全方位ステレオカメラ搭載移動ロボットによる二眼ステレオと モーションステレオを併用した周囲環境の3次元計測 後藤 真-*¹,川西 亮輔*¹,山下 淳*¹,金子 透*¹

3D Environment Measurement Using Binocular Stereo and Motion Stereo by Mobile Robot with Omnidirectional Stereo Camera

Shinichi GOTO^{*1}, Ryosuke KAWANISHI^{*1}, Atsushi YAMASHITA^{*1} and Toru KANEKO^{*1}

*¹ Department of Mechanical Engineering, Shizuoka University 3-5-1, Johoku, Naka-ku, Hamamatu-shi, Shizuoka, 432-8561, Japan

Map information is important for path planning and self-localization when mobile robots accomplish autonomous tasks. In unknown environments, they should generate their environment maps by themselves. An omnidirectional camera is effective for environment measurement, because it has a wide field of view. There are binocular stereo and motion stereo for measurement by omnidirectional camera. However, each method has advantages and disadvantages. Then, in this paper, we aim to improve measurement accuracy by using two omnidirectional cameras installed on a mobile robot using binocular stereo together with motion stereo. In addition, stereo matching accuracy is improved by considering omnidirectional image distortion. Experimental results show the effectiveness of our proposed method.

Key Words: Omnidirectional Camera, 3D Measurement, Mobile Robot

1. 緒 言

近年,ロボット技術の発展に伴い,様々な環境での 自律移動ロボットの導入が期待されている.自律移動 ロボットの活躍の場としては,災害現場,原子炉内部, 宇宙,惑星などの人間には危険であったり,活動が困 難な場所であったりすることが挙げられる.そのよう な場所は未知環境であることが多い.したがって,ロ ボットが周囲の地図情報を得るためにはロボット自身 が周囲環境の3次元計測を行う必要がある.

計測に用いるカメラには様々なものがあるが,一般 的なカメラは視野が狭く,広範囲を計測するには撮影 回数が多くなり⁽¹⁾,画像間の対応付けの処理が煩雑に なることが考えられる.これに対して,広範囲な視野 を有する撮像センサが考案されており,様々な用途で の活躍が期待されている.

広範囲な視野を有するカメラには,双曲面ミラーな どを利用した全方位カメラ⁽²⁾⁽³⁾がある.全方位カメラ は1度に周囲360°の視野を撮像できるため,移動ロ ボットに搭載するという用途に適していると考えられ る.また,全方位カメラは,広範囲な視野を有すると





(a) Camera (b) Image Fig. 1 Ominidirectinal camera

いう特徴により,周囲環境の計測や認識に有効である ことが示されている⁽⁴⁾.そこで,本研究では一度に周 囲 360 °を計測可能な双曲面ミラーを利用した全方位 カメラ(図1(a))を使用する.全方位カメラによって 得られた全方位画像を図1(b)に示す.

全方位カメラを使用した計測には,複数の全方位カ メラによるステレオ計測を行う手法⁽⁵⁾⁽⁶⁾と1台の全方 位カメラを移動させ,移動前後の画像によりモーショ ンステレオ計測を行う手法⁽⁷⁾がある.

一般に二眼ステレオ計測では,計測対象までの距離 に対してカメラ間の距離(基線長)が短いと誤差が大 きくなる.しかし,ロボット上に設置された複数台の カメラにより二眼ステレオ計測を行うことを考えると,

^{*&}lt;sup>1</sup> 静岡大学工学部(〒432-8561静岡県浜松市中区城北3-5-1) {f0030021,f5945016,tayamas,tmtkane}@ipc.shizuoka.ac.jp



ロボットの大きさにより基線長が制限されるという問題がある.したがって,二眼ステレオ計測では精度の良い計測はロボット付近に限られる(図2).

一方,ロボット上に1台のカメラを設置してモー ションステレオ計測を行う場合,カメラの移動距離が 基線長となるため,移動距離を調節することにより計 測対象が遠い距離にある場合にも対応できる.

モーションステレオ計測ではカメラ間の位置・姿勢 を推定する必要がある.そこで,位置・姿勢をデッド レコニングから推定することが考えられる.しかし, 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,悪路等のタイヤがスリップする環境下では精度の 良い推定は望めない⁽⁸⁾.これに対する手法として,動 画像情報から位置・姿勢を推定するものがある.この 手法は Structure from Motion (SFM)と呼ばれ,1台 のカメラの画像列のみを入力情報とし,カメラ以外の センサ情報を必要とせずに位置・姿勢の推定と周囲環 境の計測が可能である⁽⁹⁾.

しかし,モーションステレオ計測では,基線方向(ロ ボットの移動方向)の計測点を精度良く計測すること は困難である(図3).また,画像間の対応点情報のみ を用いて計測を行う場合,計測結果の絶対的なスケー ルが未知という問題もある.

我々はすでに全方位二眼ステレオカメラを用いて, 二眼ステレオ計測とモーションステレオ計測を併用し た計測システムを提案している⁽¹⁰⁾.しかし我々の従来 研究では,テンプレートマッチングを行う際に全方位 画像の歪みを考慮しないことが問題である.

そこで本研究では,移動ロボットに搭載された2台 の全方位カメラにより全方位画像の歪みを考慮した二 眼ステレオ計測を行うとともに,モーションステレオ 計測を併用することにより,計測精度の向上を目指す.

2. 処理の概要

本研究では図4に示す手順で計測を行う.まず環境 中で全方位カメラ搭載移動ロボットを走行させ,走行 中に全方位カメラで撮影を行い,動画像を得る.取得 した動画像によりモーションステレオ計測,二眼ステ



レオ計測をそれぞれ行う.その後,モーションステレ オ計測結果のスケールを二眼ステレオ計測結果に合わ せる.最後に,対応点の計測精度の評価値を併用条件 として結果を統合する.なお,2台の全方位カメラは ロボットの進行方向に対して垂直方向に並べて配置す る(図5).







3. 光線ベクトルの算出

本手法では画像座標をミラー側の双曲面の焦点から 被写体に向かう光線ベクトルに変換する.3次元空間 中のある1点からカメラのレンズに向かう光線は,双 曲面ミラー上で反射しレンズ中心を通過して画像平面 に向かう.このとき,3次元点とミラー上の反射点を 結ぶ直線は,必ず双曲面の焦点を通る.そこで,本手 法では画像座標を,双曲面の焦点から3次元点に向か う光線ベクトル $\mathbf{r} = [x, y, z]^{T}$ に変換する(図6).

特徴点の画像座標 (*u*,*v*) から式 (1)(2) により 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.

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

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



Fig. 6 Calculation of ray vector

4. 二眼ステレオ計測

4.1 エピポーラ拘束 ステレオ計測では2枚の画 像間で対応する点を求める必要がある.そこで本研究 では,テンプレートマッチングを用いて対応点探索を 行う.テンプレートマッチングを行う際にはエピポー ラ拘束を用いる.エピポーラ拘束を用いることで,対 応点探索範囲を画像全体からエピポーラ線上に絞るこ とができる.エピポーラ線は,注目点から求めたカメ ラ光線をもう一方のカメラ画像に投影することで求め ることができる(図7).



4.2 対応点探索 全方位画像を用いてテンプレートマッチングによる対応点探索をする際には,画像の 併進,回転,拡大率や,全方位画像特有の歪み・回転, その他の射影歪みなどが問題となる⁽¹⁰⁾.前述のよう に,双曲面ミラーを用いた全方位カメラでは,環境か らカメラに向かう光線は,双曲面の焦点で交わるとい う特性がある.そのため,双曲面の焦点を中心として, 全方位画像を透視投影変換することが出来る(図8).



Fig. 8 Perspective image



Fig. 9 Projective distortion



Fig. 10 Detecting of corresponding point

そこで,全方位画像を3次元空間中の仮想的な平面 (仮想平面)に投影した透視投影画像を左右画像でそ れぞれ作成し,テンプレートマッチングを行う.これ によって,全方位画像の歪みや射影歪みなどの影響の 低減を図る.

各種の歪みを低減するためには,仮想平面の算出が 重要となる.仮想平面が物体に対して傾いていた場合, 生成した透視投影画像に射影歪みが表れてしまう場合 がある(図9).そこで,本手法では,物体に対して 最適な仮想平面の中心位置dと,仮想平面の傾きを表 す軸ベクトル s_x , s_y を探索する.

中心位置 d は, エピポーラ線に沿った1自由度探索 によって求める.まず, 左カメラから計測点に向かう 光線ベクトル r_lを元に, エピポーラ線を算出する(図

10). そして, エピポーラ線上の各点を通る右カメラ の光線ベクトル \mathbf{r}_r を算出し, \mathbf{r}_l との交点 d を算出す る.各交点を中心とした仮想平面を作成し,仮想平面 の投影を行う.仮想平面の軸ベクトルの初期値は, \mathbf{r}_{l} と \mathbf{r}_r の2等分線の傾きに対して, \mathbf{s}_v が垂直になるよ うに与える.これによって,透視投影変換されたテン プレート画像(右画像においてテンプレートとなる領 域)と,探索画像(左画像において探索を行う領域) を得る.両画像間でテンプレートマッチングを行い, 相違度を算出する.相違度が最小となるときの d を 算出する.なお,テンプレートマッチングの評価値に はSAD (Sum of Absolute Difference)を用いる.次に, 得られた d の位置において, 仮想平面の傾きを変化さ せる.即ち,前述した初期値を基準として,軸ベクト μs_x , s_y を回転させることで, 軸ベクトルの2自由度 探索を行う.軸ベクトルを回転させながら,先程と同 様にしてテンプレートマッチングを行う.これによっ て,相違度が最小となる対応点を探索する.

なお,対応点探索を行う際には,画像の解像度を段 階的に変化させることで,処理を高速化している.

4.3 対応点の 3 次元計測 2 枚の画像の対応点 に対してそれぞれ光線ベクトルを求める.この 2 本の 光線ベクトルの交点を計測点の 3 次元座標として算出 する.

5. モーションステレオ計測

5.1 特徴抽出・追跡 特徴点の抽出・追跡により 対応点を取得する手法はさまざまなものが考案されて いるが,本研究では Lucas Kanade Tracker⁽¹¹⁾と画像を ピラミッド構造化して対応した特徴点を探索する手法 を組み合わせた特徴点追跡手法⁽¹²⁾を用いる.

全方位カメラを水平方向に設置する場合,一方のカ メラの視野内に常にもう一方のカメラが入ってしまう. 特徴点追跡によりモーションステレオ計測を行うとき, 視野内に入るもう一方のカメラの特徴点を追跡するこ とで位置・姿勢推定に誤差が生じる場合がある.した がって,各カメラのモーションステレオ計測の特徴点 追跡範囲から,もう一方のカメラが写る範囲を除外 する.

5.2 位置・姿勢の推定 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,移動前後の 画像についてそれぞれ

$$\mathbf{r}_i = [x_i, y_i, z_i]^{\mathrm{T}}, \mathbf{r}'_i = [x'_i, y'_i, z'_i]^{\mathrm{T}}$$
(3)

とし,カメラ間の位置・姿勢の情報からなる基本行列 Eを求める.Eは式(4)で表され,式(4)を変形する と式(5)が得られる.

$$\mathbf{r}'_{i}^{\mathrm{T}}\mathbf{E}\mathbf{r}_{i}=0\tag{4}$$

$$\mathbf{u}_i^{\mathrm{T}} \mathbf{e}_i = 0 \tag{5}$$

ただし,

 $\mathbf{u}_{i} = [x_{i}x'_{i}, y_{i}x'_{i}, z_{i}x'_{i}, x_{i}y'_{i}, y_{i}y'_{i}, z_{i}y'_{i}, x_{i}z'_{i}, y_{i}z'_{i}, z_{i}z'_{i}]^{\mathrm{T}}$ (6)

$$\mathbf{e} = [e_{11}, e_{12}, e_{13}, e_{21}, e_{22}, e_{23}, e_{31}, e_{32}, e_{33}]^{\mathrm{I}}$$
(7)

(*e_{ab}*は E の *a* 行 *b* 列成分)

E は 8 点以上の対応する光線ベクトル対から求まる. 具体的には以下の式(8)を最小二乗法で解く.

$$\min \|\mathbf{B}e\|^2 \tag{8}$$

$$\mathbf{B} = [\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \cdots \mathbf{u}_n]^{\mathrm{T}}$$
(9)

ここで *n* は特徴点数である.E は回転行列 R と並進移 動ベクトル $\mathbf{t} = [t_x, t_y, t_z]^T$ により式 (10) で表される.

$$\mathbf{E} = \mathbf{RT} \tag{10}$$

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} 0 & -t_z & t_y \\ t_z & 0 & -t_x \\ -t_y & t_x & 0 \end{pmatrix}$$
(11)

この E に特異値分解を行い, R とt を求める.

5.3 対応点の3次元計測 算出された回転行列 Rと並進移動ベクトルtを用いて,対応点の3次元計 測を行う.移動前後のカメラ位置から3次元空間中の 特徴点へ向かう光線ベクトルが交わる点 p_iを計測結 果として算出する.



Fig. 11 Scale matching

図 11 にスケール合せの概念図を示す.モーションス テレオ計測では画像情報のみを入力として使用するた め,スケール情報が不明である.したがって,計測結 果のスケールを実スケールと一致させる必要がある. そこで,モーションステレオ計測で得られた適当な複数の計測点 pi を選択する.その計測点の画像座標での,二眼ステレオ計測の計測点 pi を求め,二眼ステレオ計測の去カメラ座標を原点として

$$m\mathbf{p}_i = \mathbf{p}'_i \tag{12}$$

となるような *m* を算出する.他のモーションステレオ 計測結果を *m* 倍することで,スケール合わせを行う.

6. 計測結果の統合

画像間の対応点は必ずしも正確ではなく,多少の誤 差を持つ.そこで対応点毎に計測精度を評価すること により,大きな誤差を生じる可能性の高い対応点を除 去し,計測精度の良い対応点のみを利用する.

計測精度は,対応点が画像上で1画素変化したときの計測結果の変化量で評価する⁽⁷⁾.すなわち,計測結 果の3次元座標を対応点の画像座標で微分した値を評 価値とする.そこで計測結果の変化範囲としてベクト ルg,を算出する(式(13)).

$$\mathbf{g}_i = [g_{x,i}, g_{y,i}, g_{z,i}]^{\mathrm{T}}$$
(13)

ただし,

. .

$$g_{x,i} = \left\| \frac{\partial \mathbf{p}_i}{\partial x_{1,i}} \frac{\partial x_{1,i}}{\partial u_{1,i}} + \frac{\partial \mathbf{p}_i}{\partial x_{1,i}} \frac{\partial x_{1,i}}{\partial v_{1,i}} + \frac{\partial \mathbf{p}_i}{\partial x_{2,i}} \frac{\partial x_{2,i}}{\partial u_{2,i}} + \frac{\partial \mathbf{p}_i}{\partial x_{2,i}} \frac{\partial x_{2,i}}{\partial v_{2,i}} \right\|_{(14)}$$

$$g_{x,i} = \left\| \frac{\partial \mathbf{p}_i}{\partial y_{1,i}} \frac{\partial y_{1,i}}{\partial u_{1,i}} + \frac{\partial \mathbf{p}_i}{\partial y_{1,i}} \frac{\partial y_{1,i}}{\partial v_{1,i}} + \frac{\partial \mathbf{p}_i}{\partial y_{2,i}} \frac{\partial y_{2,i}}{\partial u_{2,i}} + \frac{\partial \mathbf{p}_i}{\partial y_{2,i}} \frac{\partial y_{2,i}}{\partial v_{2,i}} \right\|_{(15)}$$

$$g_{x,i} = \left\| \frac{\partial \mathbf{p}_i}{\partial z_{1,i}} \frac{\partial z_{1,i}}{\partial u_{1,i}} + \frac{\partial \mathbf{p}_i}{\partial z_{1,i}} \frac{\partial z_{1,i}}{\partial v_{1,i}} + \frac{\partial \mathbf{p}_i}{\partial z_{2,i}} \frac{\partial z_{2,i}}{\partial u_{2,i}} + \frac{\partial \mathbf{p}_i}{\partial z_{2,i}} \frac{\partial z_{2,i}}{\partial v_{2,i}} \right\|$$
(16)

である.そして,ベクトル g_iのノルムを計測結果の 誤差範囲として,式(17)を満たす対応点のみを利用する.ただしhは閾値である.

$$\|\mathbf{g}_i\| < h \tag{17}$$

これを各計測結果に用い,低精度な対応点を除去し, 計測結果を統合する.

7.実 験

7.1 実験装置 実験装置には全方位カメラを 2 台搭載した移動ロボットを使用した(図12).カメラ 間距離は 360mm であり,取得画像の解像度は 1920 × 1080pixels である.



Fig. 12 Mobile robot Fig. 13 Feature points

7·2 比較実験 透視投影変換による歪みを考慮 したテンプレートマッチング(提案手法)と歪みを考 慮していないテンプレートマッチング(従来手法)の 比較実験を行った.対象物までの距離は約1mである. 探索する点は KLT 法により抽出された特徴点 50 点を 用いた(図13).探索結果を図14に示す.従来手法 では誤対応が11点だったが,提案手法では誤対応は 4点だった.また,各対応点の類似度のヒストグラム を図 15 に示す.類似度は SAD 値とテンプレートのサ イズから逆算した.横軸が類似度の階級,縦軸が各階 級にどれだけの対応点あるか(頻度)を表している. 従来手法に比べ提案手法の方が,類似度の高い範囲に 分布していることが分かる.これらの結果から,従来 手法に比べ提案手法の方がより精度の高い対応点探索 が可能になったといえる.



(a) Proposed method(b) Previous methodFig. 14 Corresponding points





Fig. 16 Environment





(a) Left image (b) Right image Fig. 17 Stereo image pair

7.3 計測実験 実験は屋内環境でロボットを直 進移動させて行った(図16).このときに取得した左 右画像を図17に示す.二眼ステレオ計測,モーション ステレオ計測による計測結果を上から見た図を図18 と図19に,スケール合わせを行った図を図20に示す. さらに式(17)により低精度な対応点を除去し計測結 果の統合を行った図を図21と図22に示す.

モーションステレオ計測結果と比べ二眼ステレオ計 測結果には誤差も多いことがわかる(図18,図19). 誤差の原因としては,対応点探索の際の誤対応,カメ ラキャリブレーションによる誤差等が考えられる.

周囲環境の形状が計測できていることがわかる(図 21,図22).また,モーションステレオで計測した ポスターの幅が581mmであることに対し実際のポス ターの幅は578mmであり,絶対的なスケールを持つ 二眼ステレオ計測結果をモーションステレオ計測結果 と統合することにより,モーションステレオ計測結果 に絶対的なスケール情報が与えられている.

それぞれの計測の処理時間を表1に示す.二眼ステ レオ計測の処理時間は3m×4.5m×2mの範囲を計 測するのに要した時間,モーションステレオ計測の処 理時間は0.5m×2.5m×1.5mの範囲を計測するのに 要した時間である.二眼ステレオは対応点探索,モー ションステレオは特徴点追跡に多くの時間を費やして いる.これらは並列処理が可能であり,並列処理を行 うことにより処理時間の短縮が可能であると考えら れる. さらに計測結果から図 21 に示す平面1,2 の最小 二乗平面を求め,最小二乗平面からの標準偏差を求め た結果を表2に示す.表2より,平面1 は精度良く計 測できているが,平面2 は改善する必要がある.これ には,スケール合せにおける誤差が含まれていると考 えられる.したがって,より多くの対応点を用いたス ケール合わせをすることで改善できると予想される.



Fig. 18 Measurement by binocular stereo



Table 1Processing times

	0
Measurement Method	Processing time [sec]
(Measurement Range)	
Binocular Stereo	80.78
Motion Stereo	62.23

Table 2
 Standard deviation from the least square error plane

	Standard deviation [mm]
Plane1	12.1
Plane2	59.0



Fig. 20 Integrated measurement data (No evaluation value)



Fig. 21 Integrated measurement data (Top view)



Fig. 22 Integrated measurement data (Bird's eye view)

8. 結 言

本研究ではロボットに搭載した全方位二眼ステレオ カメラを用いて,二眼ステレオとモーションステレオ を併用した3次元計測のシステムの検証を行った.二 眼ステレオ,モーションステレオそれぞれで互いの計 測困難な範囲を計測することでその有効性を示した. 今後の課題として,キャリブレーション精度の向上, スケール合わせ精度の向上が挙げられ,これによりシ ステム全体の計測精度や処理速度の向上につながると 考えられる.

参考文献

- H. Ishiguro, M. Yamamoto and S. Tsuji: "Omni-Directional Stereo", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.14, No.2, pp.257-262, 1992.
- (2) C. Geyer and K. Daniilidis: "Omnidirectional Video", *The Visual Computer*, Vol.19, No.6, pp.405-416, 2003.
- (3) R. Bunschoten and B. Krose: "Robust Scene Reconstruction from an Omnidirectional Vision System", *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol.19, No.2, pp.351-357, 2003.
- (4) 岩佐英彦, 粟飯原述宏,横矢直和,竹村治雄: "全方位 画像を用いた記憶の基づく位置推定",電子情報通信学 会論文誌 D-II, Vol.J84-D-II, No.2, pp.310–320, 2001.
- (5) 井戸大介,清水平渉,前田陽一郎: "MOVIS を搭載した自律移動ロボットによる物体位置計測および誤差修 正手法",第23回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 1B15, pp.1–4, 2005.
- (6) 石川智也,山澤一誠,横矢直和: "複数の全方位動画像 からの自由視点画像成",画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2005) 講演論文集, pp.1396–1403, 2005.
- (7) R. Kawanishi, A. Yamashita and T. Kaneko: "Three-Dimensional Environment Model Construction from an Omnidirectional Image Sequence", *Journal of Robotics* and Mechatronics, Vol.21, No.5, pp.574-582, 2009.
- (8)前山祥一,大矢晃久,油田信一:"移動ロボットの屋外 ナビゲーションのためのオドメトリとジャイロのセン サ融合によるデッドレコニング・システム",日本ロボッ ト学会誌, Vol.15, No.8, pp.1180–1187, 1997.
- (9) P. Chang and M. Hebert: "Omni-directional Structure from Motion", *Proceedings of the 2000 IEEE Workshop* on Omnidirectional Vision, pp.127-133, 2000.
- (10)後藤真一,川西亮輔,山下淳,金子透:"二眼ステレオ とモーションステレオを併用した全方位ステレオカメ ラシステムによる3次元計測",日本機械学会ロボティ クス・メカトロニクス講演会'10講演論文集,1A2-E29, pp.1-4,2010.
- (11) 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.
- (12) J. Y. Bouguet: "Pyramidal Implementation of the Lucas Kanade Feature Tracker Description of the Algorithm", *OpenCV*, Intel Corporation, 2000.