

(71) SFM と MVS に基づいた現場のモデル化による レーザスキャン計画とその運用方法

北田祐平¹・安室喜弘²・檀寛成³

¹学生非会員 関西大学理工学研究科環境都市工学専攻 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町3丁目3番35号)

²正会員 ³非会員 関西大学環境都市工学部 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町3丁目3番35号)

E-mail:yasumuro@kansai-u.ac.jp

レーザスキャナは詳細で広範囲の 3 次元座標データを取得できるため、多くの現場で導入されているが、現実的な作業量で実用的なデータを取得するには計測位置の選択が難しく、専門作業者の経験に任されることが多い。我々は、SFM (Structure from Motion) と数理計画法を用いて現場の状況を考慮した最適なレーザスキャン計画を立案する手法を開発してきた。スキャンを行う現場においては、局所部分の重点的な計測や、早くて網羅的な計測といった多種多様なニーズが発生する。実効性のあるスキャナの運用には、複数のシナリオに沿ったスキャン計測を用意したり、現場で柔軟に計画を変更できることが有効である。本稿では、スキャンの多様なシナリオに対応し、かつ最適化された実行可能な計測計画立案とその運用方法を示す。

Key Words : Structure from Motion, Scan Planning, Laser Scanner, Mathematical Optimization

1. はじめに

レーザスキャナは、広大な空間において3次元の形状情報を取得するのに適しており、建設現場¹⁾や社会インフラのモニタリング²⁾、災害の事後評価³⁾など、広く使用されている。特に屋外利用の場面では、限られた時間内で必要な情報を集めることが極めて重要である。スキャナは、計測位置から直接観測が可能な対象物しか計測できないため、物体表面をすべて網羅するには、物体周囲の複数箇所からスキャンしなければならない。スキャナの計測位置の選択を誤ってしまうと、データの欠損が生じる場合や、データ密度が薄い場合がある。また、その補填のために都度計測回数を増やしてしまうと、時間と労力も増加し、冗長な計測データも増加する。本論文では、対象とする構造物やシーンに対して、現実的な計測作業量を見積り、計測データの品質を考慮して、最適な計測計画の立案を実現することを目的とする。

2. 関連研究・技術

(1) ビュープランニング

レーザスキャナに代表される光学式 3 次元形状計測において、対象の形状に適應させて計測視点を選択するビ

ュープランニングの問題が検討されてきた。任意形状の物体に対して、1 度の計測で測れる表面の範囲は、基本的には計測してみなければ分からないため、計測済みと未計測の領域に分けて、未計測の領域を最小化する可能性の高い視点(NBV;next best view)を逐次的に推定する手法が主流である。これらの方法は、人が計測作業を進める上で、次の計測位置を決めるための効率化⁴⁾や、移動ロボットが自律的に 3 次元地図を作る上での行動計画を自動立案するもの⁵⁾や、車載システムを用いて 3 次元マップを生成するもの⁶⁾などがある。これらはいずれも、任意の計測位置から計測を開始したり、予め広範囲にわたって粗く計測したりすることで初期計測データを取得し、これを起点として以降のビュープランニングを行うという枠組みを基本としている。しかし、逐次的な試行に基づくことから、特に屋外計測において、作業量の見積りや、計測作業計画を事前に立案することは難しい。

(2) 数理計画法による形状計測プランニング

事前にビュープランニングを行う方法として、檀らは、現地の簡易的な 3 次元モデルを準備して用いる方法を提案している。具体的には、SFM に基づいた 3D モデル作成技術を用いて、簡易的に生成された 3 次元モデルで可視性をチェックしながら、数理計画法により最も効率よく計測できるレーザスキャナ設置点の数と配置を最適化

する。以下ではこの手法における SFM に基づいた 3 次元モデル生成と数理計画問題としての定式化について概説し、付随して残された問題について述べる。

a) SFM (Structure from Motion) による 3D モデリング

SFM とは、画像からその背後にある幾何学的なモデルのパラメータを推定する方法であり、バンドル調整とも呼ばれている。主要な対象は、多視点画像を用いた 3 次元形状復元やカメラの位置・姿勢の推定問題であり、あるシーンをカメラの視点を変えながら撮影した複数枚の画像から、そのシーンの 3 次元形状とカメラの位置を同時に復元する。SFM 実現方法としては、因子分解法を用いた方法が基本となっている。SFM で生成された 3 次元点群の概形をトレースすることで 3D メッシュモデルを作成し、現実空間での可視性を考慮することが可能な位置関係を再現することで、構造物の壁面に対して、どの部分が、どの場所から見通せるかをチェックできるようになる。

b) 数理計画法による事前計測計画

檀らの方法でモデル化される数理計画問題は 2 つの 0-1 整数最適化問題で構成されている。以下の記号を用い、(1), (2) のように定式化される。

【添字と集合】

$i \in I$: スキャナ設置候補点とその集合

$j \in J$: 計測する物体の表面を構成する三角形とその集合

【変数】

$$x_i := \begin{cases} 0, & \text{候補点 } i \text{ を設置点として採り入れない} \\ 1, & \text{候補点 } i \text{ を設置点として採り入れる} \end{cases}$$

【パラメータ】

$$d_{ij} := \begin{cases} 0, & \text{三角形 } j \text{ は候補点 } i \text{ から計測不可能} \\ 1, & \text{三角形 } j \text{ は候補点 } i \text{ から計測可能} \end{cases}$$

$$a_{ij} := \begin{cases} 0, & d_{ij} = 0 \\ i \text{ から計測できる } j \text{ 上の点の数}, & d_{ij} = 1 \end{cases}$$

r : 測定回数の上限

$$\text{minimize } \sum_{i \in I} x_i$$

$$\text{subject to } \begin{aligned} \sum_{i \in I} d_{ij} x_i &\geq 1 \quad (\forall j \in J) \\ x_i &\in \{0, 1\} \quad (\forall i \in I) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\text{minimize } \sum_{i \in I, j \in J} a_{ij} x_i$$

$$\text{subject to } \begin{aligned} \sum_{i \in I} d_{ij} x_i &\geq 1 \quad (\forall j \in J) \\ \sum_{i \in I} x_i &\geq r, \\ x_i &\in \{0, 1\} \quad (\forall i \in I) \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、(1)は対象をスキャンするための最低回数を求め、(2)は与えられた回数で対象のスキャン数を最大化する計測場所を求める。計測位置 i から対象表面 j につ

いて可視性の判定 d_{ij} とスキャン数 a_{ij} の値を計算するためには、計測対象周辺の 3D モデルを用意して、各候補点から壁面の可視性を調べる必要がある。

3. 提案手法

2.2 項で述べたビュープランニング法では、スキャナ位置の候補や対象現場の構造物の位置関係を考慮するために、事前に用意する簡易的な 3D モデルが重要な役割を担っている。SFM により得られた点群をトレースすることで生成された 3D モデルは、現実空間での可視性を考慮することが可能な位置関係を再現することはできるものの、人的処理の工程が必要となる。つまり、成果物として得られる 3D モデルは作成者の技術によって異なるものとなるため、数理計画法に与えられるパラメータは作成者により作用し、仮想空間でのスキャナの可視性に違いが生じる可能性が考えられる。そこで、SFM によりカメラの位置姿勢推定を行い、Multi-view Stereo により環境の 3 次元復元を行うことで、人的処理工程を削減する手法を提案する。Multi-view Stereo は、SFM により取得された点群を密にしメッシュにおけるを自動構成する。点群を密にする事で作成された 3D モデルは、スキャナ計測計画の目的に合わせてシンプル化する事も可能であり、スキャナ設置計算時間の短縮やユーザが求めるスキャナ計画に合わせて 3D モデルの構成を作成する事を可能とする。従来のスキャナ計測計画の立案手法では、局所的な部分の重点的な計測計画や、網羅的な計測計画といった多様なエンドユーザの要求は考慮されていない。また、時間的制約などから、実地計測における時間の見積りが求められる。実効性のあるスキャナ計画を提案するためには、複数のシナリオを考慮したスキャナ計測計画が必要である。本稿では、スキャナ計測計画の立ち上げから、スキャナ実地計測が終わるまでの多様なシナリオを考慮し、実効性のある最適計測計画の運用方法を提案する。

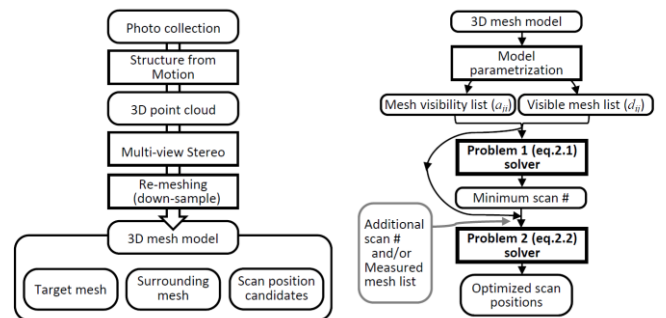


図-1 提案手法の処理手順：現地の 3D モデル化（左）とスキャン計画の算出（右）

(1) スキャナ計測計画における運用法の提案

スキャナ位置の最適化計算には、スキャナ計測対象となる環境全体のモデルを構成するメッシュ情報を格納した mesh ファイル、その点群情報 vertex ファイル、スキャナ計測対象のメッシュ番号を格納した target ファイル、スキャナ設置候補となる点 viewpoint ファイルが必要であり、図 1 (左) ではデータ作成工程を示している。図 1 右ではスキャナ設置個所の算出①によりスキャナ設置個所の算出を行っており、 i から j を見た時の立体角 a_{ij} 、 i から j を見た時の可視性 d_{ij} を算出し、スキャナの計測位置 sol を割り出す。スキャナ設置個所の算出①において解が得られない場合は全てのスキャナ対象物を網羅的に計測できないことを示している。そこで、スキャナ設置個所の算出②に遷移し、 d_{ij} に着目することで計測できる場所のみを対象物として target を再生成することも可能である。これらを用いてスキャナ設置個所の算出②を解くことで計測回数の最小化かつ、計測密度の最大化を考慮されたスキャナの設置個所が算出される。また、得られた sol において、実際にスキャナを用いて計測した際に取得できるスキャナ密度の可視化を行うことで、スキャンデータを直感的に理解することが可能であり、更に局所的な部分の重点的な計測を行う場合などに運用することが可能である。(可視化方法は実装実験で示す)。また、取得された sol に対して、スキャナ計測点をもう一点追加するなどスキャナの運用法が可能であり一例を 4 項で示す。

4. 実装

本稿では、植生などの障害物や地形の高低差などの周辺環境を考慮した詳細な計測計画を必要とする状況を想定し、大阪府吹田市の関西大学キャンパス内の建物をレーザスキャン計測の対象とした。また、提案するスキャナの運用方法の手順を用いることで、本論文の運用方法が実用的な計画のために有効的であるかどうかを示す。



図-2 CMPMVS による 3D モデル

(1) 3D モデルの作成

UAV である phantom2 を使用して構造物周辺の動画撮影を行い、動画内のフレームを選択的に切り出してキャプチャすることで画像を取得した。対象物および周辺の環境を撮影した 15 分程度の動画から約 900 枚の画像を用意して SFM を適用し、3 次元の点群座標値を取得した。SFM の処理には、オープンソースの VisualSFM を利用した。SFM の処理過程で各画像で抽出された特徴点のうち、画像間で重複した箇所について写真測量の計算が実施される。結果として、一連の画像群で対応が取れた特徴点から、同一座標系の 3 次元点群が生成される。この点群には、地物の形状や相対的な位置関係の情報が含まれている。これらを Multi-view Stereo を適用し、SFM で取得した点群の密度を高くし、自動メッシュ生成した。Multi-view Stereo の処理にはオープンソースの CMPMVS を利用した。結果として、UAV で撮影した構造物周辺が反映されている高密度の 3D モデルが生成された。構成は Vertex は 934014、Faces は 1867563 となっている。

a) 計測対象物の 3D モデル作成

生成された 3D モデルから計測対象物以外の部分を削除し、計測対象物に対応する部分を残す。さらに、スキャナ位置の最適化計算にはターゲットとなるメッシュの数が計算時間に影響するため、目的に合わせて簡略化 (Quadric Edge Collapse Decimation) を行う。

b) 計測対象物周辺の 3D モデル作成

周辺環境については、まず、地物や植生など障害物となりうるものを残して削除する。そして、データの簡略化を行う。

c) スキャナ設置候補点のポリゴンモデル作成

同様に、スキャナの設置候補点領域を残してメッシュを削除し、残ったメッシュの簡略化を行う。作成されたメッシュの頂点座標がスキャナの設置候補点となる。

(2) 計測位置の最適化計算

全ての 3D モデルを統合し、これをもとに計測位置を最適化した結果を図-3 に示す。緑色メッシュで表される部分は植生や地形などの障害物を表現しており、等間隔に設定された赤色の点が計測候補点を表している。赤

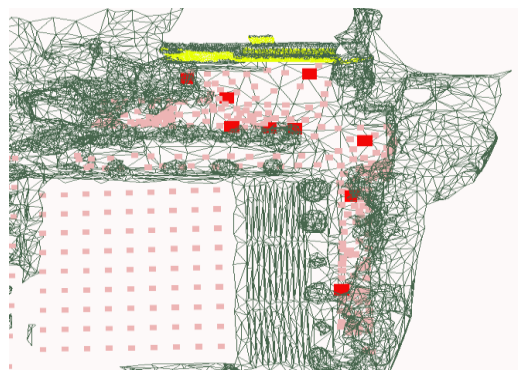


図-3 現地の画像(左)と取得された 3 次元点群座標値(右)

色メッシュの部分を実測対象として最適計算を行う。計測点の中から選択された、太く強調した赤色の点が計測位置の最適解となっており、今回のケースでは9箇所候補所が選出された。この最適解とスキャナ設置個所の算出①で得られた a_{ij} を用いて実際のスキャン結果の予測を可視化したものが図5になる。可視化フェーズを導入することで、着目したい部分がどの密度でスキャンデータを計測されるかが分かり、エンドユーザが求める結果を確認することが可能である。また、このスキャン予測結果から、更に局所的にスキャン密度を上げたいケースも想定する必要がある。実装においても、ある一部分を局所的に注目し、現在得られた最適解に対してもう一点スキャン計測を行う場合を想定した。一点追加された場合のスキャンデータの予測は図のようになり、注目している箇所のスキャン密度が高くなっていることが分かる。

6. おわりに

本稿では、事前調査に始まる最適化計算によるレーザスキャン計画の運用法を提案し、実用的な運用シナリオを示した。全体のスキャン計画の立案に加え、局所の重

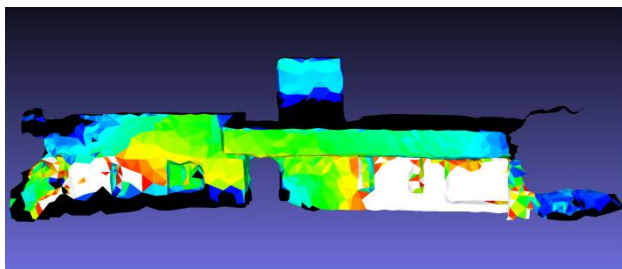


図-4 スキャンデータ予測

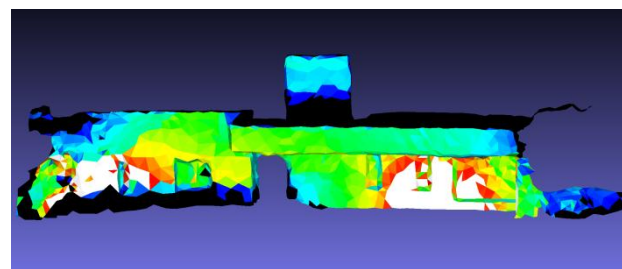


図-5 スキャンデータ予測（最適解から一点追加）

点的な計測や、追加計測などの現場でのニーズに対応可能である。レーザスキャナを用いた実測を交えたケーススタディを実施することで、スキャンデータの品質目標をスキャン計画立案時の最適化指標として設定できるようにすることが今後の課題である。

謝辞：本研究の一部は独立行政法人日本学術振興会科学研究費補助金（15H02983）の助成による。

参考文献

- 1) Shih N. and Wang P. : Point Cloud Based Comparison between Construction Schedule and AsBuilt Progress: LongRange ThreeDimensional Laser Scanner's Approach, *Journal of Architectural Engineering*, pp.98-102, 2004.
- 2) Shih N. and Huang S. : 3D Scan Information Man-agement System for Construction Management, *Journal of Construction Engineering and Management*, pp.134-142, 2006.
- 3) Miller P. E., Mills J. P., Barr S. L., Lim M., Barber D., Parkin G. and ClarkeB., Glendinning S. and Hall J. : Terrestrial laser scanning for assessing the risk of slope instability along transport corridors, *XXIst ISPRS Congress: Commission V, WG 3, Beijing*, pp.495-500, 2008.
- 4) Watson C., Chen S., Bian H., and Hauser, E. : LiDAR Scan for Blasting Impact Evaluation on a Culvert Structure, *Journal of Performance of Constructed Facilities*, (ASCE) CF.1943-5509.0000318, 2011.
- 5) R. Pitto : A Solution to the Next Best View Problem for Automated Surface Acquisition, *IEEE Trans. PAMI*, Vol 21, No. 10, pp.1060-1030, 1999.
- 6) Pulli K. : Multiview Registration for Large Data Sets, *Proceedings of Second International Conference on 3-D Imaging and Modeling*, pp.160-168, 1999.
- 7) Blaer P. S. and Allen P. K. : View planning and automated data acquisition for three dimensional modeling of complex sites, *Journal of Field Robotics*, pp.865-891, 2009.
- 8) Grabowski R., Khosla P. and Choset H. : Autonomous Exploration via Regions of Interest, *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp.1691-1696, 2003.
- 9) Asai T., Kanbara M. and Yokoya N. : Data acquiring support system using recommendation degree map for 3D outdoor modeling, *SPIE*, Vol. 6491, 2007.