

## レーザ・カメラ搭載群口ボットによる太宰府天満宮の幾何光学計測

野田 裕介<sup>†</sup> 倉爪 亮<sup>††</sup> 岩下 友美<sup>††</sup> 長谷川 勉<sup>††</sup>

† 九州大学大学院システム知能情報科学府知能システム学専攻 〒 819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744番地

〒 819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744 番地

E-mail: †{noda,kurazume,yumi,hasegawa}@irvs.is.kyushu-u.ac.jp

あらまし 歴史的に価値の高い文化遺産を後世に残す方法の一つとして、デジタルデータ化による保存が挙げられる。我々はこれまでに、移動ロボット群に搭載したレーザレンジセンサと、移動ロボット群の高精度な位置同定法である協調ポジショニング法を組み合わせ、大規模建造物に対しても ICP 法などの位置合わせ手法を必ずしも必要としない 3 次元幾何情報計測システムを提案した。本稿では、国指定重要文化財である太宰府天満宮（福岡県）を対象に、提案システムにデジタルカメラを組み合わせた幾何・光学計測システム、および幾何モデルに対するテクスチャ画像の簡便な位置合わせ手法を提案し、屋外大規模計測実験、および作成した太宰府天満宮の幾何・光学モデルを紹介する。

**キーワード** 3 次元モデリング、群ロボット、レーザレンジファインダー、デジタルアーカイブ

# Geometric and Photometric modeling of Dazaifu Tenmangu using multiple robots equipped laser range finder and camera

Yusuke NODA<sup>†</sup>, Ryo KURAZUME<sup>††</sup>, Yumi IWASHITA<sup>††</sup>, and Tsutomu HASEGAWA<sup>††</sup>

† Graduate School of Information Science and Electrical Engineering, Kyushu University Motoooka 744,  
Nishi-ku, Fukuoka-shi, Fukuoka, 819-0395 Japan

†† Graduate School of Information Science and Electrical Engineering, Kyushu University Motoooka 744,  
Nishi-ku, Fukuoka-shi, Fukuoka, 819-0395 Japan

E-mail: †{noda,kurazume,yumi,hasegawa}@irvs.is.kyushu-u.ac.jp

**Abstract** For constructing a geometric and photometric model of a large-scale structure 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** 3D modeling, Multiple robot, Laser Range Finder, Digital Archive

## 1. はじめに

レーザによる計測技術の発展により、建物など大規模構造物のデジタルデータ化が各地で行われている。大規模構造物の幾何モデリングを行う場合、オクルージョンの問題から複数地点からの形状計測が不可欠となる。そのため全体形状の幾何モデルを獲得するためには、それら計測された複数の部分形状幾何モデルを統一座標系に位置合わせする必要がある。一般的に、各計測位置の同定は行われないため、この位置合わせは後処理として行われる。この後処理では、ICP 法<sup>[1][2]</sup>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。しかしこの位置合わせを行うには、部分形状幾何モデル間の重複部分に十分な対応点を取れるように予め密な計測を行う必要がある。また後処理の段階では、手作業による初期位置合わせの手間と距離最小化処理に多くの時間が必要となる。特に大規模対象の場合、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[3][4]。

一方、三次元形状計測装置を搭載した正確な自己位置同定が可能な移動ロボットを用いれば、上述のような後

処理による位置合わせは不要となり、より効率的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、運用上のメリットも大きい。

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は、移動ロボットに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が限られており、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 [5]。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、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 [6] [7] [8] [10] [11] [9]。本システムを用いることにより、ICP 法などの後処理による位置合わせ、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となる。本稿では、国指定重要文化財である太宰府天満宮（福岡県）を対象とし、提案システムを用い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. 協調ポジショニングシステム (CPS)

協調ポジショニングシステムとは、複数の移動ロボットを 2 つのグループ A,B に分け、グループ A のロボットが移動している場合にはグループ B は静止し、グループ A の移動終了後にグループ B からの相対位置をレーザなどで精密に計測する作業を A,B が繰り返し行うことで、未知不整地環境でも移動ロボット全体として高精度な位置同定を実現するものである。CPS の例を Fig.1 に示す。この例は、1 台の親ロボットと 2 台の子ロボットからなるシステムにおいて、親ロボットに搭載したレーザ距離測定器により、子ロボットの位置、および親ロボット自身の位置を計測するものである。まずあらかじめ初期位置を計測してある親ロボットを静止させ、

(1) 子ロボット 1, 2 を矢印のように移動させた後、停止させる。

(2) 親ロボットに搭載した計測器により、子ロボット 1 までの相対距離、方位角、仰角を計測し、子ロボット 1 の位置を同定する。

(3) 同様に子ロボット 2 までの相対距離、方位角、仰角を計測し、子ロボット 2 の位置を同定する。

(4) 親ロボットを矢印のように移動、停止させ、親ロボットにより子ロボット 1, 2 までの相対距離、方位角、仰角を計測して、親ロボットの位置を三辺測量法により同定する。

という動作を繰り返す。これまで高低差 10m を含む 323.9m の屋外長距離の移動実験の結果、移動後の位置誤差が 0.97m ( 移動距離の 0.3 % ) という高い同定精度を確認している [12]。

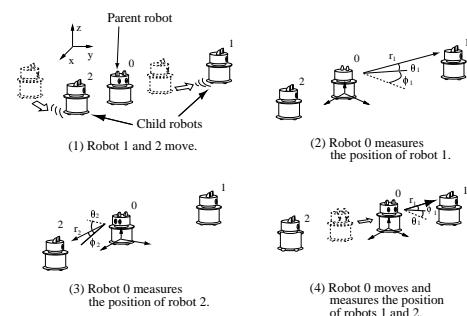


図 1 協調ポジショニングシステム (CPS)

## 3. 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 2 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 3) と 2 台の子ロボット (HPI Japan 製, 図 4) 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  $0.25^\circ$  と  $0.5^\circ$  を切り替えることができ、 $0.25^\circ$  の場合には測定角度は最大  $100^\circ$ 、 $0.5^\circ$  では最大  $180^\circ$  である。以降の実験では、主に角度分解能  $0.5^\circ$  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  $0.25^\circ$  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。

本システムは前報 [9] に比べて、測量用レーザ計測装置の変更、不整地走破性能向上のため車輪からクローラ型への変更など、屋外実証実験に必要な改良を行ったものである。

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

表 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

表 2 トータルステーション GPT-9005A

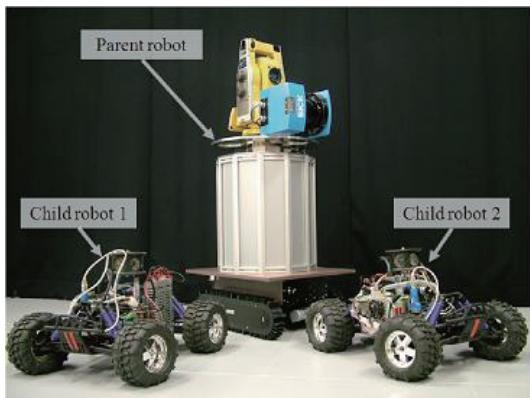


図 2 第 6 次 CPS 機械モデル CPS-VI

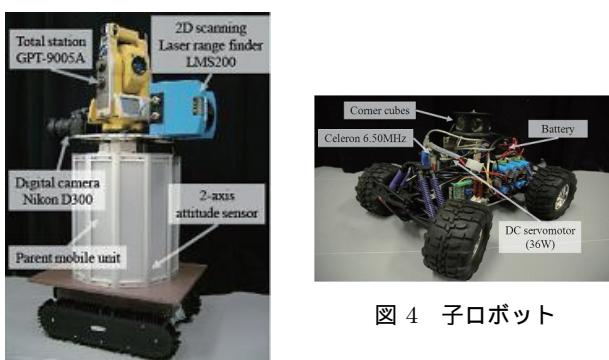


図 3 親ロボット

#### 4. 太宰府天満宮形デジタルアーカイブ作成実験

我々は今回、これまでに提案した 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の有用性を示すため、歴史的文化的価値の高い大規模建造物である、太宰府天満宮の本殿および境内の幾何・光学モデリングを試みた。本章ではまず計測対象である太宰府天満宮を紹介し、次に幾何モデリング実験、および今回新たに提案するテクスチャマッピング手法を用いた光学モデリング実験の結果を示す。

##### 4.1 太宰府天満宮

太宰府天満宮は福岡県太宰府市にある、学問の神として知られる菅原道真を祀る天満宮の一つである。その起源は919年に菅原道真の墓所の上に社殿を建立したことから始まり、現在の御殿は1591年に寄進されたものである。境内には本殿を含む二つの重要文化財と樹齢1000年を超えるといわれる大楠を含む二つの天然記念物、また約700年前に建設された日本最古の鳥居を含む数点の福岡県指定重要文化財と約50本の楠からなる福岡県指定天然記念物が点在し、歴史的価値の非常に高い第一級の文化財である。また、初詣には多くの参拝客を集め、近隣アジア諸国のお客も数多く訪れる日本有数の観光名所としても知られる。広大な敷地を有しており、主要な建造物は約25ha内に集中している。図5に太宰府天満宮本殿を示す。



図 5 太宰府天満宮

##### 4.2 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紹介する。実験は参拝客を避けるため夜間にのべ7日間行い、205箇所から幾何モデルを得た。実験環境を図6に、実験の様子を図7に示す。た



図 6 実験環境

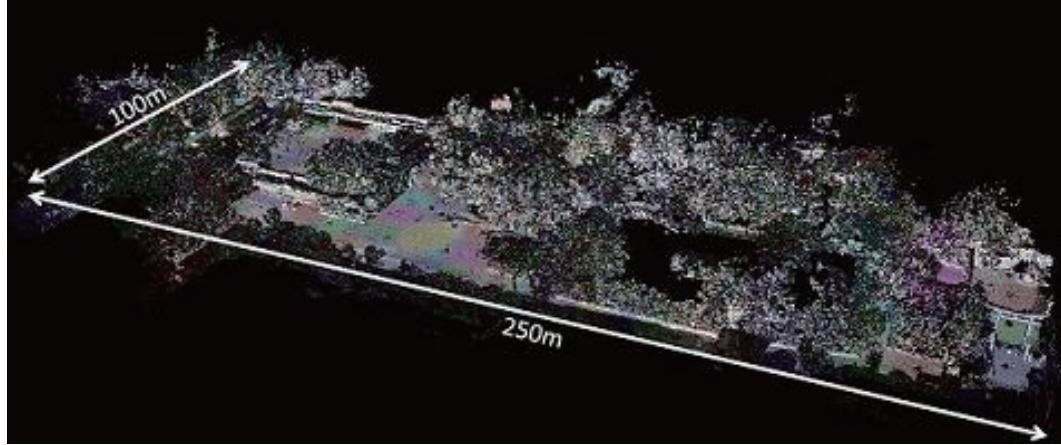


図 9 取得した幾何モデル全景

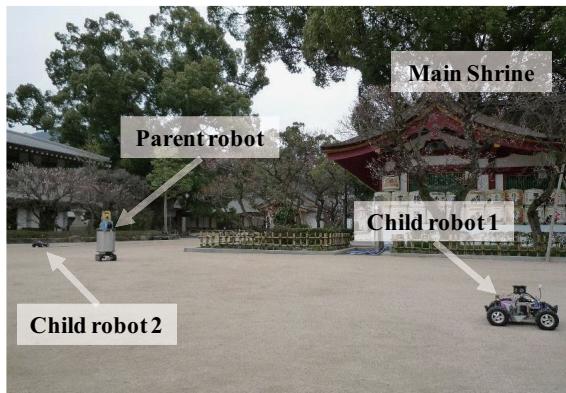


図 7 幾何モデル取得実験



図 10 幾何モデル(本殿)

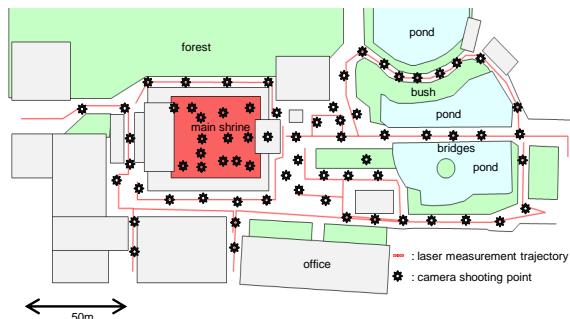


図 8 幾何モデル・テクスチャ画像計測地点

だし、図 6, 7 は昼間に撮影したものである。

計測範囲は太宰府天満宮境内の主要建造物を含む約  $250\text{ m} \times \text{約 } 100\text{ m}$  の範囲である。図 8 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、子ロボットができるだけ移動する必要がないよう広域から見渡せるように配置し、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・レーザ計測を繰り返した。図 10, 図 11 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 11 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

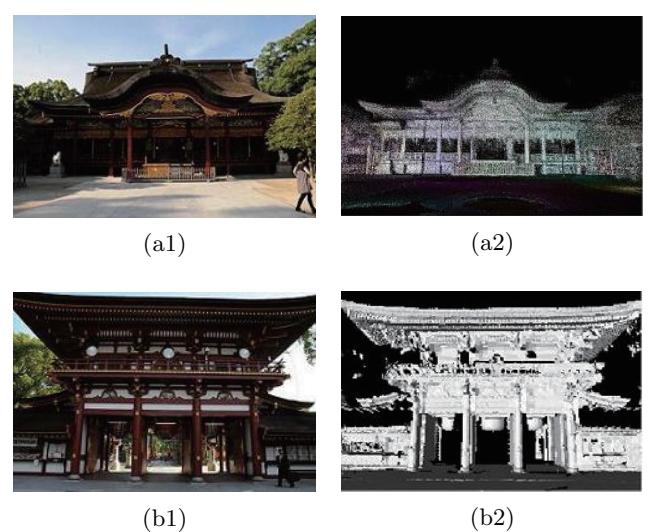


図 11 幾何モデル

たものである。また図 9 に本実験で作成した幾何モデルの全景を示す。

#### 4.3 計測位置同定精度の評価

図 8 右上の経路である心字池周回の計測を行った場合の親ロボットの移動軌跡を図 12 に示す。本実験では、親ロボットの移動回数 25 回に対し、子ロボットの移動回数

は9回であった。また、この経路は心字池を周回するものであり、計測開始地点と終了地点はほぼ一致している。そこで今回、1回目と26回目の計測データを比較することにより、CPSの位置同定精度評価を行う。実験の結果、親ロボットの総移動距離は260.6m、最大高低差は半月状の橋が存在するなど2.75mであった。一方、図14に示すように、1回目と26回目の幾何モデルの比較による、CPSの位置同定誤差は1.7m（総移動距離の0.65%）であった。この誤差は、これまでの実験結果[12]と比較すると大きな値である。本実験での移動経路は実験環境の樹木等により見通しが悪く、ロボット間の相対距離を比較的小さく設定する必要があった。一方、相対位置算出のために用いた測量用トータルステーションには計測対象に対する距離が近いほど計測誤差が大きくなる性質がある。このため、移動を繰り返す毎に誤差が蓄積され、最終的に大きな誤差が生じたと考えられる。また、半月状の橋など移動経路の高低差が大きかったことや一部地面の傾斜が急であったことも原因と考えられる。しかし、ICP法などを用いて誤差補正を行うための初期位置合わせとしては、本実験で得られた位置同定精度は十分有用である。実際に図14に示したモデルに対してICP法を適用した結果を図15に示す。この結果、ICP法の適用後は誤差は179.9mmに減少した。

図13に構築した心字池周回の3次元モデルを示す。但し、図中に開いた穴は、それぞれ親ロボットが環境計測を行った位置を表しており、親ロボットはこれらの地点からレーザによる環境計測を26回行った。

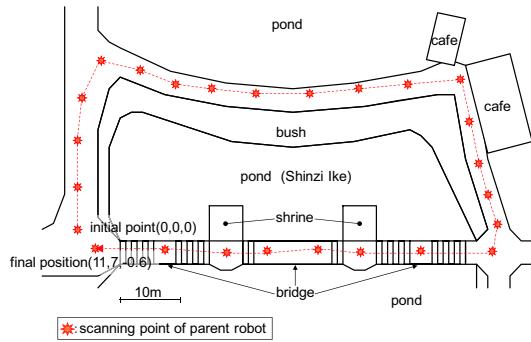


図12 心字池周回移動軌跡

#### 4.4 光学モデル作成実験

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なのは、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、レーザ計測時にテクス

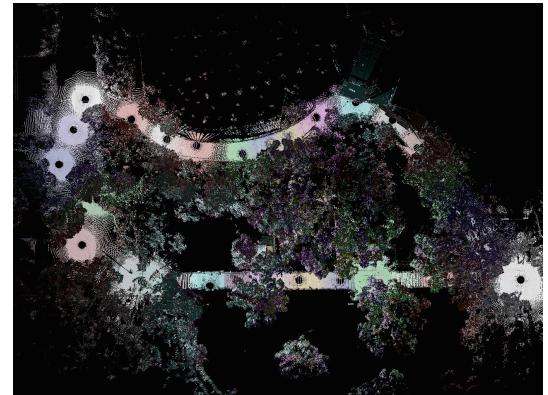


図13 心字池周回3次元モデル

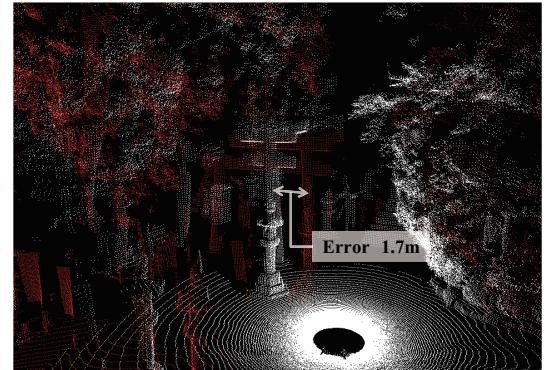


図14 1回目と26回目の幾何モデルにおける位置同定誤差



図15 ICP法の適用後

チャ画像を同時に撮影するものである。

しかし、一般にカメラ画像の解像度は、レーザ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計測に比べて少ない回数で行うことができる。また今回は、前節に示したように幾何モデリング実験を夜間に行ったため、同時にテクスチャ画像を撮影することができない。そこで、予め構築された大規模幾何モデルに対して、その後昼間に任意の場所から新たに撮影したテクスチャ画像を用い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計測回数に比べ少ない回数行い、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単な手法を提案する。本手法の手順を以下

に示す。

(1) レーザ計測装置とデジタルカメラを固定し、相対位置を正確にキャリブレーションする。

(2) レーザ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。ただし幾何モデルとテクスチャ画像の相対位置関係は(1)のキャリブレーションにより既知である。

(3) 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。

(4) 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。

デジタルカメラをレーザ計測装置回転板に搭載した親口ボットを用いて、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。実験は昼間に約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。なお、これらの計測位置同定は行われていない。撮影地点を図8に円で示す。また、親口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°ごとに12回の撮影を行った。図16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の例である。図17に、太宰府天満宮の幾何モデルに対してテクスチャマッピングを行った結果を示す。

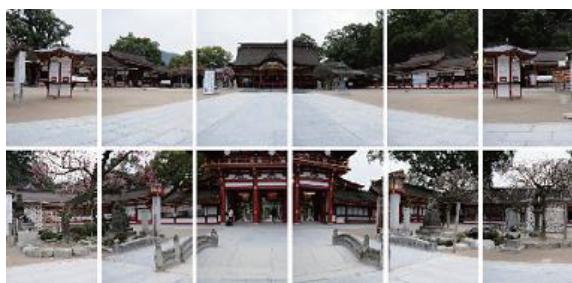


図 16 テクスチャ画像

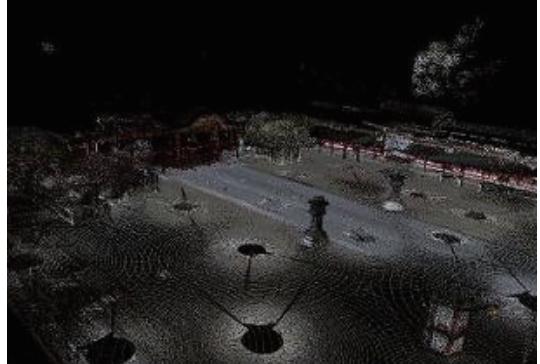
## 5. まとめ

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、国指定重要文化財である太宰府天満宮を対象とした大規模構造物の効率的な幾何・光学モデリングを紹介した。

本システムは、大規模構造物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、重複した密な計測やICP法などの後処理を必ずしも必要としない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



(a)



(b)



(c)



(d)

図 17 テクスチャマッピング結果

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。

また、実物体のデジタルデータ化による半永久的な保存やネットワークを介して場所や時間を問わず誰もが自

由に閲覧することが可能となるデジタルアーカイブ構想が近年注目されている。そこで今後、提案システムを用いた新たな文化遺産の幾何・光学モデリングを行い、太宰府天満宮のモデルも含め広く公開することを検討している。

## 文 献

- [1] P. J. Besl and N. D. McKay : "A method for registration of 3-D shapes," IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell. 14(2) 1992, 239-256.
- [2] Y. Chen and G. Medioni: "Object modelling by registration of multiple range images," Image and Vision Computing 10(3), 1992, 145-155.
- [3] 大石岳史, 佐川立昌, 中澤篤志, 倉爪亮, 池内克史, PCクラスタによる大規模距離画像の並列アライメント, 情報処理学会 CVIM 研究報告, Vol.2003, No.36, pp.27-34, 2003
- [4] 大石岳史, 佐川立昌, 中澤篤志, 倉爪亮, 池内克史, PCクラスタによる複数距離画像の並列同時位置合わせ, 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2004), 2004.7
- [5] 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.
- [6] 戸畠享大, 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.
- [7] 戸畠享大, 倉爪亮, 山田弘幸, 村上剛司, 長谷川勉, CPS SLAM の研究 (第 2 報: CPS とレーザ計測による屋内 3 次元地図の自動構築実験), 日本機械学会ロボティクスメカトロニクス講演会, 2P1-G04, 2007.
- [8] 戸畠享大, 倉爪亮, 村上剛司, 長谷川勉: 群ロボットを用いた大規模 3 次元環境計測システム, 第 25 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 1I34, Sep. 2007.
- [9] 戸畠享大, 倉爪亮, 村上剛司, 長谷川勉, 移動ロボット群による大規模建造物の 3 次元レーザ計測システムの開発, 画像の認識理解シンポジウム (MIRU2007), OS-A9-01, 2007.
- [10] R. Kurazume, Y. Tobata, K. Murakami, T. Hasegawa : "Study on CPS SLAM: 3D laser measurement system for large scale architectures," Journal of the Robotics Society of Japan, vol. 25, no. 8, pp. 1234-1242, Nov. 2007 .
- [11] Y. Noda, R. Kurazume, Y. Iwashita, T. Hasegawa :"Digital Archiving of Cultural Heritages Using Multiple Mobile Robots," Proc. The 14th Robotics Symposia, 3C3, Mar. 2009.
- [12] 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.
- [13] K. Ikeuchi, K. Hasegawa, A. Nakazawa, J. Takamatsu, T. Oishi and T. Masuda : Bayon Digital Archival Project, In Proceedings of the Tenth International Conference on Virtual System and Multimedia, pages 334-343, Nov. 2004.
- [14] Marc Levoy, Kari Pulli, Brian Curless, Szymon Rusinkiewicz, David Koller, Lucas Pereira, Matt Ginzton, Sean Anderson, James Davis, Jeremy Ginsberg, Jonathan Shade, and Duane Fulk : "The Digital Michelangelo Project: 3D Scanning of Large Statues", Proceedings of ACM SIGGRAPH 2000,pp.131-144, Jul. 2000
- [15] H. Zhao, R. Shibasaki : "Reconstructing a textured CAD model of an urban environment using vehicle-borne lase range scanners and line cameras," Machine Vision and Applications, vol. 14, pp. 35-41, 2003.
- [16] K. Ohno, T. Tsubouchi, S. Yuta : "Outdoor Map Building Based on Odometry and RTK-GPS Positioning Fusion," Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 684-690, New Orleans, LA, Apr. 2004.
- [17] 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 .
- [18] 倉爪亮, 広瀬茂男, 岩崎倫三, 長田茂美, 指田直毅: 協調ポジショニングシステムの研究 -CPS-II 型システムの最適化移動形態-, 日本ロボット学会誌, vol. 15, no. 5, pp. 773-780, July 1997.
- [19] Andress Nuchter and Hartmut Surmann : "6D SLAM with an Application in Autonomous Mine Mapping," Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 1998-2003, 2004 .
- [20] Jan Weingarten and Roland Siegwart : "EKF-based 3D SLAM for Structured Environment Reconstruction," Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and System, pp. 2089-2094, 2005.
- [21] David M . Cole and Pual M . Newman :"Using Laser Range Data for 3D SLAM in Outoor Environment," Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 1556-1563, 2006.