

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年5月17日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560437

研究課題名（和文） 可搬型3次元環境形状計測装置に関する研究

研究課題名（英文） A Study on Portable 3D Environment Mapping System

研究代表者

大矢 晃久（OHYA AKIHISA）

筑波大学・システム情報系・准教授

研究者番号：30241798

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、人間が携帯して利用可能な、環境の三次元形状計測システムを構築することである。走査型レーザ測距センサを高速に回転させながら、環境の三次元的な形状を計測する。このセンサシステムを人間が携帯し、最終的には周囲の環境に存在する形状の特徴を抽出し、人間に伝達することを目指す。本研究では、実際に人間が携帯可能な三次元形状計測システムを構築して実験を行い、その実現可能性と有用性を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is to construct a portable 3D environmental shape measurement system. The 3D shape is measured by quickly rotating the scanning laser range sensor. It will be used to inform the features of the environmental shape. In this study, an experimental system was developed and its feasibility and usefulness were examined through experiments.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合 計
2009年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2010年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2011年度	900,000	270,000	1,170,000
総 計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学、計測工学

キーワード：計測システム、三次元計測、知能ロボティクス、レーザ距離センサ

## 1. 研究開始当初の背景

通常的生活環境の中には、階段などの段差や電柱等、健常者にとっては別段気にしないようなものであっても、視覚障害者にとっては危険となるものが多く存在しており、視覚障害者の外出を妨げる大きな一因となっている。視覚障害者の行動を支援するシステムとしては、盲人用ガイドロボットの研究が盛んに行われてきた。これらの多くは人間がロボットにつかまり、ロボットが人間を誘導す

るというものであるが、人間の手が塞がってしまい、さらに移動できる範囲がロボットの走破性に依存してしまう問題があった。

そこで本研究では、周囲に存在する危険などの環境情報を提供可能な視覚障害者用立体視覚補助システムの構築を目指し、携帯するだけで環境の立体形状情報を構築可能なシステムを提案する。本システムでは、人間が走査型レーザ測距センサを用いた3Dスキャナを装備し、歩きながら得られる計測デー

タを逐次蓄積していくことで環境の三次元形状情報を取得する装置を実現する。

## 2. 研究の目的

本研究で最終的に目指しているシステムの概要は次のとおりである。人は胸部に 3D スキャナを装着し、バッグにノート型等の小型 PC を持ち歩く。そして、スキャナは人の前方の環境を常にスキャンし続け、得られた計測データを PC に受け渡す。PC は受け取った情報から環境に関する三次元形状情報を復元し、障害物や危険区域の位置や大きさ、範囲を推定し、それらを音声によって人間に伝える。

このようなシステムを実現するために必要な技術要素は以下のとおりである。

### (1) 環境の三次元情報の取得

環境中の障害物や危険区域を発見するためには、まず正確な環境の三次元情報が必要である。移動しながら環境の計測を行うことになるので、刻一刻と変化するスキャナの位置姿勢を推定しつつ、得られる計測データの蓄積を行う仕組みが必要である。

### (2) 必要とする三次元特徴情報の抽出

環境中の障害物や危険区域の位置や大きさを人間に伝えるためには、得られた環境の三次元情報から障害物や危険区域などの特徴を抽出しなければならない。

本研究では、上記のうち、とくに(1)の問題に焦点を当て、実際にシステムを構築して実験を行い、その実現可能性と有用性を明らかにすることとし、どの程度正確な形状を計測可能かという点について検討した。

## 3. 研究の方法

本研究は、平成 18~19 年度の科学研究費補助金基盤研究 (C)「移動中も計測可能な環境認識用レーザ測距システム」の成果である三次元環境計測システムを利用する。このシステムは、移動ロボットの位置・姿勢を元に三次元的な形状地図を作成するものであるが、本研究ではこれを人間が持って移動しながら同様の計測を行えるようにする。

人間が持って移動する場合、ロボットのようにセンサの位置・姿勢を簡単に得ることはできない。そこで、3D モーションセンサを用いて姿勢を計測する。また、位置は得られる計測データのマッチングをとることによって移動量を推定することによって行う。

## 4. 研究成果

### (1) 携帯型三次元測域センサ

環境中の形状情報を計測するシステムは、図 1 のように測域センサ・回転機構・モータ・

回転角計測モジュール・モーションセンサで構成した。人の手で携帯して運用することを前提に作られているため取っ手があり、総重量も 620g であるため持ち運びの負担にはならない。データ計測は、携帯型三次元測域センサと 12V のバッテリーとノート PC というシステムで行う。センサから出力されるのは、測域センサを基準とした相対的な距離情報と角度情報、回転角計測モジュールからの測域センサの回転角度情報、モーションセンサからの姿勢情報である。

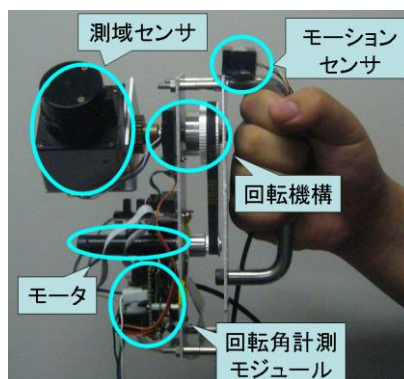


図 1 携帯型三次元測域センサの構成

携帯型三次元測域センサでは外界センサとして MUG-04LX (以降、MUG と記述する) という測域センサを搭載した。測域センサとは、環境認識用の光走査式距離センサ (LRF) の総称で、この MUG は北陽電機製の測域センサ URG-04LX (以降、URG と記述する) をベースに改造が施されたものである。URG からの変更点は、角度分解能が倍の約 0.70deg になった点、走査時間が半分の 50ms/scan になった点、走査角度が 180deg になった点の計 3 点である。URG は小型軽量が特徴で、本研究のような携帯用途に用いるには最適なセンサである。

携帯型三次元測域センサには、センサの姿勢推定の補助のためにモーションセンサが取り付けられた。使用したのは NEC-TOKIN 社製の MDP-A3U9S で、これには三軸ジャイロ、加速度センサ、地磁気センサが搭載されている。これら 3 つのセンサの値を用いて、センサの姿勢を Z-Y-X オイラー角で出力する。

測域センサは、二次元平面内の計測を行うものである。そのため、この三次元測域センサでは図 2 のように測域センサ自体を回転させることによりスキャン面を変化させ、三次元の計測を可能にしている。測域センサをモータによって回転させ、半円状のスキャン面を半球状にする。測域センサを回転させる際、通常の配線ではある程度回転した時点でケーブルが絡んでしまい回転が止まってしまう。そこで、ケーブルをスリップリングに通

すことにより、測域センサの無限回転を実現している。測域センサを回転させると、その姿勢は常に変化していることになる。そのため、各計測データがどの時点のどういう姿勢の時に計測されたデータであるのかを把握する必要がある。その役目を果たすのが回転角計測モジュールである。このモジュールでモータエンコーダのパルスをカウントし、センサの回転角度を計測している。初期位置の検出にはフォトインタラプタを利用している。

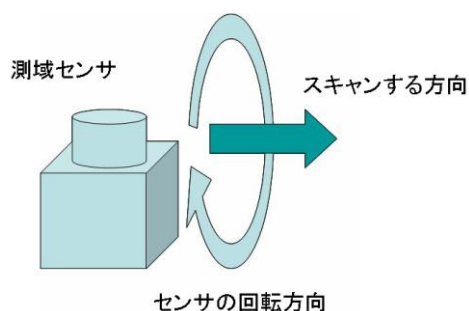


図2 回転する測域センサのイメージ

## (2) データ計測

データ計測時に三次元測域センサは以下の情報を出力する。

- ・測域センサからセンサを基準とした周囲の物体の相対的な距離と角度情報
- ・回転角計測モジュールから回転する測域センサの回転角度情報
- ・モーションセンサから姿勢情報

これらの情報が、USBで接続されたPCから要求がある度に三次元測域センサから送り出される。その情報を元に三次元空間上に各計測点をプロットしたものが立体地図となる。

図3のようにパーティションを一枚配置し、それを三次元測域センサで計測した結果を図4に示す。手ぶれ等の影響を受けないようにセンサは固定した状態で計測を行った。



図3 計測に使用した環境

図4の下図から見て取れるように、本来は一本の点列として計測データが得られるはずのパーティションに厚みが発生している。計測したパーティションと三次元測域センサは約4500mm離れており、MUGのスペックでは1000mm以上離れたときは誤差 $\pm 1\%$ となっているので、理論上生じる最大誤差は100mm弱であるが、パーティションの計測データの中で最も厚くなっている部分は約80mmであった。想定範囲内に誤差が収まっており、この結果から測域センサを回転させることによる計測誤差の増大等は起こらないと判断できる。

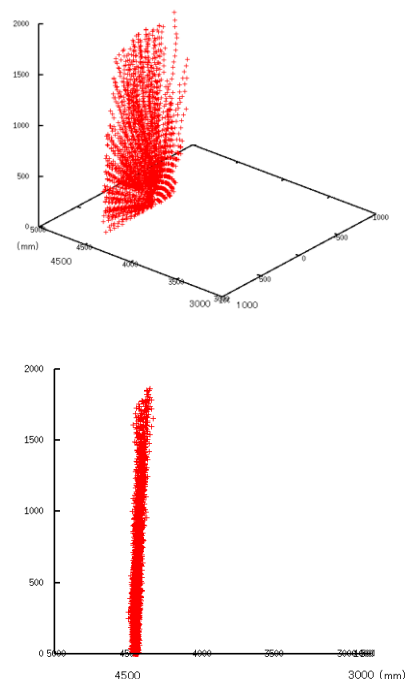


図4 パーティションの計測結果（上：計測データの正面、下：計測データの側面）

データ計測の際に発生する手ぶれに関して、センサの姿勢の変化をモーションセンサによって補正できるかを検証するため、モーションセンサの調整及び評価を行った。結果、センサは静止しているにもかかわらずyaw角の値が不規則に乱れた。これは、モーションセンサのすぐ近くを流れるモータの電流の影響で地磁気センサの値が狂い、結果としてyaw角の値がおかしくなると考えられた。そこで、地磁気センサを利用しない状態での姿勢計測の実験を行った結果、手の微妙な動きに反応しつつ、センサを横倒しにしたときにほぼ90degをきちんと出力するように調整できた。誤差に関しては、2deg以内に収まっていた。ただ、yaw角に関しては地磁気センサを切っているため三軸ジャイロ単体での算出となるため精度が悪く、また地磁気センサ



は累積誤差の修正にも関わっているため、時間の経過と共に誤差は増えていった。結論として、手ぶれにより発生する roll 角と pitch 角の変化に関しては、モーションセンサの値を用いて補正できると判断した。yaw 角方向に関しては、モーションセンサの値が信頼できないため、何らかの別手段を用意する必要があった。

### (3) 自己位置・姿勢の推定

三次元測域センサは、自身がどこにいるのかを表す 3 つの変数( $x, y, z$ )と、どういう姿勢でいるかを表す 3 つの変数(roll, pitch, yaw)を持っており、それによって自身の状態を特定する。測域センサから得られる周囲の環境の距離データはセンサを基準とした相対的な情報であるため、センサの位置・姿勢は常に把握している必要がある。

三次元測域センサの姿勢が常に変化していることを踏まえ、計測データには姿勢情報を加味した補正を掛ける必要がある。そして、その処理は自己位置推定や地図作成等の処理より先んじて行わなければならない。これを怠った場合、自己位置推定時のマッチングのミスを誘発したり、地図作成の際に誤った繋げ方をして地図を歪めてしまう恐れがある。3 つの姿勢情報の内、roll 角と pitch 角はモーションセンサから各計測時点での正確な値が送られてくるため、それをそのまま利用することができる。yaw 角に関しては、モーションセンサの値が利用できないため、ここでは座標変換は行わない。なお、センサの姿勢に関しては Z-Y-X オイラー角で定義しているため、変換する順番は roll、pitch の順である。この順序を間違えると結果が変わってしまう。ここでの処理を終えることで、各時点でバラバラのセンサ姿勢で記録された計測データの点を、センサ姿勢が床面に垂直な状態で計測した点として変換することになる。これ以降のマッチングや地図作成の処理は、全て変換が完了した計測データを用いて行う。

変換の終わった計測データの幾何的特徴を利用してスキャンマッチングを行い、センサの位置( $x, y$ )と姿勢(yaw)の算出を行う。センサから得られた複数の計測データを重ね合わせる(マッチングする)ことによって、自身の位置や姿勢を算出することをスキャンマッチングと言う。2 つの重なっていない計測データがある時、一方の計測データを基準にしてもう一方の計測データの位置や姿勢を変化させることで 2 つをマッチングする。その変化量によって基準となるデータからどの程度移動したときの計測データなのかが算出でき、計測者の位置・姿勢が判明する。また、マッチング後の 2 つのデータを合成することで、基準となった計測データに新たな

点が追加され、これを繰り返すことで地図が作られる。マッチングを行うアルゴリズムは様々な種類があるが、本研究ではマッチングの代表的なアルゴリズムである ICP (Iterative Closest Point) を用いてマッチングを行うこととした。ICP スキャンマッチングは、スキャンマッチング中の分類では、初期値が必要な「局所的」で 2 つの計測データをマッチングする「逐次型」に分類される。ICP のアルゴリズムは、対応点間の評価値が最小になる相対姿勢を繰り返し計算により求める手法である。ここで言う評価値とは距離の二乗和であり、対応点とは最近接点のことである。このアルゴリズムでは、

1. 同時変換(一回目のループの時は初期値を使用)
  2. 対応点探索
  3. 評価値を最小化する同時変換を求める
- という流れを収束するまで繰り返す。

なお、本研究はデータ計測を人間の手で行うためロボットのようにオドメトリは利用できず、ICP を行う際の初期値には前回の自己位置を用いている。上記のアルゴリズムをプログラムとして実装し、それが機能するかを実験にて確認した。パーティションを並べて図 5 のような環境を作り、三次元測域センサを手にとって移動しながらその中を移動し、得られた計測データから自己位置推定を行って、移動軌跡を算出した。なお、この実験では測域センサは回転させず、センサのスキャン面は床に水平な状態で固定されている。(ただし、手ぶれの影響はある。)これは、マッチング間の補間などのスキャンマッチングとは直接関係ない要素の影響を極力排除するためであり、センサを回転させた状態でのスキャンマッチングは後述する地図作成の時に実験を行っている。



図 5 計測に使用した環境

マッチングの結果が図6である。壁に多少の厚みはできてしまっているが、位置推定による移動軌跡についてはほぼ正しく算出されている。この実験の結果から、三次元の計測データの場合でも、スキャン面が床に水平になった時のデータを抜き出してスキャンマッチングを行えば自己位置推定が可能であると考えられた。

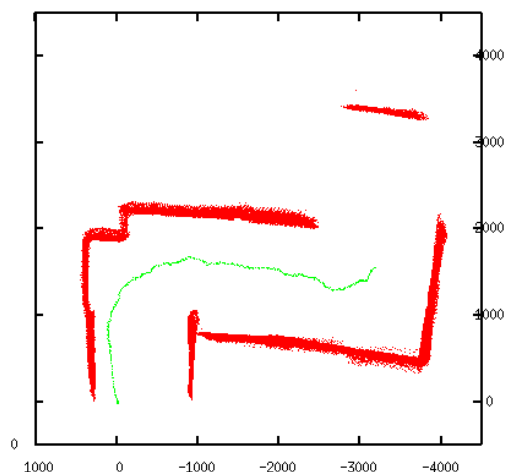


図6 自己位置推定の結果

$x$ ,  $y$ ,  $yaw$  を水平方向でのスキャンマッチングにより算出したことと同様に、 $z$  に関しては垂直方向の計測データからのスキャンマッチングによって算出する。計測開始時点でのセンサの位置  $z$  を 0 と設定して基準する。マッチングの際に  $pitch$  角の値も算出できるが、本研究ではモーションセンサの値で十分な精度がある判断して利用はしていない。

#### (4) 立体地図作成

本研究では、スキャンマッチングはスキャン面が水平か垂直になった時のみ行われるようにしている。もちろん、厳密にそうなることは稀であるので、実際にはある範囲内にスキャン面が入った場合にスキャンマッチングを行うというようにしている。センサの一回転が約 1.3 秒であることと、一回のスキャンにかかる時間が 50msec であることから、一回のスキャン毎にセンサのスキャン面は約 14deg 回転するということで、マッチング実行範囲を、水平垂直共に 15deg と設定し、各周回毎に必ずスキャンマッチングが起きるようにした。

あるマッチングとその次のマッチングの間には、最低でも 0.65sec の間隔が存在することになる。そして、マッチングが行われていない間にも計測者は移動していると考えられる。そのため、何らかの形でそのブラン

ク部分を埋める必要がある。本研究では、線形補間によってマッチングの隙間を埋めるという方針を立て、地図作成プログラムの実装を行った。

補間が正確に機能しているか、また水平時と垂直時の計測データを抜き出してのマッチングで自己位置推定ができるのかを検証するため、地図作成実験を行った。図7のように柱とパーティションでコの字型の環境を作り、そこで三次元測域センサを持って移動しながら計測を行い、そのデータを元に地図の作成を行った。ここではセンサも回転させた。

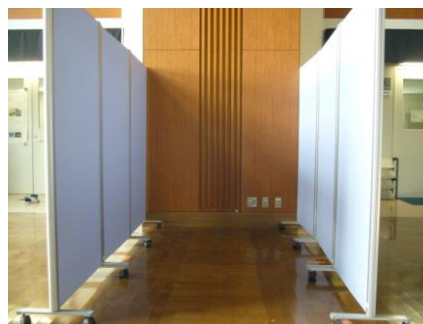


図7 実験で使用した環境（その1）

結果は図8のようになった。簡単な環境であるためマッチングに関しては問題なく成功し、自己位置の推定が実現できた。補間に関しては、概ね期待通りの効果はあったものの、計測者の人間が等速で動くことはできないため、地図に多少の歪みは生まれてしまった。今回の実験では、最大で 100mm 弱の厚みがある箇所があった。

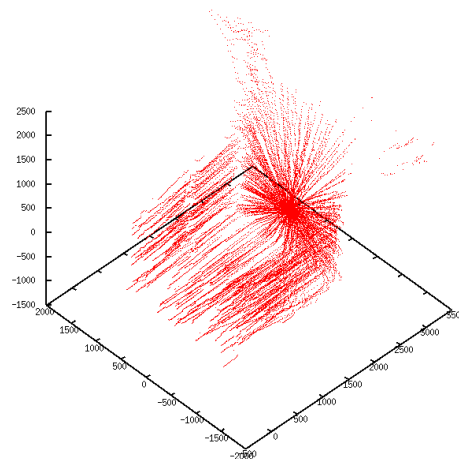


図8 地図の作成結果（その1）

2つ目の実験として、図5の環境で今度はセンサを回転させながら計測を行って自己位置推定と地図作成を行った。その結果が図

9 である。今回の実験でも、自己位置の推定は正しく行うことができた。センサの回転を止めている時と比べるとマッチングに失敗する確率は上がり、マッチングの間隔はのびてしまっているものの、完成した軌跡は計測時に辿った軌跡をほぼ正確になぞることができている。問題点は、マッチング間隔が広がったことにより、補間により生じる誤差の影響が大きくなったことである。今回の実験では最大で 200mm 程の厚みが出来ている箇所が存在した。効率の良い補間方法などは研究の本筋からは少し外れるものの、マッチングの間隔が開きやすい三次元計測の欠点でもあるため改善すべき課題である。

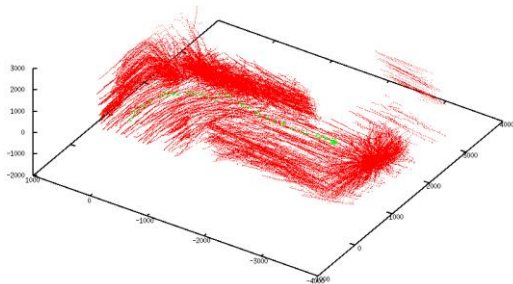


図 9 地図の作成結果（その 2）

## 5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔学会発表〕（計 2 件）

①八木秀憲、大矢晃久ほか、三次元測域センサを用いた人間検出、第 11 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会、2010 年 12 月 23 日、東北大学（宮城県）

②腰原裕一、大矢晃久ほか、複数の鏡と測域センサを用いた高速な人数／形状計測システム、第 10 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会、2009 年 12 月 26 日、芝浦工業大学（東京都）

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

大矢 晃久 (OHYA AKIHISA)

筑波大学・システム情報系・准教授

研究者番号：30241798