

実環境における RSSI を用いた 位置推定手法の提案

富山将矢¹ 小坂隆浩²

概要: 無人航空機 (UAV) は地形条件に影響されないため簡単に移動でき、災害現場での活躍が期待されています。災害現場において、UAV は主に空撮のため使用されているが、瓦礫に埋もれた被災者など空撮では発見できない場合も多い。一方、被災者発見に対して、RSSI (Received Signal Strength Indicator) を用いた位置推定手法が提案されている。RSSI とは、無線通信機器が受信する信号の強度を表す値である。被災者は、端末 (スマートフォン等) を持っている可能性が高く、被災者の位置推定に利用可能である。本研究では、障害物に囲まれた実環境下における RSSI を用いた被災者の位置推定手法を提案した。被災者発見の精度改善、時間短縮への有用性について、提案手法を市街地による実験により評価した。

キーワード: UAV, RSSI, 位置推定

Proposal of a Location Estimation Method using RSSI in Real Environment

MASAYA TOMIYAMA^{†1} TAKAHIRO KOITA^{†2}

Abstract: Unmanned aerial vehicles (UAVs) are expected to play an active role in disaster sites because they are not affected by terrain conditions and can move easily. UAVs are mainly used for aerial photography at disaster sites, but there are many cases where victims buried in rubble cannot be found by aerial photography. On the other hand, a location estimation method using RSSI (Received Signal Strength Indicator) has been proposed for finding victims. RSSI is a value that indicates the strength of the signal received by a wireless communication device. The RSSI is a value that indicates the strength of the signal received by a wireless communication device, and can be used to estimate the location of disaster victims because they are likely to have a device (such as a smartphone). In this study, we proposed a method for estimating the location of victims using RSSI in a real environment surrounded by obstacles. The usefulness of the proposed method for improving the accuracy and shortening the time for finding victims was evaluated by experiments in urban areas.

Keywords: UAV, RSSI, Location Estimation

1. はじめに

1.1 早期探索と救助の重要性

昨今、世界では災害が頻発しており、地震、津波、台風、異常気象などが人間の生活や社会活動に大きな被害をもたらしている。日本は世界でも有数の災害大国と言われており、地震、津波、火山噴火、台風、大雨などが立地条件、地形、地質、気象条件などにより発生しやすい。

地震の頻発や、南海トラフ巨大地震への懸念による防災意識の高まりから、耐震設計の建物は増えている。しかし、まだまだ多くの建物が耐震化されておらず、南海巨大地震による大規模な被害が予想されている。地震が発生すると、建物の倒壊により人が閉じ込められ、救助を必要とする状態になることは避けられない。また、近年の豪雨で街が水没し、多くの被災者が取り残される可能性もある。探索・救助活動は、まず自衛隊をはじめとする救助隊に要請し、被災地での探索を開始する。

探索と救助に要する時間は非常に重要である。人が飲ま

ず食わずで生きられる限界が 72 時間であることから、人命救助は「災害発生後 72 時間が勝負」と言われている。1995 年 1 月 17 日の兵庫県南部地震 (阪神・淡路大震災) では、発生から 3 日後に生存者数が激減した。発見時には生きていても、それ以降に救出された人は結局、死亡してしまったというケースもある。

災害の規模が大きくなればなるほど、被災者の早期発見・早期復旧は困難になる。例えば、道路や建物の倒壊により、探索隊や救助隊が被災地に入ることが困難な場合がある。

また、道路は大雨で冠水し、土砂で分断されていることが多く、被災者の発見・救出には時間がかかる。道路や建物が倒壊した場所を救助隊が探索する際には、より多くの被災者を探索するために障害物を取り除きながら進まなければならない。この撤去作業が決定的な時間のロスになりやすい。被災者の存在をより早く確認できれば、撤去作業や救助作業を最小限に抑えることができ、結果的に被災者をより早く救出することが可能になる。

1.2 Unmanned Aerial Vehicles (UAVs)

防災の分野では、無人航空機 (UAV) の活用が注目され

¹ 同志社大学院
Graduate School of Engineering Doshisha University
² 同志社大学
Doshisha University

ている。UAV は、災害時に立ち入りが困難な場所でも飛行することができる。また、地形に左右されない高い機動性は、瓦礫の中に埋もれている被災者の存在を確認・発見するのに役立つ。そのため、災害時の救助時間を短縮することができる。

1.3 RSSI を用いた位置推定手法

RSSI (Received Signal Strength Indicator) を用いた位置推定は、UAV を使って被災者を探索する方法の 1 つです。被災者は端末 (スマートフォンなど) を持っている可能性が高く、この端末がプローブパケット信号を送信する。プローブパケット信号とは、端末が定期的に発する信号のことで、端末が近くの AP (アクセスポイント) を探すアクティブスキャンを行う際に送信される。

災害時には、インフラの破壊や建物の倒壊などにより、アクセスポイントが機能しないことが多い。しかし、送信元の Wi-Fi 機能が動作していればプローブパケット信号が送信され、災害時に被害者の端末が使用できる場合には有効になる。プローブパケット信号は、受信した信号の強さを表す RSSI という値で表される。RSSI は、無線通信機器が受信した信号の強さを表すものである。アクセスポイントから端末までの距離が長くなると RSSI が大きくなり、被災者の位置を推定することが可能になる。

1.4 目的

本研究の目的は、災害時に被災者を一刻も早く救出することである。実際の環境では、RSSI は障害物や周囲の環境の影響を受け、値が不安定になったり、送信間隔が不規則になったりするなどの問題がある。これらの問題は、位置推定の精度を著しく低下させ、被災者の迅速な救出を妨げる。この問題を解決するために本研究では、実環境において障害物により劣化した RSSI から端末の位置を正確に予測することが困難な場合に、測定した RSSI の偏差を利用した端末の位置推定手法を提案する。本手法は、実環境での位置推定を前提としている点に特徴がある。従来の RSSI を用いた位置推定手法の多くは、障害物がない状態であらかじめ s その地点の RSSI を測定し、障害物がある状態でも位置推定を可能にしている [1-4]。しかし、実際の被災地では、RSSI を事前に測定することはほぼ不可能である。そこで本研究では、RSSI を事前に測定するのではなく、障害物がある状態で測定した RSSI を利用して位置推定を行う。

2. 先行研究

2.1 被災者位置推定に対する UAV 飛行アルゴリズム

辰巳らは、プローブパケット信号の信号強度に基づいて飛行経路を決定する UAV 飛行アルゴリズムを提案した [5]。辰巳らは、UAV を用いて被災者のプローブパケット信号の通信距離、受信強度、送信頻度を調査する方法として、辰巳らの提案手法は、探索開始から被害者発見までを自動化することで、探索場所の絞り込みによる飛行時間の短縮

や、定点観測によるプローブ要求の受信精度の向上を可能にした。この被災者位置推定手法において、彼らは以下の飛行アルゴリズムを使用した。この手法を第 5 章、第 6 章で既存手法として採用し、実験を行った。先行研究手法の概要を以下に示す。

- 1) 開始地点でパケット収集、メッシュサイズを設定
- 2) 東西南北いずれかの方向に移動
- 3) 移動先の地点でパケット収集
- 4) 開始地点に戻っていなければ、これまで測定した地点を頂点に含む正方形を描くように移動
- 5) 開始地点に戻るまで 4) の操作を繰り返す
- 6) 開始地点に戻ったら、各測定地点の信号強度 (受信量) の平均を比較
- 7) 最も平均値の最大値をとった地点を次の開始地点とする
- 8) 以降の飛行経路は 7) の地点を中心に点対称な正方形を描くように移動

2.2 Wi-Fi センシング機能を搭載した無人航空機による携帯ゲーム端末の探知実験

実環境では、障害物などの影響で RSSI の値が不安定になったり送信間隔が乱れたりすることがある。実際には、子どもを含めてスマートフォンを持っていない人もいることから、榎原らは携帯ゲーム機「Nintendo 2DS LL」を対象とし、Wi-Fi ビーコンを発する携帯端末であればどのようなものでも検知できることを示した [6]。続いて榎原らは、携帯ゲーム機の RSSI を室内と車内で測定し、障害物によって RSSI が低下すると結論づけている。

3. 予備実験

本研究では、RSSI が周囲の環境によってどの程度影響を受けるのか、RSSI を測定する際に何 m の差が必要なのか、測定できる最大の RSSI 値を調べるために、さまざまな環境、条件、機器で RSSI を測定する予備実験を行った。

3.1 実験概要

予備実験では、ネットワークアナライザソフトウェアである Wireshark を用いて、異なる環境、異なる条件で RSSI を測定した。被害者が所持していると予想される Wi-Fi 機能付きの端末として、Android (Nexus 5x)、iPhone (X)、PC (Mac) の 3 種類を用意した。端末はそれぞれの環境において、0m 地点の地面に設置しました。測定用 PC は、地上から約 1.2m の高さで固定した。図 1 はコンクリートの環境、図 2 は芝生の環境、図 3 は運動場の環境である。環境は、舗装された道路上 (コンクリート)、芝生、運動場の 3 種類で行った。運動場は障害物がない環境、コンクリートは障害物が少しある環境、芝生は障害物がある環境とした。芝生の環境には多くの障害物があると想定される。天候は



図 1 実験環境：舗装された道路（コンクリート）

Figure 1 Location where preliminary tests were carried out (concrete)



図 2 実験環境：運動場

Figure 2 Location where preliminary tests were carried out (playground)



図 3 実験環境：草むら

Figure 3 Location where preliminary tests were carried out (grass)

表 1 RSSI の外れ値数と全体の RSSI 数

Table 1 Number of RSSI outliers and total number of RSSI

	Concrete	Playground	Grass	Total
Number of RSSI outliers	36	25	55	116
Total number of RSSI	259	255	258	772

晴天であった。各環境、各距離間隔で、1 分間に 4 回（約 100 パケット）の RSSI を測定した。5m 間隔で測定し、間隔が RSSI に与える影響について調査した。

3.2 結果と考察

表 1 に、各環境における RSSI の外れ値の数と全体の RSSI 数を示している。コンクリート上の環境では 259 個の RSSI のうち 36 個の外れ値が存在した。運動場の環境では、255 個の RSSI のうち、25 個の外れ値が存在した。芝生の環境では、合計 258 個のうち 55 個の RSSI の外れ値が存在した。全体では RSSI 合計 772 個のうち、116 個の外れ値が存在した。外れ値はある一定期間集団で発生する傾向がある。そのためすべての外れ値が位置推定に悪影響を与えるわけではないが、その数は無視できない。障害物の少ない運動場では外れ値が少なく、障害物の多い草むらでは外れ値が多くなっていて、障害物が多い芝生では外れ値が運動場の 2 倍以上になった。したがって、このような障害物の有無も外れ値の発生に影響を与えている可能性がある。

いずれの環境、端末でも髭や外れ値が存在する。位置推定においては、外れ値だけでなく髭に対応する部分も RSSI も外れ値とみなす必要がある。位置推定の精度を上げるためには、位置を推定したい場所であらかじめ RSSI を測定し、その平均値や外れ値の情報を得ることが一番の近道である。しかし、実際の災害時で位置推定を行う場合、その場所の RSSI を事前に計測することができないため、位置推定時に測定した RSSI が外れ値であるかどうかを判断することは困難である[7]。そこで本研究では、RSSI の偏差を用いて、測定に外れ値もしくは不安定な値が存在するかを確認する。

4. 提案手法

UAV の位置推定手法の課題と提案手法について述べる。ここでは、障害物による RSSI の増減に注目する。RSSI は、通常アクセスポイントと端末との距離が短くなると増加する。しかし、RSSI は周囲の物体や電波、端末自身の影響を受けて外れ値が発生するため不安定である。先行研究では、端末と UAV の距離が離れている場合に端末の正確な位置を得るために、外れ値の影響が大きい地点から離れることができ、かつ端末の 5m 以内に計測地点をとることができる方法について述べられている[8]。鳥崎らは、端末からの距離が、40m~60m の時に RSSI の変動が小さく、外れ値を含む計測では正確な位置を推定できないと述べている。端末と UAV の距離が近い場合は測定間隔 10m でも外れ値の

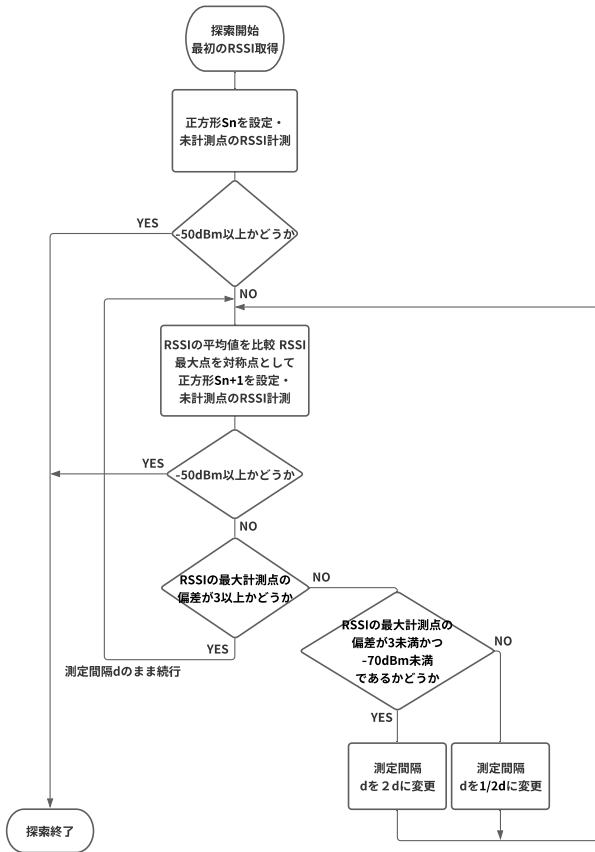


図 4 提案手法のフローチャート

Figure 4 Flowchart of the proposed method

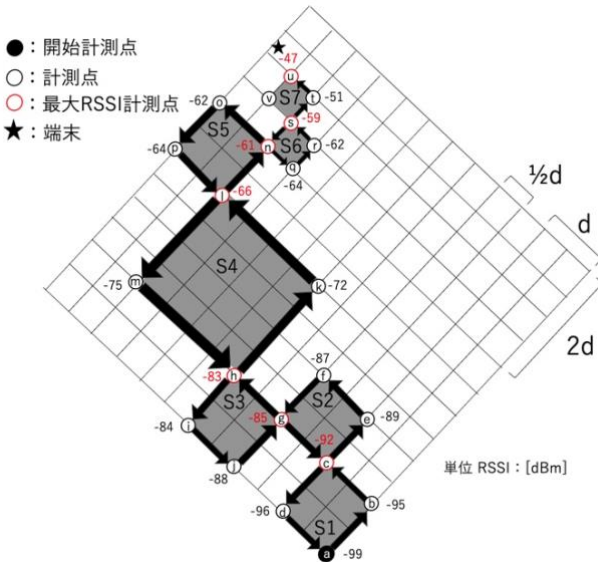


図 5 測定間隔を d とした場合の動作例

Figure 5 Overall flow of the proposed method

影響が小さくなるが、端末と UAV の距離が遠い場合はノイズの影響を無視できないため測定間隔を 10m より長くする必要があると結論づけている。よって本研究では、RSSI の偏差を利用することで、距離に応じて測定間隔を変更する手法を提案する。提案手法の概要を以下に示す。

1) 頂点の始点を含む正方形 S_n を設定し、測定間隔 d は一辺の長さとする。最初は $n=1$ とする。

2) 設定した正方形の頂点の未測定点の RSSI を測定し、平均値を計算する。

3) 設定した正方形の 4 つの頂点の RSSI を比較し、RSSI の最大計測点を対称点として点対称に移動させた正方形を正方形 S_{n+1} として新たに設定する。

4) 3) で測定した 4 つの RSSI の偏差を計算し、比較する。

4-1) RSSI の最大計測点の偏差が 3 未満かつ -70dBm 未満であった場合、 d を $2d$ に変更する。RSSI の最大計測点の偏差が 3 未満かつ -70dBm 以上の場合、 d を $1/2d$ に変更する。

4-2) RSSI の最大計測点の偏差が 3 以上の時、測定間隔を d とする。

5) 測定点の RSSI が -50dBm を超えた場合、被災者の位置が推定されたと判断する。そうでなければ、 n を大きくして 2) に戻る。

提案手法の独創性は、主に 4) にある。3) で測定した RSSI の偏差を計算することにより、障害物の影響で距離に応じた RSSI の変動が見られなかった時に、誤った方向に進んでしまうことを防ぎ、また測定間隔を変更することで探索時間の短縮ができる。鳥崎[7]により、RSSI が -70dBm 未満では、距離に応じた RSSI の変動が小さく、外れ値の存在を考えると、測定間隔を大きくする必要がある。逆に、RSSI が -70dBm 以上では、距離に応じた RSSI の変動が大きいため、端末の位置推定を詳細に行うには、測定間隔を小さくすることにより精度改善を図る。

図 4 は提案手法のフローチャートである。図 5 は、測定間隔を d とした場合の提案手法の動作例を示したものである。まず、開始点を頂点に含む正方形 S_1 を設定します。 S_1 の 4 つの頂点における RSSI の測定値の平均は、a: -99dBm , b: -95dBm , c: -92dBm , d: -96dBm であった。この時、RSSI の最大値は c であり c の偏差は 3.5 であるため、c を対称点として点対称させた正方形 S_2 を設定した。次に、 S_2 の残りの 3 つの頂点の RSSI を測定したところ、e: -89dBm , f: -87dBm , g: -85dBm であった。同じように、RSSI の最大点は g であり g の偏差は 3.25 であるために、図のように S_3 を設定した。同じように RSSI を測定し平均をとると RSSI 最大点は h で偏差は 2 となる。よって、偏差が 3 未満かつ -70dBm 未満であるため、測定間隔を $2d$ に変更した S_4 を設定した。 S_4 では RSSI 最大点は i で偏差は 8 となる。よって測定間隔を d に変更して S_5 を設定した。 S_5 での RSSI 最大点は n で偏差は 2.5 であった。偏差が 3 未満かつ -70dBm 以上であるため、測定間隔を $1/2d$ に変更した S_6 を設定した。同様に S_6 での RSSI 最大点は s で偏差は 2.5 であったため測定間隔は $1/2d$ のまま S_7 を設定した。そして、u の地点で -47dBm を計測したため、端末の位置が推定されたとして探索

を終了した。このようにして正方形の S_n を形成しながら被災者の位置を推定する。

5. 評価実験

提案手法を評価するために、測定間隔 d の長さを変え、既存手法[5]と提案手法の2つの方法で、実環境で実験を行った。RSSIの測定は、PC上でWiresharkというネットワークアナライザソフトを用いて行った。被災者の端末として、iPhone (X) を使用した。先行研究[8]では、1~5メートルの高度では結果にあまり影響しないことが確認されている。しかし、この先行研究[9]では、特殊なデバイスを搭載したUAVを使用したところ、飛行が不安定になった(図6)。そこで今回の実験では、UAVを使わずに実験者が代わりに動く形で実施した。実際にUAVを使用した場合と同じ速度、同じ待機時間で移動することで、UAVを使用しない実験の妥当性、実用性を確保した。また、高度は一定にするために測定用PCは予備実験と同様、地上から約1.2mの高さに設置した。正方形の1点のRSSI測定時間は15秒として、その間に計測したRSSIの平均を取った。環境は、市街地内にある公園(図7)と駐車場(図8)の2種類で行った。公園は市街地にはあるが、比較的周りに建物が少ない開放的な場所である。逆に駐車場の周囲には多くの建物があり、駐車場内にも車などの障害物が多く存在する場所である。実験時の天気は晴れであった。過度に短い間隔ではRSSIの差が出ないため、予備実験の結果より測定間隔である正方形の一辺の長さ d を5mとして基本の間隔距離とした。提案手法でも同様に、測定間隔である正方形の一辺の長さ d を5mとして基本の間隔距離とした。そのため、提案手法内での $2d$ は10m、 $1/2d$ は2.5mとなる。RSSIが-50dBmを超えた時点で位置推定が完了したと判断した。先行研究[8]から、RSSIを測定できる最大距離は約50mであることがわかっているため、約50m離れた場所に端末を置き、最初にRSSIを計測した場所から実験を開始した。予備実験と同様に、端末はそれぞれの環境の地面に0mの位置に設置し、生存者の位置を推定するのに適したUAV1機の最大飛行時間を考慮して、各探索の終了時間を30分に設定した。



図6 先行研究[9]で使用した特殊装置を搭載したUAV
 Figure 6 UAV equipped with the special device used in the previous study [9]



図7 実験を行った公園

Figure 7 Park where the experiment was conducted



図8 実験を行った駐車場

Figure 8 Parking lot where the experiment was conducted

6. 結果と考察

6.1 結果

図9に公園の結果、図10に駐車場の結果を示す。それぞれ、既存手法と提案手法の探索時間と成功率を示している。図9の公園の結果に注目すると、既存方法では、成功するまでの平均探索時間は22.2分、全体の探索時間は24.4分、成功率は70%であった。提案手法では成功するまでの平均探索時間は18.6分、失敗を含めた全体の平均時間は20.2分、成功率は90%であった。障害物が少ないこともあり、既存手法でも成功率は高かったが、提案手法はそれぞれ約3.6分、4.2分探索時間の削減に成功した。

図10の駐車場結果に注目する。既存方法では、成功するまでの平均探索時間は25.6分、全体の探索時間は28.2分、成功率は40%であった。提案手法では成功するまでの平均探索時間は21分、失敗を含めた全体の平均時間は22.8分、成功率は80%であった。駐車場は端末との間に車などの障害物が多く存在し、また駐車場の周りのすぐ近くに多くの建物が存在するため、RSSIの外れ値が多く発生してしまう。そのため既存手法では、RSSIの外れ値の影響や、距離によるRSSIの変動が小さい地点では、正しい方向付けができずに、探索が滞ってしまう。その結果探索失敗の

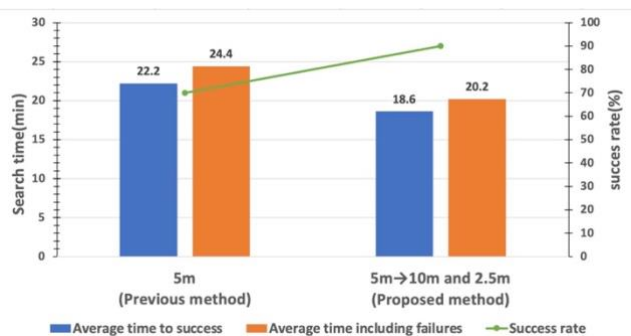


図 9 公園での結果

Figure 9 The results in the park

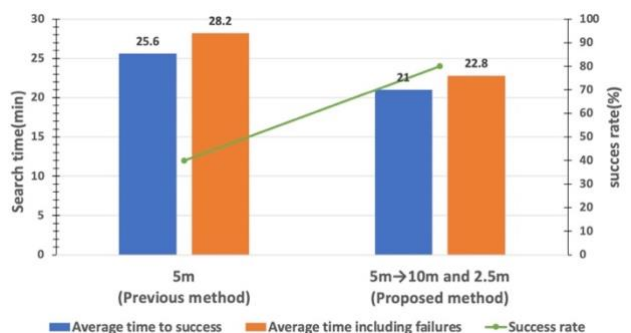


図 10 駐車場で結果

Figure 10 The results in the parking lot

ケースが増えてしまい、成功率が40%まで下がってしまった。提案手法では、RSSIの外れ値や距離によるRSSIの変動が小さい地点で測定間隔を変更することで、正しい方向付けとその箇所からの迅速な移動ができたため、成功率、探索時間共に良い結果が得られた。

6.2 考察

提案手法の独創性である測定したRSSIの偏差を用いて、測定間隔を大きくする(実験時には $d \rightarrow 2d$)ことによって、外れ値が発生する時間、地点、もしくは距離の差によるRSSIの変動が小さい地点においても、端末への方向付けを誤る回数を減らすことができ、成功率と探索時間の削減が得られた。しかし、もう一つの要素であった、より詳細な端末の位置を探索するために行った、端末との距離が近くなり距離の差によるRSSIの変動が大きい地点で測定間隔を小さくする(実験時には $d \rightarrow 1/2d$)手法を実施し、効果を得られた試行もあったが、かえって探索時間がかかってしまった原因になる場合があった。端末との距離が近くなった場合に、大きい測定間隔で正方形を設定していると-50dBmを超える位置に頂点を設定できず、端末の周りをUAVが行き来してしまうことを防ぐ目的があったが、必ずしも行き来してしまうわけではないので、更なる探索時間の短縮には、より状況にあったUAVの移動の場合分けが必要であるとわかった。

7. まとめ

本研究の目的は、実環境におけるUAVを用いた位置推

定アルゴリズムを提案することである。この目的を達成するために、RSSIの偏差を用いて探索時の正方形の1辺である測定間隔を変化させる手法を提案した。この手法を実環境で評価するために、周りに障害物の少ない公園と障害物が多い駐車場で、提案手法と既存手法を用いた位置推定実験を行った。その結果被災者の位置推定の成功率の向上と探索時間の削減が得られた。また今後の課題として、測定時間やUAV側の制約などの条件も被災者位置推定の成功率や探索時間に影響するため考慮する必要がある。

参考文献

- [1] 中井若菜, 勝間亮. 少数の障害物によるRSSI距離測定誤差に耐性のある室内位置推定手法. 第27回マルチメディア通信と分散処理ワークショップ論文集, pp. 39-47, 2019.
- [2] 大坂久登, 阿部亨, 菅沼拓夫. UAVを用いた屋外センサ位置推定の精度向上に関する基本設計. 信学技報, vol. 116, no. 361, pp. 63-68, 2016.
- [3] 古舘達也, 堀川三好, 菅原光政. 受信信号強度を用いた屋内測位手法の提案. 情報研究報告高度交通システムとスマートコミュニティ(ITS), vol. 21, pp. 1-8, 2014.
- [4] N. Suzuki, J. L. F. Zamora, S. Kashiara and S. Yamaguchi, "SOSCast: Location Estimation of Immobilized Persons through SOS Message Propagation," Proc. of the 2012 Fourth International Conference on Intelligent Networking and Collaborative Systems, pp. 428-435, 2012.
- [5] Y. Tatsumi, H. Kawanaka and T. Koita, "A Path-Planning Algorithm for UAV Position-Estimation Systems at Disaster Sites," Proc. of the 2018 IEEE 24th International Conference on Embedded and Real-Time Computing Systems and Applications (RTCSA), Hakodate, pp. 248-249, 2018.
- [6] 樫原茂, 山本篤史, 松崎健太, 宮崎康成, 関智也, 浦川豪, 福本昌弘, 太田能. Wi-Fi センシング機能を搭載した無人航空機による携帯ゲーム端末の探知実験, 電子情報通信学会, 信学技法, vol.ITS-77, pp.1-6, 2019.
- [7] M. Tomiyama, Y. Takeda and T. Koita, "Location estimation algorithm using UAV for real environments," Proc. of the 2020 Eighth International Symposium on Computing and Networking Workshops (CANDARW), pp.486-488, 2020.
- [8] 鳥崎哲成, 被災者位置推定システムにおけるUAV飛行アルゴリズムの提案, 2018年度同志社大学修士論文, 2019.
- [9] 米田美波, 小坂隆浩. コンテンツ指向ネットワークにおける飛行ルータの移動経路に関する考察, 情報科学技術フォーラム(FIT), L-013, 2017.