透明板に映る2重像を用いた1台のカメラによる距離計測手法

清水雅夫,奥富正敏,

本論文では、両面が平行平面で構成される透明板に映る2重像を1台のカメラで撮影した1枚の 画像を使った、距離計測手法を提案する.透明板に入射する光線は、透明板表面の反射光と透過光と に分かれる.この透過光は透明板の裏面に到達するが、裏面で一部が反射し、再び表面を透過する. したがって、透明板に映る像は、位置ずれのある2重像として観測できる.この2重像は、小さな ベースラインを持つステレオ画像が重なって撮影された画像と考えることができる.そこで、この2 重像間の変位拘束を導き、変位拘束に沿って画像の自己相関極大位置を探索することで2重像間の 変位を計測すれば、この変位に対応して対象との距離を求めることができる.透明アクリル板を使っ た実験装置で撮影した画像により、透明アクリル板の平行度とカメラとの位置関係に関するキャリプ レーションを行った.実画像を使った実験を行い、提案した距離計測手法によって実際に距離計測が 可能なことを示した.

Single-image Depth Estimation Method Using a Transparent Plate

MASAO SHIMIZU[†] and MASATOSHI OKUTOMI[†]

This paper proposes a novel single-camera depth estimation method using images reflected by a single transparent parallel planar plate. The transparent plate reflects and transmits the incident light on its surface. The transmitted light is then reflected on the rear-surface and is transmitted again to the air through the surface. These two light paths create an overlapped image that comprises two shifted images. The overlapped image is considered as a stereo image obtained from a narrow baseline stereo. The constraint of these stereo images is presented. The range to the object can be derived by finding correspondences on the constraint lines using the autocorrelation function of the overlapped image. This paper presents experimental results obtained using an actual system with a transparent acrylic plate.

1. はじめに

ステレオ距離計測は,受動的検出だけを利用した 距離計測手法 として古くから利用されてきた.コン ピュータビジョン分野では3次元幾何学が解析され, この結果を基に多くのバリエーションが提案されてき た.マルチカメラ⁸⁾ やマルチベースライン¹¹⁾は,シ ステムのコストがあまり問題にならない場合には,対 応付けの曖昧さを大きく減少する手法として有効であ る.最近では,ITS分野での交通計測¹⁴⁾ や歩行者検 出⁶⁾,セキュリティ分野でのセンサとしても利用され るようになり,計測精度,信頼性,ロバスト性だけで なく,コスト面での考慮が必要になってきた.

画像処理におけるコストは,使用するカメラ台数が 多くなるほど高くなる.このときのコストは,カメラ と撮影レンズだけではなく,画像キャプチャや画像処 理で必要とするメモリや計算量に対しても必要になる. このため,1台のカメラによるステレオ距離計測手法 が提案されてきた.1台の固定カメラによるステレオ 計測手法は,画像分割法,複数画像法,複数露出法の 3種類に分類できる.

画像分割法は,ミラ-^{5),12)} やプリズム⁹⁾ を利用し て画像を複数の領域に分割することで,位置や向きが 異なる複数のカメラで撮影した画像を1枚の画像に映 し込む手法である.この手法では,カメラ間での画像 濃度やコントラスト,色彩などの差がない.また,時 間的に完全に同期した複数の画像を利用するので,動 的な対象にも適用でき,リアルタイムアプリケーショ ンにも応用できる.しかし,1台のカメラの画素数を 分割利用するため,計測精度は低下する.また,カメ

[†] 東京工業大学大学院理工学研究科機械制御システム専攻 Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology

² 台のカメラの片方を投光器に置き換えたアクティブステレオ 法や,レーザレンジファインダも多く利用されている.しかし, これらの手法は大がかりな装置が必要で高価なシステムになる ため,本論文では受動的検出だけを利用した手法に限定して議 論する.

July 2006

ラの外部パラメータのキャリブレーションは,複数台 のカメラを利用したステレオ計測と同様に行う必要が ある.

複数画像法は,光学的な機構を利用してカメラの位 置を等価的に移動しながら複数枚の画像を撮影し,対 象までの距離を推定する手法である.カメラ光軸上に 配置した平行平面透明板の光軸に対する角度を変更す る¹⁰⁾ことや,透明板の角度は一定のままでカメラ光 軸に沿って回転する⁴⁾ことで,カメラ位置の精密な平 行移動を実現している.カメラは平行移動するため, 外部パラメータを推定する必要はなく,距離計算が容 易である.しかし,複数画像を撮影した後に対象まで の距離を求めるため,原理的に動物体に対応できない. また,比較的簡単とはいえ,透明板の角度を変更する ための機構が必要なため,コスト的に不利になる.

複数露出法は,単一レンズの開口^{1),2)}や,符号化開 口^{7),13),15)}を利用し,異なる位置を通過する光線を1 枚の画像に撮影して距離情報を得る手法である.また, レンズアレイ¹⁶⁾を使用する手法も提案されている.こ の手法では,複数の開口を設けるために光量に対する 使用効率が低下する.また,レンズ開口でベースライ ン長が制限される.レンズアレイを使用する手法では, 対応点探索の曖昧さに起因する計測精度の低さが問題 となる.

本論文では,両面が平行平面で構成される透明板に 映る2重像を1台のカメラで撮影した1枚の画像を 使った,距離計測手法を提案する.透明板に入射する 光線は,透明板表面の反射光(表面反射像 Is と呼ぶ) と透過光とに分かれる.この透過光は透明板の裏面に 到達するが,裏面で一部が反射し,再び表面を透過す る(裏面反射像 I_r と呼ぶ).したがって,平行平面透 明板に映る像は,位置ずれのある2重像として観測で きる.この2重像は,小さなベースラインを持つステ レオ画像が重なって撮影された画像と考えることがで きる.提案手法の基本的な構成を図1(a)に,2重像 の例を図1(b) に示す.2重像間の変位拘束は,透明 板とカメラとの位置関係から幾何学的に導くことがで きる.変位拘束に沿って画像の自己相関極大位置を探 索することで2重像間の変位を計測すれば,この変位 に対応して対象との距離を求めることができる.

本論文は,以下のように構成する.2章では,平行 平面透明板に映る2重像の性質を示す.2重像間の角 度視差と対象との距離の関係,変位方向拘束,画像の 自己相関の極大位置を探索することによる変位の検出, などの提案手法で利用する基本的な性質を説明する. 3章では,透明板を使った距離計測装置を実際に構成





Fig. 1 Basic configuration of the proposed method using a transparent parallel planar plate and an example image.

するときに考慮する必要がある,透明板の平行度やカ メラとの位置に関するパラメータのキャリプレーショ ン方法について述べる.4章では,実画像を使った実 験を行い,提案した距離計測手法によって実際に距離 計測が可能なことを示す.

2. 平行平面透明板に映る2重像の性質

2.1 2 重像間の角度視差と対象までの距離

図2に示すように,表面反射像 *I_s* と裏面反射像 *I_r* との間の角度視差 θ_s は,空気に対する透明板の相対 屈折率 n と厚さ d,カメラ光軸と透明板とのなす角度 θ_i,および対象までの距離 *D_o*によって変化する.説 明を簡単にするために,物体中の1点を対象とする. 対象とカメラ光学中心,および透明板の法線ベクトル を通る平面上での光線を考えることで,像間の角度視 差と対象までの距離の基本的な関係を説明する.この 平面は透明板の法線ベクトルを含むので,対象から来 る光線の反射や屈折は,この平面上で記述することが できる.

対象からの光線が透明板上で反射する位置を原点と する座標系 (ξ, v) を設定する.対象の位置とカメラ光 学中心位置はそれぞれ $(-D_o \sin \theta_i, D_o \cos \theta_i)$ および $(D_c \sin \theta_i, D_c \cos \theta_i)$ となるので,透明板表面反射と 裏面反射に関してこれらの位置を ξ 軸上に投影する ことで,次の関係を得る.

$$D_{o} \sin \theta_{i} + D_{c} \sin \theta_{i}$$

$$= D_{o} \cos \theta_{i} \tan(\theta_{i} - \theta_{s}) + D_{c} \cos \theta_{i} \tan(\theta_{i} - \theta_{s})$$

$$+ 2d \frac{\sin(\theta_{i} - \theta_{s})}{\sqrt{n^{2} - \sin^{2}(\theta_{i} - \theta_{s})}}$$
(1)

カメラ光学中心から対象までの距離でまとめると, 次式を得る. Vol. 47 No. SIG 10(CVIM 15)









$$D_o + D_c = d \frac{\sin\left(2\left(\theta_i - \theta_s\right)\right)}{\sin\theta_s \sqrt{n^2 - \sin^2\left(\theta_i - \theta_s\right)}} \quad (2)$$

式 (2) から、2 重像間の角度視差 θ_s の最大値と最小 値を求めることができる. $D_o = 0$ のとき、すなわち 対象が透明板に接触するまで近距離になったときに θ_s は最大値をとる、後述する実験条件($D_c = 60$ [mm], n = 1.49(透明アクリル),d = 10 [mm])では、 θ_s の 最大値は約8[度]である、画像上での探索範囲は、この 角度に対応する変位までを考慮する、また、 $D_o = \infty$ のとき、すなわち対象が無限遠方にあるときに θ_s は 最小値0をとる、ただしこれは、透明板が完全な平行 平面のときのものである、次章で述べる距離計測装置 構成では、透明板の平行度も考慮した検討を行う、

図3に示すように,表面反射像 *I*_s と裏面反射像 *I*_r は,小さなベースラインを持つステレオ画像と考える こともできる.対象が無限遠方にあるとき,このベー スライン長は次のように計算できる.

$$base = d \frac{\sin(2\theta_i)}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_i}} \tag{3}$$



図 4 入射角度に対する (a) ベースライン長と (b) オフセット Fig. 4 (a) Base length and (b) offset for the incident angle.



図 5 透明板での表面反射と裏面反射

Fig. 5 Surface reflection and rear-surface reflection on a transparent plate.

また,このときのステレオ配置は,表面反射像 *I*s を撮影するカメラの方が対象に近くなるように前後に オフセットしている.このオフセット長は,次のよう に計算できる.

$$offset = 2d \frac{n - \sin^2 \theta_i}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_i}} \tag{4}$$

具体的には,n = 1.49(透明アクリル),d = 10 [mm], $\theta_i = 45 \text{ [度]}$ のとき,base = 7.6 [mm], offset = 15.1 [mm] である.図4に,n = 1.00(真空 や空気),n = 1.49(透明アクリル,ガラス),n = 2.42(ダイヤモンド)のときの,入射角度に対するペース ライン長とオフセットを示す.それぞれに透明板の板 厚 dを乗じることで,実際の長さを求めることがで きる.

2.2 透明板の反射率

本節では,透明板表面反射像と裏面反射像の明るさ の関係を示す.各反射像の明るさは,透明板における 反射率と透過率で表すことができる.ただし,透明板 の内部吸収率は0とした.また,後述する実験では, 透明板の裏面と側面からの入射光を避けるため,黒色 の画用紙で遮光した.

図5に示すように,対象からの光線が空気中を通り

透明板表面に到達するとき(同図中の(1)), 透明板表面での反射率 $k_r^{(1)}$ は次のフレネルの公式で表すことができる .

$$k_r^{(1)} = \frac{1}{2} \left[\frac{\sin^2(\theta_i - \theta_t)}{\sin^2(\theta_i + \theta_t)} + \frac{\tan^2(\theta_i - \theta_t)}{\tan^2(\theta_i + \theta_t)} \right]$$
(5)
$$\sin \theta_i = n \sin \theta_t$$

ただし, θ_i と θ_t は入射角と屈折角である.透過率 $k_t^{(1)}$ は, $k_t^{(1)} = 1 - k_r^{(1)}$ である.

次に光線が透明板の裏面に到達するとき(同図中の (2)), 透明板内部への反射率 $k_r^{(2)}$ は同様に次のよう に表すことができる.

$$k_r^{(2)} = \frac{1}{2} \left[\frac{\sin^2(\theta_t - \theta_i)}{\sin^2(\theta_t + \theta_i)} + \frac{\tan^2(\theta_t - \theta_i)}{\tan^2(\theta_t + \theta_i)} \right] = k_r^{(1)}$$
(6)

さらに,裏面で反射した光線が透明板内部から表面 に到達するとき(同図中の(3)),透明板内部への反射 率 $k_r^{(3)}$ は次のようになる.

$$k_r^{(3)} = \frac{1}{2} \left[\frac{\sin^2(\theta_t - \theta_i)}{\sin^2(\theta_t + \theta_i)} + \frac{\tan^2(\theta_t - \theta_i)}{\tan^2(\theta_t + \theta_i)} \right] = k_r^{(1)}$$
(7)

透明板から空気中への透過率 $k_t^{(3)}$ は , $k_t^{(3)} = 1 - k_r^{(3)}$ である .

したがって,裏面反射像の合成反射率 K_t は,次の ようになる.

$$K_t = k_t^{(1)} k_r^{(2)} k_t^{(3)} = (1 - k_r^{(1)})^2 k_r^{(1)}$$
(8)

図 6 に,入射角度に対する,透明板表面での反射率 $k_r^{(1)}$ と,裏面反射像の合成反射率 K_t を示す.

次章で示すように,透明板への入射角 θ_i の範囲は, 撮影レンズ画角と透明板取り付け角度によって異なるが,後述する実験条件のときには約 $30 \le \theta_i \le 60$ [度]の範囲になる.この範囲では,式(6)および式(8)よ



図 6 入射角度に対する透明板表面での反射率と裏面反射像の合成 反射率

Fig. 6 Reflectance for the surface and rear-surface reflection.

ここでは, 各偏光成分に対する反射率の平均として反射率を計 算している.

リ, $0.040 \le k_r^{(1)} \le 0.088$, $0.037 \le K_t \le 0.073$ であ リ, 表面反射像と裏面反射像の明るさが極端に異なる ことはない.

2.3 2重像間の変位方向拘束

2.1 節で示したように,対象中の1点に対する2重 像間の変位は,図2のように透明板の法線ベクトルを 含む平面上での反射と屈折として表すことができる. この平面を,拘束平面と呼ぶことにする.本節では, 透明板からの反射像をカメラで撮影したときに,画像 上の位置に対応する2重像の変位拘束を調べる.

図 7 に示すように,カメラ光学中心をカメラ座標原 点とする座標系を設定する.透明板を,Z軸に垂直な 平面に対して角度 θ_m だけ傾いて配置する.透明板の 法線ベクトル $\mathbf{N_m} = (0, -\sin \theta_m, \cos \theta_m)$ は,関係式 導出における符号の扱いやすさの都合上,裏面向きに 設定している.原点と画像面との距離は,CCDの画 素間隔を単位として計測したレンズ焦点距離 f/δ と する.2 重像の変位拘束は,画像面と拘束平面との交 線で表すことができる.

拘束平面の正規化前の法線ベクトルを, $(c_1, c_2, 1)$ とする.拘束平面の法線ベクトルは,原点から画像面 上の位置 $\mathbf{p}^3 = (u_p, v_p, f/\delta)$ へのベクトルと,透明板 の法線ベクトル \mathbf{N}_m とに直交するので,次のように 内積がともに 0 になる.

$$c_1 u_p + c_2 v_p + f/\delta = 0 \tag{9}$$

$$-c_2\sin\theta_m + \cos\theta_m = 0 \tag{10}$$

したがって,原点を通る拘束平面 $c_1X+c_2Y+Z=0$ と画像面 $Z = f/\delta$ との交線は,画像座標(u,v)を使って次のように表すことができる.

$$v = \left(\frac{v_p}{u_p} + \frac{1}{u_p}\frac{f}{\delta}\tan\theta_m\right)u - \frac{f}{\delta}\tan\theta_m \quad (11)$$

これは、画像座標上の位置 $\mathbf{p} = (u_p, v_p)$ と、1 点 $(0, -\frac{f}{\delta} \tan \theta_m) \equiv \mathbf{e}$ を通る直線を表している、 図 8 に、例として、画像サイズ 1,024 × 768 [画素]、 $f/\delta = 1,070.0591$ 、 $\theta_m = 45$ [度] のときの、画像上の



Fig. 7 The transparent plate and a camera.



図 8 画像上の各位置における拘束直線の方向 Fig.8 Example of the constraint line directions.

各位置に対する拘束直線の方向を示す.矢印の向きは, 裏面反射像に対する表面反射像の向きを表している.

カメラ座標で表した画像上の位置 \mathbf{p}^3 に対応する 2 重像の位置を拘束直線上で探索した結果,位置 \mathbf{p}^3 か ら画素単位で表す符号付き距離 Δ の位置に見つかっ たとする.このとき,2 重像間の角度視差 θ_s は,次 のように求めることができる.

$$\theta_{s} = \cos^{-1} \left(\frac{\mathbf{p}^{3} \cdot \left(\mathbf{p}^{3} + \frac{\mathbf{p}^{3} - \mathbf{e}^{3}}{\|\mathbf{p}^{3} - \mathbf{e}^{3}\|} \Delta \right)}{\|\mathbf{p}^{3}\| \left\|\mathbf{p}^{3} + \frac{\mathbf{p}^{3} - \mathbf{e}^{3}}{\|\mathbf{p}^{3} - \mathbf{e}^{3}\|} \Delta \right\|} \right)$$
(12)

ただし,
$$\mathbf{e}^{\mathbf{3}} = (0, -\frac{f}{\delta} \tan \theta_m, f/\delta)$$
である.
また, θ_i は,次のように求めることができる.

$$\theta_i = \cos^{-1} \left(\frac{\mathbf{p}^3 \cdot \mathbf{N}_m}{\|\mathbf{p}^3\|} \right) \tag{13}$$

2.4 自己相関による対応位置探索

2 重像画像中のある注目位置に対する対応位置は, 拘束直線上を探索すればよいことが分かった.本節で は,拘束直線上の画素値を取り出した1次元関数の自 己相関を使って,対応位置を探索する方法を説明する.

変数 t に対する関数 f(t) の自己相関関数 $R_a(\tau)$ は,次のように定義される.

$$R_a(\tau) = \lim_{T \to \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{T} f(t) f(t-\tau) dt \qquad (14)$$

自己相関関数 $R_a(\tau)$ は, τ に関する偶関数で, $\tau = 0$ で最大値をとる. 関数 f(t) に周期性がないときは,自己相関関数 $R_a(\tau)$ は $\tau = 0$ で極大かつ最大値をとる.

関数 f(t) として,2 重像画像中のある注目位置を通 り,拘束直線上の画素値を取り出した関数を考える.2 重画像間の変位を Δ ,2 重画像を構成する中の1枚の 画像を I(t) とすると,2 重像は $f(t) = I(t) + I(t - \Delta)$ と表すことができる.この f(t)に対する自己相関関





数 $R_a(\tau)$ は,次のようになる.

$$R_{a}(\tau) = \lim_{T \to \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{T} (I(t) + I(t - \Delta)) \\ \times (I(t - \tau) + I(t - \Delta - \tau)) dt \\ = 2 \lim_{T \to \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{T} I(t)I(t - \tau) dt \\ + \lim_{T \to \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{T} I(t)I(t - (\tau + \Delta)) dt \\ + \lim_{T \to \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{T} I(t)I(t - (\tau - \Delta)) dt$$
(15)

つまり,2 重画像の自己相関関数は,I(t)の自己相 関関数の2倍と,I(t)の自己相関関数を $\pm \Delta$ だけシ フトした関数との和になっている.したがって,2重 像画像中のある注目位置に対する対応位置は,拘束直 線上の画素値で構成した関数の自己相関関数を求め, その第2極大位置を探索すればよいことが分かる.

図 9(a) に,注目点 p に対する拘束直線の例を示 す(図中の破線).拘束直線の長さは,探索範囲を示 す.対象までの距離が大きくなると,次第に対応位置 が注目点に近づき, $D_o = \infty$ のときには完全に一致す る.図 9(b) に,2 重像間変位量に対応する自己相関 関数の例を示す.対応点は,この自己相関関数の第2 極大 位置を探索することで求められるが,2 重像間 変位 Δ が小さくなると,すなわち対象までの距離が 大きくなると,第2 極大が分離できなくなることが分 かる.しかし,この問題に関しては,次章で簡単な解 決策を示している.

実際の処理では,式(15)の積分範囲が有限なために $+\Delta$ $<math>-\Delta$ の位置における極大値が正確には等しくならない.しかし 本論文では,この2つの極大をまとめて「第2極大」と呼ぶこ とにする.

3. 距離計測装置構成とキャリブレーション

3.1 装置構成

図 10 に示すように,カメラと透明板を配置した. カメラには,市販のディジタルカメラを利用した.キャ リプレーションによって求めたレンズ焦点距離と画素 数を使って,水平画角 $FOV_h = 52.0$ [度] と垂直画角 $FOV_v = 40.1$ [度] を求め,適切な透明板サイズの選 択と配置に利用した.

透明板には,容易に入手可能な透明アクリル板 (100×100 [mm],板厚10 [mm])を使用した.透明板 取付角度は, $\theta_m = 45$ [度]である.透明板への入射角 度は,画像上の位置に応じて異なるが,約25~65 [度] の範囲になる.透明板の裏面と側面からの入射光を避 けるため,黒色の画用紙で遮光した.また,カメラ光 学中心から光軸と透明板との交点位置までの距離は, $D_c = 60$ [mm]である.

3.2 カメラ内部パラメータ

カメラ内部パラメータは,公開されているキャリブ レーションツール³⁾を使って求めた.図11に,キャ リプレーションに利用した画像の一例を示す.このよ



図 10 透明板とカメラの配置

Fig. 10 Configuration of the transparent plate and the camera.



図 11 キャリブレーション画像の例

Fig. 11 Image example for the intrinsic camera parameter calibration.

うな画像を 18 枚使ってキャリブレーションを行った.

カメラの画素数は 2,048 × 1,536 [画素] だが,計算時 間短縮のためバイキュービック補間によって 1,024 × 768 [画素] に縮小した.キャリプレーションによって 求めたパラメータは, CCD 画素間隔で測ったレンズ 焦点距離 $f/\delta = 1,070.0591$ と画像中心 $(c_u, c_v) =$ (-7.8384, -12.7181) である.同時に得られる歪曲収 差パラメータを使って,画像から歪曲収差を取り除いた.

3.3 透明板の平行度

透明アクリル板 は完全な平行板のように思えるが, 厳密には平行ではない.本節では,まず,図2の拘 束平面上で透明板の非平行度の影響を調べる.次に, 図10に示す構成で撮影した2重像を利用して,透明 板の非平行度を求める方法を示す.最後に,透明板の 非平行度によって,どのような直線上で対応点探索を 行うべきかを示す.

3.3.1 非平行度の影響

図 12 に示すように,図2と同様な拘束平面上での 光線の反射と屈折に影響する非平行度として,角度 θ_p を考える.このとき,式(1)と同様に,次式を得る.

 $D_{o} \sin \theta_{i} + D_{c} \sin \theta_{i}$ = $D_{o} \cos \theta_{i} \tan \theta_{o} + d \tan(\theta_{t} + 2\theta_{p})$ + $d \tan \theta_{t} + D_{c} \cos \theta_{i} \tan(\theta_{i} - \theta_{s})$ (16)

ただし,透明板の厚さ d は一定と近似している .カ





押し出し製法とキャスト製法があるが,キャスト製法による透明 アクリル板を使用して検討した.押し出し製法によるアクリル板 は,キャスト製法のものと比較して平行度が高い可能性がある. 非平行度があるために,厳密には一定ではない.画像上の位置に 応じて対応する透明板の板厚が異なるため,画像上の位置に応じ た距離計測誤差を生じる.式(17)から,板厚と対象までの距離 とは1次式の関係にある.実験に使用した市販のキャスト製法に よるアクリル板(板厚10[mm])の板厚差は,100×100[mm] の四隅において約0.1[mm]であった.このため,透明板の厚 さを一定と近似することによって,約1/100の誤差を生じてい るが,2 重像間変位の推定誤差と比較して小さいと考えられる.



図 13 2 重像間の角度視差と対象までの距離 Fig. 13 Object distance for the angle disparity.

メラ光学中心から対象までの距離でまとめると,次式 を得る.

$$D_{o} + D_{c}$$

$$= d \frac{\tan(\theta_{t} + 2\theta_{p}) + \tan\theta_{t}}{\sin\theta_{i} - \cos\theta_{i}\tan\theta_{o}}$$

$$+ D_{c} \frac{\cos\theta_{i}(\tan(\theta_{i} - \theta_{s}) - \tan\theta_{o})}{\sin\theta_{i} - \cos\theta_{i}\tan\theta} \quad (17)$$

このとき,右辺第2項には距離 D_c を含むので,計測 装置を構成する前にあらかじめ測定する必要がある. また, θ_o と θ_t は図12に示すように,それぞれ次の 角度である.

$$\theta_o = \sin^{-1} \left(n \sin(\theta_t + 2\theta_p) \right) \tag{18}$$

$$\theta_t = \sin^{-1} \left(\frac{1}{n} \sin(\theta_i - \theta_s) \right) \tag{19}$$

図 13 に, $\theta_p = 0$ [度] (完全な平行板のとき)と $\theta_p = 0.058$ [度] に対する, 2 重像間の角度視差 θ_s と カメラと対象間の距離 $D_o + D_c$ の関係を示す. $\theta_p > 0$ のとき,対象の距離が大きくなるにつれて角度視差 θ_s は小さくなるが,一定の角度 θ_s^* より小さくならず, 2 重像が重なることはない.この性質によって,2 重像 の自己相関を利用した対応位置探索において,第2極 大位置を効果的に分離できる.

3.3.2 非平行度の推定

対象が無限遠方にあるときには,式(17)の分母が 0になる.

$$\sin\theta_i - \cos\theta_i \tan\theta_o = 0 \tag{20}$$

式 (18) と式 (19) を式 (20) に代入することで,次の無限遠方距離に対応する角度視差 θ_s^* と非平行度 θ_p の関係を得る.

$$\theta_p = \frac{1}{2} \left(\sin^{-1} \left(\frac{1}{n} \sin \theta_i \right) - \sin^{-1} \left(\frac{1}{n} \sin(\theta_i - \theta_s^*) \right) \right)$$
(21)

式 (21) には入射角度 θ_i を含むが, θ_i の変化に対 する影響は比較的小さい.式 (21)の関係を使えば,



図 14 (a) に示すような無限遠方と見なせる対象を撮 影した 2 重像を使って,次のように非平行度を推定で きる.

まず,画像中央部,すなわち $\theta_i \approx 45$ [度]で,2重像間の変位 d*[画素]を求める.2重像間の変位は,画像の2次元自己相関関数から求める.図14(a)に示す,画像の中央部分の大きい方の矩形で囲む部分を使って,2次元自己相関関数を求めた結果を,同図(c),(d)に示す.同図(d)から,第2極大位置は($\pm 1, \mp 4$)である.

自己相関関数からは,表面反射像 *I*_s と裏面反射像 *I*_r との変位関係を求めることはできない.しかし,実 際に透明板の四隅での板厚を測定すれば,図12のよ うに,カメラとの距離が近い側の板厚が小さくなるよ うに透明板を配置することができる.この実験では, 実際にこのように配置した装置を使ったので,変位原 点に対して右下方向の極大位置 d^{*}_sを利用する.

 $\mathbf{d}_{\mathbf{s}}^* = (d_{sh}^*, d_{sv}^*) = (+1, -4) \tag{22}$

次に,図 15 に示すように,透明板の非平行度を,2 つの角度 θ_{ph} および θ_{pv} で表す.キャリプレーション 済みのカメラ内部パラメータ f/δ を使うことで,水 平方向と垂直方向に対応する角度視差 θ_{sh}^* と θ_{sv}^* を, $\theta_{sh}^* = \tan^{-1}(d_{sh}^*\delta/f)$ のように求めれば,式 (21) か

レンズ光学中心位置は, ノーダルスライド法などで比較的容易 に測定できる.

画像を補間することや自己相関関数を補間することで,サプピ クセル単位での第2極大位置を求めることができる.第2極大 位置をより正確に求めれば,より正確な非平行度を推定できる. しかし,非平行度は式(17)の中で他の角度に加算され,しかも 値自体が小さいことから,さほど高い精度を要求されない.こ のため,この実験では,画素単位で計算した自己相関関数から 最大値位置を探索し,そのまま利用した.







ら θ_{ph} と θ_{pv} を次のように求めることができる. $\theta_{ph} = +0.014$ [度] (23)

$$\theta_{pv} = +0.058 \,[\texttt{B}] \tag{24}$$

3.3.3 非平行度を考慮した対応点探索

透明板が完全な平行板ならば,2 重像上のある注目 点に対する対応点は,図9(a)に示す拘束直線上にあ る.拘束直線上の画素値を補間して取り出して1次元 関数として扱い,この1次元関数の自己相関関数を計 算することで,対象が近距離のときには極大を3個検 出できる.第2極大位置を探索することで対応点を検 出できる.対象の距離が大きくなるにつれて,これら 3個の極大位置は近づき,やがて分離できなくなる. 原理的には,対象が無限遠方にあるときに3個の極大 は1点で一致する.

しかし,透明板に非平行度があるときには,図14(c), (d) に示すように,対象が無限遠方にあるときでも極 大は3個に分離する.この第2極大位置は,図16(a) に示すように,注目点 p に対して2点 $p \pm d_s^*$ を通 る拘束直線に平行な2直線上を移動する.この性質を 利用することで,対象までの距離が大きなときでも, 図9(b)のように第2極大が第1極大に埋もれてしま うことを避けることができる.

なお,前節の説明とは逆に,カメラとの距離が近 い側の板厚が大きくなるように透明板を配置すると, 図 16(b) に示すような2 直線上で対応点を探索する ことになる.この対応点は,自己相関関数の第2 極大 位置を検出することで探索するが,この場合には第1 極大位置の近くで検出する必要があるため,第2 極大



(a) Two constraint lines which give a good selectivity of the second peaks.



(b) Two constraint lines in another plate configuration.

図 16 非平行度を考慮した対応点探索

Fig. 16 Correspondence search with the nonparallelism of the plate.

の分離が困難になる可能性がある.このため,装置を 構成するときには,カメラとの距離が近い側の板厚が 小さくなるように透明板を配置する.

3.4 透明板の取付角度

カメラに対する透明板の取付角度には,2自由度 の不確かさがある.この不確かさによって,2.3 節で 示した拘束直線交点位置 $\mathbf{e} = (0, -\frac{f}{\delta} \tan \theta_m)$ は,実 際に撮影した画像では異なる位置に現れる.この移 動量を $\mathbf{c} = (u_c, v_c)$ とすると,拘束直線の交点は, $\mathbf{e} + \mathbf{c} = (u_c, v_c - \frac{f}{\delta} \tan \theta_m)$ となる.

対応位置を探索するときに利用する自己相関関数に おいて,第2極大の大きさは対応点の対応の良さを表 している.この対応の良さは,拘束直線の向き,すな わち拘束直線の交点 e+cが正確なほど大きくなると 考えることができる.そこで,第2極大値 $Peak(\mathbf{p}, \mathbf{c})$ を画像上の注目位置 $\mathbf{p} \ge c$ の関数と考え,次の \mathbf{c}^* を求める.

$$\mathbf{c}^* = \arg\max_{\mathbf{c}} \sum_{\mathbf{p} \in \text{Image}} Peak(\mathbf{p}, \mathbf{c})$$
(25)

このキャリプレーションで利用する2重像は,自己 相関関数の第2極大が明確に現れる画像ならどのよう な距離の対象を撮影したものでも利用できる.実験で は,図17に示す一定距離(透明板から1[m])にある 平面(壁面)を撮影して利用した.自己相関関数を計 算するときには,総和領域がある程度大きな方が極大 値が正確に現れる.そこで,直線上の画素値だけでは なく,その周囲21×21[画素]の領域を使って自己

領域サイズは実験的に選定した.



図 17 透明板の取付角度のキャリブレーションに利用した画像 Fig. 17 A overlapped image used for the calibration.



図 18 拘束直線交点位置の補正量を変化させたときの評価値 Fig. 18 Objective function value for the intersection offset.

相関を計算した.また,自己相関関数は直線上で離散 化した変位(1[画素]の大きさ)に対して計算するた め, $Peak(\mathbf{p}, \mathbf{c})$ は離散化極大値を含む3点を使った パラボラフィッティングによって推定した.画像上の すべての位置における拘束直線の向きを評価するため に,画像上の $63(=9 \times 7)$ カ所の注目位置 \mathbf{p} を使っ て式(25)を求めた.c は,水平方向と垂直方向にそ れぞれ 10[画素] おきに変化させて,全探索を行った.

図 18 に、 $-100 \le u_c \le +100$ 、 $-100 \le v_c \le +100$ に対して $\sum Peak(\mathbf{p}, \mathbf{c})$ を計算した結果を示す. $\mathbf{c} = (u_c, v_c)$ に対して、この評価値は急峻には変化していない、この結果から、 $\mathbf{c}^* = (+60, -30)$ を得る .

3.5 距離計測アルゴリズム

以上の距離計測アルゴリズムをまとめると,以下の ようになる.

(a) カメラ内部パラメータのキャリブレーション 画像の画素数とレンズ焦点距離 *f* /δ を求める.画像 からレンズ歪みを除去する. (b) 装置のキャリブレーション

距離計測装置を構成してから, $d_s^* \ge c^*$ を求める.また, D_c を測定する.以上のキャリプレーションは, あらかじめ行うことができる.

(c) 2 重像間変位の計算

注目点 p に対する対応位置を,次の2直線上の点 p_t で探索する.

$$\mathbf{p}_{\mathbf{t}} = \begin{cases} \frac{\mathbf{p} - (\mathbf{e} + \mathbf{c}^*)}{\|\mathbf{p} - (\mathbf{e} + \mathbf{c}^*)\|} t + (\mathbf{p} + \mathbf{d}_{\mathbf{s}}^*) \\ (-t_{max} \le t \le 0) \\ \frac{\mathbf{p} - (\mathbf{e} + \mathbf{c}^*)}{\|\mathbf{p} - (\mathbf{e} + \mathbf{c}^*)\|} t + (\mathbf{p} - \mathbf{d}_{\mathbf{s}}^*) \\ (0 \le t \le t_{max}) \end{cases}$$

$$(26)$$

ただし, t は画素単位の媒介変数である.また, t_{max} は, 装置の構成から決定でき, p に応じて変えてもよい. 探索した結果, |t| に拘束直線の方向に投影した d_s^* の大きさを加算して,透明板の非平行度を考慮した2 重像間変位 Δ とする.

$$\Delta = |t| + \left| \frac{\mathbf{p} - (\mathbf{e} + \mathbf{c}^*)}{\|\mathbf{p} - (\mathbf{e} + \mathbf{c}^*)\|} \cdot \mathbf{d}_{\mathbf{s}}^* \right|$$
(27)

式 (12) によって,2 重像間の角度視差 θ_s を計算する.

(d) 対象までの距離の計算

2つの角度 θ_{ph} と θ_{pv} を, 拘束直線の方向に沿った非 平行度を表す角度 θ_p に合成する.

$$\theta_p = \theta_{pv} \sin^2(\tan^{-1}(\mathbf{p} - (\mathbf{e} + \mathbf{c}^*))) + \theta_{ph} \cos^2(\tan^{-1}(\mathbf{p} - (\mathbf{e} + \mathbf{c}^*)))$$
(28)

式 (17) によって,対象までの距離を計算する.

(e) 距離計測結果の補正

提案手法では,レンズ光学中心から対象までの距離を 測定している.カメラ光軸に投影した距離に補正する ために,画像位置 (u_p, v_p) に対して計算した距離に, $(f/\delta) / \sqrt{u_p^2 + v_p^2 + (f/\delta)^2}$ を乗じる.

なお, (a) と (b) のキャリプレーションを除けば, (c) の対応点探索で大部分の計算時間を使用している.(d) と (e) は,対応点探索結果を使った演算であり,計算 量は少ない.(c)の対応点探索は,領域ペースマッチ ングを利用したステレオ画像間対応点探索における, エピポーラ線上での探索に相当する.1枚の画像上で 自己相関により探索を行う提案手法は,ステレオ画像 間での相互相関による探索に相当すると考えられる.

ここで得た \mathbf{c}^* は,拘束直線交点位置 $\mathbf{e} = (0, -\frac{f}{\delta} \tan \theta_m) \approx (0, -1,070)$ に対する補正なので,10[画素]の精度で実用上問題ない.

4. 実験結果

4.1 正対する平面

提案手法によって距離計測が可能なことを確認する ために,図19に示すように,距離計測装置に正対す る壁面を撮影して距離測定実験を行った.この壁面は 吹き付けタイル仕上げのため,図17に示すように, 細かなランダムテクスチャとして撮影された.

壁面までの距離 $D_o = 0.5$ [m] のときの入力画像に 対する自己相関関数値を,図 20 に示す.同図 (a) は, 入力画像中央 $(u_p, v_p) = (0,0)$ を通る垂直線上の各点 に対する自己相関関数値を示し,白い部分の値は大き く黒い部分の値は小さいことを表す.横軸は探索した 媒介変数 t,縦軸は入力画像上の垂直位置である.計測 対象は平面だが,入力画像での垂直位置に応じて変位 量が異なる様子が分かる.同図 (b) は,画像中央位置



図 19 壁面までの距離計測実験 Fig. 19 Setup for the experiment.



図 20 自己相関関数マップと自己相関関数の例 Fig. 20 Autocorrelation map and an example of autocorrelation function.

に対する自己相関関数 を表す(同図(a)の中央水平線 に対する断面図).なお,自己相関関数は,41×41[画 素]の領域 に対して計算した.

図 21 に , *D*_o を 0.5 [m] から 3.0 [m] まで変化させ たときの距離 (*D*_o) マップ計測結果を示す.

図 22 に,図 21 の距離計測結果の直線性を示す.画 像中央部に画像の 1/4 の面積の領域を設定し,領域 内で 17 × 17 = 289 カ所の距離を計測した.計測し た距離の平均値を黒丸で,±標準偏差をエラーバー で示す.対象までの距離が大きくなるとともに標準偏 差は大きくなり,対象までの距離が 2.5 [m] のときに 0.222 [m] である.距離の平均値はおおむね真値と一 致しているが,2 [m] 未満では真値より大きめに,そ れ以上では小さめの傾向がある.



surface at different distances.



このグラフには現れていないが,注目点自身との相関値が1に なるように値を正規化している. 領域サイズは実験的に選定した.



(a) Input overlapped image and its magnification



(b) Measured range map

図 23 入力画像 (a) と距離マップ計測結果 (b) Fig. 23 Measured range maps result.

4.2 人 物

図 23 (a) に示すような,より自然な環境での入力 画像を利用して,距離測定実験を行った.入力画像の 周辺部分を除いた 224 × 224 カ所の位置に対して距 離を求めた.画像の上下が逆転しているのは,ミラー で上下反転するためである.

図 23 (b) に,距離計測結果を示す.対象までの距離 は,約 0.5~1.5 [m] に分布している.床には,細かく ランダムなテクスチャを持つカーペットが敷いてある. このため,床部分からは比較的良好な距離計測結果が 得られた.一方,人物のほほなどの顔部分や白い靴下 部分などは,テクスチャを持たないために対応位置が 求まらず,距離計測もできなかった.この部分は,距 離計測結果において白で示した.テクスチャを持たな い領域に設定された注目点に対しては,自己相関関数 に極大が現れないために角度視差を求めることができ ず距離計測ができないが,今回の実験ではこのような 領域に対するエラー回復処理などは行わなかった.

5. おわりに

両面が平行平面で構成される透明板に映る2重像 を,1台のカメラで撮影した1枚の画像を使った,距 離計測手法を提案した.提案手法は,1台のカメラと 1枚の透明アクリル板だけで距離計測を行うことがで きる.駆動機構や特殊な光学系は,いっさい不要であ る.しかも,量産され市販されている透明アクリル板 を利用できる.市販されているアクリル板は,完全な 平行板ではなく,非平行度を持つ.提案手法は,この 非平行度を利用して,理想的な平行板を使う場合より も効果的に対応位置探索ができる.この非平行度と透 明板の取付角度誤差は,構成した装置で撮影した画像 を利用したキャリブレーションによって推定できる. 実際に距離計測実験を行い,提案手法が原理的に機能 することを確認した.

細かなランダムテクスチャを持つ壁面までの距離計 測実験を行った結果,実際に距離計測が可能であるこ とが分かった.しかし,対象までの距離が大きくなる とともに計測誤差は大きくなり,平均距離にも距離に 応じた傾向があった.この傾向の原因としては,透明 板表面と裏面の非平面性などが考えられる,より高 精度な計測を行うためには,非平面性を考慮に入れた キャリブレーション法などを検討する必要がある.

今後は,計算の簡略化を含めた効率化を行い,リア ルタイム用途を含めた実際のアプリケーションに応用 する.同時に,対応位置探索における高精度化などに より,計測精度を向上させるための工夫も行う.さら に,今回の実験では,自己相関関数を計算する領域サ イズは実験的に選定したが,距離の不連続点に対する 対応とともに最適な領域サイズの設定方法の検討も今 後の課題である.

参考文献

- Adelson, E.H. and Wang, J.Y.A.: Single Lens Stereo with a Plenoptic Camera, *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.14, No.2, pp.99–106 (1992).
- Amtoun, M. and Boufama, B.: Multibaseline Stereo using a Single-Lens Camera, Proc. International Conference on Image Processing, Barcelona, Spain, Vol.1, pp.401–404 (Sep. 2003).
- Bouguet, J.-Y.: Camera Calibration Toolbox for Matlab (Oct. 2004). http://www.vision. caltech.edu/bouguetj/calib_doc/index.html
- 4) Gao, C. and Ahuja, N.: Single Camera Stereo using Planar Parallel Plate, *Proc. International Conference on Pattern Recognition*, Cambridge, UK, Vol.IV, pp.108–111 (Aug. 2004).
- Gluckman, J.M. and Nayar, S.K.: Planar Catadioptric Stereo: Geometry and Calibration, Proc. Computer Vision and Pattern Recognition, Fort Collins, CO, USA Vol.1, pp.22–28 (June 1999).
- Grubb, G., Zelinsky, A., Nilsson, L. and Rilbe, M.: 3D Vision Sensing for Improved Pedestrian Safety, *Proc. IEEE Intelligent Vehicles Sympo*sium IV, Parma, Italy, pp.19–24, (June 2004).

- Hiura, S. and Matsuyama, T.: Depth Measurement by the Multi-Focus Camera, *Proc. Computer Vision and Pattern Recognition*, Santa Barbara, CA, USA, pp.953–959 (June 1998).
- Kang, S.B., Szeliski, R. and Chai, J.: Handling Occlusions in Dense Multi-View Stereo, *Proc. Computer Vision and Pattern Recognition*, Kauai, Hawaii, Vol.I, pp.103–110 (Dec. 2001).
- 9) Lee, D.-H. and Kweon, I.-S.: A Novel Stereo Camera System by a Biprism, *IEEE Trans. Robotics and Automation*, Vol.16, No.5, pp.528–541 (Oct. 2000).
- 10) Nishimoto, Y. and Shirai, Y.: A Feature-Based Stereo Model using Small Disparities, Proc. IEEE International Workshop on Industrial Applications of Machine Vision and Machine Intelligence, Seiken Symposium, Tokyo, pp.192–196 (Feb. 1987).
- Okutomi, M. and Kanade, T.: A Multiple-Baseline Stereo, *IEEE Trans. Pattern Anal*ysis and Machine Intelligence, Vol.15, No.4, pp.353–363 (1993).
- 12) Shim, H.: Light Weight Multi-View Capturing Projects. http://amp.ece.cmu.edu/projects/ MIRRORARRAY/
- 13) Simoncelli, E.P. and Farid, H.: Direct Differential Range Estimation using Optical Masks, *Proc. European Conference on Computer Vi*sion, Cambridge, UK, Vol.2, pp.82–93 (Apr. 1996).
- 14) Sun, Z., Bebis, G. and Miller, R.: On-Road Vehicle Detection using Optical Sensors: A Review, Proc. IEEE Intelligent Transportation Systems Conference, Washington, D.C., USA (Oct. 2004).
- 15) 山田憲嗣,高橋秀也,志水英二:符号化開口法を 用いた3次元形状検出手法,電子情報通信学会論 文誌 D-II, Vol.J80-D-II, No.11, pp.2986-2994 (1997).
- 16) 清原將裕,数井誠人,池田光二:1台のカメラと

レンズアレイとを用いた距離計測,画像の認識・ 理解シンポジウム(MIRU2004)論文集,函館, Vol.I, pp.392–397 (July 2004).

(平成 17 年 9 月 14 日受付)(平成 18 年 3 月 20 日採録)

(担当編集委員 佐藤 洋一)



清水 雅夫(正会員) 1982年東京工業大学工学部制御 工学科卒業.1984年同大学大学院 理工学研究科制御工学専攻修士課程 修了.同年キヤノン(株)入社.1989 年(株)応用計測研究所入社.2003

年東京工業大学大学院情報理工学研究科情報環境学専 攻社会人博士課程修了.2003年同大学院理工学研究 科機械制御システム専攻助手.コンピュータビジョン, 画像計測,画像処理の研究に従事.工学博士.計測自 動制御学会,電子情報通信学会,映像情報メディア学 会,IEEE,SPIE 各会員.



奥富正敏(正会員)

1981年東京大学工学部計数工学 科卒業.1983年東京工業大学大学 院理工学研究科制御工学専攻修士課 程修了.同年キヤノン(株)入社. 1987~1990年カーネギーメロン大

学コンピュータサイエンス学科客員研究員.1994年 東京工業大学大学院情報理工学研究科情報環境学専攻 助教授.2002年同大学院理工学研究科機械制御シス テム専攻教授.コンピュータビジョン,画像処理,画 像計測に関する研究に従事.工学博士.計測自動制御 学会,電子情報通信学会,日本ロボット学会,画像電 子学会,IEEE 各会員.