

ビデオカメラと同期するストロボを用いた動物体の照度差ステレオ法

安武 徹[†] 高橋信一郎[†] 松田 一朗[†] 伊東 晋[†]

[†] 東京理科大学 理工学部

〒 278-8510 千葉県 野田市 山崎 2641

E-mail: †{yasutake,taka,matsuda,itoh}@itohws01.ee.noda.tus.ac.jp

あらまし 照度差ステレオ法は、異なる照明条件下で撮影された複数の画像から、物体の3次元形状を再構成する手法である。この手法は、各画像において物体表面の傾きが等しいことを前提としているため、これまで撮影時刻によって傾きが変化する動物体に適用することは困難であった。この問題を解決するため、著者らは複数のストロボ光源をビデオカメラのフレームレートに同期して点滅させる装置を製作した。これによって、物体の変形を無視できるほど短い間隔で光源の位置を変化させながら画像を取得できるようになり、照度差ステレオ法に基づいて動物体の3次元形状を連続的に再構成することが可能となった。

キーワード 照度差ステレオ法, ビデオカメラ, ストロボ光源, 高輝度LED, 同期制御

Photometric Stereo for Moving Objects Using Strobe Lights Synchronized with a Video Camera

Toru YASUTAKE[†], Shinichiro TAKAHASHI[†], Ichiro MATSUDA[†], and Susumu ITOH[†]

[†] Faculty of Science and Technology, Tokyo University of Science
2641 Yamazaki, Noda-shi, Chiba 278-8510, Japan

E-mail: †{yasutake,taka,matsuda,itoh}@itohws01.ee.noda.tus.ac.jp

Abstract Photometric stereo is a method for recovering 3D shapes of objects from multiple images which are taken by a camera under different lighting conditions. Since the method relies on the assumption that surface orientation of the objects is constant in every image, it cannot be used for moving objects whose shape varies rapidly while the multiple images are taken, so far. To cope with this problem, we have developed a system which switches strobe lights synchronously with a frame rate of a video camera. The system enables us to acquire multiple images within a sufficiently short period where deformation of the objects is negligible and, as a result, 3D shapes of the moving objects are recovered sequentially.

Key words Photometric stereo, Video camera, Strobe lights, High intensity LED, Synchronous switching

1. ま え が き

照度差ステレオ法は、異なる照明条件下で撮影された複数の画像を用いて物体の3次元形状を再構成する手法である [1]。この手法では、各入力画像において物体表面の傾きが等しいことを前提条件としているため、これまでは静止物体を対象とし、光源の位置を切り替えながら1台のカメラで順次撮影を行うのが一般的であった。

これに対して筆者らは先に、高速に回転運動する光源の下でビデオカメラにより動画像を撮影する手法を開発した [2]。これにより、変形を無視できるほど十分短い間隔で光源位置の異なる画像を取得できるようになり、実験の結果照度差ステレオ法を動物体に適用することが原理的に可能であることが示され

た。しかし、上記の手法では1フレーム分の画像を得る間も光源が移動してしまうため、十分な露出時間を確保することが難しく、画像が不鮮明になってしまうという問題があった。一方、固定配置された複数の光源を、穴を開けた回転円板による機械的なシャッターで順次点灯させる方法 [3] も考案されているが、シャッターを開閉するタイミングを一般的なカメラのフレームレート (30fps) に同期させることが難しく、装置も大がかりになってしまう。本稿では、電子的に制御されたストロボ光源を用いることでこれらの問題を解決し、照度差ステレオ法に基づいて変形を伴う動物体の3次元形状を、連続的に再構成するシステムを構築したので報告する。

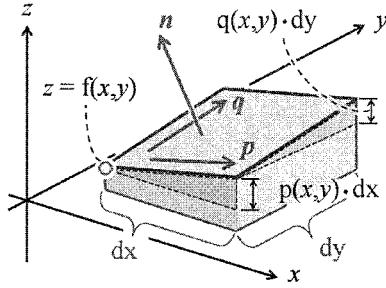


図1 面の傾き p, q と法線 n の関係

2. 照度差ステレオ法の原理

一般的な照度差ステレオ法では、1台のカメラの周囲に複数の光源を配置し、これらを順次点灯させながら撮影を行う。得られた入力画像列において、物体表面上の見かけの輝度値は光源の位置によって変化する。光源から照射される光線が物体付近で一様かつ平行に分布しており、物体表面が完全拡散面であるとみなせるとき、 t 番目の光源を点灯した際の各点の輝度値 I_t は次式によりモデル化できる。

$$I_t = \rho L_t^t \cdot n \quad (1)$$

但し、 ρ は光源の強度と物体の反射率で決まる係数、 L_t は光源方向の単位ベクトル、 n は物体表面の単位法線ベクトルである。更に平行投影カメラを仮定し、画面上の点 (x, y) に対応した物体表面の奥行きが関数 $z = f(x, y)$ として与えられるものとする。 $f(x, y)$ の x 方向、 y 方向の傾き成分をそれぞれ

$$p(x, y) = \frac{\partial f(x, y)}{\partial x}, \quad q(x, y) = \frac{\partial f(x, y)}{\partial y} \quad (2)$$

とおくと、法線ベクトル n は図1に示すように2つのベクトル $p = [1, 0, p(x, y)]$ 、 $q = [0, 1, q(x, y)]$ の外積方向で定義される。

$$n = \frac{p \times q}{|p \times q|} = \frac{[-p(x, y), -q(x, y), 1]^t}{\sqrt{p(x, y)^2 + q(x, y)^2 + 1}} \quad (3)$$

ここで、

$$r(x, y) = \frac{\rho}{\sqrt{p(x, y)^2 + q(x, y)^2 + 1}} \quad (4)$$

とおくと、(1)式は各画素 (x, y) について3つの未知数 $p(x, y)$ 、 $q(x, y)$ 、 $r(x, y)$ を含む方程式となる。

$$I_t(x, y) = r(x, y) \cdot L_t^t \cdot [-p(x, y), -q(x, y), 1]^t \quad (5)$$

従って、光源方向 L_t の異なる画像 $I_t(x, y)$ が3枚以上あれば、次式により各画素の傾き成分を含む未知数を計算できる。

$$p(x, y), q(x, y), r(x, y) = \arg \min \left\{ \sum_{t=1}^N (I_t(x, y) - I_t(x, y))^2 \right\} \quad (N > 3) \quad (6)$$

原理的にはこの傾き成分 $p(x, y)$ 、 $q(x, y)$ を任意の経路に沿って積分することで奥行き情報 $f(x, y)$ を復元可能であるが、本稿では傾き成分の推定誤差や離散化の影響を考慮し、以下に示すコスト関数 J を反復的に最小化することで奥行き $f(x, y)$ の値を算出している[5]。

$$J = \sum_{x, y} \left[\left\{ f(x+1, y) - f(x, y) - \frac{p(x+1, y) + p(x, y)}{2} \right\}^2 + \left\{ f(x, y+1) - f(x, y) - \frac{q(x, y+1) + q(x, y)}{2} \right\}^2 \right] \quad (7)$$

3. 実験システム

提案方式では光源の数を $N = 3$ とし、これらをビデオカメラのフレームレートに同期させながら順次点灯させている。光源には十分な応答速度を有する高輝度LEDを採用し、これらを電子的に制御する回路をPIC (Peripheral Interface Controller) ボードを用いて構成した。図2に装置の外観を示す。PICボードでは、ビデオカメラの外部同期信号(sync)としてフレームレート(30Hz)のパルス信号を発生させると共に、このパルスを3周期ごとに分離した信号を図3に示すように各光源の駆動回路に供給している。

使用したPICはマイクロチップテクノロジー社のPIC16F84Aであり、13の独立したI/Oポートを備えている。このため、光源の数は外部同期信号用のポートを除くと、最大 $N = 12$ 個まで拡張可能である。また、今回は一般的なビデオカメラで動作させるためフレームレートを30Hzとしたが、ソフトウェアの変更により、同期信号の周波数を上げてハイスピードカメラに対応させることも可能である。ストロボ光源駆動回路では、供給されたパルス信号をトリガとし、MOSFETにより高輝度LEDの発光に必要な電流のスイッチングを行っている。

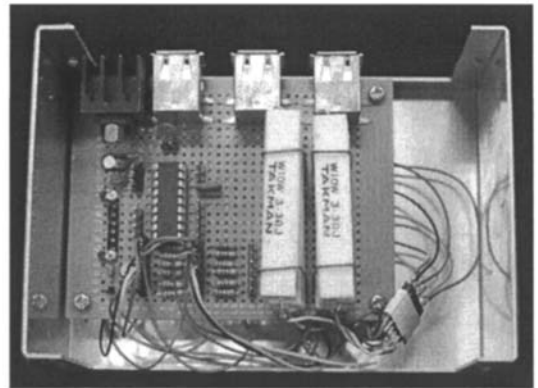


図2 PICボード

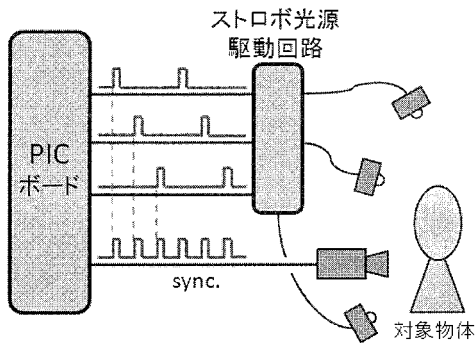


図3 システム構成

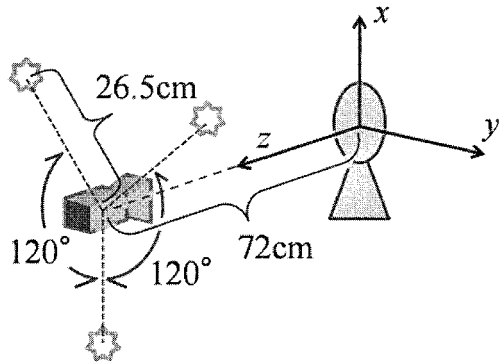


図5 撮影環境

4. テクスチャ情報の取得

提案方式では、ビデオカメラで撮影したカラー動画を輝度信号に変換し、これを照度差ステレオ法の入力画像 $I_i(x, y)$ として使用している。輝度信号に変換前のカラー画像を物体表面のテクスチャ情報として利用することができれば、イメージベースドレンダリング (IBR) によるCG映像生成技術への応用が可能となり、非常に有用であると考えられる。しかし、撮影したカラー動画はフレーム毎に光源位置が異なるため、物体表面の陰影が周期的に変化してフリッカーのようなちらつきを含む映像となってしまふ。そこで、撮影時の照明条件に左右されないテクスチャ情報を得るため、カラー画像のRGB成分に以下の補正処理を施す[4]。

まず、各フレームにおいて光源を任意の位置に移動させた場合の仮想的な輝度分布 $\tilde{I}_i(x, y)$ を求める。ここで各画素について未知数 $p(x, y)$, $q(x, y)$, $r(x, y)$ が計算された後であれば、(5)式に対し例えば $L_t = (0, 0, 1)^t$ を代入することで正面に光源を配置したときの $\tilde{I}_i(x, y)$ が計算できる。次に $\tilde{I}_i(x, y)$ と入力画像の輝度値 $I_i(x, y)$ との比率 $m = \tilde{I}_i(x, y)/I_i(x, y)$ を補正係数とみなし、これをカラー動画入力画像のRGB値それぞれに乗じる。

図4に補正処理の例を示す。(a)は顔面の下方向から照明が照射されているフレームのカラー画像である。これに対し光源の位置を正面に移動させた場合の補正係数 m の分布を同図(b)に示す。更に(a)のR, G, B成分に(b)の補正係数を乗じることにより、フレームによらず常に正面に光源があるときと等価なカラー画像(c)が得られる。



図4 補正処理

5. シミュレーション

$N = 3$ 個の光源を図5に示すようにカメラの光軸を中心として 120° 間隔で対称に配置し、表情が変化する顔の正面像を連続して撮影した。図6に取得した画像の一部を示す。なお、図6の左段、中段、右段はそれぞれ左上、右上、下部の光源が点灯している状態に対応している。これらの画像列からオーバーラップして抽出した3枚の入力画像に照度差ステレオ法を順次適用し、各フレームの時刻に対応した奥行き情報を再構成した結果を図7左段に示す。更に4.で述べた手法により求めたテクスチャ情報を合成したCG画像を同図右段に示す。これにより、各時間における表情の変化が忠実に再現されている様子を確認できる。

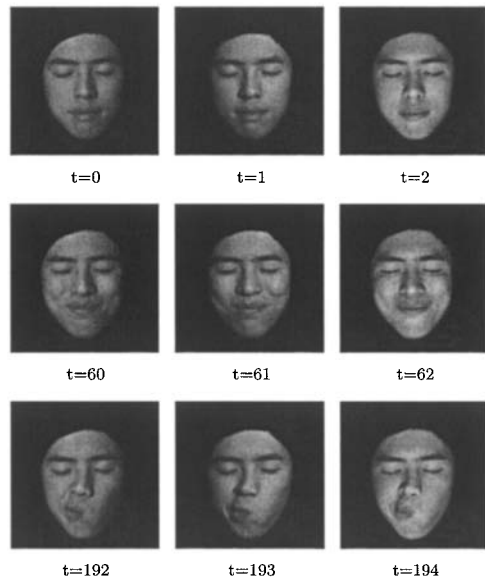


図6 入力画像

文 献

- [1] 北川博雄, 鈴木幹男, 藤田広一, “濃淡画像からの物体面の傾き抽出,” 電子情報通信学会論文誌, vol.J66-D, no.1, pp.65-72, Jan. 1983.
- [2] 小森一矢, 松田一朗, 伊東 晋, “移動光源を用いた変形する物体の照度差ステレオ法,” 2004 年映像情報メディア学会冬季大会, no.9-1, Dec. 2004.
- [3] 原 和弘, 佐治 斉, 日置専久, 品川嘉久, 國井利泰, “ライティングスイッチフォトメトリー法を用いた顔画像からの構成要素自動抽出法,” 情報処理学会第 46 回全国大会講演論文集, vol.2, pp.339-340, Mar. 1993.
- [4] 小森一矢, 松田一朗, 伊東 晋, “移動光源を用いた変形する物体の照度差ステレオ法 ～3次元構造とテクスチャ情報の同時獲得,” 2005 年電子情報通信学会年次大会, D-11-93, Mar. 2005.
- [5] Itsik Horoviz and Nahum Kiryati, “Depth from Gradient Fields and Control Points: Bias Correction in Photometric Stereo,” Image and Vision Computing, vol.22, no.9, pp.681-694, Aug. 2004.

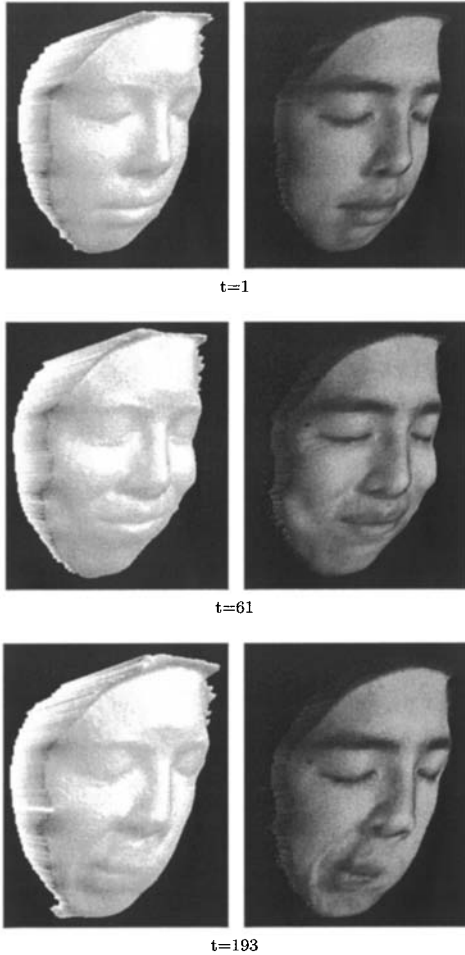


図 7 再構成結果

6. ま と め

本稿では, 電子的に制御されたストロボ光源とビデオカメラを使用し, 照度差ステレオ法の原理に基づいて動物体の 3次元形状を連続的に再構成する手法を提案した. PIC ボードと高輝度 LED を用いて実際にシステムを構築し, その動作を確認した. また, 3次元形状と共に物体面のテクスチャ情報も同時に取得できることを示した. 今後はハイスピードカメラを使用し, より動きの激しい物体の 3次元計測への応用について検討を加える予定である.