

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[†] 並松 祐子^{††} 宮崎 伸夫^{††}
松尾 豊[†] 西村 拓一[†]

本論文では、位置センサや方向センサを用いなくとも、方向に関連づけられた赤外線送受信タグを複数利用することでオブジェクトのトポロジカルな二次元の位置関係を推定できる手法を提案する。我々は、学会やオープンハウスなどの高い密度でコンテンツを有し、目的を持った多くの人が出会いを求めて集まる空間において、その場の価値を高めるような情報支援を行うことを考えている。こうした空間でのユーザの位置には何らかの意味や意図がある。したがって、その周囲のことが分かれば、ユーザの状況を色濃く反映できると考えられる。一方、適切な情報選択のためには、ユーザの位置や周囲のことでなく、人やモノが会場内でどのように分布しているかの緩いながらも大局的な状況も重要である。そこで本論文では、ユーザの周囲にある人やモノとの相対的な位置関係に着目し、そこから全体の関係性を推定する新たな手法を提案する。試作システムの詳細を述べると共に、実験を通じて本手法の有効性を示す。

Topology based Position and Direction Estimation using Relative Relationships of Infrared ID tags

YOSHIYUKI NAKAMURA,[†] YUKO NAMIMATSU,^{††} NOBUO MIYAZAKI,^{††}
YUTAKA MATSUO[†] and TAKUICHI NISHIMURA[†]

This paper proposes a method for estimation of objects' topology based on local position and orientation relationship in the real world. Our topology estimation method produces global relationships and context information of objects for information support to users. We have developed a user's device that can collect local positioning relationships as well as a topology estimation engine. The basic characteristic of our method is evaluated quantitatively with a simulation, which presumes some real world scenes assume plenty of objects in a room like a conferences or a openhouse. In addition to the characteristic, specification for the real devices is clarified with the simulation, and then devices are implemented. This paper shows the status and the feasibility of our system.

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来る。ここで形成された人脈や得られた刺激、新しい情報は人々の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、ある

目的を持って人々が多数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^{1),2)}。

こうした実世界指向のシステムでは、「何処に居るのか」、「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一つである³⁾。我々も、会場で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、上に挙げたような実世界における人対人や人対モノの局所的で密な関係性だけでなく、参加者が会場においてどのように分布するかの緩いながらも大局的な位置関係も知りたいと考えている。例えば、大局的な

[†] 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 Technology

^{††} 株式会社アルファシステムズ

Alpha Systems, Inc.

位置関係からは、輪になって話している集団や、あるポスター発表を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易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^{4)~7)}。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によって得られる大局的な位置関係情報を活かす試み⁸⁾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⁹⁾。例えば、絶対位置を推定できる位置センサ^{10),11)}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、三次元かつ高精度を要求するナビケ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¹²⁾や方向推定を行う手法¹³⁾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時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まだ未知数である。

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とも方向に関連づけられた赤外線送受信タグを複数利用することでオブジェクトのトポロジカルな二次元的な位置関係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トポロジー推定の手法を提案し、手法の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トポロジー推定の特性を明らかにすると共に、4章では、

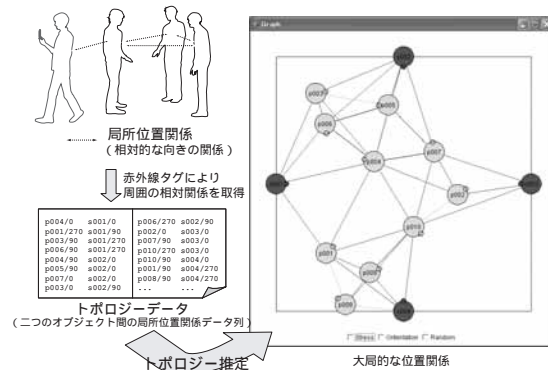


図 1 トポロジー推定の様子

Fig. 1 Overview of the topology estimation

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. トポロジーを用いた大局的な位置関係推定手法

2.1 トポロジー推定の概要

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している。大局的な位置関係は、人やモノなど二つのオブジェクト間の相対的な二次元的な局所位置関係(距離および方向の関係)をオブジェクト全体としてトポロジカルに捉えたものである。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もった二次元平面配置図であると言い換えることができる。また、ここでいうトポロジー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、本論文では、このトポロジー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ー推定と呼ぶ。

図1は、トポロジー推定の様子を示したものである。トポロジーは、Active Badge¹⁶⁾に代表される赤外線タグをオブジェクトごとに複数用いて取得する^{17),18)}。赤外線タグの指向性と有効距離を利用し、送信方向に予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。本プロトコルの詳細は以降の章で述べる。取得されたこの関係を図1中ではトポロジーデータとして示しており、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に予め対応している。

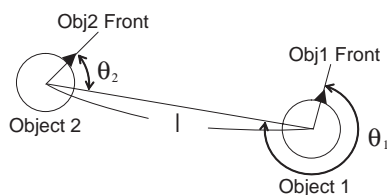


図 2 二つのオブジェクト間の相対的な距離および方向の関係
Fig. 2 Positional and directional relative relation of two objects.

角度に対応付けられたタグ ID とは別に、全体で一意的に定まる ID もオブジェクトには割り振られている。取得したトポロジーのうち、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。提案手法では、バネと斥力を用いた力学モデルを用いて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¹⁵⁾。

なお、トポロジー推定の出力結果は大局的な位置関係を示しているため、その意味では提案手法は二次元の位置推定手法として捉えることもできる。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捉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、大局的な位置関係の推定手法として提案する。

2.2 トポロジー推定での配置問題

二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 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、トポロジー推定では、赤外線タグによって取得される局所位置関係の曖昧さを考慮し、 θ と l 、時間の精度は極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ー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

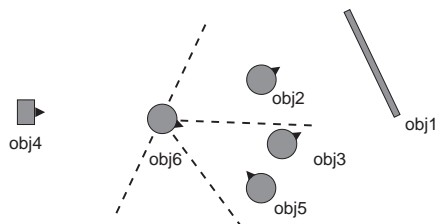


図 3 二次元平面上でのオブジェクトの位置関係の例
Fig. 3 Example of positional relations on a 2D space.

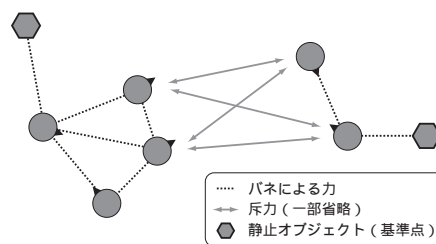


図 4 拡張バネ力学モデル
Fig. 4 Extended spring dynamical model

ている Obj2 を、赤外線タグを用いてある時間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間に検出される。

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それぞれの位置および方向を一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位置関係ネットワーク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。

2.3 トポロジー推定での力学モデル

トポロジー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¹⁵⁾。図 4 は、

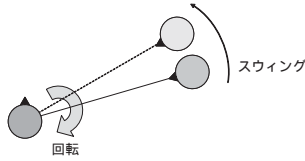


図 5 回転方向の力学モデル
Fig. 5 Roll dynamical model

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、局所位置関係をもつオブジェクト同士は近くにあるため、ある自然長およびバネ定数をも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_θ 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良い。しかし現実には、繰り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ことをこれに近似する。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：

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

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_θ を次のように定義する：

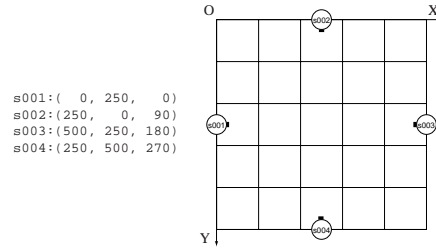


図 6 シミュレーションの対象空間と基準点の配置
Fig. 6 Space for simulations and anchor point settings.

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

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ー推定の評価

3.1 シミュレーションの目的と概要

トポロジー推定がどれだけ実際の大局位置関係を表すか、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予め配置した仮想空間を用意する。この空間の広さは 500×500 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下であり、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い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、予め方向 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 方向にそれぞれ取り付けられている。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にそれぞれ 0, 90, 180, 270 の ID 情報が割り振

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。

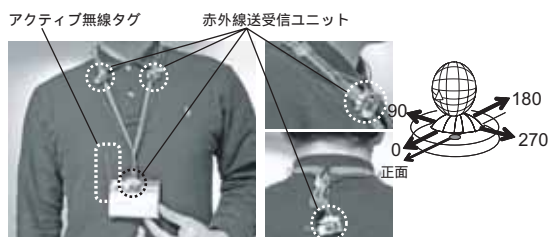


図 7 4方向分解を可能にする名札型ユーザデバイスの実装例
Fig. 7 Nametag type implementation example for 4 directional resolutions

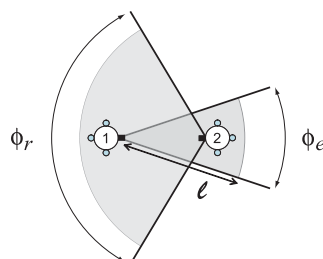


図 8 局所位置関係のセンシング判定パラメータ
Fig. 8 Sensing parameters for local positional relation

られている。また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、例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無い。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する。繰り返し、静止オブジェクトの二次元平面上的位置は既知である。

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に蓄えられ、トポロジー推定の入力になると仮定する。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四

辺中央に予め配置された四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 ϕ 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ー推定を行い、出力である位置関係ネットワークを得る。
- (4) 位置関係ネットワーク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 ϕ_e 、その時の有効距離を l 、そして、センシング可能領域の有効角度を ϕ_r で定義する。シミュレーションでは、 ϕ_e は 40 度 (中心から ± 20 度) で、 ϕ_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が、実際の赤外線 LED の発光強度特性は厳密には涙滴状である。本シミュレーションではこれを扇形で近似する。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、二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_θ 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ズレの距離

二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 が交換される。

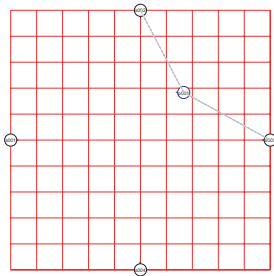


図 9 回転方向の力学モデルが作用した例

Fig. 9 Example of the roll dynamics model acted.

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) はトポロジー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ー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_θ についても E_d と同様に平均誤差とし、オブジェクト全てに対する角度のズレ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 θ_o は推定角度、角度 θ_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。

その他のパラメータとして、バネの自然長は 125 ピクセルであり、斥力は距離 100 ピクセル以内のオブジェクト同士で働くものとした。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 はトポロジー推定での繰り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。一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ー推定では、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、あまり意味がない。方向誤差 E_θ 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。 ϕ_e が 40 度、 ϕ_r が 120 度の場合、 E_θ 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

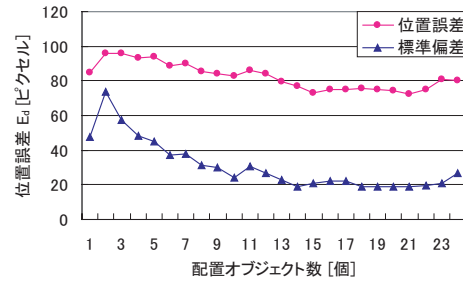


図 10 トポロジー推定の位置誤差

Fig. 10 Positional error of topology estimation

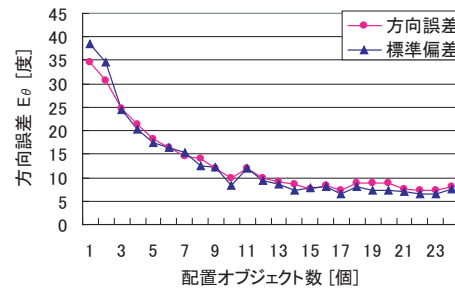


図 11 トポロジー推定の方向誤差

Fig. 11 Directional error of topology estimation

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、トポロジー推定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モデルでは、関係する二つの静止オブジェクトを結ぶ線上にオブジェクトが配置されるはずであるが、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ー推定を行い、位置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_θ 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。図から分かる通り、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ことが分かる。本手法で特徴的なのは、方向誤差 E_θ が非常に小さく、 $N = 10$ の場合で平均 9.9 度、 $N = 24$ の場合では平均 8.0 度を示したことである。その時のオブジェクトごとの局所位置関係数の平均は、それぞれ 4.9 本、7.6 本であった。ただし、センシング有効距離 $l = 250$ ピクセル、すなわち部屋の一边の半分の距離まで届くものとし、この時の試行回数 $M = 50$ であ

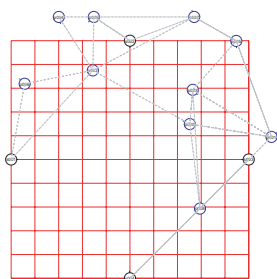


図 12 トポロジー推定が発散してしまった例
Fig. 12 Example of topology estimation divergence.

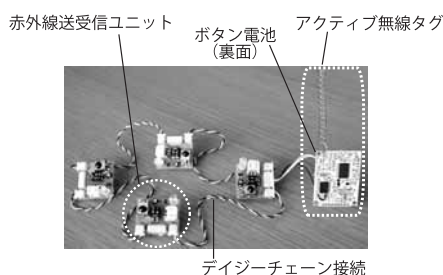


図 13 試作ユーザデバイスのモジュール構成
Fig. 13 Module configuration of prototype user device

る。また、本シミュレーションはトポロジー推定の振る舞いを調べるのが目的であるため、全てのオブジェクトが少なくとも一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。

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 を増やした時に、トポロジー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 $N = 10$ の時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。これは、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。その他、静止オブジェクトの配置にも工夫が必要であろう。例えば、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

トポロジー推定を実現するために、局所位置関係を実世界中で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

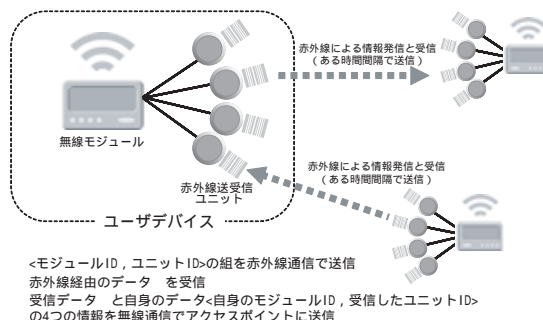


図 14 局所位置関係を取得する通信手順
Fig. 14 Communication diagram of Local relationship collection device

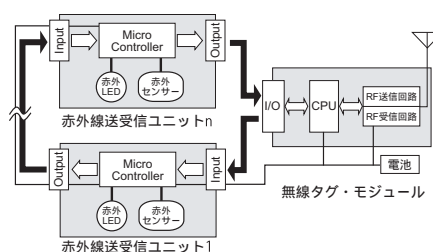
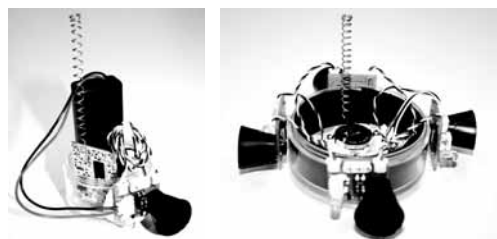


図 15 試作ユーザデバイスのブロック図
Fig. 15 Block diagram of prototype user device

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。赤外線タグ部分である赤外線送受信ユニットはそれぞれデジチェーンにより接続されるため、1 つオブジェクトに 4 つ以上のタグを取りつけて制御することも可能である。

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、二つのオブジェクト間の関係を定期的に関欠取得する。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、トポロジー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、無線タグ同士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を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ーには、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。ソフ



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 16 実験に使用した局所関係収集デバイス

トウェア制御された送信間隔は、現在は約 1 秒に 1 回に設定してある。また、このコントローラは、赤外線を受信してデコードが終わると、直ちに、非同期シリアル通信を用いてデジ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¹⁹⁾を用いた。無線タグもデジチェーン接続先から内部通信により情報を受け取ると、直ちに、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

トポロジー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。今回実装で用いたビ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、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と考えられる。

基礎実験では、まず、指向性について検証した結果、送信側は用いた赤外線 LED の固有特性の通り指向半値角 ± 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 ± 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問題が明らかとなった。そこで、図 16 の写真に示すように、受光素子の前に円筒形状の構造を持たせて入射光を抑制し、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

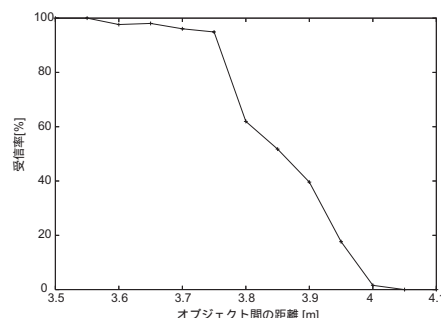


図 17 センシング有効距離

Fig. 17 Sensing effective range

工夫を行った。

次に有効距離について計測した。図 17 はその結果である。距離 3.8m 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、 $V_f =$ 約 1.8V の赤外線 LED に直列接続されており、その時の電源電圧は $V_{cc} = 3V$ なので、このときに赤外線 LED に流した電流は平均で $I = 12mA$ である。抵抗値を最小にした時の有効距離は約 6.5m 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 15m であった。

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²⁰⁾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。

センシング有効距離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 3.8m を踏まえ、一辺が 3.8m の約倍にあたる 7m の矩形空間を実験対象領域とした。図 16 は実験に使用した局所関係収集デバイスである。

図 18 はトポロジー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、トポロジー推定を行った結

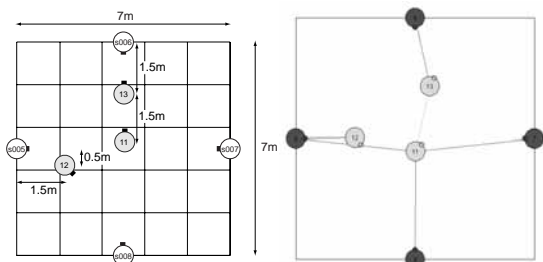


図 18 位置推定実験 1：無作為配置

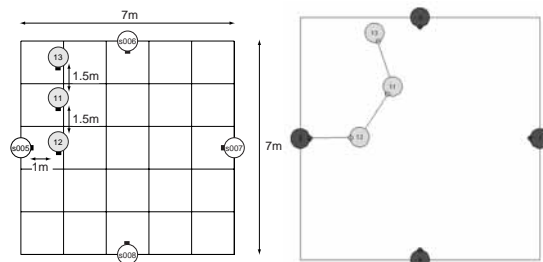


図 19 位置推定実験 2：三名が整列している状況を想定

果が右図である．右図中のオブジェクト間に跨る線はトポロジー推定力学モデルでのパネ，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同士のお互い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 の間には関係性が取れていないため，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話し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取れていないため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」といったように，トポロジー推定が大局的な位置関係の推定を十分に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^{4),5),7)} や発話動作に着目して対峙した人

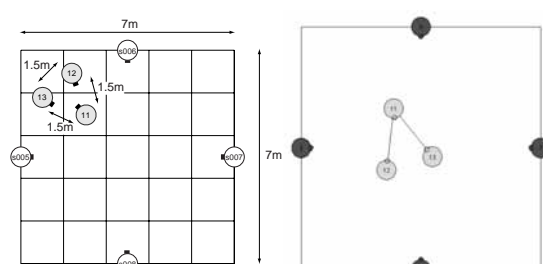


図 20 位置推定実験 3：三名がお互いに向き合って話している状況を想定

同士の関係を自動的に取得するもの¹⁴⁾ が挙げられる．また，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⁸⁾ や，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⁶⁾ も挙げられる．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，多角的に捉えるものの大きく三つに分けられる．

局所的に密な関係を取得するものとして，中でも，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繋げる Borovoy ら⁴⁾ 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．Sociometer¹⁴⁾ 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⁷⁾ 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，IntelliBadge⁸⁾ が挙げられる．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

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．

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等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どちらかを対象としているため、それらを両立させる事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-MAP⁵⁾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、実証実験の様子と共に、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 6) 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の情報でインデキシングできるという点である。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、密な関係性をも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。したがって、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。

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、二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ー推定を提案した。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、トポロジー推定が角度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 12 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繋がる、トポロジー推定の利点であると言える。

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。トポロジー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ー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。

この他に、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ー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な状況推定を、データマイニング等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に謝意を表する。

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), 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, *IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Appli-*

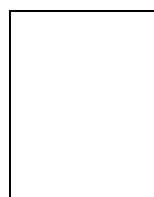
- cations, pp.85–90 (1994).
- 4) Borovoy, R., Martin, F., Vemuri, S., Resnick, M., Silverman, B. and Hancock, C: Meme Tags and Community Mirrors: Moving from Conferences to Collaboration, *In Proc. CSCW '98*, pp.159–168 (1998).
 - 5) 角康之, 江谷為之, Sidney Fels, Nicolas Simonet, 小林薫, 間瀬健二: C-MAP: Context-aware 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).
 - 6) 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).
 - 7) Gips, J. and Pentland, A.: Mapping Human Networks, *In 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, *In Proc. UbiComp2003*, Springer LNCS 2864, 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., Wardand, A., and Webster, P.: The Anatomy of a Context-Aware Application, *In Proc. MobiCom '99*, pp.59–68 (1999).
 - 11) Priyantha, N.B., Chakraborty, A. and Balakrishnan, H.: The Cricket Location-Support System, *In 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) Choudhury, T. and Pentland, A.: The Sociometer: A wearable Device for Understanding Human Networks, *MIT Media Lab TR #554* (2002).
 - 15) 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).
 - 16) 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).
 - 17) 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).
 - 18) 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).
 - 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) 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).

(平成 18 年 6 月 21 日受付)

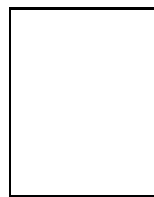
(平成 19 年 3 月 6 日採録)



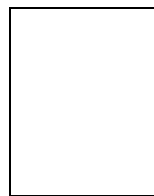
中村 嘉志 (正会員)



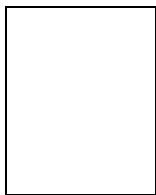
並松 祐子



宮崎 伸夫



松尾 豊 (正会員)



西村 拓一（正会員）

