

ステレオ PAL 画像による距離測定とその精度について

長谷 博行[†] 河合 宏文^{††} フランク・エクパール[†] 米田 政明[†]
加藤ジェーン^{†††}

On the Precision of 3D Measurement by Stereo PAL Images

Hiroyuki HASE[†], Hirofumi KAWAI^{††}, Frank EKPAR[†], Masaaki YONEDA[†], and Jien KATO^{†††}

あらまし 本論文では、ステレオ PAL 画像からの 3 次元距離測定とその精度について検討した。PAL (Panoramic Annular Lens) は、1985 年に Greguss によって提案された全方位レンズの一種である。PAL は屈折面と 1 組の反射面をもつ単一ガラスブロックで構成されているため光軸の調整が不要であり、小型で過酷な環境下での耐久性がある。本研究ではまず PAL の光学特性を明らかにした。次に PAL を装着した 2 台のカメラの光軸を同じ垂直線上に配置する構成を想定して獲得できる 3 次元情報の精度をシミュレーションにより検討した。さらに実験により、2 枚の PAL 画像上のエピ極線上で DP マッチングを適用することにより対応点を自動的に探索し、360 度の 3 次元情報と歪のない画像を得ることができた。

キーワード 全方位レンズ, PAL, ステレオ視, 3 次元計測

1. ま え が き

全方位センサーの研究は 1990 年以降盛んに行われてきており、その中で全方位画像を取得する方策がいろいろ提案された。大きく分けると、(1) 通常のカメラを複数台用いるか、あるいは 1 台を回転して全方位画像を得る方法、(2) ミラーを用いる方法、そして (3) 広角レンズを用いる方法がある [1]。PAL は (3) の方法に属するが広角レンズとは異なり、独特の光学構造をもっている。PAL は Panoramic Annular Lens といい 1985 年 Greguss によって開発された全方位レンズである [2]。PAL は全方位画像取得に通常使われている双曲線あるいは放物線ミラー [3] とは違い、透視投影 (perspective projection) の光学特性が明らかでない。しかし、PAL は単一のガラスブロックと 1 つの

屈折面及び 1 組の反射面の組み合わせで構成されているため、光軸の調整が不要であり、小型で過酷な環境下での耐久性がある。PAL の外形を図 1 に、光学構造を図 2 に示す。本研究では PAL を装着した 2 台のカメラを用いて 3 次元情報の獲得を試みた。ステレオ全方位センサーを用いた 3 次元再構成の試みはこれまでもいくつか報告されている。方法は大きく 3 つに分類される。すなわち、(1) 2 台のセンサーを光軸の向きを同じにして平行に配置する方法 [3] [4]、(2) 同一光軸上に 2 台のセンサーを上下に配置する方法 [5]、(3) 1 台のセンサーを移動してステレオ画像を得る方法 [6] である。横方向に配置した場合エピ極線は曲線となり、補正が必要となる。[4] ではエピ極線上で近傍画素値を用いて対応点探索を行っている。山下ら [8] はエピ極線を直線にするために円柱座標への変換を行い、変換後の画像から対応点探索を行っている。また、この方法では互いのカメラがオクル - ジョンの要因となり全方位の利点が損なわれる。一方、縦方向に配置した場合、エピ極線はドーナツ状画像の半径方向に放射状となり、2 台のカメラを水平に配置することから生じる互いのカメラによるオクル - ジョンも極力避けることができる。[5] ではこの方法を採用して 3 次元情報の獲得を試みている。

[†] 富山大学工学部, 富山市
Faculty of Engineering, Toyama University, Gofuku 3190,
Toyama-shi, Toyama, 930-8555 Japan

^{††} 株式会社 東芝, 東京都
Toshiba Corporation, 2-9, Suehiro-cho, Ome, Tokyo, 198-8710
Japan

^{†††} 名古屋大学大学院工学研究科情報工学専攻, 名古屋市
Department of Information Engineering, Graduate School of
Engineering, Nagoya university, Furou-cho Chigusa-ku,
Nagoya-shi, 464-8603 Japan



図 1 PAL(Panoramic Annular Lens)
Fig. 1 PAL(Panoramic Annular Lens)

本研究は PAL の光学構造を考え、(2) の方式を採用した。PAL を用いる上での問題点はその光学特性の非線形歪とその補正である。本論文では、PAL の光学特性を明らかにし、2 つの PAL 画像を用いて得られる 3 次元情報の測定精度について検討する。

以下、2. では PAL の光学特性について調べ、光路を逆に投射することにより 1 枚の PAL 画像から歪のない画像が得られることを示す。3. でステレオ PAL の構成や距離情報の獲得とその精度について述べる。最後に 4. で実画像から得られた 3 次元画像を示し考察する。

2. PAL

2.1 PAL の特徴

PAL (Panoramic Annular Lens) は全方位レンズである。このレンズを用いた場合、上方向に 45 度、下方向に 12 度、周囲 360 度の撮影が可能となる。PAL は C マウント用カメラであれば装着可能である。PAL を装着して撮影された画像 (図 3) を PAL 画像と呼ぶ。PAL 画像の特徴としては、図 2 の構造を見て分かるように、全方位の風景が PAL 画像の中心部の内円から外円の領域に写り、内円は上方向、外円は下方向となる。また、円の中心から対象物の写像位置への方位角を求めることにより、対象物の方位角が分かる。

2.2 光学特性の測定

PAL を装着したカメラ 1 台と LED (発光ダイオード) 12 個を等間隔に並べた器具を用意し、図 4 に示すように設置して撮影を行った。床からのカメラの高さ、個々の LED の高さ、カメラから LED までの水平距

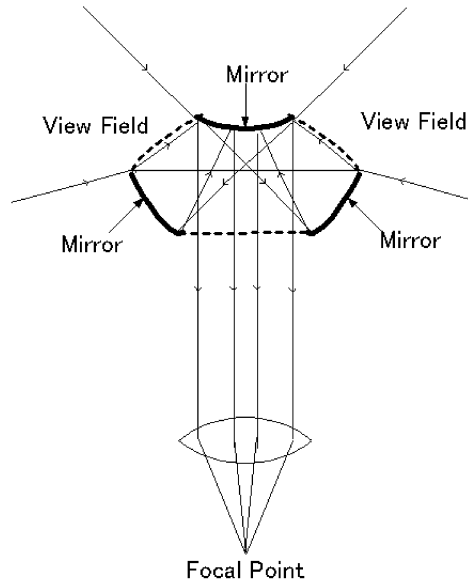


図 2 PAL の光学構造
Fig. 2 Optical structure of PAL



図 3 PAL 画像
Fig. 3 PAL image

離を測定することにより、カメラから個々の LED への角度 α (度) を計算し、PAL 画像上の LED の写像位置 r と仰角 α との関係調べた。 r は図 5 に示すように内円からの距離であり次式で計算する。なお、図 5 は入力画像の原点を左上とし、座標を (X, Z) で表している。PAL 画像座標系は原点を取得画像中央とし座標を (x, z) で表している。

$$r = \sqrt{(X - X_C)^2 + (Z - Z_C)^2} - R_I \quad (1)$$

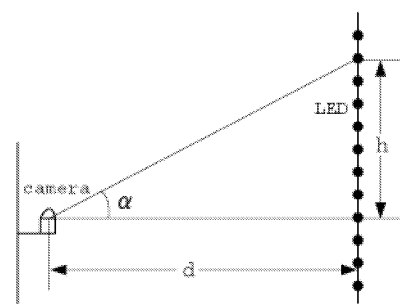


図 4 測定図
Fig. 4 Measurement scheme

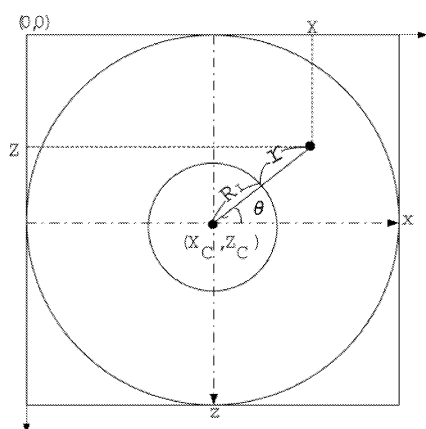


図 5 PAL 画像の座標系
Fig. 5 Coordinates of PAL image

ここに、 (X_C, Z_C) は入力画像の中心座標であり PAL 座標系の原点となる。 R_f は内円の半径である。以降、図 5 に示すように、PAL 画像座標系は中心を原点とし、横方向に x 軸、縦方向（下向き）に z 軸をとって表す。図 5 中の θ は方位角である。

5 回の実験の結果、写像位置 r と仰角 α との関係は、図 6 のグラフ（黒丸）となった。図 6 では横軸は写像位置であり、内円側が 0、外円側が 400(pixel) となっている。縦軸は仰角 α (度) である。なお、当研究室では 2 つの PAL レンズを所有しているが両レンズともほぼ同じグラフになったので、2 つのレンズのデータを用いて最小自乗法による 2 次関数近似により式 (2) を求めた。そのグラフを図 6 中に実線で重ねて表した。

$$\alpha = 0.0000882r^2 - 0.182r + 46.0 \quad (2)$$

2.3 PAL 画像の歪の補正

これまでに 1 枚の PAL 画像の歪を補正する方法として [7] が提案されている。これは PAL 以外の広角

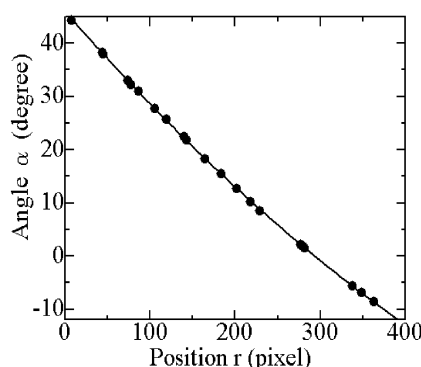


図 6 写像位置と仰角の関係
Fig. 6 Elevation angle and mapping position

レンズにも応用できる点は利点であるが、ニューラルネットの学習が必要である。ここでは円筒上へ写像する標準的な方法 [8] を採用した。

1 枚の PAL 画像から歪のない画像を得るためには、基本的に PAL へ入射した光路と同じ光路を逆方向に投射しスクリーンに写せばよい。しかし、直接スクリーンに投射すると方位角が変わるたびに非線形計算をしなければならないので実時間で視方向を変えて表示することが困難である。そこで、予め式 (2) の関係を使って図 7 のように円筒上に投射しておき、その後透視投影によりスクリーンに写すことで視方向を変えても実時間で歪みのない画像を見ることが出来る。図 8(a) の画像は図 3 の画像の一部であり、歪が補正されていることが分かる。図 8(b) は式 (2) の 2 次の係数を 0 とした場合の画像であり、わずかに歪んでいる様子が分かる。ゆえに、式 (2) が PAL レンズの光学特性を正確に表していることが分かる。

3. 3次元情報の取得

3.1 ステレオ PAL 画像

PAL を装着した 2 台のカメラで撮影したステレオ画像のことをステレオ PAL 画像と呼ぶことにする。前述のように本研究では同一直線上に上下に 2 台のカメラを配置した。上下配置によるステレオ PAL ではお互いのカメラが死角に入るが、下画像では上カメラを支えるための支柱が写る。

距離の測定法を図 9 に示す。PAL 画像中の写像位置から式 (2) を用いて仰角 α, β を求め、式 (3) に従って三角測量により水平距離 d を計算することができる。

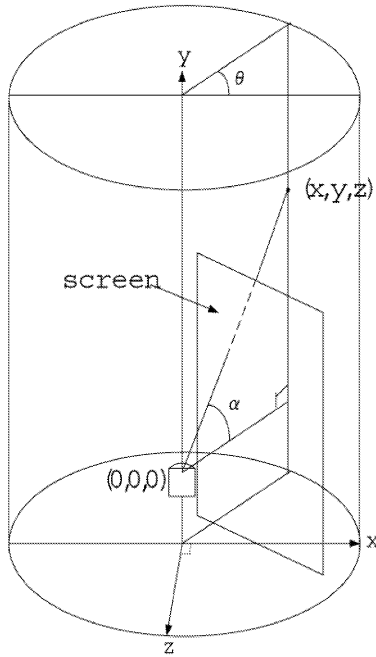


図7 円筒座標系への変換
Fig.7 Cylindrical coordinate

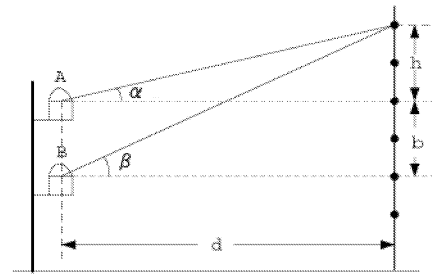


図9 シミュレーションによる距離測定
Fig.9 Simulation scheme

$\tan \beta = (h + b)/d$ である。さらに、求められた水平距離 d と上カメラから見た仰角 α 、そして方位角 θ を用いることにより 3次元位置を次の式 (4) で計算することができる。

$$\begin{aligned} x &= d \times \cos \theta \\ y &= d \times \tan \alpha \\ z &= -d \times \sin \theta \end{aligned} \quad (4)$$

3.2 測定距離の精度

次に、この方法による測定距離の精度をシミュレーションにより検証する。シミュレーションでは図9中のカメラ A を原点とし、2つの PAL は同じ特性をもつものとして、PAL 画像の標本化による誤差の影響を調べた。すなわちまず方位角 $\theta = 0$ 度上に観測点を決め、そのときの2つのカメラから見たそれぞれの仰角を計算する。次に2つの PAL 画像上に像を結び位置を式 (2) により逆算する。これは通常実数値になるので、小数第一位を四捨五入して整数化 (標本化) し、これらの2つの座標値を使って再度距離計算する。これにより実際の距離との誤差が計算できる。観測点は原点からの垂直距離 h として $1m, 0.5m, 0m, -0.15m, -0.3m, -0.7m$ の6点に設定した。カメラ A, B 間の距離を $0.3m$ とし、カメラからの水平距離として $2m$ おきに $100m$ まで計算した結果を図 10(a)(b)(c) に示す。(a) は $h = 1, 0.5$ のグラフ、(b) は $h = 0, -0.15$ 、(c) は $h = -0.3, -0.7$ のグラフであり、見易さのため3つに分けた。図中の横軸は実際の距離、縦軸は実際の距離と測定距離との差であり、両軸の数値の単位は m である。図より $20m$ あたりから急激に誤差が増加する様子が見える。三角波のように誤差が上下する原因は写像された整数座標の1画素の増減がここで生じたことを表している。

また、図 11 はカメラ間距離に対して、誤差が 10%を



(a) Distortion free image

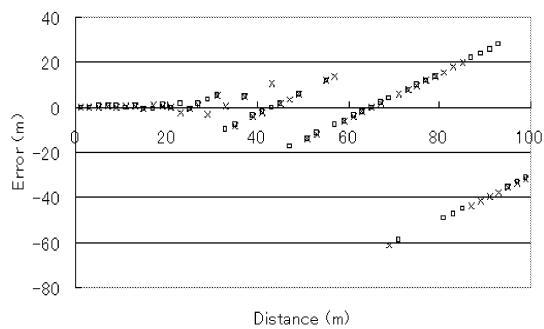


(b) Correction by a linear function

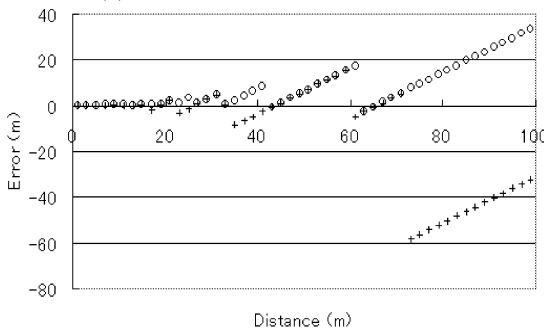
図8 歪補正された画像 (図3の一部)
Fig.8 Corrected view(a part of Fig.3)

$$d = \frac{b}{\tan \beta - \tan \alpha} \quad (3)$$

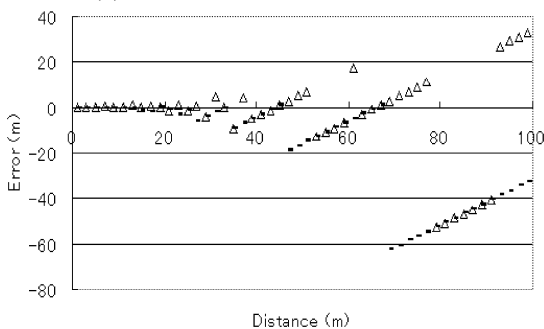
ここに、 b はカメラ間距離であり、 $\tan \alpha = h/d$,



(a) Measurement error for $h = 1.0, 0.5$



(b) Measurement error for $h = 0, -0.15$



(c) Measurement error for $h = -0.3, -0.7$

図 10 距離の測定誤差
Fig. 10 Measurement error

超える観測点距離を表している。カメラ間距離は 0.2m, 0.3m, 0.4m, 0.5m とした。カメラ間距離を大きくするにしたがって精度は上がるが, PAL の特性から当然カメラ近傍が測定範囲外になることは避けられない。

さらなる精度向上の方策としては, CCD を高解像度化, サブピクセルでのマッチング, またはカメラ 3

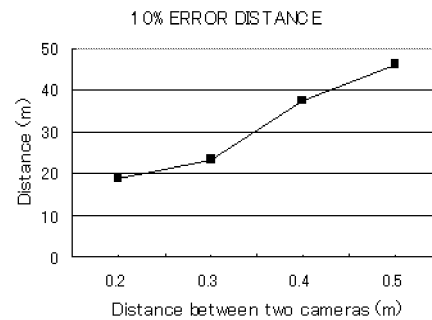


図 11 10%誤差とカメラ間距離
Fig. 11 10% error vs. distance between two cameras

台以上を光軸上に配置し画像を取得し, 距離推定精度を上げる方法が考えられる。これらは今後の課題とする。

4. 実験結果および考察

4.1 対応点探索

本節ではステレオ PAL 画像を用いて DP (ダイナミックプログラミング) による対応付けを試みる。DP マッチングは, 波形の伸び縮みに適した非線形マッチング手法である。DP を用いる理由は, 画像中に壁など濃度値が平坦な部分が多く存在するので, これらに対応付ける必要があるためである。

ステレオ PAL 画像の対応点の探索範囲は, エピ極面上のラインとなる。また, 下のカメラで撮影した写像位置は, 上のカメラで撮影した写像位置より通常は内円側となる。この関係により, 上 PAL 画像の対応点を下 PAL 画像から探索する場合の探索範囲は, 同一方位角のライン上の上画像の写像位置から内円までの範囲となる。本研究では探索方法に DP マッチングを用い, 探索は内円側から行った。DP マッチングで用いる評価式は次のように定義した。

今, 上カメラから取得した PAL 画像のエピ極線上の濃度値関数を $f_1^K(i)$, 下カメラの濃度値関数を $f_2^K(j)$ とする (図 12)。ここに, $K \in \{R, G, B\}$ である。次の式 (5) で対応点 (i, j) の評価値 g を計算する。

$$g(i, j) = F_1 + F_2 + F_3 \quad (5)$$

ただし, F_1, F_2, F_3 は次式とした。

$$F_1 = \max_K [f_1^K(i) - f_2^K(j)]^2$$

$$F_2 = \max_K [(f_1^K(i+1) - f_1^K(i))$$

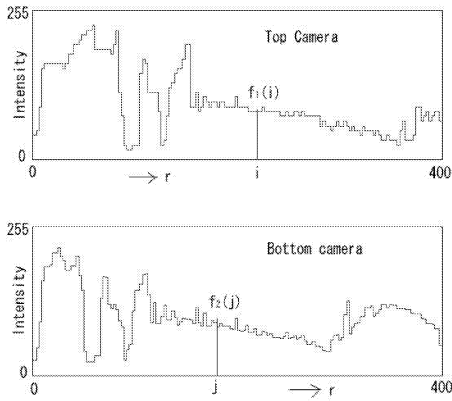


図 12 上下画像のエピ極線上の波形
Fig. 12 Intensity functions on an epi-polar line

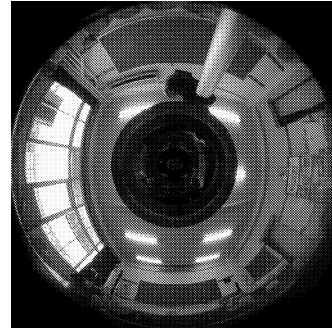
$$F_3 = \min_s [g(i-1, s) + \max_K [(f_1^K(i) - f_1^K(i-1)) - (f_2^K(j) - f_2^K(s))]^2 + ((j-s-1) \times 10)^2]$$

ここに、 F_1 は対応画素における R, G, B で最大の濃度差、 F_2 は隣接画素値の差の違いを表し、 F_3 は $i-1$ における評価値と形状差とパネ項の和である。パネ項により特徴のない波形部分の線形な対応付けが可能になる。

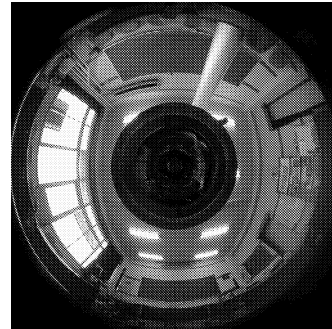
次に、画像全体をマッチングするため、内円の円周の画素ごとに、その方位角の同一ライン上でマッチングを行った。このように DP マッチングを全 PAL 画像上で行ったが、テクスチャが変化する境界付近で大きなマッチング誤差が生じた。このことは本実験では上下 2 つのカメラの光軸をレーザー光により一致させてはいるが、上下のカメラにわずかなねじれ（方位角のずれ）が生じたためと考えられる。そこで、上カメラの PAL 画像のある方位角のラインに対し、下カメラ画像の外円の円周の画素に沿う形で 1 画素ずつ角度をずらし、複数のラインとでマッチングを行った。実際には上画像の 1 つのラインに対し、下画像の合計 7 つのラインとのマッチングを行い、評価値が最小となるラインとのマッチング結果を採用した。その結果、テクスチャの境界付近でのマッチング誤差を小さくすることができた。

4.2 実験

本実験では、カメラ間距離を 0.3m とし、2 台のデジタルスチールカメラ (NIKON COOLPIX900) を



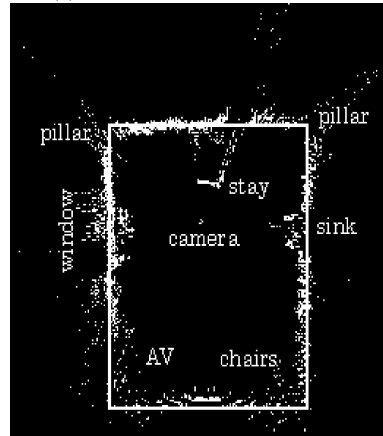
(a) Top camera image



(b) Bottom camera image



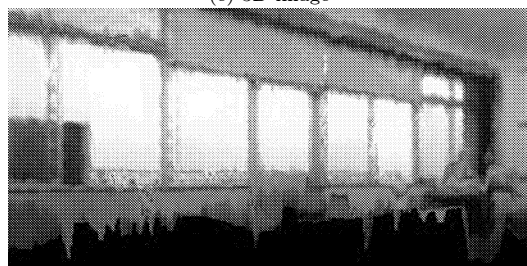
(c) Perspective projection image



(d) Distance image



(e) 3D image



(f) Displacement of the view point

図 13 3次元情報の取得例
Fig. 13 Example of 3D data

用い、横 1300 画素、縦 1300 画素、24 ビット RGB の PAL 画像を取得した。DP マッチングでは 1 ラインにつき 398 画素、ラインの本数は 1570 本となり、624,860 点の 3 次元情報を取得した。これを元に 3 次元処理を行い透視投影により得られる画像は、2.3 で述べた歪の補正処理をした画像とほぼ同じ画像になる。

図 13 は約 6m × 8m の部屋において、壁から約 2.5m のところにカメラを置いて撮影した結果である。(a)(b) のステレオ PAL 画像から取得した 3 次元情報を元に透視投影により表示した画像を (c) に示す。(c) の画像では歪がほとんど見られない。また、カメラと同じ高さ付近の断面を真下から見た図(横幅 11m)を (d) に示す。真下から見た図にした理由は図 (a), (b) の見え方と同じ位置関係にするためである。(d) では、カメラの高さから上方 1m、下方 0.5 m の範囲内のカメラからの距離データが表示されており、中央の小さな点がカメラの位置を、その上近傍の短い線分はカメラの支柱を示している。(d) には部屋の輪郭とノイズの原因となる主要な要素を重ねて示した。図より、カメラに近い部分は遠い部分より精度よく求められていることが分かる。しかし、窓 (window) の部分はガラスの影響でノイズが多く、さらに部屋の角の部分は天井から床までが全て柱 (pillar) なので特徴となる要素がなく、DP による誤対応の影響で大きなノイズとなっ

ている。これは本実験で用いた DP が 1 ラインごとのマッチングを行っているためであり、隣接ラインで求めた結果を利用することで少しは誤差を防げるのではないかと考えている。また、右壁にある洗面台 (sink)、下方の両角付近には AV 機器 (AV) や机・椅子 (chair) などが置いてあるため距離値を散乱させる要因となっている。

次に、視点を変えることにより見え方が変化することを示し、3 次元画像であることを示す。(e) は窓側の情景であるが、(f) のように視点を下げることにより窓の外の建物が隠れる様子が伺える。このとき図 (d) に示した放射状ノイズにより画像上のノイズがより目立つようになる。なお、(c)(e)(f) では測定データは実際にはメッシュ状に求められており、データの無い座標では近傍のデータから線形補間によりその値を求めた。

本実験で使用した PC の CPU は 1.1GHz の Celeron、主記憶は 512MB であり、1300 × 1300 の 2 枚の PAL 画像で対応付けに要した時間は 73 秒であった。

5. あとがき

本論文では、全方位レンズの一種である PAL (Panoramic Annular Lens) の特性を明らかにした。まず、入射角 (仰角) と写像位置の関係を実験により求めた。この関係を用いて PAL を装着した 1 台のカメラから得られたドーナツ状の画像 (PAL 画像) から円筒座標への変換により歪のない画像が得られることを示した。次に、同一光軸上に配置された 2 台のカメラを用いて取得した 2 つの PAL 画像を使った距離測定の精度についてシミュレーションにより検討した。その結果、カメラ間距離 30cm では 20m 以内であれば、原理的にほぼ 10 パーセント以下の誤差で測定可能であり、それ以上になると急激に誤差が増加することを明らかにした。このように PAL は遠方の情景を測定する目的には適していないが、取り扱いが容易なため近傍を測定または観測するポータブルな用途に適していると言える。

3 次元再構成においては DP マッチングの際に特徴の得にくい点での対応付けに課題を残した。今後は更なる精度向上と、対応付け手法の改善について研究を進める予定である。

文 献

- [1] Y. Yagi; "Omnidirectional sensing and its application", IEICE Trans. Inform. and Systems, Vol.3,

- pp.568-579, 1999.
- [2] P. Greguss; "PAL-optic based instruments for space research and robotics", Laser and Optoelektronik, Vol.28, pp43-49, 1996.
 - [3] 山澤 一誠, 八木 康史, 谷内田 正彦; "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ー", 電子情報通信学会論文誌, D-II, Vol.J79-D-II, No.5, pp.698-707, 1996.
 - [4] 金谷 典武, 白井 良明; "全方位視覚センサーを利用したステレオ視", 信学技報, PRMU200-69, pp.57-62, 2000.
 - [5] 茶園 篤, 山澤 一誠, 横矢 直和, 竹村 治雄; "全方位ステレオ視による 3 次元情報の獲得", 映像情報メディア学会誌, Vol.51, No.10, pp.1745-1753, 1997.
 - [6] 山口 晃一郎, 山澤 一誠, 竹村 治雄, 横矢 直和; "全方位動画像を用いた両眼ステレオ画像の実時間生成によるテレプレゼンス", 電子情報通信学会論文誌, D-II, Vol.J84-D-II, No.9, pp.2048-2057, 2001.
 - [7] F. Ekpar, H.Hase, M.Yoneda; "Constructing Arbitrary Perspective-Corrected Views From Panoramic Images Using Neural Networks", Proceeding of the 7th International Conference on Neural Information Processing, pp.156-160, 2000.
 - [8] 山下 敏行, 山澤 一誠, 竹村 治雄, 横矢 直和; "複数の全方位画像センサを用いたステレオ視による 3 次元モデルの作成", 信学技報, PRMU99-267, pp.43-48, 1999.

(平成 x 年 xx 月 xx 日受付)



フランク・エクパール

1998 ブダペスト工科大学コンピュータエンジニアリング学科卒。2001 富山大学大学院理工学研究科博士前期課程了。現在後期課程在学中。画像処理, 人工知能, ニューラルネットワーク等の研究に従事。



米田 政明 (正員)

1967 東北大・工・通信卒。1972 同大学院博士課程了。同年, 富山大・工・講師。現在, 同教授。この間, オートマトン・言語理論, 文字認識・文書画像理解等の研究に従事。工博。著書「計算機科学の基礎」(森北出版)。情報処理学会, 人工知能学会

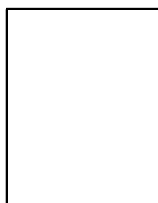
各会員。



加藤ジェーン (正員)

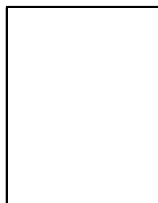
1990 年名古屋大学大学院工学研究科情報工学専攻博士前期課程修了。1993 年同専攻博士後期課程修了。同年富山大学工学部助手。1999 年オックスフォード大学客員研究員。2000 年名古屋大学大学院工学研究科助教授。工学博士。文書画像理解、

パターン認識、コンピュータビジョンなどの研究に従事。情報処理学会、電子情報通信学会、IEEE 各会員。



長谷 博行 (正員)

1971 年富山大・工・電気卒。同年(株)ゼネラル入社。1975 年富山大・工・技官。現在知能情報工学科助教授。共著書「画像処理工学」(共立出版)。最近はカラー文書画像処理の研究でコンコルディア大学 CENPARMI 客員研究員(2002 年), その他動画画像処理, 顔画像解析等の研究に従事。情報処理学会, 映像情報メディア学会, 画像電子学会, IEEE Computer Society 各会員。工博。



河合 宏文 (正員)

2000 富山大学工学部電子情報工学科卒。2002 同大学院理工学研究科博士前期課程了。同年東芝(株)入社。現在ソフトウェアの設計・開発に従事。