

無線アドホックネットワークによる 自律的端末位置推定方式とその特性

滝 沢 泰 久[†] デイビス ピーター[†] 岩 井 誠 人^{†††}
川 合 誠^{††} 小 花 貞 夫[†]

微弱電力の無線デバイスが添付された日常の一般的な物品や機器などのアプライアンスにより構成されるユビキタスコンピューティング環境において、人の状況を把握したうえで空間に遍在するアプライアンスを用いてサービスを提供するコンテキストウェアシステムの研究が多く行われている。コンテキストウェアシステムでは、人やアプライアンスの位置は重要なコンテキストであり、その位置情報の取得方式として、主に GPS や定点センシングが用いられている。しかし、GPS は屋内での利用が困難である。また定点センシングは位置が固定化された多量の測位センサにより構成された空間が必要であり、拡張性や柔軟性に欠けている。我々は、この問題点を解決するために、移動体によりアプライアンスを発見し、位置推定を行うパーソナルセンシングを提案している。本論文では、パーソナルセンシングの自己位置推定方式を提案する。さらに、提案位置推定方式は従来の測位方式と比較して少量の固定化された測位センサで高精度な位置推定が可能であることを示す。

An Autonomous Terminal Location Estimation Method Using Wireless Ad-hoc Network and Its Characteristics

YASUHISA TAKIZAWA,[†] PETER DAVIS,[†] HISATO IWAI,^{†††}
MAKOTO KAWAI^{††} and SADAŌ OBANA[†]

In ubiquitous computing environment which is composed of daily goods with attached wireless tag, one of the key issues is the context-aware system which propose services based on human context. In the context-aware system, location information of ubiquitous objects is a very important context. In outdoor environment, we can obtain precise location information using GPS. However, indoor environment usually requires different kind of positioning system because GPS signals are not available. To obtain location information in indoor environment, several indoor positioning systems have been researched. But these systems have problems for scalability and flexibility, because these systems need completely configured space. To solve the problems, we propose a concept, Personal-Sensing which sense and discovery wireless-tags on movement, and estimate self-location. In this paper, we propose self-location estimation method for Personal-Sensing, and the performance characteristics of the proposed self-location estimation method are shown.

1. はじめに

近年の GPS を用いたカーナビゲーションシステムの普及や、携帯電話によるパーソナルナビゲーションサービスの開始などにより、位置情報に基づいたサービス (LBS: Location Based Service) がモバイル市場

へ急速に展開されつつある。たとえば、人、車、ペットなどの位置情報を使用して防犯に関わる各種サービスが提供されている。また、移動通信事業者では、メールで現在の位置情報を地図情報とともに送受信するサービスを提供している。今後は、さらに、多様な LBS が市場に展開されることが予想され、いわゆるロケーションビジネス市場が拡大することが期待されている。しかし、市場の拡大には、利用範囲が屋外や屋外にある設備だけでなく、屋内や室内の設備・機器を対象とすることと、対象物の位置とともにその動的な状態を扱うことが必要不可欠となる。

一方、マイクロデバイスのコスト性能比の向上と無線通信技術の普及により、微弱電力で近接通信を可能と

[†] 株式会社国際電気通信基礎技術研究所
Advanced Telecommunications Research Institute International

^{††} 立命館大学情報理工学部
Faculty of Information Science and Engineering, Ritsumeikan University

^{†††} 同志社大学工学部
Faculty of Engineering, Doshisha University

する無線デジタルデバイス（RFID タグ、Bluetooth、ZigBee など）が小型化・低価格化・高性能化し、多様な使用目的に対応可能になってきている。このような無線デジタルデバイスは、その特徴から、人間の日常活動における身近で多様な物品に添付され、大量に流通することが予想されている。無線デジタルデバイスが、日常生活における一般的な物品に添付されることで、いままでは情報処理の対象になりえなかった多様な物品やそれらが偏在する広範囲な場所が情報処理の対象となりうる環境が構築されつつある。いわゆるユビキタスコンピューティング環境が整備されつつある。このユビキタスコンピューティング環境では、人間本位の情報処理が求められるため、人間と偏在する物品との間の位置関係およびそれらの状態からサービスを構築する LBS の研究や実験が多数行われている。これらの LBS の研究や実験には、センサを完全に配置した自由空間^{6)~8)}を用いて、人や物品の位置と状態を正確に検知し、より緻密でリアルタイムなサービスを提供する高度な LBS が数多く含まれている。しかし、これらの LBS はセンサが十分に配置された空間を必要とするため、その適用範囲は限定的な空間にとどまっている。

人間の活動空間は、その移動により、身近な空間が連続的につながった広範囲で屋内外が混在する多様な空間として考えられる。このような環境において、高度な LBS を展開するとともに、ロケーションビジネス市場の拡大を図るためには、人間が活動する広範囲で多様な空間にわたり、物品や人の位置情報や状態を高精度にセンシングする技術が不可欠となる。しかし、GPS や携帯電話網による位置推定技術は、広域をカバーできるが、屋内での精度の高い位置推定は困難であり、また日常の一般的な物品に適用するのは困難である。一方、屋内における位置推定技術は、屋内に測位センサを配置し、GPS と同様の三辺測量に基づき高精度な位置推定を行う。しかし、測位センサの通信距離が小さいため広域にわたり高い精度の位置情報を得るには、大量のセンサが必要である。また、三辺測量を十分に考慮した測位センサの配置を行う必要がある。したがって、拡張性や柔軟性に欠け、さらに、設備コストおよびその保守コストが高くなる問題点を持つ。

我々は、上記の問題を解決するコンセプトとして、パーソナルセンシングを提案している。パーソナルセンシングは、自己位置推定機能、無線デジタルデバイスを発見/検知する機能、および両機能から位置情報を合成する 3 つの機能から構成される（図 1）。これらの機能を人が所持する携帯情報端末（または移動体）

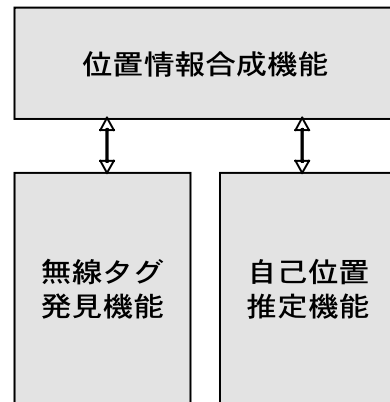


図 1 パーソナルセンシングの構成
Fig. 1 Construction of Personal-Sensing.

に持たせ、移動しながら自動的にモノを発見/検知し、さらに、その場所の自己位置推定を行うことで、モノの位置と状態を取得する新たな測位方式である。

パーソナルセンシングの自己位置推定機能は、固定された測位センサへの依存度を低くするため、パーソナルセンシング端末間の協調により、個々の端末で自己位置を推定する。端末間の通信は無線アドホックネットワークにより実施し、アドホックネットワークの柔軟性と機動性を有効に用いる。本論文では、パーソナルセンシングの自己位置推定方式を提案する。さらに、提案方式が従来測位方式と比較して少量の測位センサで高精度な位置推定が可能であることを示す。以下、2 章でパーソナルセンシングの自己位置推定機能の構成を概説し、その主要部分である組織化測位のアルゴリズムについて述べる。さらに、3 章で組織化測位のシミュレーション評価から提案方式の性能特性と有効性を示す。

2. パーソナルセンシングの自己位置推定機能

本章では、パーソナルセンシングの自己位置推定機能の構成について述べる。

2.1 自己位置推定機能の構成

自己位置推定機能は、

- 端末自己位置単独測位機能
- 端末間測距機能
- 端末間組織化測位機能

から構成される（図 2）。端末自己位置単独測位機能は、たとえば GPS などの機能により端末の位置を測位する機能である。単独測位での位置には多くのエラーが含まれていると想定する。この機能はオプションで省略可能である。端末間測距機能は、端末間の距離を測定する機能である。この機能は、TOA（Time

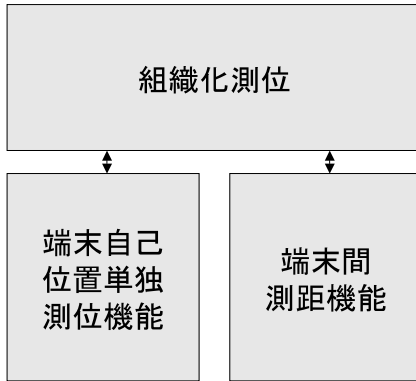


図 2 自己位置推定機能の構成

Fig. 2 Construction of self-location estimation function.

Of Arrival), TDOA (Time Deference Of Arrival), RTOF (Roundtrip Time Of Flight) などの測距機能を想定する。端末間組織化測位機能は、自己位置が未知またはエラーを含む位置情報を持つ多数の移動可能な端末（以降、ノード）と位置が固定され、自己位置が既知である少数の端末（以降、アンカノード）から構成されるネットワークを想定する。各ノードは自己位置単独測位機能から位置情報（この機能がない場合は適当な自己位置を生成する）を取得し、これを仮の自己位置とする。この仮の自己位置とネットワーク内におけるノード識別子を仮位置情報として、近傍ノードへ送信する。近傍ノードは、直接通信できるノードである。したがって、仮位置情報の近傍ノードへの送信は、最大ホップ数 1 のブロードキャストにより実施される。各ノードおよびアンカノードはこの通信を定期的実施する。ノードは近傍ノードからの仮位置情報を受信した場合、その仮位置情報と端末間測距機能による該当近傍ノードとの距離により仮の自己位置を修正する。修正した自己位置は、定期的実施される仮位置情報の配信により近傍ノードへ送られる。すなわち、ノード間およびアンカノードとの通信は、互いの位置推定状況に依存しないステートレスな通信であり、自己位置修正処理は各ノードごとに非同期/独立に行われる。このような通信と処理を再帰的に行うことにより、単独測位機能によるエラーを含む位置情報を修正しその精度を高め、また、アンカノードと直接通信ができない端末においても、近傍ノードとの距離制約からネットワークポロジを再現させ、自己位置を推定可能とする。

2.2 組織化測位

組織化測位は、2.1 節で述べたノードおよびアンカノード間の通信により得られる近傍ノードの仮位置情

報と距離による多重制約を自己組織化マップ (SOM: Self-Organizing Maps) を用いて解き、自己位置を推定する。

SOM は、Kohonen¹⁾ によって提案されて以来、高次元データの低次元化に変換する機能を利用して、各種研究が行われている。ネットワークポロジの再現への SOM の適用として、Bonabeau らにより定式化された手法^{2),3)} がある。我々は、Bonabeau らの手法をもとに、アドホックネットワークへ応用した方式^{4),5)} を提案している。しかし、これらの提案方式（以降、旧提案方式）は、

- 位置を推定するために無線の通信可能距離が一律に一定であることを前提としていること、
- 方式 4) は制御局での処理を前提とした集中型の処理であるため、アドホックネットワークには適さない。方式 5) は方式 4) を無線アドホックネットワーク環境における分散環境に適用するように改良した方式であるが、各ノードの自己位置推定処理において、1 回の修正処理ごとに全近傍ノードからの仮位置情報が必要とするため、ノード間通信量が増え、大きな処理遅延が発生すること、
- 現実的な無線通信を前提とするため、位置推定処理において行われる無線通信から動的に計測される（無線通信に依存したエラーを含む）ノード間の距離を用いること、
- 各ノードにおける自己位置修正処理の処理単位に必要なデータを任意の単一ノードからの仮位置情報とすることで、ノード間通信の遅延を抑制すること、

のために、旧提案方式のアルゴリズムを全面的に改修した。以下、Bonabeau らの SOM による手法^{2),3)} について説明し、その後、提案する組織化測位にアルゴリズムについて説明する。

2.2.1 SOM アルゴリズム

Bonabeau らのアルゴリズムを SOM アルゴリズムとして概説する。

$G = (V, E)$ を n 個のノード集合 $V = \{v_i | i = 1, \dots, n\}$ とエッジの集合 E を有する無向グラフとする。ノード i には各要素に 0 以上 1 以下である位置ベクトル $w_i \in R^2$ 、ノード i とノード j とのリンク $e_{ij} \in E$ はスカラーの重み ($0 \leq e_{ij} \leq 1$) が割り当てられる。ただし、 R は実数集合である。ノード i に接続しているノード集合をノード i の 1 次近傍集合という。SOM アルゴリズムは、このような SOM ネット

ワークグラフの各ノードの位置ベクトルを、繰り返し入力される実際のネットワークグラフの特性を表すベクトル(以降、入力ベクトル)を用いて更新し、SOM ネットワークグラフに実際のネットワークを再現する。以下、その手順を説明する。

[Step. 1] 一様分布に従って、入力ベクトル m を選択する。

[Step. 2] 入力ベクトル m にユークリッド距離において最も近いノードを選択し、これを勝者ベクトル w_{im} と呼ぶ。

[Step. 3] 勝者ベクトル w_{im} を入力ベクトル m へ近づけるため、次のように更新する。

$$w_{im}(t+1) = w_{im}(t) + \alpha(t) \cdot (m - w_{im}(t)) \quad (1)$$

[Step. 4] 勝者ベクトル w_{im} の近傍集合に含まれるノード j を入力ベクトルに近づけるため、次のように更新する。

$$w_j(t) = w_j(t) + e_{ij} \cdot f(t) \cdot \alpha(t) \cdot (m - w_j(t)) \quad (2)$$

$\alpha(t)$ は学習関数、 $f(t)$ は近傍関数でそれぞれ次のように定義する。

$$\alpha(t) = \frac{\alpha_0 \cdot T}{\eta \cdot m + T} \quad (3)$$

$$f(t) = \left[\frac{f_0 \cdot (T - \xi \cdot t)}{T} \right]^{-1} \quad (4)$$

ただし、 α_0 は学習関数の初期値、 η は学習関数の調整パラメータ、 f_0 は近傍関数の初期値、 ξ は近傍関数の調整パラメータ、 T は総繰返し回数である。

以上の手順を繰り返し実施し、SOM ネットワークの各ノードを用いて入力ベクトルにより構成されるネットワークのトポロジを再現する。

2.2.2 組織化測位のアルゴリズム

提案する組織化測位のアルゴリズムは、ノード間の距離を有効に用いるため、次の2つの戦略でネットワークのトポロジを再現する。

- (1) 修正処理の初期段階ではホップ数が2以内のノード(比較的広範囲のノード、すなわち近傍関数の値が大きい)からの仮位置情報から修正処理を行う。修正処理はノード間の距離関係を強調して処理し、ノード間の距離特徴を優先してトポロジ形成する。
- (2) 初期段階から移行し、ホップ数が1のノード(近傍ノードに絞る、すなわち近傍関数の値を小さくする)からの仮位置情報から修正処理を行う。修正処理では、局所最適に近傍ノード間の距離誤差の最小化を図り、トポロジの形を整える。

また、修正処理の処理単位に必要な仮位置情報を任意の単一ノードからの仮位置情報とするために、勝者ベクトルと入力ベクトルを次のように選択および取得する。

- ネットワークトポロジの特性を示す入力ベクトルは、近傍ノードとの通信により取得した近傍ノードの仮位置情報と距離および自己位置の相関から動的に生成する。
- 勝者ベクトルは、近傍ノードから仮位置情報を受信したノードとする。

このような方針に基づく提案アルゴリズムを、SOM アルゴリズムと比較して、以下に説明する。ここでは、無線通信に依存したエラーとして、ノード間の距離の計測誤差は真値を0とする正規分布^{(13),(14)}と仮定する。

[Step. 1] 各ノードにおいて、自己位置単独測位機能から自己位置を取得する。この機能がない場合は、ランダムに自己位置を生成する。この自己位置を仮の自己位置 $w_i(t)$ の初期値とし、これを含む仮位置情報を近傍ノードへ配信する。 t は修正回数であり、仮の自己位置の初期値では $t = 0$ である。

[Step. 2] 近傍ノード j から仮位置情報を受信したノード i 、すなわち勝者ベクトルであるノード i は、端末間測距機能から近傍ノード j との距離 $d_{ij}(t)$ を取得する。近傍ノード j の仮位置 $w_j(t)$ 、その距離 $d_{ij}(t)$ により推定されるノード i の位置を入力ベクトル $m_i(t)$ とし、ノード i の仮の自己位置を入力ベクトル $m_i(t)$ に近づける。すなわち、ノード i の仮の自己位置と入力ベクトル $m_i(t)$ の距離 $|m_i(t) - w_i(t)|$ を最小となるような修正ベクトル $v_i^{\{1\}}(t)$ を生成する(図3)。

$$v_i^{\{1\}}(t) = \frac{d_{ij}(t) - |w_i(t) - w_j(t)|}{|w_i(t) - w_j(t)|} (w_i(t) - w_j(t)) \quad (5)$$

以上が、SOM アルゴリズムの Step. 1~3 の処理に相当する。さらに、SOM アルゴリズムの Step. 4 に相当する処理を以下に行う。

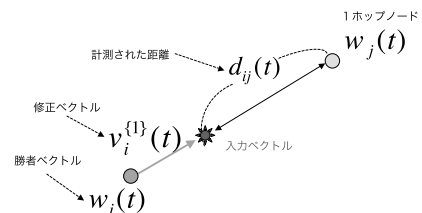


図3 近傍ノードによる入力ベクトルと修正ベクトル
Fig. 3 Input vector and victory vector by neighbor node.

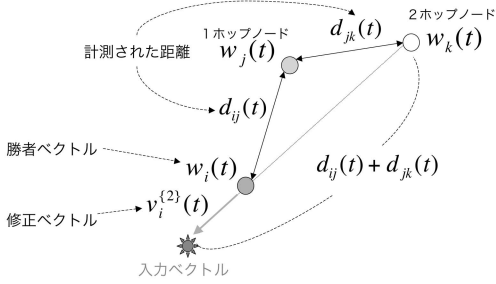


図 4 2 次近傍ノードによる入力ベクトルと修正ベクトル

Fig. 4 Input vector and victory vector by neighbor node 1.

修正処理の初期段階（繰返し回数が少ない）場合、近傍ノード j の近傍ノード集合のうち、ノード i から 2 ホップであるノード（以降、2 次近傍ノード）の仮位置と距離により推定される位置を入力ベクトルとする。入力ベクトルは距離を強調した（ノード間距離の計測誤差は真値を 0 とする正規分布と仮定しているので、2 次近傍ノードが近傍ノードより遠くなる確率が高い。したがって、近傍ノードより遠くなる確率の高い 2 次近傍ノードはより遠くなるように修正する。すなわち、精度より距離特性を優先させてトポロジの特徴を形成する）ベクトルとするため、ノード i と 2 次近傍ノード k との距離をノード i と近傍ノード j との距離 $d_{ij}(t)$ と近傍ノード j と 2 次近傍ノード k との距離 $d_{jk}(t)$ との和とする。ノード i の仮位置をこの入力ベクトルに近づけるため、次のような修正ベクトル（図 4）を生成する。

$$V_i^{\{2\}}(t) = \frac{d_{ij}(t) + d_{jk}(t) - |w_i(t) - w_k(t)|}{|w_i(t) - w_k(t)|} (w_i(t) - w_k(t)) \quad (6)$$

また、式 (5), (6) による修正を実施したうえで、2 次近傍ノード k が近傍ノード j より近い（距離制約で矛盾がある）場合、すなわち、 $|w_i(t) - w_j(t)| \geq |w_i(t) - w_k(t)|$ の場合、式 (6) 修正ベクトルの方向が誤っていると判断し、ノード i へのベクトル方向から近傍ノード j へのベクトル方向に変更し、次のような修正ベクトルを生成する（図 5）。

$$V_i^{\{2\}}(t) = w_j(t) - w_i(t) + \frac{d_{ij}(t)}{d_{jk}(t)} (w_j(t) - w_k(t)) \quad (7)$$

以上に述べた SOM アルゴリズム Step. 1~4 に相当する修正ベクトル $V_i^{\{1\}}(t)$ と $V_i^{\{2\}}(t)$ から、次の

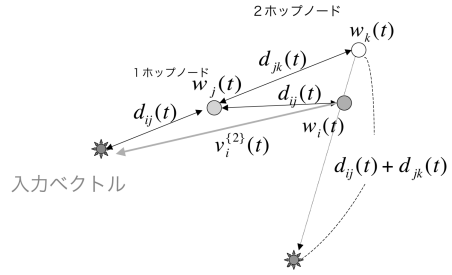


図 5 2 次近傍ノードによる入力ベクトルと修正ベクトル 2

Fig. 5 Input vector and victory vector by neighbor node 2.

ように仮の自己位置を修正し、更新する。

$$w_i(t+1) = \begin{cases} w_i(t) + \alpha_i(t) \cdot \left(V_i^{\{1\}}(t) + \sum_k V_k^{\{2\}}(t) \right) & t \leq \tau \\ w_i(t) + \alpha_i(t) \cdot V_i^{\{1\}}(t) & t > \tau \end{cases} \quad (8)$$

上式の τ は修正処理を距離特性を優先したトポロジ形成から局所最適によるトポロジの形を整える段階へ移行する繰返し回数のしきい値である。また、 $\alpha_i(t)$ は t 回目の修正時のノード i の学習関数であり、次のようになる。

$$\alpha_i(t) = \begin{cases} -1 & \theta \geq E_i(t) - E_i(t-1) \\ \eta \cdot |\alpha_i(t-1)| & \text{otherwise} \end{cases} \quad (9)$$

$$E_i(t) = \sqrt{\frac{1}{N_i(t)} \sum_{j=1}^{N_i(t)} (d_{ij}(t) - |w_i(t) - w_j(t)|)^2} \quad (10)$$

ただし、 $E_i(t)$ は t 回目の修正時のノード i の近傍ノードとの距離平均誤差、 $N_i(t)$ はノード i の t 回目修正時における近傍ノード数、 θ は近傍ノードとの距離平均誤差に関するしきい値（以降、誤差しきい値）、 η は減衰定数である。減衰定数 η は $0 < \eta < 1$ の正の整数である。

式 (8) から分かるように、近傍関数は繰返し回数しきい値 τ による単純なステップ関数とする。近傍関数は凹型の関数である場合、アルゴリズムが収束することが知られているが¹⁰⁾、このステップ関数はそれを満たしている。

提案アルゴリズムの評価関数として、式 (10) を用いるが、本来、SOM アルゴリズムは最適解を得られる



図 6 評価関数における勾配上昇の効果

Fig. 6 Effect of gradient ascent for evaluation function.

保証がないため局所解に至る可能性（勾配降下と同様）がある．局所解から脱出手法は，GA，SA などいくつかの手法があるが，いずれも分散環境/アドホックネットワーク環境に適用するにはノード間をまたがる制御が必要となり，ノード間通信が増加する．したがって，提案方式ではノード内に閉じ，ノード間通信が不必要である方式¹⁵⁾として，式(8)の学習関数 $\alpha_i(t)$ により勾配を上昇する効果により提供する．すなわち，学習関数の式(9)において上段の式により近傍ノードとの距離誤差が修正/更新処理により改善されない（誤差しきい値を超える）場合，アルゴリズムが局所解に至っている，または誤った方向に処理が進んでいると判断し，修正ベクトルを距離として反転させるため逆方向へ向けて，勾配を上昇させて，局所解から抜け出す可能性を高める効果を持たせる（図6の評価関数を参照）．さらに，式(9)の上段では，その効果を高めるため，学習関数を大きな絶対量として多くの入力を受け入れるようにする．

[Step. 3] 前回の近傍ノードへの仮位置情報配信から一定時間が経過している場合，修正された仮の自己位置を含む仮位置情報を近傍ノードへ配信する．この情報を受信した近傍ノードが [Step. 2] を実施する．

以上により，[Step. 2] と [Step. 3] を繰り返し，ノード間で通信と仮の自己位置修正処理を再帰的かつ非同期に行うことにより，各ノードにおいて正規分布の計測誤差を持つノード間距離から，より評価関数を最小化する確率の高い自己位置を推定する．

2.2.3 通信モデル

アンカノードを含むノード間の通信により送信される仮位置情報は，次のデータから構成される．

- 自己の仮位置（アンカノードの場合は固定の自己位置）とノード識別子
- 近傍ノードとの通信により取得した近傍ノードの仮位置
- 近傍ノードとの通信により計測した近傍ノードとの距離
- 上記近傍ノードのノード識別子

近傍ノードの仮位置と距離は近傍ノード数分の複数のデータが仮位置情報に含まれる．

また，アンカノードを含むノード間の通信は，定期

的に仮位置情報を最大ホップ数 1 のブロードキャストにより近傍ノードへ配信する．この情報を受信したノードは自己の仮位置の修正処理を実施する．すなわち，近傍ノードの処理状況にかかわらず，各ノードは仮自己位置の修正に応じて単独で仮位置情報を定期的に配信するだけの通信モデルである．したがって，ステートレスの通信であり，通信制御に関わるコストは非常に軽微である．

3. シミュレーション評価と性能特性

前章で述べた組織化測位の測位精度に関してシミュレーション評価を行った．本章では，その結果とそれによる組織化測位の性能特性について議論する．

3.1 評価方法

シミュレーションを実施するにあたり，ネットワーク空間を 1.0×1.0 の平面として定義し，この空間にノードおよびアンカノードをランダムに配置したネットワークポロジを定義する．また，端末間測距機能により得られる距離データはエラーを含むが，本論文では計測エラーを対象とし，NLOS (Non-Line-of-Sight, 直線見通しがない環境において直接波ではなく反射波を受信することにより発生する誤差) エラー^{11),12)} は含まないものとする．計測エラーは前述のように真値を 0 とする正規分布とする．単独測位機能はなしとし，仮の自己位置の初期値はランダムな値とする．ノードが修正した仮の自己位置を近傍ノードへ配信する間隔は，すべての近傍ノードと通信して仮の自己位置の修正を行ったたびごととする．これを 1 サイクルとし，各ノードごとに 300 サイクル行った．

また，提案方式の比較評価対象として，距離により位置推定を行う三辺測量を用いた．比較評価に用いた三辺測量は電子航法研究所 (ENRI) で公開されているプログラム⁹⁾ を利用した．三辺測量のアンカノードの配置は，各ノードから 3 つのアンカノードと通信可能であるケース（図 7 の triangulation-1, 1 辺の長さを通信距離とする正三角形の頂点にアンカノードを配置したパターン，以降三辺測量 1）と 4 つのアンカノードと通信できるケース（図 8 の triangulation-2, 対角線の長さを通信距離とする正四角形の頂点にアンカノードを配置したパターン，以降三辺測量 2）の 2 つの配置を準備した．また，各ノードにおいて三辺測量による測位処理を 50 回試行し，各試行により得られた位置の重心を自己の推定位置とした．

提案方式，三辺測量のいずれの方式も，その精度は位置推定対象ノードの位置に依存する（提案方式の場合は，アドホックネットワークのノード数，ノード密

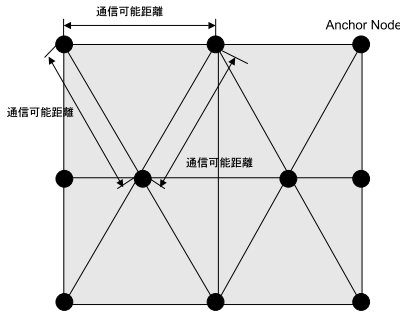


図 7 三辺測量 1 のアンカノード配置

Fig. 7 Anchor node position of triangulation-1.

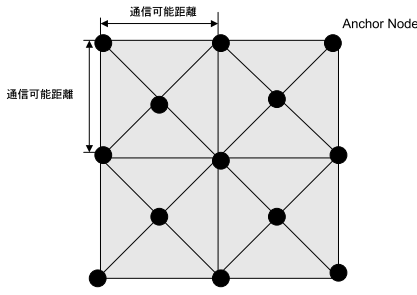


図 8 三辺測量 2 のアンカノード配置

Fig. 8 Anchor node position of triangulation-2.

表 1 シミュレーション調整パラメータ

Table 1 Simulation parameter.

繰返し回数しきい値 τ	50
誤差しきい値 θ	0.01
減衰定数 η	0.99

度、トポロジに依存し、三辺測量の場合はアンカノードからの位置関係に依存する)。そのため、繰返し回数は最適でなく、精度が収束するに十分に大きな値とした。また、三辺測量の繰返し回数を 50 回としたのは、それ以上の繰返し回数では精度の改善がないためである。

位置推定精度の評価関数としては、推定した自己位置と実際のノード位置のユークリッド距離の差の総和として、次のように定義し、位置推定誤差と呼ぶ。

$$Err_{ave} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |W_i - w_i(t)|^2} \quad (11)$$

ただし、 N はノード数、 W_i はノード i の実際の位置である。

また、シミュレーションの各調整パラメータは表 1 に示す値を用いた。

3.2 ネットワークノード数と位置推定精度

本節では、位置推定誤差とネットワークノード数の相関について述べる。

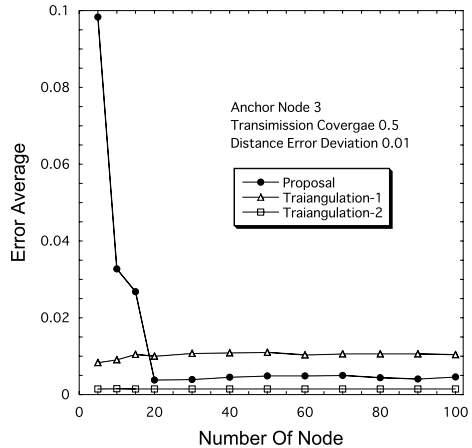


図 9 ノード数に応じた位置推定誤差

Fig. 9 Location estimation error on number of node.

図 9 に、アンカノード数 3、通信可能距離 0.5、ノード間距離の誤差偏差 0.01 の評価条件でのネットワークノード数による位置推定誤差を示す。ただし、三辺測量 1 はアンカノード数が 14 (図 7 の配置パターンを 1×1 の空間に埋め込むと、上から図 7 の 1 列目、2 列目、3 列目と配置すると、4 列目が必要となる。4 列目は 2 列目と同じパターンの配置となるので、 $3 + 4 + 3 + 4 = 14$)、三辺測量 2 はアンカノード数が 17 (図 8 のパターンでは 4 点のアンカノードと通信できない領域が、 1×1 の正四角形の頂点と頂点を共有する 8 つの三角形の領域となり、この三角形において、辺を共有している 4 つの組ごとに、接する辺上にアンカノードを配置すれば、4 点のアンカノードと通信可能となるため、 $13 + 4 = 17$) となる。

各ネットワークノード数ごとに各ノードをランダムに配置した 50 通りのネットワークトポロジに関してシミュレーションを実施し、その位置推定誤差の平均値 (図 9 の Error Average, 以降、推定平均誤差) をプロットした。図から分かるように、提案方式の推定平均誤差 (図中の黒丸) はネットワークノード数が少ない場合精度が低い。これは近傍ノード数が少なく、距離制約が不十分であるため正しいトポロジを再現することができないためである。ネットワークトポロジとしては線状、環状、複数の部分に分離した形態であった。しかし、ノード数が増えるに従い、急速に精度が向上する。ネットワークノード数が 20 を超える (平均近傍ノード数 10.4) と三辺測量 1 (図中の白三角) より高い精度を示す。三角測量 1 はネットワークノード数が増えると、精度がごくわずかであるが劣化する。これは、アンカノードに非常に近い位置にノードがある場合、3 つのアンカノードと通信可能ではあるが、

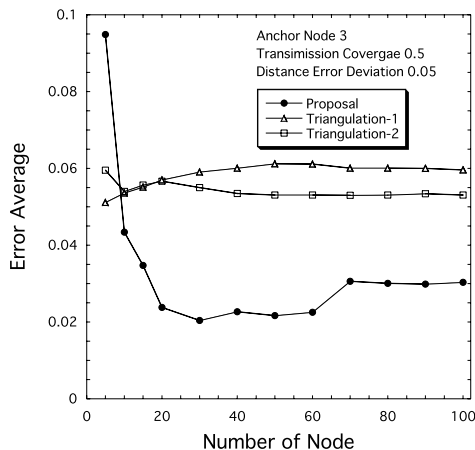


図 10 ノード数に応じた位置推定誤差 (2)

Fig. 10 Location estimation error on number of node (2).

非常に近いアンカノードの距離が 0 に近づくため大きな計算誤差となるか、または測位不能となる (誤差が非常に大きい場合、および測位不能の場合は通信可能なアンカノードの重心を推定位置とした。そのため図中ではその影響が表面化していない)。ノード数が増えると、アンカノードに近いノードが現れる可能性が高まり、精度劣化となる。一方、三角測量 2 (図中の白四角) は、前述のような状況が発生しても、その他 3 つのアンカノードの距離により高い精度の位置を算出できる。したがって、三角測量 2 は、三角測量 1 より精度が高く、またノード数が多いネットワークにおいても提案方式より高い精度を示す。しかし、提案方式はアンカノード数 3 であり、三辺測量 1 のアンカノード数の約 21%、三辺測量 2 のアンカノード数の約 18% で三辺測量 1 より高く、三辺測量 2 に近い精度を実現する。

次にノード間の距離誤差偏差を 0.05 とし、その他は同じ条件における各方式の位置推定誤差を図 10 に示す。図から分かるように、ネットワークノード数が 5 以外のネットワークにおいて提案方式は三辺測量 1 および三辺測量 2 より高い精度を示す。三辺測量 1 および 2 は、距離誤差偏差が 0.05 では約 20% 程度が測位不能または非常に大きな誤差を算出する。一方、提案方式は測位不能になることなく、また十分なネットワークノード数 (ネットワークノード数が 10 以上、平均近傍ノード数が 6 以上) である場合、距離誤差が 0.05 (約 ± 0.15 の誤差) においても、平均誤算が約 0.03 で位置推定が可能である。

以上のことから、提案方式は近傍ノード数が 10 以上であるネットワーク規模である場合、三辺測量 1 および 2 と比較して、少量のアンカノード数 (三辺測量

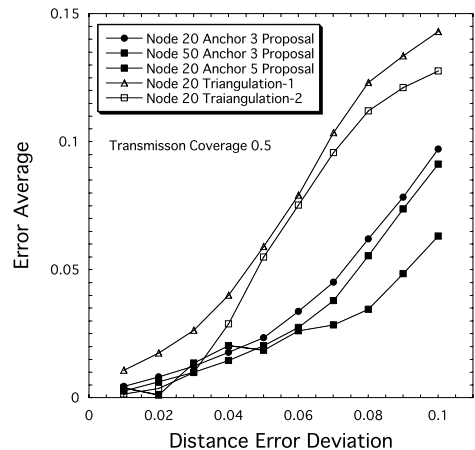


図 11 ノード間距離誤差偏差に応じた位置推定誤差

Fig. 11 Location estimation error on inter-node distance error deviation.

1 の 30%、三辺測量 2 の約 17%) で同等またはそれ以上の精度で位置推定可能である。

3.3 距離誤差偏差と位置推定精度

本節では、位置推定誤差と距離誤差偏差の相関について述べる。

図 11 は、通信可能距離 0.5 において、ノード数とアンカノード数が、それぞれ、50/6、50/3、20/3 の 3 つのネットワークにおける提案方式のノード間距離の誤差偏差に応じた推定平均誤差、およびノード数 20 の三辺測量 1 および 2 のノード間距離の誤差偏差に応じた推定平均誤差を示す。

この図から分かるように、いずれの方式も距離誤差偏差が大きくなる (大きな距離誤差が発生する可能性が高くなる) と推定平均誤差も大きくなる。しかし、提案方式は三辺測量 1 および 2 と比較して、距離誤差偏差が大きくなっても、推定平均誤差の劣化は低く抑えられている。三辺測量 1 および 2 では、距離誤差偏差が大きくなるに従い、測位不能となるノードが急増する。距離誤差偏差が 0.04 で約 10%、0.07 で約 50%、0.1 で約 80% のノードが測位不能となり、距離誤差偏差が 0.07 以上では三辺測量はほぼ機能しない結果となった。一方、提案方式は測定に用いたいずれの距離誤差偏差においても、収束し、良好な精度を提供する。

以上のことから、提案方式は、三辺測量 1 および 2 が測位困難である大きなエラーを含む距離においても、少量のアンカノードで良好な精度の位置推定が可能である。

3.4 アンカノード数と位置推定精度

本節では、位置推定誤差とアンカノード数の相関に

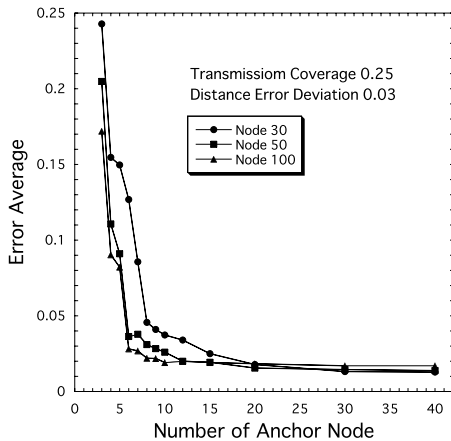


図 12 アンカノード数に応じた位置推定誤差

Fig. 12 Location estimation error on number of anchor node.

表 2 三辺測量 1 と 2 の推定平均誤差

Table 2 Error average of triangulation-1 and 2.

	三辺測量 1	三辺測量 2
ノード数 30	0.0398	0.0345
ノード数 50	0.0402	0.0351
ノード数 100	0.0415	0.0362

通信可能距離 : 0.25

距離誤差偏差 : 0.03

ついて述べる。

図 12 に、ノード数が 30, 50, 100 のネットワークにおけるアンカノード数に応じた推定平均誤差を示す。ノード間距離の誤差偏差 (Distance Error Deviation) 0.03 とし、また通信可能距離は 0.25 とした。

図から分かるように、提案方式はいずれのネットワークでも、アンカノード数の増加にともない推定平均誤差が改善される。三辺測量 1 および 2 が、通信可能距離 0.25 で 1.0×1.0 の平面に配置する場合、三辺測量 1 で 33, 三辺測量 2 で 49 のアンカノードが必要であるが、この場合のそれぞれの推定誤差を表 2 に示す。図 12 と表 2 を比較すると、提案方式において、この三辺測量 1 の推定平均誤差より良好な位置推定が可能となるアンカノード数は、ノード数が 30 のネットワークで 10 (三辺測量 1 の約 30%)、ノード数が 50 のネットワークで 8 (三辺測量 1 の約 24%)、ノード数が 100 のネットワークでは 7 (三辺測量 1 の約 21%) である。同様に、三辺測量 2 の推定平均誤差より良好な位置推定が可能となるアンカノード数は、ノード数が 30 のネットワークで 12 (三辺測量 2 の約 24%)、ノード数が 50 のネットワークで 9 (三辺測量 2 の約 18%)、ノード数が 100 のネットワークでは 7 (三辺測量 2 の約 14%) である。

以上のことから、提案方式は三辺測量 1 および 2 と比較して、少量のアンカノードで高精度な位置推定が可能であることが再確認できる。また、ノード数が 30 のネットワークとノード数が 50 のネットワークの平均近傍ノード数はそれぞれ約 5 と 8 であり、近傍ノード数が少ないネットワークになっている。このようなネットワークにおいても、アンカノード数を増やすことにより精度が向上し、三角測量 1 および 2 より少ないアンカノード数でそれらの精度を上回る。したがって、3.2 節で問題として述べたノード数が少ないネットワーク (すなわち、ノード密度が小さい) においても、少量のアンカノードを増やすことで高精度な位置推定が可能となる。

3.5 位置推定処理遅延

組織化測位における位置推定処理は、近傍ノード数が多い (ノード密度が高い) ほど精度が高まる。しかし、近傍ノードが多い場合は処理遅延が増大する問題点がある。

組織化測位の位置推定処理遅延 (以降、処理遅延) は、修正遅延と近傍ノードとの通信遅延により構成される。しかし、修正遅延は、通信遅延と比較してその処理時間が非常に微量である。したがって、処理遅延は近傍ノードとの通信遅延に強く依存することは明白である。通信遅延を通信回数と通信量に分けて考えると、通信量はノード数 \times 繰返し回数のオーダで増加し、通信回数は近傍ノード数のオーダで増加する。したがって、通信遅延はノード数 \times 繰返し回数 \times 近傍ノード数のオーダで増加することになる。3.2 節で用いたノード 100 のネットワーク (平均近傍ノード数 49.5) における通信遅延を

- ブロードキャストによる通信速度を 2 Mbits/s とする、
 - ノード識別子, 仮位置, 距離をそれぞれ 4 バイト, 16 バイト, 8 バイトとする、
 - 送信は 1 時期に 1 つのノードのみが可能である、したがって、送信時は全帯域が利用可能とする、
- の条件で概算すると、300 サイクルで約 337 秒となり、大きな遅延となる。

図 9 と図 10 から分かるように、ノード数が少ない形態からノード数を増やすと急速に精度が向上するが、ある点 (ノード数が 20, 平均近傍ノード数が 10.4) からはほぼ横ばいとなる。上記と同様に、ノード数 20 のネットワークの通信遅延を概算すると、約 7.2 秒となる。すなわち、精度を維持しつつ、ノード数と近傍ノード数を減少させて通信量を大幅に削減することが可能である。

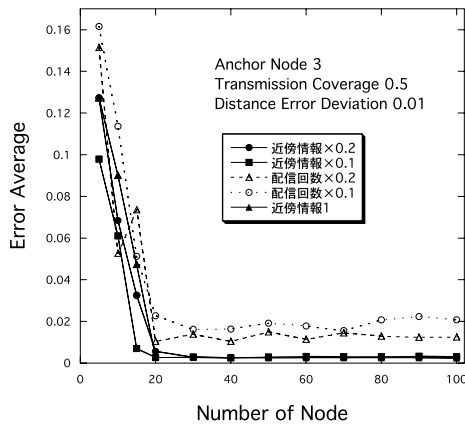


図 13 配信回数および仮位置情報量に応じた位置推定誤差 (1)
Fig. 13 Location estimation error on location info delivery rate and location info quantity (1).

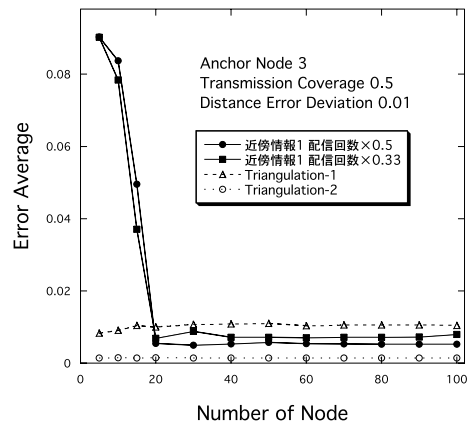


図 15 配信回数および仮位置情報量に応じた位置推定誤差 (3)
Fig. 15 Location estimation error on location info delivery rate and location info quantity (3).

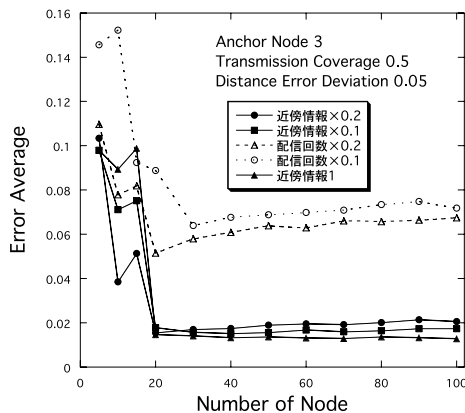


図 14 配信回数および仮位置情報量に応じた位置推定誤差 (2)
Fig. 14 Location estimation error on location info delivery rate and location info quantity (2).

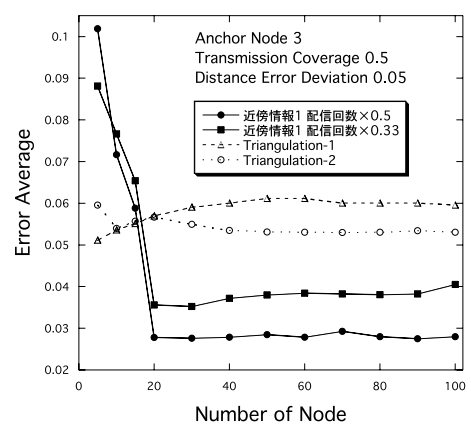


図 16 配信回数および仮位置情報量に応じた位置推定誤差 (4)
Fig. 16 Location estimation error on location info delivery rate and location info quantity (4).

以上のことから、通信遅延の支配的パラメータを次のように変更して、擬似的にノード数および近傍ノード数を減少させる。

- 近傍ノードへの仮位置情報の配信回数を減少させる。
- 仮位置情報に含まれる近傍ノードの情報を減少させる。

この手法に基づき、各ノード数のネットワークにおいて、

- 仮位置情報の配信回数を 1/5, 1/10 に削減したケース
- 仮位置情報に含まれる近傍ノードの情報を保持する近傍ノードの 1/5, 1/10, および 1 ノードに削減したケース

の 5 通りに関して、距離誤差偏差 0.01 と 0.05 でシミュレーションを実施した。その結果をそれぞれ図 13 と

図 14 に示す。この図から分かるように、図 9, 図 10 と同様の傾向となる。しかし、配信回数を削減したケースは精度が劣化し、同条件の三辺測量 1 の精度を上回らない。一方、仮位置情報に含む近傍ノード情報を削減したケースでは、精度は劣化せず、同条件の三辺測量 1 の精度を上回り、三辺測量 2 と同程度の精度となる。すなわち、大量のデータから比較的長い周期で更新/修正処理を行うより、少量のデータから短い周期で頻りに更新/修正処理を行う方が有効であることが分かる。このことから、仮位置情報に含む近傍ノード情報を 1 ノード分とし、配信回数を 1/2 (100 ノードで通信遅延が約 2.88 秒), 1/3 (100 ノードで通信遅延が 1.92 秒) とした 2 つのケースを三辺測量 1 および 2 と比較をした。その結果を図 15 (距離誤差偏差 0.01) と図 16 (距離誤差偏差 0.05) に示す。これらの図から分かるように、提案方式は、通信量を大

幅に削減しても三辺測量と同等またはそれ以上の精度を維持する。

以上のことから、提案方式は仮位置情報に含まれる近傍ノード情報量およびその配信回数を制御することにより、精度を維持しつつ、通信遅延を大幅に削減することができる。

4. おわりに

本論文では、SOM アルゴリズムを応用したパーソナルセンシングにおける自己位置推定方式を提案した。さらに、シミュレーション評価から提案方式が次の基本的な性能特性を持つことを示した。

- 三辺測量による測位方式より、大幅に少ないアンカノード数で測位が可能である。
- 位置推定精度はネットワークノード数（近傍ノード数）に依存し、適当なノード数のネットワークノードを構成すれば、三辺測量より高い精度の位置推定が可能である。
- 三辺測量で測位困難である大きな誤差を含む距離データからでも、良好な精度の位置推定が可能である。
- 処理遅延は通信遅延に依存し、その通信量はノード数 × 繰返し回数 × 近傍ノード数のオーダで増加するが、仮位置情報の配信回数と仮位置情報に含む近傍ノード情報量を制御することで精度を維持しつつ大幅に通信遅延を削減できる。

また、提案方式はその基本特性から、パーソナルセンシングに限らず、多様な応用（たとえば、センサネットワークにおけるノード位置推定など）が可能である。今後の課題として、その応用性と実用性を高めるため、

- 多様な位置精度要求に対応するため、アドホックネットワークの構成（ノード数、ノード密度、トポロジ）や仮位置情報の配信回数と仮位置情報に含む近傍ノード情報量などの制御による位置精度制御方式を確立すること、
 - 多様な環境で利用可能とするため、NLOS への適応メカニズムを検討すること、
 - 可動可能とするため、移動への適応メカニズムを検討すること、
- を行う予定である。

参 考 文 献

- 1) Kohonen, T.: *Self-Organizing Maps*, 3rd ed., Springer (2001).
- 2) Bonabeau, E. and Henaux, F.: Self-organizing maps for drawing large graphs, *Information*

Processing Letters, Vol.67, No.4, pp.177–184 (1998).

- 3) Bonabeau, E. and Henaux, F.: Graph Partitioning with Self-Organizing Maps, *Private Communication* (1998).
- 4) 保坂, 呉谷, 梅原, 川合: SOM アルゴリズムを用いたネットワークボロジの再現, *電気学会論文誌 C 電子・情報・システム部門誌*, Vol.122-C, No.2, pp.208–216 (2002).
- 5) 朝倉, 梅原, 川合: SOM アルゴリズムを用いた移動端末の分散型位置推定法, *電子情報通信学会論文誌 B*, Vol.J85-B, No.7, pp.1042–1050 (2002).
- 6) Priyantha, N., Miu, A., Balakrishman, H. and Teller, S.: The Cricket Compass for Context-aware Mobile Applications, *MOBICOM2001* (2001).
- 7) Harter, A., Hopper, A., Steggles, P., Ward, A. and Webster, P.: The Anatomy of a Context-aware Application, *MOBICOM1999* (1999).
- 8) Want, R., Hopper, A., Falcao, V. and Gibbons, J.: The Active Badge Location System, *ACM Trans. Information Systems*, Vol.10, No.1, pp.91–102 (1992).
- 9) http://www.enri.go.jp/~fks442/K_MUSEN/
- 10) Erwin, E., Obermayer, K. and Schulten, K.: Self-organizing maps: Stationary states, metastability and convergence rates, *Biol. Cybern*, Vol.67, pp.35–45 (1992).
- 11) Chen, P.-C.: A Non-Line-of-Sight Error Mitigation Algorithm in Location Estimation, *Proc. IEEE Wireless Communications Networking Conference*, Vol.1, pp.316–320 (1999).
- 12) Cong, L. and Zhuang, W.: Non-Line-of-Sight Error Mitigation in TDOA Mobile Location, *Proc. IEEE Globecom*, pp.680–684 (2001).
- 13) Shang, Y., Rumi, W., Zhang, Y. and Fromherz, M.: Localization form Connectivity in Sensor Networks, *IEEE Trans. Parallel and Distributed Systems*, Vol.15, No.11, pp.961–974 (2004).
- 14) Beutel, J.: Geolocation in PicoRadio Environment, MS thesis, ETH Zurich, Electronics Lab. (1999).
- 15) 滝沢, 芝, 大久保: VBR ストリーム処理のための適応的スケジューリングポリシーとその性能評価, *情報処理学会論文誌*, Vol.42, No.SIG14, pp.50–63 (2001).

(平成 17 年 3 月 31 日受付)

(平成 17 年 10 月 11 日採録)



滝沢 泰久 (正会員)

昭和 58 年京都工芸繊維大学工学部機械工学科卒業。同年日本ユニシス (株) 入社。平成 2 年住友金属工業 (株) 入社。平成 10 年 ATR 環境適応研究所出向。平成 14 年 (株)

国際電気通信基礎技術研究所適応コミュニケーション研究所・研究員。現在、適応的資源管理方式等の研究に従事。工学博士。電子情報通信学会, IEEE 各会員。



デイビス ピーター

昭和 55 年クィーンズランド大学物理学科卒業 (First Class Honours)。昭和 56 年京都大学理学部文部省留学研究員, 昭和 62 年クィーンズランド大学大学院博士課程修了 (Ph.D.)。

同年 (株) 国際電気通信基礎技術研究所光電波通信研究所研究員。平成 8 年同環境適応研究所研究員, カオス現象を利用した通信に関する研究に従事。平成 13 年同適応コミュニケーション研究所研究員, 自律ネットワークシステムに関する研究に従事。AIP, IEEE 各会員。



岩井 誠人

昭和 62 年京都大学工学部電気工学科卒業。平成元年同大学大学院修士課程修了。同年 KDD 入社, 研究所にてアンテナ・伝搬, 無線通信システムの研究に従事。平成 8~9 年

米国カリフォルニア大学サンディエゴ校 (UCSD) 客員研究員, 平成 9~11 年 KDD 研究所, 平成 11~13 年トヨタ自動車出向・米国 Telcordia Technologies 社客員研究員, 平成 13~14 年トヨタ IT 開発センター出向, 平成 14~16 年 KDDI 研究所, 平成 16~17 年国際電気通信基礎技術研究所 (ATR) 出向, 平成 17 年より同志社大学工学部電子工学科助教授。ATR 客員研究員。平成 8 年電子情報通信学会学術奨励賞, 平成 17 年電子情報通信学会通信ソサイエティ活動功労賞。電子情報通信学会, IEEE 各会員。



川合 誠

昭和 47 年京都大学工学部電子工学科卒業。昭和 49 年同大学大学院修士課程修了。同年日本電信電話公社 (現 NTT) 入社。平成 11 年京都大学大学院情報学研究科助教授。平成 15 年立命館大学理工学部教授。平成 16 年同大学情報理工学部教授。衛星通信, アドホックネットワーク等のワイヤレスネットワーク技術に関する研究に従事。工学博士。IEEE, AIAA 各会員。



小花 貞夫 (フェロー)

昭和 51 年慶應義塾大学工学部電気工学科卒業。昭和 53 年同大学大学院修士課程修了。同年国際電信電話 (株) (現 KDDI (株)) 入社。パケット交換方式, ネットワークアーキテクチャ, OSI プロトコル実装, データベース, ビデオテクス, 分散処理, ネットワーク管理, ITS の研究・開発に従事。平成 16 年 (株) 国際電気通信基礎技術研究所適応コミュニケーション研究所所長, アドホックネットワーク, ITS, センサネットワークの研究開発に従事。工学博士。平成 13 年文部科学大臣章 (研究功績者), 本会フェロー, 電子情報通信学会会員。