

センサーネットワークの位置決めのための 音響測距の実装と分散型アルゴリズムの提案

An Implementation of Acoustic Ranging and a Proposal of Distributed Algorithm
for Localization of Sensor Network

許 国豪*・井上 純哉**・本多 弘明*・小国健二***

Kok-How KHOR, Junya INOUE, Hiroaki HONDA and Kenji OGUNI

*学生員 東京大学大学院工学系研究科社会基盤学専攻 (〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

**正会員 工博 東京大学助教授 東京大学大学院工学系研究科社会基盤学専攻 (〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

***正会員 Ph.D. 東京大学助教授 東京大学地震研究所 (〒 113-0032 東京都文京区弥生 1-1-1)

This paper presents an implementation of acoustic ranging and proposes a distributed algorithm for localization of sensor network. Relative positions between sensor nodes are estimated based on acoustic ranging through the inverse Delaunay algorithm. This algorithm localizes all the nodes simultaneously, thus, the accumulation of the error in the localization is suppressed. Noise tolerant acoustic ranging algorithm that employs digital signal processing techniques is implemented in an off-the-shelf sensor platform (Mica2). Experiments show that this acoustic ranging algorithm is sufficient to give average range estimation error below 10 cm. Field experiment was conducted with twenty-one sensor nodes to evaluate the accuracy of the localization of the system.

Key Words : sensor network, localization, inverse Delaunay algorithm, acoustic ranging

1. はじめに

従来から市場に出回っていた PIC や AVR などのワンチップマイコンと呼ばれる省電力かつ安価な CPU が、近年飛躍的発展を遂げつつあるセンシング技術・無線通信技術と結びつくことにより、安価で高性能なセンサー・プラットフォームを多数用いたネットワークセンシングが現実味を帯びてきた。現在、研究開発用に販売されているネットワークセンシングの基本キット¹⁾でさえ、個々のセンサープラットフォーム上で計測データにデジタルフィルタリングなどの処理を施し、無線通信を利用してマルチ・ホップでデータ転送を行うことが可能である。データ転送ルートをアドホックに決定するといった高度な通信制御も可能であり、すぐにも実用に供することが可能に見える。

しかし、このような装置を工学的に意味のある計測に適用することを考えると、解決すべき課題は多く残されている。たとえば、地震工学の範疇で、大規模な地震発生直後に震源付近に多数のセンサーをばら撒いての余震機動観測、高層建造物の耐震性能検証のための超稠密計測(ビルひとつに 1000 個のオーダーのセンサープラットフォームを設置して同期計測・解析)といった課題への適用を考えると、一つ一つのセンサーの位置を測りながら設置していくことは非効率的であり、時間・資金両方の意味でのコストの増大は自明である。また、個々のセンサーに十分な(10cm 以内の)位置決め精度をもつ GPS を搭載することは現時点では

価格面の制約により不可能である。GPS を全てのセンサーに搭載することなく安価なデバイスのみを用いて個々のセンサーの位置を決定する問題はセンサーネットワーク研究の分野においては Localization Problem と呼ばれ、活発な研究が行われている研究対象である²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾。

本論文では上記の Localization Problem に対して、安価なデバイスを用いて入力データ(近傍センサーノード間の相対距離)を得る「音響測距」の精度向上のためのアルゴリズム開発とセンサープラットフォームへの実装からなる研究の結果を紹介する。また、計測される近傍ノード間の相対距離を入力データとして個々のセンサーノードの位置をネットワーク全体の並進・回転・反転の自由度を残して決定する分散型アルゴリズムを提案する。

センサーノード間の距離がデータとして与えられたときの位置決めの問題は、計測される距離データの精度が充分高ければ測量学の知見の転用により解決可能である。しかし、個々のセンサーノードに搭載するハードウェアをできる限り単純・安価なものにするという制約下では計測される距離データは誤差を多く含む。この場合、測量学で用いられるような、位置が既知の複数のノードからの距離に基づいて順次新しいノードの位置を決めていくといった逐次的位置決め手法では誤差の蓄積が生じ、全く機能しない。逐次的位置決めではなく、近傍ノードとの位置関係の同定に基づいて最

後に全体を組み上げる形の分散型アルゴリズムによる位置決めが求められる²⁾。分散型アルゴリズムにおいては、近傍ノードで形成されるローカル・クラスターのロバスト性が問題となる（後に詳述するが、ローカル・クラスターの構成ノードの位置関係が計測誤差により反転する場合などに位置決めアルゴリズムが破綻する）。本研究の分散型位置決めアルゴリズムはロバスト性の高いローカル・クラスターの生成と計算負荷の少ない組み上げの方法を提案するものである。

本研究で提案する音響測距技術は安価なブザーとマイクを用いて実装可能かつ数 cm オーダーの計測精度をもつ技術である。本論文中で紹介する実装は市販のセンサープラットフォーム (Mica2)¹⁾ にデフォルトで搭載されている音響デバイスを用いたものである。この測距技術は超音波測距⁵⁾ で多く用いられるトーン検出 (バイナリー判定) と異なり、計測された音波のセンサープラットフォーム上でのデジタル処理に基づいている。データ・スタッキングなどの処理が可能であり、デバイスの精度の制約を強く受けるバイナリー判定では不可能な計測精度向上が実現可能である (たとえば、多数のスタッキングによって原理的には ADC (Analog to Digital Converter) の分解能まで可能)。

本研究で提案し、その実装例を示すシステムは図-1 に示す階層型センサーネットワークシステムの一部を構成するものである。図-1 の最下層において「音響測距と分散型アルゴリズムに基づく位置決め手法」に基づき、child node の相対位置が決定される。相対位置が決定された child node の絶対位置決定のためのリファレンスが 図-1 の parent node の GPS により与えられる。Parent node で用いられる L1 GPS の精度向上のためのアルゴリズムと実装に関しては佐伯らによる研究⁶⁾ を参照されたい。

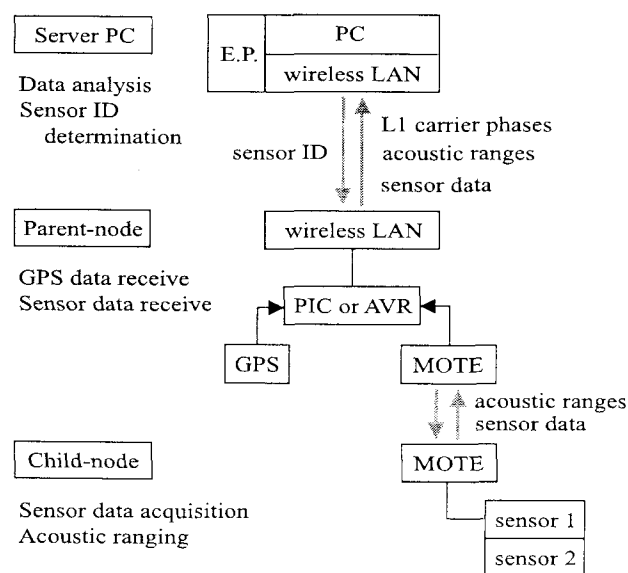


図-1 階層型センサーネットワークシステム

2. Mote における測距の実装

本節では、本研究で開発したセンサーノード間の測距方法に関して簡単に説明する。

センサーノード間の測距の実装方法は近年様々に提案されており、特に低密度でしかも高度な測定精度を要求しない状況においては、電波強度の距離による減衰を用いた技術 (RSSI: Received Signal Strength Indicator) が有名である³⁾。一方で、高密度で高精度な位置同定が要求される状況に対して有効であると考えられている手法が、電波や音波の到達時間から距離を逆算する方法 (ToA: Time of Arrival) である。リソースの限られたセンサーネットワークにおける測距技術としては、GPS の様な純粋に電波の到達時間又は到達時間の差から測距を行う方法は、高価な測定機器が必要となり全ノードに適用する事は不経済と考えられ、伝搬速度が電波より十分に遅く比較的安価な測定装置で計測可能な、音波を用いた技術の開発が現在の主流となっている^{4),5)}。

本研究で開発した測距技術も音波を用いた技術であるが、多くの研究とは異なり、超音波ではなく可聴波を用いている。可聴波を用いる理由は、超音波を用いた手法は様々なノイズの影響により 1m 程度の短距離の測距しか出来ないことと、可聴波は超音波と比較して遙かに安価なハードウェアで実装可能なことの2点にある。可聴波を用いることにより、一般的な超音波による測距で用いられるトーンディテクタではなく、ADC を通した波形のサンプリングが可能となるため、ハードウェアではなくソフトウェアによる測距の設計が可能となり、より安価でアップデートが容易な実装が Mica2 上で実現されている。ただし、本研究でセンサノードとして用いた Mica2 の仕様は表-1 に示す通り、計算機としての能力は低く、メモリの消費量及び計算量を如何に少なくするかが肝要となる。

2.1 測距の基本原理

音波を用いた手法では、音波の伝達速度が一定であると仮定することで、音波が発信ノードから受信ノードまで伝達する時間を求め、伝達距離を推定する。音波の伝達時間を正確に測定する為には、言うまでもなく到達時間と発信時間の両方を正確に知る必要がある。発信時間を正確に知る方法としては、発信側のセンサノードと受信側のセンサノードにおける時計を完全に同期させ

表-1 Mica2 の主な仕様

CPU	Amtel ATmega 128L 7.3MHz
RAM	4kB
ROM	128kB (Flash)
ADC sampling rate	28.6kHz

る方法⁷⁾と、電波の伝達速度が音波の約 10^6 倍であるという性質を利用した方法がある。本研究では後者の電波を用いた手法を用いている。つまり、発信ノードは音波と同時に電波を発信し、受信ノードは電波の受信と同時に音波のサンプリングを開始する。そうすることで、受信ノードで得られた波形データ中で、音波が最初に到着した時刻を求めることで伝達時間が推定できる事になる。

音響環境が整備された実験室ではなく、一般的な環境においては様々なノイズにより大きく波形が歪む。以下に雑音の除去方法及び直達波の伝達時間を推定するアルゴリズムの詳細を記す。

2.2 ノイズの除去

一般に音波を用いた測距で問題となる雑音は、交通などにより偶発的に発せられるランダムなノイズと、壁などにより生じる反射波があり (図-2 参照), 屋外では前者が顕著になり, 閉塞された空間では後者が顕著になる。偶発的なノイズは、複数回のサンプリングをスタッキングすることにより除去されることが知られ, S/N 比はスタッキング回数を N として $10 \log(N) \text{dB}$ で改善される。一方、残響は常に同様な波形を生成する為、単純なスタッキングによつては除去できない。サンプリング間隔を十分長く取れば、残響の影響を受けることはないが、一つの測距に要する時間が膨大なものとなる。そこで本研究では、図-3 に示すようにサンプリングの間隔をランダムに設定することで、複数回前のサンプリング時に生じた残響の位相をランダムにずらし、短時間に大量のスタッキングをする事を可能にした。本研究では、約 4 秒間に 64 回のスタッキングを可能にしている。

ADC を通して得られたデータには、上述の音場に生じるノイズの他に、マイクやブザーと言ったアナログ回路が固有に持つ低周波ノイズと、他の電子機器や内部

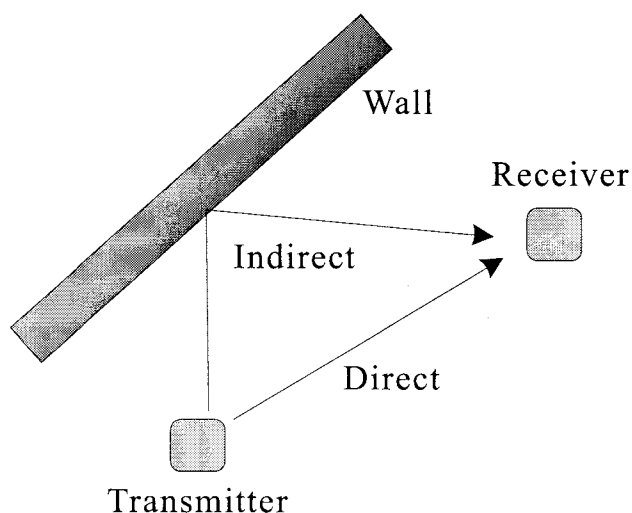


図-2 反射により複数経路発生

クロックにより生じる高周波ノイズを含んでいる。一方、ブザーから発せられる音波は一定の周波数帯域内に存在する。ここでは、FIR バンドパスフィルタにより、スタッキング後の波形データからブザー音と考えられる 4.0kHz から 5.0kHz までの周波数帯域を抽出する事で、更なる S/N 比の向上を試みた。デジタルフィルタは、実際に Mica2 を用いて取得した波形データを用い、最も少ない段数のデジタルフィルタで十分な S/N 比が得られるものを選択した。図-4 が、スタッキング後の波形データであり、顕著な低周波及び高周波のノイズが見受けられる。一方、図-5~7 はそれぞれ 21 段、25 段、35 段のデジタルフィルタを適用した後の波形データであり、21 段のフィルタで十分な S/N 比が実現されていることが分かる。本研究で用いた 21 段のデジタルフィルタの応答関数を図-8 に示す。

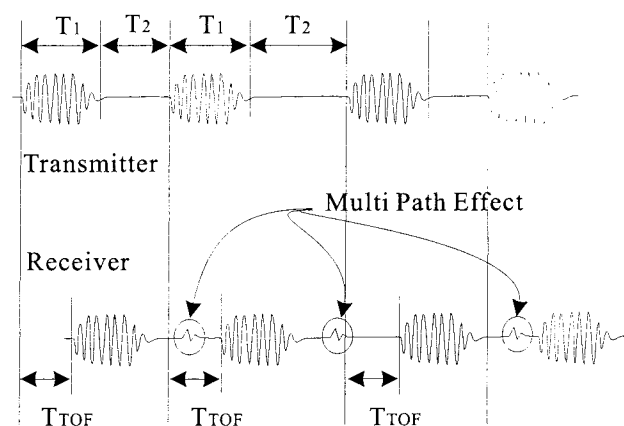


図-3 スタッキングによるノイズの除去: T_1 一定, T_2 ランダム

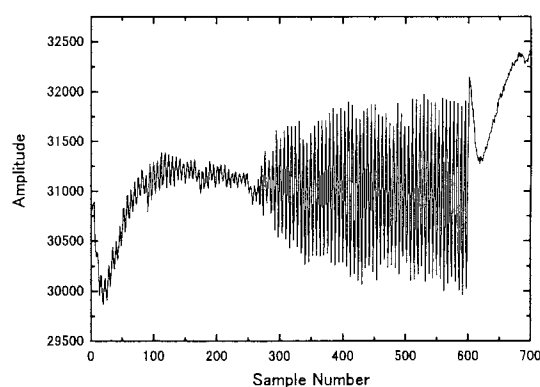


図-4 スタッキング後の波形データ

2.3 最小到達時間抽出

ノード間の距離を正確に測定する為には、図-2 に示すような音波が伝達する複数の経路のうち最短の経路を求める事が重要となる。最短の経路は最短の到達時

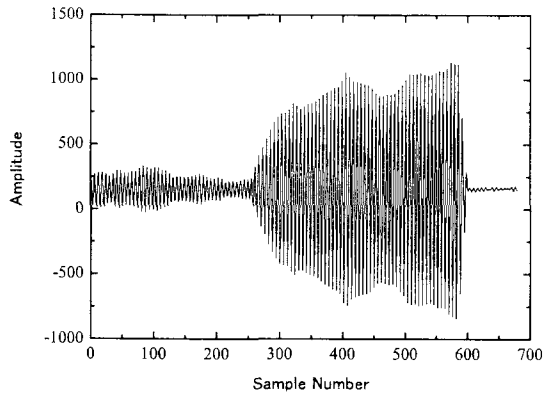


図-5 デジタルフィルタ適用後の波形データ (21 段)

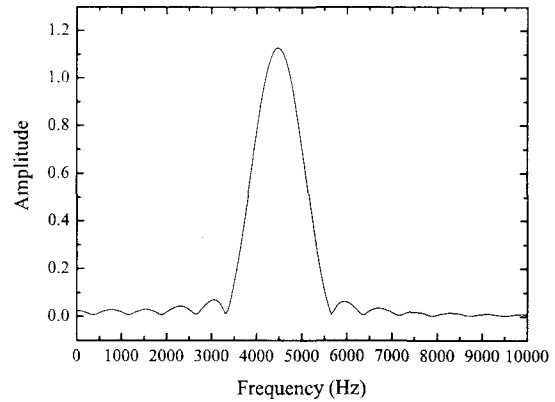


図-8 デジタルフィルタの応答関数 (21 段)

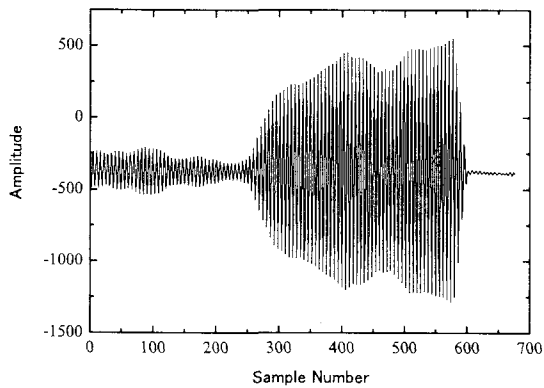


図-6 デジタルフィルタ適用後の波形データ (25 段)

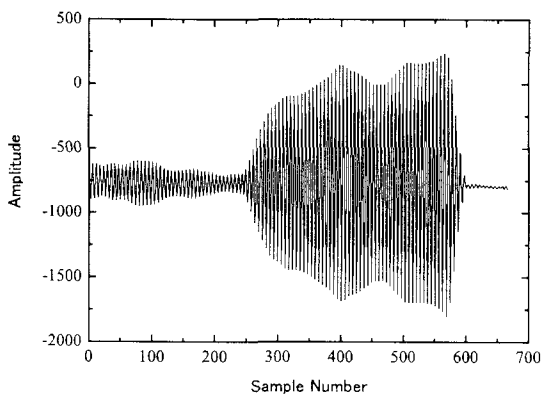


図-7 デジタルフィルタ適用後の波形データ (35 段)

間を意味する為、上記の方法によりノイズを除去した波形データで最初に発生する顕著なピークを導けば良い筈である。しかし、実際にはブザーは自己インピーダンスの影響により、電圧を与えてから最大音量が出力されるまでの時間が存在し、その間は図-5 に見られるよう

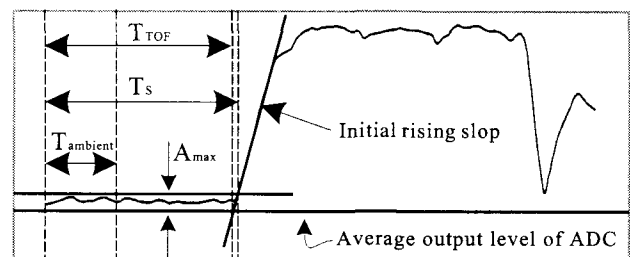
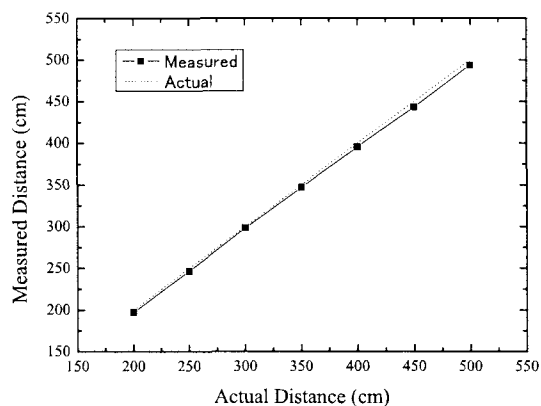


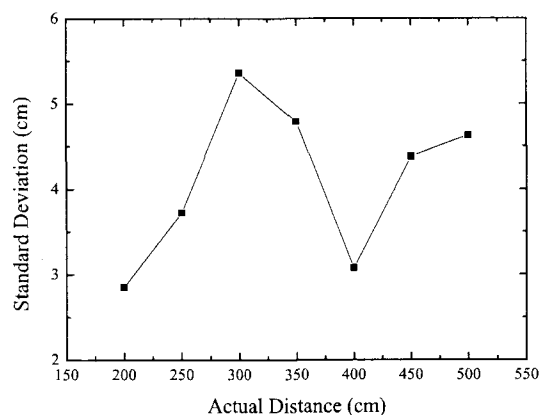
図-9 最短到達時間抽出方法

に振幅がなだらかに増大するため、最初に到達した音波はノイズレベルより小さく検出できない。また、最大音量が出力されるまでの時間は不均一であり、特に低価格のブザーにおいてはその差が顕著になる。そのため、波形データから最短の到達時間を抽出する為には、ブザーの個体差によらないアルゴリズムが不可欠となる。本研究では、全てのブザーで振幅がほぼ線形に立ち上がることを考慮し、以下の手順で最短到達時間の抽出を行う (図-9 参照)：

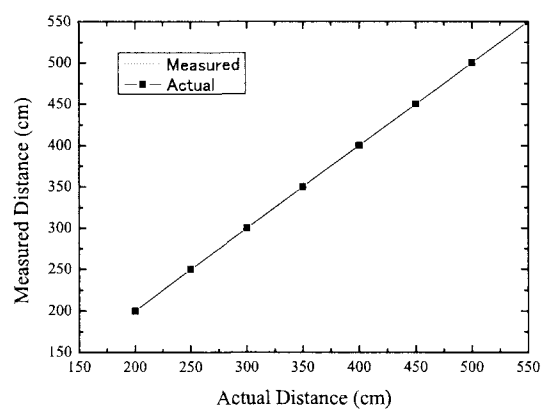
1. フィルター通過後の波形データの極大値抽出
2. 静音時におけるノイズの抽出: サンプリング開始から 40 番目のピークまでを静音領域とし、設置された環境中の最大ノイズレベルを 40 番目までのピーク中の最大値 A_{max} とする。ただし、40 番目のピークは実空間上での距離約 1m に相当する為、この判定基準を用いる限り、1m 以下の測距は考慮できないことになる。
3. ブザー音到達領域の抽出: 連続してピークレベルが A_{max} を超える領域をブザー音到達領域とし、最初に A_{max} を超える時間を T_s とする。
4. 最短到達時間の推定: ADC の平均出力レベルと T_s から始まる振幅の立ち上がりの交点を、最短到達時間 T_{TOF} とする。 T_{TOF} は簡単なカルマンフィルタを用い、 T_s から 20 サンプル過ぎたところを起点として時間を逆方向に推定した。



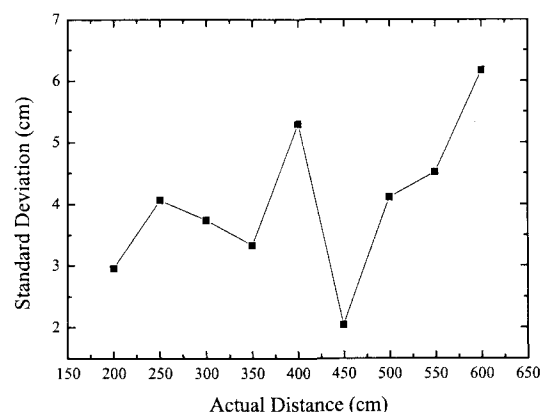
(a) 屋内



(a) 屋内



(b) 屋外



(b) 屋外

図-10 計測値と実際の距離の関係

図-11 計測誤差と実際の距離の関係

3. 精度検証試験

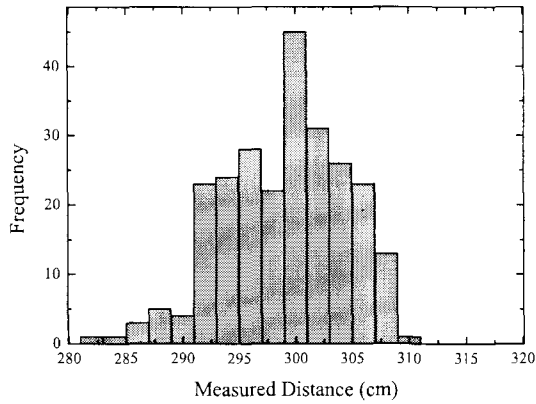
開発された測距技術の精度を検証する為、交通騒音の大きな国道沿いのビルの屋上、及び残響の大きな閉塞された室内、それぞれにおいて検証試験を行った。図-10に本手法で得られた計測値と実際の距離の関係を、図-11に実際の距離と計測誤差の関係を示す。図から明らかなように、いずれの環境下においても、本研究で開発された手法は測定距離5m以下であれば6cm以下の測定誤差で測距が可能であることがわかる。屋外と比較し屋内は環境騒音の影響は少ないが、閉塞空間であることから残響が大きいため、測定距離が3m程度で屋外よりも測定誤差が大きくなっている。図-12及び図-13に測定距離3.0m及び3.5mにおける測定結果のヒストグラムを示す。測定距離3.0mにおいては2.85m付近に、測定距離3.5mにおいては3.65m近傍に誤同定の形跡が見受けられ、いずれも残響の影響を完全には消去できなかった事を示している。

4. Delaunay 分割を用いた相対位置同定アルゴリズム – Inverse Delaunay Algorithm

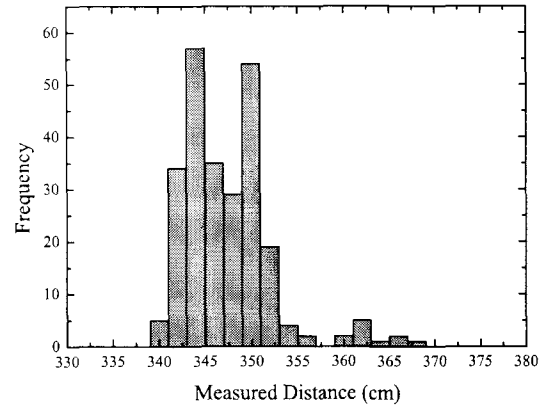
本節では、センサーネットワーク内で計測された個々のセンサーノード間の相対距離の情報のみに基づいて、全てのセンサーノードの位置を同定する(ただし、ネットワーク構成ノード総体としての並進・回転・反転の自由度は残る)ためのアルゴリズム、Inverse Delaunay Algorithm について簡単に説明する。アルゴリズムの詳細説明に入る前に、Delaunay 分割、Delaunay 多角形など、基本となる語句の数学的定義⁸⁾とそれらの特徴⁹⁾を述べる。

実二次元空間($\mathbb{R}^2$)上の有限個の点の集合 $X = \{\mathbf{x}^1, \mathbf{x}^2, \dots, \mathbf{x}^n\}$ と、2点 $\mathbf{x}, \mathbf{y}$ 間の Euclid 距離の定義 $d(\mathbf{x}, \mathbf{y})$ に関して、

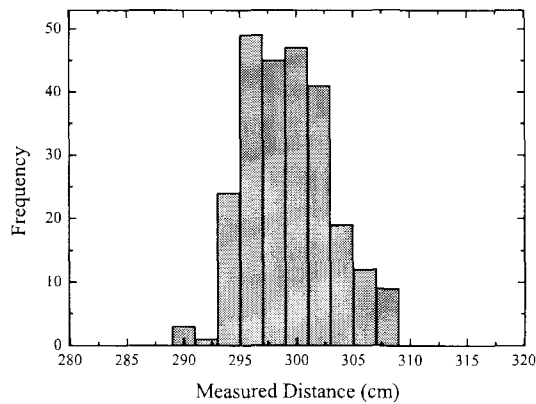
$$V(\mathbf{x}^i) = \{\mathbf{x} \mid \mathbf{x} \in \mathbb{R}^2, d(\mathbf{x}, \mathbf{x}^i) < d(\mathbf{x}, \mathbf{x}^j), j \neq i\} \quad (1)$$



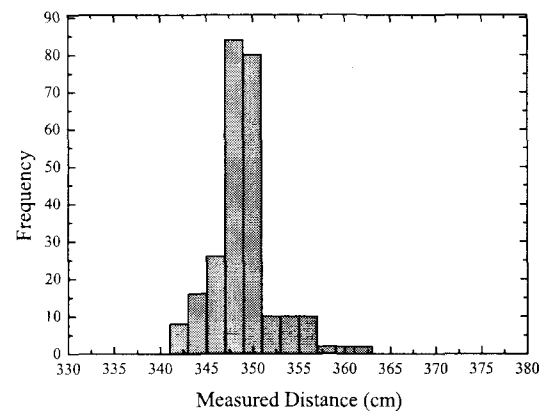
(a) 屋内



(a) 屋内



(b) 屋外



(b) 屋外

図-12 測定値のヒストグラム (測定距離 3.0m)

図-13 測定値のヒストグラム (測定距離 3.5m)

を定義する。このとき、 $V(\mathbf{x}^i)$ は $\mathbf{x}^i$ を内部に含む凸多角形となり、集合 $\{V(\mathbf{x}^1), V(\mathbf{x}^2), \dots, V(\mathbf{x}^n)\}$ は $\mathbb{R}^2$ の空間分割を与える。この空間分割を集合 X に対する Voronoi 分割とよび、 $V(X)$ で表す。集合 X に属する点を $V(X)$ の母点とよび、 $V(\mathbf{x}^i)$ を母点 $\mathbf{x}^i$ の Voronoi 領域とよぶ (図-14 参照)。

一方、 $V(\mathbf{x}^i)$ と $V(\mathbf{x}^j)$ が Voronoi 辺 (Voronoi 多角形の辺) を共有するとき、 $\mathbf{x}^i$ と $\mathbf{x}^j$ を辺で結ぶことにより、Voronoi 分割と共役な領域分割、Delaunay 分割が得られる (図-14 参照)。Delaunay 分割において領域を分割する多角形 (Delaunay 多角形) の頂点と外接円の中心はそれぞれ、Voronoi 分割の母点と Voronoi 多角形の頂点に対応する。

なお、式 (1) の対象空間を $\mathbb{R}^3$ に、Euclid 距離の定義を三次元のものにそれぞれ拡張することにより、実三次元空間 ($\mathbb{R}^3$) 上の有限個の点の集合に対する Voronoi 分割が定義される。このとき、 $V(\mathbf{x}^i)$ は凸多面体に、Voronoi 分割と共役な Delaunay 分割は一般に四面体の集合による分割となる。

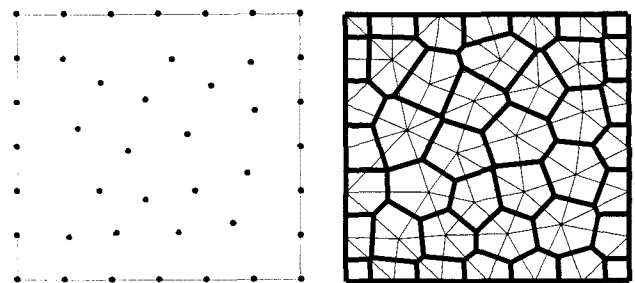


図-14 左: 母点 (位置決めされるべきセンサーノードに対応), 右: Voronoi 分割 (太線) と Delaunay 分割 (細線)

$\mathbb{R}^2$ 上の Delaunay 多角形は一般に三角形となり、それぞれの三角形の外接円の内部には $V(X)$ の母点は存在しない。

Inverse Delaunay Algorithm では、以下に述べるローカル・クラスターの構成に際して、Delaunay 多角形の上記の特徴を用いる。

Inverse Delaunay Algorithm は、

1. ローカル・クラスター (Delaunay クラスター) の作成
2. ローカル・クラスターのつなぎ合わせ

の2つの手続きからなる。以下にそれぞれの手続きの詳細を述べる。なお、簡単のため以下の説明は二次元的に配置された点群の相対位置決定問題を例にとり進めるが、三次元的配置の問題への拡張に概念的困難は伴わない(自明ではあるが具体的コーディングの困難は若干増大する)。

4.1 ローカル・クラスターの作成 - Delaunay クラスター

Inverse Delaunay Algorithm の第一段階として、それぞれの母点を中心とするローカル・クラスター (Delaunay クラスター) を作成する。図-15 に、ローカル・クラスターの例を示す。太線で囲まれた領域がローカル・クラスターである。このローカル・クラスターに対し、二次元のローカルな Euclid 座標系が定義される。この座標系の原点は母点の一つであり、これをローカル・クラスターの中心と呼ぶ。ローカル・クラスターの中心は複数の Delaunay 三角形で囲まれており、これらの Delaunay 三角形を構成する点で母点以外のものをサテライト・ノードと呼ぶ(サテライト・ノードは他のローカル・クラスターの中心でもある)。サテライト・ノードにはローカル座標系における座標が与えられ、その座標に従い、反時計回りに番号が割り当てられる。この番号がローカル・クラスターの面の方向を与える。たとえば、図-15 のサテライト・ノード 1, 2 に対応する点が、隣接するローカル・クラスターで同様の昇順で番号付けされている場合、隣接するローカル・クラスターの面の方向は図-15 のローカル・クラスターの面の方向と反対ということになる。

個々のローカル・クラスターは図-16 に示す手順に従ってクラスターの中心を頂点のひとつとする Delaunay 三角形を順次同定することにより、生成される。

1. 母点の集合からひとつ取り出し、クラスターの中

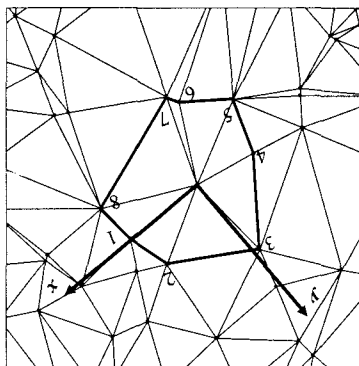


図-15 ローカル・クラスターの例 (ローカル座標系・番号付け)

心点とする(図中の黒丸で示した点)。音響測距によって得られた母点間の相対距離の情報に基づき、クラスターの中心点に最も近い点を同定する。(図-16 (a))

2. 上記の2点と、クラスターの中心点近傍に位置する他の1点からなる三角形が Delaunay 三角形であるか否かを判別する。(図-16 (b) 中の点線で描かれた三角形は外接円の中に他の母点を含むため Delaunay 三角形ではない。従って、ローカル・クラスターの構成要素にはならず、却下される。)
3. Delaunay 判別を通過した三角形の辺のうち、中心点を一端にもつ辺を次の Delaunay 三角形の辺として前のステップと同様の Delaunay 判別を行い、ローカル・クラスターを成長させる。(図-16 (c))
4. 中心点が Delaunay 三角形で取り囲まれたら(注: 中心点が点群の凸包の頂点の場合、Delaunay 三角形で取り囲むことはできないが、中心点を頂点にもつ Delaunay 三角形が最低ひとつ存在すればローカル・クラスターとして成立する。)、サテライト・ノードに番号を割り当てる。図-16 (d) に示した Delaunay クラスターのサテライト・ノードの番号付けは、全体座標系に当てはめられたときには、時計回りに昇順となっている。これは、この Delaunay クラスターの面の方向はグローバル配置の面の方向と反対である、すなわちローカル座標系がグローバル座標系に対して反転していることを示す。(ただし、これはグローバルな位置決めが終わった後で初めて判明することである。)

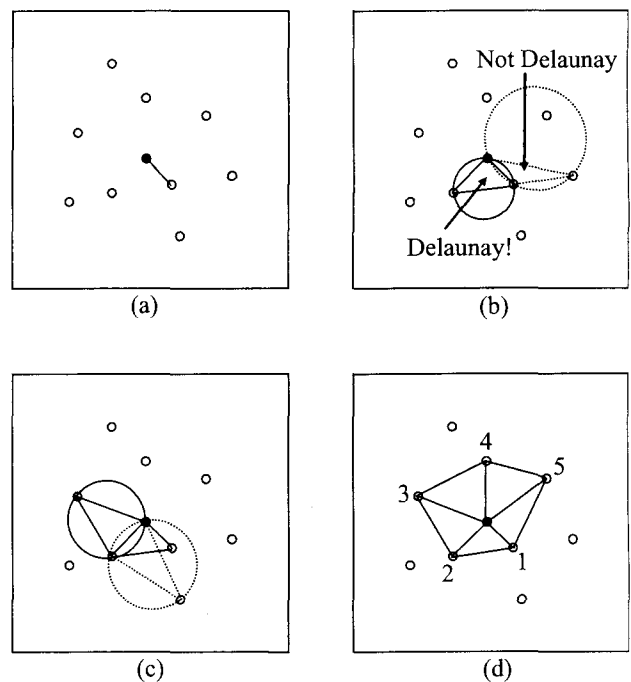


図-16 Delaunay クラスターの生成

4.2 ローカル・クラスターのつなぎ合わせ

全てのノードに対してローカル (Delaunay) クラスターが生成されたら、次はそれぞれのクラスターのノードの対応から、必要な並進・回転・反転を同定し、これらをつなぎ合わせる事となる。ここで課題となるのは計算量の抑制である。以下に示す手続きの計算量は高々 $O(n)$ (n はセンサーノードの数) である。

1. ローカル・クラスターを2つのカテゴリーに分ける。ひとつはアトミック・クラスター (以下, AC), もうひとつは橋渡し (Bridging) クラスター (以下, BC) である。ACはサテライト・ノードを他のクラスターと共有していないクラスター (図-17, 太線で囲まれたクラスター) を指し, BCはその他のクラスターである。現時点でこのアルゴリズムを実装する計算コードでは first-come-first-serve で AC と BC のカテゴリー分けをしているが, Delaunay クラスターの信頼度 (ローカルな測距の信頼度に関する先験情報が得られている場合) や形状 (極端にいびつなものは BC に回して最後まで位置を決めない) に応じたカテゴリー分けも実装可能である。
2. AC (あるいは AC・BC がいくつかつながったグループ) を BC でつなぐ。このとき, 対応するサテライト・ノードの番号付けの順序が同じであれば, つながれるクラスター (またはグループ) の面の方向が互いに逆向きであることを意味する。従って, どちらかのクラスター (またはグループ) を反転させる必要がある。例えば, 図-17 において, AC と BC の対応する辺は AC の中では $1 \rightarrow 2$ と番号がつけられ, BC の中では $2 \rightarrow 3$ と番号がつけられている。どちらも昇順であり, 面の方向が互いに反対である。最終的に, この例では図の右に示すように BC が反転させられる。
3. クラスター (またはグループ) に必要な並進・回転・反転を施し, クラスター (またはグループ) を結合する。
4. 全てのクラスターがひとつのグループに吸収されるまで, 2 番目と 3 番目の手順を繰り返す。

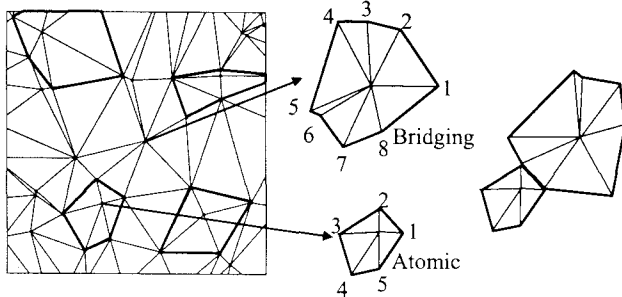


図-17 ローカル・クラスターのつなぎ合わせ

4.3 Inverse Delaunay Algorithm のまとめ

通常の計算幾何の問題では, 座標を与えられた点の集合に対して一意に与えられる空間分割である Delaunay 分割を求めることが目的となる。これに対し, 本研究で提案するアルゴリズムは互いの距離のみを与えられた点の集合の位置を総体の並進・回転・反転の自由度を残して決定することを目的としたものであり, graph realization の範疇に入る問題である。本研究では Delaunay 三角形 (三次元問題の場合四面体) で構成されるローカル・クラスターを用いて位置決めを行うため, 特に Inverse Delaunay Algorithm と名づけた。アルゴリズムの詳細な説明の前に三次元的配置への拡張は概念的困難を伴わないと述べたが, 計算量に関しても, 二次元と三次元に本質的違いはなく, 位置決めに要する全計算量は $O(n)$ に収まる。

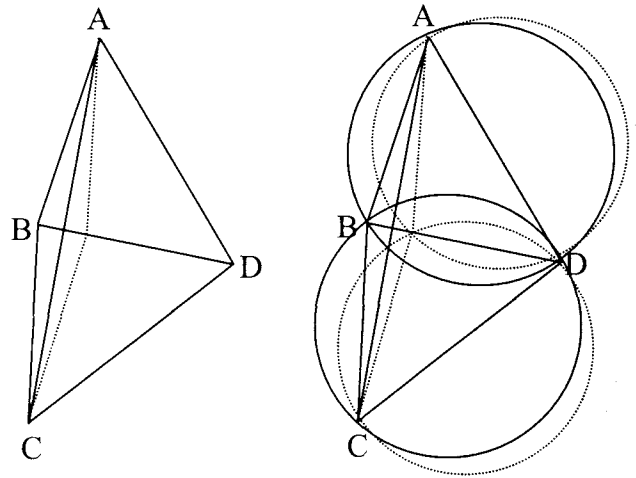


図-18 左: 距離 BD の計測誤差により, 四角形 ABCD の凸性が保証できない, 右: 距離 BD の計測誤差が同じレベルなら Inverse Delaunay Algorithm には問題なし

Inverse Delaunay Algorithm の最大の利点は距離計測の誤差に対するロバスト性の高さである。これを端的にあらわす例として, 図-18 に示す状況を考える。四角形 ABCD は分散型位置決めアルゴリズムで広く用いられている最小単位 (本研究におけるローカル・クラスターに対応) である。このとき, 距離 BD の計測の信頼度が低いと, 図の左側に示すように三角形 ABC が反転し, 四角形 ABCD の凸性が失われる可能性がある。このような反転の曖昧さは分散型位置決めアルゴリズムの最大の誤差要因であり, 四角形 ABCD を最小単位とする位置決めアルゴリズムのほとんどはこの四角形を除外する。結果として, 計測の信頼度の低下に応じて, 位置を確定できないノード数が増大し, アルゴリズムが破綻することが多い。これに対し, 図の右側に示すように, 左側と同程度の距離 BD の計測誤差に対して, Inverse Delaunay Algorithm におけるローカル・

クラスター生成では全く問題は生じない。これは四角形 ABCD の凸性あるいは三角形 ABC の反転の判定条件と比較して、三角形の Dealunay 性の判定条件のほうが広いマージンを持つためと考えられる。

5. 音響測距に基づくセンサーノードの位置決め実験

第2節に述べた音響測距機能を実装したセンサーノード (Mote) を 21 個準備し、これらをほぼランダムに平面上に配置した。それぞれのセンサーノードは、個々の配置に応じて近傍の 4~13 個のノードとの距離を計測した。センサーノード設置の様子と、実験概要図を図-19 に示す。

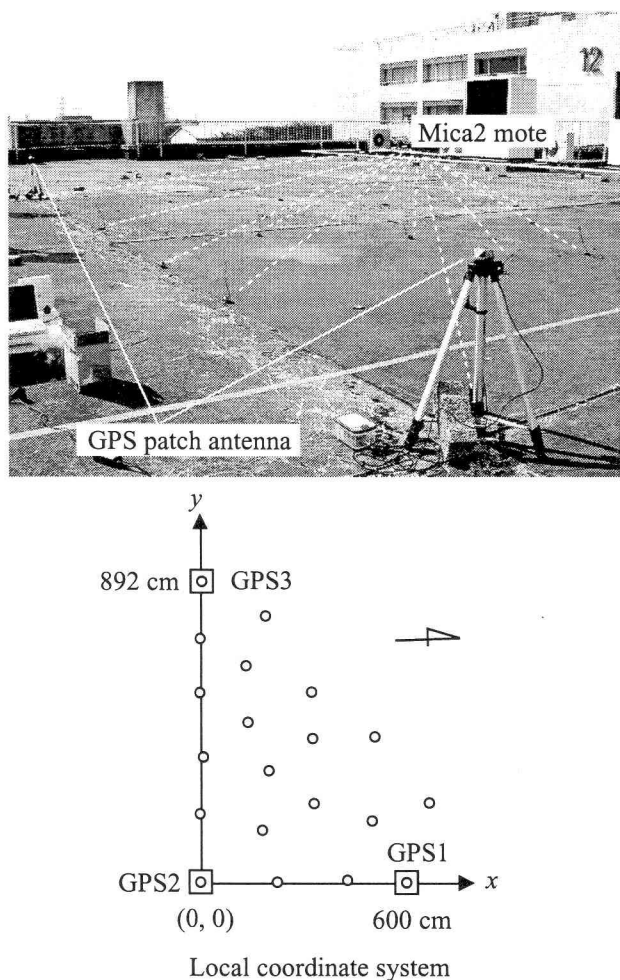


図-19 Schematic view of the deployment of sensor nodes and its photo

計測された距離データを入力として Inverse Delaunay Algorithm に基づく位置決め解析を施した。図-20 にセンサーノードの実際の配置と解析による推定位置との比較を示す。なお、総体としての回転・並進・反転は原点・ x 座標最大・ y 座標最大のそれぞれのノードと

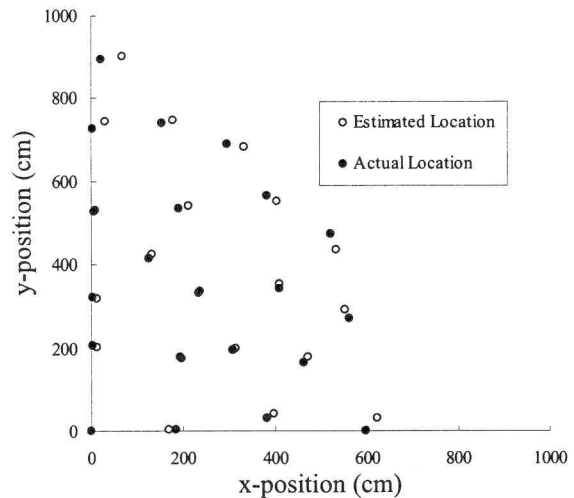


図-20 センサーノードの実際の配置と解析による推定位置との比較

同じ位置に別途配置した GPS 受信解析装置により得られる絶対位置に従い決定した⁶⁾。

実験における音響測距の誤差はノード間の平均距離 321.6cm に対して平均で ± 3.8 cm (最大 16.8cm) であった。このような誤差を含んだ計測に対して、位置決め失敗したノードは存在せず、位置決め誤差は妥当な範囲に収まっている。縁端に位置するノードの位置決め誤差は若干大きい。Laplacian smoothing や spring relaxation といった誤差分配の手法は全く用いられていないことを考えると良好な結果であるといえる。この結果は、ローカル・クラスターの反転や誤差の蓄積といった従来型の位置決め手法で問題となっている誤差要因は本研究で提案する手法では抑えられており、手法のロバスト性が高いということを示唆している。

6. まとめ

本研究では、土木工学・地震工学の問題へのネットワークセンシング技術の適用をにらみ、克服すべき課題、Localization Problem に対して、安価なデバイスを用いた音響測距と分散型位置決めアルゴリズムを組み合わせたシステムの開発を行った。システムの実装がなされ、性能検証実験は良好な結果を与えた。

今後の課題として、

- 位置決めアルゴリズムのロバスト性と、センサーノード数・距離計測精度・センサーの配置などとの関係の (数値シミュレーションによる) 解析
- 三次元的配置に対する実装と検証実験
- 図-1 の階層型システムを用いた土木構造物の現場計測

などが挙げられる。

参考文献

- 1) Hill, J. & Culler, D. (2002), Mica: A Wireless Platform for Deeply Embedded Networks, *IEEE Micro*, 22(6), pp.12-24.
- 2) Moore, D., Leonard, J., Rus, D. & Teller, S. (2004), Robust Distributed Network Localization with Noisy Range Measurements, *Proc. Second ACM SenSys*.
- 3) Bulusu, N., Heidemann, J. & Estrin, D. (2000), GPS-less low cost outdoor localization for very small devices, *IEEE Personal Communications Magazine*, Vol.7, (5), pp.28-34.
- 4) Ward, A., Jones, A. & Hopper, A. (1997), A New Localization Technique for the Active Office, *IEEE Personal Communications Magazine*, Vol.4, (5), pp.42-47.
- 5) Priyantha, N., Chaakraborty, A. & Balakrishnan, H. (2000), The Cricket Location-Support System, *6th ACM International Conference on Mobile Computing and Networking*.
- 6) 佐伯昌之・高坂朋寛・堀宗朗 (2005), 1 周波 GPS 受信機と無線 LAN を用いた多点変位計測システムの開発, 応用力学論文集, Vol.8, *submitted*.
- 7) Elson, J. and Estrin, D. (2001), Time Synchronization for Wireless Sensor Networks, *Proceedings of the 2001 International Parallel and Distributed Processing Symposium (IPDPS)*, San Francisco, California, USA, April.
- 8) 杉原厚吉 (1994), 計算幾何工学, 培風館.
- 9) de Berg, M., van Kreveld, M., Overmars, M. & Schwarzkopf, O. (1997), *Computational Geometry, Algorithms and Applications*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

(2005 年 4 月 15 日 受付)