

超音波と無線タグを用いた位置関係推定システムの実装

An Implementation of Location Estimation System using Ultrasonic and Radio

小林 亮介*¹
Ryosuke KOBAYASHI

中村 嘉志*^{1*2}
Yoshiyuki NAKAMURA

南 正輝*¹
Masateru MINAMI

西村 拓一*²
Takuichi NISHIMURA

*¹芝浦工業大学

Shibaura Institute of Technology

*²産業技術総合研究所

Information Technology Research Institute, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

It is important for ubiquitous computing to realize providing location aware information service for humans. 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. We are talking the indoor location and orientation system with a new approach called *topological estimation*. In the initial implementation of the topological estimation, we have used infrared tags as the sensors to collect real world relative information. However, there is an issue with lower accuracy in the infrared system. To solve the issue, this paper proposes a ultrasonic system to provide higher sensing accuracy. With an implemented prototype system, the experimental results demonstrate the feasibility of our ultrasonic sensing method.

1. はじめに

ユビキタスコンピューティングでは実空間内での様々な状況に適応したサービスを提供することが期待されている。実空間は人やモノ（以下、オブジェクトと称する）で構成されているので、オブジェクトの位置情報は重要なものであると考えられる。我々はこうしたオブジェクトの位置情報に基づく情報支援を学会などのイベント空間を対象として進めてきた [西村 03] [武田 06]。

現在、測位システムとして用いられているのは GPS が有名であるが、屋内で使用することは困難である。そのため屋内での測位システムとして Active Badge [Want 92], Cricket [Priyantha 01] などが研究されてきた。これらのシステムは絶対位置を精度よく捕捉することを目的としている。屋内で多くの人が集まる展示会や学会の懇親会などのイベント空間内では人は話をするときや何か作業をするときその方向に向いていることが多い。このため絶対位置よりもそれぞれのオブジェクトの相対位置関係、向き関係は特に重要なものであると考えられる。

我々はイベント空間内でのオブジェクトの相対位置関係をセンサで取得し、それらを解析することでオブジェクトの位置および向きの全体像を推定するトポロジー推定を提案している [中村 07]。トポロジー推定では、入力データである相対位置関係のセンシング精度が良ければよいほど推定アルゴリズムの制約条件が増し、推定結果の位置および向きの精度も高くなる。しかし、赤外線タグを用いた初期実装センシング方式では相対位置関係の精度が赤外線センサの数に依存し、現実的なデバイスを考慮すると前後左右などの 4 方向の分解能に限られてしまうという問題があった。

そこで本稿では、赤外線タグの代わりに超音波センサを用いることでデバイスのセンシング精度を向上させる方式を考えて実装を行い、実験及び評価を通してトポロジー推定における超音波方式の妥当性を議論する。以下、本稿では 2 章でトポロジー推定についての概要について説明し、計算機シミュ

レーション結果について示す。3 章で超音波を用いた設計と実装について述べる。4 章で実装したデバイスの実験および評価を行う。

2. トポロジー推定

本章では、トポロジー推定についての説明およびアルゴリズムについて述べ、本手法を実空間上で使用するためのデバイスについて議論する。

2.1 トポロジー推定の概要

我々はイベント空間上ではオブジェクトの相対位置関係が重要であるという考えに基づき、センサでオブジェクトの相対位置関係を取得し、その情報から位置および向きを推定するトポロジー推定の提案している。トポロジー推定の特徴は位置センサ（GPS など）や向きセンサ（電子コンパスなど）は用いなくとも、方向に関連付けられた簡単なタグを複数利用することでオブジェクトの位置および向きを推定できるという点である。

図 1 はトポロジー推定の様子を示したものである。センサデバイスにより取得された相対位置関係は、図 1 中ではトポロジーデータという名前で示している。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るが、初期実装で行った赤外線タグ方式では角度は予めタグ ID に対応させており、実際に用いるデータは前後左右の 4 方向分解のように極めて低精度のものである。これらの相対位置関係のうち、推定対象空間内において位置および方向が既知のオブジェクト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。そのための推定のアルゴリズムとして 2.2 節で説明するようなバネと斥力を用いた力学モデルを提案しており、トポロジー推定では、これによって二次元平面上でのオブジェクト全体の位置および方向を規定する。

2.2 トポロジー推定の力学モデル

トポロジー推定にはバネモデルを拡張した力学モデルを用いている。図 2 にトポロジー推定の力学モデルの概略を示す。

連絡先: 小林 亮介, 芝浦工業大学, 東京都江東区豊洲 3-7-5, kobayashi@lisa.ele.shibaura-it.ac.jp

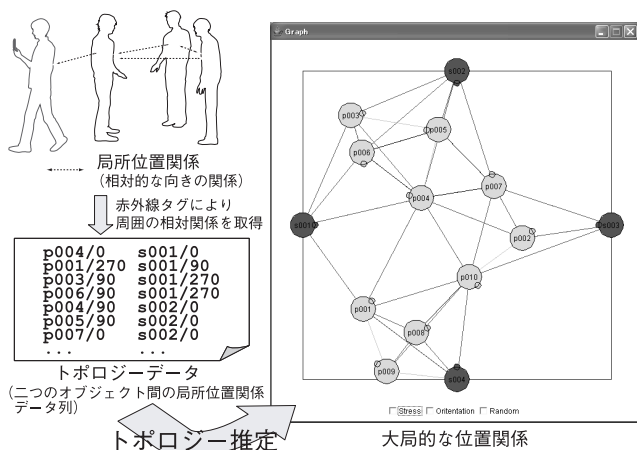


図 1: トポロジー推定の様子

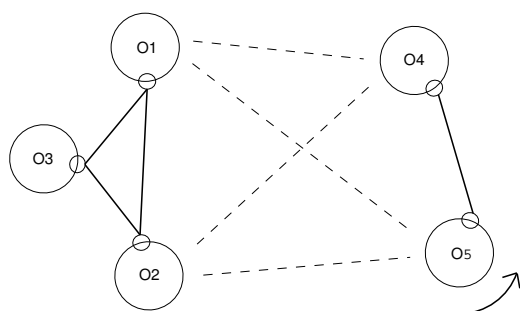


図 2: 力学モデル

図中の O1-O2-O3, O4-O5 のように、センサから情報が取得できた場合、この関係はバネでつながっていると仮定し、引力を働かせる。これはセンシング可能距離をあらかじめ設定することで、関係をもったオブジェクトは近くにいと推測できるからである。

逆に O1-O4, O1-O5, O2-O4, O2-O5 のように、センサから情報が取得できなかった場合はセンシング距離外にいと推測できるので、近くにはいないだろうと仮定し、斥力を働かせる。オブジェクト o_i にかかる力 F_l を次のように定義する：

$$F_l(o_i) = \sum_j^N spring(o_i, o_j) + \sum_j^N repulsion(o_i, o_j)$$

ここで、 $spring(o_i, o_j)$ は、オブジェクト o_i は、オブジェクト o_i と o_j の間に関係がある場合、ある係数 k_s で働く引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 $repulsion(o_i)$ は o_i と o_j の間に関係がない場合にある係数 k_r で働く斥力を示す関数である。

また、O4, O5 のように、推定結果の向きにずれが生じた場合、向きのずれに対しても力を働かせる。各オブジェクトの向きのずれに対する力 F_θ を次のように定義する：

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

ここで $roll(o_i, o_j)$ は、オブジェクト o_i と o_j の間で位置関係が取得できた場合に、検出方向と現在の方向との角度誤差に働く力を表す関数であり、角度の差分に比例する。

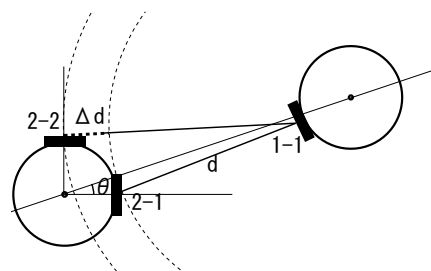


図 3: 角度測定原理

2.3 赤外線タグ用いた初期実装の課題

トポロジー推定を実空間上で実現するために初期実装として、赤外線センサを用いたデバイスを試作し、実験を行った [中村 07]。また、このデバイスのセンシング可能距離、指向性、角度分解能などの特性を測定し、これらをパラメータとして用いて計算機シミュレーションを行った。このシミュレーション結果は本手法で全体の位置および向き関係を推定できることを示した。向き関係推定に特に効果的で、オブジェクト数が 14 以上の場合、全体の角度誤差の平均が 10 度以下であった。デバイス単体では角度分解能は 90 度であるため、このトポロジー推定が有効であることがわかる。

しかし、オブジェクト全体の位置及び方向の推定精度をより向上するためにはセンサからの取得データの精度を高くする必要が考えられる。データの精度が高くなるとトポロジー推定システムで用いた力学モデルの制約条件が増すためである。赤外線タグを用いたデバイスでは赤外線データ通信により向きを識別している。そのため角度分解能は赤外線素子の数に依存し、精度を良くするためには赤外線素子を多くしなければならず、現実性に欠ける。そこで、赤外線センサの代わりに超音波センサを用いることでセンシング精度を向上させる方法を提案する。

3. 超音波を用いたトポロジー推定デバイス

3.1 超音波の特徴

超音波の伝搬速度は光の速度に比べ遅く、安価なマイコンでも伝搬時間を測定することが可能である。超音波の伝搬速度は既知であるから、伝搬時間を音速度でわること距離を測定することが可能である。また、図 3 のように 2 つ以上の超音波素子を使用した場合、角度に応じて受信タイミングのずれが生じる。この時間差を解析することで角度を測定することができる。

赤外線タグを用いた初期実装では角度の分解能は赤外線素子の数に依存してしまっていた。たとえば、赤外線素子が 4 つしかない場合は 90 度単位でしか測定できない。対して超音波を用いることで、超音波素子が 4 つしかなくても 4 方向以上の角度を測定することができる。また、超音波は赤外線に比べ距離測定も容易にできるので、推定結果はより精度のよいものになると考えられる。次節に超音波を用いた距離および角度の測定方法について詳述する。

3.2 超音波を用いた測位方法

距離の測定には ToA(Time-of-Arrival) を用いる。この手法は超音波の伝搬時間を測定し距離を算出する方法である。伝搬時間は送信時刻と受信時刻の差により求められるので、送受信間で時刻同期が取れていなければならない。今回は別途電波を

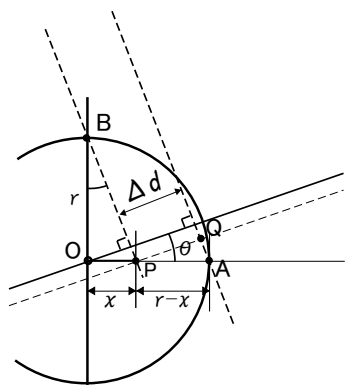


図 4: 角度測定原理

用いて同期信号を発することとした。電波の伝搬速度は音波のそれに比べ極めて速いので、同期信号の伝搬時間は無視できる。つまり、電波と超音波を同時に送信した場合、受信側では電波が到着してから計時をスタートし、超音波が到着するまでの時間を超音波の伝搬時間として近似できる。この伝搬時間を音速度でわること距離の測定を行う。

次に角度情報の取得について説明する。赤外線タグを用いた初期実装では赤外線の指向性を利用し、データ通信が成立した方向の平均値を相手のいる向きとした。これによりおよその向きと ID が同時に求まる。しかし超音波を用いてデータを送信する場合は通信時間が長くなるという問題がある。そこで今回は電波と超音波を併用することで相対位置関係と ID を取得する。

超音波センサが 2 方向以上で受信した場合、受信した各方向で距離を求め、その距離差 Δd から角度を求める。図 3 に 2 方向から受信した例を示す。超音波素子はデバイスの中心から半径 r の円上に 90 度間隔でそれぞれ 4 素子ずつ配置する。超音波素子 1-1 から発射された超音波は素子 2-1, 2-2 で受信しているが、図に示すように角度 θ に応じた距離差 Δd が生じている。この距離差 Δd およびデバイスの中心から超音波素子までの距離 r を用いて距離差 Δd を求める。

図 4 は図 3 の受信側を拡大して表したものである。点 A および B は超音波素子である。送信ノードと受信ノード間の距離 R が $r \ll R$ であると仮定し、線形近似して角度 θ を求める。 $\triangle OPB$ について考えると、線分 OP の長さ x は θ を用いて次式で表される。

$$x = r \cdot \tan\theta$$

また、 $\triangle AQP$ について考えると、

$$\cos\theta = \frac{\Delta d}{r - x}$$

であるので、これら 2 式より θ について解くと、

$$\sin\theta = 2 \left\{ 1 - \left(\frac{\Delta d}{r} \right)^2 \right\}$$

となる。 r はあらかじめ設定する値なので、 Δd を測定することで θ を求めることができる。

各ノードに対して距離 d および角度 θ を求め、力学モデルを用いたトポロジー推定することで位置関係を推定する。

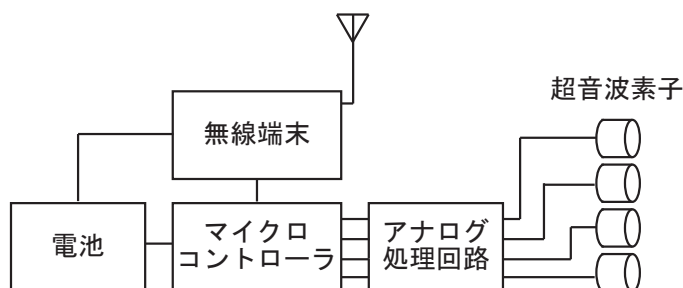


図 5: ハードウェアの構成

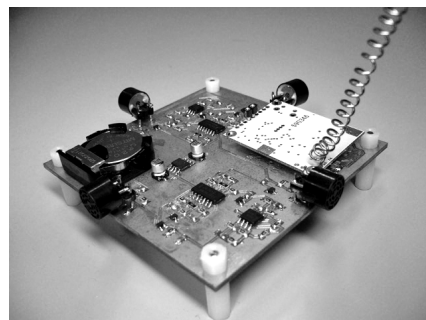


図 6: 試作デバイス

3.3 システム構成

ハードウェアの構成を図 5 に、試作したデバイスを図 6 に示す。各デバイスは無線モジュール、4 つの送受信兼用超音波センサ、アナログ処理回路、およびマイクロコントローラで構成されている。無線モジュールには小型で低消費電力タイプの SNODE [大場 05] を用いた。この無線モジュールはネットワークの中心に位置するシンクノードと通信し、各種命令の受信や計算結果を送信するために用いる。超音波の送信制御、距離や角度の計算などを行うマイクロコントローラはマイクロチップ社の PIC18F2220 を用いた。アナログ処理回路では超音波の受信波形の処理や超音波送信アンプとして使用する。シンクノードは PC に接続されていて、超音波送信命令およびセンシングデータを PC に転送する。PC のソフトウェアで力学モデルを用いて演算しトポロジー推定を行う。

相対位置関係の取得手順を次の 1~5 に示す。また、1~5 は図 7 中の①~⑤に対応している。

1. シンクノードが送信ノード ID および送信向きを指定し、無線信号で超音波送信命令を出す。この命令はすべてのノードが受信するものとする。
2. ID が一致するノード (ID2) は送信モードになり超音波パルスを発射する。ID が一致しないノード (ID1) は受信モードになり、マイクロコントローラ内蔵のタイマ機能をスタートさせ超音波の受信を待機する。
3. 受信モードのノードが超音波を受信した場合、タイマの値が超音波の伝搬時間 t である。
4. 受信ノードが先とは別方向でも超音波を受信した場合は、向きに応じた遅延時間 Δt が発生する。この値もマイクロコントローラでタイマで測定する。

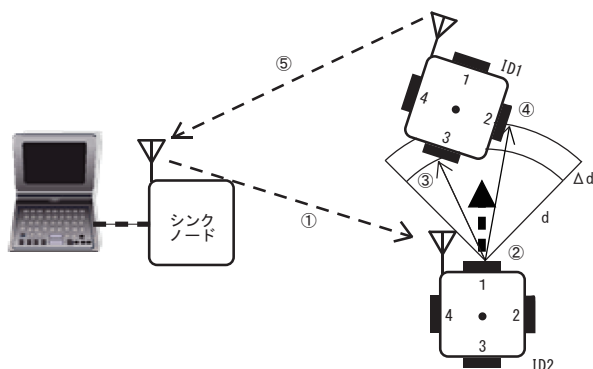


図 7: 測定手順

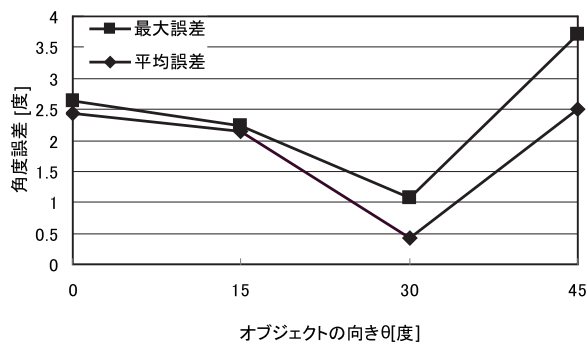


図 9: 試作超音波デバイスの角度誤差

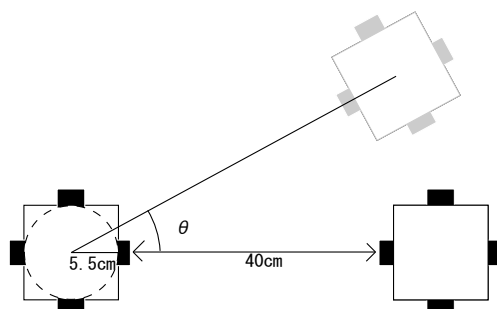


図 8: 実験方法

- 受信ノードは ID, 受信した素子番号, 伝搬時間 t および遅延時間 Δt をシンクノードに送信する。

シンクノードはこれらの情報を PC に転送する。PC 上ではノード間の距離 d および相対角度 θ を伝搬時間 t および遅延時間 Δt を用いて計算する。すべてのノードに対して距離 d および相対角度 θ を計算し、パネモデルを適応したトポロジー推定を行う。

4. 実験および評価

超音波を用いたトポロジーデバイスの基礎特性を評価するために角度分解能の測定実験を行った。超音波素子は図 8 のように中心から 5.5cm の位置に 90 度間隔で 4 つ配置する。このデバイスには超音波素子が 4 つ取り付けられているが、これらは対称であるため 2 素子を用いて 0 度～ 45 度まで測定することで 360 度の特性を知ることができる。今回の実験では θ を 0 度～ 45 度まで 15 度単位で角度を変化させ、各角度において角度分解能を測定した。ノード間の距離は 40cm で固定とする。それぞれの角度での最大角度誤差および平均角度誤差を図 9 に示す。

実験の結果、最大角度誤差はオブジェクトの向き $\theta = 45$ 度に対して 3.7 度という結果となった。この原因は超音波の伝搬距離差 Δd はオブジェクトの向き $\theta = 45$ 度で $\Delta d = 0$ 、 $\theta = 0$ 度で Δd が最大となるため、 45 度に近いほど時間差 Δt は短くなる。 Δt が短いとマイクロコントローラの処理速度が追いつかなくなり、誤差として現れる。この誤差はマイクロコントローラの動作周波数を高くすることで程度小さくすることができる。今回はマイクロコントローラの動作周波数を 8MHz と設定したが、 20MHz まで高くすることが可能であ

る。また、処理方法を変えることにより改善できると考えられる。この問題は今後の課題として取り扱っていくこととする。

5. まとめ

本稿ではイベント空間でトポロジー推定を行うために超音波素子を用いたデバイスを実装し、実験および評価を行った。超音波を用いることで赤外線タグを用いた初期実装よりも角度分解能が改善された。これにより赤外線タグを用いた初期実装より精度の良いトポロジー推定が可能となる。今後は今回試作した超音波デバイスを実空間上で使用し、イベント空間上でトポロジー推定することで全体の位置および向きの推定を行う予定である。

謝辞

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

- [中村 07] 中村 嘉志, 並松 祐子, 宮崎 伸夫, 松尾 豊, 西村 拓一: 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, 情報処理学会論文誌, Vol. 48, No. 3, pp. 1349–1360 (2007)
- [西村 03] 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)
- [大場 05] 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)
- [Priyantha 01] Priyantha, N., Miu, A., Balakrishnan, H., and Teller, S.: The Cricket Compass for Context-Aware Mobile Applications, *Proc. MOBICOM*, pp. 1–14 (2001)
- [武田 06] 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)
- [Want 92] Want, R., Hopper, A., Falcao, V., and Gibbons, J.: The Active Badge Location System, *Trans. On Information Systems*, Vol. 10, No. 5, pp. 42–47 (1992)