The Japan Society of Mechanical Engineers

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

3D Measurement by Omnidirectional Stereo Camera System Using Binocular Stereo Together with Motion Stereo

○学　後藤　真一（静岡大）　正　川西　亮輔（静岡大）
正　山下　淳（静岡大）　金子　透（静岡大）

Shinichi GOTO, Shizuoka University
Ryosuke KAWANISHI, Shizuoka University, f5945016@ipc.shizuoka.ac.jp
Atsushi YAMASHITA, Shizuoka University, tayamas@ipc.shizuoka.ac.jp
Toru KANEKO, Shizuoka University, tmtkane@ipc.shizuoka.ac.jp

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 accuracy of measurement by omnidirectional cameras using binocular stereo together with motion stereo. Experiments showed the validity of the proposed method by the mobile robot equipped with an omnidirectional stereo camera system.

Key Words: Omnidirectional Camera, Binocular Stereo, Motion Stereo, 3D Measurement, Mobile Robot

1. 序論

近年，ロボット技術の発展に伴い，自律移動ロボットの様々な環境で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．そのため，あらかじめ周囲の地図情報を与えることは難しい．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．

周囲環境の計測には高速かつ正確な計測が可能なレーザ距離センサを用いることがある．カメラを用いた計測では，距離情報だけでなく色や模様などの視覚情報も同時に取得できる．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，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，魚眼レンズを用いた魚眼カメラ[1]，双曲面ミラーなどを利用した全方位カメラ[2]などがある．全方位カメラは1枚の画像にロボットの周囲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を考えた場合，魚眼カメラよりも全方位カメラの方が適していると考えられる．全方位カメラは，その広範囲な視野を有すると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[3]．そこで，本研究では一度に周囲360°を計測可能な全方位カメラ（図1）を使用する．図2に全方位カメラによって得られた全方位画像を示す．

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[4][5]，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[6]などがある．

一般にステレオ計測の計測精度は，カメラ間の距離（基線長）が長いほど良い．しかし，ロボット上に全方位カメラを設置することを考える場合，ロボットに設置された複数カメラによりステレオ計測を行う手法では，基線を長くすることは困難である．したがって，この手法では精度の良い計測はロボット付近に限られる．



Fig. 1 Ominidirectinal camera

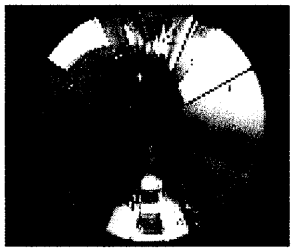


Fig. 2 Ominidirectinal image

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手法では，基線長がカメラ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にはカメラ間の相対的な位置・姿勢情報を推定する必要がある．位置・姿勢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．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[7]．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[8]．

SFMの手法の1つに，カメラの移動前後の撮影地点（観測点）における画像間で同一物体を表す点（対応点）を抽出し，画像間の対応点の幾何学的関係から位置・姿勢を推定する方法がある．これにより，画像間の対応点情報のみを用いて計測することが可能である．

しかし，モーションステレオ計測では，ロボットの移動方向（基線方向）の計測点を精度良く計測することは困難であ

NII-Electronic Library Service

The Japan Society of Mechanical Engineers

る．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．

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，計測結果の精度向上を目指す．

2. 処理の概要

本研究では図 3 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の移動ロボットを直進に走行させ，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を二眼ステレオ計測結果にスケール合わせを行い，結果を統合する．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配置する（図 4）．モーションステレオ計測の計測範囲を図 5 に示す．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．特徴点追跡を用いて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計測範囲を，基線を挟んでもう一方のカメラが写らない方向 180°とする．二眼ステレオ計測では計測可能な全ての範囲で計測を行う．

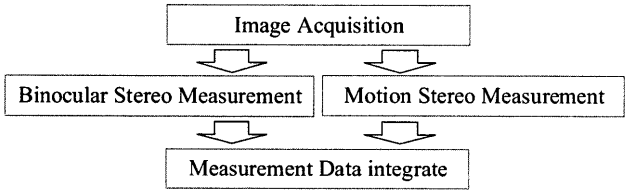


Fig. 3 Process

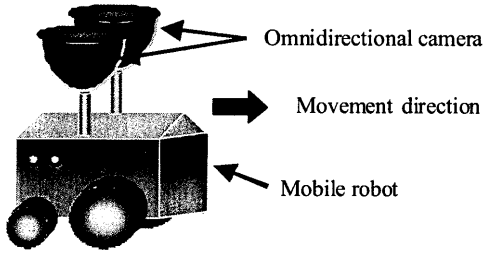


Fig. 4 Camera configuration

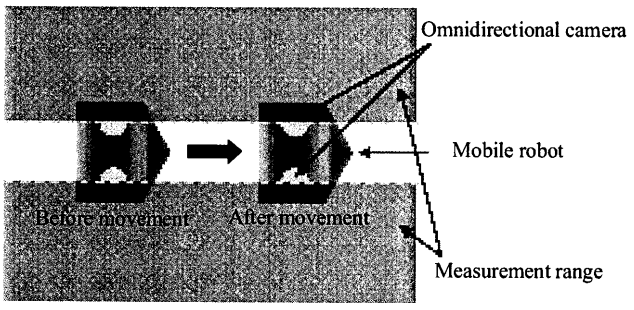


Fig. 5 Measurement range of motion stereo

3. 二眼ステレオ計測

本研究では 2 台の全方位カメラを床面に対し水平な方向に配置し，それぞれ画像を取得する．

ステレオ計測には 2 枚の画像の対応する点を求める必要がある．そこで，本研究では正規化相互相関による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．一方の画像の注目点を中心としたテンプレート画像を T, 検索する対象画像を I とすると正規化相互相関係数 R は式(1)で表される．

$$R=\frac{\sum_{j=1}^{N}\sum_{i=1}^{M}\left\{\left(\boldsymbol{I}(i,j)-\bar{I}\right)\left(\boldsymbol{T}(i,j)-\bar{T}\right)\right\}}{\sqrt{\sum_{j=1}^{N}\sum_{i=1}^{M}\left(\boldsymbol{I}(i,j)-\bar{I}\right)^2\sum_{j=1}^{N}\sum_{i=1}^{M}\left(\boldsymbol{T}(i,j)-\bar{T}\right)^2}} \tag{1}$$

ただし，$\bar{U}$ と $\bar{I}$ は次式に示す領域内の画素値の平均値である．

$$\bar{T}=\frac{1}{MN}\sum_{j=1}^{N}\sum_{i=1}^{M}\boldsymbol{T}(i,j),\quad \bar{I}=\frac{1}{MN}\sum_{j=1}^{N}\sum_{i=1}^{M}\boldsymbol{I}(i,j) \tag{2}$$

ここで M, N はテンプレートサイズ，i, j はテンプレート内部の位置をそれぞれ示す．

R は−1〜1 の値で，T と I が類似した画像であるほど大きくなり，完全に一致したとき 1 となる．よって，R の値が 1 に最も近く，閾値以上の点を対応点とする．この閾値は計測条件によってあらかじめ設定する値である．

その後，2 枚の画像の対応点に対してそれぞれカメラ光線を求める．この 2 本のカメラ光線の交点を計測点の 3 次元座標として算出する．カメラ光線は，カメラのレンズ中心から結像面までの距離やミラーの形状等の内部パラメータ，2 台のカメラの位置関係から算出できる．

4. モーションステレオ計測

4.1 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 [9] 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 [10] を用いる．

4.2 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，光線ベクトル $\mathbf{r}$ とする．移動前後の画像の光線ベクトルをそれぞれ

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

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

$$\mathbf{r}_i'^{T}\mathbf{E}\mathbf{r}_i=0 \tag{4}$$

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

ただし，

$$\mathbf{u}_i=[x_ix'_i,y_ix'_i,z_ix'_i,x_iy'_i,y_iy'_i,z_iy'_i,x_iz'_i,y_iz'_i,z_iz'_i]^T \tag{6}$$

$$\mathbf{e}=[e_{11},e_{12},e_{13},e_{21},e_{22},e_{23},e_{31},e_{32},e_{33}]^T \tag{7}$$

（e_{ab} は $\mathbf{E}$ の a 行 b 列成分）

$\mathbf{E}$ は 8 点以上の対応する光線ベクトル対に対応する連立方程式，すなわち式(8)を解いて求める．

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

ただし，

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

NII-Electronic Library Service

The Japan Society of Mechanical Engineers

である．ここで n は特徴点数とする．$\mathbf{e}$ は $\mathbf{B}^T\mathbf{B}$ の最小の固有値に対応する固有ベクトルとして求められ，$\mathbf{E}$ が求まる．$\mathbf{E}$ は回転行列 $\mathbf{R}$ と並進移動ベクトル $\mathbf{t}=[t_x,t_y,t_z]^T$ により式(10)で表される．

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

ただし，

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

である．この $\mathbf{E}$ に特異値分解を行い，$\mathbf{R}$ と $\mathbf{t}$ を求める．

4.3 対応点の 3 次元座標算出

算出された回転行列 $\mathbf{R}$ と並進移動ベクトル $\mathbf{t}$ 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 $\mathbf{p}_i$ を計測結果として算出する．

図 6 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り，計測結果のスケールが実スケールと一致しないことがある．そこで，モーションステレオ計測で得られた適当な 1 つの計測点 $\mathbf{p}_i$ 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 $\mathbf{p}'_i$ を求め，二眼ステレオ計測の左カメラ座標を原点として $m\mathbf{p}_i=\mathbf{p}'_i$ 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．

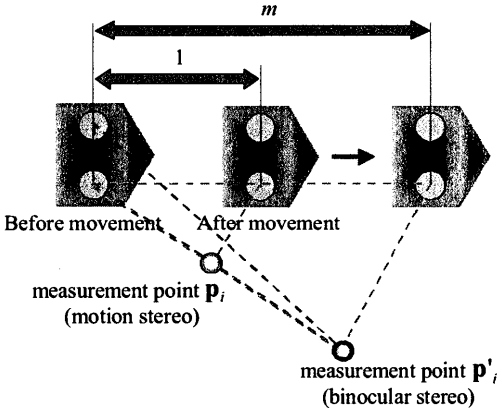


Fig.6 Scale matching

5. 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，多少の誤差を持っている．このため対応点毎に計測精度を評価することによって，大きな誤差を生じる可能性の高い対応点を除去し，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．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ものを評価値とする．そこで計測結果の変化範囲としてベクトル $\mathbf{g}_i$ を算出する（式(12)）．

$$\mathbf{g}_i=[g_{x,i},g_{y,i},g_{z,i}]^T \tag{12}$$

ただし，

$$g_{x,i}=\left\|\frac{\partial \mathbf{p}_i}{\partial x_{1,i}}\frac{\partial x_{1,i}}{\partial u_{1,i}}+\frac{\partial \mathbf{p}_i}{\partial x_{1,i}}\frac{\partial x_{1,i}}{\partial v_{1,i}}+\frac{\partial \mathbf{p}_i}{\partial x_{2,i}}\frac{\partial x_{2,i}}{\partial u_{2,i}}+\frac{\partial \mathbf{p}_i}{\partial x_{2,i}}\frac{\partial x_{2,i}}{\partial v_{2,i}}\right\| \tag{13}$$

$$g_{y,i}=\left\|\frac{\partial \mathbf{p}_i}{\partial y_{1,i}}\frac{\partial y_{1,i}}{\partial u_{1,i}}+\frac{\partial \mathbf{p}_i}{\partial y_{1,i}}\frac{\partial y_{1,i}}{\partial v_{1,i}}+\frac{\partial \mathbf{p}_i}{\partial y_{2,i}}\frac{\partial y_{2,i}}{\partial u_{2,i}}+\frac{\partial \mathbf{p}_i}{\partial y_{2,i}}\frac{\partial y_{2,i}}{\partial v_{2,i}}\right\| \tag{14}$$

$$g_{z,i}=\left\|\frac{\partial \mathbf{p}_i}{\partial z_{1,i}}\frac{\partial z_{1,i}}{\partial u_{1,i}}+\frac{\partial \mathbf{p}_i}{\partial z_{1,i}}\frac{\partial z_{1,i}}{\partial v_{1,i}}+\frac{\partial \mathbf{p}_i}{\partial z_{2,i}}\frac{\partial z_{2,i}}{\partial u_{2,i}}+\frac{\partial \mathbf{p}_i}{\partial z_{2,i}}\frac{\partial z_{2,i}}{\partial v_{2,i}}\right\| \tag{15}$$

である．そして，ベクトル $\mathbf{g}_i$ のノルムを計測結果の誤差範囲として，式(16)を満たす対応点のみを利用する．ただし h は閾値である．

$$\|\mathbf{g}_i\|<h \tag{16}$$

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．

6. 実験

6.1 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 7）．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．

6.2 計測実験

実験は図 8 のような屋内環境でロボットを直進移動させて行った．このときに取得した画像を図 9 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 10，図 11 に，スケール合わせ及び計測結果の統合を行った結果を上から見た図を図 12，その鳥瞰図を図 13 に示す．青色の点は，二眼ステレオ計測でのカメラの位置，赤色の点はその計測点，緑色の点は，モーションステレオ計測でのカメラの位置，黄色の点はその計測点である．

図 10，11 から，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．誤差の原因としては，対応点探索の際の誤対応，カメラ間の位置関係の誤差等が考えられる．

図 12，13 から，周囲環境の形状が計測できていることがわかる．また，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を与えられている．

また，表 1 にはそれぞれの計測の処理時間を示す．表 1 より，二眼ステレオ計測の処理時間がモーションステレオ計測に比べて多くかかっていることがわかる．これは対応点の誤対応を減らすためにエピポーラ線を太くし、エピポーラ線の周囲の画素についても対応点探索を行っているためである．カメラの内部，外部パラメータをより正確に求めることで正確なエピポーラ線を求めることができるため，キャリブレーションの精度を高めることで今後は二眼ステレオの処理時間は短縮することが可能であると考えられる．

さらに計測結果から左右壁面の最小二乗平面を求め，そこからの標準偏差を求めた結果を表 2 に示す．表 2 より，左右壁面の最小二乗平面からの標準偏差が共に 0.2m ほどあり，より精度の良くなるように改善する必要がある．

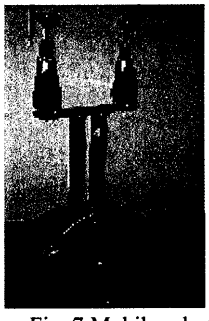


Fig. 7 Mobile robot

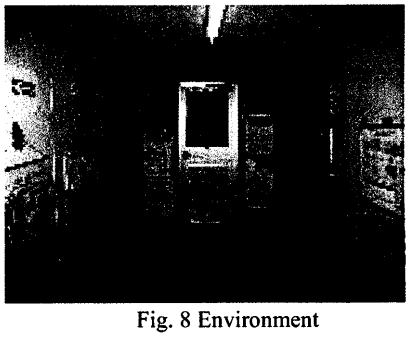


Fig. 8 Environment

NII-Electronic Library Service

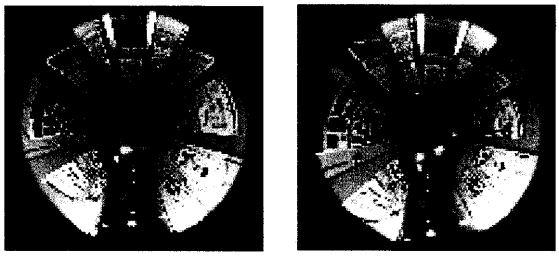


Fig. 9 Stereo image pair

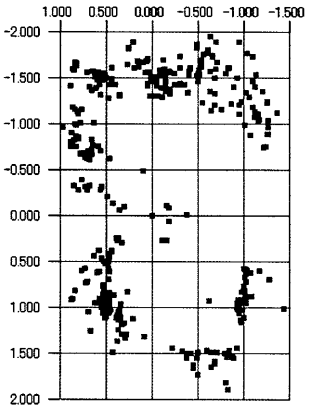
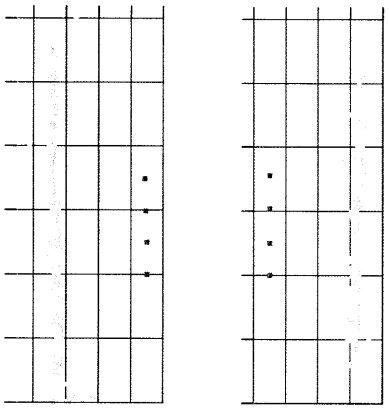


Fig. 10 Measurement result by binocular stereo



(a) Left camera (b) Right camera

Fig. 11 Measurement result by motion stereo

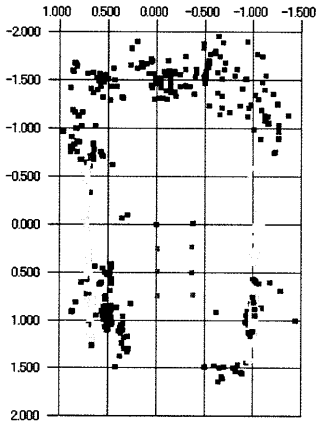


Fig. 12 Integrated measurement data (Top view)

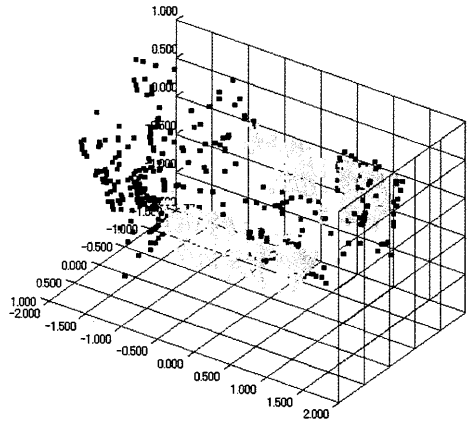


Fig. 13 Integrated measurement data (Bird's eye view)

Table 1 Processing times

計測方法（計測範囲）	処理速度
二眼ステレオ(2.5m×4m×2m)	1292.5sec
モーションステレオ(0.5m×2.5m×2m)	334.3sec

Table 2 Standard deviation from the least square error plane

	標準偏差
左壁面	0.254m
右壁面	0.193m

7. 結論

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い，またその有効性を示した．

今後の課題として，計測精度の向上，スケール合わせ精度の向上等が挙げられる．

文　献

[1] 宮川勲，若林佳織，荒川賢一，“魚眼投影モデルに基づく画像系列からの平面運動と 3 次元形状の復元”，電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol.J87-D-II,No.5, pp.1120– 1132, 2004.

[2] C. Geyer and K. Daniilidis, “Omnidirectional Video,” The Visual Computer, Vol.19, No.6, pp.405–416, 2003.

[3] 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.

[4] 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.

[5] 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.

[6] R. Kawanishi, A. Yamashita and T. Kaneko, “Construction of 3D Environment Model from an Omni-Directional Image Sequence,” Proceedings of the 3rd Asia International Symposium on Mechatronics, TP1-3(2), pp.1–6, 2008.

[7] 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.

[8] P. Chang and M. Hebert, “Omni-directional Structure from Motion,” Proceedings of the 2000 IEEE Workshop on Omnidirectional Vision, pp.127-133, 2000.

[9] 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.

[10] J. Y. Bouguet, “Pyramidal Implementation of the Lucas Kanade Feature Tracker Description of the Algorithm,” OpenCV, Intel Corporation, 2000.

NII-Electronic Library Service