

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 7 日現在

機関番号：24402

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25289115

研究課題名(和文) 通常の位置推定法が使えない環境での位置推定の実現に関する研究

研究課題名(英文) Localization techniques where conventional techniques are unusable

研究代表者

原 晋介 (Hara, Shinsuke)

大阪市立大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：80228618

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 5,700,000円

研究成果の概要(和文)：建物の内部に存在するターゲットの位置を推定する問題に対して、本研究では、複数の無人飛行体(UAVs: Unmanned Aerial Vehicles)を建物の周りに飛行させ、UAVの位置を使って位置推定を行う方法を提案している。到来時間を使った室内位置推定法に関しては、推定誤差をより小さくできるUAVのフォーメーション制御を提案し、その性能を理論解析と計算機シミュレーションにより明らかにした。一方、受信信号電力を使った室内位置推定法に関しては、建物の内部構造をワイヤレストモグラフィにより推定し、その推定結果を使って位置推定を行う方法を提案し、電波暗室の実験によりその性能を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：For the problem of localizing a target in a building, this research proposes a method of using a set of unmanned aerial vehicles (UAVs) flying around the building. In the proposed method, the set of hovering UAVs is first localized by GPS, and then the target is localized using the locations of the UAVs. For time of arrival (TOA)-based localization, a 2-step UAV formation is proposed, which can reduce the localization error. On the other hand, for received signal strength (RSS)-based localization, a method of using a signal attenuation map obtained by compressed sensing-based wireless tomography is proposed. For the TOA-based method, the performance is analyzed by theory and computer simulation, and for the RSS-based method, the performance is analyzed by experiment in an anechoic chamber.

研究分野：情報通信工学

キーワード：位置推定 到来時間 受信信号電力 無人飛行体 GPS ワイヤレストモグラフィ

1. 研究開始当初の背景

ビルや家屋等の建物で災害が起こると、生存者を救出するためにレスキュー隊員や消火活動のために消防隊員がその建物内に投入される。二次災害を防ぐためには、彼らの建物内での位置推定が必要不可欠となるが、全地球測位システム (Global Positioning System: GPS) の信号は建物内部に届かないため、GPS を使った位置推定は行えない。また、屋内に設置されている無線ローカルエリアネットワーク (Local Area Network: LAN) のアクセスポイントやセンサネットワークのアンカノードの位置が既知であれば、それらを使って位置推定は可能であるが、残念ながら、それらの位置は必ずしも既知ではないため、アクセスポイントやアンカノードを使った位置推定も行えない。さらに、カメラを使った位置推定もあるが、建物内に煙や蒸気が充満している場合、カメラ画像では何も捉えられないため、カメラを使った位置推定も行えない。

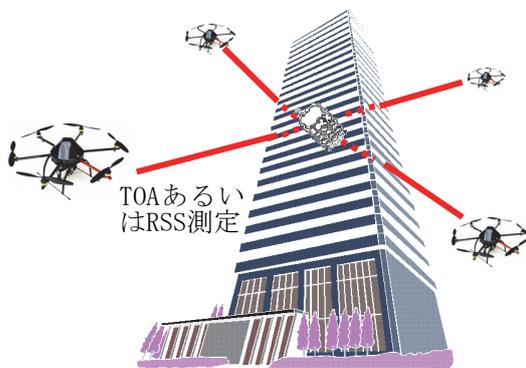


図1 UAVを用いた位置推定.

2. 研究の目的

本研究の目的は、上で述べたような、従来の方法では位置推定が行えないような環境での位置推定法の確立である。そのために、図1に示すように、ドローンのような無人飛行体 (Unmanned Aerial Vehicle: UAV) を使った位置推定法を提案する。すなわち、位置推定すべきターゲットノードとの無線通信手段を持つ UAV を建物外部に複数台飛行させ、UAV の位置は GPS で推定し、UAV の推定された位置情報を使って、つまり、UAV をアンカノードとして使って、建物内部のターゲットノードの位置を推定する階層型位置推定法を提案する。

位置推定には、大きく分けて、到来時間 (Time Of Arrival: TOA) を用いる方法と受信電力 (Received Signal Strength: RSS) を用いる方法がある。まず、TOA を用いる方法に関しては、位置推定誤差を決定する主要因として、GPS によって推定された UAV の位置誤差、UAV の台数、および UAV とターゲットノード間が見通し外 (Non-Line Of Sight: NLOS) 通信路となることによる誤差 (NLOS バイアス) が考えられるので、これらの要因が

位置推定誤差に与える影響を理論と計算機シミュレーションにより明らかし、位置推定誤差をより小さくできる UAV のフォーメーション制御を提案する。一方、RSS を用いる方法に関しては、位置推定誤差を決定する主要因として、建物の内部構造による不均一な信号減衰が考えられるので、信号減衰を推定しマップを作成し、そのマップを使って位置推定を行う方法を提案する。そして、その推定性能を実験により明らかにする。

3. 研究の方法

(1) TOA を用いる位置推定法

最尤推定に基づいた位置推定問題は、非線形関数の最小化問題として一般に定式化できる。従って、目的関数を微分し、最小値を与える解を求めることでターゲットノードの位置は推定できるが、TOA を用いる方法では、解が closed form で求まらない。従って、解を求めずに、UAV の位置誤差、UAV の台数、および NLOS バイアスが解の誤差に与える影響を調べる必要がある。

本研究では摂動法を使って誤差解析を行う。すなわち、微分された目的関数において、UAV 位置の微小変化に対する解の微小変化との関係、および TOA の微小変化に対する解の微小変化との関係を導出し、その導出された式から誤差要因の分散と推定誤差の分散との関係を理論的に導出する。

(2) TOA を用いる位置推定法における位置推定誤差をより小さくできる UAV のフォーメーション制御

建物の中心から一定距離の球面上にだけ UAV は存在できると仮定すると、位置推定誤差の分散は、UAV の位置の関数で与えられる。従って、位置推定誤差の分散をより小さくできる UAV の位置とフォーメーション制御が導出できる。

(3) RSS を用いる位置推定法における減衰マップの推定法

トモグラフィとは、物体の外部から電磁波を放射し、物体を透過あるいは反射させた電磁波を物体の外部で観測することにより、その物体の内部構造を同定しようとするものである。

建物の減衰マップを、このトモグラフィに基づいて推定する問題は、建物の外部を飛行している複数の UAV 間で無線信号を送受信し、建物内部を通過した無線信号の RSS から、その建物の二次元あるいは三次元の減衰マップを推定することを意味し、これはワイヤレストモグラフィと呼ばれる。ここで、建物の内部構造はランダムな構造ではなく、人間が生活しやすいような構造を持っているので、二次元あるいは三次元の減衰マップはスパースな構造を持っていることになる。従って、このワイヤレストモグラフィには圧縮センシングの理論が応用でき、建物外部での RSS

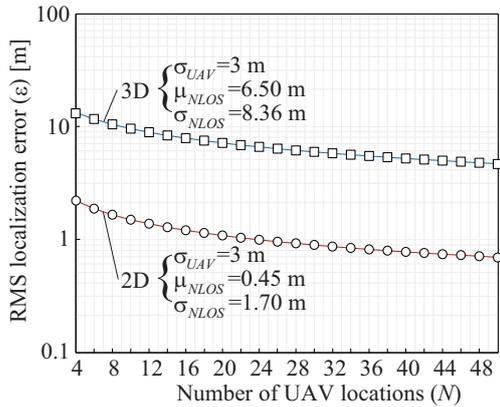


図2 TOAを用いる位置推定法の誤差特性.

測定回数が十分に少なくても、正確な減衰マップが推定できるはずである.

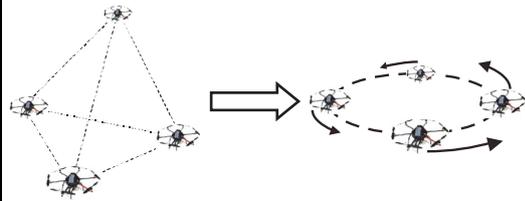
(4) 減衰マップを利用したRSSを用いる位置推定法

(3)の方法で推定された建物の減衰マップを利用すると、RSSを用いる位置推定の精度を向上させることができる. すなわち、建物内部にあるターゲットノードから送信された無線信号に対して、建物外部のUAVでRSSを測定する場合、マップで得られる無線信号の減衰を考慮すればより正確にターゲットノードの位置が推定できる.

4. 研究成果

(1) TOAを用いる位置推定法

摂動法を用いて、位置推定誤差の分散を、UAVの位置誤差、UAVの台数、およびNLOSバイアスの関数として導出することができた. その理論解析結果を図2に示す. ここで、図の縦軸と横軸はそれぞれ二乗平均平方根(Root Mean Square : RMS)位置推定誤差とUAVの台数(N)である. また、図中の σ_{UAV} 、 μ_{NLOS} と σ_{NLOS} はそれぞれUAVの位置誤差の標準偏差、NLOSバイアスの平均とNLOSバイアスの標準偏差である. さらに、3Dと2Dはそれぞれターゲットノードの位置を三次元で推定した場合と高さ既知として二次元で推定した場合の特性である. この結果より、三次元と二次元の場合ともに、UAVの位置誤差がいくら大きくても、UAVの台数を多くすれば、位置推定誤差はいくらでも小さくできることがわかる. すなわち、使えるUAVの台数がたとえ少なくても、UAVを異なる位置に移動させながらターゲットノードとのTOAを繰り返し測定すれば、仮想的にUAVの台数が増えたことになるので、すべてのTOAを用いてターゲットノードの位置を推定すれば、その推定誤差はいくらでも小さくできる. 従来の位置推定では、アンカノードの位置は固定されていて動かさなかったが、本研究で提案するUAVを使った位置推定では、UAVの位置を自由に動かすことができる. これが、提案する階層型位置推定の従来の位置推定とはまったく異なる点である.



(1) 正四面体の頂点にUAVを配置し、z軸方向(高さ)の位置を推定、固定.
(2) 推定したz軸方向の位置のx-y平面上で正方形の頂点にUAVを配置し、回転させながらx-y平面上の位置を推定.

図3 UAVのフォーメーション制御(UAVが4台の場合).

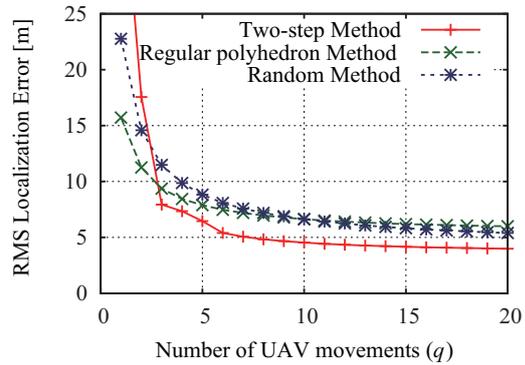


図4 UAVのフォーメーション制御を用いた場合の推定誤差特性(UAVが4台の場合).

(2) TOAを用いる位置推定法における位置推定誤差をより小さくできるUAVのフォーメーション制御

図2で三次元と二次元の場合の結果を比較すると、三次元の位置推定誤差よりも二次元の位置推定誤差が小さいことがわかる. ターゲットノードのx-y平面上的位置は連続値をとるが、建物の階層構造より、z軸方向の位置は離散値をとるので、この事実に着目すると、三次元の位置推定誤差をより小さくできるUAVの位置とフォーメーション制御を考えることができる. すなわち、UAVを順次うまく動かして、ターゲットのz軸方向の位置を最初に推定しそれを固定し、それからx-y平面上的位置を推定すれば、最終的に得られるターゲットの位置推定誤差をより小さくできる.

位置推定誤差の分散はCramer-Raoの式によりその下界が理論的に計算できる. この式を用いると、二次元の場合、N台のUAVを正N角形の頂点に配置し、ターゲットノードが中心にくるように、正N角形の形を保ったままUAVを移動させれば位置推定誤差が最小になることが証明できた. さらに、三次元の場合は、台数には制約が付くが、UAVを正多面体の頂点に配置すれば、位置推定誤差が最小になることが証明できた.

このことを利用したUAVのフォーメーション

ン制御を図3に示す. ここでは, UAV の台数を4と仮定している. ステップ1として, (1)に示すように, UAV を正四面体の頂点に配置し, ターゲットノードの三次元位置を推定し, 推定された z 軸方向の位置を固定する. そして, 次にステップ2として, (2)に示すように, 推定した z 軸方向の位置の $x-y$ 平面上で, 正方形の頂点に UAV を配置し, UAV を回転させながら $x-y$ 平面上の位置を推定する.

図4に UAV のフォーメーション制御を用いた場合の計算機シミュレーション結果を示す. ここでは, UAV の台数を4と仮定し, UAV の移動回数(q)に対する RMS 位置推定誤差を示している. また, 提案法を Two-step Method と表記し, $q=5$ までがステップ1, それ以降がステップ2である. 従って, ステップ1では, 4台の UAV は頂点数が20($=4 \times 5$)の正十二面体の頂点に順次配置される. さらに, 比較のために, すべての UAV をランダムに配置する方法と4台の UAV を正四面体に配置した後その形を保ったまま一つの UAV をランダムに移動させる方法をそれぞれ Random Method と Regular Polyhedron Method と表記し, それらの RMS 位置推定誤差も図中に示されている. 移動回数が3回以降, 提案法の特性が一番優れることがわかる.

(3) RSS を用いる位置推定法における減衰マップの推定法

図5に観測領域の分割法を示す. ここでは, x 軸と y 軸をそれぞれ N_1 と N_2 に分割し ($n_1=1, 2, \dots, N_1, n_2=1, 2, \dots, N_2$), さらに z 軸を N_3 に分割している ($n_3=1, 2, \dots, N_3$), 観測領域は合計で $N_1 N_2 N_3$ 個のブロックに分割される. 図中の黒い点は, 例えば, UAV であり, UAV 間で測定される RSS は, 直線で表されている UAV 間の経路上の各ブロックの減衰の和で与えられる. UAV は位置を変えて RSS の測定を繰り返し行い, 得られる RSS の全測定結果から, 全 $N_1 N_2 N_3$ 個のブロックの減衰を推定することがワイヤレストモグラフィ問題となる. ここで, 観測領域はスパースな構造を持っているので, 圧縮センシングを用いると, 少ない RSS 測定数で全てのブロックの減衰を推定することができる.

この圧縮センシングに基づいたワイヤレストモグラフィの性能を実験により明らかにした. 図6に示すように, 実験は電波暗室で行い, 観測領域は, 電波吸収体, ブロック, レンガと木版で構成され, 三階建ての建造物を模している. また, 電波として 2.4GHz 帯の無変調波を用いた. なお, ワイヤレストモグラフィでは正確な送受信機の位置が必要となるため, 実験では UAV を使う代わりに三次元のポジションに送受信機を取り付けた.

図7にワイヤレストモグラフィを用いた減衰マップの推定結果を示す. ここで, $N_1=7$ (20 cm 間隔), $N_2=7$ (20 cm 間隔) と $N_3=3$ (50 cm 間隔) である. 図の(1), (2)と(3)はそれぞれ一階, 二階と三階であり, 左は平面構造,

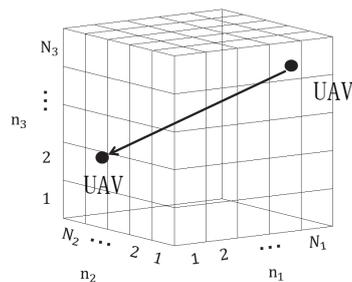


図5 観測領域の分割.



(1) 空間の内部.



(2) 空間の外部.

図6 実験のレイアウト.

そして右は推定された減衰マップである. これらの減衰マップは, RSS 測定数=810 で, 三次元のブロックをテンソル構造に見立てて直接推定するテンソル再構成を用いている. 濃い赤色が大きな減衰に対応しているので, 平面構造と推定減衰マップを比較することにより, 減衰マップから建物の内部構造が推定できていることがわかる.

(4) 減衰マップを利用した RSS を用いる位置推定法

図8に推定した減衰マップを利用した位置推定法の位置推定特性を示す. この図の位置推定誤差は, 各階に1つの発信機を設置し, 建造物の外側のポジションに取り付けた受信機で RSS を測定して得られたものである. この図の縦軸は RMS 位置推定誤差で横軸は減衰マップを推定するための RSS の測定回数である. 図中, テンソル(tensor)は三次元のブロック構造をそのままテンソルとして扱って減衰マップを推定したものであり, 行列(matrix)は $x-y$ 平面のブロックを行列として扱って減衰マップを推定したものである. さらに比較のために, 減衰マップを利用せずに位置推定を行った場合の位置推定特性も黒の破線で示されている. 全ブロック数が147であるので, RSS 測定回数が147以下でないと圧縮センシングの利点がないことになる. テンソルと行列による減衰マップ推定の結果を比較すると, テンソルによる減衰マップを利用した場合のほうが位置推定誤差が小さいことがわかる. RSS 測定回数が少ない場合, 二階での位置推定特性では, 減衰マップ

を利用しないで位置推定を行った場合の位置推定誤差が減衰マップを利用する場合の位置推定誤差よりも小さくなっている。これは二階の内部構造を推定する場合、一階と三階の内部構造の影響を受けるので、減衰マップの推定精度が高くないことに起因していると思われる。

今回の実験では、ワイヤレストモグラフィで得られた減衰マップをRSSを用いた位置推定に利用する原理を確認するために、基礎的な実験を行っただけであった。今後、さらに実験を行って、その位置推定精度を高める方法を考察する必要がある。

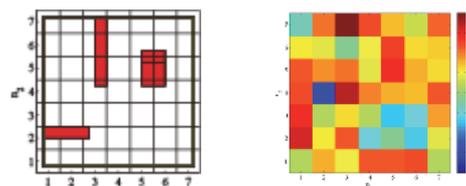
5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計2件)

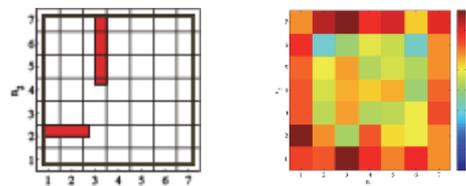
- ① Kengo Yokota, Shinsuke Hara, Takahiro Matsuda, Masaki Mukamoto, Yuki Uemura, Kenichi Takizawa, Fumie Ono, and Ryu Miura, “Experimental Evaluation on Wireless Tomography with Wireless Tomography in a Three-Dimensional Space,” 査読あり, Proceedings of the 18th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC) 2015, in CD-ROM, Hyderabad, India, 13-16 December 2015.
- ② Azusa Danjo, Yuki Watase, and Shinsuke Hara, “A Theoretical Error Analysis on Indoor TOA Localization Scheme Using Unmanned Aerial Vehicles,” 査読あり, Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference (VTC) 2015-Spring, pp. 1-5, Glasgow, UK, 11-14 May 2015, DOI: 10.1109/VTCspring.2015.7145652.

〔学会発表〕(計14件)

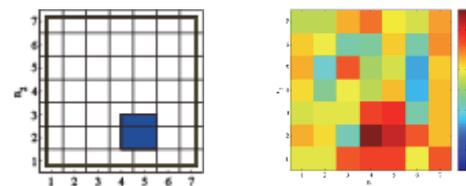
- ① 松井 康祐, 原 晋介, “最尤推定を用いた移動体間の高精度時刻同期法,” 第60回システム制御情報学会研究発表講演会 (SCI' 16), 2016年5月27日, 京都テルサ(京都府京都市)。
- ② 松井 康祐, 原 晋介, “移動物体間での時刻同期に関する一考察,” 電子情報通信学会高信頼制御通信研究会, 2016年5月13日, 機械振興会館(東京都港区)。
- ③ 壇上 梓沙, 原 晋介, “階層型屋内位置推定のためのUAVフォーメーション制御,” 電子情報通信学会高信頼制御通信研究会, 2015年12月18日, 沖縄産業支援センター(沖縄県那覇市)。
- ④ 壇上 梓沙, 原 晋介, “ランダムアクセス方式で動作するTwo-Way Rangingに関する研究,” 電子情報通信学会2015年ソサイエティ大会, 2015年9月9日, 東北大学川内キャンパス(宮城県仙台市)。
- ⑤ 横田 健吾, 原 晋介, 松田 崇弘, 向本 将規, 上村 勇貴, 滝澤 賢一, 小



(1) 1階の平面構造と推定された減衰マップ。



(2) 2階の平面構造と推定された減衰マップ。



(3) 3階の平面構造と推定された減衰マップ。

図7 減衰マップの推定(810のRSS測定を使いテンソルで再構成)。

野 文枝, 三浦 龍, “3次元空間におけるワイヤレストモグラフィの実験的評価,” 電子情報通信学会高信頼制御通信研究会, 2015年5月28日, 機械振興会館(東京都港区)。

- ⑥ 原 晋介, “無人飛行体を用いた階層型室内位置推定,” 第59回システム制御情報学会研究発表講演会 (SCI' 15), 2016年5月22日, 中央電気倶楽部(大阪府大阪市)。
- ⑦ 壇上 梓沙, 原 晋介, “Two-Way Rangingを用いた階層型位置推定法の精度向上に関する研究,” 電子情報通信学会2014年総合大会, 2015年3月10日, 立命館大学(滋賀県草津市)。
- ⑧ 大川 敬祐, 原 晋介, 松田 崇弘, “ワイヤレストモグラフィを用いた室内位置推定,” 電子情報通信学会高信頼制御通信研究会, 2014年11月20日, 北陸先端科学技術大学院大学東京サテライト(東京都港区)。
- ⑨ 渡瀬 勇氣, 原 晋介, “階層型位置推定の精度解析,” 電子情報通信学会2014年ソサイエティ大会, 2014年9月25日, 徳島大学(徳島県徳島市)。
- ⑩ 壇上 梓沙, 原 晋介, “Two-Way Rangingを用いた位置推定とクロック同期の精度向上に関する研究,” 電子情報通信学会2014年ソサイエティ大会, 2014年9月25日, 徳島大学(徳島県徳島市)。
- ⑪ 竹本 和史, 大川 敬祐, 中西 研介, 渡瀬 勇氣, 松田 崇弘, 原 晋介, 滝澤 賢一, 小野 文枝, 三浦 龍, “圧

縮センシングを用いた無線トモグラフィの性能評価,” 2014年3月10日, 電子情報通信学会移動通信ワークショップ, 早稲田大学(東京都新宿区).

- ⑫ 松田 崇弘, 原 晋介, 滝澤 賢一, 小野文枝, 三浦 龍, “通信ネットワークのための圧縮センシングを用いたトモグラフィ技術,” 2014年3月10日, 電子情報通信学会移動通信ワークショップ, 早稲田大学(東京都新宿区).
- ⑬ 大川 敬祐, 原 晋介, “通常の位置推定ができない環境での位置推定の実現に関する研究—受信電力を使ったアプローチ,” 電子情報通信学会知的環境とセンサネットワーク研究会, 2013年11月28日, 機械振興会館(東京都港区).
- ⑭ 渡瀬 勇氣, 原 晋介, “通常の位置推定ができない環境での位置推定の実現に関する研究—到来時間を使ったアプローチ,” 電子情報通信学会知的環境とセンサネットワーク研究会, 2013年11月28日, 機械振興会館(東京都港区).

[その他]

ホームページ等

<http://www.c.info.eng.osaka-cu.ac.jp/research/wireless-localization/>

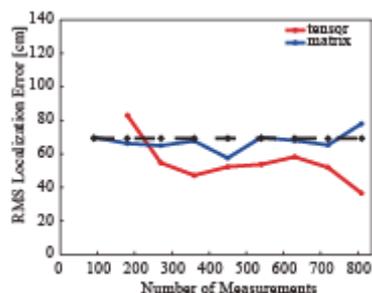
6. 研究組織

(1) 研究代表者

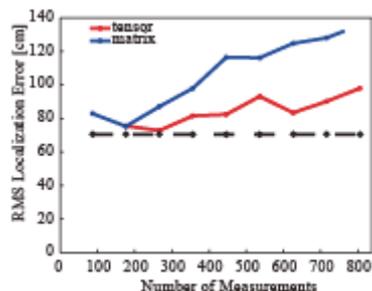
原 晋介 (HARA SHINSUKE)

大阪市立大学・大学院工学研究科・教授

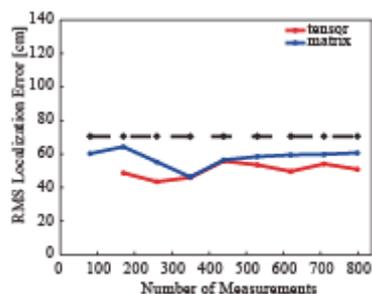
研究者番号: 80228618



(1) 1階のターゲットノードの位置推定特性.



(2) 2階のターゲットノードの位置推定特性.



(3) 3階のターゲットノードの位置推定特性.

図8 減衰マップを利用したRSSを用いる位置推定法の推定誤差特性.