

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*

野田 裕介^{*1}, 倉爪 亮^{*2}, 岩下 友美^{*2}, 長谷川 勉^{*2}

Digital Archiving of Cultural Heritages Using Multiple Mobile Robots

Yusuke NODA^{*3}, Ryo KURAZUME^{*4}, Yumi IWASHITA^{*4} and Tsutomu HASEGAWA^{*4}

^{*3} Kyushu University, Dept. of Intelligent Systems, Graduate School of Information Science and Electrical Engineering
744 Motoooka, Nishi-ku, Fukuoka-city, Fukuoka, 819-0395 Japan

^{*4} Kyushu University, Graduate Faculty of Information Science and Electrical Engineering
744 Motoooka, Nishi-ku, Fukuoka-city, Fukuoka, 819-0395 Japan

To construct three dimensional shape model of large-scale cultural heritage using a laser range finder, a number of range images are normally taken from various viewpoints, and these images are aligned using post-processing procedures such as the ICP algorithm. However, in general, those range images need prior rough alignment by hand and adequate overlapped area each other to apply ICP algorithm. To overcome these limitations, we have developed a measurement system using a group of robots and an on-board laser range finder. In this system, each measurement position can be identified by the highly precise positioning technique named Cooperative Positioning System or CPS. Thus, a large-scale 3D model can be obtained by applying simple coordinate translation to each image. This paper presents measurement experiments in “Dazaifu Tenmangu” shrine which is a national important cultural property of Japan using 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

歴史的・芸術的に価値の高い文化遺産は、人類にとって共通の財産であり、我々にはこれらを後世に残していく義務がある。しかし、これらの文化遺産には、長い年月の経過による劣化や風化、自然災害や事故などによる破損や消失などの危険に晒されているものも少なくない。近年、デジタル計測技術の発展にともない、これらの文化遺産をデジタルデータ化して半永久的に保存し、さらに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、歴史的建築物などの大規模構造物も含まれ、それらの形状計測にはレーザ計測装置を用いた計測システムが近年多用されている。

通常、レーザ計測装置を用いた大規模対象のデジタルデータ化では、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り、計測されたデータを ICP 法⁽¹⁾⁽²⁾などの後処理により位置合わせし、統合する手

順が用いられる。しかし大規模対象の場合、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、ロボットにレーザ計測装置を搭載し、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わかれば、ICP 法などの後処理が不要となり、より簡便なデジタルアーカイブ化が可能となる。また人間が重いレーザレンジファインダを運ぶ必要もなく、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アーカイブ化を実現するには、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

* 原稿受付 2009 年 1 月 15 日

^{*1} 九州大学大学院システム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

^{*2} 九州大学大学院システム情報科学府
〒 819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744 番地
Email: noda@irvs.is.kyushu-u.ac.jp

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、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⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾⁽⁹⁾。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レーザ計測実験の結果、および取得した 3 次元モデルを基に作成した太宰府天満宮のデジタルアーカイブ化を紹介する。

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 が繰り返すことを行うことで、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 の例を図 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⁽¹⁰⁾。

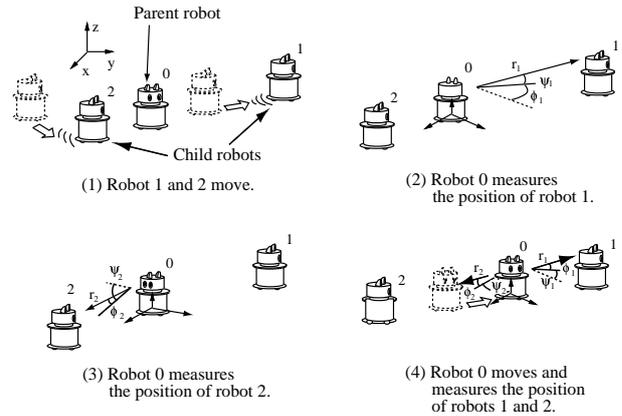


Fig. 1 協調ポジショニングシステム (CPS)

3. 太宰府天満宮のデジタルアーカイブ化

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デジタルアーカイブ化を試みた。本章ではレーザ計測実験の概要と、レーザ計測装置とデジタルカメラを用いた太宰府天満宮のデジタルアーカイブ化を紹介する。

3-1 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、初詣には九州一の参拝客を集め、近隣アジア諸国の観光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 2 に太宰府天満宮本殿を示す。



Fig. 2 太宰府天満宮

3.2 第6次 CPS 機械モデル CPS-VI 図3に、実験で使用した2次元レーザレンジファインダを搭載した第6次 CPS 機械モデル CPS-VI を示す。このシステムは、1台の親ロボット (Parent mobile unit, 図4) と2台の子ロボット (HPI Japan 製, 図5) 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) と、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) を搭載している。この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3次元モデルを作成する。

Table 1 レーザレンジファインダ LMS200
LMS 200 (SICK)

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

Table 2 トータルステーション GPT-9005A
GPT-9005A (TOPCON Ltd.)

Range	1.3 ~ 3,000[m]
Resolution (angle)	0.5 /1
Accuracy (distance)	± (2mm+2ppm×Distance)
Accuracy (angle)	1

3.3 太宰府天満宮形デジタルアーカイブ作成実験
本節では、太宰府天満宮本殿、および境内で行った3次元形状計測実験の結果を紹介する。実験は夜間にのべ7日間行い、205箇所から3次元モデルを得た。実験環境を図6に示す。計測範囲は大宰府天満宮境内の主要建造物を含む約250m×約100mの範囲である。図7に親ロボットの移動経路を示す。実験全体の親ロボットの総移動距離は2,101m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

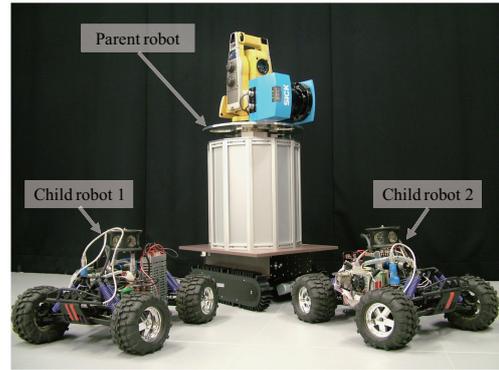


Fig. 3 第6次 CPS 機械モデル CPS-VI

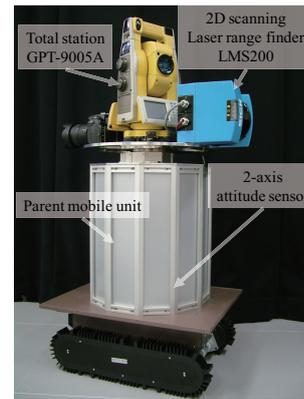


Fig. 4 親ロボット

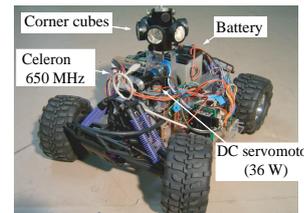


Fig. 5 子ロボット



Fig. 6 実験環境

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8、図9に取得した本殿および境内の3次元モデルを示す。異なる地点において取得した3次元モデルを、色分けして表示している。図9のa2, b2は点で、c2は得られた点データに三角パッチを貼り、面

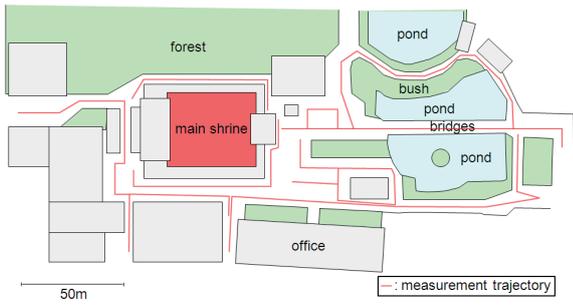


Fig. 7 親ロボット移動経路

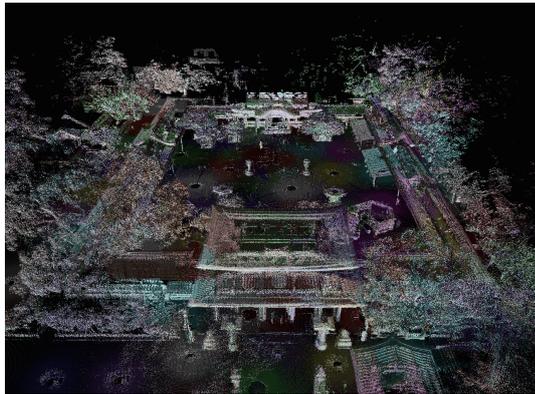
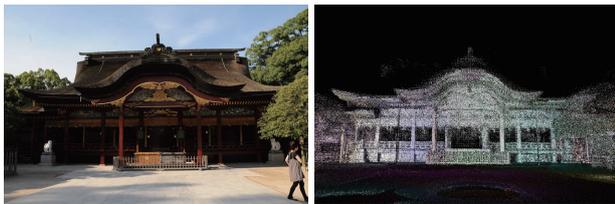


Fig. 8 3次元モデル(本殿)



(a1)

(a2)



(b1)

(b2)



(c1)

(c2)

Fig. 9 3次元モデル

で表示したものである．また図 12 に本実験で作成したデジタルアーカイブの全景を示す．

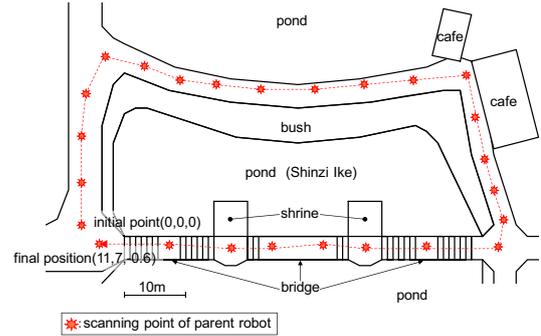


Fig. 10 心字池周回移動軌跡

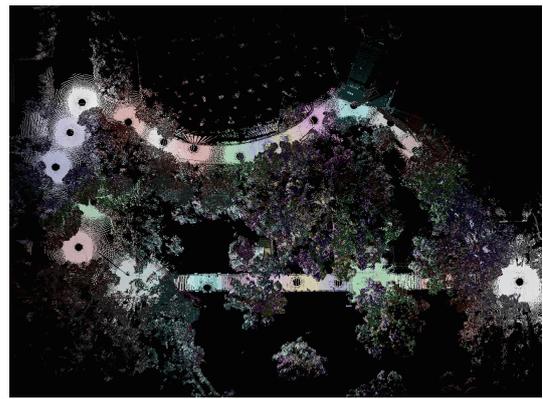


Fig. 11 心字池周回 3次元モデル

図 7 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 10 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．また心字池を周回する経路であり，計測開始地点と終了地点はほぼ一致している．実験の結果，親ロボットの総移動距離は 260.6 m，最大高低差は 2.75 m であった．一方，1 回目と 26 回目の計測データ比較による，親ロボットの総移動距離に対する CPS の位置同定誤差は 1.7 m (0.65 %) であった．この誤差は，これまでの実験結果⁽¹⁰⁾と比較すると大きな値である．これは，樹木等により実験環境の見通しが悪く，ロボット間の相対距離が比較的近かったことや，半月状の橋など移動経路の高低差が大きかったこと，また，一部地面の傾斜が急であったことが原因と考えられる．より高精度な 3 次元モデルが必要な場合には，提案手法により得られた位置を初期位置として ICP 法を適用し，誤差補正を行うことも考えられる．図 11 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．

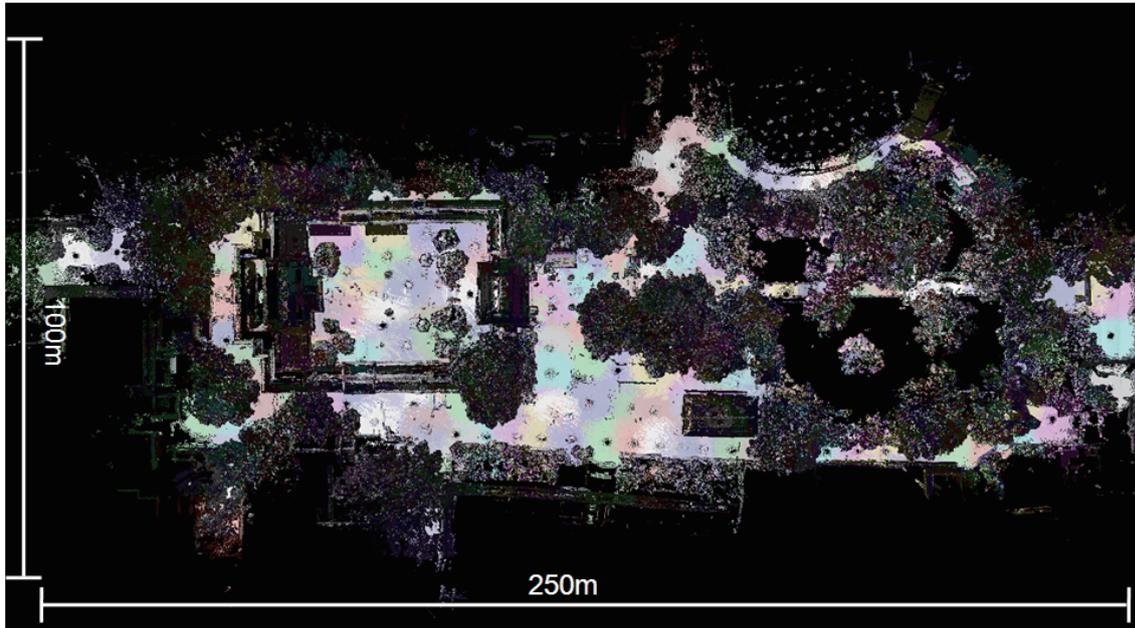


Fig. 12 取得した3次元モデル全景

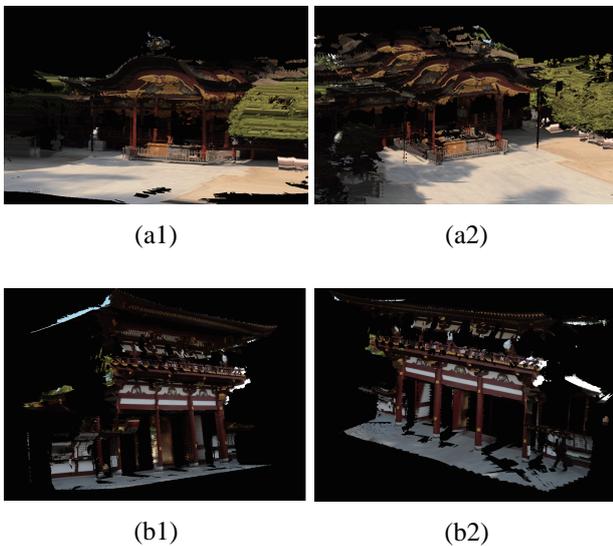


Fig. 13 テクスチャマッピング

次に、デジタルカメラから得られたテクスチャ画像を3次元モデルに重ねて表示(テクスチャマッピング)することで、より現実感を高めたモデルを作成した。図13に一例を示す。デジタルカメラの撮影はレーザ計測後に別に行い、3次元モデルとテクスチャ画像の相対位置合わせは人手により行った。

4. テクスチャマッピング

前節で示した3次元モデルとカメラ画像のテクスチャマッピングでは、レーザ計測位置とカメラの撮影位置の相対位置関係は手動により決定されていた。本



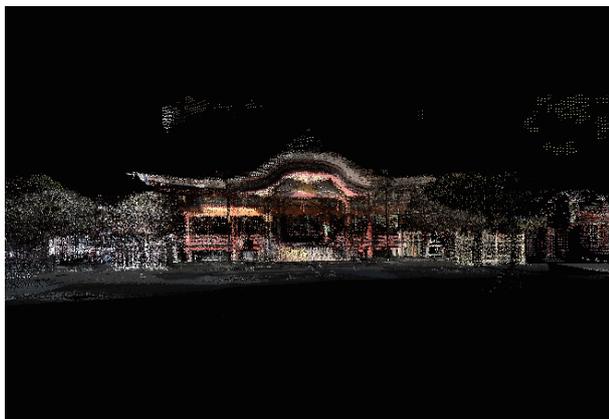
Fig. 14 デジタルカメラ搭載親口ロボット

節ではこれをできる限り自動化する手法について考察する。

3次元モデルへのテクスチャマッピングを最も簡便に行う方法は、レーザ計測装置にカメラを固定し、レーザ取得時にテクスチャ画像を同時に撮影するものである。この場合、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くことで、生成された3次元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、図14に示すように、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ロボットを用いて、3次元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3次元モデルに対してテクスチャマッピングを行った。



Fig. 15 テクスチャ画像



(1)



(2)

Fig. 16 テクスチャマッピング結果

ただし、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3次元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疎に行うことができる。また今回は、前章までに示した

ように大規模3次元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、撮影場所が未知の疎なカメラ画像を、同時に計測した3次元モデルを用いて、予め得られている大規模3次元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、レーザ計測装置により3次元モデルを、デジタルカメラによりテクスチャ画像を得る。このとき3次元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3次元モデルと既に取得済みの大規模3次元モデルに対して、ICP法を用いて位置合わせを行う。これにより、大規模3次元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3次元モデルに対してテクスチャマッピングを行う。

図15~16に実験例を示す。ただしここでは、太宰府天満宮本殿内側の3次元モデルに対して、上述の手法でテクスチャマッピングを行った。今回、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(Nikon D300)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15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16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3次元モデルに対して実験を行っている。

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)と移動可能なレーザ計測装置を組み合わせた移動ロボット群に3次元レーザ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デジタルアーカイブ化を紹介した。

本システムは、レーザ計測装置を用いた文化遺産のデジタルアーカイブ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り、大規模文化遺産の簡便なデジタルアーカイブ化手法として実用性が高い。

今後は太宰府天満宮全体の3次元モデルに対して、提案した手法を用いたテクスチャマッピングを行い、より現実性の高いモデルを作成するとともに、ロボッ

トを用いたデジタルアーカイブの例として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) 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) Takeshi Oishi, Ryusuke Sagawa, Atsushi Nakazawa, Ryo Kurazume, Katsushi Ikeuchi: "Parallel Alignment of a Large Number of Range Images on PC Cluster," IPSJ Trans. on Computer Vision and Image Media, Vol.2003, No.36, pp. 27-34, 2003
- (4) Takeshi Oishi, Ryusuke Sagawa, Atsushi Nakazawa, Ryo Kurazume, Katsushi Ikeuchi: "Parallel Simultaneous Alignment of Multiple Range Images on PC Cluster," MIRU 2004 Meeting on Image Recognition and Understanding, July 2004
- (5) S. Hirose, R. Kurazume, S. Nagata : "Cooperative Positioning System with Multiple Robots," Journal of the Robotics Society of Japan, vol. 13, no. 6, pp. 838-845, Sep. 1995 .
- (6) Y. Tobata, R. Kurazume, K. Murakami, T. Hasegawa : "Study on CPS SLAM: SLAM experiments using CPS-V and LRF," Proc. the 24th Annual Conference of the Robotics Society of Japan, 2N17, Sep. 2006.
- (7) Y. Tobata, R. Kurazume, K. Murakami, T. Hasegawa : "3D laser measurement and map generation by cooperative multiple robots," Proc. The 13th Robotics Symposia, pp. 159-165, Mar. 2008.
- (8) Y. Tobata, R. Kurazume, K. Murakami, T. Hasegawa : "3D laser measurement system using multiple mobile robots," Proc. the 25th Annual Conference of the Robotics Society of Japan, 1I34, Sep. 2007.
- (9) 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 .
- (10) R. Kurazume, S. Hirose : "Study on Cooperative Positioning System," Proc. the 16th Annual Conference of the Robotics Society of Japan, pp.169-170, Oct. 1998.
- (11) 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.
- (12) 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
- (13) H. Zhao, R. Shibasaki : "Reconstructing a textured CAD model of an urban environment using vehicle-borne laser range scanners and line cameras," Machine Vision and Applications, vol. 14, pp. 35-41, 2003.
- (14) 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.
- (15) R. Kurazume, S. Hirose, T. Iwasaki, S. Nagata : "Study on Cooperative Positioning System -Map creation by CPS Based Active Touch," Journal of the Robotics Society of Japan, vol. 17, no. 1, pp. 84-90, Jan. 1999 .
- (16) R. Kurazume, S. Hirose, T. Iwasaki, S. Nagata, N. Sashida : "Study on Cooperative Positioning System - Optimized Moving Strategy for the CPS- system," Journal of the Robotics Society of Japan, vol. 15, no. 5, pp. 773-780, July 1997.
- (17) 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 .
- (18) 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.
- (19) David M . Cole and Pual M . Newman : "Using Laser Range Data for 3D SLAM in Outdoor Environment," Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 1556-1563, 2006.