

## ビデオカメラと同期するストロボを用いた照度差ステレオ法 ～点光源モデルの導入～

A Photometric Stereo Method Using Strobe Lights Synchronized with a Video Camera  
～ Introduction of a Point Light Source Model ~

高橋信一郎\*      安武 徹\*      松田 一朗\*      伊東 晋\*  
Shinichiro TAKAHASHI      Toru YASUTAKE      Ichiro MATSUDA      Susumu ITOH

### 1. はじめに

照度差ステレオ法を変形を伴う動物体に適用するため、我々は先にストロボ光源をビデオカメラのフレームレートに同期させる装置を開発した [1]。しかし、電子的な制御が容易な LED を光源としていたため、一般的な照度差ステレオ法が前提としている平行光線の仮定を満たすために光源を遠方に設置すると、光量不足により画像が不鮮明となり、また露出時間の短い高速度カメラの利用も難しくなるといった問題があった。本稿では、近接点光源に基づいたモデル(点光源モデル)を照度差ステレオ法に導入し、上記の装置を用いた計測システムの精度向上を図る。

### 2. 計測システム [1]

変形を伴う物体に照度差ステレオ法を適用するためには、変形を無視出来るほど十分短い間隔で光源位置の異なる画像を取得する必要がある。そこで我々は、3個の光源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る装置を開発した。この装置では、十分な応答速度を有する光源として LED を採用し、これを PIC (Peripheral Interface Controller) ボードを介して制御している。具体的には、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周期毎に分離した信号を図1に示すように各光源の駆動回路に供給している。

### 3. 点光源モデルの導入

一般的な照度差ステレオ法では、照明として様々かつ平行に分布する光線を仮定している。この仮定は、光源

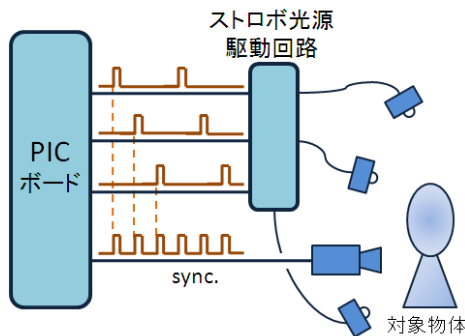


図1 光源とカメラの同期制御

\*東京理科大学 理工学部 電気電子情報工学科

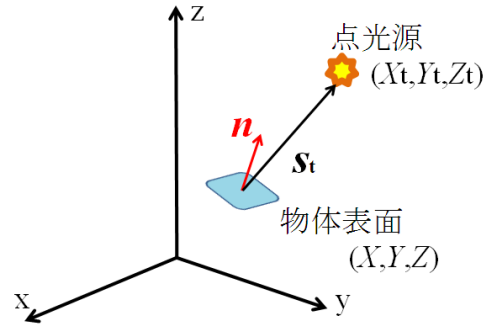


図2 点光源モデルの座標系

が十分遠方に配置された場合に成立するが、LED光源の場合、光量が不足してしまうため現実的な光源配置とは言えない。そこで、各光源を対象物体に近づけた場合を考えると、光線方向が光源との相対位置によって変化し、またその強度は距離の逆2乗則に従うことを考慮しなければならない。このような点光源モデルを用いた照度差ステレオ法に関してはいくつかの先行研究が存在する。例えば、文献 [2] では物体表面の傾きと反射特性に加え、奥行き自身も未知数として最小2乗法を解いている。この方法では、未知数の増加に伴って光源の数も増やす必要がある。また、[3] では予め粗く推定した奥行き情報を用いて光線の方向と強度をモデル化している。本稿では後者と同様な方法を採用するが、適当な値を初期値として反復的に求めた奥行き情報を利用し、その都度光線方向と強度を更新することで事前の奥行き推定を不要にしている。

ここで、弱透視投影モデルを仮定し、図2に示す座標系のZ軸の延長上にあるカメラが原点方向を向いているものとする。物体表面が完全拡散面と見なせるとき、 $t$ 番目の光源を点灯した際の物体表面の見かけの輝度値  $I'_t$  は次式によってモデル化出来る。

$$I'_t = \frac{\rho}{|S_t|^3} S_t \cdot n \quad (1)$$

$$S_t = (X_t - X, Y_t - Y, Z_t - Z) \quad (2)$$

但し、 $\rho$  は光源固有の強度と物体表面の反射率によって決まる係数、 $S_t$  は画像上の各画素に対応した物体表面上の点  $(X, Y, Z)$  と  $t$  番目の点光源の座標  $(X_t, Y_t, Z_t)$  とを結ぶベクトル、 $n$  は物体表面の単位法線ベクトルである。

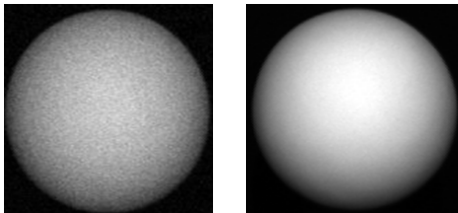
また、実際に撮影した画像の輝度値を  $I_t$  とすると、各画素に関する未知数  $\rho$  と  $n$  は次式によって求められる。

$$(\rho, n) = \operatorname{argmin} \left\{ \sum_{t=1}^3 (I_t - I'_t)^2 \right\} \quad (3)$$

実際にこれを解くためには、各画素におけるベクトル  $S_t$ 、すなわち (2) 式の  $Z$  の値が必要となる。本稿では、初期値として  $Z=0$  とおいた時の  $S_t$  に基づいて  $\rho$  と  $n$  を求め、更に法線  $n$  から再構成された奥行き  $Z$  を用いてベクトル  $S_t$  を再計算する。この手順を繰り返すことで、奥行き情報の精度を徐々に高めることが可能となる。

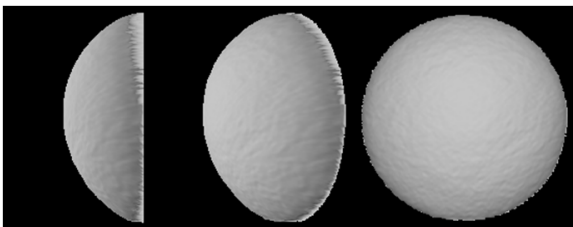
#### 4. シミュレーション結果およびまとめ

光源の配置および光源モデルの違いによる再構成精度の評価を行うため、石膏球を計測対象として実験を行った。図 3 (a) は光源を対象物体から十分離して配置した場合 (Far)、同図 (b) は光源を対象物体の近く (球の半径の 10 倍程度) に配置した場合 (Near) の入力画像の例を示している。図 3 (a) では光量不足を補うためにカメラの感度を上げているため、全体として雑音の多い画

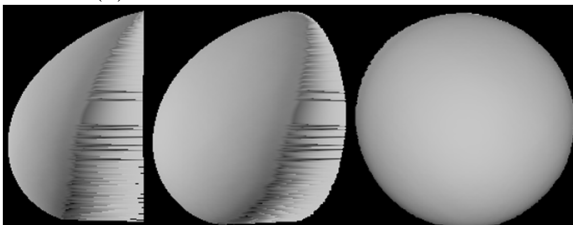


(a) 光源配置 Far (b) 光源配置 Near

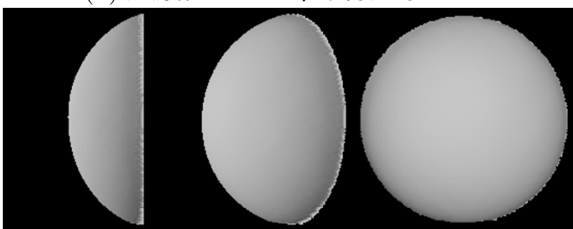
図 3 入力画像の例



(a) 光源配置 Far, 平行光線モデル

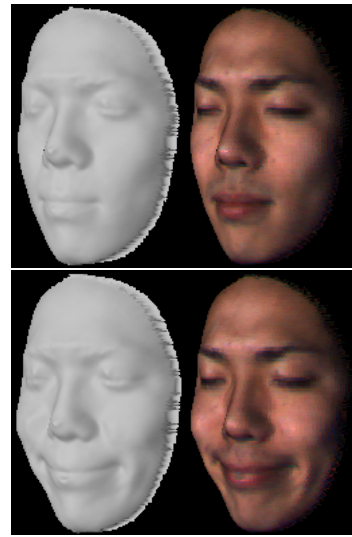


(b) 光源配置 Near, 平行光線モデル



(c) 光源配置 Near, 点光源モデル

図 4 石膏球の再構成結果



光源配置 Near, 点光源モデル

図 5 動物体の再構成結果

像となっている。次に、これらの入力画像に対して従来方式 (平行光線モデル) および提案方式 (点光源モデル) を適用し、3次元形状を再構成した結果 (左から、側面、斜面、正面の形状) を図 4 に示す。図 4 (a) では、光源と対象物体との距離が平行光線を仮定できる程度に離れているため、全体的な形状はほぼ正しいが、画像上の雑音の影響により、表面に局所的な凹凸が表れている。また、図 4 (b) では、光源が対象物体の近傍に配置されているにもかかわらず、平行光線を仮定して再構成を行っているため、形状が大きく歪んでしまっている。これに対し、図 4 (c) では、新たに点光源モデルを導入することにより、上記の歪を補正することに成功している。

最後に光源配置 Near の条件下で表情の変化を伴う顔の正面図をビデオ撮影し、得られた画像列からオーバーラップして抽出した 3 フレーム分の画像に対して提案手法を逐次適用することで、連続的に変化する 3次元形状を計測した結果を図 5 に示す。この図から表情の変化が忠実に再現されている様子が確認できる。また、文献 [4] の方法を用いて同時取得したテクスチャ情報を付加することにより、同図右に示すようにリアルな CG 画像を生成することも可能となった。

#### 【参考文献】

- [1] 安武 他: “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”, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.107, No.40, pp.29 - 34, May 2007.
- [2] 亀井 他: “点光源照明ステレオ法”, 電子情報通信学会論文誌 D, Vol.J71-D, No.10, pp.2086 - 2094, Mar. 1988.
- [3] N. Kolagani et al.: “Photometric Stereo Using Point Light Sources”, Proc. of IEEE International Conf. on Robotics and Automation (ICRA'92), May 1992.
- [4] 小森 他: “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講演予稿集, No.9-1, Dec. 2004.