

全方向画像のエッジ方向を用いたセンサの姿勢推定

王 彩華[†] 棚橋 英樹[†] 佐藤 雄隆[†] 平湯 秀和[†] 丹羽 義典[†] 山本 和彦[‡]

[†] (財)ソフトピアジャパン HOIP プロジェクト/科技団

[‡] 岐阜大学 工学部 応用情報学科

概要：全方向ステレオシステム (SOS) で得られた全方向画像からエッジ方向の統計量を用いてシステムの傾きを推定する新しい手法を提案する。本研究では、全方向画像からエッジとその方向を求め、エッジ方向を $Z=1$ の平面に射影して投票する。この射影により平行エッジは投票平面上においてセンサの傾きによって決まる共通点を通る。このため、室内環境や市街地など垂直エッジが多く存在するシーンでは、その共通点に大きなピークが得られる。このピークを検出することによってセンサの傾きを推定する。本手法と我々が既に提案した全方位画像のエッジヒストグラムを用いたセンサの位置姿勢 (水平のみ) 推定手法と併用することにより、センサの任意の位置と姿勢を推定することが可能になる。実環境での実験結果により提案手法の有効性を示す。

Pose Estimation for Active Vision Using Edge Directions of Omni-directional Images

Caihua Wang[†] Hideki Tanahashi[†] Yutaka Sato[†] Hidekazu Hirayu[†] Yoshinori Niwa[†] Kazuhiko Yamamoto[‡]

[†] HOIP Project, Softopia Japan / JST

[‡] Department of Information Science, Faculty of Engineering, Gifu University

Abstract In this paper, we propose a novel method which estimates the pose of Stereoscopic Omni-directional System (SOS), using the edge directions in the all-directional images obtained by SOS. The direction of each edge pixel is computed and projected to the plane of $Z = 1$. Since all the parallel edges pass a common point which is determined by the slant of the sensor, the vertical edges, which exist majorly in the indoor or urban scene, will form a large peak in the projection plane. Therefore, the slant of the sensor can be estimated by detecting the largest peak in the projection plane. Using this method together with the method proposed by us which estimate the location and horizontal rotation of the sensor using the edge histograms of all-directional image, any pose and location of the sensor can be estimated. Experimental results on a real environment show the effectiveness of the proposed method.

1 はじめに

センサの位置と姿勢の推定はロボティクスやコンピュータビジョンにおける最も重要な課題の

一つである [1]。全方位センサは、周囲環境 360° 視野角の情報を同時に取得できるため、ロボットやセンサの位置・姿勢推定に大変有効であり、最近注

目が集まっている．全方向画像を用いたロボット位置推定については様々な手法が提案されている [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10]．これらの手法は View-based マッチング [2, 3, 4, 5] と幾何特徴マッチング [6, 7, 8, 9, 10] に分けられる．View-based マッチング手法は，学習経路上の各位置の全方向画像から抽出された特徴量を予め記憶し，センサの位置を推定するとき，現位置で得られた全方向画像から同じように特徴量を抽出し，記憶した学習画像の特徴量と比較することによって，学習経路にある最も近い位置を求める．これらの View-based マッチング方法は，現在位置が学習した経路上に近いとき精度よくセンサの位置を認識できるが，経路から離れた場合，正確な位置推定は難しい．また，これらの手法のうち，回転（水平）不変特徴を用いた手法はセンサーの水平回転に依らずに位置を推定することが可能であるが，センサの傾きを考慮していない．一方，幾何特徴マッチング手法は，全方向画像から検出したエッジやコーナなどの幾何特徴をマッチングし，シーンとマップ間（または，フレーム間）の特徴点の対応からセンサの位置姿勢（または相対的な位置姿勢）を推定する．一般的に，複雑な実環境では，安定した特徴点抽出や特徴点の対応付けが困難であり，特徴点抽出の誤差や誤対応が位置推定に大きな影響を与える．

これまでに我々は全方向ステレオシステム (SOS) [11, 12] で得られた全方向画像のエッジヒストグラムを用いてセンサの水平回転と任意の位置を正確かつロバストに推定する手法を提案した [14]．本稿では，全方向ステレオシステム (SOS) で得られた全方向画像におけるエッジ方向の統計量を用いてセンサの任意の傾きを推定する新しい手法を提案する．まず，全方向画像からエッジとその方向を求め，エッジ方向を $Z=1$ の平面に射影して投票する．この射影では平行エッジは投票平面上においてセンサの傾きによって決まるある共通点を通る．このため，室内環境や市街地など垂直エッジが多く存在するシーンにおいては，その共通点において大きなピークが得られる．このピークを検出することによってセンサの傾きを推定する．また，低解像度の投票空間においてエッジ方向の投票で得られた SOS の傾きを初期値にして，その初期値の傾きと似た垂直エッジ方向が

ら最小二乗法で SOS の傾きを効率的に推定する手法も提案する．

本手法 [14] で提案した手法とを併用することによって，センサの任意の位置と姿勢を推定することが可能になる．SOS で得られた全方向画像を用いたシステムの位置・姿勢推定実験により，提案手法の有効性およびロバスト性を示す．

2 全方向ステレオシステム (SOS)

全方向ステレオシステム (SOS) は，正 20 面体の面上にマウントされた 20 個のステレオ・ユニットから構成され，リアルタイムで $360^\circ \times 180^\circ$ の視野角の高解像度カラー画像とステレオ情報を同時に取得することができる [11, 12]．各々のステレオユニットは，L 型に配置された 3 台のカメラから構成され，上下と左右の 2 つのステレオペア画像が得られる．これにより，正確かつ信頼できるステレオマッチングを得ることができる．各々のステレオユニットは独立にキャリブレーションされ，ユニット間のキャリブレーションは 6 面没入型ディスプレイ (COSMOS) の投影パターンを用いて行った [13]．図 1 に SOS のシステム構成を示す．各ユニットから得られたカラー画像とステレオ画像はメモリユニットに送られる．PC は PCI バスを介しメモリユニットにアクセスし，画像を取得する．全てのカメラはメモリユニットから送られた同期信号により同期が取れている．表 1 に，ステレオユニットの仕様を示す．

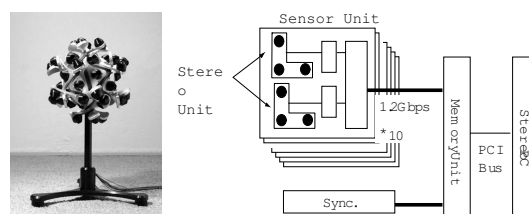


図 1: SOS のシステム構成

ステレオユニットの入れ子状のような効率的な配置によって，十分な精度の 3 次元情報を得るためのステレオベースラインの長さ (90mm) を保ちながら，システム全体の大きさ (直径: 27cm; 重量: 4.5kg) を抑えることができた．また，本システムは中心から 40cm 以上離れた空間を死角なしでカバーすることができる [11]．

表 1: ステレオユニットの仕様

Image Sensor	1/3' CMOS Chip
Resolution	640 (H) *480 (V)
Focal Length	2.9 (mm)
Field of View	96.6 deg (H)* 71.9 deg (V)
Baseline Length	90mm

このような全天周を同時にカバーする性質から、SOS がどんな姿勢であっても SOS で得られた全方向画像にはシーンに関する全天周情報に含まれている。したがって、参照点の画像を取得した時と異なる姿勢で得られた全方向画像を用いても、シーン全体の統計量からセンサの位置・姿勢を推定することが可能である。

3 SOS の傾きの推定

室内や市街地などの実環境では、垂直方向のエッジが多く存在する。位置・姿勢の推定には個々のエッジを直接特徴として使うことができるが、ノイズや視点の違いによるエッジ抽出の安定性の問題や異なる視点のエッジのマッチングの難しさといった問題がある。ここで、我々は統計的な手法を用いて、全方向画像におけるエッジ方向から SOS の傾きを推定する手法を考案する。

3.1 エッジ方向と SOS 傾きの関係

SOS の傾きを推定するには、ワールド座標系における SOS 座標系の縦軸（本研究では Z -軸とする）の方向を求めばよい。一方、ワールド座標系における SOS の傾きと SOS 座標系におけるワールド座標系の傾きはデュアル問題であり、SOS 座標系におけるワールド座標系の縦軸 Z_w の方向が分かれば、ワールド座標系における SOS 座標系の縦軸 Z の方向も分かる。SOS の傾きが未知の場合、SOS 座標系におけるワールド座標系の縦軸 Z_w の方向も未知であるが、室内などのような環境の中には 3 次元垂直方向のエッジが多く含まれている場合、それらのエッジの方向はワールド座標系の縦軸 Z_w の方向と同じであるため、SOS 座標系における 3 次元エッジ方向の分布を調べ、最も大きいエッジ方向の分布を検出すれば、SOS 座

標系におけるワールド座標系の縦軸 Z_w の方向を推定することができる。本研究では、SOS の座標系を基準座標系とし、SOS 座標系におけるワールド座標系の傾きを推定する。

ワールド座標系における 3 次元垂直エッジ点 P_w とそのエッジ方向 $E_w = (X_{E_w} Y_{E_w} Z_{E_w})^T$ は SOS の座標系ではそれぞれ P と $E = (X_E Y_E Z_E)^T$ として取得される。さらに、 P と $E = (X_E Y_E Z_E)^T$ は SOS 座標系の球面画像にそれぞれ $s = (x_s y_s z_s)^T$ と $e_d = (x_e y_e z_e)^T$ に射影されるとする。SOS 座標系 (X, Y, Z) におけるワールド座標系の縦軸を Z_w とする。3 次元空間において、垂直エッジ $P + \lambda E$ と Z_w は平行直線であるため、同一平面上にある。つまり、 P, E と Z_w は次の関係を満たす。

$$(Z_w \times P)^T E = (P \times E)^T Z_w = 0 \quad (1)$$

ここで、記号 \times は 2 つのベクトルの外積を表す。 $s = P/\|P\|$ と $e_d = (P + E)/\|P + E\| - P/\|P\|$ の関係から、 s, e_d と Z_w は次の関係を満たすことが分かる。

$$(Z_w \times s)^T e_d = (s \times e_d)^T Z_w = 0 \quad (2)$$

式 (2) は Z_w が平面 $(X Y Z)(s \times e_d) = 0$ にあることを示している。言い換えれば、球面画像に写像された 3 次元垂直エッジ点 s におけるエッジ方向 e_d と原点 O でなす平面 $(X Y Z)(s \times e_d) = 0$ はワールド座標系の縦軸 Z_w を通る。図 2 に示すように、平面 $(X Y Z)(s \times e_d) = 0$ を平面 $Z = 1$ と交差させれば、その交差線は Z_w と平面 $Z = 1$ との交点 p を通る。

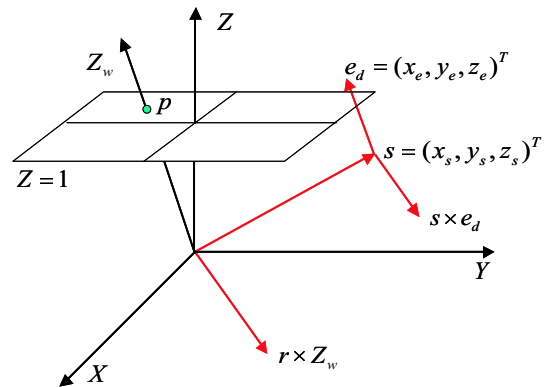


図 2: 垂直エッジと SOS の傾きの関係

$Z = 1$ 平面上の 2 次元空間 (x, y) を投票空間とした場合、球面画像におけ各エッジ点 s とその

エッジ方向 e_d は次の式で投票空間 (x, y) に投票される。

$$(x \ y \ 1)(s \times e_d) = 0 \quad (3)$$

シーンの中に垂直エッジが多数存在する場合，各エッジから作成された平面 $(X, Y, Z)(s \times e_d) = 0$ を上述のように平面 $Z = 1$ に投影すれば，その交差線はすべて共通点 p_k を通るため，投票空間 (x, y) 中に $p_k = (x_p, y_p)$ において大きなピークが形成される．したがって，投票空間 (x, y) から一番大きなピーク p_k を検出することによって，ワールド座標系の縦軸方向 Z_w を推定することができ，その値は $(x_p \ y_p \ 1)^\top$ になる．

3.2 全方向画像のエッジ方向の利用

SOS は正 20 面体にマウントされた 20 個のステレオユニットから全方向画像を取得している．本研究では，まず，SOS の各ステレオユニットのセンタカメラの画像に対して，LoG (Laplacian of Gaussian) フィルタを適用し，ゼロクロス点をエッジとして検出する．LoG はノイズに影響されやすいため，ノイズや照明の影響で偽のエッジが多く存在する．そこで，Sobel フィルタを用いて各エッジ画素におけるエッジ勾配 (強度) を計算し，画像中の最大エッジ勾配を求め，強度が最大エッジ勾配値の 5% 未満のエッジ画素を削除する．

次に，各エッジ画素において， x 方向と y 方向の Gaussian 微分フィルタを用いてエッジの勾配方向 (d_x, d_y) を計算する．画像平面におけるエッジの 2 次元方向は $(d_y, -d_x)$ で得られる．

カメラ c の画像におけるエッジ画素 (x_{ij}, y_{ij}) は近似的に次の式のように球面画像にマッピングすることができる．

$$s_{ij} = \lambda R_c (\alpha x_{ij} \ \alpha y_{ij} \ 1)^\top \quad (4)$$

ここで， α は固定距離で球面画像を生成する際の必要な視野角に応じた常数パラメータである． $\lambda = 1 / \|R_c (\alpha x_{ij} \ \alpha y_{ij} \ 1)^\top\|$ である． R_c はカメラ c の座標系とワールド座標系間の回転マトリクスである．

同様にエッジ画素 (x_{ij}, y_{ij}) におけるエッジ方向は次の式で球面画像にマッピングする．

$$e_{d_{ij}} = \beta R_c (\alpha d_{y_{ij}} \ -\alpha d_{x_{ij}} \ 0)^\top \quad (5)$$

式 (4) と式 (5) を式 (3) に代入すれば，次の式が得られる．

$$(d_{y_{ij}} \ -d_{x_{ij}} \ 0) R_c^\top \Delta(s_{ij}) \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} = 0 \quad (6)$$

$$\Delta(s_{ij}) = \begin{pmatrix} 0 & -1 & \alpha y_{ij} \\ 1 & 0 & -\alpha x_{ij} \\ -\alpha y_{ij} & \alpha x_{ij} & 0 \end{pmatrix} \quad (7)$$

これにより，全方向画像のエッジとそのエッジ方向を $Z = 1$ 平面の投票空間へ投票することができる．

3.3 最小二乗法による推定

前節の手法で高精度で傾きを推定するためには，高解像度の投票空間が必要となる．しかし，計算コストは解像度に比例するため，高解像度の投票空間での投票処理の計算コストは高い．そのため本研究では，低解像度の投票空間を用いて SOS の大まかな傾きを推定し，それを初期値とし，その初期値の傾きと似た方向を持つエッジから最小二乗法を用いて SOS の傾きを効率的に推定する．

3.1 節に述べたように，3 次元の垂直エッジとその方向を球面画像に投影したとき，式 (2) が成り立つ．したがって，垂直エッジのみを用いて式 (2) の二乗和を最小化すれば，ワールド座標系の縦軸方向 Z_w を求めることができる．しかし，普通シーンの中に垂直エッジ以外に他の方向のエッジも存在している．それらのエッジは式 (2) の外れ値となるため，最小二乗推定に大きな影響を及ぼす．そのため，3.2 節の手法で得られたワールド座標系の縦軸方向の初期値 Z_{w_0} を用いて，次の条件を満たすエッジを選び，最小二乗法でワールド座標系の縦軸方向 Z_w を求める．

$$\frac{1}{n_1 n_2} |(d_{y_{ij}} \ -d_{x_{ij}} \ 0) R_c^\top \Delta(s_{ij}) Z_{w_0}| \geq T \quad (8)$$

ここで， $n_1 = \|(d_{y_{ij}} \ -d_{x_{ij}} \ 0) R_c^\top \Delta(s_{ij})\|$ であり， $n_2 = \|Z_{w_0}\|$ である． T は閾値であり，本実験では $T = \cos(5^\circ)$ とした．

式 (4) と式 (5) から，全方向画像のエッジ点及びその方向を用いて式 (2) の二乗和を最小化することは次の式を最小化することと等価であること

がわかる .

$$\sum_{ij} \|(d_{y_{ij}} - dx_{ij} \ 0) R_c^\top \Delta(s_{ij}) Z_w\|^2 \rightarrow \min \quad (9)$$

ただし, Z_w は推定したい未知変数であり, s_{ij} は式 (8) を満たす .

式 (9) を式 (10) に書き換えることにより, 式 (10) を最小化する . Z_w は式 (11) のマトリクス M の最小固有値に対応する固有ベクトルで得られる .

$$Z_w^\top M Z_w \rightarrow \min \quad (10)$$

$$M = \sum_{ij} \Delta(s_{ij})^\top R_c e_{ij} e_{ij}^\top R_c^\top \Delta(s_{ij}) \quad (11)$$

ただし, $e_{ij} = (d_{y_{ij}} - dx_{ij} \ 0)^\top$.

4 水平回転と位置の推定

前節の手法で SOS の傾きを推定し, 傾きパラメータを用いて傾きのない時の SOS の全方向エッジ画像を生成することができる . したがって, SOS の傾き推定と傾きのない時の SOS 位置・姿勢 (水平回転) 推定の 2 段階の推定により, SOS の任意の姿勢と位置を推定することができる . SOS の傾きのないときの位置・姿勢 (水平回転) 推定には, 我々が提案した全方向画像のエッジヒストグラムを用いたセンサの位置姿勢推定手法 [14] を用いる . 本章では, その手法の概要について述べる .

SOS が傾いていない場合, SOS の移動や回転運動は, 全方向画像のエッジヒストグラムのシフトを引き起こす . SOS の回転によって生じたヒストグラムのシフト量はすべての方位角において一定であるが, SOS の平行移動で生じたヒストグラムのシフト量は移動方向とエッジの方位角に関する . 図 3 に示すように, SOS が参照点からある方向 ω に向いて動いたとき, $\omega \pm n\pi, n = 0, 1$ の方位角においてはヒストグラムのシフト量が小さく, $\omega \pm \frac{(2n+1)}{2}\pi, n = 0, 1$ の方位角においてはそのヒストグラムのシフト量が大きくなる .

本手法では, 予めいくつかの参照点において傾きのない全方向画像を取得し, そのエッジの垂直投影ヒストグラム $H_r = \{h_r(i), i = 0, \dots, N-1\}$ を記憶しておく . SOS の位置と姿勢を推定する際, 前章の手法で推定した SOS の傾きパラメータを用いて傾きない時の全方向エッジの垂直投影ヒスト

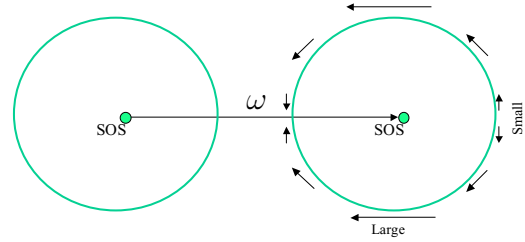


図 3: SOS の移動とエッジヒストグラムのシフト

グラム $H_c = \{h_c(i), i = 0, \dots, N-1\}$ を生成する . 参照点と現在位置のエッジヒストグラムのマッチングコストマトリクス $C(s, i) = ((h_r(i) - h_c(i+s))^2)$ を計算すれば, 両ヒストグラムのマッチングシーケンス $(h_r(i), h_c(i+s_i)), i = 0, \dots, N-1$ はマッチングコストマトリクス $C(s, i)$ の中でコストの低い sin 曲線状の軌跡をなす . 図 4 は SOS の 2 つの位置における全方位エッジヒストグラムのマッチングコストマトリクス $C(s, i)$ を示す (表示上, マトリクス中のマッチングコストの低いパスをセンタリングし上下をカットした) . $C(s, i)$ の中の sin 曲線に似たコストの低い曲線は各方位角におけるエッジヒストグラムのシフトに対応する .

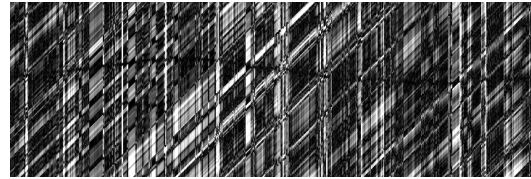


図 4: エッジヒストグラムのマッチングコスト

動的計画法 (DP) を用いて $C(s, i)$ の中の sin 曲線に似たコストの低い曲線を探索することで, H_r と H_c の間のヒストグラムのシフト量を求める . そのエッジヒストグラムのシフト量から SOS の相対的回転角度と移動方向を推定することができる . 図 5 に示すように, 参照点における姿勢に対する SOS の回転角度は全体のヒストグラムシフト量を 2 等分する中間シフト量 で得られる . を用いてヒストグラムを符号化し, sin 曲線のピークをフィンティングすることで sin 曲線のゼロ位相を求めることができる [14] . 得られた と はそれぞれ参照点に対する SOS の回転角度と移動方向を示す .

SOS の現在位置に近い 2 つの参照点 P_1 と P_2 に対する移動方向 ω_1 と ω_2 が分かれば, 図 6 のように P_1 と P_2 に対する移動方向 ω_1 と ω_2 の交点を求

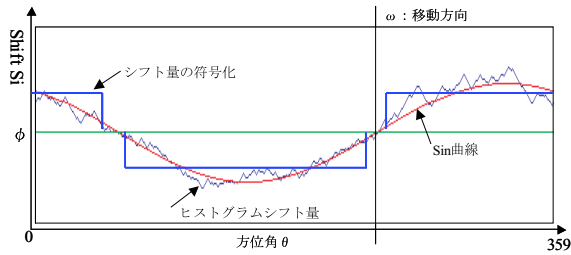


図 5: 回転角度と移動方向の推定

め, SOS の正確な位置を推定することができる。2 つの近い参照点を選択するには, 現在位置と参照点のヒストグラムマッチングコストが最も小さくなる 2 つの参照点を選択すればよい。

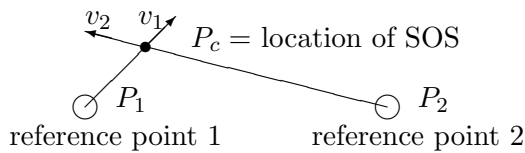


図 6: SOS の正確な位置推定

以上のように, 本提案手法により, 前章で得られた SOS の傾きのヨウとピッチの自由度と本章で求めた SOS の水平回転 及び平面位置 (X_w, Y_w) を含む 5 自由度の位置・姿勢パラメータを推定することができる。

5 実験結果

本提案手法の有効性を示すため, 実環境において実験を行った。実験は約 $3m \times 3m$ の空間で行った。まず, 空間の中心の 1 点とその左上, 右上, 左下と右下の 4 点計 5 点を参照点として選び, SOS が傾いていない状態で全方向エッジヒストグラムを取得する。次に, 中心の参照点の座標系を基準座標系として, 他の 4 つの参照点の位置・回転角度のキャリブレーションを行う。キャリブレーションは, 提案手法で周囲の 4 つの参照点に対し, まず中心の参照点に対する移動方向と回転方向を推定し, その結果に基づいて床のエッジ画像のテンプレートマッチングで中心の参照点に対する周囲 4 つの参照点の相対位置と回転を求める。図 7 にキャリブレーションの結果を示す。図 7 中の十字マークは各参照点の位置と回転角を示す。灰色のエッジは左上と中心の参照点における床のエッジをキャリブレーションで得られたパラメータで基

準座標系に統合した結果を示す。

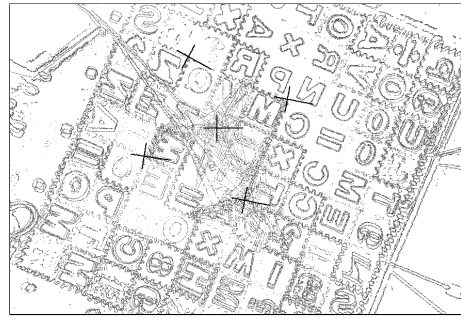


図 7: キャリブレーション結果

SOS の位置・姿勢の推定を行うとき, SOS が傾いた状態で環境の中で移動しながら全方向画像を取得する。図 8 に SOS が傾いたとき取得した全方向画像から生成したエッジの円筒画像の一例を示す。3.2 節で述べた全方向画像エッジ方向を高解像度投票空間への投票した結果を図 9 に示す。図 9 に現れたピークはワールド座標の垂直軸 Z_w の方向に対応している。そのピークを用いて SOS の傾きを推定し, 傾きパラメータに基づいて生成した傾きのないときのエッジの円筒画像を図 10 に示す。図 10 から分かるように, SOS の傾きはほぼ正確に推定されている。

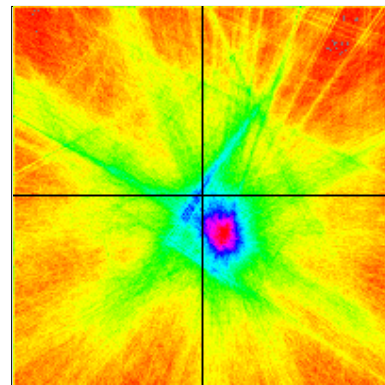


図 9: エッジ方向の投票結果

図 11 に低解像度の投票空間を用いて SOS の大まかな傾きを推定した後, 3.3 節で述べた最小二乗法で求めた SOS の傾きを用いて生成した傾きのないときの円筒エッジ画像を示す。図 10 と比較して, ほぼ同じ結果が得られていることが分かる。

最小二乗法を用いて推定した SOS の傾きパラメータを用いて, 現在位置における傾きのない全方向画像のエッジヒストグラムを生成し, 第 4 章で述べた手法で SOS の位置と水平回転角度を推



図 8: 傾いた SOS で得られた円筒エッジ画像

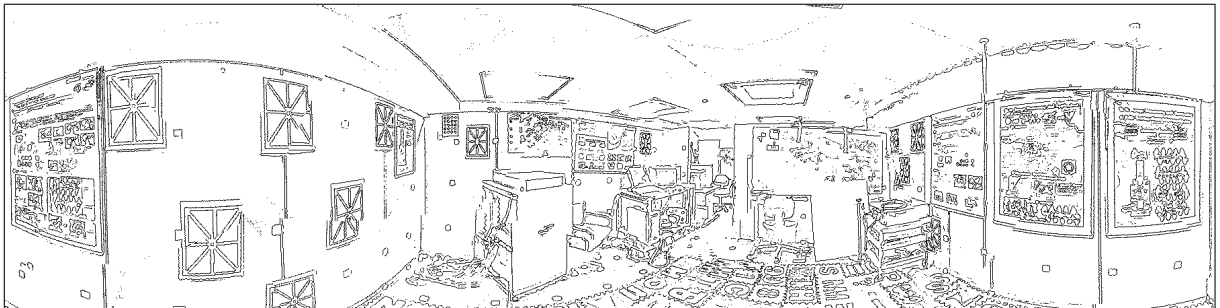


図 10: 高解像度投票空間でえられた SOS 傾きを用いて生成した円筒エッジ画像

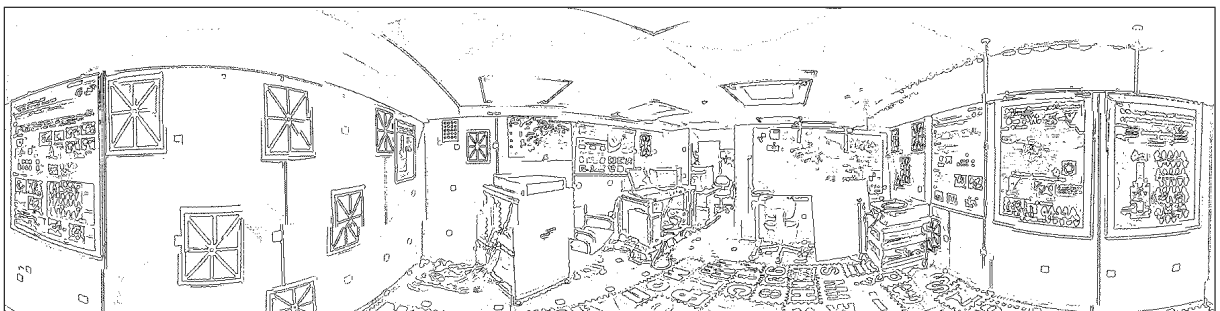


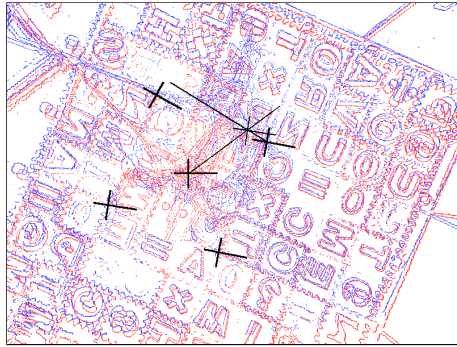
図 11: 最小二乗法でえられた SOS 傾きを用いて生成した円筒エッジ画像

定する．最も近い 2 つの参照点に対する水平回転角度を基準座標系に対する回転角度に変換し，変換後の 2 つの回転角度の平均値を SOS の姿勢とする．図 12 に位置・姿勢の推定結果の例を示す．太い十字は参照点の位置を示す．二つの参照点から引いた直線は SOS の現在位置と参照点間の相対的な移動方向を示す．その交点は SOS の現在位置を示す．交点にある十字の長軸は SOS の向きを示す．画像中のエッジパターンは中心にある参照点の床のエッジと現在位置の床のエッジを重ね合わせたものである．ただし，現在位置の床のエッジは本手法で推定された SOS の傾きと位置・姿勢のパラメータに基づいて中心参照点の座標系に変換したものである．それらの床エッジの重なり具合により，ほぼ正確に位置・姿勢推定が行えて

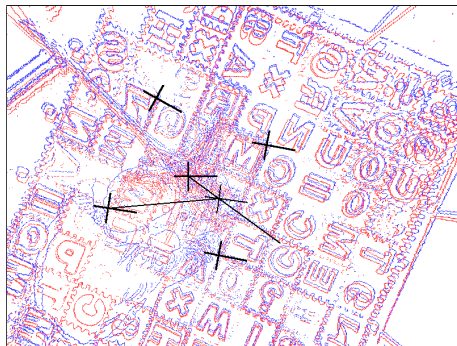
いることがわかる．図 12(c) は 45 フレーム中の位置・姿勢推定精度の最も精度の悪いフレームの結果を示している．

6 結びと今後の課題

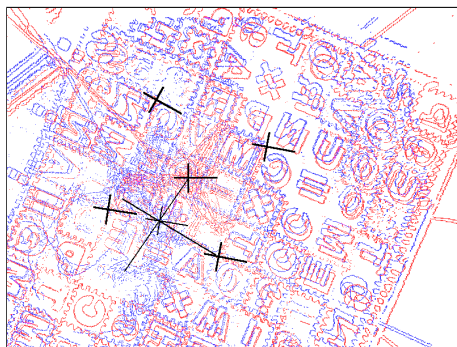
本稿では，全方向画像におけるエッジ方向の統計量を用いて SOS の傾きを推定する新しい手法を提案した．本手法は全方向画像から得られたエッジとその方向を $Z=1$ の平面に投票し，低解像度の投票空間で SOS の大まかな傾きを推定した．さらに，その大まかな傾きを初期値とし，それに似た垂直エッジ方向から最小二乗法を用いて SOS の傾きを効率的に推定した．本手法と [14] で提案した手法とを併用することで，センサの任意の位置と



a) Frame no. 1



b) Frame no. 18



c) Frame no. 26

図 12: SOS の位置・姿勢の推定結果

姿勢を推定することが可能となる。実環境で SOS で得られた全方向画像を用いた位置・姿勢推定の実験結果によって、本提案手法の有効性およびロバスト性を示した。

今後の課題としては、SOS の姿勢と位置の推定精度の検証や、より広い空間における本提案手法の実証などが挙げられる。

参考文献

- [1] G. N. DeSouza and A. C. Kak, "Vision for Mobile Robot Navigation: A Survey", *IEEE Trans. on PAMI*, Vol. 24, No. 2, pp. 237-267, 2002.
- [2] N. Winters, J. Gaspar, G. Lacey and J. Santos-

Victor, "Omni-directional Vision for Robot Navigation", *Proc. of IEEE Workshop on Omni-directional Vision*, pp. 21-28, 2000.

- [3] 西村, 野崎, 岡, "Non-monotonic 連続 DP によるスプッティングに基づく移動ロボットの時系列を用いた大局的な位置推定", *信学論 D-II*, Vol. J81-D-II, No. 8, pp. 1876-1884, 1998.
- [4] N. Aihara, H. Iwasa, N. Yokoya and H. Takemura, "Memory-Based Self-Localization Using Omni-directional Images", *Proc. of ICPR98*, pp. 1799-1803, 1998.
- [5] 岩佐, 粟飯原, 横矢, 竹村, "全方位画像を用いた記憶に基づく位置推定", *信学論 D-II*, Vol. J84-D-II, No. 2, pp. 310-320, 2001.
- [6] Y. Yagi, S. Kawato and S. Tsuji, "Real-Time Omni-directional Image Sensor (Copis) For Vision-Guided Navigation", *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol. 10, pp. 11-22, 1994.
- [7] 山澤, 八木, 谷内田, "移動ロボットのナビゲーションのための全方位視覚センサ HyperOmni Vision の提案", *信学論 D-II*, Vol. J79-D-II, No. 5, pp. 698-707, 1996
- [8] Y. Yagi, Y. Nishizawa and M. Yachida, "Map-Based Navigation for a Mobile Robot with Ominidirectional Image Sensor COPIS", *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol. 11, No. 5, pp. 634-648, 1995.
- [9] J. Gaspar, N. Winters and J. Santos-Victor, "Vision-Based Navigation and Environmental Representations with an Omnidirectional Camera", *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol. 16, No. 6, pp. 890-898, 2000.
- [10] 畑, 青木, 栄藤, "全方位画像を用いた移動ロボットの運動パラメータ推定", *信学論 D-II*, Vol. J84-D-II, No. 3, pp. 448-458, 2001.
- [11] 山本, 棚橋, 桑島, 丹羽, "実環境センシングのための全方向ステレオシステム (SOS)", *電気学会論文誌 C*, Vol. 121-C, No. 5, pp. 876-881, 2001.
- [12] H. Tanahashi, D. Shimada, K. Yamamoto and Y. Niwa, "Acquisition of Three-Dimensional Information in a Real Environment by Using the Stereo Omni-directional System(SOS)", *Proc. 3rd 3DIM*, pp.365 - 371, 2001.
- [13] 棚橋, 佐藤, 王, 丹羽, 山本, "全方向ステレオシステム (SOS) のキャリブレーション手法", *映像情報メディア学会誌*, Vol. 58, No. 4, pp.603-610, 2002.
- [14] 王, 棚橋, 佐藤, 平湯, 丹羽, 山本, "全方位画像のエッジヒストグラムを用いたセンサの位置姿勢推定", *信学技報*, PRMU-02-10, pp. 41-46, 2002.