

# 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

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>

<sup>†</sup>産業技術総合研究所 情報技術研究部門

<sup>‡</sup>株式会社アルファシステムズ

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

E-mail: nmura@ni.aist.go.jp, namimay@alpha.co.jp, miyazan@alpha.co.jp  
y.matsuo@aist.go.jp, taku@ni.aist.go.jp

## 要旨

ユビキタスコンピューティング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の研究においては、適切な情報選択のために状況依存性を活用することがますます重要になっている。近年、空間中に点在するオブジェクト（人や物）の絶対的な位置情報を利用して状況推定を行う研究が数多く行われているが、実世界においては、絶対的な位置情報よりもオブジェクト間のインタラクション情報の方が状況推定のためには重要であると我々は考えている。こうしたインタラクション情報を得るためには、絶対的な位置を直接得るのではなく、むしろオブジェクトそれぞれの局所的な相対位置関係や向き関係から得られるトポロジーを用いる方が有用である。本稿では、局所位置関係を取得する利用者デバイスおよびオブジェクト間のトポロジー推定を行う手法を提案する。そして、試作システムの開発状況を紹介しますと共に、シミュレーションを用いた実験を通じて本手法の可能性を示す。

## 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 Active Badge [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、環境中のセンサーで近接性 (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居るか、また誰と居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適用し、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ーの状況を推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程必要ではなく、ユーザー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的な位置関係に着目し、そこから全体の位置関係やユーザー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提案する。そして、簡単な実験を通じて提案手法の有効性を議論する。

以下、本稿は次のように構成される。まず、2節で局所位置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、局所位置関係を取得するためのユーザーデバイスに関して概要を述べる。4節では、提案手法を用いてトポロジー推定を行うシミュレーション実験とその結果について述べる。5節でロケーション・ウェアな情報支援システムについて関連研究を述べ、本研究の位置付けを明らかにする。最後に、6節で本稿の結論と今後の課題を述べる。

## 2 トポロジー推定の提案

### 2.1 トポロジー推定

ユーザー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、ユーザー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GPSの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、従来より、複数カメラによる位置検出手法や超音波、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る問題があった。また、XYZの座標としての記号

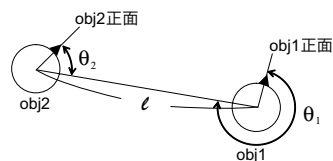


図 1: オブジェクト間の局所位置関係

的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方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ー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、「ある人の左側の近く別の人が居る」と言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」と捉えても良い。これを全体の関係で考えた時に、もし、複数の人が関係していたら、「その人たちは仲間であるようだ」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ー状況という、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

前者は局所位置関係を集めて、現在、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う

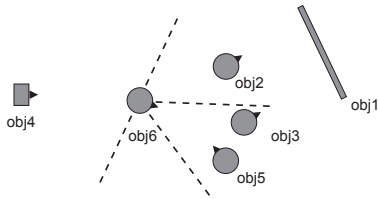


図 2: 空間内でのオブジェクトの位置関係の例

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 トポロジー推定での配置問題

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位置関係（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、 $\theta$ 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、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。

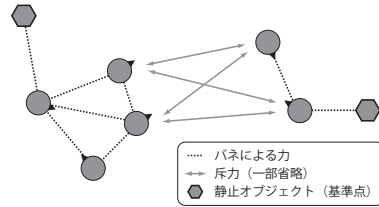


図 3: バネモデルによるトポロジー推定の例

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位置関係を基に、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位置関係を表す角度 $\theta$ と距離 $l$ とする。局所位置関係の検出できたオブジェクト間には、あるバネ定数をもったバネが張られ、それによる力がかかるとする。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、実際のセンサーでは検出できる距離 $l$ には上限があるので、直接関係が検出されなかったオブジェクト同士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、ある場所にいる時

にかかる力  $P_l$  を次のように定義する：

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

ここで、 $spring(o_i, o_j)$  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。同様に、 $repulsion(o_i, o_j)$  は局所位置関係がない場合に、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  $P_\theta$  を次のように定義する：

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

ここで、 $roll(o_i, o_j)$  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。

本稿で提案するバネモデルによるトポロジー推定では、繰返し演算により、これら  $P_l$  と  $P_\theta$  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し、オブジェクトの配置を施す。4節では、このモデルをシミュレーションを用いて検証した概要を簡単に述べ、考察する。

### 3 局所位置関係収集システムの試作

#### 3.1 システム構成

本節では、イベント空間において、ユーザや展示物、ロボットなどのオブジェクトの局所位置関係を収集するシステムについて概略と試作デバイスの諸元について述べる。局所位置関係収集システムは、各オブジェクトにあってそれぞれの局所位置関係を相互に取得するためのユーザデバイス

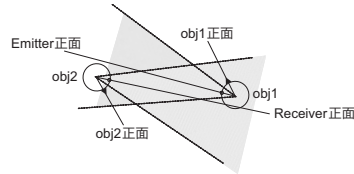


図 4: 赤外線の指向性を利用した角度分解の例

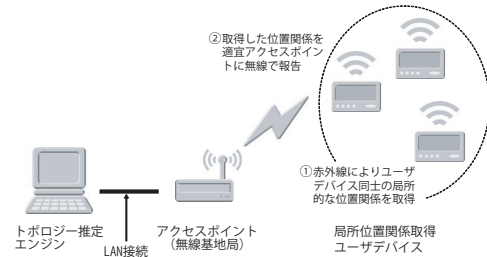


図 5: システム構成図

と、取得した局所位置関係情報をなるべく低遅延で収集するためのネットワークデバイスに分けられる。

ユーザデバイスは、空間中の各オブジェクトがそれぞれ持つ必要があるため、製造コストが低くなるようになるべく簡素な仕組みの方が好ましい。ここでは、入手が容易で安定した通信が可能な赤外線通信方式を利用することとする。図 4 に示したように、赤外線の指向性を利用し、これを複数個用いることで方向分解を行い、トポロジー推定の入力パラメータ  $\theta$  を決定する。したがって、分解能は赤外線送受信器の個数による。ただし、赤外線方式で距離を取得するためには複雑な装置構成が必要なため、ここでは、赤外線到達距離、すなわち通信可能距離に上限があることを利用して、もう一つの入力パラメータ  $l$  を取得する。したがって、オブジェクト同士は赤外線到達可能距離を上限として、ある範囲内に確率的に存在するものとする。

一方、ネットワークデバイスに求められる条件は、空間中のどこからでも情報を受渡し得なければならないことである。したがって、ここでは無線通信方式を用いることとする。

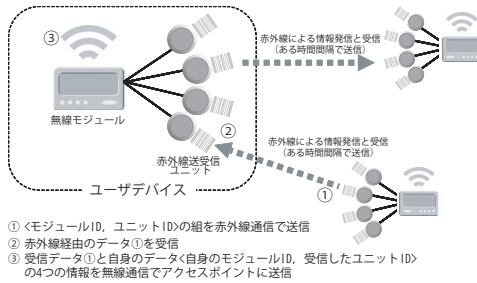


図 6: 赤外線を利用した局所位置関係の取得

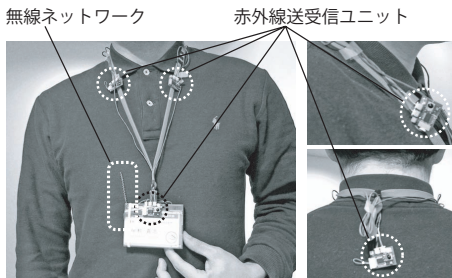


図 7: 名札型ユーザーデバイスの実装例

図5は、局所位置関係収集システムの全体の構成を示したものである。イベント空間中にはアクセスポイントが置かれており、取得されたオブジェクト間の局所位置関係は適宜ここに報告される。無線経由で報告された情報は、LANを通してトポロジー推定エンジンに到達し、トポロジー推定がなされる。

局所位置関係をユーザーデバイスがどのように取得するかについては、図6に示した。赤外線送信および受信を行う送受信器にはそれぞれIDが割り当てられており、このIDと方向を予め対応付けておくことで方向分解を行う。図は4方向の分解の例を示している。

### 3.2 試作デバイスの実装

ネットワークデバイスに小型の無線タグ[7]を用いて局所位置関係収集システムの試作を行った。図7は、ユーザーデバイスのプロトタイプ実装の外観である。図のように首かけ型の名札を用いて実

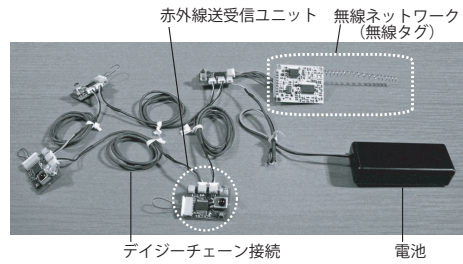


図 8: 試作ユーザーデバイスのモジュール構成

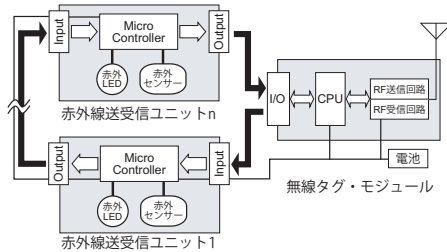


図 9: 試作ユーザーデバイスのブロック図

装を行い、イベント空間では、この名札をユーザーが装着することでユーザー間、またはユーザーとオブジェクト間の局所位置関係を取得する。

この例では、前方、後方、右前、左前の4方向の方向分解を取ることができる。方向分解を行う赤外線の通信距離は、現在は3mに調整してあるが、最大で5mの到達距離を実現することができる。したがって、トポロジー推定時には距離3mで、赤外線の照射角内に確率的に相手のユーザーが存在することになる。なお、プロトタイプ実装での赤外線の照射反値角は10度である。図8は、ユーザーデバイスのモジュール構成を示したものである。

図9は、ユーザーデバイスのブロック図を示したものである。プロトタイプでは、図のようにネットワークデバイスである無線タグ部を中心として、赤外線送受信ユニットがダイジェーション方式で接続され、環状の接続形態を取る。無線タグには一意に定まる10bitのIDが付与されており、これによりシステムはイベント空間中のユー

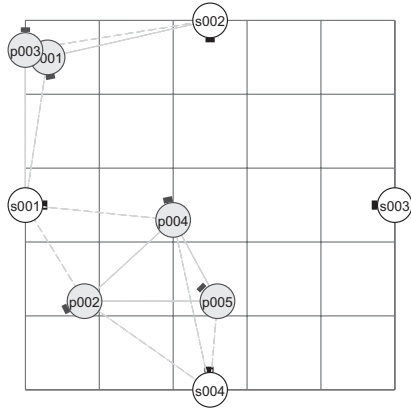


図 10: 初期状態 1 (5 ノードの場合)

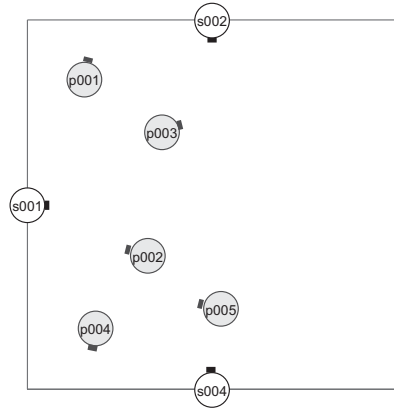


図 11: 推定結果 1 (5 ノードの場合)

ザヤオブジェクトを識別する。各赤外線送受信ユニットも 4bit の ID により識別され、これによりシステムはオブジェクト同士がどの方向の関係にあるのかを認識することができる。無線は周波数 300MHz 帯の特定省電力を利用しており、約 20m の距離までを帯域幅 2400bps でアクセスポイントとデータ通信することができる。局所位置関係のデータ送信時間は約 15 ミリ秒である。

## 4 シミュレーションを用いたトポロジー推定実験

本節では、複数個のオブジェクトがイベント空間中に存在する場合を想定し、シミュレーション実験を用いてトポロジー推定における提案パネモデル手法の特性を調べる。

### 4.1 実験方法および条件

ここでは、シミュレーション実験の前提条件と方法を説明する。まず、実際の部屋を模してオブジェクト（以降、ノードとする）の存在できる領域を矩形的 10m×10m とした。この中に、図 10 のように 4 個の静止ノードを四辺中央に配置する。これらの静止ノードはそれぞれ中央方向に向いているものとする。以下に、静止ノード名：(x 座標値, y 座標値, 方向) のリストを示す。

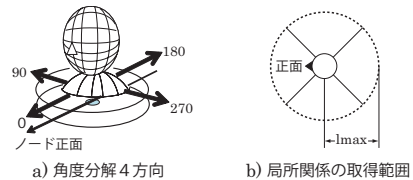


図 12: 局所位置関係および方向関係の取得条件

S001: ( 0, 5, 0)  
s002: ( 5, 10, 270)  
s003: (10, 5, 180)  
s004: ( 5, 0, 90)

なお、座標原点は図中左下であり、ノードの向きは図 12(a) で示したように図中右方向を 0 度とし、時計回りに単位を度で記述した。実験では、移動ノード（ユーザやロボットなどの一定速度以下で空間中を移動するオブジェクト）についてはランダムに位置と向きを設定し、p001, p002, ... と接頭辞 “p” を伴って表記することとする。本実験では、移動ノード数が 5 個および 10 個の場合を調べた。なお、図 10 に挙げた例は、移動ノードが 5 個の場合の例であり、これが初期状態である。図中のグリッドは 2m ごとを表している。

各ノードには、図 12(a) のように前後左右 (0 度, 90 度, 180 度, 270 度) の 4 方向に赤外線を送信器および受信器ユニットが設置されているもの

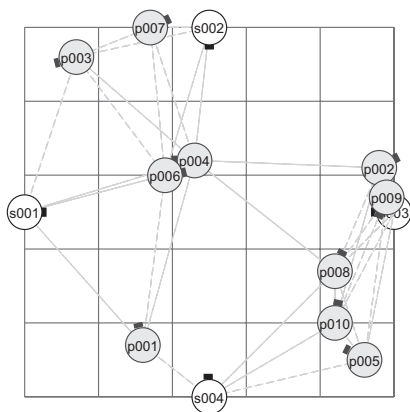


図 13: 初期状態 2 (10 ノードの場合)

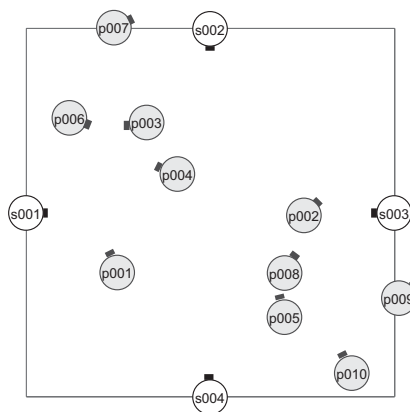


図 14: 推定結果 2 (10 ノードの場合)

とした。実験では、送受信可能な角度の範囲は90度であり、図12(b)のように4つの送受信機により全方向をカバーしているものとする。ただし、この送受信機はIDと方向の情報のみを送受信するもので、ノード間の距離は得られないものとして実験を行った。赤外線通信距離は距離(図中では  $l_{max}$ )は、実際のデバイスが約1~3mの範囲で送受信が可能であるため、本シミュレーションでも同じ条件で実験を行った。つまり、ノードを中心にドーナツ状の範囲内に他のノードが存在すれば、そのIDと向きの情報が得られるものとした。このとき、トポロジー推定アルゴリズムにおけるバネの自然長は、送受信可能距離の平均距離として2mとした。また、バネ定数および斥力定数をそれぞれ、 $k_s = 1$ 、 $k_r = 1$ と仮定してある。

## 4.2 実験結果

赤外線通信距離が1~3mで移動ノード数が5の場合の初期状態の一例として、図10の配置を行った。図中のノード間の線分は送受信が成立したことを示している。図10の初期データを基にトポロジー推定した結果を図11に示す。

右の辺の中央にある静止ノードs003は、推定結果では消滅している。これは、どのノードとも

通信できず局所位置関係が取得できなかったことが原因である。静止ノードのおよその配置は正しく推定できているが、p001、p003がs001とs002の間にずれている。これは、バネモデルによる力によって平衡点周辺に移動したためであると考えられる。

この例とは別に5回のシミュレーションを行ったが、移動ノードの配置によって送受信可能範囲外となり、ノード位置が推定できないことが2回認められた。

移動ノード数が10の場合は、図13を初期状態として、トポロジー推定出力図14を得た。斥力により近接したノードがある程度離れる傾向にあるが、良好に位置関係を推定できていると認められる。

## 4.3 考察

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求まる。理想的なデバイスは、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と通信距離の値をサーバに送信するものであろう。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調べる予定である。

## 5 関連研究

従来まで、位置を取得し、また活用するシステムは数多く研究され、開発されてきた。その中で、位置情報システムとして最も有名なもの一つは Active Badge [4] である。これは、赤外線方式という非常に簡素な仕組みでありながら、実世界指向の情報処理システムとして有用な位置情報を取得できるという事を示した初期のシステムである。本稿で提案した局所位置関係を取得するデバイスも、基本的にはこの Active Badge の方式と同様の仕組みを用いている。

本研究と同様に、ユーザとユーザの関係に着目したシステムとしては Sociometer [8] が挙げられる。これは、赤外線方式を利用してユーザ同士の対面関係を取得し、そこから人間関係を表すネットワークを構築するためのシステムである。マイクにより発話を検出することで、どれくらいの時間コミュニケーションがなされたかを計測することも、関係ネットワーク構築の際のヒントとしている。Sociometer は、デバイスや目標は本研究にかなり近いものであるが、方向分解能は 1 方向のみであるため、空間内での大局的な関係を得るためにはかなりの時間が必要であると考えられる。

実空間でのユーザ活動の意味付けを自動で行う研究もなされている。角ら [9] は、赤外線受信器と CCD カメラのハイブリッド装置をユーザデバイスとし、ユーザ活動の中での人と人、人と物とのインタラクションをキャプチャし、記録する仕組みを提案している。この記録の中からインタラクションコーパスと呼ばれる一種のデータベースを構築し、ユーザ活動の意味付けがなされる。デバイスは非常に複雑であるため現在の所、イベント空間での活用には向かないと考えられるが、インタラクションコーパスという考え方からユーザ活動の意味を抽出する手法は興味深い。

## 6 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、ユーザデバイスの試作を行った。また、シミュレーション実験を用いて、提案手法によってトポロジー推定が可能であることを示した。今後は、トポロジー推定の精度を向上させる工夫を行い、数々のシミュレーション実験より得られる知見を基にデバイスの設計へとフィードバックさせ、より効率的なシステムを構築していく予定である。

## 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., Falcão, 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] 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).
- [8] Choudhury, T. and Pentland, A.: The Sociometer: A wearable Device for Understanding Human Networks, *MIT Media Lab TR #554* (2002).
- [9] 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).