

複数ステレオ画像を用いた画像と3次元情報の同時高解像度化

木村一人[†], 長井隆行[†]

永吉洋登[‡], 酒匂 裕[‡]

電気通信大学大学院電子工学専攻

(株)日立製作所中央研究所

1 まえがき

本稿では、3次元復元と高解像度化の問題の関連性を考慮し、ステレオ動画像(複数のステレオペア画像)を用いて、高精度3次元情報と高解像度画像を同時に推定する手法を提案する。提案法では、MAP推定(最大事後確率推定)の枠組みを用いて、2つの問題を同時に組み込む形で定式化する。そして、3次元情報、高解像度画像それぞれを交互に解くことで、解を得る。また、各繰り返しにおける解は、線形方程式を解くことで得ることができる。このように、2つの関連する問題を同時に解くことで、それぞれの精度を向上できると期待できる。

高解像度化を行う研究や高精度な3次元情報を得ようとする研究は数多く見られる[1]。例えば、文献[2]ではMAP推定を用いた高解像度化を行っているが、グローバルな平行移動のみについて行っており、ローカルな移動や回転については適用できない。また3次元情報の復元については考えていない。3次元情報と高解像度画像を同時に推定する研究としては、複数枚の画像のボケを利用したものや、照度差を利用したもの[3]がある。しかしボケを手がかりとして利用するためには、同一シーンを異なる焦点距離で複数枚撮像する必要があり、照度差を利用するためには、コントロールした照明下で複数枚撮像する必要があり煩雑である。また文献[4]ではステレオ画像を用いて、ステレオ対応点探索と、対応点が重なるように変形、平均化を行うことによるノイズ低減を交互に行うことで画質と奥行きを改善を行っているが、平行移動のみについてしか考慮されておらず、画質の改善についても複雑な推定を含まず単純な画素値の置き換えと補間のみである。

2 高解像度画像と3次元情報の同時推定

2.1 MAP推定による定式化

ここでの問題は、図1のような設定において、観測される低解像度(ステレオ)画像列 $O_i = [O_i^L O_i^R]$ から高解像度画像 \hat{X} と高精度3次元情報 \hat{Z} を求める問題であり次のように書くことができる。

$$\hat{X}, \hat{Z} = \operatorname{argmax}_{X, Z} P(X, Z | O_0, O_1, \dots, O_{N-1}) \quad (1)$$

但し、 N はステレオペアの数を表している。また、高解像度画像 \hat{X} は基準となるステレオペア O_0 の左画像 O_0^L を基準とする。ここで加わる雑音がガウシアンであるとすると、画像や3次元情報に関する事前確率に滑らかさ拘束を用いると、問題は最終的に次のように書くことができる。

$$\hat{X}, \hat{Z} = \operatorname{argmin}_{X, Z} \left\{ \sum_{i=0}^{N-1} (O_i^L - W_i^L X)^T (O_i^L - W_i^L X) + \sum_{i=0}^{N-1} (O_i^R - W_i^R X)^T (O_i^R - W_i^R X) + \lambda_X X^T C_X X + \lambda_Z Z^T C_Z Z \right\} \quad (2)$$

[†]Simultaneous Superresolution of image and 3D information using multiple stereo-pair images

[†]Department of Electronic Engineering, The University of Electro-Communications

[‡]Central Research Laboratory, Hitachi Ltd.

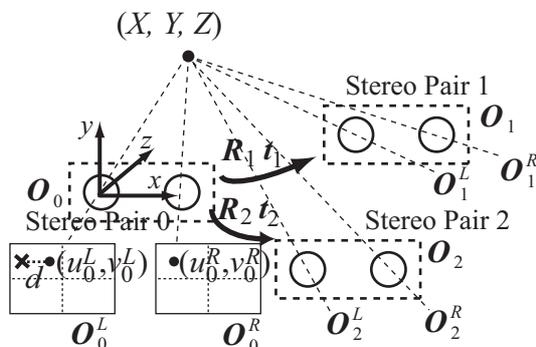


図1 カメラの配置

但し行列 W_i^L は、高解像度画像 X から O_i^L を生成するために必要な回転 R_i 、シフト t_i 、ボケ、ダウンサンプリング m 及び3次元情報 Z によって決定されるものである。また、 C_X 、 λ_X は画像の滑らかさ拘束を表現する行列およびそれに対する重み、 C_Z 、 λ_Z は3次元情報の滑らかさ拘束を表現する行列とそれに対する重みである。

式(2)の最小化を行うために、ここでは X 、 Z の片方を固定しながら交互に繰り返し最小化することを考える。しかし、式(2)は一見 X 、 Z それぞれに関して二次形式のように見えるが、 Z に関しては二次形式ではないことに注意が必要である。これは、行列 W_i^L 及び W_i^R が複雑な形で Z を含むためである。従って、 X に関しては線形方程式の解として解析的に解くことができるが、 Z に関しては工夫が必要である。

2.2 高精細3次元情報の推定

本節では、 X を固定し高精度3次元情報を推定する方法について述べる。今、3次元情報 Z と基準となるステレオペアの視差 d の各要素間には $d = Bf/Z$ なる関係がある。従って、視差 d を推定することは奥行き Z を推定することと等価であるため、基準となるステレオペア O_0 の視差 d に関する高精度化について考える。ここで、低解像度過程におけるボケがガウス関数で近似できるとする。このガウス関数をテラー展開し、視差の誤差 Δd に関する1次の項で近似することにより、式(2)を視差 d に関する2次形式で表現することが可能である。従って、最終的に次の線形方程式を繰り返し解くことで、固定した高解像度画像 \hat{X} に対して式(2)を最小化することができる。

$$\hat{d}^{(n)} = (Q + \lambda_Z \hat{C}_Z)^{-1} (Q \hat{d}^{(n-1)} + \epsilon) \quad (3)$$

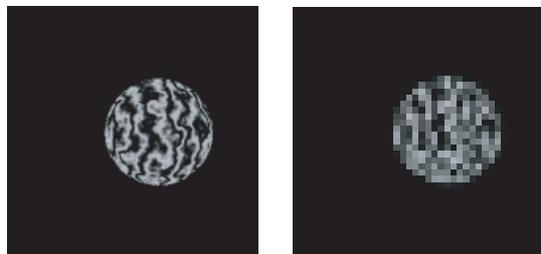
但し、 Q 、 ϵ は W_i^L 、 W_i^R やその微分を成分に持つ行列から計算される行列およびベクトルである。

2.3 高解像度画像の推定

式(2)において視差 \hat{d} を固定し、高解像度画像 X について最小化を行うことを考える。視差 \hat{d} を固定することで、式(2)は高解像度画像 X に関する2次形式となるため、以下の線形

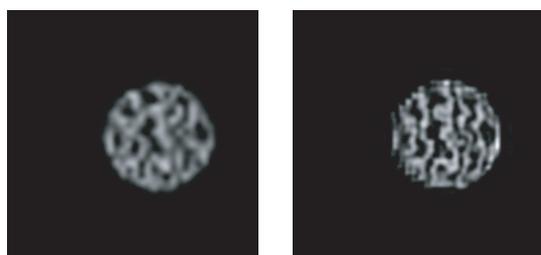


(a)



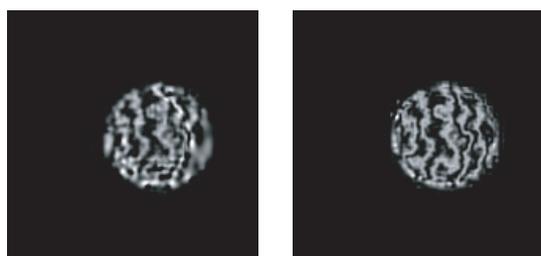
(b)

(c)



(d)

(e)



(f)

(g)

図2 CG球を用いた結果

表1 推定画像と正解画像との平均絶対値誤差

	Interpolation	MAP	Stereo+MAP	Proposed
MAE	5.7	4.9	5.4	2.9

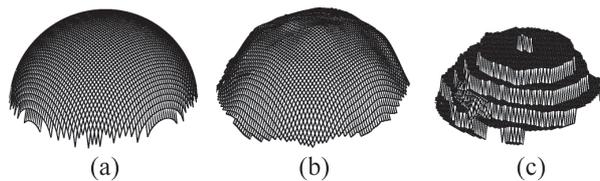
方程式の解として \hat{X} を得ることができる。

$$\hat{X} = \left(\sum_{i=0}^{N-1} (\mathbf{w}_i^L \mathbf{w}_i^L + \mathbf{w}_i^R \mathbf{w}_i^R) + \lambda_X \mathbf{C}_X \right)^{-1} \times \left(\sum_{i=0}^{N-1} (\mathbf{w}_i^L \mathbf{o}_i^L + \mathbf{w}_i^R \mathbf{o}_i^R) \right) \quad (4)$$

さらに、上式により推定された高解像度画像 \hat{X} を固定することで同様に視差 \hat{d} を前節の手法を用いて再推定する。この処理を交互に収束するまで繰り返すことで、最終的に高精細な3次元情報と高解像度画像を得ることができる。

3 実験

ここではまず、CGによって生成した球の画像を用いて実験を行った。入力には8組の低解像度ステレオペア画像計16枚であり、縦横それぞれ4倍の高解像度化を行った。図2(b)-(g)はそれぞれ、正しい高解像度画像、基準入力画像、スプライン補間による結果、文献[2]の結果、文献[2]のレジストレーション

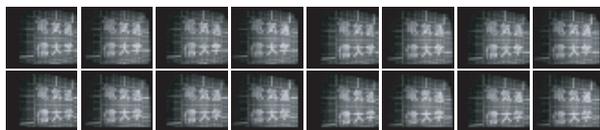


(a)

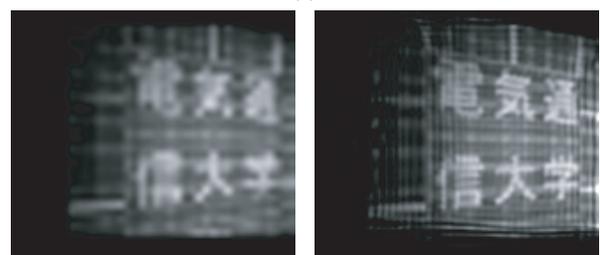
(b)

(c)

図3 3次元情報 (a) 正解 (b) 提案法 (c) ステレオ



(a)



(b)

(c)

図4 入力実画像と高解像度化の結果

パラメータにステレオの結果を用いたもの (stereo+MAP)、提案法による結果である。また、表1にそれぞれの平均絶対誤差を、図3には推定した3次元情報を示した。これらの結果より、提案法の有効性を確認することができる。次に実画像を用いて実験を行った。ステレオカメラをXYステージに固定し縦横それぞれ2cmずつ動かすことで、前述のシミュレーションと同様の条件で撮像した(図4(a))。撮像対象は、チェック柄に漢字を書いたボードである。図4(b), (c)にそれぞれ、スプライン補間および提案法の結果を示す。これより、実画像においても提案法がより精細な画像を推定していることが分かる。また3次元情報としては、平面状の形状が推定された。

4 まとめ

本稿では、高精度な3次元情報と高解像度画像を複数の低解像度なステレオペア画像から復元する手法について議論した。提案法は、MAP推定の考え方に基づき、2つの相互に関係する問題を組み込んだ評価関数を導出し、これらを交互に解くことで同時に推定することを可能とした。また、各繰り返しにおいては、線形方程式を解くことで解を得ることができる。

参考文献

- [1] S.C.Park, M.K.Park and M.G.Kang, "Super-Resolution Image Reconstruction: A Technical Overview", *IEEE Signal Processing Magazine*, pp.21-36, May 2003.
- [2] R.C.Hardie, K.J.Barnard and E.E.Armstrong, "Joint MAP Registration and High-Resolution Image Estimation Using a Sequence of Undersampled Images", *IEEE Trans. on Image Proc.*, vol.6, pp.1621-1633 Dec. 1997.
- [3] M.V.Joshia and S.Chaudhuri, "Simultaneous Estimation of Super-Resolved Depth Map and Intensity Field Using Photometric Cue", *Computer Vision and Image Understanding*, vol.101, issue 1, pp.31-44, Jan. 2006.
- [4] 池田, 清水, 奥富, "ステレオ画像を用いた画像の品質と奥行き推定精度の同時改善", 情報処理学会研究報告, CVIM, 2005(38), pp77-82, May 2005.