

レーザレンジファインダによる反射強度と位置計測を用いた床上センシングシステム

○表 允 哲 長谷川 勉 (九州大学) 曾 昉 (北京航空航天大学)
辻 徳生 諸岡 健一 倉爪 亮 (九州大学)

1. はじめに

一般家庭、介護施設等の日常環境で生活を支援するロボットには、自己位置と周囲の状況(人、物品の位置、壁などの障害物等)を把握する機能が不可欠である。しかし、複雑で動的に変化する日常環境では、ロボット搭載センサのみでこの機能を実現することは困難である。そこで、我々の研究グループでは、ロボットの作業を支援する環境情報構造化プラットフォーム(ロボットタウン)の研究開発を進めている[1]。これは、環境に分散配置したセンサ群により、環境内の移動体や物品の情報を取得し、環境構造を記述した地図情報を併せて管理するものである。これによりロボットは生活支援に必要な情報を取得できるようになる。本論文では、構成要素の一つである床上センシングシステムについて述べる。

床上センシングシステムは、室内生活空間に設置し、最小限のセンサによる生活行動と環境変化の計測を狙いとしたものである。これにより居住者の生活行動、家具配置、車椅子やワゴンあるいはロボットなど移動体の位置姿勢計測、ならびに床上放置小物品の検出と位置計測を可能にする。これまでに、床上に設置したレーザレンジファインダ(LRF)を用いて、床上に現れる人の歩行軌跡、ロボット、家具什器、小物の配置変化を計測するシステムを構築している[2]。これは、LRFを1個設置するだけでよいため、設置や保守のコストが低いうえ、居住者の全身を撮像するカメラを使用しないため、プライバシーの確保ができる。しかし、距離情報のみで物体の識別を行うことは難しい。対象の輪郭形状の一部しか得られないので外形が似ている物は識別できない。また、接近して配置された物体の分離が困難、あるいは、ワゴンや車椅子のように複数の車輪を持つ物体を複数の物体として認識する、さらに、オクルージョンが発生するなどの問題があった。

本論文では、LRFから取得できる距離情報と共に反射強度を利用して床上の物体の識別を行う手法を提案する。LRFの反射強度は、対象物表面の光学特性、距離、入射角に依存する。これを距離、入射角に対して正規化し、物体の固有の拡散反射係数を求める。その後、距離値から得られる物体の外形、および固有の拡散反射係数を利用して、物体識別を行う。材質による反射係数の違いが十分大きくない場合は、再帰反射材でできたテープを貼付する。再帰反射材は、交通標識などに用いられる強い反射が得られる材料である。物体表面の透明塗装中に微小ガラス球などを埋め込むことにより入射光と同じ方向に反射を返す。ロボットや車椅子などは常に床に接地しその対地姿勢が一定なので、

床面から一定の高さのレーザが照射される部位にこのテープを貼付することにより、他物体との反射特性との差が大きくなり容易に識別できるようになる。さらに、再帰反射材を用いて反射強度をコード化したタグを開発した。このタグをレーザスキャナで読み込むことにより、ロボットなどの姿勢計測が可能になった。

2. 壁面ミラーとLRFによる床上レーザスキャニングシステム [2]

LRFを、そのレーザ掃引面が床面と平行、床面直上(約25mm)になるよう壁際に配置する。壁面のうち床に接する部分に、長尺のミラーを固定配置する(図1)。これにより、LRFのレーザビームが反射し、床面直上を走査することになる。LRFからの直接ビームと、ミラーによる反射レーザビームの両者が掃引する領域が計測領域となる。

物体が床上に存在していないときは、LRFでは対向する壁までの距離が得られる。物体が置かれたときは、その物体の反射特性の違いによりレーザ計測距離に変化が生じたり、距離が得られなくなる。



図1 床上レーザスキャニングシステム

1. レーザ反射により距離が得られる物体
：紙、木材、プラスチックなどではLRFで奥行き距離が得られるので、レーザビームの角度とを合わせて、床上位置が計測できる。
2. 暗黒色など反射が得られない物体および金属光沢など全反射や拡散によりレーザ反射が得られない物体
：LRFからは当該物体の存在方向の奥行きが得られなくなる。しかし、鏡による反射レーザからの奥行きも得られなくなるので、これら奥行きが得られないレーザビームの交点にその物体が存在することが分かるし、その位置も計算できる。

3. 生活環境におけるレーザ反射特性

LRF からはレーザ照射点までの距離だけでなく、その点の反射強度が得られる。この反射強度を物体の識別に利用する手法について述べる。



図 2 生活環境

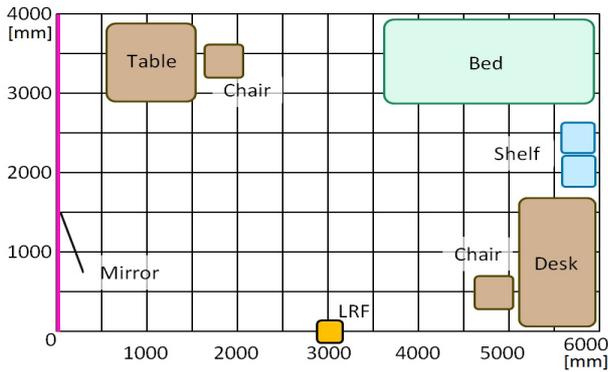


図 3 生活環境の平面図

3.1 生活環境にある日用物品のレーザ反射特性

対象とする生活環境 (図 2, 図 3) には、木、紙、プラスチック、木材などの素材でできた種々の物体が存在する。物体毎のレーザ (LRF 赤外レーザ) に対する反射特性を図 4, 図 5 に示す。

3.2 反射特性の正規化

LRF から取得した反射強度は図 4, 図 5 に示すように距離、入射角に依存している。これを距離、入射角に対して正規化することで、物体の固有の正規化反射強度を求めることができる。物体毎の距離 r および入射角 α に対する反射強度の実験の結果から、距離の近い部分 (800mm 以下) を除き、カーブの当てはめを行い (1) 式を得た。これから距離、入射角の影響を除去した式 (2) を用いて、物体の識別に利用する。

$$Intensity = K_d I_q \frac{\cos(\alpha)^{0.196}}{r^{0.287}} \quad (1)$$

$$IntrinsicIntensity = Intensity \frac{r^{0.287}}{\cos(\alpha)^{0.196}} \quad (2)$$

K_d = 拡散反射係数

I_q = 光源の強さ

α = 表面法線方向に対する入射角

r = 光源からの距離

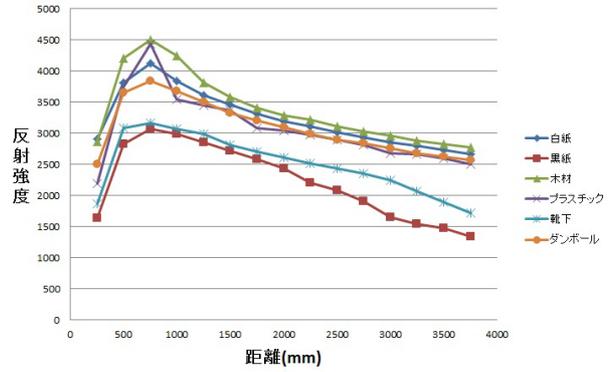


図 4 物体毎の距離に対する反射強度

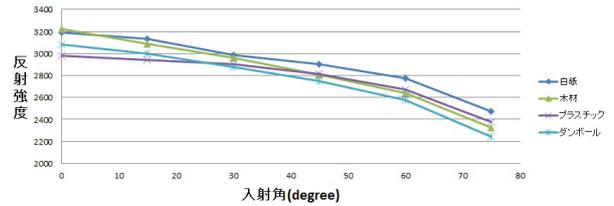


図 5 物体毎の入射角に対する反射強度

環境内に日用品を配置したときの距離および反射強度と、式 (1), (2) を利用した正規化の効果を実験で調べた。LRF の前方 2~3m の床面に木材、赤いポリバケツ、緑のプラスチック製掃除用具、段ボール箱を配置したとき (図 6) の各物体表面から得られた距離値 (図 7), 反射強度 (図 8), 距離で正規化した反射強度 (図 9) である。強度差があるものであれば識別できることが分かる。

3.3 再帰反射材の貼付による反射特性の拡張

物体毎のレーザ反射特性に十分な差がないときはそれらを正規化反射強度のみで識別することはできない。そこで、とくに識別したい対象には、再帰反射材でできたテープを貼付する。これにより、反射特性の差が大きくなり、反射強度のみで識別できるようになる。

実際にどのように反射強度を変えることができるか実験を行った結果を図 10 に示す。再帰反射材をつかうことにより、他の日用品と反射強度差が明確に表れている。



図 6 実験対象および配置

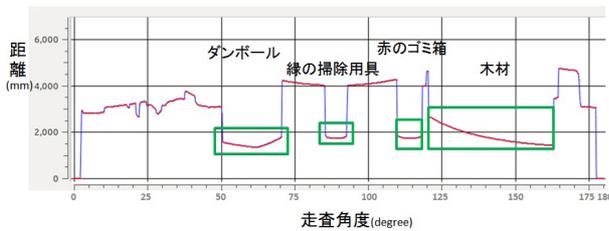


図 7 物体毎の距離

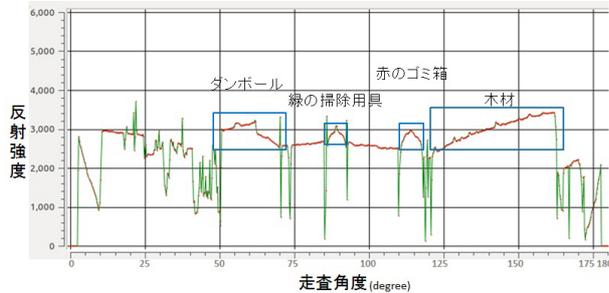


図 8 物体毎の反射強度 (正規化なし)

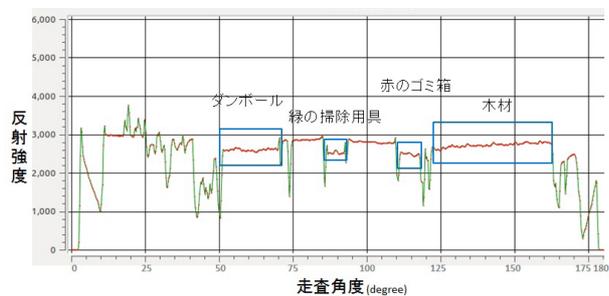


図 9 物体毎の反射強度 (正規化あり)

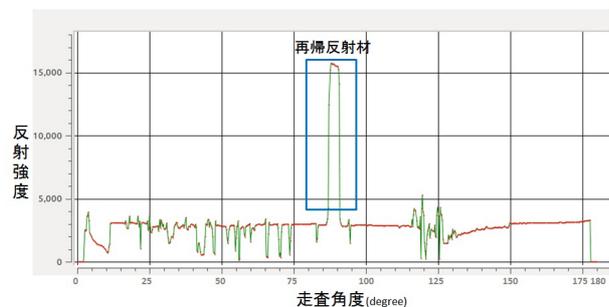


図 10 再帰反射材の反射強度

あり、それも他の物体に隠されることもある。また、居住者による椅子着座やテーブルへの接近の際など、複数のクラスタの分離が困難になることも多い。このため、対象物識別や追跡を実時間で正確に実行するのは容易ではない。

これらの問題を解決するため、対象表面から得られる位置情報に加え、反射強度を利用して識別を行う。すべてのクラスタの識別ができるわけではないが、識別可能なものを除くことができれば、残りのクラスタの識別処理は容易になる。

4.2 再帰反射材貼付による物体識別

生活環境内の椅子はしばしば動かされるし、ワゴン is そもそも移動して使用するものである。これらの脚部あるいは車輪など床面レーザがスキャンする位置に再帰反射材を貼付し、さらに必要に応じ、反射強度を調節するためのフィルムを上張りする。これにより、反射強度のみで識別できるようになる。

移動家具の脚部に再帰反射材を貼付した様子を図 11、図 12 に示す。見かけ上は気がつかない程度の軽微な加工であるが、LRF で得られた反射強度は明確に識別できる反射強度値になっている (図 13)。



図 11 椅子と再帰反射材



図 12 ワゴンと再帰反射材

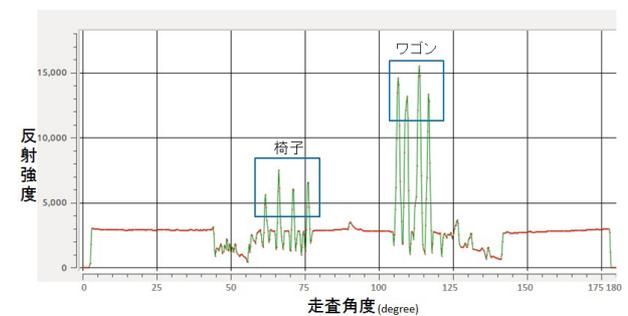


図 13 再帰反射材の反射強度

4. ロボットのための室内環境計測への応用

4.1 床上センシングによる環境情報構造化

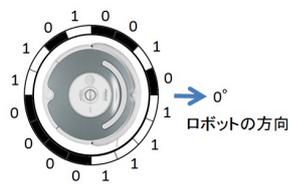
本システムの計測対象は、室内での居住者生活活動と環境変化であり、歩行軌跡、テーブルや椅子などの家具配置、手押し搬送ワゴンの位置、および床上に置かれた日用小物品である。LRF による距離測定点のクラスタが得られる。1 回の測定だけでなく、適当な時間の一連の測定データを用いれば、運動物体の軌跡の追跡もできる。

一方、計測できるのは、レーザスキャンで構成される光平面による対象の切断面のうち一部の輪郭のみで

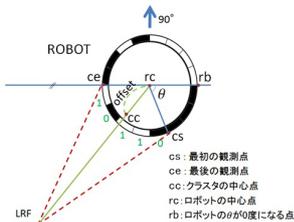
4.3 反射特性コード化によるロボット姿勢の計測

水平断面形状が、垂直回転軸に対して回転対称である物体は、LRF の距離データのみではその姿勢を決定できない。しかし、実際に断面が円またはそれに近い形状の移動ロボットは少なくない。そのようなロボットの姿勢を計測する方法を開発した。

テープの長さ方向に反射特性の強弱の縦縞をつけてコード化したものをロボットの筐体下部周囲に貼付しておく、コード化した部分に LRF のレーザを照射し反射強度および距離を計測して、姿勢と位置を計測する (図 14)。



[反射特性コード化したロボット]



[観測したコードと座標データ]

コード	姿勢	コード	姿勢
1111	0.0°	1101	180.0°
1110	22.5°	1010	202.5°
1100	45.0°	0100	225.0°
1000	67.5°	1001	247.5°
0000	90.0°	0010	270.0°
0001	112.5°	0101	292.5°
0011	135.0°	1011	315.0°
0110	157.5°	0111	337.5°

[コード表]

左の場合、ロボット姿勢の計測の例

- 1) θ を求める

$$\theta = \arccos\left(\frac{rc \cdot cs^2 + rc \cdot rb^2 - rb \cdot cs^2}{2 \times rc \cdot cs \times rc \cdot rb}\right)$$
 $\theta = 67.5^\circ$
- 2) コードの解析
 点csから点ceまでのコード="0110"
 コード"0110"の角度="157.5°" (コード表)
- 3) ロボットの姿勢
 $= 157.5^\circ - 67.5^\circ$
 $= 90^\circ$

[ロボット姿勢の計測の例]

図 14 反射特性コード化の原理図

5. 実験

椅子とワゴンに再帰反射材を貼付し、反射強度のみで識別できるようにして実験環境 (図 2) に配置した。また、反射強度をコード化したタグを貼り付けて、位置や姿勢を計測できるようにしたロボット (ルンバ) を動作させた。この環境内で、2人が歩行し、ワゴンを押したり、椅子に着座したりする状況 (図 15) での計測と識別の実験を行った。壁面ミラーと LRF による床上レーザスキャニングシステムで得られたデータ (図 16) では、左奥や中央奥などでノイズや測定点の近接などが生じているが、人、椅子、ワゴン、小物などが識別できている (図 17, 図 18)。現在は、人の足は、簡単な歩行モデルと継続的な計測により動きから識別している。歩いている途中で、かばん、ボトルなどの小物を床に置いた時でも、それらが足でなくそれ以外の小物であることを識別できている。また円形ロボットの位置と姿勢の識別および計測もできている。



図 15 実験環境

6. 結び

LRF の反射強度と位置計測のデータを用いた床面センシングシステムについて述べた。1つの LRF と細帯状のミラーを床直上の壁面に配置しただけで、

1. 机、テーブル、椅子などの家具の配置
2. ワゴン、ロボットなど移動体の識別と位置計測
3. 人の歩行追跡
4. 床上に置かれた物品の検出と輪郭計測

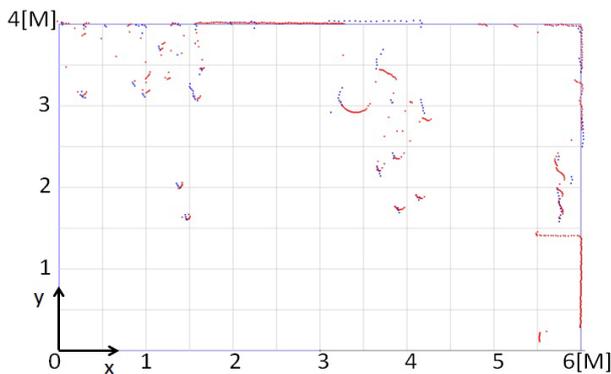


図 16 取得した LRF データ

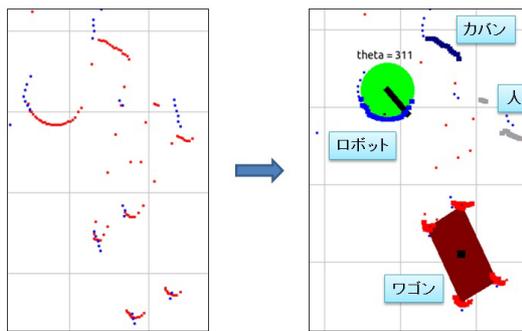


図 17 識別と計測の結果の一部拡大図

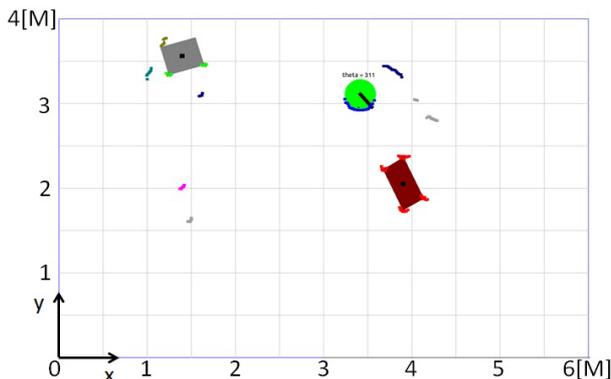


図 18 識別と計測の結果

ができる。床上にある限り、多様な大きさ、形状を有する物体が検知・計測できる。床面圧力センサで検出できない軽量物体でも検出できる。このほかにも提案システムは多くのメリットを有している。まず、センサデバイスは1つだけでよいので、初期コスト、保守コストともに小さいうえ、環境内物体への追加加工も、必要最小限の部分への小さな再帰反射テープの貼付のみでよいので美観を損ねることもほとんどない。そのうえ、居住者の全身を撮像することはないのでプライバシーの侵害も極小である。

参考文献

- [1] 長谷川勉：“環境プラットフォーム「ロボットタウン」”，日本ロボット学会誌，Vol.26 No.05，pp.23-26，2008
- [2] 長谷川勉，野原康伸，村上剛司：“生活環境における日用品情報構造化のための床面センシングシステム”，日本ロボット学会誌，Vol.28，No.9，pp.1144-1147，2010