要となる。

ひとつは制御システムとしての側面であり、制御で求められる高速リアルタイム性を満たすと同時に、画像処理や特徴量抽出において時間方向の連続性を保つことが重要となる。もうひとつはタスクからの要請として、対象やロボットの運動に動的に追従することが必要な一方で、ある時点でのビジョンの視野としては、目的の特徴量が抽出できるだけの局所的な領域だけで充分となる。これを Fig.1に示す。これらは実際のタスクに対応して、必要十

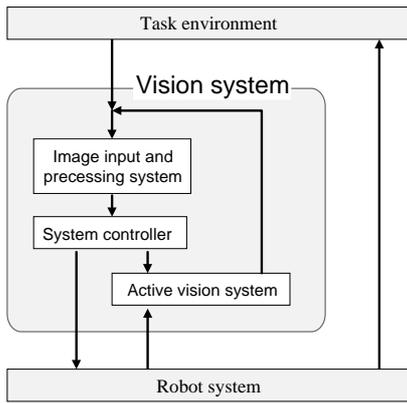


Fig.2 Concept of vision system

分な仕様をある程度具体的に導くことができる。

例えば超高速・超並列ビジョンチップのスケールアップモデルとして我々が既に構築した 1ms ターゲットトラッキングシステム [5] と、これを応用したロボットの高速把握システム [6] では、20Hz 以上というマニピュレータとアクティブビジョンの固有振動数に対応してその 10 倍の 200Hz 以上のフィードバックレートが必要となる。実際に構築したシステムでは 1ms という従来にない高速なサイクルタイムを達成した結果、アクティブビジョンによる視線の高速な追従と、アーム、ハンドによる高速かつダイナミックなリーチング、グラスピングのタスクが実現され、高速視覚の有効性が示された。ただしこのシステムでは、実装上の問題から解像度が 16×16 画素と十分ではなかったために、複雑な形状を取り扱うことができず、またシステムコントロールなどのシステム機能を省略したことにより、かなり単純な処理にしき対応できないという問題があった。

一方従来の視覚システムでは、システム設計にあたって既存のデバイスを組み合わせたものがほとんどで、目的とするタスクや処理をもとにしたトップダウン設計が徹底されていなかった。そのため、場合によっては不必要に解像度が高い代わりに、画像サンプリングレートが制御レートに対して十分ではないという問題があった。

これに対して本研究では、ビジュアルフィードバックによる高速かつ動的な制御を実現することを目的に、これまでの経験をもとにしてビジョンシステムに必要とされる機能と仕様を明らかにし、トップダウンの設計によってこれに適したビジョンシステムを構築した。次節では、これについて説明する。

3. ビジュアルフィードバックのためのビジョンシステム

3.1 ビジョンシステムの全体アーキテクチャ

ビジュアルフィードバックのためのビジョンシステムのアーキテクチャを考えるためには、まずタスクとシステムをモデル化することが重要である。前節の議論に基づいて、Fig.2に示すように、ビジョンシステムのアーキテクチャとして次の 3 つの構成要素と機能を想定する。

1. 画像処理システム — 画像の取得と処理
2. システムコントローラ — システム動作の管理と調整
3. アクティブビジョンシステム — 能動的な視線制御

また、ビジョンシステムを構成する上での外部制約として、タスク環境とロボットシステムを想定する。

先に示したように、ロボット制御のための特徴量抽出を考える

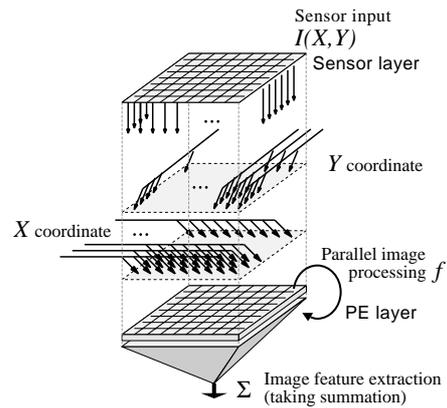


Fig.3 Architecture for image feature extraction

と、ビジョンの局所性とモビリティを満たすものとして、アクティブビジョンによる視線制御が有用であると言える。このようにビジョンシステムのアーキテクチャを想定した上で、以下では、タスク環境とロボットという制約から、ビジョンシステムの仕様と構成を検討する。

3.2 ビジュアルフィードバックにおける画像処理の構造

最初にビジュアルフィードバックにおける画像処理の構造について考察する。ビジュアルフィードバックに必要な特徴量計算のモデルとして、一般に (1) 式の表現が知られている [7]。

$$\xi = \iint_{Image} f(X, Y, I(X, Y)) dXdY \quad (1)$$

ただし X, Y は座標値、 $I(X, Y)$ は各画素のセンサ入力である。演算 f のとり方によって、領域の面積、中心、モーメント、ある方向への投影、テンプレートマッチングなど、様々な特徴量の計算ができる。

この処理の構造をみると、各画素ごとのセンサ情報と座標値にもとづく演算 $f(X, Y, I)$ と、その結果を画像全体にわたって積分計算 (総和演算) するパターンから特徴量への変換からなることがわかる。またノイズの除去やエッジ抽出などの初期視覚処理についても、各画素ごとの近傍演算が多用され、これは演算 f に含めることができる。

この結果、ビジュアルフィードバックのためのビジョンシステムのアーキテクチャとして次の 3 つの機能が必要になると考えられる。

1. 各画素ごとの完全並列演算機能 $f(X, Y, I)$ 、ただし特徴量ごとに演算が可変 (プログラマブル) であることが必要。
2. 各画素に座標値 (X, Y) を送り込むための、行 / 列並列のブロードキャスト機能 [8]。
3. 2次元アレイ状に得られる並列処理結果を特徴量に変換する総和演算機能。

このように、画素ごとに完全並列な処理に加えて、行 / 列並列のブロードキャストや総和演算の機能を実現することにより、効率的な特徴抽出の計算が可能になる。これを Fig.3に示す。

3.3 超並列画像処理の実現

次に実際にこのような超並列画像処理構造を実現する方法について検討する。

先に述べたように、1チップ集積化を目指したビジョンチップでは、現状の半導体技術として 64×64 画素程度が集積化の限界であると試算されている [3]。一方スケールアップモデルの SPE-256

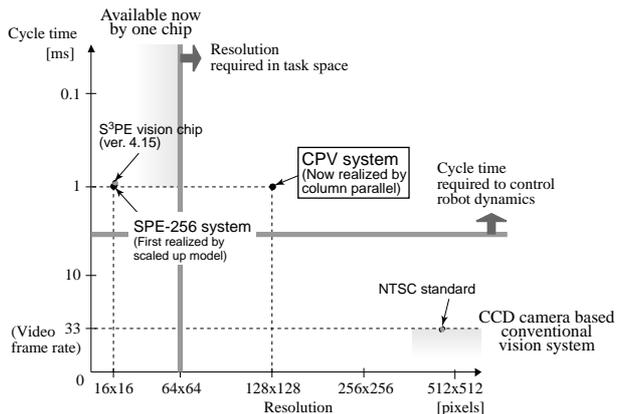


Fig.4 Comparison of each vision system approaches

システムでは、高速性については 1ms という要求を達成したものの、実装上の制約から解像度については 16×16 画素、階調が白黒のバイナリのみと十分とは言えなかった。

これに対して、本研究では新しく Column Parallel Vision (CPV) と呼ぶ、列並列接続による超並列・超高速ビジョンシステムを提案する。この方法ではセンサと処理部を多数のチップ、ボードに分割して実装し、センサと処理部の間での画像の伝送を列並列接続、行方向のスキャンにより実現し、処理に関しては先に述べた完全並列構造を採用する。

この結果、従来の CCD カメラの限界となっていた通信ボトルネックを回避することができ、同時に半導体の実装上の制約をうけることなく、多数の画素をもつシステムの構築が可能になる。具体的には、SPE-256 と比較して画素数が 64 倍の 128×128 画素、解像度がバイナリから 8bit 階調と、十分な量の情報が利用可能となり、同時にこれまでと同様に 1ms の高速性を満たしている。従来の様々なビジョンシステムの比較を Fig.4 に示す。CPV システムがビジョンシステムとして必要とされる解像度とフレームレートの両方を満たしているのがわかる。

4. 列並列ビジョンシステム (CPV システム)

4.1 システムの概要

以上の考察に基づいて、本システムの基本的な構成として、高解像度と高速性との両方を満たす列並列接続による超並列ビジョンシステムを実現した。これに加えて、画像特徴量演算の構成に対応した行 / 列方向ブロードキャスト、及び総和演算のための専用回路を実装し、これらを制御するシステムコントローラを設計、開発した。

また以前の 1ms ターゲットトラッキングシステム [5] で視線の制御に用いていた Active Vision System (AVS)-I に代えて、従来不十分とされていた高速応答とコンパクト化を実現した新しいシステム AVS-II を構築し、これをビジョンシステムの一部として組み込んだ。

以下では、構築した CPV システム、AVS-II について、全体構成と詳細を説明する。次にこれを AVS-II に搭載してターゲットトラッキングの実験を行い、その性能の評価を行った [9]。最後に一般的に用いられている画像処理を適用して、本システムにおける視覚処理の性能を確認する [10]。

4.2 全体システム構成

構築したシステムは、超高速画像処理を行う CPV システムと、実際に視線を移動させるためのアクティブビジョン (AVS-II)、こ

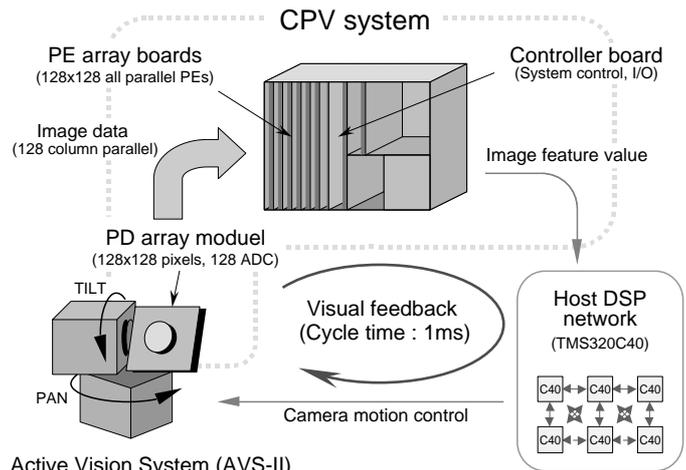


Fig.5 Overview of 1ms vision system

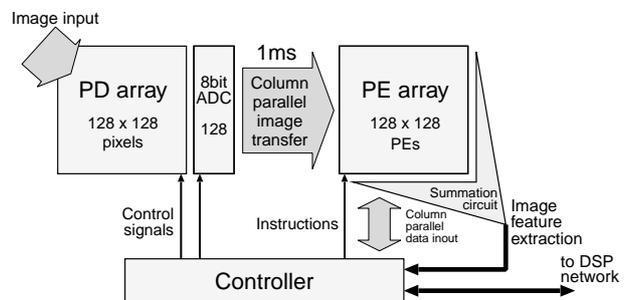


Fig.6 Column Parallel Vision (CPV) system

れを制御するホスト DSP ネットワークからなる。構築したシステムの全体図を Fig.5 に示す。画像の取り込みと処理を行って画像特徴量を抽出し、これを制御のためのセンサ情報としてホスト DSP に出力する。

また CPV システムでは大きく分けてフォトディテクタ (PD) アレイ、超並列プロセッシングエレメント (PE) アレイ、システムコントローラの 3 つの部分で連携して画像の取得と処理が行われる。CPV システムの構成を Fig.6 に示す。

4.3 列並列画像転送

PD アレイ部は受光部と列並列 AD 変換器アレイからなる。受光部の画素数は 128×128 画素、AD 変換器アレイは 128 列並列で 8 ビットの分解能を持っている。出力される画像データは、選択された列ごとに、128 列並列にビットシリアルに PE アレイへ転送さ、各フレームの全画素データは 1ms の間に読み出すことができる。

Fig.7 に PD アレイと PE アレイとの間でのデータ転送部分の構成を示す。出力された画像データに対応する PE に送るために、PD アレイの各列ごとに出力されるデータを PE アレイ内のシフトレジスタで順次転送している。

4.4 超並列画像処理部

画像処理部は 128×128 個の PE アレイからなり、画像の各画素に対して完全並列な処理を実現している。Fig.8 に PE アレイの構成と S³PE アーキテクチャの構成を示す。

PE の内部は S³PE アーキテクチャに基づいており、処理の汎用性をできる限り保ちつつコンパクトな回路を実現するものとし

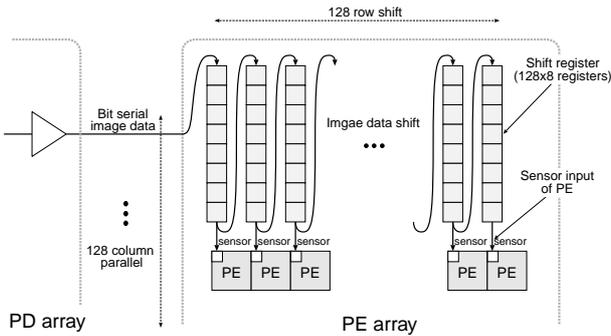


Fig.7 Image data transfer from PD to PE

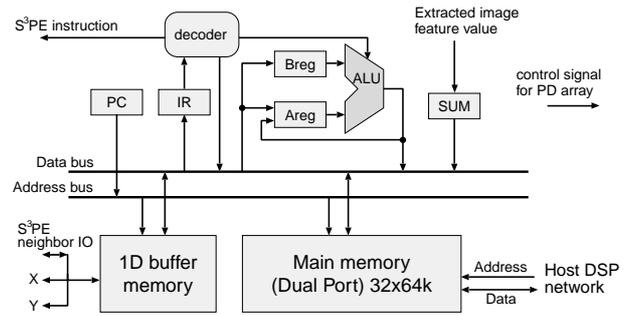


Fig.9 Architecture of Controller

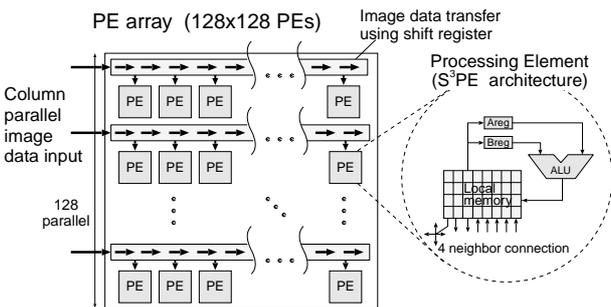


Fig.8 S³PE architecture with column parallel data transfer

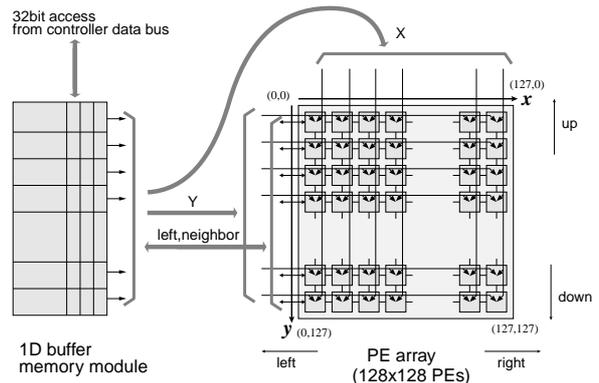


Fig.10 Row and column parallel data input and broadcast

て、SIMD 型制御、ビットシリアル ALU、4 近傍接続、24bit ローカルメモリ、メモリマップ I/O などを採用している [3]。PE が行う処理命令は後述するコントローラから供給される。また Fig.7 に示されるように、シフトレジスタを用いて送られてくるセンサデータは、PE のセンサ入力を通して取り込まれる。

PE アレイの設計は Verilog-HDL により行い、実装には多数の FPGA (Field Programmable Gate Array) を用いた。これにより開発期間の短縮と、設計と開発の同時進行が可能となった。最終的に 16×8 個の PE を内蔵したチップ (XILINX XC4044XL) を 128 個用いて、全体で 8 枚のボードを作成して画像処理部を構成した。現在、システムの動作速度として、処理の 1 ステップが 330ns で実行可能なことを確認している。

4.5 システムコントローラ

並列画像処理システムを構成する場合、システム全体の動作を制御し、かつ外部システムとのインタフェースを行うコントローラの役割が重要になる。最初に挙げたように、ビジョンシステムの目的に対応して、このコントローラで実現された機能は以下のようになる。

- ・ PE アレイからの画像特徴量の抽出、演算：
 - 専用総和演算回路により、PE アレイでの処理結果を高速に抽出し、さらに必要な各種演算を行う。
- ・ PE アレイとの行・列並列データ入出力機能：
 - PE アレイに対して、X,Y 座標のブロードキャスト、近傍接続を用いてのデータの入出力を行う。
- ・ S³PE の SIMD 制御：
 - PE アレイに対してインストラクションを送出し、SIMD でのプログラム制御を実現する。
- ・ ユーザプログラムによるプログラム制御：
 - メインメモリにダウンロードしたユーザプログラムにより、システムの全動作のプログラム制御を実現する。

- ・ 外部システムとのインタフェース：
 - 共有メモリ方式により、外部ホストシステムとのデータ入出力を必要なレートで実行する。
- ・ 各モジュール間の同期管理、制御：
 - システムを構成する各モジュールの制御を行い、モジュール間での同期を調整する。

コントローラの構成を Fig.9 に示す。実装には PE と同じ FPGA (XILINX XC4044XL) を 2 個用いて、1 ボードでコントローラを構成し、多数のバスを用いて PE と接続している。

PE アレイからの画像特徴量の抽出、演算については、階層構造を用いて遅れなく総和演算を行う専用回路 [11] を実装している。また PE アレイとの行 / 列並列データ入出力を実現するものとして、Fig.10 に示ような 1 次元メモリと呼ぶバッファメモリを用いており、コントローラのデータバスと PE アレイの入出力とを接続している。

以上のような構成により、画像を取り込んでアプリケーションに応じた処理を行い、画像特徴量を抽出して外部システム (ホスト DSP) に出力するというビジュアルフィードバックの一連の処理が、目標のサイクルタイム (1ms) に対してボトルネックなく実現されている。

4.6 アクティブビジョンシステム (AVS-II)

AVS-II は視線を高速移動させるためのアクチュエータ部である。可動部には前述の PD アレイが搭載されており、直交するパン、チルトの 2 軸の自由度を持っている。各軸には AC サーボモータを使用し、ギヤを用いず、ダイレクトドライブで使用することで文字通りダイレクトな制御を実現している。Tab.1 に AVS-II のハードウェア仕様を示す。全体として、高出力、コンパクト化を実現しており、高い応答性能が実現されている。

モータ	ACサーボモータ (ダイレクトドライブ)
制御自由度	2 自由度 (チルト・パン)
モータ出力	100W × 2
可動範囲	280(チルト) , 340(パン) 度
外寸	D150, W150, H170 mm
重量	3.5 Kg

表 1 Specifications of AVS-II hardware

処理内容	ステップ数	処理時間
センサ情報取り込み	3	1.0 μ s
フィルタ処理	41	13.6 μ s
セルフウィンドウ法	6	2.0 μ s
重心位置計算	126	42.0 μ s
合計ステップ数	176	58.6 μ s

表 2 Processing time on target tracking

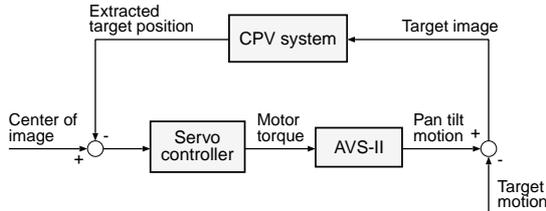


Fig.11 Block diagram of AVS-II control

アクティブビジョンの運動制御はホスト DSP 上で行っている。ホストでは並列処理用 DSP (TI 社 TMS320C40) を使用した DSP ネットワークを構成しており、IO と処理の負荷を分散して 1ms のサイクルタイムに対してボトルネックのないシステムを実現している [6]。

具体的な制御方式としては、ビジュアルフィードバックによるトルク制御を行っており、視線の高速かつ動的な制御を実現している。AVS-II の制御ブロック図を Fig.11 に示す。また以上で説明したシステム全体の写真を Fig.12 に示す。

5. 実験

5.1 1ms ターゲットトラッキング

最初にアクティブビジョン装置を含めた全体システムの、ビジュアルサーボシステムとしての性能を評価するために、ターゲットトラッキングの実験を行った。

本実験ではシステムの高速性が充分であることを示すため、1ms のサイクルタイムでのビジュアルフィードバックの実現を目標とした。具体的にはターゲットトラッキングを行うのに充分な 3bit, 8 階調の画像データを 1ms で PE アレイに転送している。

フレームごとの画像処理としては、前処理としてノイズ除去のためのフィルタ処理と 2 値化を行っている。また対象認識のアル

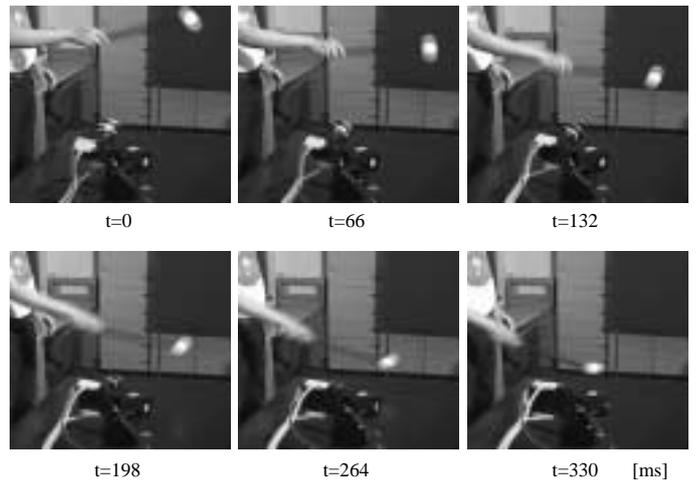


Fig.13 Experiments of 1ms target tracking

ゴリズムとして、画像の高速フィードバックの特徴を利用するセルフウィンドウ法 [12] を用いている。また最終的に出力する画像特徴量として、認識したトラッキング対象のパターンの重心位置を抽出している。それぞれの処理にかかるステップ数と時間を Fig.2 に示す。

また実際にターゲットトラッキングを行った結果を連続写真で Fig.13 に示す。手に持った棒の先の白い球をターゲットとしてトラッキングを行っている。ターゲットが不規則、かつ非常に高速に動いているにもかかわらず、充分追従できているのがわかる。

5.2 ビジュアルフィードバックの周波数応答解析

次にトラッキング動作の応答性能を確かめるために、ビジュアルフィードバック制御時の周波数応答を測定した。実験は固定したターゲットに対して画像面上でサイン波状の目標軌道を与え、これに追従させて応答を記録した。さらにこれを異なる周波数で行って応答を調べた。制御アルゴリズムとしては各軸ごとに固定パラメータの位相進み制御を行っている。測定結果を Fig.14 に示す。

パンとチルトの両軸とも 10Hz 以上の目標の高速な変化に追従できていることがわかる。これによって、本システムが、従来にない非常に高速な応答をもつビジュアルサーボを実現していることがわかる。

5.3 多階調画像処理

本システムの処理能力を確かめるために、取り込んだ多階調画像に対して、一般的に用いられている画像処理を適用した。

実験は多階調 (8bit, 256 階調) の画像に対して S^3PE で並列処理を行い、処理結果をダンプして表示している。この実験では画像処理の結果を評価しやすくするために、PD でノイズの少ない画像が得られるように画像の取り込み速度を落としており、約 50 fps で画像の取り込みを行っている。

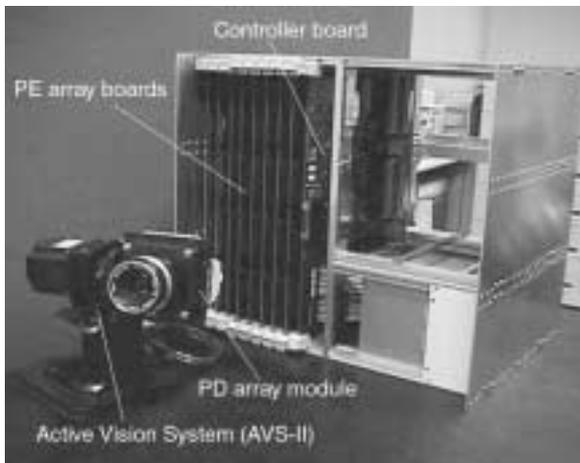


Fig.12 CPV system with AVS-II

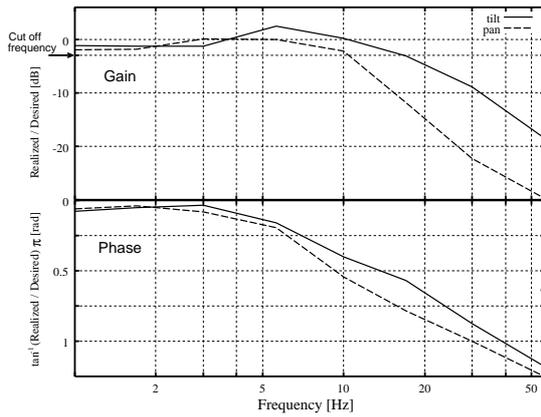


Fig.14 Frequency response of target tracking

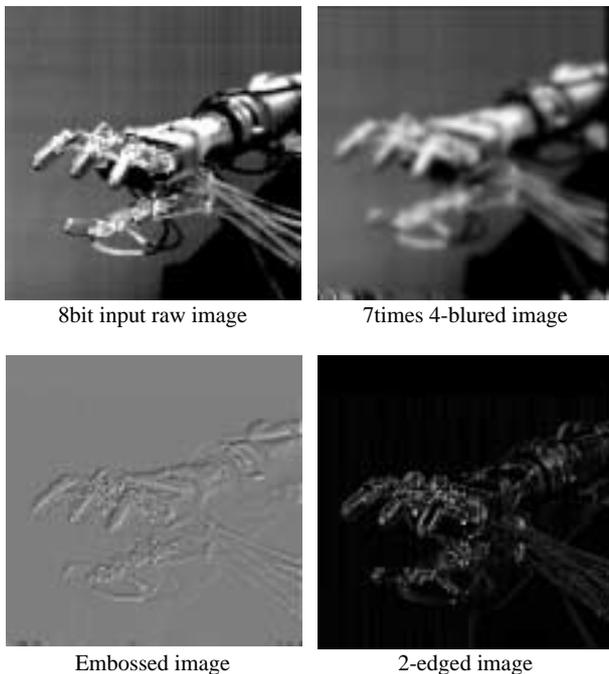


Fig.15 Image processing executed on CPV system

画像処理は全て完全並列に行われるため、非常に少ないステップ数で処理が完了する。実験を行った画像処理について、8ビット階調の画像に対するステップ数と、システムで確かめられた最高速度 (3Msteps/sec) で実行した場合の処理時間を Tab.3に示す。また Fig.15 に実際に取り込んだ画像と処理した結果を示す。

6. おわりに

今回構築した CPV システムについて、列並列の画像伝送と S³PE アーキテクチャに基づく完全並列処理を組み合わせることで、これまでにない高解像度で、ビジュアルサーボなどのアプリケーションに必要とされる 1ms の高速性が実現されることを述べた。また構築したシステムの詳細を説明し、目的とする高速なビジュアルフィードバックを実現するのに適した構造と、機能を備えていること示した。

また構築したシステムを用いた実験により評価を行った。一つは画像センサをアクティブビジョンに搭載してターゲットトラッキングを行い、高い応答性能を持つ新しいアクチュエータ (AVS-II) と組み合わせることで、これまでにない高速なトラッキング性

画像処理例	ステップ数	処理時間
センサ情報取り込み	8	26.6 μ s
2 近傍ぼかし処理	58	19.3 μ s
7 近傍ぼかし処理	406	135.3 μ s
2 近傍エンボス処理	59	19.6 μ s
2 近傍エッジ処理	59	19.6 μ s

表 3 Image processing time on CPV system

能が得られたことを示した。また汎用の画像処理が、多階調の画像に対して超並列・超高速に実行されることを確かめた。

今後このシステムを用いたロボットの制御を行い、解像度と高速性を兼ね備えた高速視覚の有用性を示して、ビジュアルフィードバックの新たな展開を目指す予定である。

参考文献

- [1] 石川正俊. 超高速・超並列ワンチップビジョンとその応用. 日本ロボット学会誌, Vol. 13, No. 3, pp. 31-34, 4 1995.
- [2] 井上博允. リアルタイムビジョンとその応用. 日本ロボット学会誌, Vol. 13, No. 3, pp. 306-310, 1995.
- [3] M. Ishikawa, K. Ogawa, T. Komuro, and I. Ishii. A CMOS Vision Chip with SIMD Processing Element Array for 1ms Image Processing. In *Dig. Tech. Papers of 1999 IEEE Int. Solid-State Circuits Conf. (ISSCC'99)*, pp. 206-207, 1999.
- [4] 石井抱, 村田達也, 松内良介, 小室孝, 石川正俊. 高速ロボット制御のための超並列ビジョンチップシステム. 第3回ロボティクスシンポジウム, pp. 59-66, 1998.
- [5] 中坊嘉宏, 石井抱, 石川正俊. 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. 417-421, 1997.
- [6] 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, pp. 1-6, 1999.
- [7] W. Jang and Z. Bien. Feature-based Visual Servoing of an Eye-In-Hand Robot with Improved Tracking Performance. In *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 2254-2260, 1991.
- [8] 石井抱, 小室孝, 石川正俊. ビットプレーン特徴分解を用いたモーメント計算法. 電子情報通信学会技術報告, Vol. PRMU99-52, pp. 23-28, 1999.
- [9] 中坊嘉宏, 石川正俊, 豊田春義, 水野誠一郎. 列並列・超高速ビジョンシステム (CPV-I) を用いたアクティブビジョン. 第17回ロボット学会学術講演会予稿集, p. 2B23, 1999.
- [10] 中坊嘉宏, 石井抱, 石川正俊, 豊田春義, 水野誠一郎. 列並列 S³PE アーキテクチャによる超高速ビジョンシステム (CPV-I). *ROBOMEC'99 講演論文集*, pp. 1P1-65-096, 1999.
- [11] 坂口隆明, 小室孝, 石井抱, 石川正俊. ビジョンチップのためのモーメント出力回路. *SICE '96 予稿集*, pp. 829-830, 1996.
- [12] 石井抱, 石川正俊. 1ms ビジュアルフィードバックシステムのための高速対象追跡アルゴリズム. 日本ロボット学会誌, Vol. 17, No. 2, pp. 195-201, 1999.