

多点瞬時解析高速ビジョンシステムによる 運動・変形物体のリアルタイム形状計測

渡辺義浩 (東大) 小室孝 (東大) 石川正俊 (東大)

Real-time Shape Measurement of a Moving/Deformative Object

*Yoshihiro WATANABE(Univ. of Tokyo), Takashi KOMURO(Univ. of Tokyo),
Masatoshi ISHIKAWA(Univ. of Tokyo)

Abstract— This paper describes real-time shape measurement using a newly developed high-speed vision system. This shape measurement enables observation of a moving/deformative object at high-frame rate and its data acquisition in real-time. Such operation is realized by a high-speed vision system with a massively parallel vision co-processor for fast analysis of numerous targets in an image. In this paper, we detail our proposed shape measurement system and review some results of evaluation experiments. Experimental results show the advantages compared with conventional examples, which will achieve improvement in wide range of applications.

Key Words: High-speed Vision, Shape Measurement, Real-time Image Measurement, Vision Processor

1. はじめに

画像を用いた非接触での形状計測は、多くの分野でニーズの高い重要な技術である。一方で、多岐に渡るアプリケーションにおいて、分解能、対象サイズ、スピードなどの要求性能は多様化しており、それぞれの要求に応えるべく、これまで多くのシステムが実現されてきた。

本研究では、計測スピードの向上に主眼を置き、対象物体の動作を止めることなく、形状計測をリアルタイムに遂行するシステムの実現を目的とする。ここでの対象物体は、高速に運動する剛体、変形/振動する非剛体を指す。これまで、対象と計測系の相対関係が既知である状況での形状計測が主であったのに対し、このような動的計測の実現によって、新たな応用展開が期待できる。例えば、運動物体や変形/振動現象に対する制御タスクの実現、自動目視検査の超高速化、走行中の移動ユニットからの路面計測、精度と自由度の高いヒューマンインターフェースなどを想定している。

以上の背景の下、多点解析高速ビジョンシステムとマルチスポット光による計測手法に基づき、上記の目的を達成するシステムを構築した。本稿では、同システムの構成とともに、評価実験とその結果を通して、本計測の効果を示す。

2. 多点瞬時解析高速ビジョンシステムを用いた形状計測

2.1 コンセプト

運動・変形物体に対する本形状計測では、(A) 単一画像による形状計測の完了、(B) 高フレームレート観測による運動物体の継続観測、(C) 高速処理による形状情報のリアルタイム取得の3つの要件を満たす必要がある。これらを同時に満たす構成の概念図を Fig.1 に示す。下記にその詳細を述べる。

これまで形状計測は、数多くの手法が試みられてきており、代表的なものには、スリット光を利用した光切断法や、複数パターンの時系列投影によって空間をコード化する手法などがある [1]。これらは、精度の高い計測

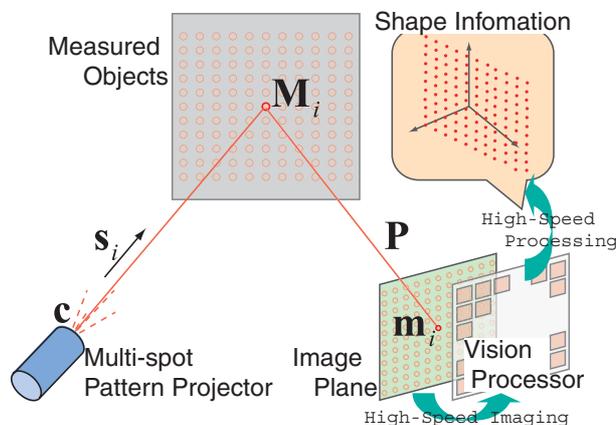


Fig.1 多点瞬時解析高速ビジョンシステムによる形状計測

を可能とするが、投影光の走査中に計測物体が静止していることを前提としていた。このため、今回のように、フレーム間で物体が動く場合には計測を遂行することが困難であると考えられる。一方で、マルチカメラによるステレオ視を利用することも考えられるが、システム規模の拡大や、処理データ量増大の点から運用における効率性が低い問題がある。

これらの問題に対し、本計測はパターン投影によるアクティブステレオに基づき、単一の画像によって形状の取得を行う手法を採用する。このような手法における投影パターンには、多重スリットやグリッドなどが考えられるが、今回は多点を空間中に照射するマルチスポットパターンを利用する。マルチスポットによる形状計測は、これまでに装置の小型化を目指した形状計測でも利用されている [2]。但し、多点を同時に計測領域へ投影するため、観測パターンから3次元情報へ変換する際に、一意性を確保することが困難である場合がある。この点に関しては、計測範囲を予め制限するなど、制約を加えることで保証するものとする。このような制約が加えられた場合でも、単一画像で形状情報を得られる利点は大きく、本計測が有効なアプリケーションの範囲は十分に広いと考えられる。

さらに、高速運動物体の継続観測や、計測制御における高いフィードバックレートを可能とするために、高フレームレートでの撮像と視覚処理をリアルタイムに行い、形状情報を瞬時に取得するものとする。そのための処理システムとして、新たに実現した多点瞬時解析高速ビジョンシステムを用いる。また、高フレームレートでの継続観測は、蓄積される形状情報の統合によって、形状情報の分解能向上に寄与する可能性も高いと考えられる。

以上から、Fig.1 に示されるように、本システムは、パターン投影のためのプロジェクタと、高フレームレートカメラ、及び多点情報を瞬時に解析しうる処理系からなる。各部の詳細を次節以降で述べる。

2.2 マルチスポットによる形状計測

Fig.1 に示されるように、計測点是对應するスポットの照射直線とカメラの視線の交点に位置する。これを利用し、計測点の画像座標から空間座標を求めることができる。拘束式を下に示す。

$$M_i = c + \delta s_i \quad (i = 1, \dots, N_p) \quad (1)$$

式(1)は、あるスポット i の空間点 M_i が、プロジェクタ中心 c を通り、勾配 s_i の直線上に位置することを示している。 N_p は、照射したスポットの総数である。

$$P\tilde{M}_i = \omega\tilde{m}_i \quad (2)$$

また、式(2)は、スポット i の画像点 \tilde{m}_i と空間点 \tilde{M}_i の対応関係を透視投影行列 P によって記述したものである。計測において、 c 、 s 、 P は既知のパラメータであり、 \tilde{m}_i が観測データである。このため、上記2式から、空間点の座標 M_i を求めることができる。なお、プロジェクタの原点とカメラの光軸中心を結ぶ線分が、撮像面と平行になるように配置する平行ステレオを利用することで、単純化することもできる。

本システムでは、マルチスポットパターン照射のためのプロジェクターとして、Moritex 製 SNF-533X (33 × 33 ドット 2 線間ビーム角 0.45[deg]) を利用した。

2.3 多点瞬時解析高速ビジョンシステム

2.3.1 全体構成

本システムは、リコンフィギャラブル高速ビジョンシステムに、多点瞬時解析を行う回路 IP を搭載したものである。リコンフィギャラブル高速ビジョンシステムは、CPU とコプロセッサの連携によるスループットの高い視覚情報処理の実現を目的として新たに開発した視覚システムである [3]。同システムは、PC、高フレームレートカメラ、交換可能な画像処理コア IP を実装したコプロセッサから構成される。全体の構成を Fig.2 に示す。

今回、マルチスポットによる画像計測の超高速化のために、画像から多数の物体情報の瞬時抽出を可能とする処理アーキテクチャ [4] をコプロセッサとして搭載した。このように、速度向上のボトルネックとなる画像処理部をコプロセッサが担うことで、視覚情報処理の大幅な高速化が実現できる。この多点瞬時解析コプロセッサは、今回の形状計測だけでなく、粒子計測や流体計測などのリアルタイム画像計測への応用展開にも利用できる。

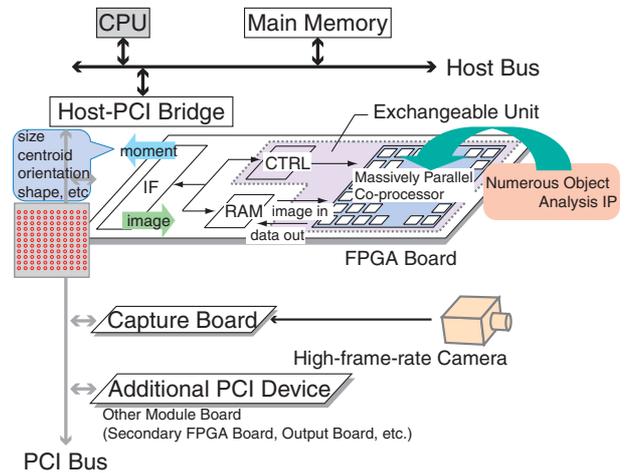


Fig.2 多点瞬時解析高速ビジョンシステム

同コプロセッサは、物体情報として、画面内の分割領域の画像モーメントを演算する。画像モーメントは、様々な幾何特徴量への変換を可能とするパラメータである。 $(i + j)$ 次の画像モーメントは下式で表される。

$$m_{ij} = \sum_x \sum_y x^i y^j I(x, y) \quad (3)$$

通常、画面 $N \times N$ 内の複数領域に対して演算を行う場合、ラスタ走査による処理量 $O(N^2)$ のラベリングと領域数 n に比例した演算を伴うと考えられる。これに対し、本アーキテクチャは、超並列構造、画素間非同期通信、並列抽出といった特徴によって、処理量を $O(\sqrt{n})$ に抑えており、kfps レベルの超高速処理と数千個オーダーの超多数観測の実現を可能としている。

本システムでは、コプロセッサ IP を実装する FPGA ボードとして、三菱エンジニアリング製大規模 FPGA ボード KAC-02-A を採用した。同ボードは、ユーザ論理用の FPGA として、Xilinx 社製 XC2V6000 を 2 基搭載している。今回の実装では、 64×64 の画素アレイで構成される超並列コプロセッサユニットを 2 基搭載している。動作周波数 40MHz で制御し、1,024 個の 0 次、1 次の画像モーメントを $70 \mu\text{s}$ で抽出できている。

また、コプロセッサへの画像転送は、高フレームレートカメラからリアルタイムに行われる。このためのカメラとして、DALSA 製 CA-D6 を利用した。このような画像の高速転送を保証するデバイスは、並列 A-D 変換の技術によって近年新たに可能となった [5]。同カメラの解像度は 256×256 、フレームレートは 955 fps である。

さらに、利用した PC は、Dell Precision 670、メイン CPU は、Intel Xeon 2.80 GHz である。

2.3.2 処理概要

今回の形状計測におけるシステム全体の動作タイミングを Fig.3 に示す。撮像画像は、キャプチャボードを介してメインメモリに格納され、2 値画像に変換後、コプロセッサへ転送される。続いて、コプロセッサは、画像モーメントを抽出し、データをホストへ返す。さらに、メイン CPU は多点の画像モーメントを用いて形状情報の演算を行う。今回は、コプロセッサの処理時間に合わせ、2 フレームに 1 度画像を取り込む構成をとった。

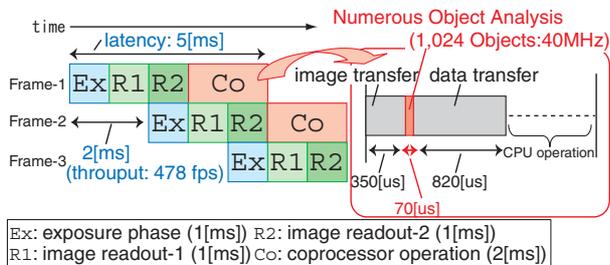


Fig.3 システムの動作タイミング

メイン CPU における形状演算のための処理は、各スポットに関する画像モーメントから重心座標への変換、画像点と対応スポットパラメータのマッピング、3次元情報の演算の3種類である。

特に、マッピング処理において、滑らかな表面に照射された点に関しては、高フレームレート観測を前提とした場合、フレーム間での移動が極小であることが仮定できる。これを利用し、フレーム間で近傍範囲に存在する画像点同士は同一のスポットに属するものとして処理を適用した。このような近傍点探索に関しては、バケット法 [6] が利用できる。これは、探索平面を格子状に分けることによって、探索の効率化を図るものである。格子領域に含まれる点数が一定となるように格子を設定することで、点集合が平面に一様分布している場合に、その計算量を探索する点数に線形にすることができる。一方、形状のエッジ等に位置し、不連続に移動した点に関しては、各スポットが画像上で拘束される既知の直線を利用し、例外的に処理を適用した。以上の処理は、300 ~ 400 μ s 程度で完了した。

このように、本システムは、Fig.3 に示すタイミングの場合、スループット 478 fps、レイテンシ 5 ms 程度で形状情報を取得できる。同性能は、多くのアプリケーションにおける要求を十分に満たしていると考えられるが、本システムはいくつかの改善の余地を残しており、これはシステムの限界を示すものではない。第1に、多点瞬時解析コプロセッサは、内部処理のパイプライン化、動作周波数の向上の余地を残しており、数倍程度の速度向上が可能である。第2に、メインメモリとコプロセッサ間の PCI データ転送におけるバス幅に拡張の余地があり、転送レートを上げることができる。同時に、コプロセッサからホストへの転送に関して、バースト転送に対応していない問題を抱えている。これらの改善によって、転送時間を含むコプロセッサ処理に要する時間を 1 ms 程度に収めることが可能である。第3に、画像読みだしにおいて、フレームバッファリング方式を採用しているため、2 ms の遅延を生じているが、縮小することができる。これらの余地を解消することで、例えば、高フレームレートカメラと同等のスループット性能 955 fps、及びレイテンシ 4 ms 程度の形状計測を実現することも十分に可能である。アプリケーションに応じて、以上の性能の余地を改善する必要があると考えられる。

3. 評価実験

3.1 実験環境

前節で述べた形状計測システムを用いた評価実験の環境について述べる。実験環境を Fig.4 に示す。今回の実験環境では、カメラから 200mm 離れた、100mm \times 100mm の領域を計測範囲とした。また、計

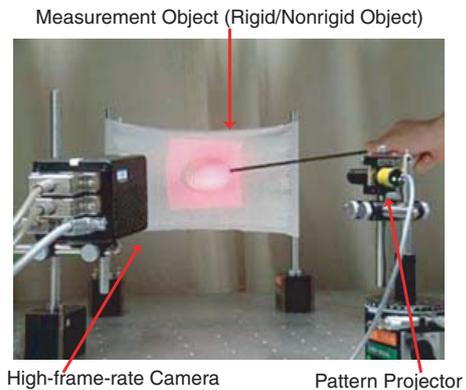


Fig.4 実験環境

測スポットの対応問題から各点のフレーム間の奥行き的位置ずれは最大 10~40mm 程度であるとした。また、計測は全てのスポットが撮像された状態から始めるものとした。

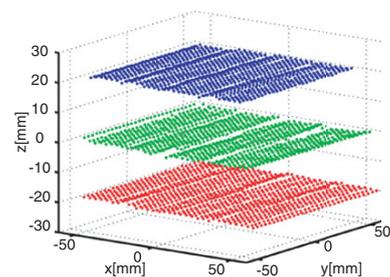


Fig.5 平面の計測

カメラ、及びプロジェクタの内部パラメータ、及びカメラとプロジェクタの位置関係に関しては、事前にキャリブレーションを行った。このような設定の下、 $z = -20, 0, 20$ mm に位置する既知の平面を計測した場合の結果を Fig.5 に示す。なお、空間座標は計測領域の中心を原点とし、光学台に垂直な平面を xy 平面とした。

3.2 実験結果

3.2.1 非剛体変形/振動の計測

非剛体物体に対する評価実験を行った。本実験では、伸縮製のある布を計測対象とした。ここでは、平面状に固定した布に、ボールを投げ当てた際の変形/振動の様子を計測した。

Fig.6 に、4 フレーム毎の計測結果を示す。図において、青点は各計測点の3次元位置である。また、得られたデータから推定できる表面情報をワイヤフレームで表示した。

計測結果より、ボールが衝突した瞬間や、その場所を中心として布が振動している様子が捉えられていることがわかる。このような現象をリアルタイムで捉えることは、リアルタイム変形検査や振動制御など、多くの局面で利用できると考えられる。

3.3 剛体計測

次に、運動する剛体物体に対する評価実験を行った。ここでは、カメラの前を自由落下する物体に関して形状計測を適用した。Fig.7 に実験で用いた剛体の写真を示す。

それぞれの形状に関する 10 フレーム毎の計測結果を Fig.8, 9 に示す。計測結果より、剛体形状がその運動状態とともに正確に捉えられていることがわかる。今後、

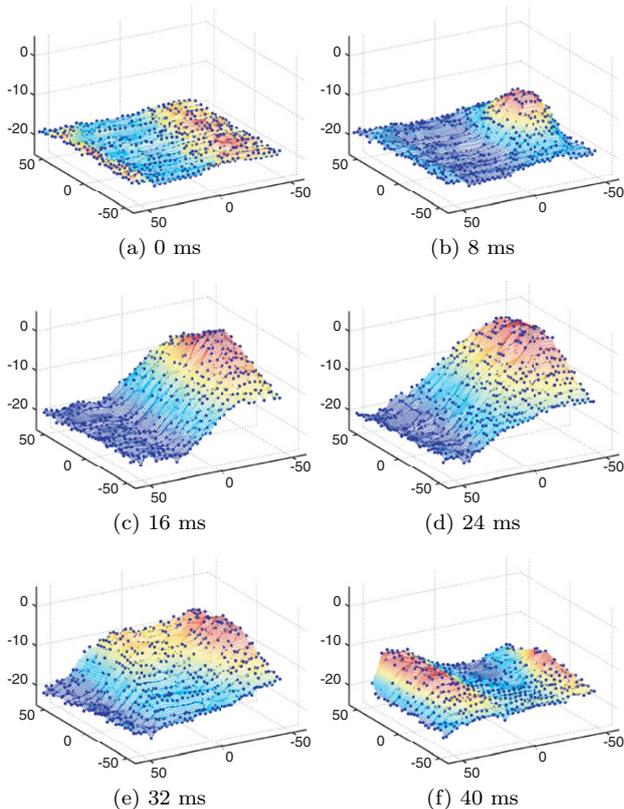


Fig.6 変形/振動する非剛体の形状計測 (軸単位 [mm])



Fig.7 計測対象の写真

より複雑な運動と形状を有する対象への拡張によって、アプリケーションでの有効性を高めることが重要であると考えられる。

4. まとめ

本稿では、運動・変形物体に対するリアルタイム形状計測のためのシステム構成を提案した。本システムは、マルチスポット光に基づく単一画像での形状計測と、多点瞬時解析高速ビジョンシステムを利用した高いスループットでの継続観測によって、計測中に変動する物体の計測を可能としている。また、構築したシステムに関する評価実験の結果、計測が正確に行われていることが確認できた。

本計測システムは、形状計測における対象運動の制約を取り除き、観測における自由度を図るとともに、形状情報の瞬時取得を可能としている。この点は、特に制御を伴う動的な観測において有効であり、その応用発展の可能性は十分に高いと考えられる。今後は、配置やカラーリングなどマルチスポットパターンの工夫、スポット数の増加や、フレーム間の形状情報の統合などに関する検討を行い、発展的なアプリケーション開発に着手し

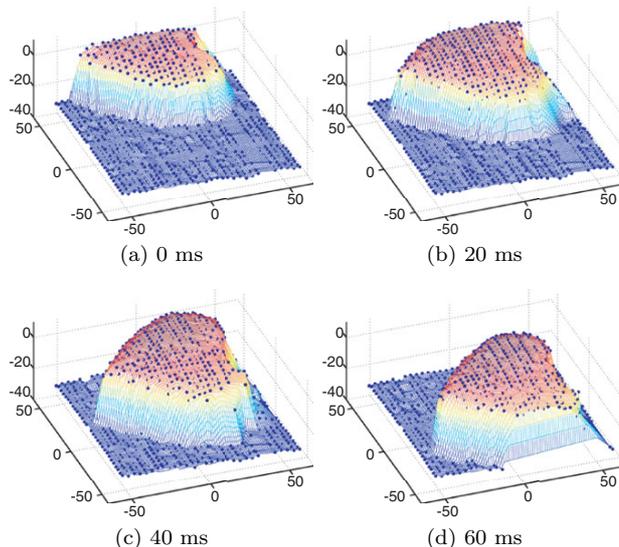


Fig.8 運動する剛体の形状計測 -対象 1- (軸単位 [mm])

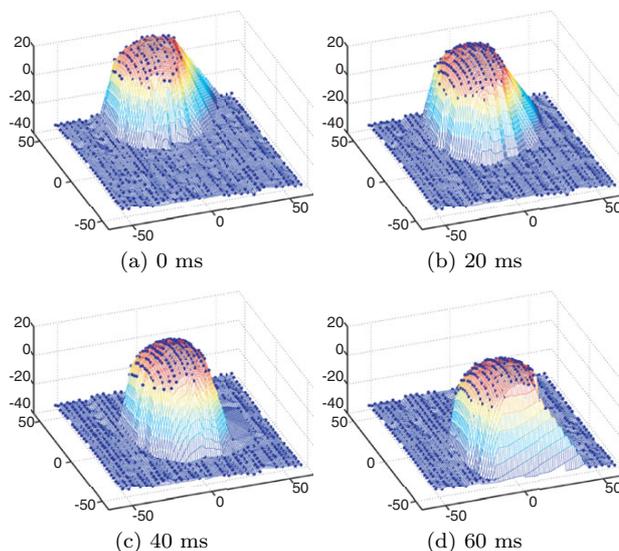


Fig.9 運動する剛体の形状計測 -対象 2- (軸単位 [mm])

て行く予定である。

参考文献

- [1] 井口征士, 佐藤宏介, 三次元画像計測, 昭晃堂, 1990.
- [2] 立石雅輝, 梅田和昇: “汎用小型距離画像センサの構築,” 第23回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 3B16, 2005.
- [3] 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,” 第5回情報科学技術フォーラム (FIT2006) 論文集.
- [4] Yoshihiro Watanabe, Takashi Komuro, Shingo Kagami and Masatoshi 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.
- [5] S. Kleinfelder, et al., “A 10000 frames/s cmos digital pixel sensor,” IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol.36, No.12, pp.2049-2058, 2001.
- [6] ロバート ゼジウィック, アルゴリズム C++, 近代科学社, 1994.