

キセノンライトアレーを用いたミリ波アクティブイメージングと 機械学習を用いた物体分類

西村 陸[†] 佐藤 弘康[†] 陳 強[†]

[†]東北大学大学院工学研究科通信工学専攻 〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-05

E-mail: †riku.nishimura.t6@dc.tohoku.ac.jp, sahiro@ecei.tohoku.ac.jp, chenq@ecei.tohoku.ac.jp

あらまし 人や物自体が放射している熱雑音を検波して画像を得るミリ波パッシブイメージング技術は空港等におけるセキュリティ用途として期待されているが、周囲環境温度に応じてコントラストが劣化する課題がある。本報告では、キセノンライトアレーを用いたアクティブイメージング法を提案し、キセノンライトアレーの ON/OFF を切り替えたイメージング結果の画像群に機械学習を適用して物体の有無、形状、材質が分類できることを示す。

キーワード イメージング, ミリ波, アクティブ, 照射源, 機械学習

Millimeter-Wave Active Imaging Using Xenon-Light Array and Object Classification by Machine Learning

Riku NISHIMURA[†] Hiroyasu SATO[†] and Qiang CHEN[†]

[†]Graduate School of Engineering, Tohoku University

6-6-05 Aramakiyazaoba, Aobaku, Sendai-shi, Miyagi, 980-8579 Japan

E-mail: †riku.nishimura.t6@dc.tohoku.ac.jp, sahiro@ecei.tohoku.ac.jp, chenq@ecei.tohoku.ac.jp

Abstract Millimeter wave passive imaging technology, which obtains images by detecting thermal noise emitted by people and objects themselves, is expected to be used for security applications in airports, etc. However, there is a problem of contrast degradation depending on the ambient temperature. In this report, we propose an active imaging method using a xenon light array and show that the presence, shape, and material of an object can be classified by applying machine learning to a set of images obtained by switching the xenon light array on and off.

Keywords Imaging, Millimeter-Wave, Active, Illumination, Machine-Learning

1. まえがき

人体が常時放出しているミリ波を画像化することで、人がまとった衣服等の背後の危険物を完全非侵襲・非接触で検知するミリ波パッシブイメージングはセキュリティ用途を始めとして期待されている[1-3]。しかしながら、ミリ波パッシブイメージングでは検知したい物体からのミリ波以外に、壁や蛍光灯等周囲環境が熱として放射しているミリ波も熱雑音として重畳することになり、周囲温度に依存して画質が劣化する場合がある。

この問題を解決する手法として、筆者らはこれまで被写体に向けて信号発生器(SG)で給電された導波管開口アンテナを一次放射器とするパラボラ反射鏡を照射源として、物体を所持する人体に照射するアクティ

ブイメージングを進めてきた[4-9]。その結果、人体に対する物体のコントラストが向上して物体の検知特性が改善する知見を得た。しかし、SGを使用することは人体への侵襲性の問題が残ることおよび人体からの散乱波と物体からの散乱波の強度が同程度の場合は物体の検知が困難であるとの課題があった。

そこで本稿では、照射源にキセノンライトアレーを使用したインコヒーレントアクティブイメージングを行った結果について報告する。使う照射源を切り替え、照射角度を変化させることで照射角度依存性について検討する。また、多方向から同時に照射することで照射角度依存性の小さい物体のコントラストを向上させる。さらに、得られた実験データに対し機械学習を適用することで物体の有無、形状、材質を分類した結果を述べる。

2. ミリ波イメージングへの機械学習の適用

2.1. 機械学習

機械学習とは、あるデータ群から規則を見つけ、未知のデータに対する推測予測を行う学習手法の一つである。機械学習で使われる代表的なアルゴリズムには教師あり学習、教師なし学習、強化学習の3種類があり、今回は教師あり学習を使用した。教師あり学習はさらに分類と回帰に分けることができ、今回は分類を行なった。教師あり学習とは学習データに対して正解ラベルをつけて学習させる方法である。機械学習の流れは大量のトレーニングデータから特徴量を抽出する学習フェーズと学習した規則に沿ってテストデータを判断する推論フェーズに分かれている。

今回トレーニングデータ、テストデータに使ったデータはパッシブイメージング、照射角度を変えたインコヒーレントアクティブイメージング、多方向から同時に照射したインコヒーレントアクティブイメージングの結果を使った。

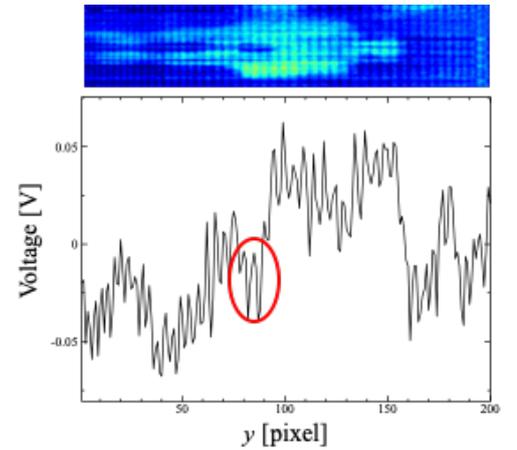
2.2. 物体有無の分類

テストデータを物体なし、物体ありに分類し、さらに物体ありをアクティブイメージングで物体あり、パッシブイメージングで物体ありに分類する。

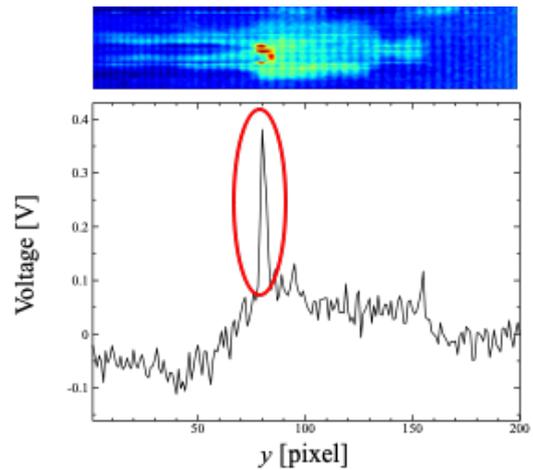
パッシブイメージングは物体の輝度温度を測定する。輝度温度は物理温度と放射率の積で求めることができるため物理温度が人体と差があり、放射率が大きい物体が被写体の場合、物体と人体のコントラストが大きくなる。水の入ったペットボトルを被写体にしてパッシブイメージングを行なった結果を図1(a)に示す。ペットボトルがある位置で受信電圧が下がっている。中に入っている水の温度が低く、放射率が大きいいため輝度温度が低くなった。このようにパッシブイメージングで人体と受信電圧に差がある場合、物体あり(パッシブ)に分類する。

アクティブイメージングは物体からの散乱波が大きい場合、人体と物体のコントラストが大きくなる。導体板を被写体にした場合のイメージング結果を図1(b)に示す。導体板がある位置で受信電圧が大きくなっている。導体は反射率が大きいいため物体からの散乱波が大きくなり受信電圧が大きくなっている。このようにアクティブイメージングで人体より受信電圧が大きい場合、物体あり(アクティブ)に分類される。

畳み込みニューラルネットワークを使いテストデータを物体なし、物体ありの2種類に分類し、さらに物体ありをアクティブイメージングで物体ありとパッシブイメージングで物体ありに分類する。物体なしのミリ波画像に物体なし、パッシブイメージングで物体ありのミリ波画像に物体あり(パッシブ)、アクティブ



(a) ペットボトル (水入り)



(b) 導体板

図1 受信電圧分布

イメージングで物体ありのミリ波画像に物体あり(アクティブ)とラベル付けを行い、トレーニングデータに使う。

2.3. 物体の形状、材質の分類

物体あり(アクティブ)に分類された物体の形状、材質を分類し、照射角度依存性の大きい導体と照射角度依存性の大きい誘電体、照射角度依存性の小さい導体の3種類に分類する。

形状の分類は照射角度依存性を比較し行う。導体板やセラミック板など平な形状の物体が被写体の場合、特定の照射角度から照射した時のみ物体からの反射波がイメージング装置で受信され受信電圧が大きくなる。一方、導体柱など丸みを持った形状の物体が被写体の場合、どの照射角度から照射しても物体からの散乱波がイメージング装置で受信されるため、どの照射角度から照射しても物体の受信電圧が同程度になる。

材質の分類は物体からの受信電圧の大きさを比較することで行う。材質が導体板の場合、物体への入射波

が全て反射するため受信電圧が大きくなる。一方、材質が誘電体板の場合、物体への入射波の一部が透過し一部が反射するため受信電圧が小さくなる。

形状、材質を分類するために特徴量を抽出しランダムフォレストを使い形状、材質に分類を行う。

3. 実験方法

3.1. 実験系

インコヒーレントアクティブイメージングシステムの構成を図2に示す。イメージング装置はレンズとイメージング素子[10-17]で構成されている。検波システムとして、イメージング素子によって二乗検波方式でミリ波の電力（輝度温度）に比例する受信電圧を検出し、イメージング素子アレーによってミリ波画像を構成している。被写体面に人体と物体を配置した。照射源はキセノンライトアレーで構成されている。イメージング装置正面から被写体面までの距離を 100 cm、被写体面からキセノンライトまでの距離を 80 cm とした。物体は発泡スチロールを用いて人体の正面に固定した。物体として、導体板、導体柱、導体半球、セラミック板、ペット板、ポリエチレン板、セラミックナイフ、モデル銃、アルミホイールで表面に荒さを与えた散乱体（“いも” と呼称）、金属製の定規、スマートフォン、カッター、水の入ったペットボトルの 13 個を使用した。

3.2. 実験方法

本論文ではパッシブイメージング、照射する照射源を切り替えて照射角度を変化させるインコヒーレントアクティブイメージング、多方向から同時に照射するインコヒーレントアクティブイメージングの3つの手法でイメージングを行なった。

パッシブイメージングでは照射を行わず被写体の輝度温度を測定した。照射角度を変化させる実験は、照射源 #1 のみ照射、#2 のみ照射のように照射する照射源を切り替えることで照射角度を変化させてイメージングを行なった。多方向から同時に照射を行う実験では、照射源 #1 のみ照射、#1 と #2 を同時に照射のように照射する照射源の個数を変えてイメージングを行なった。

4. 結果

4.1. イメージング結果

イメージングを行なった 13 個の物体のうち形状、材質が単純な導体板、導体柱、セラミック板の3つのイメージング結果を図3に示す。

パッシブイメージングの結果を図3(a)に示す。導体板、導体柱を持っている場合、人体と物体のコントラ

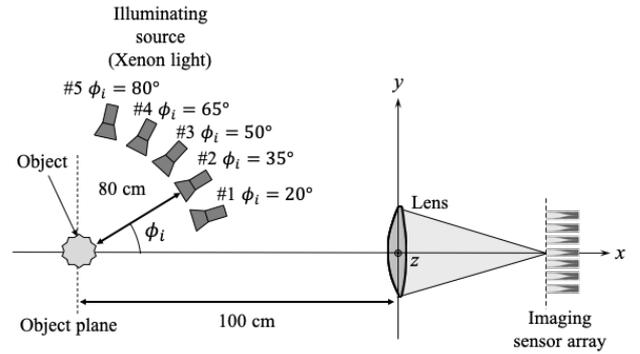


図2 実験系

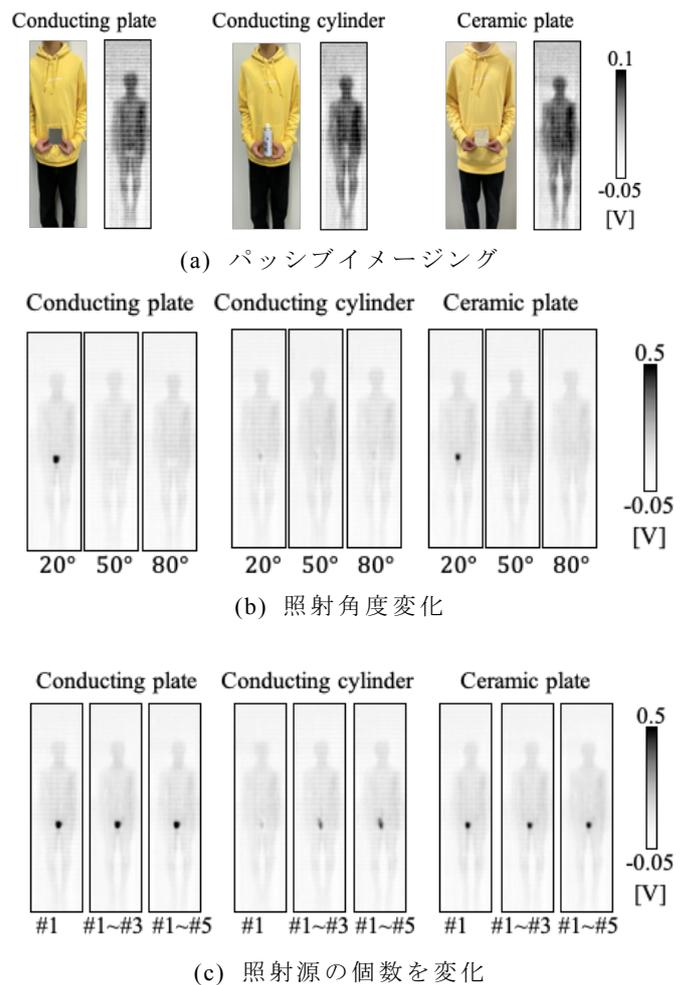


図3 イメージング結果

ストが大きかった。導体板、導体柱は材質が導体なので反射率が大きく物体の輝度温度が周囲の輝度温度と同程度になり受信電圧が人体よりも小さくなった。一方、セラミック板は透過率が大きいいため物体の輝度温度が人体の輝度温度と同程度になってしまった。

照射角度を変化させたインコヒーレントアクティブ

イメージングの結果を図 3(b)に示す。導体板、セラミック板を持っている場合、特定の照射角度から照射した場合にコントラストが大幅に向上した。板状で表面が平らなため、特定の照射角度から照射した時のみ物体からの反射波がイメージング装置で受信できたからだと考えられる。一方、導体柱を持っている場合、照射角度を変化させても同様な結果となった。柱状の形状をしており、 ϕ 方向に丸みを帯びているため物体からの散乱波が ϕ 方向に無指向性になった。また、コントラストの向上も僅かであった。

照射する照射源の数を変化させたインコヒーレントアクティブイメージングの結果を図 3(c)に示す。導体板、セラミック板は照射角度依存性が大きいので、照射する照射源の数を増やして多方向から同時に照射しても受信電圧に変化がなかった。一方、導体柱の場合、 ϕ 方向の照射角度依存性が小さいので多方向から同時に照射することで受信電圧が大きくなり、コントラストが向上にした。

4.2. 特徴量の抽出

図 4(a)は図 3(b)のイメージング結果を縦軸に一枚の画像の受信電圧の最大値として V_{max} 、横軸に照射角度 ϕ_i をとり、図示したものである。照射角度依存性の大きい導体板、セラミック板は $\phi_i = 20^\circ$ の時に V_{max} が大きくなっている。

形状を分類するために 3 つの特徴量 X_1, X_2, X_3 を抽出した。 X_1 は各照射角度の最大受信電圧の差で、式(1)で与えられる。

$$X_1 = \max(V_{max,\phi_i}) - \min(V_{max,\phi_i}) \quad (1)$$

X_2 は各照射角度の最大受信電圧の分散で、式(2)で与えられる。

$$X_2 = \frac{1}{N_{ill}} \sum (V_{max,\phi_i} - \overline{V_{max,\phi_i}})^2 \quad (2)$$

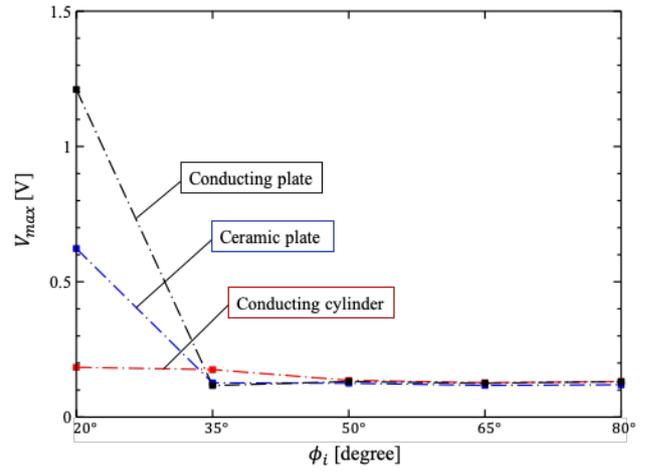
X_3 は X_2 と $\max(V_{max,\phi_i})$ の比で、式(3)で与えられる。

$$X_3 = \frac{X_2}{\max(V_{max,\phi_i})} \quad (3)$$

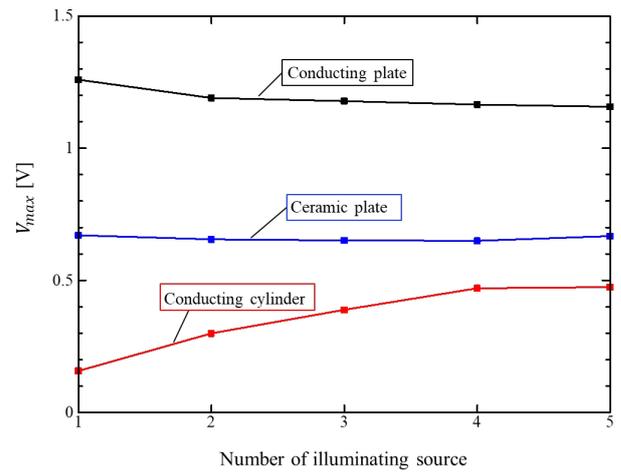
X_1, X_2, X_3 共に照射角度依存性が大きい物体の時に大きくなり、小さい時に小さくなる。 X_3 は受信電圧が小さい物体が被写体の場合、分散も小さくなる問題があったのでその問題を解決するために比を取った。

図 4(b)は図 3(c)のイメージング結果を縦軸に V_{max} 、横軸に照射源の数をとり図示した。同じ形状で材質が異なる導体板とセラミック板で V_{max} に差が出ている。

材質を分類するために 2 つの特徴量 X_4, X_5 を抽出した。導体柱など散乱断面積の小さい物体が被写体の場合でも受信電圧を大きくするために全ての照射源が ON の時の値を使用した。 X_4 は全ての照射源が ON の時の V_{max} を抽出した。反射率が大きい物体の場合に値



(a) 照射角度変化



(b) 照射源の個数を変化

図 4 特徴量

が大きくなっている。 X_5 は全ての照射源が ON の時、1 枚の画像の中で受信電圧が 0.2 V 以上の受信電圧の平均値を抽出した。物体からの散乱波の平均値を抽出するために X_5 を設定した。

4.3. 物体の分類結果

物体の分類を行うために図 5 のフローチャートを作成し分類を行った。まず、テストデータを物体なし、物体ありに分類し、さらに物体ありを物体あり（アクティブ）、物体あり（パッシブ）の 2 種類に分類し、分類結果を表 1 にまとめた。

パッシブイメージングでは物体の有無を正しく判断できない物体が多かったが、アクティブイメージングでは水の入ったペットボトル以外の物体で正しく物体の有無を判断することができた。

水の入ったペットボトルとセラミックナイフのイメージング結果を図 6 に示す。水の入ったペットボト

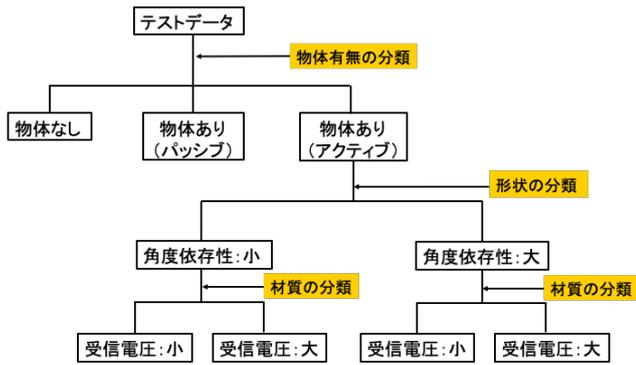


図 5 物体分類のフローチャート

表 1 物体有無の分類結果

	Active	Passive
Conducting Plate	○	○
Conducting cylinder	○	○
Conducting sphere	○	○
IMO	○	○
Smart phone	○	○
Ruler (conductor)	○	×
Cutter (conductor)	○	×
Model gun	○	○
Ceramic plate	○	×
PET plate	○	×
PE plate	○	×
PET bottle (w/ water)	×	○
Ceramic knife	○	×

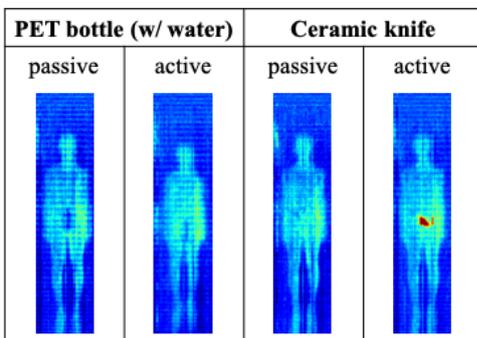


図 6 イメージング結果

ルはパッシブイメージングの方がアクティブイメージングよりも人体と物体のコントラストが大きかった。パッシブイメージングでは水は放射率が大きく、温度が低かったためコントラストが大きくなった。一方、アクティブイメージングでは水の入ったペットボトルは照射角度依存性が小さい物体で材質も PET と水であるためコントラストが向上しなかった。

セラミックナイフの場合、パッシブイメージングではコントラストが小さく物体の有無を判断できな

表 2 物体の形状，材質の分類結果

	result	
Conducting Plate	○	A
Smart phone	○	
Ruler (conductor)	○	
Cutter (conductor)	△	
Model gun	○	
Ceramic plate	△	B
PET plate	△	
PE plate	×	
Ceramic knife	○	C
Conducting cylinder	○	
Conducting sphere	○	
IMO	○	

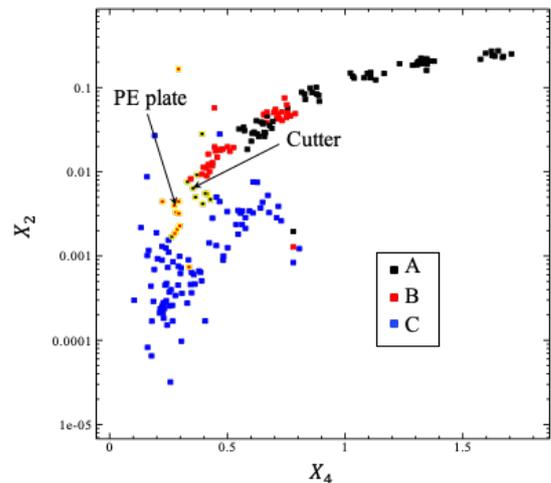


図 7 特徴量の分布

ったが照射を行うことでコントラストが向上し物体の有無を判断できた。セラミックナイフの照射角度依存性が小さく、反射率が大きい材質だったからだと考えられる。

次に物体あり（アクティブ）に分類された物体の形状，材質を分類し，照射角度依存性の大きい導体（A），照射角度依存性の大きい誘電体（B），照射角度依存性の小さい導体（C）の 3 種類に分類し，分類した結果を表 2 にまとめた。

物体 1 個につき 10 枚のデータをテストデータに使用し，9 枚以上正しく分類できた場合を○，8～6 枚正しく分類できた場合を△，5 枚以下だった場合を×とした。精度は全体で 88 %となった。カッター，セラミックナイフ，ペット板，ポリエチレン板は正しく分類することができなかった。

4.2.で抽出した特徴量5つのうち X_2 を縦軸, X_4 を横軸にとったものを図7に示した。2つの特徴量だけでもAが右上,Bが左上,Cが下の3つの領域に分かれていることがわかる。正しく分類できなかった物体は領域の境目にプロットされるため分類が困難となった。適切に特徴量の数を増やすこと,トレーニングデータ数を増やすことで精度を向上させることでできると考えられる。

5. まとめ

本報告では,照射源に複数のキセノンライトを使用したインコヒーレントアクティブミリ波イメージングを行った。さらに,機械学習を使い物体の分類を行なった。照射角度を変化させイメージングを行うことで照射角度依存性の比較を行い,多方向から同時に照射することで照射角度依存性の小さい物体のコントラストを向上させた。また,ミリ波画像に機械学習を適用することで,物体の有無,形状,材質を分類できることを明らかにした。

謝辞

本研究の一部はJSPS科研費20K04515の助成を受けて行われた。

文献

- [1] 佐藤 弘康, 澤谷 邦男, 水野 皓司, “ミリ波パッシブイメージング技術 (セキュリティ分野への応用を主に),” 計測自動制御学会, 計測と制御, vol. 48, no. 10, pp. 748-753, 2009.
- [2] 佐藤弘康, 陳強, “ミリ波パッシブイメージング装置,” 株式会社シーエムシー出版, 最新ミリ波技術, 第10章, pp.1-12, Jul. 2015.
- [3] H. Sato, K. Sawaya, K. Mizuno, J. Uemura, M. Takeda, J. Takahashi, K. Yamada, K. Morichika, T. Hasegawa, H. Hirai, H. Niikura, T. Matsuzaki, S. Kato and J. Nakada, “Passive millimeter-wave imaging for security and safety applications,” SPIE Proceedings, vol. 7671, Orlando, USA, 2010.
- [4] H. Sato, K. Kuriyama and K. Sawaya, “Forward-Nulling Passive Millimeter Wave Imaging Using Cooling Dielectric Tube”, IEICE Trans. Commun, vol. E95-C, no. 10, pp. 1627-1634, 2012.
- [5] 前田 淳朗, 佐藤 弘康, 陳 強, “前方照射源を利用したパッシブイメージング,” 電子情報通信学会総合大会, C-2-74, p.74, 2019年3月.
- [6] A. Maeda, H. Sato, and Q. Chen, “Incoherent Active Millimeter Wave Imaging Using Forward-Illuminating Source,” Proc. GSMM2019, pp. 87-89, May 2019.
- [7] 前田 淳朗, 佐藤 弘康, 陳 強, “インコヒーレント照射を利用したアクティブミリ波イメージング,” 信学技報, vol. 119, no.228, AP2019-87, pp.39-42, 2019年10月.
- [8] 前田 淳朗, 佐藤 弘康, 陳 強, “前方照射を利用したインコヒーレントアクティブミリ波イメージング,” 信学技報, vol.119, no.346, MW2019-125, pp.37-40, 2019年12月.
- [9] 西村 陸, 佐藤 弘康, 陳 強, “インコヒーレント照射を利用したミリ波アクティブイメージングへの機械学習の適用,” 信学技報, vol. 121, no. 191, AP2021-71, pp. 19-23, 2021年10月.
- [10] H. Sato, N. Arai, Y. Wagatsuma, K. Sawaya and K. Mizuno, “Design of Millimeter Wave Fermi Antenna with Corrugation,” IEICE Trans. (B), vol. J86-B, no. 9, pp. 1851-1859, 2003 (in Japanese).
- [11] H. Sato, K. Sawaya, N. Arai, Y. Wagatsuma and K. Mizuno, “Broadband FDTD Analysis of Fermi Antenna with Narrow Width Substrate,” IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, vol. 1, pp. 261-264, Ohio, 2003.
- [12] H. Sato, K. Sawaya, Y. Wagatsuma and K. Mizuno, “Design of Narrow-width Fermi Antenna with Circular Radiation Pattern,” IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, vol. 4, pp. 4312-4315, Monterey, 2004.
- [13] H. Sato, K. Sawaya, Y. Wagatsuma, K. Mizuno, “Broadband FDTD Design of Fermi Antenna for Passive Millimeter Wave Imaging,” 2005 IEEE International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications (MAPE '05), Beijing, vol. 1, pp. 123-126, August, 2005.
- [14] Y. Takagi, H. Sato, Y. Wagatsuma, K. Sawaya and K. Mizuno, “Study of high gain and broadband antipodal Fermi antenna with corrugation,” International Symposium on Antennas and Propagation, vol. 1, pp. 69-72, Sendai, Aug. 2004.
- [15] H. Sato, Y. Takagi, Y. Wagatsuma, K. Mizuno, and K. Sawaya, “Time Domain Characteristics of Broadband Antipodal Fermi Antenna And Its Application To Throughwall Imaging,” International Symposium on Antennas and Propagation, vol. 1, pp. 338-390, Seoul, Korea, 2005.
- [16] H. Sato, Y. Murakami, K. Sawaya, and K. Mizuno, “FDTD Analysis of 81-element Antipodal Fermi Antenna Array with Axially Symmetric Array Element Pattern,” IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, San Diego, USA, 2008.
- [17] H. Sato, K. Sawaya, K. Mizuno, J. Uemura, M. Takeda, J. Takahashi, K. Yamada, K. Morichika, T. Hasegawa, H. Hirai, H. Niikura, T. Matsuzaki, J. Nakada, “Development of passive millimeter wave imaging device using 77GHz Band(Invited)”, Proc. IEEE SENSOR 2009, pp. 1632-1635, Oct. 2009.