超並列コプロセッサ搭載型高速ビジョンシステム

High-speed Vision System with Massively Parallel Co-processors

渡辺 義浩十 小室 孝十石川 正俊十

Yoshihiro Watanabe[†], Takashi Komuro[†], Masatoshi Ishikawa[†]

† 東京大学大学院情報理工学系研究科

[†]Graduate School of Information Science and Technology, University of Tokyo

E-mail: Yoshihiro_Watanabe@ipc.i.u-tokyo.ac.jp

Abstract

本稿では、高サンプリングレート/スループットかつ 低レイテンシで画像処理を実行するためのビジョンシ ステムを新たに提案する.これまで、ビデオレートより も遥かに高いレートを必要とするリアルタイムアプリ ケーションにおいて、柔軟かつ高速な画像処理を提供す ることは困難であった.このような局面に有効なシステ ムとして、演算機能や内部の構成について専用のアーキ テクチャを備えた超並列コプロセッサを、交換可能な形 式で搭載する高速ビジョンシステムを提案する.また、 同システムの運用例として、リアルタイム多点計測に適 用した場合のコプロセッサの内容と、その応用展開につ いても述べる.

1 はじめに

ロボティクス,顕微鏡観察,検査,ヒューマンインター フェースなどのアプリケーションでは,測定量の感度, 確度,分解能,測定範囲とともに,サンプリングレート, スループット,及びレイテンシの時間に関する性能向上 が強く要請される.特に,その数値目標として,kHz レ ベルのサンプリングレート/スループット,及びms オー ダのレイテンシが必要とされる局面が多いことが指摘 されている [1]. これは,アクチュエータの制御レートが 1kHz に及ぶことや,高速な現象の多くがms オーダの 変動成分を含むことに起因するものである.しかし,こ のような要請を満たすことは,ビデオレート 30 fps に 制約されたセンシング機能の不足や,処理機能の性能の 低さなどの問題から難しかった.

我々は、このような問題の解決に有効なシステムとし て、超並列コプロセッサ搭載型高速ビジョンシステムを 提案する.本稿では、同システムの構成と、PCベース の開発事例を報告するとともに、多点計測を重点応用と した運用例を示す.ここでの多点計測は、画像内の多数 分割領域の局所変化を解析し、計測量を推定するもので あり、様々な応用分野で利用することができる.これに ついて、実装したコプロセッサの性能を示す.また、応 用事例として,超多数の粒子状材料の同時観測,流体計 測のリアルタイム化,運動物体のための3次元センシン グの3つに関する評価を示す.

- 2 超並列コプロセッサ搭載型高速ビジョンシ ステム
- 2.1 リアルタイムビジョンシステムの課題と方針



図1 ビジョンシステムの性能と機能

これまで、様々なニーズに基づき、プログラマブルタ イプ [2]、ITS 応用向けの組み込みタイプ [3]、撮像機能と 処理機能を 1 チップ化した Focal Plane Processor タイ プ [4]、カメラと専用回路を直結した特定タイプ [5]、画 像転送の効率化を図ったタイプ [6、7] などのビジョンシ ステムが開発されてきた.

このような成果に対して、ビジョンシステムにおける 主な操作を、撮像、データ転送、データ処理の3つに分 離し、1節で述べた要求性能を満たすために必要となる システム構成について述べる.撮像、及びデータ転送を 担うモジュールは、A/D変換の並列化や、LVDSを利用 した伝送の高速化によって、条件を満たすことが可能で あると考えられる.例えば、Kleinfelder らによって、画 像サイズ 352 × 288、フレームレート 10 kHz の CCD デバイスが開発されている [8]. このため、転送の効率 化は今回の目標において必須ではない.

一方, データ処理に関しては, 処理速度と機能の柔軟 性の両立を図ることは困難であった. 特に, 高フレーム レートリアルタイムアプリケーションでは、特定用途化 で達成される処理性能と、多様な応用展開を可能とする 機能の拡張性の両者が求められており、図1に示される 位置の特性を備えたシステムが新たに設計される必要 がある.

以上の議論を反映し、高速な視覚と処理機能を有する 高速ビジョンシステムを提案する.本システムの特徴 は、(A) 画像処理のためのコプロセッサの導入、(B) 超 並列アーキテクチャの利用による計算量削減、(C) コプ ロセッサの交換搭載によるシステム機能の専用化と再 構成、(D) 高速バス接続によるモジュールの拡張の4つ である.このように、ボトルネックとなる任意の手続き を担う処理モジュールをメインプロセッサとは別に設 けることで、多種のタスクからなる視覚情報処理の効率 化を図ることができる.これは、カメラと直結された処 理モジュールではなく、コプロセッサとしての組み込み によって生じる利点である.

また、コプロセッサは超並列構造を備え、画像補正や 特徴量抽出などの手続きを担う. さらに、機能の柔軟 性を専用コアの交換搭載によって提供することで、処理 速度との両立を図る. 加えて、バス接続に基づく構造に よって、アプリケーションにおけるモジュールの可換性 を保ち、システム全体の拡張性を上げている. 本システ ムは、特徴量抽出までの視覚情報処理に関する並列処理 モジュールの強化に重点が置かれており、計測などの良 設定問題の枠組の応用において、有効なプラットフォー ムとなると考えられる.



2.2 開発システムの詳細

図2 システム構成

上記のコンセプトに基づき,システムを開発した [9]. 開発システムは、図 2 に示されるように、PC、高フレー ムレートカメラ、画像処理コアを実装したコプロセッ サからなる. 画像処理コア、及びそのコントローラは、 Field Programmable Gate Array(FPGA) に実装され るものとした. FPGA の利用は、コアの選択的な搭載を 実現する手法として有効である. 今回採用した FPGA

夜一 システム動作に関する美11时间	
operation	time $[\mu s]$
Camera Operation	
exposure phase	1,050
image buffering	1,050
image transfer	1,050
Image Binarization	70
Image Transfer	
host main memory \rightarrow PCI memory	280^{\flat}
PCI memory \rightarrow RAM in FPGA	40
Operation on Co-Processor	-
Data Transfer	
$\mathrm{RAM} \to \mathrm{PCI} \text{ memory in FPGA}$	40
PCI memory \rightarrow host main memory	60^{\flat}
2 8 102 bute was transformed	

シュニノ動作に関ナス空には明

^v 8,192 byte was transferred

は、三菱エンジニアリング製 KAC-02-A である. 写真 を図3に示す. 同ボードは、コプロセッサを搭載可能な 2基の FPGA(Xilinx 社製 XC2V6000) を備えている.



図3 コプロセッサを搭載する FPGA ボード

また、バスに関しては、PCI を利用した.現在、PCI バスのスピードは、転送幅 64bit、動作周波数 66MHz の 場合で 533Mbyte/s、PCI express x16 で 4Gbyte/s の転 送が可能である.なお、データ転送がパイプライン化さ れる場合、バス上で競合する主な過程はキャプチャボー ドからの画像読み出しとコプロセッサへの画像転送に なると考えられる.これに対して、64bit/66MHz PCI 通信では、上記の性能に基づくと、1ms 以内に 512×512 の 8bit グレースケール画像の転送を 2 度行うことがで きる.このため、kfps のスループットに対して PCI バ ス接続を実用的に用いることができると考えられる.

高フレームレートカメラは、PCI バス上のキャプチ ャボードを介して接続した. 今回,利用したカメラは、 DALSA 製 CA-D6 である. 同カメラの解像度は 256 × 256, フレームレートは最大 955 fps である. また,利用 した PC は, Dell Precision 670, メイン CPU は, Intel Xeon 2.80 GHz である.

2.3 システム性能の評価

開発したシステムの動作確認を行った.表1に実行 時間の概算値を示す.ここでは、2値画像を用いた応用 を仮定している.動作は、(1)撮像画像をメインメモリ へ格納、(2)画像を前処理後コプロセッサへ転送、(3)コ プロセッサで所定の処理を実行、(4)結果をメインメモ リヘ転送の4段階から成る.(2)の前処理では、各画素 値を1ビット幅に変換し、全体のデータ量を8,192 byte に抑える処理を行った.このような場合、表に示される ように、コプロセッサコアの処理が十分に高速化できれ ば、(2)から(4)までの一連の処理を1ms に収めた形式 で、スループット 955 fps、レイテンシ4ms程度のリア ルタイムアプリケーションが実現できると考えられる.

なお、プロセッサ間のデータ転送は、前述した理想性 能まで最適化の余地があり、向上が可能である.また、レ イテンシに関しても同様に短縮が可能である.加えて、 今回は、メインメモリへの画像格納時に、フレームバッ ファリング方式に基づく転送を行っているため2msを 要しているが、これは1msに向上できる.次節からは、 開発システムの運用事例について述べる.ここでは、重 点応用として多点計測を取り上げる.

3 多点計測への応用展開

3.1 多点計測の波及効果と実現に向けた課題

多点計測が関連するアプリケーションは、多数の分割 領域で構成される多点像を受動的に得る場合と能動的 に得る場合の2種類に大別できる.前者には、粒子製品 の検査、バイオイメージング、血流解析、流体計測、微 生物の観測、マイクロ応用における微小物体のマニピュ レーション、基板などの表面洗浄のための塵検出、大気 中の粒子観測などがある.後者には、テクスチャを用い た運動計測、パターン照射による運動/変形物体の3次 元センシング、可視光を用いた無線通信などがある.

これらの事例において、現象の計測と制御を目標とした新たな応用開発のためには、リアルタイム化、サンプリングレートの向上、観測点数の増大、柔軟性の高い計測量の利用などが必要となると考えられる。例えば、流体計測ではkfpsレベルのサンプリングレートで、数千点の速度ベクトル分布を取得する必要がある。また、運動物体の3次元センシングでは、ロボット制御のための1kfpsのスループットと、計測される運動対象のサイズと分解能に依存した点数の計測が必要となる。仮に20cm四方を分解能5mmで計測する場合、計測点数は1,600点である。この他にも、多点計測の新たな応用展開の多くにおいて、1kfpsで1,000~2,000個の対象を画像解析する性能が求められている。

本稿では、同性能の実現のために、画像から多点の情 報を抽出する手続きをコプロセッサへ分離し、システム を運用した.本手続きを多点解析と呼ぶ.また、本手続 きを担うモジュールを多点解析コプロセッサと呼ぶ. 3.2 多点解析コプロセッサ

画像解析のための各点の領域情報として、画像モーメントを利用した. (i+j)次の画像モーメント m_{ij} は、下式で表される.

$$m_{ij} = \sum_{x} \sum_{y} x^i y^j I(x, y) \tag{1}$$

ここで, I(x, y) は, 座標 (x, y) に相当する画素の値で ある. 同特徴量から, サイズ, 位置, 傾き, 縦横比, 形状 などの情報を得ることができる [10].



図4 並列演算による画像モーメント抽出

同特徴量を多点像から抽出するための演算は,入力画 像を対象領域へ分割する演算と特徴量演算の2種の手 続きを伴う. 同演算を高速に実行するために計算手法 を新たに提案した [11]. 本手法は,画素単位の演算並列 化によって画像モーメント演算の高速化を図り,対象単 位の演算並列化によって対象数増大に伴う計算量の増 大を抑えるものである.

特に,対象並列化に関しては,画像モーメントが列並 列に演算できることを利用し,列方向に重なっていない 対象領域の特徴量を同時に演算することで実現した.こ れによって,図4に示されるように,画素や対象につい て逐次的に演算を構成する場合に比べて,計算量が大幅 に削減でき,高速化が可能となる.このような計算手法, 及び実行回路の設計では,並列構造による高速化,SIMD 制御に基づく並列処理の効率化,ビットシリアル演算に よる並列度の向上,画素間通信の非同期化によるデータ の高速伝搬の4つを基本アーキテクチャとした.



図5 コプロセッサのブロック図

さらに、同手法を実行するための多点解析コプロセッ サの設計と実装を行った.本コプロセッサには、64× 64の2次元メッシュ接続とツリー接続を備えた超並列 構造の演算器を搭載した.回路の全体構成を図5に示 す.本回路は周辺回路とコアから成る.ここでの周辺 回路は,外部とのデータ入出力を管理する通信インター フェースとコアを制御するコントローラを指す.コア は,中心的な演算を担う部分を指しており,今回は前処 理を行うアレイ回路と画像モーメント演算を行う回路 から成る.ここでの前処理は,入力画像から列方向に重 なっていない複数の対象領域を切り出す処理である.同 処理については,画素並列かつ非同期に実行するアルゴ リズム[11]を採用した.さらに,本多点解析コプロセッ サを 2.2 節で述べた 2 基の FPGA にそれぞれ搭載した. 3.3 動作概要



図6 システム動作

1,024 対象の2次までの画像モーメントを演算する 場合のタイミングチャートを図6に示す.システムは、 2.3節で述べた画像の撮像,転送,処理の3操作をパイプ ライン実行している.なお、今回の画像処理は、メイン CPU での前処理 (Pre-processing), コプロセッサへの画 像転送 (I1/I2), コプロセッサでの処理 (P1/P2), 演算さ れた画像モーメントのメインメモリへの転送 (D1/D2) からなる.前処理では、鮮鋭化と2値画像化を行った. 同前処理は 260 μs を要した. さらに, 256 × 256 の入 力画像は 256 × 128 に分割され、2 基のコプロセッサ コアへ転送された. 各コアは画像を 64 × 64 のブロッ ク画像へ分割し、処理を適用した. なお、P1、P2 では 4,192byte の画像をそれぞれ転送した. また, D1, D2 では、8,192byteの画像モーメントをそれぞれ転送した. 各ステージの転送時間は、表1に示されるように、それ ぞれ 140 µs, 60µs を要した.

各コアの処理は、512 対象の 0 次、1 次、2 次の画像 モーメント抽出の場合、約 130µs で完了することを確 認した. 結果として、前処理を含む 1,024 対象の多点解 析の処理時間は 730 µs となった. また、本コプロセッ サはコントローラからの制御の変更によって、同一の回 路で対象数と次元数を変更することができる. 例えば、 800 対象の 0 次、1 次の画像モーメント演算の場合、コ アの処理時間は約 120 µs であった. この場合は, D1, D2 での転送量が 4,192byte となり, 1,600 対象に対する 処理時間は 690µs となった. なお, 2 基のコプロセッサ の利用は, 各コアで要する時間が長くなった場合に有効 になると考えられる. また, 実装の配置配線の最適化に よって, コプロセッサの処理速度は数倍の高速化が可能 である.

このように、サンプリングレート/スループット 955 fps, レイテンシ 4ms でのリアルタイム多点計測におけ る 1 タスクとして、多点解析を組み込むことができた. この結果は、本節の冒頭で課題とした目標性能を満たし ており、応用展開に十分に有効な影響を与えうる数値で あると言える.次節から、同システムによるリアルタイ ム多点計測の応用例について、評価を行った結果を示す. 4 リアルタイム粒子計測への適用

4.1 静止画像に対するシステム検証

本節では、多数の粒子状物体の同時観測に関する評価 を示す.これまで、運動粒子の高速計測は、光学的アプ ローチによって実現されることが多かった.これは、粒 子へ照射した光の散乱を観測し、統計的な処理によって 粒子数やサイズを特定するものである.しかし、形状な どパターンに関する解析ができない点や、システムの セットアップに関する精度を確保することが困難であ る点などが問題となっていた.これに対して、本稿の粒 子計測は、撮像された画像をパターン解析するアプロー チをとるため、自由度の高い応用展開を図ることがで きる.



図7 入力画像と解析結果

まず,明示的な静止画パターンに対するシステム検証 結果を示す.パターンは,傾きの異なる同一の楕円から なる.画像サイズは、256 × 256,楕円の数は576 個で ある.図7(a)に入力パターンを示す.また、2次までの 画像モーメントを利用し、図7(b)に、各粒子の位置と 傾きを描画したものに示す.図から、対象の領域情報が 正しく演算されていることが確認できる.

4.2 パターン識別を伴う運動粒子の計測

次に,運動中の粒子に対する計測の評価を示す. 粒 子群の運動では,衝突が多発するため,パターン識別に よって画像上の分割領域の状態を判定することが必要 であると考えられる.ここでは、画像モーメントを用 いて、粒子同士の衝突状態を判定し、粒子数を計測した 実験結果を示す.実験では、観測粒子をボックス内に設 置し、視野から外れないものとした.また、多点解析コ プロセッサは、1,024 対象の0次、1次、及び2次の画像 モーメントを抽出した.さらに、観測粒子は、径2mm と3mmの2種類の標準粒子を用いた.このような環 境の下、上部からの空気噴射によって、粒子を底面で運 動させ、観測を行った.

粒子の衝突状態は、計測された特徴量を既知の特徴量 と比較することで判定した.ここでの判定は、粒子が衝 突して観測された画像上の各領域から、個数と粒子の種 類を識別するものである.今回は、下記のベクトル x を 特徴量として利用した.同ベクトルは、2次までの画像 モーメントを用いている.

$$\boldsymbol{x} = \begin{bmatrix} S \\ H_1 \\ H_2 \\ H_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{00} \\ \mu_{20} + \mu_{02} \\ (\mu_{20} - \mu_{02})^2 + 4\mu_{11}^2 \\ \mu_{20}\mu_{02} - \mu_{11}^2 \end{bmatrix}$$
(2)

本ベクトル x は、画像上での並進と回転に対して不変 な値をとる.また、中央画像モーメント μ_{ij} は、画像モー メント m_{ij} から並進成分を除去したものである [10].



図8 リアルタイム粒子計測における入力画像

以上のセットアップに従い,評価実験を行った.撮像 された画像を図8(a)に示す.また,軌跡と状態識別に 関する計測結果を図9に示す.グラフ中の点は,6種類 のマーカでプロットされている.それぞれのマーカは, 数字順に径2mmの1粒子,径3mmの1粒子,衝突し た2粒子,衝突した3粒子,衝突した4粒子,衝突した 5粒子を示している.グラフ中には4フレーム毎に得ら れた計測データが計5フレームに渡って描画されてい る.それぞれのフレームのデータは,異なる濃さの点で プロットされている.黒に近い計測点ほど,時間経過が 後のデータである.

さらに、識別された粒子の状態を反映し、計数解析を 行った. 計数結果を図 8(b) に示す. これは、連続する



図9 粒子群の衝突識別

20 フレームにおける画面内の粒子数の分布を 2 種類の 径ごとにプロットしたものである.図より,全フレーム に渡って,ほぼ同数の粒子がカウントされていることが わかる.これは,粒子群が視野外に出ないことから,ほ ぼ安定した計測が行われていることを示している.パ ターンと粒子数のマッチングにおいて,事前に得られる 標準ベクトルを増やし,精度を高めることで,さらに安 定した結果が得られることが期待できる.

5 リアルタイム流体計測

5.1 課題と方針

流体計測を画像計測ベースで行う手法に、Particle Image Velocimetry(PIV) と呼ばれるものがある [12]. こ れは、流体中に計測媒介となる粒子を散布し、その移動 情報から流速分布を時系列に得る可視化計測である.近 年では、解析結果をフィードバックし、流体の制御を行 う技術への発展が期待されている.しかし、これまで、 侵襲型のセンサによる流体の乱れや、処理性能不足によ る分解能や流体速度の低下に問題があった.このような 背景に対して、高フレームレートでのリアルタイム PIV の実現は、必要不可欠な技術であると考えられる.

5.2 評価実験の概要と結果

PIV に基づく流体計測には,(1)計測領域へのトレー サ粒子の散布,(2)シート光の照射,(3)粒子像の撮像, (4)画像から粒子情報の抽出,(5)流体状態の推定の5つ の手続きがある.今回の実験では,(3),(4)の過程を評 価し,kfpsレベルでのリアルタイム PIV の実現可能性 を確認するものとした.また,本実験では,障害物の周 囲で回り込みを生じる空気乱流を計測した.

実験環境の模式図を図 10 に示す.計測領域は 2 枚の 平行平板で閉じられた,厚さ 20 mm,広さ 455 mm × 270 mm の 3 次元空間である.同領域の 4 側面のうち,



図 10 リアルタイム流体計測の実験環境模式図

455 mm の 2 面は閉じ, もう一方の向かい合う 2 面は開 放した. この開放された側面の片側から空気を吸引し, 流体を形成した. また, 領域の中央付近には, 径 50 mm, 高さ 20 mm の円柱を障害物として設置した.

実験では, 計測のためのトレーサ粒子として, 径 1mm 程度の発泡スチロールビーズを利用した. また, 多点解 析コプロセッサは, 1,600 対象の 0 次, 及び 1 次の画像 モーメントを抽出した. さらに, 流体の速度分布を取得 するためのスループットを 955 fps, レイテンシを 4 ms とした.



(a) 流体中の粒子位置



(b) 流体中の速度ベクトル分布

図 11 流体中の粒子軌跡

以上の条件下で評価実験を行った.計測された粒子 群の点位置を図 11(a) に示す. グラフでは,連続する 4 フレームの粒子位置を異なる濃さの点でプロットして いる. 黒に近い計測点ほど,時間経過が後のデータであ る. 各フレームの平均粒子数は約1,000 個であった.

さらに、得られた粒子群の位置情報を用いて、速度ベ クトル分布の推定を行った.ここでは、連続する4フ レームのデータから推定を行う4時刻追跡法[12]を用 いた.推定結果を図11(b)に示す.同図での計測点数の 減少は、4フレームの間に消失した粒子があったことや、 衝突によって安定したベクトルが検出されなかったた めである.これらの問題は、観測環境の調整や、前節で 述べたような高次の画像モーメントを利用した衝突識 別などによって、解消が可能であると考えられる.

以上の結果から、流体状態をリアルタイムに取得できることが確認された.これは、本システムが提供する多点計測が、流体計測とその制御を行うために非常に強力な技術要素となりうることを示していると考えられる.

6 運動/変形物体のリアルタイム3次元セン シング

6.1 課題と方針

本節では、運動/変形物体のためのリアルタイム3次 元センシングについて述べる。例えば、応用展開分野と して、ロボットマニピュレーションへの適用、ヒューマ ンインターフェースへの展開、工業製品の検査工程への 導入、医療現場における自動化技術での試用、走行車両 への搭載などのフィードバックを利用した自動化応用 が挙げられる。

これまで,変形/振動する非剛体や,高速に並進/回転 する剛体などの物体に対して、3次元センシングを適用 することは困難であった.これは、これまでのシステム が静止に近い状態の物体を扱っており、対象と計測系の 関係が時間的に変化しないことを前提としていたため である.また、3次元情報を取得するスループットと、計 測開始から完了までのレイテンシに関する性能も、上記 で挙げられたリアルタイム応用に対して十分ではなかっ た.例えば、機械制御への応用展開では、スループット kHz オーダ、レイテンシ ms オーダを満たすことが必須 の条件となる.このような3次元センシングにおいて も多点計測は有用性が高い.

提案する3次元センシングは、このような背景を反映 し、単一画像での計測完了、高フレームレートイメージ ング、高速視覚情報処理の統合によって、リアルタイム 3次元センシングを実現するものである。

6.2 手法の概要と評価結果

システム全体の構成を図 12 に示す.本システムでは、 単一画像から3次元マップを取得するために、2次元パ ターン照射に基づく手法を用いている.これによって、 運動中の対象の3次元センシングが可能となる.また、



図 12 リアルタイム 3 次元センシングのシステム構成

同手法において、時間と空間に関する分解能の両立を 図るためには、高密度なパターンの高速変化を詳細に捉 える必要がある.このために、高フレームレートイメー ジングを導入した.さらに、同手法が要求する処理量は 大きく、情報取得のスループット、及びレイテンシに関 する性能を確保するためには、処理速度の飛躍的な向上 が必要となる.このために、高速視覚情報処理が必要と なる.

本手法では、投影パターンとして、多点のスポットパターンを利用した.この場合、照射プロジェクタの中心 *c* と各点の勾配 *s*_i、及びカメラの透視投影のパラメータ *P* が既知であれば、画像点 *m*_i から 3 次元位置 *M*_i を 求めることができる.画像点 *M* と照射点 *i* の対応につ いては、高フレームレート観測の下、1時刻前のフレー ムにおける情報を利用することで効率的に実行可能な 手法を提案した [13].



図 13 実験環境

以上の手法に従い, 評価実験を行った. 実験環境の写 真を図 13 に示す.本実験では, マルチスポットパター ンプロジェクタとして, Moritex 製 SNF-533X (33 × 33 dots, line pitch 0.45 deg)を利用した.また, 多点解析 コプロセッサは, 1,024 対象の 0 次, 及び 1 次の画像モー メントを抽出した.画像点から 3 次元位置への変換に関 しては, 開発システムのメインプロセッサで行った.本 3 次元センシングのスループットは 955fps, レイテンシ は 4.5ms となった.



図14 計測対象の写真



図 15 変形する旗の計測結果

本実験では、高速に揺れる旗(非剛体の高速変形)、飛 来するボール(剛体の運動)、運動する手の3つの異な る対象物体に対して3次元センシングを適用した.図 14に、旗とボールの写真を示す.また、図15~17に 実験結果を示す.軸の単位はmmである.プロットさ れた点は計測されたスポットの3次元位置を示してい る.また、計測結果から推定される表面をあわせて図に 示した.いずれも、正しく計測が行われていることが確 認できる.このようなリアルタイム3次元センシング は、様々な応用において強力な技術となることが期待で きる.

7 おわりに

本稿では、高速画像処理の新たな応用展開に向けて、 プラットフォームの提案と構築を行った.提案するビ ジョンシステムは、超並列処理構造を備えるコアを交換 可能なコプロセッサとして搭載するものである.本シ ステムは、共通のプラットフォームによって、高い性能 を要求する多種の応用への展開を目的としている.こ



図 16 飛来するボールの計測結果



図 17 ジェスチャを行う手の計測結果

れは,最終的なアプリケーションシステムの技術要素として組み込まれるだけでなく,新規開発の検証用途としても利用でき,価値が高い.

次に、多点計測を重点応用とした本システムの運用例 を示した.ここでは、同計測においてボトルネックとな りうる多点解析をコプロセッサへ分離した.同コプロ セッサの実装回路を示し、kfps レベルで1,000 個以上の 対象情報を取得できることを示した.

最後に、本システムの応用展開について評価を行った. 今回は、粒子群のパターン情報や移動情報を利用する検 査、可視化計測、3次元センシングなどのアプリケーショ ンを取り上げ、本システムによる波及効果について述べ た.加えて、評価実験を通し、その根拠を示した.

参考文献

- [1] 石川正俊, "超高速ビジョンの展望", 日本ロボット
 学会誌, vol.23, no.3, pp.274-277, 2005.
- [2] C.C. Weems, S.P. Levitan, A.R. Hanson, E.M. Riseman, D.B. Shu, and J.G. Nash, "The image

understanding architecture," International Journal of Computer Vision, pp.251–282, 1989.

- [3] S. Kyo, S. Okazaki, and T. Arai, "An integrated memory array processor architecture for embedded image recognition systems," Proceedings of the 32nd International Symposium on Computer Architecture, pp.134–145, 2005.
- [4] A. Moini, VISION CHIPS, Kluwer Academic Publishers, 2000.
- [5] 藤原健介,山本健吉,石井抱,"1000点以上のマー カー追跡を可能とする高速ビジョンプラットフォー ムの開発"ロボティクス・メカトロニクス講演会 2006 講演論文集, pp.2A1-C07, 2006.
- [6] Y. Nakabo, M. Ishikawa, H. Toyoda, and S. Mizuno, "1ms column parallel vision system and its application of high speed target tracking," Proceedings of 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.650–655, 2000.
- [7] I. Ishii, K. Kato, S. Kurozumi, H. Nagai, A. Numata, and K. Tajima, "Development of a megapixel and milli-seccond vision system using intelligent pixel selection," Proceedings of 1st IEEE Technical Exbition Based Conference on Robotics and Automation, pp.SE-4, 2004.
- [8] S. Kleinfelder, S. Lim, X. Liu, and A.E. Gamal, "A 10000 frames/s CMOS digital pixel sensor," IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol.36, no.12, pp.2049–2058, 2001.
- [9] 渡辺義浩,小室孝,鏡慎吾,石川正俊,"超並列コ プロセッサ IP を用いたリコンフィギャラブル高速 ビジョンシステムの構築と評価",情報科学技術レ ターズ,vol.5,pp.25-28,2006.
- [10] R. Mukundan, and K.R. Ramakrishnan, Moment functions in image analysis (Theory and Applications), World Scientific, 1998.
- [11] Y. Watanabe, T. Komuro, S. Kagami, and M. Ishikawa, "Parallel extraction architecture for information of numerous particles in real-time image measurement," Journal of Robotics and Mechatronics, vol.17, no.4, pp.420–427, 2005.
- [12] 可視化情報学会編, PIV と画像解析技術, 朝倉書 店, 2004.
- [13] Y. WATANABE, T. Komuro, and M. Ishikawa, "955-fps real-time shape measurement of a moving/deforming object using high-speed vision for numerous-point analysis," Proceedings of 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2007.