

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

三原 翔一郎¹ 伊藤 智史¹ 村上 隆秀¹ 新保 宏之¹

概要: 本研究は、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て、画像上の通信端末の位置を推定する手法を提案する。ミリ波は物体に遮蔽されると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り、これに対して、画像から通信端末の受信電力を予測することで、複数の基地局間で適切な通信制御を行う手法がこれまでに提案されている。これらの予測手法を通信端末の位置が未知の環境に適用するためには、カメラの画像と基地局で測定した無線情報とを組み合わせて、画像上の通信端末の位置を推定する必要がある。そこで我々は、ミリ波の強い直進性を利用して、移動する物体による遮蔽の変化を動画像から算出し、測定した受信信号強度の変化と比較することで、画素ごとに通信端末が位置する確からしさを算出する手法を提案した。提案手法の有効性を評価するために実験を行い、実環境で撮影したステレオカメラ動画像と測定したミリ波の受信信号強度を用いて、提案手法により画像上の通信端末の位置を推定できることを示した。

1. まえがき

第5世代移動通信システム(5Gシステム)による移動体通信サービスが2020年から本格的に展開されている。5Gシステムでは、IMT-2020 [1]において「大容量、多接続、高信頼/低遅延」というユースケースが示されている。

2025年頃を想定すると、5Gシステムの通信性能に対するユーザからの要求は大きくなり、5Gシステムの高度化が必要になると考えられる。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、個々の通信フローへの品質要求を満たすことが求められる。例えば、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。一方、5Gシステムでは、大容量通信の実現のためにミリ波帯が利用される。しかし、ミリ波は、波長が短く回折しづらいため、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し [2]、通信が遮断されてしまうという問題を抱えている。これに対し、基地局側のカメラ画像を用いて、屋内で人物に対する遮蔽の発生を予測する手法が検討されている [3]。

筆者らは、遮蔽予測を屋外、かつ多数の物体がある環境に適用するための検討を進めている。具体的には、無線通信環境を基地局側から深度カメラで撮影した画像を用い

て、移動物体による遮蔽に起因する突然の受信電力の低下を予測し、複数の基地局間で適切な通信制御を行う手法である [4-8]。しかし、前述した検討における受信電力の予測手法では、通信端末を備える物体の位置が得られていることを前提としている。ミリ波では波長が短いことから、数10cm単位の位置精度で位置が把握できないと、受信電力や遮蔽発生の予測がずれてしまう原因となる。しかし、通信端末の位置を知る方法として一般的なGPS測位では5m程度、補正情報を用いても1m程度の誤差が生じるため [9,10]、受信電力予測に必要な精度が得られない。カメラ等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通知する仕組みを構築する必要が生じてしまう。

端末側のセンサや計算資源を用いずに、基地局側の設備のみを用いて、端末の位置を把握するには、基地局側で取得した画像と無線情報を組み合わせて、画像上の通信端末の位置を推定する必要がある。近年、画像から物体を検出する技術の検出率が著しく向上し、画像上の物体の位置を高精度に推定することが可能になっている。しかし、繁華街のように公共の場所で多数の物体があるような場合、画像のみでは、検出した物体のうちどれが通信端末を保持するかは判別できない。一方、一般的に取得できる受信電力のような無線情報のみから通信端末の位置を検出しようとすると、拡張秦式等の伝搬式からおおまかな距離を推定する

¹ 株式会社 KDDI 総合研究所
KDDI Research, 2-1-15 Ohara, Fujimino-shi Saitama, Japan

ことは可能である。しかし、伝搬環境に依存することから推定される距離の精度は低く、加えて、基地局から端末への方向は取得できないことから、端末の位置を推定することはできない。

このため、画像と無線情報から端末位置に関連する情報を抽出するには、これらを上手く組み合わせた新たな手法が必要となる。そこで、ミリ波の強い直進性を利用し、画像から抽出した移動物体による遮蔽の時間変化と、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する手法を提案する。提案手法によって、基地局側の情報のみ用いて通信端末の位置を推定することが可能となる。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幾つか提案されている [3, 11–13]。これらは画像認識で広く用いられている CNN (Convolutional Neural Network) 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、画像中の移動物体がミリ波の受信電力に与える影響を予測する深層学習モデルを構築している。ただし、いずれの手法においても通信端末の位置は既知であるか、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。しかしながら、筆者らが検討している屋外、かつ多数の物体がある環境では、通信端末の位置は未知であり固定されてもいないため、これらの手法は本検討には適さない。

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 [14]、または無線情報を用いた位置推定技術 [15] がある。しかし、いずれも精度やユーザ側に掛かる負担に課題があるため、通信端末を保持する物体を特定する用途には適さない。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 5m 程度、補正情報を用いても 1m 程度の誤差が生じる [9, 10]。また、天球の見通しが限られる都市部においてはさらに精度が低下する上、屋内では用いることができない等の制約がある。カメラ画像を用いた自己位置推定としては SLAM (Simultaneous Localization And Mapping) [16] や VPS (Visual Positioning System) [17] 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 [18] や E-CID (Enhanced Cell ID) 方式 [19]、Fingerprint 方式 [20] があるが、いずれも数十 m 単位の誤差が生じるため [9]、端末を保持する物体の特定には精度が不足する。

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 [21] 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 [22] 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 [23] により端末位置の候補を複数推定した上で、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 [24] による位置推定が移動物体による電波遮蔽の影響により精度が著しく悪化する問題を解決するため、カメラ画像から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 [25]、端末を保持する物体の特定には適さない。

3. 提案手法

本研究が提案する、ステレオカメラの動画像とミリ波の受信信号強度を用いた端末位置の推定手法について説明する。

3.1 提案手法の概要

提案手法は、ミリ波の強い直進性を利用して、画像と無線情報の時間的な変化を結びつけることで、画像上の通信端末の位置を推定する。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、カメラが捉える可視光は、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。従って、物体がミリ波を遮蔽しながら通信端末の前を通過すると、ミリ波の受信信号強度が低下したと同時に画像上では通信端末が物体に遮蔽され、受信信号強度が回復したと同時に通信端末が再び画像に映るようになる。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。筆者らは、これらの時間的な変化が一致する領域を画像上で探索することで、通信端末の画像上の位置を推定することを実現した。具体的には、画像上の各領域に対して、物体による遮蔽の時間変化と、実際のミリ波の受信信号強度の時間変化を比較し、これらが類似した場合、そこに通信端末がある可能性が高いと推定する。

処理の流れを図 1 に示す。入力にはステレオカメラで撮

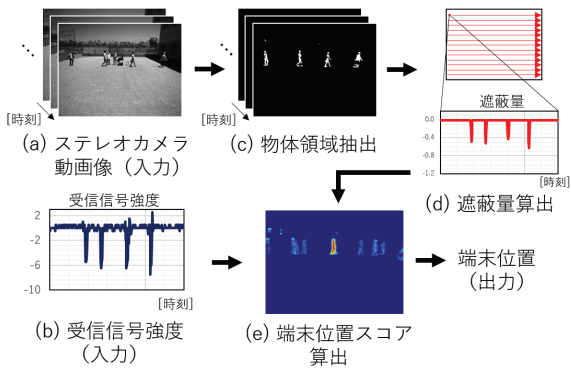


図 1 提案手法の処理の流れ

影した動画と基地局で測定した受信信号強度を用いる。まず、画像から移動物体の領域を抽出する(図1(c))。次に、抽出した物体領域を用いて、画像上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(図1(d))。本研究ではこの定量化した値を遮蔽量と呼ぶこととする。基地局と通信端末との見通し内通信路を移動物体が通過したとき、画像上の通信端末の位置で算出した遮蔽量と、実際の受信信号強度には同様の時間変化が生じると考えられる。そこで、画像上の各位置で算出した遮蔽量と受信信号強度の時間変化の類似度を評価し、この類似度を通信端末がそこに存在する確からしさを表す端末位置スコアとする(図1(e))。最後に、端末位置スコアに基づいて、画像上の端末位置を推定する。

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に遮蔽量の定義の模式図を示す。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。本研究では、伊藤ら[11]と同様に基地局のアンテナの近傍にステレオ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。ミリ波は、送受信アンテナを繋ぐ見通し線を中心とする領域内で拡がりを持って伝搬する[26]。この拡がりを画像上で考えると、画像上の通信端末の位置(注目画素)を中心とした同心円状の密度をもつ領域になる。本研究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もつため(つまり可視光に近い伝搬特性をもつため)、通信端末とカメラの間を移動する物体が画像上で占める領域(遮蔽物体領域)が伝搬分布と重なった分だけミリ波が遮蔽されると仮定する。そして、本研究では伝搬分布のうち遮蔽物体領域と重なった部分の積分に負の符号を付けた値を遮蔽量と定義する。

以下に、遮蔽量の具体的な算出方法を述べる。いま、画像 I が含む任意の注目画素 $P_i (i \in \mathbf{I})$ に対応する空間上の点 P'_i に通信端末があると仮定して、点 P'_i から到来するミリ波を移動物体が遮蔽したときの遮蔽量 b_i を算出することを考える。ただし、 \mathbf{I} は画像 I 全体の画素のインデックス

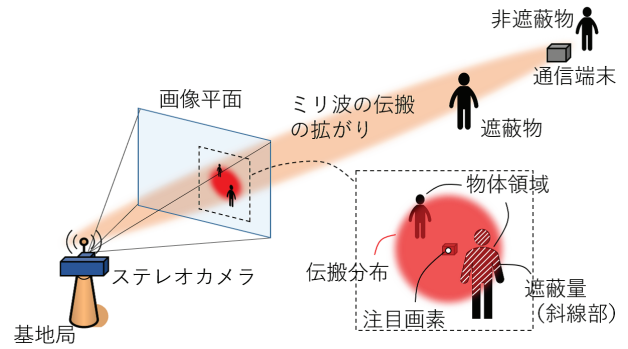


図 2 遮蔽量の定義の模式図

集合を表す。画像上でのミリ波の伝搬の拡がりを表す伝搬分布 G_i は、本研究では注目画素 P_i を中心とした分散 σ^2 のガウス分布で近似する。

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

r は注目画素 P_i からの距離を表す。次に、画像上の移動物体の物体領域 \mathbf{O} を抽出する。本研究では、環境光の変化に頑健な動的背景差分法[27]を用いて推定した前景領域を物体領域 \mathbf{O} とした。抽出した物体領域 \mathbf{O} のうち、基地局から見て点 P'_i より手前にある物体(図2の遮蔽物)の領域のみミリ波の遮蔽に影響を与える。そこで、物体領域 \mathbf{O} が含む任意の画素のうち、基地局から見て、注目画素 P_i よりも手前にある画素では1、奥にある画素では0の値を取る遮蔽物体領域関数 $B_i(j) (j \in \mathbf{I})$ を定義する。奥行きの情報にはステレオカメラが出力する視差を利用し、物体に遮蔽されていないときの注目画素 P_i の視差 \bar{d}_i と各画素の視差 d_j とを比べることで、各画素が注目画素 P_i よりも手前か奥かを判断した。

$$B_i(j) = [P_j \in \mathbf{O}][d_j > \bar{d}_i] \quad (2)$$

$[\cdot]$ はアイバーソンの記法を表す。このとき、上述の遮蔽量の定義から、遮蔽量 b_i は以下の式3により算出できる。

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

ここで、 θ は画素 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) から決まる画素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や遮蔽物の位置を考慮して伝搬分布の拡がりを表す σ の値を決める必要があるが[26]、本研究では、基礎検討として σ をこれらの変数に依存しない定数として検証を行った。より厳密な遮蔽モデルの導入は、本研究の今後の課題とする。

3.3 端末位置の推定

時刻 t におけるステレオカメラの動画 $I(t)$ から算出した遮蔽量 $b_i(t)$ と、基地局で測定した通信端末の受信信号強度 $s(t)$ の時間変化を比較することで、端末位置を推定する提案手法について以下に述べる。基地局と通信端末との

見通し内通信路を移動物体が通過したとき、受信信号強度 $s(t)$ は移動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画素 $P_e (e \in \mathbf{I})$ に対して算出した遮蔽量 $b_e(t)$ は、画素 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もつことになる。逆に、端末位置でない画素に対して算出した遮蔽量 $b_{i \neq e}(t)$ は、受信信号強度 $s(t)$ とは異なる変化の傾向をもつ。従って、ステレオカメラの動画像 $I(t)$ の各画素 P_i に対して、各時刻 $t = 0 \dots T$ で算出した遮蔽量 $b_i(t)$ と受信信号強度 $s(t)$ の時間変化の類似度を評価することで、各画素 P_i に通信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、遮蔽量 $b_i(t)$ と受信信号強度 $s(t)$ の時間変化の類似度として、時系列データの類似度を表す指標として代表的な正規化相互相関を算出し、これを通信端末が画素 P_i に位置する確からしさを表す端末位置スコア $Score(i)$ とする。

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

本研究では、端末位置スコア $Score(i)$ が最大となる画素 $P_{\tilde{e}}$ を通信端末の推定位置とした。推定位置の画素インデックス \tilde{e} は式5で与えられる。

$$\tilde{e} = \underset{i}{\operatorname{argmax}} Score(i) \quad (5)$$

なお、本研究ではカメラの画角内の任意の位置で通信端末が静止している環境を想定した。通信端末が移動する場合への対応は、今後の研究課題として本稿のスコープ外とする。

4. 実験

提案手法の有効性を示すため、屋外環境で基礎的な実験を実施した。

4.1 実験環境

実験環境を図3に示す。送受信機は60GHz帯のWiGig装置を水平距離12.5m, 15.0m, 17.5mの3パターンで対向させ、受信機の周りを歩行者が通過した際の受信信号強度を毎秒16サンプルで測定した。ステレオカメラは受信機側に向けて送信機下部に設置し、1600×1200の解像度の深度付きグレースケール画像を10fpsで撮影した。送信アンテナは高さ2.7m、ステレオカメラは高さ2.4m、受信アンテナは高さ1.1mの位置に設置した。本研究では基礎検討として歩行者(人体)を遮蔽物体とし、歩行者は図3(b)に示す強遮蔽、非遮蔽、弱遮蔽のいずれかの状態となる位置を通るように、送受信機の間を結ぶ直線に対して垂直な線上を移動させた。非遮蔽は送信機から見て受信機より遠

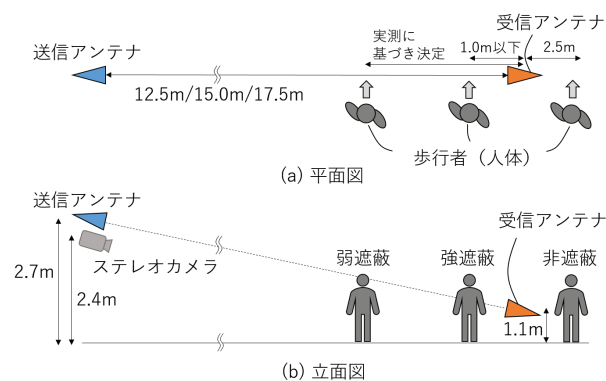


図3 実験環境の図面

方に位置しミリ波を遮蔽しない状態、強遮蔽は受信機から1.0m以内の距離でミリ波を遮蔽し、受信信号強度を6dBm程度またはそれ以上に低下させる状態、弱遮蔽は受信信号強度を数dBm程度低下させる状態を表し、弱遮蔽状態となる位置は実測に基づいて決定した。送受信機間の距離ごとに、強遮蔽のみ(4名)、強遮蔽(3名)+非遮蔽(2名)、強遮蔽(2名)+非遮蔽(2名)+弱遮蔽(1名)の状態が発生する3つの遮蔽パターンを設定し、4名または5名の歩行者が1mから2m程度の間隔を空けて、同じ方向に移動する間に測定を行った。実験時の天候は晴れ、時間帯は日中帯とした。なお、実験場所の制約から、ミリ波帯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)[5]と比べて、短い通信距離で実験を行った。実際のナノエリアを想定した距離での評価、および夜間帯や悪天候への対応については、今後の研究課題とする。送信アンテナの高さは、ミリ波帯基地局の設置場所として想定される高さ4.0m[28]を参考に、送信アンテナから受信機への俯角が実際のナノエリアの場合と近くなるように設定した。

4.2 端末位置スコアの算出結果

実験で撮影したステレオカメラ動画像と、測定した受信信号強度を用いて、提案手法により全画素に対して端末位置スコアを算出した結果の一例を図4に示す。ここでは、送受信機間の距離が15.0m、4名の歩行者が一列に並んで移動し、4回の強遮蔽状態が発生した試行パターンの測定データを用いた。全試行パターンの結果については、本稿の末尾の図8に示す。また、遮蔽量を算出する際の分散は経験的に $\sigma^2 = 10$ とした。通信端末は図4(a)(d)の赤点で示した位置にある。算出した端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に切り詰めた上で、全体を255倍し、疑似カラー化して画像として表示した結果が図4(c)である。この結果から、通信端末の周辺に端末位置スコアが高い領域(赤みを帯びた領域)が分布していることが読み取れる。

これらの結果において、独自に定義した遮蔽量の算出結果を示すため、端末位置スコアが高い領域とそうでない領

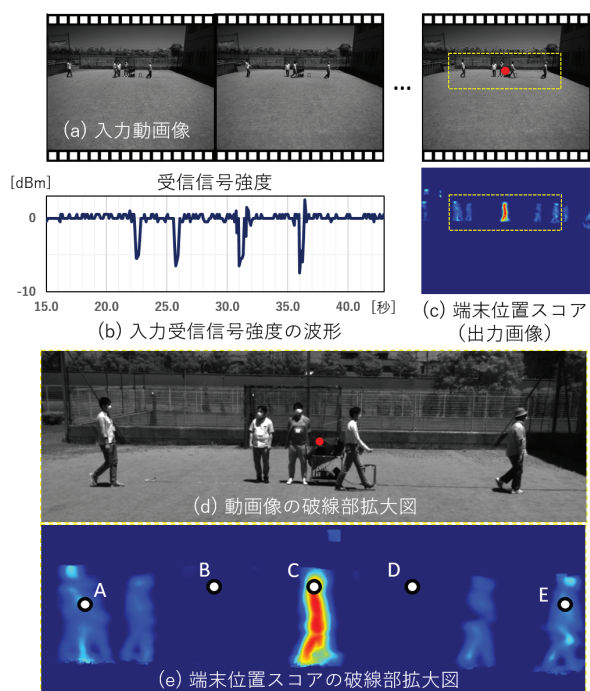


図 4 端末位置スコアの算出結果

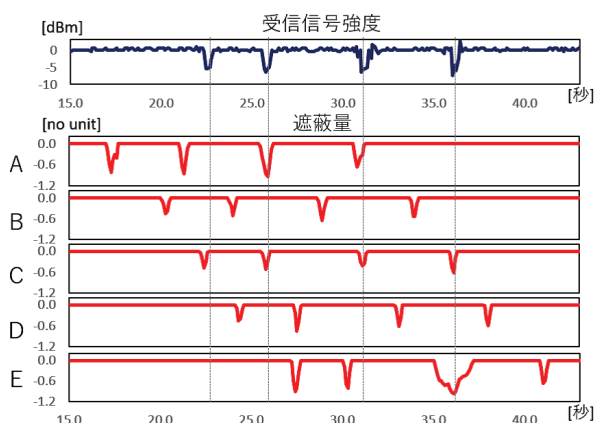


図 5 受信信号強度と遮蔽量の時間変化の比較

域で算出された遮蔽量の時間的な変化を、受信信号強度の波形と共に図5に図示する。図5の遮蔽量のグラフは、上から順にそれぞれ図4(e)の点Aから点Eの位置に対応しており、点Cは端末位置スコアが最大の位置、点Bと点Dは端末位置スコアがほぼ0の値の位置、点Aと点Eはやや端末位置スコアが高くなっている位置である。端末位置スコアが最大の点Cでは、受信信号強度と遮蔽量の変化が時間的にほぼ一致しているのに対して、他の点の遮蔽量は時間方向にシフトされたような結果となっている。点Bと点Dではすべての時間変化のタイミングがずれており、端末位置スコアが増加しなかった。点Aと点Eでは受信信号強度と遮蔽量が部分的に近い時間変化が生じており、そのため端末位置スコアがやや上昇したと考えられる。

これらの結果から、提案手法によって、画像から算出した遮蔽量と、測定した受信信号強度の時間変化の類似度を

捉えることで、各画素に通信端末が位置する確からしさを推定できることが示された。

4.3 端末位置推定の精度評価

提案手法により算出した通信端末の推定位置と、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。各行が強遮蔽、非遮蔽、弱遮蔽を組み合わせた遮蔽パターン、各列が送受信機間の距離（送受信距離）の各パターンに対応する。誤差は画像上の推定位置と真値との間の画素距離で評価した。さらに、空間的な距離でも評価するために、端末位置を通りカメラの光軸に垂直な平面に、推定位置の画素を透視投影した点と、真値とのユークリッド距離でも評価した。なお、強遮蔽のみの結果は、送受信機間の距離ごとに5回ずつ試行した結果の平均値で、それ以外はそれぞれ1回ずつ試行した結果を示した。いずれの結果においても誤差が数十 cm 単位となり、全試行で平均を取ると、画素距離では 25.0px、ユークリッド距離では 0.264m の誤差となった。

送受信距離ごとに全遮蔽パターンの結果の平均を取ったところ、送受信距離が大きくなるにつれて画素距離が小さくなる結果が得られた。これは、図8から明らかのように、送受信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ためだと考えられる。また、ユークリッド距離は送受信間の距離が大きくなって、ほぼ変化がないか、または小さくなることを確認できる。以上から、提案手法には、基地局と通信端末の間の距離が大きくなった場合でも、推定精度が低下しないという利点があると言える。

一方、遮蔽パターンごとに全送受信距離の結果の平均を取ったところ、遮蔽パターンの違いによる推定精度への影響は顕著には見られなかった。しかし、図8(c)のように、弱遮蔽を含む試行では、端末位置でない位置に端末位置スコアが高い領域が生じたことが確認できる。そのため、提案手法において弱遮蔽の影響がないとは言いきれない。弱遮蔽の影響を分析するために、遮蔽パターンごとの試行回数を増やして測定誤差の影響を抑制し、より詳細な分析を行うことが今後の課題となる。

4.4 端末位置推定の精度に影響を与える要因の考察

提案手法による、端末位置推定の精度が低下する要因について考察する。前節で示した通り、今回の実験環境において、提案手法により数十 cm 単位の精度で通信端末の位置を推定できた。しかしながら、実際の通信端末の位置から大きく離れた領域で、高い端末位置スコアが算出された試行が幾つか見られた（図8(c)左、中央）。例として、送受信機間の距離が 15.0m、強遮蔽+非遮蔽+弱遮蔽の状態が発生する試行パターンの、受信信号強度と遮蔽量の時間変化、および算出した端末位置スコアの可視化結果を図6に

表 1 提案手法による通信端末の推定位置の誤差

遮蔽パターン	画素距離 [px] / ユークリッド距離 [m]			
	送受信距離 12.5m	送受信距離 15.0m	送受信距離 17.5m	全送受信距離平均
強遮蔽	17.4 / 0.161	33.5 / 0.372	12.7 / 0.163	21.9 / 0.232
強遮蔽+非遮蔽	22.8 / 0.211	40.0 / 0.443	15.8 / 0.205	26.2 / 0.286
強遮蔽+非遮蔽+弱遮蔽	60.1 / 0.555	16.2 / 0.178	7.0 / 0.090	27.7 / 0.274
全遮蔽パターン平均	33.4 / 0.309	29.9 / 0.331	11.8 / 0.152	25.0 / 0.264

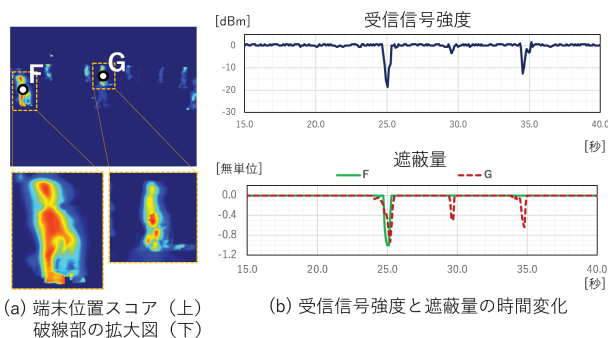


図 6 実際の通信端末の位置と大きく異なる領域で高い端末位置スコアが算出された例

示す。この試行では図 6(a) の点 G で算出した端末位置スコアが最大となったが、一方で点 F の周辺に端末位置スコアが高い領域が広がっている。点 F で算出した遮蔽量は、時刻 25.0 秒あたりの増加と減少のタイミングが受信信号強度と非常に類似しており、そのため端末位置スコアが高くなったと考えられる。その後に弱遮蔽と強遮蔽が一回ずつ発生しているが、そのとき点 F で算出した遮蔽量は一定である。それにも関わらず、端末位置スコアが高くなった原因として、今回端末位置スコアとして用いた正規化相互相関の特性が考えられる。正規化相互相関 (式 4) は二変数のうち一方が変動したときに他方が一定である場合、その値が大きく変化しない。つまり、この試行では弱遮蔽と強遮蔽が発生した際に遮蔽量が一定値を取り続けたため、スコアがあまり低下しなかったと考えられる。以上から、提案手法では、通信端末の位置以外に一度でも遮蔽量と受信信号強度の時間変化が類似した位置があると、その位置の端末位置スコアが高くなってしまい、誤推定の原因になると考えられる。

通信端末を遮蔽した物体と、同じ大きさかつ同じ速度で移動する物体が多数存在する場合、異なる位置で類似した遮蔽量が算出される可能性が高く、誤推定につながる上述の問題が発生し易くなると考えられる。そのため、一方向に同じ速度で多数の物体が移動するような環境、例えば、歩道や車道を含む市街地などに本手法を適用するためには、この問題を解決することが重要な課題となる。一方で、複数回発生した受信信号強度の変化と、全く同じ遮蔽量の変化が通信端末以外の位置で算出される可能性は低い。これを利用し、受信信号強度と遮蔽量のどちらかが一定のときにも、スコアを適切に変化させるような、端末位置スコア

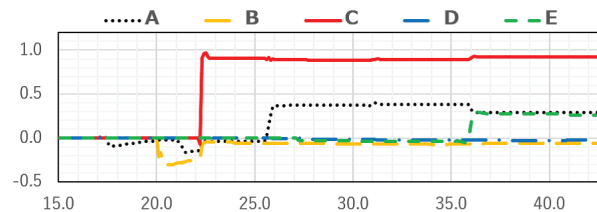


図 7 端末位置スコアの時間変化

の算出手法の考案が必要である。

他にも、カメラの解像度は位置推定の精度に影響を与える要因の一つである。提案手法はカメラの画素で空間を離散化するため、その解像度が高ければ高いほど、より精密な遮蔽量の計算や位置推定が可能になると考えられる。実際のナノエリアを想定した範囲で、多人数の人物等が写るような場合に、どの程度の解像度が必要になるのか、今後検証する必要がある。

4.5 端末位置スコアの時間方向の特性の考察

ここまでは、測定時間内のすべてのデータを用いて、オフライン処理で端末位置スコアを算出したが、リアルタイムに通信端末の位置を推定する場合、逐次的に端末位置スコアを算出することになる。そこで、提案手法により算出される端末位置スコアが、測定開始から時間的にどのように変化していくかを調べた。図 4(e) の点 A から点 E の各点において、測定開始から各時刻までのデータを用いて、端末位置スコアを算出したときの時間変化を図 7 に示す。通信端末の位置に対応する点 C の端末位置スコアが、22.1 秒あたりの 1 回目の強遮蔽が発生した時刻 (図 5 参照) に増加していることから、提案手法は遮蔽が 1 回発生した時点で端末位置の推定が可能になると言える。その後、点 A は 25.6 秒あたり、点 E は 35.8 秒あたりでスコアが増加しているが、それぞれの時刻での遮蔽量の変化がやや受信信号強度の変化とずれている (図 5 参照) ことから、点 C よりもスコアが小さいままとなったと考えられる。以上から、提案手法を用いてリアルタイムに通信端末の位置を推定する場合、遮蔽が少なくとも 1 回発生した時点で、端末位置の推定が可能になると言える。

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、画像上の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、画像から抽出した移動物体による遮蔽の時間変化と、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。屋外環境で測定したデータを用いて、提案手法により通信端末の位置を推定する実験を行い、提案手法が約15mの距離にある通信端末の位置を数十cm単位の精度で推定できることを示した。今後は、通信端末の位置以外に一度でも遮蔽量と受信信号強度の時間変化が類似した位置があると、誤推定が発生する恐れがある問題の解決に取り組む。そのため、遮蔽量と受信信号強度の時間変化が異なる傾向となった場合に、端末位置スコアを下げるような工夫を検討する。また、より厳密な遮蔽モデルの導入や、通信端末が移動する場合に対応できるように、提案手法の改良に取り組む予定である。

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] ITU-R: *ITU-R Recommendation M.2083* (2015).
- [2] Sun, S. et al.: Investigation of Prediction Accuracy, Sensitivity, and Parameter Stability of Large-Scale Propagation Path Loss Models for 5G Wireless Communications, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 65, No. 5, pp. 2843–2860 (2016).
- [3] 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).
- [4] 村上隆秀, 伊藤智史, 三原翔一郎, 新保宏之: 5Gの高度化に向けたミリ波遮蔽予測への機械学習の適用における課題, *RISING研究会*, P-2-69 (2019).
- [5] 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).
- [6] 村上隆秀, 三原翔一郎, 伊藤智史, 新保宏之: ミリ波帯の遮蔽影響予測に対応した5Gナノエリア基地局の基礎的検討, *信学総体*, B-5-60 (2019).
- [7] 三原翔一郎, 伊藤智史, 村上隆秀, 新保宏之: ナノエリア遮蔽予測に向けた奥行き方向を含む物体移動予測手法, *信学総体*, B-5-61 (2019).
- [8] 伊藤智史, 三原翔一郎, 村上隆秀, 新保宏之: 画像情報を用いたナノエリア遮蔽影響予測の計算量削減の検討, *信学総体*, B-5-62 (2019).
- [9] Dardari, D., Closas, P. and Djurić, P. M.: Indoor tracking: Theory, methods, and technologies, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 64, No. 4, pp. 1263–1278 (2015).
- [10] 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).
- [11] 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).
- [12] Okamoto, H. et al.: Machine-learning-based throughput estimation using images for mmWave communications, *2017 IEEE 85th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, IEEE, pp. 1–6 (2017).
- [13] 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)*, IEEE, pp. 1–5 (2018).
- [14] Xin, X., Jiang, J. and Zou, Y.: A review of Visual-Based Localization, *Proceedings of the 2019 International Conference on Robotics, Intelligent Control and Artificial Intelligence*, pp. 94–105 (2019).
- [15] 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).
- [16] Sumikura, S., Shibuya, M. and Sakurada, K.: OpenVS-LAM: a versatile visual slam framework, *Proceedings of the 27th ACM International Conference on Multimedia*, pp. 2292–2295 (2019).
- [17] 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).
- [18] 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).
- [19] 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).
- [20] Li, B., Quader, I. J., Dempster, A. G. et al.: On outdoor positioning with Wi-Fi, *Positioning*, Vol. 1, No. 13 (2008).
- [21] 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).
- [22] 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).
- [23] Anisetti, M., Bellandi, V., Damiani, E. and Reale, S.: Advanced localization of mobile terminal, pp. 1071–1076 (2007).
- [24] Li, B., Wang, Y., Lee, H. K., Dempster, A. and Rizos, C.: Method for yielding a database of location fingerprints in WLAN, *IEE Proceedings - Communications*, Vol. 152, No. 5, pp. 580–586 (2005).
- [25] Ibrahim, M. and Youssef, M.: CellSense: An Accurate Energy-Efficient GSM Positioning System, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 61, No. 1, pp. 286–296 (2012).
- [26] 進士昌明: 無線通信の電波伝搬, 電子情報通信学会 (1992).
- [27] Zivkovic, Z.: Improved adaptive Gaussian mixture model for background subtraction, *Proceedings of the 17th International Conference on Pattern Recognition, 2004. ICPR 2004.*, Vol. 2, IEEE, pp. 28–31 (2004).
- [28] Sun, S., Yan, H., MacCartney, G. R. and Rappaport, T. S.: Millimeter wave small-scale spatial statistics in an urban microcell scenario, *2017 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pp. 1–7 (2017).

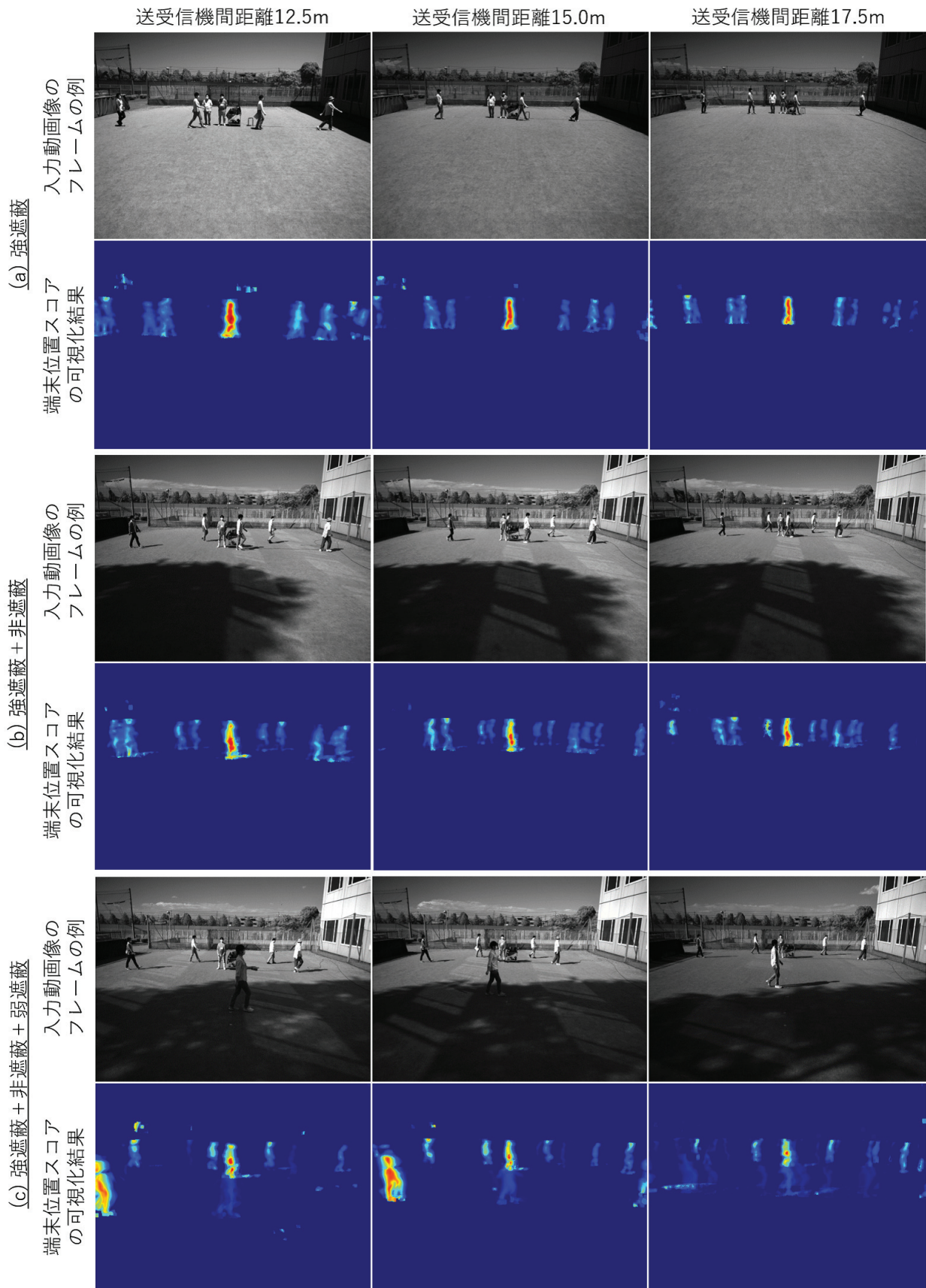


図 8 端末位置スコアの算出結果 (全試行パターン)