計測点の信頼度を考慮した全天球ステレオカメラの運動推定*

野田純平 ** Sarthak Pathak *** 藤井浩光[†] 山下 淳^{††} 淺間 一^{††}

Motion Estimation of Spherical Stereo Camera Considering Confidence of Reconstructed Points

Junpei NODA, Sarthak PATHAK, Hiromitsu FUJII, Atsushi YAMASHITA and Hajime ASAMA

Localization is an important function for a mobile robot. In this research, a new localization method using a spherical stereo camera is proposed. Spherical stereo cameras are effective for motion estimation as they can visualize and measure all directions of the environment. Instead of using conventional sparse feature points, dense information of all pixels in images is used to estimate motion accurately. However, because of the wide field of view, the 3D measurement uncertainty is not uniform across the image. Hence, geometric uncertainty of every 3D point is calculated and used as weights to improve accuracy. Experiments show the effectiveness of using uncertainty information to increase the accuracy of motion estimation.

Key words: spherical stereo camera, motion estimation, measurement uncertainty, visual odometry, stereo matching

1. 序 論

作業効率の向上を目的として,さまざまな分野でロボットの 利用が期待されている.現在利用されているロボットの例とし て,宇宙探査ロボット¹⁾,災害地復旧作業ロボット²⁾,インフ ラ点検ロボット³⁾などが挙げられる.これらのロボットを用 いることで作業効率が向上し,人間が直接作業することが困難 な環境における作業の低コスト化が可能となる.このようなロ ボットを用いた作業では,作業位置を特定するなどの目的で, ロボットの位置を推定することが求められる.ロボットの位置 情報は,初期位置からの運動を推定することによって得ること ができる.このために,小型・軽量でありロボットへの搭載が 容易なカメラをロボットに搭載し,取得する画像情報を用いた 運動推定が行われることが多い.

一般的にカメラの運動推定は、2台のカメラから成るステレ オカメラによって計測する環境の3次元点を計測し、運動前後 での計測点の共通情報を用いて行うことが多い.また、カメラ にはさまざまな視野の広さのものが存在し、運動推定を行う環 境によって適したカメラが異なる。室内や、カメラが計測対象 に接近している状況などのように、カメラの周囲に計測対象が 散らばっているような場合では、広い視野を持つカメラを用い てより多くの情報を取得して用いることが推定精度の向上に有 効であることが示されている⁴⁾⁵⁾.広い視野を持つカメラの例 として、魚眼カメラ、双曲面ミラーを用いた全方位カメラ、そ して図1に示すような全天球カメラなどが挙げられる.

全天球カメラは、前後に配置された2つの魚眼カメラから得 られる画像をつなぎ合わせて、図1の左のように周囲360 deg の映像が光学中心cを中心とする球面に投影されたような球面 画像Sを生成し、図1の右に示す2次元の正距円筒画像IC変

†† 正 会 員 東京大学大学院



Fig. 1 Example of a spherical image

換して出力する.

また,視野の広さはロバスト性にも影響することが知られて いる.通常の視野のカメラを用いて運動を推定する際,ロボッ トの回転などの動きによって視野が大きく変わると,計測点の 共通情報が得られず運動を推定できなくなる⁶.これを防ぐた めには,周囲 360 deg の情報を取得でき回転によって視野が変 わらない全天球カメラが非常に効果的である.

一方ステレオ計測の性質として、ステレオカメラに対する計 測点の位置によって計測精度が異なるという点が挙げられる. ステレオ計測は、2つのカメラで取得する画像上で同一の3次 元計測点が投影されている画素の座標を用いて三角測量の原理 で計測点の座標を計算する.ここで、画像上の画素には幅があ るため、計測点の座標は、投影されている画素の幅分の広がり を持つ領域内というところまでしか特定できない. 計測点の位 置によってこの領域の大きさは変わり、面積が大きいほど計測 精度は低くなり信頼度が低下する. 例えば, 図2において赤い 網かけで示す領域が各計測点が存在すると考えられる領域で, 緑色で示す計測点は黄色で示す計測点よりも計測精度が低くな ることがわかる.このように、計測点の位置がステレオカメラ の基線方向にあるほど信頼度は低下する.また、図2に青い網 かけで示す領域が通常の視野のステレオカメラの計測範囲であ り、この限られた範囲のみを計測する通常の視野のステレオカ メラと比較して、図2に円形で示すような360 degの視野を持 つ全天球カメラなどの、広い視野を持つカメラを用いたステレ

^{*} 原稿受付 平成 30 年 5 月 17 日

掲載決定 平成 31 年 3 月 13 日

^{**} 学生会員 東京大学大学院(東京都文京区本郷 7-3-1)

^{***} 東京大学大学院

 ^{*} 東京大学大学院(現,千葉工業大学; 千葉県習志野市津田沼 2-17-1)



Fig. 2 In a spherical stereo camera, the measurement uncertainty is not uniform and changes greatly across the range of the image. In this example, measurement point (green) has high uncertainty and measurement point (yellow) has low uncertainty

オ計測では,信頼度が低くなるような点も計測するため,計測 点の信頼度を考慮することが必要である.

2. 関連研究

カメラの運動推定手法についてはこれまでにさまざまな研究 が行われており,推定に用いる画素の選択方法によって分類さ れる.1つが,特徴点として検出されるような疎らな画素のみ から成るスパースな点群を用いる手法であり,もう1つが,す べての画素から成るデンスな点群を用いる手法である.スパー スな手法と比べて,デンスな手法ではより多くの情報を用いる ため,外れ値に対するロバスト性や推定精度が向上することが 示されている⁷⁾.

カメラの運動推定の基本的な手法として, Hartley ら⁸⁾ は単 眼カメラの運動推定手法を提案しており,同一の3次元点が運 動前後の各画像に投影されている対応点座標から8点法⁹⁾ を 用いて運動を推定している.しかし,この手法では運動のス ケールまでは定まらない.

また,運動前後の画像対から得られた対応点を3次元復元 し,それぞれの復元点群を Iterartive Closest Point (ICP)¹⁰⁾等 の手法を用いて位置合わせすることで運動を推定する手法も存 在する.しかし,この手法では復元の誤差が位置合わせに大き く影響するため,運動推定精度が低いとされている¹¹⁾.

この手法よりも精度が高い手法として、デンスな復元点群を 投影して生成した画像と実際に取得された画像を比較する手法 が挙げられている. Engel ら¹²⁾ や Forster ら¹³⁾ によってこの 手法による運動推定が提案されている. しかし、これらの手法 は通常の視野のカメラを用いた手法であり、全天球カメラに対 して用いることはできない. Makadia ら¹⁴⁾ は、1 台の全天球カ メラの運動推定手法を提案しているが、回転運動のみに対する 運動推定手法であり、並進を含む運動に対しては用いることが できない. Kim ら¹⁵⁾ は双曲面ミラーを用いた全方位ステレオ カメラの運動推定手法を提案している. しかしこの研究では、 計測点の信頼度を考慮した運動推定を行っていない.

計測点の信頼度を考慮した研究として, Goto ら¹⁶ は全方位 ステレオカメラを用いた 3 次元計測において, 複数の計測にお ける信頼度の低い点を除去した結果を統合することによって計 測結果の精度を向上させる手法を提案している.しかしこれは スパースな手法であり, デンスな手法ではない.また, 信頼度 が閾値以下の計測点の情報を全く使わず, 閾値以上の計測点を 等しく使うより, 信頼度によって全計測点を重み付けをして使 うほうが, 計測した情報をより有効に用いることができる.し かしこれまでに,全天球ステレオカメラの運動推定において, 計測点の信頼度を重みとして用いて位置合わせをするデンスな 手法は存在しない.

以上のことから本研究では、全天球ステレオカメラの運動推 定精度の向上を目的とし、計測精度から各計測点の信頼度を定 めて重みとして用いる位置合わせ手法を新規に提案する.

3. 運動推定の概要

ここでは、全天球ステレオカメラの運動推定の概要について 述べる.本研究で扱う全天球ステレオカメラは,左右2台の全 天球カメラより構成されており, ステレオカメラの座標系とし て右カメラの座標系を用いる.カメラの運動推定は,取得した 映像から推定に用いるフレームを選択し、選択したフレーム間 の運動を順次推定していくことによって行う.図3に示すよう に2フレームのステレオ画像を選択したとすると、これらのス テレオ画像には環境の3次元点が投影されており、両フレーム のステレオ画像に共通して投影されている3次元点の情報を用 いることで、ステレオカメラの運動を幾何的に求めることがで きる. ここで, 選択するフレームの間隔が小さいと, フレーム 間で共通する特徴点の検出はできるが、推定するフレームの数 が多くなり計算量が増加する.一方で,選択するフレームの間 隔が大きすぎると、推定するフレームの数が減少して計算量を 小さくすることができるが、フレーム間で共通する特徴点の検 出が困難になり、推定ができなくなる、したがって、選択する フレームは共通する特徴点を検出して運動を推定できるように 定める必要がある.

運動推定のために行う全天球ステレオ計測は、同一の3次元点がステレオ画像に投影されている各点の座標から、Pathakら¹⁷⁾の手法を用いて三角測量の原理で3次元点の座標を計算することによって行う.この際、右カメラの座標系を基準としたときの左カメラの座標系の位置姿勢を表す回転行列**R**_{*l*,*r*}と並進ベクトル**t**_{*l*,*r*}を用いる.並進ベクトルの大きさ ||**t**_{*l*,*r*}||がステレオカメラの基線長となるが、一般に基線長が長いほど、精度よく計測できるようなステレオカメラから計測対象までの距離は大きくなるため、環境に合わせて適切な基線長を定める必要がある.

この論文では、フレーム k における左右のカメラの球面画像 をそれぞれ $S_{l,k}$, $S_{r,k}$ と表し、またこのときのステレオカメラ の座標系を Σ_k とする.また、 Σ_{k-1} から Σ_k への運動を表す回 転行列と並進ベクトルをそれぞれ $\mathbf{R}_{k,k-1}$, $\mathbf{t}_{k,k-1}$ とする.すな わち、これらが推定値として求めるものである.

なお,本研究では照明変化や鏡面反射などの要因による画像 の明るさへの影響は考慮しておらず,同じ物体は異なる視点で 取得した画像においても同一の明るさをもつということを前提 としている.

4. 提案 手法

4.1 提案手法の概要

本研究で用いるデンスな手法はスパースな手法と比べて精度 よく運動を推定する手法であるが、非線形最適化を行うため、 局所解に陥ることを防ぐために最適解に近い適切な初期値が 必要である.そこで、精度は低いが初期値なしで推定できるス パースな手法を用いて初期運動推定を行い、得られた推定値を デンスな手法の非線形最適化における初期値として用いること で、局所解に陥ることを防ぐ.



Fig. 3 Overview of motion estimation and coordinate system in this paper

また,ステレオ計測の精度は計測する空間に対して一様では なく,計測対象のステレオカメラに対する位置関係によって異 なるため,推定に用いる各計測点の信頼度も一様ではない.し たがって,運動推定の精度を向上させるためには,各計測点を 同様に用いるのではなく信頼度を考慮して用いることが有効 であると考えられる.そこで,計測点の位置から信頼度を定め て,デンスな手法において各計測点を信頼度によって重み付け して用いることで推定精度を向上させる手法を提案する.

4.2 ステレオカメラのキャリブレーション

本手法では運動推定のために,ステレオ画像から復元した計 測点の3次元情報を用いる.ステレオ画像から3次元復元を行 うためには,ステレオカメラを構成する2台のカメラの位置姿 勢関係を把握しておく必要がある.そのため,事前にキャリブ レーションを行い,2台のカメラの位置姿勢の関係を求めてお く.ステレオカメラ製作時に定まるこの位置姿勢の関係は,運 用中に変化することはないものとする.

キャリブレーションは、チェッカーボードなどを用いて同一 の3次元点がそれぞれの画像に投影される座標の組を複数取 得し、8点法⁹⁾を用いて行う.この結果、右カメラの座標系を 基準としたときの左カメラの座標系の位置姿勢を表す回転行列 **R**_{*l*,*r*}と並進ベクトル**t**_{*l*,*r*}が得られる.

4.3 スパースな手法による初期運動推定

スパースな手法による初期運動推定は、運動を推定する2フ レームで共通して計測される3次元点群を位置合わせすること によって行う.位置合わせをするための点群を得るために、両 フレームのステレオ画像に共通する特徴点を検出して3次元 復元を行う.特徴点は各画素が持つ特徴量を利用して検出され るが、全天球画像には歪みがあるため、線形性を仮定する一般 的な特徴量を用いると特徴点の検出が上手くいかない場合があ る.そこで本研究では、歪みに対してロバストな特徴量である A-KAZE 特徴量¹⁸⁾を用いる.

得られた運動前後の復元点群に対して,対応する復元点間の 距離の二乗和が最小となるような運動を推定値とする.ここ で,各対応点間の距離の二乗和を最小化するような運動が一意 に定まるためには3組以上の対応点が必要である.

フレーム k-1 とフレーム k のステレオ画像に共通する特 徴点として N 個の点が検出されたとし、各フレームで復元し た対応点をそれぞれ \mathbf{X}_{k-1}^{i} , \mathbf{X}_{k}^{i} ($1 \le i \le N, N \ge 3$) とする. Σ_{k} における \mathbf{X}_{k-1}^{i} は、 $\mathbf{R}_{k,k-1}^{-1}\mathbf{X}_{k-1}^{i} - \mathbf{t}_{k,k-1}$ と表されるため、 式 (1) によって得られる $\mathbf{R} \ge \mathbf{t}$ が求める運動である. これは Besl ら ¹⁰⁾ の手法を用いて求めることができる.



Fig. 4 Before rectification, the coordinate system of both cameras are not aligned (left). By rectification, they are aligned along the direction of each z axis, to correspond with the baseline direction (right). Red lines indicate epipolar lines, on which corresponding points exist

$$\underset{\left[\mathbf{R}\mid\mathbf{t}\right]}{\text{minimize}} \sum_{i=1}^{N} \left| \left| \left(\mathbf{R}^{-1} \mathbf{X}_{k-1}^{i} - \mathbf{t} \right) - \mathbf{X}_{k}^{i} \right| \right|^{2}.$$
(1)

しかし,特徴点として検出される点には対応の誤りなどの 外れ値が含まれており,検出されたすべての対応点を用いて 得られる結果は精度が良くない.そこで,Random Sampling Consensus (RANSAC)¹⁹⁾の手法を用いることで,外れ値の影 響を抑える.対応点の組からランダムに選んだ3組を用いて推 定を行う,という手順を一定回数繰り返し,それぞれの推定結 果をすべての対応点に適用したときに対応点間の距離が閾値以 下となるような点の数が最も多くなる推定結果を正しい推定結 果とする.

4.4 デンスな手法による高精度な運動推定

デンスな手法による高精度な運動推定は、運動前のフレーム のステレオ画像上のすべての画素より計測される点群と運動 後のフレームのステレオ画像を位置合わせすることによって 行う. 位置合わせをするための点群を得るために, 運動前のフ レームのステレオ画像に対して平行ステレオに対するステレオ マッチング手法 ¹⁷⁾を用いて,すべての画素に対して対応点を 探索して視差を求め、3次元復元を行う. ここで、2台の全天 球カメラを組み合わせてステレオカメラを構成する際、それぞ れの座標軸の向きを完全にそろえることは難しく、製作時に生 じる左右のカメラの座標系のずれを強調して図示すると、図4 の左側のようになる. そのため, 図5(a) に赤い線で示すよう な,対応点が存在するエピポーラ線が曲線になってしまい,平 行ステレオに対するステレオマッチングの手法を用いることが できない. そこで, Pathak ら¹⁷⁾ の手法により, $\mathbf{R}_{l,r}$ と $\mathbf{t}_{l,r}$ を 用いて図4の右側に示すように2台のカメラのz軸が基線方向 と一致するように座標系を回転して画像を修正することによっ て、図5(b)のようにエピポーラ線が平行化され、平行ステレ オに対するステレオマッチングの手法を用いることができる.

復元した点群を運動後のフレームのステレオカメラの地点に 投影すると,運動後のフレームで実際に取得されたステレオ画 像と一致する画像が生成される.したがって,復元した点群を 異なる地点に投影して生成されるステレオ画像と運動後のフ レームで実際に取得されたステレオ画像の画素値の差の二乗和 が最小となるような地点への運動が推定値である.

フレーム k-1 で復元した点群を, \sum_{k-1} から **R** と **t** 運動し た座標系を持つステレオカメラに投影し, 図 6 に青く示すよ うな仮想画像 $S_{r,vir}$ および $S_{l,vir}$ を得る. フレーム k-1 で M 個の点が復元されたとして, \sum_{k-1} における座標が \mathbf{X}_{k-1}^{j} ($1 \leq j \leq M$) で表される計測点が \sum_{k-1} から **R** と **t** 運動し た座標系を持つステレオカメラの右カメラに投影される座標 $\hat{\mathbf{x}}_{r,vir}^{j}$ は以下のようになる.



(a) Before rectification

(b) After rectification

Fig. 5 (a) Before and (b) after epipolar rectification: Corresponding points exist on epipolar lines indicated as red lines. The lines are curved before rectification, whereas they are parallelized after rectification



Fig. 6 Reconstructed 3D point $\mathbf{X}_{l,vir}^{j}$ at frame k-1 is projected onto coordinates $\mathbf{\hat{x}}_{r,vir}^{j}$ and $\mathbf{\hat{x}}_{l,vir}^{j}$ respectively on the right and left camera of a virtual stereo camera (blue). They are compared with the pixel values of coordinates $\mathbf{\hat{x}}_{r,vir}^{j}$ and $\mathbf{\hat{x}}_{l,vir}^{j}$ in right and left camera of stereo camera at frame k (red)

$$\hat{\mathbf{x}}_{r,vir}^{j} = \frac{\mathbf{R}^{-1}\mathbf{X}_{k-1}^{j} - \mathbf{t}}{\left|\left|\mathbf{R}^{-1}\mathbf{X}_{k-1}^{j} - \mathbf{t}\right|\right|}.$$
(2)

また, Σ_{k-1} から**R**と**t**運動した座標系を持つステレオカメ ラの左カメラの座標系への運動を表す回転行列は**RR**_{*l*,*r*},並進 ベクトルは**t** + **Rt**_{*l*,*r*}なので,**X**^{*j*}_{*k*-1}が左カメラに投影される座 標 $\hat{\mathbf{x}}^{j}_{l,vir}$ は以下のようになる.

$$\hat{\mathbf{x}}_{l,vir}^{j} = \frac{(\mathbf{R}\mathbf{R}_{l,r})^{-1}\mathbf{X}_{k-1}^{j} - (\mathbf{t} + \mathbf{R}\mathbf{t}_{l,r})}{\left|\left|(\mathbf{R}\mathbf{R}_{l,r})^{-1}\mathbf{X}_{k-1}^{j} - (\mathbf{t} + \mathbf{R}\mathbf{t}_{l,r})\right|\right|}.$$
(3)

したがって,仮想画像と実際に取得された画像との画素値の 比較で求められるフレーム間の運動は,式(4)の最適化によっ て得られる.

$$\min_{[\mathbf{R}|\mathbf{t}]} \sum_{\forall (\mathbf{x}_{k-1}^{j})} \left(\left(\mathbb{S}_{r,k}(\hat{\mathbf{x}}_{r,vir}^{j}) - \mathbb{S}_{r,vir}(\hat{\mathbf{x}}_{r,vir}^{j}) \right)^{2} + \left(\mathbb{S}_{l,k}(\hat{\mathbf{x}}_{l,vir}^{j}) - \mathbb{S}_{l,vir}(\hat{\mathbf{x}}_{l,vir}^{j}) \right)^{2} \right).$$

$$(4)$$

4.5 計測点の信頼度を考慮した位置合わせ

式(4)は、すべての計測点 \mathbf{X}_{k-1}^{j} を等しく用いて最適化を行っているが、各計測点は信頼度が異なるため、信頼度によって



Fig. 7 The uncertainty of spherical stereo measurement is indicated as the red area, which is caused by error in search on the epipolar circle



Fig. 8 $S(\mathbf{X}_{k-1}^{j})$ for each reconstructed point is plotted as dense red region indicate large area

重み付けをすることが望ましい.復元のための対応点探索を, 図7に赤い円で示す,対応点が存在する大円上で行うため,探 索における誤差から図7に赤く示すような領域が生じる.計測 点の3次元座標によって定まる計測精度の違いがもつ運動推定 への影響を誤差解析するため,基準値として探索において±1 pixelの誤差が生じたと仮定し,このときにエピポーラ平面上 で計測点が存在する面積を $S(\mathbf{X}_{k-1}^{j})$ とする.面積 $S(\mathbf{X}_{k-1}^{j})$ の 分布を図8に示す.赤色が濃い領域ほど面積は大きくなってい る.この面積 $S(\mathbf{X}_{k-1}^{j})$ が大きいほど計測点の信頼度は低くな るため, $S(\mathbf{X}_{k-1}^{j})$ と剥整パラメータpm⁻²を用いて各計測点 の信頼度 $C(\mathbf{X}_{k-1}^{j})$ を以下のように定める.

$$C(\mathbf{X}_{k-1}^{j}) = \frac{1}{pS(\mathbf{X}_{k-1}^{j}) + 1}.$$
(5)

このとき, p は $S(\mathbf{X}_{k-1}^{j})$ の違いを信頼度に反映させる度合い を定めるパラメータであり, p が大きい場合,中程度の場合, 小さい場合の 3 通りの場合に式 (5) で定められる信頼度の分布 を図 9 に示す.青色が濃い領域ほど信頼度は高くなっている. p が大きい場合,ステレオカメラに近く $S(\mathbf{X}_{k-1}^{j})$ が小さい部 分のグラデーションが大きくなり, $S(\mathbf{X}_{k-1}^{j})$ の違いがよく反映 される一方で,ステレオカメラから遠く $S(\mathbf{X}_{k-1}^{j})$ が大きい部 分の信頼度は小さくなりほとんど利用されなくなる.この結 果,運動推定に用いる計測点の情報量が減り,推定精度が低下



(b) Medium p

(a) Large p



(c) Small pFig. 9 Confidence distribution for various size of p

する. pが小さい場合, $S(\mathbf{X}_{k-1}^{j})$ の違いによる影響が小さくな り、すべての点が同じような信頼度で利用されることになるた め、信頼度の効果が小さくなる. 以上のことから, 推定に用い る計測点の情報量と, $S(\mathbf{X}_{k-1}^{j})$ の違いを信頼度に反映させる度 合いを考慮して適切なpを定めることが必要になる. このよう にして定めるpによって計算した信頼度を用いて式(4)に重み 付けをすると, 以下の式となる.

$$\begin{split} \underset{[\mathbf{R}|\mathbf{t}]}{\text{minimize}} & \sum_{\forall (\mathbf{X}_{k-1}^{j})} C(\mathbf{X}_{k-1}^{j}) \big(\big(\mathbb{S}_{r,k}(\hat{\mathbf{x}}_{r,vir}^{j}) - \mathbb{S}_{r,vir}(\hat{\mathbf{x}}_{r,vir}^{j}) \big)^{2} \\ &+ \big(\mathbb{S}_{l,k}(\hat{\mathbf{x}}_{l,vir}^{j}) - \mathbb{S}_{l,vir}(\hat{\mathbf{x}}_{l,vir}^{j}) \big)^{2} \big). \end{split}$$

$$(6)$$

式(6)で表される非線形最適化を,スパースな手法による初 期運動推定の結果を初期値として Levenberg-Marquardt 法で解 き,得られる値が推定値である.

5. 実環境における実験

5.1 実験概要

提案手法の有効性を確かめるために、まず実環境において実 験を行った.信頼度の分布はステレオカメラの基線方向が変化 するような回転運動によって大きく変わるため、このような運 動に対する推定では信頼度を考慮することが特に効果的である と考えられる.そこでステレオカメラの回転運動に対して実験 を行い、信頼度を考慮することによる効果を確かめた.

実験は、図 10 (a) に示す 6.6 m (幅) ×6.6 m (奥行き) ×2.7 m (高さ)の室内で行った.全天球カメラには 2 台の RICOH THETA S を用い,基線長が 0.48 m の全天球ステレオカメラを



(a) Experimental environment

(b) Spherical stereo camera setup used for experiment

Fig. 10 Experimental conditions 1

Table 1 The positions and orientations of the points 1 to 7 in experiment 1

Pose	x m	y m	z m	$\phi \deg$	θ deg	ψ deg
1	0	0	0	0	0	0
2	-0.03	-0.12	0	0	0	-30
3	-0.12	-0.21	0	0	0	-60
4	-0.24	-0.24	0	0	0	-90
5	-0.36	-0.21	0	0	0	-120
6	-0.45	-0.12	0	0	0	-150
7	-0.48	0	0	0	0	-180

構成した.基線長は、この環境においてより多くの点をステレ オ計測できるような長さを試行錯誤的に定めた.

2 台のカメラの位置関係を表す回転行列 **R**_{*l*,*r*} および並進ベ クトル **t**_{*l*,*r*} は,事前にキャリブレーションを行うことで取得し た.キャリブレーションでは,ステレオカメラの位置姿勢を変 えながらチェッカーボードを6回撮影し,6組のステレオ画像 からチェッカーパターンの交点をそれぞれ54個ずつ手動で選 択することによってステレオ画像における対応点座標を複数取 得し,8点法⁹を用いて行った.

実験における画像の取得は以下のように行った.任意の角度 回転することができるカメラ台を用い,図 10 (b) のように,2 台のカメラの中点が回転軸の真上になるようにステレオカメラ をカメラ台に固定した.フレーム間である程度の共通する特徴 点を検出できるような運動として,ステレオカメラを,中点を 通り z 軸と平行な向きを軸として 30 deg ずつ回転させ,計7 フレームのステレオ画像を取得した.各地点におけるステレオ カメラの位置姿勢を表1に示す.また,取得した画像の例とし てフレーム1におけるステレオ画像を図 11 に示す.

最初のフレームにおけるステレオ座標系をグローバル座標系 とし、各ステレオ画像に対して連続する2フレーム間の相対 運動を順に推定する逐次処理によって、各フレームのステレオ カメラの位置姿勢を推定した。フレーム間の相対運動の推定に は、初期運動推定として用いるスパースな手法のみを用いた場 合、スパースな手法で初期運動推定をした後に信頼度の下位 10%を除く閾値処理によってデンスな手法で高精度な運動推 定をした場合、そして提案手法である、スパースな手法で初期 運動推定をした後に、信頼度の重み付けによるデンスな手法で 高精度な運動推定をした場合の3通りの手法を用いた.推定し た並進と回転の誤差として、表1の真値と比較したときのユー クリッド距離 m とクォータニオンでの回転角 deg を用いて定 量的に評価し、計6回のフレーム間の推定誤差の平均によって 各手法の性能を比較した.

全天球画像として 600 × 300 pixel のサイズの正距円筒画像



(a) Left image at frame 1



(b) Right image at frame 1

Fig. 11 Example of captured images in real experiment

Table 2 Statistics of S and C at frame 1 in real experiment

	$S \text{ m}^2$	C (p = 0.02)
Average	0.051	0.999
SD	0.008	0.002
Min	0.003	0.988
Max	0.599	1.000
Median	0.022	0.999

を用いた.また,式(5)における調整パラメータには,試行錯 誤的に定めた固定値 p = 0.02を用いた.計算には,コア数4, スレッド数8の Intel(R) Core(TM) i7-4790 @ 3.60GHz CPU お よび 32.0 GB DDR3 RAM を備えた計算機を使用し,並列処理 は行っていない.

5.2 実験結果

フレーム 2 において右カメラで取得した画像と, フレーム 1 のステレオ画像から復元した点群を投影して生成した仮想画 像を図 12 (a), (b) に示す.点群の投影によって実際に撮影した ものと同じような画像が生成されていることが確認できる. な お,仮想画像における黒い領域はこの部分に投影される点群 が存在していないことを表しており,この領域にある画素は 式 (6)の計算には用いていない.

S と *C* の分布の例として,フレーム1における復元での*S* と *C* の統計量のうち,平均値,標準偏差,最小値,最大値,中央値を表2に示す.

並進と回転の,各手法における推定誤差の平均をそれぞれ 図 13 (a), (b) に示す.各グラフにおいて左からそれぞれ,初期 運動推定として用いるスパースな手法のみを用いた場合,ス パースな手法で初期運動推定をした後に信頼度の閾値処理に よってデンスな手法で高精度な運動推定をした場合,そして提 案手法である,スパースな手法で初期運動推定をした後に,信 頼度の重み付けによってデンスな手法で高精度な運動推定をし た場合の手法における推定誤差の平均を示している.並進,回



(a) Right image at frame 2



(b) Virtual image generated from images at frame 1







転ともに提案手法の推定誤差が最も小さくなっていることか ら,提案手法の有効性を確認できた.

計算時間の平均は、スパースな手法による初期運動推定が 5.2 秒、スパースな手法で初期運動推定をした後に閾値処理に よってデンスな手法で高精度な運動推定をした場合が41.4 秒、 提案手法である、スパースな手法で初期運動推定をした後に、 計測点の信頼度を考慮してデンスな手法で高精度な運動推定を した場合が40.8 秒であった.スパースな手法のみと比較して デンスな手法を用いる場合には計算時間が増加するが、推定精 度の向上も大きいため、デンスな手法を用いることは有効であ ると考えられる.また、信頼度の閾値処理をする場合と重み付



Fig. 14 Experimental environment for simulation experiment

けをする場合では計算時間はほとんど変わらず,重み付けをす ることによる計算時間の増加はないことが確かめられた.

6.1 実験概要

次にシミュレーション環境で実験を行い,フレーム数を大幅 に増やして推定誤差を評価するとともに,最終フレームにおけ る蓄積誤差を評価することで提案手法の有効性を確かめた.シ ミュレーション実験におけるデータの取得には 3DCG ソフト Blender を使用し, Visual Odometry の先行研究⁴⁾ で用いられ ている 10.0 m (幅)×6.0 m (奥行き)×4.0 m (高さ)の室内 環境²⁰⁾をもとに作成した,図 14 に示す環境を用いた.この 環境において基線長 0.20 m のステレオカメラを運動させ,計 101 フレームのステレオ画像を取得した.運動は,高さ 0.80 m における部屋の中央を中心とした半径 2.0 m の円周上の軌跡に 沿って 100 回の移動で 1 周するよう約 0.126 m ずつ位置を変 え,36 deg ずつ姿勢を変えるように行った.取得した画像の例 として,フレーム 1 におけるステレオ画像を図 15 に示す.

5章で述べた実環境における実験と同じく、最初のフレーム におけるステレオ座標系をグローバル座標系とし, 各ステレオ 画像に対して連続する2フレーム間の相対運動を順に推定する 逐次処理によって, 各フレームのステレオカメラの位置姿勢を 推定した.フレーム間の相対運動の推定には、初期運動推定と して用いるスパースな手法のみを用いた場合、スパースな手法 で初期運動推定をした後に信頼度の下位10%を除く閾値処理 によってデンスな手法で高精度な運動推定をした場合、そして 提案手法である,スパースな手法で初期運動推定をした後に, 信頼度の重み付けによってデンスな手法で高精度な運動推定を した場合の3通りの手法を用いた. 推定した並進と回転の誤差 として, 真値と比較したときのユークリッド距離 m とクォー タニオンでの回転角 deg を用いて定量的に評価し,計 100 回 のフレーム間の推定誤差の平均によって各手法の性能を比較し た. また, 最終フレームであるフレーム 101 におけるステレオ カメラの位置と姿勢の誤差を、それぞれ真値と比較したときの ユークリッド距離 m とクォータニオンでの回転角 deg を用い て定量的に評価した.

全天球画像として 600 × 300 pixel のサイズの正距円筒画像 を用いた.また,式(5)における調整パラメータには,試行錯 誤的に定めた固定値 p = 0.02を用いた.計算には,5章で述 べた実環境における実験で使用したものと同じ計算機を使用 した.



(a) Left image at frame 1



(b) Right image at frame 1

Fig. 15 Example of captured images in simulation experiment

Table 3 Statistics of S and C at frame 1 in simulation experiment

	$S \text{ m}^2$	C(p = 0.02)
Average	0.067	0.999
SD	0.083	0.002
Min	0.001	0.979
Max	1.049	1.000
Median	0.055	0.999

6.2 実験結果

フレーム 2 において右カメラで取得した画像と,フレーム 1 のステレオ画像から復元した点群を投影して生成した仮想画像 を図 16 (a), (b) に示す.また, *S* と *C* の分布の例として,フ レーム 1 における復元での *S* と *C* の統計量のうち,平均値, 標準偏差,最小値,最大値,中央値を表 3 に示す.

並進と回転の,各手法における推定誤差の平均をそれぞれ 図 17 (a), (b) に,最終フレームにおける位置と姿勢の誤差をそ れぞれ図 18 (a), (b) に示す.フレーム間の推定誤差の平均は, 閾値処理をした場合と重み付けをした場合でほとんど変わらな いが,推定を重ねるごとに誤差が蓄積するため,最終フレーム における位置と姿勢の誤差のグラフでは差が広がっていること が確認できる.このように,移動ロボットの運動推定において は推定の誤差が蓄積するため,フレーム間の推定誤差は少しで も小さくなっていることが望ましく,提案手法の有効性が確認 できた.

計算時間の平均は、スパースな手法による初期運動推定が 6.9 秒、スパースな手法で初期運動推定をした後に信頼度の閾 値処理によってデンスな手法で高精度な運動推定をした場合が 27.5 秒、提案手法である、スパースな手法で初期運動推定をし た後に、信頼度の重み付けによってデンスな手法で高精度な運 動推定をした場合が 27.1 秒であった.



(a) Right image at frame 2



(b) Virtual image generated from images at frame 1

Fig. 16 (a) Right image at frame 2 and (b) virtual image generated from images at frame 1 in simulation experiment



Fig. 17 Average errors of translation and rotation for each estimation method in simulation experiment

7. 結 論

全天球ステレオカメラの運動推定精度の向上を目的とした, 計測点の信頼度を考慮した位置合わせ手法を新規に提案した. ステレオカメラに対する計測点の位置によって異なる信頼度 を,対応点探索における誤差から生じる,計測点が存在すると 考えられる領域の面積を用いて定式化した.精度よく運動を推 定できるが,適切な初期値が必要なデンスな手法を用いるため に,精度は低いが初期値なしで推定できるスパースな手法を用 いて初期運動推定を行った.デンスな手法における位置合わせ では,各計測点をそれぞれが持つ信頼度によって重み付けして





用いた. 複数フレーム間のランダムな運動に対して運動推定を 行い,精度を評価した. スパースな手法のみを用いる場合,ス パースな手法に加えて信頼度の閾値処理によってデンスな手法 も用いる場合,そして提案手法である,スパースな手法に加え て信頼度の重み付けによってデンスな手法を用いる場合の3通 りの手法の性能を比較して結果を考察した. これにより提案手 法の有効性を確認した.

本手法では計測点の信頼度として,探索における誤差を±1 pixel としたときにエピポーラ平面上で計測点が存在する面積 を用いた単純な式により定めたが,ステレオ計測の計測精度の 違いをより効果的に反映させるような信頼度の定め方には再考 の余地がある.また本研究では,同じ物体は異なる視点で取得 した画像においても同一の明るさをもつということを前提とし ているが,屋外環境などへの適用を考えた場合には,照明変化 や鏡面反射などの要因による明るさへの影響を考慮することが 必要になると考えられる.そして,全天球ステレオカメラの運 動推定の実用性をさらに高めるためには,蓄積誤差を抑える手 法を構築する必要もあると考えられる.

辞

謝

本研究の一部は、内閣府総合科学技術・イノベーション会議 の戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)「インフラ維持 管理・更新・マネジメント技術」(管理法人:国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構)によって実施された.

参考文献

- M. Pertile, S. Chiodini, R. Giubilato and S. Debei: Effect of Rolling Shutter on Visual Odometry Systems Suitable for Planetary Exploration, Proceeding of 2016 IEEE Metrology for Aerospace, (2016) 598.
- M. George, JP. Tardif and A. Kelly: Visual and Inertial Odometry for a Disaster Recovery Humanoid, Proceeding of the 9th Conference on Field and Service Robotics, **105**, (2015) 501.
- 3) Y. Hada, M. Nakao, M. Yamada, H. Kobayashi, N. Sawasaki, K. Yokoji, S. Kanai, F. Tanaka, H. Date, S. Pathak, A. Yamashita, M. Yamada and T. Sugihara: Development of a Bridge Inspection Support System Using Two-wheeled Multicopter and 3D Modeling Technology, Journal of Disaster Research, 12, 3, (2017) 593.
- Z. Zhang, H. Rebecq, C. Foster and D. Scaramuzza: Benefit of Large Field-of-View Cameras for Visual Odometry, Proceeding of the 2016

IEEE International Conference on Robotics and Automation, (2016) 801.

- M. Pertile, S. Chiodini, S. Debei and E. Lorenzini: Uncertainty Comparison of Three Visual Odometry Systems in Different Operative Conditions, Measurement, 78, (2016) 388.
- 6) 酒井 研斗, 堀 浩一:小型 UAV による自律分散型 SLAM システムの 実証研究, 人工知能学会全国大会論文集, 28, (2014) 1.
- L. Valgaerts, A. Bruhn, M. Mainberger and J. Weickert: Dense versus Sparse Approaches for Estimating Fundamental Matrix, International Journal of Computer Vision, 96, (2012) 212.
- R. I. Hartley and A. Zisserman: Multiple View Geometry in Computer Vision, Cambridge University Press, Second Edition, (2004).
- R. I. Hartley: In Defense of the Eight-point Algorithm, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 19, 6, (1997) 580.
- P. J. Besl and N. D. McKay: A Method for Registration of 3-D Shapes, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 14, 2, (1992) 239.
- D. Scaramuzza and F. Fraundorfer: Visual Odometry [Tutorial] Part I: The First 30 Years and Fundamentals, IEEE Robotics & Automation Magazine, 18, 4, (2011) 80.
- 12) J. Engel, J. Stücker and D. Cremers: Large-Scale Direct SLAM with Stereo Cameras, Proceeding of the 2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, (2015) 1935.
- C. Forster, Z. Zhang, M. Gassner, M. Werlberger and D. Scaramuzza: SVO: Semi-Direct Visual Odometry for Monocular and Multi-camera

Systems, IEEE Transactions on Robotics, 33, 2, (2017) 249.

- 14) A. Makadia and K. Daniilidis: Rotation Recovery from Spherical Images without Correspondences, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 28, 7, (2006) 1170.
- 15) J. H. Kim and M. J. Chung: SLAM with Omni-directional Stereo Vision Sensor, Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, (2003) 442.
- 16) S. Goto, A. Yamashita, R. Kawanishi, T. Kaneko and H. Asama: 3D Environment Measurement Using Binocular Stereo Camera, Proceeding of the 2011 IEEE International Conference on Computer Vision Workshop, (2011) 296.
- 17) S. Pathak, A. Moro, A. Yamashita and H. Asama: Dense 3D Reconstruction from Two Spherical Images via Optical Flow-based Equirectangular Epipolar Rectification, Proceeding of the 2016 IEEE International Conference on Imaging Systems and Techniques, (2016) 140.
- 18) P. F. Alcantarilla, J. Nuevo and A. Bartoli: Fast Explicit Diffusion for Accelerated Features in Nonlinear Scale Spaces, Proceeding of the British Machine Vision Conference, (2013) 1.
- 19) M. A. Fischler and R. C. Bolles: Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography, Communications of the ACM, 24, 6, (1981) 381.
- 20) University of Zurich Robotics and Perception Group: Room environment, https://www.ifi.uzh.ch/en/rpg/software_datasets/multifov_ datasets.html, 2019 年 1 月 29 日.