

全天球パノラマ画像による部屋情報を用いないカメラ自己位置推定

大橋 拓朗[†] 横山 昌平^{††,†††}

[†] 東京都立大学システムデザイン学部 〒191-0065 東京都日野市旭が丘6-6

^{††} 国立情報学研究所 〒101-8430 東京都千代田区一ツ橋2-1-2

^{†††} 東京大学生産技術研究所 〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1

E-mail: [†]ohashi-takurou@ed.tmu.ac.jp, ^{††}shohei@tmu.ac.jp

あらまし 本論文では、1枚の全天球パノラマ画像から部屋情報を用いないカメラの室内自己位置推定手法を提案する。これまでに、GPSを用いた正確な位置推定が難しい室内において、複数のカメラの複眼視にて位置推定を行う手法や1つの全天球カメラからの入力と部屋情報を用いて自己位置推定する手法等が提案されている。提案手法では、一台の全天球カメラのみから壁と天井の淵を検出する事で、部屋の間取り等の情報に依らない自己位置推定を行う。提案手法のアイデアは、正距円筒図法に投影された全天球パノラマ画像の赤道において歪が無い事に着目し、画像を水平垂直方向に回転させる事で、カメラと、天井と壁の淵の方向を求め、自己位置推定を行う。

キーワード 画像認識、全天球カメラ、直線検出、自己位置推定、正距円筒図法

1 はじめに

近年、スマートフォンやタブレット等の携帯情報端末の普及や人間の操縦なしに動作を行う自律型のロボット、ドローンの用途の拡大に伴い、位置情報サービスの需要が増加している。その例として、列車運行のない夜間などの限られた時間での点検を行う必要がある鉄道事業者が、トンネルや棟梁等の作業負担の大きい場面でドローンを用いている[1]。また、工場においてもピッキング作業を行う協働型自立配送ロボットが利用されている[2]。こうした移動ロボットによる作業では、ロボットの自己位置推定が重要な課題である。このような場合には主にGlobal Positioning System(GPS)が用いられるが、トンネル内部や屋内といった信号が届きにくい場所においてはGPSを用いた正確な位置推定は困難である。

これまで、GPSを用いない屋内測位技術として、無線LANのアクセスポイントやビーコンを用いる手法が提案されてきた[3]が、近年、屋内測位の新しいアプローチとしてカメラの動画像から自己位置を推定する手法が提案されている[4][5][6][7]。しかし、そのほとんどが画像を大量に用意するというような事前の準備が必要なものであり、手軽に位置推定する際に向いているとは言いがたい。

そこで、本研究では屋内での部屋の間取り等の情報を得るといった事前の準備なしに位置推定を行うことを目的とし、1台の全天球カメラから直線検出を用いて自己位置を推定する手法を提案する。全天球カメラはその視野の広さから、広範囲の情報を利用でき、また向きを気にする必要がないため、撮影の手間を大幅に減少させることから利用を検討した。反対に通常のカメラでは一眼レフや魚眼カメラなど、様々な製品がそれぞれの視野角を採用している。そのため全天球カメラを利用することで製品の仕様の差に困るといった心配を排除した。また全天球カメラで撮影された動画像は、全天球球面動画像と全天球パ

ノラマ動画像の2種類があり、本研究では後者を使用した。全天球パノラマ動画の特徴として、全方位の風景を通常のカメラで撮影された動画と同じ形式で観聴することが可能である。しかし、一般的に全天球カメラで撮影された動画像は、全天球球面動画像を正距円筒図法という投影法によって全天球パノラマ動画像に変換されるため、全天球パノラマ動画像は歪んでしまう。図1は全天球パノラマ画像の例であり、高緯度領域での机の歪みが実際に確認できる。全天球パノラマ動画像上で直線検出を行う場合、実空間上で直線であっても全天球パノラマ動画像では歪みに沿って曲線となってしまい、うまく検出することが困難である可能性が高い。

そこで、本研究では全天球球面画像を正距円筒図法によって全天球パノラマ画像に変換する際、画像を地面と水平かつ画像内で横向きの軸(x軸)を中心に回転させ、全天球パノラマ画像の中心を少しづつずらしたものを用意する。次に直線の検出範囲を全天球パノラマ画像の低緯度領域、すなわち赤道付近に絞ることで、歪みにとらわれることなく、cannyのエッジ検出といった通常の画像処理方法を用いて直線を検出することを可能とした。本論文の構成は以下のとおりである。2章では本研究で使用した技術及びその活用に関する研究について述べる。3章では提案手法について説明し、4章では実験とその結果、考察について述べる。まとめと今後の課題を5章にまとめる。

2 関連研究

まず、GPSを用いない屋内測位の代表的なアプローチとしては、Wi-Fi、ビーコン、IMES(Indoor MEssaging System)を用いた測位手法が挙げられる。[3]しかしこれらの手法では、対象となる環境に基地局を設置しなくてはならず、運用するために決して少なくないコストがかかってしまう。

また近年では、自己位置推定と環境地図の作成を同時にすることが可能な技術である、SLAM (Simultaneous Localization and



図 1 高緯度領域で机がゆがんだ全天球パノラマ画像

Mapping) を用いて自己位置を推定する手法がさかんに研究され、実用も行われている。主にロボットのための自己位置推定と地図構築を行う技術であり、SLAM の手法はセンサや環境の種類によって異なっている。

SLAM で用いられるセンサは、内界センサと外界センサに分けることができる。ただそのどれもで誤差やノイズが生じ、またセンサによって特性が異なるため複数のセンサデータを融合することが重要であるとされている。内界センサには車輪の回転角の積分によって移動ロボットの現在位置や姿勢を推定するオドメトリや加速度センサ、外界センサには LIDAR、カメラが用いられる [4]。

Hess らは [5] は Google の Cartographer を用いて、屋内地図をリアルタイムに作成し自己位置を推定する手法を提案した。Cartographer はセンサー内蔵のバックパックをデバイスとし、それを携行することでリアルタイムで 2D のグリッドマップを生成するものである。

Mur-Artal ら [6] は、画像内の特徴点を利用し自己位置推定と環境地図の作成を行う手法として、ORB-SLAM を提案した。これは一台のカメラ映像を用いる単眼 SLAM の一種であり、CPU で実行可能かつ低遅延で点群を取得可能といったことから広く利用されている。しかし点群が疎であるという欠点がある。

このように、SLAM は得られた点群データの質に位置推定精度が左右されるため、高価な LIDAR が使われることが多く、またカメラを外界センサに用いる手法も存在するが、LIDAR と違って直接距離を計測できないため、3 次元再構成を組み込むなどして距離計算を行う必要がある。本研究では安価で手軽に位置推定を行うことを前提としているため、SLAM は用いない。

SLAM 以外で、動画像から位置を推定する手法として挙げられるのが、事前に 3D モデルなどといった様式で部屋内部の情報を確保しておき、推定したい位置によって得られる動画像と比較することで位置推定を行う手法である。このような手法は部屋情報を取得する方法に違いが表れている。

井上ら [7] は、画像から撮影した対象の 3 次元復元や位置姿勢の推定手法である SfM(Structure from Motion) を利用して、全天球パノラマ画像から 3 次元復元と自己位置推定、方位測定を行った。しかし、1 つの 3 次元モデルを作成し、位置推定等を行うために井上らは 2000 枚以上の全天球パノラマ画像を用いている。これは非常に大きな数である。

また、後藤ら [8] は、環境の 3 次元モデルと全天球パノラマ

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。全天球パノラマ画像内の直線特徴を利用するため/randam ハフ変換を行い、また制約を設けて誤検出を減らしている。しかしこれらの研究は 3 次元モデルや大量の部屋内部の画像を用意といった事前の作業に時間がかかるてしまい、手軽には行うことは困難である。

そして、青木ら [9] は 2 つの全天球カメラから対応する直線を検出し、三角測量を用いて位置を推定する手法を提案している。直線検出を行うという点では類似しているが、本研究では 1 つの全天球カメラを用いて推定を行う。また直線検出時、青木らは特徴点を人為的に選択しそこから延びる直線を検出しているが、本研究では天井の淵を半自動的に選択するアルゴリズムを作成している。本研究では、部屋の中ではほぼ必ず存在する、天井と壁の境目となる部分（天井の淵）に焦点を当て、1 枚の全天球パノラマ画像からの位置推定を目的とする。

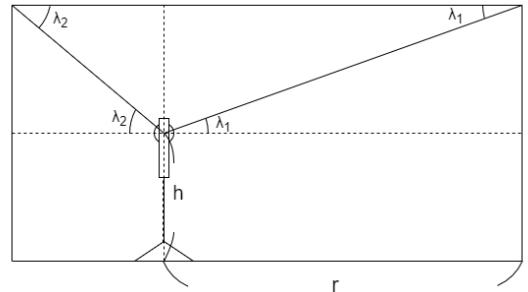


図 2 横から見たカメラと部屋の位置関係

3 提案手法

提案手法の概要を示す。まず図 1 のような検出したい天井の淵が存在する方向に中心を向けた全天球パノラマ画像を用意する。それを 1 度ずつ上に回転させ、45 度まで回転させた天球パノラマ画像に対し、赤道付近の縦 20pixel ほどの領域で直線検出を行うことにより、ゆがみのない直線が検出される。その中で最も直線が検出されたとみなせるものを選定し、カメラから天井までの仰角を求める。図 2 では横から見たカメラと部屋の位置関係を簡単な図で描いている。提案手法では、全天球パノラマ画像の回転と直線検出を用いることで、この図における λ_1 を求め壁までの距離 r を算出していく。この先、全天球パノラマ画像の回転、直線検出、自己位置推定について説明していく。

3.1 全天球パノラマ画像の回転

まず、全天球パノラマ画像は生成する際の中心を任意に定めることができ、それを利用して任意の場所を歪みの少ない低緯度領域に入れることができる。図 3 と図 4 は、どちらも全天球パノラマ画像で図 3 を床方向に 60 度回転させることで生成した画像が図 4 である。これらを見ると、図 3 では丸印がある机が、画像の高緯度領域に写っていることで大きくゆがんで

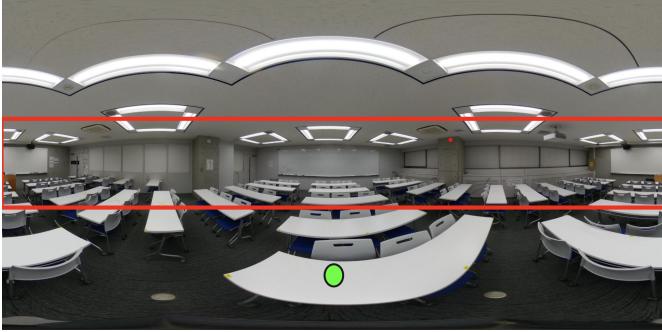


図3 回転前の全天球パノラマ画像

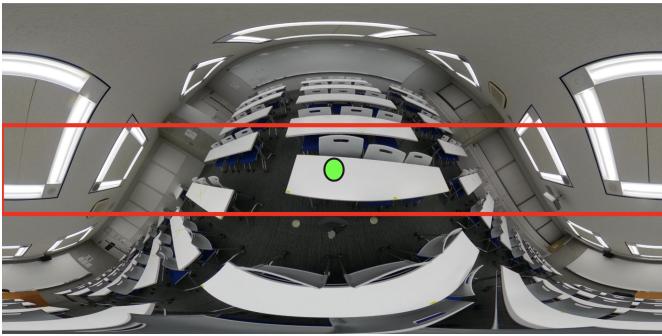


図4 図3を床方向に60度回転させた全天球パノラマ画像

いるのがわかる。しかし回転後の図4では印のついた机が赤枠で囲まれた低緯度領域内に入ったことで、現実世界に近い形で写っているのが見て取れる。これが全天球パノラマ画像の回転であり、それを利用することで正距円筒図法の画像は任意の場所に任意の被写体を映すことが可能であるこの例である。

提案手法では天井の淵を低緯度領域に入れるように画像を天井方向を向くように回転させ、直線検出を利用して天井の淵を検出し、図2における仰角 λ_1, λ_2 を求める。

次に全天球パノラマ画像の回転の理論を説明する。全天球カメラを中心とした球面座標系 (r, θ, ϕ) において、(1), (2), (3)式で表される回転行列 $R(r), R(\theta), R(\phi)$ が存在する。図5は赤色で示した \vec{g} から緑色で示した \vec{f}' まで r だけ回転させたときのイメージ図であり、これは \vec{g} に(1)式をかけることで求めることができる。

同様に、回転前、回転後のベクトルをそれぞれ \vec{g}, \vec{f}' とし、 \vec{f}' は \vec{g} を ϕ, θ, r の順に回転させたものであるとすると、(4)式のように1つの式で回転行列を表現でき、 \vec{g} から \vec{f}' への変換は(5)式のように表せる。また $R(z)$ は直行行列のため(5)式のベクトル \vec{f}' と \vec{g} を入れ替えて式は成り立つ。つまり、(1)から(5)式を用いることで、球面座標系 (r, θ, ϕ) における任意のベクトルの回転が実装可能となる。

次に(6)から(10)式では、正距円筒図法によって平面画像となった全天球パノラマ画像の xy 座標と球面座標系の相互変換について示している。回転前、回転後の全天球パノラマ画像における任意の座標をそれぞれ $(i, j), (p, q)$ としている。(6)から(8)式で求めた値を(5)式の右辺に代入し、得られた ϕ_f, θ_f, r_f に対して(9), (10)式を用いることで回転後の xy 座標 (p, q) を求めることができる。

$$R(r) = \begin{bmatrix} \cos r & -\sin r & 0 \\ \sin r & \cos r & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$R(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$R(\phi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$R(z) = R(r) \times R(\theta) \times R(\phi) \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} \phi_f \\ \theta_f \\ r_f \end{bmatrix} = R(z) \times \begin{bmatrix} \phi_g \\ \theta_g \\ r_g \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\phi_g = \sin i \times \cos j \quad (6)$$

$$\theta_g = \sin i \times \sin j \quad (7)$$

$$\phi_g = \cos i \quad (8)$$

$$p = \arccos r_1 \quad (9)$$

$$q = \arctan 2(\theta_1, \phi_1) \quad (10)$$

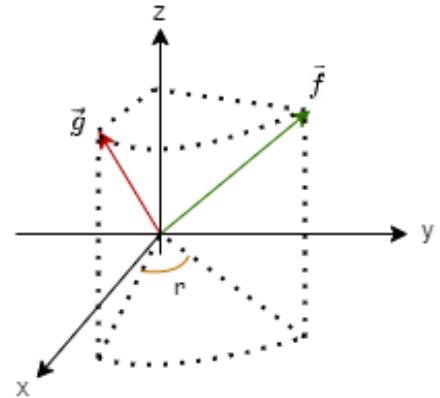


図5 z軸に対して r だけ回転させたベクトル

3.2 直線検出

直線検出ではOpenCVに搭載されているcv2.createFastLineDetector関数を用いた。全天球パノラマ画像では文字通りカメラの周りすべての情報を1枚の画像に写す。それにより天井の淵1辺も、距離によるが、画像の幅の半分以下の大きさになってしまふため、より強力で高速な検出法を選択した。また天井の淵は壁や天井と同じ色のため、検出のパラメータは表1に示す値を利用した。また直線検出を行う範囲は入力画像によって多少変更している。例えば図6では $(x_1, y_1, x_2, y_2) = (2350, 1670, 4300, 1690)$ とした。

表1 cv2.createFastLineDetector 関数の各パラメータの値

parameter	value
length_threshold	3
distance_threshold	1.41421356
canny_th1	13
canny_th2	23
canny_aperture_size	3
do_merge	False

3.3 自己位置推定

自己位置を推定する方法として、仰角が何度かを求めることができれば以下に示す(11)式を利用することで、その壁までの距離が判明するため、直線検出によってカメラから天井までの仰角 a を求めた。

ここで、仰角を検出する方法だが、 x 軸方向で直線検出を行う範囲は天井の淵スコアを用いる。天井の淵スコアとは、検出された直線が x 軸方向において、重複なしで何 pixel の長さであったかを示す値である。これを用いることで、天井の淵が壁一面に対し最も長い直線だと仮定すると、そのスコアが最も高くなつた時が天井の淵であると判別することができ、仰角を求めることが可能となる。

その仰角 a と天井高 $floor_h$ とカメラの高さ $camera_h$ を用いて、検出した淵側の壁からどれくらい離れているかを以下の(11)式を用いて計算した。

$$pos = floor_h - camera_h / \tan a \quad (11)$$



図6 実験1に用いた画像

4 実験

本実験は RICOH 社の THETA Z1 を使用し、東京都立大学日野キャンパスの横山研究室と 2 号館 401 で行った。実験は大きく分けて 2 種類行い、まず 1 つが天井の淵に境界マーカーを付与し、検出を容易にした状態での自己位置推定を行うもので、2 つ目が境界マーカーを用いない状態での自己位置推定を行った。境界マーカーとは、エッジの弱い天井の淵の検出を容易に行うために貼った赤色のラインテープのことを指す。

4.1 節には実験 1 として、横山研究室内での天井の淵 1 辺に



図7 実験2に用いた画像

対し、境界マーカーを貼り、天井の淵を検出しやすくした状態でのカメラ自己位置推定を行う実験を記載し、4.2 節には実験 2-1, 2-2 として、2 号館 401 でそれぞれ 401 後方の壁、ドア側の壁に面している天井の淵に対し、何も工夫を加えず自己位置推定を行った実験を記載している。

また、それぞれの実験において検出したい天井の淵が入るように手作業にて直線検出範囲を定めており、実験 1 においては $(x_1, y_1, x_2, y_2) = (2350, 1670, 4300, 1690)$ 、実験 2-1 では $(x_1, y_1, x_2, y_2) = (2600, 1670, 4080, 1690)$ 、実験 2-2 では $(x_1, y_1, x_2, y_2) = (2350, 1670, 4800, 1690)$ といった値での検出となっている（単位はすべて [pixel]）。

横山研究室におけるカメラの位置は、（窓からの距離、レンズの高さ、壁からの距離） = (4.913, 1.289, 4.253)[m] で、天井高は 2.564m である。2 号館 401 におけるカメラの位置は部屋の中心で、（廊下側の壁からの距離、レンズの高さ、401 後方の壁からの距離） = (4.736, 1.5, 5.708)[m] で、天井高は 2.6m である。

4.1 天井の淵に境界マーカーを付与した状態での自己位置推定

今回の実験 1 では、図 6 に示した画像を用いており、図 6 の中央に移っている壁に面している天井の淵に対して境界マーカーを付与している。天井の淵スコアによって 0 から 45 度の回転された画像のうち、天井の淵をとらえているものを判別した後、その仰角を同様のスコアを用いて小数点第一位まで求め、壁からの距離を推定する。

図 8 はこの実験 1 における最大の天井の淵スコアを示した際の画像であり、テープを付与した天井の淵をとらえた画像が出力されているのがわかる。また、0 から 45 度まで 1 度ずつ図 6 を回転させた際の天井の淵スコアは、図 13 に示しており、これを見ると最も高いスコア値は 17 を示しているのがわかる。

図 16 は最も高かったスコアである 17 度を中心にして 0.1 度ずつ上下に回転させた際の天井の淵スコアを示している。つまり 16.0 度から 0.1 度刻みで 18.0 度までの天井の淵スコアを載せている。これを見ると僅差ではあるが 17.1 度の時が最も高い値を指しており、これにより全天球カメラから天井の淵への仰角は 17.1 度であるということが判明した。

次に求めた仰角から、カメラと壁の距離を推定する。カメラのレンズの高さは三脚の長さと本体の長さの合算により求められ、1.289m で、天井高はレーザー測距計により測定し 2.564m

であった。これらの値を(11)式に代入して求められた推定値は4.144mで、正解データである実測値は4.253mと誤差は10.9cmであった。表2にこれらの値をまとめている。これにより天井の淵スコアを用いた天井の淵判別は可能であることが判明した。



図8 実験1において最大の天井の淵スコアを示した画像

4.2 境界マーカーなしでの自己位置推定

4.2.1 401後方の壁からの距離推定

実験2-1では、境界マーカーなしで401後方の壁とカメラの距離推定を行う。今回の実験では図7に示した画像を用いており、天井の方向へ回転させている。図9は天井の淵スコアが最も高かった際の画像で、見やすさのために出力された全天球パノラマ画像から検出部分付近を拡大して載せている。これらを見るに天井の淵付近に短い直線がいくつも検出されており、マーカー等の誘導なしでも天井の淵を検出することが可能だということがわかる。

図14と図17は仰角を求める際に、検出されたx軸方向の直線の長さを重複なしで計測した結果をまとめた散布図である。それぞれ横軸が仰角 [deg]、縦軸が検出された直線の長さを示す天井の淵スコア [pixel] を表している。図17から、カメラから天井の淵までの仰角は10.1度であった。これを(11)式に代入して、壁までの距離である実測値と比較すると表2のようになる。結果は実測値が5.708m、実験にて求めた推測値が6.175mで、誤差46.7cmであった。

4.2.2 廊下側の壁からの距離推定

次に実験2-2では、境界マーカーなしで廊下側の壁とカメラの距離推定を行う。実験には図7を窓側に90度回転させた画像を用いる。

図10には、実験2-2において天井の淵スコアが最も高かった際の画像を示した。これを見ると天井の淵スコアを用いて天井の淵を判別することができていることがわかる。しかし表1に示した、直線検出に用いるパラメータや直線検出を行う範囲を変更すると図15にて2番目に値が高かった仰角6度が1番目になるなどといった事象が発生した。そのため、直線検出を行う際のパラメータや範囲の設定は現在手動で行う必要があり、手法の検討を行っている。

図15と図18は天井の淵を判別する際に用いる天井の淵スコアを仰角ごとに表したものであり、これらからカメラから天井の淵までの仰角は10.9度であることが判明した。この時カメラの高さは1.5mで、天井高は2.6mであり、これを(11)式に代入して、壁までの距離である実測値と比較するために表2に

記載した。結果は実測値が4.736m、実験にて求めた推測値が5.712mで、誤差97.6cmであった。

3つの実験の中でもこの実験2-2が最も誤差が大きかった理由としては、1つはカメラの傾きによるものが考えられる。三脚に全天球カメラを付けて撮影しているのだが、その際にわずかであるが傾いている時がある。そのため傾きを水平に戻す天頂補正を行っているが、1度単位のズレは目視では容易に修正することが難しい。

画像編集ソフトを用いて天頂補正も行ったが、theta Z1での天頂補正アプリ RECOH THETA stitcher を用いた補正では、図11に示すように補正後の画像に対して回転のアルゴリズムを実行すると、赤道付近よりも少し下で直線になるといった結果となり、解決策の検討を行っている。図11の緑色の枠は直線検出を行う範囲を示しており、本来であればこの枠の辺りは歪みなく水平に写るはずだが、画像中央が上に盛り上がるよう歪んでしまっていることが確認できる。

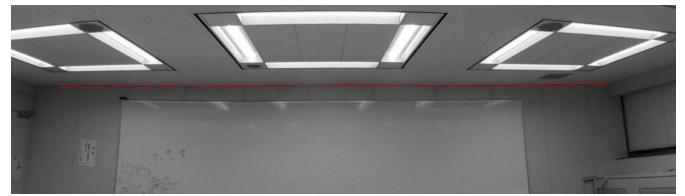


図9 実験2-1で最大の天井の淵スコアを示した画像



図10 実験2-2で最大の天井の淵スコアを示した画像

表2 正解データである実測値と推測値、その差

	実測値 [m]	推測値 [m]	実測値と推測値の差 [m]
研究室	4.253	4.144	0.109
401後方の壁側	5.708	6.175	0.467
廊下側	4.736	5.712	0.976



図11 天頂補正による赤道付近の歪みの例



図 12 直線検出による天井の淵の検出失敗例

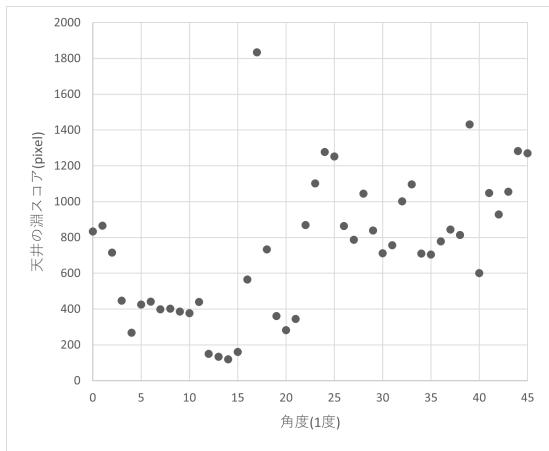


図 13 研究室における仰角(1度)と天井の淵スコア

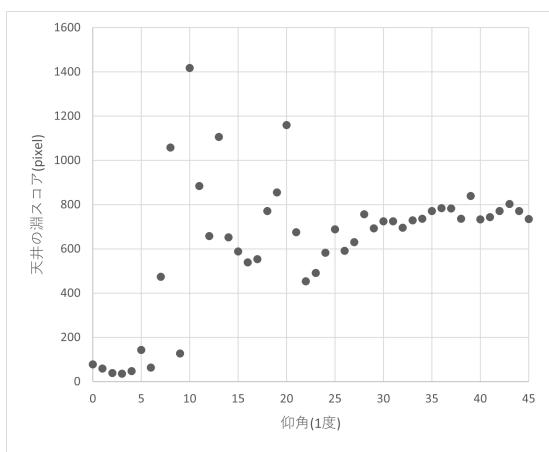


図 14 401 後方における仰角(1度)と天井の淵スコア

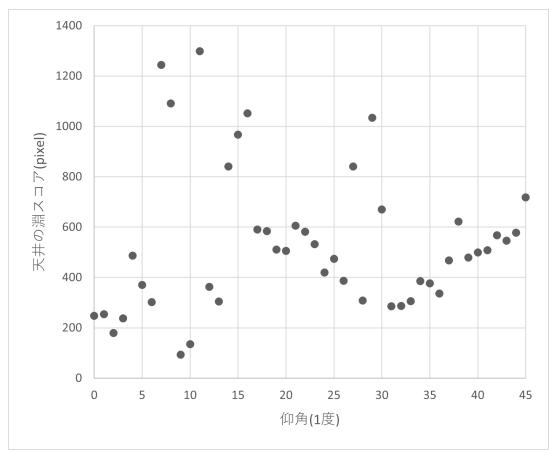


図 15 401 のドア側における仰角(1度)と天井の淵スコア

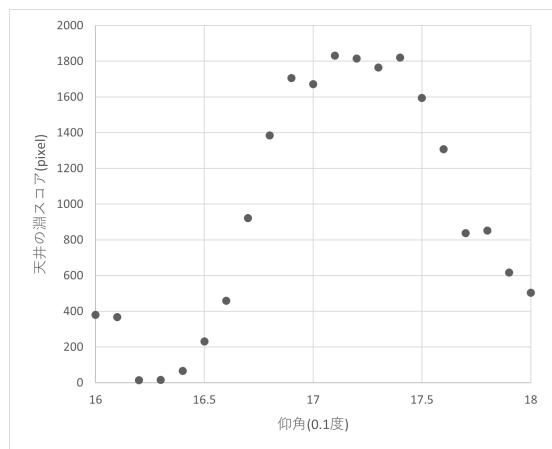


図 16 研究室における仰角(0.1度)と天井の淵スコア

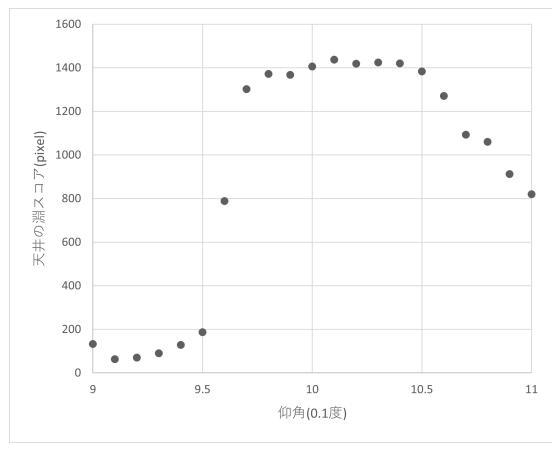


図 17 401 後方の壁における仰角(0.1度)と天井の淵スコア

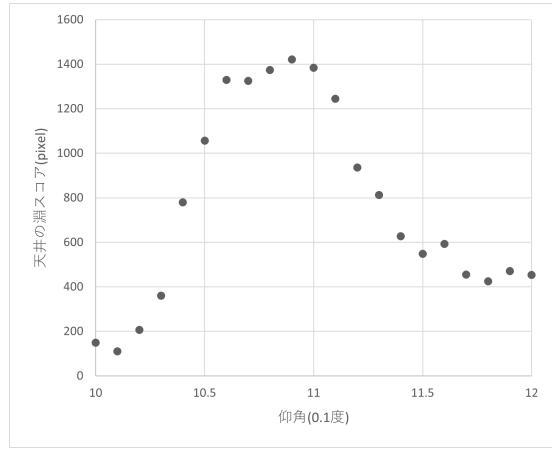


図 18 401 のドア側における仰角(0.1度)と天井の淵スコア

5 まとめと今後の課題

本研究では、1枚の全天球パノラマ画像から部屋情報を用いないカメラの屋内自己位置推定手法を提案した。全天球パノラマ画像を回転アルゴリズムを用いて1度ずつ回転させ、全天球パノラマ画像の赤道付近において直線検出を行った。また検出した直線情報から天井の淵を特定するために、x軸に射影した際の長さを求めた。天井を特定したのちその時の仰角を参照することで、位置推定を可能とした。

そして実験の結果から、提案手法はいまだ改善の余地はあるものの、小さいものでは誤差10cmと十分に自己位置推定が可能であることが判明した。

今後の課題としては、現在の提案手法における位置推定の誤差を小さくしていくことが挙げられる。実験に用いた部屋403にて、窓側方向の天井の縁検出を行ったところ、図12のように、想定とは異なった角度の画像が天井の縁であると判定された。これは直線検出ができるといはるが、検出箇所において、天井の縁よりも長く直線が検出されていることが原因と考えられる。こうした天井の淵と同程度の長さの直線が存在する天井、壁に対しては誤判別の可能性が高まることが判明した。よって天井の縁の判定方法を変更する等行い、誤判別の可能性を低くしなくてはならない。

そのために2方向からのアプローチで今後は対応していくと考えている。まずは、semantic segmentationの利用である。これはディープラーニングを利用して、画像内の全画素にラベルやカテゴリを関連付け、色により分類するアルゴリズムである。これにより天井と壁をクラス分けし異なる色で分類することができれば、容易に天井の淵を検出することが可能であるため、現在取り組み中である。

天井の淵の判別精度を上げるもう一つのアプローチとして挙げられるのは、直線検出のパラメータの見直しによる精度の向上である。これは上記のsegmentationがうまくいかなかった場合の案なのだが、現在の表1にまとめた値は、ある程度の部屋の天井の淵を検出できる値ではあるが、すべての部屋に対応できるわけではない。現状より幅広く適用できるパラメータを見つけることを考えている。

また、現在は天井の淵以外の検出をなるべく抑えるために、天井の淵の大きさに合わせた横幅の範囲で直線検出を行っている。将来的にはこちらも人間の手を必要とせず、自動で判別できるようにしていきたいと考えている。そして、x軸に水平な軸の回転のみを考えているため、他の軸が少しでも斜めになつてると検出精度に大きな差が出てしまう関係上、手動での天頂補正等を行っている。こうした補正なしで自己位置推定が行えるようにすることも今後の課題として挙げられる。

6 謝 辞

本研究の一部は国立情報学研究所CRIS委託研究及び東京都

立大学「ローカル5G環境を活用した最先端研究」の助成を受けたものである。

文 献

- [1] 国土交通省，“国土交通省のドローン活用事例”
<https://www.mlit.go.jp/common/001428828.pdf>
- [2] 株式会社フジテックス、物流倉庫プランナーズ，“協働型自律搬送ロボットAMR ForwardX”
<https://lplanners.jp/products/forwardx-amr/>
- [3] 中尾浩一.“屋内測位技術の動向について”. OGI Technical Reports, 2014.
- [4] 友納正裕, and 原祥堯.“SLAMの現状と今後の展望.”システム/制御/情報 64.2 (2020): 45-50.
- [5] Hess, Wolfgang, et al. “Real-time loop closure in 2D LIDAR SLAM.” 2016 IEEE international conference on robotics and automation (ICRA). IEEE, 2016.
- [6] Mur-Artal, Raul, Jose Maria Martinez Montiel, and Juan D. Tardos. “ORB-SLAM: a versatile and accurate monocular SLAM system.” IEEE transactions on robotics 31.5 (2015): 1147-1163.
- [7] 井上優希, 董亞飛, 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, 2015, 81.12: 1173-1179.
- [8] 後藤翼, Sarthak Pathak, 池勇勲, 藤井浩光, 山下淳, 淺間一.“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”.精密工学会誌, 2017, 83.12: 1209-1215.
- [9] 青木貴大, 原潤一, 渡辺裕.“全天球画像における対応直線検出”. In: IEICE Conferences Archives. The Institute of Electronics, Information and Communication Engineers, 2019.