

自動化された協調ポジショニングシステムによる 3次元環境地図の自動生成

○ 鄭 龍振* 倉爪 亮** 岩下 友美** 長谷川 勉**

* 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

** 九州大学大学院システム情報科学研究院

E-mail: yongjin@irvs.is.kyushu-u.ac.jp, {kurazume,yumi,hasegawag}@ait.kyushu-u.ac.jp

Laser-based 3D map building by Automatic Cooperative Positioning System

○Yongjin JEONG*, Ryo KURAZUME**, Yumi IWASHITA** and Tsutomu HASEGAWA**

* Graduate School of Information Science and Electrical Engineering, Kyushu University

** Faculty of Information Science and Electrical Engineering, Kyushu University

E-mail: yongjin@irvs.is.kyushu-u.ac.jp, {kurazume,yumi,hasegawag}@ait.kyushu-u.ac.jp

Abstract: We propose the group robot system that creates accurate three-dimensional map using the automated highly accurate positioning algorithm, Cooperative Positioning System (CPS) and an on-board laser measurement system. This system consists of one parent robot that is equipped with a total station and laser measurement system, and two child robots that are equipped with corner cubes and infrared beacons. This system enables to create a precise 3D environment map automatically using the infrared beacons.

Key Words:3D environmental map, Structured environment, Laser range finder

1 はじめに

我々は、レーザ計測器と測量用トータルステーションを搭載したロボット群により、ロボットの高精度位置同定法である協調ポジショニングシステムを用いて、ロボットが移動しながら3次元環境計測と地図作成を行うシステムを開発している。これまでに本システムにより、震災で倒壊した建物内部や崩落した坑道、洞窟内などでの内部状態の調査と要救助者の探索、発見 [1]、歴史的文化的価値の高い大規模建造物の幾何・光学モデリング [2] などに応用できる事を示してきた。しかしこれまでのシステムでは、協調ポジショニングシステムにおけるトータルステーションによるコーナキューブの探索は半手動で実現されており、より省力化された3次元環境計測と地図作成の実現には、この自動化が大きな問題となっていた。そこで本稿ではこの計測作業を自動化するための取り組みを紹介する。

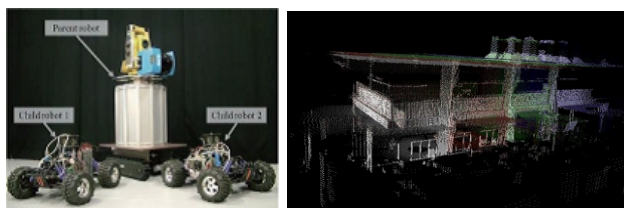


Fig.1 ロボット群と測定された環境モデル

2 3次元環境レーザ計測システム

これまでに開発した群ロボットによる3次元環境レーザ計測システムを Fig.1 に示す。このシステムは、1台の親ロボットと2台の子ロボットからなり、親ロボットに搭載したレーザレンジファインダによる3次元環境計測結果に対し、その計測位置の同定に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) [3], [4], [5] を利用することで、複数の計測結果の統合に ICP 法 [6], [7] などの後処理を用いることなく、大規模建造物の全体3次元モデルを効率よく求めることができる [1]。以下、搭載した計測機器について詳しく述べる。

2.1 測量用トータルステーションおよびコーナキューブ

親ロボットには高精度レーザ距離測定器である測量用トータルステーション (Table 1, GPT-9005A, TOPCON Ltd.) が搭載されている。このトータルステーションにより、半自動的に子ロボットに搭載したコーナキューブまでの距離、方位角、仰角を正確に計測することで、子ロボット的位置、および親ロボット自身の位置と向きを計測することが可能である。これまでの実験の結果、本トータルステーションを用いた場合の協調ポジショニング法での位置誤差は、およそ移動距離の0.3% [8] であった。なお、本システムでは子ロボットの向きの場合には計測できないため、子ロボットの姿勢推定には yaw 軸センサやデッドレコニングなど他の手法を併用する必要がある。またトータルステーションによるコーナキューブの自動探索には、コーナキューブのおおまかな方向へトータルステーションをあらかじめ向ける必要

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

Table 1 トータルステーション (GPT-9005A, TOPCON)

LMS 200 (SICK)	
Range	80[m] / 8[m]
Resolution(distance)	1[cm] / 1[mm]
Field of view	180° / 100°
Resolution(angle)	0.5° / 0.25°

Table 2 レーザレンジファインダ (LMS200, SICK)

MD900-T (Applied Geosystems)	
Range	± 25°
Resolution	0.004°
Repeatability	0.01°

Table 3 姿勢センサー (MD900-T, Applied Geosystems)

がある。

2.2 環境計測用 3 次元レーザ計測システム

環境地図生成には、レーザ投射面が縦方向になるように設置した 2 次元レーザレンジファインダ (Table 2, LMS 200, SICK) を用い、これを親ロボットに搭載した回転ステージ (ARS-136-HP, 中央精機) 上で 360° 回転させながらレーザ計測することで、周囲の 3 次元距離情報を得る。

2.3 姿勢センサ

親ロボットに搭載した計測装置は、親ロボットの走行面の凸凹や傾斜により、計測値に大きな影響を受ける。そこで、姿勢センサ (Table 3, MD900-T, Applied Geosystems) により計測された roll 角, pitch 角を用いて、トータルステーションの方位角、仰角とレーザレンジファインダの回転軸の傾斜を補正する。

2.4 コントローラ

親ロボットおよび 2 台の子ロボットは、遠隔地におかれたコントローラにより集中管理され、コントローラとロボットは無線 LAN によるソケット通信を行う。コントローラは、親ロボットから環境計測データや協調ポジショニングシステムによる同定位置を受信し、座標変換を行って計測された 3 次元地図を画面に表示する。またジョイスティックやタッチペンによる GUI インタフェースを有し、全てのロボットの移動やセンシングを集中的に制御する。

3 計測自動化に向けた改良

3.1 コーナキューブの自動探索

協調ポジショニング法の自動化に必要なトータルステーションによるコーナキューブの完全自動探索を実現するため、子ロボット上部回転台に赤外線ビーコンを取り付け、親ロボットが子ロボットの大まかな方向を推定できるようにした。親ロボットは赤外線ビーコンからの赤外線信号を受信すると、信号の方向を推定し、トータルステーションをその方向に自動的に振り向かせることができる。これにより子ロボットがどの位置にいても、赤外線ビーコンのすぐ下にあるコーナキューブを自動的に発見し、距離、方位、仰角を測定することができる。ただしトータルステーションが赤外線ビーコンを探索するためには、まずリモコンをトータルステーションに振り向かせる必要があり、次式で得られる回転角度 θ_r に応じて上部回転台をあらかじめ回転させることとした。

$$\theta_r = \tan^{-1} \frac{y_0 - y_i}{x_0 - x_i} - Y_i$$

ここで x_0, y_0 は親ロボットの現在位置の xy 座標, x_i, y_i, Y_i は子ロボット i の現在位置の xy 座標と yaw 角を表す。ただし初回の位置同定時は、子ロボットの位置が測定されていないため、手で上部回転台を回転させておく。

計測された方位角 ϕ_p , 仰角 ψ_p は姿勢センサーから得られる pitch, roll 角を利用して次式で補正を行いグローバル座標系での方位角 ϕ_g , 仰角 ψ_g を求める。ただし, R は 3×3 の回転行列である。

$$\begin{pmatrix} N_x \\ N_y \\ N_z \end{pmatrix} = R_x(\text{roll}) \cdot R_y(\text{pitch}) \cdot \begin{pmatrix} \cos(\psi_p) \cdot \cos(\phi_p) \\ \cos(\psi_p) \cdot \sin(\phi_p) \\ \sin(\psi_p) \end{pmatrix}$$

$$\psi_g = \tan^{-1} \frac{N_z}{\sqrt{N_x^2 + N_y^2}}, \quad \phi_g = \tan^{-1} \frac{N_y}{N_x}$$

この補正された方位角、仰角を用いて、親ロボットから子ロボット i の位置を次式で求める。ただし r_i は計測された親子ロボット間の距離である。

$$\begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{pmatrix} + r_i \cdot \begin{pmatrix} \cos(\psi_i) \cdot \cos(\phi_i) \\ \cos(\psi_i) \cdot \sin(\phi_i) \\ \sin(\psi_i) \end{pmatrix}$$

また 2 台の子ロボット 1,2 の位置から親ロボットの位置は次式で求める。ただし Y_0 は親ロボットの向きである。

$$(x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2 = r_1^2 \cos^2 \psi_1 = l_1^2$$

$$(x_0 - x_2)^2 + (y_0 - y_2)^2 = r_2^2 \cos^2 \psi_2 = l_2^2$$

$$(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 = l_0^2$$

$$k_1 = l_0^2 + l_2^2 - l_1^2, \quad k_2 = l_0^2 - l_2^2 + l_1^2$$

$$q_1 = \sqrt{l_0^2 - (l_2 - l_1)^2}, \quad q_2 = \sqrt{-l_0^2 + (l_2 + l_1)^2}$$

$$s = \begin{cases} +1 & \text{if } \phi_1 > \phi_2 \\ -1 & \text{else} \end{cases}$$

$$x_0 = \frac{x_1 k_1 + x_2 k_2 + s(y_1 - y_2) q_1 q_2}{2l_0^2}$$

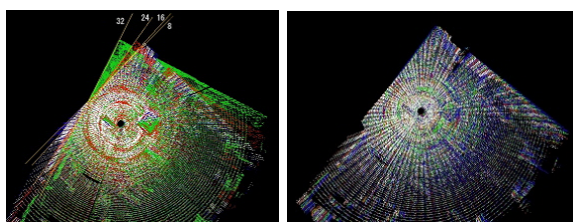
$$y_0 = \frac{y_1 k_1 + y_2 k_2 - s(x_1 - x_2) q_1 q_2}{2l_0^2}$$

$$z_0 = z_1 - r_1 \sin \psi_1 = z_2 - r_2 \sin \psi_2$$

$$Y_0 = -\phi_1 + \tan^{-1} \frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0} = -\phi_2 + \tan^{-1} \frac{y_2 - y_0}{x_2 - x_0}$$

3.2 環境計測用レーザシステム

3次元地図データは、レーザレンジファインダ (LMS 200, SICK) から得られる距離と仰角, 回転ステージ (ARS-136-HP, 中央精機) から得られる方位角, 及び姿勢センサから得られる roll 角, pitch 角を用いて計算される。回転ステージから方位角を得るには, コントローラ (QT-CD1, 中央精機) にその都度, 現在の角度を問い合わせる方法 (方法 1) が考えられるが, 通信に 40ms 程度必要であり, 回転速度が大きいと実際の角度と計測角度にずれが存在する可能性があった。そこで回転速度を一定と仮定し, 経過時間から回転角度を推定した (方法 2)。ただし加減速時間を考慮し, 目標の測定範囲より若干広い角度範囲を回転させている。方法 1, 2 それぞれに対し, 回転ステージの回転速度を 8[deg/sec] ~ 32[deg/sec] とし, 作成された 4 枚の地図を重ねて表示した結果を Fig.2 に, 方法 2 で計測された環境地図を Fig.3 に示す。



方法 1

方法 2

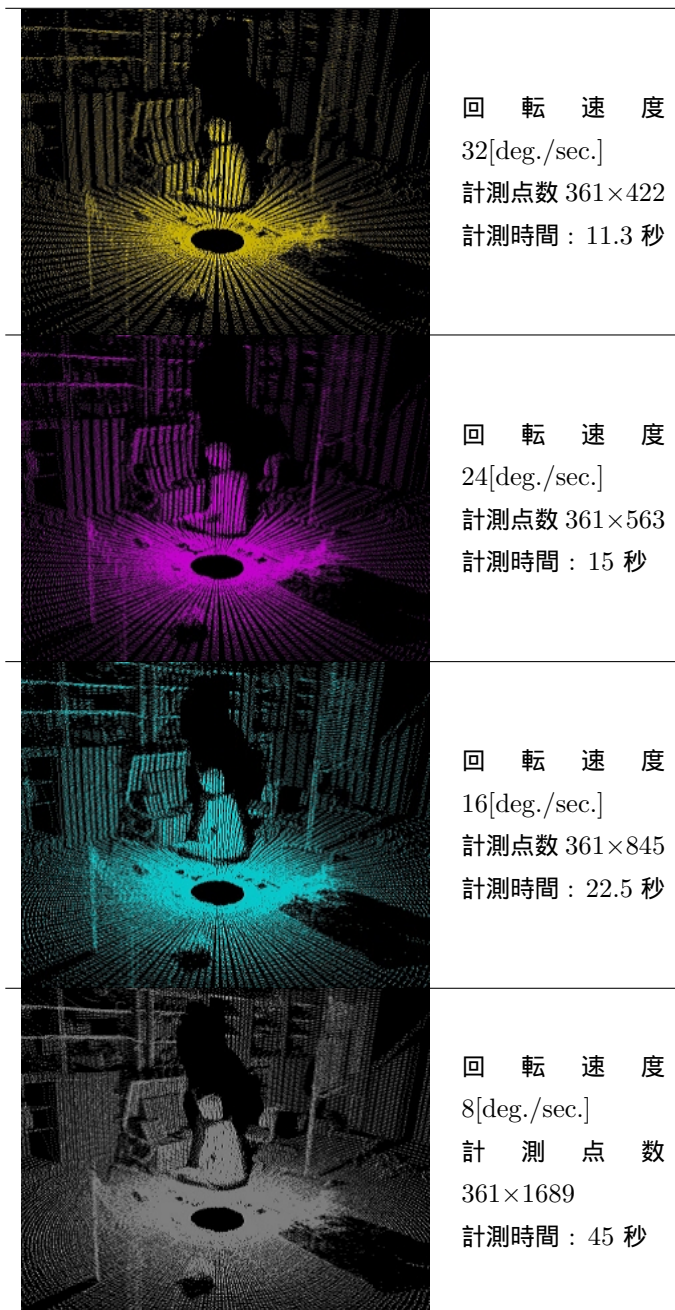
Fig.2 回転速度による方法 1, 2 の計測結果の比較

3.3 環境地図の生成法

計測した距離データは次式で 3次元地図上の点データに変換される。ただし, ϕ_i は方位角, ψ_i は仰角, r_i は測定距離, c は回転軸からレーザレンジファインダまでのオフセット距離, h は地面からレーザレンジファインダまでの回転軸方向の高さであり, (x_0, y_0, z_0) は協調ポジショニング法で得られた親ロボットの現在位置の座標である。

$$R_{xyz} = R_z(yaw + \phi_i) \cdot R_y(pitch) \cdot R_x(roll)$$

$$\begin{pmatrix} P_{ix} \\ P_{iy} \\ P_{iz} \end{pmatrix} = R_{xyz} \cdot \begin{pmatrix} r_i \sin(\psi_i) + c \\ 0 \\ r_i \cos(\psi_i) + h \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{pmatrix}$$



回転速度
32[deg./sec.]
計測点数 361×422
計測時間: 11.3 秒

回転速度
24[deg./sec.]
計測点数 361×563
計測時間: 15 秒

回転速度
16[deg./sec.]
計測点数 361×845
計測時間: 22.5 秒

回転速度
8[deg./sec.]
計測点数
361×1689
計測時間: 45 秒

Fig.3 回転速度による地図の解像度の変化

3.4 ロボットの移動制御

コントローラは取得された 3次元環境地図からリアルタイムで 2次元グリッド地図を生成し, ロボットはこの 2次元グリッド地図を用いて環境計測位置や移動経路をポテンシャル法により自動計画する。

まず, 障害物や壁などロボットが移動不可能なグリッドの周囲に, そのグリッドを中心とするガウス分布状のポテンシャル値を与え, Fig.4 で表すようなポテンシャル地図を生成する。次に, ポテンシャル値がなるべく小さい経路に沿って次の計測地点までの移動する最適経路を A* アルゴリズムにより算出する。その後, コントローラは実際に回転や前進・後進の移動命令を組み合わせる親ロボットを次の計測地点まで移動させる。ポテンシャル値を考慮することで Fig.5

で表すように障害物や壁などから離れた安全な移動を実現できる。さらに、Fig.6 で表すように A* アルゴリズムにより風潰し探索よりはるかに低い探索回数で同じ最適経路を選択できる。

この計測位置の自動計画と自動化された協調ポジショニング法により移動と計測を繰り返すことで、事前に設定されたある計測範囲全体の 3 次元環境地図を自動的に生成することが可能になった。

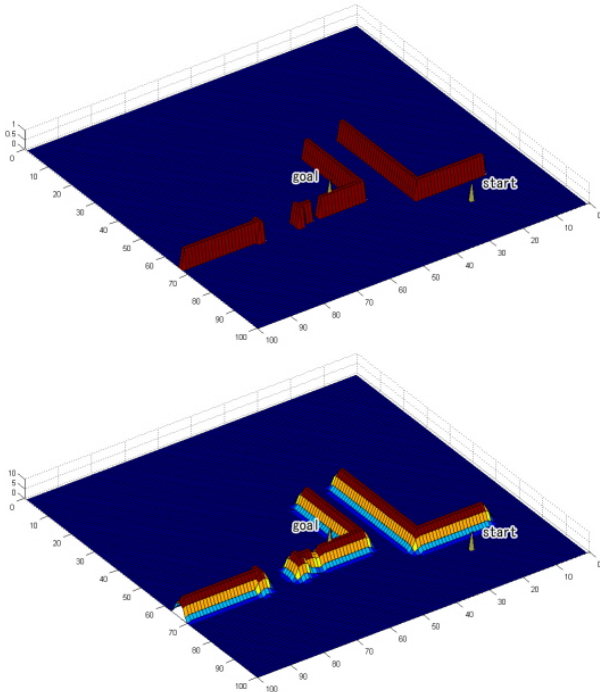


Fig.4 グリッド地図 (上) とポテンシャル地図 (下)

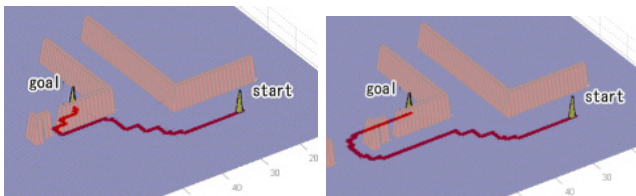


Fig.5 グリッド地図からの経路探索 (左) とポテンシャル地図からの経路探索 (右)

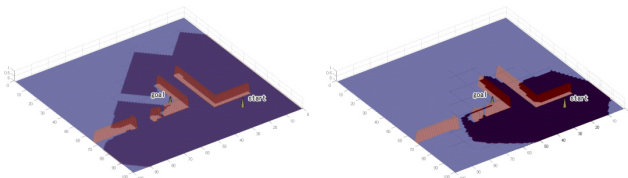


Fig.6 風潰しの探索範囲 (左) と A* の探索範囲 (右)

4 まとめと今後の予定

本稿では自動化された協調ポジショニングシステムと搭載したレーザ計測システムにより、未知の空間を移動しながら正確な 3 次元地図を生成する、ロボット群による 3 次元環境地図自動作成システムを紹介した。

今後は、提案した 3 次元環境地図の自動計測システムを用いて、実環境での計測実験を行う。また、本システムによって生成された 3 次元地図を用いたパーソナルサービスロボットの誘導方法について検討する予定である。

文献

- [1] 戸畑享大, 倉爪亮, 村上剛司, 長谷川勉: “群ロボットによる 3 次元環境計測と地図生成”
- [2] 野田裕介, 倉爪亮, 岩下友美, 長谷川勉: “レーザ・カメラ搭載群ロボットによる太宰府天満宮の幾何光学計測”, 「画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2009)」2009 年 7 月
- [3] Y. Tobata, R. Kurazume, K. Murakami, T. Hasegawa: “Study on CPS SLAM: SLAM experiments using CPS-V and LRF”, the 24th Annual Conference of the Robotics Society of Japan, 2N17, Sep. 2006.
- [4] Y. Tobata, R. Kurazume, H. Yamada, K. Murakami, T. Hasegawa: “Study on CPS SLAM: Automatic construction of 3D map by CPS and laser range finder”, robomec 07, 2P1-G04, 2007
- [5] Y. Tobata, R. Kurazume, K. Murakami, T. Hasegawa: “3D laser measurement system using multiple mobile robots”, the 25th Annual Conference of the Robotics Society of Japan, 1I34, Sep. 2007.
- [6] P.J. Besl and N.D. McKay: “A method for registration of 3D shapes”, IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell. 14(2) 1992, 239-256
- [7] Y. Chen and G. Medioni: “Object modelling by registration of multiple range images”, Image and Vision Computing 10(3), 1992, 145-155
- [8] 倉爪亮, 広瀬茂男: “協調ポジショニングシステムの研究”, 第 16 回日本ロボット学会学術講演予稿集, pp. 169-190, Oct. 1998