

推薦論文

ミリ波無線通信システムの受信信号強度と RGB-D カメラ動画像を用いた通信端末の位置推定

三原 翔一郎^{1,a)} 吉川 慧司¹ 村上 隆秀¹ 新保 宏之¹

受付日 2021年5月10日, 採録日 2021年11月2日

概要: 本稿は, ミリ波の受信信号強度と RGB-D カメラの動画像を組み合わせて, 通信端末の位置を推定する手法を提案する. ミリ波を用いた無線通信には, 物体が通信路を遮蔽したときに受信電力が大きく低下し, 通信が遮断されやすい問題がある. これに対し, カメラの画像を用いて遮蔽を予測し, 基地局間の無線リンクを制御する技術がいくつか提案されている. しかし, ミリ波の遮蔽を予測するには, 通信端末の位置を数十 cm の精度で把握する必要がある. 既存の方法では, 特殊な測位装置に加えて, 端末の位置情報を基地局に通知する仕組みが必要となるため, 実環境への適用は困難となる. この問題を解決するため, 基地局側の情報のみを用いた端末位置の推定手法を提案する. 提案手法は, 基地局から撮影した RGB-D カメラ動画像と, ミリ波の遮蔽による受信信号強度の変化に基づいて, 通信端末の位置を推定する. 実際の通信環境を模した屋外環境で実験を行い, 提案手法により通信端末の位置を推定できることを示した.

キーワード: 端末位置推定, ミリ波無線通信, 第 5 世代移動通信システム

User Equipment Positioning for a mmWave System Using RSSI and RGB-D Camera Images

SHOICHIRO MIHARA^{1,a)} KEIJI YOSHIKAWA¹ TAKAHIDE MURAKAMI¹ HIROYUKI SHINBO¹

Received: May 10, 2021, Accepted: November 2, 2021

Abstract: In this paper, we propose a positioning method for user equipment (UE) of a mobile millimeter wave (mmWave) communication system. In such a system, a blockage is a cause of a disconnection or a serious degradation of communication. Several techniques to control radio links between base stations have been proposed to avoid these problems. These techniques control radio links by a blockage prediction based on camera images. However, those techniques require an accurate position of the UE with a precision of several tens of centimeters. The existing method requires a particular positioning equipment and a system to notify the UE position to the base station, which makes it difficult to apply in real environments. To solve this problem, we propose the UE positioning method using information only on the base station side. Our proposed method estimates a UE position based on temporal variations in images from a RGB-D camera and the received signal strength indicator by movements of the objects. We evaluated our method by experiments in an outside environment that simulates the actual communication environment. The experiments show that the proposed method can estimate the position of the UE.

Keywords: positioning, millimeter wave communication, 5G system

1. はじめに

2025 年頃には, 第 5 世代移動通信システム (5G システ

ム) の通信性能に対するユーザの要求が高まり, 5G システムの高度化が必要になると想定される. 今後, 5G システムの普及につれて生まれる様々な用途に応じて, 個々の

¹ 株式会社 KDDI 総合研究所
KDDI Research, Fujimino, Saitama 356-8502, Japan
^{a)} sh-mihara@kddi.com

本論文の内容は 2020 年 11 月の第 28 回マルチメディア通信と分散処理ワークショップ (DPSWS2020) で報告され, 同プログラム委員長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.

通信フローへの品質要求を満たすことが求められる。たとえば、自動制御のロボットを想定すると、制御信号のような高信頼かつ低遅延が求められる通信に加えて、4K カメラなどの複数のセンサからの大容量かつ低遅延な通信が要求される。大容量通信を実現するために、5G システムでは、従来、主に使われてきた 6 GHz 帯以下の周波数に加えて、ミリ波帯が利用される。しかし、ミリ波帯は 6 GHz 帯以下の周波数に比べて減衰が大きく、回折しづらい伝搬特性を持つため、見通し内通信路を物体が遮蔽すると受信電力が大きく低下する [1]。現在の 5G システムには、受信信号強度が一定期間低下した場合に、端末の接続先を別の基地局に切り替える、ハンドオーバーという仕組みがある。しかし、ミリ波の遮蔽によって急激に受信信号強度が低下する場合には、ハンドオーバーができずに、無線リンクの切断、すなわち通信の遮断が発生するという問題がある。

筆者らは、物体が多数存在する屋外環境において、基地局に併設した RGB-D カメラを用いて、ミリ波の遮蔽を予測する研究を進めている。端末と周辺の物体との位置関係を把握してミリ波の遮蔽を予測し、その情報に基づき端末の接続先基地局を事前に切り替えることで、無線の接続性を高信頼に確保することを目指している [2]。具体的には、遮蔽予測の結果を、複数の基地局を利用したロバストビームフォーミング [3] の制御に投入し、無線リンクの切替を行う。また、これまでの検討から、ミリ波は波長が短いため、端末の位置情報が遮蔽予測の精度に影響しやすいことが明らかとなっている。約 0.3 m の精度で端末の位置を把握できていないと、受信電力や遮蔽発生の予測がずれてしまう [4]。そのため、基地局から見て垂直・水平の方向に数十 cm 以下の精度で、継続的に端末の位置を把握する必要がある。しかし、GPS などの既存の測位技術では数 m 単位の精度の位置情報しか得られず、補正情報を用いても 1 m 程度の誤差が生じてしまう [5], [6]。カメラなどの端末のセンサを用いる場合は、高精度に位置推定が可能だが、端末側に計測の手間や処理負荷がかかる。加えて、これらの方法では、位置情報を端末から基地局に継続的に通知する仕組みを構築する必要が生じてしまう。

これらのことから、端末側のセンサや計算資源を使わずに、通信端末の位置を正確かつ継続的に取得する新たな手法が必要となる。近年、深層学習により、画像内の物体をリアルタイムで高精度に検出・追跡することが可能になった。しかし、どの物体が端末を保持しているかは、画像のみでは判別できない。一方、受信信号強度を用いて、拡張秦式 [7] などの伝搬式から、大まかに基地局と端末の間の距離を推定することは可能である。しかし、推定された距離の精度は低く、基地局からの方向が得られないため、受信信号強度のみから端末の位置を決定することは現実的ではない。本稿では、カメラの画像と無線情報を組み合わせることで、基地局側の情報のみから、端末の位置を推定す

る方法を提案する。画像から観測できる物体どうしの重なりの変化と、受信信号強度の時間変化の相関をとることで、画像上の端末の位置を推定する。

本稿では、2 章で関連する従来研究について述べ、3 章で本研究の提案手法について説明する。4 章で提案手法を評価するために実施した実験の結果と考察を示し、5 章でまとめを行う。

2. 関連研究

5G システムの高度化を目的として、移動物体によるミリ波への遮蔽影響を画像から予測する手法がいくつか提案されている [4], [8], [9], [10]。これらは、畳み込みニューラルネットワーク (CNN: Convolutional Neural Network) をベースとした深層学習モデルを利用している。CNN を用いて画像の二次元構造を維持した特徴量を抽出し、得られた特徴量から、移動物体がミリ波の受信電力に与える影響を予測するモデルを構築している。ただし、これらの手法は、通信端末の位置が既知であるか、または画像上の端末位置が変化しない環境を前提としており、画像上の端末位置が固定された画像を用いて深層学習モデルを訓練している。したがって、多数の移動物体が存在し、端末の位置が既知ではないような屋外環境に適用することはできない。通信端末の位置を明示的に推定せずに、ミリ波の遮蔽予測を行う手法も提案されている [11]。ビームフォーミングの制御情報と画像を用いて深層学習モデルを訓練し、車両を対象とした遮蔽予測を行う。端末の位置は、ビーム情報から抽出される潜在的な特徴量として扱われる。しかし、ビーム情報からは粗い端末の方向しか得られないことから、多数の歩行者などを含む複雑な環境では、正確に遮蔽を予測することが難しくなる。

通信端末の位置を取得する技術としては、GPS を用いた測位や、端末が備えるカメラを用いた自己位置推定 [12]、または無線情報を用いた位置推定技術 [13] がある。しかし、いずれも精度や端末側の計算負荷の面で課題がある。GPS は屋外環境での通信端末の測位に広く用いられているが、通常 5 m 程度、補正情報を用いても 1 m 程度の誤差が生じる [5], [6]。また、天球の見通しが限られる都市部においてはさらに誤差が大きくなるうえ、屋内では用いることができないなどの制約がある。カメラ画像を用いた自己位置推定としては SLAM (Simultaneous Localization And Mapping) [14] や VPS (Visual Positioning System) [15] などの技術があり、数 cm 単位の精度で位置推定が可能である。しかし、いずれの場合も、端末のカメラを環境に向けて撮影し続ける必要がある。加えて、これらの手法では、推定した位置情報を基地局に通知する仕組みが必要となるため、ユーザとオペレータ双方の負担が大きくなる。無線情報のみを用いて端末の測位を行う技術としては OTDOA (Observed Time Difference Of Arrival) 方式 [16] や E-CID

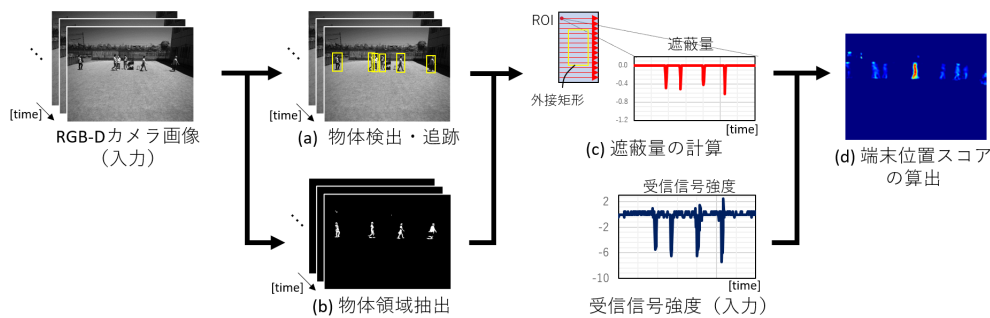


図 1 提案手法の処理の流れ

Fig. 1 Processing flow of the proposed method.

(Enhanced Cell ID) 方式 [17], Fingerprint 方式 [18] があるが、いずれも数十 m 単位の誤差が生じる [5]. 遮蔽予測は端末の位置を数十 cm の精度で把握する必要があるため、精度が不足する.

画像と無線情報を組み合わせて通信端末の位置を推定する技術としては, GSM 方式の無線情報と通信端末のカメラを用いた Anisetti らの手法 [19] と, Bluetooth Low Energy (BLE) の受信信号強度と環境に設置したカメラを用いた星らの手法 [20] が提案されている. Anisetti らは, GSM 方式の受信信号強度データベースを用いた端末位置推定手法 [21] により端末位置の候補を複数推定したうえで, 端末のカメラで撮影した画像を, 特徴的な建造物などが登録されたデータベースと照合することで, 端末位置の候補を適切に絞り込む手法を提案した. 星らは, BLE の Fingerprint 方式 [22] による位置推定の精度が, 移動物体による電波遮蔽の影響により著しく悪化する問題を解決するため, カメラ画像を用いて, 電波遮蔽の影響の少ない BLE ビーコンを選択する手法を提案した. しかしながら, どちらも屋外環境では数十 m 程度の精度が限界であり [23], ミリ波の遮蔽予測の要件を満たさない.

3. 提案手法

本章では, RGB-D カメラ画像と無線情報を組み合わせて通信端末の位置を推定する手法を提案する.

3.1 提案手法の概要

提案手法は, 基地局側の情報のみを用いて, 通信端末の位置を推定する. 基地局に併設したカメラの画像から抽出した物体間の遮蔽と, 受信信号強度の時間変化を結びつけることで, 画像内の各領域に通信端末があるかどうかを判定する. ミリ波は直進性が強いいため, 物体に遮蔽されると受信信号強度が急激に低下し, 遮蔽が解消されるとすぐに回復する. 一方で, カメラがとらえる可視光は, 物体に遮蔽されると瞬時に遮断され, 遮蔽が解消されると再びカメラに届く. つまり, 画像上の通信端末の位置では, 物体による遮蔽が発生/解消するタイミングと, ミリ波の受信信号強度が低下/回復するタイミングが一致する. 提案手法

は, この一致を利用して, 無線情報とカメラ動画画像を組み合わせることで端末位置を推定する. 具体的には, ミリ波の強い直進性を利用して, 画像上の物体間の遮蔽を定量化し, 受信信号強度の時間変化と遮蔽の変化が一致する領域を探索する.

処理の流れを図 1 に示す. 提案手法は, (a) から (d) までの 4 つの処理ステップで構成される. 入力には, 基地局に併設した RGB-D カメラで撮影した動画画像と, 基地局で測定した受信信号強度を用いる. まず, (a) 画像認識技術を用いて画像から物体を検出し, 追跡する. 検出された物体が, 端末を持つ物体の候補となる. 次に, (b) ミリ波を遮蔽する領域として, 移動物体の領域を抽出する. 遮蔽物の形状によって, ミリ波の伝搬が受ける影響は変わるため [4], 物体の輪郭に沿った領域を画素単位で抽出する. そして, (c) 検出・追跡された物体の周辺領域 (以下, ROI: Region of Interest) 内の各点において, 他の物体による遮蔽の度合いを独自に定義した方法で定量化する. 以後, この定量化された値を「遮蔽量」と呼ぶ. 提案手法では, 入力画像における ROI 内の各画素を対象の点として, 遮蔽量を算出する. さらに, (d) ROI 内の各点で算出した遮蔽量と, 受信信号強度の時間変化との類似度を評価する. この類似度を, 通信端末がその位置に存在する尤度を表す端末位置スコアと見なす. 最後に, 算出した端末位置スコアに基づいて, 画像上の通信端末の位置を推定する. (c) と (d) の無線情報とカメラ画像を組み合わせることで端末の位置推定を行うステップが, 従来手法にはない, 提案手法の特徴的な処理である.

3.2 遮蔽量の算出

3.1 節で述べた遮蔽量の定義について説明する. 図 2 は, ミリ波の伝搬と遮蔽, カメラモデルの幾何学的関係を簡略化した模式図である. 伊藤ら [4] と同様に, 基地局のアンテナの近傍に RGB-D カメラを設置した環境を想定し, アンテナ位置から見た可視光を画像として撮影する. このときの画像上の物体による遮蔽の度合いを, ミリ波の伝搬を模擬して定量化する. ミリ波は, 送受信アンテナをつなぐ見通し線を中心とする領域内で広がりを持って伝搬する [24].

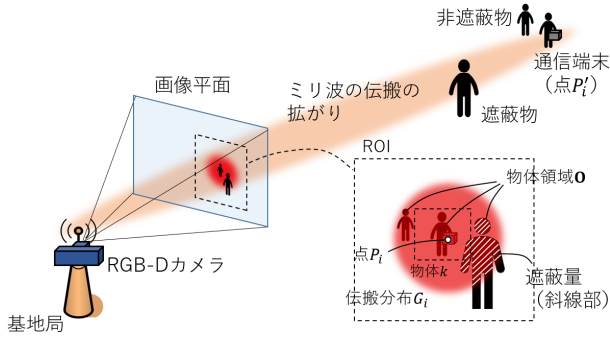


図 2 遮蔽量の定義の模式図

Fig. 2 Diagram of the definition of occlusion intensity.

この広がり画像平面に透視投影すると、画像上の通信端末の位置を中心とした同心円状の密度を持つ領域になる。本稿では、この領域を伝搬分布と呼ぶ。ミリ波は直進性の強い伝搬特性を持つ、すなわち可視光に近い場合、画像上の物体領域と伝搬分布が重なった分だけミリ波が遮蔽されると仮定する。ただし、端末と基地局の間に位置する物体のみ、遮蔽に寄与する物体領域として扱う。この仮定に基づき、伝搬分布のうち、物体領域に遮られた部分（図 2 の斜線部分）の積分に負の符号を付けた値を遮蔽量と定義する。符号反転は、遮蔽量の変動と受信信号強度の変動の方向を一致させるために行う。

以下に、遮蔽量の具体的な算出方法を述べる。いま、点 P_i ($i \in \mathbf{R}_k, k \in \mathbf{K}$) に対応する空間内の点 P'_i に端末があるとすると、ただし、動画から検出および追跡された物体の集合を $\mathbf{K}$ 、物体 k の ROI 内の画像上の各点を表すインデックス集合を $\mathbf{R}_k$ とする。物体の検出および追跡には、画像認識に基づく物体検出器および追跡器を利用する。検出および追跡された物体ごとに、外接矩形を ROI として設定する。もしくは、検出位置のずれや、外接矩形の外に端末が位置する可能性を考慮し、外接矩形の周辺を含む範囲を ROI としてもよい。端末が静止している環境では、物体検出を行わずに、ROI を任意の領域に固定する [25]。

移動物体が点 P'_i から到来するミリ波を遮蔽するとき、遮蔽量 b_i を計算することを考える。まず、伝搬分布 G_i を、点 P_i を中心とした分散 σ のガウス分布で近似する。ただし、 r は画像平面上の点 P_i からの距離を表す。

$$G_i(r, \sigma) \simeq \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1)$$

次に、画像中の物体領域 $\mathbf{O}$ を抽出する。物体領域の抽出には、背景差分を用いる。抽出した物体領域 $\mathbf{O}$ のうち、基地局から見て点 P'_i より手前にある部分のみ、ミリ波の遮蔽に影響を与える。そこで、点 P_i を含む物体 k の平均深度 $\bar{d}_k$ よりも手前にある点では 1、それ以外の点では 0 の値をとる遮蔽領域関数 $B_i(j)$ ($j \in \mathbf{R}_k$) を定義する。ただし、物体 k の平均深度 $\bar{d}_k$ は、物体 k が他の物体によって遮蔽されていないときの、物体 k の ROI 内の物体領域 $\mathbf{O}_k$

における平均深度とする。

$$B_i(j) = [P_j \in \mathbf{O}][d_j < \bar{d}_k - \varepsilon_d] \quad (2)$$

ε_d は点 P_i を含む物体自身の物体領域を取り除くための調整項であり、 $[\cdot]$ はアイバーソンの記法を表す。なお、ROI を固定する場合は、点 P_i を含む物体 k の平均深度 $\bar{d}_k$ を、点 P_i の深度 $\bar{d}_i$ に置き換えればよい。

上記の定義に基づき、遮蔽量 b_i は次のように計算できる。

$$b_i = - \sum_{r, \theta} G_i(r, \sigma) B_i(j_{i, r, \theta}) \quad (3)$$

ここで、 θ は点 P_i を原点とした極座標における角度、 $j_{i, r, \theta}$ は (i, r, θ) から決まる点のインデックスを表す。

なお、本来は送受信アンテナ間の距離を考慮して伝搬分布の広がり σ の値を決める必要があるが [24]、本稿では、距離に依存しない定数と見なして基礎的な検討を行った。より厳密な遮蔽モデルの導入は、今後の課題とする。

3.3 端末位置の推定

端末の位置は、動画から算出した遮蔽量の時間変化と、基地局で測定した受信信号強度を比較することで推定する。基地局と通信端末との見通し内通信路を物体が通過したとき、時刻 t における受信信号強度 $s(t)$ は、物体による遮蔽が発生したタイミングで低下し、遮蔽が解消されたタイミングで上昇する。一方、通信端末が位置する点 P_e ($e \in \mathbf{R}_h, h \in \mathbf{K}$ は端末を保持する物体のインデックス) に対して算出した遮蔽量 $b_e(t)$ は、点 P_e を中心とする伝搬分布 G_e を移動物体が遮蔽したタイミングで減少し、遮蔽が解消されたタイミングで増加する。つまり、通信端末の位置の遮蔽量 $b_e(t)$ は受信信号強度 $s(t)$ と同様の時間変化の傾向を持つ。したがって、 $\mathbf{R}_k$ の各点 P_i について、遮蔽量の時系列 $b_i(t)$ と受信信号強度の時系列 $s(t)$ の類似度を評価することで、各点 P_i に端末が位置する確からしさを求めることができる。本研究では、類似度の指標として正規化相互相関を用いる。類似度の値を、端末が点 P_i ($i \in \mathbf{R}_k, k \in \mathbf{K}$) に位置する尤度を表す端末位置スコア $L_k(i)$ とする。

$$L_k(i) = \frac{\sum_t (b_i(t) - \bar{b}_i)(s(t) - \bar{s})}{\sqrt{\sum_t (b_i(t) - \bar{b}_i)^2} \sqrt{\sum_t (s(t) - \bar{s})^2}} \quad (4)$$

検出されたすべての物体 $\mathbf{K}$ の中で、最大のスコアをとる点 P_e を ROI 内に含む物体 $\mathbf{R}_h$ が、通信端末を保持していると判定し、点 P_e を通信端末の推定位置とする。通信端末の位置に対応する点のインデックス $\tilde{e}$ は次のように求められる。

$$\tilde{e} = \operatorname{argmax}_{i, k} L_k(i). \quad (5)$$

4. 評価

提案手法の有効性を示すため、ミリ波帯の基地局で形成される、最大 50m 程度の通信エリア（ナノエリア）[2] を模擬した屋外環境で実験を行い、得られたデータで評価を行った。

4.1 実験環境

実験環境を図 3 に示す。現実の環境を想定して、基地局の設置高にバリエーションを持たせた。ビルの軒先、低層住宅の屋根を想定した 10m 高の高所基地局と、電柱あるいは信号機を想定した 4m 高の低所基地局を構築した。端末は、各基地局と水平距離でおよそ 30m, 40m, 50m の 3 パターンの位置に対向させた。端末は、距離 30m の場合は低所基地局と、それ以外の場合は高所基地局と接続した。送受信機には、自動で適切な方向にビームを向けることが可能なビームフォーミング機能を有する、60 GHz 帯の WiGig 装置を用いた。ビームフォーミングの制御手法は、WiGig の標準規格に沿ったものであり、アンテナの指向特性を水平方向に探索して、高い受信信号強度が得られる方向にビームを向けることができる。実際に、遮蔽物がない見通しの良い環境において、おおむね基地局と端末を結ぶ直線の方角に対応する指向特性が選択されていることを確認した。端末の移動の影響を調べるため、端末を静止させる状態と、基地局に対して水平方向に移動させる状態の 2 つの状態での測定を行った。端末は手押し台車に搭載し、高さは 1.2m とした。遮蔽物は歩行者または車両とし、送受

信機の間を通過するように移動させた。各基地局で、端末から送信される信号の受信信号強度を毎秒 16 サンプルで測定した。RGB-D カメラ（ステレオカメラ）は端末側に向けて基地局のアンテナの横に設置し、深度付きグレースケール画像を 10 fps で撮影した。画像解像度は 1,600×1,200 とし、深度方向の分解能は 50m 先の位置で 1.93m となった。実験時の天候は晴れまたは曇り、時間帯は日中帯とした。

4.2 端末位置スコアの算出結果

提案手法により端末の位置を推定できることを示すため、実験で測定したデータを用いて端末位置スコアを算出した。算出した結果の一例を図 4 に示す。本節では、検出及び追跡の誤差の影響を取り除くため、ROI を画像上に固定する手法 [25] を用いた。ROI は、各端末と遮蔽物を含む図 4 の破線部に固定した。物体領域の抽出には、明暗の変化に頑健な動的背景差分法 [26] を用いた。この例では、3 台の端末を図 3(a) に示す 3 つの位置に静止させた。図 4(b) に、各端末の画像上の位置をプロットした。遮蔽物には、歩行者 2 名のペアが各端末の前を通過するように、計 4 名の歩行者に移動させた。なお、端末 1 と端末 2 の前を各ペアが同じタイミングで横切るように指示した。これまでの筆者らの基礎検討 [25] から、1 回から 3 回程度の遮蔽が発生すれば端末位置スコアが算出できることが明らかとなっている。本実験では、端末の前を歩行者のペアが 3 回通過した際の、それぞれ約 2 秒間の測定データを入力に用いた。3 台の端末から得られる受信信号強度ごとに、端末位置スコアを算出した結果を図 4(c) に示す。なお、端

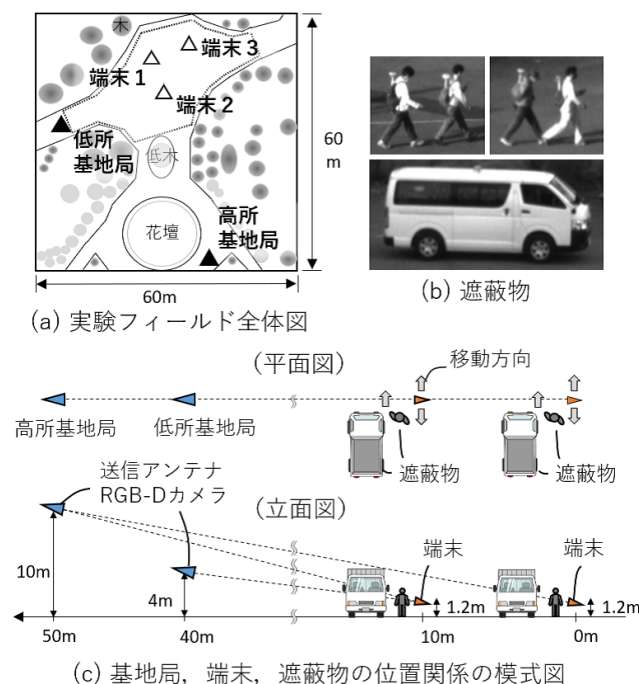


図 3 実験環境の図面と遮蔽物の外観

Fig. 3 Experimental environment and appearances of blocking objects.

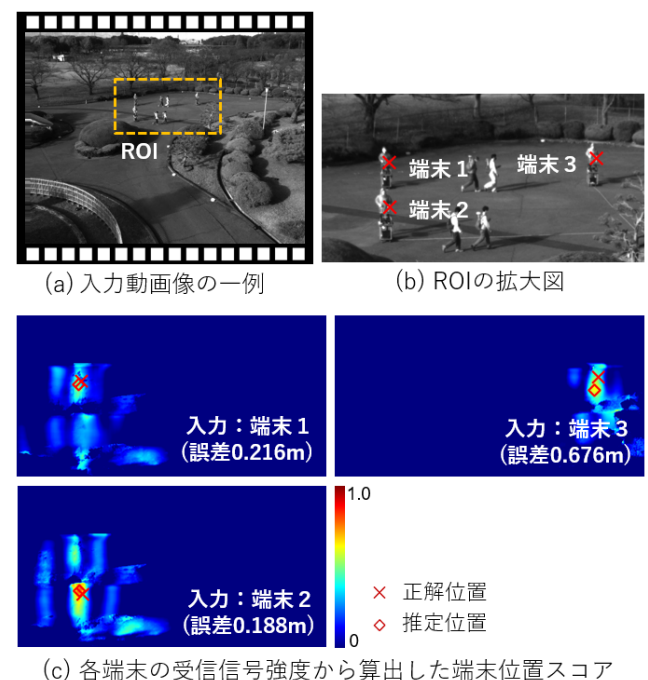


図 4 端末位置スコアの算出結果の一例

Fig. 4 Example of the calculation result of positioning score.

表 1 提案手法による通信端末の推定位置の誤差

Table 1 Error of estimated UE position by the proposed method.

端末の移動状態	遮蔽物の種類	画素距離 [px] / ユークリッド距離 [m]			
		距離 30.0 m	距離 40.0 m	距離 50.0 m	遮蔽物ごとの平均
静止	歩行者	47.0 / 0.952	5.7 / 0.125	17.3 / 0.484	20.3 / 0.502
	車両	10.8 / 0.250	25.0 / 0.580	21.4 / 0.640	20.9 / 0.567
	平均	28.9 / 0.601	18.6 / 0.428	19.3 / 0.562	20.6 / 0.537
移動	歩行者	71.0 / 1.383	7.8 / 0.250	13.8 / 0.502	26.6 / 0.660
	車両	N/A	54.8 / 1.341	309.0 / 8.802	224.3 / 6.315
	平均	71.0 / 1.383	31.3 / 0.796	161.4 / 4.652	111.3 / 3.083

末位置スコアを可視化するため、端末位置スコアのうち 0 以下の値を 0 に切り詰めたうえで、全体を 255 倍し、疑似カラー化して画像として表示した。

端末位置スコアの高い領域が、入力した受信信号強度に対応する端末の周辺に広がる結果が得られた。端末の位置は、スコアが最大値の点を選ぶことで推定できる。図 4(c) に、推定位置をプロットした。また、入力：端末 1 と入力：端末 2 の結果から、互いにもう一方の端末の周りのスコアが上昇していることが読み取れる。これは、端末 1 と端末 2 に対して発生する遮蔽がほぼ同じタイミングであったことが原因と考えられる。誤った位置の端末位置スコアが上昇してしまうと、誤推定の恐れが生じる。この問題については、4.5 節にて考察する。

4.3 端末位置推定の精度評価と分析

提案手法により推定した通信端末の位置と、実際の通信端末の位置（真値）との誤差を算出した結果を表 1 に示す。真値は、画像上の端末のアンテナ位置を手作業でポインティングして決定した。端末の移動状態、遮蔽物の種類、基地局から端末までの距離の条件ごとに、2 回または 3 回の試行の平均誤差を算出した。ただし、安全を考慮したスペースの制約から、端末が移動、車両による遮蔽、距離 30 m、の条件での試行は実施していない。誤差は、入力データの末尾時点での、画像上の推定位置と真値との間の画素距離で評価した。加えて、空間的な距離でも評価するため、基地局から端末までの距離とカメラの内部パラメータを用いて、画素距離をユークリッド距離に変換した。基地局から端末までの距離の測定には、高精度測位を行う RTK-GNSS を用いた。本節では、各物体の外接矩形をもとに、ROI を決めた。端末は台車に載せて移動させるため、台車を押す人物の外接矩形の外に位置する。そのため、外接矩形を縦に 1.5 倍、横に 3 倍に拡張した矩形領域を ROI とした。画像認識による物体検出・追跡の精度評価は本稿のスコープから外れるため、物体の外接矩形は手作業により作成した。物体検出および追跡の精度が提案手法に与える影響については、4.5 節で考察する。

静止端末に対して、平均誤差は画素距離で 20.6 px、ユー

クリッド距離で 0.537 m となった。一方、移動端末については、平均誤差は画素距離で 111.3 px、ユークリッド距離で 3.083 m となった。移動端末のいくつかの試行で、端末を保持する物体の判定に失敗している例があった。その場合に誤差が数 m 単位となるため、平均誤差が増大した。静止端末と移動端末、それぞれ 13 回と 7 回の試行に対して、提案手法により端末を保持する物体を判定したときの成功率を算出した。端末保持の判定を行った後は、物体追跡により対象の同定を継続できるため、各試行の入力データの末尾時点で判定を行った。その結果、端末を保持する物体の判定成功率は、静止端末については 100.0%、移動端末については 71.4%、全体で 90.0% であった。端末を保持する物体の判定に成功した場合に限ると、推定位置の平均誤差は 0.625 m となった。端末の移動が提案手法に与える影響については、次節にて考察する。

基地局から端末までの距離ごとに誤差の平均をとったところ、静止端末については、誤差はほぼ変化がないか、または小さくなることが確認できる。これまでの筆者らの基礎検討 [25] でも同様の結果が得られており、端末までの距離が大きくなるほど画像上の物体が小さくなり、端末位置スコアが高くなる領域が小さくなったことが要因として考えられる。以上から、端末が静止している場合、提案手法の位置精度が送受信間の距離に依存しないという利点があるといえる。移動端末については、端末を保持する物体の判定失敗により生じる誤差が支配的となり、そのような傾向は確認できなかった。また、今回の環境では、基地局高ごとの遮蔽発生傾向に違いがなかった。そのため、基地局高の違いによる提案手法への影響は認められなかった。

4.4 端末の移動による影響の考察

端末が移動する場合、提案手法の推定精度が低下する要因について考察する。図 5(a) に、移動端末に対して算出した端末位置スコアの例を示す。この試行では、端末を載せた台車を持つ人物を含む 4 名の歩行者を 2 名ずつのペアに分け、ペアどうしを対向して移動させた。各歩行者に対して算出した端末位置スコアを比較すると、端末の周りのスコアが上がりきっておらず、それ以外の領域のスコアと

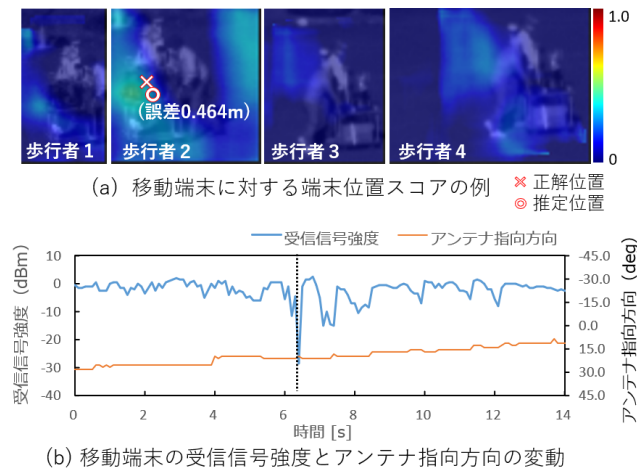


図 5 移動端末に対する端末位置スコアの算出結果と無線情報の変動
Fig. 5 Variation of radio information for moving UE and calculation result of positioning score.

の相対的な差が小さくなっていることが読み取れる。この原因を分析するため、移動端末で測定した受信信号強度と、アンテナの指向特性のピーク方向（以後、アンテナ指向方向）の時間変動を調べた。グラフを図 5(b) に示す。アンテナの指向方向は断続的に変化しており、端末の移動に不連続に追従している。受信信号強度は、遮蔽が発生したタイミング（グラフ内破線）以外でも、上下に変動している。フェージングによる局所的な電波強度の変動と、指向特性の制御による受信電力の変動の影響が含まれると考えられる。これらの変動が外乱となり、遮蔽の発生と受信信号強度の変動が一致せず、端末周辺のスコアが低下したと考えられる。逆に、外乱による受信信号強度の変動と、端末以外の位置に対する遮蔽が偶然一致すると、誤った位置の端末位置スコアが上昇する恐れもある。

今後の課題として、端末の移動により生じる受信信号強度の外乱を考慮した改良を行う必要がある。これには、ビームフォーミングによるアンテナ指向特性の制御情報を利用することが、有効と考えられる [11]。ミリ波を利用する場合、利得の高いアンテナが必要となるため指向特性が鋭くなり、通信エリアが狭くなる。ビームフォーミング技術により、端末の位置に応じて指向特性を変えることで、広い範囲に通信を提供する。このとき、指向特性のピーク方向の変動から、端末の静止または移動状態を推定することができる。端末が移動している場合は、受信信号強度に外乱が含まれる可能性があるとして判断し、適応的に受信信号強度の取り扱いを変化させることが有効と考えられる。たとえば、端末が移動している場合、画像から遮蔽が発生していると検知した短い区間の受信信号強度のみを入力に用いることで、外乱の影響を抑えることができる。また、指向特性のピーク方向から、端末の方向を大まかに把握することで [27]、明らかな誤推定を除去することができる。さらに、端末位置の推定結果をビームフォーミングの制御ア

ルゴリズムに提供することで、アンテナ指向特性のミスアライメントを防ぐなど [28], [29]、無線制御への応用も可能と考えられる。これらの改良方法の検証については、今後の課題となる。

4.5 混雑環境で生じる課題の考察

物体が多数存在する環境で生じる課題について考察する。提案手法は、画像内の物体を検出・追跡している間のデータを用いるため、追跡が途切れてしまうと、それ以降の端末位置を推定できなくなるという課題がある。本稿では、基礎検討として、手作業で物体の外接矩形を作成したが、実用上は、画像認識による検出器および追跡器を用いることになる。近年、深層学習の著しい発展により、高い検出・追跡精度が得られるようになっている [30], [31]。しかし、都市部の密集地帯など、狭い範囲を多数の車両や人物が行き交うような環境においては、すべての対象物を切れ目なく継続的に検出・追跡することが難しくなる。画像認識による検出・追跡の精度は、ミリ波の遮蔽予測に関する先行文献 [11] においても課題とされている。物体検出の予備的な検証として、公開データセットの MS COCO [32] で学習した YOLOv4 [33] を用いて、4.1 節で述べた実験環境において、約 7 分間、2 台の車両と 9 名の歩行者が行き交うシーンに対して、物体検出を行った。検出対象は、MS COCO に含まれる “person”, “car”, “truck” の 3 種類の物体とし、それ以外の物体は検出しないように学習した。信頼度の閾値を 0.25、正誤判定の閾値を $IoU = 0.5$ とし、精度を評価した結果、適合率が 0.71、再現率が 0.79 となった。一般的な追跡器は、検出器の出力を基に追跡を行うため [34]、検出失敗の影響を受けて、頻繁に追跡の途切れが生じることになる。

したがって、物体追跡が失敗した場合にも、端末位置推定を継続させる仕組みを考案する必要がある。たとえば、過去の物体の移動経路から将来の移動を予測することで [35]、追跡が途切れた場合にも、予測先で端末位置の推定を行うことが可能となる。さらに、端末位置の推定結果を逆に物体追跡にフィードバックすることで、1 度ロストした追跡を復帰させることもできる。また、複数の基地局から測定した受信信号強度や RGB-D カメラの動画をを用いることで、端末位置推定の継続性を向上させることができる。複数の視点から見た遮蔽状況は異なるため、より多くの情報を推定に用いることができる。上述した画像認識精度の課題についても、改善が見込める [36]。

混雑環境では、遮蔽が同時多発的に発生することで、誤推定が生じる恐れがある。4.2 節で述べたとおり、端末の位置とそれ以外の位置で同時に遮蔽が発生した場合、それぞれの位置の端末位置スコアが上昇するため、どちらに端末があるか判別が難しくなる。本手法を都市部などに適用するためには、この問題を解決することが重要な課題とな

る。一方で、複数回発生した端末に対する遮蔽と、まったく同じ遮蔽が端末以外の位置で発生する可能性は低い。これを利用し、受信信号強度が低下していないときに遮蔽があった領域の端末位置スコアを小さく補正するなど、新たな端末位置スコアの算出手法の考案が必要である。

4.6 ミリ波の遮蔽予測への適用

ミリ波の遮蔽予測に提案手法を適用した場合の、有効性と課題について考察する。ミリ波の遮蔽を予測するためには、端末を持つ物体を正しく判定したうえで、物体内の端末の位置を推定する必要がある。本稿の実験環境では、端末を保持する物体の判定に 90.0% の確率で成功し、その際の位置の推定精度は平均誤差 0.625 m となった。フェージングを含むミリ波の遮蔽を予測するためには、端末の位置を数十 cm の精度で把握する必要があるため [4]、位置精度が十分とはいえない。一方で、見通し内通信路に対する遮蔽の有無を予測するだけであれば、提案手法の位置精度でも十分といえる。ミリ波通信の遮断を防ぐための無線リンク制御 [2] に、フェージングを含む遮蔽予測が必要かどうかは、今後の検討課題である。

提案手法を実際の通信環境で利用するうえで、夜間および悪天候時への対応も今後の課題となる。本稿で使用した RGB-D カメラの代わりに、LiDAR や遠赤外線カメラなどを用いることで、時間帯や天候の影響を受けないセンシングが可能となる。しかし、これらのセンサデータに提案手法を適用するためには、RGB-D カメラとは異なるセンサ特性やデータ構造、空間分解能に合わせた手法の再検討が必要となる。

5. 結論

本研究は 5G システムの高度化に向けて、基地局で取得できる情報のみを用いて、通信端末の位置を推定する手法を提案した。提案手法は、ミリ波の強い直進性を利用し、画像から抽出した物体どうしの遮蔽の時間変化と、基地局で測定した受信信号強度の時間変化を比較することで、画像上の端末の位置を推定した。実際の通信環境を模した屋外環境で実験を行った結果、提案手法により 30 m から 50 m の距離にある通信端末の位置を推定できることを示した。端末を保持する物体の判定に 90.0% の確率で成功し、その際の位置推定の平均誤差は 0.625 m となった。今後は、端末が移動する場合に、受信信号強度の外乱の影響で、推定精度が低下してしまう課題の解決に取り組む。さらに、より複雑な環境にも適用できるようにするため、物体追跡が失敗した場合にも、端末位置推定を継続させる手法の検討を行う予定である。

謝辞 本研究は総務省委託研究「第 5 世代移動通信システムの更なる高度化に向けた研究開発 (JPJ000254)」の成果の一部である。

参考文献

- [1] Sun, S. et al.: Investigation of Prediction Accuracy, Sensitivity, and Parameter Stability of Large-Scale Propagation Path Loss Models for 5G Wireless Communications, *IEEE Trans. Vehicular Technology*, Vol.65, No.5, pp.2843–2860 (2016).
- [2] Murakami, T. et al.: Research Project to Realize Various High-reliability Communications in Advanced 5G Network, *2020 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, pp.1–8 (2020).
- [3] Iimori, H., de Abreu, G.T.F., Taghizadeh, O., Stoica, R.-A., Hara, T. and Ishibashi, K.: Stochastic learning robust beamforming for millimeter-wave systems with path blockage, *IEEE Wireless Communications Letters*, Vol.9, No.9, pp.1557–1561 (2020).
- [4] 伊藤智史, 三原翔一郎, 村上隆秀, 新保宏之: 機械学習を用いたミリ波向け遮蔽影響予測の屋外環境への適用検証, 信学技報, Vol.120, No.89, pp.7–12 (2020).
- [5] Dardari, D., Closas, P. and Djurić, P.M.: Indoor tracking: Theory, methods, and technologies, *IEEE Trans. Vehicular Technology*, Vol.64, No.4, pp.1263–1278 (2015).
- [6] 内閣府宇宙開発戦略推進事務局: みちびき (準天頂衛星システム), 内閣府 (オンライン), 入手先 (<https://qzss.go.jp/index.html>) (参照 2020-7-14).
- [7] Hata, M.: Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services, *IEEE Trans. Vehicular Technology*, Vol.29, No.3, pp.317–325 (1980).
- [8] Okamoto, H. et al.: Machine-learning-based throughput estimation using images for mmWave communications, *2017 IEEE 85th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, pp.1–6, IEEE (2017).
- [9] Nakashima, K. et al.: Impact of Input Data Size on Received Power Prediction Using Depth Images for mm Wave Communications, *2018 IEEE 88th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall)*, pp.1–5, IEEE (2018).
- [10] Nishio, T. et al.: Proactive received power prediction using machine learning and depth images for mmWave networks, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol.37, No.11, pp.2413–2427 (2019).
- [11] Charan, G., Alrabeiah, M. and Alkhateeb, A.: Vision-Aided 6G Wireless Communications: Blockage Prediction and Proactive Handoff, arXiv (2021).
- [12] Xin, X., Jiang, J. and Zou, Y.: A review of Visual-Based Localization, *Proc. 2019 International Conference on Robotics, Intelligent Control and Artificial Intelligence*, pp.94–105 (2019).
- [13] Paul, A. and Sato, T.: Localization in wireless sensor networks: A survey on algorithms, measurement techniques, applications and challenges, *Journal of Sensor and Actuator Networks*, Vol.6, No.4 (2017).
- [14] Sumikura, S., Shibuya, M. and Sakurada, K.: Open-VSLAM: A versatile visual slam framework, *Proc. 27th ACM International Conference on Multimedia*, pp.2292–2295 (2019).
- [15] Anup, S., Goel, A. and Padmanabhan, S.: Visual positioning system for automated indoor/outdoor navigation, *TENCON 2017 – 2017 IEEE Region 10 Conference*, pp.1027–1031 (2017).
- [16] Bohanudin, S., Ismail, M. and Hussain, H.: Simulation model and location accuracy for observed time difference of arrival (OTDOA) positioning technique in Third Generation system, *2010 IEEE Student Conference on Research and Development (SCoReD)*, pp.63–66 (2010).

- [17] Celik, G., Celebi, H. and Tuna, G.: A novel RSRP-based E-CID positioning for LTE networks, *2017 13th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC)*, pp.1689–1692 (2017).
- [18] Li, B., Quader, I.J., Dempster, A.G., et al.: On outdoor positioning with Wi-Fi, *Positioning*, Vol.1, No.13 (2008).
- [19] Anisetti, M., Ardagna, C.A., Bellandi, V., Damiani, E., Döller, M., Stegmaier, F., Rabl, T., Kosch, H. and Brunie, L.: Landmark-assisted location and tracking in outdoor mobile network, *Multimedia Tools and Applications*, Vol.59, pp.89–111 (2010).
- [20] 星 尚志, 石塚宏紀, 小林亜令, 南川敦宣: 動的遮蔽物を考慮した BLE による屋内位置推定手法の提案, 情報処理学会論文誌, Vol.60, No.1, pp.48–57 (2019).
- [21] Anisetti, M., Bellandi, V., Damiani, E. and Reale, S.: Advanced localization of mobile terminal, pp.1071–1076 (2007).
- [22] Li, B., Wang, Y., Lee, H.K., Dempster, A. and Rizos, C.: Method for yielding a database of location fingerprints in WLAN, *IEEE Proceedings – Communications*, Vol.152, No.5, pp.580–586 (2005).
- [23] Ibrahim, M. and Youssef, M.: CellSense: An Accurate Energy-Efficient GSM Positioning System, *IEEE Trans. Vehicular Technology*, Vol.61, No.1, pp.286–296 (2012).
- [24] 進士昌明: 無線通信の電波伝搬, 電子情報通信学会 (1992).
- [25] 三原翔一郎, 伊藤智史, 村上隆秀, 新保宏之: ステレオカメラ動画像とミリ波の受信信号強度を用いた通信端末の位置推定, 第 28 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.74–81 (2020).
- [26] Zivkovic, Z.: Improved adaptive Gaussian mixture model for background subtraction, *Proc. 17th International Conference on Pattern Recognition, ICPR 2004*, Vol.2, pp.28–31, IEEE (2004).
- [27] Fascista, A., Coluccia, A., Wymeersch, H. and Seco-Granados, G.: Low-Complexity Accurate Mmwave Positioning for Single-Antenna Users Based on Angle-of-Departure and Adaptive Beamforming, *ICASSP*, pp.4866–4870 (2020).
- [28] Song, B., Wei, Z., Li, G., Zhang, X., Liu, Y. and Yang, D.: Energy and spectral efficiency analysis of millimeter wave MIMO system based on known-position beamforming, *IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC)*, pp.1–6 (2017).
- [29] Miao, W., Luo, C., Min, G., Wu, L., Zhao, T. and Mi, Y.: Position-Based Beamforming Design for UAV Communications in LTE Networks, *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pp.1–6 (2019).
- [30] Liu, L., Ouyang, W., Wang, X., Fieguth, P., Chen, J., Liu, X. and Pietikainen, M.: Deep Learning for Generic Object Detection: A Survey, *arXiv* (2019).
- [31] Ciaparrone, G., Luque Sanchez, F., Tabik, S., Troiano, L., Tagliaferri, R. and Herrera, F.: Deep learning in video multi-object tracking: A survey, *Neurocomputing*, Vol.381, pp.61–88 (2020).
- [32] Lin, T.-Y., Maire, M., Belongie, S., Bourdev, L., Girshick, R., Hays, J., Perona, P., Ramanan, D., Zitnick, C.L. and Dollar, P.: Microsoft COCO: Common Objects in Context, *arXiv* (2015).
- [33] Bochkovskiy, A., Wang, C.-Y. and Liao, H.-Y.M.: YOLOv4: Optimal Speed and Accuracy of Object Detection, *arXiv* (2020).
- [34] Mekonnen, A.A. and Lerasle, F.: Comparative Evaluations of Selected Tracking-by-Detection Approaches, *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video*

Technology, Vol.29, No.4, pp.996–1010 (2019).

- [35] Zhang, P., Ouyang, W., Zhang, P., Xue, J. and Zheng, N.: SR-LSTM: State refinement for lstm towards pedestrian trajectory prediction, *CVPR*, pp.12085–12094 (2019).
- [36] Anuj, L. and Krishna, M.T.G.: Multiple camera based multiple object tracking under occlusion: A survey, *2017 International Conference on Innovative Mechanisms for Industry Applications (ICIMIA)*, pp.432–437 (2017).

推薦文

本論文は、ミリ波帯基地局に併設したステレオカメラの動画像と通信端末から受信した信号強度を組み合わせ、画像上の通信端末の位置を推定する新たな手法を提案するものである。提案手法は、端末位置の推定を端末側のセンサや計算資源を用いずに行うことを可能とする有用性が高い手法である。また、実環境における実験により手法の有効性が示されており、将来的な実現可能性が高く、今後の実サービスでの応用も期待できる。以上の理由により、本論文を推薦する。

(第 28 回マルチメディア通信と分散処理ワークショップ
プログラム委員長 石原 進)



三原 翔一郎 (正会員)

1990 年生。2012 年大阪大学基礎工学部システム科学科卒業。2014 年同大学大学院基礎工学研究科博士前期課程修了。同年 KDDI 株式会社入社, 2017 年より株式会社 KDDI 総合研究所。拡張現実, 画像認識の研究に従事。2018 年山下記念研究賞受賞。



吉川 慧司

1994 年生。2017 年京都大学工学部電気電子工学科卒業。2019 年同大学大学院情報学研究科修士課程修了。2019 年より KDDI 株式会社, 株式会社 KDDI 総合研究所。電波伝搬の予測および伝搬チャネルのモデル化の研究に従事。



村上 隆秀

1979 年生。2002 年東北大学工学部通信工学科卒業。2004 年同大学大学院工学研究科電気・通信工学専攻博士前期課程修了。2007 年同博士後期課程修了。博士（工学）。同年より KDDI 株式会社，株式会社 KDDI 研究所（現株式会社 KDDI 総合研究所）。無線アクセスネットワーク（RAN）の研究に従事。電子情報通信学会会員。



新保 宏之（正会員）

1974 年生。1997 年電気通信大学電子情報学科卒業，1999 年同大情報システム学研究科情報ネットワーク学専攻博士前期課程修了。同年，KDD 株式会社（現 KDDI 株式会社）入社後，KDD 研究所（現 KDDI 総合研究所）で勤務。Beyond5G/6G を含めた移動体通信，月面での通信，TCP/IP，飛行体基地局，運用管理システムの研究に従事。2015 年山下記念研究賞受賞。電子情報通信学会会員。本会シニア会員。