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

戸畑　享大†　　倉爪　亮†　　村上　剛司†　　長谷川　勉†

† 九州大学
〒 819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744 番地

あらまし　アンコール遺跡や紫禁城など，現存する大規模歴史的建造物を高精度レーザ計測し，正確な 3 次元形状をデジタルデータとして保存するプロジェクトが各地で進められている．通常，大規模建造物の全体モデルを得るには，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 3 次元点データを ICP 法などの後処理により位置合わせする手順が用いられる．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 3 次元点データがある程度正し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あわせを行う必要があり，また各計測地点で得られた 3 次元点データ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，レーザ計測装置の設置位置，計測方向を精度よく測定し，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 3 次元データ点を重ね合わせる手法が考えられる．本論文では，群ロボットシステムによる高精度位置同定手法と移動可能なレーザ計測装置を組み合わせ，ICP 法などの後処理や密な測定を必ずしも必要としない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を提案する．

キーワード　SLAM，3 次元計測，群ロボット，協調的位置同定，レーザレンジファインダ

3D laser measurement system for large scale architectures using multiple mobile robots

Yukihiro TOBATA†, Ryo KURAZUME†, Kouji MURAKAMI†, and Tsutomu HASEGAWA†

† Kyushu University
744, Motooka, Nishi-ku, Fukuoka, 819-0395, JAPAN

Abstract　In order to construct a 3 dimensional shape model of a large scale historical architecture such as Angkor or Tzuchingch'eng Palace by a laser range finder, a number of range images are normally taken from various viewpoints and these images are aligned using post-processing such as ICP algorithm. However, before applying the ICP algorithm, these range images have to be aligned roughly by a human operator in order to converge to the precise positions. In addition, range images must be overlapped sufficiently each other by taking dense images from close viewpoints. On the other hand, if poses of a sensor at viewpoints can be identified precisely, local range images are converted to the world coordinate system directly with simple transformation calculation. This paper proposes a new measurement system for a large scale architecture using a laser range finder, which needs no post-processing and can be applied to sparse range measurements by combining a precise positioning technique using multiple robots and an onboard laser range finder.

Key words　SLAM, 3D map, Multiple robot, Cooperative positioning, Laser range finder

1. はじめに

アンコール遺跡 [1] や紫禁城 [2]，ポンペイ遺跡など，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 3 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各地で進められている．通常，これら大規模建造物をレーザ計測する場合，一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 3 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 3 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

３次元点データがある程度正し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あ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３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，レーザ計測装置の設置位置，計測方向を精度よく測定し，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 3 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多く提案されている [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では用いることができない．

この問題に対し，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] を適用し，この手法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，ICP 法などの後処理や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計測の可能な，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を提案する．

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，姿勢がわかれば，それぞれの地点で得られた３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 3 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よく計測できれば，高低差を含む高精度な 3 次元位置同定が可能であるが，走行経路に予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り，未知未整備環境では使用できない．(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（Cooperative Positioning System, 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，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．本章では，この協調ポジショニングシステム（CPS）の原理と，これを用いた SLAM（Simultanious Localization And Mapping）の実例を紹介する．

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 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 [9]．

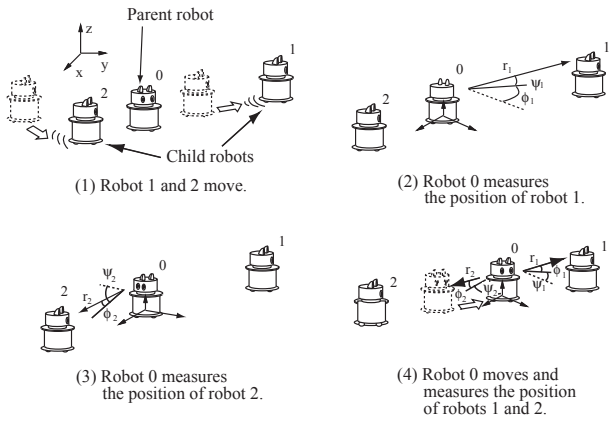


図 1 協調ポジショニングシステム (CPS)

Fig. 1 Cooperative Positioning System, CPS

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,

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

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

$$z_0 = z_1 - r_1 \sin \psi_1 \tag{3}$$

$$= z_2 - r_2 \sin \psi_2 \tag{4}$$

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

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

の 6 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 4 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．

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

ただし，$\mathbf{X}_0 = (dx_0\ dy_0\ dz_0\ d\theta_0)^T$,
$\mathbf{X}_{1,2} = (dx_1\ dy_1\ dz_1\ d\theta_1\ dx_2\ dy_2\ dz_2\ d\theta_2)^T$, $\mathbf{\Theta} = (dr\ d\phi\ d\psi)^T$,
$\mathbf{d}_i = \sqrt{(\tilde{x_0} - \tilde{x_i})^2 + (\tilde{y_0} - \tilde{y_i})^2}$

$$\mathbf{L} = \begin{pmatrix} \tilde{r_1}\cos\tilde{\psi_1} - d_1 \\ \tilde{r_2}\cos\tilde{\psi_2} - d_2 \\ \tilde{z_1} - \tilde{r_1}\sin\tilde{\psi_1} - \tilde{z_0} \\ \tilde{z_2} - \tilde{r_2}\sin\tilde{\psi_2} - \tilde{z_0} \\ \tilde{\phi_1} + \tilde{\theta_0} - \tan^{-1}\frac{\tilde{y_1} - \tilde{y_0}}{\tilde{x_1} - \tilde{x_0}} \\ \tilde{\phi_2} + \tilde{\theta_0} - \tan^{-1}\frac{\tilde{y_2} - \tilde{y_0}}{\tilde{x_2} - \tilde{x_0}} \end{pmatrix} \tag{8}$$

であり，$\mathbf{A} \in R^{6\times4}$, $\mathbf{K}_1 \in R^{6\times8}$, $\mathbf{K}_2 \in R^{6\times3}$ 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,

$$\mathbf{\Sigma}_L = \mathbf{K}_1\mathbf{\Sigma}_{1,2}\mathbf{K}_1^T + \mathbf{K}_2\mathbf{\Sigma}_\Theta\mathbf{K}_2^T \tag{9}$$

と求められる．ただし $\mathbf{\Sigma}_\Theta$ は

$$\mathbf{\Sigma}_\Theta = diag(\sigma_r^2\ \sigma_\phi^2\ \sigma_\psi^2) \tag{10}$$

であり，$\sigma_r^2, \sigma_\phi^2, \sigma_\psi^2$ 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

$$\mathbf{V} = \mathbf{L} - \mathbf{A}\mathbf{X}_0 \tag{11}$$

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

$$\min \mathbf{V}^T\mathbf{\Sigma}_L^{-1}\mathbf{V} \tag{12}$$

を最小化する $\mathbf{X}_0$ を求める．式 (12) に式 (9),(11) を代入し $\mathbf{X}_0$ で微分すると，残差 2 乗和を最小にするロボット 0 の位置偏差 $\mathbf{X}_0$ は

$$\mathbf{X}_0 = (\mathbf{A}^T\mathbf{\Sigma}_L^{-1}\mathbf{A})^{-1}\mathbf{A}^T\mathbf{\Sigma}_L^{-1}\mathbf{L} = \mathbf{B}\mathbf{L} \tag{13}$$

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 (13) より

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

で与えられ，同様にロボット 0,1，ロボット 0,2 間の誤差共分散は

$$(\mathbf{\Sigma}_{01}, \mathbf{\Sigma}_{02}) = \mathbf{B}\mathbf{K}_1\mathbf{\Sigma} \tag{15}$$

となる．ただし $\mathbf{\Sigma}$ はロボット 1,2 の誤差分散行列，及び 1,2 間の誤差相関行列からなる行列

$$\mathbf{\Sigma} = \begin{pmatrix} \mathbf{\Sigma}_{11} & \mathbf{\Sigma}_{12} \\ \mathbf{\Sigma}_{21} & \mathbf{\Sigma}_{22} \end{pmatrix} \tag{16}$$

である．

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,

$$x_i = x_0 + r_i \cos\phi_i \cos\psi_i \tag{17}$$

$$y_i = y_0 + r_i \sin\phi_i \cos\psi_i \tag{18}$$

$$z_i = z_0 + r_i \sin\psi_i \tag{19}$$

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

$$\mathbf{X}_i = \mathbf{L}_i + \mathbf{X}_0 + \mathbf{K}_{2,i}\mathbf{\Theta} \tag{20}$$

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

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

である．従って子ロボット i の位置偏差，誤差分散行列，誤差相関行列は,

$$\mathbf{X}_i = \mathbf{L}_i \tag{22}$$

$$\mathbf{\Sigma}_{ii} = \mathbf{\Sigma}_0 + \mathbf{K}_{2,i}\mathbf{\Sigma}_{\Theta_i}\mathbf{K}_{2,i}^T \tag{23}$$

$$\mathbf{\Sigma}_{0i} = \mathbf{\Sigma}_{ij} = \mathbf{\Sigma}_0 \tag{24}$$

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 (13),(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，各ロボットの移動毎に移動したロボットの種類に応じて式 (14),(15) 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 ($\sigma_r = 3[mm], \sigma_\phi = 5[sec.], \sigma_\psi = 5[sec.]$) を代入し，10m ずつ 100 回直線的に移動した場合の 1Km 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 $\mathbf{\Sigma}_0$ の位置成分について，$\sigma_x^2 + \sigma_y^2 = 0.0203[m^2]$ 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].

2.3 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 （Simultanious 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], [14], [15].

提案した CPS は未知の 3 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することで，未知環境に高精度な SLAM が実現できる．我々は，これまでに 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.2）．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 2 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.3 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 3 次元情報は得られなかった．本論文で提案するシステムは，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ものであり，より広範囲の 3 次元環境情報を得ることができる．

3. 群ロボットを用いた 3 次元環境地図作成システム

本章では，前章で示した協調ポジショニングシステム (CPS) とレーザ計測装置を組み合わせ，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システムを提案する．本章では，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．

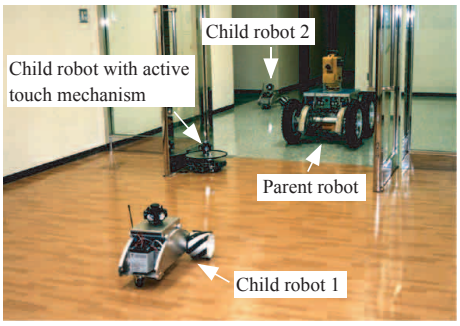


図 2　アクティブタッチ型 CPS SLAM
Fig. 2　Active touch CPS SLAM system

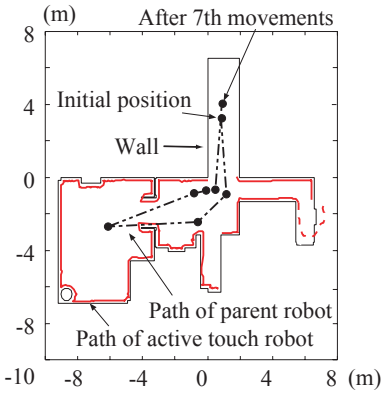


図 3　得られた壁面配置図
Fig. 3　Obtained environmental map

3.1 第 5 次 CPS 機械モデル CPS-V

Fig.4 に 2 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.6) と 2 台の子ロボット (HPI Japan 製, Fig.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) 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) 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，角度 180 °の範囲で得ることができる (Table 2)．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 (Fig.6)．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，未知環境においても高精度な 3 次元環境地図を作成する．

3.2 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 3 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ずつ交互に移動させ (Fig.7)，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 3 次元距離データから環境構造を測定した．

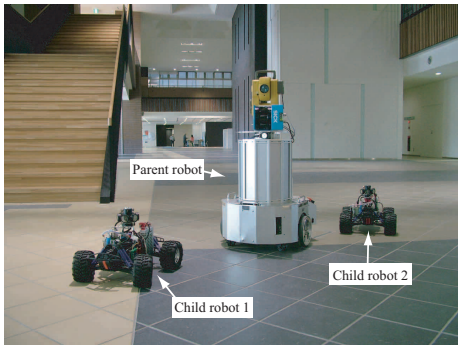


図 4　第 5 次 CPS 機械モデル CPS-V
Fig. 4　5th CPS machine model, CPS-V

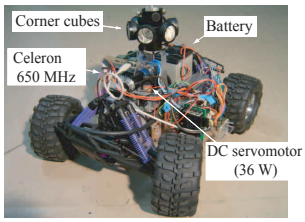


図 5　子ロボット
Fig. 5　Child robot

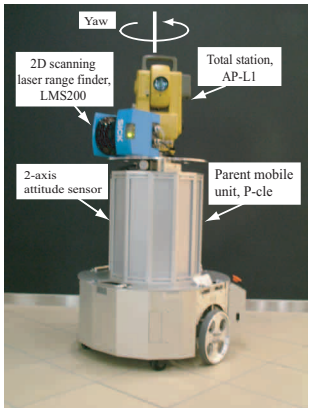


図 6　親ロボット搭載の Yaw 軸回転ステージを利用した 3 次元レーザ計測
Fig. 6　3D laser measurement using rotation table around Yaw axis

AP-L1 (TOPCON Ltd.)	
Range	4〜400[m]
Resolution (distance)	0.2[mm]
Resolution (angle)	5 ″
Precision (distance)	± 3 + 2ppm[mm]
Precision (angle)	± 5 ″

表 1　トータルステーション AP-L1
Table 1　Specification of total station, AP-L1

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

表 2　レーザレンジファインダ LMS200
Table 2　Specification of laser range finder, LMS200

図 7　群ロボットを用いた 3 次元レーザ計測実験
Fig. 7　3D laser measurement using multiple robots

親ロボットの移動軌跡を Fig.8 に示す．親ロボットは最大で，x 軸方向に 39m，y 軸方向に 10m 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，及び前回環境計測を行な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 3 次元地図を Figs.9,10 に示す．それぞれの図中の 3 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，親ロボットはこれらの地点から移動中にレーザによる環境計測を 23 回行った．a2 と b2 は点で，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 3 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 法等の後処理を全く用いることなく 3 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 86.21m に対し，1.25m（総移動距離の 1.45%）であり，この誤差は第 2.1 章で示した従来の CPS による位置同定精度 [9] に比べて著しく大きい．このため，例えば Fig.8 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.12(a) に示すように 1.17m 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 2 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 5m 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 4m 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 3 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，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.11 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 93.9m に対して 0.22m（総移動距離の 0.24%）であった．また Fig.11 中に示す Corner の移動前後の位置を比較した結果，Fig.12(b) に示すように誤差は 0.22m となり，(a) と比較して格段に精度が向上したことが確認できた．

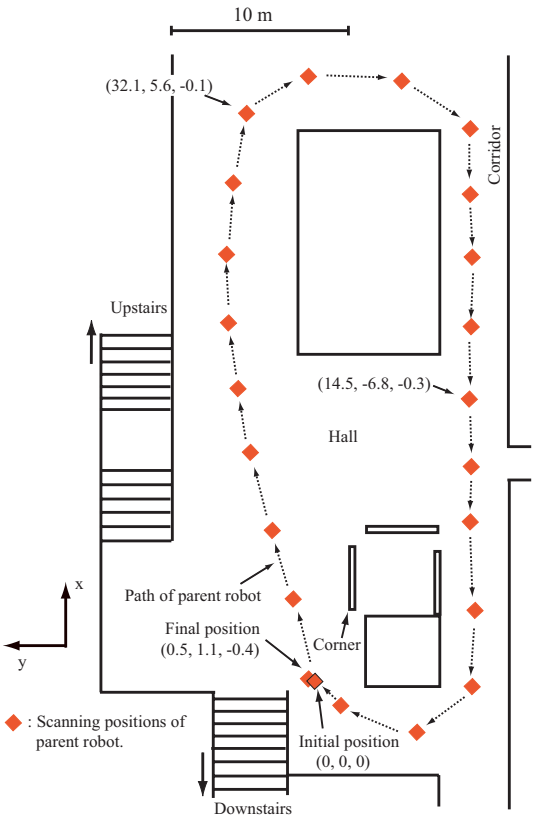


図 8　親ロボットの移動軌跡
Fig. 8　Path of parent robot

3.3　大規模建造物の 3 次元形状計測実験

次に同様に CPS-V を用い，屋外環境において建造物の 3 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 3 次元形状を計測した．親ロボットの移動軌跡を Fig.13 に，計測結果を Figs.14,15 に示す．このように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分かる．また，ICP 法を適用するために従来のよう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 3 次元環境構造を得ることができる．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，0.63m（総移動距離の 0.43%）であった．

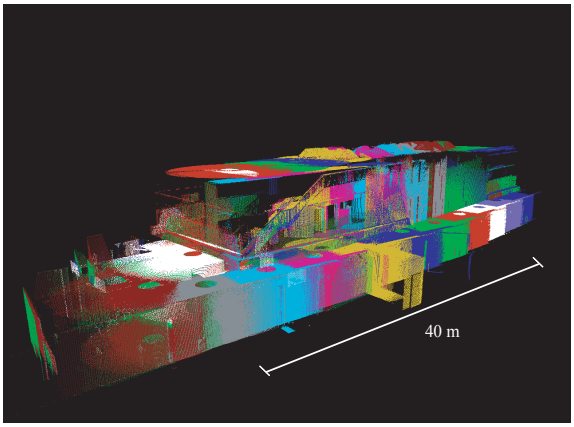


図 9　取得した 3 次元環境地図（全体図）
Fig. 9　Obtained 3D map

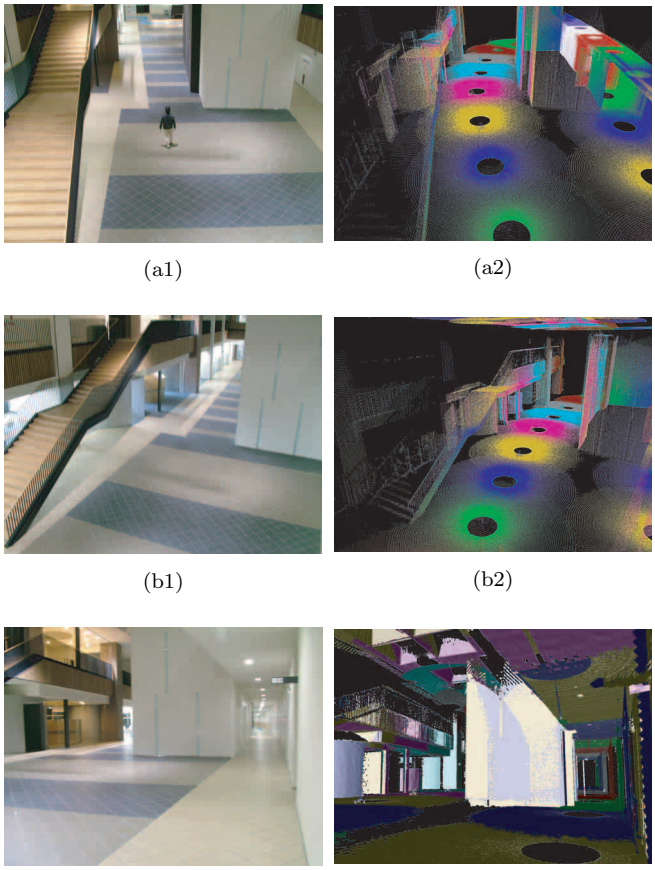


図 10　取得した 3 次元環境地図
Fig. 10　Obtained 3D map

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）と移動可能なレーザ計測装置を組み合わせ，ICP 法などの後処理を必要としない移動ロボット群による大規模 3 次元レーザ計測システムを提案した．本手法は ICP 法などの後処理や密な測定を必ずしも必

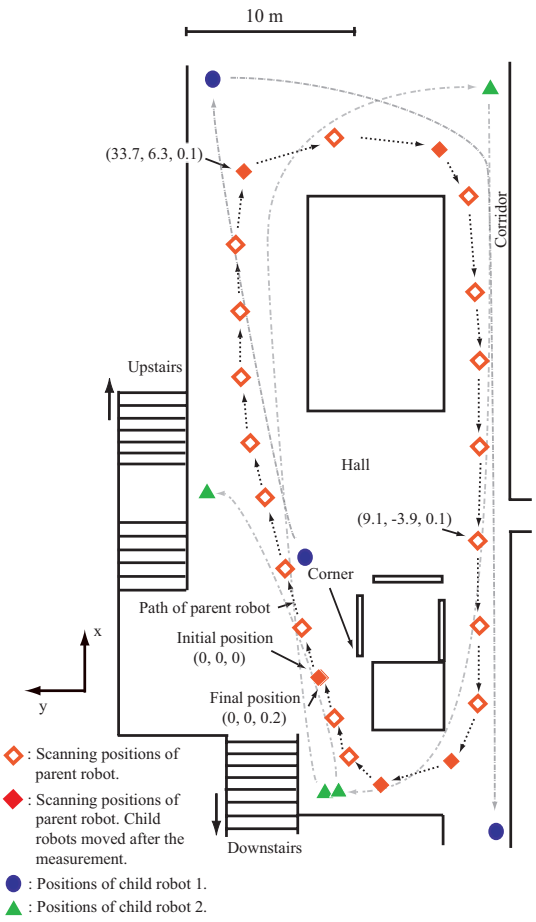
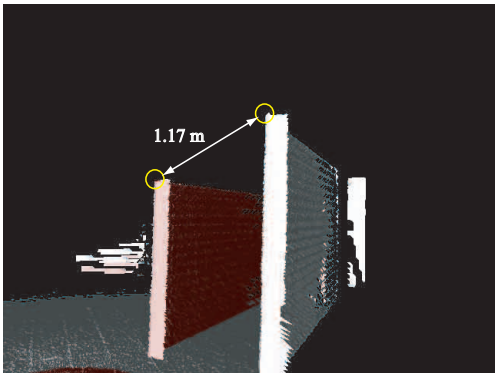
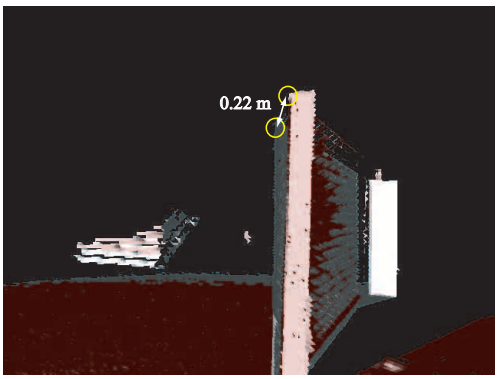


図 11　親ロボットの移動軌跡（子ロボットの移動回数が 5 回の場合）
Fig. 11　Path of parent robot (child robot moves 5 times)



(a)



(b)

図 12　精 度 検 証
Fig. 12　Accuracy validation

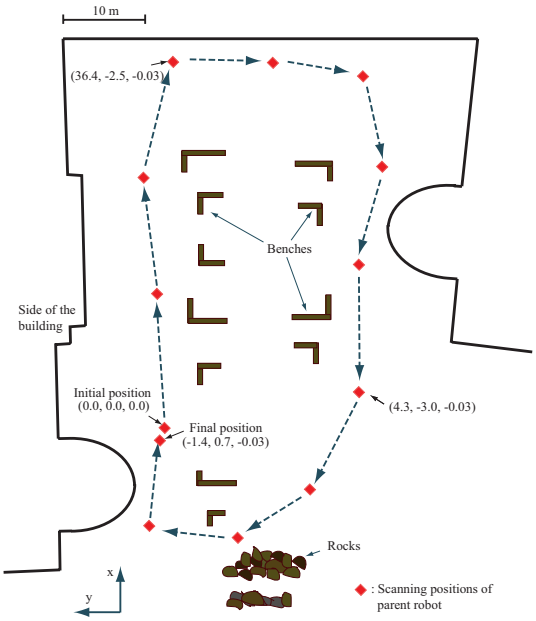


図 13　親ロボットの移動軌跡
Fig. 13　Path of parent robot

要としないことから，大規模建造物の 3 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．また屋内環境および屋外環境において建造物の 3 次元計測実験を行い，異なる地点において取得した 3 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 法等の後処理を全く用いることなく 3 次元環境地図が生成できることを確認した．

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 法と組み合わせることで，移動ロボット群の位置同定精度および 3 次元環境地図の高精度化を図る．

文　　献

[1] 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.

[2] “凸版印刷 VR システム ”, http://biz.toppan.co.jp/vr/

[3] 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

[4] 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.

[5] Y. Chen and G. Medioni, Object modelling by registration of multiple range images, Image and Vision Computing 10(3), 1992, 145-155.

[6] H. Zhao, R. Shibasaki, Reconstructing a textured CAD

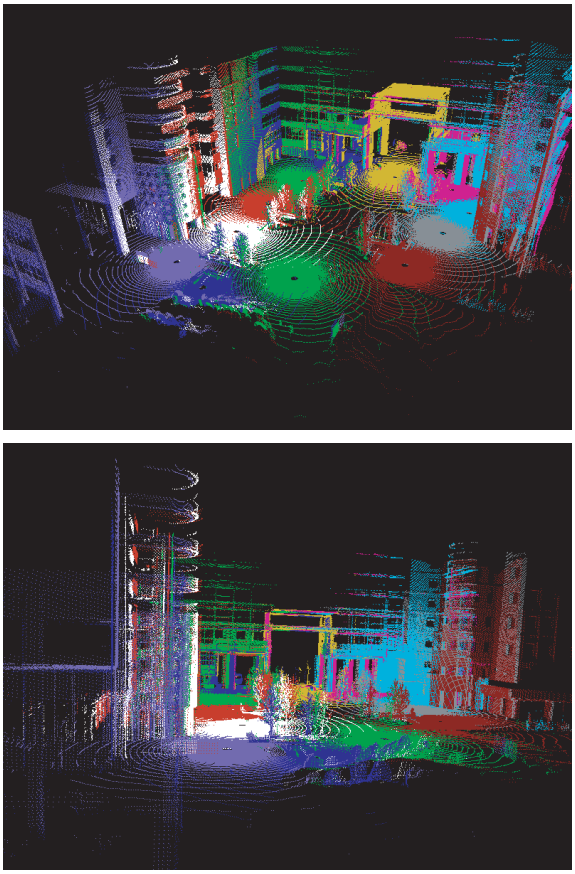
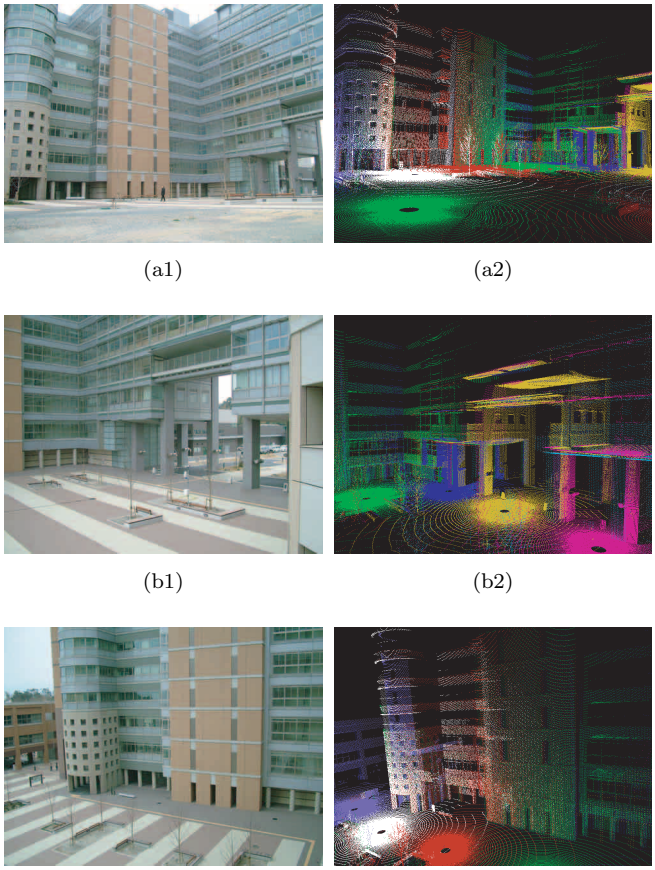


図 14　建造物の 3 次元形状
Fig. 14　3D shapes of buildings



(a1)　(a2)

(b1)　(b2)

(c1)　(c2)

図 15　建造物の 3 次元形状
Fig. 15　3D shapes of buildings

model of an urban environment using vehicle-borne lase range scanners and line cameras, Machine Vision and Applications, vol. 14, pp. 35-41, 2003.

[7] K. Ohno, T. Tsubouchi, S. Yuta, "Outdoor Map Building Based on Odometory and RTK-GPS Positioning Fusion," Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 684-690, New Orleans, LA, Apr. 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, Sep. 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, Oct. 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, Jan. 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, Sep. 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, July 1997.

[13] 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 .

[14] 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.

[15] 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.