

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 8 日現在

機関番号：30107

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25330181

研究課題名(和文) 不均衡点群照合法を用いた3次元対象物へのロバスト画像投影システムの開発

研究課題名(英文) Robust Image Projection System for the 3D Object based on Point Cloud Registration dealing with Point Sets having Different Numbers of Points

研究代表者

高氏 秀則 (TAKAUJI, Hidenori)

北海学園大学・工学部・教授

研究者番号：90431329

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：3次元物体を投影対象とした場合においても、ユーザに対して適切な2次元画像提示が可能な「2D」プロジェクタを開発した。

投影対象の詳細な形状情報の取得には、オフラインで投影対象を詳細に計測した密なモデル点群とTOFカメラで計測した粗いデータ点群を照合することで高速な3次元形状認識を実現した。

また、3次元点群として得られる投影対象の3次元物体形状を利用した投影画像の歪み補正手法を開発し、曲面状の凹凸面を投影対象とした2次元画像提示を実現した。

研究成果の概要(英文)：We developed the "2D projector" which can project a 2D image onto a 3D object and display images easily viewable for users.

Point cloud registration between the model point set and the data point set is used to obtain the detailed shape information of the 3D projection object. The model point set obtained from offline measurement is high-resolution and dense data. In contrast, the data point set measured by TOF camera is sparse data.

Additionally, we developed a distortion correction technique of projected images using the shape information of the 3D projection object obtained as point cloud data. The technique enables 2D image projection onto a curved concave-convex surface.

研究分野：情報学、知覚情報処理

キーワード：画像情報処理 視覚情報提示 3次元形状認識 点群照合 知能ロボティクス

1. 研究開始当初の背景

近年、2次元平面に立体的な映像を映し出す3Dプロジェクタや3Dテレビが開発・販売されている。しかし、人間に対して情報を提示する場合、例えば道路標識などのように、認識の容易さから3次元よりも2次元による情報提示が適する場面も多い。そこで、本研究では3次元物体に対し2次元画像(平面画像)が投影可能な「2D」プロジェクタの開発を目指し研究を開始した。

実物体をスクリーンとみなし光源位置や物体の反射特性を仮想的に変化させる研究や、アートの世界では立体的なオブジェクトに画像を投影する事により空間を演出するプロジェクションマッピングが実現されている。しかし、これらは投影対象が既知であったり、形状が単純な場合が多く、複雑な形状や未知の場合には実現されていない。また、これらは3次元対象物の形状自体を活かすことに重点が置かれており、3次元対象物上に2次元平面を実現するという本研究の目的とは明らかに異なる。

投影対象の3次元形状の取得にはレンジファインダやTOF(Time-of-Flight)カメラなど様々な手法が開発されているが、計測可能なのは、ある1方向からの表面形状のみであり、短時間に詳細な形状(全周囲データ)を計測するのは困難である。我々は局所領域における点群の密度情報を利用することで、点群総数が異なる点群間の照合(不均衡点群照合)を実現しており、その開発過程においてモデル点群とデータ点群の点群照合により対象物の詳細形状を認識する着想を得て、これを3次元対象物への画像投影に利用することを考えた。

2. 研究の目的

3次元物体をプロジェクタの投影対象とした場合の問題点は、通常の平面スクリーンへの投影画像とは異なり、投影対象の形状やその表面特性、ユーザの観測位置(ユーザ視点)に依存して、ユーザが目にする投影画像は、画像の歪みや隠れ、明るさのバラツキが発生することである(図1)。そこで、3次元物体を投影対象とした場合においても、ユーザに対して適切な画像提示が可能な「2D」プロジェクタを実現するため、次の二つの研究目的を設定した。

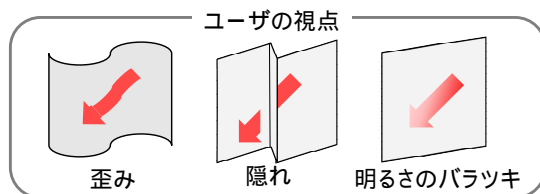


図1 投影画像の歪みや隠れ

(1) 投影対象物の3次元形状認識手法の開発

3次元物体を画像投影対象とした場合、投影

画像は投影対象の形状により歪みが生じる。この歪みの補正には投影対象の詳細な形状情報が必要となる。本研究では、投影対象の計測に、計測点数は多くはないが実時間である方向からの3次元位置の計測(データ点群の取得)が可能なTOFカメラを利用する。投影対象の詳細な形状情報の取得には、オフラインで投影対象を詳細に計測した密なモデル点群(全周囲データ)を利用し、TOFカメラで計測した粗いデータ点群と照合すること(不均衡点群照合)で、高速な3次元形状認識を実現する(図2)。

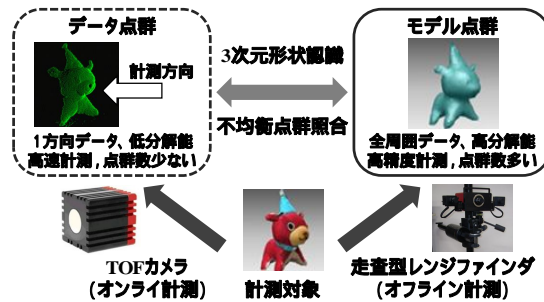


図2 3次元形状認識

(2) ロバスト投影画像生成手法の開発

ユーザに対して適切な2次元画像提示を実現するため、投影対象物の3次元形状と表面特性に応じた投影画像の補正手法が必要となる。また、画像投影時にプロジェクタ・カメラシステムを利用することで、ユーザの観測位置に応じたロバストな投影画像生成を実現する。

3. 研究の方法

初期段階で課題を独立した二つの課題「投影対象物の3次元形状認識手法の開発」と「ロバスト投影画像生成手法の開発」に切り分け、並行して研究を遂行し、最終的にこれらの研究成果を統合し、「不均衡点群照合法を用いた3次元対象物へのロバスト画像投影システムの開発」を行う。

(1) 投影対象物の3次元形状認識手法の開発

現在、走査型レンジファインダなどにより、物体の3次元形状を3次元点群として高密度・高精度に計測できる。しかし、これらは計測時間が長く装置自体も大型となることから、実時間物体認識のためのセンサとして不向きである。本研究では、投影対象の計測にTOFカメラを利用する。これは、計測点数は多くはないが実時間での距離計測と同時に画像の取得も可能なセンサである。投影対象の詳細な形状情報の取得は、オフラインで詳細に計測した投影対象の密なモデル点群とTOFカメラで計測した疎なデータ点群を照合することで投影対象の位置・姿勢を認識する。点群照合はBeslらによって提案されたICP(Iterative Closest Point)アルゴリズムを用いることが多いが、モデル点群とデータ

点群では点群総数が異なるため ICP を直接適用することは困難である。本研究では、我々が独自に開発した局所領域の点群の密度を意味する局所一貫性（以下、LCPD：Local Consistency of Point Dispersion）を不均衡点群間の照合に利用する。この際、TOF カメラによる単位面積あたりの計測点数は、対象物までの距離に依存することから、これらの影響を除去する前処理についても考察する。

(2) ロバスト投影画像生成手法の開発

3次元物体を画像投影対象とした場合、投影画像をユーザに歪みなく見せるためには、投影対象の形状とユーザの観測位置に応じて投影画像を適切に補正しなければならない。この補正をプロジェクタ - カメラシステムを用いて実現した先行研究があるが、これはユーザ視点に設置したカメラからの情報を必要とする。本研究では、画像を提示する対象はユーザであり、ユーザ視点からの画像情報は利用できない。したがって、ユーザの観測位置（ユーザ視点）とモデル点群から得られる投影面の詳細な3次元形状のみを利用した投影画像補正を実現する。我々は、投影対象が平面の場合における投影画像補正手法として、拡張現実感（Augmented Reality, AR）研究用のソフトウェアライブラリである ARToolKit により平面の位置・姿勢を取得し、ユーザ視点に応じて投影画像を補正する手法を開発した。本研究では点群で得られるより複雑な3次元形状に対応した投影画像補正手法を開発する。

4. 研究成果

(1) ICP による点群照合を用いた形状認識手法の開発

投影対象の3次元形状の位置・姿勢の認識には、オフラインで詳細に計測した投影対象の密なモデル点群と TOF カメラで計測した疎なデータ点群を照合することで実現する。この際、点群照合手法として用いる ICP アルゴリズムは、点群間で点群総数が異なる場合、ICP の評価値分布は極小値が多くなり照合の成功率が低下する。そこで、ICP における最近傍探索を K 近傍探索に拡張し、対応点ごとに K 個の点間距離を求め、その総和を評価値とする改良を行った。これにより評価値分布が滑らかになり、結果として成功率の改善を実現した（図3）。

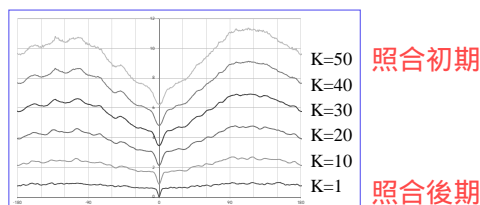


図3 K近傍探索による評価値分布

(2) LCPD による点群照合を用いた形状認識手法の開発

我々が独自に開発した LCPD を利用した点群照合手法において、LCPD の局所領域サイズを照合段階に応じて更新していくことで大局的照合性能（初期位置ずれの許容範囲）と照合精度を両立させた。3次元計測器による単位面積あたりの計測点数は対象物までの距離に依存するため、LCPD はこれをそのまま照合に利用できない。そこで、TOF カメラの測定原理を考慮することで、これらの影響を除去する前処理を実現した。

(3) 3次元点群照合における点群数削減手法の比較

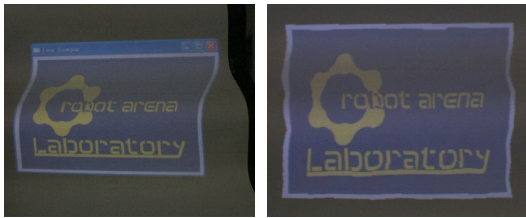
3次元点群照合の高速化には点群数の削減が有効であるが、点群削減方法に依存して照合速度と照合精度が異なる。そこで、点群削減方法としてボクセル法と特徴点抽出法の2手法の比較を行った。特徴点の抽出には近傍点を利用した局所平面を複数生成し、各局所平面の法線方向間に大きな違いがある場合に、その点を特徴点として抽出した。実データを用いた照合実験の結果、ボクセル法は元点群の形状情報を残した点群削減が行われるため、照合精度の低下の少ない高速な照合が行えたが、特徴点抽出法はエッジを強調する手法のため、曲面の多い点群に対しては元点群の形状情報が失われることになり、結果として照合精度の低下が発生することが確認された。

(4) 平面形状を利用した投影画像の歪み補正手法の開発

3次元物体を画像投影対象とした場合、投影画像をユーザに歪みなく見せるためには、投影対象の形状とユーザの観測位置に応じて投影画像を適切に補正する必要がある。まず、投影対象が単純な平面で構成される場合の投影画像補正手法について検討した。従来、平面の位置・姿勢の検出には平面に張り付けた既知のマーカ（ARToolKit）を用いていたが、これを TOF カメラから得られる点群データにより代替した。ピンホールカメラモデルによる光線と計測データから得られる平面との交点からなる投影画像補正手法を導出し、その有効性を実験的に検証した。

(5) 3次元物体形状を利用した投影画像の歪み補正手法の開発

曲面状の凹凸面に対する投影画像の歪み補正手法を開発した（図4）。3次元点群で与えられた投影対象に対し、点群中から近傍3点を選択し平面を生成することで投影対象を小領域からなる平面で近似し、これらの各平面に対して投影画像補正手法を適用することで曲面状の凹凸面に対応した。また、平面で近似する際の分解能（平面領域の大きさ）が歪み補正に与える影響について実験的に検証した。



(a)補正前 (b)補正後

図4 投影画像の歪み補正

(6) 画像投影における投影距離に依存した輝度減衰の軽減

画像投影において投影対象に光が届くまでに距離に依存して光量が減衰する。このためユーザが目にする投影画像の輝度値は投影距離によってバラつき、ユーザに対して適切な画像提示が行えない。この問題を軽減するため、投影距離の影響を検証し、それに応じて投影画像の輝度を補正する手法を開発した。投影画像の輝度補正には観測カメラから取得した画像の輝度情報を利用する。この取得画像はレンズの絞りの影響から画像周辺部分の輝度が低下する周辺減光が発生している。そこでプロジェクタの輝度補正の精度を高めるために、取得画像中心部の輝度値を利用した周辺減光補正を行った。次に基準距離地点で取得した画像との輝度差を利用し投影画像の輝度補正を行うことで、投影距離に依存した輝度減衰の軽減を実現した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計5件)

土谷圭央、高氏秀則、花島直彦、段階処理を用いた点群照合の高精度・高速化と照合範囲の拡大、精密工学会誌、査読有、Vol.79、No.11、2013、pp.1110 - 1116

近藤正一、金子俊一、高氏秀則、前田俊二、渋谷久恵、ロバストかつ高い収束性能を持つ二次元点群照合アルゴリズム、精密工学会誌、査読有、Vol.79、No.11、2013、pp.1130 - 1136

〔学会発表〕(計5件)

高橋大空、高氏秀則、金子俊一、屋内環境における壁面情報を用いた全方位カメラ搭載の移動ロボットの自己位置推定、第14回計測自動制御学会 システムインテグレーション部門講演会、2013年12月20日、神戸国際会議場(兵庫県・神戸市)

S.Kondo, S.Kaneko, H.Takauji and S.Maeda, RODD: Robust Matching of Dot Dispersion, International Symposium on Optomechatronic Technologies (ISOT2013), October 28, 2013, Jeju Island (Korea)

近藤正一、金子俊一、田中孝之、前田俊二、高氏秀則、RODD: ロバストでかつ収束性

能の高い点群照合アルゴリズム、平成 25 年電気学会 電子・情報・システム部門大会、2013年9月5日、北見工業大学(北海道・北見市)

6. 研究組織

(1)研究代表者

高氏 秀則 (TAKAUJI, Hidenori)

北海学園大学・工学部・教授

研究者番号：90431329

(2)研究分担者

金子 俊一 (KANEKO, Shun'ichi)

北海道大学・情報科学研究科・教授

研究者番号：50134789