

Wi-Fi 電波を用いたデバイスフリー屋内測位

代表研究者 下坂正倫 国立大学法人 東京工業大学 情報理工学院

1 序論

屋内における位置情報は、ユビキタスコンピューティングの基盤技術として着目されており、その中でも Wi-Fi 信号を用いた屋内位置の推定手法は実用性が高い技術として議論されている。Wi-Fi を用いた屋内測位技術として従来から使用されている Received signal strength indicator (RSSI) [1][2]の他に、Channel state information (CSI) [3], Round trip time (RTT) [5]といったプロトコルを用いた高精度な測位が提案されている。この中でも、RTT は RSSI よりもノイズが乗りにくい特性を持つことと、近年 IEEE 802.11mc 規格として規定され一般の端末でも容易に使用可能となったため、実用性の観点から大きく着目され始めた技術である。

現在、RTT の使用方法として、端末と基地局間の高精度な距離測量を用いた端末位置測位の議論が数多く行われている [6][7]。この枠組みでは、多くの研究者が、より高精度な RTT 測位手法の実現や、RTT 測位に必要な基地局位置の推定 [8], また基地局位置によらない RTT 測位 [6] など、端末を保持した測位対象者の高精度屋内測位を目指している。しかし、RTT に対する屋内測位手法は、上記の端末位置の高精度屋内測位の議論にとどまっており、まだ Wi-Fi RTT を用いた新しい応用の開拓について、議論が不足している。

一方、現在、社会では COVID-19 の影響により、濃厚接触者やクラスター、混雑の検知の観点で、部屋レベルの複数人の屋内位置の同時測位技術の需要が大きく高まっている。この屋内の複数人屋内測位問題の特徴として、測位対象者が端末を持っているとは限らず、端末保持者に対する測位だけでは、測位対象者全員の測位が行えないという問題がある。この屋内測位情報の抜けは、濃厚接触者やクラスター、混雑の検知への応用の際、信頼度を大きく下げってしまうため、大きな問題となる。つまり、端末の有無に関わらず、対象環境中の複数人の屋内測位を実現できる、デバイスフリー屋内測位技術の構築が必要である。

そこで、本研究課題では RTT 情報の新たな応用手法として、RTT 情報を用いたデバイスフリー複数人屋内測位を開発し、有効性を検証する。今まで距離測定のみで使用されてきた RTT を、対象環境に基地局と端末を複数設置し、電波干渉の発生をセンサ反応として使用する新規な実現方法であり、対象環境における人の密度推定として具現化する。これは RTT を用いた対象環境内の複数人の人位置について、デバイスを持たずとも検知する技術である。また、本研究課題では、Wi-Fi RTT に限定せず、近年注目を浴びる UWB プロトコルにおける RTT 情報を用いたデバイスフリー複数人測位システムを試作し、性能評価を実施する。

2 関連研究

2-1 Wi-Fi RSSI や CSI を用いた測位

Wi-Fi を用いた測位手法として、信号強度である RSSI を用いた手法が多く研究されている [1][2]。これらの手法では、RSSI を並べたベクトルである fingerprint を入力として、教師データとのマッチングを行うことにより、対象となる端末の測位を行う手法である。また、近年、より正確な測位を目指して、Wi-Fi の電波の周波数などといった Channel State Information (CSI) を用いた測位技術も多く研究されている [3][4]。この枠組みでは複数のアンテナを持つ受信機にて周波数を取得し、複数のアンテナの距離に基づいて位相差を計算することにより、端末の存在する角度情報を得ることで高精度な測位を実現する手法である。この CSI は、高精度な測位を実現する反面、特殊なハードウェアやソフトウェアを必要とするため、実用性が低いという問題が存在する。

2-2 Wi-Fi RTT を用いた測位

現在、新たに IEEE 802.11mc 規格として規定された RTT が、高精度な測位のためのプロトコルとして着目されている。この RTT は、基地局と端末間の通信時間情報を用いて、その間の距離を測量する技術である。この RTT の特徴として、時間情報を用いるため RSSI と異なりそもそものノイズ量が少ないことや、規格化されているため特殊な端末が必要とせず実用性が高いことが挙げられ、これから普及していくことが予想される。この RTT によって計測される距離測量を用いて、多くの研究者が、高精度な RTT 測位手法の実現[9][10]や、RTT 測位に必要な基地局位置の推定[8]、また基地局位置によらない RTT 測位[6]など、端末を保持した測位対象者の高精度屋内測位を目指している。

Schauer らは、RTT を用いた距離測量において、ハードウェアが変化した際の特性や、取得される通信時間への様々なフィルタリングの性能を詳細に評価している。また、Choi ら[8]は、Wi-Fi RTT を用いた三角測量による屋内測位技術に必須となる基地局の位置を推定する手法を提案している。Hashem ら[6]は、基地局位置が未知である環境への適用を行うため、RTT による Fingerprint を用いた測位への発展を行なった。これらの手法に代表されるように、現在、RTT を用いた測位では、距離測量結果を用いた端末位置の高精度な測位についての議論にとどまっている。つまり、新たな指標を用いた測位が議論されているが、そのほかの応用はまだ不十分である。

2-3 RTT を用いた人の検知の応用技術

この RTT を用いた応用手法であるが、Wi-Fi RTT と同様の指標である UWB RTT を用いた応用技術として、人が通過しているかの検知といった人の検知技術が提案されている[11][12]。一つ目の手法では、天井に RTT の送受信機を設置し、RTT の反射波について干渉を検知することで通過人数を検知している[11]。また、二つ目の手法では、同様に天井に RTT の送受信機を設置し、RTT の干渉を検知することで、3m 四方程度の環境における人の有無の検知を行なっている[12]。

これらの手法では、RTT を用いて人の存在の検知という新たな応用手法を提案しているものの、狭い範囲の一人の検知にとどまっている。そのため、現在 COVID-19 で必要とされているクラスタの検知や多人数の測位、混雑の推定などへの適用が不可能である。この点に注目し、本研究課題では、Wi-Fi RTT を用いたデバイスフリー複数人屋内測位の実現に取り組んだ。

3 往復遅延時間 (RTT) を用いた複数人デバイスレス屋内測位の計測原理

まず、本研究で提案する往復遅延時間 (RTT) を用いた密度検知に基づいた複数人を対象とするデバイスレス屋内測位について問題設定を行い、その後、一人の学習データから複数人の測位を実現するための議論を行う。

3-1 RTT を用いた密度推定によるデバイスフリー複数人屋内測位

今まで、RTT を用いた距離測量を使用した屋内測位として、三角測量を用いた端末位置の検出による測位の議論が行われてきた。この手法では、3つの基地局が存在する環境において、それぞれの基地局から端末までの測定された距離を半径とした円に対する交点に端末が存在するといった検出を行うことで、端末位置の推定を行う手法である。この手法は、RTT が時間指標を用いているため、測定距離に対する誤差が少ないという特性を持ち、RSSI による三角測量と異なり、高精度に測位が行えるというものである。

一方、この検出手法による測位では、基地局と端末の間の距離測量を直接測位に用いるため、測位対象者が端末を保持する必要がある。つまり、環境中の測位対象者全員が端末を持つ必要がある。この全員が端末を持つ必要がある検出による手法は、端末を持つ一人一人の高精度な測位を行うことに即した技術である。

しかし、対象環境中の混雑検知や接触検知の目的では、端末の有無に関わらない環境中全員の測位が必要となる。端末による距離検知による屋内測位手法では、環境中の端末を持たない人に対する測位が不可能であるため、上記の目的に使用できない。

本研究課題で構築する枠組みでは、環境中の複数人の検知を端末の有無に限らず複数人の測位を行うため、環境中に基地局と端末を配置しセンサとして使用する。その際、基地局と端末の間を人が遮った際に、Wi-Fi 信号への人体の干渉により、RTT による距離測量結果が変化することに着目する。つまり、RTT の人体の干渉から環境内部の変化を検知できることを利用し、環境内部の人の密度を推定する。RTT を用いて各測位対象位置にどの程度人が存在するか、という人体の存在密度としてモデル化する。この枠組みでは、測位対象者の端末所有を前提としない。それゆえ、今まで端末の検出に基づいた測位のみ議論されていた RTT 情報を用いて、新たに、現在 COVID-19 の影響で需要が大幅に高まっている部屋内の複数人の屋内測位へと展開が期待できる。

本研究で提案する密度推定による複数人屋内測位は、環境中に複数個の Wi-Fi 基地局（および複数個の受信端末）を配置し、それらのペアで取得される RTT から計算される距離を入力として密度推定モデルを構築する。本研究で定義した密度推定による複数人屋内測位における特筆すべきは、環境中に一人が存在する教師データの学習のみで、複数人の測位を実現できるフレームワークという点である。

3-2 人体遮蔽による Wi-Fi RTT 信号強度変化

RTT を用いた人デバイスレス屋内測位の実現のため、着目する RTT の性質である、RTT の遮蔽による信号強度変化について述べる。まず、本研究で使用する RTT は基地局と端末間の電波到達時間であり、この時間を用いて距離を計測する指標である[13]。この測定方法に起因し、この電波到達時間が変化すると測定される距離も変化の特徴を持つ。また、この電波到達時間は環境要因や間に人が入り干渉するなど、直接波が干渉されることで計測できなくなるため、反射波や回折波の電波到達時間が計測されるようになる。つまり、信号の直接波が存在するかどうかで、RTT が変化し、測定される距離が変化する。本研究では、直接波のパス状に人などが入った際、人体による直接波の吸収が行われることで、反射波や回折波の測定値に変化することで通信の時間が長くなり、測定される距離が長くなるという現象を利用する。

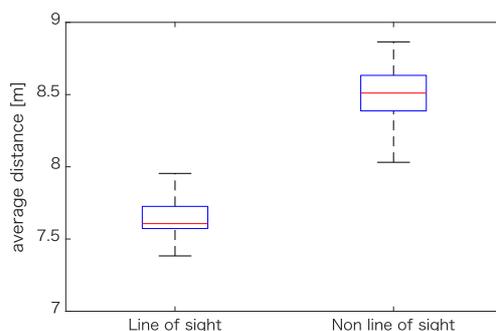


図1：RTTにおける7m離れた際の直接波(Line of sight)および人が間に入った際(Non line of sight)の測定距離

図1に、実環境中に基地局と端末を7m離して設置した環境において、直接波上に人が存在する際と存在しない際の測定される距離について、40回測定した際の平均を示す。この結果より、直接波が計測される際(Line of sight)人が間に入り干渉した結果(Non line of sight)と比較しておおよそ1mほど計測される距離が伸びていることが確認できる。つまり、人が端末間に存在する際、直接波と比べて長い距離へと変化することがわかる。本研究では、この人が間に入った際の測定距離の変化に着目し、環境中に複数の基地局と端末の対を作成し、直接波を環境中に多数構成することで、RTTによる距離が人の位置に反応する環境を

構成する。構築された複数の直接波への人の干渉を用いて、密度推定モデルを構築することにより、複数人のデバイスレス屋内測位が実現される。

3-3 RTT を用いた人デバイスレス屋内測位の環境構築

本研究では、直接波と間接波の変化を用いて密度推定モデルの構築を行うため、推定性能は環境構築が大きく関わる。そこで、高精度な測位を実現する環境設定の指針について議論を行う。環境中に存在する対象者の位置の検知において、2つ以上の複数の直接波が干渉されている際、その干渉された直接波の交点が、対象者の最も確からしい位置となる。例として、図2 (a) のような測位対象点が四点の状態を考える。図2 (b) のように3つの直接波が干渉された場合、その交点に近い左下の位置に人がいると推定される。また、図2 (c) のように4つの直接波が干渉された場合、干渉された直接波の交点は左上及び右下に存在し、その交点に人がいると推測される。このように、測位対象となる点上で少なくとも2つの直接波が通るように基地局及び端末を設置することで、それぞれの位置で推定が行える。

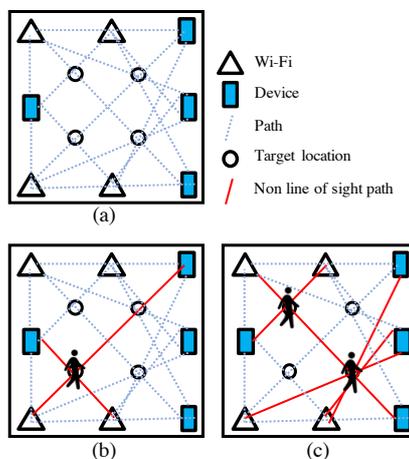


図2：RTTによる複数人屋内測位の認識原理：(a) 対象点四点での事例，(b) 左下の対象点に対象者が存在する際のLOS/NLOS，(c) 左上・右下それぞれに対象者が存在する際のLOS/NLOS

ここで、環境要因や環境内の人の数の影響で直接波と間接波それぞれの状態においても、測定のノイズが発生することや、測定される距離がどの程度変化するのが自明でないため、人の干渉が発生しているかといった状態が明示的に取得できるわけではないことに注意されたい。つまり、干渉を直接検知し、交点に人が存在するという検知方法でなく、人の存在の確からしさとして扱いモデル化する必要がある。本研究では、このノイズに頑健なモデルを構築するため、機械学習による密度推定モデル構築を採用した。

3-4 人の遮蔽を考慮する特徴量の定式化

環境中に一人のデータを用いて高精度に複数人測位を達成するには、直接波及び間接波をよく反映した特徴量の構成を行う必要がある。しかし、それぞれの基地局と端末対に対する測定距離は未知であるため、直接波と間接波の確からしさをデータからエンコードした特徴量を構成する必要がある。本研究では、直接波及び間接波における特性を考慮し、教師データから直接波に近い統計量と間接波に近い統計量に基づき、特徴量を設計した。

4 Wi-Fi RTTに基づくデバイスフリー測位の性能評価実験Ⅰ(学内会議室)

本節では、実際の屋内で取得されたデータを用いて、RTTによるデバイスフリー複数人屋内測位が行えること、また、環境中に一人が存在するデータのみを用いて、複数人のデバイスフリー屋内測位が行えること

を示す。この実験では家具等の遮蔽のないオープンな環境（会議室等）を利用し、本研究で構築する測位システムの基本的性能を評価する。

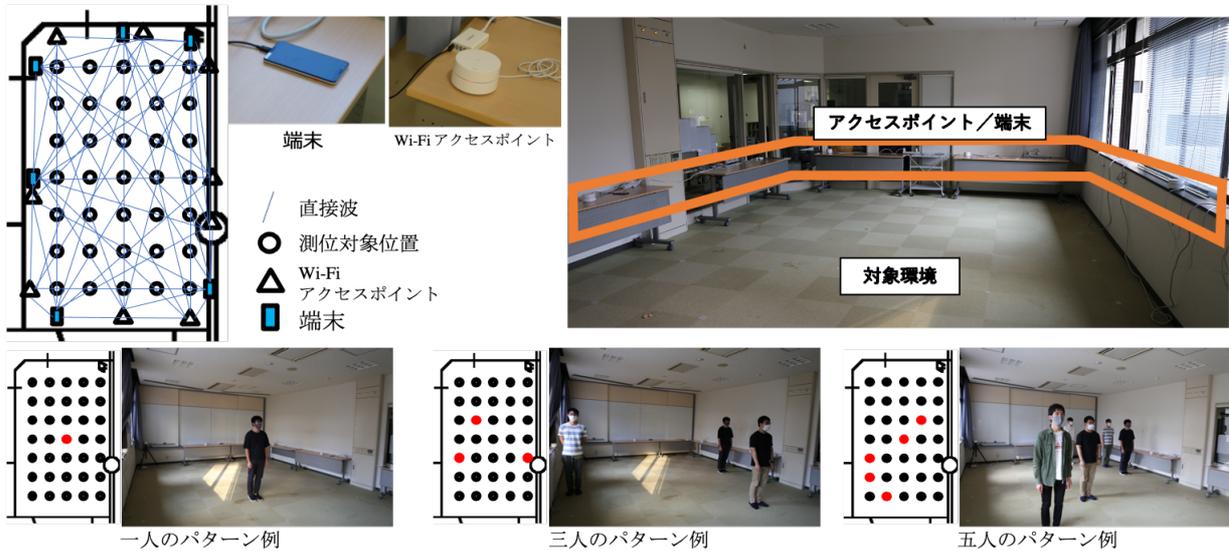


図 3：学内会議室を利用したデバイスフリー屋内測位の基本性能評価

評価により提案したシステムが環境中の人数推定について、一人の推定時は人数について平均 0.48 人の誤差、推定位置について平均 0.25m の誤差、三人の推定時は平均 1.17 人、0.91m の誤差、5 人の推定時は平均 2.13 人、1.29m の誤差で測位が可能であることが確認された。

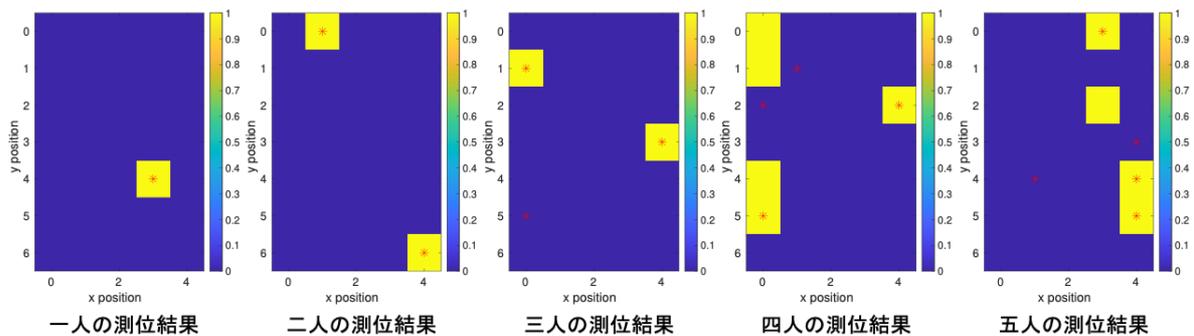


図 4：デバイスフリー屋内測位の測位結果

定性的には図 4 のように、赤点で示された実際に人が存在する位置に対して、黄色の矩形で示された予測位置が重なり、測位が高精度に行われていることが確認できる。

5 人体遮蔽に伴うオフィス環境の Wi-Fi RTT ベースデバイスフリー屋内測位

4 節で述べた家具の存在しない環境における測位性能評価に加え、より現実の環境に近い、家具が存在する状況での測位システムの性能評価を実施した。特に、4 節では測位対象の人間が全て立位であることを仮定したが本実験では、立位だけでなく着座者も対象とする環境での測位性能の検証も実施した。図 5 は実

験データ収集時の様子である。図4と同様、図6に測位時の結果を2次元平面に示す。実際の人の位置に応じた出力が概ねできていることが確認できた。

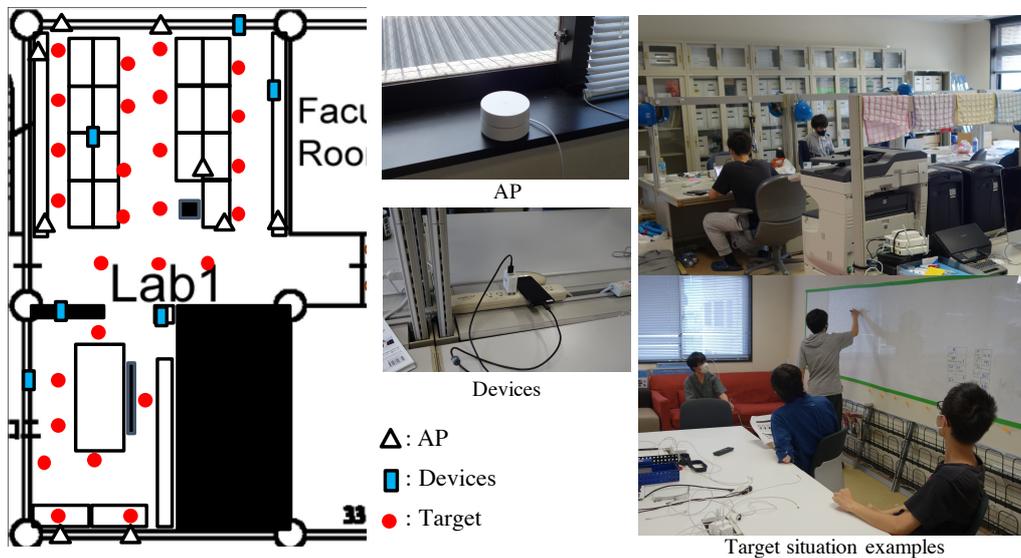


図5：オフィス環境における測位性能評価の様子

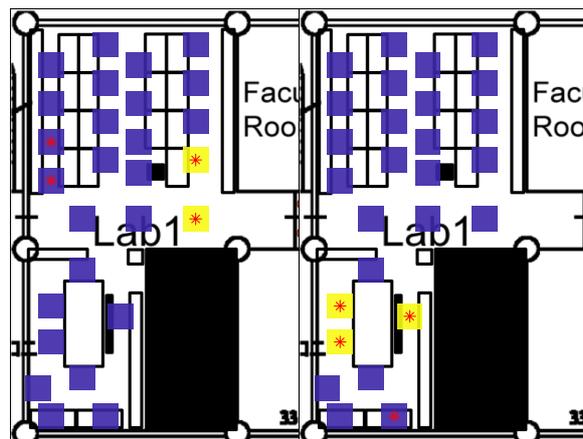


図6：オフィス環境における測位性能評価

6 人体遮蔽に伴う Wi-Fi RTT および UWB RTT 測距変動評価

本調査では Wi-Fi RTT に基づくデバイスフリー測位システムの構築を主眼としているが、Wi-Fi RTT と並行して RTT が入手可能な UWB デバイスを用いたシステムの開発も行なった。UWB デバイスは Apple Air Tag 等の商品の基盤となっている通信プロトコルであり、今後普及が見込まれる技術であることから、デバイスフリー測位システムの安価な実装手段となる可能性を秘めているためである。

本予備実験では、UWB の人による遮蔽と Wi-Fi における人の遮蔽にどのような特徴の差があるのかを確認する。以下の図に示されるように、直線上に Wi-Fi RTT 端末とアクセスポイント、および、UWB アンカーとタグを配置し、それらを結ぶ直線上に人が立つことで直接波を遮った際の、測距結果の変化を確認する実験

を実施した。

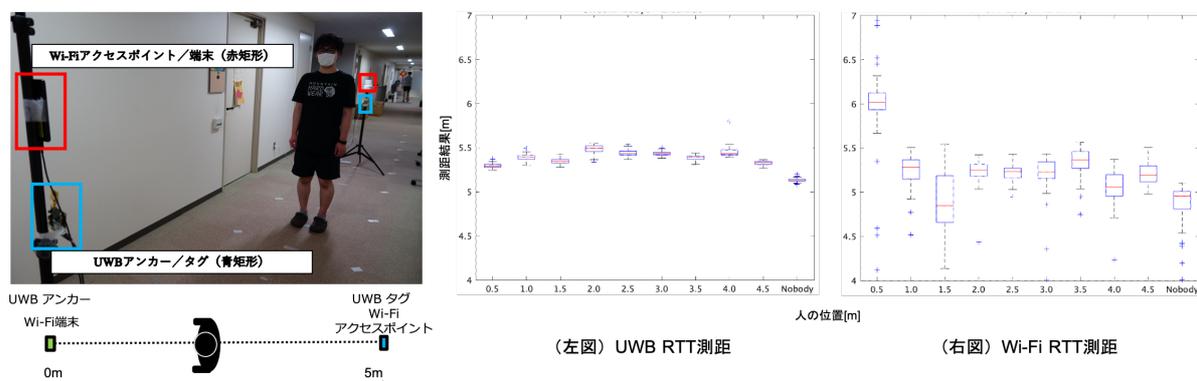


図7：人体遮蔽により変化するUWB-RTTとWi-Fi RTTの測距データ

図7より、実験結果である箱ヒゲ図の左に示されるUWBのRTTが、右に示されるWi-FiのRTTプロトコルと比べ、より安定して人の遮蔽の影響を受けること、およびデータのばらつきが少ないことが確認された。この結果よりUWBを用いることでより安定かつ高精度なデバイスフリー測位の実現の可能性が新たに示された。また、図7での確認はオフィス環境における廊下において実施したが会議室などのような開かれた環境においては直接波の受信電波強度 (FSL) と最大受信電波強度 (RSL) の差に着目する必要性を確認し、環境を問わず頑健な測位の実現には、RTTに加え、FSL, RSLを併用することが良いという方針を得た。

7 UWB RTT を用いた頑健なデバイスフリー屋内測位

4節および6節で述べた実験結果を踏まえ、UWB RTT ベースのデバイスフリー屋内測位システムのプロトタイプを構築し、Wi-Fi RTT によるそれとの性能比較を実施した。Wi-Fi RTT ベースの測位システムとの比較のため、4節で述べた会議室環境を用いて測位性能を評価した。図8はWi-Fi RTT ベースの測位システム、UWB RTT を用いたもの、UWBのRSL/FSLのみに着目した手法、UWBの複数のデータソース (RTT, FSL/RSL) を併用したものの性能を示している。図8よりUWBベースのシステムがWi-Fi RTT ベースのそれに比べ、極めて高い測位性能を発揮することが確認できた。

特徴量	MNE	MALE	MNELE
Wi-Fi RTT 測定距離	0.99	1.00	0.0020
UWB 測定距離	0.06	0.07	0.0005
UWB RSL, FSL の差	0.09	0.05	0.0016
UWB 併用	0.00	0.00	0.0005

特徴量	MNE	MALE	MNELE
Wi-Fi RTT 測定距離	0.99	1.00	0.0020
UWB 測定距離	0.06	0.07	0.0005
UWB RSL, FSL の差	0.09	0.05	0.0016
UWB 併用	0.00	0.00	0.0005

図8：UWB ベース・Wi-Fi RTT ベース測位の性能 (左：環境中1名, 右：環境中2名)

8 結論

本研究課題では、電波の往復遅延時間 (RTT) に注目したデバイスフリー屋内測位システムを開発した。まず、Wi-Fi RTT に基づくシステムの計測原理の正しさを確認するため、家具等の遮蔽のない会議室環境にて評価した。続いて、より現実的なオフィス環境での性能評価を行ない、そのような環境でも測位が可能であることを確認した。並行して近年注目を浴びる UWB を用いた同種のシステムのプロトタイプを開発し、初期に構築した Wi-Fi ベースのシステムに比べて大幅な性能向上が達成しうることを確認した。

本課題で開発した測位システムはあくまでプロトタイプレベルであり社会実装に必要なさまざまな制約を解消するものではないが、未だ完全な解決がなし得ていないコロナ感染症、関連したソーシャルディスタンスを考慮に入れた日常の活動を考えれば、本課題で構築した技術が何かしらの貢献につながるものと信じ、本研究課題の研究期間後も開発を続けていく予定である。このような技術の基盤の構築の機会を与えてくださった電気通信普及財団の皆様には改めて、感謝申し上げます次第である。

謝辞

本研究を進めるに当たり、当方が主宰する東京工業大学・情報理工学院・下坂研究室の学生諸君の献身的努力に感謝する。また、共同研究を実施するヤフー株式会社坪内孝太氏、立命館大学の西尾 信彦教授より示唆に富んだ助言を頂いたことをこの場を借りて感謝申し上げます。

【参考文献】

- [1] Bahl, P. and Padmanabhan, V.: RADAR: an in-building RF-based user location and tracking system, In Proceedings of International Conference on Computer Communications (IN-FOCOM), Vol. 2, pp. 775–784 (2000).
- [2] Yin, J., Yang, Q. and Ni, L.: Adaptive temporal radio maps for indoor location estimation, In Proceedings of International conference on pervasive computing and communications (PerCom), pp. 85–94 (2005).
- [3] Hsu, C.-Y., Ahuja, A., Yue, S., Hristov, R., Kabelac, Z. and Katabi, D.: Zero-effort in-home sleep and insomnia monitoring using radio signals, In Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies (IMWUT), Vol. 1, No. 3, p. 59 (2017).
- [4] Kotaru, M., Joshi, K., Bharadia, D. and Katti, S.: Spotfi: Decimeter level localization using wifi, In Proceedings of the ACM Conference on Special Interest Group on Data Communication (SIGCOMM), pp. 269–282 (2015).
- [5] Prieto, J., Bahillo, A., Mazuelas, S., Lorenzo, R., Blas, J. and Fernandez, P.: NLOS mitigation based on range estimation error characterization in an RTT-based IEEE 802.11, indoor location system, In Proceedings of International Symposium on Intelligent Signal Processing (ISPACS), pp. 61–66 (2009).
- [6] Hashem, O., Youssef, M. and Harras, K. A.: WiNar: Rtt-based sub-meter indoor localization using commercial devices, In Proceedings of International Conference on Pervasive Computing and Communications (PerCom), pp. 1–10 (2020).
- [7] Yan, S., Luo, H., Zhao, F., Shao, W., Li, Z. and Crivello, A.: Wi-Fi RTT based indoor positioning with dynamic weighted multidimensional scaling, In Proceedings of International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), pp. 1–8 (2019).

- [8] Choi, J., Choi, Y.-S. and Talwar, S.: Unsupervised Learning Technique to Obtain the Coordinates of Wi-Fi Access Points, In Proceedings of International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), pp. 1–6 (2019).
- [9] Schauer, L., Dorfmeister, F. and Maier, M.: Potentials and limitations of wifi-positioning using time-of-flight, In Proceedings of International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), pp. 1–9 (2013).
- [10] Ibrahim, M., Liu, H., Jawahar, M., Nguyen, V., Gruteser, M., Howard, R., Yu, B. and Bai, F.: Verification: Accuracy evaluation of WiFi fine time measurements on an open platform, In Proceedings of International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom), pp. 417–427 (2018).
- [11] Choi, J. W., Quan, X. and Cho, S. H.: Bi-directional passing people counting system based on IR-UWB radar sensors, In Journal of IEEE Internet of Things, Vol. 5, No. 2, pp. 512–522 (2017).
- [12] Choi, J. W., Yim, D. H. and Cho, S. H.: People counting based on an IR-UWB radar sensor, In Journal of IEEE Sensors, Vol. 17, No. 17, pp. 5717–5727 (2017).
- [13] Pei, C., Zhao, Y., Chen, G., Tang, R., Meng, Y., Ma, M., Ling, K. and Pei, D.: WiFi can be the weakest link of round-trip network latency in the wild, In Proceedings of International Conference on Computer Communications (INFOCOM), pp. 1–9 (2016).

〈 発 表 資 料 〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
UWB の測定距離と直接波の減衰度を利用したデバイスフリー複数人屋内測位	情報処理学会 UBI 研究会	2022 年 6 月
Device-free multi-person indoor localization with Wi-Fi RTT	JOURNAL OF INTERNET OF THINGS	投稿中