

全方位カメラを用いた環境モデリングのための 特徴抽出最適化およびカメラ外部パラメータ推定

川西亮輔 山下淳 金子透
静岡大学工学部機械工学科

本論文では全方位カメラを用いた環境モデリングの手法を提案する。2 画像間で対応する特徴点を動画像中で追跡する。カメラの移動前後の画像間における特徴点の関係からカメラの位置・姿勢情報などの外部パラメータの推定をする Structure from Motion (SFM) による計測を行う。SFM による計測では、外部パラメータの推定精度が最終的な計測精度に大きく影響する。また、精度の良い推定結果が期待できる特徴点を抽出する必要がある。そこで本研究では、特徴抽出の最適化およびカメラ外部パラメータの効果的な推定手法を提案し、精度の良い環境モデルの生成を目的とする。実験結果より提案手法の有効性が確認された。

1. 序論

移動ロボットが経路生成や自己位置同定を行うためには地図情報が必要である。しかし、ロボットが未知環境で自律的に行動する場合には、ロボット自身が周囲環境を計測し、地図を作成する必要がある。

地図生成には、カメラによって視野内の物体の計測を行うアプローチがある。しかし一般的な視野のカメラは撮影回数が多く必要なため、周囲環境を 1 枚の画像で撮影できる全方位カメラが有効である。

全方位カメラを用いた計測に、複数のカメラを用いてカメラ間でステレオ計測をする手法がある。しかしステレオ計測の精度はカメラ間の距離(基線長)が大きく影響するため、基線長が短いと対象が遠い場合に十分な精度が得られない。この問題に対して、1 台のカメラの移動前後の取得画像を用いて計測を行うモーションステレオと呼ばれる手法が提案されている。この手法ではカメラの移動距離が基線長となるため、基線長が調節できる。

周囲環境の計測にはカメラの移動前後の相対的な位置・姿勢情報等の外部パラメータを推定する必要がある。外部パラメータをロボットのデッドレコニングから推定することが考えられるが、デッドレコニングは誤差が蓄積することが知られており良い精度は望めない。そこで、画像情報のみから対象の計測と外部パラメータの推定を同時に行う Structure from Motion (SFM) と呼ばれる手法がある。この手法ではカメラのみのセンサ情報でロボットの周囲環境の計測を行うことができる。

そこで我々は、1 台の全方位カメラを用いた SFM による環境モデリングの手法を提案している[1]。この手法は、ロボットの移動前後の 2 画像間で対応す

る特徴点の画像座標の関係から外部パラメータを推定する。推定した外部パラメータを用いて周囲の計測を行い、環境モデルを生成する。

SFM による計測では外部パラメータの推定精度が最終的な計測精度に大きく影響する。そのため外部パラメータを精度良く推定する必要がある。また、外部パラメータの推定精度が期待できる特徴点を抽出しなければならない。

したがって本研究では、計測に最適な特徴抽出と外部パラメータ推定の手法を提案し、精度の良い環境モデルを生成することを目的とする。

2. 処理の概要

実験装置は移動ロボットに、ビデオカメラに双曲面ミラーを取り付けた全方位カメラを搭載したものを使用する(図 1)。移動ロボットを環境中で走行させ、走行中に撮影した動画像を用いて計測を行う。

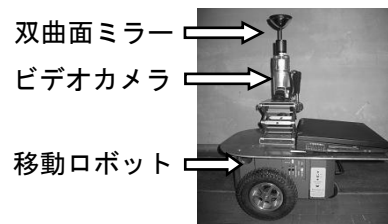


図 1 全方位カメラ搭載の移動ロボット

本研究の処理手順を図 2 に示す。まず動画像を取得する。最初の画像中で輝度値に特徴があり対応の取りやすい点を特徴点として抽出し、以後のフレームで追跡を行う。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外部パラメータを推定し、推定された外部パラメータを用いて対応点の 3 次元座標を算出する。以上の処理を観測点ごとに繰り返す。その後、非線形推定に

よって外部パラメータをより精度良く推定する．こうして最終的に得られた外部パラメータを用いて対応点の3次元座標を再度算出する．最後に複数回の計測結果を合成する．

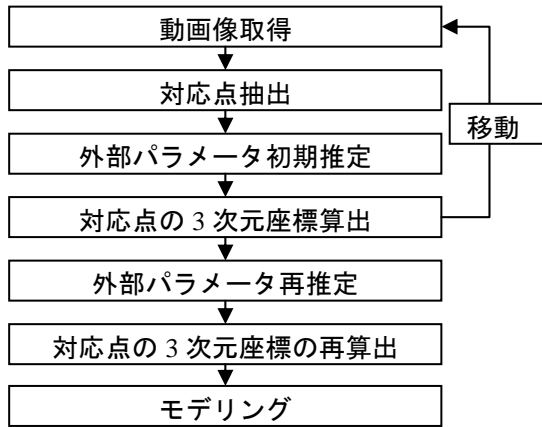


図2 処理手順

3. 環境センシング手法

3.1 対応点抽出

取得した画像から画像間で対応している点を取得するため，画像中の角や点など輝度値に特徴がある点を特徴点として抽出し（図3中の点），それを動画像中で追跡する．本手法では，Lucas Kanade Tracker[2]と画像をピラミッド構造化して探索する手法を組み合わせた特徴点追跡手法[3]を用いる．

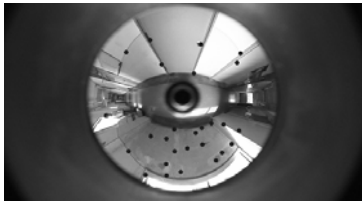


図3 全方位画像からの特徴抽出

特徴を定量的に評価したものを特徴量と呼ぶ．特徴量が多いほど特徴的な点である．特徴量が多いほど画像間の追跡が容易で画像間の対応がとりやすい．逆に特徴量が小さい点ほど対応が取りにくく，対応を誤る可能性がある．そこで特徴量が多い順に特徴点を抽出する．

3.2 光線ベクトルの算出

カメラから特徴点の3次元空間上の点に向かう光線のベクトルを，光線ベクトル $\mathbf{r}=[x,y,z]^T$ とする．本研究で用いる全方位カメラはカメラ前方に双曲面ミラーを配置したものであり，この光線ベクトル \mathbf{r} は，ミラーの双曲面の焦点から特徴点の光線が双曲面上で反射する点へのベクトルで表せる（図4）．特徴点の画像座標 $[u,v]^T$ から(1)(2)式により \mathbf{r} を求める．ここで， a, b, c は双曲面のパラメータであり， f は焦点距離である．

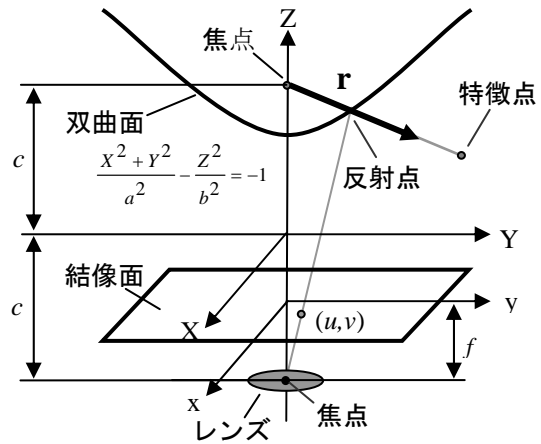


図4 反射点の算出

$$\mathbf{r} = \begin{bmatrix} su \\ sv \\ sf - 2c \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$s = \frac{a^2 \left(f \sqrt{a^2 + b^2} + b \sqrt{u^2 + v^2 + f^2} \right)}{a^2 f^2 - b^2 (u^2 + v^2)} \quad (2)$$

そして，後の演算で特徴点ごとの偏差を生じさせないように $\|\mathbf{r}\|$ の大きさを正規化する．ここでは \mathbf{r} を単位ベクトルに変換し， $\|\mathbf{r}\|$ の大きさを揃える．

3.3 基本行列Eの算出

計測に用いる2つの画像における対応点の光線ベクトル $\mathbf{r}_i=[x_i, y_i, z_i]^T$ ， $\mathbf{r}'_i=[x'_i, y'_i, z'_i]^T$ を用いて幾何関係によりカメラ間の位置・姿勢の情報からなる行列を求める．この行列は基本行列 \mathbf{E} と呼ばれ，(3)式で表される．(3)式を変形すると(4)式が得られる．

$$\mathbf{r}'_i{}^T \mathbf{E} \mathbf{r}_i = 0 \quad (3)$$

$$\mathbf{u}_i{}^T \mathbf{e} = 0 \quad (4)$$

ただし，

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_i &= [x_i x'_i, y_i x'_i, z_i x'_i, x_i y'_i, y_i y'_i, z_i y'_i, x_i z'_i, y_i z'_i, z_i z'_i]^T \\ \mathbf{e} &= [e_{11}, e_{12}, e_{13}, e_{21}, e_{22}, e_{23}, e_{31}, e_{32}, e_{33}]^T \\ & \quad (e_{ab} \text{は} \mathbf{E} \text{の} a \text{行} b \text{列成分}) \end{aligned}$$

基本行列 \mathbf{E} は8点以上の対応する光線ベクトル対に対する連立方程式，すなわち(5)式を解いて求める．ここで， n は特徴点の数とする．

$$\min_{\mathbf{e}} \|\mathbf{Ue}\|^2 \quad (5)$$

ただし， $\mathbf{U}=[\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \dots, \mathbf{u}_n]^T$ である．

\mathbf{e} は $\mathbf{U}^T \mathbf{U}$ の最小固有値に対応する固有ベクトルとして与えられ，基本行列 \mathbf{E} が求まる．

3.4 外れ値除去

追跡によって得られた対応点は全てが正しく対応しているとは限らない．誤った追跡をされた点が計測に含まれると外部パラメータの推定に悪影響を及ぼす．そこで，外部パラメータに悪影響を及ぼす点

を外れ値として除去する．これには RANSAC (RANdom SAmple Consensus) [4]を用いる．

具体的には，まず基本行列 \mathbf{E} が決定する最小の対応点数である 8 個の特徴点をランダムで抽出し \mathbf{E}_{rand} を求める．そして光線ベクトル $\mathbf{r}_i, \mathbf{r}'_i$ に対して(6)式を満たす特徴点の数を k とする．

$$|\mathbf{r}_i^T \mathbf{E}_{\text{rand}} \mathbf{r}_i| < q \quad (6)$$

ただし q は閾値である．この $\mathbf{E}_{\text{rand}}, k$ を求める処理をあらかじめ設定した回数繰り返す．そして k が最大となったときの(6)式を満たさない特徴点を外れ値とする．その後，外れ値を除いた特徴点を用いて(5)式より基本行列 \mathbf{E} を算出する．

3.5 抽出する特徴点数の最適化

一般に 8 組の特徴点があれば外部パラメータの推定が行えるが，実際は画像の量子化誤差などの影響のため抽出する特徴点数（抽出数）が少ないと正確な外部パラメータの推定は困難である．また環境の詳細なモデル化のためには抽出数を多くすることが望ましい．しかし前述した通り，抽出数を多くすると特徴量が小さい点を抽出し，外部パラメータ推定に悪影響を及ぼす可能性がある．よって抽出数は，外部パラメータの推定精度が十分に期待できる最大の抽出数とする．

ここで，外部パラメータの推定精度を評価する指標として RANSAC によって外れ値とされた特徴点の数（外れ値数）を用いる．外れ値数が多いほど，個々の特徴点から得られる外部パラメータの推定値にばらつきがあり，推定精度が悪いといえる．したがって，外部パラメータの推定精度が十分に期待できる最大の外れ値数を求め，その外れ値数となるとき抽出数が上記の条件を満たす抽出数である．

実際に計測を行った際の，抽出数とその抽出数ときの外れ値数の関係のグラフを図 5 に示す．抽出数がある値になるまで外れ値数は緩やかな増加傾向にあり，抽出数がある値を越えると外れ値数が急な増加傾向を示す．外れ値数が急な増加傾向を示すまでは抽出数に比べ外れ値数が少ないため外部パラメータの推定値のばらつきは少ない．したがって外れ値数が急な増加傾向を示す直前の外れ値数が条件を満たす外れ値数である．ここで以下の式を定義する．

$$g_o(k) = \frac{w \sum_{i=k}^{k+w} i \cdot O_i - \sum_{i=k}^{k+w} i \sum_{i=k}^{k+w} O_i}{w \sum_{i=k}^{k+w} i^2 - \left(\sum_{i=k}^{k+w} i \right)^2} \quad (7)$$

$$g_o(k) < G \quad (8)$$

g_o は外れ値数の増加傾向の度合いを表す値で，抽出数とその抽出数ときの外れ値数のグラフの傾きを最小二乗法で求めたものである．ここで O_i は抽出数 i のときの外れ値数， w は傾きをとる幅， G は閾値である． w を適切に設定することで，外れ値数の細かな変化に影響されることなくグラフの増加傾向を求めることができる．各抽出数 k について $g_o(k)$ を計算し，(8)式を満たす最大の k を，外部パラメータ推定に最適な抽出数とする．

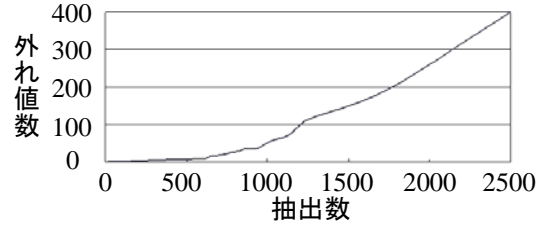


図 5 抽出した特徴点数と外れ値数

3.6 外部パラメータの初期推定

基本行列 \mathbf{E} は回転行列 \mathbf{R} と並進移動ベクトル $\mathbf{t}=[t_x, t_y, t_z]^T$ により(9)式で表される．

$$\mathbf{E} = \mathbf{R} \mathbf{T} \quad (9)$$

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 0 & -t_z & t_y \\ t_z & 0 & -t_x \\ -t_y & t_x & 0 \end{bmatrix}$$

\mathbf{E} に特異値分解を行い， \mathbf{R} と \mathbf{T} を求める．

3.7 誤追跡除去

本手法では，画像間で対応する特徴点に向かう光線ベクトルの組がそれぞれ一平面上にあるように外部パラメータが推定される．しかしカメラの移動方向と平行な直線上では，どのように対応をとっても移動前後の光線ベクトルの組は同じ平面上にある．したがってカメラの移動方向と平行な直線上で追跡を誤っても外部パラメータの推定に悪影響はなく，RANSACにより外れ値にされない．例として図 6 に示す環境がある．(a)の抽出された点が，(b)に示すどの位置に追跡されても外部パラメータ推定に悪影響はない．

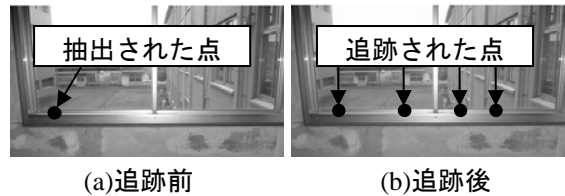


図 6 外部パラメータ推定に悪影響のない誤追跡

外部パラメータ推定には影響がないが，誤追跡点は環境モデルの精度を悪化させる．したがって除去するのが望ましい．しかし，直線上の点すべてを除

去すると対応点が少なくなり、精度の良い計測ができない。また直線上にある特徴点は、周囲の輝度値で画像間の対応をとるのは難しい。したがって、カメラの移動方向や画像の輝度値によらない誤差除去手法が必要となる。

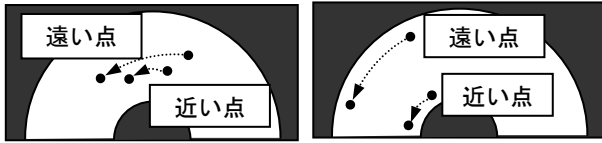
そこで、特徴点が追跡されるとき画像上での動きを考える。特徴点が画像間で誤った追跡をしているとき、その特徴点は正しく追跡されている特徴点と異なった動きを見せる。ここで、特徴点*i*の第*n*フレームでの画像座標を($x_{i,n}, y_{i,n}$)とし、特徴点の速度($v_{x,i,n}, v_{y,i,n}$)と加速度 $a_{i,n}$ を以下のように定義する。

$$v_{x,i,n} = x_{i,n} - x_{i,n-1} \quad (10)$$

$$v_{y,i,n} = y_{i,n} - y_{i,n-1} \quad (11)$$

$$a_{i,n} = \sqrt{(v_{x,i,n} - v_{x,i,n-1})^2 + (v_{y,i,n} - v_{y,i,n-1})^2} \quad (12)$$

このとき特徴点がカメラに近いほど、あるいは全方向画像において中心から離れているほど、画像上での速度は大きくなる (図7)。



(a)カメラからの距離 (b)画像の中心からの距離
図7 特徴点の速度の違い

速度が大きいと画像上で同じような動きをしても加速度が大きくなるので、特徴点の空間上の位置による加速度の差をなくすため、加速度をその特徴点の速度で正規化する ((13)式)。

$$a'_{i,n} = \frac{\sqrt{(v_{x,i,n} - v_{x,i,n-1})^2 + (v_{y,i,n} - v_{y,i,n-1})^2}}{\sqrt{\left(\frac{v_{x,i,n} + v_{x,i,n-1}}{2}\right)^2 + \left(\frac{v_{y,i,n} + v_{y,i,n-1}}{2}\right)^2}} \quad (13)$$

追跡を誤っている特徴点の動きは正しく追跡されている点と異なるため、加速度が特徴点全体の平均と異なる値をとる。よって、特徴点の加速度が特徴点全体の平均と著しく異なるものを追跡が誤っている点として除去する。

3.8 特徴点の計測

2 画像間の対応点情報から推定された回転行列と並進移動ベクトルを用いて、移動前と移動後のカメラ位置から特徴点へ向かう光線ベクトルが交わる点を計測結果とする。

3.9 計測結果の限定

計測精度は一般にカメラの移動方向の延長線付近

ほど、あるいはカメラから遠いものほど悪い。このため計測結果は精度の良いものと悪いものが存在することになる。ここで計測精度の良い対応点を使用するため、計測結果 $\mathbf{p}_{m,i}$ を2画像上の特徴点座標 $[u_{m,i}, v_{m,i}]^T$, $[u'_{m,i}, v'_{m,i}]^T$ で偏微分したもから(14)式で誤差を評価するベクトル \mathbf{g} を求める。そしてベクトル \mathbf{g} のノルムが(15)式を満たす計測結果を以後の処理に用いる。ただし、 h は閾値である。

$$\mathbf{g} = \left| \frac{\partial \mathbf{p}_{m,i}}{\partial u_{m,i}} \right| + \left| \frac{\partial \mathbf{p}_{m,i}}{\partial v_{m,i}} \right| + \left| \frac{\partial \mathbf{p}_{m,i}}{\partial u'_{m,i}} \right| + \left| \frac{\partial \mathbf{p}_{m,i}}{\partial v'_{m,i}} \right| \quad (14)$$

$$\|\mathbf{g}\| < h \quad (15)$$

3.10 バンドル調整

3.3 節で推定した外部パラメータは特徴点に含まれる誤差を考慮していないため、必ずしも良い推定結果であるとは限らない。そこで各特徴点の計測誤差を考慮して外部パラメータを推定する。3.3 節で推定した外部パラメータを初期値とし、特徴点の再投影誤差の二乗和を最小化するバンドル調整法[5]と呼ばれる手法を用いる。再投影誤差和を計算する際に、特徴点ごとに計測誤差を評価し適切に重みをつけることで、より精度の良い推定をする。

ここで再投影誤差とは、特徴点の3次元座標値を画像上に再投影したときの座標と、元の画像座標との差である。これが小さいほど外部パラメータの推定精度が良い。特徴点の再投影されたときの座標は(16)~(18)式より求められる。

$$\begin{pmatrix} u \\ v \\ -c+f \end{pmatrix} = d' \begin{pmatrix} dx \\ dy \\ dz+2c \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -c \end{pmatrix} \quad (16)$$

$$d = \frac{cz + b\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}{\left(\frac{b}{a}\right)^2 (x^2 + y^2) - z^2} \quad (17)$$

$$d' = \frac{f}{dz + 2c} \quad (18)$$

画像の再投影誤差和を以下のように定義する。

$$E_f = \sum_p r_{fp} |\mathbf{x}_{fp} - \mathbf{x}'_{fp}|^2 \quad (19)$$

ここで、 $E_{f,i}$ は第*f*フレームでの再投影誤差和、 r_{fp} は第*f*フレームの*p*番目の特徴点に対する重み係数、 \mathbf{x}_{fp} は特徴点の元の画像座標、 \mathbf{x}'_{fp} は再投影したときの画像座標である。重み係数は3.9 節の(14)式で表されるベクトル \mathbf{g} のノルムを用いて特徴点ごとに誤差を評価し、適切に重みを決定する。

3.11 計測結果の合成

推定された外部パラメータを用いて計測結果を合成する。本研究では個々の計測結果はカメラ間の距離を1としており、実際の観測点間の距離が異なる計測結果をそのまま合成すると図8の点線で示す今回の計測結果が実線で示す前回の計測結果と一致しない。そこで、2つの計測で共通して用いた画像の観測点 c を中心として、同じ特徴点における前回の計測結果 $\mathbf{P}_{m,i}=[x_{m,i}, y_{m,i}, z_{m,i}]^T$ と今回の計測結果 $\mathbf{P}_{m+1,i}=[x_{m+1,i}, y_{m+1,i}, z_{m+1,i}]^T$ が一致するようにスケールを合わせる。

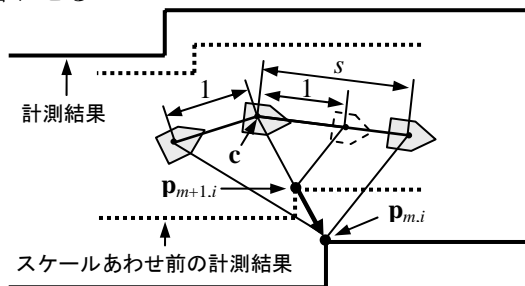


図8 スケール合わせ

ここで、 c から遠い計測結果の影響を大きく受けないようにするため、計測結果の各成分に対数をとったものの二乗距離が最小となるようにスケールを合わせる。すなわちスケール s は(20)式から求まる。

$$\min_s \sum_{i=1}^n \left\| \log(\mathbf{p}_{m,i} - \mathbf{c}) - \log(s\mathbf{p}_{m+1,i} - \mathbf{c}) \right\|^2 \quad (20)$$

4. 実験

4.1 実験環境

計測は屋内環境（L字廊下）で行った。ロボットの移動速度は約10cm/sで、移動中に全方位カメラで撮影した5fpsの動画像を入力とした。入力画像のサイズは1920×1080pixelsである。

4.2 実験結果

まず、3.4節の外れ値除去などの、計測精度が悪い点を除去する処理を行わないで計測をした。計測はL字廊下で行い、計測結果は上からの視点で図9に示す。矢印はロボットの移動方向である。誤計測点が多く、廊下の形状が正確に表されていない。

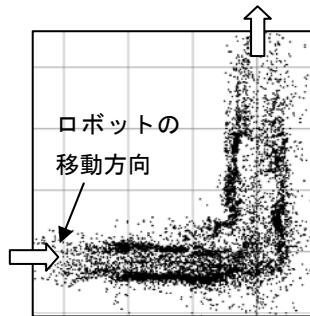


図9 除去処理を行わないときの計測結果

これに対し、我々の従来研究で提案された3.4節の外れ値除去と3.9節の精度の悪い点の除去処理を行ったときの計測結果を図10に示す。外部パラメータ推定に悪影響のある点と計測精度が悪い点が除去され、計測精度が向上した。

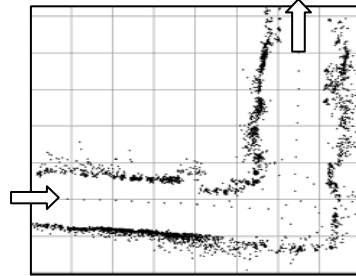
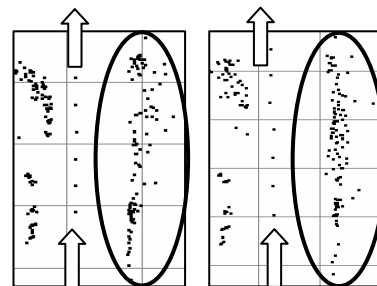


図10 外れ値と精度の悪い点の除去結果

3.5節の抽出数の最適化を行った結果を図11に示す。廊下の計測結果の一部を上から見た図である。(a)と比べ(b)は廊下の壁の形状をより正確に計測できている(図11中の楕円内)。計測結果のばらつきを評価するため、壁の計測点に最小二乗法による直線近似を行い計測点の標準偏差を算出した(表1)。処理後はばらつきが小さくなったことが分かる。

表1 抽出数の最適化後の壁の計測点のばらつき

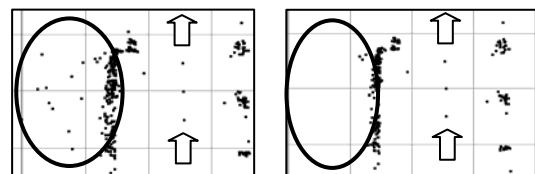
	処理前	処理後
標準偏差	0.533	0.223



(a)処理前 (b)処理後

図11 抽出数の最適化の結果

3.7節の誤追跡除去を行った結果を図12に示す。誤追跡点((a)の楕円内の点)を除去したことで、廊下の壁の外側に計測されていた点が除去された((b)の楕円内)。



(a)処理前 (b)処理後

図12 誤追跡除去の結果

再投影誤差和の計算結果を表2に示す。処理前に比べて処理後は再投影誤差が小さくなっており、カ

メラ外部パラメータがより精度良く推定されたことが分かる. 計測結果として図 13 を示す. (a)と比べ(b)は計測点のばらつき(標準偏差)が小さくなっており(表 3), カメラ外部パラメータ推定がより適切になったことで計測結果が改善された.

表 2 再投影誤差和

		処理前	処理後
再投影誤差和	観測点間 1	9589	797
	観測点間 2	10513	509
	観測点間 3	5515	743

表 3 バンドル調整後の壁の計測点のばらつき

	処理前	処理後
標準偏差	0.157	0.084

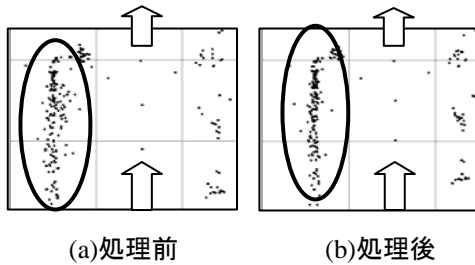


図 13 バンドル調整の結果

全処理の結果を図 14 に示す. 廊下形状が精度良く計測できている. また, 生成した環境モデルで従来研究[1]との比較を行う. 従来手法における環境モデル(図 16(a))と比べ, 本手法による環境モデル(図 16(b))は実環境(図 15)を正確に表している.

5. 結論

全方位カメラを用いた環境モデリングの精度向上のための, 計測に最適な特徴点の抽出手法およびカメラ外部パラメータの効果的な推定手法の提案をした. それにより計測結果が向上し, 環境モデルの精度が向上した. よって本手法の有効性が示された.

今後の課題としては, 一定の間隔で観測点を設定するのではなく状況に応じて変化させることにより, さらに密な計測を行うことなどが考えられる.

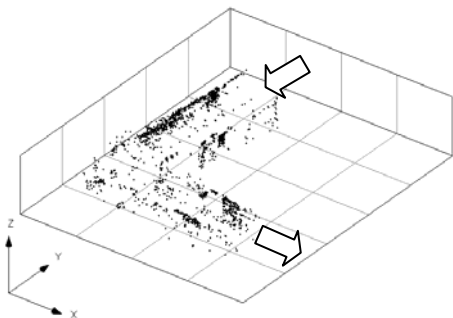
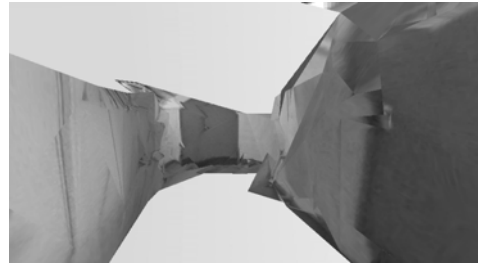


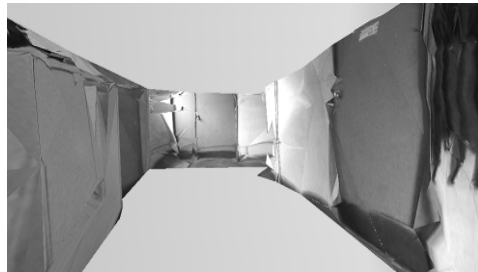
図 14 全処理の計測結果(鳥瞰図)



図 15 モデリング環境



(a)従来手法



(b)本手法

図 16 モデリング結果

参考文献

- [1] 山下淳, 原田知明, 川西亮輔, 金子透: “全方位カメラ搭載移動ロボットによる画像列を用いた 3次元環境モデリング”, 電気学会研究会資料(情報処理/産業システム情報化合同研究会 IP-06-11~19/IIS-06-27~35), pp.31-36, 2006.
- [2] J. Shi and C. Tomasi: “Good Features to Track”, Proceedings of the 1994 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp.593-600, 1994.
- [3] J. Y. Bouquet: “Pyramidal Implementation of the Lucas Kanade Tracker Description of the Algorithm”, Intel Corporation, 2000.
- [4] 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, Vol. 24, pp.381-395, 1981.
- [5] B. Triggs, P. McLauchlan, R. Hartley and A. Fitzgibbon: “Bundle Adjustment -A Modern Synthesis”, Vision Algorithms: Theory & Practice, Springer-Verlag LNCS 1883, 2000.