

気球上から取得した三次元形状の歪み補正

○ 廣田祐一郎 増田智仁 長谷川一英 小川原光一 池内克史(東京大学)

Shape Reformation of 3D Range Image Scanned on a Balloon

*Yuichiro HIROTA, Tomohito MASUDA, Kazuhide HASEGAWA,

Kohichi OGAWARA and Katsushi IKEUCHI, University of Tokyo.

Abstract - To scan upper part of large objects such as a temple, great Buddha, etc., scanning on a balloon is one of the best solutions. In this case, swing of the balloon causes distortion of 3D range images. To solve this problem we propose a shape-reformation method of 3D range images using the conjugate gradient method through estimating the velocity of the balloon.

Key Words: Shape reformation, Laser range finder, Balloon, Alignment

1. はじめに

近年、高精度なレーザーレンジセンサーから得られる3次元の計測データ(距離画像)を用いて、現実世界をCG上で再構築する研究が行われている。我々は主に大仏、寺院等のような比較的大規模な文化財を効率的にモデリングする手法の開発を行ってきた。

通常の三次元形状の計測は、レーザーレンジセンサーを地上に設置し、対象物体を余すことなく測定できるよう複数の方向からスキャンを行う。しかし、計測する対象物とそれを取り巻く環境によっては、センサーで計測できる範囲を越える箇所やオクルージョンになる箇所が存在し、これを回避するためにはセンサーを頻繁に移動させて、様々な地点からの計測を行わなければならない。このように、地上からのみの大規模対象物の測定は膨大な労力を要する。

そこで我々は地上から撮影不可能な領域を効率的に計測するために気球にセンサーを搭載したFlying Laser Range Finder(FLRF)を開発した。(図1, 表1)

通常のレーザーレンジセンサーによる計測とは異なり、気球上から物体の距離画像を取得する際には、気球の性質上、センサーの位置が風などの環境により変動し画像が歪むといった問題点がある。本論文ではFLRFによって得られる歪みを含んだ距離画像と、地上の定点から得られる歪みの無い距離画像とを位置合わせする際に、データ間の相対的な位置・姿勢を推定する従来の手法を拡張して、パラメータ表現された形状の歪みを同時に考慮し、これを補正する手法を提案する。

以下、2章では揺れ補正と位置合わせについての関連研究について説明し、3章では我々の提案する位置合わせ手法の拡張について述べる。4章では人工的に歪ませた距離画像を提案手法により補正し、歪み補正のパラメータの推定精度について検証する。最後に提案手法の課題について言及し、全体の結論を述べてまとめとする。



図1 FLRF

表1 FLRF 諸元

縦方向計測点数	160
横方向計測点数	3,600
スキャン時間 s	1

2. 関連研究

位置合わせ手法については Besl ら¹⁾の Iterative Closest Point(ICP 法)をベースに、対応要素、誤差尺度などの観点から様々な提案がなされてきた。

対応要素の抽出には距離画像の幾何学的特徴点を用いる方法²⁾³⁾と三次元点を用いる方法¹⁾⁴⁾がある。対応する三次元点としては最近傍点を用いるもの以外に Normal-Shooting⁵⁾や Projection⁶⁾⁷⁾を用いるものがある。

誤差尺度については点と点の距離、点と面の距離を用いるもの⁵⁾⁷⁾の他にセンサーでスキャンする際に点の座標値と同時に得られる反射率や光学的情報を用いる手法が提案されている⁸⁾。

これらの位置合わせ手法は全て剛体変換であり、本研究における歪み補正のように距離画像の幾何形状を変えることは考慮されていない。増田ら⁹⁾は西野らの位置合わせ手法¹⁰⁾を拡張して、形状の変形が何らかの数式によって表されるとき、三次元データ間

の位置・姿勢に加えて形状も最適化する手法を提案した。

そこで本研究では、増田らの形状変形位置合わせの手法を FLRF で得られる計測データの歪みの補正に応用した。空中における気球の運動をパラメータで記述し、気球上より得られた計測データと地上から得られた歪みの無いデータとの重なり部分で位置合わせする際に、歪みも同時に補正することを試みた。

西野らは通常的位置・姿勢合わせにおいて誤差関数 $E(\mathbf{p})$ を以下のように設定してこれを最急勾配法を用いて最小化している。

$$E(\mathbf{p}) = \frac{1}{N(M-1)} \sum_i^N \sum_j^M \rho(z_{ij}(\mathbf{p})) \quad (1)$$

where $\mathbf{p} = (\mathbf{m}, \mathbf{q})$

$$z_{ij}(\mathbf{p}) = \|\mathbf{R}(\mathbf{q})\mathbf{x}_i + \mathbf{m} - \mathbf{y}_{ij}\|^2$$

$$\rho(z_{ij}(\mathbf{p})) = \log(1 + \frac{1}{2} z_{ij}(\mathbf{p})^2)$$

N : 計測データの点数

M : 計測データの数

$\mathbf{x}_i$ は位置合わせを行う画像中の i 番目の点で $\mathbf{y}_{ij}$ は j 番目の計測画像中の $\mathbf{x}_i$ に対応する点を示す。パラメータ群 $\mathbf{p}$ は並進移動ベクトル $\mathbf{m}$ と回転を表すクォータニオン $\mathbf{q}$ で構成される。誤差関数は対応点(最近傍点)間距離の 2 乗 $z_{ij}(\mathbf{p})$ にローレンツ関数を用いた M 推定法で重みを付けた $\rho(z_{ij}(\mathbf{p}))$ の平均で定義している。この誤差関数についてパラメータ群 $\mathbf{p}$ についての勾配を求めると次のようになる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial \mathbf{p}} &= \frac{1}{N(M-1)} \sum_i^N \sum_j^M \frac{\partial \rho(z_{ij})}{\partial z_{ij}} \cdot \frac{\partial z_{ij}}{\partial \mathbf{p}} \\ &= \frac{1}{N(M-1)} \sum_i^N \sum_j^M w(z_{ij}) z_{ij} \frac{\partial z_{ij}}{\partial \mathbf{p}} \quad (2) \end{aligned}$$

$$\text{where } w(z_{ij}) = \frac{1}{z_{ij}} \cdot \frac{\partial \rho(z_{ij})}{\partial z_{ij}}$$

ここで $\partial z_{ij} / \partial \mathbf{p}$ を単位クォータニオンで評価する⁹⁾¹¹⁾ ことにするとパラメータ勾配はさらに次のように記述される。

$$\frac{\partial z_{ij}(\mathbf{p})}{\partial \mathbf{p}} = 2(\mathbf{R}(\mathbf{q})\mathbf{x}_i + \mathbf{m} - \mathbf{y}_{ij}) \frac{\partial \mathbf{R}(\mathbf{q})\mathbf{x}_i + \mathbf{m} - \mathbf{y}_{ij}}{\partial \mathbf{p}} \Big|_{\mathbf{q}^T}$$

$$= \begin{bmatrix} 2(\mathbf{x}_i + \mathbf{m} - \mathbf{y}_{ij}) \\ -4\mathbf{x}_i \times (\mathbf{m} - \mathbf{y}_{ij}) \end{bmatrix} \quad (3)$$

詳細については 9)10)11) を参照されたい。

増田らは西野らの用いた $z_{ij}(\mathbf{p})$ を形状パラメータを考慮して次のように再定義した。

$$z_{ij}(\mathbf{p}) = \|\mathbf{R}(\mathbf{q})\mathbf{g}(\mathbf{k})_i + \mathbf{m} - \mathbf{y}_{ij}\|^2$$

ここで、 $\mathbf{k}$ は形状パラメータ群、 $\mathbf{g}(\mathbf{k})_i$ は位置合わせを行う理想データの i 番目の点である。位置合わせする距離画像に並進と回転の移動に加えてパラメータによる変形 $\mathbf{g}(\mathbf{k})$ を加えている。この時パラメータ勾配は次のようになる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial z_{ij}(\mathbf{p})}{\partial \mathbf{p}} &= 2(\mathbf{R}(\mathbf{q})\mathbf{g}(\mathbf{k})_i + \mathbf{m} - \mathbf{y}_{ij}) \frac{\partial \mathbf{R}(\mathbf{q})\mathbf{g}(\mathbf{k})_i + \mathbf{m} - \mathbf{y}_{ij}}{\partial \mathbf{p}} \Big|_{\mathbf{q}^T} \\ &= \begin{bmatrix} 2(\mathbf{g}(\mathbf{k})_i + \mathbf{m} - \mathbf{y}_{ij}) \\ -4\mathbf{g}(\mathbf{k})_i \times (\mathbf{m} - \mathbf{y}_{ij}) \\ 2(\mathbf{g}(\mathbf{k})_i + \mathbf{m} - \mathbf{y}_{ij}) \frac{\partial \mathbf{g}(\mathbf{k})_i}{\partial \mathbf{k}} \end{bmatrix} \quad (4) \end{aligned}$$

一番下の行が新たに追加された形状パラメータの勾配を表している。

実際には最小化を効率的に行うために Fletcher-Reeves 法, Polak-Ribiere 法による共役勾配法¹²⁾¹³⁾¹⁴⁾を用いている。勾配方向に対する移動量は、黄金分割による囲い込み手法によって決定される。

3. 歪み補正を考慮した位置合わせ手法

気球による画像の歪みには、以下の要素が影響する。

- ・ 平行移動の初速度
- ・ 平行移動の加速度
- ・ 回転移動の角速度
- ・ 回転移動の角加速度

FLRF が 1 回スキャンするのに要する時間が 1 秒であることを考慮すると、計測時間内における加速度・角加速度は無視することができる。また、微小な回転移動は等速度の平行移動として近似することができるため、本稿では計測時間内の気球の等速度運動のみを考えることとする。

この場合、各軸についての速度である 3 つのパラメータを最適化することになる。よって、(4)式における形状パラメータの項 $\mathbf{g}(\mathbf{k})$ は速度ベクトル $\mathbf{v}$ をパラメータとした歪みの補正項 $\mathbf{d}(\mathbf{v})$ で置換される。

以上の仮定下においてパラメータ勾配 $\partial z_{ij} / \partial \mathbf{p}$ は次のようになる．

$$\frac{\partial z_{ij}(\mathbf{p})}{\partial \mathbf{p}} = \begin{bmatrix} 2(\mathbf{d}(\mathbf{v})_i + \mathbf{m} - \mathbf{y}_{ij}) \\ -4\mathbf{d}(\mathbf{v})_i \times (\mathbf{m} - \mathbf{y}_{ij}) \\ 2(\mathbf{d}(\mathbf{v})_i + \mathbf{m} - \mathbf{y}_{ij}) \frac{\partial \mathbf{d}(\mathbf{v})_i}{\partial \mathbf{v}} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\text{where } \mathbf{d}(\mathbf{v})_i = \mathbf{x}_i + t_i \mathbf{v}$$

ここで t_i はスキャン開始からの経過時間であり，歪み補正項 $\mathbf{d}$ は FLRF で計測された画像中の点座標に計測開始からの相対変位 $t_i \mathbf{v}$ を加えることで表される．

4. 実験

4.1 実験方法

提案した歪み補正を考慮した位置合わせ手法について，歪みを記述する速度パラメータの推定精度を検証するためにサンプルデータを用いた実験を行った．

FLRF は図2のように左上から右下に向かってスキャンし，得られた画像の横方向の点は表 1 に示したように 3,600 点得られるが，実際は両端の 900 点をカットし中央の 1,800 点を距離画像として用いている．

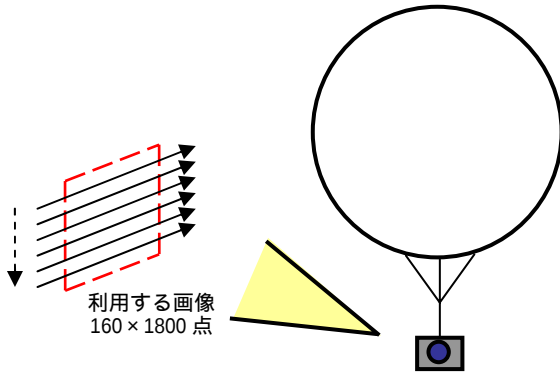


図2 スキャン順序

表 1 に示した FLRF 諸元と，距離画像として横方向については中央の 1,800 点のみを利用していることから式(5)において t は次のようになる．

$$t = \frac{1000}{160}i + \frac{1000}{160 \cdot 1800}(j + 900) \quad (6)$$

ただし i, j はそれぞれ距離画像の点の横，縦のインデックス番号である．

実験では速度推定の精度を定量的に評価するため

に，FLRF が x 軸方向に 0.3m/s で移動しながら計測した場合のサンプル距離画像(図 4)を人工的に生成し，これと，元の歪みのない画像とを提案手法を用いて位置合わせし歪みパラメータである速度ベクトルを推定した．反復計算に用いる並進，回転運動の初期値は適切に設定されているものとし，速度の初期値(反復法に用いる最初の入力値)については手で入力しこの初期値に対する速度推定結果を見る．

4.2 実験結果・考察

位置合わせ前後の距離画像を図 4，図 5 に，入力する速度初期値に対する速度推定の結果を表 2 に示す．

表 2 では入力する速度初期値によらず高い精度で FLRF の速度を推定し，歪みを補正することが可能であることが分かる．本実験では気球が比較的安定しているときに計測を行うことを想定して FLRF の速度を 0.3m/s としたが，この場合，初期値を特に設定しないで 0m/s としても高い精度で速度を推定し歪みを補正することが可能である．つまりセンサーの速度に関して前提知識がない場合でも，0.3m/s のセンサーの速度であれば正しく補正できるといえる．

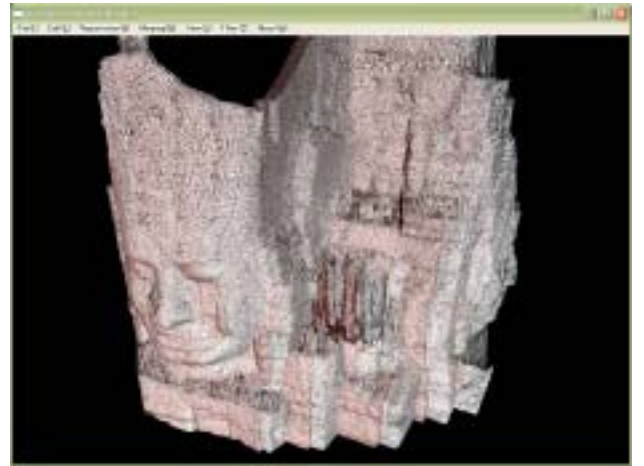


図4 位置合わせ前

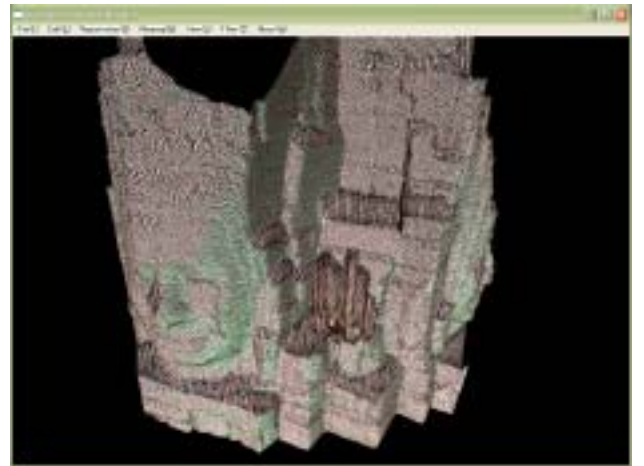


図5 歪み補正位置合わせ後

表 2 速度推定結果

初期値 m/s	推定速度 m/s
0.0	0.298567
0.1	0.302812
0.2	0.297567

5. まとめ

本論文では地上の定点から取られた歪みのない計測データと、FLRFにより計測された歪みを含む距離画像との間で増田らの拡張位置合わせ手法を応用した。拡張位置合わせ手法は計測データ間の位置・姿勢合わせと同時に形状合わせを行う手法であり、この手法を用いて FLRF によるデータの歪みを補正した。FLRF は空中で等速度で動いているものと仮定すると、FLRF によって得られるデータの歪みは FLRF の速度を用いて表現することが出来る。よって、最適な歪み補正を行うことは、計測時の FLRF 速度を推定することに他ならない。

実験では FLRF の運動している方向が与えられれば、速度初期値を特に設定しなくても(0m/s でも)高い精度で FLRF の速度を推定し、空中を移動している気球上から計測した距離画像の歪みを補正できることを実証した。

しかし逆に気球の運動している方向が与えられない場合は、初期値に非常に敏感になり反復計算が局所解に陥って正しい補正が出来なくなることが多かった。その原因の一つとして、並進運動、回転運動、歪みの補正による、誤差関数への影響力がそれぞれ異なることが挙げられる。この問題はこれらの要素に適切な重みを設定することある程度回避でき、初期値への依存性を低くすることが出来ると考えられる。また、気球の運動方向や速度の初期値をより正確に求めるため手段としては FLRF に加速度センサー、角速度センサーを搭載することで FLRF の運動を検知することが考えられる。このように、ソフト的、ハード的なアプローチを組み合わせしていくことで今後、より収束力の高い歪み補正手法を開発していく予定である。

参考文献

- 1) P. J. Besl and N. D. McKay: A method for registration of 3-d shapes. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 14, No. 2, pp. 239-256, (1992)
- 2) K. Higuchi, M. Herbert, and K. Ikeuchi: Building 3-d models from unregistered range images. *Graphical Models and Image Processing*, Vol. 57, pp. 315-333, (1995)
- 3) A. E. Johnson and M. Herbert: Surface matching for object recognition in complex 3-dimensional scenes. *Image and Vision Computing*, Vol. 16, No. 9/10, pp. 635-651, (1998)
- 4) David Simon: Fast and Accurate Shape-Based Registration, *PhD thesis, School of Computer Science, Carnegie Mellon University*, (1996)
- 5) Y. Chen and G.G. Medioni: Object modeling by registration of multiple range images. *Image and Vision Computing*, Vol. 10, No. 3, pp. 145-155, (1992)
- 6) G. Blais and M. Levine: Registering multiview range data to create 3d computer objects. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 17, No. 8, pp. 820-824, (1995)
- 7) P. Neugebauer: Geometrical cloning of 3d objects via simultaneous registration of multiple range images. *Proceedings of International Conference on Shape Modeling and Application*, pp. 130-139, (1997)
- 8) A. E. Johnson and S. Kang: Registration and integration of textured 3-d data. *Proceedings of International Conference on 3D Digital Imaging and Modeling*, pp. 234-241, (1997)
- 9) T. Masuda: 3d shape restoration and comparison through simultaneous registration. Master's thesis, Graduate School of Information Science and Technology, University of Tokyo, (2003)
- 10) K. Nishino and K. Ikeuchi: Robust simultaneous registration of multiple range images. *Proceedings of the 5th Asian Conference on Computer Vision*, Vol. 2, pp. 455-461, (2002)
- 11) Mark D. Wheeler: Automatic Modeling and Localization for Object Recognition. PhD thesis, School of Computer Science, Carnegie Mellon University, (1996)
- 12) E. Polak: *Computational Methods in Optimization*. New York: Academic Press, (1971)
- 13) David A. H. Jacobs: *The States of the Art in Numerical Analysis*. London: Academic Press, (1977)
- 14) J. Stoer and R. Bulirsch: *Introduction to Numerical Analysis*. New York: Springer-Verlag, (1980)