

# ピラミッドの最適計測プランの作成

檀 寛成

キーワード：3次元レーザースキャナ，最適計測プラン，集合被覆問題

本稿は、北田 祐平さん（(株) ポリフォニー・デジタル）による 2015 年度関西大学大学院理工学研究科 修士論文をもとに加筆修正したものです。

## 1. 3次元レーザースキャナとは

本稿では 3 次元レーザースキャナを取り上げます。3 次元レーザースキャナとは、スキャナから（裸眼でも安全な弱い）レーザーを射出し、その反射光がスキャナで感知されるまでの経過時間を測定することで、レーザーを射出した方向にある物体までの距離を測定する装置です（光の速さを  $c$ 、経過時間を  $t$  とすると、距離  $d$  は  $d = ct/2$  となります）。

この装置で屋外構造物の 3 次元データを取得することを考えてみましょう（地上から見えない部分は除くことにします）。計測原理を考えるとわかるように、スキャナをある位置に設置して 1 回だけ計測しても対象全体を計測することはできません。複数箇所から計測し、得られたデータを後で統合する必要があります。また、対象の周辺に障害物がある場合は、それを避けるように計測を行う必要もあります。

すなわち、3 次元レーザースキャナで対象物を計測する際には、どの位置から計測するかという「計測プラン」が非常に重要になります。

## 2. 最適な計測プランの作成

この問題に対し、われわれのグループでは、3 次元レーザースキャナを用いる際の最適な計測プランを作成する手法を提案しています [1]。

本手法では、計測対象の概形モデルが得られていて、その表面が多角形でメッシュ状に分割されていることを仮定しています。またスキャナを設置することができる候補点も事前に与えられているものとします。

このとき、次に挙げる二つの最適化問題を解くことにより最適な計測プランを作成します：

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

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

ここで、 $I$  はスキャナ設置の候補点の集合、 $J$  は計測対象の表面にあるメッシュの集合とします。またパラメータ  $d_{ij}, a_{ij}$  は

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

$$a_{ij} := i \text{ から } j \text{ を計測したときのデータ量} \\ (i \text{ からのレーザーが } j \text{ に当たる回数})$$

と定められているものとします。また、変数  $x_i$  は値として 0 もしくは 1 だけを取ることで変数 (0-1 変数) で、値が 1 であれば候補点  $i$  を計測に利用する、0 であれば利用しない、ということを表します。

問題 (1) は、すべてのメッシュ  $j \in J$  が少なくとも 1 回以上計測されるという制約の下で計測回数を最小にするという最適化問題で、「集合被覆問題」というよく知られた問題になっています。スキャナの設置や計測には一定の時間と手間が必要ですので、最低何回で対象物を計測できるかを知ることは非常に重要です。

さて、問題 (1) を解いて得られた最適解、すなわち  $x_i = 1$  となる候補点  $i$  から計測を行えば、対象物の表面をもれなく計測することができます。しかし、同じ回数だけ計測するなら、得られるデータ量が多いほうがよいですね。そこで問題 (2) を解くことで、計測回数の上限を  $r$  回とするとときに得られるデータ量が最

だん ひろしげ  
関西大学 環境都市工学部  
〒 564-8680 大阪府吹田市山手町 3-3-35  
dan@kansai-u.ac.jp



図1 ネフェルイルカラー王のピラミッド

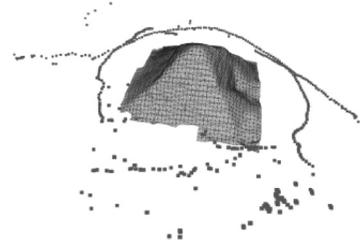


図2 ピラミッドの3Dモデルとスキャナ設置候補点

大となるような計測点を求めます。  $r$  には、問題 (1) で得られた最小の計測回数を設定してもいいですし、時間などに余裕がありそれ以上の計測が可能であれば、それを設定しても構いません。

### 3. 計測対象モデルの作成

前節で紹介した手法により、最適な計測プランを作成することが可能です。しかし、そのためには「計測対象の概形モデル」が得られていることが必要でした。

本研究では、SfM (Structure from Motion) と MVS (Multi-View Stereo) という技法により、このモデルを作成することにしました。これらの手法は、視点の異なる、同一領域を写した複数の写真から 3D モデルを作成する手法です。これにより、対象物の表面がメッシュで分割された 3D モデルを作成することができます<sup>1</sup>。

### 4. ピラミッドの最適計測プラン

共同研究者の紹介で、『世界ふしぎ発見!』や『NHK スペシャル』などに出演しておられる河江肖剰氏 (名古屋大学) のプロジェクトをお手伝いする機会に恵まれました。本研究では、エジプトのアブシールという場所にあるネフェルイルカラー王のピラミッド (図 1) を計測する際の最適な計測プランを作成しました。

まず、2014 年 9 月に先遣隊が現地へ行き、対象のピラミッドの写真や動画を撮影しました。帰国後、これらのデータから約 600 枚の写真を準備し、SfM/MVS を適用することによって、ピラミッドの 3D モデルを作成しました (図 2)。なお、それぞれの写真を撮影した場所を計測候補点にしています。そして、このデータから  $d_{ij}, a_{ij}$  の値を計算し、問題 (1)、(2) を解いて最適な計測プランを作成しました。実際には、計測の「質」(対象物の単位面積当たりの計測点数) を一定程度以上にするという制約を加えて問題 (1)、(2) を解き、最適な計測プラン (7 点から計測) を得ました。



図3 計測結果

そして 2015 年 3 月、本隊が現地入りし、作成した計測プランを用いて実際にネフェルイルカラー王のピラミッドをスキャナで計測しました<sup>2</sup>。現地は砂漠ということもあり、最適な計測点にスキャナを設置するのに随分苦労しましたが、ピラミッド全体の計測に成功しました (図 3)。

本研究は、OR の適用範囲の幅広さを示す一例になっていると思います (それにしてもまさか OR を通じて考古学に関わる日が来るとは…)。

**謝辞** 本研究は、北田氏・河江氏のほか、安室喜弘氏 (関西大学)、金谷一朗氏 (長崎県立大学)、松下亮介氏 ((株) 竹中工務店)、千葉史氏 ((株) ラング) との共同研究です。ネフェルイルカラー王のピラミッドの計測は、チェコ・エジプト学研究所 (Czech Institute of Egyptology) との共同プロジェクトとして行われました。本研究の一部は JSPS 科研費 15H02983 の助成を受けたものです。

### 参考文献

[1] H. Dan, Y. Yasumuro, T. Ishigaki and T. Nishigata, "Measurement planning of three-dimensional shape by mathematical programming," In *Proceedings of the 11th International Conference on Construction Applications of Virtual Reality 2011 (CONVR2011)*, pp. 205–216, 2011.

<sup>1</sup> 通常、スキャナによる計測の精度は、この手法で作成したモデルの精度を大きく上回ります。

<sup>2</sup> 筆者が現地に行っていないのは内緒です…。