

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 27 日現在

機関番号：12608

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24650080

研究課題名(和文)時空間変調したLight Fieldに基づく動体の高速3次元計測法

研究課題名(英文)Fast 3D Object Tracking using Spatially and Temporally Modulated Light Field

研究代表者

熊澤 逸夫(Kumazawa, Itsuo)

東京工業大学・像情報工学研究所・教授

研究者番号：70186469

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円、(間接経費) 900,000円

研究成果の概要(和文)：本課題では、運動物体の3次元位置を光学的に計測する上で都合が良い照明系を、時空間変調したLight Fieldとして形成し、照明光のあるいは受光素子への入射光の一本一本を区別して計測することによって、動体の3次元計測を高速高精度化することを試みた。その結果、モータで駆動するミラーを通じてプロジェクタ光の反射角度を変えて、異なる波長で異なる方向から光を投射する照明装置を完成し、それを指のジェスチャーの3次元計測に応用し、良好な結果を得た。またこの結果を踏まえ、提案システムの発展形として数百のLED照明や画像センサを個別に動かしてスキャンしながら対象を計測する超分散照明・計測方式を考案した。

研究成果の概要(英文)：In the project, optical measurement systems with spatially and temporally modulated light field for lighting are developed and their effectiveness for three dimensional tracking of a moving object is evaluated. As an application, the various finger gesture actions for the smart television manipulation are shown to be tracked using the proposed system. As an extension of the developed system, an ultra-distributed lighting and sensor system is proposed. The system observes the moving object with hundreds of lighting sources and image sensors implemented with an efficient scanning method.

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・知覚情報処理・知能ロボティクス

キーワード：情報センシング 画像計測 3次元計測 物体追跡 Light Field 照明 画像センサ

1. 研究開始当初の背景

近年の光学技術と記録技術の進歩によって、Light Field の4次元の情報を計測、記録できる基盤が整いつつあることから、SIGGRAPH 等で Light Field の分析や応用に関する論文が発表されるようになった。例えば、2008年のSIGGRAPHで Liang, C.K. 等は Light Field の計測方法を、また Raskar, R. 等は Light Field 理論をカメラのグレアの低減へ応用した研究を発表している。一方、筆者等は、蛍光顕微鏡光学系のモデルの構築に Light Field 理論を応用し、任意光学系のシミュレータ(空間内の光線の位置と方向の計測装置)を独自に構成した。従来の CCD センサ等の撮像デバイスは、計測位置(x, y)に入射する光線の入射方向を区別できないため、計測できるのは光量の2次元の分布 $I(x, y)$ のみであったが、これを Light Field 理論では、画素に入射する光線を、入射方向(,)も区別して4次元の情報 $I(x, y, ,)$ として計測、利用することに特徴がある。上記シミュレータでは、X-Y-Z ステージを動かしながら、この4次元情報を計測していたため、静止した Light Field しか観測できず、動いている物体の3次元計測に利用できなかった。そこで本研究では、複数方向から異なる色で時空間変調した光で観察対象を照明する技術を併せて用いることにより、時間的に変化する Light Field を計測することを可能とし、ロボットの高性能化に不可欠な高速3次元動体計測技術を確立することにした。



図1 : X-Y-Z ステージを用いた Light Field 計測装置

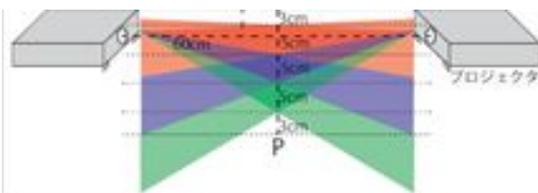


図2 : 色と強度を時間変調する照明系による Light Field 計測装置

2. 研究の目的

本研究では、従来のレンズ光学系を用いる画像計測方式に代わる革新的な光学計測原理を Light Field 理論に基づき開発し、それを高速に運動している物体の3次元計測へ応用することを目的とする。Light Field とは、3次元空間中に飛び交うあらゆる光線の情報を、3次元の各位置で方向別、波長別に表現した「光線場」のことであり、空間内の光学的情報を完全に表す。従来のカメラでは、撮像センサの画素が並ぶ平面に投射される画像を計測する際に、画素に入射する光線の方向を区別できなかったが、Light Field を計測するためには、その方向を区別する必要がある。本課題では、照明系の工夫により、通常のカメラでも Light Field を計測できるようにして、動体の3次元計測を少ない計算量で高精度に実現することを目的とする。

3. 研究の方法

先の研究課題では図1の装置を製作し、X-Y-Z ステージを動かしながら、対象物体から反射してくる光線の Light Field を計測し、Light Field により対象の3次元形状や3次元運動を少ない計算量で高精度に計測できることを確認し、学会で発表した。ただしこの装置では、X-Y-Z ステージを動かす間、対象物体は静止してなければならず、もしも対象が動いて物体から反射する光線の Light Field が変化する場合、計測結果に大きな誤差が生じてしまう。そこで本課題では、物体が動き、Light Field が時間的に変化する場合でも、それを実時間で計測できるように、図2に示すように色と強度を時間的、空間的に変調させた照明光を液晶プロジェクタで生成し、この特殊な照明を利用して、物体から反射してくる光線の位置と方向の4次元情報を簡易なアルゴリズムで高速に計測する。またこうして実時間で計測された Light Field を用いて、物体の3次元運動を高速・正確に計測する手法を確立する。

そのため前課題の最後に図3に示すように照明光を液晶プロジェクタによって生成することによって、任意の照明条件(照明光パターンの時空間変調)をコンピュータでプログラミングして生成できるようにして、本課題に備えた予備実験を実施した。

しかしながら、液晶プロジェクタの投射光は毎秒30フレーム程度のフレームレートでしか変更できないため、動体の計測には不十分であることが判明し、図4に示すようにプロジェクタの投射光をさらにステッピングモータによって角度を変えるミラーによって、高速に反射方向を変化させることで時間変調して、計測対象に当てるようにした。

本課題は、こうして液晶プロジェクタで空間的に照明パターンを自在に設定できるようにした上でそれをミラーにより高速に時間変調して、3次元空間内の動体の追跡を試みた。



図3：2台のプロジェクタで時空間変調した照明光を照射（時間変調速度は液晶プロジェクタのフレームレートに制限される）。

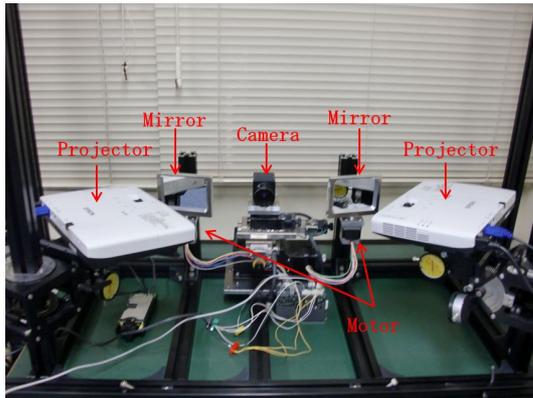


図4：図3の装置にさらにステッピングモータで角度を変えるミラーを設置して、プロジェクタの照射光をミラーで反射させてから対象に当てるようにして、フレームレートに制限されずに高速に時間変調できるようにした装置。

4. 研究成果

以上の研究方法で得られた各年度の成果を以下に述べる。

平成24年度：

本研究では、従来のレンズ光学系を用いる画像計測方式に代わる革新的な光学計測原理をLight Field理論に基づき開発し、それを運動している物体の3次元リアルタイム計測へ応用することを目的として、平成24年度には、以下の研究成果を得た。まず、照明系の工夫により、通常のカメラでは区別できない光線の方向を区別して計測するために、照明光を、液晶プロジェクタで光線方向ごとに色と強度を時間変調して、対象に照射するようにした。それによって、色と変調パターンの相違により光線毎にラベルを付けて、通常のカメラを用いながらLight Field理論を利用できるようにした。またこの装置を用いて人の顔の立体形状をリアルタイムで計測できることを実験的に確認した。当初の計画では、プロジェクタ数を4台に増やすことで、多様な照明方向(光線方向)を実現する予定であったが、モータで駆動するミラーを通じてプロジェクタ光の反射角

度を変えて照明することによって、2台の液晶プロジェクタで多様な方向の照射光を得ることを可能とした。このように色と時間変調パターンによってラベル付けした光線を用いる照明系を試作して、反射角度を変えて照明光の方向をパソコンによって制御できるようにした。

平成25年度：

2台の液晶プロジェクタから様々なパターンを変えて投射光を計測対象に照射する際に、ステッピングモータにより高速、高精度に動いて反射光の方向を変えるミラーを介在することによって、フレームレートに制約されずに照明光を高速に時間変調する機構を構成した。この照明装置によって、異なる方向から異なる色と強度で時空間変調した照明を対象に当てて、観察される画像の色と強度の時空間変調パターンに基づき、3次元空間を動く対象をリアルタイムに追跡する技術を開発し、追跡対象を昨年度の「人の顔」から、顔よりも高速に動き、大きさも小さな「指」として、時空間解像度を改善することで、指のジェスチャーを認識することを試みた。この研究の過程で、コストとサイズを抑えながら、多数の照明光源とカメラを分散配置して、その全てを動かしながら、対象を計測する方式の着想を得て、これらの常時動いている照明光源とカメラの姿勢を、コストが低い単純なセンサで計測する原理を考案し、それ(プロジェクタ及び画像センサ傾斜角度検出用分散設置型センサ)を試作した。このセンサは小型で簡易なメンブレイン型センサであり、光源と画像センサをそれぞれ個別に首振りするようにヒンジを用いて多数フレームに設置して、単一の動力源でフレーム全体を振ることで、光源とセンサを首振り運動させた時に、触れの位相を計測することを可能とするものである。センサそのものは触れが端に至るタイミングを計測するだけのメンブレイン型スイッチであるため安価に製作できる上、多数の光源とカメラを振るためのモータを光源とカメラ個別に用意する必要がなくなり、フレーム全体を動かす1つのモータで済ませることを可能とする画期的な原理であり、これまでに2台のプロジェクタとカメラで有効性を検証した手法を光源とカメラを増やして性能向上する際に利用することができる。

本課題の成果を評価した実験結果：

以上の成果を実験的に評価した結果を以下の図と表に示す。

まず図5には、提案手法によって動きを追跡して識別する指のジェスチャーがどのようなものであるかを示す。

また図6に、前処理として行った背景除去とモノクロ画像化の結果を示す。

そして図7には3次元計測アルゴリズムの適用結果を示す。

最後に図8には、指のジェスチャーの識別結果を示す。

◎複数の指の動きからジェスチャー認識を行う
 ◎机上にカメラを置き、仮想的なタッチパネルを生成
 ◎複数の指のジェスチャー認識により、スマートTVをコントロール

Point! 3次元計測を用いることで高精度に認識
 ・背景除去が容易になる
 ・複数の指の認識が容易になる
 ・カメラ方向に突き出した指を認識しやすい

◎実現させる主なジェスチャー

- ◎ポインティング
 - 1 本指を上下左右に動かす
 - 2 本指を近づけたり離したりする
- ◎クリック
 - 1 本指を前後に動かす
- ◎スクロール
 - 水平に提示した2本指を上下に動かす
 - 垂直に提示した3本指を左右に動かす

◎拡大縮小

◎ブラウザの戻る・進む

図5：本課題で識別することを指す様々な指のジェスチャー

背景除去処理

◎操作領域内外で指領域の輝度値が大きく変化する性質を利用

◎指領域（下図の赤い円）の輝度値を監視して、小さくなったときに背景画像を更新

モノクロ画像復元

◎カラーモノクロ変換式でモノクロ画像を生成する
 ◎青の領域が暗くってしまう
 $Y = 0.299R + 0.587G + 0.144B$

◎距離画像の結果を用いて画像を補正することで、均質なモノクロ画像を復元する

距離ごとに画像を分離

平均輝度 128 に補正

G画像（遠距離） B画像（中距離） R画像（近距離）

図6：背景除去とモノクロ化の前処理の結果

3次元計測アルゴリズム

◎LBP特徴を用いたAdaBoostのカスケード型識別器

Point! 性質の異なる識別器を組み合わせることで性能を向上

モノクロ画像 → 距離画像 → 統合結果

モノクロ画像用識別器

距離画像用識別器

図7：3次元計測アルゴリズムの適用結果

◎実験環境

光源：液晶プロジェクタ (EB-1750) × 2台
 手前から G, C, B, M, R の光を照射 25cm

環境光：蛍光灯または暗室
 カメラ：ARTCAM-036M1
 フレームレート：約 60fps

◎計算時間

クロック	指先エリア限定処理	1フレームの平均実行時間	平均フレームレート
3.5GHz	○	3.91 [ms]	256 [fps]
3.5GHz	×	4.96 [ms]	202 [fps]
1.66Hz	○	8.09 [ms]	124 [fps]
1.66Hz	×	10.8 [ms]	93 [fps]

◎成功例 (左から入力・距離・モノクロ・検出結果の画像)

◎失敗例 (左よから入力・距離・モノクロ・検出結果の画像)

◎指先エリア限定処理の精度

動画番号	指の本数	撮影環境	フレーム数	指先エリア限定処理の成功率	指先エリア限定処理の面積削減率	指先抽出の成功率
1	1	暗室	2136	99.8%	84.4%	90.7%
2	1	蛍光灯	2072	100%	85.9%	89.2%
3	1~2	暗室	2108	88.8%	83.7%	79.7%
4	1~2	蛍光灯	2155	90.4%	83.5%	75.3%

図8：指のジェスチャー識別精度の評価結果

5. 主な発表論文等

- 〔雑誌論文〕(計3件)
- (1) 福司謙一郎, 熊澤逸夫, “複数視点の時系列奥行情報の統合による隠ぺいに頑健な領域分割”, 電子情報通信学会和文論文誌 D, Vol. J96-D, pp.1039-1047(2013) (査読有)
 - (2) Charles-Henri Quivy and Itsuo Kumazawa, “It’s orange and small, and white stripes... Augmented-Reality System for Fish Species Identification in Aquariums”, Proceedings of PCM2012 - Pacific-Rim Conference on Multimedia 2012, Vol.1, pp.210-221 (2012)(査読有)
 - (3) 鈴木 健斗, 熊澤逸夫, “照明の光線場を用いたジェスチャー認識のための高速指先位置検出”, MIRU2012 画像の認識・理解シンポジウムプロシーディングス, Vol. IS3-15, pp.440-447(2012) (査読なし)

- 〔学会発表〕(計2件)
- (1) Saran Suwannachakul, Teerasit Kasetkasem, Kitti Chumkesornkulkit, Preesan Rakwatin, Thitiporn Chanwimaluang and Itsuo Kumazawa, “Rice Cultivation and Harvest Date Estimation Using MODIS NDVI Time-series Data”, Proceedings of the

International Conference on Information and Communication Technology for Embedded Systems 2014, Ayutthaya, Thailand (2014年01月23日~2014年01月25日) (査読なし)

(2) S Ponlapak Phuhinkong, Teerasit Kasetkasem, Preesan Rakwatin, Thitiporn Chanwimaluang and Itsuo Kumazawa, "Inundation Region Identification Using the Level Set Method", Proceedings of the International Conference on Information and Communication Technology for Embedded Systems 2014, Ayutthaya, Thailand (2014年01月23日~2014年01月25日) (査読なし)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

熊澤逸夫 (Kumazawa, Itsuo)

東京工業大学・像情報工学研究所・教授

研究者番号：70186469