

# 複数の赤外線タグを用いた相対位置関係からのトポロジカルな位置および方向の推定

中村 嘉志<sup>†</sup> 並松 祐子<sup>††</sup> 宮崎 伸夫<sup>††</sup>  
松尾 豊<sup>†</sup> 西村 拓一<sup>†</sup>

本論文では、位置センサや方向センサを用いなくても、方向に関連付けられた赤外線タグを複数利用することで、人やモノなどのオブジェクトのトポロジカルな二次元の位置関係および向き関係を推定できる手法を提案する。実世界における人を対象とした状況依存型システムでは、人やモノの位置関係をいかにして手軽に取得するかが重要な課題の1つである。特に人は、何らかの意図や意味があってそこにいるため、位置や向き関係の情報はその人の状況を反映していることが多い。とりわけ向き関係の情報は、向き合っているのかそれとも背中合わせなのかによって同じ位置関係にあっても意味が異なるように、人対人や人対モノの関係において位置関係だけでは困難なより詳細な状況を反映すると考えられる。そこで本論文では、実世界でのオブジェクトの向き関係に着目し、それらから空間全体でのオブジェクトの位置および方向を推定する新たな手法を提案する。計算機シミュレーション実験と試作システムの実機実験を通じて、本手法が位置および向き関係を実世界において推定できることを示す。

## Topology Based Position and Orientation Estimation Using Relative Relationships of Infrared ID Tags

YOSHIYUKI NAKAMURA,<sup>†</sup> YUKO NAMIMATSU,<sup>††</sup> NOBUO MIYAZAKI,<sup>††</sup>  
YUTAKA MATSUO<sup>†</sup> and TAKUICHI NISHIMURA<sup>†</sup>

This paper proposes a method for estimating an object's two-dimensional (2D) position and orientation based on topological information collected using infrared tags without any special location sensors or direction sensors. Estimating a user's location and articles irrespective of circumstances is an important issue for context-aware systems. Because users are present in a location with some purpose or intention, a user's position and orientation clearly reflect their context. Especially, orientation information can reflect a more detailed context than that obtained merely according to the location: people standing face-to-face or back-to-back would have vastly different contexts. In this paper, we particularly examine an object's orientation and describe a new method for estimating an object's position and orientation in an indoor, real-world environment. With a simulation and an implemented prototype system, the experimental results demonstrate the feasibility of our estimation method.

### 1. はじめに

学会や展示会など人と人、人とモノを結び付ける催しが年間を通して各地で数多く行われている。このような催しは人脈作りや情報交換の場であり、参加者は発表や展示から得られる新しく興味深い情報を収集するために集まってくる。ここで形成された人脈や得ら

れた刺激、新しい情報は発想を膨らませたり協働作業を展開したりする原動力となる。我々は、多数の人が目的を持って集まる実世界の催しをイベント空間と称し、情報処理技術を用いて新たな情報発見や参加者同士のコミュニケーションの促進を行いたいと考え、研究や開発、実証実験の取り組みを行っている<sup>1),2)</sup>。

こうした実世界指向のシステムでは、「どこに居るのか」、「誰と居るのか」、「近くに何があるのか」といった、ユーザやその周りの状況をいかにして取得するかが重要な課題の1つである<sup>3)</sup>。我々も、近くに居る人や操作したコンテンツに応じた状況依存型の情報支援を実現することを目指している。そのためには、上にあげたような実世界における人対人や人対モノの局所

<sup>†</sup> 産業技術総合研究所情報技術研究部門  
Information Technology Research Institute, National  
Institute of Advanced Industrial Science and Technol-  
ogy

<sup>††</sup> 株式会社アルファシステムズ  
Alpha Systems, Inc.

的で密な関係性だけでなく、大局的な位置関係も知りたいと考えている。ここで、大局的な位置関係とは、人やモノの会場内における緩い位置関係、および、特に向き関係を示すものである。この大局的な位置関係からは、たとえば、輪になって話している集団や、あるポスター発表と一緒に見聞きしている集団を見つけ出すことができると考えられる。こうしたコンテキスト情報に基づいて付加価値の高い情報支援を行えば、共通の話題を見つけやすく参加者のお互いの会話も弾むであろう。

イベント空間、特に学会やオープンハウスにおいて、相対的な位置関係を活かして情報提示や情報分析を行う取り組みはこれまでにいくつか報告されている<sup>4)~7)</sup>。これらのシステムは、人対人や人対モノの関係性は詳細に取得できるものの大局的な位置関係の取得には至っていない。一方で、ある決められた場所と参加者とを会場全体で結び付けることよって得られる大局的な位置関係の情報を活かす試み<sup>8)</sup>もあるが、この手法では、今度は参加者の周囲の状況は分からない。

相対位置ではなく絶対位置からも位置関係を知ることができる。屋内向けに位置推定を行うそうした手法はこれまでに数多く提案されている<sup>9)</sup>。たとえば、絶対位置を推定できる位置センサ<sup>10),11)</sup>と方向センサを用いれば、局所的な位置関係と大局的な位置関係を同時に取得できると考えられる。しかし、学会などイベント空間では、開催が期間的に限定されており、設置や解体などのインフラにかかる時間的・作業的コストを低く抑えたいという要求がある。また、空間的にも限定された閉空間であるため、三次元かつ高位置精度を要求するナビゲーション応用の必要性は低いが、一方で多くの参加者に利用してもらうためにデバイスおよび手法の簡便さの重要度は大きい。簡便性という点では、近年、センサネットワークや無線 LAN 上でノードの位置推定を行う手法<sup>12)</sup>や方向推定を行う手法<sup>13)</sup>も提案されているが、推定には受信電波強度を利用するため、デバイスを人体に自由に身に付けたときに生じる電波強度のゆらぎや、それによる推定精度のぶれが未知数である。

そこで本論文では、イベント空間の一般的な開催場所である屋内を対象として、局所的な位置関係と大局的な位置関係を同時に取得できる新たな手法を提案する。本手法は、位置センサや方向センサを用いなくても方向に関連付けられた赤外線タグを複数利用することで、人やモノなどの情報支援上重要なオブジェクトのトポロジカルな、つまり位置関係や向きを推定できることが特徴である。以下、本論文は次のよう

に構成される。まず、2章で、局所位置関係から大局的な全体の位置関係を推定する手法を提案し、詳細アルゴリズムを述べる。3章では、計算機シミュレーションを用いて提案手法の特性を明らかにするとともに、4章で実機による実験を行う。5章で先行研究との比較を通して本研究の位置付けを明らかにする。最後に、6章で本論文の結論と今後の課題を述べる。

## 2. トポロジを用いた位置および方向の推定手法

### 2.1 トポロジ推定の概要

大局的な位置関係を推定する環境として、本論文では、学会や展示会などの多数の人が目的を持って集まる屋内を想定する。大局的な位置関係は、人やモノなど2つのオブジェクト間の相対的な二次元の局所位置関係(距離および方向の関係)をオブジェクト全体としてとらえたものである。対象とする二次元平面は屋内空間の床面である。したがって、大局的な位置関係は、対面関係、横並び関係のような関係構造を持った二次元平面配置図であるといえる換えることができる。また、本論文でのトポロジとは対象となるオブジェクトの一次相対関係のつながり集合であり、このトポロジから大局的な位置関係を推定する手法を総称してトポロジ推定と呼ぶ。

トポロジは、あらかじめ方向に関連付けられた赤外線タグをオブジェクトごとに複数用いて取得するものとする<sup>14),15)</sup>。赤外線タグは、Active Badge<sup>16)</sup>に代表されるように屋内において位置関係を安定して取得できる実績を有している。また、このことはイベント空間における我々の過去の取り組み<sup>17)</sup>でも実証されている。加えて、赤外線は指向性の制御が電波や超音波に比較して容易であるため、その指向性にタグIDを関連付ければオブジェクトがどのような向きであるのか、その向き関係を取得することができる。一方、測距は単純な回路では困難であるものの、タグIDの有効距離の制御は容易である。提案手法では、これら赤外線タグの特徴である指向性と有効距離を利用し、送信方向にあらかじめ対応付けられたタグIDを伝えることによって有効距離内にあるオブジェクトとの相対的な位置関係を取得する。

図1は、トポロジ推定の様子を示したものである。複数の赤外線タグにより取得された局所位置関係は、図1中ではトポロジデータという名前で示しており、各データの意味は、「検出元オブジェクト名/角度1 検出先オブジェクト名/角度2」である。この場合の角度の単位は度であり、これがタグIDにあらかじめ対応

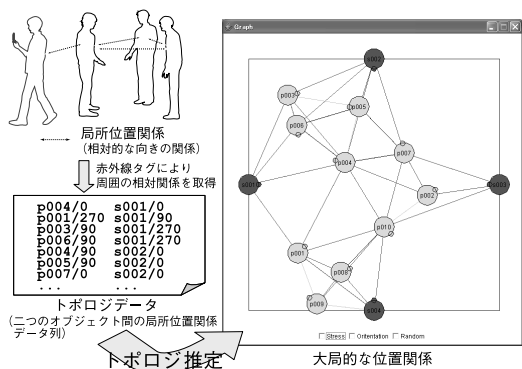


図 1 トポロジ推定の様子  
Fig. 1 Overview of the topology estimation.

している。

角度に対応付けられたタグ ID とは別に、全体で一意に定まる ID もオブジェクトには割り振られている。取得したトポロジのうち、この一意の ID に基づき、対象平面上での位置および方向が既知のものがいくつか分かれば、その位置を基準として他のオブジェクトの位置を相対的かつ再帰的に規定することができる。本論文では、トポロジ推定のアルゴリズムとしてバネと斥力を用いた力学モデルを提案し、二次元平面上でのオブジェクトの位置および方向を規定する。

なお、トポロジ推定の出力結果は大局的な位置関係を示しているため、これは位置推定手法としてもとらえることができる。しかし、(i) 厳密な三次元位置を精度良く推定することが主目的ではないこと、(ii) 相対的な関係性を全体としてとらえることに着目していること、そして、(iii) その関係性がトポロジカルなネットワークのように張り巡らされることから、本論文では位置推定ではなく、位置関係の大局的な推定手法として提案する。

2.2 トポロジ推定での配置問題

2つのオブジェクト間の距離と方向の関係が図2で示したように取得できるとする。ただし、オブジェクトには正面などの基準点がそれぞれ設けてあり、ここでの方向とは、図のようにこの基準点からのずれ角でそれぞれ表す。また、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ものとする。

ここで、角度  $\theta$  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、トポロジ推定は静止オブジェクトである基準点を中心とした単なる配置問題に帰着する。しかし、赤外線タグによって取得される局所位置関係実データの曖昧さを考慮し、トポロジ推定

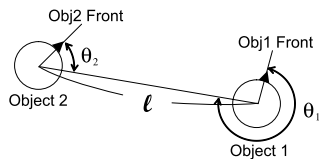


図 2 2つのオブジェクト間の相対的な距離および方向の関係  
Fig. 2 Positional and directional relation of two objects.

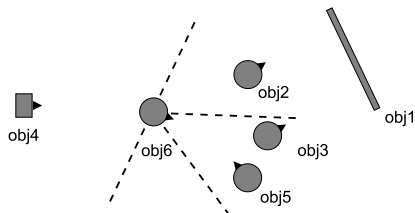


図 3 二次元平面上でのオブジェクトの位置関係の例  
Fig. 3 Example of positional relations on a 2D space.

では  $\theta$  と  $l$ 、時間の精度はきわめて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推定の概略について、図3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方向の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、赤外線タグを用いてある時刻に検出できるとする。赤外線がObj2に遮られる可能性もあるが、Obj6の左前にある展示パネルObj1を同様に検出できることもある。こうして赤外線タグにより、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時刻に検出される。

トポロジ推定では、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それぞれの位置および方向を1つの二次元平面上で規定する必要がある。ここで、図3の例をもう一度見てみると、Obj4のロボットの存在可能領域はObj6から相対的に見た場合後方のかなり広い領域となって定まらないように見える。しかし、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別できるため、これらの制約条件を用いれば推定結果である大局的な位置関係と実際のオブジェクトの位置および方向とのずれも小さくなると予想される。

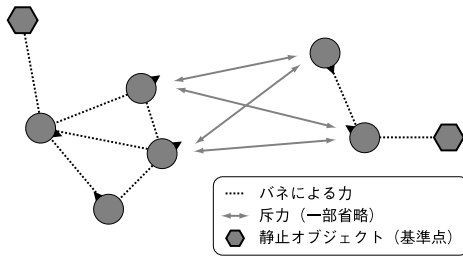


図 4 拡張バネ力学モデル  
Fig. 4 Extended spring dynamical model.

### 2.3 トポロジ推定での力学モデル

トポロジ推定を実現するにあたり、我々は、バネモデルを拡張した力学モデルを考案した<sup>18)</sup>。図 4 は、この拡張バネ力学モデルの概略を示したものである。本提案力学モデルでは、局所位置関係を持つオブジェクト同士は近くにあるため、これらはある自然長およびバネ定数を持ったバネで結ばれているものとする。一方、オブジェクト間には、ある定数による万有斥力が働く。これは、実際のセンサ（赤外線タグ）では検出できる距離に上限があるので、関係を持たないオブジェクトは遠くにいるだろうという仮定による。

以下、具体的にアルゴリズムを示す。まず、上述のようにセンサにより検出されたオブジェクト間の局所位置関係（位置および方向の関係）をバネに置き換える。次に、以下に定義する力  $P_l$  および  $P_\theta$  の総和が局所解に落ち着く場合を最も矛盾が少ないと定義する。理想的にはこれを解析的に解けばよい。しかし現実には繰返し演算を用いた数値解析を利用して、係る力を総当たりで計算してその移動量が最も少なくなる状態をこれに近似する。このとき、位置が既知である静止オブジェクト以外のオブジェクトの演算開始初期位置は任意の点である。以上によって、ある二次元平面上へのオブジェクトの配置を施す。

いま、各オブジェクトがある場所にいるときにかかる力  $P_l$  を次のように定義する：

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

ここで、 $\text{spring}(o_i, o_j)$  は、オブジェクト  $o_i$  と  $o_j$  の間に局所位置関係がある場合に、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。 $\text{repulsion}(o_i, o_j)$  はある係数  $k_r$  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反

バネに置き換えられるこれらの局所位置関係は、図 1 の人が 4 名立っている例では破線で示される関係である。

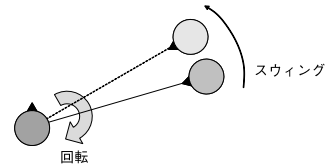


図 5 回転方向の力学モデル  
Fig. 5 Rotation and swing dynamical model.

比例する。 $N$  はオブジェクト数である。

また、方向にもバネの力が働くものとする。この力は局所位置関係が検出された方向からのずれに対して働くものとし、各オブジェクトの方向のずれに対する力  $P_\theta$  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  $o_j$  の間に局所位置関係がある場合に、検出方向と現在の方向との角度差分に係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。また、図 5 で示したような回転時に関係する相手を振る応力が働くものとしている。

## 3. 計算機シミュレーションによるトポロジ推定の評価

### 3.1 シミュレーションの目的と概要

トポロジ推定がどれだけ実際の大局的な位置関係を表すか、計算機シミュレーションを用いてその推定誤差から評価を行う。

シミュレーションでは、図 6 に示すように、懇親会場を想定した正方形の部屋を仮定し、その四辺の中央にそれぞれ基準点となる静止オブジェクトをあらかじめ配置した仮想空間を用意した。この空間の広さは  $500 \times 500$  ピクセルである。図中のグリッドの横に示した記号列は、静止オブジェクトの「オブジェクト名：(X 座標値, Y 座標値, 方向)」である。この二次元平面の座標系原点は図中左上であり、方向は X 軸方向を原方向として時計回りに単位を度で割り当てた。円で表したオブジェクトに付加されている矩形の突起はそのオブジェクトそれぞれについての正面方向を示している。

次に、入力となる局所位置関係の取得について詳細を述べる。移動オブジェクトの局所位置関係、特に人の位置関係は、イベント空間において図 7 に示すような名札状のデバイスを用いて取得されると仮定する。このデバイスには、あらかじめ方向 ID が割り当てられた赤外線タグが身体の正面を前として前後左右の 4

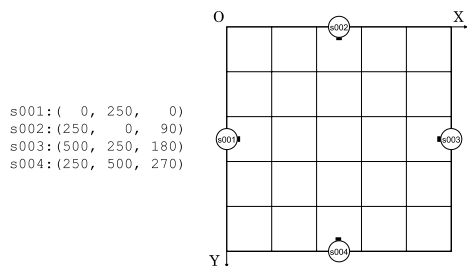


図 6 シミュレーションの対象空間と基準点の配置

Fig. 6 Space for simulations and anchor point settings.

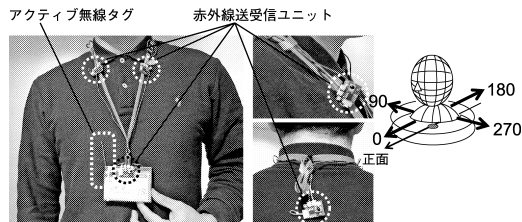


図 7 4 方向分解を可能にする名札型ユーザデバイスの実装例

Fig. 7 Nametag type implementation example for 4 directional resolutions.

方向にそれぞれ取りつけられている。図では方向 ID は正面を 0 度とした角度に対応しており、上から見た時計周り順にそれぞれ 0, 90, 180, 270 の ID 情報が割り振られている。

この赤外線タグは送受信ユニットであり、ID 情報を送信できると同時に、向けられた方向からも受信できるものを想定している。前後左右の 4 方向は、たとえば懇親会場にいる人にとって、前方は「興味がある人、モノ」、左右方向は「対等の立場である人、モノ」、後方はそのいずれでもないという簡単な意味付けを想定したものである。このとき、方向分解能は送受信ユニットの数で規定される。

静止オブジェクトであるモノの場合は必ずしも 4 方向ではない。なぜなら、壁や展示パネルは正面の重要度は高いが、一方で後方の意味は薄いからである。加えて、必ずしも名札状のデバイスである必要はない。シミュレーションでは、名札と機能的には同様のデバイスであるが、正面と左右の 3 方向だけを認識できるデバイスが設置されているものとした。繰返し、静止オブジェクトの二次元平面上の位置は既知である。

これらのデバイスにより得られた局所位置関係は、実機では、アクティブ無線タグを通じてデータベース

2 人の人が対面していた場合、方向 ID 0 がそれぞれ交換され、お互いに対峙しているという局所位置関係が取得される。横並びで同じ方向を向いている場合は方向 ID 90 と 270 がそれぞれ交換される。

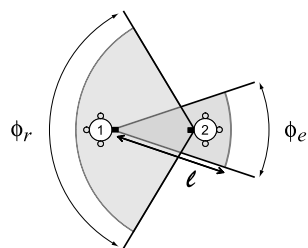


図 8 局所位置関係のセンシング判定パラメータ

Fig. 8 Sensing parameters for local positional relation.

に蓄えられ、トポロジ推定の入力となる。ただし、本シミュレーションではオブジェクトの時間的な変化については取り扱わず、時間的に切り出したある情景を対象とする。提案力学モデルの確かさと実機実装のためのセンシング距離に関する設計指針を得ることが目的だからであり、本論文では、時間の動的変化については今後の課題とする。

### 3.2 シミュレーションの方法と条件

大局的な位置関係の推定誤差  $E$  は、次の手順および方法により求める。

- (1) シミュレーション対象空間 (図 6) に対して 4 方向分解を持ったオブジェクト  $N$  個をランダム位置にランダム方向で配置する。
- (2) ランダム配置された  $N$  個のオブジェクトと 4 辺中央にあらかじめ配置された 4 つの静止オブジェクトに対して、センシング有効距離  $l$  や有効角  $\phi$  を用いた判定基準に基づき、それぞれ対象空間中で局所位置関係を計算する。
- (3) 判定の結果得られた局所位置関係を入力として 2.3 節で述べた提案力学モデルに基づいてトポロジ推定を行う。
- (4) 推定結果の位置および方向と (1) でランダム配置した元の位置および方向について、オブジェクトごとに推定誤差  $E$  を計算する。

ここで、まず、局所位置関係の判定方法について述べる。シミュレーションでのセンシング条件は、受信オブジェクトのセンサが送信オブジェクトの信号領域内に入っており、かつ、その信号が受信オブジェクトのセンシング可能領域方向から得られた場合とする。図 8 は、オブジェクト 2 がオブジェクト 1 の信号をセンシングできる理想的な場面を示したものである。図中扇形で表した領域が信号領域およびセンシング可能領域を示しており、赤外線タグの信号領域の有効角を  $\phi_e$ 、そのときの有効距離を  $l$ 、そして、センシング可能領域の有効角度を  $\phi_r$  で定義する。シミュレーションでは、 $\phi_e$  は 40 度 (中心から  $\pm 20$  度) で、 $\phi_r$  は

120度(中心から±60度)である．これらのパラメータは一般的な赤外線 LED および受信モジュールの特性とほぼ同じである．発光強度特性に関して，実際の赤外線 LED のそれは厳密には涙滴状であるが，本シミュレーションではこれを扇形で近似するものとする．また，センシング条件が整った場合には必ずセンシングが成立すると判定する．ただし，オクルージョンを考慮し，2つのオブジェクト間の送受信線上に，ある半径  $r$  を持った別のオブジェクトが存在する場合にはセンシングは成立しないと判定する．

次に，推定誤差  $E$  の計算方法について説明する．推定誤差は位置誤差  $E_d$  と方向誤差  $E_\theta$  をそれぞれ求める． $E_d$  はオブジェクトそれぞれに対するずれの距離を求めたその総加平均とし，次のように定義する：

$$E_d = \frac{1}{M} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^M \sum_{s=1}^N \sqrt{(x_{oi} - x_{si})^2 + (y_{oi} - y_{si})^2}$$

ここで，位置座標  $(x_o, y_o)$  はトポロジ推定結果の推定位置，位置座標  $(x_s, y_s)$  はランダム配置したトポロジ推定前のそのオブジェクトの原位置である． $N$  は配置オブジェクト数， $M$  は試行回数である．

$E_\theta$  についても  $E_d$  と同様に平均誤差とし，オブジェクトすべてに対する角度のずれを次のように定義する：

$$E_\theta = \frac{1}{M} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^M \sum_{s=1}^N |\theta_{oi} - \theta_{si}|$$

ここで，角度  $\theta_o$  は推定角度，角度  $\theta_s$  はそのオブジェクトについてランダム配置した初期状態の原角度である．

そのほかのパラメータとして，バネの自然長は 125 ピクセル固定であり，斥力は距離 100 ピクセル以内のオブジェクトどうして働くものとした．また，振動を防ぐ目的で，バネ定数に相当する係数  $k_s$  や  $k_a$ ，斥力の係数  $k_r$  はトポロジ推定での繰返し演算時には距離に応じてその値を低減させる工夫を行っている．

### 3.3 シミュレーションの結果と考察

まず，最も単純な配置オブジェクト数  $N$  が 1 の場合について考察する．1つの静止オブジェクトとの間でしか局所関係が取得できない場合はバネは 1本である．したがって，原位置がどこであれトポロジ推定では，その静止オブジェクトから半径 125 ピクセル(バネの自然長)の距離に対象のオブジェクトが存在すると推定される．よって，位置誤差  $E_d$  はセンシング有効距離  $l$  に強く依存することになり，この場合はあまり意味がない．方向誤差  $E_\theta$  も，図 8 のような判定条件に強く依存し，最大誤差が幾何学的に定まる． $\phi_e$

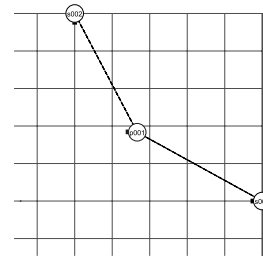


図 9 回転方向の力学モデルが作用した例

Fig. 9 Example of the roll dynamics model acted.

が 40度， $\phi_r$  が 120度の場合， $E_\theta$  の最大誤差は 40度である．

配置オブジェクト数  $N$  が 1 の場合でも，X 軸，Y 軸線上に配置された静止オブジェクトとそれぞれ 1 つずつ，計 2 つの局所関係が得られた場合，提案手法の動作は特徴的である．局所関係をバネのみに置き換えただけのモデルでは，関係する 2 つの静止オブジェクトを結び線上にオブジェクトが直線的に配置されるはずである．しかし提案手法では，図 9 に示したように，その線上からずれた場所に配置される．これは，図 5 で示した回転時に関係する相手をスウィングさせる応力が加わっているからである．

次に，配置オブジェクト数  $N$  を 1 ~ 25 と変化させてトポロジ推定を行い，位置および向き関係の推定精度を確認した． $N$  に対する位置誤差  $E_d$  を図 10 に，方向誤差  $E_\theta$  を図 11 にそれぞれ示す．単位はそれぞれ [ピクセル]，[度] である．このときのセンシング有効距離  $l$  は 250 ピクセル，すなわち部屋の 1 辺の半分の距離まで届くものとし，試行回数  $M$  は 1,000 である．

図から分かれるとおり，位置誤差  $E_d$  は，配置オブジェクト数が増えるに従って減少している．本手法で特徴的なのは，方向誤差  $E_\theta$  が非常に小さく， $N = 23$  の場合で平均 8.4 度を示したことである．そのときのオブジェクトごとの局所位置関係数の平均は，ノードあたり 6.1 本であった．これは，ノードあたりで平均約 3 の局所位置関係数を持っていることを示している．

ただし，本シミュレーションはトポロジ推定の振舞いを調べるのが目的であるため，すべてのオブジェクトが少なくとも 1 つの局所関係を持つようなシーンを試行の母集団とした．この条件は提案手法においてオブジェクトを捕捉しトポロジ推定が可能な最小限の条件を示している．逆にいえば，局所関係を 1 つも持たないオブジェクトの位置および向きは不定となる．局所関係を持つかどうかは，赤外線タグの到達距離や空間内に占めるオブジェクト数に依存して変化するが，

しかし、実際のオブジェクトである人は空間内を動き回るため、他のどれかのオブジェクトとある時点で局所位置関係を結ぶことが期待できる。

### 3.4 発散

一方で、本シミュレーションから提案手法の問題点も浮上した。配置オブジェクト数  $N$  を増やしたときに、トポロジ推定の演算が発散してしまう現象が多く見られるようになった。図 12 は  $N = 10$  のときに発散してしまった例である。試行回数に占める発散回数の割合は  $N = 10$  の場合で 19%、 $N = 20$  の場合で 37%であるが、 $N = 50$  の場合では試行に対してほぼ 100%の発散が見受けられた。

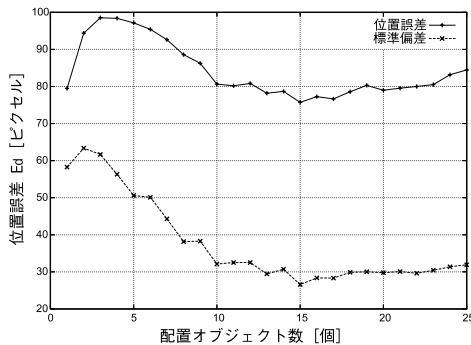


図 10 トポロジ推定の位置誤差

Fig. 10 Positional error of topology estimation.

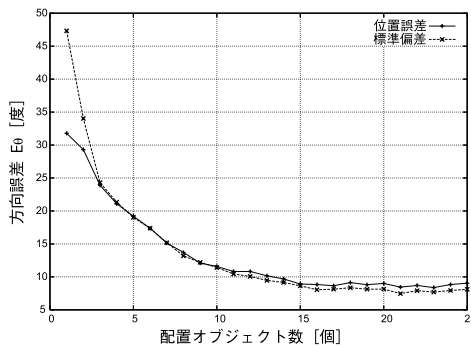


図 11 トポロジ推定の方向誤差

Fig. 11 Directional error of topology estimation.

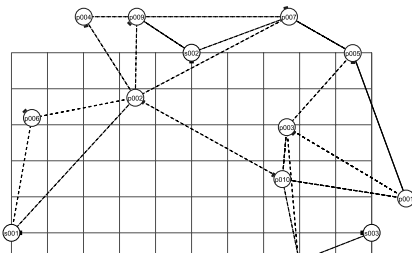


図 12 トポロジ推定が発散してしまった例

Fig. 12 Example of topology estimation divergence.

発散は、基準点となる静止オブジェクトが  $N$  に対して相対的に少なくなることが主原因である。このほかに、静止オブジェクトの配置にも工夫が必要であろう。たとえば、図 6 で示したシミュレーション対象空間の中央に 5 つ目の静止オブジェクト (4 方向分解タイプ) を置くことにより、 $N = 20$  の場合での発散割合 37%は約 25%に改善された。

## 4. 局所位置関係収集デバイスの実装と評価

### 4.1 局所位置関係収集デバイス

トポロジ推定を実現するために、局所位置関係を実際に取得して収集するデバイスシステムを実装した。図 13 は、デバイスのプロトタイプを示したものである。これを、図 7 に示したように、名札型のユーザデバイスとして実装することによりユーザの局所位置関係を取得することを想定している。

このデバイスを用いて実際に局所位置関係を取得する赤外線タグ部の通信手順を図 14 に示す。この手順では、ビーコン型の赤外線通信方式を用いて、2 つのオブジェクト間の関係を定期的に間欠取得する。取得された局所位置関係の情報は、アクティブ無線タグからシンクノードなどのゲートウェイに対して発せられ、これを經由してデータベースに蓄えられた後、トポロ

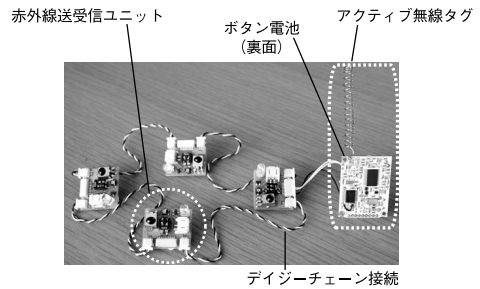
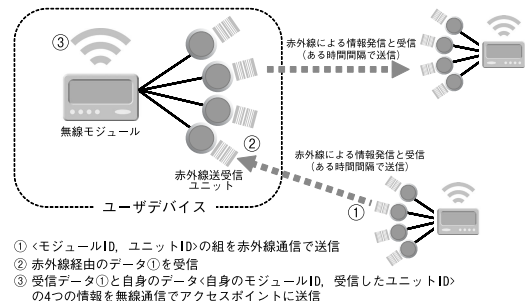


図 13 試作ユーザデバイスのモジュール構成

Fig. 13 Module configuration of prototype user device.



- ① <モジュールID, ユニットID>の組を赤外線通信で送信
- ② 赤外線経由のデータ①を受信
- ③ 受信データ①と自身のデータ①自身のモジュールID, 受信したユニットIDの4つの情報を無線通信でアクセスポイントに送信

図 14 局所位置関係を取得する通信手順

Fig. 14 Communication diagram of local relationship collection device.

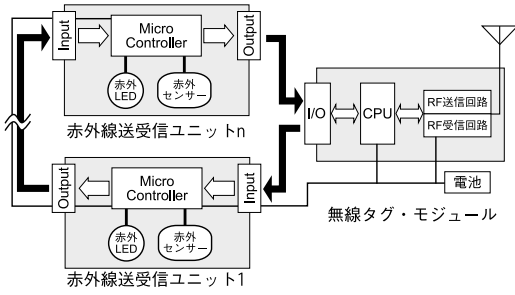


図 15 試作ユーザデバイスのブロック図

Fig. 15 Block diagram of prototype user device.

ジ推定の入力として活かされる。ただし、ここではアクティブ無線タグを単なる無線通信機として用いており、無線タグどうしは本実装では協調動作することはない。

図 15 は、ブロック図である。赤外線タグ部である赤外線送受信ユニットのマイクロコントローラには、マイクロチップ社の PIC16LF88 を用いた。このコントローラが赤外線の送信エンコードと受信デコードを行う。送受信のための赤外線 LED および赤外線センサには、赤外線リモコン用の市販のディスクリット部品を用いた。本プロトタイプ実装では、赤外線タグとしてのデータ長は 8 bit であり、うちデバイス ID として 4 bit、方向 ID として 3 bit、制御用に 1 bit を用いている。赤外線の搬送波は 38 KHz であり、ヘッダおよび誤り検出のための反転符号を含めた平均送信時間は約 22 ミリ秒である。送信間隔はソフトウェア制御され、現在は約 1 秒に 1 回に設定してある。また、マイクロコントローラは、赤外線を受信してデコードが終わると、ただちに非同期シリアル通信を用いてデジーチェーン接続先のユニットと内部通信を行う。無線タグには小型で省電力タイプのタグ<sup>19)</sup>を用いた。無線タグもデジーチェーン接続先から内部通信により情報を受け取ると、ただちにシンクノードに対して電波を発信し、取得した局所位置関係を報告する。

#### 4.2 局所関係収集デバイスのセンシング特性

トポロジ推定の実機実験をするにあたり、プロトタイプシステムのセンシングに関して基礎的なデータを計測した。局所関係を収集するためには、角度分解が行えるよう十分な指向性を示し、その指向性の範囲内では高いセンシング率を示さなければならない。また、同時に距離分解も得られれば推定精度は向上する。今回実装で用いたピーコン型の単受光素子赤外線方式では測距は困難であるため、図 2 で示した距離  $l$  を得ることはできない。しかし、赤外線の到達距離、すなわちセンシングの有効距離がシャープな特性を示せば、

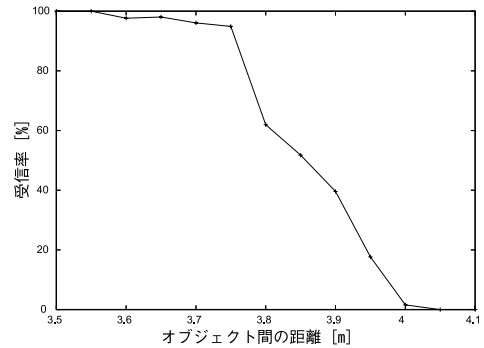


図 16 センシング有効距離

Fig. 16 Sensing effective range.

最大到達距離を拡張バネモデルの自然長を決定するためのパラメータとして用いることができる。

基礎実験では、まず、指向性について検証した。用いた赤外線 LED の固有特性のとおり、送信側について指向半値角  $\pm 20$  度を確認した。これは計算機シミュレーションで用いたパラメータとも合致する値である。しかし、シミュレーションではこの有効角外はセンシング判定をしないことにしているが、これは半値角であって実機ではこの範囲外でも光強度を低いながらも観測する。これに受光素子の有効角  $\pm 60$  度が重なると、送受信として見たときには十分な指向性が得られず、予想外の方向からの信号も受信してしまうという問題が明らかとなった。そこで、受光素子の前に円筒形状の構造を持たせて入射光を物理的に抑制し、先のシミュレーションでのセンシング特性となるべく合う工夫を行った。

次に有効距離について計測した。図 16 はその結果である。距離 3.8 m を境に受信率がシャープに落ちていることが分かる。ただし、これは、送信側と受信側を正対させた状態で一般的な蛍光灯下で計測したものである。赤外線 LED の前に設けた電流制限のための可変抵抗により LED の発光輝度を調整できるが、ここでは抵抗値を最大にして発光輝度を抑えた状態で計測した。この制限抵抗の値は  $R = 100 \Omega$  である。これは、 $V_f$  は約 1.8 V の赤外線 LED に直列接続されており、そのときの電源電圧は  $V_{cc} = 3 V$ 、送信時の LED の ON/OFF のデューティ比は約 50 : 50 であるので、このときに赤外線 LED に流した電流は平均で  $I = 6 \text{ mA}$  である。一方、抵抗値を最小にしたときの有効距離は約 6.5 m であった。また、無線タグの有効範囲である電波の到達距離は約 15 m であった。

最後にプロトタイプ実装の消費電力に関する評価を行った。図 7 に示した名札型デバイスのイベント空間における利用を考えた場合、少なくとも 1 日 8 時間



の連続運用が可能であることが望ましい．実験では，市販のボタン型リチウム電池の中で現在最も流通量の多い CR2032 を 1 つ用いて，デバイスがどれだけ連続運用に耐えられるか，デバイスにとって厳しい条件でその時間を計測した．実験の結果，ボタン型電池 1 つで約 3 時間半の連続運用が可能であることが分かった．ただしこれは，赤外線タグ 4 方向に対してそれぞれ 1 秒に 1 回の ID を有効距離最大にして送信し，また同時に 1 秒に 1 回の頻度で他のデバイスから受信を受け続けた場合の値である．このとき，赤外線タグおよび無線タグのマイクロプロセッサにはスリープなどの最適化は行っていない．本実装では，特に，無線タグにおける電波の受信機能は用いないことから，無線タグ上で受信待機を行わないようスリープ制御を用いて最適化し，LED の制限抵抗を上述の 100 Ω，すなわち有効距離を 3.8 m に再設定した条件で稼働させた場合，約 4 時間半の連続運用が可能であった．したがって，ボタン型電池 2 個を用いれば，1 秒に 1 回の送信頻度で 1 日の連続運用が可能である．

4.3 実機による位置推定特性

実機を用いて位置推定の特性を評価する実験を行った．実際には人の背丈や配置の仕方によって高さが異なるが，ここでは簡単化のため高さ方向の違いは割愛し，同じ高さの平面上で実験を行った．ただし，本実装と同じような赤外線方式を用いて，ユーザと環境中のセンサとの近接性 (proximity) から位置を取得する我々の別の取り組み<sup>17)</sup>では，背丈の違いによる高さ方向の誤差はデバイスの運用上はほとんど問題にならないことが分かっている．

実験対象領域は，前章のシミュレーション条件と 4.2 節のセンシング特性の評価実験での有効距離 3.8 m をふまえ，一辺が 3.8 m の約倍にあたる 7 m の矩形空間とした．図 17 は実験に使用した局所関係収集デバイスである．

図 18 はトポロジ推定の実験を表したスナップショットである．左図は実際に配置したオブジェクトの位置を示しており，この位置関係で実機を用いて実際に局所位置関係を収集し，トポロジ推定を行った結果が右図である．右図中のオブジェクト間にまたがる線は提案力学モデルでのバネであり，すなわち局所位置関係を示している．図中の左図の実際の状態が右図で示したようにうまく再現できていることが分かる．このように提案手法およびシステムでは，静止オブジェクト (基準点) や移動オブジェクトどうしのお互いの関係性から位置推定を行うことができる．

図 19 は 3 名のユーザが整列している状況を想定し



静止オブジェクト (基準点) 移動オブジェクト (前後左右の 4 方向分解)

図 17 実験に使用した局所関係収集デバイス

Fig. 17 Location relationship collection device.

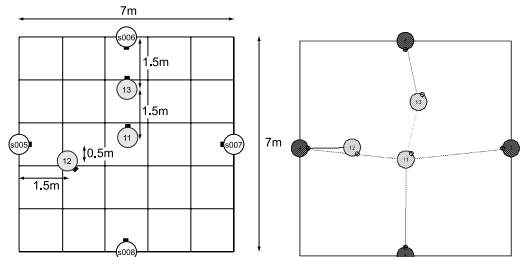


図 18 位置推定実験 1: 無作為配置

Fig. 18 Estimation experiment 1: random allocation.

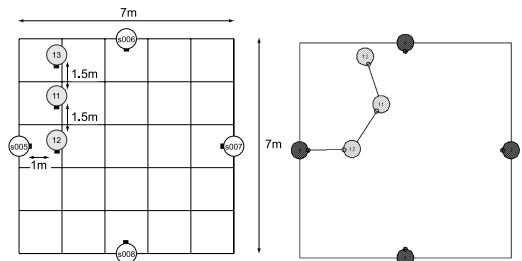


図 19 位置推定実験 2: 3 名が整列している状況を想定

Fig. 19 Estimation experiment 2: three persons form in a line.

たものである．この結果は，万有斥力と図 5 で示した回転方向の力学モデルが作用した好例である．13 と 6 の間には関係性がとれていないため，万有斥力によって 12→11 の線上に 13 が乗っておらず歪んだ位置で推定されている．12 から見て 11 の位置が歪んでいるのは回転方向の応力が加わったためである．なお，12 の方向が正しく再現できていないのは演算途中で局所解に落ちてしまったためである．

図 20 は，3 名のユーザがお互いに向き合っている状況を想定したものである．話し合う位置が悪く基準点との関係性がとれていないため空間上に固定されず，大局的な位置推定という意味では問題が残る．しかし，3 名がお互いに向き合っているという

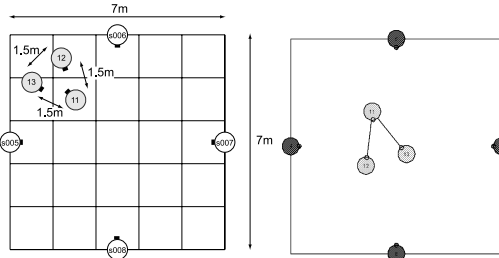


図 20 位置推定実験 3 : 3 名がお互いに向き合っている状況を想定

Fig. 20 Estimation experiment 3: three persons face each other in a circle.

状況はうまく再現できている。したがって「3 名が近くで向き合っている」→「3 名は話している可能性が高いため知り合いであるか知り合った可能性が高い」という状況推定に利用可能であるように、トポロジ推定が大局的な位置関係の推定を行っていることを示している。

## 5. 関連研究

学会やオープンハウスなどにおいて、参加者の情報支援を目的として人やモノの関係性を取得する研究や取り組みはこれまでにいくつか報告されている。名刺交換などのメタファを用いて局所的な関連を明示的に取得する手法<sup>4),6),7)</sup>や発話動作に着目して対峙した人同士の関係を自動的に取得するもの<sup>20)</sup>があげられる。また、同一のイベントを多数のセンサを用いて記録した多角的な情報を再利用可能な形にする手法<sup>5)</sup>や、特定の場所と参加者の緩い関係を会場全体で取得するシステム<sup>8)</sup>もあげられる。まとめると、これらは、局所的な密な関係を取得するもの、および、大局的な緩い関係を取得するもの、多角的にとらえるものの大きく 3 つに分けられる。

局所的に密な関係を取得するものとして、なかでも、メッセージ交換に着目し、その伝搬経路を解析することでコミュニケーションからコミュニティ解析につなげる Borovoy ら<sup>6)</sup>の取り組みは興味深い。彼らは、Meme タグと呼ばれる赤外線通信装置を備えた名刺型デバイスを参加者に配布し、日本の俳句のような最大 64 文字に制限された meme と呼ばれる文章を会場で出会った人との間で交換することにより人と人とを関連付けている。Sociometer<sup>20)</sup>では、このような関係性の取得を発話をヒントに自動で行うことを目的

としている。ブックマークメタファを利用して、ユーザが興味のある対象を取得するシステム<sup>7)</sup>は、コミュニティの基となる人間関係の抽出をより意識したものとして提案されている。

会場全体での参加者の様子に着目した取り組みとして、IntelliBadge<sup>8)</sup>があげられる。これは、RFID タグをベースとしたシステムであり、参加者がどの部屋に居るかというようなある特定の位置と人との関係を、配布したバッジ型 RFID タグを用いて自動取得する。その位置関係情報に基づいて発表の人気度を聴講者数で表示するなど、大局的な情報を活用する取り組みがなされている。

以上の取り組みは、比較的簡便なデバイスを用いており、また、設置やキャリブレーションなどの事前準備の負荷も小さいことから、1 章で述べたイベント空間の性質を満たしていると考えられる。しかし、参加者周囲の関係性が会場全体での様子のもどちらかを対象としているため、それらを両立させることができるとはいえない。

一方、密な関係性を用いたアプリケーション指向のシステムとして、見学ガイドを目的とした C-MAP<sup>4)</sup>がある。これは、モバイル端末とその上で動くエージェントシステムを用いて、モバイル端末への操作や会場に設置されたセンサとの局所的な位置関係からユーザが会場で起こした体験などのインタラクション情報を取得し記録する。システムはその情報に基づいて利用場面に応じた情報を端末上に提示するというもので、実証実験の様子とともに、そこで得られた情報を社会ネットワーク構造化して可視化することで、参加者同士のコミュニケーションを促進させる方策が述べられている。

文献 5) では、こうして得られた多くの体験情報を記録して構造化し、再利用できる形にする提案がなされている。この提案で特に興味深いのは、赤外線 ID システムを利用して、カメラ付きウェアラブルデバイスで撮影されるビデオ画像や音声データを機械可読な場所情報でインデキシングできる点である。これらは複数の人の、そして複数のセンサで取得した情報に対して適用されるため、密な関係性を持った情報を多角的に蓄積することができる。したがって、この情報を分析すれば、本論文で目的とする大局的な位置関係を構成できる可能性がある。しかし、これらの情報から、ある任意のオブジェクトの周囲の関係を抽出することは困難であると思われる。よって、個々の人やモノの視点に立った分析は可能であっても、ある 1 シーンを大局的に表現できるとはいえない。

この例では 12 と 13 の間の局所関係は取得できていないが、この結果では  $\frac{1}{2}$  の確率でたまたま位置関係が再現できている。

イベント空間において人やモノの位置から関係性を取得する関連研究は以上であるが、オブジェクトの周囲の相対位置関係に着目することで、局所的な位置関係を取得しつつ大局的な位置関係および向き関係をも同時に取得できる手法は、我々の知る限りではまだ存在しない。

## 6. おわりに

本論文では、人やモノ、コンテンツが多数存在する実世界での状況取得を目指し、2つのオブジェクトの局所的な相対位置関係から大局的な全体の関係を推定するトポロジ推定を提案した。シミュレーションおよびプロトタイプの実機実験より、提案力学モデルによって状況推定が可能な程度に大局的な位置関係を推定できることが分かった。特に、トポロジ推定が方向に対して良い推定精度を持ち、3章のシミュレーションの中で示したある条件の下では、オブジェクト数14以上の場合にオブジェクト全体の方向誤差の平均が10度以下を実現できることが示された。また、オブジェクト数が増えるにつれ位置関係の推定誤差も小さくなることが分かった。これらは、オブジェクトの周囲の関係性をトポロジカルに扱うことによって、間接的に他の多くのオブジェクトにつながる、トポロジ推定の利点であるといえる。

しかしながら、実験を通して提案手法に対する新たな課題も得られた。トポロジ推定で基準点となる静止オブジェクトの数が全体のオブジェクトに対して相対的に少ないとトポロジ推定の演算が発散してしまうという問題が認められた。これに対しては、実験よりオブジェクトの配置の工夫によって改善されることが示されたが、今後は、局所位置関係の時間的変化を用いて発散を抑制する工夫を行ってみたいと考えている。

このほかに、赤外線タグ方式以外での局所位置関係を取得する手法や、イベント空間以外でのトポロジ推定の応用についても探っていく予定である。そして、本研究の次の目標である大局的な位置関係からグループの導出など人の社会的関係性というより高次元な状況推定を、データマイニングなどの手法を用いて行いたいと考えている。

謝辞 実験に協力してくれた芝浦工業大学大学院の小林亮介くん、そして本論文に対して貴重なご意見を寄せて下さった査読者の方々に謝意を表す。また、本研究の一部は、平成16年度NEDO産業技術研究助成事業により助成を受けて実施したものである。

## 参考文献

- 1) 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), pp.3E1-01 (2003).
- 2) 武田英明, 松尾 豊, 濱崎雅弘, 沼 晃介, 中村嘉志, 西村拓一: イベント空間におけるコミュニケーション支援, 電子情報通信学会誌, Vol.89, No.3, pp.206-212 (2006).
- 3) Schilit, B., Adams, N. and Want, R.: Context-Aware Computing Applications, *Proc. IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications*, pp.85-90 (1994).
- 4) 角 康之, 江谷為之, Fels, S., Simonet, N., 小林 薫, 間瀬健二: C-MAP: Context-awareな展示ガイドシステムの試作, 情報処理学会論文誌, Vol.39, No.10, pp.2866-2878 (1998).
- 5) 角 康之, 伊藤禎宣, 松口哲也, シドニーフェルス, 間瀬健二: 協調的なインタラクションの記録と解釈, 情報処理学会論文誌, Vol.44, No.11, pp.2628-2637 (2003).
- 6) Borovoy, R., Martin, F., Vemuri, S., Resnick, M., Silverman, B. and Hancock, C.: Meme Tags and Community Mirrors: Moving from Conferences to Collaboration, *Proc. CSCW'98*, pp.159-168 (1998).
- 7) Gips, J. and Pentland, A.: Mapping Human Networks, *Proc. PerCom2006*, pp.159-168 (2006).
- 8) Cox, D., Kindratenko, V. and Pointer, D.: IntelliBadge: Towards Providing Location-Aware Value-Added Services at Academic Conferences, *Proc. UbiComp2003*, pp.264-280 (2003).
- 9) Hightower, J. and Borriello, G.: Location Systems for Ubiquitous Computing, *IEEE Computer*, Vol.34, No.8, pp.57-66 (2001).
- 10) Harter, A., Hopper, A., Steggle, P., Ward, A. and Webster, P.: The Anatomy of a Context-Aware Application, *Proc. MobiCom'99*, pp.59-68 (1999).
- 11) Priyantha, N., Chakraborty, A. and Balakrishnan, H.: The Cricket Location-Support system, *Proc. MobiCom'00*, pp.32-43 (2000).
- 12) 高島雅弘, 趙 大鵬, 柳原健太郎, 福井 潔, 福永 茂, 原 晋介, 北山研一: センサネットワークにおける受信電力と最ゆう法を用いた位置推定, 電子情報通信学会論文誌 B, Vol.J89-B, No.5, pp.742-750 (2006).
- 13) 伊藤誠悟, 佐藤弘和, 河口信夫: 無線 LAN の受信電波強度分布間類似度による方向推定手法, 情報処理学会論文誌, Vol.47, No.1, pp.51-62 (2006).
- 14) 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推定, 計測自動制御学会 SI2004

講演論文集, pp.204-205 (2004).

- 15) 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的な位置関係を利用したトポロジー推定システムの開発, 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).
- 16) Want, R., Hopper, A., Falcao, V. and Gibbons, J.: The Active Badge Location System, *ACM Trans. Info. Sys.*, Vol.10, No.1, pp.91-102 (1992).
- 17) 中村嘉志, 宮崎伸夫, 坂本和彌, 本村陽一, 蔵田武志, 西村拓一: 無電源小型端末 CoBIT による位置に基づく情報支援システムの提案, 教育システム情報学会誌, Vol.22, No.3, pp.175-187 (2005).
- 18) 並松祐子, 宮崎伸夫, 松尾 豊, 中村嘉志, 西村拓一: 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, 情報処理学会研究報告 (2006-HI-117), pp.59-66 (2006).
- 19) 大場光太郎: 超小型ネットワーク・ノードの開発, 産総研 TODAY (広報誌), Vol.5, No.4, pp.20-21 (2005).
- 20) Choudhury, T. and Pentland, A.: The Sociometer: A wearable Device for Understanding Human Networks, Technical report #554, MIT Media Lab (2002).

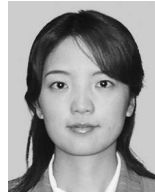
(平成 18 年 6 月 21 日受付)

(平成 18 年 12 月 7 日採録)



中村 嘉志 (正会員)

1994 年神奈川大学理学部情報科学科卒業。1996 年電気通信大学大学院情報システム学専攻科博士前期課程修了。1997 年同大学院同専攻科博士後期課程退学。同年同大学院同専攻科助手を経て、現在、産業技術総合研究所情報技術研究部門研究員。2006 年より芝浦工業大学客員助教授 (連携大学院) を併任。博士 (工学)。ロケーション・ウェアラブルな情報支援システムの研究に従事。センサネットワークと実世界指向のヒューマン・コンピュータ・インタラクションに興味を持つ。電子情報通信学会, 人工知能学会, IEEE 各会員。



並松 祐子

2003 年早稲田大学理工学部物理学専攻卒業。2005 年同大学院理工学研究科物理学及応用物理学専攻博士前期課程修了。同年株式会社アルファシステムズ入社。現在、通信システムの研究開発に従事。情報論の基礎に興味を持つ。



宮崎 伸夫

1999 年東京工業大学工学部経営システム工学科卒業。2001 年同大学院社会理工学研究科博士前期課程修了。現在、株式会社アルファシステムズに勤務。ロケーション・ウェアラブルな情報支援システムの研究に従事。センサネットワークと情報家電ネットワークの相互接続に興味を持つ。



松尾 豊 (正会員)

1997 年東京大学工学部電子情報工学科卒業。2002 年同大学院工学系研究科博士課程修了。博士 (工学)。同年より、産業技術総合研究所情報技術研究部門勤務。2005 年 10 月よりスタンフォード大学客員研究員。人工知能, Web マイニング, 社会ネットワークに興味を持つ。人工知能学会, 自然言語処理学会, AAAI, INSNA 各会員。



西村 拓一 (正会員)

1992 年東京大学工学系大学院修士 (計測工学) 課程修了。同年 NKK (株) 入社。X 線, 音響・振動制御関係の研究開発に従事。1995 年技術研究組合新情報処理開発機構つくば研究センタに出向, 1998 年 NKK (株) 復帰。1999 年技術研究組合新情報処理開発機構つくば研究センタに所属。2001 年独立行政法人産業技術総合研究所サイバーアシスト研究センター研究員, 主任研究員を経て、現在、同情報技術研究部門実世界指向インタラクショングループ長。2005 年より筑波大学大学院知能機能システム専攻助教授 (連携大学院) を併任。博士 (工学)。時系列データ検索・認識, 実世界情報支援に興味を持つ。電子情報通信学会, 人工知能学会, ヒューマンインタフェース学会, 赤外線学会, ACM 各会員。