

濃煙空間内における 避難者の人流解析に関する検討

堀川真伸¹・畑本啓吾¹・松浦弘治²

¹ (一財)阪神高速先進技術研究所調査研究部情報・施設研究室

² 保全交通部施設管理課

要約

トンネル内火災時に火点前方で渋滞が発生している場合、火点両側の避難環境を確保する目的で低風速化制御を行うが、時間の経過とともに煙が拡散され、トンネル内監視カメラでは避難者の把握が困難になることが課題である。火災発生から随時トンネル内における避難者数を把握することができれば、避難支援や避難者救助に繋がる消防活動への情報提供を行うことができる。そこで、多くの避難者が保有するスマートフォンから発せられる Wi-Fi のパケットを受信することで、視界が悪い環境下において避難者数を推定できないか検証を行った。検証の結果、避難者数の推定値から避難者の動きを把握できることを確認した。

キーワード: トンネル火災, 避難者検出, Wi-Fi, 機械学習

1. はじめに

阪神高速の AA 級トンネルには、トンネル内に死角がないようにトンネル内監視カメラ（以下、カメラとする。）が設置されており、このカメラを用いてトンネル内の状況を随時把握する。しかしながら、トンネル内火災時に火点前方で渋滞が発生している場合、熱気流・煙の拡散を抑制し、火点両側の避難環境を確保する目的で低風速化制御（図-1）を行うが、時間の経過とともに煙が拡散され（以下、濃煙空間とする。）、カメラでは避難者の把握が困難になる。勿論、火災発生から随時トンネル内における避難者の有無を検出することができれば、避難支援や避難者救助に繋がる消防活動への情報提供を行うことができ、避難者の安全性向上が見込まれる。そのため、さらなる安全対策を考える上では、濃煙空間内での避難者検出方法を検討する必要がある。

本検討では、この課題に対して避難者が保有する

スマートフォン（以下、端末とする。）から発せられる Wi-Fi プローブ要求（以下、プローブ要求とする。）を利用した端末台数推定による人流解析が適用可能かを検証する。プローブ要求を用いた端末台数推定を用いた人流解析は、低コストおよび導入の容易性から一時期多くの実証実験が行われた。しかしながら、プローブ要求を解析することで利用者の識別や追跡が可能ながことが社会的な問題となり、プライバシー強化の観点から端末の Mac アドレスのランダム化が導入され、固定 Mac アドレスを利用していた従来手法の活用が困難となった。そこで、本検討では、ランダム化された Mac アドレスを考慮した端末台数推定手法を開発し、避難誘導に活用することが可能かを検討する。

本稿では、避難者行動を想定したトンネル実験を行い、端末台数推定をした結果と端末台数推定を用いた避難者行動の把握に関する結果について報告する。



図-1 トンネル内火災時に火点前方で渋滞が発生している場合の排煙制御（低風速化制御）

2. 検証概要

本検討では、避難誘導等の避難者の安全性を向上させる施策を実施するために、避難者の状況を把握する技術の開発を目的としている。具体的には、一定時間毎に各エリアにおける端末台数を把握する技術の開発を想定しており、実現イメージを図-2 に示す。図-2 で示す通り、各時刻における各エリアにいる端末台数を把握することで、避難者の動きを把握でき、避難誘導等避難者の安全性を向上させるために活用できると考えている。この実現に向けて、阪神高速道路 31 号神戸山手線神戸長田トンネル未供用部にて実験を行い、本検討で開発した端末台数推定手法の精度検証を行った。次に、プローブ要求の電波受信強度（以下、RSSI とする。）を用いることにより、避難者の動きを把握できないか検証を行った。

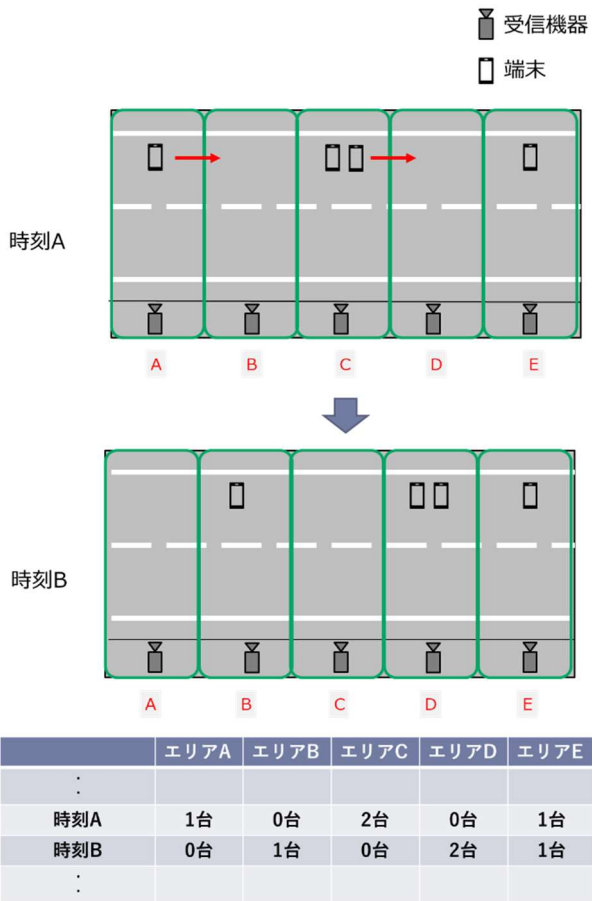


図-2 避難者把握技術の実現イメージ

3. 端末台数推定の精度検証

(1) 端末台数推定手法

本検討では、表-1 に示すプローブ要求に含まれる 6 つの特徴量を用いた機械学習による端末台数推定を提案する。まず、Mac アドレスがランダム化された端末に対応するために前処理をする必要がある。

Mac アドレスがランダム化された端末は、短い間隔で複数のプローブ要求を出し、Mac アドレスが切り替わることがある。そこで、1 秒区間で観測したプローブ要求において Mac アドレスまたはパケット長が同一のものを 1 つのプローブ要求としてまとめ、まとめた個数を 7 つ目の特徴量として加えることとする。RSSI については、1 秒間で得られたプローブ要求の中で最大値のものを 1 つの特徴量としてまとめることとする。提案手法では、上記の 7 つの特徴量を 3 次元に次元削減するために主成分分析を行う。その後、DBSCAN を用いてクラスター分析を行い、プローブ要求を分類することで端末台数推定を行う。

表-1 プローブ要求に含まれる情報

情報	特徴
時間	プローブ要求を取得した時間を表す情報
パケット長	プローブ要求のパケットの大きさを表す情報
シーケンス番号	通信の通し番号を表す情報
RSSI	プローブ要求の受信信号強度を表す情報
HT Capability	IEEE 802.11n 規格で導入された高速伝送技術を表す情報
VHT Capability	IEEE 802.11ac 規格で導入された超高速伝送技術を表す情報

(2) 検証内容

提案する端末台数推定手法の精度を検証するために、トンネルにてデータ収集を行った。避難者を想定して、歩行時のデータ収集を行い、200 m の距離を歩行速度 1.2 m/s で直進した。監査路側、道路中央、追越車線側の 3 ケースを各 10 回計測した。端末は、市場シェアを考慮し、iPhone SE（第 3 世代）、Galaxy S22、Xperia 5 IV、AQUOS sense 7 の 4 機種とした。

収集したデータを組み合わせることにより、1~32 台の端末が存在することを想定したデータを生成した。1 台の場合は、150 個（3 ケース×10 回×5 機種）のデータを検証に用いる。2 台の場合は、 ${}_{150}C_2$ でデータを生成し、生成したデータ数が 1000 個を超えるため、ランダムに抽出した 1000 個のデータを検証に用いることとした。3 台以上の場合も同様とした。

本検討における端末台数推定は避難者検出が目的であるため、リアルタイムで処理する必要がある。故に、その都度最適な端末台数推定モデルパラメータを探索することは難しい。そのため、生成したデータから最適なモデルパラメータを設定し、その固定化したモデルパラメータにて端末台数推定を行うこととした。また、端末台数推定に用いるデータ取得間隔を 15 秒間とし、毎秒において端末台数推定を行った。具体的には、開始時刻 0 秒から 15 秒までの 15 秒間の端末台数推定、1 秒から 16 秒までの

15 秒間の端末台数推定というような形で、毎秒端末台数推定を行い、精度検証を実施した。

(3) 検証結果

端末台数推定結果を図-3 に示す。平均推定誤差については、端末台数が多いほど増加する傾向にある。しかしながら、端末台数が 10 台以上であっても、平均推定誤差は 3~5 台程度であった。これより、提案手法による端末台数推定を行うことで、避難者数の把握がある程度可能であることがわかった。

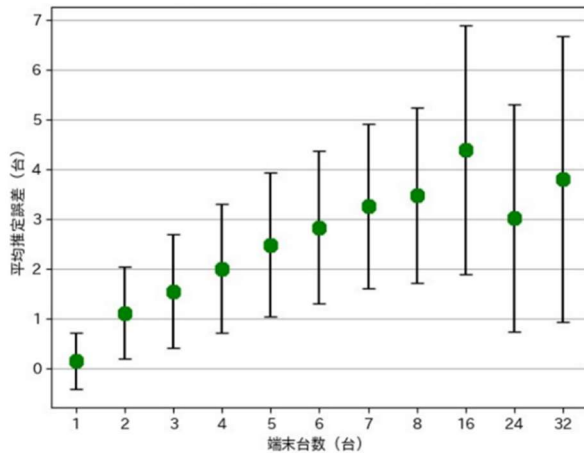


図-3 端末台数推定結果

4. 避難者の人流解析に関する基礎的検討

(1) 検証内容

プローブ要求の RSSI を用いることにより、避難者の動きを把握できないか検証を行うために、トンネルにてデータ収集を行った。図-4 に示すようにプローブ要求を受信する機器を 10 m 間隔に 21 台設置し、歩行時のデータ収集を行い、200 m の距離を歩行速度 1.2 m/s で直進した。歩行ケースは、監査路側、道路中央、追越車線側の 3 ケースを各 10 回計測した。端末は、3. と同じ機種とした。また、3. と同様に収集したデータを組み合わせることにより、1~32 台の端末が存在することを想定したデータを生成し、固定化したモデルパラメータにて避難者の動きを把握できるか検証を行った。また、端末台数推定に用いるデータ取得間隔を 15 秒間とし、毎秒において端末台数推定を行った。

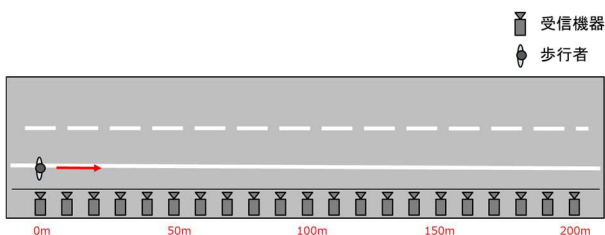


図-4 実験機器の配置図

(2) 検証結果

本検証において、RSSI に閾値を設けることで、

端末から遠い受信機器はプローブ要求を受信できなくなるため、経過時間毎の端末推定台数の大小を確認することで避難者の動きを推測できるか検証した。正解の端末台数が 8 台であり、RSSI の閾値を -65 dbm 以上と設定した場合の、経過時間毎の 0 m, 100 m, 200 m 地点における端末台数推定結果を図-5 に示す。0 m 地点の受信機器において、0 秒~15 秒の端末推定台数が最大であることと、実験では 0 m 地点からスタートし、歩行速度 1.2 m/s で端末が受信機器から遠ざかっていることを考えると、0 m 地点の受信機器の端末台数推定の最大値付近に、実際の端末が通過していたであろうことが推測できる。100 m 地点、200 m 地点の受信機器においても、同様に端末台数推定の最大値付近に、実際の端末が通過していたであろうことが推測できる。また、0 m 地点、100 m 地点、200 m 地点の受信機器の端末台数推定の最大値付近の時刻を確認することで、0 m→100 m→200 m の順に移動していることも推測できる。端末台数推定精度については、正解台数が 8 台に対して、0 m, 100 m, 200 m の最大推定台数は 10~11 台であるため、数台の誤差が出る結果とはなったが、避難者数をおおよそ把握することは可能であることがわかった。このことから、各地点における受信機器の端末推定台数の時系列推移を確認することで、避難者の一方方向の流動（近づく、遠ざかる）を確認でき、ある程度の誤差はあるものの、台数推定できる可能性について確認できた。また、各地点における受信機器の端末推定台数の最大値となる時刻を確認することで、避難者の動きを把握できる可能性があることを確認できた。

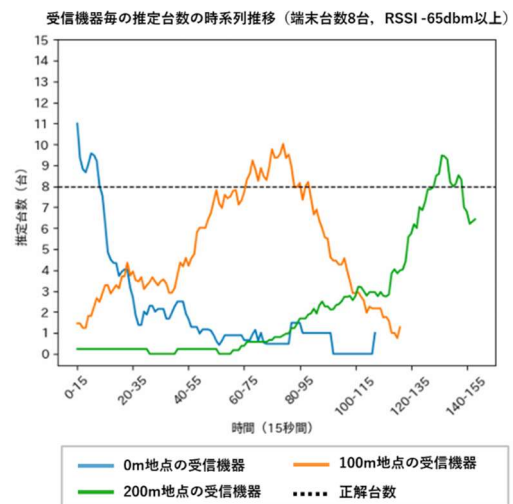


図-5 受信機器毎の推定台数の時系列推移

次に、正解の端末台数が 8 台であり、RSSI の閾値を -90 dbm 以上と設定した場合の端末推定台数の結果を図-6 に示す。これより、どの時刻で推定台数が最大値をとるか明確でなく、各地点の受信機器の通過時刻が推測できないために避難者の動きを把握できないことがわかる。そのため、避難者の動きを把握するためには適切な RSSI の閾値を設定する必要があることがわかった。

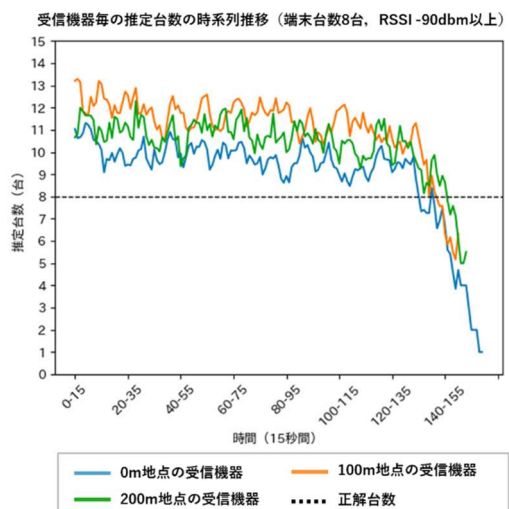


図-6 受信機器毎の推定台数の時系列推移

5. 実運用に向けた検討

4. の結果より、RSSI を用いることにより避難者の動きを把握できる可能性があることを確認できたが、避難者の動きを把握するためには適切な RSSI の閾値を設定する必要がある。実運用を想定した際に、車が停止していたり等電波に対する障害物があることが想定され、障害物があれば、RSSI は影響を受け、変動してしまう。そのため、障害物の配置等の状況に応じて、適切な RSSI の閾値が変わってしまうために、実運用において、適正な RSSI の閾値設定を行うことは難しいと考える。故に、今回の検討結果を踏まえた、実運用に適用できる新たな手法について、検討することとした。検討した手法を以下に示す。本手法は、たとえ障害物があり、各地点の RSSI が現場状況により変動したとしても、各地点の RSSI の相対比較であるために、絶対値の変動の影響を受けない。そのため、本手法は障害物等の現場状況による RSSI の変動に対応した手法であると考えられる。

STEP1：各地点の RSSI を相対比較することにより、エリア判定を行う（図-7）

STEP2：エリア判定された地点の受信機器でのみ端末台数推定を行う（図-8）

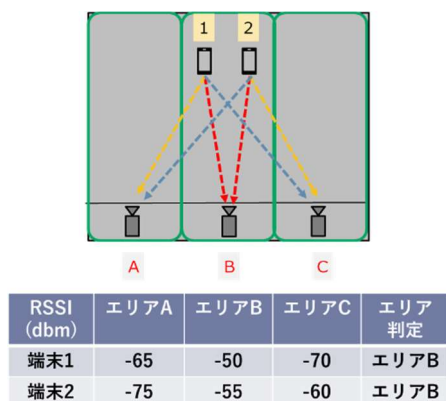
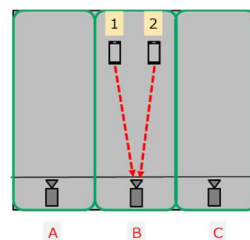


図-7 STEP1 エリア判定のイメージ



	エリアA	エリアB	エリアC
端末台数推定に用いるプローブ要求	なし	端末1のプローブ要求 端末2のプローブ要求	なし

	エリアA	エリアB	エリアC
端末推定台数	0台	2台	0台

図-8 STEP2 端末台数推定のイメージ

6. おわりに

本検討では、濃煙空間内において避難者を検出する方法として、避難者が保有する端末から発せられるプローブ要求を利用した端末台数推定手法を提案し、端末台数推定精度について確認した。また、プローブ要求の RSSI を用いた端末台数推定手法により避難者の動きを把握できるか基礎的な検証を行った。

これらの検討により得られた知見を以下に示す。

- 端末台数推定の平均推定誤差は、端末台数が多い場合であっても、3~5 台程度であり、避難者数のおおよその把握が可能であることがわかった。
- RSSI の閾値を適切に設定した場合において、端末推定台数の時系列推移を確認することにより、避難者の動きを把握できることがわかった。

今後としては、実運用を考慮したエリア判定を踏まえた端末台数推定手法について検討を進めたい。具体的には、エリア判定精度が確保される受信機器の設置間隔について検討を行ったうえで、避難者の行動がより現実に近い条件で実験を行い、精度検証を実施し、避難誘導に活用することが可能かを検討したい。

謝辞：本稿で示した端末台数推定結果は岩手県立大学との共同研究により実施した成果である。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 長久保伊吹，堀川三好，岡本東：濃煙トンネル空間における避難誘導を目的としたモバイル端末台数推定手法の提案，情報科学技術フォーラム講演論文集，Vol.22，No.4，pp.61-64，2023。
- 2) 中田恵史，岡本東，堀川三好：無線 LAN におけるプローブ要求を用いた混雑度推定，情報処理学会研究報告，Vol.2018-DPS-175，No.1，2018。