

フラッシュを使用したデジタルカメラでの距離計測の一手法

小川直哉 梅田和昇
中央大学

距離計測には大がかりな装置や特殊な環境を必要とすることが多い。本稿では、デジタルカメラを使用した簡便な距離計測手法を提案している。フラッシュを使用して撮像した画像と使用せずに撮像した画像の 2 枚からフラッシュのみによる放射照度を得て距離を計算する。実験により、誤差は大きいものの大まかな距離情報が得られることを示している。

1. 序論

現在、距離計測や形状復元の手法として様々な手法が提案されているが、大がかりな装置や特殊な環境が必要とされるものが多い。

三角測量の原理を利用したステレオ法[1][2]では、複数台のカメラを用いる方法や、レーザプロジェクトを用いる方法が提案されている。

異なった照明条件での複数の画像から形状を求める照度差ステレオ法[2]は、光源のコントロールが必要であり、無限遠光源という仮定がある。単画像で観測される陰影から形状を復元する Shape-from-Shading 法[2]では、単光源のみを必要とするが、照度差ステレオ法と同様に無限遠光源を仮定し、光源のコントロールが必要である。しかし実環境ではこれらの条件は一般に満たされない。

また、安価な装置を利用して三次元形状を復元するものとして CyberModeler[3]がある。これは、参照マークが印刷された回転台上に物体を設置し、回転台を回転させながら市販のデジタルカメラで複数枚の画像を撮像し、参照マークからカメラの位置を計算し、全方位の画像を取得することでシルエットから三次元形状を計算するものである。装置は安価であるが、回転台が必要である、シルエットを抜き出すために背景紙を設置しなければならない、など環境に制約がある。

東芝が開発したモーションプロセッサ[4]は、カメラの周囲に配置された LED から近赤外光を発光し、反射光の強さが物体までの距離にほぼ反比例することを利用して、物体の切り出しや大まかな三次元形状の取得を行っている。

本研究ではこの手法を参考に、デジタルカメラを用いて、可視光を利用した簡便に一般的な環境下で色情報を得ることができる距離計測の手法を提案する。

2. 距離計測手法

2.1 手法の概要

本手法では、デジタルカメラを使用して同じ対象をフラッシュを使用した場合と使用しない場合の 2 通り撮像し、2 枚の画像間での明るさの差を用いて距離計測を行う。

デジタルカメラで撮像した画像の画素値は、CCD 上の放射照度に比例している[5]。放射照度は線形性が成り立つので、フラッシュを使用して撮像した画像から得た放射照度と、同じ環境下でフラッシュを使用せずに撮像した画像から得た放射照度の差をとることによって、フラッシュによる反射光だけの放射照度値を得ることができる。反射光の強度が物体との距離の二乗にほぼ比例して弱くなることを利用することで距離情報を取得することができる。この手法はフラッシュ以外の光源環境を知る必要がないので、暗室などの特殊な環境を用意する必要はなく、安価な装置で簡便に距離計測ができるという利点がある。

2.2 仮定

本稿で提案する手法では以下の条件を仮定する。

- (a) 物体表面の反射は拡散反射のみであり、鏡面反射はしない。
- (b) フラッシュとレンズの中心の位置は等しい。

2.3 距離計算式の導出

物体上のある 1 点での放射輝度と、その点に対応する画像上の 1 点での放射照度との関係を考える。

画像面から距離 f 離れた直径 d のレンズを考える (Fig. 1)。物体表面上の小領域の面積を δO 、対応する画像上の小領域の面積を δI とする。物体上の小領域からレンズの中心に向かう光線が光軸と角度 α をなし、この光線と表面法線がなす角度が θ であるとする。物体上の小領域が光軸に沿ってレンズから距離 z のところにあるとすると、それに対応する画像小

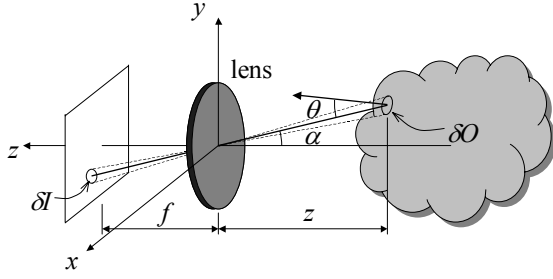


Fig. 1 カメラ座標系

領域の放射照度は次式で与えられる[2].

$$E_{image} = L_{object} \frac{\pi}{4} \left(\frac{d}{f} \right)^2 \cos^4 \alpha \quad (1)$$

ここで, L_{object} は物体小領域の放射輝度である. 双方向性反射率分布関数 $\rho(\theta_i, \phi_i; \theta_e, \phi_e)$ を導入すると式(1)は,

$$E_{image} = \rho(\theta_i, \phi_i; \theta_e, \phi_e) \cdot E_{object} \frac{\pi}{4} \left(\frac{d}{f} \right)^2 \cos^4 \alpha \quad (2)$$

となる. ここで, E_{object} は物体上の放射照度である. 双方向性反射率分布関数とは, ある視線方向 (θ_e, ϕ_e) と光の照射方向 (θ_i, ϕ_i) に対する表面の反射特性を表したもので, つまり放射照度に対する放射輝度の比率を表す関数である.

光源がフラッシュのみの場合を考える. フラッシュの放射強度を I とすると, 物体上におけるフラッシュ光による放射照度は,

$$E_{object} = \frac{I \delta \omega}{\delta O} \cos \theta_f \quad (3)$$

となる. ここで, θ_f はフラッシュから物体小領域へ向かう光線と表面放線とがなす角である. また, $\delta \omega$ はフラッシュから物体上の微小領域を見たときの立体角で,

$$\delta \omega = \frac{\delta O \cos \theta_f}{(z / \cos \alpha_f)^2} \quad (4)$$

と表わせる. 式(3), (4)を考慮すると式(2)は,

$$E_{image} = \rho(\theta_f, \phi_f; \theta, \phi) \cdot I \frac{1}{z^2} \cos^2 \alpha_f \cos^2 \theta_f \frac{\pi}{4} \left(\frac{d}{f} \right)^2 \cos^4 \alpha \quad (5)$$

となる.

フラッシュを使用したときの画像上の放射照度を E_{image}^F , フラッシュを使用しなかったときの画像上の放射照度を E_{image}^{NF} とすると, $E_{image} = E_{image}^F - E_{image}^{NF}$ である.

ここで, フラッシュの位置はレンズの中心と同じ位置であると仮定しているので, $\alpha_f = \alpha$, $\theta_f = \theta$ とおける. また, 物体表面が反射率 r の拡散反射面であると仮定すると, 双方向性反射率分布関数は,

$$\rho(\theta, \phi; \theta, \phi) = \frac{r}{\pi} \cos \theta \quad (6)$$

であるので, 式(5)より,

$$z = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{I r}{E_{image}^F - E_{image}^{NF}}} \frac{d}{f} \cos^3 \alpha \cos^{\frac{3}{2}} \theta \quad (7)$$

を得る. 式(7)より, 距離はフラッシュの放射強度および対象物体の反射率の平方根に比例し, 照度の差の平方根に反比例することがわかる. 先に述べたように, CCD 面の放射照度と画像の輝度値は比例するので, 2 枚の画像の差分から距離を求めることができる.

しかし, θ が未知数であるので, この段階では距離を求めることはできない.

2.4 面法線の推定

式(7)において, 視線方向と物体表面の法線とがなす角 θ が未知数であるので, これを推定する必要がある.

Fig. 2 に示す場合を考える. CCD 上の第 i 画素と第 $i+1$ 画素に写っている物体上の点をそれぞれ P_i , P_{i+1} とし, レンズ中心から CCD 上の第 i 画素と第 $i+1$ 画素へのベクトルをそれぞれ $\mathbf{a}_i$, $\mathbf{a}_{i+1}$, 画像の差分により得たフラッシュのみによる放射照度をそれぞれ E_i , E_{i+1} とする. また, 物体の表面は局所的に平面であると仮定し, 法線ベクトルを $\mathbf{n}$ とする.

ここで, ベクトル $\overrightarrow{P_i P_{i+1}}$ は,

$$\overrightarrow{P_i P_{i+1}} = \overrightarrow{O P_{i+1}} - \overrightarrow{O P_i} = z_{i+1} \mathbf{a}_{i+1} - z_i \mathbf{a}_i \quad (8)$$

と表せる. $\overrightarrow{P_i P_{i+1}}$ と $\mathbf{n}$ は垂直なので,

$$\mathbf{n} \cdot (z_{i+1} \mathbf{a}_{i+1} - z_i \mathbf{a}_i) = z_{i+1} \mathbf{n} \cdot \mathbf{a}_{i+1} - z_i \mathbf{n} \cdot \mathbf{a}_i = 0 \quad (9)$$

である. これより,

$$\frac{z_{i+1}}{z_i} \frac{\mathbf{n} \cdot \mathbf{a}_{i+1}}{\mathbf{n} \cdot \mathbf{a}_i} = 1 \quad (10)$$

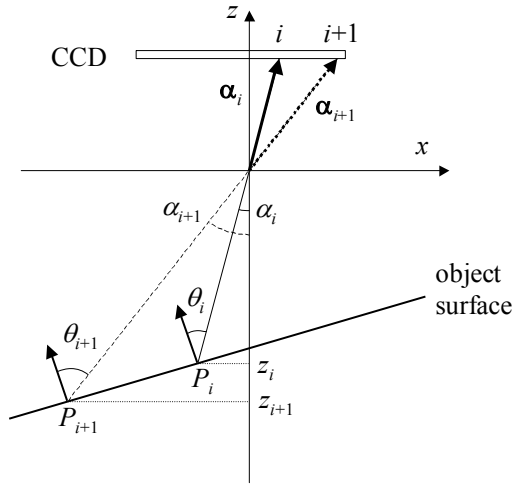


Fig. 2 模式図

を得る。また、

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{a}_i = |\mathbf{n}| |\mathbf{a}_i| \cos \theta_i \quad (11)$$

と表せることから、

$$\frac{\mathbf{n} \cdot \mathbf{a}_{i+1}}{\mathbf{n} \cdot \mathbf{a}_i} = \frac{|\mathbf{a}_{i+1}| \cos \theta_{i+1}}{|\mathbf{a}_i| \cos \theta_i} \quad (12)$$

を得る。式(12)を式(10)へ代入すると、

$$\frac{z_{i+1}}{z_i} \frac{|\mathbf{a}_{i+1}| \cos \theta_{i+1}}{|\mathbf{a}_i| \cos \theta_i} = 1 \quad (13)$$

となる。式(7)より、

$$\frac{z_{i+1}}{z_i} = \left(\frac{E_i \cos^6 \alpha_{i+1} \cos^3 \theta_{i+1}}{E_{i+1} \cos^6 \alpha_i \cos^3 \theta_i} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (14)$$

を得るので、式(13)と式(14)を連立すると、

$$\frac{z_{i+1}}{z_i} = \left(\frac{E_i \cos^6 \alpha_{i+1} |\mathbf{a}_i|^3}{E_{i+1} \cos^6 \alpha_i |\mathbf{a}_{i+1}|^3} \right)^{\frac{1}{5}} \quad (15)$$

となる。右辺を a と置くと、

$$z_{i+1} = a z_i \quad (16)$$

となり、 $\overrightarrow{P_i P_{i+1}}$ は a を用いて、

$$\overrightarrow{P_i P_{i+1}} = z_i \begin{pmatrix} a \tan \alpha_{i+1} - \tan \alpha_i \\ a - 1 \end{pmatrix} \quad (17)$$

と表せる。カメラの視野角が 180[deg]を超えない限り z_i は負であり、通常は 180[deg]未満であるので、式(17)から既知の情報のみで物体表面に平行なベクトルの向きが得られることになる。

この方法を用い、注目する画素の四近傍でそれぞれ面に平行なベクトルを求め、それらの外積から三次元での面法線を求めることにより、 θ の推定が可能になる。

3. 実験

以上で提案した手法を用いて、実際に撮像した画像を使用して距離計測実験を行った。2.4 節で述べた面法線を推定する計算は各画素でそれぞれ行った。

実画像にはノイズが含まれるため、隣接画素との照度比で面法線を推定する本手法では距離計算に大きな影響を及ぼす。そこで、差分で得られたデータに対して平滑化処理を行った。

実験に使用したカメラは Nikon D70、フラッシュはカメラに内蔵のもの(ガイドナンバー約 15[ISO200 · m])、レンズは Nikon AF-S DX Zoom-Nikkor 18-70mm f/3.5-4.5G IF ED である。

また、今回の実験では簡単のため、フラッシュは点光源であり、その放射強度は全ての方向で等しい、という仮定を 2.2 節で述べた仮定に加えた。

3.1 実験 1

対象物として、Fig. 3 に示すホワイトスクリーン(SANYO KA-LCV-101KZ)を約 1.55[m]離れた位置で正面から撮像した。ホワイトスクリーンは反射特性が均等な拡散反射に近く、2.3 節で述べた仮定(b)に対して適当な対象である。

結果を Fig. 4 に示す。ばらつきはあるものの、ほぼ平面上に分布していることがわかる。ばらつきの主な原因はノイズが完全に除去できていないことであると考えられる。中心付近にやや突出した部分があるが、これは鏡面反射成分の影響によるものと考えられる。

3.2 実験 2

同じ対象物を、正面から 30[deg]傾いた位置から撮像した。中心との距離は実験 1 と同じである。

反射光は、物体表面法線と視線とのなす角のコサインに比例して弱くなる。よって、面の傾きを考慮しないと、計算結果は実際よりも距離が遠い結果に



Fig. 3 ホワイトスクリーン

になってしまう。本手法では、2.3 節で述べた傾きを考慮する部分を含んでいるので、この部分の有効性の検証のため、この実験を行った。

結果を Fig. 5 に示す。実験 1 の結果よりもややばらつきが大きくなっているが、中心の距離はほぼ同じであり、30[deg]傾いた平面に近い位置に分布していることがわかる。実験 1 よりもばらつきが大きくなった原因としては、隣接画素との照度比で面法線を推定しているために、同じノイズ強度でも面の傾きが大きいときにノイズの影響が強くなってしまふことが考えられる。

4. 結論

本稿では、大がかりな装置や特殊な環境を必要としない、フラッシュを使用したデジタルカメラによる簡便な距離計測手法を提案した。実験によりこの手法の有効性を示した。

本稿では、画像に写っている範囲内の物体の法線ベクトルが一定で、かつ物体表面がすべて同じ反射率である場合を扱ったが、今後は異なる反射率を持つ面が混在する画像に適用できるようにする必要がある。

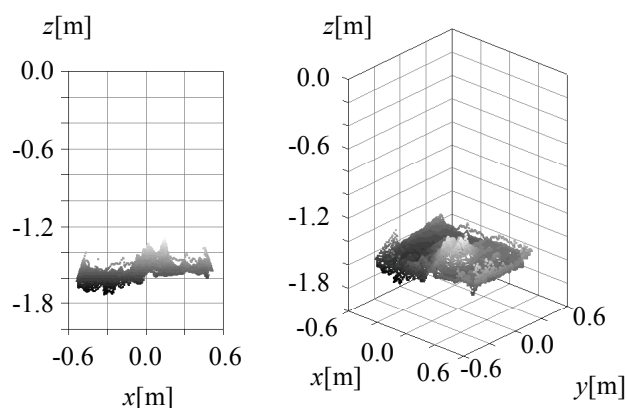


Fig. 4 計算結果 1(0[deg])

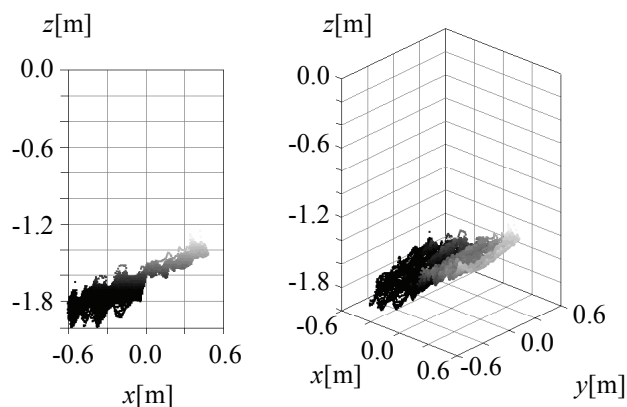


Fig. 5 計算結果 2(30[deg])

参考文献

- [1] 井口征士, 佐藤宏介, “三次元画像計測”, 昭晃堂, 1990
- [2] B. K. P. Horn 著, NTT ヒューマンインタフェース研究所プロジェクト RVT 訳, “ロボットビジョン”, 朝倉書店, 1993
- [3] 藤村恒太, 大上靖弘, 寺内智哉, 江見哲一, 福崎勤, “デジタルカメラ画像から簡単に 3 次元データを生成するソフトウェア技術”, SANYO TECHNICAL REVIEW, Vol. 35, No. 1, Jun. 2003
- [4] 沼崎俊一, 土井美和子, “手振りで気持ちを伝えるインタフェース～モーションプロセッサ～”, IPSJ Magazine, Vol.41, No.2, Feb. 2000
- [5] 標準化委員会, “デジタルカメラの感度規定”, CIPA DC-004-2004, カメラ映像機器工業会