

最適化技法を用いたレーザスキャン計画の立案 ～ピラミッドを覆い尽くせ！～

檀 寛成
(関西大学 環境都市工学部)

NTT データ数理システム 数理最適化交流会 2021

【アカデミックコンファレンス FY2021 用 ダイジェスト版】

2021/10/29



自己紹介

- 2001/3: 京都大学大学院 情報学研究科 修士課程修了
- 2001/4 – 2006/3: (株) 数理システム 研究員
- 2004/9: 博士 (情報学)
 - 指導教員: 福島雅夫先生 (現: 京都情報大学院大学)
- 2006/4 – : 関西大学
 - 2006/4 – 2007/3: 工学部 システムマネジメント工学科
 - 2007/4 – : 環境都市工学部 都市システム工学科
- 2020/10 – : 大阪大学 招へい教員
 - 梅谷先生の「数理最適化寄付講座」のお手伝いをしています

興味を持っている研究対象

- 非線形最適化
 - 自動微分とか内点法とか実装してます
- 最適化技法の実問題への応用
 - 最近は土木分野での応用が多いです (所属が土木系学科)

- 3D スキャナとは
- 問題定義: 3D スキャンプランの立案
- 提案手法
 - 最適化手法を用いた 3D スキャンプランの立案
 - 現場のデータをどのように作成するか？
- 提案手法の適用例
 - 梅田地下街の計測
 - ピラミッド (Abusir, Egypt) の計測
- まとめ

本発表は、「ピラミッドの最適計測プランの作成」
(オペレーションズ・リサーチ 61 p.648-649) に基づきます。

http://www.orsj.or.jp/archive2/or61-10/or61_10_648.pdf

3D スキャナとは

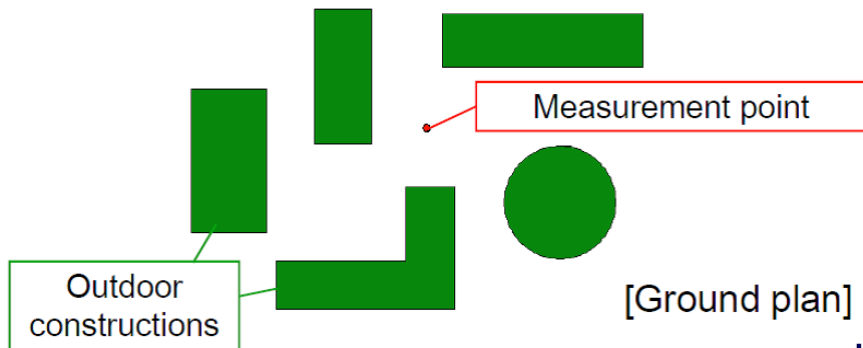
3D スキャナとは (4/4)

- 地上レーザスキャナの特徴
 - 対象物（の表面）の点群データを取得できる
 - 構造物の現状 (as-is / as-built) を記録できる
- 地上レーザスキャナの使用例
 - 建設現場の進捗管理・完成形の記録
 - 被災状況の記録
 - 流出した土砂量の推定等に利用できる
 - 歴史的建造物・遺跡の記録
- 地上レーザスキャナによる測量方法も整備されつつある
 - 国土地理院
「地上レーザスキャナを用いた公共測量マニュアル（案）」

問題定義

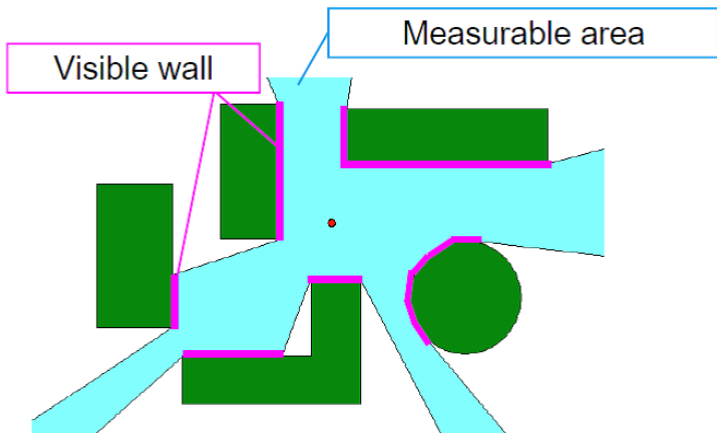
3D スキャン時の困難

- 3D スキャナからの可視性
 - 物体間の遮蔽関係を調べる必要がある
 - 対象物全体を計測するのは困難



3D スキャン時の困難

- 3D スキャナからの可視性
 - 物体間の遮蔽関係を調べる必要がある
 - 対象物全体を計測するのは困難



問題定義

- どう計測したら対象物全体を計測できるか？
 - 遮蔽を避ける必要性
 - 複数箇所からの計測が必要
- トレードオフ: 計測の質と時間的コスト
 - 計測回数を増やせば計測の質は上がる
 - 計測の質: 得られた点群の密度
 - 同じ場所を重ねて計測すれば密度はあがるものと仮定
(=同じ場所にパルスレーザーがあたることはないと仮定)
 - 計測回数を増やすと時間的コストも増える
 - 約1時間/回 (※スキャナにもよります)

問題: 最適な 3D スキャンプランの作成

- 対象物全体を計測するための最小の計測回数はいくつ？
- 計測点の最適な配置は？

提案手法

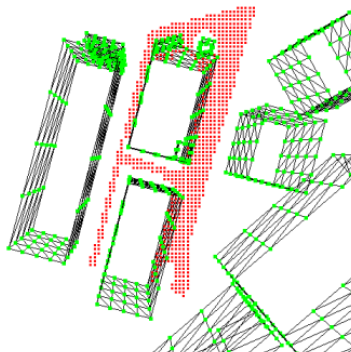
提案手法の概要

最適化問題として定式化し、ソルバで求解する

- モデル 1: 対象物全体を計測するのに必要な計測回数の最小化
- モデル 2: 定められた計測回数の下で得られるデータ量 (= 点群データの点数) の最大化

● 仮定

- 計測対象と周辺環境がメッシュ (三角形) で表現されている
- 計測候補点が与えられている
- 現場データをどのように作成するか? (後述)



定式化 (1/6)

[集合/添字]

- $i \in I$: 計測候補点,
- $j \in J$: 計測対象表面のメッシュ.

[変数]

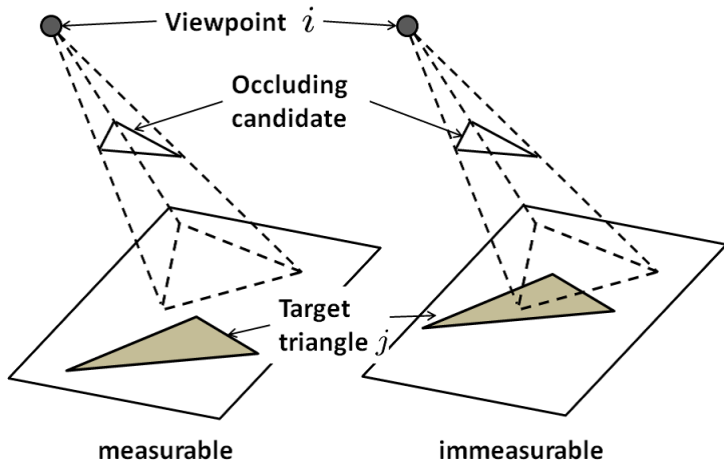
$$x_i := \begin{cases} 1, & i \text{ を計測点として採用する,} \\ 0, & i \text{ を計測点として採用しない.} \end{cases}$$

[パラメータ]

$$d_{ij} := \begin{cases} 1, & i \text{ から } j \text{ は計測できる,} \\ 0, & i \text{ から } j \text{ は計測できない,} \end{cases}$$
$$a_{ij} := \begin{cases} i \text{ から } j \text{ を計測して得られるデータ量,} & d_{ij} = 1, \\ 0, & d_{ij} = 0, \end{cases}$$
$$r := \text{計測可能回数の上限.}$$

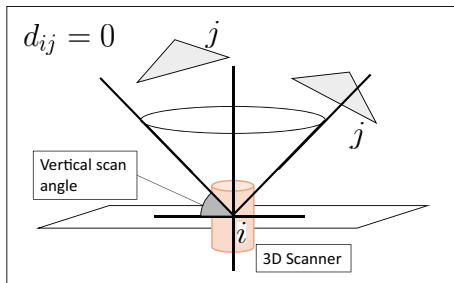
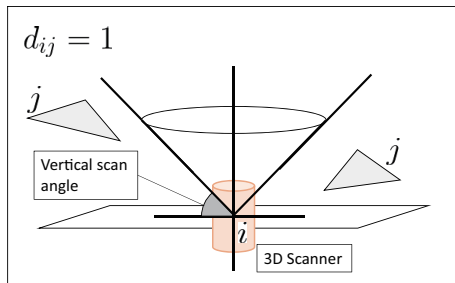
定式化 (2/6)

- 計測候補点 i からの j の可視性 (遮蔽)



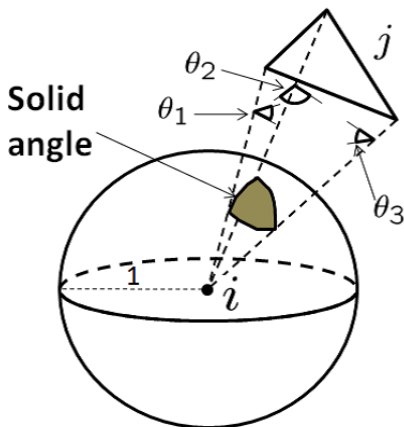
定式化 (3/6)

- 計測候補点 i からの j の可視性 (スキャナの視野)



定式化 (4/6)

- a_{ij} : i から j を計測したときのデータ量
- a_{ij} は i から j を見たときの立体角に比例する
 - 立体角: 対象物を単位球の中心に向けて射影したときの「影」の大きさ



モデル 1

対象物全体を計測しつつ，計測回数を最小にする

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

- 目的関数: 採用する計測点の数を最小にする
- 制約条件: 対象物表面のメッシュを少なくとも 1 回は計測する
- 『集合被覆問題』に他ならない！

モデル 2

計測点の最適な配置を求める

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

- 目的関数: 得られるデータ量を最大にする
- r : 計測可能回数 (\geq モデル 1 での最適目的関数値)

データの準備

一般論として…

最適化問題を解くためにはデータが必要不可欠！

本研究でのデータ準備方法

- 3D モデル（メッシュ）の作成
 - パターン 1（図面等がある場合）：3D モデラー等で作成
 - パターン 2（図面等がない場合）：事前調査で写真撮影し、SfM/MVS で粗い 3D モデルを作成
 - SfM: Structure from Motion, MVS: Multi-view Stereo
- 3D モデルから d_{ij}, a_{ij} を計算
- （最適解の算出 → 現場での実測）

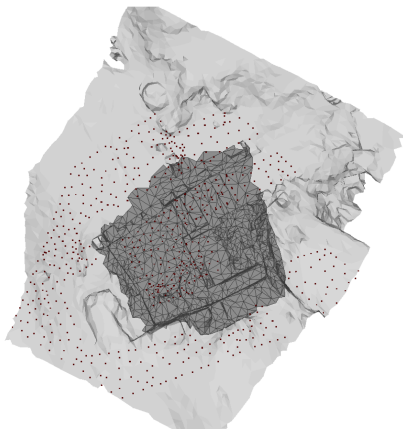
現場のデータをどのように準備するか？ (2/3)

- 図面からメッシュを作成した実例（大学構内）



現場のデータをどのように準備するか？ (3/3)

- SfM/MVS の実例 (バルバル神殿 (バーレーン))

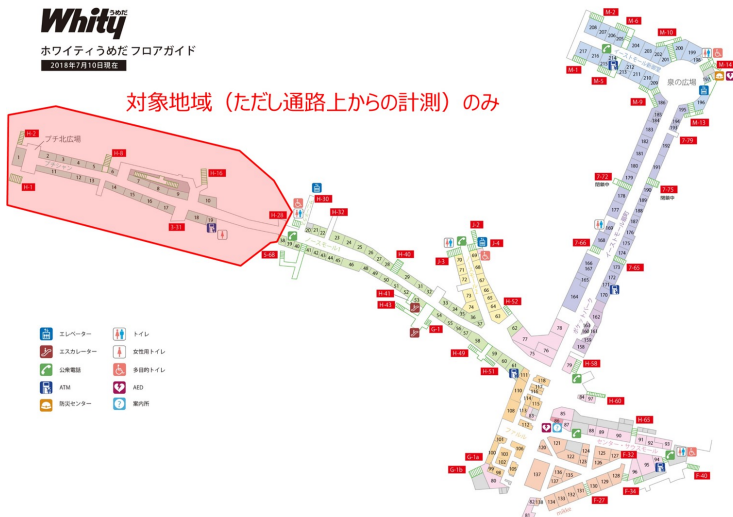


(メッシュ数: 2710, 計測候補点: 1262)

適用例

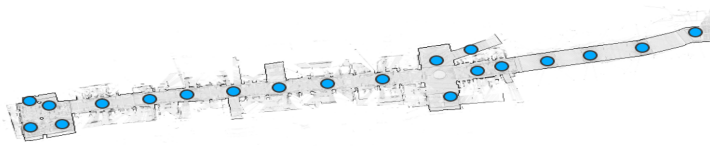
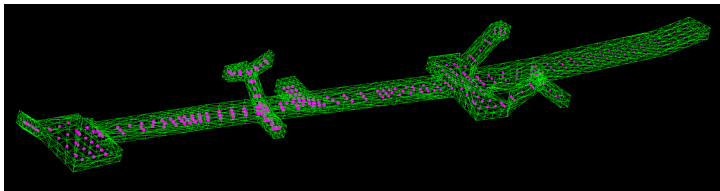
適用例 1: 梅田地下街

● 梅田地下街の記録（協力：大阪地下街株式会社様）



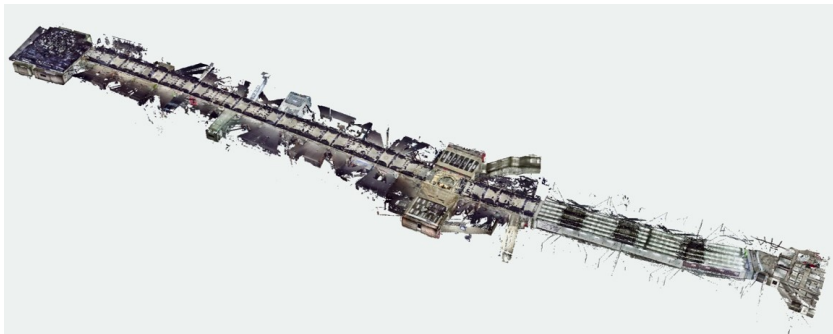
適用例 1: 梅田地下街

- メッシュ分割したモデルとスキャナ設置候補位置
 - メッシュ数：約 4000，スキャナ設置候補位置：333 箇所
- 全体を網羅しつつ，約 1 平方 cm あたりに 1 点のレーザが当たるように計画 ⇒ 20 点で計測可能！
 - モデル 2 の制約条件を少し変更



適用例 1: 梅田地下街

- スキャン結果
 - 記録した点群に、写真で撮影した画像の色を乗せたもの



適用例 1: 梅田地下街

- スキャン結果
 - 記録した点群に、写真で撮影した画像の色を乗せたもの



適用例 2: ピラミッド (Abusir, Egypt)

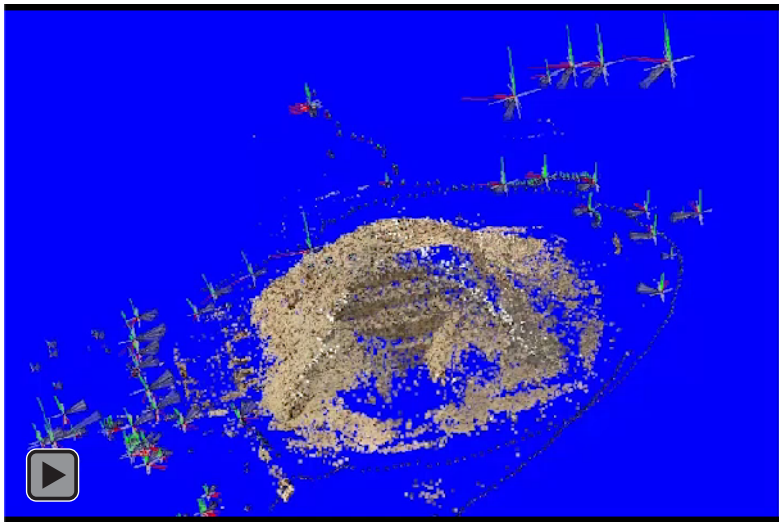
- 事前調査 (2014/9)



30

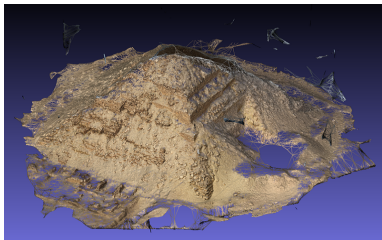
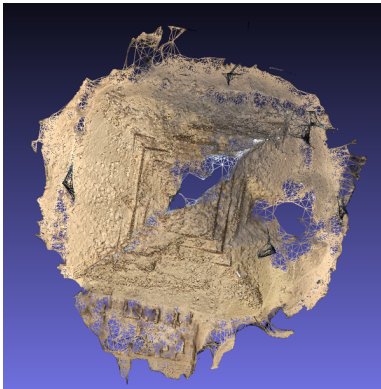
適用例 2: ピラミッド (Abusir, Egypt)

- Structure from Motion (SfM)
 - 写真 624 枚 (写真, 動画からの切り出し)



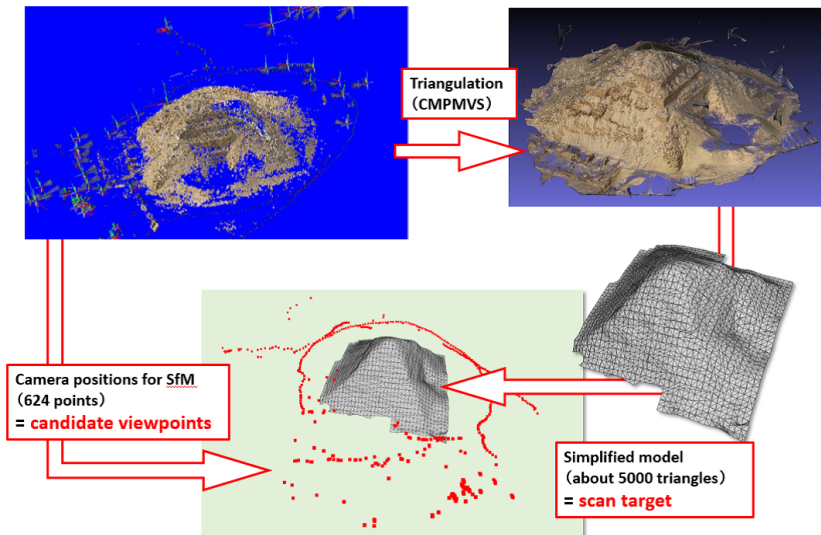
適用例 2: ピラミッド (Abusir, Egypt)

- MVS によるメッシュ化
 - 節点数 1,658,906, 面数 3,316,972



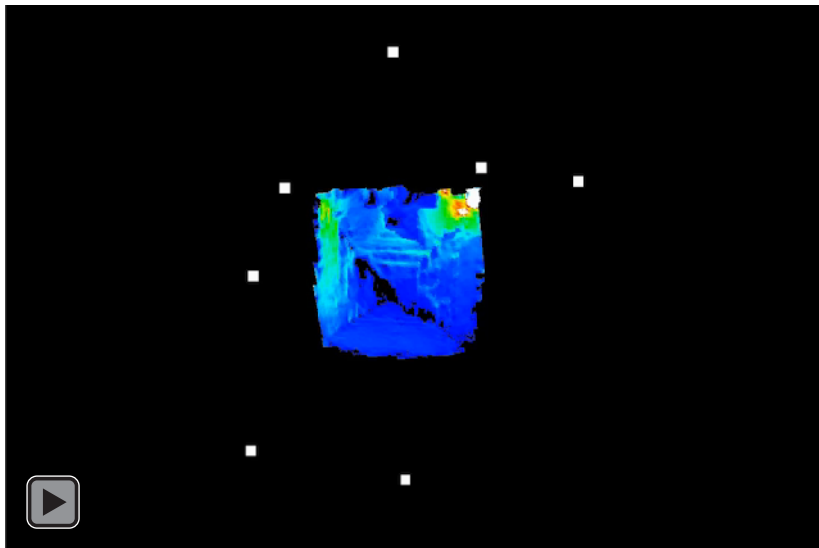
適用例 2: ピラミッド (Abusir, Egypt)

- 入力データ



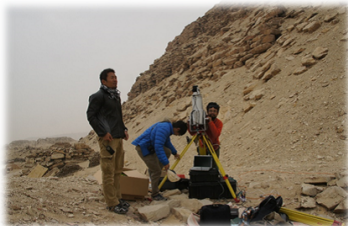
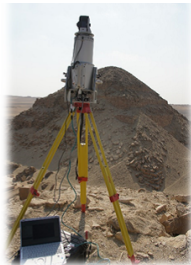
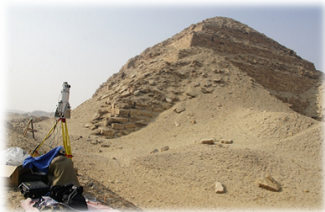
適用例 2: ピラミッド (Abusir, Egypt)

- 最適な計測点 (7 点)



適用例 2: ピラミッド (Abusir, Egypt)

- 現場での計測 (2015/3)



まとめ

- 最適化手法を用いた 3D 計測プランニング
 - 全体を計測できる最小の計測点数の算出
 - 定められた個数の計測点の最適配置
- データの準備，現場への適用
- 今後の課題
 - 計算の高速化（可視性のチェックが遅い）
 - 現場でのニーズに応えられるシステムの作成

本研究を通じて感じたこと

- 最適化は極めて横断的な学問
 - まさか考古学に貢献できるとは…
- 比較的単純な定式化でも面白いことができる！

Special thanks to:

安室 喜弘 教授（関西大学），河江 肖剰 准教授（名古屋大学），
金屋 一郎 教授（長崎県立大学），市川 泰雅 氏（CG artist），
廣瀬 詢 氏（関西大学），松下 亮介 氏（関西大学），北田 祐平 氏（関西大学）