

太陽光を用いた照度差ステレオ法

内山 英昭[†] 齋藤 英雄[†]

[†] 慶應義塾大学理工学部 情報工学科

〒 223-8522 横浜市港北区日吉 3-14-1

E-mail: †{uchiyama,saito}@ozawa.ics.keio.ac.jp

あらまし 本稿では、屋外の物体の三次元形状を推定する手法として、太陽光を用いた照度差ステレオ法を提案する。太陽を光源として用いる場合、雲や大気の影響から観測される照度が一定であることは少ないこと、また時間と共に変化する太陽の光源方向ベクトルの一次独立性が低いことを考慮する必要がある。本手法では、太陽の光源方向ベクトルを算出し、観測される輝度を Lambertian モデルと仮定して RANSAC を用いて照度が異なることによる影響を補正する。次に面法線ベクトルの算出において、画像に写りうる面法線ベクトルが限定されることを利用する。取りうる面法線ベクトルをあらかじめ設定して輝度変化を算出し、実画像上の各点に対し、設定した面法線ベクトルの中から輝度変化の最も近いベクトルを探索する。実験では CG と屋外で撮影した画像列に対して行い、太陽を光源として用いた場合に従来手法よりも本手法が有効であることを示す。

キーワード 太陽光, 照度差ステレオ法, Lambertian, RANSAC

Photometric Stereo using Sunlight

Hideaki UCHIYAMA[†] and Hideo SAITO[†]

[†] Department of Information and Computer Science, Keio University

3-14-1 Hiyoshi Kouhoku-ku, Yokohama, 223-8522, Japan

E-mail: †{uchiyama,saito}@ozawa.ics.keio.ac.jp

Abstract We propose a method of the photometric stereo using sunlight as a technique to compute the geometry of outdoor objects. By assuming that reflection model is Lambertian, we apply RANSAC to correct the instability of luminance. To compute a normal vector, we consider the limitation of the normal vectors included in a monocular image, and then choose a suitable vector from them. In our experiments, we apply our method to CG and images taken in outside for demonstrating, our method is more effective than conventional methods.

Key words Sunlight, Photometric Stereo, Lambertian, RANSAC

1. はじめに

コンピュータビジョンの分野において、三次元形状を推定する研究が盛んに行われている。特に屋外の物体に対しては、デジタルアーカイブ、屋外景観シミュレーション、拡張現実感などを目的として多くの手法が提案されている。

バルテノン神殿をモデリングした研究[1]においては、光源情報を得るために球体を用いて上空の光源環境分布を計測し、またレンジデータとシーンを撮影した画像列を用いて形状と反射特性を計測した。また、マルチベースラインステレオ法を利用して動画像列から自然特徴点の追跡を行うことでオクルージョンを含む複雑な屋外環境の軌行きを推定する研究[2],[3]などが挙げられる。これらはいずれも複数の視点から撮影を行う手法である。

一方、屋外には多くの定点カメラが設置されており、撮影しているシーンの三次元的情報を得ることができれば様々な用途に用いることができる。一例として、霧のあるシーンにおいて光の減衰モデルを利用してカメラからシーンまでの距離を算出し、霧の影響を補正してコントラストを復元する研究[4]が挙げられる。これは天気を用いており、屋外特有の手法であると言える。

固定カメラで撮影したシーンの三次元的情報を得る手法が数多く提案されてきた[5]。その中の一つとして、複数の方向から光を照射して各点の輝度変化を用いて面法線ベクトルを算出する照度差ステレオ法[6]~[8]が挙げられるが、屋外の物体を計測する場合には使われることが少ない。主な理由として、物体に平行光源を照射する必要があるが、建物などに対して平行光源を照射することが難しく、また太陽が照明の影響を受けてし

まうといったことが挙げられる。しかしながら、太陽は平行光源であり、屋外の物体に平等に光を照射しているため、太陽を光源として用いて照度差ステレオ法を適用することが可能であると考えられる。

そこで、本研究は太陽光を用いて照度差ステレオ法を行うことを目的とする。屋外では雲や大気の影響を受けたり、太陽の動きが決まっているために撮影できる場所や時間が制限されるが、幅広く用いることが出来るようにするためには制約を出来るだけ少なくする必要がある。初めに本手法の前提条件について明示し、本手法のアルゴリズムについて述べる。実験ではCGと屋外の画像について行い、本手法の有効性を示す。

2. 提案手法

2.1 前提条件

屋外で撮影を行うため、天候や大気の影響が考えられる。本研究では、太陽の光が照射される必要があるために晴れが望ましいが、一時的な曇りがあった場合でも補正を行うために構わない。また、図1のように日本においては一年を通して太陽が南側に昇る。太陽の光が照射される面を撮影するため、撮影できる範囲は撮影する物体を原点とした座標系において東から西まで南を含む半円の任意の方角からとする。また、カメラは地面と平行に設置する。

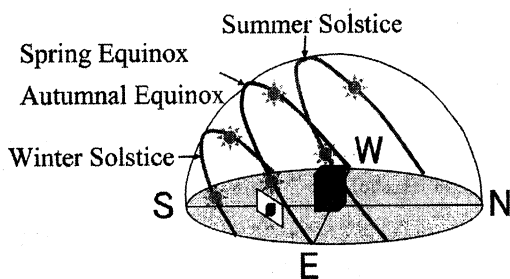


図1 太陽の軌跡

2.2 手法の流れ

日照時間帯において定点カメラで撮影した画像列を入力とし、時間変化に伴う輝度変化を用いて面法線ベクトルの算出を行う。

初めに、各画像の撮影日時と物体のある地点の緯度・経度を利用して太陽の光源方向ベクトルの算出を行い[10]、方位磁石を用いてカメラの向いている方向を得ることで照度差ステレオ法で用いる座標系に座標変換を行う。

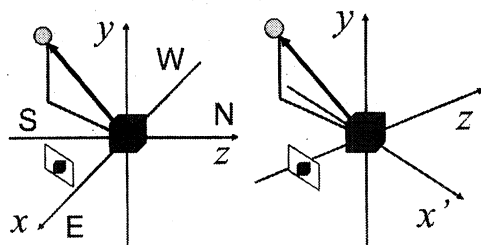
面法線ベクトルの算出のためには光源の照度が既知であるか一定である必要があるが、太陽光は雲や大気の影響を受けるために照度が一定であることは少ない。そこで、観測される輝度をLambertianモデルと仮定し、画像の各点に対してRANSACを用いて照度が異なるものについて補正を行う[11],[12]。

また、一日の太陽の光源方向ベクトルの変化は、一次独立性が低いために計算で算出した面法線ベクトルには大きな誤差が含まれている場合がある。そこで、単眼画像の特徴として、写りうる面法線ベクトルに限られることを利用する。あらかじめ

面法線ベクトルの取りうる範囲を設定し、それぞれの輝度変化を算出して実画像上の各点の輝度変化と比較し、最も輝度変化の類似した面法線ベクトルを探索する。

2.3 光源方向ベクトルの算出

日時と緯度・経度を用いて、図2の(a)のように方位に合わせた世界座標系における太陽の光源方向ベクトルを算出することができる。算出した面法線ベクトルから積分を用いて形状推定を行う場合、カメラ平面を xy 平面に平行にする必要があるため、座標系を図2の(b)のようにカメラ平面と xy 平面が平行になっている座標系に変換する必要がある。二つの座標系の変換行列の成分は、カメラを地面に平行に設置することで、 y 軸中心の回転成分のみとなる。これはカメラの向いている方向を得ることで算出することができる。本手法では、方位磁石を用いて回転角を得た。



(a) 世界座標系 (b) 本手法の座標系

図2 座標系

2.4 RANSACを用いた輝度の補正

観測される輝度 I をLambertianモデルで表されると仮定すると式(1)のようになる。光源方向の単位ベクトル s と面法線の単位ベクトル n の二つのベクトルの内積と係数 k で表される。実験を通して光源の照度が一定であると仮定することで、面の反射率と光源の照度の積を係数 k で表すことができる。以下において係数 k を反射率と呼ぶ。

屋外においては、雲や大気が太陽光を遮ることによって照度が異なる場合がある。そのため、RANSACを用いて照度が異なることに起因する外れ値を検出し、補正を行う必要がある。

$$I = ks \cdot n \quad (1)$$

2.4.1 用いる輝度の選択

式(1)において、二つのベクトルの成す角が90度以上の場合はAttached Shadowとなり、理論的には負の値をとる。しかしながら、実画像においては最小値が0であるので式(1)で表すことができないため、RANSACで用いるサンプルとして用いることができない。さらに、屋外においては二次反射や環境光などの影響から最小値が0になることはない。そこでAttached Shadowの成分をあらかじめ取り除くためにしきい値を設定し、しきい値以上の輝度をサンプルとして用いる。

2.4.2 輝度の補正

RANSACを用いる場合には以下の定数を決定する必要がある。

n モデルを決定するために必要な点の最小数

r 反復回数

t 外れ値かどうか判定するしきい値

面法線ベクトルと反射率の自由度が3であるので $n = 3$ となり, r と t はサンプル数や復元するモデルの精度に応じて決定する。以下に光源方向を1から10として, アルゴリズムを以下に示す。

(1) 面法線ベクトルの算出

三つの光源をランダムにサンプリング(ここでは1, 5, 7とする)を行うと式(2)のように表され, 反射率 k を含む面法線ベクトル n' を算出する。

$$\begin{pmatrix} n'_x \\ n'_y \\ n'_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s_{1x} & s_{1y} & s_{1z} \\ s_{5x} & s_{5y} & s_{5z} \\ s_{7x} & s_{7y} & s_{7z} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} I_1 \\ I_5 \\ I_7 \end{pmatrix} \quad (2)$$

(2) 輝度の復元と有効な輝度のカウント

ランダムサンプリングした光源の輝度から算出した n' を用いて, 式(3)によりすべての光源方向の輝度 I' を算出する。次に, すべての光源方向 i に対して, 式(4)から復元した輝度と観測された輝度の差をしきい値を用いて分類し, $point_i$ を算出する。最後に, 式(5)から観測された輝度に近い輝度を有効な輝度としてカウントしておく。 fit は, 復元した輝度がどれだけ観測された輝度に類似しているかを表す指標である。

$$\begin{pmatrix} I'_1 \\ I'_2 \\ \vdots \\ I'_{10} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s_{1x} & s_{1y} & s_{1z} \\ s_{2x} & s_{2y} & s_{2z} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ s_{10x} & s_{10y} & s_{10z} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} n'_x \\ n'_y \\ n'_z \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$point_i = \begin{cases} 1 & |I_i - I'_i| \leq t \\ 0 & |I_i - I'_i| > t \end{cases} \quad (4)$$

$$fit = \sum_i point_i \quad (5)$$

(3) fit が最大となる場合の探索

(1) から (2) を r 回ループし, fit が最大となる場合を決定する。

(4) 輝度の補正

fit が最大となった場合について, 再度すべての光源方向 i に対して t 以下の光源方向を抽出する(ここでは1, 2, 4, 5, 7, 8, 9であったとする)。式(6)から擬似逆行列 s^+ [13] を用いて面法線ベクトル n'' を算出することができる。最後に式(7)を用いて算出した輝度 I'' を補正值とする。

$$\begin{pmatrix} n''_x \\ n''_y \\ n''_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s_{1x} & s_{1y} & s_{1z} \\ s_{2x} & s_{2y} & s_{2z} \\ s_{4x} & s_{4y} & s_{4z} \\ s_{5x} & s_{5y} & s_{5z} \\ s_{7x} & s_{7y} & s_{7z} \\ s_{8x} & s_{8y} & s_{8z} \\ s_{9x} & s_{9y} & s_{9z} \end{pmatrix}^+ \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_7 \\ I_8 \\ I_9 \end{pmatrix} \quad (6)$$

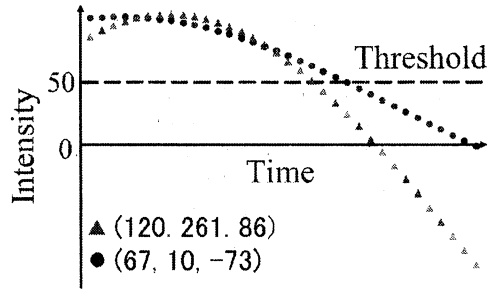


図3 観測された輝度と補正結果の例

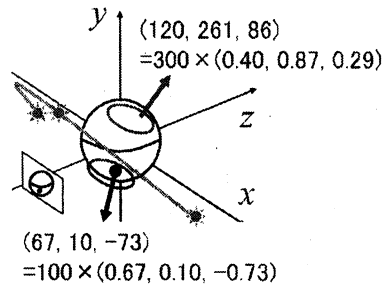


図4 太陽の軌跡と輝度変化の似た領域

$$\begin{pmatrix} I''_1 \\ I''_2 \\ \vdots \\ I''_{10} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s_{1x} & s_{1y} & s_{1z} \\ s_{2x} & s_{2y} & s_{2z} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ s_{10x} & s_{10y} & s_{10z} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} n''_x \\ n''_y \\ n''_z \end{pmatrix} \quad (7)$$

2.4.3 面法線ベクトル n'' について

RANSACで輝度の補正した際に算出した面法線ベクトル n'' から $|n''| = 1$ であることを利用して, 面法線の単位ベクトルを算出することができる。しかしながら, この面法線ベクトルには大きな誤差が含まれている場合がある。この理由について以下に述べる。

図3は, 12月13日慶應義塾大学矢上キャンパスにおいて観測された太陽の光源方向ベクトルを算出し, 以下の二つの面法線ベクトルを設定し, 輝度変化を算出してグラフに表したものである。縦軸は輝度であり, 横軸は時間である。また, 図4に太陽の軌跡と二つの面法線ベクトルを反射率 k と面法線単位ベクトル n に分けて球体上の面法線ベクトルとして示す。図4より, この二つのベクトルの成す角は88度であり, 反射率 k が大きく異なっているにも関わらず, 図3からしきい値以上の部分において, 輝度変化が類似していることが分かる。これは次のように説明できる。

太陽の軌跡が物体の近辺を中心とした円周上を動くために, 光源方向ベクトルの一次独立性が低くなる。つまり, 軌跡の平面に対して面法線ベクトルの輝度変化が類似してしまう。球体上の二つの楕円は輝度変化の類似した領域であり, 反射率 k の値によって図3のようにほぼ同じ輝度変化となる。画像平面

と光源の軌跡の平面が直行した場合に、軌跡の平面に対して面
対称なベクトルが最も多く含まれるために、輝度変化が類似し
た領域が最大となる。

輝度変化が類似した領域が存在することにより、計算で算出
した場合に照度が異なることやノイズの影響によって本来の面
法線ベクトルを算出するのではなく、軌跡の平面に対して面
対称なベクトルを算出してしまうことがある。このため、輝
度の補正を行うことはできるが、面法線ベクトルの算出を行
うと大きな誤差を生じることがある。しきい値を下げること
で誤差を生じにくくさせることも考えられるが、しきい値は
Attached Shadow をあらかじめ除去するために必要があるた
め、しきい値を下げると Attached Shadow の影響を受けるこ
とによって誤った面法線ベクトル算出してしまふ原因となる。
そこで、取りうる面法線ベクトルに制約を加えることで、面法
線ベクトルの誤算出を減少させる。

2.5 面法線ベクトルの探索

太陽の方向ベクトルの一次独立性が低いために、面法線ベク
トルの際に誤差を生じることがある。そこで、より適切な面法
線ベクトルの算出を行うために、画像に撮影される面の法線ベ
クトルの向きが限られること、そして、反射率の項を消去し、
正規化を行うことで同じ方向を向く面に輝度変化は等しくな
ることを利用する。具体的には、あらかじめ取りうる面法線ベ
クトルを設定して輝度変化を求めた後、実画像の各点の輝度
変化を正規化して比較を行い、同じ輝度変化となる点を探索す
ることによって面法線ベクトルを決定する。以下にその詳細を述
べる。

2.5.1 面法線ベクトルの設定

本手法は、図 2 (b) のように画像平面を xy 平面と平行な
座標系の下で行い、視線は z 軸の正の方向を向いている。つ
まり、写っている面法線ベクトルの z 成分の符号は負であるた
め、取りうる面法線ベクトルの z 成分の取りうる範囲を負と
して限定することができる。

図 5 のように面法線ベクトルを天頂角 ϕ 、方位角 θ の二つ
の変数で表すと、二つの変数の取りうる範囲は $0^\circ \leq \phi, \theta \leq 180^\circ$
となる。この範囲内を等間隔に区切ることで写っている面法
線ベクトルを設定する際に、平等に分布させることができる。ま
た、太陽の光源方向ベクトルを算出しているの、各面法線ベ
クトルについて各光源方向における輝度を算出しておく。

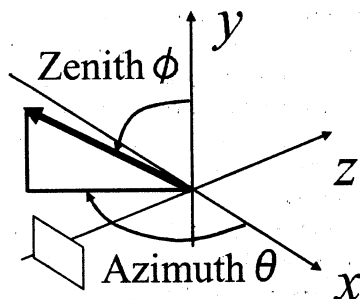


図 5 面法線ベクトルの設定

2.5.2 面法線ベクトルの探索

入力画像列の各画素について、設定した面法線ベクトルの中
から最も輝度変化の近いベクトルを探索する。式 (1) において
Lambertian モデルには係数として反射率 k が含まれているた
め、設定した面法線単位ベクトルの輝度変化と比較を行う場合
に反射率の影響をなくすためには正規化をする必要がある。そ
こで、入力画像の各画素の輝度変化において、最大値を取る光
源方向ベクトルを s_{max} とすると、各輝度の正規化後の値 I_i^{in}
は式 (8) のように算出することで反射率 k を消去することが
できる。

$$I_i^{in} = \frac{k s_i \cdot n^{in}}{k s_{max} \cdot n^{in}} = \frac{s_i \cdot n^{in}}{s_{max} \cdot n^{in}} \quad (8)$$

また、同様に設定した面法線ベクトルの輝度変化も入力画像
の輝度変化において、最大値を取る光源方向ベクトル s_{max} の
時の輝度で割ることで正規化を行う。

$$I_i^{ref} = \frac{s_i \cdot n^{ref}}{s_{max} \cdot n^{ref}} \quad (9)$$

最後に正規化した輝度を用いて、式 (10) で定義された SD
が最小となる面法線ベクトルを探索する。入力画像の輝度が完
全な Lambertian モデルで表される場合には、 $n^{in} = n^{ref}$ の
とき $SD = 0$ となる。

$$SD = \sum_i |I_i^{in} - I_i^{ref}| \quad (10)$$

3. 実験と検討

本手法の有効性を示すために、実験は CG で生成した Lam-
bertian モデルの球体の画像と屋外の画像について行った。本
研究は、太陽光を用いて屋外の物体の形状推定を行うことを目
的としているが、安定した環境の下でも有効であることを示す
ために CG で実験を行った。従来手法として、RANSAC を用
いた輝度補正の際に算出した面法線ベクトルを利用し、本手法
で算出した面法線ベクトルとの比較を行った。

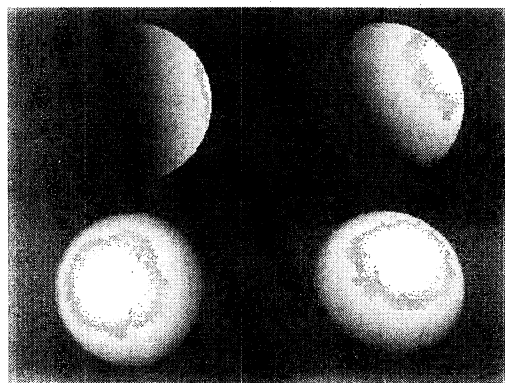


図 6 CG の入力画像の例

3.1 CGの場合

入力画像の例を図6に示す。屋外の画像を撮影した場合に算出した光源方向ベクトルを用いて光を照射した画像を34枚生成した。反射はLambertianモデルであり、観測される輝度が飽和することはないように画像化を行った。

3.1.1 定量的評価

本手法におけるしきい値の設定の際、CGの反射はLambertianモデルであるために二次反射や環境光の影響を受けておらず、しきい値を0としてAttached Shadowのみを取り除いた。また、面法線ベクトルを探索する際、面法線ベクトルの取りうる範囲を設定する必要があるが、CGは形状が既知であるために入力画像に含まれるすべての面法線ベクトルの範囲が既知である。そこで、CGに含まれるすべての面法線ベクトルが含まれるように角度を100分割して面法線ベクトルを設定し、探索を行った。

定量的評価を行う際、CGの形状が既知であるために球体の各点の面法線ベクトルについて、理論値との内積を取ることによって誤差を算出することができる。表1に従来手法と本手法の平均誤差を示す。単位は度である。

結果1において、従来手法では光源方向ベクトルの一次独立性が低いことや、球体の右下や左下などにおいて三方向以上から光が照射されていない領域が存在していたために、面法線ベクトルが算出できなかった点が31896点中1395点あった。本手法ではすべての点において輝度変化の比較を行って探索するため、面法線ベクトルが算出できない点はないが、従来手法と同様に三方向以上から光が照射されていない領域では大きな誤差を含んでいた。

そこで結果2として、従来手法で面法線ベクトルを算出できなかった点を除いて算出した結果を示した。完全なLambertianモデルであるために、本手法も従来手法も誤差が1度以下となって結果1よりも大幅な改善が見られ、光が三方向以上から照射されている点について本手法が安定した環境の下でも有効であることを示した。

表1 誤差の平均

	従来手法	本手法
結果1	4.7度	3.3度
結果2	0.88度	0.67度

3.1.2 設定する面法線ベクトルについて

次に、設定する面法線ベクトルの数を少なくした場合にどれだけ誤差が増大するかについて検討する。前述の実験においては、角度を100分割することで10000種類の面法線ベクトルの中から探索を行った。そこで、角度を100分割、50分割、25分割とすることで面法線ベクトルの種類を10000、2000、625として探索を行う。各面法線ベクトルの平均誤差を算出した結果を表2に示す。

180度を100分割した場合には間隔が1.8度であり、50分割した場合には間隔が3.6度となるため、誤差は間隔に依存して増えていくことがわかる。本実験では球体を用いたために分割

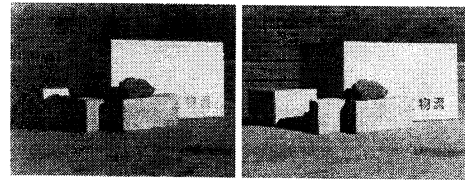
数を減らせば減らすほど誤差が生じたが、対象物体が直方体のような場合では分割数を減らすことで計算時間を減らすことができるとともに、面法線ベクトルを安定に算出することができると思われる。

表2 面法線ベクトルの種類と誤差

面法線ベクトルの種類	10000	2500	625
平均誤差	3.3	5.5	7.6

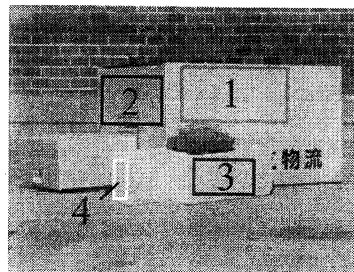
3.2 屋外の画像の場合

2005年12月13日慶應義塾大学矢上キャンパスの屋上で7時30分から15時45分まで15分間隔で34枚撮影した。カメラの向いている方向は北から時計回りに40度の方向であった。カメラはNikon D70を使用し、シャッタースピード、焦点距離、露光は撮影を通して一定とした。入力画像の例を図7に示す。画像のサイズは1192×894であるが、640×480に縮小して処理を行った。図7の(a)、(b)を比較すると大気の影響により色が変わり、照度が変わっていることが分かる。図7の3の1と2はダンボール、3と4はコンクリートブロックであり、これらの領域について面法線ベクトルの算出を行った。



(a) 8:00

(b) 10:00



(c) 13:00

図7 屋外で撮影した入力画像の例

3.2.1 算出した面法線ベクトル

図7の(c)の画像において、1から4は平面であるために、それぞれの領域内では面法線ベクトルが等しくなる。そこで、領域内の点の数を n として、各点 i の面法線ベクトル s_i を算出し、平均ベクトル s_{ave} を算出する。 s_i と s_{ave} の内積から誤差を算出し、式(11)に定義した平面性 $flatness$ を算出する。これは平均した面法線ベクトルからのずれを表したものであり、

単位は度である。本手法を適用する際に、しきい値は60とし、天頂角と方位角の分割数は25として625種類の面法線ベクトルの中から探索を行う。

表3に従来手法と本手法を用いて算出した面法線ベクトルの平面性を示す。aとbに比べ、cとdは著しく平面性が低い。これは入力画像のうち半分以上が34枚中20枚が影であったために、有効な輝度を得られなかったからであると考えられる。本実験では、カメラの向いている方向が北から時計回りに40度の方向であったため、太陽の光が当たらない領域が多く存在していた。真北向きにカメラを設置した場合が最も写っている面に光が平等に照射される状態である。また、1と3を比較した場合、3のコンクリートブロックの表面がざらざらしていたため、平面性が1と比較した場合に低くなったと考えられる。

従来手法と本手法の結果を比較した場合、すべてにおいて本手法が従来手法よりも良好な結果となっていることが分かる。

$$flatness = \frac{1}{n} \sum_i \arccos(s_i \cdot s_{ave}) \quad (11)$$

表3 平面性

	a	b	c	d
従来手法	7.2	17.3	57.6	35.3
本手法	3.2	15.1	50.5	30.1

3.2.2 形状推定

図7の(c)の1と3の部分について形状推定を行い、距離画像を用いて示した。黒ければカメラから遠く、白ければカメラに近いことを示す距離画像である。図8の(a)、(b)は1に対して従来手法、本手法を用いた結果であり、(c)、(d)は3に対して従来手法、本手法を用いた結果である。1に関して、従来手法、本手法とも平面性が高いため、グラデーションのようにダンボールの面がカメラに徐々に近づいている様子が復元できている。3に関しては、表面がざらざらしているために距離画像も白黒が交互になっていることが分かる。

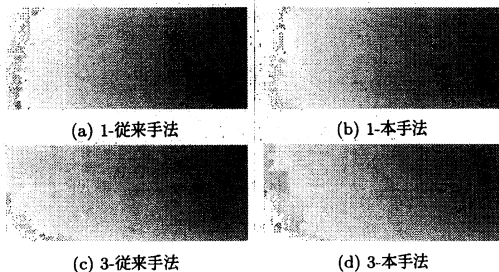


図8 形状推定

4. 結 論

屋外で物体の三次元形状を推定する手法として、太陽光を用いた照度差ステレオ法を提案した。本手法では、雲や大気によって照度が異なることによる影響をRANSACを用いて補正し、太陽の光源方向ベクトルの一次独立性が低いことによって計算で面法線ベクトルを算出すると誤差を生じるため、単眼画像の特徴を利用することでより適切な面法線ベクトルの算出を行った。実験では、従来手法よりも本手法が良好な結果を示していた。今後、多くの物体に対して本手法を適用して検討していきたい。

文 献

- [1] P. Debevec et al, "Estimating Surface Reflectance Properties of a Complex Scene under Captured Natural Illumination," USC ICT Technical Report, December 2004.
- [2] M. Okutomi and T. Kanade, "A Multiple-baseline Stereo," IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.15, No.4, pp.353-363, 1993.
- [3] T. Sato, M. Kanbara and N. Yokoya, "Outdoor scene reconstruction from multiple image sequences captured by a hand-held video camera," IEEE International Conf. on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent System, pp.113-118, July 2003.
- [4] S.G. Narasimhan and S.K. Nayar, "Contrast Restoration of Weather Degraded Images," IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.25, No.6, pp.713-724, June 2003.
- [5] 井口征士, 佐藤宏介, "三次元画像計測," 昭晃堂, 東京, 1990.
- [6] K. Ikeuchi, "Determining Surface Orientation of Specular Surfaces by using The Photometric Stereo Method," IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.3, No.6, pp.661-669, 1981.
- [7] R. Basri and D. Jacobs, "Photometric Stereo with General, Unknown Lighting," Proc. Computer Vision and Pattern Recognition Conf., pp.374-381, 2001.
- [8] A. Hertzmann and S. M. Seitz, "Example-Based Photometric Stereo: Shape Reconstruction with General, Varying BRDFs," IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.27, No.8, pp.1254-1264, August 2005.
- [9] M. A. Fischler and R. C. Bolles, "Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography," Communications of the ACM, Vol.24, No.6, pp.381-395, 1981.
- [10] 長沢工, "日の出・日の入りの計算: 天体の出没時刻の求め方," 地人書館, 東京, 1999.
- [11] 石井育規, 福井孝太郎, 向川康博, 尺長健, "光学現象の分類に基づく画像の線形化," 情報処理学会論文誌, Vol.44, No.SIG5, pp.11-21, April 2003.
- [12] T. Okabe and Y. Sato, "Object recognition based on photometric alignment using RANSAC," IEEE Computer Society Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition, pp.1-221-228, June 2003.
- [13] デジタル画像処理編集委員会, "デジタル画像処理," CG-ARTS 協会, 東京, 2004.