

令和1年度 卒業論文

# 位置情報非利用型環境認識技術

千葉大学 工学部都市環境システム学科

16T0315W

大橋 優人

指導教員： 塩田 茂雄 教授

令和2年 2月提出

# 目次

第1章 序論 .....	1
1.1 研究背景 .....	1
1.2 研究目的 .....	1
1.3 本論文の構成 .....	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
第3章 位置推定技術 .....	4
3.1 レンジベース位置推定技術 .....	4
3.1.1 TOA・TDOA .....	5
3.1.2 RSS .....	5
3.1.3 AOA .....	6
3.2 レンジフリー位置推定技術 .....	6
3.2.1 Centroid 法 .....	7
3.2.2 DV-hop 法 .....	8
3.2.3 APIT 法 .....	10
第4章 近接情報利用型位置推定 .....	12
4.0 問題設定 .....	12
4.1 センサ間の接続関係を表す無向グラフの構築 .....	14
4.2 センサの相対位置マップの構成 .....	15
4.2.1 stress majorization .....	16
4.3 センサの絶対位置マップの構成 .....	19
第5章 シミュレーション実験 .....	21
5.1 実験A 位置推定精度 .....	21
5.1.1 実験条件 .....	21
5.1.2 結果 .....	23
5.2 実験B 物体数のカウント .....	26
5.2.1 実験条件 .....	26

5.2.2 結果 .....	2 6
第 6 章 結論 .....	3 2
謝辭 .....	3 3
参考文献 .....	3 4

# 第1章 序論

## 1.1 研究背景

インターネットに接続された IoT(Internet of Things)機器が収集する大量のデータを処理・分析し、実世界の環境情報をリアルタイムに認識して、様々なサービスを実現する社会が到来しつつある。一方、IoT 機器の数や処理すべきデータ量の増大によりインターネットやクラウドで消費する電力量が急増しており、情報システム総体での抜本的な省エネルギー化が求められている。そのため、微小エネルギーで動作するデバイスの開発、IoT 機器を動作させるためのエネルギーを環境から抽出する技術など、情報システムの低消費電力化を目指した研究開発が進められている。

## 1.2 研究目的

省エネルギーの観点からは、多数の車載カメラから大量の画像データを収集してダイナミックマップを生成したり、ドローンによる空撮映像から農作物の生育情報を把握したり、(中国の一部の都市のように)街中にカメラを設置して監視システムを構築したりすること、つまり高機能センサ群から収集した大量のデータを、膨大な計算資源を投入して分析することは理想的な環境情報認識手法とは言い難い。振動をエネルギーに変えて動作する物体反応型センサを多数道路に敷設して交通状況を調べたり、水分量が低下するとシグナルを発するセンサを農地に埋め込んで土壌の水管理をしたりするなど、微量なエネルギーで動作する単純なセンサ群から必要最小限のデータを収集し、それらデータを処理して必要十分な量の情報を得ることこそ、むしろ目指すべき姿である。

近年、ナノテクノロジーの進歩により各種デバイスの小型化が進み、目視サイズであった無線センサ端末を  $1\text{mm}^2$  以下にまで小型化する研究も進められている [1-5] . 本研究では、そのようなサイズも消費電力も微小なセンサを使用した環境センシングについて検討する.

微小低消費電力センサには、(サイズや電力消費量の制約から) 位置認識機能は実装されず、その位置を把握することは困難であると考えられる. つまり、微小低消費電力センサが収集するデータには位置情報が付与されず、位置属性のない微小な (しかるが、データ処理に関する多くの既存技術は位置情報が利用できることを前提としており、これらは適用できない. 位置の分からない大量のバイナリセンサ (1 ビット情報のみ出力するセンサ) を使用した環境センシングに関する研究も一部で行われているが [6-8] , 限定的な情報の認識に留まっている.

本研究では、低消費電力センサ群が収集する位置属性のない大量のデータを処理し、環境情報を認識する位置情報非利用型環境認識技術の確立を目的とし、その技術が有効に機能することをシミュレーション実験により実証する.

### 1.3 本論文の構成

本論文の以下の構成は次のようになっている.

第2章では、センサネットワークについて説明する.

第3章では、位置推定技術について説明する.

第4章では、近接情報利用型位置推定法について述べる.

第5章では、位置推定が有効に機能することを様々なシミュレーションで確認する.

第6章では、本論文の結論を述べる.

## 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、ノードの周囲の状況を検知し、そのデータになんらかの加工を加えネットワークを経由し情報を伝えるための端末である。一般的には、この検出する部分であるセンサ自身と検出したデータを加工したりほかの処理を指示したりするプロセッサ、その結果得られた情報をネットワークへ流すための通信モジュール、また動作するための電源が備わっている。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，光センサ，磁気センサ等。

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小型化し、さらに、低価格・低消費電力化が実現している。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 [9-11]。無線通信を用いてセンサネットワークを構成する場合、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。

## 第3章 位置推定技術

位置推定技術には様々な手法があるが、大きくレンジベース方式とレンジフリー方式に大別される。以下では、位置推定環境に電波を発する端末を設置し、位置が未知のノードの位置推定を行う手法を紹介する。

### 3.1 レンジベース位置推定技術

レンジベース方式は各ノード間距離や受信信号の到来方向を測定結果から求め、それに基づきノードの位置を推定する手法である。TOA(Time Of Arrival), TDOA(Time Difference Of Arrival), RSS(Received Signal Strength)によりノード間距離を推定し位置推定を行う手法と、電波の到達角度によりノードの位置推定を行う AOA(Angle Of Arrival)という手法がある。レンジベース位置推定技術の特徴を表1に示す。

表1 レンジベース位置推定技術の特徴.

推定手法	推定要素	必要ノード数	問題点
TOA・TDOA	到達時刻	3	ノードの時間同期誤差が精度に影響
RSS	信号強度	3	距離減衰のモデル化が必要
AOA	到達角度	2	アンテナ設置コスト

### 3.1.1 TOA・TDOA

到達期間（TOA：Time Of Arrival）方式はノード間の電波送信時間と受信時間を測定することにより到達距離を求める方式である。そのため、送信側と受信側の時間同期が必要となる。同期時の時間誤差が推定の精度に影響する。

到達時間差（TDOA：Time Difference Of Arrival）方式は、各電波受信側での電波の到達時間差により位置を推定する手法である。送信側との同期をする必要がないため、TOA方式よりも実用的である。

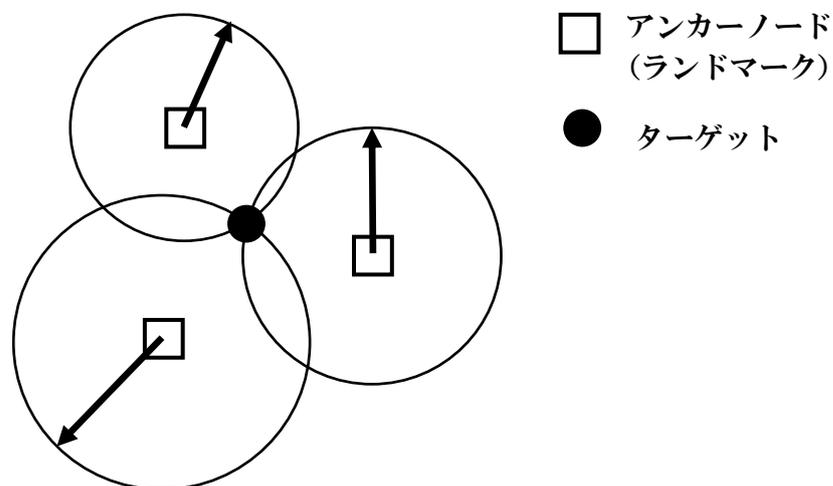


図1 TOA/TDOA/RSS を利用した位置検出技術[12][13].

### 3.1.2 RSS

RSS 位置検出技術は、ノードが発した電波を受信し、その受信信号強度から距離を算出、位置を推定する手法である。受信信号強度から距離を算出するには、その環境における電波の距離減衰のモデル化が必要である。距離減衰のモデル化には使用環境下で様々な位置、距離のRSSの測定が必要である。簡易な装置で電波を受信、位置を算出できるが、推測の精度を向上するためには、距離減衰を複数モデル化する必要がある。

### 3.1.3 AOA

到達角度（AOA : Angle Of Arrival）方式は，アンカーノードが発した電波がどの方向（到達角度）から発せられたかを測定することで位置を推測する．図に AOA 方式の推定手法を示す．AOA 方式が必要とする情報は到達角度  $\theta_1$  と  $\theta_2$  のみであるため，TOA・TDOA や RSS に比べ測位するためのノード数が少ない利点がある．しかし，到達角度を推定するには，指向性のアンテナやアレーアンテナを用いるため，コストがかかってしまう欠点がある．

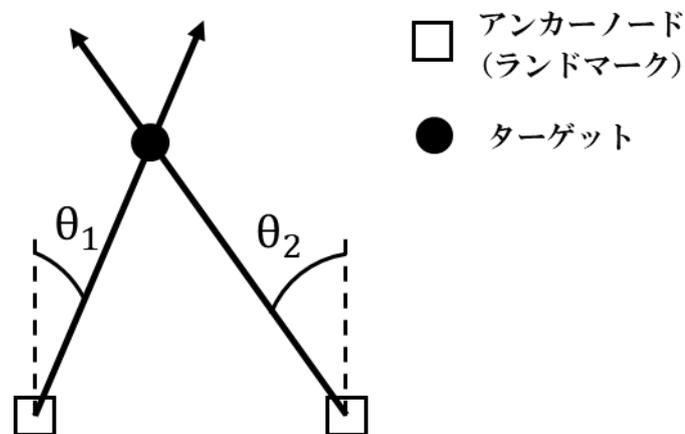


図 2 AOA を利用した位置検出技術[12][13].

## 3.2 レンジフリー位置推定技術

レンジフリー方式はあらかじめ位置がわかっている一部のノード（アンカーノード）を用い，それらノードとの位置関係やホップ数などからノードの位置を推定手法である．レンジフリー位置推定技術の特徴を表 2 に示す．

表 2 レンジフリー位置推定技術の特徴．

推定手法	推定要素	必要ノード数	問題点
Centroid	重心位置	3	アンカーノード設置のコスト
DV-hop	平均距離	3	誤差が大きい
APIT	APIT検定とRSSI	3	RSSI誤差が精度に影響

### 3.2.1 Centroid 法

Centroid 法 [14] は、アンカーノードが発したビーコンをノードが取得することで、位置推定をする。各ノードは、ビーコンからアンカーノードの位置を受信する。複数のアンカーノードの位置の重心をノードが存在する位置として算出することで位置推定を行う。式に  $N$  台アンカーノード位置  $(X_1, Y_1) \cdots (X_N, Y_N)$  をノードが取得したとき、ノードの位置として推測される座標  $(X, Y)$  を示す。

$$(X, Y) = \left( \frac{X_1 + \cdots + X_N}{N}, \frac{Y_1 + \cdots + Y_N}{N} \right). \quad (1)$$

図3にセントロイドアルゴリズムでノード位置を推定する例を示す。アンカーノードを青丸、推定ノードを赤丸で示す。アンカーノードが発するビーコンの到達距離を黒丸で表した。

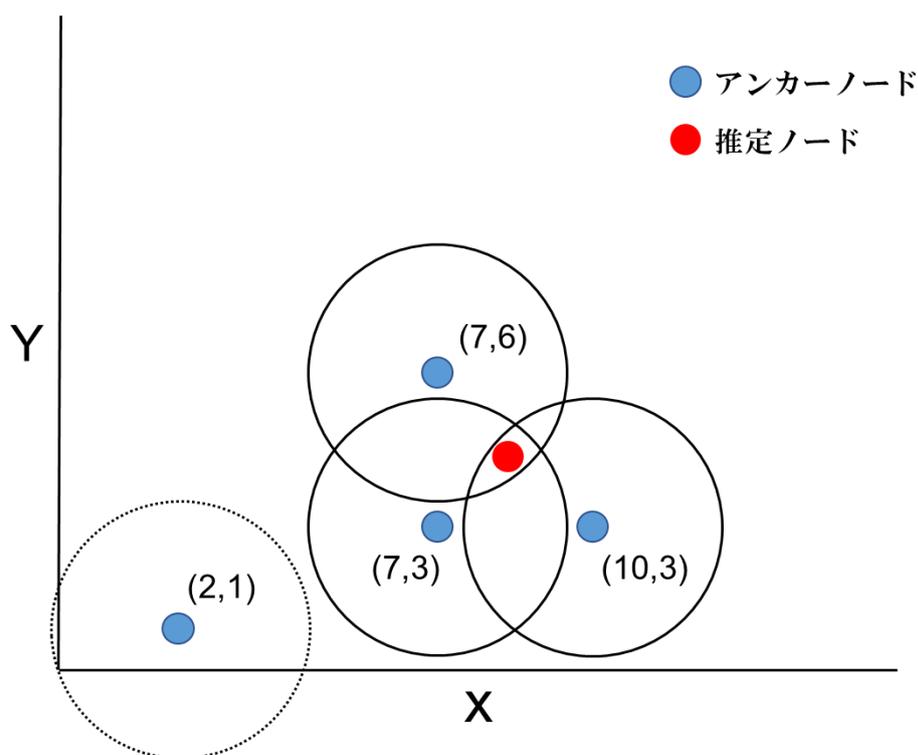


図3 Centroid 法位置推定例.

図 3 の例ではアンカーノードの座標がそれぞれ, (7,3), (7,6), (10,3)であるので

$$\left( \frac{7+7+10}{3}, \frac{3+6+3}{3} \right) = (8,4), \quad (2)$$

となり, ノードの位置は (8,4) だと推定される.

Centroid 法の手法自体は簡単であるが, 位置推定の精度を上げるためには, 各端末を多くのアンカーノードがカバーする必要がある. そのため, Centroid 法にはコストや設置場所の増加といった問題点がある.

### 3.2.2 DV-hop 法

DV-hop 法 [15] は, アンカーノードからノードへのホップ数を取得後, 1 ホップの平均距離よりノードへの距離を計算し, 位置を推定する手法である. 以下に手順を示す.

1. 各ノードがアンカーノードから電波を受信する.
2. 受信データからノードはアンカーノードとノード間のホップ数を取得する
3. アンカーノード間距離より 1 ホップの平均距離を算出する
4. すべてのノード間において, 手順 3 を行う
5. アンカーノードが 1 ホップの平均距離を近隣のノードへ送信する
6. ノードがアンカーノードとの距離を算出する
7. 以上の手順で取得したデータより多角測量し, 位置推定する

手順 6 では, 3 個以上のアンカーノードとの距離を算出する必要がある. 手順 3 は以下の式 (3) が用いられる. ここで,  $C_i$  はアンカーノード  $i$  に関する 1 ホップの平均距離である.

$$C_i = \frac{\sum \sqrt{(X_i - X_j)^2 + (Y_i - Y_j)^2}}{\sum h_i} \quad (i \neq j). \quad (3)$$

図 4 の例において、 $C_1, C_2, C_3$  [m] はアンカーノード  $i$  から推定ノードまでの 1 ホップの平均距離を表し、これらを計算すると

$$C_1 = \frac{70 + 100}{2 + 4} = 28.3, \quad (4)$$

$$C_2 = \frac{70 + 120}{2 + 4} = 31.7, \quad (5)$$

$$C_3 = \frac{100 + 120}{4 + 2} = 36.7, \quad (6)$$

である。アンカーノード  $A_1, A_2, A_3$  の推定ノードまでのホップ数はそれぞれ 2,3,2 であるので、ホップ数を 1 ホップの平均距離に乘じ算出すると、アンカーノードから推定ノードまでの距離  $L_i$  [m] は

$$L_1 = 2 \times 28.3 = 56.6, \quad (7)$$

$$L_2 = 2 \times 31.7 = 63.4, \quad (8)$$

$$L_3 = 2 \times 36.7 = 73.4, \quad (9)$$

となる。アンカーノードの位置が分かっているので、多角測量に基づき、位置を推定する。DV-hop 法の手法は簡単ではあるが、誤差が大きい。また、アンカーノードとノード数が増えると、通信量が増大する問題がある。

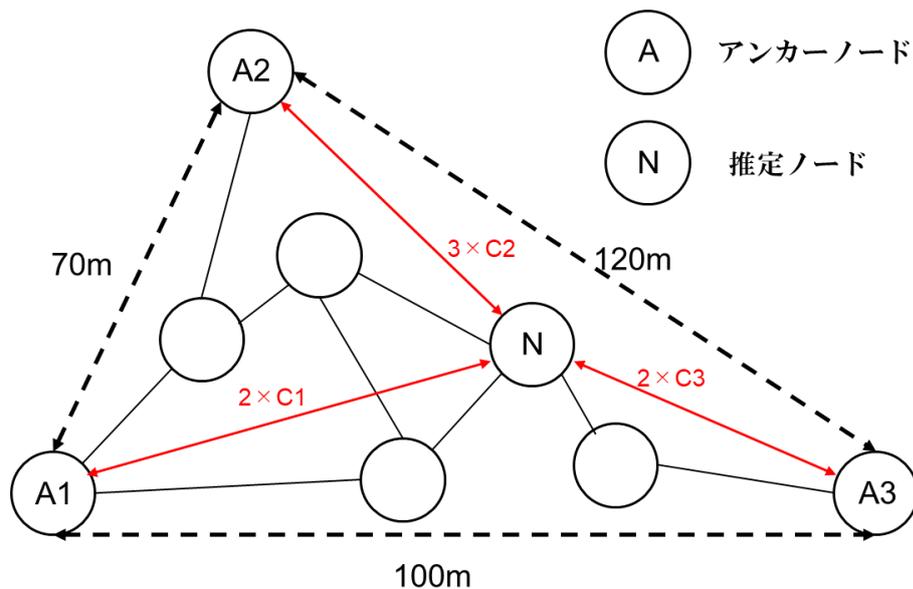


図 4 DV-hop 法位置推定例.

### 3.2.3 APIT 法

APIT(Approximate Point-In-Triangulation Test)法 [16] は、各アンカーノードがそれ自身の位置情報を含んだビーコンを定期的にブロードキャストする。各ノードは、受信したビーコンから 3 つのアンカーノードの組み合わせで作成可能なすべての三角形を求める。これらの三角形に対し、自分が各三角形の内側にいるのか、外側にいるのかを検証し、それに基づき自身の位置を絞り込んでいく。三角形の内部か外部かの判断には、PIT 検定および APIT 検定が用いられる。PIT 検定には、各ノードをすべての方角に移動し、各三角形の 3 台すべてのノードとの距離が離れる方角にある場合、そのノードはその三角形の外側にいると判定する。簡単な検定法ではあるが、各ノードをすべての方角に移動するのは現実的ではない。これを解決する方法として、ノードを移動させるのではなく、RSSI を利用するのが APIT 検定である [17]。

APIT 検定では、各ノードは各アンカーノードからの RSSI 情報を交換し、各アンカーノードに対し、どちらのアンカーノードのほうが近いかをまず決める。その情報に基づき、各三角形を構成する 3 つのアンカーノードとのすべての距離において、自分より遠いノードが近隣ノードに存在する場合、自分がその三角形の外側にいると判断する。APIT 法は少ない通信量（オーバーヘッド）で Centroid 法よりも高い位置推定精度が得られるが、アンカーノードで構成されるどの三角形の内側にも含まれないノードの位置を決めることはできない。また RSSI と距離との関係を表す減衰モデルは近似モデルであり、RSSI から求められる距離は必ずしも正確ではない。そのため、三角形の内側にいるか外側にいるかの判定は誤りやすく、位置推定精度も劣化してしまう [17]。

図 5 に APIT 法での位置推定例を示す。推定ノードは A から E, 5 個のアンカーノードからビーコンを受信する。その後, 5 個のアンカーノードから, 3 個のアンカーノードを組み合わせて三角形を求める。次に RSSI により距離を測定し, 推定ノードがどの三角形に含まれているかを測定する。図では推定ノードは三角形 ABC, BCE, BDE に含まれる。そのため, 推定ノードは三角形 ABC, BCE, BDE が重なっている位置に存在すると推定できる。

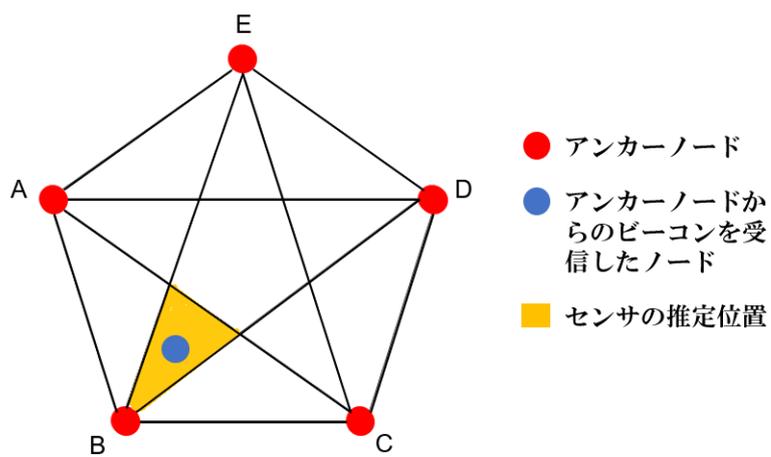


図 5 APIT 法位置推定例[17].

## 第4章 近接情報利用型位置推定

### 4.0 問題設定

位置情報非利用型環境認識技術の具体例として、本研究では設置場所の分からない物体検出型センサが複数置かれた領域を通過する物体の認識技術を取り上げる。問題設定を以下に示す。

2次元平面上の  $N$  個のセンサが置かれている。(位置が既知の一部のセンサを除き) 各センサの位置は不明とする。センサはそれぞれ固有の監視エリアを有しており、本稿ではセンサ  $i$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ) の監視エリアを  $A_i$  と記す。 $A_i$  は時間的に変化しないものとする。簡単のため、監視エリア内には対象物が高々一つ存在し、各離散時刻  $t$  ( $t = 1, 2, \dots, N$ ) において対象物が占める領域を  $O_t$  と表すことにする。センサ  $i$  は各離散時刻  $t$  において監視エリア内に対象物が存在する場合 (つまり、 $A_i \cap O_t \neq \emptyset$  を満たす場合) に物体を検出し、自らの識別子を LPWA (low-power wide-area) などの通信技術により、クラウドに送信する。時刻  $t$  において対象物を検出したセンサの識別子の集合を  $S_t$  とすると、クラウドではセンサからの信号に基づき、各時刻において反応したセンサ識別子の集合  $\{S_t\}_{t=0}^{\infty} = (S_0, S_1, S_2, \dots)$  を知ることができる。

図 6 に本問題設定の一例を示す。図では時刻 0 においてセンサ 4, 8, 10 が, 時刻 1 でセンサ 2 と 6 が, 時刻 2 でセンサ 3 が対象物を検出している。したがって,  $S_0 = \{4, 8, 10\}$ ,  $S_1 = \{2, 6\}$ ,  $S_2 = \{3\}$  である。

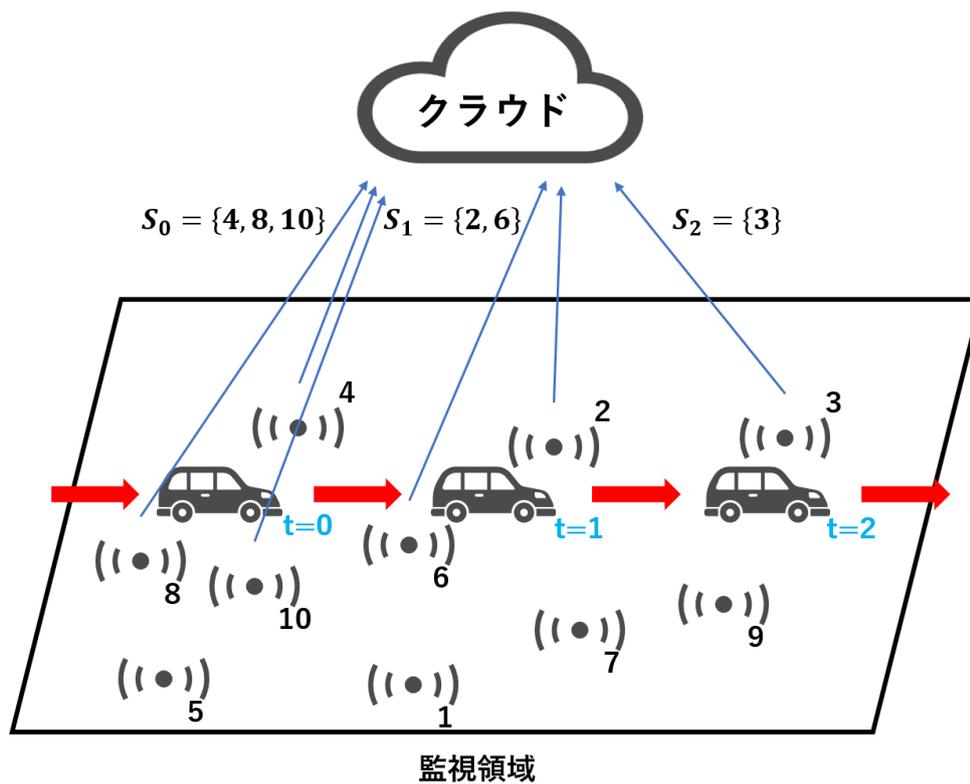


図 6 問題設定.

## 4.1 センサ間の接続関係を表す無向グラフの構築

近接情報利用型位置推定 [18] は、コネクティビティベースの協調位置推定技術 [19-23] を利用した位置推定手法である。本章では、その概要を簡単に説明する。

図 6 において、センサ 4, 8, 10 は時刻 0 で対象物を同時に検出しており、この事実からセンサ 4, 8, 10 は互いに近くに存在すると想像できる。近接情報利用型位置推定では、同時刻に対象物を検出したセンサ同士は接続されている（connected：近くにいる）と認識する。同様に図 6 において、センサ 2 と 6 は時刻 1 で対象物を同時に検出しているため、センサ 2 と 6 は接続されていることになる。このように、対象物が監視領域を通過するたびに、センサ間の接続関係（近接関係）の情報が得られる。十分な数の対象物が通過後、センサ間の接続関係情報に基づき、図 7 の左に示すような、センサの接続関係を表現した無向グラフが得られる。

センサの接続関係を表現するグラフが求めれば、グラフの情報からセンサ間の仮想的な距離を定めることができる。例えば、センサ  $i$  と  $j$  が接続されている場合、センサ  $i-j$  間の距離  $d_{ij}$  は 1 に等しいと定める。同様にセンサ  $i-j$  間が  $n$  ホップ離れている場合、センサ  $i-j$  間の距離  $d_{ij}$  は  $n$  に等しいと定める。

本稿では、行列  $D = \{d_{ij}\}$  を距離行列と呼ぶ。センサ間の接続関係が図 2 の左の無向グラフで表現されている場合の距離行列を図 7 の右に示す。

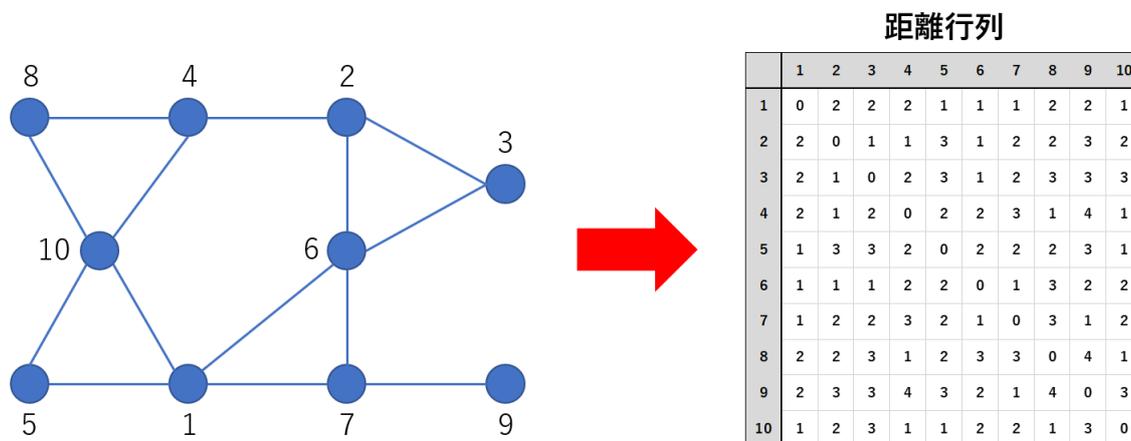


図 7 センサ間の接続関係を表す無向グラフと距離行列。

## 4.2 センサの相対位置マップの構成

次に、センサの相対位置マップを構成する方法を述べる。相対位置マップはセンサ間の相対的な位置関係を示すものであり、3個以上のアンカーが存在すれば、相対位置マップは、拡大/縮小、回転、並進（さらには必要に応じて反転）を施すことにより絶対位置マップに変換できる。以下では、センサ  $i$  の相対位置マップ上の座標（相対座標）を  $\hat{\mathbf{s}}_i$  と表し、一般性を損なうことなく  $\hat{\mathbf{s}}_1 = \mathbf{0}$  とする。

センサの相対座標は距離行列をできるだけ正確に再現するように定めたい。このため、センサの相対座標を以下の最適化問題を解くことにより求める。

$$(\hat{\mathbf{s}}_2, \dots, \hat{\mathbf{s}}_N) = \underset{(\mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_N)}{\operatorname{arg\,min}} \varepsilon(\mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_N), \quad (10)$$

ここで

$$\varepsilon(\mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_N) \stackrel{\text{def}}{=} \sum_{i=1}^N \sum_{j \neq i}^N (|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j| - d_{ij})^2, \quad (11)$$

であり、かつ  $\mathbf{x}_1 = \mathbf{0}$  とする。(10)の右辺の最適化問題は、グラフの描画分野でしばしば登場し、効率的に近似解を求めることのできる計算法(stress majorization)が存在する [24]。以下、4.2.1でその概略を説明する。

## 4.2.1 Stress majorization

まず，以下を定義する．

$$g(\mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_N, \mathbf{y}_2, \dots, \mathbf{y}_N) \stackrel{\text{def}}{=} \sum_{i=1}^N \sum_{j \neq i} \left\{ |\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j|^2 + (d_{ij})^2 - 2(\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j)^T (\mathbf{y}_i - \mathbf{y}_j) \frac{d_{ij}}{|\mathbf{y}_i - \mathbf{y}_j|} \right\}. \quad (12)$$

関数  $g(\mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_N, \mathbf{y}_2, \dots, \mathbf{y}_N)$  は (10) の右辺に現れる目的関数  $\varepsilon(\mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_N)$  と以下の関係がある．

$$\varepsilon(\mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_N) = g(\mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_N, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_N) \leq g(\mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_N, \mathbf{y}_2, \dots, \mathbf{y}_N). \quad (13)$$

ここで，(13) の不等式は任意の  $(\mathbf{y}_i, \mathbf{y}_j)$  について次が成り立つことから得られる．

$$|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j| = \frac{(\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j)^T (\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j)}{|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j|} \geq \frac{(\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j)^T (\mathbf{y}_i - \mathbf{y}_j)}{|\mathbf{y}_i - \mathbf{y}_j|} \quad (14)$$

stress majorization は再帰的に解を探索する一種の降下法である．  $n$  番目の解を  $(\hat{\mathbf{s}}_2^{(n)}, \dots, \hat{\mathbf{s}}_N^{(n)})$  とする．このとき，  $n+1$  番目の解  $(\hat{\mathbf{s}}_2^{(n+1)}, \dots, \hat{\mathbf{s}}_N^{(n+1)})$  は  $g(\mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_N, \hat{\mathbf{s}}_2^{(n)}, \dots, \hat{\mathbf{s}}_N^{(n)})$  を最小化する  $(\mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_N)$  として定義する．

したがって、 $(\hat{\mathbf{s}}_2^{(n+1)}, \dots, \hat{\mathbf{s}}_N^{(n+1)})$  は以下を満たす。

$$\begin{aligned} & \left[ \frac{\partial g(x_2, \dots, x_N, \hat{\mathbf{s}}_2^{(n)}, \dots, \hat{\mathbf{s}}_N^{(n)})}{\partial x_i} \right]_{(x_2, \dots, x_N) = (\hat{\mathbf{s}}_2^{(n+1)}, \dots, \hat{\mathbf{s}}_N^{(n+1)})} \\ & = 2 \sum_{j \neq i} \left\{ \left( \hat{\mathbf{s}}_i^{(n+1)} - \hat{\mathbf{s}}_j^{(n+1)} \right) - \left( \hat{\mathbf{s}}_i^{(n)} - \hat{\mathbf{s}}_j^{(n)} \right) \frac{d_{ij}}{\left| \hat{\mathbf{s}}_i^{(n)} - \hat{\mathbf{s}}_j^{(n)} \right|} \right\} = 0, \end{aligned} \quad (15)$$

ここで、 $\hat{\mathbf{s}}_1^{(n)} = \hat{\mathbf{s}}_1^{(n+1)} = \mathbf{0}$  である。(15) より、 $n$  番目の解  $(\hat{\mathbf{s}}_2^{(n)}, \dots, \hat{\mathbf{s}}_N^{(n)})$  と  $n+1$  番目の解  $(\hat{\mathbf{s}}_2^{(n+1)}, \dots, \hat{\mathbf{s}}_N^{(n+1)})$  の関係式が得られる。

$$c_i \hat{\mathbf{s}}_i^{(n+1)} - \sum_{j=1; j \neq i}^N c_{ij} \hat{\mathbf{s}}_j^{(n+1)} = \hat{\mathbf{s}}_i^{(n)} \sum_{j=1; j \neq i}^N \frac{d_{ij}}{\left| \hat{\mathbf{s}}_i^{(n)} - \hat{\mathbf{s}}_j^{(n)} \right|} - \sum_{j=1; j \neq i}^N \frac{d_{ij} \hat{\mathbf{s}}_j^{(n)}}{\left| \hat{\mathbf{s}}_i^{(n)} - \hat{\mathbf{s}}_j^{(n)} \right|}, \quad (16)$$

ここで、

$$c_i = \sum_{j=1; j \neq i}^N c_{ij}, \quad c_{ij} \stackrel{\text{def}}{=} \begin{cases} 1, & d_{ij} < \infty \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

(16) は次の再帰式の形で表すことが可能である。

$$\begin{aligned} & \left( \hat{\mathbf{s}}_{2x}^{(n+1)}, \dots, \hat{\mathbf{s}}_{Nx}^{(n+1)} \right)^T = A^{-1} \left( \beta_{2x}^{(n)}, \dots, \beta_{Nx}^{(n)} \right)^T, \\ & \left( \hat{\mathbf{s}}_{2y}^{(n+1)}, \dots, \hat{\mathbf{s}}_{Ny}^{(n+1)} \right)^T = A^{-1} \left( \beta_{2y}^{(n)}, \dots, \beta_{Ny}^{(n)} \right)^T. \end{aligned} \quad (17)$$

ここで、 $\hat{s}_{ix}^{(n+1)}$  と  $\hat{s}_{iy}^{(n+1)}$  は  $\hat{\mathbf{s}}_i^{(n+1)}$  の  $x$  座標と  $y$  座標、また  $\beta_{ix}^{(n)}$  と  $\beta_{iy}^{(n)}$  は以下で表される  $\beta_i^{(n)}$  の  $x$  座標と  $y$  座標である。

$$\beta_i^{(n)} = \hat{\mathbf{s}}_i^{(n)} \sum_{j=1; j \neq i}^N \frac{d_{ij}}{\left| \hat{\mathbf{s}}_i^{(n)} - \hat{\mathbf{s}}_j^{(n)} \right|} - \sum_{j=1; j \neq i}^N \frac{d_{ij} \hat{\mathbf{s}}_j^{(n)}}{\left| \hat{\mathbf{s}}_i^{(n)} - \hat{\mathbf{s}}_j^{(n)} \right|}. \quad (18)$$

また, (17) で現れる  $A$  は以下の ( $n$  に非依存な) 正則行列である. [18]

$$A = \underbrace{\begin{pmatrix} c_2 & -c_{23} & \cdots & -c_{2N} \\ -c_{32} & c_3 & \cdots & -c_{3N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -c_{N2} & -c_{N3} & \cdots & c_N \end{pmatrix}}_{N-1}. \quad (19)$$

(13) の不等式関係から

$$\begin{aligned} \varepsilon(\hat{\mathbf{s}}_2^{(n)}, \dots, \hat{\mathbf{s}}_N^{(n)}) &= g(\hat{\mathbf{s}}_2^{(n)}, \dots, \hat{\mathbf{s}}_N^{(n)}, \hat{\mathbf{s}}_2^{(n)}, \dots, \hat{\mathbf{s}}_N^{(n)}) \\ &\geq g(\hat{\mathbf{s}}_2^{(n+1)}, \dots, \hat{\mathbf{s}}_N^{(n+1)}, \hat{\mathbf{s}}_2^{(n)}, \dots, \hat{\mathbf{s}}_N^{(n)}) \\ &\geq g(\hat{\mathbf{s}}_2^{(n+1)}, \dots, \hat{\mathbf{s}}_N^{(n+1)}, \hat{\mathbf{s}}_2^{(n+1)}, \dots, \hat{\mathbf{s}}_N^{(n+1)}) \\ &= \varepsilon(\hat{\mathbf{s}}_2^{(n+1)}, \dots, \hat{\mathbf{s}}_N^{(n+1)}). \end{aligned} \quad (20)$$

最初の不等式は,  $g(\mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_N, \hat{\mathbf{s}}_2^{(n)}, \dots, \hat{\mathbf{s}}_N^{(n)})$  を最小化する  $(\mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_N)$  として  $(\hat{\mathbf{s}}_2^{(n+1)}, \dots, \hat{\mathbf{s}}_N^{(n+1)})$  が定義されることから導かれる. (20) は  $n+1$  番目の解が  $n$  番目の解よりも (10) の右辺の目的関数  $\varepsilon(\mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_N)$  を減少させることを意味しているので, (17) により再帰的に解を求めると, その結果は目的関数の (少なくとも) 局所解に収束する.

なお, (他の降下法と同様) stress majorization は初期解  $(\hat{\mathbf{s}}_2^{(1)}, \dots, \hat{\mathbf{s}}_N^{(1)})$  を必要し, 目的関数が複数の局所解をもつ場合, 収束先は初期解の選び方に依存する. 初期解の選び方等については, 文献 [18,23] を参考のこと.

### 4.3 センサの絶対位置マップの構成法

センサの中に 3 台以上のアンカー（絶対位置座標が既知のセンサ）が含まれていれば、4.2 節の方法で得られた相対位置マップに対して、スケール変換（拡大／縮小）、並進、回転、さらには反転を施し、絶対位置マップを得ることができる。本節では、相対位置マップから絶対位置マップを得るための変換アルゴリズム [25] について説明する。以下では、 $n$  個のアンカーが存在することとし、それらを 1 から  $n$  まで番号付けする。残りの  $N - n$  個のセンサは  $n + 1$  から  $N$  までの番号付けを行う。また、 $\mathbf{s}_i$  をセンサ  $i$  の絶対位置座標とする。 $\mathbf{s}_i$  は以下のように表される。

$$\mathbf{s}_i = \mathbf{s}_a + dR(\hat{\mathbf{s}}_i - \hat{\mathbf{s}}_a). \quad (21)$$

ここで、 $\mathbf{s}_a$  は絶対位置座標でのアンカーの重心、 $\hat{\mathbf{s}}_a$  は相対座標でのアンカーの重心、 $R$  は回転行列、 $d$  は拡大縮小比（スケーリング比）である。

$$\mathbf{s}_a = \sum_{i=1}^n \mathbf{s}_i, \quad \hat{\mathbf{s}}_a = \sum_{i=1}^n \hat{\mathbf{s}}_i. \quad (22)$$

スケーリング比  $d$  は以下により定まる。[25]

$$d = \sqrt{\sum_{i=1}^n |\hat{\mathbf{s}}_i - \hat{\mathbf{s}}_a|^2 - \sum_{i=1}^n |\mathbf{s}_i - \mathbf{s}_a|^2}. \quad (23)$$

次にスケーリング後の相対位置座標を絶対位置座標に変換するための回転行列  $R$  を定めるため、以下を定義する。

$$M \stackrel{\text{def}}{=} \sum_{i=1}^n (\mathbf{s}_i - \mathbf{s}_a)(\hat{\mathbf{s}}_i - \hat{\mathbf{s}}_a)^T. \quad (24)$$

$M$  は 2 行 2 列の行列である.  $M^T M$  の固有値及び固有ベクトルのペアを  $(\lambda_1, \mathbf{u}_1)$  および  $(\lambda_2, \mathbf{u}_2)$  とする. 回転行列  $R$  は次の式で与えられる.

$$R = M \left( \frac{1}{\sqrt{\lambda_1}} \mathbf{u}_1 \mathbf{u}_1^T + \frac{1}{\sqrt{\lambda_2}} \mathbf{u}_2 \mathbf{u}_2^T \right). \quad (25)$$

## 第5章 シミュレーション実験

4で説明した近接情報利用型位置推定技術手法の有効性を2つのシミュレーションにより評価する。5.1では、今回の技術手法で導いた推定位置と実際の位置にどれほどの誤差があるのかについてシミュレーションを行う。5.2では、環境認識の一例として、監視領域内の物体数のカウントできるのかについてシミュレーションを行う。

### 5.1 実験 A 位置推定精度

#### 5.1.1 実験条件

4で説明した近接情報利用型位置推定技術手法の位置推定精度をシミュレーションにより確認する。20m四方の監視領域（図8）にセンサがランダムに設置されている。センサの設置密度  $\rho$  は 1m 平方あたり 0.5 個ないしは 1 個であるとする。各センサの監視エリアは半径 2m の円とする。また、位置が既知のセンサ（アンカー）が監視領域の 4 隅に 1 つずつ（計 4 つ）置かれている（図 8）。

この監視領域を 30 個の半径 1m の円形の対象物が図 9 のように直線状の経路に沿って速度 1m/s で次々と通過する。監視領域を通過するときの直線経路と監視領域の中心との距離  $d$  ( $0 \leq d \leq 10\sqrt{2}$ )、および通過経路と x 軸がなす角度  $\delta$  ( $0 \leq \delta \leq 2\pi$ ) はランダムに選ばれるものとする。監視領域内のセンサは 1 秒おきに、自らの監視エリアに対象物が存在するか否かを確認し、対象物が存在する場合は自らの識別子を含む信号をクラウドに送信する。クラウドではセンサからの信号に基づき、近接情報利用型位置推定手法により、各センサの絶対座標を推定する。なお、センサ間の接続関係を表すグラフ（図 7）において、すべてのセンサが連結される場合に限り、絶対座標が推定できる。シミュレーション実験では、監視領域を通過する対象物の一定個数が増加した時点で位置推定精度がどの程度であるかを確認した。

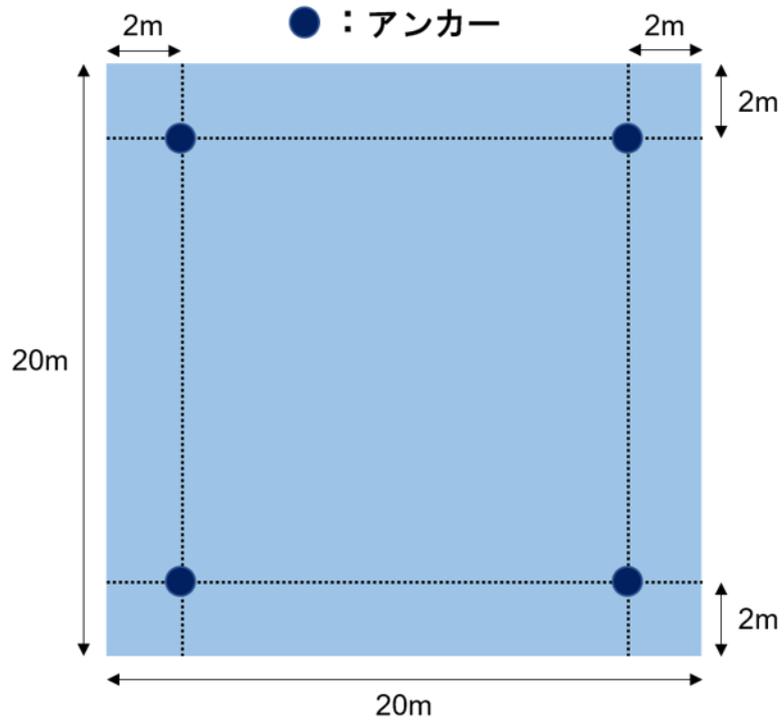


図 8 監視領域.

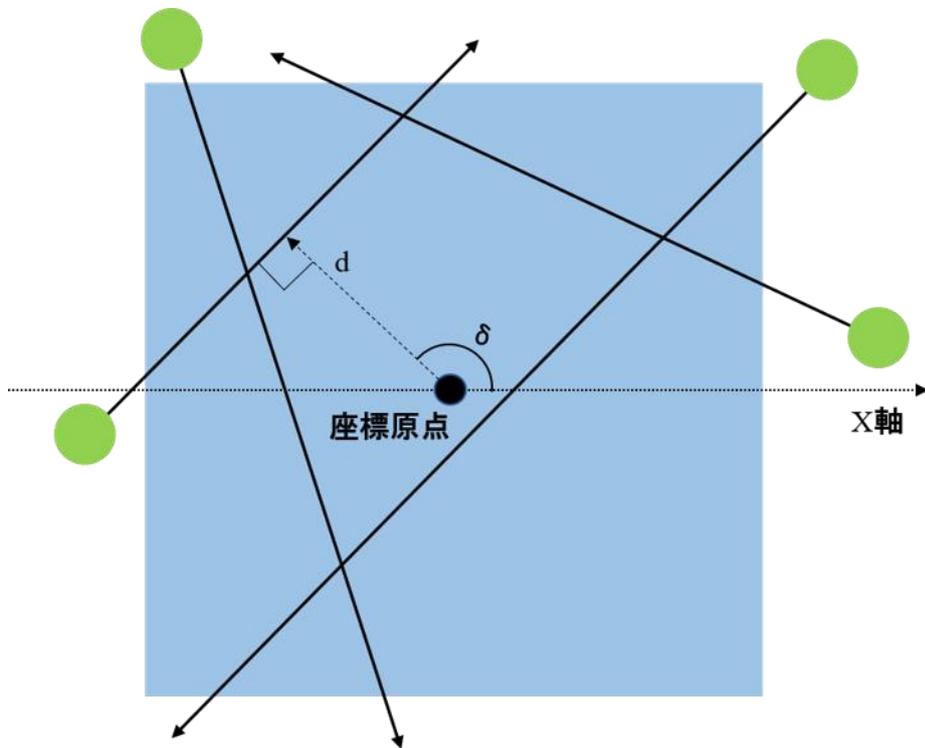


図 9 対象物の通過経路.

## 5.1.2 結果

図 10 および図 11 におけるセンサの設置密度は 1m 平方あたり 0.5 個とした。15 個程度通過時点で、絶対位置座標が推定でき、その時点でかなり正確に位置推定ができていることが確認できた。平均位置推定誤差は監視領域を通過する対象物が増えるにつれ、おおむね単調に減少するが、対象物が 30 個程度通過後でおよそ 0.8m 未満の値に収束する。図 10、図 11 はそれぞれ、対象物が 15 個通過した時点および 30 個通過した時点における、センサの推定座標と実際の座標を比較して示したものである。図において青丸が実際の座標、赤の菱形が実際の座標である。対象物が 15 個通過した時点での位置推定誤差に比べ、30 個通過した時点では、位置推定誤差が少し減少している様子が確認できる。

図 12 および図 13 はセンサの設置密度は 1m 平方あたり 1 個としたときの結果である。図 12、図 13 はそれぞれ、対象物が 20 個通過した時点および 30 個通過した時点における、センサの推定座標と実際の座標を比較して示したものである。30 個通過時点での平均位置推定誤差はおおむね 0.6m 未満であり、センサの設置密度が 1m 平方あたり 0.5 個の場合よりも幾分少ない。図からも対象物が 30 個通過した時点では、かなり正確に各センサの位置が推定できている様子が確認できる。

なお、既存の位置推定技術には位置推定誤差がセンチメートルオーダー程度に収まるものがあり、それらと比べると、ここで述べた位置推定手法の推定精度は劣るが、次節で示すように、利用目的によっては本位置推定手法の精度で十分に有効である。

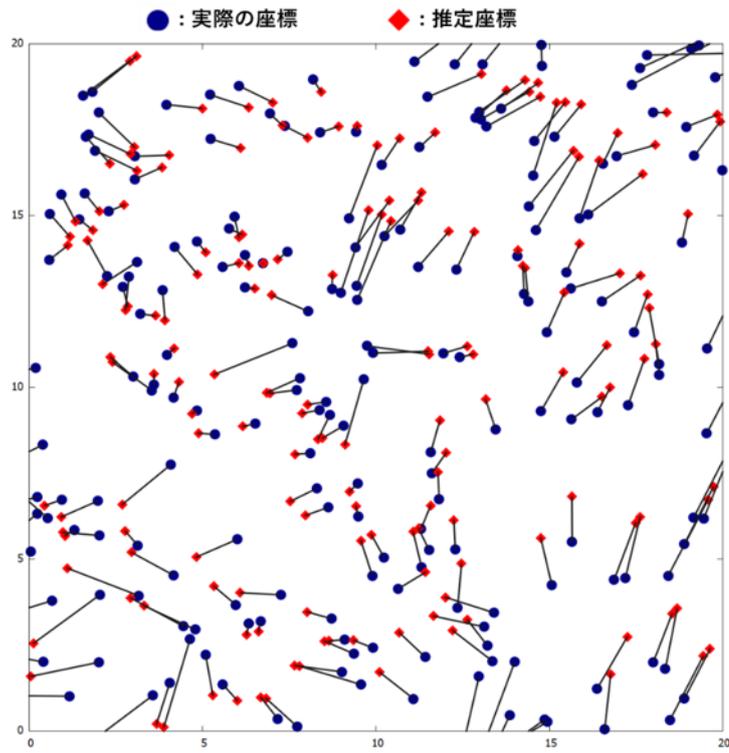


図 10 推定座標と実際の座標との比較 (15 対象物通過時点) :  $\rho = 0.5$  [ $1/m^2$ ].

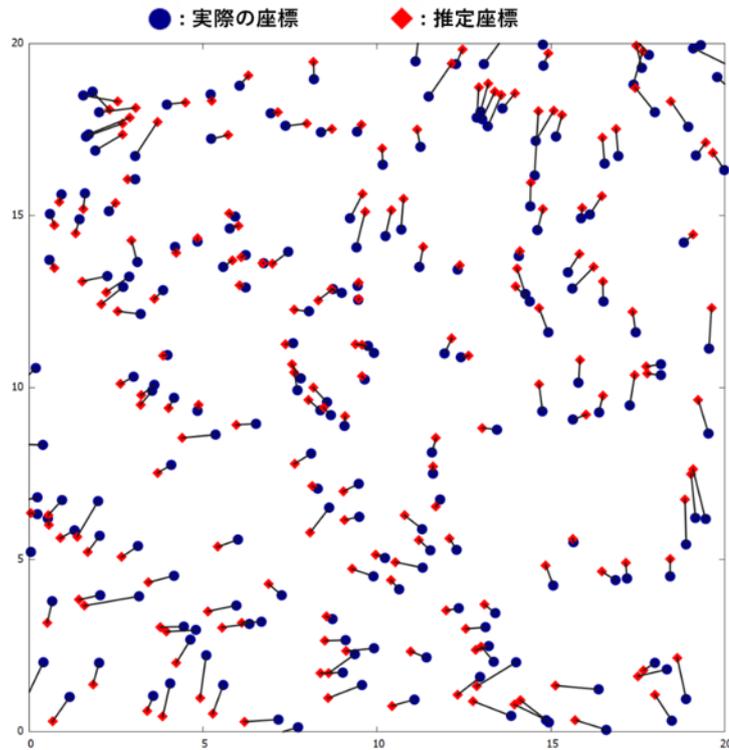


図 11 推定座標と実際の座標との比較 (30 対象物通過時点) :  $\rho = 0.5$  [ $1/m^2$ ].

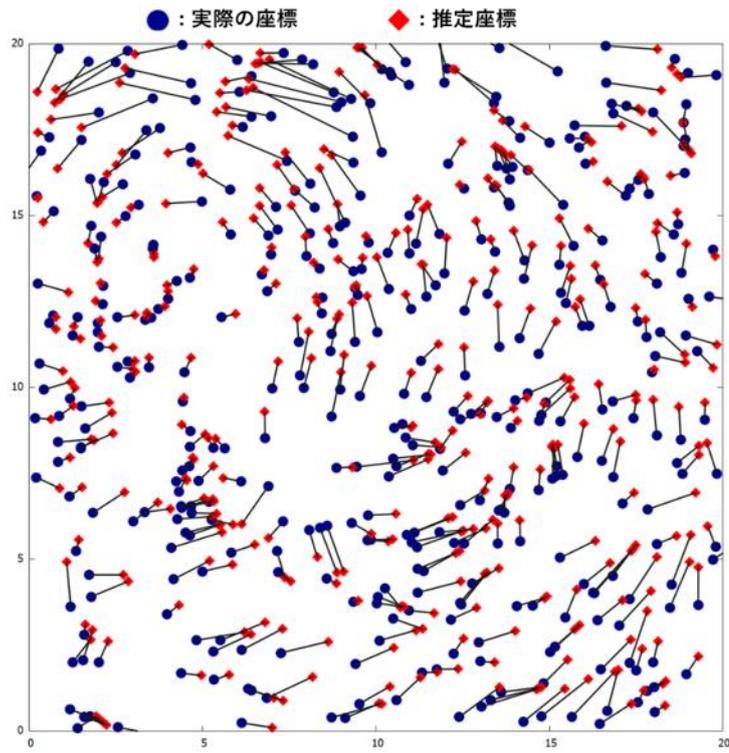


図 12 推定座標と実際の座標との比較 (20 対象物通過時点) :  $\rho = 1$  [ $1/m^2$ ].

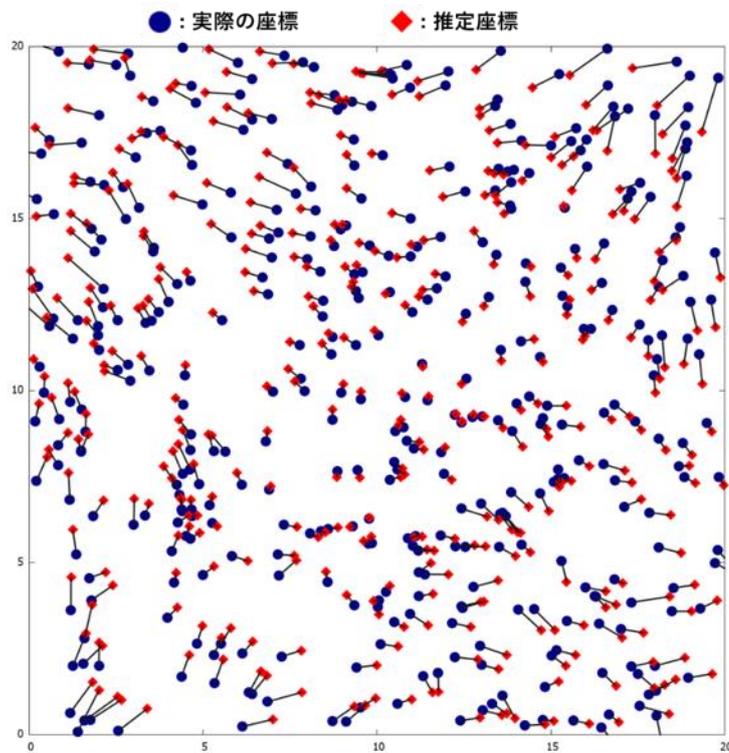


図 13 推定座標と実際の座標との比較 (30 対象物通過時点) :  $\rho = 1$  [ $1/m^2$ ].

## 5.2 実験 B 物体数のカウント

### 5.2.1 実験条件

前節の実験により監視領域内のセンサの位置を推定したのちに，図 14 に示すように半径 1 の円形の 3 つの物体を監視領域内に通過させ，センサの反応から実際に 3 つの物体が監視領域を通過中であることを認識できるかどうかを確認する実験を行った。

### 5.2.2 結果

図 15 (時刻 1)，図 16 (時刻 2)，図 17 (時刻 3) は，センサの設置密度が 1m 平方あたり 0.5 個の場合における，前節の方法で (30 個の対象物が通過後に) 推定したセンサの絶対位置マップ上で，物体に反応したセンサを赤丸で，未反応のセンサを黒丸で示したものである。これらの図から明らかに 3 つの物体が監視領域を通過中であることが読み取れる。絶対位置マップ上の各センサの位置は推定座標であり誤差を伴っているが，このような物体数のカウントにおいて位置推定誤差はほぼ影響しない。

図 18 (時刻 1)，図 19 (時刻 2)，図 20 (時刻 3) は，センサの配置密度が 1m 平方あたり 1 個の場合の結果である。この図からは 3 つの物体が監視領域を通過中であることがより明瞭に確認できる。

参考のために，20 個の対象物が通過後に推定したセンサの推定座標を用いて，同様の実験を行った。センサの配置密度は，1m 平方あたり 1 個の場合を用いた。結果を図 21 (時刻 1)，図 22 (時刻 2)，図 23 (時刻 3) に示す。驚くべきことに，センサの推定座標には幾分かの誤差があるにもかかわらず，3 つの物体が監視領域を通過中であることが図 13，図 14，図 15 と同様に十分明瞭に認識できる。すなわち，対象物のカウント等の用途の場合であれば，近接情報利用型による位置推定は十分有効に機能する。

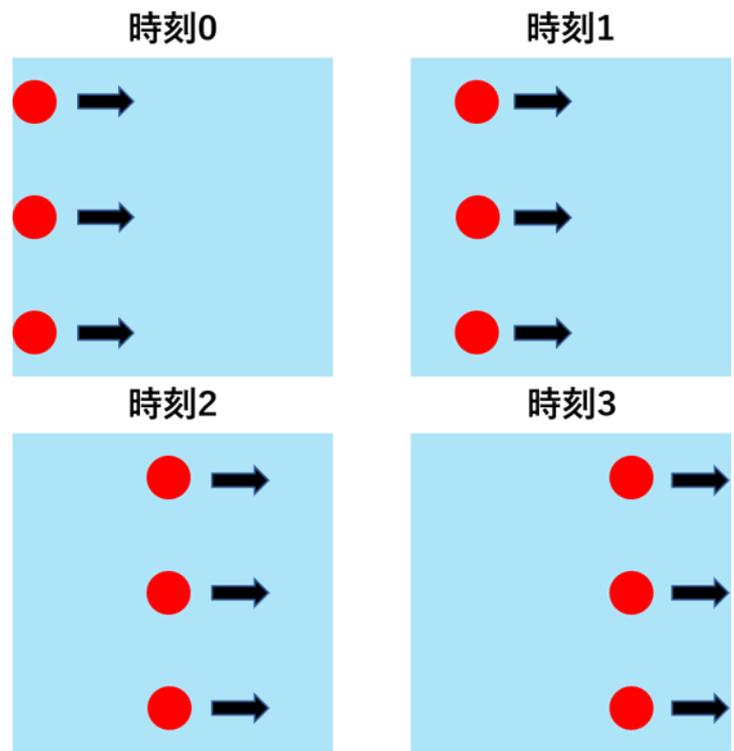


図 14 監視領域の物体通過経路.

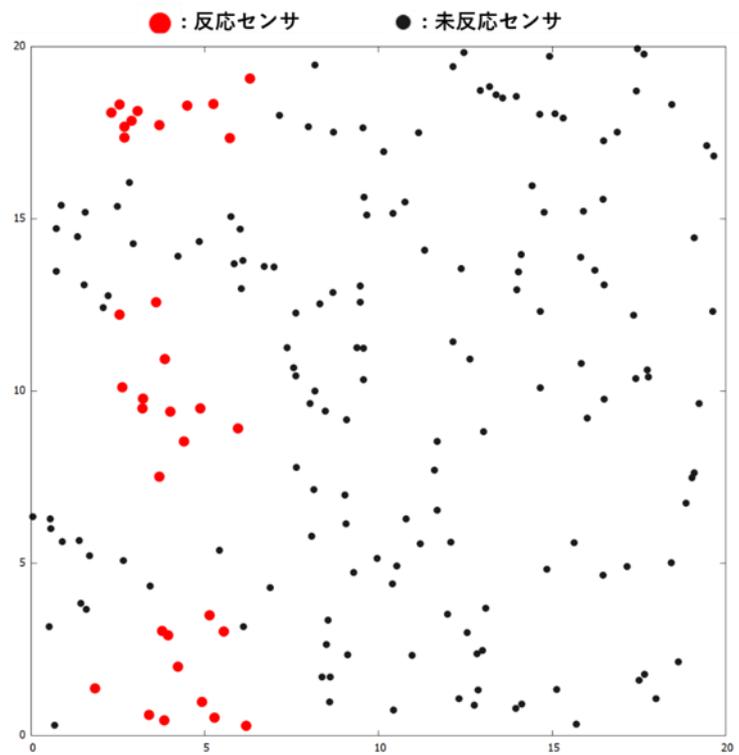


図 15 通過物体に対する反応 (時刻 1) :  $\rho = 0.5 [1/m^2]$ .

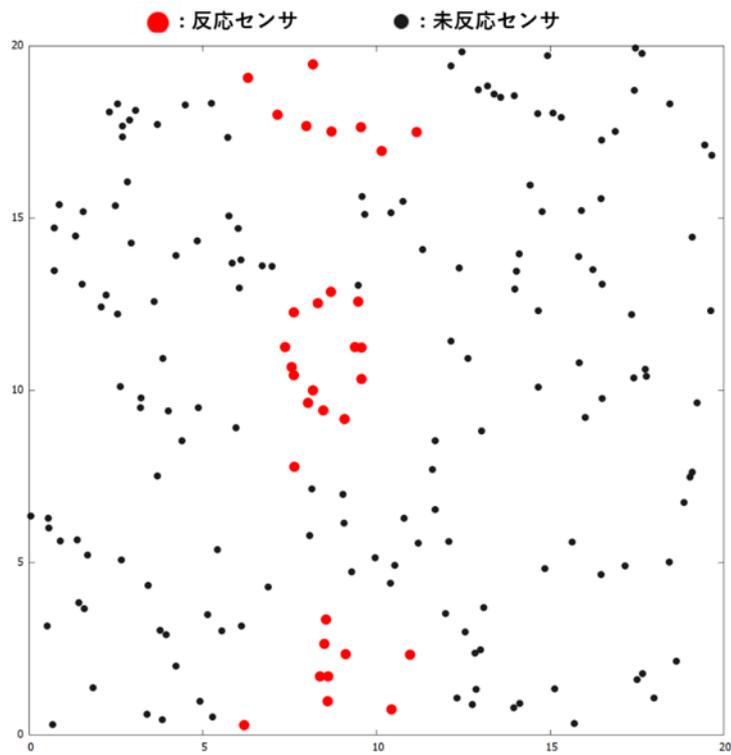


図 16 通過物体に対する反応（時刻 2）： $\rho = 0.5 [1/m^2]$ .

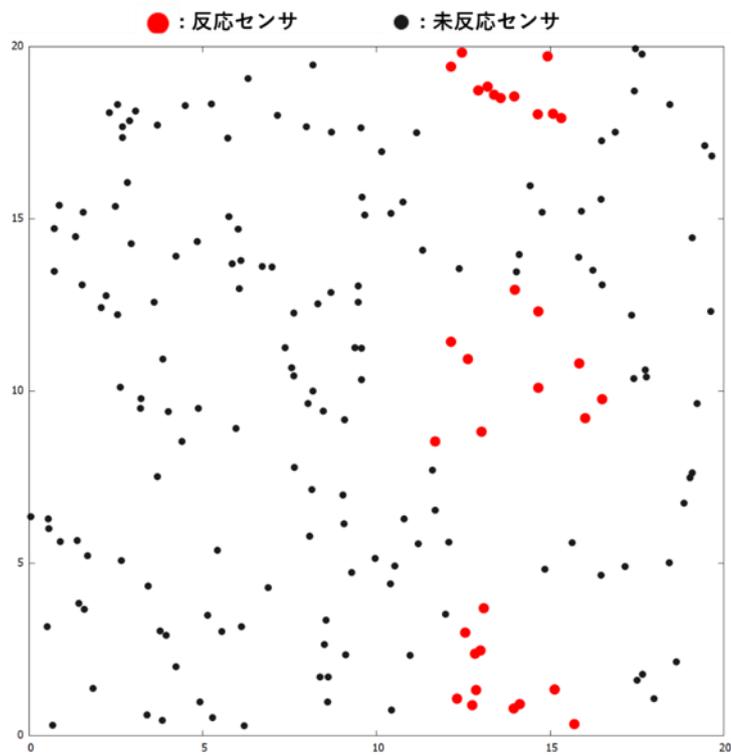


図 17 通過物体に対する反応（時刻 3）： $\rho = 0.5 [1/m^2]$ .

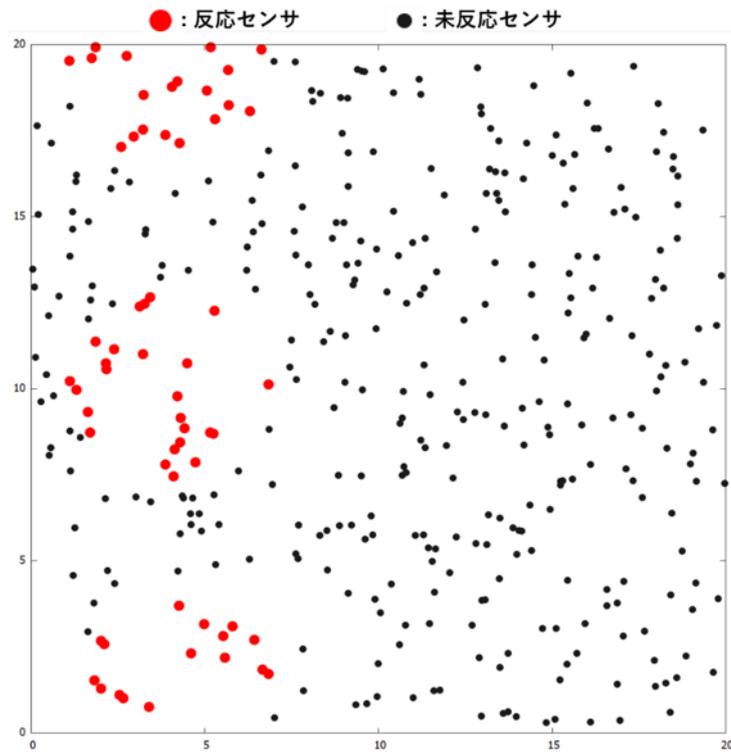


図 18 通過物体に対する反応 (時刻 1) :  $\rho = 1 [1/m^2]$ .

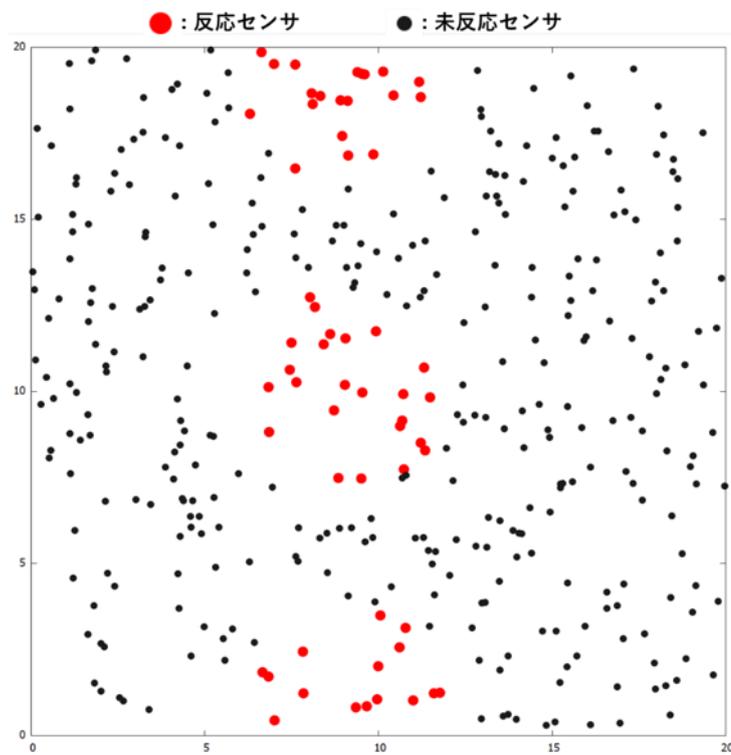


図 19 通過物体に対する反応 (時刻 2) :  $\rho = 1 [1/m^2]$ .

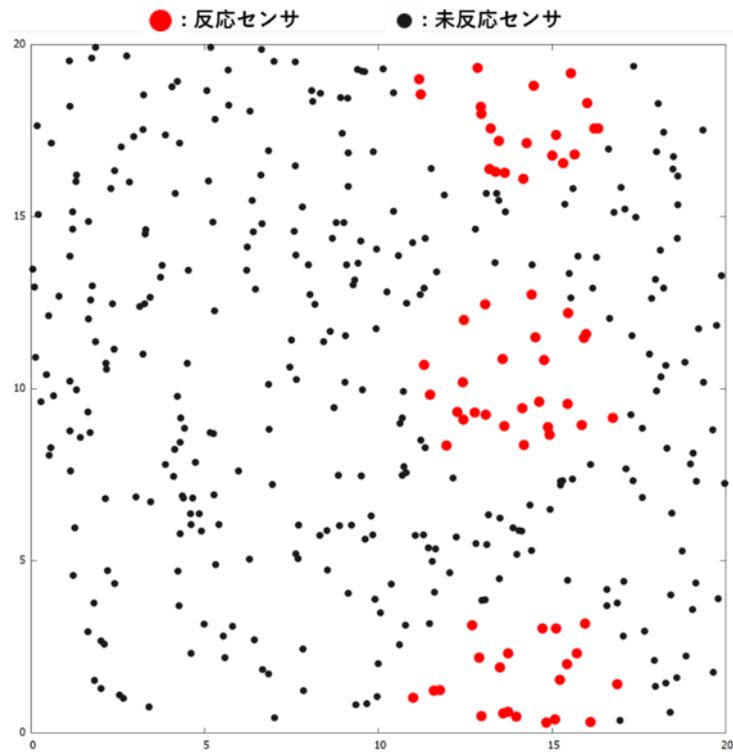


図 20 通過物体に対する反応 (時刻 3) :  $\rho = 1 [1/m^2]$ .

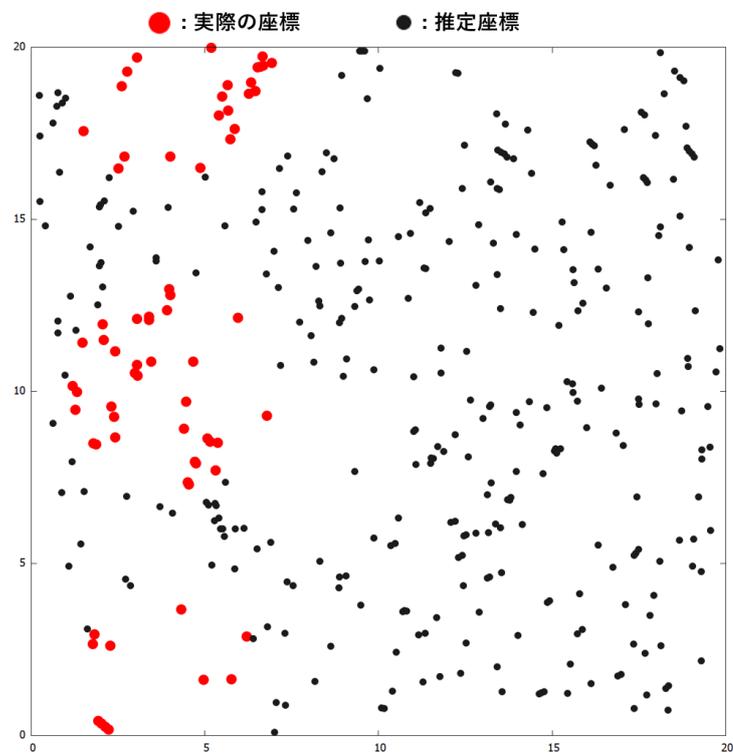


図 21 20 対象物通過時点における通過物体に対する反応 (時刻 1) :  $\rho = 1 [1/m^2]$ .

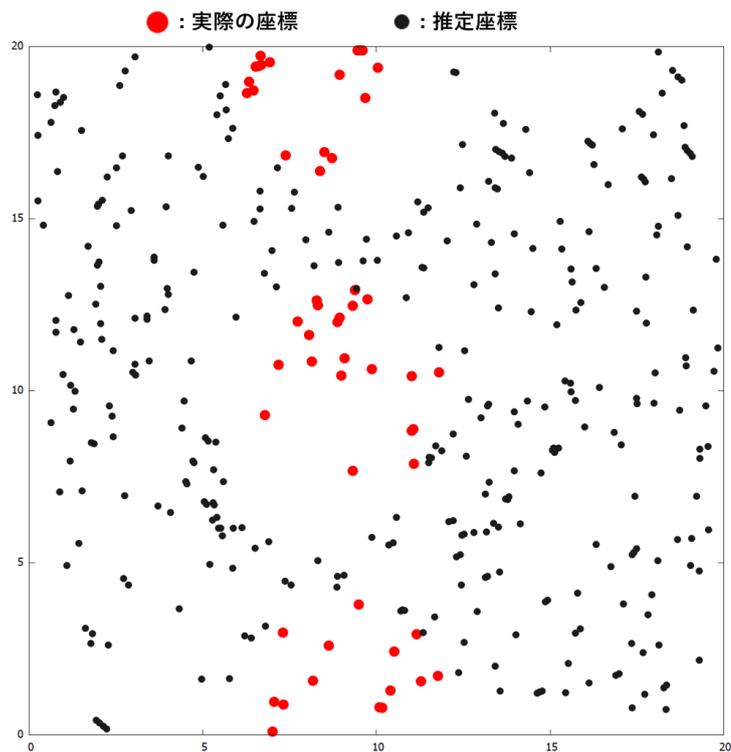


図 22 20 対象物通過時点における通過物体に対する反応（時刻 2）： $\rho = 1$  [1/m<sup>2</sup>].

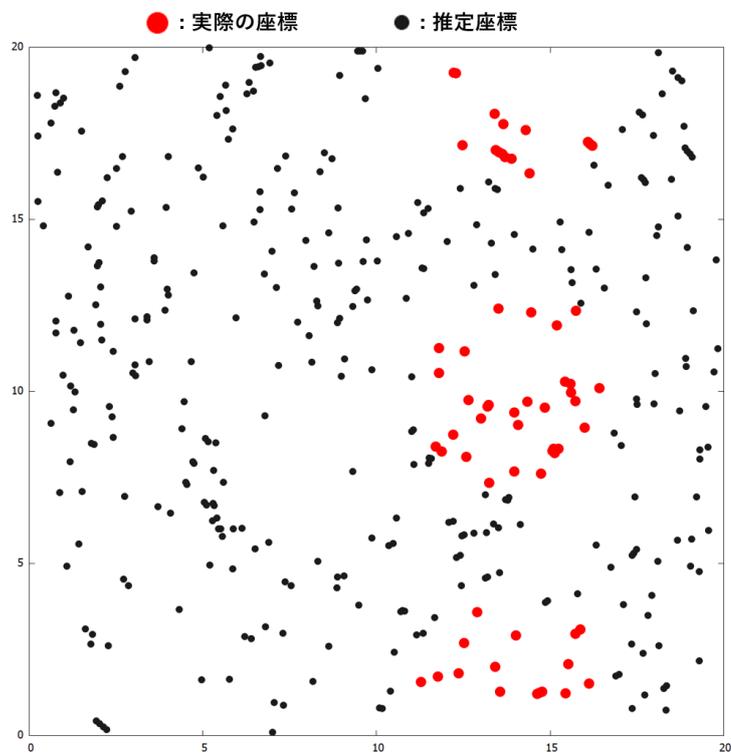


図 23 20 対象物通過時点における通過物体に対する反応（時刻 3）： $\rho = 1$  [1/m<sup>2</sup>].

## 第6章 結論

本研究では、多数の物体反応型センサが置かれた監視領域を通過する物体数のカウンターの例を通して、非位置情報利用型環境認識技術の可能性を検討した。本研究で利用した近接情報利用型位置推定手法によるアプローチは直接的ではあるが、非位置情報利用型の環境認識技術を実現する上で十分な可能性があることを示唆する結果が得られた。

非位置情報利用型の環境認識技術が実現されれば、実際の位置認識機能を持つ高性能のセンサが必要な場面において、本研究で用いたような低性能のセンサを大量に配置し位置推定を行うといった手法が、通信量および消費電力の観点から状況によって選択肢になりうる。また、今回は物体検出型センサを用いた位置推定を行ったが、温度や光等の情報からも位置推定ができると考えられる。

今後は、センサの反応の仕方と対象物の通過経路や輪郭との間には明確な関係が存在すると思われるので、輪郭が既知の経路に沿って通過させたときのセンサの反応から何らかの普遍的な関係性を学習させることによって、未知の経路に沿って侵入する対象物の輪郭推定についての検討を行いたい。具体的には、形状等が既知の対象物を監視領域に通過させた際のセンサの反応を教師信号として用意し、ニューラルネットワークを用いた深層学習など、様々な機械学習の手法を適用することにより、物体情報認識が可能であるかについて検討を行う。

## 謝辞

本研究においてご多忙の中、丁寧に指導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。特に白木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、そのおかげで本研究を潤滑に進めることができました。

最後に、お世話になっ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。

## 参考文献

- [1] H. Tanaka, Y. Ohno, and Y. Tadokoro, “Adaptive control of angular sensitivity for vhf-band nano-antenna using cnt mechanical resonator,” *IEEE Transactions on Molecular, Biological and Multi-Scale Communications*, vol.3, no.1, pp.24–
- [2] T. Nan, H. Lin, Y. Gao, A. Matyushov, G. Yu, H. Chen, N. Sun, S. Wei, Z. Wang, M. Li, et al., “Acoustically actuated ultra-compact nems magnetoelectric antennas,” *Nature communications*, vol.8, no.1, p.296, 2017.
- [3] Y. Tadokoro, Y. Ohno, and H. Tanaka, “Detection of digitally phase-modulated signals utilizing mechanical vibration of cnt cantilever,” *IEEE Transactions on Nanotechnology*, vol.17, no.1, pp.84–92, 2017
- [4] Y. Tadokoro, H. Tanaka, and M. Dykman, “Driven nonlinear nanomechanical resonators as digital signal detectors,” *Scientific reports*, vol.8, no.1, p.11284, 2018.
- [5] 西堀翔真, 田所幸浩, 村瀬勉, “超大量ナノスケール端末からの微量データ転送のための階層化 MAC プロトコル,” 電子情報通信学会情報ネットワーク研究会, IN2018-137, pp. 319-324, 2019.
- [6] H. Saito, S. Shioda, and S. Tanaka, “Stochastic geometric filter and its application to shape estimation for target objects,” *IEEE Trans. Signal Processing*, vol.59, no.10, pp.4971–4984, 2011.
- [7] H. Saito, S. Shimogawa, S. Tanaka, and S. Shioda, “Estimating parameters of multiple heterogeneous target objects using composite sensor nodes,” *IEEE Trans. Mobile Computing*, vol.11, no.1, pp.125–138, 2012.
- [8] H. Saito and S. Shioda, “Parameter estimation method for time-variant target object using randomly deployed sensors and its application to participatory sensing,” *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol.14, no.6, pp.1259–1271, 2014.
- [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 Network Operator's View of a Sensor Network. *IEEE Commun. Magazine*, vol.46, no.12, pp. 112-120, 2008.
- [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] 大槻知明, “位置推定技術,” *信学技報*, pp.3, 2006
- [13] 辻宏之, “アレーアンテナを用いた屋内外の無線基地局位置推定の実験的検証,” *電子情報通信学会論文誌 B*, Vol.J90-B, No.9, pp.784-796, 2007
- [14] N. Bulusu, J. S. Heidemann, D. Estrin, and T. Tran, “Selfconfiguring localization systems: Design and experimental evaluation,” *ACM Trans. Embedded Comput. Syst.* vol.3, no.1, pp.24-60, 2004.
- [15] D. Niculescu and B. Nath, “DV based positioning in ad hoc networks,” *Telecommunication Systems*, vol.22, no. 1-4, pp. 267-280, 2003.
- [16] T. He, C. Huang, B. M. Blum, J. A. Stankovic, and T. F. Abdelzaher, “Range-free localization schemes in large scale sensor networks,” *Proc. of ACM/IEEE MOBICOM03*, 2003.
- [17] 島村和希, “センサの相対位置推定のための最適化手法,” *千葉大学院工学研究科修士論文*, pp.14, 2014
- [18] S. Shioda, “Localizing sensors from their responses to targets,” *IEICE Transactions on Communications*, vol.98, no.1, pp.145–152, 2015.
- [19] N. Patwari, J.N. Ash, S. Kyperountas, A.O. Hero, R.L.Moses, and N.S. Correal, “Locating the nodes: cooperative localization in wireless sensor networks,” *IEEE Signal Processing Magazine*, vol.22, no.4, pp.54–69, 2005.
- [20] H. Wymeersch, J. Lien, and M.Z. Win, “Cooperative localization in wireless networks,” *Proceedings of the IEEE*, vol.97, no.2, pp.427–450, 2009.
- [21] S. Lederer, Y.Wang, and J. Gao, “Connectivity-based localization of large-scale sensor networks with complex shape,” *ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN)*, vol.5, no.4, p.31, 2009.

- [22] Y. Shang, W. Ruml, Y. Zhang, and M.P. Fromherz, "Localization from mere connectivity," Proceedings of the 4th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking & computing ACM, pp.201–212 2003.
- [23] S. Shioda, J. Komatsu, and K. Nishihara, "Connectivity-based sensor localization for anisotropic networks by stress relaxation," 2015 IEEE 82nd Vehicular Technology Conference (VTC2015-Fall) IEEE, pp.1–5 2015.
- [24] E.R. Gansner, Y. Koren, and S. North, "Graph drawing by stress majorization," Graph Drawing, pp.239–250, Lecture Notes in Computer Science, Springer, 2005.
- [25] B.K.P. Horn, H. Hilden, and S. Negahdaripour, "Closed-form solution of absolute orientation using orthonormal matrices," Journal of the Optical Society of America, vol.5, no.7, pp.1127–1135, 1988.