

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 6月 8日現在

機関番号：82626
 研究種目：若手研究（B）
 研究期間：2010～2011
 課題番号：22700190
 研究課題名（和文） 高速度光源を用いたアクティブビジョンセンシングによる運動物体の形状解析
 研究課題名（英文） Shape Acquisition of Deformable Objects by Active Vision Sensing using High-speed Illumination
 研究代表者
 山崎 俊太郎（YAMAZAKI SHUNTARO）
 独立行政法人産業技術総合研究所・デジタルヒューマン工学研究センター・研究員
 研究者番号：40392675

研究成果の概要（和文）：

高速度プロジェクタを利用して、200Hz以上の高フレームレートで計測可能なアクティブビジョンシステムを構築した。まず、高速度プロジェクタと高速度カメラを用いて、時間符号化による高速度構造化光投影システムを構築した。次に、単一の計測画像から距離画像を取得する空間コード化法、および画像演算装置(GPU)を用いた実時間形状復元法を提案した。また、校正物体を用いずに、計測システムの幾何パラメータを自校正する方法を提案した。

研究成果の概要（英文）：

We have developed high-speed active vision systems using high-speed projectors and cameras, and accomplished 3D depth acquisition for deformable objects at a frame rate of more than 200Hz. First, we developed a high-speed structured light system based on temporally coded illumination using DLP projectors. Second, we proposed the method of reconstructing depth maps from single camera images using spatially-coded color stripes without high-speed cameras for real-time depth recovery. Third, we have proposed a method for simultaneous geometric self-calibration of projector and camera.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,300,000	690,000	2,990,000
2011年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：情報学

科研費の分科・細目：知覚情報処理・知能ロボティクス

キーワード：4次元計測, 変形推定, 人体形状計測, 距離画像, プロジェクタカメラシステム

1. 研究開始当初の背景

半導体技術の進歩によって画像センサの性能が劇的に向上し、高フレームレート(1000Hz以上)で撮影可能な高速度カメラの入手が容易になった。高速度撮影された画像をコンピュータビジョン技術で処理するこ

とで、これまで観察することの難しかった瞬間的な現象を、詳細かつ立体的に解析できるようになる。こうした新しい計測手法は、多くの研究分野にとって有益であり、新たな知見の発見につながりうる。

高速度コンピュータビジョンは、一つの研究領域として世界中の機関で研究されてい

る。特に、米国 USC とスイス ETH の研究グループは計測システムの完成度や計測精度を高める方向で成果を上げてきている。一方、応募者を含む国内の研究グループは高性能撮像デバイスを利用した計測速度の向上に成功している。

研究代表者はこれまで、DMD(Digital micromirror device)を利用したプロジェクタが持つ高周波ノイズを、制御された光源とみなして利用するアクティブビジョン技術の研究を進めてきた。本事業では、これまでの成果を発展させ、高速度で動作する、高精度の3次元形状計測システムを構築することを目指している。

2. 研究の目的

本事業では、高速度光源と高速度カメラを用いて、構造化光投影によって、運動物体の3次元形状を、正確に、同時に、隠れなく計測する方法を明らかにする。こうしたシステムを実現するための問題は、安定した高速度光源の実現方法である。研究代表者はDMDを利用したプロジェクタの特性を利用して高速度光源を実現する基礎的な方法論を研究しており、これを実際の3次元計測に応用して、その性能を検証することが本事業の目的の一つである。構築したシステムを評価するための応用事例として、人間の手作業を計測し、手の運動特性などの分析を行う。

3. 研究の方法

本事業では、プロジェクタとカメラで構成されるアクティブビジョンシステムを構築する基礎研究フェーズと、複数のシステムを組み合わせて利便性を向上する実用研究フェーズの2段階の計画を立て、それぞれを1年間で実施した。

初年度は、まずDMDを利用するプロジェクタを光源として利用する、高速度アクティブビジョンシステムを構築した。アクティブビジョンシステムの速度は、投影装置のフレームレートによって制限される。そのため、ディスプレイ用途に開発されたプロジェクタを用いる従来法では、人体などの高速に運動する物体を精度よく計測することができない。そこで研究代表者は、申請時にはDMDを利用するプロジェクタが持つ高周波ノイズパターンを動的光源とする方法論を提案していた。ところが、事業の開始後に、1ビット白黒パターンを最大5kHzで、8ビット濃淡パターンを最大500Hzで投影可能な高速度デバイス(Light Commander プロジェクタ)が入手可能になった。そこで、計画を変更し、市販プロジェクタのノイズ解析を中止し、2進符号に基づく時間パターンを用いた構造

化光システムを構築した。これによって、距離計測の精度が大幅に向上し、外乱に対する頑健性も向上した。図1に、構築したプロジェクタカメラシステムの外観を示す。



図1：高速度プロジェクタカメラシステム

次に、構造化光から3次元形状を復元するための、幾何パラメータの校正方法を研究した。従来法は、マーカのついた構造物やチェスボード状の平面など、形状や模様が既知の校正物体を事前に撮影し、画像中の少数の特徴点からパラメータを推定する。最初にカメラを校正し、校正済みカメラを用いてプロジェクタを校正する必要があるため、校正誤差に偏りが生じやすく、また校正作業に時間と手間、利用者の熟練を要するという問題があった。我々は、構造化光の投影を用いると、高精度で密な画像間の対応が自動で得られることに着目し、基礎行列の分解を利用した新しい自校正手法を提案した。プロジェクタとカメラが満たすエピポラ拘束を、拡張座標を用いて歪み基礎行列で表現する方法を提案し、その代数的な分解によって、変更される可能性のあるすべての幾何パラメータを、自動で精度良く求める方法を示した。

最後に、2進符号化コードの投影像からプロジェクタとカメラ間の画素対応を計算し、三角測量の原理によって距離画像を獲得する計測システムを開発した。実際に構築したシステムでは、プロジェクタとカメラが200Hzで同期しており、約22Hzの速度で距離画像を取得できる。開発したシステムで動作中の人間の手を計測した結果を図2に示す。

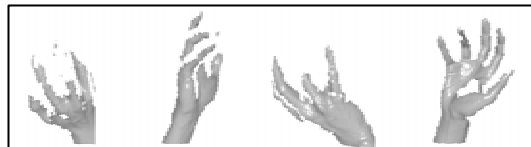


図2：運動中の手の高速度3次元形状計測

2年目は、初年度に開発した高速度プロジェクタカメラシステムを2組用いて、運動中の物体の表面形状を全方位から計測する方法に関して研究した。2組用いることで、1組の場合の比べて、最大で2倍の表面積を同時に計測することが可能となるが、計測対象の姿勢によって、必ずしも十分な計測範囲を確保することはできない。また、プロジェクタやカメラの数を増やすことはコストの点

で現実的ではない．現実的には，低コストで入手可能な光学機器で運動物体の形状を計測できることが望ましい．

そこで，一回の画像計測情報から距離画像を取得する，空間コードを用いた構造化光投影法を研究した．Hamming Code という新しい最大長符号(Maximum Length Sequence)を考案し，これを利用して，画像計測の際の外乱に対して頑健なカラーストライブパターンを提案した．提案法は，類似の従来法と比較して，距離の不連続性や光の拡散，光学系の不完全性に起因する画像ボケの問題に対して頑健であることを示した．提案した投影パターン，計測画像，それを用いた3次元復元の結果を図3に示す．



図3：(上) Hamming Color パターン，
(左下) 計測画像，(右下) 復元結果

高速度プロジェクタを用いる方法では，計測画像から距離画像を計算する処理が単純なため，実時間で結果を得ることができる．その一方で，カラーストライブを用いる方法では，対応点の曖昧性を解消するための最適化計算が不可欠であり，実時間処理には適していない．そこで，対応点の連続性を保証する拘束付き動的計画法を，高速な画像演算装置(GPU)を利用して計算することによって処理を高速化した．提案法で GPU (Nvidia GeForce 480GTX)を用いた場合，CPU (Intel Core2 Duo 2GHz)と比べて 600 倍以上高速であり，利用する GPU の数にほぼ比例する並列性能を示している．実験では，画像取得などに要する時間を考慮しても，2 GPU を用いることで実時間で距離画像を出力できることを確認した．GPU を用いた計算速度の向上を図4に示す(数字は計算時間のミリ秒)．

最後に，開発した距離が統計測システムを利用して，人間の手作業を計測し，変形の推定と全周形状の復元を行った．各時刻における計測によって得られた部分表面形状を三角形メッシュに変換した後，微分座標の一種である Laplacian Coordinate を利用して，曲率変化の小さい変形を逐次推定する方法を提案した．変形を補正せずに距離画像を張り合わせた結果と，変形を補正した場合の結果を図5に示す．変形の大きい指先部分において，補正しない場合には変形によって部分形状が正しく位置合わせできないが，提案法

では正しく位置合わせできることがわかる．

	CPU	1 GPU	2 GPUs
Data upload	—	0.286	0.285
Color normalization	5.1	0.097	0.053
Consistency computation	809.6	8.533	5.130
Table update	12948.4	11.756	5.892
Backtrack	13.5	0.817	0.440
Data download	—	0.376	0.340
Total	13776.6	21.865	12.140

図4：GPU を用いた動的計画法の速度向上

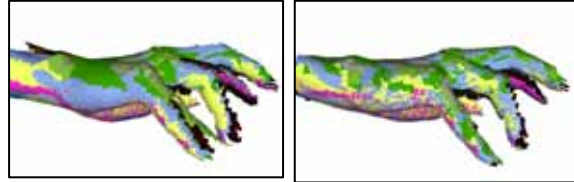


図5：変形物体の全周形状の復元
(左：変形補正なし，右：補正あり)

4．研究成果

高速度アクティブビジョンシステムの構築に関しては，形状計測手法，システムの校正手法とともに，概ね当初の計画通り研究を遂行し，十分な結果を得ることができた．特に，高速度プロジェクタを用いて高速度時間コード化法を実現する手法の他に，カラーストライブパターンを用いた空間コード化法に関しても新しい知見を得ることができた点は特筆すべきである．

一方で，複数のシステムを組み合わせることで全周形状を取得する研究，およびそれを用いた人体運動の解析に関しては，十分な成果を上げることができなかった．これは，事業開始後に新型のプロジェクタが入手可能になったため計測原理に関わる研究計画を大きく変更した点，今回の予算規模で構築できるシステムでは十分な計測範囲を確保できなかった点が大きな原因である．本助成事業の終了後も，本研究を継続し，上記の課題に取り組むと同時に，今回構築したシステムの定量的な評価，特に精度検証を行う必要がある．

プロジェクタカメラシステムの自校正手法について，国内外の会議で発表(学会発表)した他，ソフトウェアを研究代表者の Web ページで公開した．これまでに数 10 件の問い合わせがあり，研究グループの他，メディアアーティストなどにも広く利用されている．また，自校正の方法論を応用して Structure From Motion 法の研究を行い，屋内外における人間の 3 次元位置と姿勢を，単眼の一人称視点ビデオ映像から取得する方法を提案し，国内の研究会で発表した(学会発表)．また同じ原理を利用して画像ベースレンダリング法を簡便に実現するシステムを考案し，誌上発表した(雑誌論文)．

3次元計測技術について，時間コード，空

間コードを用いる方法のそれぞれに関して国際会議で発表した(雑誌論文, 学会発表). 並列動的計画法を用いた大域的最適化手法と GPU を用いた並列計算手法について, GPU の専門家が集まる国際ワークショップで別途成果を発表した(学会発表).

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計2件)

Sanjeev J. Koppal, Shuntaro Yamazaki, Srinivasa G. Narasimhan, Exploiting DLP Illumination Dithering for Reconstruction and Photography of High-speed Scenes, International Journal of Computer Vision, 96(1), pp.125-144, 査読有, 2012, DOI: 10.1007/s11263-011-0454-y

山崎 俊太郎, 持丸 正明, 金出 武雄, 画像ベース Web3D, コンピュータソフトウェア, 28(4), pp.126-136, 2011 年, 査読有, DOI: なし

[学会発表](計5件)

Shuntaro Yamazaki, Akira Nukada, Masaaki Mochimaru, Hamming Color Code for Dense and Robust One-shot 3D Scanning, The 22nd British Machine Vision Conference, the University of Dundee, UK, August 30, 2011

山崎 俊太郎, 持丸 正明, 金出 武雄, 基礎行列の分解を利用したプロジェクトカメラシステムの同時自己校正, 第14回画像の認識・理解シンポジウム, 石川県金沢市文化ホール, 2011年7月22日

Shuntaro Yamazaki, Masaaki Mochimaru, Takeo Kanade, Simultaneous self-calibration of a projector and a camera using structured light, IEEE International Workshop on Projector Camera Systems, Crowne Plaza in Colorado Springs, USA, June 24, 2011

山崎 俊太郎, 持丸 正明, 金出 武雄, 一人称ビジョンシステムのための自己位置推定法, パターン認識・メディア理解研究会, 中部大学, 愛知県, 2010年05月13日

Shuntaro Yamazaki, Parallel Dynamic Programming for Realtime 3D Acquisition, ETHZ - Tokyo Tech Workshop: Computing with GPUs, Cells, and Multicores, ETH Zurich,

Switzerland, May 10, 2010

[その他]
ホームページ等
<http://www.dh.aist.go.jp/~shun/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山崎 俊太郎 (YAMAZAKI SHUNTARO)
独立行政法人産業技術総合研究所・デジタルヒューマン工学研究センター・研究員
研究者番号: 40392675