

平成 30 年 5 月 29 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2017

課題番号：15K12056

研究課題名(和文) 密な高速3次元計測のためのプロジェクタ・カメラシステムの研究

研究課題名(英文) Projector Camera Systems for Dense High-Speed 3D Measurement

研究代表者

鏡 慎吾 (KAGAMI, Shingo)

東北大学・情報科学研究科・准教授

研究者番号：90361542

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,600,000円

研究成果の概要(和文)：高フレームレートかつ高密度な距離画像を計測するための技術の開発を行った。提案手法は位相シフト法に基づくものであり、その高速化を実現するため、大きく分けて二つの技術を開発した。第一は光学系の工夫による濃淡縞パターン的高速生成技術であり、デジタルマイクロミラーデバイスにより生成される2値画像パターンの空間積分により濃淡縞を生成する。第二は複数の濃淡縞の合成・分解に基づく位相接続技術であり、長波長のガイドパターンを用いた位相接続を4パターンの投影・撮影により行うことができる。

研究成果の概要(英文)：Methods for high-frame-rate and high-density depth measurement have been developed. The proposed methodologies are based on phase shifting of fringe patterns, to which two types of novel acceleration methods are applied. The first is an optical system to generate fringe patterns at high speed using a Digital Micromirror Device (DMD), where binary patterns emitted by DMD are spatially integrated, which enables projection of fringe patterns at the rate of the DMD pattern rate. The second is a phase unwrapping method utilizing additive mixture of multiple fringe patterns which are decomposed by a signal processing technique, which enables phase unwrapping by projecting and measuring only four patterns.

研究分野：計測工学

キーワード：スマートセンサ情報システム 画像、文章、音声等認識

1. 研究開始当初の背景

奥行き計測を行うことのできるカメラシステム（距離画像センサ）が比較的安価に入手できるようになり、その利活用が活発化している。特に、対象物への能動的な光投射に基づく製品が実用面で注目を浴びている。一方で、応用によっては通常のビデオレート（例えば 30 フレーム毎秒）では十分ではなく、より高速な距離画像計測が求められている。

高速カメラを用いて高フレームレート計測を実現する手法も近年開発されており、研究代表者らも 3000 フレーム毎秒の 3 次元形状計測に成功している。それらは、固定パターンの投影、あるいは Digital Micromirror Device (DMD) プロジェクタ等により高速生成が可能な 2 値パターンの投影に基づいている。しかし、これらの手法はパターンの局所的対応づけに基づくステレオ法であり、計測される 3 次元点はカメラ画像上で疎らにしか得られない。密な距離画像が必要な場合は何らかの補間処理が必要となる。これらとは別に、投射光の往復時間を測定するタイプ (Time of Flight 型, ToF 型) の距離画像センサもよく用いられるが、特殊なイメージセンサを要するため、高速化への敷居は高い。プロジェクタ・カメラ系を用いたステレオ計測法のうち、密な距離画像を得ることが可能な方法としては、正弦波縞パターンの投影による位相シフト法が広く用いられている。しかしこの方法は高速化が難しい。

第一に、時間変化する正弦波縞パターンの投影が難しい。通常的手段としては、フィルムの機械的移動、液晶プロジェクタの利用、DMD プロジェクタの利用などが挙げられるが、いずれも高速化が難しい。DMD プロジェクタは高速駆動が可能だが、物理的には 2 値パターン投影装置であり、濃淡画像は複数パターンの時間積分により生成されるため、高速化の妨げとなっている。

高速化の試みも行われている。例えば 2 値の縞パターンの焦点ぼけ投影により正弦波縞を近似する方法が提案されているが、精度が犠牲になっており、また計測できる奥行き範囲が狭い。フィルムを移動させる代わりに直線上に配置した LED 光源の点灯を切り替える方法も提案されているが、投影を支配する幾何学的関係が通常とは異なるため、校正のために計測空間全体に対するルックアップテーブルの事前作成が必要である。計測範囲と精度はそのテーブルの規模と事前測定の手間により制限される。

高速化に対する第二のボトルネックは、位相接続の手間である。計測対象表面に不連続な境界がある場合は、位相接続は本質的に不良設定問題であり、不定性が残る。不定性を除去するため、周期の異なる正弦波を用いて複数回の計測を行うのが常套手段であるが、計測に必要な画像枚数が増加し、高速化の妨げになる。

2. 研究の目的

本研究は、上記の課題を解決して高速かつ高密度な 3 次元計測を実現するための基礎技術の確立を目的とする。第一の課題に関しては、DMD によって生成される 2 値パターンを時間積分する代わりに、光学的に空間積分することで、濃淡縞画像を生成するアプローチを試みる。第二の課題に関しては、位相接続のための情報を投影パターン内に埋め込み、カメラ側の信号処理によりこれを分離することを目指す。具体的には、異なる周期の正弦波を合成したものを投影・撮影し、周波数分解によりそれぞれの正弦波を分離して計測する新しい手法を検討する。

3. 研究の方法

(1) 縞パターンは本来的に 1 次元のパターンである。縞の濃淡値が x 方向に変化する場合、 y 方向は冗長であると言える。この冗長性を利用し、DMD が表示するバイナリパターンを y 方向に空間積分し、1 次元の濃淡変化パターンを生成することを考える。その 1 次元パターンを再度 y 方向に光学的に引き伸ばすことができれば、目的とする濃淡縞パターンを生成できる。本研究ではそのような機能を持った光学系を提案する。バイナリパターンが表示された DMD を平行光で照明し、その反射光をシリンドリカルレンズによって y 方向に集光し、ディフューザ上に濃淡のある 1 次元のパターンとして収束させる。この入力光線はディフューザによって拡散され、その後シリンドリカルレンズで y 方向にのみ引き伸ばされることで、濃淡のある縞パターンが出力されることが期待できる。この光学系を実際に構築し、検証を行う。

(2) 位相接続法として、異なる 2 種類の波長の正弦波の加法合成と分解に基づく手法を考える。この場合、解くべき未知数はそれぞれの正弦波の振幅、位相、直流成分の 6 変数である。しかし 2 つの直流成分は分離して求める必要はなく、また、2 つの振幅の比は投影パターンの振幅の比に等しいと考えられるため、実質的には 4 変数を定めればよく、適切な問題設定を行うことで 4 ステップの計測で決定し得ると期待できる。

そこで、2 種類の正弦波を加法合成したものを投影し、その観測画像から未知変数を定めることを考える。通常の位相シフト法で用いるパターンを単純に足し合わせると、2 種類の位相値を分離して求めることができない。そのため両者をそれぞれ位相シフトした際に時間領域で直交するように取ることを考える。通常の位相シフト法における位相計算は時間領域の輝度信号の 1 次の項のフーリエ係数を求めることに相当するため、これと直交する項を加えてもその計算には影響が及ばない。一方、新たに加えた項のフーリエ係数は通常の方法では一意に定めることができないが、前述のように 2 種類の正弦波

の振幅の比を既知とすると、新たに加えた正弦波の位相関数に一定の制約を課す条件下でこれが可能となる。

4. 研究成果

(1) 図に示す実験系を構築した。Texas Instruments 社の DLP LightCrafter4500 を分解して照明系を取り除き、Banner Engineering 社のフォーカス式緑色 LED スポットライトで置き換えた。DMD からの反射光が通過する投影光学系もいったん取り除き、Edmund Optics 社の平凸シリンドリカルレンズ（焦点距離 12.5 mm）2 個とホログラフィックディフューザ（拡散角 $1 \times 60^\circ$ ）1 個からなる空間積分光学系を通してから元の投影光学系に再度通す構成とした。カメラとして Point Grey Research 社の Grasshopper 3 GS3-U3-23S6M を使い、 640×480 画素の映像を撮影する設定とした。提案手法が最終的に目指すのは高フレームレート計測であるが、本実験では基本原理の確認に主眼を置くため露光時間は 19 ms に設定した。

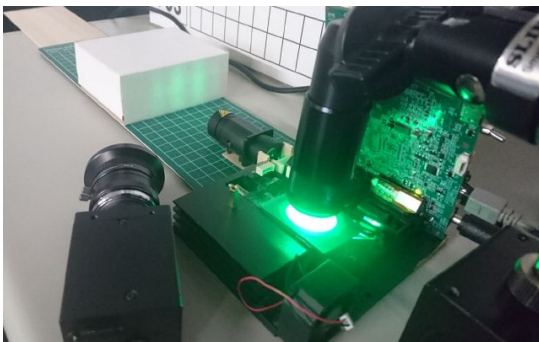
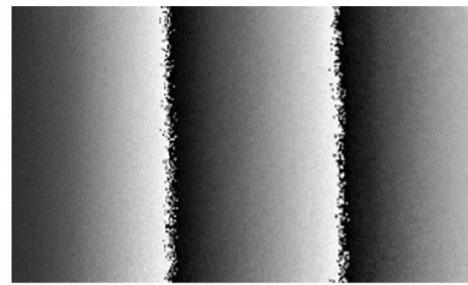
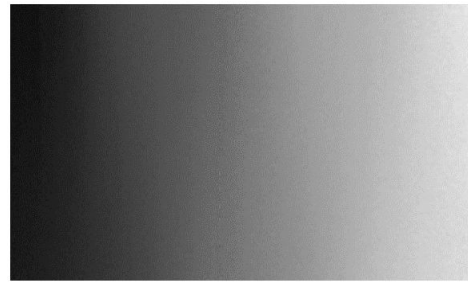


図 1: 実験システム

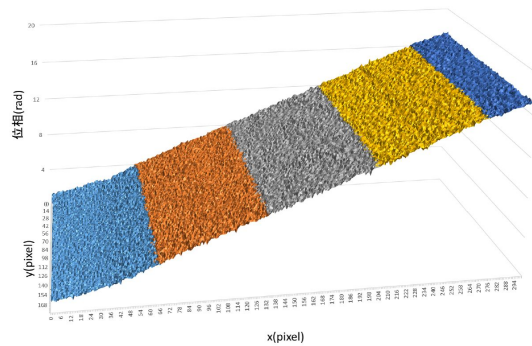
提案する光学系が期待通りに動作することを確認するため、平面を対象として 3 ステップ位相シフト法による計測を実行し、得られる位相分布の線形性を調べた。投影光学系に正対するように矩形の白色平面を配置し、投影された濃淡縞パターンをカメラで撮影した。カメラ画像上の矩形の四隅を手動で指定し、矩形となるように平面射影変換を行う。この手順により得られた画像の x 座標とその位置の画素で得られる位相には線形の関係があることが期待される。画像全体が 3 波長からなるパターンと 1 波長からなるパターンから得られた位相分布を図 2(a)(b)に示す。さらに、後者を手がかりとして前者に位相接続を行った結果を、位相を高さとして 3 次元プロットしたものを図 2(c)に示す。3 波長パターンでは良好な位相分布が得られていることが確認できる。



(a)



(b)



(c)

図 2: 位相計測結果

(2) 位相接続法に関しては、最も簡単で基本的な位相関数として、投影パターンの x 座標に対して線形に変化する 2 種類の正弦波を合成したものについて評価を行った。合成された 4 シフト分のパターンを図 3 に示す。この投影パターンの観測結果から、投影パターン座標系上の x 座標を復元するシミュレーション結果を図 4 に示す。これにより提案手法の原理上の動作が確認できた。



(a) $n = 0$



(b) $n = 1$



(c) $n = 2$



(d) $n = 3$

図 3: 提案する投影パターン

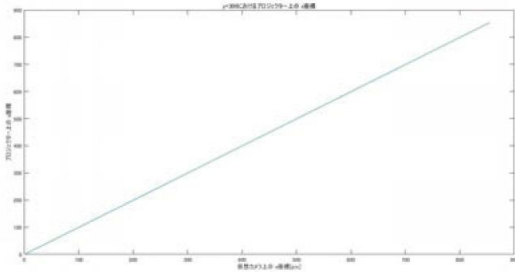


図 4: シミュレーションによる位相推定結果

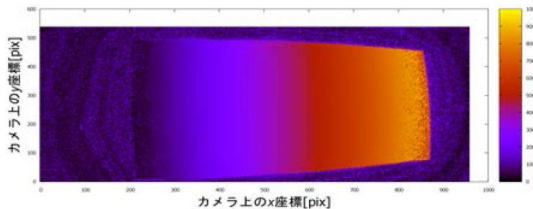


図 5: 実験による位相推定結果

プロジェクタとして Texas Instruments 社 DLP LightCrafter 4500 を、カメラとして Point Grey Research 社 Grasshopper 3 GS3-U3-23S6M を用いた実験システムを構築し、同様に投影パターン座標系の x 座標をカメラ画像から復元する実験を行った。結果を図 5 に示す。カメラ画像上の両端領域を除くと概ね良好な結果が得られていることがわかる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 5 件)

Shingo Kagami, Koichi Hashimoto: High-frame-rate region-based visual tracking on CPU: an implementation perspective, Proc. 2016 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII2016), pp.562-567, Sapporo, Japan, 2016. 査読有.

DOI: 10.1109/SII.2016.7844058

Yuta Imai, Shingo Kagami, Koichi Hashimoto: Estimation of a large relative rotation between two images of a fast spinning marker-less golf ball, Proc. 2016 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII2016), pp.556-561, Sapporo, Japan, 2016. 査読有.

DOI: 10.1109/SII.2016.7844057

Akifumi Goto, Shingo Kagami, Koichi Hashimoto: Display tracking using blended images with unknown mixing ratio as a template, Proc. 9th ACM SIGGRAPH Conference and Exhibition on Computer Graphics and Interactive Techniques in Asia (SIGGRAPH Asia 2016), Technical Briefs, Article No. 24, Macau, 2016. 査読有.

DOI: 10.1145/3005358.3005381

Shingo Kagami, Kotaro Omi, Koichi Hashimoto: Alignment of a flexible sheet object with position-based and image-based visual servoing, Advanced Robotics, Vol.30, No.15, pp.965-978, 2016. 査読有.

DOI: 10.1080/01691864.2016.1183518

Shingo Kagami, Koichi Hashimoto: Sticky Projection Mapping: 450-fps Tracking Projection onto a Moving Planar Surface, Proc. 8th ACM SIGGRAPH Conference and Exhibition on Computer Graphics and Interactive Techniques in Asia (SIGGRAPH Asia 2015), Emerging Technologies, Article No. 23, Kobe, Japan, 2015. 査読有.

DOI: 10.1145/2818466.2818485

〔学会発表〕(計 5 件)

長沼 朋哉, 鏡 慎吾, 橋本 浩一, DMD を用いた三次元計測のための濃淡縞パターン高速生成, 画像センシングシンポジウム, 2018.

鏡 慎吾, 動きをとらえる高フレームレート画像処理とその応用 (招待講演), 第 6 回バイオメトリクスと認識・認証シンポジウム, 2017.

塩谷 美帆, 鏡 慎吾, 橋本 浩一, 高速三次元計測のための合成正弦波を用いた位相シフト法, 画像センシングシンポジウム, 2017.

鏡 慎吾, 橋本 浩一, 領域ベース平面追跡の高速計算, 計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 2016.

鏡 慎吾: 高フレームレート画像追跡とその応用 (招待講演), 2016 年 6 月パーティクルフィルタ研究会, 仙台市, 2016.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

鏡 慎吾 (KAGAMI, Shingo)

東北大学・大学院情報科学研究科・准教授
研究者番号: 90361542