

テクニカルノート

両面ハーフミラー板の透過像を用いた単眼距離計測

清水 雅夫^{†1} 奥 富 正 敏^{†1}

本論文では、両面にハーフミラーコーティングを施した透明板を通して撮影した、1枚の2重像を使った距離計測手法を提案する。2重像間の変位拘束に沿って対応位置を探索して像間変位を計測すれば、対象との距離を得ることができる。像間変位は正規化自己相関関数を利用して計測するが、明るさが異なる画像で構成された2重像でも効果的に像間変位を計測できるように、正規化自己相関関数の形状に関する類似度も利用した。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であることを示した。

Monocular Range Estimation through a Double-sided Half-mirror Plate

MASAO SHIMIZU^{†1} and MASATOSHI OKUTOMI^{†1}

This paper proposes a novel single-camera range estimation method using a single complex image transmitted through a double-sided half-mirror plate. The range to the object can be derived by finding correspondences along a constraint line using the autocorrelation of the complex image with some similarity indices. This paper also presents experimental results obtained using an actual system.

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。そのバリエーションとして、1台のカメラによる距離計測手法も多く提案されてきた。この中には、透明板の表面反射像と裏面反射像の角度視差が対象までの距離に応じて変化する性質を利用した手法³⁾もある。

本論文では、両面ハーフミラー板を通して撮影した、1枚の2重画像を用いた距離計測手法を提案する。撮影レンズ前面を覆うカメラハウジングにカメラを納めるだけで、距離計測が可能になる。両面にハーフミラーコーティングを施した透明板を透過する光線は、入射光側ハーフミラーを透過した後に、射出光側ハーフミラーを透過する光線と反射する光線とに分かれる。透過する光線(直接像 I_d と呼ぶ)はそのままカメラに到達するが、反射した光線の一部は再び入射光側ハーフミラーで反射してから射出光側ハーフミラーを透過してカメラに到達する(第1次内部反射像 I_{i1} と呼ぶ)。このため、両面ハーフミラー板を通して画像を撮影すると、位置ずれがあり、明るさが異なる2重像が観測できる。

2重像間の変位拘束に沿って対応位置を探索して像間変位を計測すれば、対象との距離を得ることができる。像間変位は正規化自己相関関数を利用して計測するが、明るさが異なる画像で構成された2重像でも効果的に像間変位を計測できるように、正規化自己相関関数の形状に関する類似度も利用した。さらに、離散的な位置での正規化自己相関関数値から、繰返し計算なしで高精度に極大位置を推定する手法²⁾を利用した。この像間変位から対象までの距離を得るために、光線追跡法を利用した。

2. 距離計測方法

2.1 角度視差と対象までの距離

図1に示すように、直接像 I_d と第1次内部反射像^{*1} I_{i1} 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 、直接像の入射角度 θ_i 、および対象までの距離 D_o によって変化する。対象とカメラ光学中心、および両面ハーフミラー板法線ベクトルを通る平面上での光線を考えることで、角度視差と対象までの距離の基本的な関係を説明する。図1に示すように、直接像の射出位置を原点とする座標系 (ξ, ν) を設定する。カメラ光学中心の位置を $(D_c \sin \theta_i, D_c \cos \theta_i)$ とする。対象までの距離 $D_o + D_i + D_c$ について、直接像と内部反射像の経路を ξ 軸上に投影してまとめると、次式を得る。

^{†1} 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
Tokyo Institute of Technology

*1 両面ハーフミラー板内部では多重反射が生じるが、本論文では第2次以後の内部反射像は利用していない。

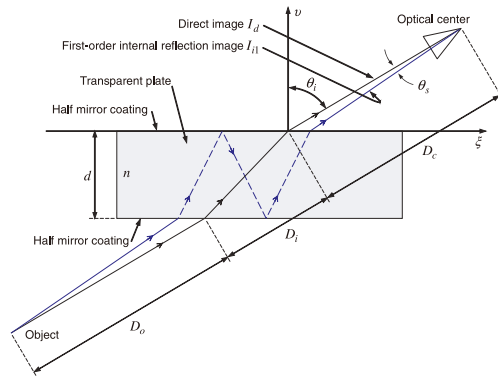


図1 基本的な幾何学構成
Fig. 1 Optical geometry.

$$D_o + D_i + D_c = d \left(\cos \theta_i + \frac{\sin^2 \theta_i}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_i}} \right) + d \frac{3 \sin(\theta_i - \theta_s)}{\sqrt{n^2 - \sin^2(\theta_i - \theta_s)}} - \frac{\sin \theta_i}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_i}} \frac{\sin \theta_s}{\cos(\theta_i - \theta_s)} \quad (1)$$

つまり、1枚の2重像から像間変位を計測して角度視差 θ_s を求めることで、対象までの距離が計測できる。

2.2 2重像の変位拘束

図2に示すように、カメラ光学中心を原点とするカメラ座標系を設定する。両面ハーフミラー板の法線ベクトルを $\mathbf{n}_m = [n_1, n_2, 1]^T$ 、CCDの画素間隔を単位とするレンズ焦点距離（原点と画像面との距離）を f/δ とする。画像上位置 $A(\mathbf{a}) = (a_1, a_2)$ に対する拘束平面（両面ハーフミラー板での屈折や反射が生じる平面）は、ベクトル $\mathbf{a} = [a_1, a_2, f/\delta]^T$ と両面ハーフミラー板の法線ベクトル \mathbf{n}_m をどちらも含み、原点を通る平面である。画像面と拘束平面との交線が、2重像の変位拘束を表す拘束直線である。この拘束直線を画像座標系 (u, v) で表すと、次のようになる。

$$\left(v - n_2 \frac{f}{\delta} \right) \left(a_1 - n_1 \frac{f}{\delta} \right) = \left(a_2 - n_2 \frac{f}{\delta} \right) \left(u - n_1 \frac{f}{\delta} \right) \quad (2)$$

画像上位置 $C(\mathbf{c}) = (n_1 \frac{f}{\delta}, n_2 \frac{f}{\delta})$ は、原点からハーフミラー板に下ろした垂線と画像面と

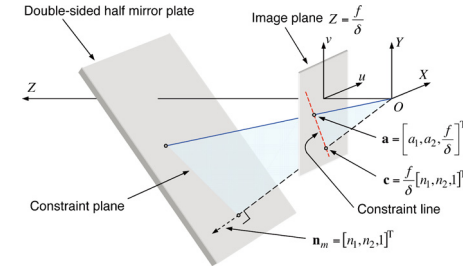


図2 両面ハーフミラー板とカメラ
Fig. 2 The double-sided half-mirror plate and camera.

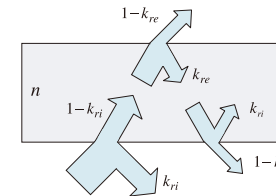


図3 両面ハーフミラー板の合成透過率
Fig. 3 Total transmittance through half-mirror plate.

の交点である。

2.3 直接像と内部反射像の明るさ

両面ハーフミラー板の透過像は、直接像も内部反射像もハーフミラーを透過するために暗くなる。図3に示すように、両面ハーフミラー板の入射側と射出側ハーフミラーの反射率を、それぞれ k_{ri} および k_{re} とする。ハーフミラーと透明板の内部損失を無視すると、透過率はそれぞれ $1 - k_{ri}$ および $1 - k_{re}$ である。このとき、直接像 I_d と内部反射像 I_{i1} の合成透過率は、それぞれ $(1 - k_{ri})(1 - k_{re})$ と $(1 - k_{ri})k_{re}k_{ri}(1 - k_{re})$ となる。つまり、内部反射像の方が必ず $k_{re}k_{ri}$ だけ暗くなる。具体的には、 $k_{re} = k_{ri} = 0.75$ のとき、内部反射像は直接像の0.5625倍の明るさしかない。

2.4 正規化自己相関関数を用いた変位検出

よく知られているように、位置ずれを持って重なり合った同じ信号の自己相関関数の第2極大位置は、位置ずれ量に対応する。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。

$$R_a(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T f(t)f(t-\tau)dt \quad (3)$$

関数 $f(t)$ として、2重像上の注目位置を通り、拘束直線上の画素値を取り出した関数を考える。2重像間の変位を Δ 、2重像を構成する片方の画像を $I(t)$ 、2重像間の明るさの比を g とすると、2重像は $f(t) = I(t) + gI(t - \Delta)$ と表すことができる。この $f(t)$ に対する正規化自己相関関数^{*1} $\bar{R}_a(\tau)$ は、次のように $I(t)$ の正規化自己相関関数 $\bar{R}_I(\tau)$ と、それを $\pm\Delta$ だけシフトした関数との和になる。

$$\bar{R}_a(\tau) = \bar{R}_I(\tau) + \frac{g}{1+g^2} \bar{R}_I(\tau \pm \Delta) \quad (4)$$

つまり、2重像上のある注目位置に対する対応位置は、拘束直線上で正規化自己相関関数を求め、その第2極大位置を探索することで求めることができる。ただし、第1極大に対する第2極大の相対的な大きさ $g/(1+g^2)$ は、 $k_{re} = k_{ri} = 0.75$ のとき ($g = 0.5625$ のとき) には約 0.43 と小さくなるため、第2極大位置の検出が困難になる可能性がある。

2.5 対応位置探索

正規化自己相関関数の第2極大は、大きさが小さいだけでなく、計測対象のテクスチャと明るさの影響を受ける。特に、注目領域中に複数の平均明るさ領域が含まれるときには、単純に値の大きさだけでは第2極大を検出できないことがある。

そこで、対応位置探索の前に、まず次のように正規化自己相関関数から直流に近い成分を除去する。

$$\bar{R}'_a(\tau) = \bar{R}_a(\tau) - \bar{R}_a(\tau) \otimes N(0, \sigma) \quad (5)$$

ただし、 \otimes はたたみ込み積分、 $N(0, \sigma^2)$ は平均 0、分散 σ^2 のガウス関数を表す。正規化自己相関関数 $\bar{R}_a(\tau)$ は、拘束直線に沿って 1 [画素] おきに求める。

次に、式 (5) の $\bar{R}'_a(\tau)$ から、次の条件を満たす離散極大位置候補 p を検出する。

$$\bar{R}'_a(p) > \bar{R}'_a(p-1) \text{ かつ } \bar{R}'_a(p) > \bar{R}'_a(p+1) \quad (6)$$

この離散極大位置候補 p の両側の正規化自己相関値を使って、パラボラフィッティングを行い、サブピクセル極大位置を推定する。

$$\Delta = p + \frac{\bar{R}'_a(p-1) - \bar{R}'_a(p+1)}{2\bar{R}'_a(p-1) - 4\bar{R}'_a(p) + 2\bar{R}'_a(p+1)} \quad (7)$$

ところが、式 (6) の条件では、複数の極大位置候補が検出されることが多い。そこで、候

補の中から、以下の3つの評価値の積 $S_0(p)S_1(p)S_2(p)$ を最大にするサブピクセル極大位置 Δ を選ぶ。

(1) 極大位置での正規化自己相関値

$$S_0(p) = \bar{R}'_a(p) - \frac{(\bar{R}'_a(p-1) - \bar{R}'_a(p+1))^2}{8(\bar{R}'_a(p-1) - 2\bar{R}'_a(p) + \bar{R}'_a(p+1))} \quad (8)$$

(2) 極大位置での曲率

$$S_1(p) = -\frac{\bar{R}'_a(p-1) - 2\bar{R}'_a(p) + \bar{R}'_a(p+1)}{2} \quad (9)$$

(3) 原点曲率と極大位置曲率との差の逆数

$$S_2(p) = |S_1(0) - S_1(p) + \delta|^{-1} \quad (10)$$

ただし、 δ はゼロ割りを防ぐための小さな定数である。

さらに、得られた対応位置が探索範囲内であることを確認し、バックマッチングを行い、誤対応を低減させている。また、パラボラフィッティングによるサブピクセル極大位置の推定誤差低減手法²⁾ を利用した。

2.6 光線追跡法による対象の位置

実際に使用する両面ハーフミラー板では両表面が厳密には平行でないため、直接像と内部反射像は 2.2 節で示した拘束平面上での屈折や反射だけではなく、拘束平面から外れた屈折や反射も考慮する必要がある。そこで、光線追跡法⁴⁾ を利用して、2重像の画像間変位に対応する対象までの距離を求めた。光線追跡法を使うと、キャリブレーションにより求めたハーフミラー板の法線ベクトルから、注目位置に対する直接像と内部反射像の光線を表す直線を求めることができる。この2直線の交点位置 (実際には誤差により交点が存在しないことがあるため、2直線への距離の和が最小になる位置) を求めることで、対象の位置を得る。

3. 実験結果

3.1 装置構成とキャリブレーション

図 4 に示すように、カメラ光軸に対して両面ハーフミラー板を約 45 [度] に固定した。グレースケール 640 × 480 [画素] の画像が撮影できるカメラを利用した。両面ハーフミラー板は、10 [mm] 厚の透明アクリル板を片面ハーフミラー (1 [mm] 厚ガラス基板) で挟んで構成した ($d = 12$ [mm])。透明アクリル板とガラス基板の屈折率は、どちらも 1.49 である。ハーフミラーの反射率は $k_{re} = k_{ri} = 0.75$ である。

カメラ内部パラメータ¹⁾、画像上位置 $C(c)$ 、無限遠方に対する2重像間変位、両面ハ-

*1 明るさとコントラストの違いを吸収するために、平均値と分散で正規化を行う。

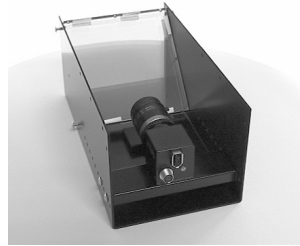


図 4 実験装置構成

Fig. 4 Configuration of the experimental system.

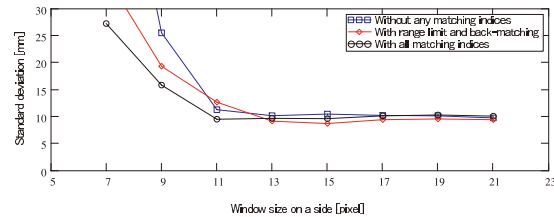


図 5 類似度指標の効果

Fig. 5 Effect of the matching indices.

フミラー板の非平行度は、透明板の反射像を利用したリフレクションステレオ³⁾と同様に求めた。求めた非平行度から、両面ハーフミラー板の入射光側と出射光側の各面の法線ベクトルを求めて光線追跡法で利用した。

面精度の高い両面ハーフミラー板を利用すれば、非平行度のキャリブレーションは不要になる可能性があるが、カメラ光軸に対する取り付け角度のキャリブレーションは必要である。

3.2 対応位置探索の効果

2重像における対応位置の探索は、2枚の画像が混合していること、画像間の明るさが異なること、面精度が低いために拘束が不正確な可能性があること、などの理由で困難になっている。ここでは、同じ2重像に対して2.5節で述べた方法の効果を示す。

ランダムテクスチャを貼り付けた、距離550 [mm]に正対する平面を撮影し、画像上4,225カ所で平面までの距離を計測した。図5に、注目領域のサイズを、7×7から21×21 [画素]まで変化させたときの、距離計測結果の標準偏差を示す。印は正規化自己相関値だけを使った結果、印は探索範囲の再確認とバックマッチングだけを行った結果、印はさら

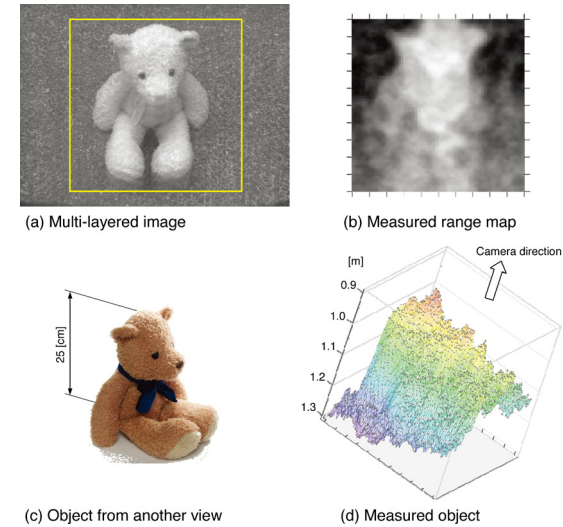


図 6 距離マップ計測結果

Fig. 6 Range map estimation result.

に2.5節で述べたすべての指標を利用した結果である。すべての指標を利用することで、注目領域のサイズが小さいときの標準偏差が小さく抑えられている。しかし、距離550 [mm]に対して標準偏差が約10 [mm]であることから、距離計測精度はあまり高くない。

3.3 実画像を使った距離計測

図6に、アスファルト路面上のクマのぬいぐるみの計測結果を示す。注目領域サイズは11×11 [画素]、対応位置が検出できなかった箇所は周囲の結果を使って補間した。

4. おわりに

両面にハーフミラーコーティングを施した平行平面透明板を通して撮影した1枚の2重像を使った距離計測手法を提案した。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であることを示した。

今後、距離計測精度を向上させるために、より正確な拘束の利用や、多重反射の利用が考えられる。

参 考 文 献

- 1) Bouguet, J.-Y.: *Camera Calibration Toolbox for Matlab* (2004).
- 2) Shimizu, M. and Okutomi, M.: Sub-Pixel Estimation Error Cancellation on Area-Based Matching, *IJCV*, Vol.63, No.3, pp.207-224 (2005).
- 3) 清水, 奥富: 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, 情報処理学会論文誌: コンピュータビジョンとイメージメディア, Vol.47, No.SIG10 (CVIM15), pp.131-142 (2006).
- 4) Whitted, T.: An Improved Illumination Model for Shaded Display, *Comm. ACM*, Vol.23, No.6, pp.343-349 (1980).

(平成 19 年 8 月 20 日受付)

(平成 20 年 3 月 9 日採録)

(担当編集委員 北原 格)



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。2003 年同大学院理工学研究科機械制御システム専攻助教。工学博士。



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。2002 年同大学院理工学研究科機械制御システム専攻教授。工学博士。