

CPS SLAMの研究

—大規模建造物の高精度三次元幾何形状レーザ計測システム—

倉 爪 亮* 戸 畑 享 大* 村 上 剛 司* 長谷川 勉*

Study on CPS SLAM

—3D Laser Measurement System for Large Scale Architectures—

Ryo Kurazume*, Yukihiro Tobata*, Kouji Murakami* and Tsutomu Hasegawa*

In order to construct three-dimensional shape models of large-scale architectural structures 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, before applying the ICP algorithm, these range images must be registered to roughly correct positions by a human operator in order to converge to precise positions. In addition, range images must be made to sufficiently overlap each other by taking dense images from close viewpoints. On the other hand, if the positions of the laser range finder at viewpoints can be identified precisely, local range images can be directly converted to the global coordinate system through a simple transformation calculation. The present paper proposes a new measurement system for large-scale architectural structures using a group of multiple robots and an on-board laser range finder. Each measurement position is identified by a highly precise positioning technique called Cooperative Positioning System (CPS), which utilizes the characteristics of the multiple-robot system. The proposed system can construct 3D shapes of large-scale architectural structures without any post-processing procedure such as the ICP algorithm or dense range measurements. Measurement experiments in unknown and large indoor/outdoor environments are successfully carried out using the newly developed measurement system consisting of three mobile robots named CPS-V.

Key Words: SLAM, 3D Map, Multiple Robots, Laser Range Finder, Digital Archive

1. は じ め に

被災した地下街や建物内部などの未知・不整地環境において、要救助者の有無や内部の状態、救助活動が可能な空間を探索する場合、自律移動ロボットによるSLAM (Simultaneous Localization And Mapping) は有効な手法である[13]~[15]。SLAMとは、事前知識のない未知環境において、ロボットが自己位置を同定しつつ周囲の環境情報を計測することにより、ロボットの移動経路周囲の環境地図を作成する手法である。このSLAMによる高精度な環境地図の作成には、以下の2点が重要となる。

- (1) 高精度な自己位置同定システム
- (2) 高精度な環境計測システム

しかし、(1)については、従来提案されている自己位置同定手法、あるいはSLAMで一般に用いられる観測履歴から自己位置を同定するシステムでは、それほど高精度な自己位置同定は実現できていない。

一方、(2)については、レーザレンジファインダを用いたシステムが費用、精度の点で有効である。従来、レーザレンジファインダは高価、大型、振動に弱いという問題があったが、近年、比較的安価で小型な装置が開発され、市販されている。

レーザレンジファインダを用いて高精度な環境情報を取得するシステムは、ロボット以外の分野、例えば文化遺産のデジタルアーカイブなどでも利用されている。アンコール遺跡[1]や紫禁城[2]、ポンペイ遺跡などでは、失われつつある貴重な文化遺産を高精度レーザ計測装置やデジタルカメラにより計測し、正確な三次元形状や見えをデジタルデータとして保存するプロジェクトが進められている。通常、これら大規模建造物をレーザ計測する場合、1台のレーザ計測装置から一度に計測できる範囲は限られることから、多くの位置にレーザ計測装置を移動して多数回の計測を行い、得られた三次元点データをICP法[4][5]などの後処理により位置合わせする方法が用いられる。この後処理の結果、各計測地点におけるセンサ座標系で記述された三次元点データが、一つの世界座標系へ変換され、大規模建造物の全体像を得ることができる。しかし、実際にICP法が正確に収束するためには、それぞれの三次元点データがある程度正し

原稿受付 2007年4月5日

*九州大学

*Kyushu University

い相対位置関係になるように、通常人手により大まかな初期位置合わせを行う必要がある。また計測地点が多い場合には後処理の計算コストも膨大となり、さらに ICP 法により精度良く位置合わせを行うためには、各計測地点で得られた三次元点データに共通して特徴的な形状が含まれ、かつ点データの分布が十分に重なるように測定を密に行わなければならない。

これに対し、上述の SLAM と同様にレーザ計測装置の設置位置、計測方向を精度良く測定し、センサ座標系から世界座標系への変換行列を直接求めることで、ICP 法などの後処理を用いずに三次元データ点を重ね合わせる手法が考えられる。この一例として、これまでに GPS とレーザ計測装置を組み合わせた手法が提案されている [6] [7]。しかし、現在 GPS で高精度な位置同定を行うには、RTK 方式（リアルタイムキネマティック方式）や VRS 方式（仮想基準点方式）など特殊な機器、手法を用いる必要があり、また GPS は衛星の見通せない建物の間や屋内環境、洞窟内や地下街では用いることができない。

本論文では、移動ロボットの高精度位置同定手法として提案された、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）[8] を用い、この CPS と移動可能なロボット搭載型レーザ計測装置を組み合わせることで、大規模環境においても高精度な環境地図を作成するシステム “CPS SLAM” を提案する。本手法は移動ロボットに対する SLAM としての利用だけでなく、ICP 法などの後処理が不要という特徴から、歴史遺産など大規模建造物に対する高精度三次元幾何形状の自動レーザ計測システムとしても利用できる。

2. 群ロボットによる高精度位置同定手法

レーザ計測装置を装備した移動ロボットが、計測対象の周囲を巡回し、多地点から対象のレーザ計測を行うシステムを考える。このとき、移動中のロボットの正確な位置、姿勢が分かれば、それぞれの地点で得られた三次元点データは、簡単な座標変換により世界座標系へと変換できる。

これまで移動ロボットの位置同定法として、大まかに以下の三つの手法が提案されてきた。

- (1) 車輪の回転角度や加速度センサなどの内界センサ情報を積分する手法
- (2) 外界センサにより外部の目標物（ランドマーク）を計測し、自己位置を同定する手法
- (3) GPS を用いる手法

(1) はオドメトリ法、あるいはデッドレコニング法と呼ばれ、特に車輪型移動ロボットでは最も一般的な手法であるが、不整地では車輪の滑りにより同定精度が低いこと、高低差は測定困難であることなどの欠点がある。また (2) はランドマークが精度良く計測できれば、高低差を含む高精度な三次元位置同定が可能であるが、既知のランドマークを用いる場合には、走行経路にあらかじめランドマークを設置し、かつその正確な地図を準備する必要がある。一方、SLAM は環境計測と位置同定を同時に行うことで既知ランドマークを使用せずに未知環境での位置同定を実現するものであるが、外界センサ情報を繰り返し使用するために誤差が急激に蓄積する傾向があり、また特徴的な環境情報が常に外界センサ情報に含まれている必要がある。(3)

は (2) の特殊な場合であり、近年盛んに用いられているが、同定精度や使用環境が見通しのいい屋外に限られるなど、実用上の問題がある。

これに対し、倉爪らは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（CPS）を提案している [8]。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、まったくの未知、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。本章では、この協調ポジショニングシステム（CPS）の原理と、重み付き最小二乗法を用いた位置同定手法を紹介する。

2.1 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二つのグループ 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。

この CPS の実現精度の確認のために、高低差 10 [m] を含む三次元屋外環境において長距離移動実験を行った。Fig. 2, 3 に実験の様子と移動軌跡を示す。実験の結果、323.9 [m] 移動後の

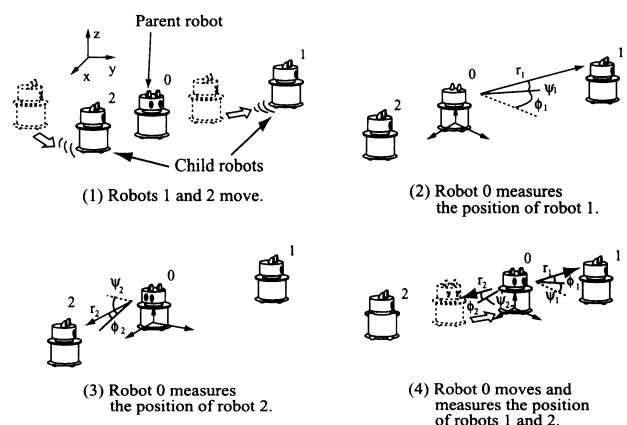


Fig. 1 Cooperative Positioning System, CPS

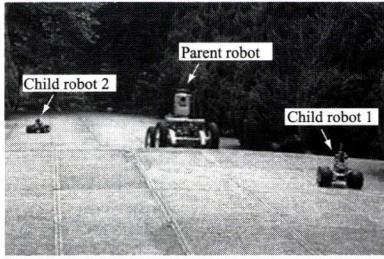


Fig. 2 Long distance measurement experiment

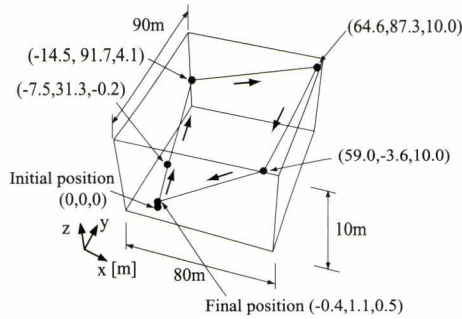


Fig. 3 Results of long distance measurement experiment

位置誤差が 0.97 [m] (移動距離の 0.3%) であり, 従来手法と比べて格段に高い精度が実現できることが確認された [9].

2.2 CPS の位置同定精度

CPS により実現される位置同定精度について解析的に検討する. まず Fig. 1 に示す 3 台のロボットを用いた CPS において, 位置が既知な 2 台の子ロボット 1, 2 までの距離, 方位角, および仰角を計測して, 親ロボット 0 の位置を同定する場合 (Fig. 1 (4)) を考える. ただし, 親ロボット 0 は後述の機械モデルと同様に 2 軸姿勢センサを搭載し, 重力方向に対する傾きは既知であるとする. このとき, それぞれのロボットの位置, 姿勢を $\mathbf{P}_i(x_i, y_i, z_i, \theta_i)$, ($i = 0 \sim 2$), ロボット 0 からロボット 1, 2 までの距離を r_1, r_2 , 方位角を ϕ_1, ϕ_2 , 仰角を ψ_1, ψ_2 とすると, ロボット 0 からロボット 1, 2 への観測方程式は,

$$(x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2 = r_1^2 \cos^2 \psi_1 \quad (1)$$

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

$$z_0 = z_1 - r_1 \sin \psi_1 \quad (3)$$

$$= z_2 - r_2 \sin \psi_2 \quad (4)$$

$$\theta_0 = -\phi_1 + \tan^{-1} \frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0} \quad (5)$$

$$= -\phi_2 + \tan^{-1} \frac{y_2 - y_0}{x_2 - x_0} \quad (6)$$

の六つである. ここで決定すべき変数はロボット 0 の位置姿勢 $(x_0, y_0, z_0, \theta_0)$ の四つであるから, この観測情報は冗長である. そこで $x_i = \tilde{x}_i + dx_i$ 等とおき, Taylor 展開すると以下の式が得られる.

$$\mathbf{A}\mathbf{X}_0 = \mathbf{L} + \mathbf{K}_1\mathbf{X}_{1,2} + \mathbf{K}_2\mathbf{\Theta} \quad (7)$$

ただし, $\mathbf{X}_0 = (dx_0 \ dy_0 \ dz_0 \ d\theta_0)^T$,

$\mathbf{X}_{1,2} = (dx_1 \ dy_1 \ dz_1 \ d\theta_1 \ dx_2 \ dy_2 \ dz_2 \ d\theta_2)^T$, $\mathbf{\Theta} =$

$$(dr \ d\phi \ d\psi)^T, \mathbf{d}_i = \sqrt{(\tilde{x}_0 - \tilde{x}_i)^2 + (\tilde{y}_0 - \tilde{y}_i)^2}$$

$$\mathbf{L} = \begin{pmatrix} r_1 \cos \tilde{\psi}_1 - d_1 \\ r_2 \cos \tilde{\psi}_2 - d_2 \\ \tilde{z}_1 - r_1 \sin \tilde{\psi}_1 - \tilde{z}_0 \\ \tilde{z}_2 - r_2 \sin \tilde{\psi}_2 - \tilde{z}_0 \\ \tilde{\phi}_1 + \tilde{\theta}_0 - \tan^{-1} \frac{\tilde{y}_1 - \tilde{y}_0}{\tilde{x}_1 - \tilde{x}_0} \\ \tilde{\phi}_2 + \tilde{\theta}_0 - \tan^{-1} \frac{\tilde{y}_2 - \tilde{y}_0}{\tilde{x}_2 - \tilde{x}_0} \end{pmatrix} \quad (8)$$

であり, $\mathbf{A} \in R^{6 \times 4}$, $\mathbf{K}_1 \in R^{6 \times 8}$, $\mathbf{K}_2 \in R^{6 \times 3}$ は係数行列である. また観測値の誤差を表す $\mathbf{L}$ のすべての要素が 0 である場合を考えると, 式 (7) の右辺の二乗平均, すなわち誤差分散行列は,

$$\mathbf{\Sigma}_L = \mathbf{K}_1 \mathbf{\Sigma} \mathbf{K}_1^T + \mathbf{K}_2 \mathbf{\Sigma}_\Theta \mathbf{K}_2^T \quad (9)$$

と求められる. ただし $\mathbf{\Sigma}$ はロボット 1, 2 の誤差分散行列, および 1, 2 間の誤差相関行列からなる行列

$$\mathbf{\Sigma} = \begin{pmatrix} \mathbf{\Sigma}_{11} & \mathbf{\Sigma}_{12} \\ \mathbf{\Sigma}_{21} & \mathbf{\Sigma}_{22} \end{pmatrix} \quad (10)$$

また $\mathbf{\Sigma}_\Theta$ は

$$\mathbf{\Sigma}_\Theta = \text{diag}(\sigma_r^2 \ \sigma_\phi^2 \ \sigma_\psi^2) \quad (11)$$

であり, σ_r^2 , σ_ϕ^2 , σ_ψ^2 はそれぞれ距離, 方位角, 仰角の測定誤差の分散値である. ただし, この測定誤差は各観測で独立に得られ, $\mathbf{X}_{1,2}$ と $\mathbf{\Theta}$ には相関がないことに注意する.

さて, 式 (7) を解いて解 $\mathbf{X}_0$ を求めたいが, 係数行列 $\mathbf{A}$ は正方行列ではないため, ここでは重み付き最小二乗法により解 $\mathbf{X}_0$ を求める. すなわち, まず残差方程式

$$\mathbf{V} = \mathbf{L} - \mathbf{A}\mathbf{X}_0 \quad (12)$$

を考え, この $\mathbf{\Sigma}_L^{-1}$ で重みづけられた残差二乗和

$$\min \mathbf{V}^T \mathbf{\Sigma}_L^{-1} \mathbf{V} \quad (13)$$

を最小化する $\mathbf{X}_0$ を求める. 式 (13) に式 (9), (12) を代入し $\mathbf{X}_0$ で微分すると, 残差二乗和を最小にするロボット 0 の位置偏差 $\mathbf{X}_0$ は

$$\mathbf{X}_0 = (\mathbf{A}^T \mathbf{\Sigma}_L^{-1} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{\Sigma}_L^{-1} \mathbf{L} = \mathbf{B}\mathbf{L} \quad (14)$$

と求まる. またこのときのロボット 0 の位置姿勢に対する誤差分散行列は, 式 (14) より

$$\mathbf{\Sigma}_0 = \mathbf{B}\mathbf{\Sigma}_L \mathbf{B}^T = (\mathbf{A}^T \mathbf{\Sigma}_L^{-1} \mathbf{A})^{-1} \quad (15)$$

与えられ, 同様にロボット 0, 1, ロボット 0, 2 間の誤差共分散は

$$(\mathbf{\Sigma}_{01}, \mathbf{\Sigma}_{02}) = \mathbf{B}\mathbf{K}_1 \mathbf{\Sigma} \quad (16)$$

となる.

また子ロボット i が移動静止し, 親ロボットにより位置を同

定する場合 (Fig. 1 (2), (3)) を考える. このとき子ロボットの位置は,

$$x_i = x_0 + r_i \cos \phi_i \cos \psi_i \quad (17)$$

$$y_i = y_0 + r_i \sin \phi_i \cos \psi_i \quad (18)$$

$$z_i = z_0 + r_i \sin \psi_i \quad (19)$$

となるが, $x_i = \tilde{x}_i + dx_i$ 等とおき Taylor 展開すると,

$$\mathbf{X}_i = \mathbf{L}_i + \mathbf{X}_0 + \mathbf{K}_{2,i} \boldsymbol{\Theta} \quad (20)$$

が得られる. ただし, $\mathbf{X}_i = (dx_i \ dy_i \ dz_i \ d\theta_i)^T$,

$$\mathbf{L}_i = \begin{pmatrix} \tilde{x}_0 + \tilde{r}_i \cos \tilde{\phi}_i \cos \tilde{\psi}_i - \tilde{x}_i \\ \tilde{y}_0 + \tilde{r}_i \sin \tilde{\phi}_i \cos \tilde{\psi}_i - \tilde{y}_i \\ \tilde{z}_0 + \tilde{r}_i \sin \tilde{\psi}_i - \tilde{z}_i \end{pmatrix} \quad (21)$$

である. したがって子ロボット i の位置偏差, 誤差分散行列, 誤差相関行列は,

$$\mathbf{X}_i = \mathbf{L}_i \quad (22)$$

$$\boldsymbol{\Sigma}_{ii} = \boldsymbol{\Sigma}_0 + \mathbf{K}_{2,i} \boldsymbol{\Sigma}_{\Theta} \mathbf{K}_{2,i}^T \quad (23)$$

$$\boldsymbol{\Sigma}_{0i} = \boldsymbol{\Sigma}_{ij} = \boldsymbol{\Sigma}_0 \quad (24)$$

で与えられる. よって具体的には, まずロボット i の位置姿勢を適当な $\tilde{\mathbf{P}}_i$ と仮定して式 (14), (22) から $\mathbf{X}_i$ を求め, これらが十分に小さくなるまで $\tilde{\mathbf{P}}_i \leftarrow \tilde{\mathbf{P}}_i + \mathbf{X}_i$ として計算を繰り返せばよい. また CPS で計測を繰り返した後のロボットの位置同定精度は, 各ロボットの移動ごとに移動したロボットの種類に応じて式 (15), (16) で与えられる誤差分散行列, 誤差相関行列を順次計算することで導出できる.

一例として, 次章で紹介する測量用トータルステーションの測定誤差の実測値 ($\sigma_r = 3$ [mm], $\sigma_\phi = 5$ [s], $\sigma_\psi = 5$ [s]) を代入し, 10 [m] ずつ 100 回直線的に移動した場合の 1 [km] 移動後の位置同定精度を計算したところ, 親ロボットの誤差分散行列 $\boldsymbol{\Sigma}_0$ の位置成分について, $\sigma_x^2 + \sigma_y^2 = 0.0203$ [m²] という結果が得られた. 実際には次章の実験で示すように, 本体姿勢傾斜角の測定誤差やコーナキューブ中心のずれなどによりこれほど高い精度は得られないが, 機械モデルを用いたこれまでの実験から, 従来の車輪回転角度を積分するデッドレコニング法とは比較にならない高精度な位置同定が可能であることが確認されている [12].

3. 群ロボットを用いた三次元環境地図作成システム

3.1 CPS を用いた SLAM の実現 (CPS SLAM)

ロボットが位置同定を行いながら, 同時に環境地図を作成する手法は SLAM (Simultaneous Localization And Mapping) と呼ばれ, 移動ロボット分野で盛んに研究が行われている [13]~[15].

これまでに提案した CPS は未知の三次元環境でも高精度な位置同定が実現できることから, ロボットに周囲環境測定用センサを搭載し, 移動と同時に環境地図を作成することで, 未知環境においても高精度な SLAM が実現できる. 我々は, これま

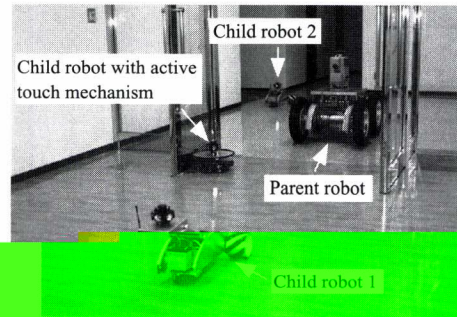


Fig. 4 CPS SLAM with active touch robot

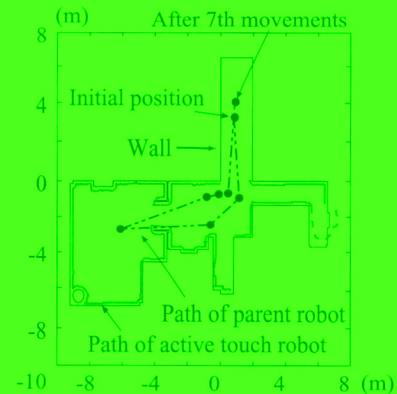


Fig. 5 Obtained floor map

で CPS とアクティブタッチ型移動ロボットを組み合わせた SLAM システムを提案した [10] (Fig. 4). このシステムは, 壁に接触しながらセンサレスで移動するアクティブタッチロボットを, CPS ロボットに搭載したレーザ距離計測装置により測定することで, アクティブタッチロボットの軌跡, すなわち未知環境での壁や柱の二次元配置を自動獲得するものである. しかし, このシステムでは, Fig. 5 のようにアクティブタッチロボットが接触したある一定の高さの壁や柱の地図が正確に得られるものの, 壁の高さなど, その他の三次元情報は得られなかった. そこで本章では, このアクティブタッチ型 CPS SLAM を拡張し, アクティブタッチロボットの代わりに非接触レーザ計測装置を用いることで, より広範囲の三次元環境情報を得ることができる新たな CPS SLAM を提案する. 本システムでは, 移動ロボットがレーザ計測を繰り返しながら大規模建造物の周囲を巡回し, その計測位置を CPS により正確に測定することで, ICP 法などの後処理も用いなくても大規模建造物の全体像を精度良く求めることができる. 以降では, まずレーザ計測装置を搭載した CPS 機械モデル CPS-V を紹介し, 次に CPS-V を用いた屋内外環境地図作成実験の結果を示す.

3.2 第 5 次 CPS 機械モデル CPS-V

Fig. 6 に二次元レーザレンジファインダを搭載した第 5 次 CPS 機械モデル CPS-V を示す. このシステムは, 1 台の親ロボット (P-cle, Parent mobile unit, Fig. 7) と 2 台の子ロボット (HPI Japan 製, Fig. 8) からなる. 親ロボットは二次元レーザレンジファインダ (LMS 200, Sick) 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 (AP-L1, TOPCON Ltd., Table 1), および重力方向に対する本体の

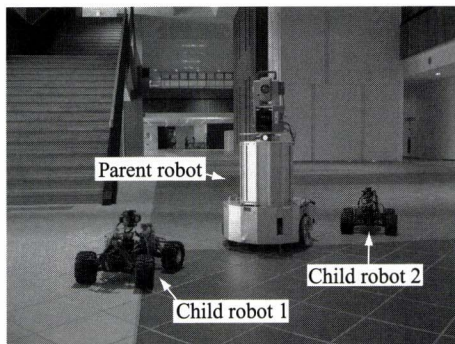


Fig. 6 Fifth CPS machine model, CPS-V

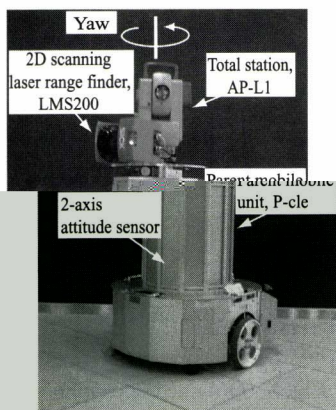


Fig. 7 3D laser measurement system using rotation table around yaw axis

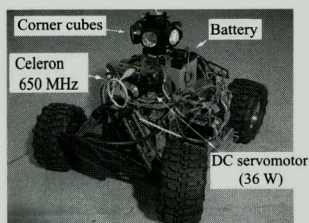


Fig. 8 Child robot

Table 1 Specification of total station, AP-L1

AP-L1 (TOPCON Ltd.)	
Range	4~400[m]
Resolution (distance)	0.2[mm]
Resolution (angle)	5"
Precision (distance)	$\pm 3 + 2\text{ppm[mm]}$
Precision (angle)	$\pm 5''$

Table 2 Specification of laser range finder, LMS200

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

傾きを測定するための2軸姿勢センサ (MD900-TS, Applied Geomechanics Inc.) を搭載している。この二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 80 [m], 角度 180° の範囲で得ることができる (Table 2)。また、親ロボッ

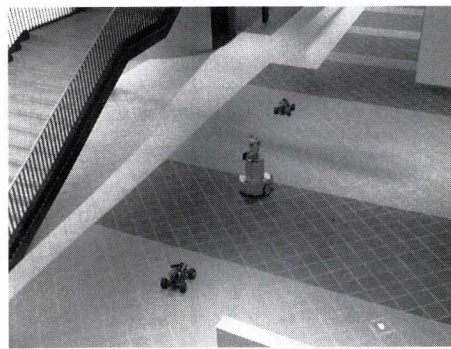


Fig. 9 Indoor experiment using CPS-V

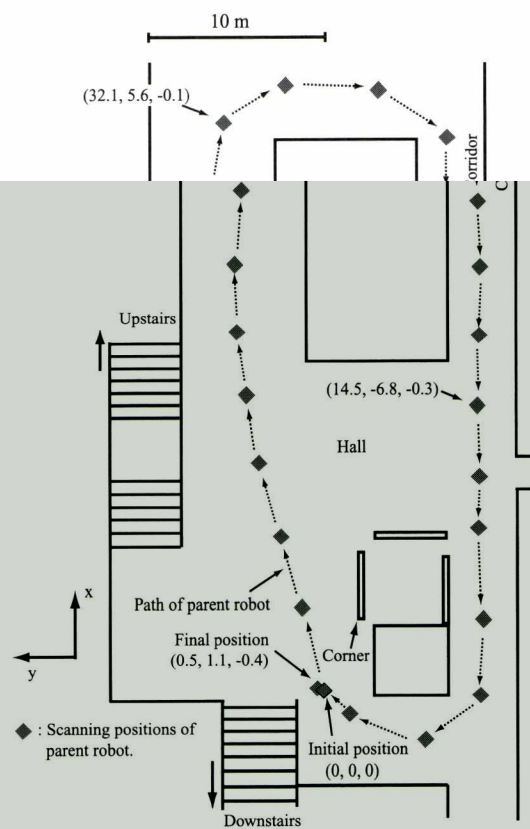


Fig. 10 Path of parent robot

トは、本体上部に搭載した回転テーブルを垂直軸 (yaw 軸) 周りに回転させ、回転を行いながら二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、ロボット全周囲の三次元距離データを得ることができる (Fig. 7)。なお、1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。この三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、未知環境においても高精度な三次元環境地図を作成する。

3.3 屋内環境地図作成実験

構築した第5次 CPS 機械モデル CPS-V を用い、屋内空間における三次元環境地図の構築実験を行った。

実験では各ロボットを 1 回約 4 [m] ずつ移動させ (Fig. 9)、親ロボットが静止した地点で親ロボットに搭載した回転ステー

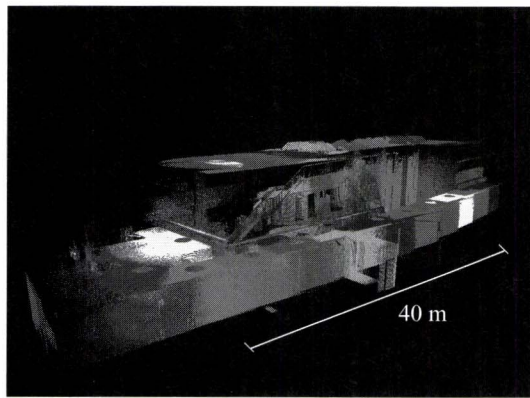


Fig. 11 Obtained 3D map of indoor environment

ジを垂直軸周りに回転させてレーザレンジファインダにより計測し、得られた三次元距離データから環境構造を測定した。

親ロボットの移動軌跡を Fig. 10 に示す。親ロボットは最大で、x 軸方向に 39 [m]、y 軸方向に 10 [m] 移動し、2 台の子ロボットは、親ロボットの次の環境計測予定地点、および前回環境計測を行った地点でそれぞれ停止させた。また、実験の結果得られた三次元地図を Fig. 11, 12 に示す。それぞれの図中の三次元地図内に開いた穴は、親ロボットが環境計測を行った位置を表しており、親ロボットは移動中にレーザによる環境計測を 23 回行った。また、Fig. 12 (a2), (b2) は点で、Fig. 12 (c2) は得られた点データに三角パッチを貼り、面で表示している。実験の結果、異なる地点において取得した三次元点データを、CPS によって同定された位置情報のみを用いて位置合わせすることで、ICP 法等の後処理をまったく用いることなく三次元環境地図が生成できることが確認できた。なお、本実験の結果得られた CPS の位置同定誤差は、親ロボットの総移動距離 86.21 [m] に対して 1.25 [m] (総移動距離の 1.45%)、また yaw 軸周りの角度誤差は 4.2° であり、この誤差は第 2.1 節で示した従来の CPS による位置同定精度 [9] に比べて著しく大きくなった。このため、例えば Fig. 10 中に示す Corner において、第 1 回目の観測結果と第 23 回目の観測結果を比較した場合、Fig. 13 (a) に示すように 1.17 [m] のずれが生じている。

本実験におけるこのような大きな誤差蓄積の主な原因として、

- (1) 位置同定用レーザレンジファインダの誤差特性
- (2) 移動に伴う CPS 動作の反復回数

の二つが考えられる。(1) はロボット間の距離測定時に発生する誤差である。トータルステーション (Table 1) の測定誤差の特性として、測定対象までの距離が 5 [m] 以下の場合、測距誤差は急激に増加することが分かっている [12]。本実験では、子ロボットと親ロボットの相対距離を約 4 [m] に保って移動させたため、測定誤差が特に大きかったと考えられる。また (2) については、22 回の CPS 動作を繰り返したために、誤差が大きく蓄積したことが考えられる。CPS はデッドレコニング等と比べれば誤差の蓄積は小さいものの、高精度な位置同定には、できる限り少ない CPS 動作回数での移動が望ましい。一方で、密な三次元環境地図の構築にはできるだけ多くの観測が必要である。ところが、CPS の特性の一つに、ロボットが次の位置同定

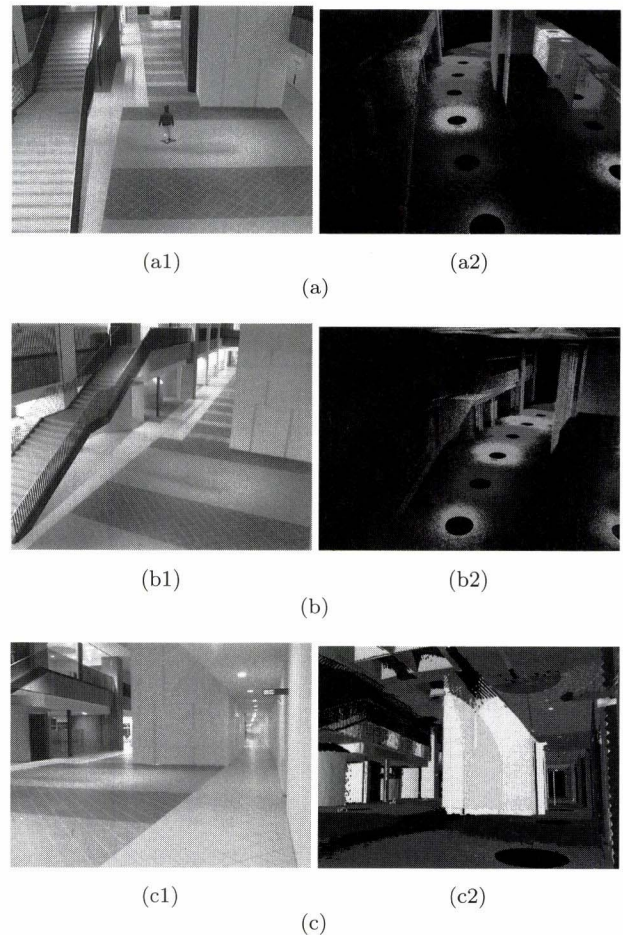


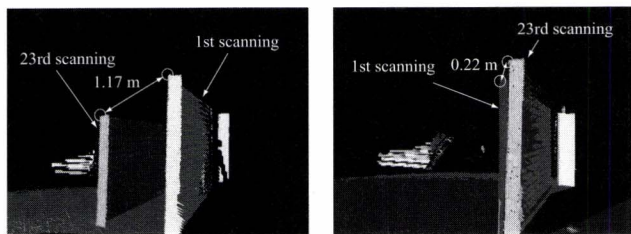
Fig. 12 Obtained 3D map of indoor environment

目標地点までの移動中に何か作業を行ったり、障害物と衝突したとしても、CPS による位置同定精度には何ら影響がないことがある [8]。本システムにおいては、親ロボットの位置同定精度は子ロボットの移動回数に大きく依存することから、子ロボットをできる限り動かさないように広範囲に散らばって静止させ、親ロボットだけが短い移動と子ロボットの観測による位置同定、レーザによる環境計測を繰り返すことで、前述の実験よりも高精度な環境地図の生成が可能であると考えられる。

この手法の精度検証のため、親ロボットの移動経路は前述の実験と同様とし、子ロボットはできるだけ少ない移動回数となるように移動させて、同様に環境地図を生成した。親ロボットの移動軌跡を Fig. 14 に示す。実験では、親ロボットの移動回数 22 回に対し、それぞれの子ロボットの移動回数は 5 回とした。実験の結果得られた CPS の位置同定誤差は、親ロボットの総移動距離 93.9 [m] に対して 0.22 [m] (総移動距離の 0.24%)、yaw 軸周りの角度誤差は 1.5° であった。また Fig. 14 中に示す Corner の移動前後の位置を比較した結果、Fig. 13 (b) に示すように誤差は 0.22 [m] となり、Fig. 13 (a) と比較して格段に精度が向上したことが確認できた。

3.4 大規模建造物の三次元形状計測実験

次に屋外環境において建造物の三次元形状計測実験を行った。計測は屋外 13 地点から行い、建造物側面の三次元形状を計測



(a) Child robot moves 22 times (b) Child robot moves 5 times

Fig. 13 Comparison of modeling errors

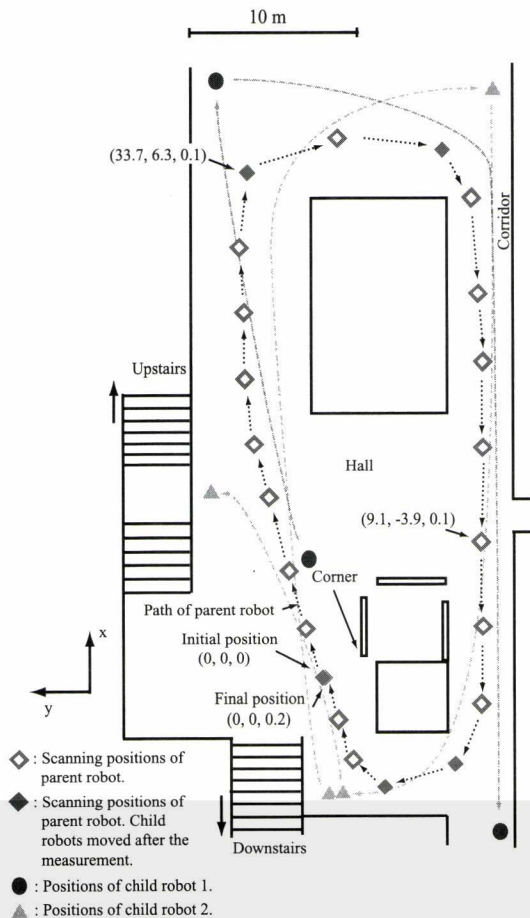


Fig. 14 Path of parent robot (each child robot moves 5 times)

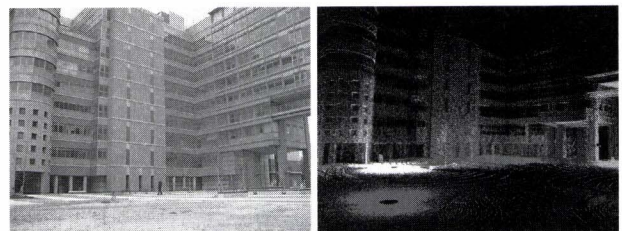
した。計測結果を Fig. 15, 16 に、親ロボットの移動軌跡を Fig. 17 に示す。本実験における位置同定誤差は、親ロボットの総移動距離 147.7 [m] に対して 0.63 [m] (総移動距離の 0.43%), yaw 軸周りの角度誤差は 0.9° であった。実験の結果、従来のように ICP 法を適用するために点データの分布が十分に重なるように測定しなくても、単純な形状の計測対象に対しては少ない計測回数で三次元環境構造が得られることが確認された。

3.5 起伏のある屋外環境における三次元計測実験

次に、高低差約 3 [m] の起伏のある屋外環境で実験を行った (Fig. 18)。実験結果を Fig. 19 に示す。親ロボットは Fig. 20 に示す軌跡で移動した。親ロボットは 2 軸姿勢センサを搭載しており、傾いた地形でも本体姿勢を補正することで、子ロボットの計測やレーザ計測が可能である。環境における位置同定誤



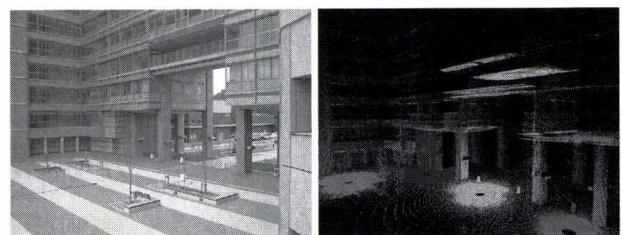
Fig. 15 Total view of 3D map in outdoor environment



(a1)

(a)

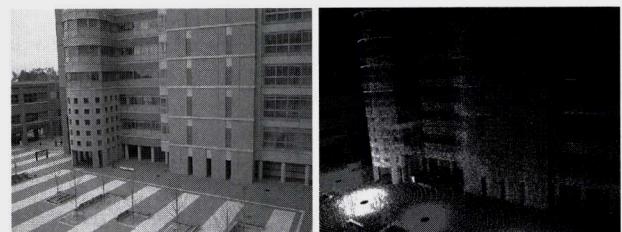
(a2)



(b1)

(b)

(b2)



(c1)

(c)

(c2)

Fig. 16 3D map of buildings in outdoor environment

差は、親ロボットの総移動距離 130.6 [m] に対して 0.80 [m] (総移動距離の 0.61%), yaw 軸周りの角度誤差は 0.7° であった。このように起伏のある屋外環境においても、屋内環境と同様に本システムが有効であることが確認できた。

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口

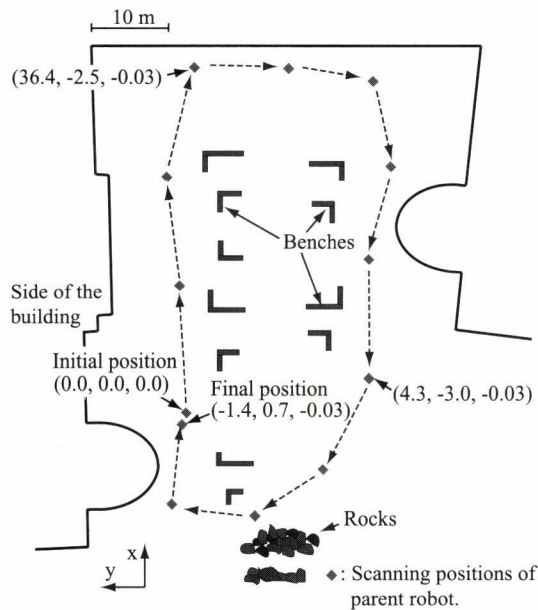


Fig. 17 Path of parent robot

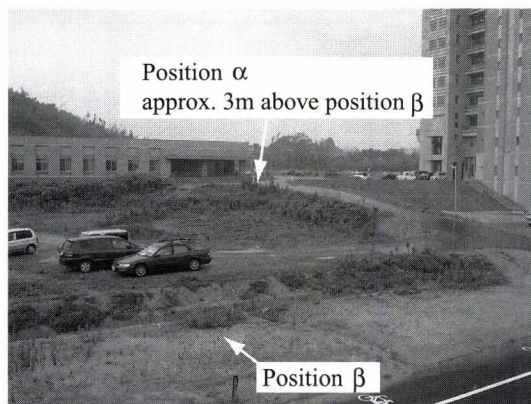


Fig. 18 Outdoor environment with slopes

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、大規模環境においても高精度な環境地図を作成するシステム “CPS SLAM” を提案した。また新たに構築した CPS 機械モデル CPS-V を用いて、屋内および屋外環境において大規模建造物に対する三次元環境地図の作成実験を行い、異なる地点で計測した三次元点データを、CPS によって同定された位置情報のみを用いて位置合わせすることで、ICP 法等の後処理をまったく用いることなく三次元環境地図が生成できることを確認した。また、CPS 動作回数が環境地図の精度に影響することを確認し、ロボット群の移動形態の工夫により、高精度な三次元環境地図が構築できることを示した。さらに、起伏のある屋外環境においても本システムが有効であることを実験により確認した。

本システムは ICP 法などの後処理や密な測定が必ずしも必要ないことから、歴史遺産など大規模建造物の高精度三次元レーザ計測を高速かつ完全に自動化できる可能性がある。今後は、現在はオペレータの指示により行われている計測地点の選択と群

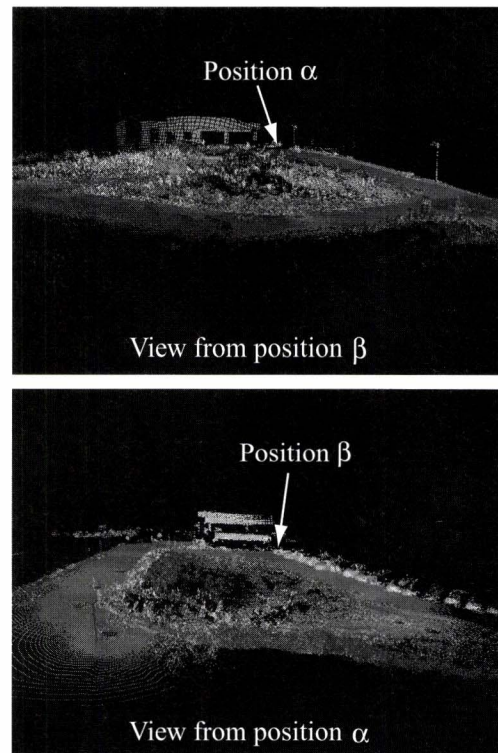


Fig. 19 3D map of outdoor environment with slopes

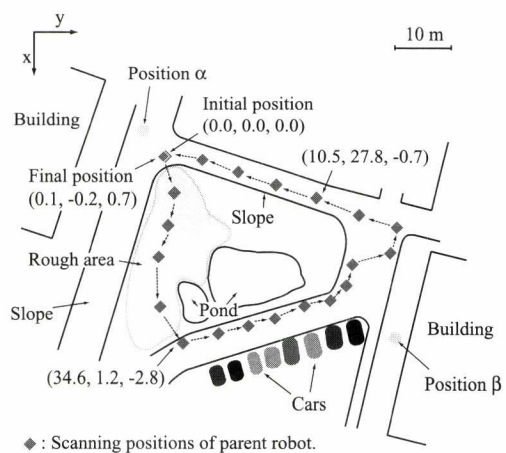


Fig. 20 Path of parent robot

ロボットの移動、実際のレーザ計測作業を自動化したシステムの開発を目指すとともに、状況に応じて ICP 法と組み合わせて蓄積誤差を補正することで、移動ロボット群の位置同定精度および三次元環境地図の高精度化を図る。また、観測された複数距離データの統合処理により、ロボットが利用しやすい環境地図の作成手法についても検討する。

謝 辞 本研究の一部は、文部科学省科研費補助金基盤 B「ロボット群と環境固定センサ群の相互支援による人間・ロボット共生環境の情報構造化 (18360124)」および「5 感センサネットワークによる被災建造物内 RT システムの開発 (19360119)」の助成を受けて行われました。

参 考 文 献

- [1] K. Ikeuchi, K. Hasegawa, A. Nakazawa, J. Takamatsu, T. Oishi and T. Masuda: "Bayon Digital Archival Project," Proceedings of the Tenth International Conference on Virtual System and Multimedia, pp.334-343, 2004.
- [2] 凸版印刷株式会社:凸版印刷 VR システム, <http://biz.toppan.co.jp/vr/>
- [3] M. Levoy, K. Pulli, B. Curless, S. Rusinkiewicz, D. Koller, L. Pereira, M. Ginzton, S. Anderson, J. Davis, J. Ginsberg, J. Shade and D. Fulk: "The Digital Michelangelo Project: 3D Scanning of Large Statues," Proceedings of ACM SIGGRAPH 2000, pp.131-144, 2000.
- [4] P.J. Besl and N.D. McKay: "A method for registration of 3-D shapes," IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell., vol.14, no.2, pp.239-256, 1992.
- [5] Y. Chen and G. Medioni: "Object modelling by registration of multiple range images," Image and Vision Computing, vol.10, no.3, pp.145-155, 1992.
- [6] H. Zhao and 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.
- [7] K. Ohno, T. Tsubouchi and S. Yuta: "Outdoor Map Building Based on Odometry and RTK-GPS Positioning Fusion," Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.684-690, 2004.
- [8] 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, 1995.
- [9] 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, 1998.
- [10] 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, 1999.
- [11] 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, 2006.
- [12] 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, 1997.
- [13] A. Nuchter and H. Surmann: "6D SLAM with an Application in Autonomous Mine Mapping," Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.1998-2003, 2004.
- [14] J. Weingarten and R. Siegwart: "EKF-based 3D SLAM for Structured Environment Reconstruction," Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and System, pp.2089-2094, 2005.
- [15] D.M. Cole and P.M. Newman: "Using Laser Range Data for 3D SLAM in Outdoor Environment," Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.1556-1563, 2006.



倉爪 亮 (Ryo Kurazume)

1967年2月4日生。1991年東京工業大学機械物理工学専攻修士課程修了。同年(株)富士通研究所入社, 1995年東京工業大学機械宇宙学科助手, 2000年スタンフォード大客員研究員, 同年東京大学生産技術研究所博士研究員, 2002年九州大学システム情報科学研究院助教授, 2007年より同教授, 現在に至る。群ロボット, 歩行機械, レーザ計測の研究に従事。博士(工学)。(日本ロボット学会正会員)



村上剛司 (Kouji Murakami)

1975年4月25日生。2004年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博士課程修了。同年より九州大学大学院システム情報科学研究院助手, 現在に至る。多関節多指ハンド, 感覚センシングの研究に従事。博士(工学)。(日本ロボット学会正会員)



戸畑享大 (Yukihiro Tobata)

1981年10月26日生。2005年防衛大学校情報工学科卒業。現在, 九州大学大学院システム情報科府知能システム学専攻修士課程在学中。CPS SLAMの研究に従事。(日本ロボット学会学生会員)



長谷川勉 (Tsutomu Hasegawa)

1950年2月18日生。1973年東京工業大学電子物理工学科卒業。同年電子技術総合研究所勤務。1992年より九州大学工学部情報工学科教授。現在同大学大学院システム情報科学研究院教授。知能ロボットの研究に従事。工学博士。計測自動制御学会, 電気学会, 日本機械学会などの会員。(日本ロボット学会正会員)