

推薦論文

電子トリアージシステムにおける モバイルノード利用型 RSSI 位置推定方式

山田 純 弥^{†1,*1} 澤村 啓 太^{†1} 竹中 友 哉^{†2,*2}
峰野 博 史^{†1} 水野 忠 則^{†2}

大規模災害が発生した際に、傷病者の位置や病状変化をモニタリングする電子トリアージシステムの開発が進められている。電子トリアージシステムでは傷病者にセンサを装着し、センシング情報を収集することで傷病者の位置や病状をモニタリングする。このシステムでは屋内外を問わず、傷病者数やその位置を確実に把握することが求められるため、GPS に頼ることのない位置推定技術が要求される。本研究では、電子トリアージシステムを想定した位置推定方式として、モバイルノード利用型 RSSI 位置推定方式を提案し、シミュレーションおよび実環境実験においてその性能を評価した。

RSSI Localization using Mobile Node in Electronic Triage System

JUNYA YAMADA,^{†1,*1} KEITA SAWAMURA,^{†1}
TOMOYA TAKENAKA,^{†2,*2} HIROSHI MINENO^{†1}
and TADANORI MIZUNO^{†2}

The electronic triage system that monitors the patient position and condition change when the wide-scale disaster occurs has been developed. In electronic triage system, patient's position and condition are monitored by installing the sensor in patients, and collecting sensing information. In this system, localization technology that might not rely on GPS is demanded because the number of patient and the position are requested to be estimated surely regardless of indoor or outdoor environments. In this study, we propose RSSI localization using mobile node in the electronic triage system and we evaluate it by using a simulation and conducting an experiment.

1. はじめに

近年、ユビキタス社会の実現に向け、センサノードがアドホックネットワーク機能を用いて自律的にネットワークを構築するセンサネットワークの研究がさかんに行われている。センサノードは温度や湿度、照度などを収集しモニタリングすることが可能であり、省エネ、医療現場、災害現場、交通などの様々な場面で応用が可能である。センサネットワークのアプリケーションでは、イベントの発生箇所を特定するセンサノード自身の位置を知ることが必要となるため、センサノードの位置情報が重要となる。そのため、センサノードの位置推定技術の研究が注目を集めている。一般的に位置情報を取得するためには全地球測位システム (GPS: Global Positioning System) が有効であるが、屋内では使用できない点や、ノードにハードウェアコストを強いることなどからすべてのノードに搭載することは現実的ではない。そこで、GPS を用いずにネットワーク内のノードの位置推定を行う必要がある。

本研究では電子トリアージシステムを想定した位置推定方式について述べる^{*1}。トリアージとは大規模な事故・災害において多数の傷病者が発生した際に、それぞれの傷病者に対する治療や搬送の優先順位を効果的に決めることである。しかし、現状のトリアージでは傷病者の位置や状態の変化を知ることができず、優先順位の高い傷病者を探し出すのに時間がかかるという欠点がある。そこで、傷病者にセンサを装着し、センシング情報を迅速に収集することで傷病者の位置や病状をリアルタイムで監視する電子トリアージシステムの研究開発が進められている¹⁾。

本論文では、電子トリアージシステムにおいて傷病者の位置を特定するために、モバイルノード利用型 Received Signal Strength Indicator (RSSI) 位置推定方式を提案する。提案

†1 静岡大学情報学部

Faculty of Informatics, Shizuoka University

†2 静岡大学創造科学技術大学院

Graduate School of Science and Technology, Shizuoka University

*1 現在、育英短期大学

Presently with Ikuei Junior College

*2 現在、三菱電機株式会社

Presently with Mitsubishi Electric Corporation

*3 本研究は、独立行政法人科学技術振興機構 (JST) の戦略的創造研究推進事業 (CREST) による支援を受けて実施している。

本論文の内容は 2010 年 3 月のマルチメディア通信と分散処理研究会にて報告され、同研究会主催により情報処理学会論文誌ジャーナルへの掲載が推薦された論文である。

方式は GPS を搭載しないモバイルノードを利用してマルチホップ測距で発生する誤差を減少させ、RSSI の揺らぎの影響を低減させる。シミュレーションおよび実環境実験で評価を行った結果について述べ、提案方式の有効性を述べる。

以下、2 章で関連研究、3 章で提案方式、4 章でシミュレーション評価、5 章で実環境実験、6 章でまとめと今後の課題について述べる。

2. 関連研究

2.1 災害時救命救急支援を目指した人間情報センシングシステム¹⁾

列車事故やテロ、ビル災害など数百人以上の傷病者が短期間に生じるような大規模災害が発生した際に傷病者の重傷性と緊急性によって搬送・治療の優先度を決定するトリアージが注目されている。トリアージでは傷病者の優先度を把握しやすいようトリアージタグが利用されているが、傷病者の病状の変化や緊急に処置が必要な高優先度の傷病者の位置を把握しにくいという欠点がある。そこで、脈拍センサや血中酸素濃度センサなどを備えた電子トリアージタグを傷病者に装着し、センサノードからのセンシング情報を収集するとともに、災害現場で臨時にアドホックネットワークを構築することで、傷病者の位置や病状変化を監視し、初期に救命活動を行う消防関係者や医療チームにその情報を視覚的に提示する電子トリアージシステムの構築が進められている¹⁾。図 1 に電子トリアージシステムにおける位置把握例を示す。このシステムでは屋内外を問わず、事故・災害発生現場において傷病者数やその位置を確実に把握することが求められるため、GPS のみに頼ることなく、アドホックに構築された無線ネットワークインフラストラクチャを利用した位置推定技術が要求され

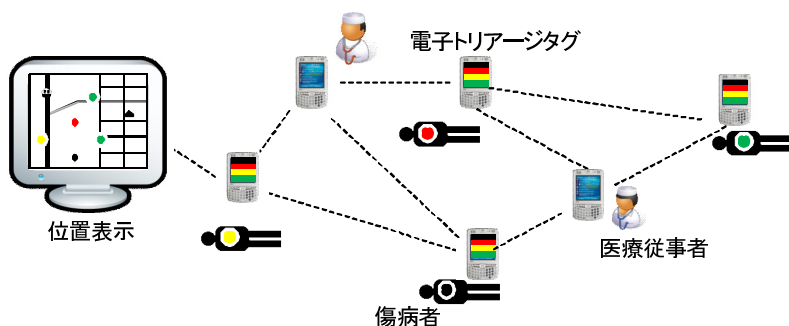


図 1 電子トリアージシステムにおける位置把握例
Fig. 1 Example of localization in electronic triage system.

る。電子トリアージシステムでは、最終的におよそ 2m 程度の位置推定精度を達成させることを目標としている。

2.2 位置推定手法

2.2.1 測 距

位置推定手法の原理的なブロック図を図 2 に示す。位置推定手法は測距 (Distance estimation) フェーズと測位 (Position estimation) フェーズから構成される。二次元平面上でノード $\hat{P}(\hat{x}, \hat{y})$ の推定位置座標を求めたい場合、測距フェーズでは m 個 ($m \geq 3$) のセンサが収集した n 個のサンプルデータ s_j^i ($i = 1 \dots m$) ($j = 1 \dots n$) から推定距離 \hat{d}_i を求める。それらのデータを利用することで、測位フェーズで $\hat{P}(\hat{x}, \hat{y})$ の推定位置座標を求めることが可能となる。

ノード間の距離を推定する方法として電波の到来時間を利用した Time of Arrival (TOA) 方式、電波の到着時間差を利用した Time Difference of Arrival (TDOA) 方式、到来方向を利用した Angle of Arrival (AOA) 方式、受信電界強度を利用した RSSI 方式などが利用されている。ただし、TOA 方式や TDOA 方式、AOA 方式は専用のハードウェアを必要とするため、大規模な位置推定システムに導入した場合にコストがかかるという欠点がある。そのため、本研究ではノードの小型化、低コスト化の実現に向け、既存の無線通信機能をそのまま利用可能な RSSI 方式の測距を利用した位置推定手法の開発を進めた。

RSSI は IEEE 802.15.4 などの無線通信機能を備えたデバイスにおいて測定可能である²⁾。RSSI は一般的に距離に依存して減衰するため、ノード間の通信時に得られる RSSI から距離を求める。しかし、RSSI は測定する環境によって減衰の傾向が変化するため、事前にそ

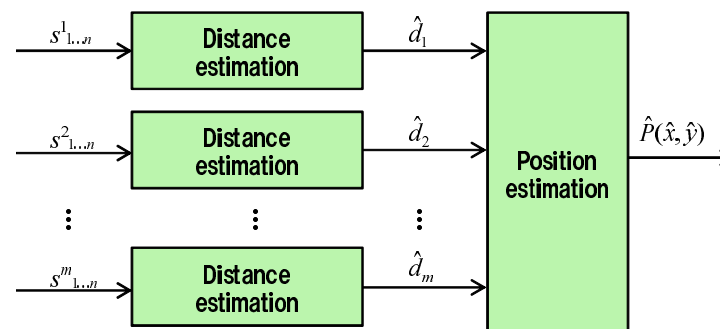


図 2 位置推定手法の原理的なブロック図
Fig. 2 Theoretic block diagram of localization.

の傾向を調べる必要がある．受信ノードにおける受信電界強度 P [dBm] の減衰モデルは一般的に以下の式 (1) で表される³⁾．

$$P = P_0 - 10n_p \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) + X_\sigma \quad (1)$$

ここで、 P_0 [dBm] は距離 d_0 [m] における受信電界強度である． X_σ [dB] は電波の揺らぎであり、平均 0、分散 σ^2 のガウス分布 $N(0, \sigma^2)$ でモデル化される． n_p は伝送経路の品質を表す伝播損失係数である．環境ごとの伝播損失係数を表 1 に示す³⁾．伝播損失係数は、障害物がない屋外のフリースペースの場合は 2 に近づき、障害物のある屋内では 4~6 とされる．

RSSI 方式では測距フェーズにおいて受信ノードの受信した受信電界強度 P を式 (1) に代入することで距離 d [m] を推定する．RSSI の伝播損失係数は環境に依存するため、事前に伝播損失係数の測定を行う必要がある．自動的に伝播損失係数を補正する技術も研究されているが^{4),5)}、電波の揺らぎの分散値 σ^2 が大きい環境では同じ空間内であってもノード間で大きく異なった RSSI を受信することがあり、高精度な位置推定を行うためには電波の揺らぎによる影響を低減させる必要がある．

2.2.2 測 位

測位フェーズでは、測距フェーズで推定した距離を利用して位置推定を行う．位置推定アルゴリズムには三辺測量⁶⁾ や多次元尺度構成法 (MDS: Multi Dimensional Scaling)⁷⁾ がある．三辺測量は、3 つのあらかじめ位置が既知のノード (既知ノード) から位置が未知のノード (未知ノード) の位置座標を推定するアルゴリズムで、DV-hop⁸⁾ などで利用されている．一方、MDS は既知ノードを必要とせず、ノード間の距離からノードの相対位置座標を算出可能なアルゴリズムである．いずれの位置推定アルゴリズムでも位置座標を算出するためにノード間の距離を利用するため、RSSI を利用した測距方式で推定した距離を利用した場合、高精度な位置推定は難しいという欠点がある．RSSI 利用型位置推定方式において

表 1 環境ごとの伝播損失係数

Table 1 Path loss exponents in various environments.

環境	伝播損失係数 (n_p)
フリースペース	2
見通し外の都市部	3~5
見通し内の屋内	1.6~1.8
障害物のある屋内	4~6

モバイルノードを対象とした高精度な位置推定手法の研究が多く行われているが^{9),10)}、センサネットワークにおいて位置推定の対象となることが多い固定ノードに対しては適応できないことや、移動する既知ノードが必要という欠点がある．電子トリアージシステムは、身動きのとれない傷病者が位置推定の対象である．そのため、固定ノードを対象とし、既知ノードを必要としない位置推定手法が必要となる．

3. 提案方式

3.1 モバイルノード利用型位置推定

位置推定精度の向上には、測距フェーズで発生する誤差を低減させる必要がある．しかし、既存の位置推定の研究では高精度化のために、既知のモバイルノードが必要であったり、固定ノードを対象とした位置推定には適応できなかったりなどの問題点がある．そこで、本研究では電子トリアージシステムを想定し、軽傷の傷病者や医療従事者をモバイルノードとして利用した位置推定手法を提案する．提案方式ではマルチホップ通信によって生じる測距の誤差をモバイルノードを利用して減らす．固定ノードが密度を十分に確保できない環境では、ノードどうしが直接通信ができない区間が存在する．直接通信できないノード間はマルチホップ通信を利用して測距を行う．マルチホップされた経路が多ければ測距で生じる誤差も大きくなる．図 3 にマルチホップ通信による一般的な測距の概念図を示す．*Node A* と *Node B* が互いに通信範囲外に位置している場合、*Node A*、*Node B* 間の距離

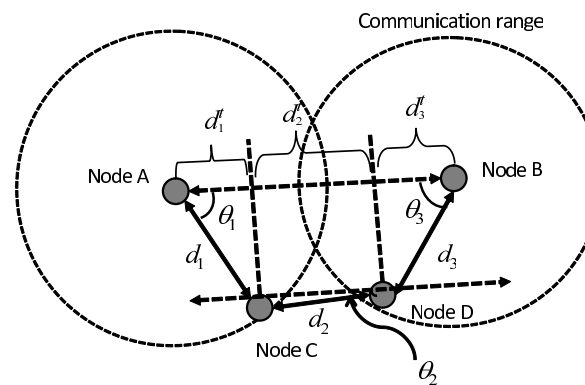


図 3 一般的なマルチホップ測距

Fig. 3 General method of multi-hop distance estimation.

はマルチホップによって累積したノードの距離となる．ここで， $i - 1$ から i 番目までの距離を d_i ($i > 0$) とし，*Node A*，*Node B* 間の直線経路を i 番目のホップ通信の送信ノードおよび受信ノードからの垂線で区切った距離を d_i^t とする．ホップ数の総数を n 回とすると，*Node A*，*Node B* 間の距離の真値 d_{AB}^t ，推定距離 \hat{d}_{AB} は，それぞれ以下のように表せる．

$$d_{AB}^t = \sum_{i=1}^n d_i^t \quad (2)$$

$$\hat{d}_{AB} = \sum_{i=1}^n d_i \quad (3)$$

また，*Node A*，*Node B* 間の直線経路と i ホップ目の直線経路を交差させてなす角を θ_i とすると d_i^t と d_i の関係は以下の式 (4) で表すことができる．

$$d_i^t = d_i \cos \theta_i \quad (4)$$

Node A，*Node B* 間の誤差 d_{AB}^e は推定距離 (3) から距離の真値 (2) を減算し，以下の式 (5) で表すことができる．

$$d_{AB}^e = \sum_{i=1}^n d_i - \sum_{i=1}^n d_i \cos \theta_i \quad (5)$$

式 (5) はマルチホップ測距における誤差の要因を示しており，誤差をなくす，すなわち $d_{AB}^e = 0$ を実現するには θ を 0 にすればよい．つまり，マルチホップ通信において測距の誤差が生じる原因は仲介するノードが距離を測定するノード間の直線上に存在しないときである．そこで，モバイルノードの利用を想定し，モバイルノードが移動してきたときに測距した距離情報を利用することで，マルチホップ測距における誤差を低減させる方式を提案する．

図 4 に提案するモバイルノードを利用したマルチホップ測距の概念図を示す．*Node A*，*Node B* は互いに通信範囲外に位置し，*Node A* と *Node B* 間を測距する場合を考える．モバイルノードは定期的に周囲のノードからデータを受信する．モバイルノードが *Node A*，*Node B* と同時に通信ができたとき，モバイルノードとの推定距離をそれぞれ \hat{d}_1 ， \hat{d}_2 とし，それらを加算した \hat{d}_{AB} を推定距離として利用する．モバイルノードが新たに \hat{d}_1 ， \hat{d}_2 を更新した場合，以下の条件式が成立すれば \hat{d}_{AB} を更新し，不成立ならば更新を行わない．

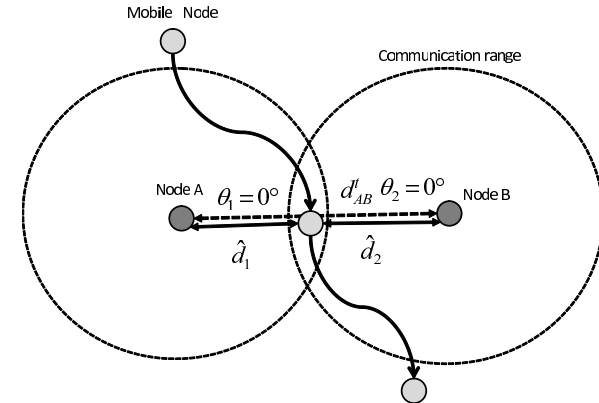


図 4 モバイルノードを利用したマルチホップ測距
Fig. 4 Distance estimation with mobile node.

$$\hat{d}_{AB} > \hat{d}_1 + \hat{d}_2 \quad (6)$$

θ が 0 のとき， \hat{d}_{AB} は最小値をとるため，過去に推定された \hat{d}_{AB} の中で最小の値を利用したとき，最も誤差が少ないと判断する．提案方式では，モバイルノードを介した測距が行えればよいので，モバイルノードおよび固定ノードの位置を把握しておく必要はなく，モバイルノードを移動させるだけで位置推定精度の改善が可能であると考えられる．

電子トリアージシステムでは重傷で身動きがとれない傷病者を固定ノード，軽傷の傷病者や医療従事者をモバイルノードとして提案方式を利用することを想定する．

3.2 電波の揺らぎに対応した RSSI 分割測距方式

RSSI 利用型位置推定方式では，事前調査などによって RSSI の減衰モデルが特定されていても雑音の影響で取得するノード間で値が大きく異なることがあるため，電波の揺らぎに対応した測距方式が必要である．電波の揺らぎによって，距離が遠いノード間の RSSI が距離の近いノード間の RSSI よりも大きくなるという順序関係の矛盾が生じ，それが位置推定精度を悪化させる．本研究では，簡易的に雑音を低減させる方式として，RSSI 距離関数をいくつかの区間に分割することで雑音による影響を低減させることを考える．RSSI 距離関数を区間に分割し，区間ごとに距離を一意に設定することで同じ区間内での順序関係の矛盾をなくすことが可能であり，位置推定精度が向上すると考える．図 5 に RSSI 分割の概念図を示す．ノード間の受信感度を P_{min} [dBm]，ノード間の最小通信距離での受信電界強度を

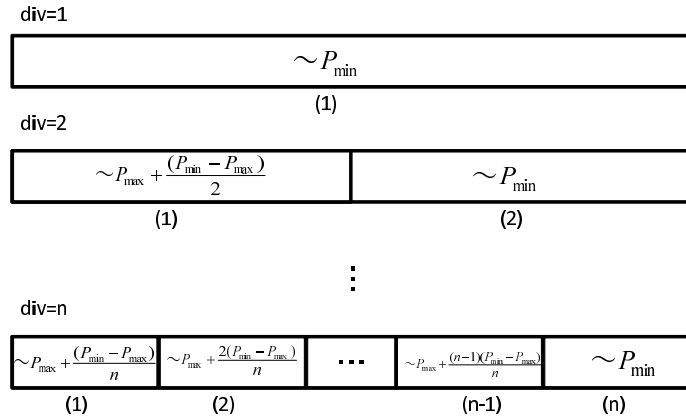


図 5 RSSI 分割の概念図
Fig. 5 Conceptual illustration of proposed RSSI division.

P_{max} [dBm] とする．減衰モデルの分割数を div とし， P_{min} から P_{max} を div 個の区間に分割する．受信電界強度 P [dBm] の属する区間 i ($i = 1 \dots div$) を特定する．特定された区間 i の中で RSSI の最小値である $P_{max} + \{i(P_{min} - P_{max})/div\}$ から推定距離を算出する．たとえば， $P_{min} = -95$ ， $P_{max} = -65$ ， $div = 3$ としたとき，受信電界強度の各区分 P_i^{div} は， $-75 \leq P_{i=1}^{div} < -65$ [dBm]， $-85 \leq P_{i=2}^{div} < -75$ [dBm]， $-95 \leq P_{i=3}^{div} < -85$ [dBm] の 3 つの区間に分割する．ノード間の受信電界強度 P が -80 [dBm] の場合， $i = 2$ となるため， -85 [dBm] を受信したものと推定距離を算出する．また， $div = 1$ の場合，電界強度を取得できればすべて受信感度 P_{min} を変換した距離として算出される．提案方式を利用すれば，同じ距離のノード間で取得した RSSI が雑音の影響で異なっても順序関係の矛盾を低減させることが可能であり，位置推定精度が向上すると考える．

4. シミュレーション評価

4.1 シミュレーションの前提

提案手法の有効性を確認するためにシミュレーションによって位置推定精度を評価した．距離測定には RSSI を利用することを想定し，減衰モデルは式 (1) を利用した．シミュレーションのパラメータを表 2 に示す． n_p を 5， d_0 を 1 [m]， P_0 を -35 [dBm]， σ^2 を 5 [dB] とし，受信感度を -95 [dBm] とした．位置推定アルゴリズムには距離情報から相対的な位

表 2 シミュレーションのパラメータ
Table 2 Simulation parameters.

パラメータ	値
n_p	5
d_0	1 [m]
P_0	-35.0 [dBm]
σ^2	5.0 [dB]
受信感度	-95 [dBm]

置座標を設定可能な MDS を利用した． N 個のノードに対して， (X_i, Y_i) ($i = 1 \dots N$) を推定された位置座標， (X_i^t, Y_i^t) ($i = 1 \dots N$) を位置座標の真値とし，Root Mean Square Error (RMSE) を以下のように定義し，位置推定精度の評価に利用した．

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \{(X_i - X_i^t)^2 + (Y_i - Y_i^t)^2\}} \quad (7)$$

本シミュレーションの目的はモバイルノード利用型位置推定方式において測距誤差の削減効果を確認することと，RSSI 分割測距方式において電波の揺らぎの影響の低減効果を確認することである． 30×30 [m] のマップ上に固定ノード (A~H) を図 6 のように 8 m 間隔の格子状に配置し，モバイルノードは $M(-10, -10)$ の位置から矢印の方向に 0.5 m/s で移動する．1 秒間に 1 回，全点間の RSSI を取得し P とした．既存方式では P を \hat{P} とし，分割測距方式では P から求めた補正値を \hat{P} とし，式 (1) より推定距離 \hat{d} を以下の式で求めた．

$$\hat{d} = 10^{\left(\frac{P_0 - \hat{P}}{10n} + \log_{10} d_0\right)} \quad (8)$$

求めた \hat{d} を利用して位置推定を行い RMSE を算出する．減衰モデルをそのまま適用する既存方式と，本論文で提案する RSSI 分割測距方式 ($div = 1 \dots 5$) を比較した．シミュレーションをそれぞれ 20 回行い，初期誤差とモバイルノードが格子状に配置された固定ノードの間を通り終わる 80 秒後の RMSE をそれぞれ平均化した．

4.2 シミュレーションの結果

提案方式 ($div = 4$) における 80 秒後の位置推定結果を図 7，提案方式 ($div = 4$) における RMSE の推移を図 8 に示す．図 8 から，雑音の影響で一時的に RMSE が増えるが，モバイルノードが格子状内に到達した 20 秒後から急激に RMSE が減少していることが分

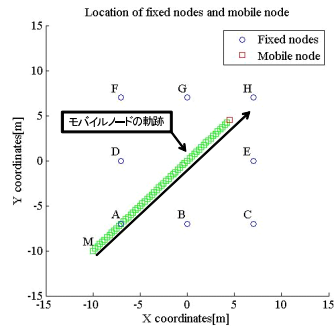


図 6 ノードの配置
(○: 固定ノード □: モバイルノード)
Fig. 6 Node deployment (○: static node □: mobile node).

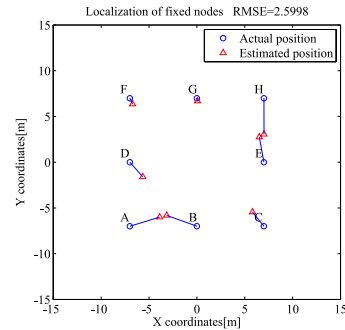


図 7 提案方式 ($div = 4$) の位置推定結果
(○: 真値 △: 推定位置)
Fig. 7 Result of localization in proposal method ($div = 4$, ○: actual position △: estimated position).

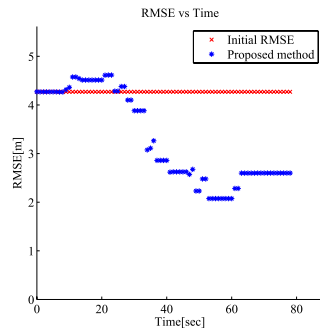


図 8 提案方式 ($div = 4$) の RMSE の推移
(×: 初期誤差 * : 時系列誤差)
Fig. 8 Time transition of RMSE in proposal method ($div = 4$, ×: initial RMSE * : RMSE).

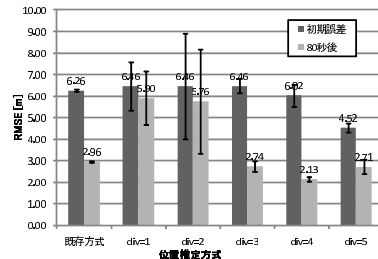


図 9 シミュレーション結果
Fig. 9 Simulation result.

かる。これはモバイルノードが、ノード D とノード E、ノード B とノード G などの通信ができないノード間の通信を仲介することでマルチホップ通信で生じる誤差を抑えることができるからである。既存の RSSI 測距方式および RSSI 分割測距方式 ($div = 1 \dots 5$) についてのシミュレーション結果を図 9 に示す。比較したすべての測距方式において、80 秒後の誤差が初期誤差よりも低減されている。特に、提案方式 ($div = 4$) ではモバイルノード

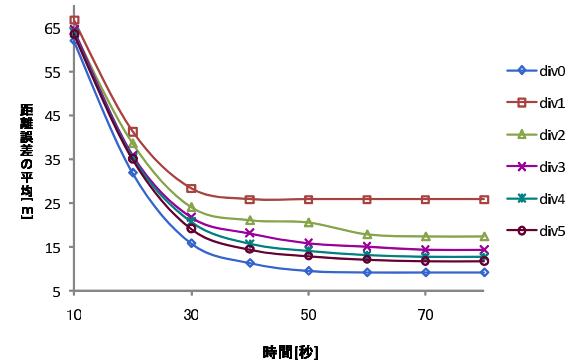


図 10 シミュレーションにおける距離誤差の推移
Fig. 10 Time transition of distance estimation error in simulation.

を利用することで RMSE を初期誤差の約 65%削減することができた。既存の RSSI 測距方式に比べ、RSSI 分割測距方式 ($div = 3 \dots 5$) では、RMSE を削減することができた。しかし、RSSI 分割測距方式 ($div = 1, 2$) では既存の測距方式よりも RMSE が大きくなってしまった。これは、分割数が少ないために、区間ごとに設定された距離と、距離の真値の差が大きくなってしまったためだと考える。図 10 は、モバイルノードと各固定ノードの距離誤差の平均の推移を分割数ごとに示したものである。モバイルノードを利用することで RMSE を減少させることができたが、分割測距方式では既存方式よりも距離誤差を改善することはできなかった。シミュレーションでは局所的な電波の揺らぎがない理想的な電波環境を想定しているため、分割測距方式の効果を得られなかったと考える。以上のことから、モバイルノードを利用することで距離の誤差を削減することが可能であるといえる。

5. 実環境実験

5.1 測距の実験方法

提案方式が実環境において誤差を削減することが可能であるか確かめるため、実環境実験を行った。実環境実験では、減衰モデルを調べるための測距を行い、特定した減衰モデルを利用して位置推定を行うためのデータ収集を行った。

実環境実験における位置推定に利用する減衰モデルを特定するために測距を行った (図 11 (a))。実験条件を表 3 に示す。実験は静岡大学浜松キャンパスの体育館で行った。使用機器は、サン・マイクロシステムズが開発した、IEEE 802.15.4 に準拠した無線センサ

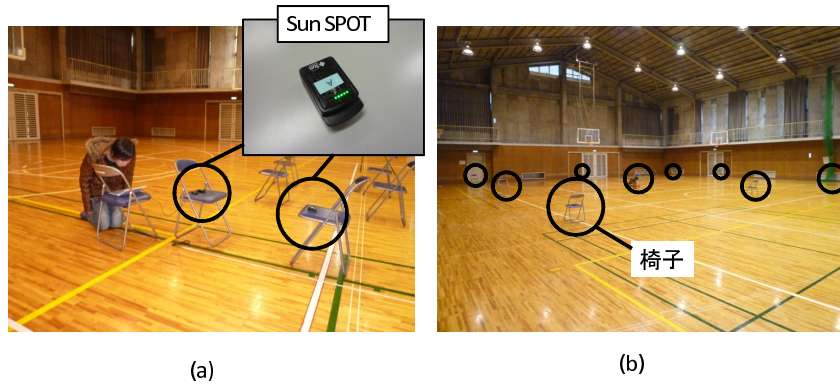


図 11 実験の様子。(a): 距離測定 (b): 位置推定のためのデータ収集

Fig. 11 Situation of experiment. (a): distance estimation (b): data collection for localization.

表 3 実験条件

Table 3 Experimental conditions.

場所	静岡大学浜松キャンパス体育館
使用機器	Sun SPOT (2007 年リリース版) デモセンサボード 9 台 ベースステーション 1 台
電波周波数帯	2.40-2.4835 [GHz]
格子状配置の間隔	8 [m]
送信電力	0 [dBm]
受信感度	-95 [dBm] (15 m)
データサンプル数	1,000

ネットワークデバイスである Sun SPOT¹¹⁾ を利用した。Sun SPOT の送信電力は 0 [dBm] に設定した。Sun SPOT の受信感度は -95 [dBm] であり、 n_p を 5 と仮定するとその対応距離は式 (8) より 15 m となる。電子トリアージタグをつけた傷病者が病院に搬送されベッドで寝ていることを想定し、同じ程度の高さにするためにノードを椅子の上に配置した。まず、2 台のデモセンサボードを利用し、1 m ~ 10 m まで 1 m 間隔で各 500 回のサンプルを収集した。

5.2 位置推定のためのデータ収集の実験方法

位置推定の際に利用する推定距離を算出するために RSSI の収集を行った。位置推定のためのデータ収集 (図 11 (b)) では 9 台のデモセンサボードを固定ノード (A ~ I) とし、図 12

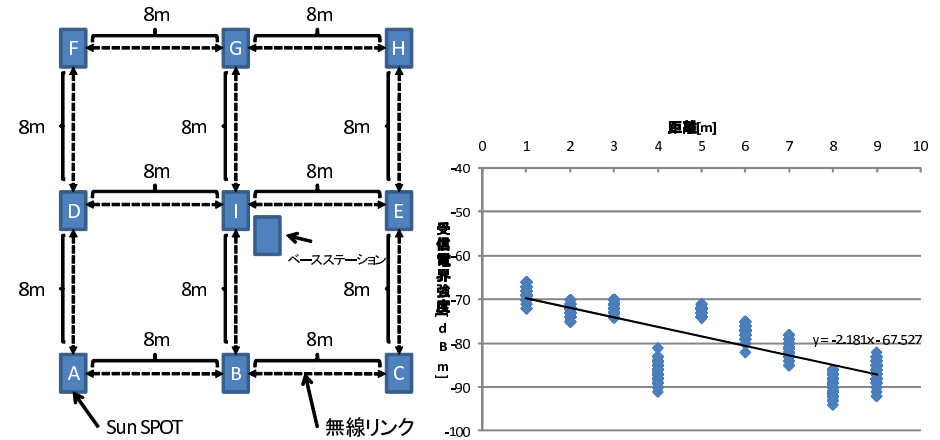


図 12 実環境実験配置図

Fig. 12 Node deployment in experiment.

図 13 RSSI 測定結果

Fig. 13 Result of RSSI measurement.

のようにシミュレーションと同様に 8 m 間隔の格子状に配置した。提案方式でのモバイルノードの導入によるマルチホップ誤差の低減を確認するため、固定したノード I をモバイルノードの一時的な参加とみても有効性を検証した。各ノードは近隣ノードに対し、自身の固有 ID を付与したデータを送信する。データを受信したノードは RSSI を取得し、<送信ノード固有 ID, 受信ノード固有 ID, RSSI> をベースステーションへ送信する。ベースステーションが収集したデータから距離行列を作成する。マルチホップ通信による誤差を検証するために、ノード I がある状態とない状態で実験を行った。これにより、ノード I がいない状態では向かい合うノード (ノード B とノード G, ノード D とノード E) や対角に位置するノード (ノード A とノード H, ノード C とノード F) は通信を行うときに、大きな角度でマルチホップを行うことになり、誤差が大きくなることが想定される。それに対し、ノード I がある状態では向かい合うノードや対角に位置するノードはノード I を仲介して通信を行うことが可能なため、小さな角度でマルチホップを行うことが可能であり、誤差を低減させることができると考える。本研究では、ノード I が移動することを想定するが、マルチホップ通信による誤差の低減および、分割測距方式の有効性を確認するため、モバイルノードを利用せずノード I を固定して実験を行った。各実験では、ベースステーションがデータを 1,000 回受信するまで行った。

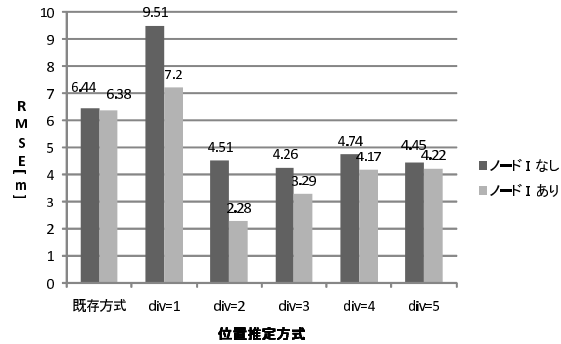


図 14 位置推定結果
Fig. 14 Localization result.

5.3 測距の実験結果

RSSI 測定の結果を図 13 に示す．なお，10 m ではサンプルが十分に取得できなかったため送信可能範囲外とした．受信電界強度が 4 m で大幅に減衰した．これは，屋内では一般にマルチパスによる影響を受けやすく，受信電界強度が不安定なためであり，そのような現象が本実験の中でも起こったためだと考える．そのため，RSSI 利用型位置推定方式ではマルチパスの影響を考慮した測距手法が必要となる．このデータから，全体的には距離に依存して減衰することが分かる．求めたデータを線形近似した式を減衰モデルとし，式 (9) と定義する．ここで， P [dBm] は受信電界強度， \hat{d} [m] は推定距離を表す．

$$\hat{d} = \frac{P + 67.527}{-2.181} \quad (9)$$

5.4 位置推定の実験結果

5.2 節で収集したデータと式 (9) の減衰モデルを利用して位置推定を行った．収集したデータから RSSI が取得できたノード間は RSSI を平均化し，平均値から推定距離を算出し位置推定に利用する．RSSI が取得できなかったノード間に関してはダイクストラ法を利用し，最短経路を求めて推定距離を算出した．求めた推定距離行列に MDS を適応して位置推定を行った．実環境データでの位置推定もシミュレーションと同様，既存方式と提案方式 ($div = 1 \dots 5$) で比較した．

実環境実験での結果を図 14 に示す．実環境においては既存の RSSI 測距方式では中間

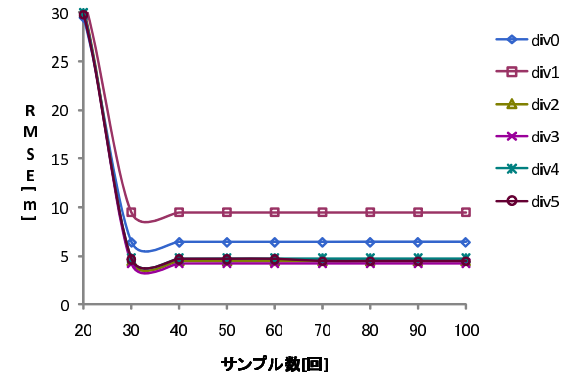


図 15 実環境実験での距離誤差の推移 (ノード I なし)
Fig. 15 Time transition of distance estimation error in experiment without node I.

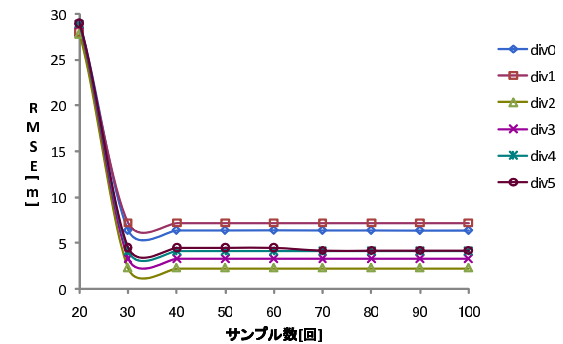


図 16 実環境実験での距離誤差の推移 (ノード I あり)
Fig. 16 Time transition of distance estimation error in experiment with node I.

ノードを置いても精度改善はできなかったが，提案方式 ($div = 1 \dots 5$) では中間にノードを配置することでマルチホップ通信によって生じる誤差を削減することができた．既存の RSSI 測距方式で誤差が削減できなかったのは，順序関係の矛盾が大きい場所に仲介ノードを置いても，より順序関係の矛盾が発生して誤差が大きくなるためだと考える．それに対し，RSSI 分割測距方式を利用すると順序関係の矛盾が低減された状態でノードを仲介するため，誤差を削減することができたと考える．既存方式での RMSE が 6.4 [m] 前後に対し

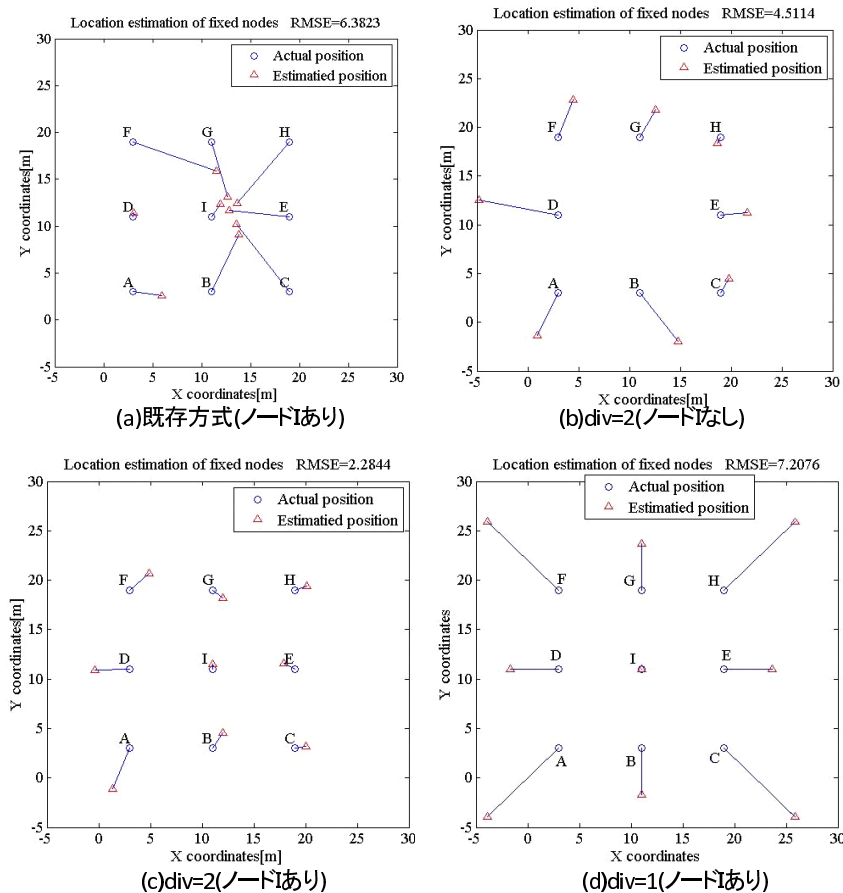


図 17 実環境での位置推定結果 (○: 真値 △: 推定値)

Fig. 17 Result of localization in experiment (○: actual position △: estimated position).

て、提案方式 ($div = 2$) でノード I を入れた場合、RMSE は 2.28 [m] となり、約 64% の誤差を削減できた。図 15 に実環境実験での距離誤差の推移 (ノード I なし)、図 16 に実環境実験での距離誤差の推移 (ノード I あり) を示す。これらの図から、分割数によっては既存方式に比べ距離誤差を削減可能であることが分かる。これは、実環境ではマルチパスの影

響で局所的に急激な電波の揺らぎが発生し、分割測距方式を利用することによって、局所的な電波の揺らぎの影響を軽減することができたためだと考える。

既存方式での位置推定表示結果を図 17 (a) で示す。今回の実験ではノードを等間隔に置いたにもかかわらず、ノード間で取得した RSSI の平均値が大きく異なっている箇所があった。そのため、既存の RSSI 測距方式では、高精度な位置推定精度が得られなかったと考える。提案方式 ($div = 2$) における位置推定表示結果を図 17 (b) と図 17 (c) に示す。提案方式 ($div = 2 \dots 5$) では、同じ距離で大きく異なる電界強度を受信しても、閾値を与えることで設定した推定距離に丸めることができるため、順序関係の矛盾が低減され大きな誤差が発生しなかったものとする。提案方式 ($div = 1$) における位置推定表示結果を図 17 (d) に示す。RMSE は既存方式より上回ってしまったが、位置推定結果を見ると既存方式よりも形が整っている。提案方式 ($div = 1$) の場合、通信が可能ならばすべて同じ距離として推定される。そのため、ノードを等間隔に置いた場合は各々の推定距離に大きな誤差が発生するが、相対的な位置関係の出力には適しているといえる。

以上の結果から、RSSI 分割測距方式を利用し、電波の揺らぎの影響を低減させた状態で仲介ノードを利用することで位置推定誤差を削減することができる。

6. まとめと今後の課題

本論文では、電子トリアージシステムを想定したモバイルノード利用型 RSSI 位置推定方式を提案し、シミュレーションおよび実環境実験でその有効性の評価を行った。シミュレーションでは、モバイルノードを利用することでマルチホップ通信によって生じる距離推定の誤差を約 65% 削減できることを示した。実環境実験では通信範囲外のノード間に仲介ノードを配置することで、シミュレーション同様に誤差を削減できることを確認でき、RSSI 分割方式を利用することで RMSE を最大 64% 削減することができた。現時点で電子トリアージシステムが想定している 2m 程度の位置推定精度への達成は実現できていないが、RADAR^{12),13)} や Active Badge¹⁴⁾ などで使用が想定されているような 4m 精度でのユーザのトラッキングシステムや、部屋レベルでの位置表示システムでは十分利用が考えられる。

電子トリアージシステムを想定した環境では、医療従事者は移動することを想定する。そのため、移動するノードが存在することを想定した実環境実験が今後の課題となる。また、傷病者や医療従事者がどのような場所にノードを取り付けるか、モバイルノードの数やどのように動くかによっても位置推定精度に影響を与えられられる。RSSI 分割測距方式では簡易的に閾値を等間隔に分割したが、RSSI は一般的に距離に近いほど急激に減衰し、遠

くなれば減衰が緩やかになることから，閾値の設定を工夫をすることでさらに高精度な位置推定が可能だと考える．今後は，電子トリアージシステムの環境をより忠実に再現するために，ノードをランダムに配置し，大規模な測定環境での位置推定精度の検証と RSSI 分割測距方式の精度改善を確認する予定である．

参 考 文 献

- 1) 東野輝夫：災害時救命救急支援を目指した人間情報センシングシステム 平成 19 年度研究実施報告書，戦略的創造研究推進事業 CREST (オンライン)，入手先 http://www.sen.jst.go.jp/result/result_h19/higashino/higashino001.pdf (参照 2010-08-22)．
- 2) Srbinovska, M., Gavrovski, C. and Dimcev, V.: Localization Estimation System Using Measurement of RSSI Based on Zigbee Standard, *Electronics'08*, pp.45–50 (2008)．
- 3) Rappaport, S.T.: *Wireless Communications: Principles and Practice*, Prentice Hall (2001)．
- 4) Barsocchi, P., Lenzi, S. and Chessa, S.: Virtual Calibrating for RSSI-based Indoor Localization with IEEE 802.15.4, *Proc. IEEE ICC*, pp.512–516 (2009)．
- 5) 立石和也，井家上哲史：RSSI 方式における減衰定数の位置推定時決定手法，電子情報通信学会技術研究報告，Vol.128, No.10, pp.1509–1515 (2008)．
- 6) 坂井丈泰：GPS 技術入門，東京電機大学出版局 (2003)．
- 7) Kruskal, B.J. and Wish, M.: *Multidimensional Scaling*, Sage Publications (1978)．
- 8) Niculescu, D. and Nath, B.: DV Based Positioning in Ad Hoc Networks, *Telecommunication Systems*, Vol.22, pp.267–280 (2003)．
- 9) Olama, M.M., Djouadi, M.S., Papageorgiou, G.I. and Charalambous, D.C.: Position and Velocity Tracking in Mobile Networks Using Particle and Kalman Filtering With Comparison, *IEEE Trans. Vehicular Technology*, Vol.57, No.2, pp.1001–1010 (2008)．
- 10) Hu, L. and Evans, D.: Localization for Mobile Sensor Networks, *Proc. ACM MobiCom 2004*, pp.45–57 (2004)．
- 11) Sun SPOT 無線センサーネットワークデバイス，ORACLE (オンライン)，入手先 <http://jp.sun.com/products/software/sunspot/> (参照 2010-08-22)．
- 12) Yanying, G., Lo, A. and Niemegeers, I.: A Survey of Indoor Positioning Systems for Wireless Personal Networks, *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, Vol.11, pp.13–32 (2009)．
- 13) Paramvir, B. and Venkata, N.P.: RADAR: An In-Building RF-based User Location and Tracking System, *Proc. IEEE Infocom*, Vol.2, pp.775–784 (2000)．
- 14) Roy, W., Andy, H., Veronica, F. and Jonathan, G.: The Active Badge Location

System, *ACM Trans. Information System (TOIS)*, Vol.10 (1992)．

(平成 22 年 9 月 5 日受付)

(平成 23 年 2 月 4 日採録)

推 薦 文

本論文は，電子トリアージシステムにおいて傷病者の位置を特定するために，モバイルノード利用型 RSSI 位置推定方式を提案し，シミュレーションおよび実環境実験を通じて評価を行った結果について述べたものである．本提案方式は，直接通信できないノード間の測距を，軽傷の傷病者や医療従事者をモバイルノードとして利用したマルチホップ通信により実現している点がユニークであり，高い新規性が認められる．また，シミュレーションと実環境実験を実施しており，多様な観点から本手法の有効性を示している点が評価できる．以上より本論文は推薦に値する．

(マルチメディア通信と分散処理研究会主査 勝本道哲)



山田 純弥

1987 年生．2010 年静岡大学情報学部情報科学科卒業．センサネットワークにおけるローカライゼーション技術に興味を持ち，特に RSSI を用いた Range-based 方式においてモバイルノードを利用する位置推定に関する研究に従事．第 71 回情報処理学会全国大会学生奨励賞受賞．現在，育英短期大学現代コミュニケーション学科在学中．



澤村 啓太

1986 年生．2011 年静岡大学情報学部情報社会学科卒業見込み．モバイルノードを利用した RSSI 位置推定技術に関する研究に従事．主に実環境での本提案手法における分割測距方式の性能評価部分を担当．2011 年 4 月より株式会社富士通アドバンスソリューションズ東海に勤務予定．



竹中 友哉 (正会員)

1983 年生。2005 年静岡大学情報学部情報科学科卒業。2006 年同大学大学院情報学研究科修士課程修了。2009 年同大学院自然科学系教育部情報科学専攻博士課程修了。同年同大学ポスドク研究員。2007 年 Mitsubishi Electric Research Laboratories (アメリカ) にて 6 カ月間、インターンシップ。2009 年日本学術振興会特別研究員。2010 年三菱電機 (株) 入社。現在、同社情報技術総合研究所に勤務。博士 (情報学)。在学中に無線マルチホップネットワークのローカライゼーション技術に関する研究に従事。電子情報通信学会会員。



峰野 博史 (正会員)

1999 年静岡大学大学院理工学研究科修士課程修了。同年日本電信電話 (株) 入社。NTT サービスインテグレーション基盤研究所を経て、2002 年 10 月より静岡大学情報学部助手。2006 年九州大学大学院システム情報科学府博士 (工学)。2011 年 4 月より静岡大学情報学部准教授。モバイルコンピューティング、センサネットワーク応用に関する研究に従事。電子情報通信学会、IEEE、ACM 各会員。



水野 忠則 (フェロー)

1945 年生。1969 年名古屋工業大学経営工学科卒業。同年三菱電機 (株) 入社。1993 年静岡大学工学部情報知識工学科教授。1996 年同大学情報学部情報科学科教授。2006 年より同大学創造科学技術大学院教授。工学博士。情報ネットワーク、モバイルコンピューティング、ユビキタスコンピューティングに関する研究に従事。著訳書としては『コンピュータネットワーク』(日経 BP)、『モダンオペレーティングシステム』(ピアソン・エデュケーション) 等がある。電子情報通信学会、IEEE、ACM、Informatics Society 各会員。情報処理学会フェロー。