

陰影情報と特徴点对応の統合による画像列からの全周囲3次元形状復元

前田剛, 椋木雅之, 浅田尚紀
(広島市立大学大学院 情報科学研究科)

1 はじめに

実物体の3次元形状のモデル化は文化財や芸術作品のデジタルアーカイブ化など幅広い目的に用いられる重要な技術である。中でも、カメラを用いて撮影した画像列から3次元形状を復元する手法は特殊な機器が不要であり、適用範囲が広いため、数多くの研究が行われてきた。

文献 [1] では、異なる光源状況下の画像から陰影情報をもとに法線を推定し、それをもとに反射パラメータや3次元形状をもとめ、3次元モデルを生成している。また文献 [2] では、全周囲画像列から特徴点对応させ、大局的幾何制約や反復処理を行うことで3次元モデルを生成している。しかし、法線をもとに復元する手法では法線に表れない段差や形状の全てを表すことはできない。また特徴点对応を用いた手法では画素数に比べ特徴点の数が少数のため、細かな形状を復元できない場合がある。

そこで本論文では、上記の2つの手法を組み合わせることでそれぞれの問題を解決し、高精細な3次元形状を復元することを目的とする。

2 陰影情報と特徴点对応の統合による復元

2.1 陰影情報からの法線方向の算出

文献 [1] の手法をもとに陰影情報から画素毎の法線情報を得る。まず、位置が既知である4つの光源を用いて同じ視点から異なる光源状況下で撮影した4枚の画像を得る。ここで、点灯する光源は画像中に1個とし、遠方から照らしているとする。また全ての光源は同じ明るさの白色光であるとする。

一般に、物体の表面反射特性は拡散反射成分と鏡面反射成分から構成される。反射光が拡散反射成分と鏡面反射成分に分けられるとすると、画素の色度と光源の色度が一致しない場合は色度情報から鏡面反射成分を除去することが可能であり、その画素に対応する物体表面の幾何情報が得られる。光源が白色の場合に $\hat{i}^k = i_{\max}^k(\mathbf{x}) - i_{\min}^k(\mathbf{x})$ とする。ここで、 i_{\max} は色ベクトル $I = \{i_r, i_g, i_b\}$ の最大色であり、 i_{\min} は最小の色である。また k は k 番目の光源を表す。これにより鏡面反射成分(白色成分)を除去できる。残りの拡散反射成分は物体表面における法線 $\bar{\mathbf{N}}$ と光源方向ベクトル $\bar{\mathbf{L}}$ の成す角 $(\bar{\mathbf{N}} \cdot \bar{\mathbf{L}})$ に比例するため、 $\hat{\mathbf{I}} = (\hat{i}^1 \cdots \hat{i}^4)^\top$ を用いて、表面法線は次式で導出可能である。

$$b(\mathbf{x})\bar{\mathbf{N}} = ([\bar{\mathbf{L}}]^\top [\bar{\mathbf{L}}])^{-1} [\bar{\mathbf{L}}]^\top \hat{\mathbf{I}} \quad (1)$$

ここで $b(\mathbf{x})$ はスケールファクタである。また $[\bar{\mathbf{L}}] = (\bar{\mathbf{l}}^1 \cdots \bar{\mathbf{l}}^4)^\top$ であり $\bar{\mathbf{l}}^k$ は k 番目の光源方向を定義する単位ベクトルである。

2.2 特徴点对応を用いた推定

文献 [2] より、特徴点の3次元位置とカメラパラメータを推定する。まず対象物の全周囲画像列から Harris の特徴点検出手法を用いて特徴点を検出する。この特徴点を、画像全体をアフィン変換で近似するという大局的幾何制約を用い画像間に対応付ける。この特徴点の対応付け結果をもとに物体の形状と各画像を撮影したカメラの位置・姿勢を同時に推定する (Structure from Motion)。

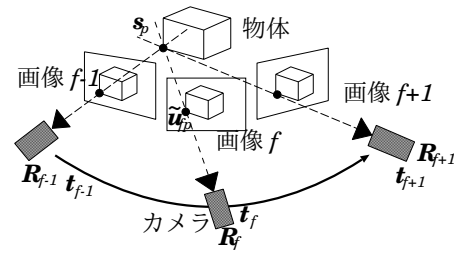


図 1: 形状復元とカメラパラメータ推定

図 1 に示すように、第 f ($1 \leq f \leq F$) 画像で観測された第 p ($1 \leq p \leq P$) 特徴点の観測座標を $\tilde{\mathbf{u}}_{fp} = (\tilde{u}_{fp}, \tilde{v}_{fp})$ 、第 p 特徴点の3次元座標を $\mathbf{s}_p = (x_p, y_p, z_p)$ 、第 f 画像のカメラ位置・姿勢を表すパラメータ(カメラパラメータ)を回転行列 \mathbf{R}_f 、並進ベクトル \mathbf{t}_f とする。 \mathbf{s}_p を \mathbf{R}_f と \mathbf{t}_f のカメラで投影した時の画像座標を \mathbf{u}_{fp} とすると、画像列からの形状復元は次のように定式化される。

$$\arg \min_{\mathbf{s}_p, \mathbf{R}_f, \mathbf{t}_f} \sum_{(f,p)} |\tilde{\mathbf{u}}_{fp} - \mathbf{u}_{fp}|^2$$

ここで $\mathbf{u}_{fp} = \mathcal{P}(\mathbf{R}_f \mathbf{s}_p + \mathbf{t}_f)$ (2)

ここで、 \mathcal{P} は透視投影変換を表す。式 (2) より \mathbf{s}_p 、 \mathbf{R}_f 、 \mathbf{t}_f を求める。そして特徴点で構成された3角面とカメラ位置、姿勢を用いることで、エピポーラ線上の対応点探索範囲を限定し、より密な特徴点の対応点探索を行う。形状復元と対応点探索を繰り返すことで特徴点の3次元位置とカメラパラメータを逐次改良しながら求める。

2.3 陰影情報と特徴点对応の統合

陰影情報から得られた法線と特徴点对応から得られた特徴点の3次元位置とカメラパラメータを用い、全周囲形状復元を行う。まず、対象物の全周囲画像列と、その画像列と同じカメラ位置数ヶ所において光源位置を変えた画像を得る。得られた画像から、それぞれの手法により法線、特徴点の3次元位置、カメラパラメータを得る。この情報を用い、それぞれのカメラ位置での対象物体の奥行きを推定することで形状を復元する。この推定の方法として、文献 [3] の手法を变形し、下のエネルギー関数を最小化することで画素毎の3次元位置を推定する。

$$\begin{aligned} & \arg \min_{z_{u,v}} E(z_{u,v}) \\ &= \arg \min_{z_{u,v}} \sum_{u,v} \lambda \left(\left(\frac{\partial z}{\partial x} - p_{u,v} \right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y} - q_{u,v} \right)^2 \right) \\ & \quad + (1 - \lambda) \left(\left(\frac{\partial^2 z}{\partial x^2} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 z}{\partial y^2} \right)^2 \right) \\ &= \arg \min_{z_{u,v}} \sum_{u,v} \lambda \left(\frac{1}{2} \left(\frac{z_{u+1,v} - z_{u-1,v}}{\Delta x} - p_{u,v} \right)^2 \right. \\ & \quad \left. + \lambda \left(\frac{1}{2} \left(\frac{z_{u,v+1} - z_{u,v-1}}{\Delta y} - q_{u,v} \right)^2 \right) \right. \\ & \quad \left. + (1 - \lambda) \left(\frac{z_{u+1,v} - 2z_{u,v} + z_{u-1,v}}{\Delta x} \right)^2 \right. \\ & \quad \left. + (1 - \lambda) \left(\frac{z_{u,v+1} - 2z_{u,v} + z_{u,v-1}}{\Delta y} \right)^2 \right) \end{aligned}$$

添字の u, v は各画素に対応している。 $z_{u,v}$ は地点 u, v での奥行きを表し、 $(\frac{\partial z}{\partial x}, \frac{\partial z}{\partial y}, 1)$ は法線である。また、求めた法線を $(p_{u,v}, q_{u,v}, 1)$ とする。 $(\frac{\partial^2 z}{\partial x^2})^2 + (\frac{\partial^2 z}{\partial y^2})^2$ は滑らかさ制約であり、隣接する点が直線に近いほど 0 に近くなる。 λ は重みづけであり、法線情報と滑らかさ制約のどちらを重視するかを決めるものである。この式は各画素 (u, v) に対応する奥行き $z_{u,v}$ が求めた法線情報と整合するように $z_{u,v}$ を誤差最小化により求めるものである。この際、滑らかさ制約により、奥行き $z_{u,v}$ が滑らかに変化するようにしている。

このエネルギー関数の最小化の手法として、共役勾配法を用いる。また、画像間の推定の整合性を保つために、共役勾配法で1回値を修正する毎に、隣接画像で共通の特徴点については、その3次元位置の平均をとる。

3 実験

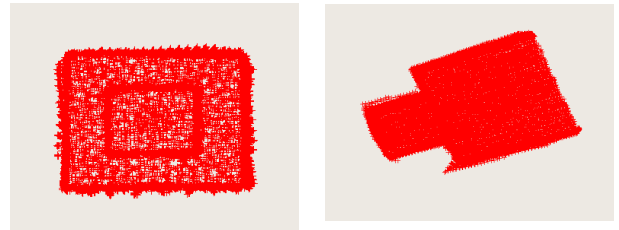
大きさの違う立方体に、石垣のテクスチャとレンガのテクスチャを張ったものを対象物体とし、10度間隔で作成した全周囲画像36枚と、同じカメラ位置で光源

位置を変えた4枚の画像を40度間隔で作成した。作成した全周囲画像の一部を図2に示す。

本手法を用いて3次元形状を復元した結果を図3に示す。表示は6画素毎に行った。図2の左の画像において、特徴点对応では1089点の特徴点で形状復元を行っているが、本手法では87586点で形状を復元している。この結果より、特徴点对応より多くの点により形状を復元できていることが分かる。



図 2: 作成した画像列の一部



上面図

側面図

図 3: 作成した画像列の一部

4 おわりに

本研究では光源位置を変えた画像と全周囲画像から陰影情報と特徴点对応の2つの手法により得られた情報を統合し、3次元形状を復元する手法について述べた。実験により多くの点による高精細な形状を復元できていることを確認した。

今後の課題として、実画像への適用や実験において不適切な推定結果となった部分を直し、3次元形状の高精度化を行うことなどが挙げられる。

謝辞

本研究の一部は、NEDO 産業技術研究助成事業の助成をうけて行った。

参考文献

- [1] 沈 黎, 町田 貴史, 竹村 治雄: "効率的なフォトメトリクスステレオ法による3次元形状と表面反射特性の推定", 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2005), pp.1305-1312.
- [2] 保田 和隆, 椋木 雅之, 浅田 尚紀: "大局的幾何学制約を用いた特徴点追跡に基づく画像列からの3次元モデル生成", Vol.47 No.SIG 10(CVIM 15) 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 July 2006 pp.96-106.
- [3] Yvan G.Leclerc and Aaron F.Bobick "The Direct Computation of Height from Shading" IEEE Conf. Comput. Vision Patt. Recogn. (Hawaii), May 1991, pp. 552-558.