# 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

# 山下 淳\*,原田 知明,川西 亮輔,金子 透(静岡大学)

3-D Environment Modeling from Images Acquired with an Omni-Directional Camera Mounted on a Mobile Robot Atsushi Yamashita<sup>\*</sup>, Tomoaki Harada, Ryosuke Kawanishi, Toru Kaneko (Shizuoka University)

### Abstract

Measurement and modeling of a surrounding environment is important for mobile robots to move autonomously. In this paper, we propose a new method for environment measurement using an omni-directional camera on a mobile robot. Our method is based on a structure-from-motion under the assumption that the environment is static. The method measures surrounding environment at the same time as estimating the robot's motion. We show the validity of our method through experiments.

## キーワード:ストラクチャ・フロム・モーション,全方位カメラ,3次元モデリング,単一カメラ,位置・姿勢推定

(Structure from Motion, Omni-Directional Camera, 3-D Modeling, Single Camera, Estimation of Position and Posture )

### 1. 序 論

本研究では,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手法を提案する.

環境地図は,移動ロボットが移動している最中の自己位 置同定や経路計画などに必要不可欠な情報である.しかし, 未知環境で作業を行う必要がある場合には,移動ロボット 自身が環境地図を生成することが重要となる<sup>(1)</sup>.

地図生成には,レーザレンジファインダを用いて周囲の 物体までの距離を計測する手法と,カメラを用いる手法が ある<sup>(1)</sup>.カメラを用いた地図生成では,物体までの距離を 計測できることに加え,物体表面のテクスチャ情報を同時 に取得できることが大きな利点の1つである.その際,通常 のカメラと比較して視野が広い全方位カメラを利用するこ とが有効である<sup>(2)</sup>.全方位カメラは,特殊な形状のミラー をカメラの前方に設置することにより,360度の視野を有 するカメラである<sup>(3)</sup>.

一般的に3角測量の原理を用いて物体までの距離を計測 する際,全方位カメラを用いる場合にも2台以上のカメラ が必要である<sup>(4)(5)</sup>.ステレオ計測は基線長が長いほど精度 が良いが,これらの手法では全方位カメラをロボット上に 設置しているため基線長をある程度以上長くすることは困 難である.このため計測対象が遠距離に存在する場合には, 精度の良い計測ができないことがある.

これに対して,1台のカメラを移動させることにより移 動前後の画像からステレオ計測を行うモーションステレオ 法が提案されている.移動ロボットにカメラを搭載する場 合,基線長がロボットの移動距離となるため,移動距離を 調節することにより計測対象が遠距離に存在する場合にも 対応できる.ただしこの手法を用いるためには,カメラ間, すなわちロボットの移動前後の相対的な位置姿勢情報が必 要となる.移動による位置姿勢変化をデッドレコニングに より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精度の良い計測は望めな い.また, GPS を用いて位置姿勢を推定する方法<sup>(6)</sup> があるが, 屋内の計測には向かない.

これに対する手法として,画像情報のみからロボットの移動前後の相対的な位置姿勢を推定する手法が提案されている<sup>(7)</sup>.この手法はSFM(Structure from Motion)と呼ばれ,カメラ以外のセンサ情報を必要とせずに周囲環境の計測が可能である<sup>(8)</sup>.

以上,移動ロボットが周囲環境のセンシングを行う際には, 視野の広い全方位カメラを用い,誤差の蓄積しないSFMに より画像情報から位置・姿勢を推定し環境計測を行うこと が有効である<sup>(9)(10)</sup>.そこで本研究では,1台の全方位カメ ラをロボットに設置し,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ロボットの相対的な 位置・姿勢を推定し,周囲環境の計測を行う手法を提案す る.そして得られたカメラ間の位置姿勢情報を用いて複数 の計測結果を組み合わせることで広範囲な環境計測データ を取得し,3次元モデリングを行う手法を構築する.

### 2. 提案手法の概要

1 台の全方位カメラを搭載したロボットを用い, ロボットの移動によって得られた撮影位置の異なる 2 画像に対し てステレオ計測を行う.これには移動前後のカメラ間の相 対的な位置関係を必要とする.すなわちカメラ間の回転行 列 R と並進移動ベクトル t が必要である.本研究では, R と t は画像間の対応点を用いて weakly calibrated stereo の 原理により求められる.

処理の手順は以下の通りである.まず時系列画像間の対応点を取得する.具体的には,ロボットの移動中に動画像を撮影し,画像中で特徴があり対応の取りやすい点群を特徴点として抽出し以後のフレームで追跡を行う.

そしてカメラ間の相対的な位置姿勢である R,tを推定 し,推定された R,tを用いて特徴点の3次元計測を行う、 ただし環境は全て静止しているものとする.また,カメラ の内部パラメータは事前に取得しておき計測中に変化しな



図 1 計測データ統合 Fig.1. Measurement data combination.

いものとする.

次に,複数回の計測結果を合成する.合成方法の概念図 を Fig.1 に示す.まず観測点1と2の画像を用いて,観測点 1から2へのロボットの回転行列  $\mathbf{R}_1$ と並進移動ベクトル t1 を推定し画像中の対応点の3次元座標 p1,i を計測する. ただし*i* は対応点の番号とする.次に観測点2と3の画像 用いて  $\mathbf{R}_2$  と  $\mathbf{t}_2$  を推定し  $\mathbf{p}_{2i}$  を計測する.これにより得ら れた  $\mathbf{R}_1$ ,  $\mathbf{R}_2$ ,  $\mathbf{t}_1$ ,  $\mathbf{t}_2$  から観測点 1, 2, 3 の相対的な位置 関係が決定する.ただし,この計測は画像の対応点情報の みを用いているため観測点間の距離は決定できず,計測結 果は ||t<sub>i</sub>|| に対して相対的なものとなる.このため観測点1, 2間の距離と観測点2,3間の距離が異なる場合,||t1||と ||t<sub>2</sub>||を観測点間の距離の関係になるようにスケールを一致 させる必要がある.スケール合わせでは,それぞれの計測 で共通して使用した対応点の3次元座標 **p**<sub>1,i</sub>, **p**<sub>2,i</sub> が一致 するように ||t<sub>i</sub>|| を求める.これにより計測間のスケールを 合わせることができ,計測結果の合成が可能となる.上記 の計測と合成を繰り返すことにより広範囲な計測結果が得 られる.

最後に,計測で得られた点群と取得した全方位画像を用 いてテクスチャ付き環境モデルを生成する.

3. 環境センシング手法

3・1 特徴点の取得 取得した動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,それらの点を動画像中で追跡する.本手法ではKLT(Kanade-Lucas-Tomasi) Trackerを用いる<sup>(11)</sup>.

まず初期画像において特徴点を指定した1個抽出し,そ の後の動画像に対して特徴点を追跡する.対応が取れない ことにより追跡できなかったものは逐次消去し,残った特 徴点を対応点とする.次回の計測での初期画像には特徴点 数が1個となるように前回の計測で残った特徴点に加えて 新しく特徴点を抽出する.

**3・2** 特徴点方向の算出 KLT Tracker により得られた特徴点の 3 次元空間上の点からカメラに対して入射する光線の逆方向の単位ベクトルを  $\mathbf{r} = [x, y, z]^T$  とする<sup>†</sup>.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



Fig. 2. Ray vector.

配置したもの<sup>(12)</sup>であり、この光線ベクトルrは、全方位 カメラ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として表すことができる(Fig.2).

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.

$$\mathbf{r} = \frac{1}{(su)^2 + (sv)^2 + (sf - 2c)^2} \begin{pmatrix} su \\ sv \\ sf - 2c \end{pmatrix} \cdots (1)$$
$$s = \frac{a^2(f\sqrt{a^2 + b^2} + b\sqrt{u^2 + v^2 + f^2})}{a^2f^2 - b^2(u^2 + v^2)} \cdots (2)$$

ここで, *a*, *b*, *c*は双曲面のパラメータであり, *f*は像距離(カメラのレンズ中心から結像面までの距離)である.

**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 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.

$u_i =$	$(x_i x'_i, y_i x'_i, z_i x'_i, x_i y'_i, y_i y'_i, z_i y'_i, x_i z'_i, y_i z'_i, z_i z'_i)^T$
	$\cdots \cdots (5)$
$\mathbf{e} =$	$(e_{11}, e_{12}, e_{13}, e_{21}, e_{22}, e_{23}, e_{31}, e_{32}, e_{33}]^T \cdots (6)$

である ( e<sub>ab</sub> は E の a 行 b 列成分 ).

基本行列 E は 8 点以上の対応する光線ベクトル対に対す る連立方程式を解くことにより求められる.すなわち(7) 式を解くことになる.ただし, n は特徴点の数とする.

これを変形すると,

<sup>&</sup>lt;sup>† T</sup> はベクトルまたは行列の転置を表す.

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

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 E が求まる.

3・4 外れ値除去 特徴点追跡は全てが正しく対応 しているとは限らない.そこで,誤った追跡を行ったものを 外れ値として除去する.これには RANSAC<sup>(13)</sup>を用いる.

具体的には,まず基本行列 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. そして全特徴点の光線ベクトル  $\mathbf{r}_i$ ,  $\mathbf{r}'_i$ に対して (9) 式を満 たす特徴点の数を k とする.

ただしqは閾値である.この $\mathbf{E}_{rand}$ ,kを求める処理を繰り返す.

k が最大になり以後の繰り返し回数が予め設定した数 w に達したとき,k が最大となったときの(9)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(8)式より基本行列 E を算出する.

**3·5** 位置・姿勢推定 基本行列 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 (10) 式で表される.

ただし,

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

本手法では画像のみを入力としスケール情報を得ずに計測を行うためカメラ間の距離 ||t|| が決定できない.そこでカメラ間の距離を1として計測を行うこととし,このために ||t|| = 1 なるように ||E|| を変える.||t|| = 1 より Tのフロベニウスノルムは  $\sqrt{2}$ となり,(10)式で T に回転行列 R を掛けてもノルムは変化しないため,||E|| =  $\sqrt{2}$ とする((12)式).

 $\mathbf{E}'$ を $\mathbf{R}$ とTに分解するために特異値分解を行う.

ただし,  $\Sigma = diag(r, s, 0)$  である.

r, sは E' の特異値であり共に 1 付近の値となる. R を 回転行列とするため r = s = 1 とする. これを (14) 式のよ うに変形させることにより (15)(16) 式から R, T を求める.

$\mathbf{E}' = \mathbf{U}\mathbf{Y}\mathbf{V}^T\mathbf{V}\mathbf{Z}\mathbf{V}^T \cdots \cdots$	(14)
$\mathbf{R} = \mathbf{U}\mathbf{Y}\mathbf{V}^T \cdots \cdots$	(15)
$\mathbf{T} = \mathbf{V}\mathbf{Z}\mathbf{V}^T \cdots \cdots$	(16)

ただし,

そして T の成分から t を作成する. R と t の解は複数存 在するが,特徴点の計測結果が光線ベクトルの向きと一致 するものを正しい解とする.

**3.6** 特徴点の計測  $\mathbf{R}_m$ ,  $\mathbf{t}_m$  を m 回目の計測にお ける 2 画像から推定された回転行列と並進移動ベクトルと すると,  $\mathbf{R}_m$ ,  $\mathbf{t}_m$  の位置関係にカメラが存在するとして 3 角測量の原理を用いて特徴点の計測を行う. すなわち 2 つ のカメラからの光線ベクトルが交わる点を計測結果とする. 実際には画像ノイズ等の影響により光線ベクトルはねじれ の関係にあることが多いため, 光線ベクトル間の距離が最 短となる時の中点を計測結果とする.特徴点 i の計測結果  $\mathbf{p}_{m,i}$  は (19) 式で表される.

$$\mathbf{p}_{m,i} = \frac{1}{2} \left\{ \frac{A_{m,i} \mathbf{r}_{m,i} + B_{m,i} \mathbf{R}_m^T \mathbf{r}'_{m,i}}{(\mathbf{r}_{m,i}^T \mathbf{r}_{m,i})(\mathbf{r}'_{m,i}^T \mathbf{r}'_{m,i}) - (\mathbf{r}_{m,i}^T \mathbf{R}_m^T \mathbf{r}'_{m,i})^2} + \mathbf{t}_m \right\}$$
.....(19)

ただし,

$$A_{m,i} = (\mathbf{r}_{m,i}^{T}\mathbf{t}_{m})(\mathbf{r}_{m,i}^{T}\mathbf{r}_{m,i}) - (\mathbf{r}_{m,i}^{T}\mathbf{R}_{m}^{T}\mathbf{r}_{m,i}')(\mathbf{r}_{m,i}^{T}\mathbf{R}_{m}^{T}\mathbf{t}_{m}) \cdots (20) B_{m,i} = (\mathbf{r}_{m,i}^{T}\mathbf{t}_{m})(\mathbf{r}_{m,i}^{T}\mathbf{R}_{m}\mathbf{r}_{m,i}) - (\mathbf{r}_{m,i}^{T}\mathbf{r}_{m,i})(\mathbf{r}_{m,i}^{T}\mathbf{R}_{m}^{T}\mathbf{t}_{m}) \cdots (21)$$

3・7 低精度の計測点の除去 計測精度は一般にカメ ラの移動方向の延長線付近ほど悪く、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  $[u_{m,i}, v_{m,i}]^T$ ,  $[u'_{m,i}, v'_{m,i}]^T$ で偏微分したものから(22)式で誤差を評価す るベクトルgを求める.そしてベクトルgのノルムが(23) 式を満たす計測結果を以後の処理に用いる.



ただし, h は誤差評価のための閾値である.

3・8 計測結果の合成 上記により動画像中の2画 像における計測結果が得られ,それと同時にカメラ間の位 置関係も得られる.そこで次の計測には前回の計測で使用



図 3 スケールの不一致 Fig. 3. Scale mismatching.

した最終画像を初期画像として以後の数フレームを用いて 同様な計測を行う.これにより,得られたカメラ間の位置 関係を用いて計測結果を合成できる.

しかし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 Fig.3 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.

ここで,  $P_{m,i} \ge P_{m+1,i}$ の座標間の距離を最小にするようなスケールにすると c から遠い計測結果の影響を大きく受けるため,計測結果の各成分に対数をとったものの 2 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 (24) 式から求まる.

$$\min_{\mathbf{s}'} \sum_{i=1}^{n} ||\log(\mathbf{p}_{m,i} - \mathbf{c}) - \log(s'\mathbf{p}_{m+1,i} - \mathbf{c})|| \cdots (24)$$

3・9 モデリング 上記の処理を繰り返して得られた計測点群を用いてモデリングを行う.

具体的には,点群から各点を結ぶ3角形(3角パッチ)を 構成し,テクスチャを貼り付ける平面を作成する.まず,3 次元のドロネー分割を用いて点群から凸形状の3角錐群を 生成する.ただし,カメラ(観測点)から観測される計測 点(可視点)は3角錐の内部に存在し,表面に現れない可 能性がある.そこで,観測点と可視点を結ぶ線分の間には 物体が存在しないことを利用し,観測点と可視点を結ぶ線 分が3角錐と交差する場合,線分が交差した面を削除する. この処理により,3角パッチを生成する.

次に,得られた画像から最大の面積を持つテクスチャを 各3角パッチに貼り付けることで,高解像度の3次元環境 モデルを生成する.

#### 4. 実 験

**4・1** 実験環境 SONY 製八イビジョンカメラ HDR-HC1 と末陰産業製双曲面ミラー SOIOS70-SCOPE を組み 合わせた全方位カメラ (Fig.4(a))を, Mobile Robots Inc. 製 Pioneer3 上に設置し (Fig.4(b)), 2 次元平面上で移動 ロボットを移動させながら画像を取得した (Fig.4).また,



(a) Omni-directional camera.(b) Mobile robot.図 4 実験システム

Fig. 4. Experimental system.



図 5 全方位画像中の特徴点 Fig. 5. Feature points in an omnidirectional image.

人間が全方位カメラを把持して位置と姿勢を3次元的に変化させながら画像を取得した.いずれの場合も,入力画像のサイズは1920 × 1080pixels である.

4・2 実験結果 最初にカメラの移動が2次元の実験 を行った.L字に曲がった廊下においてロボットを約40cm/s の速度で移動させ,移動中に全方位カメラで撮影した15fps の動画像を計測処理の入力とした.個々の計測の観測点は 20frameごとに設定した.これにより基線長は約530mmと なる.

全方位画像に抽出された特徴点を表示した例を Fig.5 に 示す. は RANSAC により除去された点, は精度が悪い と判定された点, は結果の合成に使用し計測結果を表示 した点を示す.初期画像における特徴点の抽出数はl = 200個とした.また, RANSAC の閾値はq = 0.01とし,繰り 返し回数をw = 5000とした.計測精度の良い点を判別す る閾値としては,h = 0.25を用いた.更に, 以外で示し た特徴点を計測終了後に除去して次回の計測には画像全体 から再抽出した.

処理時間は 2.53GHz の CPU で,特徴点の追跡が 1 枚の 画像ごとに約 2.0s であり,対応点が得られてからの計測時 間は約 0.6s であった.

周囲環境を計測した結果を上から見た図を Fig.6 に示す. (a) は外れ値の除去及び精度の悪い結果の除去を行わずに 計測した結果,(b) は外れ値除去のみを行った結果,(c) は



Fig. 6. Outlier and low accuracy points rejection.

低精度除去のみを行った結果,(d)は外れ値除去と低精度 除去の両方を行った結果である.L字型廊下状に分布して いる点は特徴点の計測結果を示し,廊下中央に点在する点 は計測に用いたカメラの位置の推定値を示す.

(a) では外れ値により観測点の位置関係の推定に誤差を生 じ,廊下の角が直角に計測されていない.また誤差の大き い点を計測しているため,計測結果がばらついている.こ れに対して(b) では外れ値除去により観測点の位置関係の 推定精度が向上したため,角は直角に計測されているがば らつきは大きい.(c) では低精度の除去により計測精度の 良い点のみを計測しているため計測結果は廊下壁面にまと まっている.(d) では外れ値除去により観測点の位置関係 の推定精度向上し,低精度除去により計測精度が向上して おり,直角に曲がった廊下の環境を正しく計測されている.

次に,観測点間の距離である基線長を変化させ,基線長別の計測結果を作成した.入力する動画像はFig.6 と同じものを使用し,基線長の変化には1回の計測に用いるフレーム数を変化させることによって行った.10frame毎,30frame毎,70frame毎の計測結果をFig.7 に示す.

(a)の10frame毎の計測では廊下を曲がる前と後で大き くスケールが変化している.これは基線長が短いため計測 結果の誤差が大きく,これを用いたスケール合わせに大き く影響しているためであると考えられる.(b)の30frame 毎の計測ではスケールの変化がほとんど無く,また計測点 の数も十分得られ,環境を正しく計測されている良好な結 果であると考えられる.(c)の70frame毎の計測では計測 点の密度が荒い結果となった.これは計測回数が少ないこ とに加え,対応点抽出時における特徴点の追跡で多くの特 徴点が追跡できずに失われ,対応点の数が減少したためで ある.これにより,本手法に適する基線長は計測結果の十



Fig. 8. Dead reckoning and proposed method.

分な精度が得られる長さで,かつ,対応点が多く得られる 長さであると考えられる.

最後に,ロボットのデッドレコニングの値を観測点間の 位置姿勢として用いた場合と,本手法の画像のみから推定 した観測点間の位置姿勢を用いた場合の計測結果を Fig.8 に示す.デッドレコニングと本手法の入力には同じ動画像 を使用した.(a) にデッドレコニングによる計測結果を,(b) に本手法による計測結果を示す.(a) ではロボットの車輪に 偏りがあるため,計測結果が曲がっている.それに対し(b) の本手法による計測では,直角に曲がった廊下の形状を正 しく計測された結果が得られた.定量的には,(b) では廊 下の長さの計測誤差は平均 2.6%であった.これにより,本 手法はデッドレコニングと比べて十分精度の良い位置姿勢 の推定が可能であることが分かる.

また,3次元環境モデリングの結果を Fig.9 に示す.(a) は通常のカメラで廊下を撮影した結果,(b) は計測結果から 作成した環境モデルの3角パッチをワイヤーフレームで表 示した結果,(c) はこれにテクスチャを貼り付けた結果であ る.3次元モデリング結果と通常のカメラで撮影した画像 と比較すると,物体の位置関係が一致しているため,実環 境を表す環境モデルが適切に作成できていると考えられる.



(a) Actual image.



(b) Wire frame.
 (c) Result of 3-D modeling.
 図 9 3次元モデリング結果
 Fig. 9. Result of 3-D modeling.



図 10 カメラの位置・姿勢変化が 3 次元の場合 Fig. 10. Result of 3-D movement.

次に,カメラを3次元的に移動させた実験を行った.人間が全方位カメラを把持して,位置・姿勢を変化させながら4角い部屋の中を移動させ取得した画像を用いた結果を Fig.10に示す.(a)は鳥瞰図3次元計測結果であり,矢印の始点がカメラの位置,矢印の方向がカメラの姿勢を示す. (b)はテクスチャを貼り付けた結果である.3次元的に位置・姿勢が変化した場合にも,適切な結果が出ていることが分かる.

#### 5. 結 論

双曲面ミラーによる全方位カメラの移動中の動画像を用 いて SFM により周囲環境を計測し,複数の結果を合成し て広範囲な3次元計測結果を得ると同時に,環境モデルを 生成する手法を提案した.この手法の利点として,カメラ の画像のみを入力情報としていることによりシステム構成 が単純であり,また多少の上下動や姿勢変動のあるカメラ の移動にも対応できる.実験では多数の計測結果の合成に 対して誤差の累積が小さいという結果が得られ,本手法の 有効性が示された.

今後の課題としては,対応点の検出精度の向上や,3箇 所以上の観測点の幾何学的関係により複数の観測点の位置 関係を同時に推定することなどが挙げられる.

謝 辞 本研究の一部は,財団法人カシオ科学振興財団の 援助を受けた.

#### 参考文献

- (1) S. Thrun: "Robotic Mapping: A Survey," *Technical Report CMU-CS-02-111*, Carnegie Mellon University (2002)
- (2) J. Gaspar, N. Winters and J. Santos-Victor: "Vision-Based Navigation and Environmental Representations with an Omnidirectional Camera," *IEEE Transactions* on Robotics and Automation, Vol.16, No.6, pp.890–898 (2000)
- (3) Y. Yagi: "Omnidirectional Sensing and Its Applications," *IEICE Transactions on Information and Sys*tems, Vol.E82-D, No.3, pp.568-579 (1999)
- (4) J. Takiguchi, M. Yoshida, A. Takeya, J. Eino and T. Hashizume: "High Precision Range Estimation from an Omnidirectional Stereo System," *Proceedings of the* 2002 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.263–268 (2002)
- (5) H. Koyasu, J. Miura and Y. Shirai: "Mobile Robot Navigation in Dynamic Environments Using Omnidirectional Stereo," *Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.893–898 (2003)
- (6) J. Meguro, J. Takiguchi, Y. Amano and T. Hashizume: "Omni-directional Motion Stereo Vision based on Accurate GPS/INS Navigation System," *Proceedings of* the 2nd Workshop on Integration of Vision and Inertial Sensors (2005)
- (7) M. Tomono: "3-D Localization and Mapping Using a Single Camera Based on Structure-from-Motion with Automatic Baseline Selection," *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.3353–3358 (2005)
- (8) R. Hartley, R. Gupta and T. Chang: "Stereo from Uncalibrated Cameras," Proceedings of the 1992 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp.761–764 (1992)
- (9) J. Gluckman and S. K. Nayar: "Ego-Motion and Omnidirectional Cameras," Proceedings of 6th International Conference on Computer Vision, pp.999–1005 (1998)
- (10) M. Oe, T. Sato and N. Yokoya: "Estimating Camera Position and Posture by Using Feature Landmark Database," *Proceedings 14th Scandinavian Conference* on Image Analysis, pp.171–181 (2005)
- (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) K. Yamazawa, Y. Yagi and M. Yachida: "HyperOmni Vision: Visual Navigation with an Omnidirectional Image Sensor," Systems and Computers in Japan, Vol.28, No.4, pp.36–47 (1997)
- (13) 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)