

赤外線カメラと再帰性反射材を用いた デバイスフリー屋内位置推定に関する検討

山藤 浩明² 前川 卓也^{1,3,4} 松下 康之¹

概要：本稿では，赤外線カメラと再帰性反射材を用いたデバイスフリー屋内位置推定手法を提案する．これまでの Wi-Fi 等の電波を用いたデバイスフリー屋内位置推定手法では，電波発信機と受信機間を人体が通過する際に電波強度が変化する現象を用いて位置を推定することが主であった．このアプローチでは，電源が必要な受信機を環境内に複数設置する必要がある，設置コストが高い．またカメラ画像を用いた屋内位置推定手法は，プライバシーの観点から問題があった．そこで提案手法では，環境内に再帰性反射材を複数設置し，それらを赤外線 LED を搭載する赤外線カメラにより撮影する．これにより，人体がある反射材を遮蔽しているとき，人がカメラとその反射材の間にいることが分かることを利用し，人の位置推定を行う．提案手法は再帰性反射材を用いることによって，電源が必要な端末を環境内に複数設置する必要が無く，可視光を撮影しないことにより，プライバシーの問題が少ないという利点がある．本研究では，この遮蔽情報をを用いた機械学習に基づく屋内位置推定手法の検討と，赤外線カメラにより撮影された画像のプライバシー侵害に関する検証を行う．

1. はじめに

近年，センサ技術の発展に伴い，様々なセンサを用いた屋内位置推定に関する研究が盛んに行われている．屋内位置推定技術は，商業施設等での動線分析や独居高齢者の見守りなどに活用されることが期待されている．

一般的な屋内位置推定手法としては，人感センサやカメラ，Laser Range Finder (LRF) を用いたものが挙げられる．しかし，人感センサを用いた手法では，建屋内に設置する多数のセンサごとに電源を確保しなければならず，設置コストが高いという問題がある．カメラを用いた手法では，1 台のカメラで広範囲を監視することが可能であるため設置台数が少なく済むという利点があるが，カメラによって屋内環境を画像として記録することはプライバシーの観点で問題がある．LRF を用いた手法は，1 台で広範囲を観測可能で，検出範囲内に存在する物体までの距離情報のみを出力するセンサであるためプライバシーの問題も小さいが，センサ自体が高価であるという問題があり，高齢者

の見守りなどのアプリケーションへの適用は困難である．

また，スマートフォンの普及に伴って，Wi-Fi などの電波を用いた手法の研究も多く行われている．これらの手法は，アクセスポイントから発せられる電波が距離に応じて減衰する原理を用いて位置推定を行う．Wi-Fi の他に，超音波や Ultra Wide Band (UWB) 等の電波を用いた手法も存在するが，これらの手法に共通した問題点として，位置推定対象のユーザにスマートフォン等の受信機を添付する必要があることが挙げられる．このような手法はデバイスバウンド (device-bound) 屋内位置推定と呼ばれており，高齢者の見守りなどの常にユーザの位置を補足し続けるアプリケーションにおいてユーザに与える負担が大きい．

近年，この負担を軽減する手法として，ユーザに受信機を持たせる必要のない，デバイスフリー (device-free) 屋内位置推定の研究が注目されている．Wi-Fi 電波を用いたデバイスフリー屋内位置推定手法では，アクセスポイントと Wi-Fi 電波受信機間を人が通過するとき，人体によって電波が反射吸収される現象を用いて位置推定を行う．しかし，この手法を用いてロバストで高精度な位置推定を行うには多数の受信機を設置する必要があり，受信機には電源を確保しなければならないことから設置コストが高い．

ここで，既存の屋内位置推定手法の問題点をまとめると，プライバシー，センサ自体の価格，デバイスを環境に設置するコスト，ユーザがデバイスを身につける負担の 4 点が挙

¹ 大阪大学大学院情報科学研究科
Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

² 大阪大学工学部電子情報工学科
School of Engineering Division of Electronic and Information Engineering, Osaka University

³ 国際電気通信基礎技術研究所
Advanced Telecommunications Research Institute International (ATR)

⁴ JST CREST

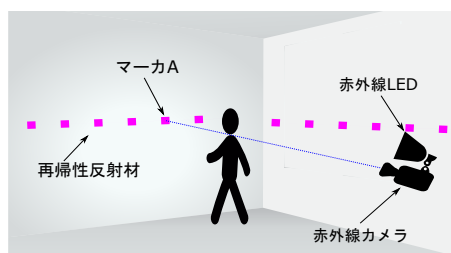


図 1 赤外線デバイスとマーカの設置例

げられる．そこで本研究では，これらの問題を解決する新しい屋内位置推定手法を提案する．提案手法では，赤外線カメラデバイスと再帰性反射材を組み合わせることでデバイスフリー屋内位置推定を実現する．ここで，赤外線カメラデバイスとは，赤外線カメラと赤外線 LED からなる装置であり，赤外線 LED が照射する方向を赤外線カメラで撮影する．再帰性反射材とは，入射光を入射した方向と同じ方向に反射する素材であり，光源と同じ位置に設置したカメラで光源の発した光の反射光をとらえることができる．

提案手法では，環境内の壁などに複数添付した再帰性反射材を赤外線カメラデバイスで撮影し，デバイスと反射材の間を人が通過したことを反射材のオクルージョンを利用して検知する（図 1）．図ではマーカ A とカメラの間に人が存在するため，カメラはマーカ A のみを捉えることができない．これにより，人がカメラとマーカ A の間に存在することが分かる．既存研究のデバイスフリー Wi-Fi 屋内位置推定では，電波の受信機と発信機の間を人が通過したことを検知するが，本研究では赤外線カメラデバイスと電源が不要な再帰性反射材の間を人が通過したことを検知することを特徴とする．本稿では，環境に 2 台のデバイスを設置し，機械学習の枠組みで人の 2 次元位置を推定することを試みる．

本研究で提案する位置推定手法の利点としては，(1) 可視光ではなく赤外線を撮影しており，強度の低い赤外線 LED を用いているためカメラ画像に人がほとんど映り込むことがなく，プライバシー侵害度が低い点，(2) 使用する赤外線カメラは市販の Web カメラを改造することで製作可能であり非常に安価な点，(3) 電波を用いたデバイスフリー位置推定手法において電波の受信機の役割を担う再帰性反射材のマーカには電源が不要であるため設置コストが低い点，(4) 半透明な再帰性反射材を用いることで屋内環境の美観を損ねることがない点，(5) 電波を用いた手法に対して光学的な手法を用いることで高精度な位置推定が行える点などが挙げられる．赤外線カメラデバイスについては各部屋に 2 台設置する必要があるが，最新の Wi-Fi 電波を用いたデバイスフリー屋内位置推定に関する研究でも，1 から 4 部屋からなる各環境に 10 個の送受信機を設置 [8], [9] しており，提案手法は既存手法と比較して少ない数の電源が必要なデバイスで高精度な位置推定が可能である．

2. 関連研究

2.1 屋内位置推定技術

屋内位置推定は，人感センサ [1] やカメラ [3]，LRF [4] を用いた手法の他に，Wi-Fi [7]，Bluetooth [13]，超音波 [10]，UWB [5] 等の電波を用いた手法が一般的である．

Aslam らは，人の接近または離脱を検知する 2 種類の人感センサを環境内に複数配置することで人の移動の検知および移動方向の推定を行うモデルを提案している [1]．また Shrivastava らは，注目する領域内の物体の有無を検出するセンサを用いて位置推定を行う際の，センサの検出範囲及びセンサの設置密度と推定誤差との関係を考察している [11]．Fleuret らは，目線程度の高さに設置した複数台のカメラで撮影した画像から，背景差分を用いることで人物の位置を推定し，存在確率マップを用いて 3 次元軌跡を推定する手法を提案している [3]．Fod らは，LRF を腰の高さに設置し，カルマンフィルタとパーティクルフィルタを用いて人物を追跡する手法を提案している [4]．これらの手法は，いずれもデバイスフリーの屋内位置推定手法であるが，(1) 多数のセンサを設置するコストの問題 [1], [11]，(2) プライバシの問題 [3]，(3) デバイスが高価であるという問題 [4] などがある．

また近年，スマートフォンの普及に伴って，Wi-Fi 等の電波を用いた屋内位置推定手法も多く提案されている．複数の電波発信機が設置された環境において，受信機が受信する各発信機からの電波強度は受信機の位置によって異なる．そのため，この受信電波強度のセットは，ユーザの各位置におけるフィンガープリント（固有情報）となる．このようなフィンガープリントを用いてユーザの位置を推定する手法をフィンガープリンティング位置推定と呼ぶ [7]．フィンガープリンティング位置推定は，オフラインで行われる学習フェーズとオンラインで行われる推定フェーズに分けられる．学習フェーズでは，環境内の座標が既知である複数の参照点において，アクセスポイントからの Wi-Fi の受信電波強度情報（フィンガープリント）を収集する．推定フェーズでは，座標が未知のテストポイントにおける受信電波強度情報を，各参照点において収集したフィンガープリントと比較することでテストポイントの座標を推定する．本研究では，各マーカが人体により遮蔽されているか否かの情報を，ユーザの位置に固有のフィンガープリントとして位置推定を行う．

2.2 電波を用いたデバイスフリー屋内位置推定技術

Wi-Fi 等の電波を用いた一般的な屋内位置推定ではユーザが常に受信機を持ち歩く必要があるため，独居高齢者の見守りのような常にユーザの位置を捕捉し続けるようなアプリケーションには向いていない．そのため，近年，デバイスフリー屋内位置推定の研究が注目されている．

Youssef らは、Wi-Fi 電波の送受信機が複数設置された環境において、Wi-Fi の受信電波強度を用いてデバイスフリー屋内位置推定を行う手法を提案している [6]。学習フェーズにおいて各参照点に人が居る際の電波強度を環境内に固定された複数の受信機によって収集する。推定フェーズでは、ある電波強度のベクトル s が与えられたときにベイズの定理 $P(l | s) = P(s | l) \frac{P(l)}{P(s)}$ を用いて条件付確率 $P(l | s)$ が最大となるように人の位置 l を推定する。

最新の研究においては、受信電波強度情報をそのまま用いる代わりに受信電波強度の分散値を用いることで環境の変化に対応する手法が提案されている [9]。この研究では、9 台のアクセスポイントと 1 台のハブを設置した 4 部屋からなる環境を 7 つのエリアに分割し、その中からユーザのいるエリアを推定する実験を行った結果、90%以上の精度でエリアの推定が可能なることを示した。また、Ohara らは、分散値を用いた屋内位置推定の学習フェーズにおいて、環境ごとに受信電波強度情報を収集する負担を軽減するために、他環境で収集した受信電波強度情報を用いて推定を行う手法を提案しており [8]、およそ 10 m 四方の 1 から 3 部屋からなる 4 環境において実験を行い、平均誤差 1.63 m の精度でユーザの位置が推定可能なることを示した。

本研究では、環境内の各部屋に最大で 2 台のデバイスを設置し、光学的手法を用いることで高精度なデバイスフリー屋内位置推定を試みる。

3. 提案手法

図 2 に学習フェーズとテストフェーズからなる提案手法の概要を示す。学習フェーズではまず、環境に再帰性反射材のマーカと赤外線カメラデバイスを設置し、無人の環境で画像を撮影したあと、各マーカの画像内の座標を計算する。次に、環境内の複数の座標既知である参照点に人が居るときの画像を撮影する。撮影した各画像において各マーカが隠蔽されているか否かを判定し、この情報を各座標での特徴量とし、各座標での特徴量を各座標固有のフィンガープリントとして位置推定器を学習する。テストフェーズでは、得られた画像から学習フェーズと同様に特徴量を抽出し、位置推定器によりユーザの座標を推定する。

以降では、まず製作したデバイスについて説明したあと、提案手法の各手順について詳細に説明する。

3.1 プロトタイプデバイス

本研究では、市販の Web カメラを改造して安価に製作可能である赤外線カメラデバイスを用いて屋内位置推定を行う。ここでは、本研究で開発した赤外線カメラデバイスの構成について説明する。

赤外線カメラデバイスは、図 3 に示すように (1) 赤外線カメラ、(2) 赤外線 LED、(3) 赤外線 LED 制御ボードの 3 つの要素によって構成されており、それぞれについて以下で説明する。

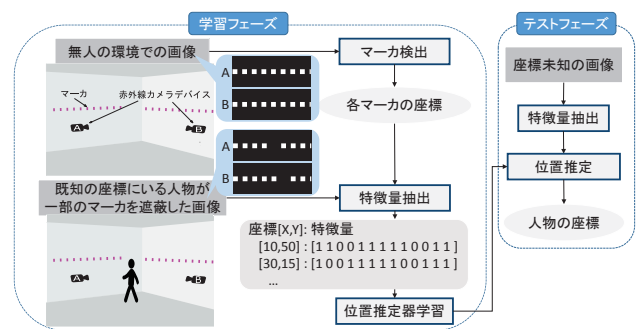


図 2 提案手法の概要

赤外線カメラ

本研究では安価に入手可能な市販の Web カメラに、可視光を遮断するフィルタを装着することで赤外線カメラを製作した。使用した Web カメラは 2500 円程度で安価に入手可能で、画角は 120° あるものを用いたため一台で広範囲を撮影することができる。装着するフィルタには、波長 920 nm 以下の光を遮断する赤外線透過フィルタを用いた。Web カメラのフォーカスは手動で設定するものとし、露光時間は $\frac{1}{256}$ 秒とした。撮影する画像の解像度は 1280 × 720 である。

赤外線 LED

提案手法では、広範囲に赤外線を照射する必要がある。そこで照射角が 75 度の広範囲に照射可能な赤外線 LED を 4 つ使用し、それらを自在に曲げることのできるフレキシブルユニバーサル基板上に図 4 に示すように配置することで、さらに広範囲に照射できるような工夫を施した。また、赤外線 LED として入手性が高い 940 nm の波長をもつものを用いた。

赤外線 LED 制御ボード

赤外線カメラで撮影した画像には、太陽光からの赤外線や蛍光灯等も写り込んでしまう。そこで提案手法は、赤外線 LED を高速に点灯・消灯させた際にそれぞれ撮影した画像の差分を取ることでマーカのみを検出する。本研究では、Web カメラを改造した赤外線カメラを用いるためカメラ自体には外部光源を制御する機能を内蔵していない。そのため、マイコンボードである Arduino^{*1} を用いて、赤外線 LED 制御ボードを製作し、コンピュータから赤外線 LED の点灯・消灯を制御することで、カメラ画像を撮影するタイミングとの同期を取る。制御ボードとの通信処理の遅延や、コンピュータが Web カメラの画像を撮影しディスクに書き出すまでの遅延などの影響により、赤外線カメラデバイスのフレームレートはおおよそ 3 fps となっている。ここでのフレームレートとは、赤外線 LED の点灯時と消灯時 2 枚の画像を 1 組にして 1 フレームと数えたものである。

赤外線画像の例

製作した赤外線カメラデバイスを用いて、図 5 に示す環

^{*1} <https://www.arduino.cc/>

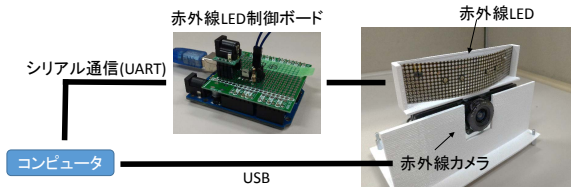


図3 赤外線カメラデバイスの構成図

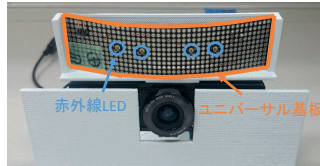


図4 赤外線LEDモジュール

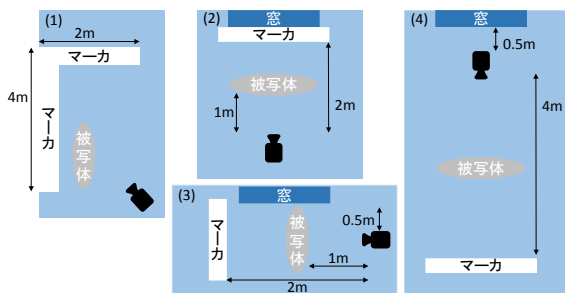


図5 撮影環境

境(1)から(4)で撮影した画像の例を図6から9に示す。また、画像閲覧ソフトであるIrfanView^{*2}に搭載されている自動補正機能を用いて、明るさ・コントラスト・ガンマ値を補正し、暗い画像の視認性を向上させたものも示している。

図6は図5の環境(1)に示す窓が映り込まない環境で撮影した画像であり、人物によりマークが遮蔽されていることが分かる。図7は環境(2)で撮影した画像であり、窓枠の下にマークを設置し、窓の方向にデバイスを向けている。窓及びマークまでの距離が2m、被写体までが1mである。窓とマークがカメラに対して同じ方向にあって、カメラがマークを捉えられていることが分かる。図8は環境(3)で撮影した画像であり、窓に対して平行にデバイス・被写体・マークが並んでいる。デバイスから窓までの距離は0.5m、マークまでは2m、被写体までは1mである。上下にLEDを点灯させた際の画像と消灯させた際の画像を示している。マークが窓の近くに設置されていても、LED消灯時にマークがカメラ画像に映り込んでいないことが分かる。図9は環境(4)で撮影した画像であり、直射日光の入る窓を背にしてデバイスを設置、デバイスから4mの位置にマークを設置し、被写体のデバイスからの距離を1m, 2m, 3mと変化させて撮影した。カメラの撮影方向と太陽光の方向がほぼ同じであっても、LED消灯時にマークがカメラ画像に映り込んでいないことが分かる。

3.2 マーカ検出

まず、デバイスによって撮影した無人環境での画像から

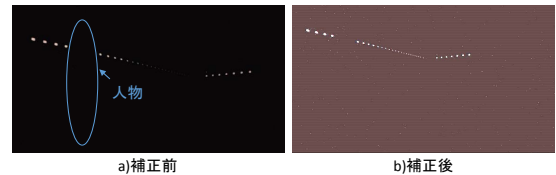


図6 直射日光のない環境



図7 窓に向けてデバイスを設置した環境

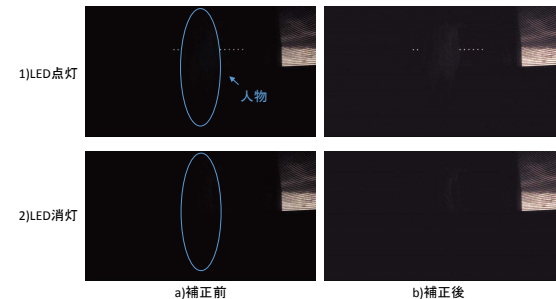


図8 横から直射日光が当たる環境

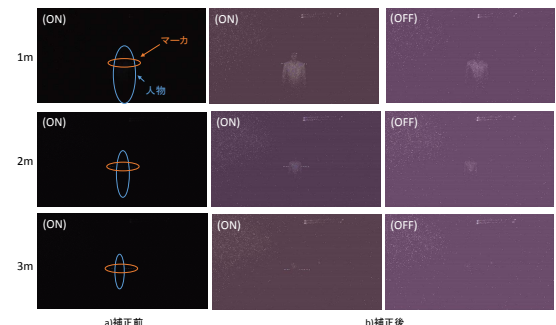


図9 窓を背にデバイスを設置した環境

マークを検出するアルゴリズムについて説明する。マーク検出アルゴリズムの手順を図10に示す。3.1節で述べたように赤外線カメラデバイスからは、ほぼ同時刻に赤外線LEDを点灯して撮影した画像(点灯画像)と消灯して撮影した画像(消灯画像)の2枚のペアが得られる。このアルゴリズムは、これらの画像から各マークの中心座標を出力する。図10に沿ってアルゴリズムを説明する。

1) 赤外線LEDの反射光のみの画像を得るために、点灯画像と消灯画像の差分画像を生成する。点灯画像及び消灯画像をRGB画像からグレースケール画像に変換したのち、各ピクセルの輝度の差を計算する。

2) 差分画像に対して二値化処理を施す。ここでは画像内の最大輝度の $\frac{1}{2}$ の値を二値化の閾値とする。

3) 二値化画像から輪郭の抽出を行う。輪郭の抽出とは、二値画像に対して連続する同一画素値の領域の輪郭線を抽出する処理である。本研究では鈴木ら[12]のアルゴリズムを用いる。輪郭線によって分割されている各同一画素値の領域が各マークに対応する。次に、各輪郭線のポリゴ

^{*2} <http://www.irfanview.com/>

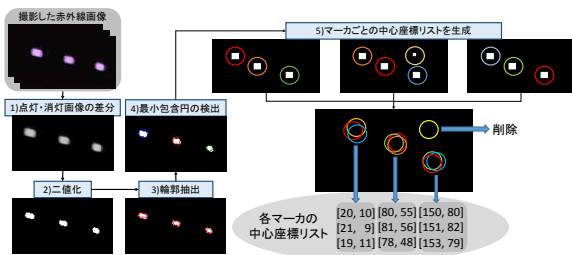


図 10 マーカ検出アルゴリズムの概要

ン近似を行う．ここでポリゴン近似とは，ある許容誤差の範囲で多角形に近似して表現する処理である．本研究では Douglas-Peucker アルゴリズム [2] を用いる．今回の実装では元の輪郭線とポリゴン近似後の輪郭線のずれの許容誤差を 3 ピクセルとした．図 10-(3) の画像にポリゴン近似後の輪郭線を赤色で示している．

4) 抽出した輪郭情報からマーカの中心座標を計算する．提案手法では正方形のマーカを添付しているが，デバイスとマーカの距離，角度によっては抽出した輪郭線は三角形や五角形になり得る．このような輪郭情報からマーカの中心座標を求めるために，最小包含円検出アルゴリズムを用いる．最小包含円とは，与えられた 2 次元点をすべて包含する最小の円のことであり，ひとつのマーカの輪郭線上のすべての頂点を包含する最小の円を計算する．この円の中心座標をマーカの中心座標とする．図 10-(4) の画像にマーカごとの最小包含円を青・赤・緑色の線で示している．

5) ノイズに頑健なマーカ検出を行うため 1) から 4) までの処理を複数の画像ペアに適用する．まず無人の環境において撮影された複数枚の画像に 1) から 4) までの処理を適用し，各マーカの最小包含円を画像ペア数分だけ得る．これらに対して，同じマーカから検出された最小包含円の対応付けを行う．各画像で検出された最小包含円が図形的に重なるものを同じマーカから検出された最小包含円であるとみなし，各マーカごとに最小包含円の中心座標のリストを生成する．このリストから，ノイズの影響を排除するため，マーカの中心座標が 1 つしか含まれない，すなわち 1 枚の画像からのみ検出されたマーカを削除する．

以上の処理によって，無人の環境で撮影された複数枚の画像から，各マーカの中心座標のリストを得ることができる．

3.3 特徴量抽出

マーカ抽出アルゴリズムによって各マーカの中心座標リストが得られる．この中心座標を用いて各マーカが遮蔽されている否かを判定し，特徴量を計算する．

特徴量を抽出する画像に対して，マーカごとに保持している中心座標について，それぞれの座標ごとにその輝度値が閾値を超えているか否か，すなわち遮蔽されているか否かを判定し，最終的には多数決によってそのマーカが遮蔽されているか否かを決定する．全マーカに対して同様の処

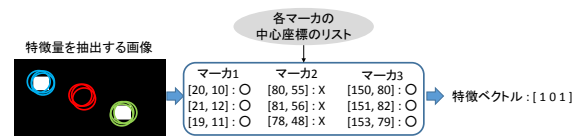


図 11 特徴量抽出アルゴリズムの概要

理を行い，遮蔽されている場合は 0，遮蔽されていない場合は 1 の特徴量が抽出されるものとする．そして，全てのマーカの特徴量を連結して表した特徴ベクトルを生成する．提案手法では，マーカの遮蔽を判定する輝度の閾値としての 256 階調中の 100 を用いた．これは実際に撮影した画像を用いた事前実験により決定したものである．

環境に複数設置されているデバイスがそれぞれ撮影した画像に対して，特徴ベクトルの作成までの処理を独立して行い，それらの特徴ベクトルを連結することで 1 つのベクトルに統合する．この特徴ベクトルの次元数は，複数台のデバイスで撮影された画像に写っているマーカの延べ数である．以上のようにして作成された特徴ベクトルを，位置推定器の学習および，それを用いた位置推定に用いる．

3.4 機械学習による屋内位置推定

機械学習による屋内位置推定は，大きく位置推定器の学習と位置推定のフェーズに分けられる．学習フェーズでは，環境内の複数の座標が既知である様々な参照点に人が居るときの画像を撮影し，特徴ベクトルとそれに対応する位置座標のセットを取得する．このデータをトレーニングデータとして位置推定器を学習する．推定フェーズでは，人の座標が未知である画像から特徴ベクトルを抽出し，学習フェーズで学習した位置推定器を用いて座標を推定する．本研究では，最近傍法を位置推定器として用いた．

すなわち，まず学習フェーズにおいては，デバイスを設置した環境内を人が自由に歩行しデータを収集する．この際，人の歩行軌跡（座標）はカラー画像を撮影することで得る．こうして得られた画像に 3.3 節の特徴量抽出アルゴリズムを適用して，特徴ベクトルとそれに対応する位置座標のセットにしたフィンガープリントを生成する．

推定フェーズでは，座標未知のテストポイントに人が居るときの画像に対して，特徴ベクトルを抽出し，その特徴ベクトルと，学習フェーズで構築したそれぞれの特徴ベクトルとの距離を計算する．提案手法では，特徴ベクトル間の距離としてユークリッド距離を用いた．テストポイントでの特徴ベクトルとの距離が最も小さい参照点を探索し，その参照点の座標をテストポイントでの座標とする．

4. 評価

図 12 に示す環境において実験を行った．2 m × 4 m の環境にマーカ 1，マーカ 2 の 2 種類のマーカを添付したパネルをおよそ 1.5 m の高さに 3 枚設置した．マーカ 1 には 25 mm 四方のマーカを 75 mm 間隔で 19 個，マーカ 2 には 50 mm 四方のマーカを 100 mm 間隔で 7 個添付しており，

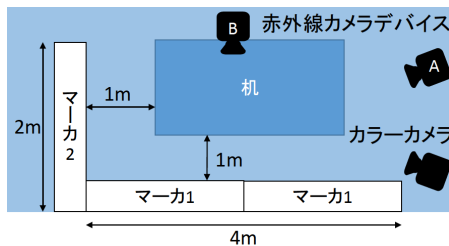


図 12 実験環境

合計で 45 個のマーカーを使用した。2 台の赤外線カメラデバイス (A デバイス・B デバイス) と、人物の歩行軌跡を取得するためのカラーカメラをおよそ 1 m の高さに設置し撮影した。

データセット

図 12 に示す環境において 5 セッションのデータを撮影した。各セッションにおいてカラーカメラで人物の歩行軌跡を撮影し、手動で各時刻における人物の座標を設定した。カラー画像から人物の座標（参照点座標）を設定する際は、人物の両足の midpoint をその人物の座標とした。5 セッションの撮影時間は、平均で 35 秒、参照点は平均で 75 点含まれる。2 台のデバイスで検出されるマーカーの延べ数は 56 個である。

評価手法

マーカーの添付数と推定精度の関係を明らかにするために、撮影したデータセットから擬似的にマーカーの添付数を減らした比較のためのデータセットを生成する。撮影した画像からマーカー間隔が 2 倍、3 倍となるように使用するマーカー間引き、検出するマーカー数が延べで 31 個及び 21 個となる 2 つのデータセットを生成した。データセットごとに、1 セッションをテストデータとし、残りのセッションをトレーニングデータとする交差検定を行った。

4.1 実験結果・考察

位置推定精度

推定誤差の絶対値の平均である平均絶対誤差を表 1 に示す。また、累積分布関数を図 13 に示す。

全 56 個のマーカーを使用した場合の平均絶対誤差は 0.259 m だった。電波を用いた一般的なデバイスフリー屋内位置推定の精度は約 1.5 m 程度であり、提案手法の優位性を示せた。

マーカー数の影響

31 個のマーカーを使用した場合の平均絶対誤差は 0.342 m、21 個のマーカーを使用した場合 0.480 m であり、マーカーを間引くことで全マーカーを使用した場合と比較してそれぞれ 83 mm、221 mm の精度の低下が見られた。また、累積確率が 90% となる絶対誤差はそれぞれ約 0.5 m、0.7 m、0.9 m となった。

マーカー間隔は、最小で 75 mm だったものがマーカーを間引くことで、マーカー数 31 個の場合 175 mm、マーカー数 21 個の場合 275 mm となる。全マーカーを使用する場合のマーカー

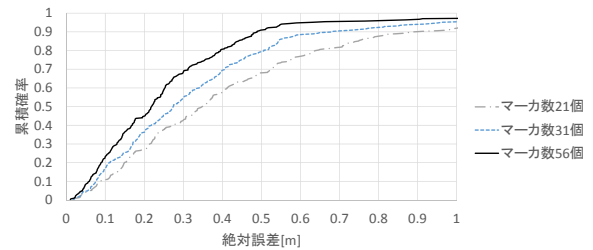


図 13 累積分布関数

表 1 提案手法の各データセットにおける平均絶対誤差

マーカーの検出数	平均絶対誤差 [m]
56 個	0.259
31 個	0.342
21 個	0.480

間隔からそれぞれ、100 mm、200 mm だけ増加する。平均誤差はそれぞれ 83 mm、221 mm だけ増加していることから、マーカーを間引くことによって増加する平均誤差とマーカー間隔の間には相関があると考えられる。提案手法は離散的に添付したマーカーの遮蔽情報を用いるため、捉えられる人の位置の粒度はマーカー間隔に依存する。さらに、マーカーをより密に添付することで推定精度の改善を試みることを考えたとき、本環境では最大でも 75 mm 程度の精度向上しか期待できないと考えられる。このことから、マーカー添付のコストも考慮すると 75 mm のマーカー間隔は十分に密であると考えられる。

4.2 マーカーサイズの検証

提案手法では環境に添付したマーカーを赤外線カメラで撮影することで位置推定を行う。ここでは、環境にどの程度の大きさのマーカーを貼付する必要があるかを検証する。

提案手法では、3.2 節で述べるマーカー検出アルゴリズムによってマーカーを検出しオクルージョンの有無を判定する。そこで、このアルゴリズムによって検出可能なマーカーサイズとマーカーまでの距離、角度の関係を検証するため実験を行った。25 mm 四方と、50 mm 四方の 2 種類のマーカーを 4 つずつ 15 cm 間隔に添付し、赤外線カメラデバイスからの距離と、デバイスに対する角度（正対する角度を 0° とする）をそれぞれ以下の条件で変化させて検出に成功したマーカーの数を記録した。

- 距離：3 m、5 m、8 m、10 m
- 角度：0°、45°

実験は、直射日光の入らない屋内環境で行った。実験の結果を図 14 に示す。この結果からは、提案デバイスを用いた場合、3 m 以内の環境では 25 mm 四方のマーカーを添付すれば十分であり、それ以上の距離の環境では 50 mm 四方のマーカーを用いることで、およそ 8 m まで検出できることが分かる。8 m の検出範囲は、一般家庭を想定する場合十分な距離であると考えられる。

また、デバイスに対する角度によっても検出数が異なっ

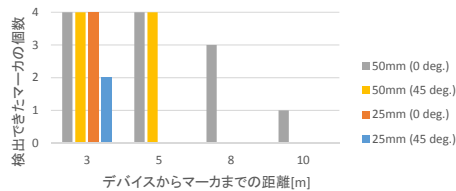


図 14 2 種類のマーカの各距離・角度における検出個数

ているが、これは入射光が反射シート面に対して垂直に近いほど反射性能が高いという再帰性反射材の特性によるためと考えられる [14]。このことから、マーカは出来る限りデバイスに対して正対するように設置することが望ましいと分かる。

4.3 プライバシに関する検証

提案手法では、赤外線 LED によって赤外線を照射し、その反射光を赤外線カメラで撮影するため、環境に居住する人に赤外線が照射され、その人を赤外線カメラが撮影することによりプライバシーが侵害される可能性がある。また、太陽光が強く当たる環境では、太陽光に含まれる赤外線に居住者が照らされることによってプライバシーが侵害される可能性がある。そこで、提案するセンシング手法のプライバシー侵害度を評価する実験を行い、プライバシーを侵害しないカメラやマーカの設置方法を検討する。本研究では、以下の 2 つの観点から評価を行う。

- 人物の同定可能性：不特定多数の人をトラッキングする環境下において、人を同定する情報を捉えてしまう可能性について評価する。
- 行動の同定可能性：位置に加えてさらに詳細なコンテキストである行動情報を捉えてしまう可能性について評価する。

4.3.1 人物の同定可能性

文献 [15] では、顔画像に対してプライバシー保護のための画像処理を施す際の有効性を定量的に評価する手法が提案されている。この研究では、複数の観測者が処理を施された顔画像を見た際に、その被写体を同定できた観測者の割合を ID 可到達性と定義し、アンケート調査によって ID 可到達性を算出することで保護処理の有効性を評価する手法を提案している。

本研究では、画像処理を施す代わりに、赤外線カメラデバイスから被写体までの距離と太陽光の当たる条件を変化させ、その ID 可到達性に与える影響をアンケート調査によって評価する。被写体と観測者は、比較的親密度の高い同じ研究室所属の学生とした。アンケート調査で用いる画像の撮影条件を図 15 に示す。被写体までの距離については、50 cm, 90 cm, 110 cm, 130 cm の 4 パターンを、太陽光の当たる条件は、窓に設置してあるブラインドを開閉することで直射日光ありとなしの 2 パターンを用い、合計で被写体 1 人当たり 8 パターンの撮影を行った。ブラインドを開けることで、直射日光が当たる人の顔をカメラが直接撮



図 15 アンケート調査用の画像の撮影環境

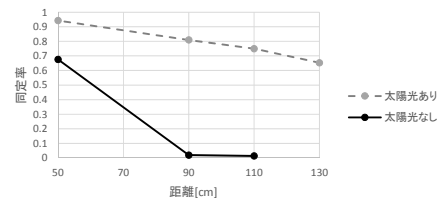


図 16 人物の同定可能性に関するアンケート調査結果

影する環境、すなわち最もユーザのプライバシーを侵害し得る環境を再現できるため、このようなセッティングを用いた。なお撮影は 11-13 時の時間帯に行った。

また撮影画像に対して何らかの補正処理を加えることによって人物が特定できてしまう場合、その人物のプライバシーは守られない。あらゆる補正手法を検証することは不可能であるため、一般的なソフトウェアを用いて適用できる補正処理を施した画像をアンケート調査に用いることとした。この処理には 3.1 節と同様に画像閲覧ソフトである IrfanView に搭載されている自動補正機能を用いた。アンケート調査では、補正前後いずれの画像も参照可能な形で実施した。

被写体として 7 名の顔画像を撮影し、被写体の 7 名と重複する者も含めて 15 名の観測者に対して、各被写体のカラー顔画像および“分からない”という 8 つの選択肢を示し、それらから被写体を推測して選択もらうアンケートに答えてもらった。直射日光なし 130cm の条件は明らかに同定不可能と思われたためアンケートは行っていない。図 16 にそのアンケート結果を示す。ここで同定率とは、被写体の名前を正しく推定できた割合のことである。

この結果から、直射日光が当たらない条件下では、被写体が赤外線カメラデバイスから 90 cm 以上離ればほぼ同定できないことが分かる。一方、直射日光が当たる条件下では、今回の調査で最長の距離である 130 cm 離れていても、65% 程度の割合で同定可能なことが分かる。今回の調査では太陽光が直接的に当たる条件で撮影したため、カメラデバイスとの距離を変化させても被写体に当たる太陽光の強さは変化しない。太陽光には波長 1000 nm の近赤外線であっても、可視光の最も強い波長における強度の 48% 程度の強度がある [16] ため、カメラデバイスから離れた距離であっても、太陽光によって照らされることで人物を同定できたと考えられる。

しかし、屋内環境では直射日光により強く照らされるのは窓際の限られたエリアであり、そのようなエリアであっても、図 15 のように窓の横から窓の方向を撮影しなければ人の顔が赤外線画像に映り込むことはない。(図 8 のように逆光により被写体の顔は写り込まない。)

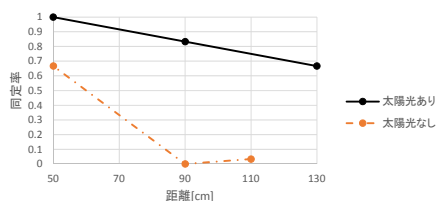


図 17 行動の同定可能性に関するアンケート調査結果

4.3.2 行動の同定可能性

顔画像による人物の同定可能性に関する調査と同じ手法を用いて、行動の同定可能性についても調査を行った。

行動については、1枚の画像から同定することは困難であることから、10秒程度の動画画像を用いてアンケート調査を行った。食事をする、本を読むの2種類の行動について、顔画像と同様の撮影環境・条件で、距離について50cm, 90cm, 110cm, 130cmの4パターン、直射日光あり・なしの2パターンごとに撮影した。なお、被写体はすべて同一の人物である。

顔画像による人物の同定可能性に関する調査と同じ15名から回答を得た。なお、アンケートの設問数の関係で、130cm(太陽光なし)、110cm(太陽光あり)については回答を得ていない。図17にアンケート結果を示す。

この結果からは、各条件において人物の同定可能性に関する調査とほぼ同等の同定率であることが分かる。

以上の結果から、カメラデバイスを窓からある程度離れた位置に設置すること、窓の近くに設置するとしても、部屋の内側を撮影するように設置すること、居住者の主な生活領域から50cm離れた位置にカメラを設置することで、その居住者の人物・行動同定可能性は低く抑えることができることがわかる。

5. おわりに

本研究では、これまでのWi-Fi電波やカメラを用いた位置推定手法に比べて、可視光を撮影しない赤外線カメラと再帰性反射材を用いることで設置コストが低くプライバシーに配慮したデバイスフリー屋内位置推定手法を提案した。本稿では、赤外線カメラで撮影した画像をプライバシーの保護の観点から評価するアンケート調査を行い、一定の条件下で十分にユーザのプライバシーが保護できることを示した。また評価実験では、電波を用いた手法に対して高精度な位置推定が可能であることを示した。

謝辞

本研究の一部は、JST CREST および JSPS 科研費 26730047 の助成を受けて行われたものです。

参考文献

[1] Aslam, J., Butler, Z., Constantin, F., Crespi, V., Cybenko, G. and Rus, D.: Tracking a moving object with a binary sensor network, *Proceedings of the 1st international conference on Embedded networked sensor systems*, ACM, pp. 150–161 (2003).

[2] Douglas, D. H. and Peucker, T. K.: Algorithms for the reduction of the number of points required to represent a digitized line or its caricature, *Cartographica: The International Journal for Geographic Information and Geovisualization*, Vol. 10, No. 2, pp. 112–122 (1973).

[3] Fleuret, F., Berclaz, J., Lengagne, R. and Fua, P.: Multicamera people tracking with a probabilistic occupancy map, *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, Vol. 30, No. 2, pp. 267–282 (2008).

[4] Fod, A., Howard, A. and Mataric, M. J.: A laser-based people tracker, *Robotics and Automation, 2002. Proceedings. ICRA '02. IEEE International Conference on*, Vol. 3, IEEE, pp. 3024–3029 (2002).

[5] Gezici, S., Tian, Z., Giannakis, G. B., Kobayashi, H., Molisch, A. F., Poor, H. V. and Sahinoglu, Z.: Localization via ultra-wideband radios: a look at positioning aspects for future sensor networks, *Signal Processing Magazine, IEEE*, Vol. 22, No. 4, pp. 70–84 (2005).

[6] Kosba, A. E., Abdelkader, A. and Youssef, M.: Analysis of a device-free passive tracking system in typical wireless environments, *New Technologies, Mobility and Security (NTMS), 2009 3rd International Conference on*, IEEE, pp. 1–5 (2009).

[7] LaMarca, A., Chawathe, Y., Consolvo, S., Hightower, J., Smith, I., Scott, J., Sohn, T., Howard, J., Hughes, J., Potter, F. et al.: Place lab: Device positioning using radio beacons in the wild, *Pervasive computing*, Springer, pp. 116–133 (2005).

[8] Ohara, K., Maekawa, T., Kishino, Y., Shirai, Y. and Naya, F.: Transferring positioning model for device-free passive indoor localization, *Proceedings of the 2015 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing*, ACM, pp. 885–896 (2015).

[9] Paul, S. A., Wan, A. E., Adenwala, Fatema, Schafermeyer, Erich, Preiser, Nick, Kaye, Jeffrey, Jacobs and G, P.: MobileRF: A robust device-free tracking system based on a hybrid neural network HMM classifier, *the 2014 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing*, pp. 159–170 (2014).

[10] Priyantha, N. B., Chakraborty, A. and Balakrishnan, H.: The cricket location-support system, *Proceedings of the 6th annual international conference on Mobile computing and networking*, ACM, pp. 32–43 (2000).

[11] Shrivastava, N., Madhoo, R. M. U. and Suri, S.: Target tracking with binary proximity sensors: fundamental limits, minimal descriptions, and algorithms, *Proceedings of the 4th international conference on Embedded networked sensor systems*, ACM, pp. 251–264 (2006).

[12] Suzuki, S. et al.: Topological structural analysis of digitized binary images by border following, *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, Vol. 30, No. 1, pp. 32–46 (1985).

[13] Wang, Y., Yang, X., Zhao, Y., Liu, Y. and Cuthbert, L.: Bluetooth positioning using RSSI and triangulation methods, *Consumer Communications and Networking Conference (CCNC), 2013 IEEE*, IEEE, pp. 837–842 (2013).

[14] スリーエムジャパン株式会社: Product Bulletin フレキシブルプリズム反射シート 3910FP シリーズ.

[15] 中島悠太, 池野知顕, 馬場口登: 顔画像に対するプライバシー保護処理の有効性の定量的評価 (セキュリティ, 一般), *電子情報通信学会技術研究報告. ICSS, 情報通信システムセキュリティ*, Vol. 112, No. 128, pp. 59–66 (2012).

[16] 米国エネルギー省, 再利用可能エネルギー研究所: Solar Spectra, <http://rredc.nrel.gov/solar/spectra/>.