

平成22年4月5日現在

研究種目：若手研究（B）
 研究期間：2008～2009
 課題番号：20700184
 研究課題名（和文） 単眼全方位カメラを用いた移動ロボットによる環境センシング
 研究課題名（英文） Environment Sensing by Mobile Robot Equipped with a Single Omni-Directional Camera
 研究代表者
 山下 淳（YAMASHITA ATSUSHI）
 静岡大学・工学部・准教授
 研究者番号：30334957

研究成果の概要（和文）：ロボットが未知環境で自律的に活動するためには、ロボット自身が周囲環境を計測し、地図を生成する必要がある。そこで本研究では、全方位カメラを搭載した移動ロボットを用いて環境センシングを行う手法を提案する。提案手法では、周囲環境のセンシングを行うと同時に、移動ロボット自身の動きも推定する。実験結果より、提案手法の有効性を確認した。

研究成果の概要（英文）：Measurement and modeling of a surrounding environment is important for mobile robots to move autonomously. In this study, we propose a new method for environment measurement using an omni-directional camera on a mobile robot. The method measures surrounding environment at the same time as estimating the robot's motion. We show the validity of our method through experiments.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2009年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：ロボット工学

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：全方位カメラ，移動ロボット，センシング，3次元計測，地図生成，モデリング

1. 研究開始当初の背景

(1) ロボットによる周囲環境の3次元観測は、近年極めて重要な研究課題となっている。自然災害やテロによって倒壊した建物や崩落した炭鉱では、人間が瓦礫の下敷きとなって閉じ込められ、早急な救助が必要となる。しかしこれらの環境では、二次災害の危険や通路の狭さのため、救出計画を立案し人間が進

入して救出作業を行う前に、ロボットなどの無人機械を使って内部の状況を調査することが必要不可欠となる。このとき、映像を撮影するだけでは内部の形状がどうなっているか分からないため、観測シーンの3次元形状を計測・復元する必要がある。

(2) 上記の背景を踏まえ、未知環境の地図を

生成すると同時に、生成した地図の中でのロボットの軌跡や現在位置を推定する SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) と呼ばれる研究が盛んに行われている。SLAM ではレーザ測距計を用いて物体までの距離を計測するアプローチが多い。それに対して、近年ではロボットに搭載した1台のカメラで撮影した映像のみから環境計測を行う優れた手法が提案されている。この方法は、Computer Vision 分野で Structure from Motion (以降 SFM) と呼ばれる手法をベースとしており、画像上で特徴のある点を抽出・追跡し、カメラの移動前後での特徴点の動きからカメラの動きを推定すると同時に観測対象の形状を計測・復元するものである。カメラを用いることにより、テクスチャ (物体表面の模様) 情報を持った3次元地図を生成できる。

(3) 一方、普通のカメラのかわりに全方位カメラを用いて環境計測を行う手法が提案されている。しかし、全方位カメラは視野が広い分、通常のカメラよりも解像度 (分解能) が場所によっては極端に低い。従って、普通のカメラを全方位カメラに置き換えるだけで、基本的には通常のカメラ用の手法を用いた計測手法では、必然的に結果の質の低下を招き、全方位カメラの利点が活かされていないという問題がある。

2. 研究の目的

(1) 前述の通り全方位カメラの利点が活かされていないという従来研究の現状を踏まえ、本研究では、全方位カメラの特性を積極的に考慮した環境センシング手法を提案する。具体的には、1台の全方位カメラで取得した画像列を用いることで、普通のカメラを用いた場合よりも、高精度かつ高速に観測シーンの3次元形状を計測する手法を提案する。

(2) 本研究で研究期間内に解決を目指す技術的チャレンジングポイントは、以下の通りである。

① 全方位画像に適した特徴点検出・追跡手法の構築

従来の特徴点追跡手法は普通のカメラで撮影した画像を対象としているため、全方位画像では高精度に正しく特徴点を追跡できない。そこで、通常のカメラと異なり大きく歪んだ全方位画像中の特徴的な点を安定的に抽出・追跡する方法を新たに構築する。

② 高精度な全方位カメラの動き推定手法、及び観測シーンの3次元計測手法の構築

①の処理で得られた特徴点の組を用いて、画像情報のみから全方位カメラの動きを推定すると同時に、撮影環境の3次元計測を行う手法を新たに構築する。ここでは、全方位

画像の特性を考慮して、外れ値 (間違い) を含むデータから高精度かつ安定に計測を行う方法を新たに提案する。

③ 誤差に対してロバストな形状復元手法の構築

全方位画像の特性や各特徴点の理論的な計測精度を考慮して計測結果の信頼性を総合的に評価し、撮影シーンを多面体で表現して形状復元を行う手法を新たに構築する。

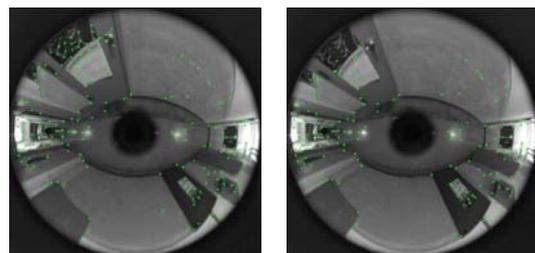
3. 研究の方法

(1) 本研究では、単体の全方位カメラを移動させながら周囲環境を撮影し、この映像を用いて環境センシングを行う手法を構築する。

提案手法の概要は以下の通りである。まず全方位カメラを移動させながら動画像を取得する。画像中で特徴があり、対応の取りやすい点を特徴点として抽出し、以後の画像で追跡を行う。追跡を行った画像間で対応点が取得できる。追跡された複数の対応点情報を用いてカメラの動きを推定し、推定したカメラの動きを用いて対応点の3次元座標を算出する。以上の処理を繰り返し、動画像を通して全計測結果を合成して撮影環境の3次元復元を行う。以下に詳細な手法を示す。

(2) 全方位画像に適した特徴点の検出・追跡

最初の画像中から特徴的な点を検出し、次の瞬間にその特徴点がどの場所に移動したかを追跡する手法を構築する。通常のカメラで撮影された動画中の特徴点検出・追跡には、KLT トラッカーと呼ばれる方法や、SIFT 特徴量を用いた方法などが用いられることが多い。図1に、KLT トラッカーを用いて全方位画像の特徴点 (黄緑色の点) を追跡した結果を示す。この例のように従来手法では、カメラの移動前後で見え方の変化が少ない点 (= カメラから遠方の点) から順番に特徴点として検出していく。しかし、精度良く計測を行うためにはカメラからの距離が近い点が必要である。距離が近い点は、全方位画像中において回転により見え方の変化が大きく計算されてしまうだけであり、全方位画像用に回転方向の影響をキャンセルして計算できれば極めて性質の良い特徴点となりえる。



(a) 時刻 t

(b) 時刻 $t+1$

図1 特徴点の検出・追跡

そこで、(a) 全方位画像でも変化しない物理量を求めて特徴点を検出・追跡する、(b) 追跡する特徴点の数をシーンの複雑さに応じて動的に変更することで全方位画像に適した信頼性の高い点のみを抽出する、(c) 統計的な手法をベースとした RANSAC と呼ばれる手法を応用して全方位画像中で誤追跡された特徴点を除去する、という 3 手法を新たに構築し、全方位画像に適した特徴点の検出・追跡を実現する。

(3) 全方位カメラの動き推定

(2)の処理で得られた特徴点の組を用いて、画像情報のみから全方位カメラの動きを推定すると同時に、撮影環境の 3 次元計測を行う。

通常のカメラの場合、ある方向のみに存在する特徴点を用いてカメラの動きを推定する。従って、微小な並進運動と回転運動の区別が難しく、その結果必然的に推定誤差が発生する。それに対して全方位カメラでは、原理的に回転方向の動きを検知しやすいという特徴に加え、カメラの動き推定に全方向の特徴点を用いることが可能であるため、誤差の発生を抑えることができる。ここでは、全方位画像の特性を活かすため、バンドル調整と呼ばれる手法をベースに、特徴点の場所に応じて信頼性を評価することで、カメラの動きを精度良く推定する手法を構築する。また、推定したカメラの動きを元に、特徴点の 3 次元座標を求める。

(4) 外れ値（間違い）を含むデータからの高精度な 3 次元計測

(2)や(3)の処理を行っても、偽の特徴点を誤追跡する場合がある。具体的には、カメラの移動方向と平行な直線上にある特徴点は、(1)や(2)で悪い評価を与えられないため、誤追跡しやすい（図 2、簡単のため通常のカメラ画像の例を示す）。また、環境中の特徴点の計測精度は、カメラの移動方向の延長線付近になるほど、あるいはカメラから離れたものほど原理的に悪くなる。そこで、前者の問題については、(a) 画像中の全特徴点の動きの傾向と異なる動きの点を除去することで、後者については、(b) それぞれの特徴点に発生する誤差の大きさを解析的に求めて誤差の大きな点を除去することで対応する。



(a) 時刻 t (b) 時刻 $t+1$
図 2 誤追跡しやすい偽の特徴点の例

(5) 誤差に対してロバストな形状復元

特徴点を頂点とする三角パッチを構成し、撮影シーンを多面体として表現し、形状復元を行う手法を構築する。また、各三角パッチにテクスチャを貼り付けることで、テクスチャ付き 3 次元地図を生成する。ここで、すべての計測データを用いると、三角パッチの数が多くなりすぎ、計算時間が増加すると同時に、物理的な物体の辺に矛盾する三角パッチが生成される。そこで、(a) 各特徴点の空間的な存在確率分布を求め、より精度が良さそうな点のみを用いて三角パッチを形成することで、データ量が少なく信頼性の高い形状復元を行う（図 3）。また、(b) カメラの撮像をアフィン変換で近似して、そのシーンを写した 2 画像を比較する方法を、全方位画像用に発展させ、物理的に矛盾する三角パッチを除去する。更に、(c) 場所に応じて最も高精細なテクスチャを各三角パッチに貼り付けることで、高精度な 3 次元地図を生成する。

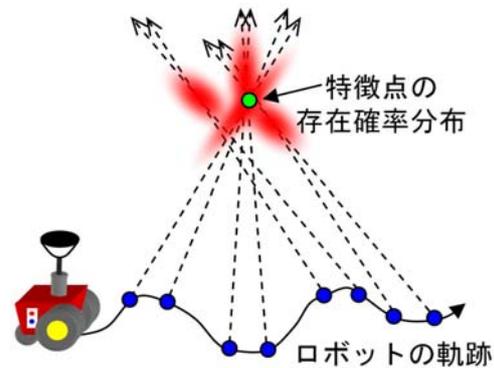


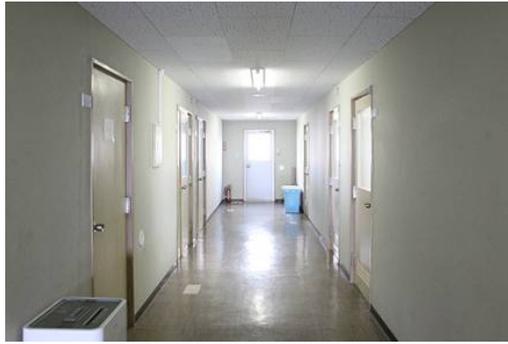
図 3 特徴点の誤差評価

4. 研究成果

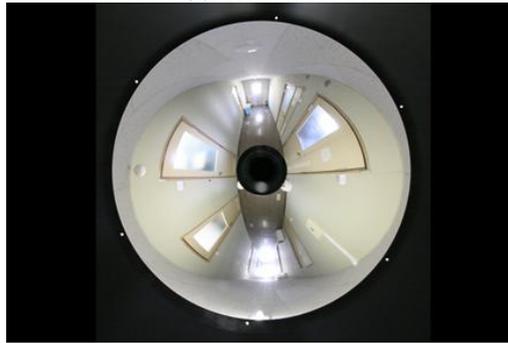
(1) 屋内環境実験

屋内環境（図 4）で計測を行った。全方位カメラを搭載した移動ロボットを約 10cm/s の速度で走行させながら撮影を行い、フレームレートは 10fps とした。入力画像（図 4(b)) のサイズは 1920x1080pixels である。計測に用いた画像列は 61 枚で、ロボットの移動距離は約 60cm である。観測点としたのは第 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60 フレームである。したがって 1 回あたりの計測の基線長は約 10cm となる。すべてのフレームで追跡が行えたエッジと特徴点のみを用いて計測を行った。

提案手法による計測結果を図 5(a)に、3 次元地図生成結果を図 5(b)に示す。廊下の特徴的な部分が検出され、高精度に壁の位置が計測できていることが分かる。また、テクスチャを貼り付けた 3 次元地図も精度良く生成できていることが分かる。

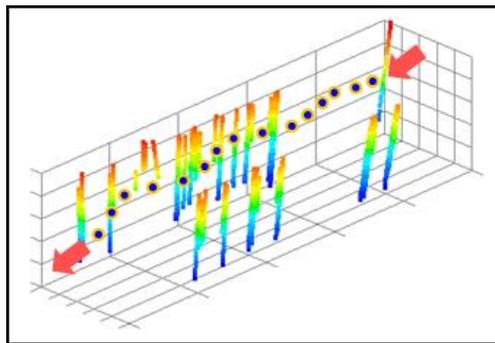


(a) 実験環境



(b) 入力画像

図4 屋内環境



(a) 計測結果



(b) 3次元地図生成結果

図5 屋内環境の実験結果

(2) 屋外環境実験

屋外環境(図6:建物の中庭)においても実験を行った。計測に用いた画像列は61枚で、人の移動距離はおよそ3mほどである。

提案手法による結果を図7に示す。屋内環境と同様、高精度に3次元地図を生成することができた。



(a) 実験環境



(b) 入力画像

図6 屋外環境

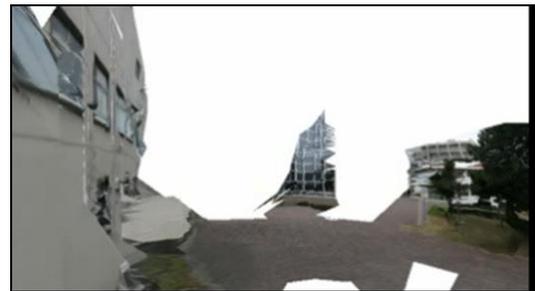


図7 屋外環境の実験結果

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1件)

- ① Ryosuke Kawanishi, Atsushi Yamashita and Toru Kaneko: "Three-Dimensional Environment Model Construction from an Omnidirectional Image Sequence", Journal of Robotics and Mechatronics, 査読有, Vol.21, No.5, pp.574-582, October 2009.

〔学会発表〕(計11件)

- ① 川西 亮輔, 山下 淳, 金子 透: "全方位画像列の特徴点とエッジ情報を併用したカメラ運動推定による3次元環境計測", 第15回ロボティクスシンポジウム講演予稿集, pp.449-456, 奈良, 2010年3月16日.
- ② 瀬瀬 理志, 川西 亮輔, 山下 淳, 金子

- 透: "3次元環境モデル構築のための全方位画像からのモデル形状に適合したテクスチャ生成", ビジョン技術の実利用ワークショップ講演論文集 (ViEW2009), pp.146-151, 横浜, 2009年12月3日.
- ③ Ryosuke Kawanishi, Atsushi Yamashita and Toru Kaneko: "Environment Measurement based on Structure from Motion with Feature Flow Model by Using Omni-Directional Camera", Proceedings of the 3rd International Conference of Asian Society for Precision Engineering and Nanotechnology (ASPEN2009), 2A2-7, pp.1-5, Kokura (Japan), 2009年11月12日.
- ④ Ryosuke Kawanishi, Atsushi Yamashita and Toru Kaneko: "Estimation of Camera Motion with Feature Flow Model for 3D Environment Modeling by Using Omni-Directional Camera", Proceedings of the 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2009), pp.3089-3094, St. Louis (U.S.A.), 2009年10月13日.
- ⑤ 川西 亮輔, 山下 淳, 金子 透: "全方位カメラを用いた特徴点フローモデルによる3次元環境モデル生成", 画像の認識・理解シンポジウム 2009 (MIRU2009) 論文集, pp.1548-1555, 松江, 2009年7月22日.
- ⑥ 川西 亮輔, 山下 淳, 金子 透: "特徴点フローモデルを用いた全方位カメラの位置姿勢推定による3次元環境モデリング", 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'09 講演論文集, 1A1-F14, pp.1-4, 福岡, 2009年5月25日.
- ⑦ 川西 亮輔, 山下 淳, 金子 透: "全方位カメラを用いた周囲環境計測のための特徴点フローモデルによる位置姿勢推定", 映像情報メディア学会技術報告, Vol.33, No.11, pp.65-68, 横浜, 2009年2月28日.
- ⑧ 川西 亮輔, 山下 淳, 金子 透: "全方位画像列からの周囲環境モデル構築", 第26回日本ロボット学会学術講演会予稿集, RSJ2008AC1L2-03, pp.1-4, 神戸, 2008年9月10日.
- ⑨ Ryosuke Kawanishi, Atsushi Yamashita and Toru Kaneko: "Construction of 3D Environment Model from an Omni-Directional Image Sequence", Proceedings of the 3rd Asia International Symposium on Mechatronics (AISM2008), TP1-3(2), pp.1-6, Sapporo (Japan), 2008年8月28日.
- ⑩ 川西 亮輔, 山下 淳, 金子 透: "全方位カメラを用いた3次元環境モデリング", 画像の認識・理解シンポジウム 2008 (MIRU2008) 論文集, pp.561-566, 軽井沢, 2008年7月25日.

- ⑪ 川西 亮輔, 山下 淳, 金子 透: "全方位画像列を用いた3次元環境モデル生成", 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'08 講演論文集, 2P2-C13, pp.1-4, 長野, 2008年6月7日.

[その他]

ホームページ等

<http://sensor.eng.shizuoka.ac.jp/~yamasita/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

山下 淳 (YAMASHITA ATSUSHI)

静岡大学・工学部・准教授

研究者番号: 30334957

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし