

# 移動ロボット群を用いた大規模文化遺産の幾何・光学モデリング

## Geometric and Photometric Modeling of Cultural Heritages Using Multiple Mobile Robots

○ 学 野田 裕介(九大)      正 倉爪 亮(九大)  
岩下 友美(九大)      正 長谷川 勉(九大)

Yusuke NODA, Kyushu University, noda@irvs.is.kyushu-u.ac.jp  
Ryo KURAZUME, Kyushu University  
Yumi IWASHITA, Kyushu University  
Tsutomu HASEGAWA, Kyushu University

For constructing a geometric and photometric model of a large-scale cultural heritage using a laser range finder and a digital camera, a number of measurements must be performed at various viewpoints. However, in general, obtained range images must be aligned into standard coordinates by applying registration algorithms such as ICP. To shorten the processing time and simplify the geometric modeling, we have developed a laser measuring system using multiple robots and the precise positioning system named Cooperative Positioning System or CPS. Additionally, as a simple photometric modeling, we proposed a method to align texture images accurately onto a geometric model using range data. This paper presents the measurement experiments in "Dazaifu Tenmangu" shrine which is a national important cultural property of Japan by the proposed system consisting of three mobile robots.

**Key Words:**Digital Archive, Cultural Heritage, 3D modeling, Multiple robot, Laser Range Finder

### 1 はじめに

デジタル計測技術の発展にともない、歴史的に価値の高い文化遺産をデジタルデータ化して半永久的に保存することが可能となった。また、それらのデジタルデータをネットワークを介して場所や時間を問わず誰もが自由に閲覧、および鑑賞することが可能となるデジタルアーカイブ構想が注目されている。デジタルデータ化の対象には、劣化や風化、自然災害や事故などによる破損や消失が危惧される歴史的建築物などの大規模構造物も含まれる。これらの幾何・光学モデリングにはレーザ計測装置やデジタルカメラを用いた計測システムが近年多用されている。

通常、大規模対象の幾何モデリングでは、オクルージョンの問題から複数地点からの計測が不可欠である。そのため、それら計測された複数の幾何モデルを統一座標系に位置合わせする必要があるが、一般的に各計測位置の同定は行われないため、ICP法などのアルゴリズムを用いた幾何モデル間の距離最小化による位置合わせが行われる。しかしこの処理には多くの時間と手間を必要とし、また大規模対象の場合、処理すべきデータ量が膨大となり、例えばPCクラスタを用いた並列処理など特殊な計算機、アルゴリズムが必要となる場合が多い。

一方、ロボットに計測装置を搭載し、ロボットが移動、計測を繰り返すシステムを考える。このとき、もしそれぞれのレーザ計測位置が正確に同定できれば、ICP法などの後処理が不要となり、より簡便なモデリングが可能となる。また人間が重い計測装置を運ぶ必要もなく、計測に必要な人数も低減でき、運用上のメリットが大きい。

しかし、上述の手法で大規模建造物のデジタルデータ化を実現するために、移動ロボットには高精度な自己位置同定システムが求められる。従来提案されているオドメトリベースの自己位置同定手法では、特に凹凸面や高低差のある環境での精度が低く、また、観測履歴を元に逐次的に自己位置を同定する一般的な SLAM シス

テムでは特徴的なランドマークの必要性、観測誤差の蓄積などの問題がある。さらに、GPSによる位置同定は使用可能な環境に限られており、例えば屋内環境や森林では使用することができない。

この問題に対し、我々はこれまでに、移動ロボットの高精度な位置同定手法として、群ロボットによる協調ポジショニングシステム(Cooperative Positioning System, CPS)を提案している<sup>1)</sup>。このシステムは、レーザによる相対位置計測システムを搭載した複数の移動ロボットを協調的に動作させ、全くの未知、不整地環境でも従来の内界センサとは比較にならない高精度の位置同定を実現するものである。また、我々はこれまでに、本手法とロボット搭載型レーザ計測装置を組み合わせることで、ICP法などの後処理、或いは密な測定を必ずしも必要とせず、またGPSが利用困難な環境でも高精度な環境構造デジタルデータの作成が可能で、CPSを利用した移動ロボット群によるレーザ計測システムを提案した<sup>4)</sup><sup>5)</sup>。本稿では、提案するシステムを用いた太宰府天満宮(福岡県)を対象とした屋外大規模建造物の幾何モデリング実験の結果、および新たに提案するデジタルカメラを追加装備したシステムを用いた簡便かつ正確なテクスチャマッピング手法による光学モデリング実験の結果を紹介する。

### 2 デジタルカメラを搭載した第6次CPS機械モデル CPS-VI-2

図1に、実験で使用した2次元レーザレンジファインダとデジタルカメラを搭載した第6次CPS機械モデルCPS-VI-2を示す。このシステムは、1台の親ロボット(Parent mobile unit, 図2)と2台の子ロボット(HPI Japan製, 図3)からなる。親ロボットは2次元レーザレンジファインダ(LMS 200, SICK)(表1)、子ロボットとの相対位置算出のための測量用トータルステーション(GPT-9005A, TOPCON Ltd.) (表2)、およびテクスチャ画像

を撮影するためのデジタルカメラ (Nikon, D300) を搭載している。また移動機構には屋外での不整地走行が可能なクローラ車輪 (トピー工業, S90 クローラモジュール) を用いた。また搭載した 2 次元レーザレンジファインダは、スリット状の距離データを最大 80m の範囲で得ることができる。角度分解能は 0.25° と 0.5° を切り替えることができ、0.25° の場合には測定角度は最大 100°, 0.5° では最大 180° である。以降の実験では、主に角度分解能 0.5° を用い、階段など詳細なデータが必要な場合には角度分解能 0.25° を用いた。また、親ロボットは、本体上部に搭載した回転テーブルを垂直軸周りに回転させ、回転を行いながら 2 次元レーザレンジファインダからスライス状の距離データを連続して計測することで、ロボット全周囲の 3 次元距離データを得ることができる。なお、一回の全周囲の 3 次元距離データ取得に要する時間は 37.8 秒である。この 3 次元距離データの取得作業を CPS 動作による移動、位置同定と組み合わせ、高精度な幾何モデルを作成する。

LMS 200 (SICK)	
Range	80[m]
Field of view	180°/100°
Resolution (distance)	10[mm]
Resolution (angle)	0.5°/0.25°

Table 1 レーザレンジファインダ LMS200

GPT-9005A (TOPCON Ltd.)	
Range	1.3 ~ 3,000[m]
Resolution (angle)	0.5 / 1
Accuracy (distance)	± (2mm+2ppm×Distance)
Accuracy (angle)	1

Table 2 トータルステーション GPT-9005A

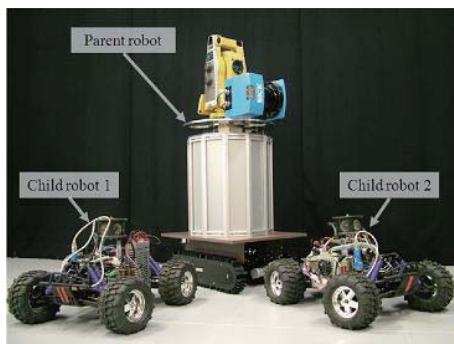


Fig.1 第 6 次 CPS 機械モデル CPS-VI-2

### 3 太宰府天満宮デジタルアーカイブ作成実験

#### 3.1 幾何モデル作成実験

本節では、太宰府天満宮本殿、および境内で行った幾何形状計測実験の結果を示す<sup>5)</sup>。実験は夜間にのべ 7 日間行い、205 箇所から幾何モデルを得た。実験環境を図 4 に示す。計測範囲は大宰府天満

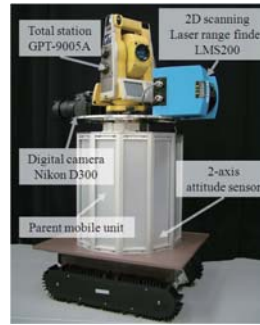


Fig.2 デジタルカメラを搭載した親ロボット

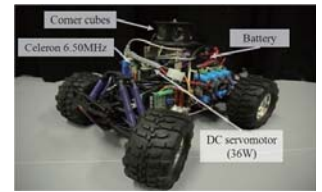


Fig.3 子ロボット



Fig.4 実験環境

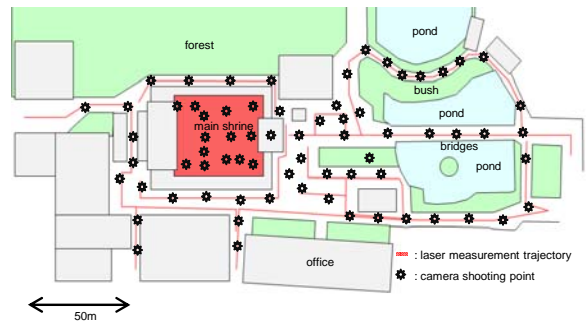


Fig.5 幾何モデル・テクスチャ画像計測地点

宮境内の主要建造物を含む約 250 m × 約 100 m の範囲である。図 5 に親ロボットの移動経路をラインで示す。実験全体の親ロボットの総移動距離は 2,101 m であった。また実験では、子ロボットをできるだけ広域に配置するように移動し、静止している子ロボットをランドマークとして、親ロボットが移動と停止・位置同定・環境計測を繰り返した。図 7、図 8 に取得した本殿および境内の幾何モデルを示す。異なる地点において取得した幾何モデルを、色分けして表示している。図 8 の a2 は点で、b2 は得られた点データに三角パッチを貼り、面で表示したものである。また図 6 に本実験で作成した幾何モデルの全景を示す。

#### 3.2 光学モデル作成実験

次に、より現実感の高い幾何モデルを得るために、デジタルカメラから得られたテクスチャ画像を用いて、これまでに作成した幾何モデルに対してテクスチャマッピングを行う。

幾何モデルへのテクスチャマッピングにおいて重要となるのは、幾何モデルとテクスチャ画像の相対位置関係の決定方法である。これを最も簡便に行う方法は、レーザ計測装置とカメラの相対位置関係を事前にキャリブレーションにより決定しておき、レーザ

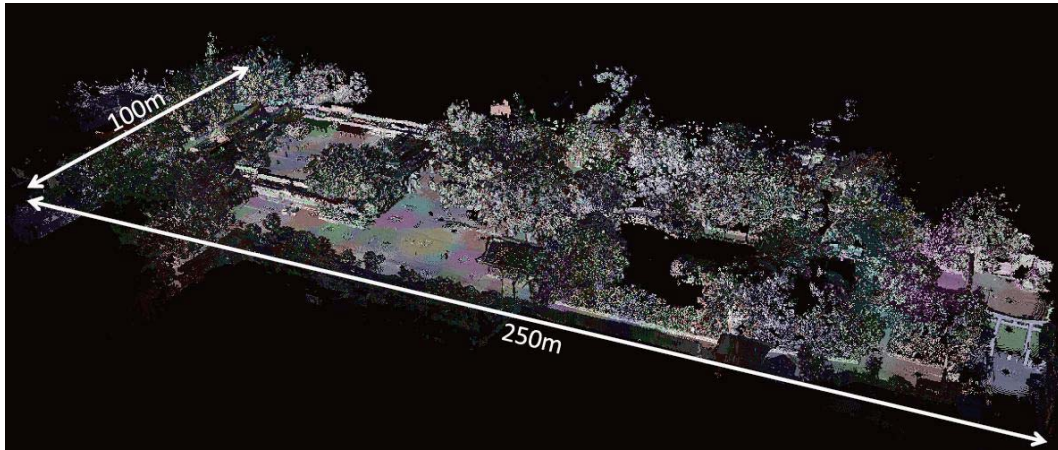


Fig.6 取得した幾何モデル全景

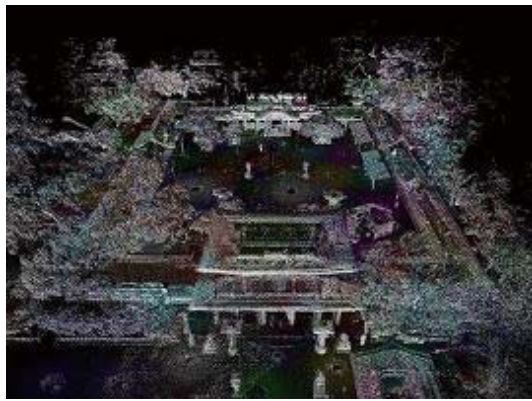


Fig.7 幾何モデル (本殿)



(a1)



(a2)



(b1)



(b2)

Fig.8 幾何モデル

計測時にテクスチャ画像を同時に撮影するものである、これにより幾何モデルの点とテクスチャ画像の画素の対応関係を一意に決定できる。そこで今回、デジタルカメラをレーザー計測装置回転板に搭載した親ロボットを用いて、幾何モデルとテクスチャ画像の同時取得実験を新たに行い、取得済みの大規模幾何モデルに対してテクスチャマッピングを行った。

ただし、一般にカメラ画像の解像度は、レーザー計測により得られる幾何モデルに比べて非常に高いことから、テクスチャ画像の取得はレーザー計測に比べて疎に行うことができる。また今回は、前節までに示したように大規模幾何モデルの構築を予め行い、その後新たに少数のテクスチャ画像を任意の場所から取得してテクスチャマッピングを行う。そこで以下では、撮影場所が未知のテクスチャ画像撮影をレーザー計測回数に比べて疎に行い、同時に計測した幾何モデルを用いて、予め得られている大規模幾何モデルに自動的にテクスチャマッピングする簡便な手法を提案する。本手法の手順を以下に示す。

1. まず、レーザー計測装置により幾何モデルを、デジタルカメラによりテクスチャ画像を得る。このとき幾何モデルとテクスチャ画像の相対位置関係はキャリブレーションにより事前に決定しておく。

2. 次に、得られた幾何モデルと既に取得済みの大規模幾何モデルに対して、ICP法を用いて位置合わせを行う。これにより、大規模幾何モデルに対するテクスチャ画像の相対位置関係を得る。
3. 最後に得られた相対位置を用いてテクスチャ画像を座標変換し、大規模幾何モデルに対してテクスチャマッピングを行う。実験は昼間にのべ3日間行い、70箇所から幾何モデル及び全周テクスチャ画像を得た。実験の様子を図9に、撮影地点を図5に円で示す。ただしここでは、太宰府天満宮本殿内側の幾何モデルに対して、上述の手法でテクスチャマッピングを行った。なお、親ロボット全周囲のテクスチャ画像を得るために、デジタルカメラを用いて各計測地点それぞれにおいて水平方向 $30^\circ$ ごとに12回の撮影を行った。図10は1つの計測地点でデジタルカメラにより撮影された12枚のテクスチャ画像、図11がテクスチャマッピングを行った結果である。現在、本手法を用いて、太宰府天満宮全体の幾何モデルに対して実験を行っている。

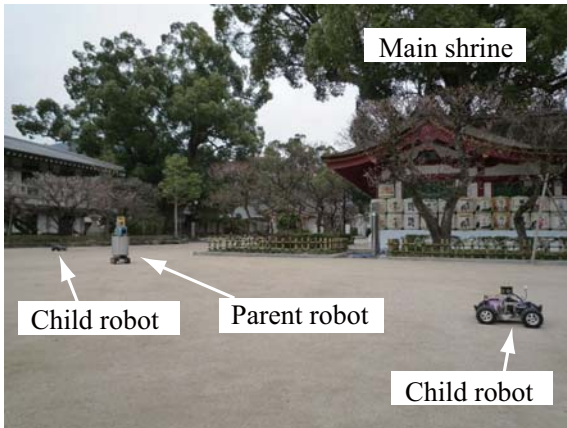


Fig.9 テクスチャ取得実験



Fig.10 テクスチャ画像

#### 4 まとめ

本論文では、移動ロボットの高精度位置同定手法である群ロボットによる協調ポジショニング法(CPS)とレーザ計測装置、およびデジタルカメラを組み合わせた移動ロボット群計測システムを用いて、国の重要文化財である太宰府天満宮を対象とした大規模建造物の幾何・光学モデリングを紹介した。

本システムは、文化遺産のデジタルデータ化に群ロボットシステムを初めて導入し、ICP法などの後処理が不要な新たな手法を開発したものである。また、幾何モデル計測システムにデジタルカメラを組み合わせることによる、簡便かつ正確なテクスチャマッピング手法を新たに提案した。

今後は太宰府天満宮全体の幾何モデルに対して、提案した手法を用いてより現実性の高い幾何・光学モデルを作成し、広く公開することを検討している。

謝辞 データ取得にご協力いただきました太宰府天満宮に感謝いたします。本研究の一部は、JST 地域イノベーション創出総合支援事業重点地域研究開発推進プログラム・シーズ発掘試験「ロボット群による大規模建造物の自動レーザ計測システムの開発」、文部科学省科研費補助金基盤B「5感センサネットワークによる被災建造物内システムの開発(19360119)」の助成を受けて行われました。

#### 文献

[1] 広瀬茂男, 倉爪亮, 長田茂美, “群ロボットによる協調ポジショニング法,” 日本ロボット学会誌, vol. 13, no. 6, pp. 838-845, Sep. 1995.



(a)



(b)



(c)

Fig.11 テクスチャマッピング結果

[2] 倉爪 亮, 広瀬 茂男, “協調ポジショニングシステムの研究 (第8報: CPS-IIIによる長距離移動測定実験),” 第16回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.169-170, Oct. 1998.

[3] 倉爪 亮, 広瀬 茂男, 岩崎 倫三, 長田 茂美, “協調ポジショニングシステムの研究 (CPS アクティブタッチ融合型地図生成法),” 日本ロボット学会誌, vol. 17, no. 1, pp. 84-90, Jan. 1999.

[4] 戸畑 享大, 倉爪 亮, 村上 剛司, 長谷川 勉, “CPS SLAMの研究 (CPS-Vの構築とSLAM実験),” 第24回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 2N17, Sep. 2006.

[5] 野田 裕介, 倉爪 亮, 岩下 友美, 長谷川 勉, “移動ロボット群を用いた大規模文化遺産のデジタルアーカイブ,” 第14回ロボティクスシンポジウム, 3C3, 2009.3.16