# 人工物環境における全天球カメラの位置姿勢推定のための 直線特徴に基づく **3D-2D** マッチング\*

後藤 翼 \*\* Sarthak Pathak \*\*\* 池 勇勳 \*\*\* 藤井浩光 \*\*\* 山下 淳<sup>†</sup> 淺間 一<sup>†</sup>

3D-2D Matching of Line Features for Spherical Camera Localization in Man-made Environment

Tsubasa GOTO, Sarthak PATHAK, Yonghoon JI, Hiromitsu FUJII, Atsushi YAMASHITA and Hajime ASAMA

In this paper, a novel method for 6 degrees of freedom (DoF) localization of a single spherical camera in a man-made environment is proposed. Taking advantage of the various line features that are usually present in such an environment, a technique to match the 2D line feature information inside a spherical image to the 3D line segment information available in a known 3D model of the environment is developed. There are two main challenges to be overcome. First is the detection of the line feature information in a spherical image and its abstraction into a descriptor that is compatible with the 3D line feature information in the model. Second is to evaluate similarity of the line feature information from the 2D image and that from arbitrary 6 DoF poses in the 3D environment model in order to localize the camera. To deal with the former, a randomized hough transform with spherical gradient-based filtering is used to accurately detect line features in the image and create a line feature descriptor. The same descriptor is created from arbitrary 6 DoF poses in the 3D model. Then, to deal with the latter, the Earth Mover's Distance (EMD) is used to evaluate their similarity. The proposed method was evaluated in a real environment with its 3D model. The results demonstrated that it can effectively estimate the 6 DoF pose of a spherical camera using a single image.

Key words: spherical camera, localization, 3D-2D matching, line feature, descriptor, Hough transform

# 1. 序 論

移動ロボットの用途が拡大しており,近年ではドローンを用いた橋梁やトンネルなど社会インフラの点検作業<sup>1)</sup>への適用のような試みが行われている.このような移動ロボットによる作業では,ロボットの位置姿勢推定が重要な課題となる.

移動ロボットの位置姿勢推定に関して、従来より Global Positioning System (GPS) を用いた手法が提案されている<sup>2)3)</sup>.しか し、橋の下やトンネル内など信号の届かない場所において GPS を利用することは困難である.このような場合に、ロボットに 搭載したカメラの画像からロボットの位置姿勢を推定すること は有効であり、本研究では全天球カメラ<sup>4)</sup>に着目する.全天球 カメラは逆向きに組み合わせた2つの魚眼カメラから成り、視 野が360 deg と極めて広いという特徴を有する.例えば、カメ ラを対象物に近接させるなど、通常の透視投影カメラでは視界 が限定されるような場合にも、全天球カメラでは対象物に対す るカメラの背後も含めた広範囲の画像を取得できる.カメラ画 像を用いた位置姿勢推定において、このような視野の広さは利 点であり、本研究では全天球カメラを用いた位置姿勢推定手法 を提案する.

画像から位置姿勢を推定する手法として,事前に参照情報を 用意し,位置姿勢が未知の状態で取得した画像とのマッチング を行うことで位置姿勢推定を行う手法がある.そのような手法 は数多く提案されているが,それらは以下のように大きく2つ に分類できる. 1つ目は、環境中のシーンの画像を事前にメモリに保存して おき、推定したい位置姿勢において得られる画像とメモリ中の 画像を比較することで位置姿勢推定を行う手法である<sup>5)~7)</sup>.パ ノラマ画像を用いた手法<sup>5)6)</sup>や全方位カメラを用いた手法<sup>7)</sup>も 提案されているが、これらの方法では参照する画像を大量に用 意しておく必要がある.

2つ目は、環境の地図やモデルを参照情報として利用し、取 得した画像とマッチングすることで位置姿勢推定を行う手法で ある<sup>8)~12)</sup>.環境の地図やモデルから任意の位置姿勢における 環境中のシーンを再現することで、事前に大量の参照画像を撮 影する必要がないという利点がある. Cham ら<sup>8)</sup>は,2次元の 環境地図と画像中のエッジを利用することで位置姿勢を推定す る手法を提案している. Ishizuka ら<sup>9)</sup>は,環境の3次元モデル と全方位カメラ画像中の直線特徴を利用し位置姿勢を推定する 手法を提案している. また, Ramalingam ら<sup>10)</sup>は, 建物の隙間 から上空に覗く空の形状を用いた位置姿勢推定手法を提案して いる.しかし、これらの方法は平面内での並進と回転の3自由 度のみの推定にとどまっており、ドローンなど空間中を動き回 る移動ロボットの位置姿勢を推定するためには,6自由度の位 置姿勢推定が必要となる.6自由度の位置姿勢推定のアプロー チとして、Jiら<sup>11)</sup>らは壁に固定したカメラの位置姿勢を3次元 モデル中の直線情報を用いて推定する手法を提案している.ま た,Bleser ら<sup>12)</sup>は、特徴点のトラッキングをするための初期値 推定や推定誤差の補正のために, CAD モデルの直線情報を利用 しカメラの位置姿勢推定手法を提案している.しかし、これら の手法は標準的な透視投影カメラ画像に基づいており、全天球 カメラにおける画像中の歪みの影響などを考慮していないため, 全天球カメラの6自由度の位置姿勢の推定は困難である.

本研究では、天井から床に至る線分および天井と壁、床と壁

<sup>\*</sup> 原稿受付 平成 29 年 5 月 15 日

掲載決定 平成 29 年 7 月 31 日

<sup>\*\*</sup> 学生会員 東京大学大学院(東京都文京区本郷 7-3-1)

<sup>\*\*\*</sup> 東京大学大学院

<sup>†</sup> 正 会 員 東京大学大学院



Fig. 1 Approach of the proposed method. We extract line features and generate descriptors from both a spherical image and arbitrary poses in the 3D model. These descriptors are compared to estimate the position and orientation of the spherical camera

との線分など,環境中に線分が多数存在する人工物環境におけ る位置姿勢推定に焦点を当て,環境の3次元モデルと全天球カ メラ画像を用いた 3D-2D マッチングによる6自由度の位置姿 勢推定を目的とする.特に,人工物環境に多数存在する直線の 分布をマッチングの特徴量として利用し,3次元環境モデル中 の任意の位置姿勢におけるシーンの画像と,実際に取得した全 天球カメラ画像の,それぞれから抽出した直線特徴を共通して 記述可能なディスクリプタを構築する.提案手法では,それら のディスクリプタをマッチングすることで全天球カメラの6自 由度の位置姿勢を推定する.

#### 2. 3D-2D マッチング手法

#### 2.1 概要

提案手法の流れを図1に示す.まず,全天球カメラ画像と3 次元モデルの両方から直線特徴を抽出し,それぞれディスクリ プタを生成する.本手法におけるディスクリプタとは,ある視 点から取得した画像中に存在する環境中の直線の分布を表現し た記述子を指す.このディスクリプタは環境中の視点の位置姿 勢に依存して変化する.全天球カメラ画像から得られるディス クリプタと,3次元モデル内の任意の位置姿勢から得られるディ スクリプタの類似度を評価することで,全天球カメラの6自由 度の位置姿勢を推定することが可能である.ディスクリプタの 類似度の評価には,多次元の分布の類似度を評価できる距離関 数である Earth Mover's Distance (EMD)<sup>13)</sup>を用いる.EMDの 値が最小となる位置姿勢が最終的な推定結果となる.

以上のように本研究では、全天球カメラ画像および環境の3 次元モデルの両方から同様のディスクリプタを生成し比較する ことで、6自由度の位置姿勢推定を可能とする手法を新規に提 案する.

# 2.2 ディスクリプタ生成

全天球カメラの位置姿勢を全天球カメラ画像と3次元モデル の両者から得られるディスクリプタを比較することで推定する. 全天球カメラから得られるディスクリプタは画像中の直線特徴 を検出することによって生成する.このとき,ランダムハフ変 換に基づいて直線の検出を行う.一方,3次元モデルから得られ るディスクリプタは環境中の直線特徴を直接的に変換すること で生成する.直線の分布は視点の位置姿勢に依存するため,こ れらのディスクリプタは視点の位置姿勢の情報を含んでいる.





(a) Generation process (b) Generated descriptor

Fig. 3 Schematic of projection of a line on a spherical image and transforming a unit normal vector into the spherical Hough space. In a spherical image, 3D lines in the environment are projected as great circles. *n* is a unit normal vector with respect to the plane defined by the great circle. The unit normal vector defines a line projected on the spherocal image uniquely

また,それぞれのディスクリプタの単位法線ベクトルに対し, 各直線の長さに対応した重みづけを行う.一般的に画像中で長 く描画される直線は検出が比較的容易なため,直線の長さに応 じた重み付けをすることで重みを大きくし重要度を上げる.こ れにより信頼性の高い直線特徴を用いて位置姿勢推定を行うこ とが可能となる.逆に,カメラから遠い位置にある直線などは, 画像中で短く描画されるため画像処理による検出が困難になり, ディスクリプタの記述が不正確になる.そのような遠方の直線 の重みを小さくし重要度を下げることで,誤検出や未検出しや すい直線の影響を小さくすることができる.

2.2.1 全天球カメラ画像からのディスクリプタ生成

直線はランダムハフ変換によって検出される. 図2(a)のような全天球カメラ画像は図2(b)のような正距円筒画像として 得られ,環境中の直線は赤い線のように歪んで描画される.全 天球カメラ画像上では3次元の直線は大円として投影される. ディスクリプタの生成について,概念図を図3(a)に示す.この 大円によって定義される平面に対する単位法線ベクトル n は 直線を一意に定義できる.そこで,環境中の直線特徴を定義す るパラメータとしてこの単位法線ベクトルをとり,この単位法 線ベクトルの終点になり得る範囲を表面とした単位球をハフ空 間と定義する.つまり,単位法線ベクトルを球上のハフ空間に 変換することで,直線特徴を抽出する.このハフ空間における 直線の分布は直線特徴および全天球カメラの位置姿勢を記述す る.従って,このハフ空間をディスクリプタとして扱うことが できる.

この法線ベクトルをランダムハフ変換によって検出する.ま ず,ガウシアンフィルタによって入力画像をぼかし,ノイズの影 響を低減させる.次に,ぼかした画像に対し,Cannyのエッジ 検出を行うことでエッジのみを描画した画像を生成する.この とき,ガウシアンフィルタおよびCannyのエッジ検出は正距円 筒画像上で行う.ここまでの流れを図4に示す.以下,エッジ



Fig. 4 The flow of image processing. First, a real spherical image is blurred by a Gaussian operator for reducing the influence of noise. Next, the edge image is generated from the blurred image using the Canny edge detection operator

のみを描画した画像をエッジ画像と呼び,エッジ上の点をエッ ジ点と呼ぶ.ランダムハフ変換では以下のような処理を繰り返 し行う.

- i) ランダムにエッジ点を2点選択する.
- ii) 選択した2点の位置ベクトルの外積により単位法線ベクト ルを算出する.
- iii) 単位法線ベクトルを投票し、ハフ空間を更新する.

同一直線上の2組のエッジ点から算出された2つの単位法線 ベクトルは理論上では全く同一のベクトルとなるが、実際には ノイズなどの影響により単位法線ベクトルがわずかにずれる場 合がある.そこで、新たに投票されたベクトルがすでに投票さ れているベクトルに近かった場合,つまり、2つの単位法線ベ クトルのなす角が閾値以内だった場合には、2つのベクトルの 座標の平均の値をとり新たなベクトルとして投票する.このよ うに繰り返し投票されたハフ空間を全天球カメラ画像から得ら れるディスクリプタとして扱う.このとき、投票数を各直線の 重みとする.このようにして生成されたディスクリプタの概念 図を図3(b)に示す.各点の色は重みを表現している.

全天球カメラ画像を正距円筒画像に変換する際,画像の上端 および下端に向かうにつれて画像がより引き伸ばされる.よっ て, Cannyのエッジ検出を正距円筒画像上で行うと,画像の上 端部および下端部のエッジは引き伸ばされていることになる. このような画像上で,ランダムにエッジ点を選択した場合,画 像の上端および下端のエッジは本来より多く選択されることに なり,本来は短い直線の重みが大きくなる恐れがある.そこで, 球上で均一なサンプリングとなるようにエッジ点を選択する. つまり,正距円筒画像の縦軸の長さをrとしたとき,選択され る縦軸の座標 v を,

$$v = \frac{r}{\pi}\arccos\left(2p - 1\right),\tag{1}$$

とする. pを0から1までランダムに選択することで,球上で 均一なサンプリングが可能となる.これにより,展開画像で行 うエッジ検出が直線検出の精度に与える影響を低減可能である. よって,直線の長さに応じて投票数が多くなり,投票数を重み として扱うことで直線の長さに対応した重み付けが可能となる.

また,通常の透視投影カメラに比べ全天球カメラは撮影範囲 が広いため,同じ直線に対する投票数が多くならず,単純にラ ンダムハフ変換を適用するだけでは直線検出の精度が低下する 恐れがある.そこで,エッジ点を2点選ぶ際に同一直線から選 ばれる確率を増やすために,2つの制約を設ける.1つ目は2つ のエッジ点の距離に関する制約である.1点目のエッジ点から 閾値内の距離にあるエッジ点を2点目として選ぶ.2点間の距



Fig. 5 The directions of the gradient vectors of the points that are on a same line are same



(a) Without conditions

(b) With conditions

Fig. 6 The result of line detection using the randomized Hough transform without and with the two proposed conditions. The colorful curves show detected lines

離が離れている場合には2点が同一直線上にある確率は低くな る.2つ目は、2つのエッジ点の勾配ベクトルの方向に関する 制約である。同一直線上の点の勾配ベクトルは全天球カメラ画 像の球上で同じ方向を指すため、勾配ベクトルが球上で同一方 向である場合のみ投票を行う。概念図を図5に示す。以上の2 つの制約条件をともに満たす場合のみ投票を行う。これらの2 つの制約を設けなかった場合の直線検出結果を図6(a)に、2つ の制約を設けた場合の直線検出結果を図6(b)に示す。色付き の曲線が検出された直線である。制約がない場合には、誤検出 された直線が多い。また、画像の縦方向の直線が検出されてい ないことがわかる。つまり、誤検出や未検出が多いことがわか る。それに比べ、制約がある場合には、誤検出された直線が少 なく、画像の縦方向の直線も正確に検出できている。よって、2 つのエッジ点に制約を設けることによって、直線検出の精度が 向上することが確認できる。

2.2.2 3次元モデルからのディスクリプタ生成

3次元モデルから直線特徴を抽出するために、まず図7に示 すようなモデル内の直線のみを記録したラインマップを用意す る. ラインマップのすべての直線特徴をディスクリプタに変換 する.環境中の任意の視点におけるディスクリプタを生成する 必要があるために、カメラの座標系を定義し、このカメラ座標 系を基準に計算を行う.任意の位置姿勢に対応するディスクリ プタは図8に示すように直線を変換することで生成される.各 直線の端点の位置ベクトルを $p_1$ , $p_2$ とすると, $p_1$ と $p_2$ の外 積によって単位法線ベクトルを算出する. これらの単位法線ベ クトルをディスクリプタに変換することで、与えられた位置姿 勢におけるディスクリプタを生成する.また、全天球カメラ画 像を用いたディスクリプタ生成と同様に、直線の長さに対応し た重み付けを行うために、2つの端点の位置ベクトルのなす角 αの大きさを各単位法線ベクトルの重みとして用いる.3次元 モデルからディスクリプタを生成する際にも単位法線ベクトル に重み付けを行うことで、2.2.1 項で説明した全天球カメラ画像 から生成されたディスクリプタとのマッチング精度を向上させ ることが可能である.

以上のような方法で,3次元モデルから直接的に任意視点に



Fig. 7 An example of a line map



Fig. 8 Schematic of transforming a 3D line in the line map to the spherical Hough space. A cross product of two position vectors  $p_1$  and  $p_2$  of end points of a line derive a normal vector n. The angle  $\alpha$  is the weight for computing EMD

おけるディスクリプタを生成する.これにより,全天球カメラ 画像と3次元モデルの任意の位置姿勢から同様のディスクリプ タを生成することができる.

# 2.3 ディスクリプタの類似度比較

位置姿勢を推定するために、上記の方法で生成したディスク リプタの類似度を評価する必要がある.本研究では、EMD<sup>13)</sup>を ディスクリプタの類似度を評価する評価関数として採用する. EMD は 2 つの多次元分布の距離を計測する手法であり、2 つの 分布のわずかなずれに対してロバストであることで知られてい る.EMD の値は、ある多次元分布から別の多次元分布に変換す る際に必要な最小の仕事量に相当する.1次元分布の場合の例 を図9に示す.よって、L<sub>2</sub>ノルムのような距離関数とは違い、 わずかなずれに対してロバストである。例えば、2 つの分布が わずかにずれているような場合、L<sub>2</sub>ノルムを用いると大きな値 が結果に出てくるが、EMD を用いると小さな値が結果に出てく る.以上のことからディスクリプタの類似度の評価に EMD を 用いる.

本研究では, EMD を用いるためにディスクリプタを球上の分 布として扱う. つまり, 全天球カメラ画像から得られるディス クリプタを図9の分布1,3次元モデルから得られるディスク リプタを図9の分布2のように扱う. EMD の計算を行うため にそれぞれのディスクリプタを以下のようにクラスタ*Q* に変 換する.

$$\boldsymbol{Q}^{(1)} = \left[ (\boldsymbol{n}_i^{(1)}, \boldsymbol{w}_i^{(1)}) \mid 1 \leq i \leq N^{(1)} \right], \tag{2}$$

$$\boldsymbol{Q}^{(2)} = \left[ (\boldsymbol{n}_j^{(2)}, w_j^{(2)}) \mid 1 \leq j \leq N^{(2)} \right], \tag{3}$$

ここで, **n** は全天球カメラ画像と3次元モデルから得られる ディスクリプタにおける単位法線ベクトルの座標, w は重みを



Fig. 9 Schematic of EMD computation. EMD measures the amount of minimum work needed to convert distribution 1 to distribution 2

意味する. クラスタ  $Q^{(k)}$  のサイズ  $N^{(k)}$  はディスクリプタに 変換された単位法線ベクトルの数である. EMD は以下のよう に定義される.

$$EMD(\boldsymbol{Q}^{(1)}, \boldsymbol{Q}^{(2)}) = \frac{\sum_{i=1}^{N^{(1)}} \sum_{j=1}^{N^{(2)}} f_{ij} d_{ij}}{\sum_{i=1}^{N^{(1)}} \sum_{i=1}^{N^{(2)}} f_{ij}^{N^{(2)}} f_{ij}},$$
(4)

ここで、変数  $f_{ij}$  は各単位法線ベクトルの座標  $n_i$ ,  $n_j$  と重み  $w_i$ ,  $w_j$  を用いて輸送問題を解くことで算出される輸送量であ る<sup>13)</sup>.  $d_{ij}$  はユーザ定義の距離であり、今回は以下で計算され る 2 つの単位法線ベクトルのなす角とする.

$$d_{ij} = \arccos(\boldsymbol{n}_i^{(1)\mathrm{T}} \boldsymbol{n}_j^{(2)}).$$
(5)

EMD の最小値は0であり、2つの分布の類似度が高いほど値 が減少する.よって、EMD が最小値をとる位置姿勢をカメラの 位置姿勢推定結果とする.

本研究では, 粗密探索によって EMD の最小値を環境の 3 次 元モデル内から探索する.

## 3. 3D-2D マッチングの性能評価実験

## 3.1 実験概要

提案手法の有効性を確かめるために 2 通りの実験を行った. 実験 1 では,環境中の位置の違いに対する頑健性を評価するた めに,環境中の異なる 5 地点において全天球カメラ画像を取得 し,それぞれの位置姿勢を推定する実験を行った.実験 2 では, 姿勢の違いに対する頑健性を評価するためにある地点の画像を *x* 軸周りに 30 deg ずつ 180 deg まで回転した画像を入力画像 とし,位置姿勢を推定した.姿勢が変化すると正距円筒画像中 の直線の歪み方が変わるため,これによる結果への影響を確認 した.

本実験では、EMD の最小値を3次元モデルから探索する際、 3回に分けた粗密探索によって環境中を全探索した.1回目の 探索では、環境中の全範囲に対して、各軸の並進方向に0.5m ずつ、各軸の回転方向に45 deg ずつ変化させながらディスクリ プタを生成・比較し、EMD が最小となる位置姿勢を探索した. 2回目の探索では、1回目の探索結果を基準に、並進方向に対し て-0.5mから+0.5mまで0.1mずつ、回転方向に対して-45 deg から+45 degまで15 degずつ探索した.3回目の探索では、回 転方向に対してのみ-15 degから+15 degまで1 degずつ探索し、 3回目の探索結果を最終的な推定結果とした.すなわち、最終 的な刻み幅は並進方向に0.1m、回転方向に1 deg で探索した.

### 3.2 実験環境

全天球カメラは図 10 に示す RICOH THETA S を使用した. 全天球カメラの撮影により投影される画像データは,真球のモ デルに従い投影される.本研究ではカメラ製造元が提供する内 部パラメータは,球のモデルを正確に表現可能であり,内部パラ



Fig. 10 RICOH THETA S spherical camera that was used in this experiment and 6 degree of freedom



Fig. 11 The 3D environment model of the experimental environment

**Table 1**The positions and orientations of the points 1 to 5

Pose	x m	$y \mathrm{m}$	z m	$\phi \deg$	$\theta$ deg	$\psi$ deg
1	2.0	4.1	0.9	0	0	0
2	5.6	4.1	0.9	0	0	0
3	3.8	2.8	0.9	0	0	0
4	2.0	1.0	0.9	0	0	0
5	5.6	1.0	0.9	0	0	0

メータ等のずれによる歪みはないものと仮定する.推定対象と なる6自由度の位置姿勢を表現するためのカメラ座標系は図10



Fig. 12 The line map of the experimental environment. Spherical images were taken at points 1 to 5 as shown in Table 1

 Table 2
 The errors of the estimation result of experiment 1

Pose	x m	y m	z m	$\phi$ deg	$\theta$ deg	$\psi \deg$
1	0.1	0.1	0.0	0	1	0
2	0.0	0.0	0.0	0	1	2
3	0.3	0.2	0.0	1	1	0
4	0.0	0.0	0.0	1	2	1
5	0.1	0.0	0.0	1	2	2

のように定義した.  $y_{img}$ の正の方向が正距円筒画像の中心となる.環境の3次元モデルは RGB-D センサを搭載したロボット による Simultaneous Localization and Mapping (SLAM)を用い て生成し、ラインマップは各直線の端点の座標を手動で決定し 作成した.実験で使用した3次元モデルを図11に、ラインマッ プを図12に示す.実験1において、図中の1から5に示す地 点において画像を取得し、位置姿勢を推定した.地点1から5 の真値の座標を図12の各座標軸と表1に示す.各地点で撮影 した画像を図13に示す.また、実験2においては、地点1の 画像を x 軸周りに 30 deg ずつ回転させた.図13(a)、図14に 地点1で取得した正距円筒画像と x 軸周りに 60 deg 回転させ た正距円筒画像を示す.両図とも画像の上部および下部にいく ほど直線が大きく歪んでいることがわかる.





Fig. 13 Spherical camera image captured at points 1 to 5



Fig. 14 Spherical camera image rotated 60 deg around x axis captured at point 1



Fig. 15 The success rate with respect to each number of circles drawn in an input image. One circle is equivalent to about 2 % area of the whole image. In other words, ten circles occluded about 20 % area

# 3.3 実験1に関する結果および考察

実験1に関する位置姿勢推定の結果を表2に示す.値は位置 姿勢の推定誤差を表している.推定誤差の最大値は並進方向に 0.3 m,回転方向に2 degであり、カメラ位置の違いに依らず高 い精度での位置姿勢推定を実現できた.

実験1において,地点3(図13(c))は環境のほぼ中央にあ り、すべての直線から遠い位置にあたる.そのような地点から 取得される画像においては、検出される直線が短く,直線検出の 精度が低下する.よって,地点3は実験1において最も位置姿 勢の推定精度が低下する場所に位置しているが、そのような場 合においても、推定誤差は並進方向に0.3 m、回転方向に1 deg まで抑えられており、本手法の直線検出の精度に対するロバス ト性を確認できた.

また,人など複数の移動物体が画像中に写り込んでしまった 場合を想定し,図 13 (f)のように地点1において円を描画した 画像を入力画像として位置姿勢推定を行い,遮蔽に対する頑健 性について評価した.このとき,5376×2688 pixの画像に対 して,面積比約2%にあたる半径300 pixの円をランダムな位 置に描画した.円の個数を重ならないように増やしていき,円 の個数ごと成功確率で評価した.最大誤差が並進方向に0.3 m, 回転方向に2 deg 以内であれば成功とした.最大10 個の円を描 画し,それぞれ30 回の試行を行った.円の位置は試行の度に変 更した.結果をまとめたグラフを図 15 に示す.

3 個の円が描画された場合,画像全体の約6%が隠れること になるが,そのような場合でも90%以上の確率で位置姿勢推定 できることが確認できた.10個の円が描画された場合,すなわ ち画像全体の約20%に相当するような大きな面積が隠れた場 合にも,60%の成功確率という結果が得られた.

 Table 3
 The errors of the estimation result of experiment 2

Rotation	x m	y m	z m	$\phi \deg$	$\theta$ deg	$\psi \deg$
30	0.0	0.0	0.0	0	0	0
60	0.1	0.0	0.1	0	0	1
90	0.0	0.0	0.0	1	0	0
120	0.0	0.0	0.0	0	1	2
150	0.0	0.0	0.0	0	0	0
180	0.0	0.0	0.0	0	0	0

#### 3.4 実験2に関する結果および考察

実験2に関する位置姿勢推定結果を表3に示す.値は位置 姿勢の推定誤差を示している.推定誤差の最大値は並進方向に 0.1 m,回転方向に2 degであり、カメラの姿勢に依らず高い精 度での位置姿勢推定が実現できた.

実験2のようにカメラ姿勢が変化した場合,画像を展開する 際の歪み方が大きく異なり,画像上での直線の長さなど直線検 出の精度にも影響を及ぼす.本研究では,2.2.1項で述べたよう に,姿勢の違いによる画像の歪み方の違いの影響を無くすため に,正距円筒画像を球面中で扱うことでディスクリプタを生成 する手法を提案した.実験2においては,30 deg から180 deg まで大きく姿勢を変化させたが,いずれの場合も姿勢の違いに 影響を受けずに推定誤差は小さく,最大値は並進方向で0.1 m, 回転方向で2 deg であった.以上より,生成したディスクリプ タの姿勢変化に対するロバスト性も確認でき,提案手法の有効 性を確認した

#### 4. 結論

人工物環境における全天球カメラの位置姿勢推定を目的とし た,直線特徴を用いた 3D-2D マッチング手法を新規に提案した. 全天球カメラ画像と 3 次元環境モデルにおける直線特徴を新た に設計したディスクリプタによって記述した.全天球カメラ画 像においては,ランダムハフ変換をベースに全天球カメラ画像 の特性を生かし,球上のハフ空間を生成することで直線特徴を 抽出し,これをディスクリプタとした.3次元環境モデルにお いては,ラインマップを用意し,直線特徴を直接変換すること で全天球カメラ画像と同様のディスクリプタを生成した.これ らのディスクリプタの類似度を EMD によって評価した.実環 境での実験において全天球カメラの位置姿勢推定を行い,環境 中の位置や姿勢の異なる入力画像を用いて結果を考察した.こ れにより提案手法の有効性を確認した.

本手法では EMD が最小となる位置姿勢の探索に粗密探索に よる探索法を用いたが,位置姿勢推定の精度を向上させるには ローカルミニマムに陥る可能性を考慮する必要がある.探索方 法におけるローカルミニマムに陥る可能性の低減が今後の課題 である.

#### 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

Y. Fujino, "The Cross-ministerial Strategic Innovation Promotion Program, Infrastructure Maintenance, Renovation, and Management", http://www8.cao.go.jp/cstp/panhu/sip\_english/34-37.pdf, Cabinet of-

fice, Government of Japan, 2017 年 5 月 10 日.

- S. Kim, C. Roh, S. Kang, and M. Park: "Outdoor Navigation of a Mobile Robot Using Differential GPS and Curb Detection", *Proceedings* of the 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation (2007) 3414.
- 3) K. Ohno, T. Tsubouchi, B. Shigematsu, and S. Yuta: "Differencial GPS and Odometry-based Outdoor Navigation of a Mobile Robot", *Advanced Robotics*, **18**, 6 (2004) 611.
- 4) 株式会社リコー, "RICOH THETA", https://theta360.com/ja/, 2017 年 5月10日.
- A. Torii, Y. Dong, M. Okutomi, J. Sivic, and T. Pajdla: "Efficient Localization of Panoramic Images Using Tiled Image Descriptors", *Information and Media Technologies*, 9, 3 (2014) 351.
- 6) 井上優希, 董亜飛, 田平創, 鳥居秋彦, 奥富正敏: "全球パノラマ画像を 用いた SfM による 3 次元復元と自己位置・方位推定への応用", 精 密工学会誌, 81, 12 (2015) 1173.
- N. Aihara, H. Iwasa, N. Yokoya, and H. Takemura: "Memory-based Self-localization Using Omnidirectional Images", *Proceedings of the* 14th IEEE International Conference on Pattern Recognition (1998) 1799.
- 8) T. Cham, A. Ciptadi, W. Tan, M. Pham, and L. Chia: "Estimating Camera Pose from a Single Urban Ground-View Omnidirectional Image and a 2D Building Outline Map", *Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* (2010)

366.

- 9) D. Ishizuka, A. Yamashita, R. Kawanishi, T. Kaneko, and H. Asama: "Self-localization of Mobile Robot Equipped with Omnidirectional Camera Using Image Matching and 3D-2D Edge Matching", Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Computer Vision Workshop (2011) 272.
- 10) S. Ramalingam, S. Bouaziz, P. Sturm, and M. Brand: "Geolocalization Using Skylines from Omni-Image", *Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Computer Vision Workshop* (2011) 23.
- Y. Ji, A. Yamashita, and H. Asama: "Automatic Calibration of Camera Sensor Networks Based on 3D Texture Map Information", *Robotics* and Autonomous Systems, 87 (2017) 313.
- 12) G. Bleser, H. Wuest, and D. Stricker: "Online Camera Pose Estimation in Partially Known and Dynamic Scenes", *Proceedings of the 2006 IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality* (2006) 56.
- 13) Y. Rubner, C. Tomasi, and L. J. Guibas: "A Metric for Distributions with Application to Image Databases", *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Computer Vision* (1998) 59.