

局所位置関係を用いたトポロジー推定法の提案と シミュレーションによる特性評価

並松祐子[†], 宮崎伸夫[†], 松尾豊[‡], 中村嘉志[‡], 西村拓一[‡]

[†] 株式会社アルファシステムズ

[‡] 産業技術総合研究所 情報技術研究部門

本論文では、実世界のコンテキストを反映させた情報支援を行うために、オブジェクト同士の局所的な位置と向きとの関係を取得し、そこから大局的な関係や意味を抽出するトポロジー推定に関する手法を提案する。また、シミュレーションを用いて本提案手法の基本的な特性を定量的に評価する。さらに、学会や懇親会場などの混雑した空間を想定し、多数のオブジェクトを用いたシミュレーション実験によって数種類の利用シーンに応じて必要となるデバイス特性を明らかにする。実験および評価の結果、トポロジー推定手法が情報支援に必要なコンテキスト情報を抽出するのに有効であることが示された。

Topology Estimation using Local-positioning Relationship: A Suggestion and Characterization by Simulation

YUKO NAMIMATSU[†], NOBUO MIYAZAKI[†], YUTAKA MATSUO[‡],
YOSHIYUKI NAKAMURA[‡], and TAKUICHI NISHIMURA[‡]

This paper proposes a method for estimation of object's topology based on local position and direction relationship in the real world. Our topology estimation method produces global relationships and context information of objects for the information support. The basic characteristic of our method is evaluated quantitatively with a simulation supposing conferences of fellowship banquet. In addition to the characteristic, specification for the real devices is clarified with the simulation using some application scene supposing plenty of objects in a room. The experiments and evaluation results show the feasibility of our topology estimation method.

1. はじめに

ユビキタスコンピューティング[1] やウェアラブルコンピュータなど実世界を指向した情報処理技術においては、ユーザを取り巻く状況を把握し、個々のユーザに適したサービスを提供することが中心的な課題の一つである。ユーザの状況は様々であるが、その中でも、「何処に居るのか」、「誰と居るのか」、「近くに何があるのか」の位置に関する情報が特に重要なものとして挙げられる[2]。こうした位置情報を活用してサービス生成や環境適応、情報支援などを行うシステムは、位置情報システム[3]、もしくは、より広い意味で状況依存

情報処理 (Context-aware computing) システムと呼ばれている。

位置情報システムとして有名なものに ActiveBadge[4]がある。これは、バッジ型の光ビーコン発信装置を装着したユーザを、環境中のセンサで近接性(proximity)を利用して感知することによって位置検出を行うシステムである。このシステムは、当初はバッジを付けたユーザの近くに内線電話を転送するサービスを実現する目的で開発された。しかし、ユーザが位置情報サーバにアクセスすることで、ある人がどの辺りにいるか、また誰といるかを知ることができる。

我々も、このような位置情報システムを学会や

懇親会場、展示会などのイベント会場に運用し、来場者に対する情報支援を行っている[5]。このような情報支援では、位置情報だけでなく、ユーザがイベント会場の人々や展示物、またはロボットなどの空間中のオブジェクトとどのように関わったかといったインタラクション情報がユーザの状況を確定する上で重要である。このインタラクション情報を得るためには、オブジェクトの絶対位置はそれほど必要ではなく、ユーザやオブジェクトとの相対的な位置や向き関係、すなわちトポロジーで十分であると考えられる[6]。

そこで本稿では、位置と方向の関係からなるオブジェクト間の局所関係に着目し、そこから全体の位置関係やユーザの状況を推定するトポロジー推定の手法について提案する。ここでは、トポロジー推定の一手法としてバネモデルを用いた手法を実装し、システム全体の特性を評価するためのシミュレータを作成した。これらを用いてシミュレーション実験を行い、トポロジー推定システムを理論的に考察する。

以下、本稿は次のように構成される。まず、2節で局所関係から全体の位置関係を推定するトポロジー推定の手法を提案する。3節では、シミュレーション実験のために作成したシミュレータの概要を示し、試作したトポロジー推定エンジンの内容を述べる。4節では、配置問題に対するノードの密度と結合数に関する考察を述べる。

2. トポロジー推定の提案

2.1. トポロジー推定

ユーザの位置をベースに状況推定を行うアプローチは古くから提案されているが、ユーザの位置をどのように取得するかといったことが課題であった。屋外であれば、近年ではGPSを用いた測位手法を簡単に利用できるが、屋内では利用が困難なため屋内用の測位系を構築する必要がある。このため従来複数カメラによる位置手法や超音波、磁場、赤外光、電波を用いた位置検出システムが提案され使用されている。しかし、懇親会場のように混雑した空間での位置検出には、装置の配置にかかるコストが無視できなかつたり検出精度が不安定となつたりする問題があった。また、XYZの座標としての記号的な位置が検出されたとしても、地図などを基にしてそれに意味付けしなければ扱い難いという問題があった。

イベント空間で情報支援を行うことを考えた場合、座標としての位置よりも、「誰が」「何に」「どのくらい」注目しているかといった相対的かつ局所的な関係のほうが情報としての価値は高いと考えられる。そこで、本研究ではイベント空間にお

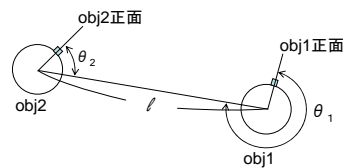


図 1 オブジェクト間の局所関係

いて、図 1のように、オブジェクト間の局所関係(位置と方向の関係)を重視し、これらの情報を集めて全体の関係を推定することによってユーザの状況の推定へと展開させるアプローチを取る。例えば、図 1の関係は、「ある人の左側近くに別の人がいる」といったことを示している。もし、これが向き合って近くに存在し長時間その状態が続くなら、「両者は話し合っているようだ」ということも推定できるだろう。こうして推定されるユーザ状況という、より高次の情報を基に適切な情報支援(例えば知り合いの紹介)を行うことを本研究では考える。

ここで、トポロジー推定は以下の2つの処理に分けられ、定義される。

- ・ 大局的な位置関係の抽出
- ・ 意味や知識の抽出

前者は局所関係を集めて、空間中のオブジェクトがどのような位置関係になっているのかを推定することである。この場合、ある制約下でのオブジェクトの配置問題となる。後者は、得られた大局的な位置関係から、注目しているオブジェクトやグループ、知り合いを見つけるといったユーザの状況を推定することである。本稿では、このうちトポロジー推定の基礎となる前者の大局的な位置関係の抽出について議論する。

2.2. トポロジー推定における配置問題

イベント空間において、図 1で示したように、オブジェクト間のある局所関係(位置と方向の関係)が取得できるとする。ただし、オブジェクトには人やロボットなどの一定速度以下で動作する移動オブジェクトと、空間中に固定された位置が既知である展示物などの静止オブジェクトがあるとする。

ここで、角度 θ と距離 l 、およびそれらの時間変化が精度良く取得できれば、トポロジー推定は静止オブジェクトから基準点を定めるだけで単なる配置問題に帰着する。しかし、ここでは現実のセンサを考慮し、 θ と l 、時間の精度は低いものと仮定する。

上記の低精度の仮定を置いたトポロジー推定の

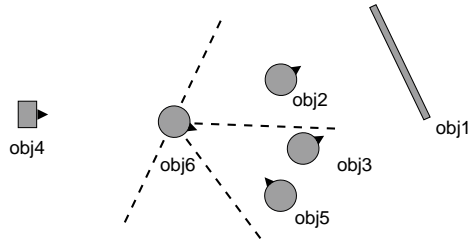


図 2 多数オブジェクトのトポロジー推定

概略について、図 2の例を用いて説明する。この例では、方向に関して左前、前方、右前、後方の4分解能があるとする。Obj6の左前に後ろを向いて立っているObj2を、ある確率で検出できるとする。Obj2に遮られる可能性もあるが、同様にObj6の左前にある展示パネルObj1を検出できることもある。Obj6の前方にはObj3が後ろを向いて存在し、Obj5は対面して存在すると検出される。また、Obj6の後方にはObj4が前を向いて存在すると検出されるだろう。Obj6から見て検出された局所位置関係と同様の関係は、他のObjそれぞれについてもある確率で検出される。トポロジー推定では、各オブジェクトについて検出されたこれらの局所位置関係を基に、矛盾が小さくなるように推定する必要がある。ここで、図 2の例をもう一度見てみると、Obj4がObj2やObj5を検出していなければ、Obj6の影になっている領域に存在する可能性が高くなる。一方、Obj3とObj5はObj6の前方に存在し、かつObj5とObj3の位置関係も相互に判断できるため、これらの制約条件を用いればトポロジーだけでなく位置推定精度も高くなると予想される。

2.3. バネモデルを利用したトポロジー推定手法

本節では、検出されたオブジェクト間の局所関係を基に、バネモデルを用いたトポロジー推定手法について提案する。与えられる情報は図 1で示したように、オブジェクト間の局所関係を示す角度 θ と距離 l とする。この局所関係の検出できたオブジェクト同士は近くにいるものと考え、あるバネ定数を持ったバネを張ることで再現した。また、関係が検出できなかったオブジェクト間には、ある定数による万有斥力が働くものとする。これは、実際のセンサでは検出できる距離 l に上限があるので、直接関係が検出されなかったオブジェクトは遠くにいるだろうという仮定による。図 3は、提案バネモデルによるオブジェクト間の関係を示したものである。

そこで、各オブジェクトがある場所にいるときにかかる力 P_i を次のように定義する。

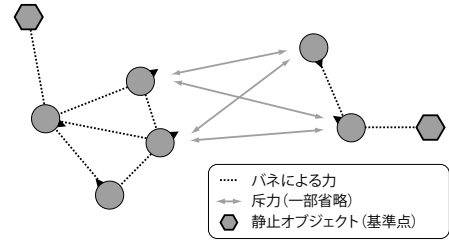


図 3 バネモデルによるトポロジー推定の例

$$P_i(o_i) = \sum_{j=1}^N \text{spring}(o_i, o_j) + \sum_{j=1}^N \text{repulsion}(o_i, o_j)$$

ここで、 $\text{spring}(o_i, o_j)$ はオブジェクトと o_i と o_j の間に局所関係がある場合に、ある係数 k_s で働くバネ力を表す関数であり、オブジェクト間の距離に比例する。同様に、 $\text{repulsion}(o_i, o_j)$ は局所関係がない場合に、ある係数 k_r で働く斥力を表す関数であり、オブジェクト間の距離の自乗に比例する。Nはオブジェクト数である。

また、向き係数にもバネの力が働くものとする。この力は局所関係が検出された方向からのズレに対して働くものとし、各オブジェクトの方向のズレに対する力 P_θ を次のように定義する：

$$P_\theta(o_i) = \sum_{j=1}^N \text{roll}(o_i, o_j)$$

ここで、 $\text{roll}(o_i, o_j)$ はオブジェクト o_i と o_j の間に局所関係がある場合に、検出方向と現在の方向との角度差分に関わるバネ力を表す関数であり、ある係数 k_a について角度差分に比例する。

本稿で提案するバネモデルによるトポロジー推定では、繰り返し演算により、これら P_i と P_θ の総和が局所に落ち着く場合をもっとも矛盾が少ないと定義し、オブジェクトの配置を施すとした。

3. バネモデルを利用したトポロジー推定システム

3.1. トポロジー推定システム的设计

トポロジー推定システムはオブジェクト間の局所的関係から大局的關係を推定しデータマイニングを用いて意味や知識を抽出するシステムである。このシステムは、デバイスシステムである局所関係収集システム[7]の出力を入力とすることを仮定しているが、本稿ではトポロジー推定エンジンの基本的な特性を調べるためシミュレーションを用いて評価を行うこととする。図 4は、トポロジー推定エンジンとシミュレータの関係を表したものである。なお、デバイスシステムは赤外線を利用したオブジェクト間の局所的な位置関係および方向関係をセンシング情報として取得するシステ

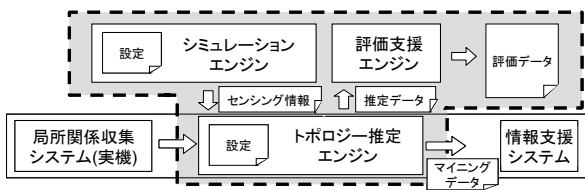


図 4 シミュレータの構成

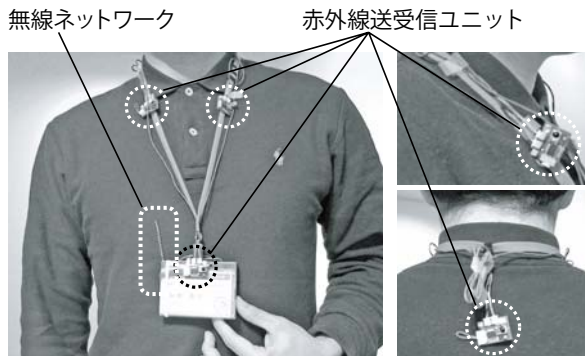


図 5 局所関係収集システム

ムである。図 5 は局所関係を取得するユーザデバイスを示したものである。

シミュレータはシミュレーションエンジンと評価支援エンジンからなる。シミュレーションエンジンは、設定した場面に従って局所位置関係を生成するモジュールである。この出力が実空間上のオブジェクト間の関係をシミュレートしており、トポロジー推定エンジンに入力される。後者の評価支援エンジンは、トポロジー推定エンジンを評価するためのモジュールである。これは二次元画像による作画と統計処理により、システムを定性的かつ定量的に評価することを目的としたものである。

以下、シミュレーションエンジンの詳細について述べ、トポロジー推定エンジンについては 3.2 節以降で詳述する。

シミュレーションエンジンは、局所関係収集システムの機能をソフトウェア的に再現するモジュールである。局所関係収集システムから得られるセンシング情報は、空間やオブジェクトに付随したセンサデバイスが配置してあるシーンを切り出したもので、センサデバイス同士がやり取りした結果である。このセンシング情報を生成するにあたり、ここでは空間を $L \times L$ の矩形空間であると仮定し、パラメタライズできるようにした。その矩形空間に予め位置を指定して N_s 個の静止オブジェクトを配置すると、シミュレーションエンジ

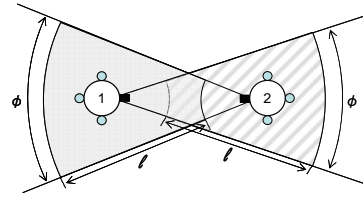


図 6 センシングの条件

ンは移動オブジェクトを N_d 個ランダムに配置する。今回作成したシミュレーションエンジンでは、シーン情報として矩形空間(部屋など)の大きさを L 、静止オブジェクトの数 N_s および二次元の位置と方向 (x, y, θ) 、そして、移動ノードの数 N_d を設定するものとした。

次に、センシング情報が取得できる条件と判定方法について説明する。センシングされる条件は「2つのノードがお互いの通信可能な領域に入っている」とした。図 6 はオブジェクト 1 とオブジェクト 2 が通信できる理想的な場面を示したものである。扇型で現した領域は通信可能な範囲を示しており、実機であるデバイスの赤外線通信を模倣している。これを角度 ϕ 、距離 l で定義し、2つのオブジェクトがそれぞれの通信可能領域内に入った場合に必ず通信が成立するとした。なお、この図では、各オブジェクトにそれぞれ 4 つのセンサデバイスが付随しているとしている。これらを用いてトポロジー推定エンジンの特性を抽出し、性能の評価を行う。

3.2. バネモデルによる配置問題

本節では、トポロジー推定エンジンが局所関係からどのように大局関係を抽出するかについて述べる。トポロジー推定の前半部である大局関係の抽出は、静止オブジェクトのような基準点を設けると、オブジェクトの配置問題と考えることができる。

ここで、図 7 を用いて説明する。ノード 1 が (x_1, y_1) にあり正面方向が θ_1 を向いているとする。また、 θ_1 の方向に θ_2 を向いているノード 2 を (x_2, y_2) に検出したとする。このとき、ノード間の距離 l は、

$$l = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}$$

と計算できる。絶対座標を基準にノード 1 から見たノード 2 の方向としてノードの配置方向 θ_{12} が

$$\theta_{12} = \arctan\left(\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}\right)$$

と分かる。また、以上の角度からノードの配置方向から互いを検知したデバイスの正面方向までの角度としてデバイス検知誤差角度 $\Delta\theta$ が、

$$\Delta\theta = \theta_{12} - (\theta_1 + \theta_2)$$

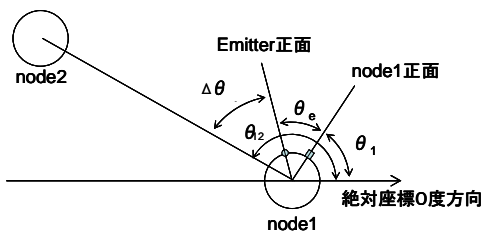


図 7 2つのノードと角度の関係

で求められる。以上により、2つのオブジェクト間の関係性が求まる。これらを考慮している全てのオブジェクト間に施すことにより、全体の関係性を定めることができる。

次に、定まった関係をバネに置き換え、安定となる局所解を求める手法について説明する。本手法では、この局所解を大局関係の推定結果としている。

提案バネモデルでは、検出されたノード間に張られたバネについてフックの法則を拡張し、バネの自然長 l_n と上記のデバイス検知誤差 $\Delta\theta$ を用いたトルクと張力の式を

$$\Delta x = k_s(l - l_n) \cdot \left[\frac{1}{2} + (1 - \cos(\Delta\theta/180 \cdot \pi)) \right] \cdot \frac{x_1 - x_2}{l}$$

$$\Delta y = k_s(l - l_n) \cdot \left[\frac{1}{2} + (1 - \cos(\Delta\theta/180 \cdot \pi)) \right] \cdot \frac{y_1 - y_2}{l}$$

としている。ここで、 k_s はバネ定数である。局所解を求める際には、この Δx 、 Δy が 0 になる方向にノードを移動させる。

また、検出されないノード間には斥力が働くものとした。その斥力は以下の式に従う。

$$\Delta x = -\frac{k_r l_n^2}{l^2} \cdot \frac{x_1 - x_2}{l}$$

$$\Delta y = -\frac{k_r l_n^2}{l^2} \cdot \frac{y_1 - y_2}{l}$$

ここで k_r は斥力定数である。

つぎに、 $\Delta\theta$ が 0 になる方向にノードを回転させる。これはバネ力および斥力によって移動した際のオブジェクト間の方向関係のズレを補正するものである。

バネモデルによるトポロジー推定の配置は、まず静止ノードを配置し、次に移動ノードをランダムに配置した状態を初期値として、以上の量を繰り返し演算で 1000 回更新することとした。

3.3. 通信距離と局所関係数

矩形の空間にノードを配置すると、ノード間の平均距離はどのくらいになるだろうか？このことは実際のシステムでオブジェクト間での局所関係を取得する際に重要な指針となる。なぜなら、実

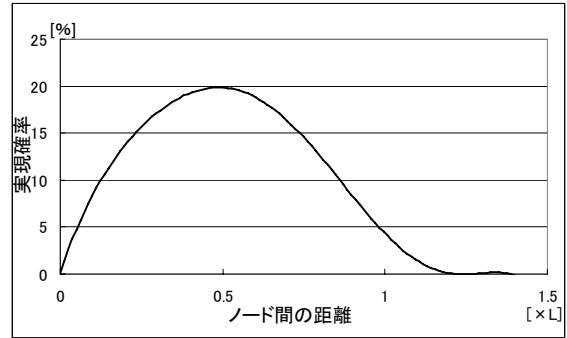


図 8 正方形の部屋における距離分布

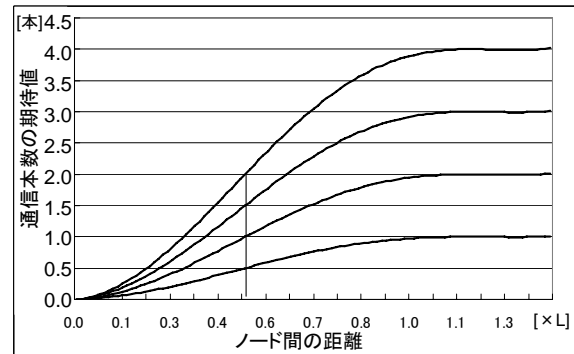


図 9 ノードの通信期待値

際のデバイスでは、局所関係を取得するのに必要なエネルギーと誤差は距離に応じて増大するからである。ここでは、まず、ある区間の大きさとその中でノード数が与えられたときに、局所関係を得るのに最も効率がよい距離を算出する。図 8 は空間内のノード間の距離の割合を表す。空間をセルに分解しその中心を代表点として2つのノードの距離を計算し、全体からその距離のサンプル数の割合を表したものである。

次に、空間に存在するノードの平均距離に関して距離分布を区間積分すると全部のノードに対する積分領域に存在するノードの割合になる。空間に N 個のノードがあるとき、ある1つのノードが m 個のノードと局所関係を結ぶ期待値は、 m とその区間積分値の積になる。図 9 はデバイスのセンシング距離に関する通信の期待値を示したもので空間中に $N = m + 1$ 個のノードが存在するとき、各ノードがもつ局所関係の期待値であり、下から $m = 1, 2, 3, 4$ の場合を表す。

図より、例えば、空間中に5個のノードが配置された状態で、1つのノードについて平均2つの局所関係を持ちたいとき $0.52 \times L$ 程度の通信距離とすればよいことが分かる。

4. トポロジー推定のシミュレーション実験 および評価

4.1. シミュレーション実験の詳細

シミュレーション実験では実際の懇親会場を想定し部屋の大きさを $L=50[m]$ と仮定した。また、静止オブジェクトを図 10のように四辺の中央にそれぞれ配置した。このように配置することでX軸方向の誤差やY軸方向の誤差がそのまま各静止ノードとの関係性を評価することができる。以下に、配置した静止ノードのノード名：(X座標値, Y座標値, 方向) のリストを示す。

- s001 : (0, 25, 0)
- s002 : (25, 50, 270)
- s003 : (50, 25, 180)
- s004 : (25, 0, 90)

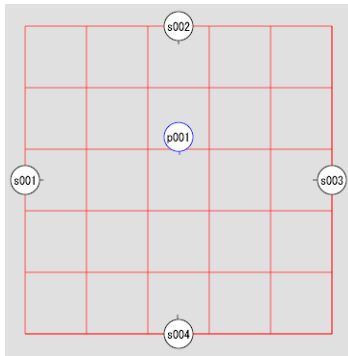
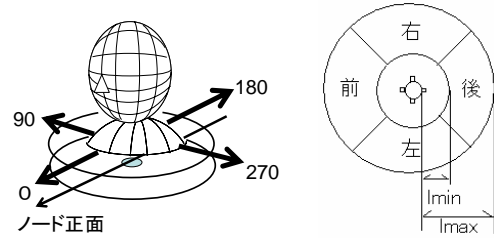


図 10 空間のノード配置

なお、座標原点は図中左下であり、オブジェクトの向きは図中右方向を 0 度とし、時計回りに単位を度で記述した。ここで、静止オブジェクトの識別 ID を s001, s002, ... と接頭辞“s”を伴って表記した。移動オブジェクトはこの室内にランダムで設定し、識別 ID を p001, p002, ... と“p”を伴って表記することとする。

シミュレーションでの方向分解は前後左右の 4 方向とし、センサを (0 度, 90 度, 180 度, 270 度) に設置するものとした(図 11(a))。これは、想定している懇親会場にいる人にとって、前方は「興味がある人, もの」、左右は「対等の立場である人, もの」、後方はそのいずれでもないという簡単な意味づけを想定したものである。また、各センサの通信可能領域の角度は $\phi=90$ 度とし、オブジェクトを中心とした距離が l_{min} から l_{max} のドーナツ型の領域で必ず検知できることとした(図 11(b))。これにより、ある距離で存在するオブジェクトの局所関係を取得することとする。なお、実験には Pentium III 1GHz, メモリ 128MB の Windows PC を用いた。



(a) 角度分解 4 方向 (b) 局所関係の取得範囲

図 11 デバイスの方向と通信可能領域

4.2. 結果と考察

実験では、矩形空間の一边の大きさである L を $50[m]$ に固定し、移動ノード数 N_d とセンシング可能距離 $l_{min} \sim l_{max}$ を変化させた上でトポロジー推定エンジンの基本特性について評価した。以下、本稿では、次の 2 つの評価を行うこととする。

- (ア) 推定されたノードの位置 (出力) が初期条件 (入力) からどの程度ずれているか、二乗誤差の平均を用いて、トポロジー推定システムの位置推定特性を示す。
- (イ) センシング可能距離 $l_{min} \sim l_{max}$ と (ア) との関係性を明らかにすることによって、ある密度でオブジェクトがあるときの最適な通信可能距離を示す。これは、実機デバイスのチューニングの指標となる。

図 12 と図 13 は (ア) の推定位置の二乗誤差について、移動ノード数 N_d を $\{1, 3, 5, 8, 10, \dots\}$ と変化させたグラフである。推定位置の二乗誤差とは図 10 のような静止ノードと移動ノードが配置されたある 1 シーンで、シミュレータにより生成された推定前の位置 (x_1, y_1) と推定された位置 (x_2, y_2) の二乗誤差を移動ノード N_d 個について平均し、さらに 40 シーンについて平均した平均二乗誤差 Error:

$$Error = \frac{1}{40} \frac{1}{N_d} \sum_{40 \text{ シーン}} \sum_{N_d} \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}$$

である。初期条件は、空間の大きさ $L=50 [m]$ 、静止ノードの配置と個数 4 は前述の通りとする。通信可能距離に関して $\{l_{min}, l_{max}\} = \{5, 25\}, \{2.5, 12.5\}$ の 2 通り調べた。

2 つの図について平均誤差を比較すると通信可能距離を $\{l_{min}, l_{max}\} = \{5, 25\}$ としたほうが精度良く推定されたことが分かる。次に、3.3 節の図 9 で述べた矩形空間でのノード間の距離と通信本数の期待値を検証する。移動ノードを 10 個配置すると 1 つのノードの移動ノード同士の通信本数の期待値は距離 $\{l_{min}, l_{max}\} = \{5, 25\}$ で平均 6~7 本程度、距離 $\{l_{min}, l_{max}\} = \{2.5, 12.5\}$ で平均 1~2 本程度となる。このとき局所関係を線で表示し取

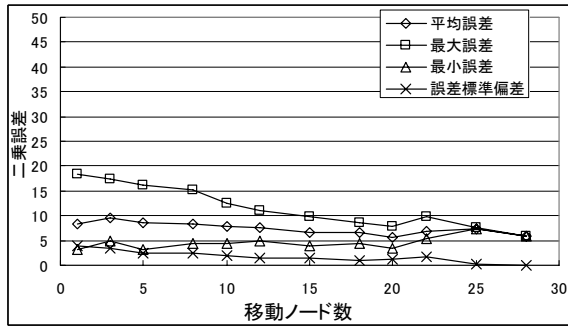


図 12 推定位置の二乗誤差(lmin5-lmax25)

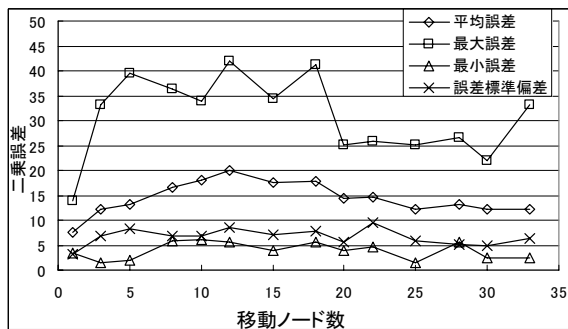


図 13 推定位置の二乗誤差(lmin2.5-lmax12.5)

り出したシーンを図 14 と図 15 に示す. 通信本数が計算程度であることがわかる.

また, この例では静止ノードの通信可能領域が, 図 16 のように, 空間をほぼ覆い, 移動ノードはほぼ全ていずれかの静止ノードと通信できている. 図 14 では各ノードが基準点となる静止ノードと必ず結合を持っているが, 図 15 では必ずしも静止ノードと結合していない.

実験結果が示すように, ノードの密度によって適切な送受信可能距離が存在することが分かった. 本稿では, 全移動ノードが 1 つないしは 2 つの静止ノードに検知されたとき最もよい精度が得られた. 逆に移動ノードが静止ノードに検知されにくい密度では, 今回の配置問題で推定することは難しい. しかし, 図 13 ではノード数が 20 以上について二乗誤差平均が下がっていることわかる. したがって, この領域の大きさではノード数 20 以上とすると精度が良くなることがみとめられた.

これらのことから, 理想的な環境デバイスは周辺にノードが少ない場合は通信距離を増加させ, ある程度見つかった時点でノードの情報をサーバに送信するような設計が求められると考える. 今後, 位置精度, 向きの精度が各種パラメータによってどのように変化するか述べる予定である.

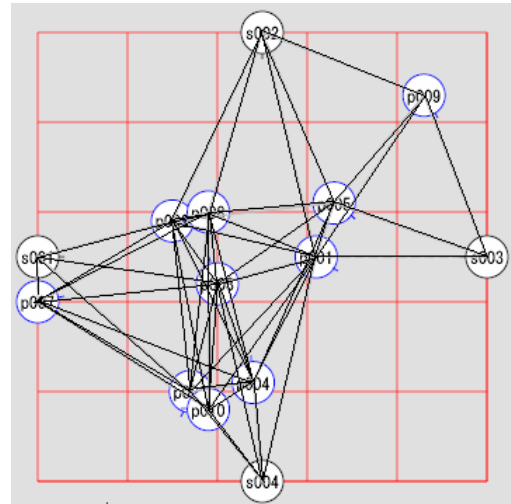


図 14 密な局所位置関係(lmin5-lmax25)

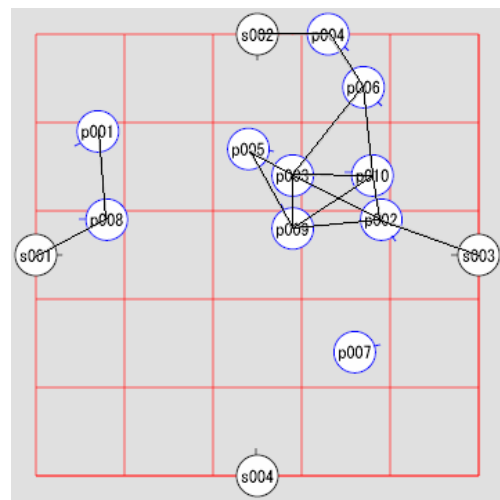


図 15 疎な局所位置関係(lmin2.5-lmax12.5)

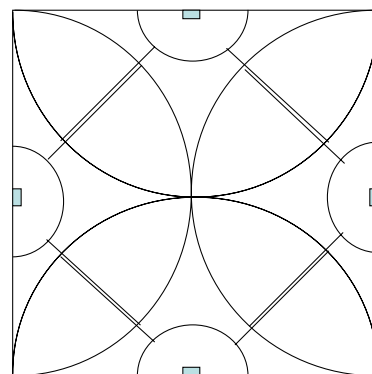


図 16 静止ノードの通信可能領域

5. おわりに

本稿では, 局所的な相対位置関係や向き関係から全体の関係を推定するトポロジー推定について, バネモデルを利用した推定手法を提案し, 推定エ

ンジンとシミュレータの実装を行った。また、これらを用いてシミュレーション実験を行い、提案手法によるトポロジー推定の距離特性を評価した。矩形の空間内でのトポロジー推定は、その一辺の半分程度の通信距離としたとき、静止ノードと1つないしは2つの局所関係を結びよい推定結果が得られることがわかった。そうでなくても、ノードの密度が増せば、同様に精度よく検出されることが期待できる。今後はより様々な応用シーンに対する特性の評価や角度特性などそのほかの特性調査にも取り組みたい。

参考文献：

1. Weiser, M.: Some Computer Science Issues in Ubiquitous Computing, CACM, Vol.36, No.7, pp.75–84 (1993).
2. Schilit, B., Adams, N. and Want, R.: Context-Aware Computing Applications, IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications, pp.85–90 (1994).
3. Hightower, J. and Borriello, G.: Location Systems for Ubiquitous Computing, IEEE Computer, Vol.34, No.8, pp.57–66 (2001).
4. Want, R., Hopper, A., Falcao, V. and Gibbons, J.: The Active Badge Location System, ACM Trans. on Info. Sys., Vol.10, No.1, pp.91–102 (1992).
5. 西村拓一, 橋田浩一, 中島秀之: イベント空間情報支援プロジェクト, 第17回人工知能学会全国大会 (JSAI2003), 3E1-01 (2003).
6. 西村拓一, 中村嘉志, 松尾豊, 坂本和彌, 宮崎伸夫: 赤外光タグを用いた多数オブジェクトのトポロジー推定, 計測自動制御学会 SI2004 講演論文集, pp.204-205 (2004).
7. 中村嘉志, 並松祐子, 宮崎伸夫, 松尾豊, 西村拓一: オブジェクトの局所関係を利用したトポロジー推定システムの開発, 情報処理学会第47回冬のプログラミング・シンポジウム報告集, pp.1-8 (2006).