

## 超音波センサを用いた隠れた物体を含む3次元シーンの推定

安井康貴 坂上文彦 佐藤淳

名古屋工業大学

## 1. はじめに

センサの直線上にない隠れた物体のセンシング手法である NLOS センシングは、自動車の安全支援システムや自動運転への応用が期待されている。一般的な NLOS センシング [1]では、指向性の強い光学センサを用いる。しかし、光学センサを用いる手法では外光や霧などの影響を受けやすく屋外シーンでの実用が困難であるという問題がある。一方、自動車には距離情報を取得する装置として、超音波センサが搭載されている。このセンサは雨や霧といった環境下や、光の当たらない暗闇の中でも情報を適切に取得できる。しかし超音波センサを用いた距離計測技術では、複数物体の位置や物体の形状、大きさを計測することはできないという問題がある。また、従来の超音波センサは1次反射しか想定していないため、隠れた物体を正しく検知することができない。そこで本研究では、超音波センサから得られる情報のみを用いた NLOS センシング手法を提案する。

## 2. 観測信号のモデル化

## 2.1. 超音波の反射モデル

一般的な物体に対して超音波を照射した場合、物体表面上の凹凸が超音波の波長と比較して小さいため、物体法線の正反射方向で強く音波が観測される。このような反射を鏡面反射と呼ぶ。ここで、ある平面を介して隠れた物体に対して超音波を照射した場合、隠れた物体で反射して超音波センサで計測される反射波は物体表面および平面で鏡面反射した音波のみであると考えられる。この時、超音波センサから隠れた物体までの入射経路と隠れた物体から超音波センサまでの反射経路は同じ経路となる。ここで、鏡面反射を起こす平面に対して隠れた物体を面対称移動した位置に仮想物体が存在すると考えると、隠れた物体からの反射波は仮想物体での反射波と等しくなる。よって、このような仮想物体を含むシーン中に存在する平面を全て推定することができれば、そこから順次仮想物体を隠

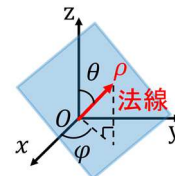


図 1: 平面を表現するパラメーター

れた物体として復元していくことで、隠れた物体の位置と形状を推定できる。

## 2.2. 3次元平面の表現

本研究では3次元シーンが平面で構成されていると仮定して、その復元を行う。3次元空間中の平面 $S$ は原点と平面の距離 $\rho$ と図1のように定義した $\theta$ ,  $\varphi$ を用いて次式で定義できる。

$$x \sin \theta \cos \varphi + y \sin \theta \sin \varphi + z \cos \theta = \rho \quad (1)$$

よって、この3つのパラメーターを変化させた時、各平面がシーン中に存在するか否かを判定することで、3次元シーンを構成する平面を推定する。

## 2.3. 確率モデルに基づく観測表現

次に、シーン中の平面が観測信号に与える影響を考える。超音波センサからの距離が $d$ の領域に着目すると、受信される観測信号の振幅は、センサから距離 $d$ の位置に存在する物体により反射された音波の強さの合計となる。ここで、センサから距離 $d$ の位置に存在する点 $X_d$ とその点を通る平面 $S$ を用いて、以下の関数 $\delta$ を定義する。

$$\delta(X_d, S) = \begin{cases} 1: \text{点} X_d \text{を通る平面} S \text{が存在} \\ 0: \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

平面 $S$ 上の点 $X_d$ での反射波の振幅を $I(X_d, S)$ と表すと、ある距離 $d$ に対応する時間 $t_d$ における観測信号 $I(t_d)$ の振幅は次式のようになる。

$$I(t_d) = \sum_{X_d} \sum_S \delta(X_d, S) I(X_d, S) \quad (3)$$

ここで、 $\delta$ を安定に推定することは難しいため、この関数を確率で近似表現することを考える。点 $X_d$ に物体が存在し、その物体表面が平面 $S$ であるような確率を $P(X_d, S)$ として表現する。これを用いて式(3)を次式のように書き換える。

$$I(t_d) = \sum_{X_d} \sum_S P(X_d, S) I(X_d, S) \quad (4)$$

ここで、距離 $d$ の点を通る全ての平面から音波が反射された場合の振幅を以下のように定義する。

NLOS Sensing by Ultrasonic Sensors

Koki Yasui Fumihiko Sakaue Jun Sato · Nagoya Institute of Technology

$$I_{all} = \sum_{X_d} \sum_{S} I(X_d, S) \quad (5)$$

このとき、距離 $d$ の点を通る全ての平面が存在する確率が均一であるとすれば、 $P(X_d, S)$ は以下のように決定できる。

$$P(X_d, S) = \frac{I(t_d)}{I_{all}} \times I(X_d, S) \quad (6)$$

これにより、シーン中の平面 $S$ が存在する確率を決定できる。

次に、 $K$ 台のセンサから得られる平面の存在確率を考える。超音波センサ $k$ における点 $X_d$ を通る平面の存在確率が $P_k(X_d, S)$ として得られているものとし、また各センサより得られる情報がそれぞれ独立しているとする、点 $X_d$ を通る平面の存在確率は以下のように定義できる。

$$P_m(X_d, S) = \prod_k P_k(X_d, S) \quad (7)$$

これにより、全ての超音波センサから得られる情報を用いて、平面の存在確率を推定することができる。

### 3. 3次元シーンの推定

以上のように推定された平面の存在確率に基づき3次元シーンを推定する。本研究では、平面のパラメーターにより構成される3次元空間において、平面の存在確率が極大値となる点を3次元シーンを構成している平面として決定する。また、このように推定された平面から、幾何的な位置関係を考慮することで、反射により生じた仮想物体であるか実在する平面であるかを判別し、最終的なシーン形状を決定する。

## 4. 実環境実験

### 4.1. 実験環境

提案法により、隠れた物体を含むシーンの3次元形状を復元する実験を行った。本実験では3台の超音波センサを使用し、これらの超音波センサを前進運動させ3時刻分の観測信号を取得した。超音波センサには市販の送受信兼用センサを用いた。また、超音波センサと鏡面反射を起こす平面、隠れた物体は図2のように配置した。ここで、隠れた物体には人を模した人形を使用した。また、超音波センサと隠れた物体の間には吸音材を設置した。このような環境で、設置された平面および隠れた物体の位置推定を行った。

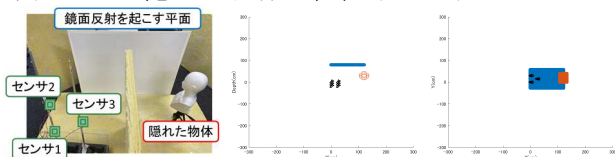


図 2: 観測シーン (a) XZ 平面 (b) XY 平面

図 3: 正解シーン

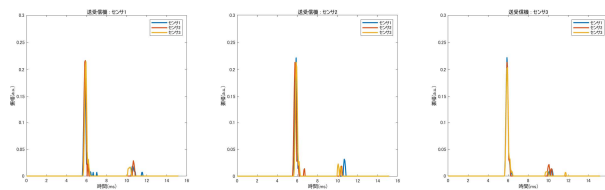
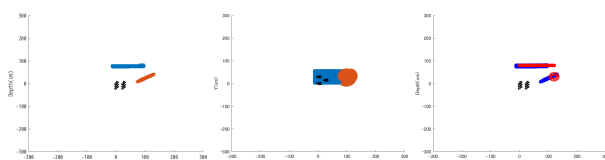


図 4: 観測信号



(a) XZ 平面 (b) XY 平面 図 6: 比較結果

図 5: 推定シーン

### 4.2. 結果

この実験で用いた3台の超音波センサから得られた観測信号の一部を図4に示す。これらの観測信号から3次元シーンを推定した結果を図5に示す。また、正解シーンと推定シーンを比較した結果を図6に示す。この図では、正解の復元結果を赤色で、推定された復元結果を青色で示している。この比較において、音波が反射した平面の位置推定の誤差は2.4cmであり、隠れた物体の位置推定の誤差は4.9cmだった。この結果から、平面と隠れた物体のどちらもおおむね正しく推定されていることが分かる。しかし、音波を反射する平面は実際よりも小さく推定されている。これは、鏡面反射を起こす平面にはセンサが適切に反射波を観測できない範囲が存在し、そのような範囲は推定が難しいことを示している。一方で、隠れた物体の形状は実際よりも大きく推定されている。これは、3台の超音波センサから得られる情報のみでは細かな形状を推定することが難しいことを示している。これらの問題は実験で用いる超音波センサの配置数を増やし、推定対象である3次元シーンから得られる情報量を増やすことで改善可能と考えられる。以上のことから、提案法を用いることで少ないセンサを用いた場合でも隠れた物体を含むシーン情報を適切に復元可能であることを確認できた。

### 参考文献

- [1] Xin, Shumian, et al. "A theory of Fermat paths for non-line-of-sight shape reconstruction." *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2019.