

大規模距離画像の同時位置合わせ手法

大石 岳史^{†1} 佐川 立昌^{†3} 中澤 篤志^{†2}
倉爪 亮^{†4} 池内 克史^{†1}

Simultaneous Alignment of a Large Number of Range Images

TAKESHI OISHI,^{†1} RYUSUKE SAGAWA,^{†3} ATSUSHI NAKAZAWA,^{†2}
RYO KURAZUME^{†4} and KATSUSHI IKEUCHI^{†1}

This paper describes a method for aligning a large number of range images. A problem in the process of simultaneous alignment of a large number of range images is the increase of the computation time and required memory. Then, we developed a parallel method that improves the time and memory performances of that process. Searching correspondences and calculation of errors between two range images, which are most time consuming steps, can be performed independently in each pairs. Therefore, the parallelization is achieved by assigning these pairs of two range images to each processors. The graph partitioning algorithms are applied in order to obtain the optimal solution of pairs assignment.

1. はじめに

距離画像の位置合わせ問題は、実物体から形状モデルを自動生成する上で最も重要な問題の一つである^{1);2)}。レンジセンサによって複数の異なる方向から測定された距離画像は、それぞれの視点を基準とした座標系で記述されているため、座標系を統一する位置合わせ処理が必要である。この距離画像の位置合わせ問題を解決する手法として最もよく知られている手法は、Besl が提案した ICP (Iterative Closest Point) である³⁾。この ICP を基本として、これまでに様々な手法が提案されている^{4)~6)}。

多くの位置合わせ手法は 2 枚の距離画像の相対位置姿勢を求めるものであるが、距離画像枚数が多い場合はこれを順次繰り返していくと誤差の蓄積が問題となる。これを避けるためには、全ての距離画像間の相対位置姿勢を同時に推定する同時位置合わせ手法が有効である。ペアワイズな手法を拡張した同時位置合わせ手法は Bergevin や Benjema によって提案されている。また、Neugebauer は点と面の距離を誤差として、最小二乗問題を線形化して解くことによって全体

位置合わせを行う手法を提案している⁷⁾。Nishino らが提案する手法では M 推定を用いてロバストな同時位置合わせを行っている¹⁰⁾。

このように、これまでに様々な位置合わせ手法が提案されているが、いずれの手法でも問題となるのが対応点探索の計算量である。基本的な ICP では最近傍点を全ての頂点に対して計算するため、対応する 2 枚の距離画像の頂点数を等しく n とした場合、対応点探索の計算量は $O(n^2)$ である。そこで、最近傍探索を高速化する手法としては探索木 (kd-tree) を使う手法も提案されている¹¹⁾。ただし kd-tree による探索の計算量は $O(n \log(n))$ である。一方、複数距離画像の同時位置合わせは、全ての組合せに対して対応点探索を行う必要があるため、画像枚数が増えると計算量は急激に増加する。

また、大規模距離画像を位置合わせする際のもう一つの大きな問題点はメモリ使用量である。通常の同時位置合わせ手法では、全ての組合せに対して繰り返し計算を行うために、全距離画像をメモリ中に読まなければならない。12) のような並列化 ICP でも各プロセッサは全ての距離画像をメモリ中に保持する必要がある。

そこで、本論文では計算の高速化及びデータ分散によるメモリ削減を実現する並列同時位置合わせ手法を提案する。また、本手法を分散メモリ型の PC クラス

†1 東京大学 生産技術研究所

†2 大阪大学 サイバーメディアセンター

†3 大阪大学 産業科学研究所

†4 九州大学 大学院 システム情報科学研究院

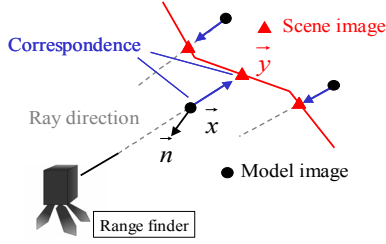


図 1 対応点探索

Fig. 1 Search correspondences

タ上で実装し、大規模距離画像群の同時位置合わせ実験によりその有用性を示す。

2. 同時位置合わせ手法

本章ではまず基本となる同時位置合わせ手法について説明する。前提条件として各距離画像は予めおおまかに位置合わせされているものとする。位置合わせ手順は ICP とほぼ同じであるが、全ての距離画像に対して誤差関数が一つ定義され、全ての距離画像の位置が同時に推定される点異なる。手順の概略を以下に示す。

- (1) 全ての距離画像間で以下の計算を行う
 - (a) 全頂点の対応点を探索する
 - (b) 全対応点間の誤差を計算する
 - (2) 計算された全ての誤差を最小化するように各距離画像の変換行列を求める
 - (3) 終了条件を満たすまで (1) (2) を繰り返す
- 以下、これらの手順についてそれぞれ説明する。

2.1 対応点探索

まず、全距離画像から 2 つの画像を選択しそれぞれモデル画像、シーン画像とする。図 1 に示すで示されたモデル画像上の頂点からレンジセンサの光線方向に直線を伸ばし、で表現されるシーン画像のメッシュとの交点を対応点とする。このとき光線方向に対して対応するメッシュが裏面方向になる場合や、対応点間距離が与えられた閾値 l_{th} 以上の場合は誤対応として除去する。この対応点探索は GPU を用いて高速に行われる。

2.2 誤差評価

対応する 2 点間の距離には点と面の距離を用いる。モデル画像上の頂点 \vec{x} とそれに対応するシーン画像メッシュ上の点 \vec{y} とし、 \vec{n} をモデル画像上の頂点 \vec{x} の法線とすると (図 1)、誤差評価式は以下ようになる。

$$\mathbf{R}_M \vec{n} \cdot \{(\mathbf{R}_S \vec{y} + \vec{t}_S) - (\mathbf{R}_M \vec{x} + \vec{t}_M)\} \quad (1)$$

ここで \mathbf{R}_M , \vec{t}_M はモデル画像の回転、平行移動行列であり \mathbf{R}_S , \vec{t}_S はシーン画像の回転、平行移動行列で

ある。これを全ての距離画像の組合せが含む全頂点 (i, j) に対して計算し二乗誤差 ε^2 が最小となるような変換行列を求める。この式は以下ようになる。

$$\varepsilon^2 = \min_{\mathbf{R}, t} \sum_{i \neq j, k} \{(\mathbf{R}_M \vec{n} \cdot \{(\mathbf{R}_S \vec{y} + \vec{t}_S) - (\mathbf{R}_M \vec{x} + \vec{t}_M)\})\}^2 \quad (2)$$

2.3 変換行列の計算

式 (2) に示した誤差評価式はこのままでは非線形であり最小化計算が難しいため、これを線形化する⁷⁾。求める変換の回転角を微小角と仮定すると、回転行列 \mathbf{R} は以下のように書くことができる。

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} 1 & -c_3 & c_2 \\ c_3 & 1 & -c_1 \\ -c_2 & c_1 & 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

平行移動行列を、

$$\vec{t} = \begin{pmatrix} t_x & t_y & t_z \end{pmatrix} \quad (4)$$

とすると式 (2) は以下のように変形する事ができる⁷⁾。

$$\varepsilon^2 = \min_{\vec{\delta}} \sum_{i \neq j, k} \|\mathbf{A}_{ijk} \vec{\delta} - \mathbf{s}_{ijk}\|^2 \quad (5)$$

$$\mathbf{s}_{ijk} = \vec{n}_{ik} \cdot (\vec{x}_{ik} - \vec{y}_{ijk}) \quad (6)$$

$$\mathbf{A}_{ijk} = \begin{pmatrix} \underbrace{0 \dots 0}_{6i \times 1} & \underbrace{\mathbf{C}_{ijk}}_{6 \times 1} & \underbrace{0 \dots 0}_{6(l-i-1) \times 1} \\ \underbrace{0 \dots 0}_{6j \times 1} & \underbrace{-\mathbf{C}_{ijk}}_{6 \times 1} & \underbrace{0 \dots 0}_{6(l-j-1) \times 1} \end{pmatrix} + \quad (7)$$

$$\mathbf{C}_{ijk} = \begin{pmatrix} \vec{n}_{ik} \times \vec{y}_{ijk} \\ -\vec{n}_{ik} \end{pmatrix} \quad (8)$$

$$\vec{\delta} = (\vec{m}_0 \dots \vec{m}_{n-1}) \quad (9)$$

$$\vec{m}_i = \begin{pmatrix} c_{1i} & c_{2i} & c_{3i} & t_{xi} & t_{yi} & t_{zi} \end{pmatrix} \quad (10)$$

ただし全ての距離画像枚数は n である。式 (5) より最小二乗法により $\vec{\delta}$ が求められる。

3. 同時位置合わせの並列化

本章では 1 台のサーバと複数台のクライアントからなる分散メモリシステムにおいて、前章で示した同時位置合わせ手法を並列に実現する方法について説明する。

前章で説明した対応点探索及び誤差計算は各距離画像間で独立に計算することができるため、これらの計

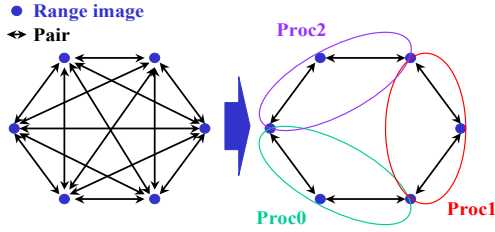


図 2 組合せの除去
Fig. 2 Rejection of redundant pairs

算を距離画像の組合せ毎にクライアントに割り当てる。各距離画像の変換行列の計算は、対応点探索などに比べて計算時間が短い上にメモリ空間を必要としないため、サーバプログラムで行う。また、各クライアントが計算する組合せも同様にサーバプログラムが求める。

3.1 組合せの除去

距離画像間の重なりが全く無い場合や重なる領域が小さい場合は、これらの距離画像間で位置合わせ計算を行う必要は無い。また逆に距離画像の重なり枚数が十分多い場合は、これらの距離画像間の計算は冗長とみなす事ができる。そこで、図 2 に示すように冗長、不要な組合せを予め除去する事によって、計算の高速化を図るとともにデータ分散の効率を高める。

この組合せの除去は以下の 3 つの情報を用いて順次行っていく。

1. 大域的な接続関係
2. 局所的重なり領域
3. 相対画像間距離

大域的な接続関係とは、最小バウンディングボックスの重なりと視線方向が成す角度によって定められる。また局所的重なり領域とは、各距離画像間の対応点数によって定義される。そして相対画像間距離は、各距離画像間の相対的なユークリッド距離によって定義される。各手順ではそれぞれに定義された情報によって条件の判定を行い、組合せを除去していく。

3.2 組合せの割当て

以上の手法によって得られた距離画像の組合せを各プロセッサに割り当てる。負荷分散とデータ分散を同時に満たす割当てを求める問題は NP-困難である¹³⁾。そこで我々はこの問題をグラフ分割問題に帰着し、経験的解法を適用する事によって各プロセッサに割り当てる組合せを決定した。

まず、分割すべき組合せグラフを定義する。図 3 の左図は距離画像 I_i とそれらの接続関係を示している。この接続グラフの双対を取り、 $P_{i,j}$ をノードとし、各距離画像をネットとしたグラフを作成する(図 3 右)。このグラフに含まれるノード重みの和は計算時間を表

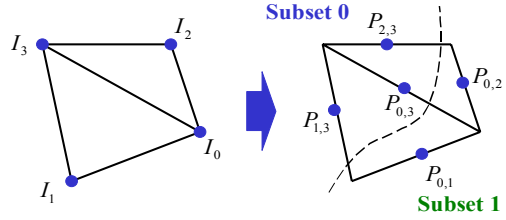


図 3 組合せハイパーグラフ
Fig. 3 Correspondence pair node hyper-graph

表 1 実験結果 (バイヨン寺院)

Table 1 Experimental results (Bayon Temple)

nProc	Time[s]	Max Mem.[MB]	Min Mem.[MB]
16	209.7	1297	1170

し、ネット重みの和はメモリ使用量を表している。計算時間は計算すべき総頂点数に比例することから、各ノード重み $W_{i,j}^{node}$ を計算すべき総頂点数、すなわち対応する距離画像 i 及び j の頂点数 v_i と v_j の和とする。またメモリ使用量は各距離画像 i に含まれる頂点数に比例する事から、ネット重み W_i^{net} として頂点数 v_i で表す。

$$W_{i,j}^{node} = v_i + v_j \quad (11)$$

$$W_i^{net} = v_i \quad (12)$$

分割されたグラフに含まれるノード重みの和が均等且つネット重みの和が最小となるようこのハイパーグラフを分割する事によって、最適な組合せの割当て方法を得る事ができる。

4. 実験

最後に、大規模距離画像を本手法によって同時位置合わせした結果を示す。実験に用いたデータはカンボジアのバイヨン遺跡を Cyrax2500 及び IMAGER5003 によって測定した 501 枚の距離画像群である。この距離画像群が含む総頂点数は 219,149,558 点(平均 437,424 点)、総メッシュ数は 395,774,710 (平均 789,969)である。因みに、このデータセットはメモリ空間の制約により 1 プロセッサで計算することはできなかった。表 1 に 16 プロセッサで処理を行った場合の平均計算時間及びメモリ使用量(最大値, 最小値)を示す。20 回の反復計算によって図 4 の様に位置合わせされた結果が得られた。

5. おわりに

本論文では複数枚の距離画像を同時に並列位置合わせする手法を提案した。本手法はまず様々な評価基準

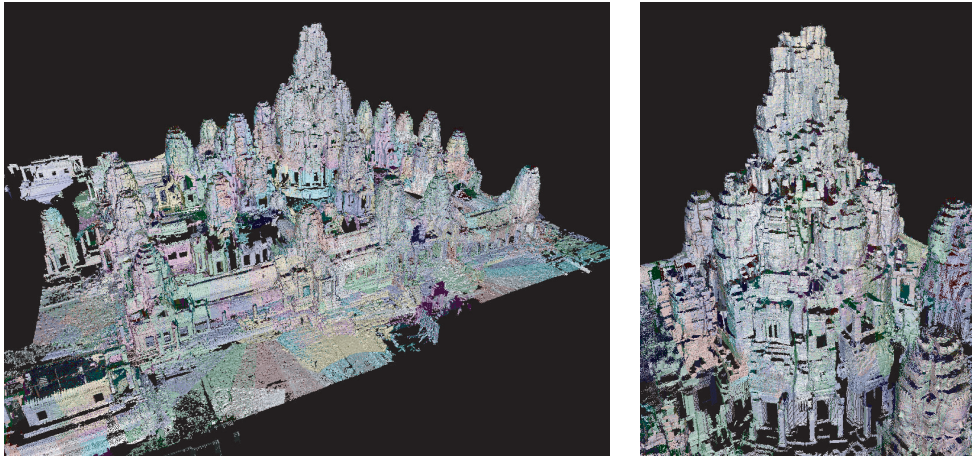


図 4 位置合わせ結果 (カンボジア・バイヨン寺院)
Fig. 4 Alignment result (Bayon Temple, Cambodia)

を用いて不要、冗長な組み合わせを除去し、計算時間の短縮と効率的なデータ分散を図った。さらに計算時間とメモリ使用量を最適化するために、組合せグラフを定義してグラフ分割アルゴリズムを適用した。また、本手法を PC クラスタ上で実装し、実際に大規模な距離画像を同時位置合わせすることによって本手法の有効性を示した。なお本並列化手法は他の多くの同時位置合わせ手法に適用する事が可能である。

謝辞 本研究は科学技術振興機構戦略的創造研究推進事業 (CREST) の支援を受けて行われました。また測定にご協力頂いた鎌倉高德院の方々及び、日本政府アンコール遺跡救済チーム (JSA) の方々に感謝の意を申し上げます。

参 考 文 献

- 1) Ikeuchi, K. and Sato, Y.: *Modeling from Reality*, Kluwer Academic Press (2001).
- 2) Levoy, M.: The Digital Michelangelo Project, *Proc. SIGGRAPH 2000*, pp. 131-144 (2000).
- 3) Besl, P. J. and McKay, N. D.: A method for registration of 3-D shapes, *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, Vol. 14, No. 2, pp. 239-256 (1992).
- 4) Chen, Y. and Medioni, G.: Object modelling by registration of multiple range images, *Image and Vision Computing*, Vol. 10, No. 3, pp. 145-155 (1992).
- 5) Blais, G. and Levine, M.: Registering Multi-view Range Data to Create 3D Computer Objects, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.17, No.8 (1995).
- 6) Masuda, T., Sakaue, K. and Yokoya, N.: Registration and Integration of Multiple Range Images for 3-D Model Construction, *Proc. Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* (1996).
- 7) Neugebauer, P. J.: Geometrical Cloning of 3D Objects via Simultaneous Registration of Multiple Range Image, *Proc. of the 1997 Int. Conf. on Shape Modeling and Application (SMA'97)*, pp. 130-139 (1997).
- 8) Benjemaa, R. and Schmitt, F.: Fast global registration of 3d sampled surfaces using a multi-z-buffer technique, *Proc. Int. Conf. on Recent Advances in 3-D Digital Imaging and Modeling*, pp. 113-120 (1997).
- 9) Bergevin, R., M. Soucy, H. G. and Laurendeau, D.: To-towards a general multi-view registration technique, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.18, No. 5, pp. 540-547 (1996).
- 10) Nishino, K. and Ikeuchi, K.: Robust Simultaneous Registration of Multiple Range Images, *Proc. of Fifth Asian Conference on Computer Vision ACCV '02*, pp. 454-461 (2002).
- 11) Zhang, Z.: Iterative point matching for registration of free-form curves and surfaces, *International Journal of Computer Vision*, Vol. 13, No. 2, pp. 119-152 (1994).
- 12) Langis, C., Greenspan, M. and Godin, G.: The parallel iterative closest point algorithm, *Proc. International Conference on 3D Digital Imaging and Modeling (3DIM)* (2001).
- 13) Garey, M. R. and Johnson, D. S.: *Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness*, Freeman & Cie (1979).