

平成 23 年度 卒業論文

バイナリセンサによる非凸型対象物形状推定

平成 24 年 2 月提出

指導教員 塩田 茂雄 教授

千葉大学工学部都市環境システム学科

08T0235B 高木 重希

目次

第1章 序論.....	- 1 -
1.1 研究背景.....	- 1 -
1.2 既存研究と本稿との関係.....	- 2 -
1.3 論文の構成.....	- 2 -
第2章 センサネットワーク.....	- 3 -
2.1 センサノード.....	- 3 -
2.2 センサネットワーク.....	- 3 -
2.3 センサノードのネットワーク形態.....	- 5 -
2.4 センサ配置.....	- 7 -
第3章 センシングエリア.....	- 8 -
3.1 センシングモデル.....	- 8 -
3.2 センサの対象物検出方法.....	- 9 -
3.3 センサの対象物検出エリア.....	- 10 -
第4章 対象物推定の提案方法.....	- 11 -
4.1 凸型対象物の形状推定方法.....	- 11 -
4.1.1 検出エリアと対象物の形状との関係.....	- 11 -
4.1.2 センサ密度一定における対象物形状推定.....	- 11 -
4.1.3 最小二乗誤差推定.....	- 12 -
4.2 非凸型対象物の形状推定方法.....	- 13 -
4.2.1 非凸型対象物について.....	- 13 -
4.2.2 非凸型対象物における理論式.....	- 13 -
第5章 シミュレーション評価.....	- 14 -
5.1 シミュレーション条件.....	- 14 -
5.1.1 シミュレーション条件.....	- 14 -
5.1.2 センサと検出閾値.....	- 15 -

5.1.3 シミュレーション条件の詳細.....	- 16 -
5.2 シミュレーション結果.....	- 18 -
5.2.1 シミュレーション結果：対象物面積推定.....	- 18 -
5.2.1-a 円形センサ.....	- 18 -
5.2.1-b 扇形センサ.....	- 19 -
5.2.1-c 推定値相対誤差.....	- 24 -
5.2.2 シミュレーション結果：対象物周囲長推定.....	- 25 -
5.2.2-a 円形センサ.....	- 25 -
5.2.2-b 扇形センサ.....	- 25 -
5.2.3 シミュレーション結果： c の値（4.2.2参照）.....	- 31 -
5.3 c の j 依存性（4.2.2参照）.....	- 32 -
5.3.1 c の算出式.....	- 32 -
5.3.2 c の j 依存性の検証.....	- 33 -
第6章 まとめ	- 34 -
参考文献	- 35 -
謝辞	- 37 -

第1章

序論

1.1 研究背景

近年、センサが取得した物理情報をセンサに搭載した通信機能を介して収集し、様々な分析や制御に用いるセンサネットワークが注目されている。センサネットワークの多くの研究では、センサのマルチホップ通信機能を仮定する。そのため各センサは短・中距離で広帯域の無線通信機能を備えることが望ましいのだが、このようなセンサは必ずしも安価なものとは限らない。

一方で、マルチホップ通信が不要であるセンサを用いた提案もなされている。この提案では、演算能力やメモリ容量に限界のある安価な低能力センサが利用でき、多数のセンサをランダムに配置するような利用法が可能となる。

後者のケースを想定し、測位機能を持たないバイナリセンサ（例えば対象物を検知したか否かの1bit情報を収集・通知する低機能な安価なセンサ）を用いた対象物の形状、面積を推定する技術が提案されている[1,2,3]。

センサ密度は電池切れや経年劣化に伴う故障により漸次減少すると考えられる。既存の研究では、センサ密度を推定しつつ凸型対象物の形状（面積、周囲長）を推定する技術が提案されている[4]。しかし、現実には対象物は必ずしも凸型であるとは限らない。

そこで、本研究では、新たに理論式を用い、センサ密度は既知とした状態で、非凸型対象物の形状を推定する技術を検討する。

センサは対象物からの受信ノイズを任意の検出閾値比較し、対象物を検出する。その条件を満たすセンサの存在範囲を表す関係式が存在する[2,3]。その式とセンサ密度を組み合わせることで、検出センサ数を表現することが可能となる。そこで、センサの検出を含めたシミュレーションによる提案方法の評価を行う。その際、対象物の形状、センシングエリアの形状、センサの密度、検出閾値などの条件を様々に変えてシミュレーションを行い、提案推定法の精度を確認する。

1.2 既存研究と本稿との関係

測位機能を持たないバイナリセンサを用いた対象物の形状、大きさを推定する提案は既に多く行われている。以下に述べる。

- －対象物とセンシングエリアが重なる面積を導出できるセンサを用いた、対象物の推定法の提案[5].
- －対象物を検出したかどうかという情報のみを得るセンサを用いる。対象物とセンシングエリアの両方が凸型、もしくはセンシングエリアが円形である場合の対象物の形状・面積推定法の提案[6].
- －[6]の拡張として、凸型でない対象物に対する推定法の提案[1]
- －2つのセンサの複合センサノード[7,8]を用いて大きさが異なる複数対象物のパラメータ推定法の提案[7].
- －センサの故障などの原因により、センサ密度は漸次減少すると考えられるため、実際には稼働中のセンサ密度を予め把握することは難しい。そこで、センサ密度を推定しながら凸型対象物の形状推定をする方法の提案[4].

これらの既存研究は、対象物が凸型に限定されているもの、センシングエリアが限定されている等の提案となる。本研究の新規性は、推定する対象物を非凸型形状に拡張することで、実用性を上げることにある。また、本研究の提案法では、凸型対象物の形状推定も行うことができる理論式を用いているという点も新規性として挙げられる。

1.3 論文の構成

以下、本研究の構成内容を述べる。

- 第2章 センサネットワークの概要について述べる。
- 第3章 センサ、センシングエリアの概要について述べる。
- 第4章 非凸型対象物の形状を推定するための提案方法を、凸型対象物の提案手法の概要と共に述べる。
- 第5章 シミュレーション実験を通じて、第4章で述べる、対象物の形状推定精度を確認する。また、推定精度の考察についても述べる。
- 第6章 本研究のまとめと今後の課題について述べる。

第2章

センサネットワーク

2.1 センサノード

センサノードとは、センサ・処理部・通信部および電源ユニットから構成され、検知したデータに何らかの処理を行った後、ネットワークを経由し他の場所に伝えるためのデバイス・端末である。センサ機能には以下のようなものがある。

ー環境やモノや人を観測・測定するセンサ

温度センサ，湿度センサ，加速度センサ，位置・角度センサ，圧力センサ，光センサ，磁気センサ，音波センサ等。

ー環境やモノを検知・検出するセンサ

ガスセンサ，光センサ，超音波センサ等。

ーモノの情報を読み取り識別するセンサ

指紋センサ，血流センサ，画像センサ等。

2.2 センサネットワーク

センサネットワークとは、センサノードが検出した情報をネットワーク経由で収集するシステムのことである。

センサノードは、技術の進歩により大きさが小さくなり、さらに、低価格・低電力が実現している。そのため近年では、進化したセンサノードを利用し、現在のセンサネットワークは構成されている[9][10][11]。センサネットワークを無線通信を使用し構成する場合、センサノードはバッテリーを搭載することにより、どこでも自由に配置することができる。ゆえにリアルタイムでの情報収集が可能となる。

センサネットワークは、医療健康，防犯・セキュリティ，防災，環境リスクへの対応等様々な分野で不可欠なものとなっている（図 2.1）。

以下にセンサネットワークのシステム例を挙げる。

一医療健康

どこでも健康管理が可能となり、心拍、血圧、体温などを常時モニタリングできる。その情報から個人ごとの健康診断を自動的に行う。異常が認められた場合には GPS などによる居場所特定情報を付加し、医療機関などへ自動的に通報し、救急車を現場へ急行させるようなシステム。

一防犯・セキュリティ

防犯センサにより、不法侵入者を検知するセンサネットワークに接続されたブザーや投光器による不法侵入者の威嚇を行う。また、カメラによる撮影などを自動的に行うと共に、あらかじめ指定された通報先へ電子メールなどで状況を通知するシステム。

一防災

災害発生時に、そのエリアにセンサを散布・配布し、これらがアドホックネットワークを形成しデータを収集する。水害、林野火災、土砂崩壊、液状化などの被害状況のモニタリングと、それに基づく最適な災害対策支援の実現に役立つ。また、火災などの災害時の現場状況把握と、被災者と救援者の位置把握により、比較的安全な経路への被災者の避難誘導を実現するようなシステム

一環境リスクへの対応

街中の大気、工場からのガス排出量、火山ガスの濃度などを常時監視し、行政、一般市民、研究者などへ情報提供をする。センサの監視データに基づく改善行政を支援するような環境モニタリングシステム。

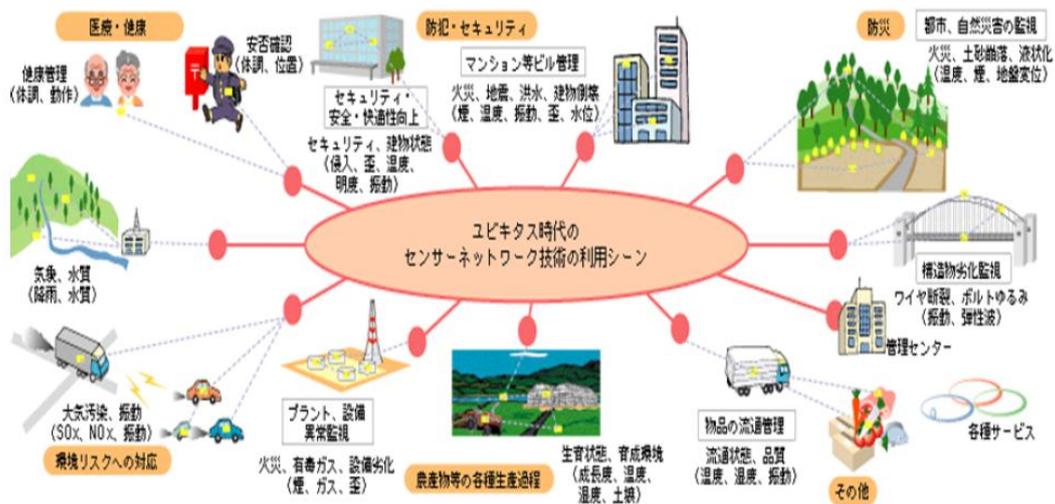


図 2.1 センサネットワーク技術の利用シーン

出展:<http://www.johotsusintokei.soumu.go.jp/whitepaper/ja/h16/html/G3802200.html>

2.3 センサノードのネットワーク形態

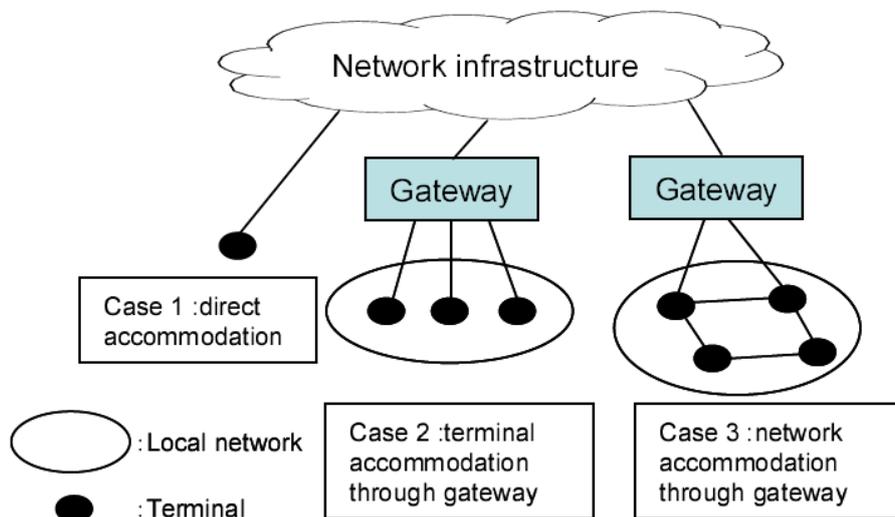


図 2.2 端末の收容形態

センサなどの端末收容の形態は、以下の3つに分かれている（図 2.2）。

- －直接收容。
- －ゲートウェイの端末收容，
ローカルネットワーク内の端末がゲートウェイとのみ通信する形態。
- －ゲートウェイのネットワーク收容，
ローカルネットワーク内の他端末とも通信する形態。

ネットワーク收容と端末收容の差は、ローカルネットワーク内で使用するプロトコルに依存する。ネットワーク收容のためには、Bluetooth、ZigBee などのマルチホップ機能を有するプロトコルを利用するか、ルーティングプロトコルを導入する必要がある。センサノード間でマルチホップ通信を行う場合、通信を行うセンサノードが互いに通信エリア内に存在する必要がある。孤立したセンサノードからは情報収集ができない（図 2.3）。しかし、ゲートウェイの端末收容の場合、各センサノードはマルチホップ通信を行わず、ゲートウェイとのみ直接通信を行うため、センサノードの通信エリア同士の連結性は不要である（図 2.4）。このような形態のネットワークは「広域ユビキタスネットワーク」と呼ばれる[12]。

直接收容の場合のネットワークインフラは、現状では、携帯電話網が最有力である。ゲートウェイ收容の場合のネットワークインフラは、インターネットアクセス網、あるいは携帯電話網とされる。表 2.1 にネットワーク收容形態の具体例を示す。

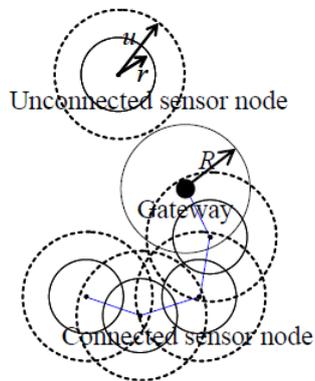


図 2.3 ゲートウェイのネットワーク収容.
 (r : センシングエリア半径,
 u : センサノードの通信距離).

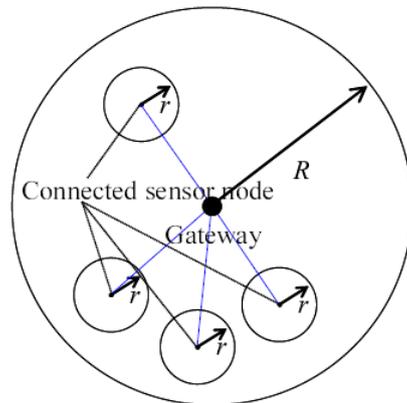


図 2.4 ゲートウェイの端末収容.
 (R : ゲートウェイの通信範囲,
 r : センサエリア半径).

表 2.1 ネットワーク収容形態の具体例.

	ゲートウェイ例	アクセス方法	端末例	用途例	特徴
直接収容形態	なし	携帯電話網パケット無線	宅内機器, 監視カメラ, 各種センサ	遠隔制御, 遠隔監視, センシング情報収集	単独性
ゲートウェイ収容形態	携帯電話機	携帯電話網パケット無線 +Bluetooth, ZigBee	ウェアラブルセンサ, ヘッドセット	センシング情報収集, コンテ ンツ転送	携行品, 移動性, 低消費電力, 小型
	カーナビ, モバイルデータ	携帯電話網パケット無線 +Bluetooth, 無線 LAN	車載センサ, 車載 DVD	センシング情報収集, コンテ ンツ転送	携行品, 移動性
	ホームゲートウェイ, PC	ADSL, FTTH+ 無線 LAN	宅内 AV 機器	遠隔保守, コン テ ンツ移動	固定性 (小移動), 高ビットレート

2.4 センサ配置

センサネットワークを構成するセンサの配置は，以下のようなケースが考えられる．

- －センサの位置を指定する場合．
- －センサの位置が等間隔である場合．
- －センサがランダムに配置される場合．
- －多少ランダムにムラがある場合．

また，既存の研究[6]により対象物の推定は，以下のようにセンサ配置が空間定常性を満たす場合に適用できることが明らかとなっている．

- －センサが等間隔である場合．
- －ポアソン過程に従う場合．
- －Cox 過程（センサの配置密度が確率過程であるようなポアソン過程[13]）に従う場合．

そこで，本研究では，センサの配置は空間定常性を満たすとする．そして，多数のセンサが非斉時ポアソン過程に従って撒かれている領域を想定する．

第 3 章

センシングエリア

3.1 センシングモデル

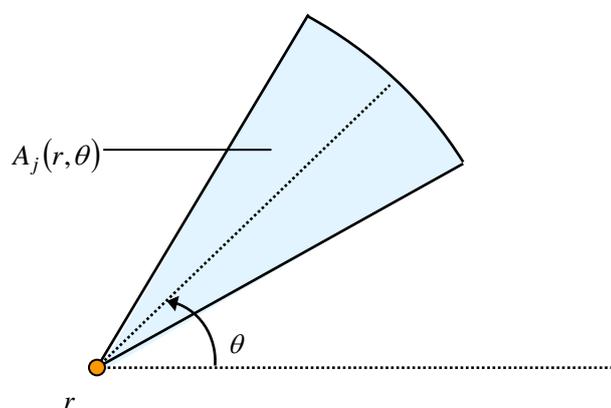


図 3.1 センシングエリアの例

領域内の各センサは J 個の異なる形状のセンシングエリアを使い分ける能力を持つとする。センシングエリアは線分，扇形のように特定の方向への指向性を持つものでも構わないが，その向き（偏角）はランダムに決まるものとする（図 3.1）。位置 $r \in R^2$ に存在するセンサの， j 番目 ($j=1, \dots, J$) の形状を持つ，偏角 $\theta \in [0, 2\pi)$ のセンシングエリア $A_j(r; \theta)$ を使用中のセンサは， $A_j(r; \theta) \cap \tau \neq \emptyset$ である場合に限り，対象物を検知できるとする。このセンシングモデルは Boolean センシングモデルと呼ばれる[14,15,16,17]。

また，位置 r におけるセンサ密度を $\lambda(r)$ と表記する。領域内には対象物が一つ存在し，その対象物は領域 τ を占める。また，本稿では以下のように表記を定義する。

- $|\tau|$: 対象物 τ の周囲長.
- $\|\tau\|$: 対象物 τ の面積.
- $|X|$: 領域 X の周囲長.
- $\|X\|$: 領域 X の面積.

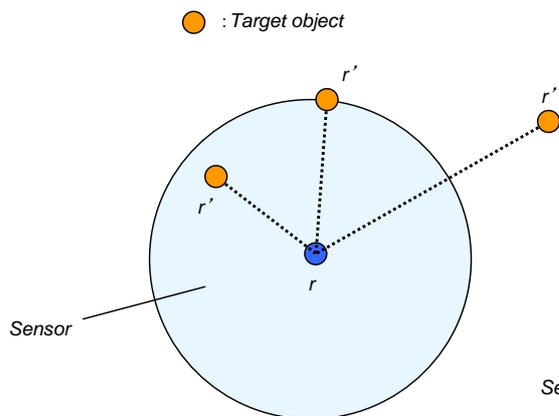


図 3.2 センサの対象物検出方法（微小の場合）.

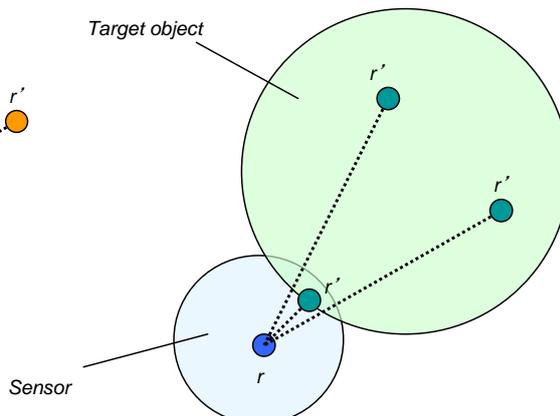


図 3.3 (τ の場合).

3.2 センサの対象物検出方法

センサはノイズ強度を利用し、対象物を検出したかどうかを判断する．以下にセンサの対象物検出方法を述べる．

位置 r に存在するセンサは、位置 r' に存在する（大きさが無視できる）微小物体から、 $s(r; r')$ に等しい強度のノイズを受信すると仮定する（図 3.2）．等方的なセンシング能力を持つセンサの場合、

$$s(r; r') = \frac{c}{(|r - r'| + \varepsilon)^2}, \quad (3.1)$$

となるノイズ強度を受信する． c は定数であり、 ε は微小な値をとる定数とする．同じように、領域 τ を占める対象物からは、

$$s(r; \tau) = \max_{r' \in \Omega} s(r; r'),$$

に等しいノイズ強度を受信するとする（図 3.3）．等方的なセンシング能力を持つセンサの場合、

$$s(r; \tau) = \max_{r' \in \tau} \frac{c}{(|r - r'| + \varepsilon)^2} = \max_{r' \in \Omega} \frac{c}{(d + \varepsilon)^2},$$

$$d = \min_{r' \in \tau} |r - r'|,$$

さらに、

$$s(r; r') > x$$

のときにセンサは対象物を検出したと判断する．

ここで、以下を定義する.

$$A'(x) \equiv \{r' \mid s(r; r') > x\},$$

$A'(x)$ は、そこに何らかの物体が存在する場合に、センサの受信ノイズ強度が x 以上となる領域である. そして、定義より、 $A'(x)$ はセンシングエリア $A_j(r; \theta)$ に等しい. すなわち受信ノイズ強度が式 3.1 で与えられる場合、 $A'(x)$ はセンサを中心とする半径 $\sqrt{c/x} - e$ を有する円、または扇形となる.

3.3 センサの対象物検出エリア

センシングエリアの $|A_j(r; \theta)|$ および $\|A_j(r; \theta)\|$ は、 r や θ に非依存なので、以下、これらを $|A_j|$, $\|A_j\|$ と略記する.

一方、領域 τ を占める対象物に対して

$$D_j(\tau) \equiv \{(r, \theta) \mid A_j(r; \theta) \cap \tau \neq \emptyset\},$$

を定義する. ここで、 $D_j(\tau)$ は、向き θ を持つ j 番目のセンシングエリアを使用中のセンサが対象物 τ を検出できる位置と偏角のペアの集合 (空間 $R^2 \times [0, \pi)$ 内の集合) に相当する.

以下、 $D_j(\tau)$ を検出エリアと呼び、その広さを

$$\|D_j(\tau)\| \equiv \frac{1}{2\pi} \int_{D_j(\tau)} dr d\theta,$$

で定義する.

第4章

対象物推定の提案方法

4.1 凸型対象物の形状推定方法

本章ではまず、既存の研究で提案されている、バイナリセンサによる凸型対象物の形状・センサ密度推定方法[4]について述べる。

4.1.1 検出エリアと対象物の形状との関係

対象物 τ が凸形状であれば、検出エリアと対象物の形状、センシングエリアとの間に以下の関係式が成立する。[2,3]

$$\|D_j(\tau)\| = \frac{1}{2\pi} |\tau| \cdot |A_j| + \|\tau\| + \|A_j\|. \quad (4.1)$$

4.1.2 センサ密度一定における対象物形状推定

センサが一定の密度 λ で撒かれているケースを想定する。領域 $D_j(\tau)$ に存在する j 番目のセンシングエリアを使用中のセンサは、対象物 τ を検出することができる。 j 番目のセンシングエリアを使用中のときの物体を検出したセンサ数を N_j とすると、 $E[N_j] = \lambda \|D_j(\tau)\|$ であるから、対象物が凸であれば期待値 $E[N_j]$ は、式4.1より以下のようになる。

$$E[N_j] = \lambda \left(\frac{1}{2\pi} |\tau| \cdot |A_j| + \|\tau\| + \|A_j\| \right). \quad (4.2)$$

センサは異なる3つのセンシングエリア (A_1, A_2, A_3) を利用できるものとし、

$$N \equiv (N_1, N_2, N_3)^T, \quad A \equiv \begin{pmatrix} |A_1| & 1 & \|A_1\| \\ |A_2| & 1 & \|A_2\| \\ |A_3| & 1 & \|A_3\| \end{pmatrix},$$
$$\chi \equiv (\lambda |\tau| / 2\pi, \lambda \|\tau\|, \lambda)^T, \quad (4.3)$$

を定義すると、

$$E[N] = Ax, \quad \text{or} \quad x = A^{-1}E[N] \quad (4.4)$$

となり、 A^{-1} を具体的に計算することで、 $E[N]$ が正確にわかれば、 $\lambda, \|\tau\|, |\tau|$ に関する3元連立方程式とみなすことができ、 $\lambda, \|\tau\|, |\tau|$ を求めることができる。

4.1.3 最小二乗誤差推定

現実には、期待値 $E[N]$ を知ることはできない。得られるのは、測定値 $N = (N_1, N_2, N_3)$ であるが、 N はその期待値とは必ずしも一致しない。すなわち、

$$N = E[N] + e, \quad e \equiv (e_1, e_2, e_3),$$

のように期待値からの誤差 e を含む。

測定値 N から x を求める問題は、最小二乗誤差推定として定式化できる。今、各センサが J (≥ 3) 個の異なるセンシングエリア (A_1, \dots, A_j) を利用できるものとする。 e は未知であるから、 N から x を一意に求めることはできないため、

$$e^T e = (N - E[N])^T (N - E[N]) = (N - Ax)^T (N - Ax),$$

$$A \equiv \begin{pmatrix} |A_1| & 1 & \|A_1\| \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ |A_j| & 1 & \|A_j\| \end{pmatrix},$$

を最小化するように x を決定する。すなわち、

$$\hat{x} = \min\{x \mid (N - Ax)^T (N - Ax)\}, \quad (4.5)$$

により x の推定値 \hat{x} を与えることとする。式 4.5 の右辺は解析的に求めることができ、

$$\hat{x} = (A^T A)^{-1} A^T N, \quad (4.6)$$

が得られる。ここで、 $(A^T A)^{-1} A^T$ は一般逆行列とも呼ばれる。特に $J = 3$ の場合、 A が逆行列を持つならば、

$$(A^T A)^{-1} A^T = A^{-1}, \quad (4.7)$$

であるので、式 4.6 は式 4.2 に一致する。従ってセンサ密度、対象物の面積・周囲長の推定値は $E[N_k]$ を N_k に置き換えたもので与えられる。なお、 $J \leq 2$ の場合、式 4.6 は式 4.5 のノルム最小解を与える。

物体が領域内を動く場合は、複数の時間で場所を変えて測定を行うことにより、一連の測定値 $N(t_i) = (N_1(t_i), N_2(t_i), N_3(t_i))$ ($i = 1, \dots, n_T$) が得られる。いずれの測定でも式 4.2 が成立するので、測定値の平均

$$\langle N \rangle = \frac{1}{n_T} \sum_{i=1}^{n_T} N(t_i),$$

を一回の測定の代わりに用いて、

$$\hat{x} = (A^T A)^{-1} A^T \langle N \rangle,$$

により推定することができる。やはり、 $\langle N \rangle$ は $E[N]$ と一致せず、誤差を含むが、一回の測定に比べて含まれる誤差は小さく推定精度は向上する。

本研究では、この最小二乗誤差推定を用いてより精度の高い推定を行う。

4.2 非凸型対象物の形状推定方法

本章では、4.1 で述べた準備を踏まえ、非凸型対象物の形状推定の提案について述べる。

4.2.1 非凸型対象物について

本研究では、非凸型対象物として、(後にパラメータを含め示す) T 型 (図 5.2) と Cap 型 (図 5.3) を扱うこととする。

4.2.2 非凸型対象物における理論式

非凸型対象物の場合は、積分幾何学の公式[18]により、式 4.1 が

$$c_j \|D_j(\tau)\| = \frac{1}{2\pi} |\tau| \cdot |A_j| + \|\tau\| + \|A_j\|, \quad (4.8)$$

となり、未知変数 $c_j (\geq 1)$ が一つ増える (凸型対象物の場合は $c_j = 1$ となる)。ここで、 c_j の j 依存性が小さければ (センシングエリアの形状に比較的非依存であれば)、これは c と置き換えることができ、以下の式が得られる。

$$cN_j = \frac{\lambda}{2\pi} |\tau| \cdot |A_j| + \lambda \|\tau\| + \lambda \|A_j\|. \quad (4.9)$$

式 4.9 は未知変数を 4 つ含む ($c, \lambda, \|\tau\|, |\tau|$)。ただし、4.1 で示したように単純に $J (\geq 4)$ 個の異なるセンシングエリア A_1, \dots, A_J を用いて方程式を立てても、この 4 つの未知変数の連立方程式とみなして解くことはできない。そこで、センサ密度を既知とし、式 4.3 を

$$N \equiv (N_1, N_2, N_3)^T, \quad A \equiv \begin{pmatrix} |A_1| & 1 & \|A_1\| \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ |A_J| & 1 & \|A_J\| \end{pmatrix},$$

$$\chi \equiv \lambda \left(\frac{|\tau|}{2\pi c}, \frac{\|\tau\|}{c}, \frac{1}{c} \right)^T,$$

と定義することで、4.1 と同様に、 $c, \|\tau\|, |\tau|$ に関する連立方程式と見なして解くことができる。

第 5 章

シミュレーション評価

4.2 で述べた推定方法の精度をシミュレーションにより評価する。既存の研究[4]により、検出閾値数が多い方が推定精度が良いことがわかっている。そこで本研究では、より精度の高い推定値を得るために検出閾値数を 5 つに固定し、形状推定をするシミュレーションを検討する。

5.1 シミュレーション条件

5.1.1 シミュレーション条件

提案手法の基本性能を評価するため、センサ密度が一定の平面内を対象物が等速度で直線運動をする最も単純な条件とする。センサを撒く監視領域を 200×12000 のエリアに設定し、対象物をエリアの左端に位置させ、そこから x 軸に沿ってスピード 100 で移動させる (図 5.1)。センサは 100 の観測時刻 ($t=1, \dots, 100$) で受信信号の強度を測定する。複数の閾値で対象物の検出状況を調べ、観測時刻毎にその結果を遠隔の監視センタに通知する。監視センタは検出センサ数を集計し、100 回の測定の平均を取った後に、4.2 の方法で対象物の面積・周囲長を推定し、未知変数 c も決定する。この一連のシミュレーションをセンサの配置を変えて 100 回行い、推定値を 100 回求め、その平均値を調査した。

非凸型対象物の形状は T 型と Cap 型の 2 種類を用いる (図 5.2, 図 5.3)。その対象物のパラメータは表 5.1 の通りとする。センサ密度 λ は 0.1, 0.5, 1.0 でそれぞれ検証する。

5.1.3 でシミュレーション条件をまとめる。

5.1.2 センサと検出閾値

センサは、監視領域に斉時ポアソン過程に従って撒かれているとする。センサは以下のようなものを用いる。

- 円形センサ：超音波センサのような無指向性のセンサを模擬する，センシングエリアが円形であるセンサ
- 扇形センサ：光電センサのような指向性を持つセンサを模擬する，センシングエリアが扇形であるセンサ

扇形センサの中心角は $\pi/8$ とする（注1）。

3.2 でも述べたように，センサは対象物から発せられる信号の強度が閾値を上回る場合，対象物を検知したと判断する。信号は2次元平面内を伝播し，発信元からの距離の二乗で強度が減衰するものとする。対象物との距離が d のときの信号強度を

$$s(d) = \frac{1}{(d+0.01)^2},$$

で与えることとした（距離が0のとき信号強度は $0.01^{-2} = 10000$ となる）。表5.3にはシミュレーションで用いた検出閾値および，検出閾値とセンシング半径との関係を示した。最も小さいセンシング半径（0.306）を基準とすると，この検出閾値設定により1倍，約3.3倍，約10倍，約33倍，約100倍の5通りの異なるセンシング半径を模擬することができる。

注1. 扇形センサのセンシングエリアの面積は中心角に比例する。ここで，センシングエリアの面積が0の場合，提案手法は適用できない。中心角が小さいほど対象物の検出機会が減るため，推定精度は低下し，中心角が0の極限で推定不能となるためである。既存の光電センサの中心角は $1\sim 5^\circ$ であるが，中心角は光学レンズ等で制御可能であることを考慮し，シミュレーションでは中心角を $\pi/8$ に設定した。

5.1.3 シミュレーション条件の詳細

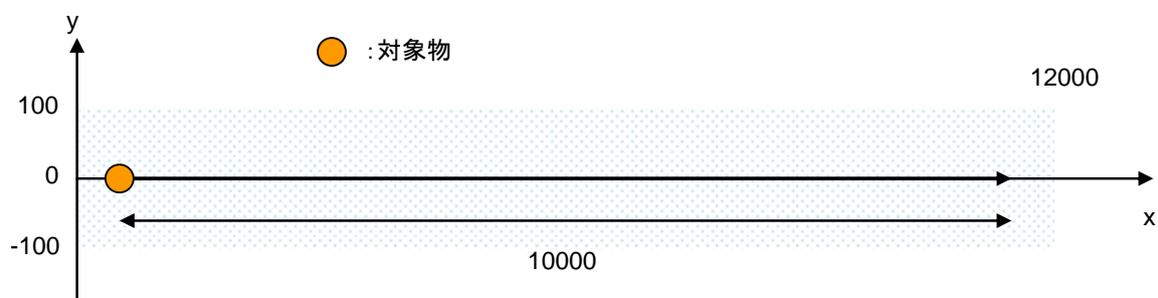


図 5.1 シミュレーションエリア（センサ密度均一）.

表 5.1 シミュレーション条件.

観測領域	200×12000
観測時間	100
測定回数	100

対象物：個数	1
対象物：形状	T型, Cap型（図 5.2, 図 5.3, 表 5.2 参照）
対象物：パラメータ	（表 5.2 参照）
対象物：移動	x軸に沿ってスピード100で移動

センサ形状	円形センサ（ 2π ）, 扇形センサ（ $\pi/8$ ）
センサ密度	0.1, 0.5, 1.0
検出閾値数	5

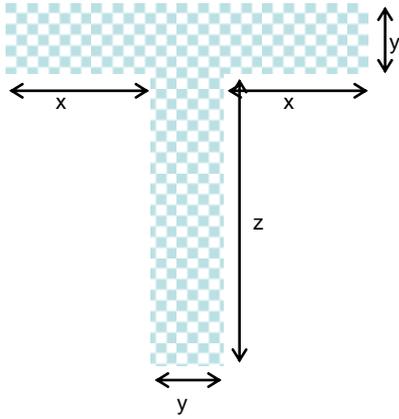


図 5.2 対象物形状：T型.

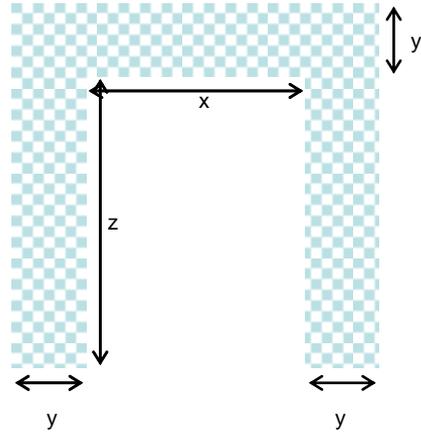


図 5.3 対象物形状：Cap型.

表 5.2 対象物パラメータ.

ID	Shape	Parameter
1.	T-shape	x=2 y=1 z=4
2.	T-shape	x=4 y=2 z=8
3.	T-shape	x=8 y=4 z=16
4.	Cap-shape	x=3 y=1 z=4
5.	Cap-shape	x=6 y=2 z=8
6.	Cap-shape	x=12 y=4 z=16

表 5.3 検出閾値とセンシング半径との関係.

Threshold	Sensing range
10.0	0.306
1.0	0.990
0.1	3.152
0.01	9.990
0.001	31.612

5.2 シミュレーション結果

5.2.1 シミュレーション結果：対象物面積推定

表 5.4 は円形センサによる非凸型対象物面積推定結果（平均推定値）を示したものである。同様に表 5.5 は扇形センサによる面積推定結果である。

図 5.4, 図 5.5 は面積推定結果における, 円形センサ, 扇形センサによる表のデータをそれぞれグラフにしたものである。

条件として用いたセンサ密度 (0.1, 0.5, 1.0) によって, 表・グラフともに, それぞれ 3 つに分けた。

対象物の大きさ別の面積推定精度を比較するために, 図 5.6, 図 5.7 には対象物ごとの相対誤差の大きさを示したグラフを載せる。

5.2.1-a 円形センサ

表 5.4 のデータより, センサ密度の違いによる面積推定への影響はほぼ見られなかった。ただし, 0.1 以外のセンサ密度のとき (0.5, 1.0 のとき) の方が, 推定値が真値に多少近づくという傾向は見られる。本研究においては, センサ密度を推定せず既知とした状態にしているため, 面積推定においては, センサ密度の大きさはあまり関係しないことが考えられる。しかし, 精度を少しでも上げるためには, センサ密度は, 0.5 もしくは 1.0 程度に設けることが望ましい。

図 5.4 のグラフより, 円形センサの場合, 比較的精度が高く面積を推定することが可能であることがわかる。対象物の形状別の精度は, Cap 型よりも T 型の方がより精度の高い推定結果が得られた。これは, T 型よりも Cap 型の対象物の方がより複雑な形をしているからであると考えられる (図 5.2, 図 5.3 参照)。

次に対象物の大きさ別の面積推定精度について述べる。

図 5.6 より, T 型, Cap 型ともに, 対象物が大きくなるにつれて, 相対誤差は小さくなる (推定値がより真値に近くなる) ことがわかる。したがって, 本研究の面積推定においては, 対象物がより大きいことが推定精度を上げるのに適していることがわかる。

ここで, 凸型対象物の面積推定においては, 対象物が小さいほうが, 推定精度が上がることをわかっている[4]。しかし, 非凸型対象物の場合, 凸型対象物よりも形状が複雑になるため (凸型対象物は円形・長方形・正方形といった単純なものに限定していたため), 対象物が小さすぎると対象物の形状が判定しづらいことが要因として考えられる。

5.2.1-b 扇形センサ

表 5.5 のデータより, センサ密度の違いによる面積推定への影響はほぼ見られなかった。しかし, 円形センサと同様に, センサ密度は 0.5 もしくは 1.0 の時の方が, 推定値が真値に多少近づくという傾向が見られる。

図 5.5 のグラフより, 扇形センサの場合, 円形センサに比べ推定精度が格段に下がるのがわかる。対象物の形状別に精度を比較すると, ID4 (パラメータは 5.1.3 参照) を除き, 円形センサと同様に, Cap 型よりも T 型の方が精度の高い推定結果が得られた。Cap 型である ID6 の推定値が負の値となってしまうている。ただし, 凸型対象物の既存研究[4]においても同様に負の推定値が結果として出ることがあるようである。

図 5.7 の対象物の大きさ別の面積推定精度について述べる。ID1, ID2, ID4 においては比較的精度の高い推定結果が得られた。特に ID1, ID4 に関しては, 円形センサよりも高精度で推定できているという結果となった。これは, 扇形センサの場合, 対象物の大きさが小さい方が高精度に推定できることを意味しており, 既存研究[4]と同様の考察となった。したがって本研究においては, 扇形センサのみ, 対象物が小さい方が高精度に面積推定を行うことができると考えられる。要因として挙げられるのは, 非凸型対象物の場合, 円形センサで小さい対象物を検出しようとする, 検出エリアが分断される (4.2 における, c の値が大きくなる) 可能性が高くなるからであると考えられる。

以上を総括すると, 対象物の面積推定においては, 推定精度をより上げるためには, 扇形センサよりも円形センサのほうが望ましい。

表 5.4 円形センサにおける面積推定平均値.
(センサ密度 0.1, 0.5, 1.0).

ID	Exact	density=0.1
1	9	10.913475
2	36	39.51438022
3	144	156.7299633
4	13	18.54391957
5	52	66.99293819
6	208	267.9010222

ID	Exact	density=0.5
1	9	10.69416756
2	36	39.54637942
3	144	156.4204716
4	13	18.26517511
5	52	66.99081572
6	208	267.6772978

ID	Exact	density=1.0
1	9	10.75667492
2	36	39.56233733
3	144	156.426559
4	13	18.37737739
5	52	67.08074462
6	208	267.8363635

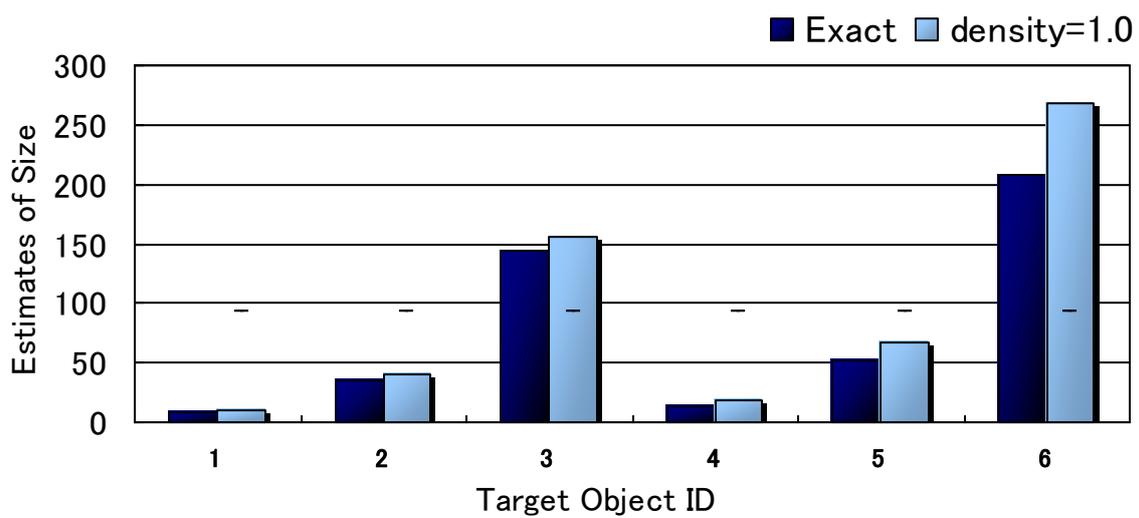
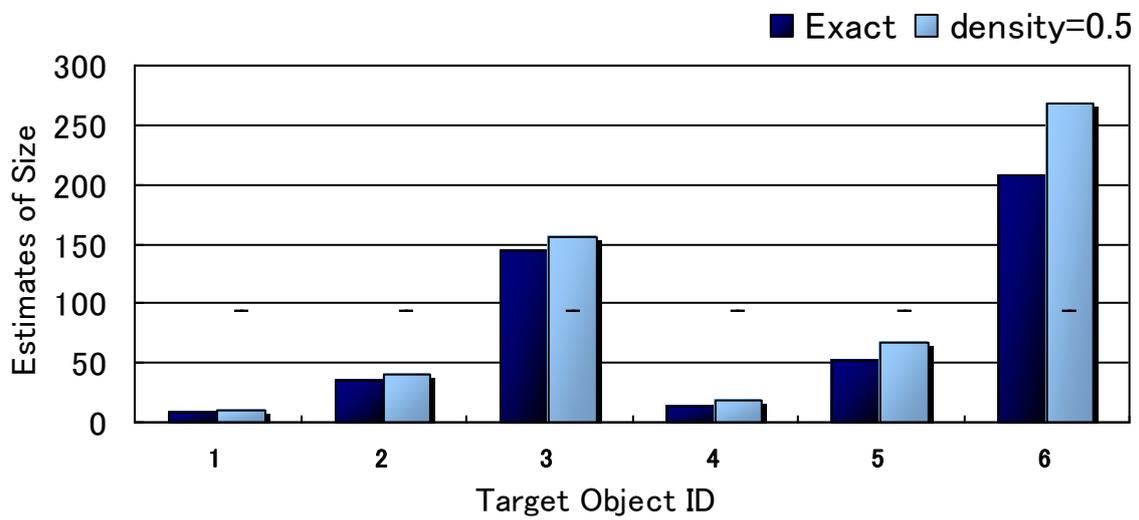
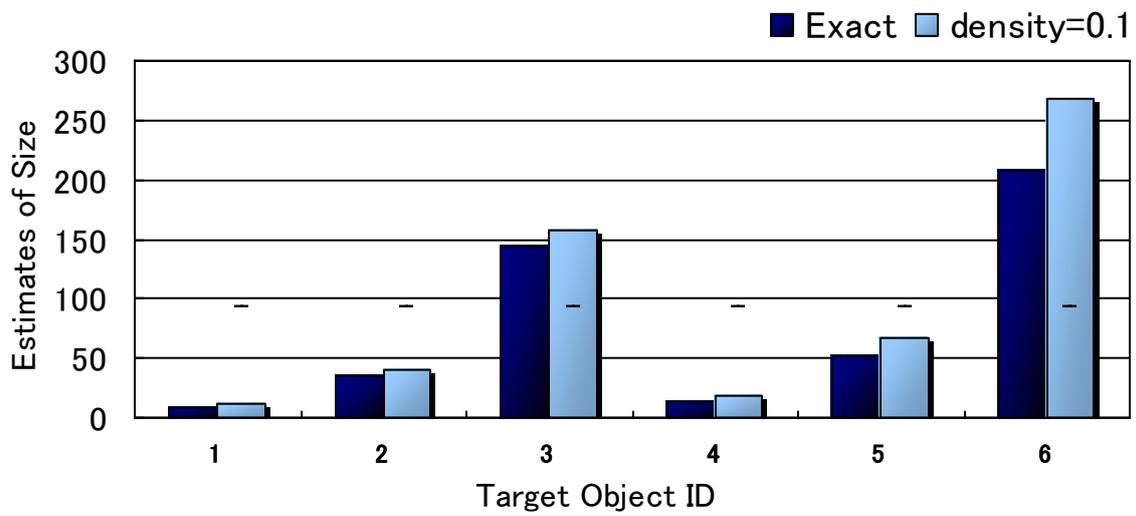


図 5.4 円形センサにおける面積推定結果.

表 5.5 扇形センサにおける面積推定平均値.
(センサ密度 0.1, 0.5, 1.0).

ID	Exact	density=0.1
1	9	10.06274943
2	36	42.19611655
3	144	250.768972
4	13	17.66346538
5	52	115.2602921
6	208	-685.6324388

ID	Exact	density=0.5
1	9	10.00855707
2	36	42.61887218
3	144	241.2290417
4	13	17.42003685
5	52	114.4199014
6	208	-576.6866287

ID	Exact	density=1.0
1	9	10.05387192
2	36	42.70899571
3	144	242.4803608
4	13	17.53814488
5	52	115.6821253
6	208	-561.3430905

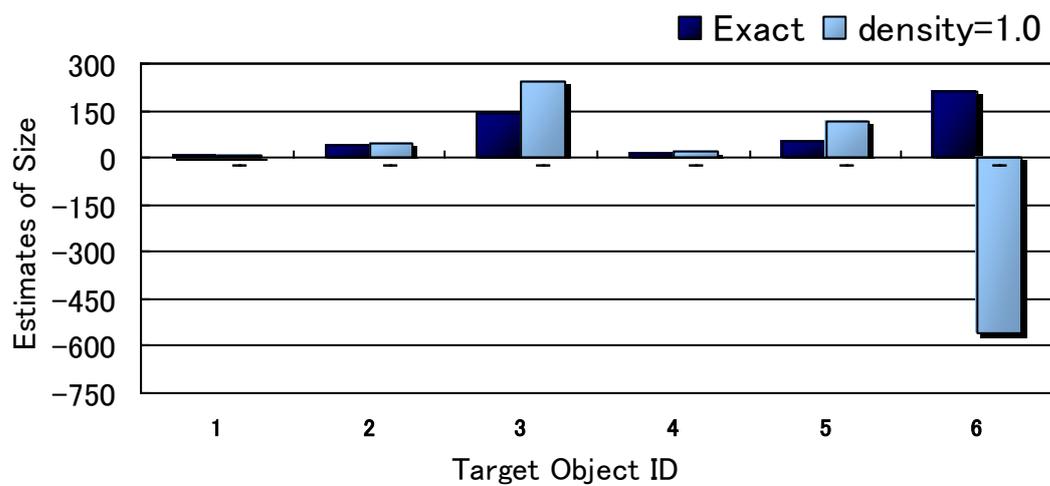
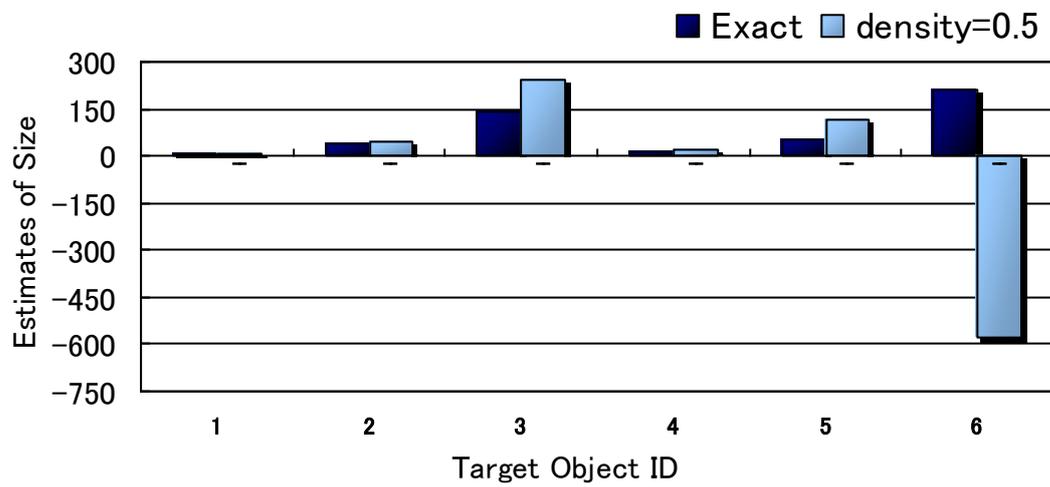
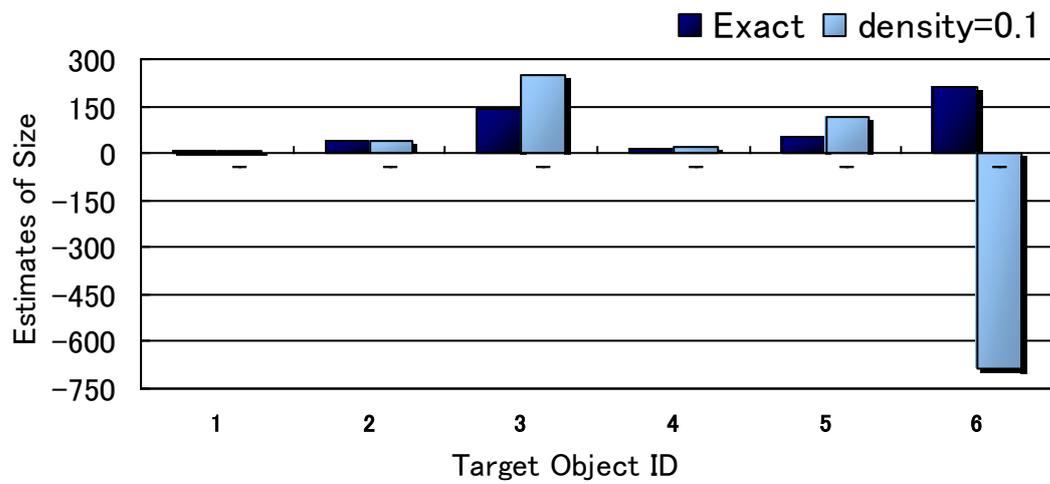


図 5.5 扇形センサにおける面積推定結果.

5.2.1-c 推定値相対誤差

推定値相対誤差は以下の式より算出した。

$$\text{推定値相対誤差} = \frac{|\text{真値} - \text{平均推定値}|}{\text{真値}}$$

以下に対象物ごとの相対誤差の結果を載せる。

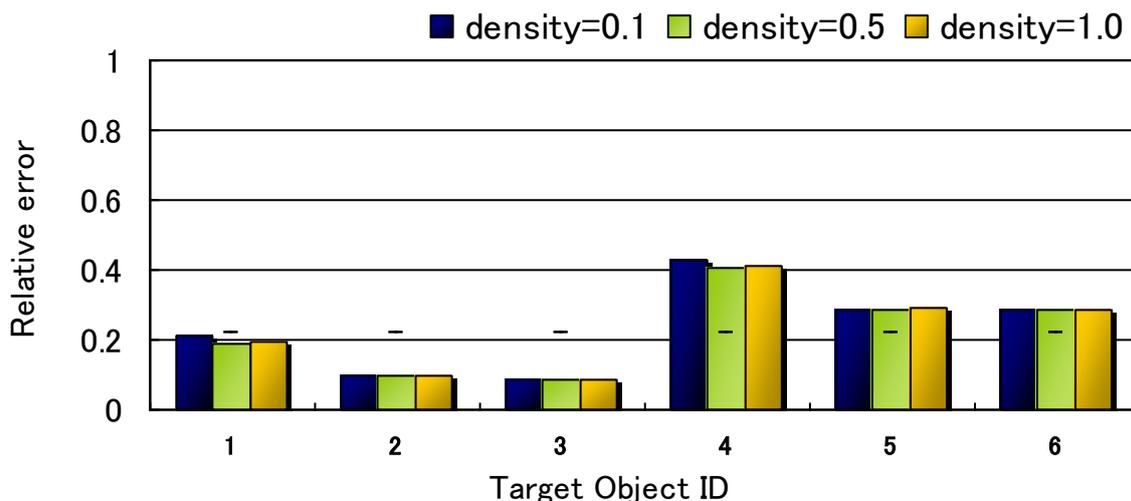


図 5.6 ID ごとの面積推定：相対誤差の大きさ（円形センサ）。

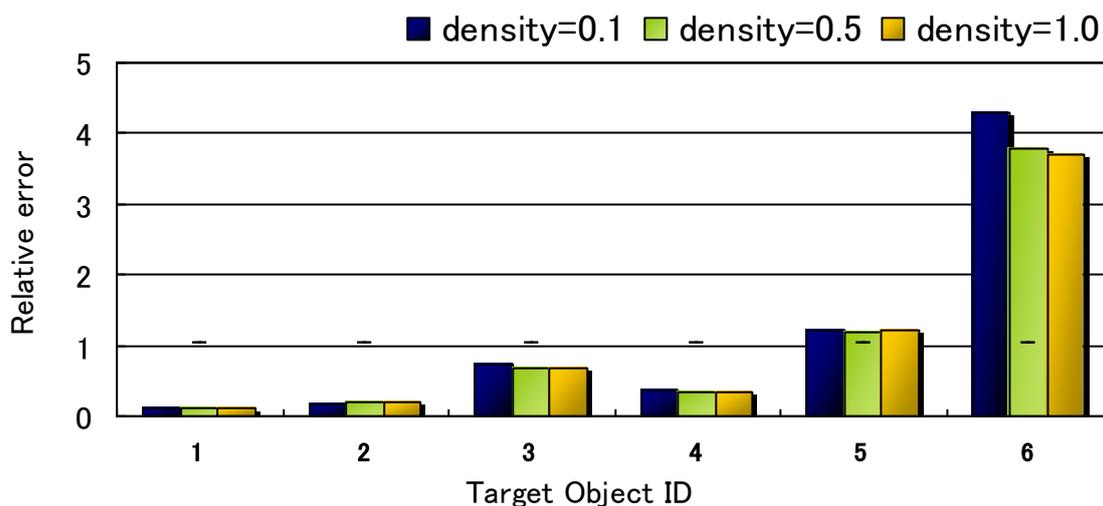


図 5.7 ID ごとの面積推定：相対誤差の大きさ（扇形センサ）。

5.2.2 シミュレーション結果：対象物周囲長推定

表 5.6 は円形センサによる非凸型対象物の周囲長推定結果（平均推定値）を示したものである。同様に表 5.7 は扇形センサによる周囲長推定結果である。

図 5.8, 図 5.9 は周囲長推定結果における, 円形センサ, 扇形センサの表 5.6, 表 5.7 のデータをグラフにしたものである。

対象物の大きさ別の周囲長推定精度を比較するために, 図 5.10, 図 5.11 には対象物ごとの相対誤差の大きさを示す結果を載せる。

5.2.2-a 円形センサ

表 5.6 のデータより, センサ密度が大きくなるにつれ, 推定値が真値に多少近づくという傾向が見られた。面積推定のとくに比べ, センサ密度が大きいほうが, 推定精度が高くなることがわかる。

図 5.8 のグラフからも分かるように, 円形センサの場合, 比較的精度が高く推定することが可能であることがわかる。対象物の形状別の精度は, Cap 型よりも T 型の方が高い。これは, 5.2.1 同様の結果となった。

次に対象物の大きさ別の周囲長推定精度について述べる。

図 5.10 より, T 型, Cap 型ともに, 対象物が大きくなるにつれて, 相対誤差は小さくなる（推定値がより真値に近くなる）という結果が, 面積推定のとくと同様に得られた。したがって, 本研究の面積・周囲長推定においては, 対象物が大きいたことが推定精度を上げるのに適していることがわかる。

全体を通して, 円形センサにおける非凸型対象物の周囲長推定は, 特に ID1~3 では相対誤差が約 10%以下に収まり, ID4~6 においても約 20%以下に収まる結果が得られたため, 本研究で一番高精度であった。しかし, 確実に対象物の形状を判定するためには相対推定誤差を 1%以下に抑える必要があるため, より精度を上げる必要がある。

5.2.2-b 扇形センサ

表 5.7 のデータより, 円形センサと同様にセンサ密度が大きくなるにつれ, 推定値が真値に多少近づくという傾向が見られた。

図 5.9 のグラフからも分かるように, ID1, ID2, ID4 を除き, 推定精度が低いことがわかる。また, Cap 型である ID6 の推定値が負の値となってしまう。

図 5.11 の対象物の大きさ別の周囲長推定は, 特に ID1, ID2, ID4 では, 円形センサと同程度もしくはより高精度で推定できるという結果となった。これは, 5.1.1 同様, 本研究においては, 扇形センサのみ, 対象物が小さい方が高精度に周囲長推定を行うことができるからであると考えられる。

センサごとの推定精度は, 扇形センサよりも円形センサのほうが高いことがわかる。

表 5.6 円形センサにおける周囲長推定平均値.
(センサ密度 0.1, 0.5, 1.0).

ID	Exact	density=0.1
1	20	17.62959326
2	40	37.6667677
3	80	83.03874976
4	28	21.0017044
5	56	47.37987599
6	112	126.9640943

ID	Exact	density=0.5
1	20	17.86806539
2	40	37.90760833
3	80	82.94523874
4	28	21.27062348
5	56	47.61608865
6	112	126.8239918

ID	Exact	density=1.0
1	20	17.91983822
2	40	37.99504247
3	80	83.01706601
4	28	21.31528675
5	56	47.68417142
6	112	126.8610914

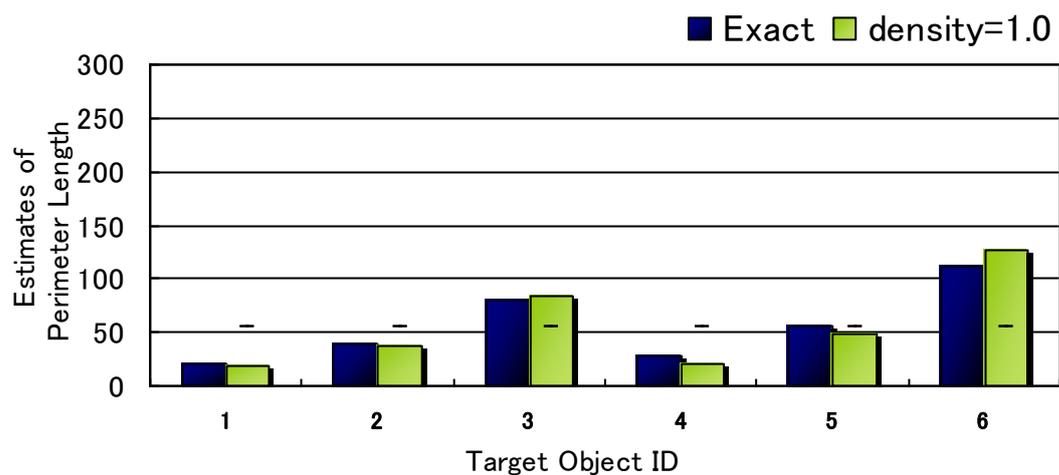
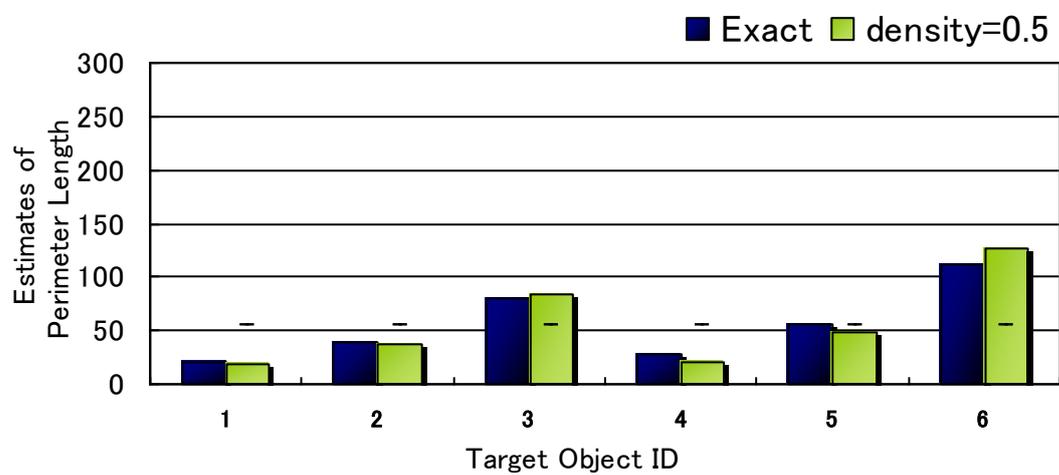
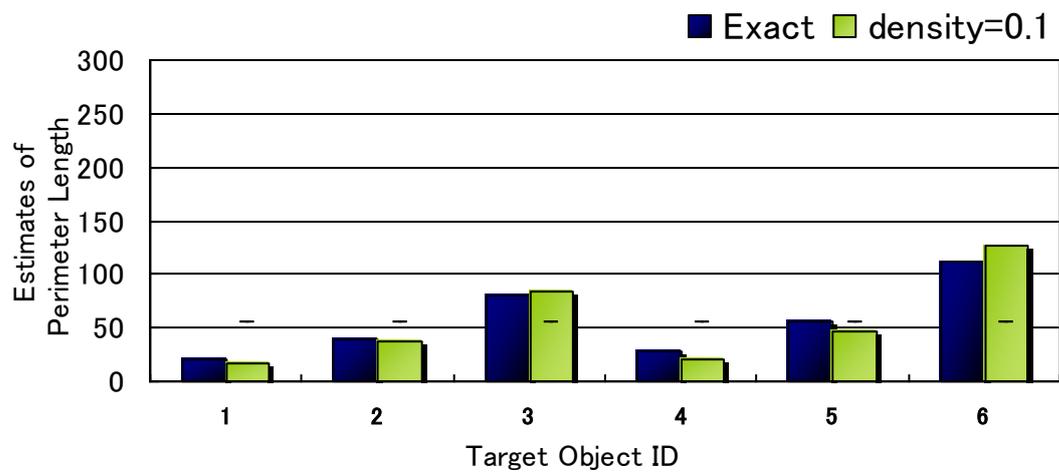


図 5.8 円形センサにおける周囲長推定結果.

表 5.7 扇形センサにおける周囲長推定平均値.
 (センサ密度 0.1, 0.5, 1.0).

ID	Exact	density=0.1
1	20	18.20355349
2	40	41.64248904
3	80	134.5260808
4	28	26.85995266
5	56	109.9553338
6	112	-375.8004146

ID	Exact	density=1.0
1	20	18.3688049
2	40	42.4916615
3	80	129.865518
4	28	26.84367098
5	56	110.6386355
6	112	-311.1491727

ID	Exact	density=0.5
1	20	18.34697332
2	40	42.44146843
3	80	129.156997
4	28	26.90617468
5	56	109.4060527
6	112	-319.3040301

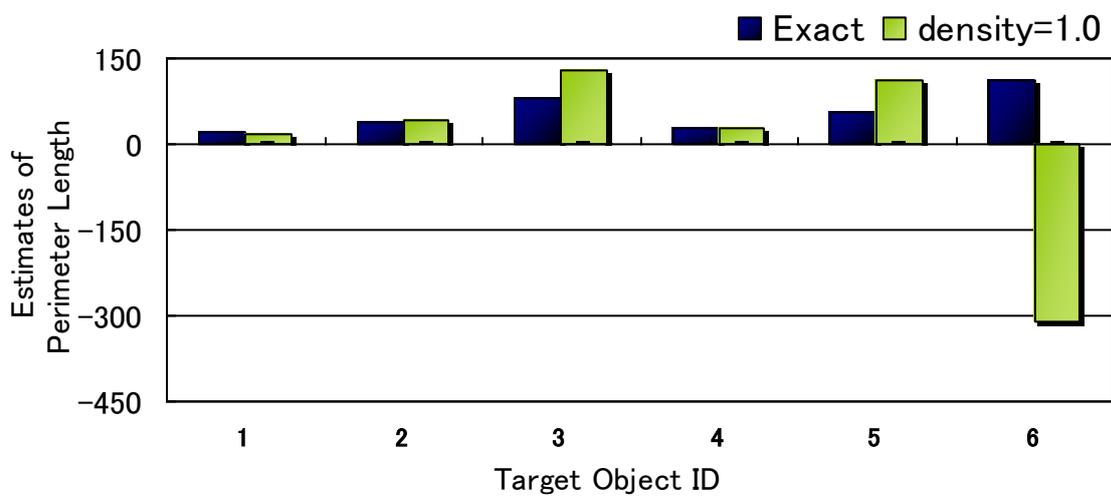
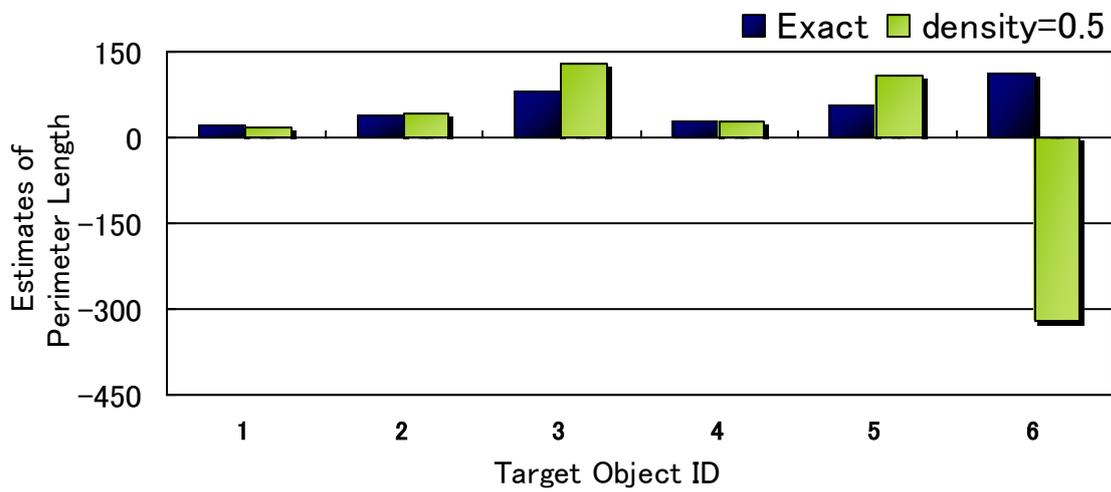
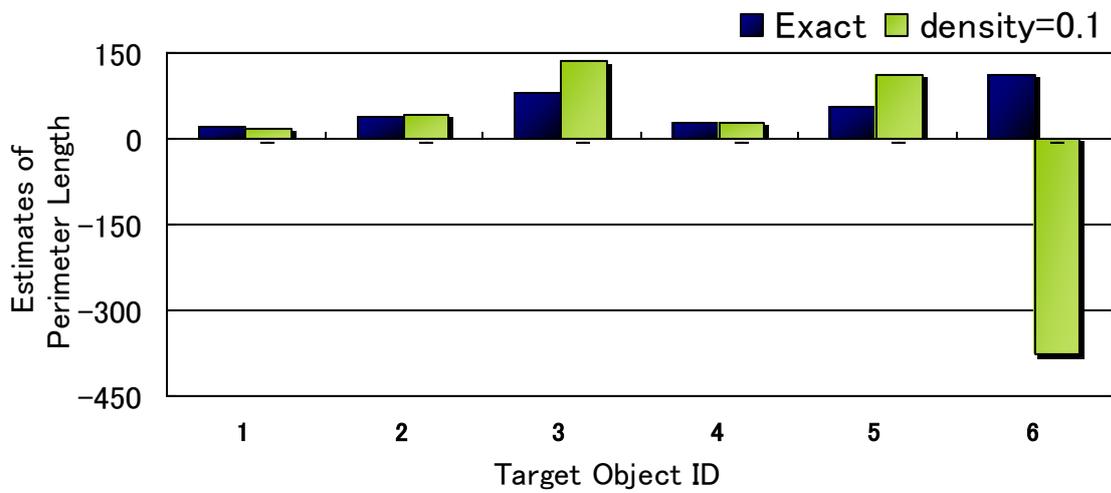


図 5.9 扇形センサにおける周囲長推定結果.

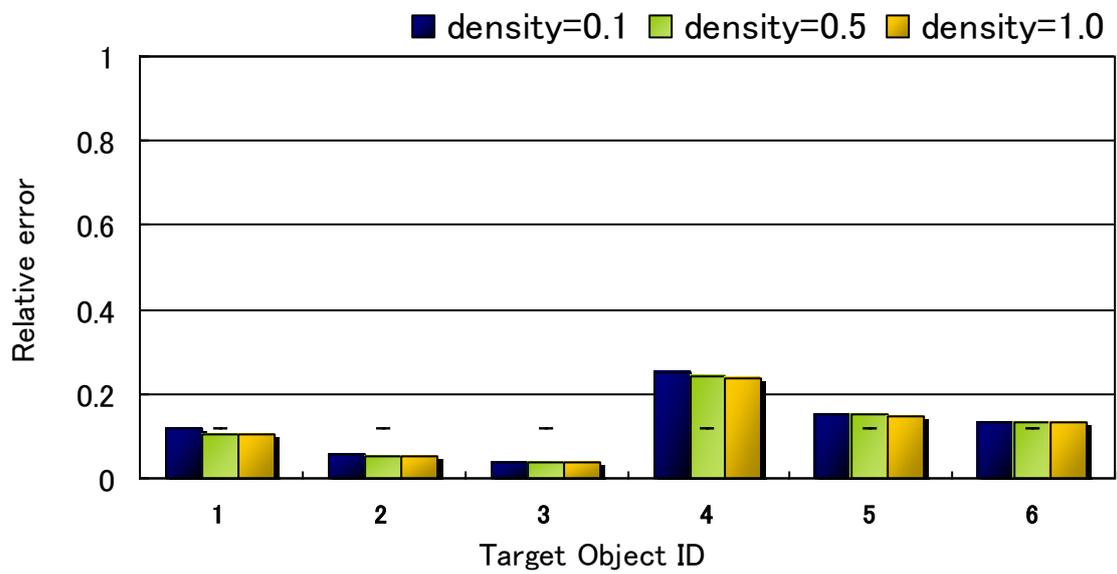


図 5.10 ID ごとの周囲長推定：相対誤差の大きさ（円形センサ）.

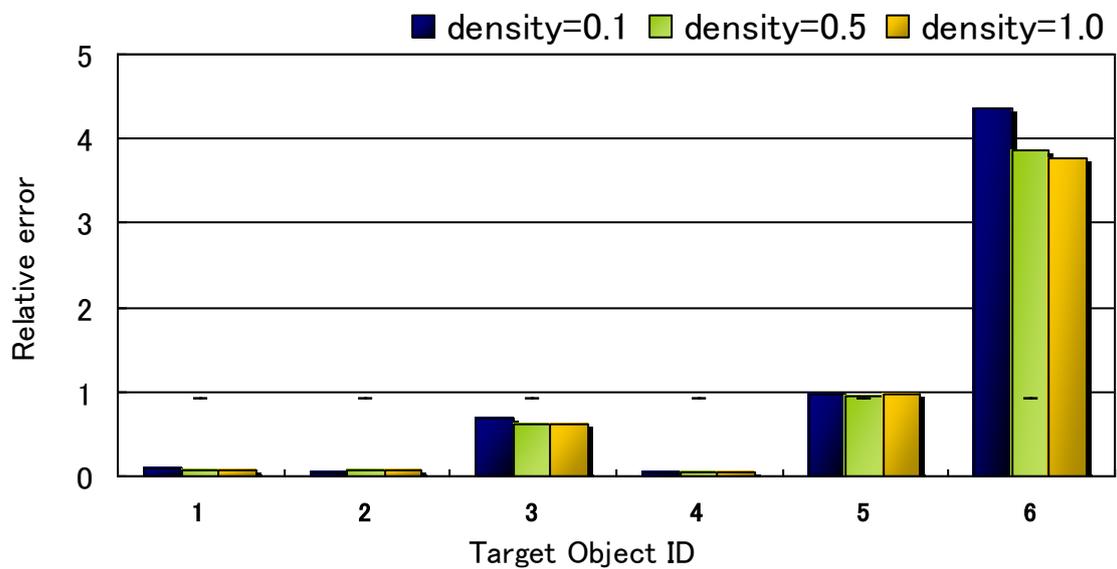


図 5.11 ID ごとの周囲長推定：相対誤差の大きさ（扇形）.

5.2.3 シミュレーション結果： c の値（4.2.2 参照）

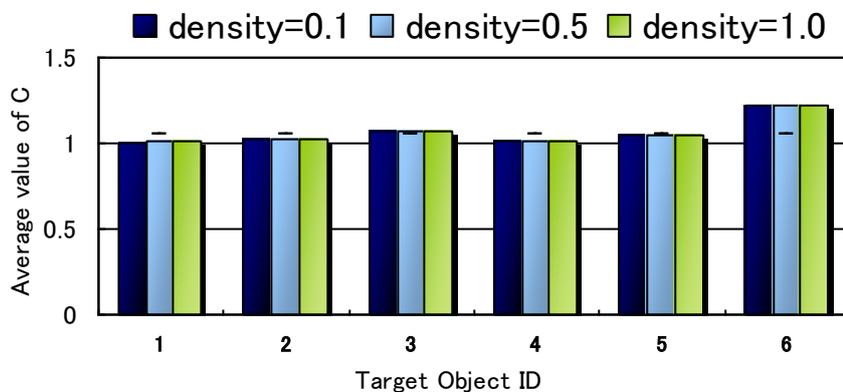


図 5.12 ID ごとの C の平均値（円形センサ）.

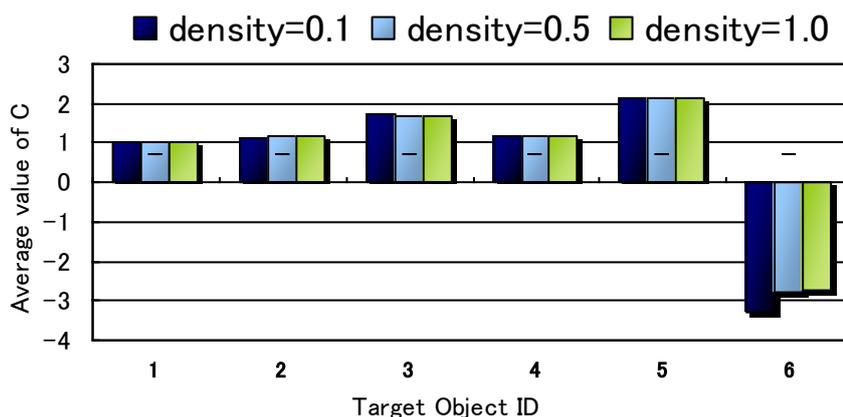


図 5.13 ID ごとの C の平均値（扇形センサ）.

上の図 5.12, 図 5.13 は円形センサ, 扇形センサそれぞれによる面積・周囲長推定を行った際の c の平均値である. 非凸型対象物の場合, $c \geq 1$ となることが前提である (4.2.2). 結果は扇形センサの ID6 の推定を除いて, 全て理論通りの値となった. 扇形センサによる ID6 の形状推定における c の値は負の値になってしまっている. これは, 図 5.5, 図 5.9 の形状推定結果を確認してもわかる. すなわち, 本研究における扇形センサによる ID6 の形状推定は, 正しく行えていなかったことが考えられる.

5.3 c の j 依存性 (4.2.2 参照)

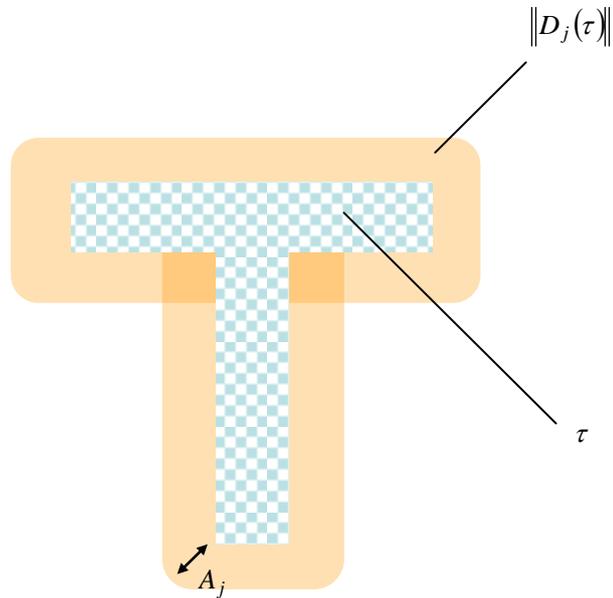


図 5.14 対象物と検出エリア.

5.3.1 c の算出式

本研究の推定結果に誤差があるのは、 c の j 依存性 (センシングエリアの大きさによる依存性) が小さいとする仮定に誤りがあったためだと考えられる (4.2.2). そこで、本章では、 c の j 依存性についての考察を行う。

4.2.2 の式 4.8 を c についての式に直すと、

$$c = \frac{1}{\|D_j(\tau)\|} \left(\frac{1}{2\pi} |\tau| \cdot |A_j| + |\tau| + \|A_j\| \right), \quad (5.1)$$

となる。ここで、 $\|D_j(\tau)\|$ は、検出エリアのことであるので (図 5.14),

$$\|D_j(\tau)\| = |\tau| \cdot A_j + \left(\frac{3\pi}{2} - 2 \right) A_j^2 + \|\tau\|,$$

となる。すなわち、推定しようとした対象物の形状 (面積・周囲長) を代入することで、未知数である c を計算することができる。

表 5.8 センシング半径ごとの c の算出式 (円形センサ).

	ID1	ID2	ID3	ID4	ID5	ID6
A1	1.0026	1.0008	1.0002	1.0018	1.0006	1.0002
A2	1.0134	1.0054	1.0019	1.0097	1.0038	1.0013
A3	1.0431	1.0226	1.0101	1.0333	1.0167	1.0072
A4	1.0893	1.0607	1.0353	1.0760	1.0486	1.0268
A5	1.1280	1.1069	1.0797	1.1189	1.0946	1.0664

表 5.9 円形センサによる形状推定における c の平均値.

	ID1	ID2	ID3	ID4	ID5	ID6
0.1	1.0047	1.0223	1.0699	1.0072	1.0453	1.2242
0.5	1.0063	1.0237	1.0687	1.0089	1.0465	1.2229
1	1.0069	1.0243	1.0690	1.0094	1.0470	1.2231

5.3.2 c の j 依存性の検証

表 5.8 は円形センサにおいて、センシング半径ごとに c の値を計算で求めたものである (式 5.1). 計算結果から、センシング半径が大きくなるにつれて c の値が大きくなること がわかる. したがって、 c の j 依存性は存在した.

表 5.9 は円形センサ (センサ密度 0.1, 0.5, 1.0) による対象物形状推定の際の c の平均 値である. この平均値が表 5.8 の c の値の区間に収まっているかどうかを検討する. 結果は、 ID6 に関しては c の区間を越えているが、その他は算出した c の値の区間に収まっている. したがって、形状推定においては、理論値の区間内には収まっているため、推定自体はう まく行えていることがわかる. しかし、 c の j 依存性は存在し、仮定に誤りがあったことか ら、推定誤差が出てしまっていたと考えられる.

第 6 章

まとめ

本研究では、測位機能を持たないバイナリセンサを用いた非凸型対象物の形状（面積・周囲長）推定方法について考察した。その結果、非凸型対象物の形状を推定することが可能であることが確認された。ただし、条件により推定精度は異なることがわかった。

円形センサと扇形センサによる推定を行った結果、円形センサの方がより推定精度が上がることがわかった。また、面積推定よりも周囲長の推定の方が精度が高かった。

また、推定誤差の原因として、未知数 c の j 依存性（センシングエリアの大きさ依存性）は小さいとした仮定に誤りがあったためと考察した。結果として、 c に j 依存性が存在することが判明し、推定誤差が生じた要因の一つであると考えられる。

本研究の提案では、センサの密度が未知の場合の形状推定は行えていない。しかし、現実には、センサ密度は電池切れや経年劣化に伴う故障により漸次減少すると考えられる。そのため、今後の課題として、センサ密度が未知の場合における、非凸型対象物形状の推定に拡張することが考えられる。また、凸型対象物の形状推定に比べ、特に面積推定精度の面がまだ十分でないことから、 c の j 依存性等を考慮した、より精度の高い推定方法を検討することも課題として挙げられる。

参考文献

- [1] H. Saito and Y. Arakawa and K. Tano and J. Harada and S. Shioda. Experiments on binary sensor networks for estimation of target perimeter and size. IEEE SECON, 2009.
- [2] H. Saito and S. Shimogawa and S. Shioda and J. Harada. Shape Estimation Using Networked Binary Sensors. IEEE INFOCOM, 2009.
- [3] H.Saito and S. Tanaka and S. Shioda. Estimating parameters of non-convex target object using networked binary sensors. IEEE SUTC, 2010.
- [4] 山下賢也, 塩田茂雄, 齊藤洋, “センサ密度が未知のバイナリーセンサネットワークによる対象物形状推定,” 電子情報通信学会論文誌, vol. J95-D, no. 1, pp.54-66, 2012.
- [5] H. Saito and S. Shioda and J. Harada. Shape and Size Estimation Using deployed networked sensors. IEEE SMC, 2008.
- [6] H. Saito and S. Shioda and J. Harada. Shape and Size Estimation Using Networked Binary Sensors. IEEE SMC, 2008.
- [7] H. Saito and S. Shimogawa and S. Tanaka and S. Shioda. Estimating Parameters of Multiple Heterogeneous Target Objects Using Composite Sensor Nodes. IEEE Trans. Mobile Computing (in press).
- [8] H. Saito and S. Tanaka and S. Shioda. Stochastic Geometric Filter and its Application to Shape Estimation for Target Object. (submitted for publication)
- [9] G. J. Pottie and W. J. Kaiser. Wireless Integrated Network Sensors. Commun. ACM, 43, 5, pp. 51-58, 2000.
- [10] I. F. Akyildiz and W. su and Y. Sanakarasubramaniam and E. Cayirci. A Survey on Sensor Networks. IEEE Communications Magazine, 40, 8, pp. 102-114, 2002.
- [11] B. W. Cook and S. Lanzisera and K. S. j. Pister. SoC Issues for RF Smart Dust. Proceedings of IEEE, 94, 6, pp. 1177-1196, 2006.
- [12] H.Saito and M. Umehira and O. Kagami and Y. Kado. Wide Area Ubiquitous Network: The Network Operator’s View of a Sensor Network. IEEE Commun. Magazine, vol. 46, no. 12, pp. 112-120, 2008.
- [13] D. Daley and D. Vere-Jones. An Introduction to the Theory of Point Processes. Springer, 2002.
- [14] B. Liu and D.Towsly. A Study on the Coverage of Large-scale Sensor Networks. IEEE Mobile Ad-hoc and Sensor Systems, 2004.

- [16] D. Tian and N. Georganas. A Coverage-preserving Node Scheduling Scheme for Large Wireless Sensor Networks and Applications, pp. 32-41, 2002.
- [17] F. Ye and G. Zhong and S. Lu and L. Zhang. Peas: A Robust Energy Conserving Protocol for Long-lived Sensor networks, IEEE ICDCS, 2003.
- [18] S. Shakkottai and R. Srikant and N. Shroff. Unreliable Sensor Grids: Coverage, Connectivity and Diameter, Proc. IEEE INFOCOM, 2003.
- [19] L. Santalo, "Integral Geometry and Geometric Probability," Cambridge University Press, 2004.

謝辞

本研究においてご多忙の中，丁寧にご指導をしていただきました塩田茂雄教授に深く感謝いたします。

また，塩田研究室の先輩方にも本当に感謝しております。特に島村様にはシミュレーションプログラムのご指導をいただき，林様には研究の方針のアドバイスをいただきました。先輩方のご協力のおかげで本研究を潤滑に進めることができました。

同研究室の4年生も研究を進める仲間として，共に切磋琢磨できたことに本当に感謝しております。

就職活動と研究との両立には非常に悩みましたが，塩田教授のご親切な対応，周りの皆様のおかげで，無事に両立することができました。

最後に，一年間お世話になりました皆様方に感謝の意を申し上げます。

本当にありがとうございました。

平成24年 高木 重希