

平成 30 年 5 月 24 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2014～2017

課題番号：26709012

研究課題名(和文)高精度三次元計測のための飛行体制御

研究課題名(英文)Control of UAV for 3D measurement with high accuracy

研究代表者

荒井 翔悟 (ARAI, SHOGO)

東北大学・工学研究科・准教授

研究者番号：80587874

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 10,700,000円

研究成果の概要(和文)：プロジェクタとカメラを利用したアクティブステレオ法は、テクスチャレス物体の三次元計測が可能である。特に、高架式の道路、トンネル、建物の構造物検査のような巨大な対象の特定の箇所を精密に三次元計測したい場合には、プロジェクタ-カメラシステムを搭載した移動体による三次元計測が有効である。このような背景の下、本研究はプロジェクタ-カメラシステムを搭載した飛行体による高精度三次元計測のために必要な技術の確立を目的とする。主な研究成果は、アクティブステレオ法による高精度三次元計測法の提案、三次元計測結果を使った物体認識技術の確立、計測の適切なポイントを動的に計算するアルゴリズムの提案、に大別される。

研究成果の概要(英文)：Active stereo methods with a projector-camera system can measure 3D surface of texture-less objects. 3D measurement performed by the projector-camera system installed on a moving vehicle is useful for the inspection of elevated roads, tunnels, and buildings. The purpose of this research is to develop essential technologies for high accurate 3D measurement by a UAV equipped with the projector-camera system. We have proposed a high accurate 3D measurement method categorized as the active stereo method, pose estimation algorithms by using 3D point cloud, and algorithms for determining appropriate position of the UAV in order to obtain high accurate 3D measurement.

研究分野：制御工学

キーワード：飛行体 三次元計測

1. 研究開始当初の背景

高解像度・高フレームレートなカメラ，ならびに小型プロジェクタが低価格で入手可能になったことで，工業部品の計測，人の体型計測，文化財・美術品の計測など，さまざまな用途の三次元計測にプロジェクタ・カメラを用いるケースが増大している。

非接触センサによる計測が求められるシステムでは，プロジェクタ・カメラの利用が有効である．特に，高架式の道路，トンネル，建物の構造物検査のような巨大な対象の特定の箇所を精密に三次元計測したい場合には，プロジェクタ・カメラシステムを搭載した移動体による三次元計測が効果を発揮する。

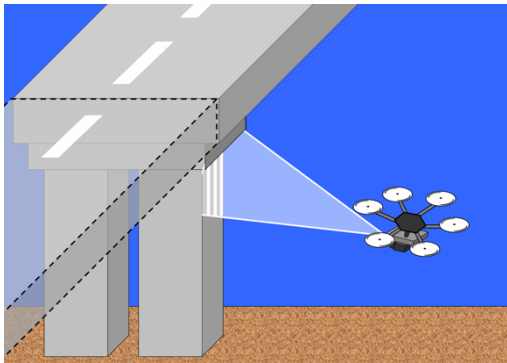


図1：プロジェクタ・カメラによる構造物検査のイメージ

2. 研究の目的

この背景の下，本研究ではプロジェクタ・カメラシステムを搭載した飛行体による高精度三次元計測のために必要な技術の確立を目的とする．研究項目は主に，アクティブステレオ法による三次元計測技術の確立，三次元計測結果を使った物体認識技術の確立，三次元形状計測の適切な計測ポイントを動的に計算するアルゴリズムの開発，に大別される。

3. 研究の方法

本研究では，プロジェクタ・カメラを搭載した飛行体による高精度な三次元計測を可能とするために必要な技術開発を行う．研究計画全体における課題は，1. プロジェクタ・カメラによる三次元計測システム構築，2. アクティブステレオ法による高精度三次元計測技術の確立，3. 三次元計測結果を使った物体認識・位置姿勢推定技術の確立，4. 動的計測ポイント設定アルゴリズムの構築，に大別される．以下，項目別に説明する。

(1) プロジェクタ・カメラシステムの構築

プロジェクタ・カメラシステムを飛行体に搭載する．一般にプロジェクタの最大輝度・コントラストが大きいほど，高精度な計測が可能になるが，消費電力・重量共に増大する．このトレードオフを考慮したシステム構築を行う．システム構築後，計測精度に大きな影響を与えるプロジェクタの光学特性（輝度階調特性，照度の空間的ばらつきなど）の把握のた

めに校正実験を行った後，アクティブステレオ法による三次元計測を行い計測精度を把握する．このデータは，パターン光の生成に生かされる．最後に，計測範囲を考慮した上で，カメラ・プロジェクタ間の位置決めを行い，固定用のステーを製作する．

(2) 照射パターンと計測精度の評価

プロジェクタ・カメラを搭載した飛行体によってアクティブステレオ法による三次元計測を行う場合，さまざまな要因によって三次元計測精度が左右される．考えられる要因として，計測対象物体表面の光学特性，照射パタンのパターンとサイズ，計測中の飛行体の微小移動挙げられる．こうした要因に対処するため，投影パタンのサイズ決定アルゴリズム構築，既存のアクティブステレオ法の高精度化，計測対象表面の光学特性に応じた最適な照射パタンの自動生成アルゴリズムの構築を実施する．

(3) ステレオカメラ・プロジェクタを利用した三次元物体認識・位置姿勢推定アルゴリズム構築

アクティブステレオ法では，一般に複数のパターン光を投影・撮像するため，計測中の飛行体の移動は無視できない．計測中の計測装置の移動は三次元計測精度を悪化させる要因となる．こうした計測中の計測装置の微小な移動にロバストな三次元物体認識・位置姿勢推定アルゴリズムを構築する．

(4) 動的計測ポイント設定アルゴリズム

センサスケジューリングアルゴリズムを元にして，多数の候補の中から有用なデータを計測できると期待されるプロジェクタ・カメラの位置・姿勢を制御系のダイナミクスを考慮した上で決定するアルゴリズムを構築する．

4. 研究成果

得られた研究成果について，以下に項目別に記述する．

(1) プロジェクタ・カメラシステムの構築

プロジェクタ・カメラシステムを構築し，主に三次元計測方法について検討した．計測精度に大きな影響を与えるプロジェクタの光学特性の把握のために校正実験を行った後，三次元計測法の一つである位相シフト法，及びステレオ法による三次元計測を実施した．

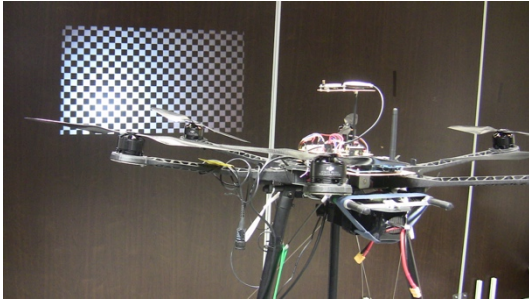


図2: プロジェクターカメラシステムを搭載した飛行体

(2) 投影パタンのサイズ決定

カメラとプロジェクタを用いたアクティブステレオ法による三次元計測法では、プロジェクタから予め設計された特定のパタン光を対象に照射する。高精度な三次元計測のためには、カメラによる撮像によってコントラストの高い画像が得られることが望ましいが、これは計測対象の材質に大きく依存する。たとえば、半透明材質を撮像すると一般に低コントラスト画像が得られ、三次元計測精度は低下する。この問題を解決するために、特に半透明材質を対象とした投影パタンについて考察した。投影パタンは最小基本パタンから構成される。この最小基本パタンのサイズを小さくとると、空間解像度は大きくなるが、コントラスト比が低下し、半透明材質に対する計測が困難になる。このトレードオフの関係について考察し、計測対象材質の半透明度合いを定量的に評価して、適切な最小基本パタンサイズを決定する手法を考案し、評価した。提案法では、プロジェクタから白黒二値のランダムドットパタンを事前に投影し、最適な投影パタンサイズを決定する。実験によって、提案手法によって半透明材質に対する計測精度を改善することに成功した。

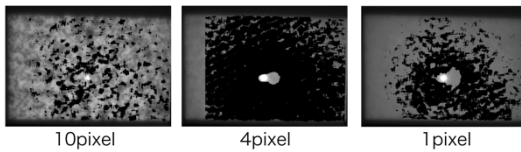


図3: 投影パタンサイズの違いによる三次元計測結果の違い。半透明な平板をアクティブステレオ法で計測した。黒く塗りつぶされた範囲が三次元計測可能であったポイントを表す。

(3) 位相シフト法による高精度三次元計測
位相シフト法による高精度三次元計測法についての提案を行った。位相シフト法は、アクティブステレオ法に分類される三次元計測法である。プロジェクタとカメラを利用したアクティブ計測法は、テクスチャレスな対象を計測可能であるという大きなメリットを有している。位相シフト法では、正弦波状の照射パタンをプロジェクタから投影し、対象から

の反射光をカメラで撮像することで三次元計測が行われる。位相シフト法にはサブピクセル精度での三次元計測が可能であるというメリットがある。位相シフト法での三次元計測では、原理上3回以上のパタン光の照射を必要とし、照射パタン数と三次元計測精度の間には正の相関がある。一方、飛行体に位相シフト法を組み込んだ三次元計測装置を搭載する場合、照射パタン数の増加は計測時間の増加につながり、計測中の飛行体の微小な移動により三次元計測精度が悪化することが想定される。そこで、位相シフト法における照射パタン数と三次元計測精度の関係を理論的に考察し、計測対象物体表面の光学特性に応じて、照射パタン数を変更する方法を提案した。

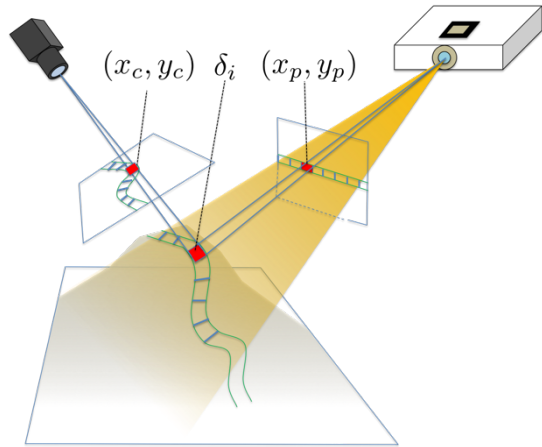


図4: 位相シフト法による三次元計測

- ▶ 照射輝度と観測輝度の関係を3次項まで考慮しTaylor展開により近似

$$I_n = f(P_n) \approx f(P) + \frac{\partial f}{\partial P} A_n \sin\left(\theta + \frac{\pi}{2} n\right) + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 f}{\partial P^2} \left\{ A_n \sin\left(\theta + \frac{\pi}{2} n\right) \right\}^2 + \frac{1}{6} \frac{\partial^3 f}{\partial P^3} \left\{ A_n \sin\left(\theta + \frac{\pi}{2} n\right) \right\}^3$$
- ▶ 位相の計算方法
 if $0.9 < w < 1.1$ $\theta = \tan^{-1} \left(w \frac{I_n - I_2}{I_1 - I_3} \right)$, $w = \frac{2 \frac{\partial f}{\partial P} + (I_1 + I_3 - 2I_2) \zeta}{2 \frac{\partial f}{\partial P} + (I_1 + I_3 - 2I_2) \zeta}$, $\zeta = \frac{\partial^2 f}{\partial P^2}$
- ▶ 数理解析: 提案手法の精度検証

$$w \frac{I_n - I_2}{I_1 - I_3} \frac{2 \frac{\partial f}{\partial P} + \frac{1}{3} \frac{\partial^2 f}{\partial P^2} (A_n \cos \theta)^2}{2 \frac{\partial f}{\partial P} + \frac{1}{3} \frac{\partial^2 f}{\partial P^2} (A_n \sin \theta)^2} \frac{2 \frac{\partial f}{\partial P} + \frac{1}{3} \frac{\partial^2 f}{\partial P^2} (A_n \cos \theta)^2}{2 \frac{\partial f}{\partial P} + \frac{1}{3} \frac{\partial^2 f}{\partial P^2} (A_n \sin \theta)^2} = \tan \theta$$

図5: 位相シフト法の計測精度解析

(4) 最適な照射パタンの自動生成アルゴリズム
構成素材に依らず最適なパタンを計算するアルゴリズムの開発に取り組んだ。対象をカメラで撮像し、その画像から照射パタンを生成する。生成された照射パタンを対象に照射し、その反射光をカメラで撮像し、再び照射パタンを生成する。この一連のステップを繰り返すことで、三次元計測を行うアルゴリズムを開発した。計算時間が長いという問題点があるが、計測精度については数値シミュレーションにより良好な結果を得た。

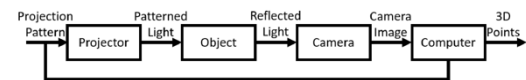


図6: 計測対象物体に応じた照射パタン生成アルゴリズムのブロック線図。

(5) ステレオカメラプロジェクトを利用した三次元物体認識・位置姿勢推定アルゴリズム構築

三次元計測で得られた三次元点群の処理技術について検討を実施し、物体認識アルゴリズムの開発を行った。表面にテクスチャや形状特徴の少ない対象に対する認識と位置姿勢推定アルゴリズムを考案した。この方法では、色情報を使わずに三次元点群のみを使って認識を行う。3D Keypoint 検出し、3D Keypoint 間の幾何学的拘束条件を考慮した高精度な対応付を行う。

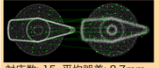
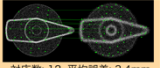
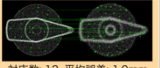
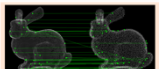
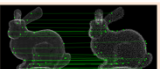
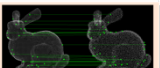
	SHOT	SHOT + GC	提案法
ノブ	 対応数: 15, 平均誤差: 8.7mm	 対応数: 12, 平均誤差: 3.4mm	 対応数: 12, 平均誤差: 1.0mm
Bunny	 対応数: 31, 平均誤差: 7.7mm	 対応数: 34, 平均誤差: 4.0mm	 対応数: 24, 平均誤差: 2.7mm

図7: 3D Keypoint 対応付けの高精度化に関する検討

(6) 計測地点設定アルゴリズムの構築

飛行中動的に計測地点を設定するアルゴリズムの提案を行った。三次元空間を離散化し、各計測地点の重要度を定量化した。重要度の計算にはモンテカルロシミュレーションを利用する。また、この方法は、どの地点で計測を行うべきかが分かるので、マルチエージェントシステムによるフィールド計測に応用可能である。

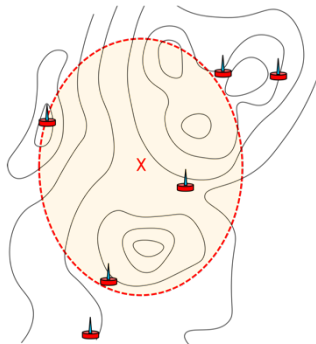


図8: マルチエージェントシステムによるフィールド観測。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計4件)

(1) 荒井翔悟, 長時間稼働可能な移動型水環境モニタリングセンサの制御, 日本ロボット学会誌, Vol. 36, No. 1, pp. 27--30, 2018. 査読有

(2) Naoya Chiba, Shogo Arai, Koichi Hashimoto, Feedback projection for 3D measurements under complex lighting conditions, American Control Conference, pp. 4649--4656, 2017. 査読有

(3) 荒井翔悟, 原田智紀, 藤平敦, 橋本浩一, ビンピッキングのための高精度三次元計測とロボスタ推定, 日本ロボット学会誌, Vol. 34, No. 4, pp. 261--271, 2016. 査読有

(4) 荒井翔悟, 岩谷靖, センサネットワークにおける観測計画, 計測と制御, Vol. 3, No. 12, pp. 1099--1104, 2014. 査読有

〔学会発表〕(計9件)

(1) 福地伸晃, 荒井翔悟, 橋本浩一. ビンピッキングのためのランダムフォレストによるバラ積み部品の3次元位置姿勢推定, ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2016.

(2) 荒井翔悟, 福地伸晃, 橋本浩一. これまでに提案された種々の3D Keypointを高速に検出する方法, 画像センシングシンポジウム, 2016. 査読有

(3) Shogo Arai, Pose Estimation of Industrial Parts for Robotic Bin Picking with Machine Learning, International Conference on Informatics, Electronics & Vision, 2016.

(4) 荒井翔悟, 福地伸晃, 千葉直也, 橋本浩一. 3D Keypoint 対応付けの高精度化に関する検討, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2015.

(5) 房州俊樹, 荒井翔悟, 橋本浩一, 高精度位相シフト法の提案, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2015.

(6) 房州俊樹, 荒井翔悟, 橋本浩一, 画像フィールドバックプロジェクションによる三次元計測, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2014.

(7) Shogo Arai, 3D robot vision system for random bin picking of industrial component with metallic luster, International Conference on Electronics, Informatics, and Vision, 2014.

(8) Shogo Arai, Sensor Scheduling in Sensor Networks from Control Theory Approach, Annual World Congress of Emerging InfoTech, 2014.

(9) Shogo Arai, P. Sirigrivatanawong, and K. Hashimoto, "Control of water resource monitoring sensors with flow field estimation for low energy consumption," IEEE International Conference on Control & Automation, pp. 1037--1044, 2014. 査読有

6. 研究組織

(1) 研究代表者

荒井 翔悟 (ARAI, SHOGO)

東北大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号:80587874