

## 3次元空間における測域センサ群の自己位置推定法

吉貞 洸<sup>1</sup> 山田 遊馬<sup>1</sup> 廣森 聡仁<sup>1</sup> 山口 弘純<sup>1</sup> 東野 輝夫<sup>1</sup>

**概要：**レーザ測域センサー (LRS) はその測距性能の正確さと検出域の広さから、屋内空間の移動物体や人のトラッキングに用いられている。しかし、複数の LRS で死角を無くし広域をカバーする重複型の配置を行う場合には、LRS の相互位置をセンチオーダーで正しく設定する必要がある。本研究では、屋内の閉空間の壁面等に水平設置された複数の LRS を対象に、それらの位置関係を自動で推定する手法を提案する。提案手法では、多くが壁などの平面体で構成される屋内空間特性に着目し、各 LRS から得られる点群から平面体を捉えた直線成分を抽出し、その重ね合わせを用いて同一物体の認識と位置合わせを行う。これにより LRS の位置関係を推定するアルゴリズムを提案する。さらに、対象三次元空間内に任意の仰俯角で設置された複数 LRS の位置関係を推定する手法も提案する。具体的には、各 LRS から得られる点群データに対し、仰俯角情報を用いて水平面への射影を求めた後、上述の手法を用いて水平面上の位置関係を推定し、設置高と仰俯角を考慮して LRS の三次元位置関係を推定する。大阪大学情報科学研究科棟内において、LRS を用いて異なる 15 地点でデータを収集し、任意の二地点における点群データの組合わせを利用して LRS の位置推定を行った結果、最大誤差 10cm で LRS の位置関係を推定できることを示した。

## The Localization Method of Laser Range Scanners in 3-D Environment

Hikaru Yoshisada<sup>1</sup> Yuma Yamada<sup>1</sup> Akihito Hiromori<sup>1</sup> Hirozumi Yamaguchi<sup>1</sup> Teruo Higashino<sup>1</sup>

### 1. はじめに

近年のセンサ技術の発展に伴い、屋内環境における人の行動情報を活用した新しいサービスやシステムの開発が活発に行われている。商業施設やイベント会場、オフィスなど多数の人が集まり移動する閉空間において、人物の正確な位置情報を取得することにより、例えば近隣店舗のセール情報などをタイムリーに通知することなども可能となる。また、人々の位置情報を集約することで建物内での人の分布情報を把握し、スポット混雑解消のための適切な誘導や行動変容なども実現できる。また、そういった人分布情報をエネルギー管理システムと連携させることで、無駄のない快適な空調や照明の提供といったスマートビルディングサービスなどへの展開が期待される [1]。

端末の位置情報を取得する手段の一つとして、屋外ではスマートフォンや携帯電話に搭載した GPS が挙げられるが、屋内環境では GPS 衛星からの電波を受信することが

困難であり、正確な測位は期待できない。屋内では RFID タグ [2] や Bluetooth ビーコン、無線 LAN [3] などを用いることが一般的であるが、いずれも端末自身の位置情報取得を前提としており、不特定多数の人や群衆のトラッキング用途ではない。

そこで、近年ではレーザ測域センサー (LRS) による人の位置推定及び軌跡推定が注目を集めている。LRS は周囲の物体との距離を正確に測定することができるセンサであり、例えば、北陽電機株式会社製の LRS (UTM-30LX-EW) は検出保証距離 30m、走査角度 270 度、距測精度  $\pm 50\text{mm}$ 、走査時間 25ms/scan と、広範囲を高速かつ正確に計測することができる。また、LRS の計測データは LRS からの方角と距離で表される計測対象物の位置情報のみであり、顔や服装といった個人情報あるいはプライバシー情報を一切含まないため、プライバシー侵害リスクは極めて小さい。我々の研究グループは、水平に設置した複数の LRS を用いた歩行者の位置推定及び軌跡推定システム「ひとなび」を開発しており [4]、グランフロント大阪内の展示施設 The Lab. における 4 年以上の展示 [5] や情報とメディアアート

<sup>1</sup> 大阪大学大学院 情報科学研究科  
Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University



図 1 ひとなび

の世界最大の展示会 Ars Electronica 2015 への出展，海外企業の 1,000m<sup>2</sup> 超のオフィスへの導入や国内実店舗への導入等の実績がある（図 1）。また，LRS から得られる匿名軌跡とモバイル端末の WPAN 通信やモーションセンサを用いて，歩行者の端末特定ならびに軌跡推定を行う手法などを提案してきている [6, 7]。

ひとなびのような複数の LRS を利用した歩行者の位置推定手法においては，複数の LRS からの点群データ（計測データ）を統合するために LRS の相対位置および相対方位角（以降，LRS の位置関係と呼ぶ）を利用する。したがって，位置関係が把握できないかあるいは大きな誤差を含む場合，複数 LRS の計測データを同一座標系で正しく統合することができず，LRS の高い測距精度の影響によって歩行者の誤検出や移動軌跡の誤差を誘発する。また，LRS 設置においては，家具や壁，柱など様々な障害物を考慮し，歩行者の検出精度を向上させるために LRS の設置位置を都度調整することも多い。しかし，LRS の位置を調整するたびに LRS の位置関係を高精度に実測する必要があり，LRS の数や配置関係，配置変更頻度によって多大な労力を必要とする。

本研究では，これまでのひとなび開発と実システム導入にかかる経験から，センサー設置時のヒューマンエラーとコストが大きな障害となることを認識し，その自動化により省力化ならびにヒューマンエラーの排除を図る。具体的には，屋内の閉空間に水平に設置された複数の LRS の計測データを基にして，LRS の位置関係を自動で推定する手法を提案する。提案手法では，複数の LRS の計測データに含まれる共通物体を認識し，それを基準とした位置関係の推定を試みる。その共通物体として，一般の屋内空間に多く含まれる，壁や設置された棚など直線的な輪郭を形成する平面体を用いることが有効であるとの考えから，各 LRS の点群データから直線成分を抽出し，同一物体の推定と位置合わせを行うことで LRS の位置関係を推定する。

具体的には，対象屋内空間には壁や棚，パーティションなど床面に対して垂直な平面が多数存在し，壁同士は垂直あるいは平行の関係にあるという前提のもとで，まず，一台の LRS で得られた各角度への距離データを二次元水平面上の点群に変換し，得られた点群データに対して RANSAC（Random Sample Consensus）アルゴリズムを利用した手法を適用することで複数の二次元直線を推定する。推定した直線上に存在する連続した点の集合を線分として抽出し，他の LRS から同様に求めた線分群との一致率が高くなるような回転角と平行移動量を推定する。推定した位置関係を基にして座標統合した二つの点群データと，他の LRS の点群データとの間で位置推定を繰り返していくことで，空間内に存在する全ての LRS の位置関係を推定する。

なお，本研究では LRS が水平に設置されておらず，かつ床面からの設置高と仰俯角が既知である環境下において，三次元空間内に任意の仰俯角で設置された LRS の位置推定手法も提案している。具体的には，それぞれの LRS に対して仰俯角と計測データを用い，得られた点群データの水平面への射影を求める。その後，前述の手法を用いて水平面上の位置関係を推定し，設置高と仰俯角を加味して三次元空間における LRS の位置関係を推定する。

大阪大学情報科学研究科棟内で LRS を用いて異なる 15 地点で計測を行ってデータを収集し，任意の二地点における計測データの組み合わせに対して相対位置推定を行った結果，共通する計測対象物が 3 か所以上存在する場合，推定した LRS の位置関係と実際の LRS の位置関係との位置誤差が数 mm～最大 10cm，角度誤差が高々 2.5 度の高精度で位置推定を行うことができた。

## 2. 関連研究

### 2.1 LRS 点群データに基づく移動ロボットの自己位置推定

LRS を搭載した移動ロボットが自身の位置推定及び周辺地図情報の作成を同時に行うことを目的とした SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) [8] の研究において，屋内空間における LRS 自身の位置推定手法が多数提案されている。例えば，移動ロボットに搭載した LRS の計測データをロボットが滞在する空間の地図情報と統合することにより空間内での位置を推定する手法や，以前に滞在した位置での LRS の計測データと比較することで相対的な位置を推定する手法などが提案されている。文献 [9] では，シミュレーションにより擬似的に生成した LRS の計測データを機械学習することで，空間内におけるロボットの位置推定を行う手法を提案し，誤差約 0.1m の精度で位置を推定できることを示している。文献 [10] では，移動ロボットに取り付けた LRS の計測データを二次元平面上に確率密度として表現し，移動先で得られた LRS

の計測データを Newton 法により統合し、その際に得られる平行移動量及び回転角に基づき、ロボットの現在位置を推定する手法を提案している。文献 [11] では、LRS の極座標系を利用した PSM (Polar Scan Matching) を提案し、二地点で得られた LRS の計測データに含まれる点と点を対応付けし、残差平方和が最小となるような変換パラメータを求めることで、複数の LRS に対する相対位置推定を行っている。LRS の計測データに基づいた移動ロボットの自己位置推定手法において、広く用いられる手法としては、ICP (Iterative Closest Point) アルゴリズムが挙げられる [12]。ICP アルゴリズムは、異なる二地点で得られた LRS の計測データに対して、対応する二点の誤差量が最小となるよう処理を繰り返し、二つの点群が最も重なる回転角及び平行移動量を求める収束演算系のアルゴリズムである。文献 [11] の PSM と同様に、LRS の計測間隔ごとに、得られる LRS の計測データを比較することで、移動ロボット自身の位置を推定する手法であるが、LRS の計測間隔でロボットが移動する距離は短く、比較する二つの LRS の計測データの大半は同じ領域を示していることから、高い精度での推定を実現している。この手法を基にした手法も多数提案されており、例えば、文献 [13] では、RANSAC アルゴリズム [14] によって選択した点を ICP アルゴリズムにおける対応点として利用し、特徴抽出を必要としないマッチング手法が提案されている。また、パターン認識技術を ICP アルゴリズムと組み合わせることで安定性と精度の向上を実現する手法 [15] や、部屋の構造や天候などの周辺環境の知見から推定精度の向上を実現する手法 [16] などが提案されている。

## 2.2 提案手法の位置付け

LRS を搭載した移動ロボットの自己位置推定手法の多くは、ロボットの移動速度や LRS の計測間隔から大まかな位置関係を把握し、二点間の LRS の計測データがある程度同じ領域を測定している前提のもとで自身の位置を推定している。一方、本研究では屋内空間の定点に固定された複数の LRS の位置推定を目的としており、これらの LRS による計測データは、広域のセンシングとオクルージョンの排除を実現するためにそれぞれが同一空間を部分的に計測している。したがって上述の手法を単純に適用することができない。これに対し、提案手法では、計測されたデータを点群そのまま扱うのではなく、空間の形状を表す壁などの直線的な部分を点群データから抽出して対象空間の部分特徴量とし、この特徴量に基づき共通物体の認識を行うとともに LRS 間の相対位置を推定する新しい手法を提案している。

表 1 UTM-30LX-EW の仕様書 [17]

| 項目    | 仕様                                                           |
|-------|--------------------------------------------------------------|
| 検出距離  | 0.1 ~ 30m                                                    |
| 測距精度  | 0.1 ~ 10m : $\pm 30\text{mm}$ , 10 ~ 30m : $\pm 50\text{mm}$ |
| 走査角度  | 270 度                                                        |
| 角度分解能 | 0.25 度                                                       |
| 走査時間  | 25 ms/scan                                                   |
| 外形寸法  | W62 × D62 × H88 mm                                           |
| 質量    | 210g (ケーブル除く)                                                |

## 3. 水平に設置された LRS の位置推定手法

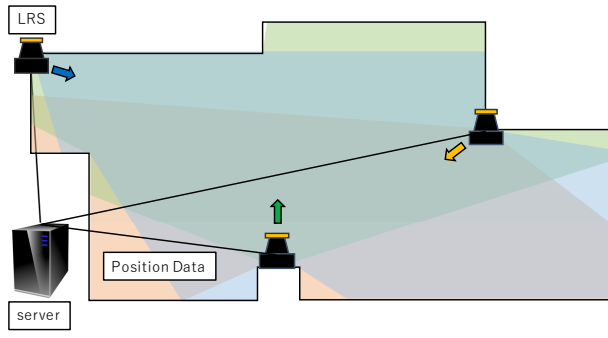
### 3.1 概要と想定環境

LRS による位置推定システムにおいては、図 2(a) に示されるように、空間内で移動する人の位置を推定するために、空間内に複数の LRS が設置され、これらの LRS により計測されたデータは、ネットワークを介してサーバに集約し、空間内の人の位置が導出される。提案手法は、このシステムにおいて、LRS 間の計測データが正しく統合できるように、空間内における各 LRS の位置を特定するためのものである。空間内に設置された LRS から得られた計測データは、図 2(b) に示すように、二次元平面上の点群データとして得られる。この点群データから、空間の輪郭を表現する線分を抽出し、ある二台の LRS から得られた線分群から、互いの線分群の一致度が高くなるよう、一方の線分群を回転及び平行移動させ、LRS 間の相対位置を導出する。点群データからの線分群の抽出は 3.3 節で、線分群の位置合わせは 3.4 節で述べる。空間内に設置した LRS の組み合わせごとで、位置合わせを繰り返していくことで、最終的に図 2(c) のように、全ての LRS の位置を推定することができる。また、本手法の三次元空間への応用については 4 章で述べる。

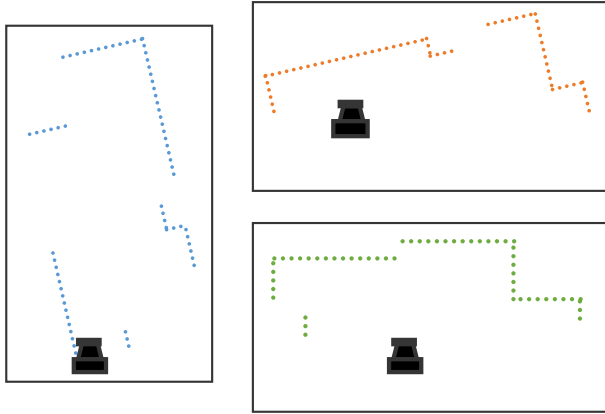
### 3.2 レーザレンジスキャナによる距離測定

代表的な LRS として、提案手法の性能評価実験で用いる北陽電機株式会社製の UTM-30LX-EW [17] の仕様を表 1 に示す。LRS は、レーザ光が対象物に反射して戻ってくるまでの伝播時間に基づき、LRS から対象物までの距離を測定するセンサである。表 1 に示すように、LRS 自体は小型であるが検出距離 30m、走査範囲 270 度という広範囲を非常に小さい誤差で測定することが可能である。また、LRS から得られるデータは、対象物の方向と距離から求められる位置情報のみであるため、データサイズが小さく扱いやすいという利点がある。なお、LRS はレーザ光を透過しない物体までの距離を計測するセンサであるため、測定したい対象物の間に別の物体が存在する場合には、対象物までの距離は測定できない性質がある。

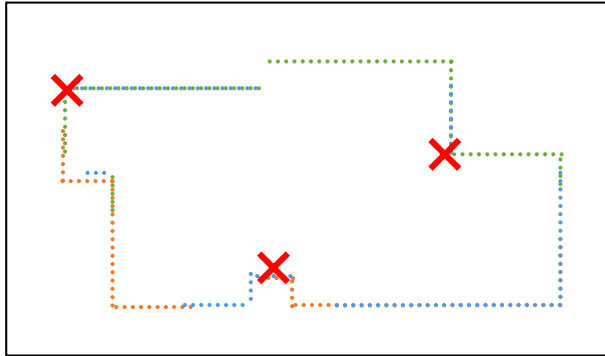
提案手法では、LRS により計測されたそれぞれの距離



(a) システムのアーキテクチャ



(b) 各スキャンにより得られた距離データ



(c) 複数スキャンの位置合わせのイメージ

図 2 提案システムの概要

データ  $d_i$  を  $xy$  座標平面上の点  $p_i = (x_i, y_i)$  として表現する。LRS の座標系を図 3 に示す。LRS の位置が座標平面の原点に対応し、走査範囲を  $2\Phi$  とすると  $x$  軸の正方向に対して  $\pm\Phi$  の扇型領域が LRS のスキャン範囲である。一度のスキャンによって得られるデータ数を  $N_{scan}$  とすると、角度分解能  $\Delta\theta$  は  $\frac{2\Phi}{N_{scan}-1}$  で表される。従って、LRS の計測データに式 (1) により、 $xy$  座標平面上の点群  $P$  が得られる。

$$P = \{p_i = (x_i, y_i) \mid x_i = d_i \cos \theta_i, y_i = d_i \sin \theta_i, \theta_i = -\Phi + i\Delta\theta, i = 0, 1, \dots, N_{scan} - 1\} \quad (1)$$

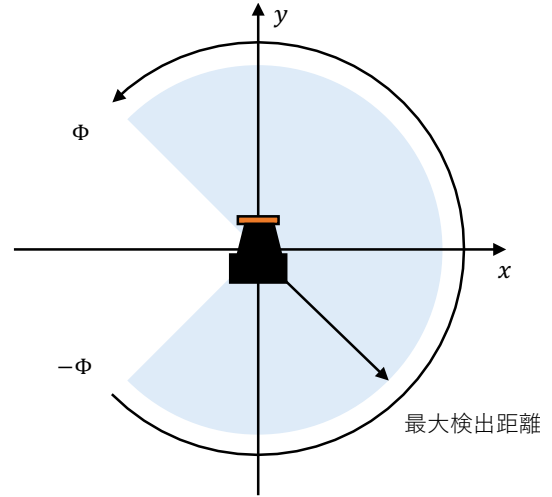


図 3 LRS の座標系

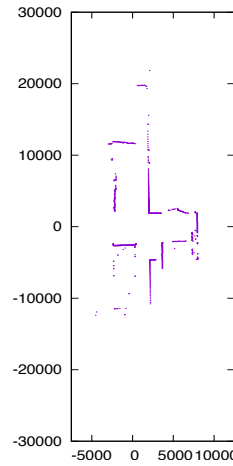


図 4 LRS の点群データ例

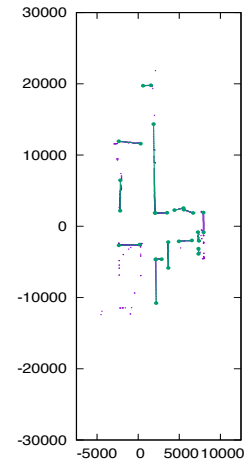


図 5 図 4 の線分群

### 3.3 点群データから RANSAC アルゴリズムによる線分群抽出

本節では、 $xy$  座標平面上の点群として表現された LRS の計測データから、空間の特徴を検出する方法について述べる。図 4 に、大阪大学情報科学研究科棟内において LRS により計測した点群データの例を示す。図に示されるように、壁はその形状から直線的な物体として計測される一方、椅子や机の脚などの小さな障害物は、ノイズとして計測されることが確認できる。

提案手法では、測定誤差やノイズの影響を可能な限り抑えながら、空間の形状を表す直線部分を効率よく抽出できるよう、RANSAC アルゴリズムに基づき空間の特徴量を導出する。RANSAC による直線検出は、まず、観測されたデータ内に対し、ランダムに抽出した点群が直線を構成すると仮定し、この直線と点群の距離が閾値以下となるかを判定し、その基準を満たした点群のうち、含まれる点の数が最大となる直線を導出する [14, 18]。このアルゴリズムは、ランダムにサンプリングした点群に対する近似直線を導出するため、外れ値が含まれるようなデータに対して

も、サンプリングを何度か繰り返すことで外れ値を除いた直線近似が可能となっている。RANSAC による直線抽出では、一般的に二個以上の点を抽出して直線を推定するが、提案手法では、LRS の点群データにおいて、隣接するいくつかの点の集合は直線を構成する可能性が高いという観点から、ランダムに選択する点は一箇のみとし、その隣接点を利用して直線を推定する。直線推定の手続きは下記のようなになる。

(1) 点群データからランダムに 1 点

$p_i (i \in \{0, 1, \dots, N_{scan} - 1\})$  を選択し、その点に近いものから順に 4 点を選択する。

(2) 選択した 5 点を基に、各点から直線までの距離のレンジが最小になるような直線  $l$  を推定する。

(3) (1) で選択した 5 点を除いた点群データに対して、直線  $l$  上に存在する点の数を計算する。ここで、直線  $l$  と点の距離が閾値  $T_{abs}$  以下の場合、その点は直線上に存在すると定義する。なお、評価実験では  $T_{abs} = 50\text{mm}$  とした。

(4) (1) から (3) を  $n$  ステップ繰り返し行い、直線  $l$  上に存在する点の数が最大となる直線を抽出する。なお、提案手法では経験的に  $n = 100$  とした。

この直線推定により、壁や柵は無限長の直線として表現される。しかし、壁や柵の長さは有限であるのに対して、空間の特徴を直線で表現してしまうと、壁同士の位置関係など詳細な特徴を得ることができない。そこで、提案手法では一本の直線を抽出するごとに以下の処理を行い、直線を線分化する。

(1) 長さ 0 の線分  $ls$  を定義し、直線推定において最初に選択した点  $p_i$  を  $ls$  の端点とする。

(2) 点  $p_{i+s(j+1)}$  ( $s = \{-1, 1\}, j = 0, 1, \dots$ ) に対して、点  $p_{i+s_j}$  との距離が  $T_{pdist}$  以下であり、かつ推定した直線からの距離が  $T_{abs}$  以下である場合、線分  $ls$  の端点を点  $p_{i+s(j+1)}$  に更新する。それ以外の場合は端点の更新は行わない。評価実験では、 $T_{pdist} = 1000\text{mm}$  とした。

(3) (2) の処理を、各端点について端点が 5 回連続で未更新になるまで行う。

(4) (3) で算出した線分の両端点から直線  $l$  へ下ろした垂線の足同士の距離が  $T_{len}$  以上であれば線分として抽出し、線分群に追加する。この時、抽出された線分上に存在する点が別の線分抽出時に選択されないようにするために、点群データから取り除く。なお、評価実験では  $T_{len} = 500\text{mm}$  とした。

LRS の点群データから線分群を抽出するために、上述した直線推定および線分化を、長さ  $T_{len}$  以上の線分が抽出できなくなるまで繰り返し行う。しかし、直線の推定に RANSAC アルゴリズムを利用しているため、直線推定における点  $p_i$  の選ばれ方次第では、長さ  $T_{len}$  以上の線分を

すべて抽出する前に、それ未満の長さの線分が抽出される場合が考えられる。そこで、長さ  $T_{len}$  以上の線分が抽出できない状態が  $m$  回連続するまで線分抽出を行う。提案手法では、経験的に  $m = 50$  とした。

このようにして得た線分群には、同一の壁や物体から検出された線分が複数含まれる場合が考えられる。そのため、上述の手法で線分群を抽出したのち、含まれる線分の中で片方の端点同士が距離  $T_{epdist}$  以下で、かつ線分の角度差が  $T_{angle}$  以下である二本の線分が存在する場合、その線分を一つの線分に統合し、元の線分群から統合前の線分を削除し、統合後の線分を線分群に追加する。なお、評価実験では  $T_{epdist} = 500\text{mm}, T_{angle} = 5$  度とした。これを統合できる線分の組み合わせがなくなるまで行う。図 5 に、図 4 から抽出した線分群の例を示す。

### 3.4 線分群の位置合わせ

本節では、3.3 節で抽出した LRS の線分群同士を位置合わせする方法について述べる。位置合わせは直交線分群の抽出、類似度評価、整合性評価の三段階のプロセスによって構成される。位置合わせを行う二つの LRS を  $A, B$ 、これらの LRS により抽出された線分群をそれぞれ  $LS_A, LS_B$  とする。また、二台の LRS の計測範囲は重複しており、互いの計測範囲において、同一物体が少なくとも一つは含まれているものとする。

#### 3.4.1 線分群からの直交線分群の抽出

提案手法では、壁や柵などが基本的に平行または直交の関係にある空間に適用することを想定している。ゆえに、壁や柵などの計測対象物から得られた線分を抽出するために、線分群  $LS$  から平行・直交する線分が比較的多い線分群を直行線分群  $LS_{\perp}$  として抽出する。以降では直行線分群  $LS_{\perp}$  の抽出方法について述べる。

まず、線分群  $LS$  に含まれる線分  $ls$  を LRS の座標系における  $x$  軸の正方向のなす角  $\theta (\theta \in [0, 180))$  によってクラスタリングを行う。クラスタ数を  $N_C$  としたとき、それぞれのクラスタをクラスタ  $i (0 \leq i < N_C)$  と定義する。そして、線分群  $LS$  の全ての線分をクラスタ  $\lfloor (\theta + \theta_{ofs}) / \frac{180^\circ}{N_C} \rfloor \bmod N_C$  にクラスタリングする。ここで  $\theta_{ofs}$  は、クラスタ 0 に含まれる線分のなす角の最小値を表している。ゆえに、クラスタ  $i$  には  $\theta \in [\frac{180^\circ}{N_C} i + \theta_{ofs}, \frac{180^\circ}{N_C} (i+1) + \theta_{ofs})$  を満たす線分がクラスタリングされることとなる。ここで、クラスタ  $i$  に属する線分同士はほぼ平行であるため、クラスタ  $i$  に属する線分群を同方向線分群  $LS_{\parallel i}$  と定義する。図 5 の線分群に対して、 $N_C = 18, \theta_{ofs} = 0^\circ$  としたときのクラスタリングの結果を表 2 に示す。

クラスタ  $i, i + \frac{N_C}{2}$  に属する線分の間にはほぼ直交するという関係がある。このクラスタ  $i, i + \frac{N_C}{2}$  をクラスタベ

表 2 図 5 の線分群のクラスタリング例 ( $N_C = 18, \theta_{ofs} = 0^\circ$ )

| クラスタ | 線分数 | クラスタ | 線分数 | クラスタペアの<br>線分数 |
|------|-----|------|-----|----------------|
| 0    | 4   | 9    | 5   | 9              |
| 1    | 1   | 10   | 0   | 1              |
| 2    | 0   | 11   | 0   | 0              |
| 3    | 0   | 12   | 0   | 0              |
| 4    | 0   | 13   | 0   | 0              |
| 5    | 0   | 14   | 0   | 0              |
| 6    | 0   | 15   | 1   | 1              |
| 7    | 0   | 16   | 0   | 0              |
| 8    | 2   | 17   | 2   | 4              |

表 3 図 5 の線分群のクラスタリング例 ( $N_C = 18, \theta_{ofs} = 5^\circ$ )

| クラスタ | 線分数 | クラスタ | 線分数 | クラスタペアの<br>線分数 |
|------|-----|------|-----|----------------|
| 0    | 1   | 9    | 0   | 1              |
| 1    | 0   | 10   | 0   | 0              |
| 2    | 0   | 11   | 0   | 0              |
| 3    | 0   | 12   | 0   | 0              |
| 4    | 0   | 13   | 0   | 0              |
| 5    | 0   | 14   | 0   | 0              |
| 6    | 0   | 15   | 1   | 1              |
| 7    | 0   | 16   | 1   | 1              |
| 8    | 7   | 17   | 5   | 12             |

ア  $i (0 \leq i < \frac{N_C}{2})$  と定義する。そのため、直交線分群  $LS_\perp$  を抽出するためには、クラスタペア  $i$  に含まれる線分数が最大となるようなクラスタペア  $i_{\max}$  を選択すれば良い。ゆえに、直交線分群  $LS_\perp$  は式 (2) で表される。

$$LS_\perp = \left\{ LS_{\parallel i_{\max}}, LS_{\parallel i_{\max} + \frac{N_C}{2}} \right\} \quad (2)$$

表 2 の場合、クラスタペア 0 (クラスタ 0, 9) に含まれる線分数が 9 本で最大となるため、直交線分群  $LS_\perp$  は  $\{LS_{\parallel 0}, LS_{\parallel 9}\}$  となる。

しかし、 $\theta_{ofs}$  の値によっては、クラスタ  $i, i+1$  の境界に多数の線分が存在する場合がある。その場合、本来同じクラスタとしてクラスタリングされるべき線分が 2 つのクラスタに分割されるため望ましいとはいえない。これを防ぐために  $\theta_{ofs}$  の設定値を変動させて同様に線分のクラスタリングを行い、 $\theta_{ofs}$  ごとに算出されるクラスタペアに含まれる線分数が最大となるクラスタペアを直交線分群  $LS_\perp$  とする。

表 3 に図 5 の線分群に対して、 $N_C = 18, \theta_{ofs} = 5^\circ$  としたときのクラスタリングの結果を示す。表 3 の結果ではクラスタペア 8 (クラスタ 8, 17) に含まれる線分数が 12 本となっており、表 2 の結果 ( $N_C = 18, \theta_{ofs} = 0^\circ$ ) のクラスタペア 0 の線分数 (9 本) より多いため、表 3 のクラスタペア 8 が直交線分群  $LS_\perp$  として抽出される。

なお、評価実験においては、クラスタ数  $N_C = 12$  とした。

### 3.4.2 直交線分群を利用した位置合わせ

本項では、二台の LRS  $A, B$  のそれぞれの直交線分群を利用して LRS  $A$  に対して LRS  $B$  を位置合わせをする手法について述べる。ここで、LRS  $A$  を原点とした座標系  $A$  (図 3) 上の位置ベクトル  $p$  を  $^A p$  と定義する。LRS  $B$  を LRS  $A$  に対して位置合わせするということは、座標系  $A$  上における座標系  $B$  の相対位置および相対方位角を推定することに等しく、これは式 (3) のアフィン行列  $^{A/B} M$  を算出することと等価である。

$$^A p = ^{A/B} M ^B p \quad (3)$$

しかし、LRS の測定誤差などの影響で、アフィン変換後の線分群が完全に一致するわけではない。そのため、後述するアフィン変換後の線分群の一致度が最も高くなるようなアフィン行列  $^{A/B} M_{best}$  を算出し、LRS  $A, B$  の位置関係を推定する。

ゆえに、二台の LRS の直交線分群  $LS_{A\perp}, LS_{B\perp}$  には、同一物体から得られた線分の組が 1 組以上含まれていると考えられる。そのため、提案手法では二つの直交線分群から線分を 1 本ずつ選択し、選択した線分組 ( $ls_A, ls_B$ ) が同じ物体から得られたものであると仮定して位置合わせを行う。ゆえに、まず線分組 ( $ls_A, ls_B$ ) の中点が一致かつ  $x$  軸とのなす角が等しくなるようなアフィン行列  $^{A/B} M_0$  を算出する。しかし、同一の物体から検出された線分組が全く同じ部分を検出しているとは限らず、共有している領域が一部のみである場合も考えられる。ゆえに、アフィン行列  $^{A/B} M_0$  で直交線分群  $LS_{B\perp}$  アフィン変換した後に線分  $ls_A$  のなす角の方向に距離  $D$  だけ平行移動させて位置合わせを行う必要がある。アフィン変換後の直交線分群  $LS_{B\perp}$  を  $^A LS_{B\perp}$  と表すと、 $^A LS_{B\perp}$  は式 (4) で表せる。ここで、アフィン行列  $M_D$  は、選択した線分  $ls_A$  のなす角の方向に距離  $D$  だけ平行移動させる行列である。

$$^A LS_{B\perp} = \{ M_D ^{A/B} M_0 ls_B \mid ls_B \in LS_{B\perp} \} \quad (4)$$

次に、2 つの線分群  $LS_{A\perp}, ^A LS_{B\perp}$  の一致度を計算する手法を述べる。選択した線分組 ( $ls_A, ls_B$ ) は同一直線上に存在するという仮定から、 $ls_A, ls_B$  を含む同方向線分群の線分はほぼ平行である。それぞれの LRS から抽出した同方向線分群のうち線分  $ls_A, ls_B$  を含む同方向線分群を  $LS_{A\parallel \ni}, LS_{B\parallel \ni}$  と定義し、もう一方の同方向線分群を  $LS_{A\parallel \not\ni}, LS_{B\parallel \not\ni}$  と定義する。すると、 $LS_{A\parallel \ni}, LS_{B\parallel \not\ni}$  および  $LS_{A\parallel \not\ni}, LS_{B\parallel \ni}$  に含まれる線分は互いに直交するため、同一の物体から得られた線分ではないことが分かる。ゆえに、線分群の一致度を算出する際は、 $LS_{A\parallel \ni}, LS_{B\parallel \ni}$  および  $LS_{A\parallel \not\ni}, LS_{B\parallel \not\ni}$  に含まれる線分組に対して一致度を計算すれば良い。そして、線分群の一致度  $\text{SIM}(LS_{A\perp}, ^A LS_{B\perp})$  を式 (5) のように定義する。ここで、関数  $\text{sim}(ls'_A, ls'_B)$  は線分  $ls'_A, ls'_B$  の類似度を算出する関数であり、詳細は後述



する．式 (5) は線分群  $LS_{A\perp}, {}^A LS_{B\perp}$  のそれぞれの線分について，線分  $ls_B (\in {}^A LS_{B\perp}), ls_A (\in LS_{A\perp})$  の最大類似度の総和を線分群の一致度としている．

$$\begin{aligned} \text{SIM}(LS_{A\perp}, {}^A LS_{B\perp}) &= \text{SIM}_{\text{LS}}(LS_{A\parallel\exists}, {}^A LS_{B\parallel\exists}) \\ &\quad + \text{SIM}_{\text{LS}}(LS_{A\parallel\exists}, {}^A LS_{B\parallel\exists}) \\ &\quad + \text{SIM}_{\text{LS}}({}^A LS_{B\parallel\exists}, LS_{A\parallel\exists}) \\ &\quad + \text{SIM}_{\text{LS}}({}^A LS_{B\parallel\exists}, LS_{A\parallel\exists}) \quad (5) \end{aligned}$$

$$\text{SIM}_{\text{LS}}(LS_A, LS_B) = \sum_{ls'_A \in LS_A} \left( \max_{ls'_B \in {}^A LS_B} \text{sim}(ls'_A, ls'_B) \right)$$

次に，二本の線分  $ls_A, ls_B$  の類似度  $\text{sim}(ls_A, ls_B)$  について述べる．同じ物体から得られた 2 本の線分は，共有部分が長く，同一直線上に存在すると考えられる．そのため，2 本の線分  $ls_A, ls_B$  の類似度  $\text{sim}(ls_A, ls_B)$  を式 (6) のように，共有部分の長さで定義する．ここで， $\text{Overlap}(ls_A, ls_B)$  は共有部分の長さ， $\text{LineDistance}(ls_A, ls_B)$  は線分間の距離を表しており，式 (7)，式 (8) のように定義する．また， $\text{Mapping}(ls_A, ls_B)$  は線分  $ls_A$  を線分  $ls_B$  を含む直線に垂直に写像した時の共有部分の長さ， $\text{Distance}(\overline{ls_A}, ls_B)$  は線分  $ls_A$  の中点と線分  $ls_B$  を含む直線との距離を表しており，詳細を図 6 に示す．

式 (6) では，線分の共有部分が閾値  $T_{\text{overlap}}$  以上かつ線分間の距離が閾値  $T_{\text{dist}}$  以下の場合に，線分が同じ物体により検出されたとして一致度を算出し，それ以外の場合は 0 とした．なお，評価実験では  $T_{\text{overlap}} = 500\text{mm}$ ， $T_{\text{dist}} = 300\text{mm}$  とした．

$$\begin{aligned} \text{sim}(ls_A, ls_B) &= \begin{cases} \frac{\text{Overlap}(ls_A, ls_B)}{\min(|ls_A|, |ls_B|)} + \frac{T_{\text{dist}} - \text{LineDistance}(ls_A, ls_B)}{T_{\text{dist}}} \\ \quad (\text{Overlap}(ls_A, ls_B) \geq T_{\text{overlap}} \\ \quad \wedge \text{LineDistance}(ls_A, ls_B) \leq T_{\text{dist}}) \\ 0 \quad (\text{Otherwise}) \end{cases} \quad (6) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Overlap}(ls_A, ls_B) &= \min(\text{Mapping}(ls_A, ls_B), \text{Mapping}(ls_B, ls_A)) \quad (7) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{LineDistance}(ls_A, ls_B) &= \max(\text{Distance}(\overline{ls_A}, ls_B), \text{Distance}(\overline{ls_B}, ls_A)) \quad (8) \end{aligned}$$

そして，位置合わせでは全ての線分組  $(ls_A, ls_B)$  について同様のアフィン変換を行い，それぞれの線分群の一致度  $\text{SIM}(LS_{A\perp}, {}^A LS_{B\perp})$  を算出し，最も線分群の一致度が高かったアフィン行列  $M_D {}^A/B M_0$  を  ${}^A/B M_{\text{best}}$  とする．このアフィン行列  ${}^A/B M_{\text{best}}$  は回転・平行移動をする変換行列であるため，式 (9) のように表せる．この時， $\theta$  は LRS  $A, B$  の方位角の差， $(t_x, t_y)$  は座標系  $A$  上の LRS  $B$  の位置

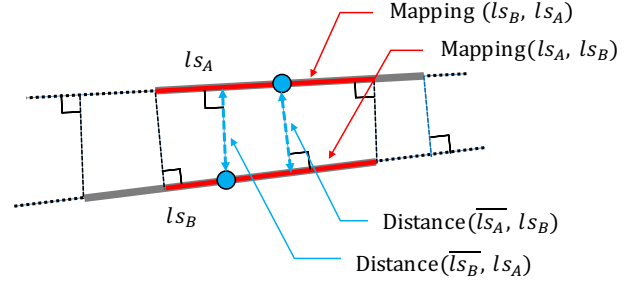


図 6 Mapping および Distance の定義

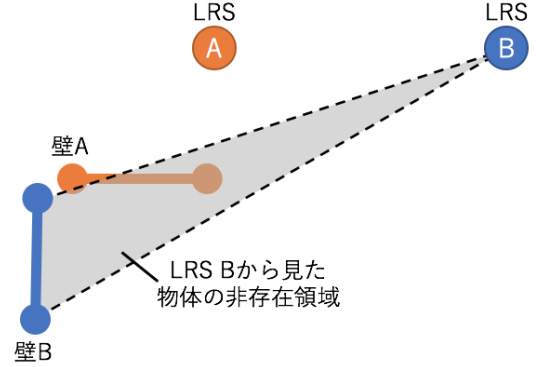


図 7 線分の位置関係が矛盾する例

を表しており，このアフィン行列  ${}^A/B M_{\text{best}}$  から LRS  $A, B$  の位置関係が推定できる．

$${}^A/B M_{\text{best}} = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & t_x \\ \sin \theta & \cos \theta & t_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (9)$$

### 3.5 整合性の検証

3.4 節で述べた位置合わせ手法では，二台の LRS が共有する計測領域が狭い場合において，偶然に非共有領域の線分群の類似度が正しい位置合わせ時の類似度より高くなり，誤検出となる場合がある．よって，アフィン変換後の線分群の位置関係が論理的に正しいものであるか否かを判断し，位置関係に矛盾が生じれば当該アフィン行列を除外する必要がある．

例えば，図 7 のように LRS  $A, B$  がそれぞれ壁  $A, B$  を検出した場合，LRS  $B$  と壁  $B$  の間の領域は LRS  $B$  から見た物体の非存在領域である．しかし，この LRS  $A, B$  の位置関係では，この非存在領域に LRS  $A$  が検出した壁  $A$  が存在することになり矛盾が発生する．このように，一方の LRS とその LRS が検出した線分の間にもう一方の LRS が検出した線分が存在する場合は，二つの LRS の位置関係に矛盾があると判断し，位置関係の推定から除外する．

## 4. 提案手法の 3 次元空間への応用

3 章で述べた提案手法は，設置されている LRS がすべて水平であるという前提に基づいた手法である．本章では，LRS の仰俯角が同一ではない場合における位置推定につい

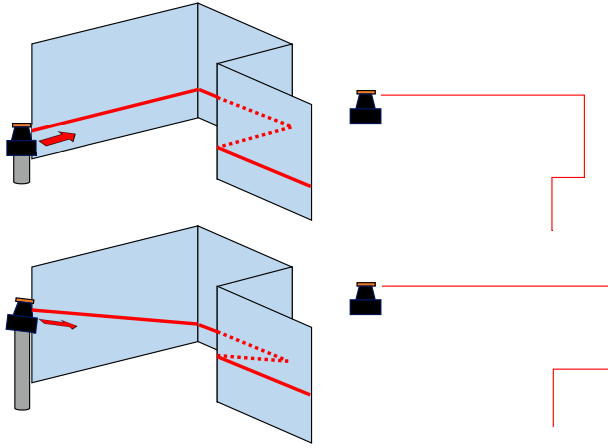


図 8 水平スキャンと斜方スキャンの空間認識の違い

て述べる。

3次元座標系において位置推定を行うにあたって問題となる点として、水平にスキャンする場合と比較して同じ物体までの検出距離が長くなってしまふ点が挙げられる。例えば、図8のような場合、LRSが水平の場合と傾斜している場合でスキャンされた部分の長さが異なり、空間の正しい規模が把握できないという問題がある。そこで、3章で述べた前提に加えて、以下のような前提を設ける。

- 各 LRS を設置した場所の床からの設置高  $h$  と仰俯角  $\varphi$  は既知であるとし、LRS の回転は  $y$  軸回転のみとする。

この前提を設けることで、斜め方向のスキャンによって得られた点群の水平座標平面上への写像を求めることが可能となり、その結果、水平座標平面上への写像に対して上述の手法を用いて位置合わせを行うことが可能となる。この時、LRS の仰俯角と設置高を実測する際に発生する時間的コストは、全 LRS の位置関係を実測することと比較して大幅に小さいと考えられる。また、LRS はスキャンした物体までの方向と距離以外の情報を検出することはできないため、斜めに設置したことで床など水平方向の物体と壁、棚など垂直方向の物体を区別できないことが懸念される。しかし、設置高と仰俯角が既知であれば床面と壁面の区別が可能となる。

水平座標平面上の写像を用いた水平方向の位置推定によって得られるのは、水平方向のアフィン変換を求めるアフィン行列  ${}^{A/B}M_{best}$  である。3次元座標系における LRS の位置関係は、このアフィン行列  ${}^{A/B}M_{best}$  と LRS 間の設置高の差、仰俯角の差を利用して推定可能である。

#### 4.1 水平座標平面への投射

LRS の仰俯角は図3における  $y$  軸周りの回転角として表現することができるため、LRS により計測された距離データ  $d_i$  を、LRS を原点とする水平座標平面上へ写像した時の点の座標  $(x_i, y_i)$  は以下の式 (10) で求めることができる。

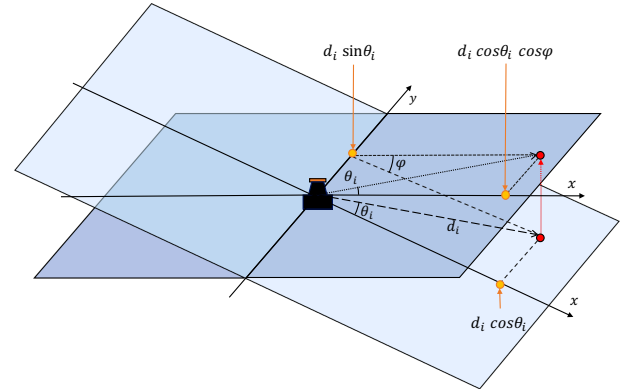


図 9 スキャン点の水平面への投射

$$x_i = d_i \cos \theta_i \cos \varphi, \quad y_i = d_i \sin \theta_i \quad (10)$$

また、LRS がもつ座標平面と、水平方向の座標平面の関係および式 (10) を図で表すと、図9のようになる。

#### 4.2 3次元座標系における位置推定

3次元座標系における LRS の位置推定では、まず水平方向の2次元座標系での位置推定を行い、その結果と既知の情報を利用して3次元座標系へと拡張させることで行う。位置合わせの対象とする LRS をそれぞれ  $A, B$  とし、それぞれの設置高を  $h_A, h_B$ 、仰俯角を  $\varphi_A, \varphi_B$  とする。 $B$  を  $A$  に対して位置合わせする場合、水平方向の位置推定は3.3節から3.4節で述べた手法を利用し、水平方向の位置関係を示すアフィン行列  ${}^{A/B}M_{best}$  を推定する。3次元  $xyz$  座標空間の原点を  $A$  が設置されている地点直下の  $z = 0$  の点とすると、 $A$  の座標は  $(0, 0, h_A)$  となる。この時、 ${}^{A/B}M_{best}$  によって求められる平行移動量  $t_x, t_y$  は  $B$  が  $A$  の位置からどれだけ水平面上を移動するかを表現しているため、 $B$  の座標は  $(t_x, t_y, h_B)$  となる。この2つの座標より、 $A$  と  $B$  の距離を算出することが可能となる。また、相対方位角を  ${}^{A/B}M_{best}$  より求められる  $\theta$  で、相対仰俯角を各 LRS の仰俯角  $\varphi_A, \varphi_B$  の差で表現することが可能となり、3次元空間において LRS の位置推定が可能となる。

### 5. 評価実験

本学情報科学研究科棟内において、北陽電機株式会社製の LRS (UTM-30LX-EW) を用いて、3章で提案した手法の性能評価を実施した。

#### 5.1 実験環境・実験方法

本実験では、情報科学研究科 A 棟 5 階において、図10に示した15地点に、LRS を設置し、25秒間データを計測した。各 LRS は床から 85cm から 110cm の位置に水平に設置され、壁や設置されたパーティションが正しく検出されるよう、人がいない状態で計測を実施している。位置推定の誤差を評価するため、図10中に示した二次元ワールド



表 4 計測地点

| 計測地点番号 | $x$ [mm] | $y$ [mm] | $\theta$ ( $0^\circ \leq \theta < 360^\circ$ ) |
|--------|----------|----------|------------------------------------------------|
| 1      | +220     | 0        | 0                                              |
| 2      | +210     | -5395    | 0                                              |
| 3      | +210     | -10930   | 0                                              |
| 4      | +160     | +6300    | 285                                            |
| 5      | +160     | +6300    | 332                                            |
| 6      | +210     | +14140   | 0                                              |
| 7      | +210     | +20360   | 0                                              |
| 8      | +1500    | +13610   | 136                                            |
| 9      | +1470    | +4150    | 220                                            |
| 10     | +2050    | +1850    | 180                                            |
| 11     | -1590    | +4080    | 270                                            |
| 12     | -5910    | +2160    | 0                                              |
| 13     | +4020    | -4760    | 180                                            |
| 14     | +730     | -17770   | 90                                             |
| 15     | +730     | +24250   | 270                                            |

座標系を各 LRS の座標系とは別に定義し、各計測地点  $i$  のワールド座標系における  $x$  座標  $x_i$  [mm] と  $y$  座標  $y_i$  [mm], LRS の座標系とワールド座標系のなす角  $\theta_i$  [ $^\circ$ ] を実測した。各計測地点におけるそれぞれの値を表 4 に示す。

評価実験では、二地点の計測データの全ての組み合わせに対し、3.3 節のアルゴリズムによる線分抽出を行った後 3.4 節の位置推定アルゴリズムにより位置を推定し、その推定精度を導出した。具体的には、まず、ある二台の LRS  $A, B$  の計測データを用いた位置推定では、 $B$  の点群データを  $A$  の座標系における表現へ変換するためのアフィン行列  $A/B M_{best}$  を推定する。その後、 $A$  はワールド座標系において表 4 に示す位置と角度にあるため、 $A$  の座標系をワールド座標系に変換するアフィン行列  $W/A M$  は表 4 の  $x$  座標  $x_A$ ,  $y$  座標  $y_A$ , 回転角  $\theta_A$  を用いて表す。本実験では、各計測データの組み合わせに対して、式 (11) によって求めることができるワールド座標系における  $B$  の推定位置 ( $x_{W/B}, y_{W/B}$ ) と、ワールド座標系での  $B$  の実際の位置 ( $x_B, y_B$ ) を元に位置誤差を求めるとともに、 $A$  と  $B$  の相対方位角の推定値と表 4 から求められる実際の相対方位角を元に角度誤差を求めて、双方の精度を評価指標とした。

$$\begin{aligned}
 \begin{pmatrix} x_{W/B} \\ y_{W/B} \\ 1 \end{pmatrix} &= W/A M \ A/B M_{best} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \\
 &= \begin{pmatrix} \cos \theta_A & -\sin \theta_A & x_A \\ \sin \theta_A & \cos \theta_A & y_A \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t_x \\ t_y \\ 1 \end{pmatrix} \quad (11)
 \end{aligned}$$

## 5.2 評価結果

ある二つの LRS の組に対する位置推定が成功した基準を、位置誤差が 300mm 以下かつ角度誤差が 5 度以下とする。共通する計測対象物数毎の組み合わせ総数及び位置推

表 5 共通する計測対象物数ごとの位置推定実験結果

| 共通して検出した<br>物体数 | 組み合わせ<br>総数 | 位置推定が<br>成功した数 | 位置推定<br>成功率 [%] |
|-----------------|-------------|----------------|-----------------|
| 1               | 50          | 0              | 0.0             |
| 2               | 40          | 15             | 37.5            |
| 3               | 28          | 17             | 60.7            |
| 4               | 18          | 13             | 72.2            |
| 5               | 6           | 5              | 83.3            |
| 6               | 4           | 4              | 100             |

定が成功した組み合わせ数、位置推定成功率を表 5 に、共通する計測対象物数の増加に伴う位置推定成功率の推移を図 11 にそれぞれ示す。但し、共通する計測対象物数が 0 であるような組み合わせについては対象外とする。

図 11 に示されるように、共通する計測対象物が 3 か所以上存在する場合は 60% 以上の組み合わせにおいて位置推定が成功しており、5 か所以上の場合は 80% 以上の組み合わせで位置推定に成功している。このことから、ある程度同じ領域を観測している場合には、提案手法により、高い精度で LRS 間の位置関係を把握できることがわかる。

また、図 12 に、位置推定時の位置誤差と角度誤差それぞれについて、共通する計測対象物数ごとの分布を示す。この図に示されるように、共通する計測対象物の増加に伴ってそれぞれの誤差の分散は小さくなり、位置推定が正しくない場合でも大幅な推定位置の間違いが起こる組み合わせが少なくなることが確認できる。なお、角度に関して、誤差の分布が 0 度、90 度、180 度付近に集中しているのは、位置推定アルゴリズムの中で直交する線分群を元に位置推定を行なったことが要因である。

さらに、表 6, 7 に、共通する計測対象物数ごとの位置推定が成功した組み合わせにおける推定誤差の平均と、共通する計測対象物数ごとのすべての組み合わせの位置推定における推定誤差の平均値を示す。これらの表から、位置推定が成功した LRS の組み合わせについて、共通する計測対象物数が 3 か所以上の場合に位置誤差の平均値が 100 mm, 角度誤差の平均値が 2.5 度を達成していることが確認できる。これより、提案手法によって二台の LRS の点群データからお互いの位置を約 10cm 以内の精度で推定できることが確認できた。また、位置推定が成功していない場合を含めても、数十 cm 以内の精度での位置を推定できていることを示している。

## 6. まとめ

本研究では、屋内空間内に設置された複数の LRS の計測データより得た点群データから、空間の特徴量として壁などの情報を線分群として抽出し、これらの線分を位置合わせするアフィン行列を推定することで、各 LRS の位置推定を行う手法を提案した。提案手法では、線分抽出の際に LRS の測距誤差による影響を最小化するために RANSAC

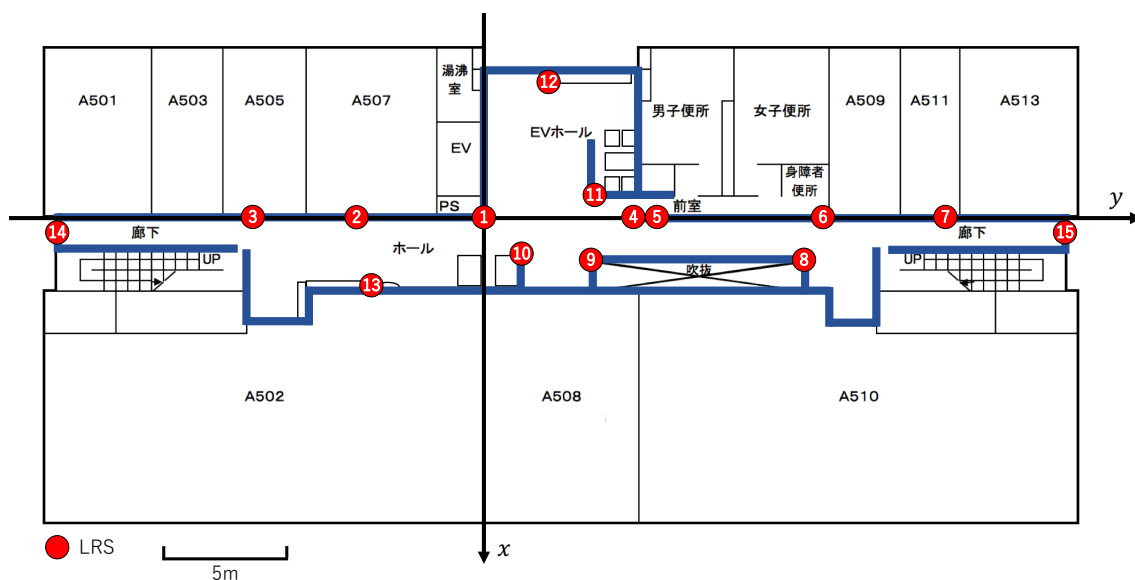


図 10 LRS の配置図

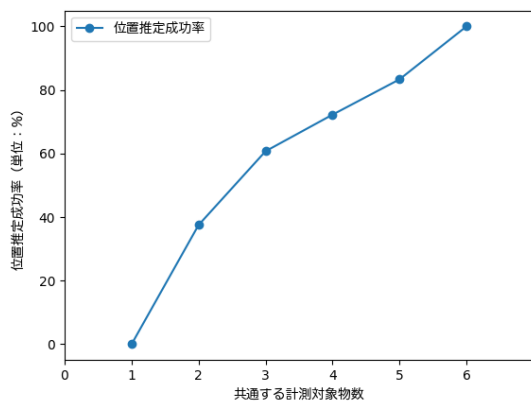


図 11 共通する計測対象物数ごとの位置推定成功率

表 6 位置推定が成功した場合の推定誤差の平均値

| 共通する<br>計測対象物数 | 推定位置誤差の<br>平均 [mm] | 推定角度誤差の<br>平均 [度] |
|----------------|--------------------|-------------------|
| 1              | -                  | -                 |
| 2              | 171.8              | 1.8               |
| 3              | 88.1               | 2.4               |
| 4              | 84.3               | 1.5               |
| 5              | 67.4               | 1.4               |
| 6              | 52.8               | 1.5               |

アルゴリズムを適用した。また、得られた線分群を方向ごとにクラスタリングし、直交線分群を抽出することによって位置合わせにおける特徴量として有効な線分のみを残し、一致度を求める線分の組み合わせを減少させることで位置合わせにおける計算量を削減し、同時に位置合わせの精度の向上を図った。位置合わせでは、線分群の一致度を評価するとともに、推定したアフィン行列を適用した場合の線分群の位置関係の整合性を評価することで、より高精

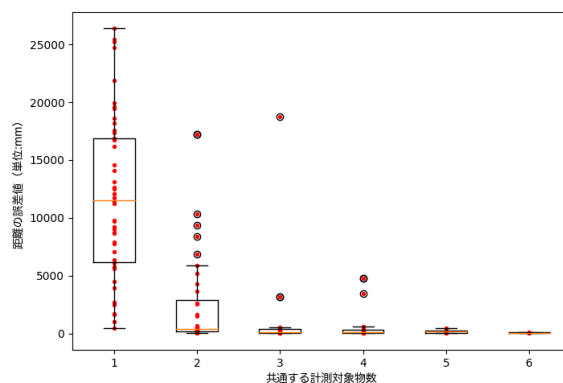
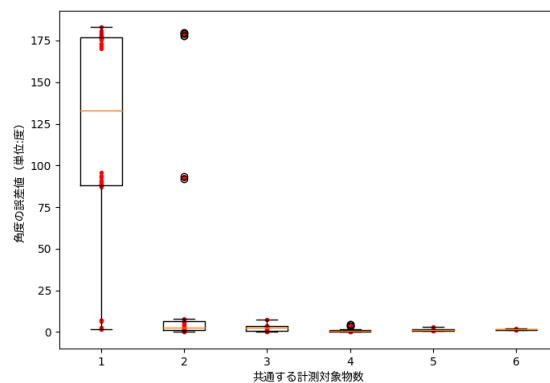


図 12 位置推定における位置誤差と角度誤差の分布

度な位置推定を可能とした。

大阪大学情報科学研究科棟内において 15 地点で LRS による計測データを収集し、15 地点のうち二地点の LRS の全組み合わせに対して計測データをもとに位置推定する実証実験を行い、提案手法による位置推定精度を評価した結

表 7 すべての場合の推定誤差の平均値

| 共通する<br>計測対象物数 | 推定位置誤差の<br>平均 [mm] | 推定角度誤差の<br>平均 [度] |
|----------------|--------------------|-------------------|
| 1              | 9608.0             | 76.3              |
| 2              | 3822.7             | 46.7              |
| 3              | 808.2              | 5.5               |
| 4              | 806.5              | 16.5              |
| 5              | 275.5              | 1.64              |
| 6              | 52.8               | 1.5               |

果、共通する計測対象物が三か所以上存在する場合、位置誤差が数 mm～最大 10cm、角度誤差が最大でも 2.5 度を達成し、非常に高い精度で位置合わせを行うことが可能であることが確認できた。

今後の課題の 1 つとして、三台以上の LRS に対する同時位置推定への対応が挙げられる。通常、空間内には三台以上の LRS を設置して歩行者の位置推定及び軌跡推定を行うことが考えられる。そのため、それらの LRS の計測データをもとに全ての LRS についてその位置を推定することが必要となる。二台の LRS からの計測データを用いた位置推定を逐次的に繰り返す方法では誤差の蓄積が懸念されるため、三台以上の LRS からの計測データを用いて同時にすべての LRS の位置を推定する手法を検討する必要がある。また、性能評価については限られた環境における評価実験に留まっているが、今後、様々な環境下において提案手法の性能評価および分析を行っていく予定である。

## 謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費 JP26220001 ならびに JP15H02690 の助成を受けたものです。

## 参考文献

- [1] Chiguchi, M., Yamaguchi, H., Higashino, T. and Shimoda, Y.: Human thermal comfort estimation in indoor space by crowd sensing, *2016 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm)*, pp. 45–50 (online), DOI: 10.1109/SmartGridComm.2016.7778736 (2016).
- [2] Schulz, D., Fox, D. and Hightower, J.: People tracking with anonymous and ID-sensors using Rao-Blackwellised particle filters, *Proceedings of the 18th international joint conference on Artificial intelligence (IJCAI'03)*, pp. 921 – 926 (2003).
- [3] Figuera, C., Rojo-Álvarez, J. L., Mora-Jiménez, I., Guerrero-Curieses, A., Wilby, M. and Ramos-López, J.: Time-Space Sampling and Mobile Device Calibration for WiFi Indoor Location Systems, *IEEE Transactions on Mobile Computing*, Vol. 10, No. 7, pp. 913 – 926 (2011).
- [4] 上嶋祐紀, 藤田和久, 樋口雄大, 廣森聡仁, 山口弘純, 東野輝夫: ひとつがつながるなび—位置と気持ちと空間の共有—, マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2013) シンポジウム論文集, pp. 2105–2115 (2013).
- [5] ひとたび: [https://youtu.be/noSHVvBQd\\_Q](https://youtu.be/noSHVvBQd_Q).
- [6] Wada, Y., Higuchi, T., Yamaguchi, H. and Higashino, T.: Accurate Positioning of Mobile Phones in a Crowd Using Laser Range Scanners, *Proceedings of the 9th IEEE International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communication (WiMob '13)*, pp. 430–435 (2013).
- [7] Takafuji, T., Fujita, K., Higuchi, T., Hiromori, A., Yamaguchi, H. and Higashino, T.: Indoor Localization utilizing Tracking Scanners and Motion Sensors, *Proceedings of the 11th IEEE International Conference on Ubiquitous Intelligence and Computing (UIC '14)*, pp. 112–119 (2014).
- [8] Durrant-Whyte, H. and Bailey, T.: Simultaneous Localization and Mapping: Part I, *IEEE Robotics and Automation Magazine*, Vol. 13, No. 2, pp. 99 – 110 (2006).
- [9] Park, S. and Roh, K. S.: Coarse-to-Fine Localization for a Mobile Robot Based on Place Learning With a 2-D Range Scan, *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 32, No. 3, pp. 528 – 544 (2016).
- [10] Biber, P. and Straßer, W.: The Normal Distributions Transform: A New Approach to Laser Scan Matching, *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Vol. 3, pp. 2743 – 2748 (2003).
- [11] Diosi, A. and Kleeman, L.: Laser Scan Matching in Polar Coordinates with Application to SLAM, *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 3317 – 3322 (2005).
- [12] Rusinkiewicz, S. and Levoy, M.: Efficient Variants of the ICP Algorithm, *Proceedings of the Third International Conference on IEEE 3-D Digital Imaging and Modeling, 2001*, pp. 145 – 152 (2001).
- [13] Islam, M. D., Reza, S. M. T., Uddin, J. and Oyekanlu, E.: Laser Scan Matching by FAST CVSAC in Dynamic Environment, *International Journal of Intelligent Systems and Applications, IJISA, MECS Publisher, Hong Kong*, Vol. 5, No. 11, pp. 11 – 18 (2013).
- [14] Fischler, M. A. and Bolles, R. C.: *Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography*, Vol. 6, No. 24, pp. 381 – 395, Commun. ACM (1981).
- [15] Tian, X., Hua, F. and Wang, T.: An innovative localization system of transformer substation automation robots based on pattern recognition and ICP algorithm, *Proceedings of the 4th International Conference on Applied Robotics for the Power Industry (CARPI)*, pp. 1–5 (2016).
- [16] Chen, Y., Liu, J. and Jaakkola, A.: Knowledge-based indoor positioning based on LiDAR aided multiple sensors system for UGVs, *Proceedings of 2014 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS 2014)*, pp. 109–114 (2014).
- [17] Hokuyo Automatic Co., L.: *Scanning Laser Range Finder UTM-30LX-EW Specification*, <http://www.hokuyo-aut.jp/02sensor/07scanner/download/products/utm-30lx-ew/> (2012).
- [18] 平湯秀和: 測域センサを用いた三次元モデリング手法の検討 (第 2 報), 岐阜県情報技術研究所研究報告, Vol. 1, No. 12, pp. 44–46 (2010).