

冷却管パラボラ反射鏡によるミリ波パッシブイメージングの物体検知特性の改善

栗山 弘平, 佐藤 弘康, 澤谷 邦男 (東北大学大学院工学研究科)

概要: ミリ波帯熱雑音の熱源として冷却水を通した直管形塩化ビニル管 (Polyvinyl chloride (PVC) pipe) を放物筒面の焦点に配置した冷却管パラボラ反射鏡を提案している. 77 GHz 帯ミリ波パッシブイメージング装置を用いて試作した冷却管パラボラ反射鏡の開口分布を測定した結果, 冷却管の位置を調整することにより低い熱雑音強度で一様な分布が得られることを明らかにしている. さらに, 冷却管パラボラ反射鏡を人体の後方に配置した逆光によるイメージング, および人体と物体にパラボラ反射鏡を向けた順光によるイメージングを行った結果を示し, 逆光の場合はミリ波画像における人体と背景のコントラストの向上, 順光の場合は CD-ROM 等の平面状導体について検知特性が改善されることを示している.
キーワード: 冷却水, 塩化ビニル管, パラボラ反射鏡, パッシブイメージング, 熱雑音源

1. まえがき

近年, テロ・犯罪等によって安全・安心な社会が脅かされてきており, 液体爆発物やプラスチック爆弾等, 金属探知機で検知できない不審物を所持する不審者を迅速に検知する手段が望まれている. ミリ波パッシブイメージングは, 人や物から放射されるミリ波帯の熱雑音を受信し, 非接触・非侵襲で衣服下の不審物を検知可能な技術として, 実用化が期待されている [1].

筆者らはこれまで, 空港等の水際において使用するための 77 GHz 帯ミリ波パッシブイメージング装置を開発し, 実用性について評価を進めてきた [2-4]. パッシブイメージングによる物体の検知において, 液体爆発物やプラスチック爆弾, セラミックナイフ等の誘電体の検知ではイメージング素子の温度分解能の向上が重要となるが, 拳銃や金属製ナイフ, 起爆装置等の散乱導体の検知では, イメージング装置は散乱導体に入射した周囲環境からの熱放射による散乱波を観測することになり, 散乱導体の視認性を向上させるためには周囲環境の熱雑音強度分布を制御する必要がある.

筆者らはこれまで, 人体の輪郭および輪郭に置かれた所持物の視認性と検知特性を改善する目的で, 人体の後方に配置する逆光用熱雑音源として直管形蛍光管を放物筒面の焦点に配置した蛍光管パラボラ反射鏡を提案した [5-6]. 本報告では, ミリ波パッシブイメージングにおいて主に散乱導体の検知特性を改善することを目的として, 直管形冷却管を放物筒面の焦点に配置した冷却管パラボラ反射鏡を提案する. また, 開発した 77 GHz 帯ミリ波パッシブイメージング装置を用いて冷却管および試作した冷却管パラボラ反射鏡が放射している熱雑音強度分布を測定した結果を示すとともに, 蛍光管を用いた場合と比較する. さらに, パラボラ反射鏡からの熱雑音を人体の後方から照射する逆光パッシブイメージング, および熱雑音を人体の前方から照射する順光パッシブイメージングを行った結果を示し, 人体および散乱導体の視認性

について評価した結果を述べる.

2. 冷却管パラボラ反射鏡

2.1 構造

冷却管パラボラ反射鏡を図 1 に示す. 放物筒面 $z = x^2/4f$ は焦点が $z = f = 100$ mm, 材質が厚さ 0.5 mm のステンレス製導体板とし, 冷却水循環装置で冷却された冷却水を直径 30mm, 内径 24mm の直管形塩化ビニル (Polyvinyl chloride, PVC) 管に導き, 冷却水を循環させて冷却管を構成し, これを $z = p$ に配置する. 放物筒面は開口幅が 830 mm, 高さ 2000 mm, 奥行き 430 mm である. 1 枚の導体板の左右の端部を $\pm x$ 方向からの力で押し曲げることで放物筒面を作製できるので, 大形の開口面を比較的容易に実現できる. また, 冷却管の位置を変えることにより $p = f$ の場合は平面波, $p > f$ の場合は集光波, $p < f$ の場合は拡散波の波面を有する低温の熱雑音源が実現できる.

2.2 冷却管の基本特性

冷却水循環装置内部における冷却水の凍結を防ぐため, 冷却水としてラジエター液を使用した. 冷却水循環装置の設定温度を -5°C に設定したときの冷却管の表面温度は約 2.5°C であった. 冷却管のミリ波帯熱雑音強度の測定には開発したミリ波パッシブイメージング装置 (Passive

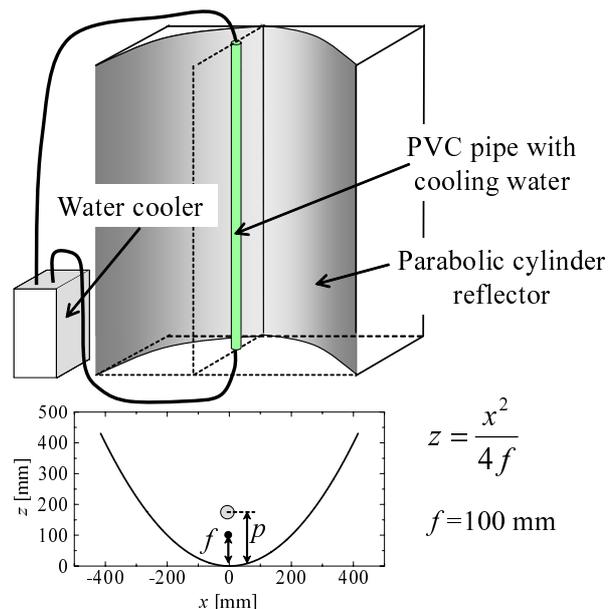


図 1: 冷却管パラボラ反射鏡.

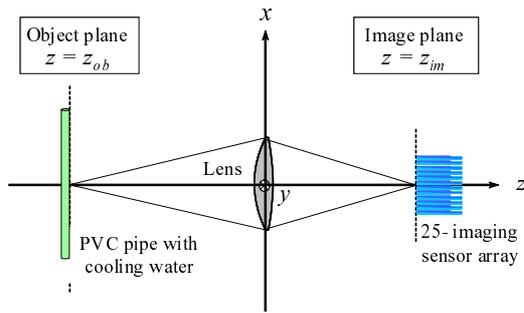


図 2: 光学系の構成 .

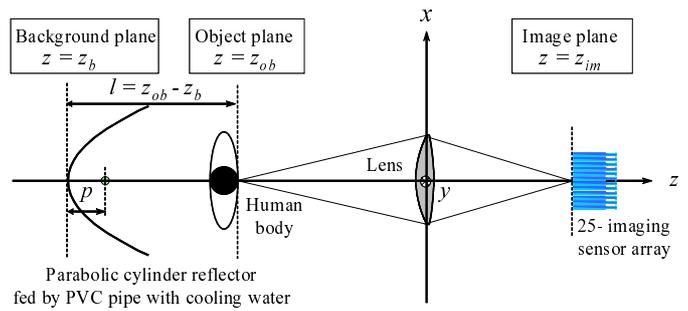


図 4: 冷却管パラボラ反射鏡による逆光の光学系の構成 .

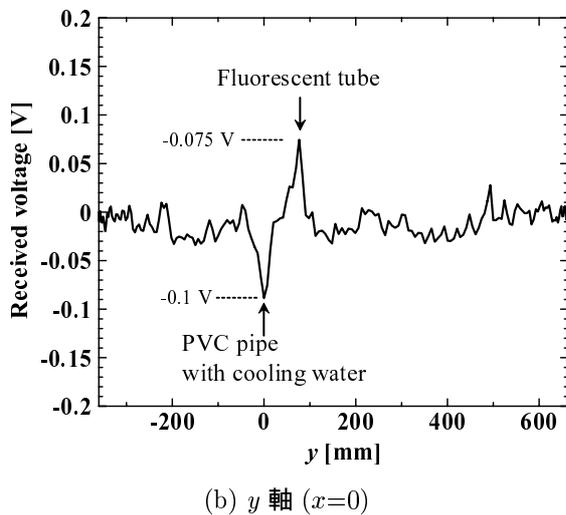
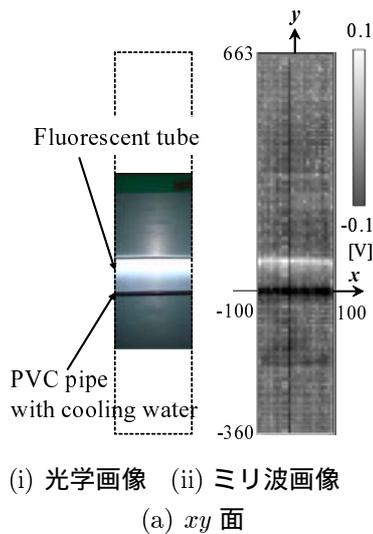


図 3: 間隔 120 mm の冷却管と蛍光管のミリ波画像 ($z_{ob} = -1950$ mm, $z_{im} = 1081$ mm) .

millimeter wave (PMMW) imaging device) を用いた [2-4] . 装置の光学系の構成と座標系を図 2 に示す . レンズの光軸を z 軸とし , 物体面 $z = z_{ob}$ に置かれた物体からのミリ波帯の熱雑音を , 誘電体レンズを介して像面 $z = z_{im}$ に集光し , この像面に置かれたイメージング素子アレー

で受信 , 増幅及び検波し受信電圧の 2 次元分布を画像化してミリ波画像を得る [2-3] . 誘電体レンズは口径が 500 mm の非球面ポリエチレンレンズであり , 振動リフレクタを垂直面で振動させ , 水平配列 25 素子 1 次元イメージング素子アレーを用いて 77 GHz 帯 2 次元受信電圧分布を得ている .

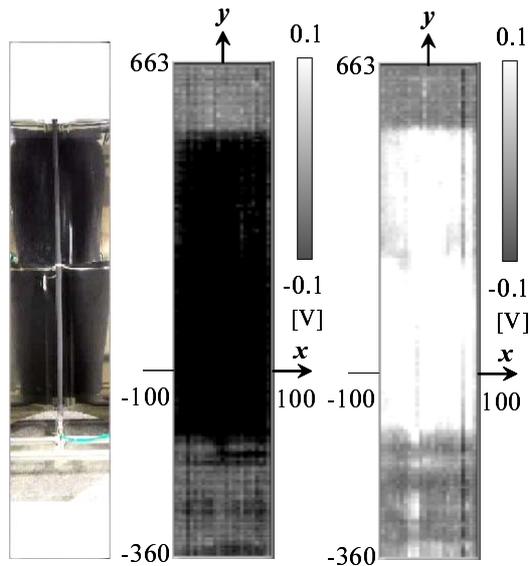
管軸が x 方向に平行な冷却管と蛍光管を間隔 120 mm で物体面 $z_{ob} = -1950$ mm に配置したときの $z_{im} = 1081$ mm におけるミリ波画像を光学画像と共に図 3(a) に示す . ここで , 電圧レベルは視野上端部の物体が置かれていない位置を観測したときの受信電圧が 0 V となるように電圧をオフセットした場合の値であり , ミリ波画像の濃淡は色が白いほど受信電圧が大きいことを表している . x 方向の電圧分布から , 冷却管 , 蛍光管ともに管軸方向に概ね一様な強度分布が得られることがわかった . 以後 , 物体面は $z_{ob} = -1950$ mm , 像面は $z_{im} = 1081$ mm とする . y 軸に沿う受信電圧分布を図 3(b) に示す . 冷却管 , 蛍光管の受信電圧はそれぞれ -0.1 V , 0.075 V が得られ , 背景に対する電圧差は冷却管の方が大きい結果となった .

3. 逆光を用いたパッシブイメージング

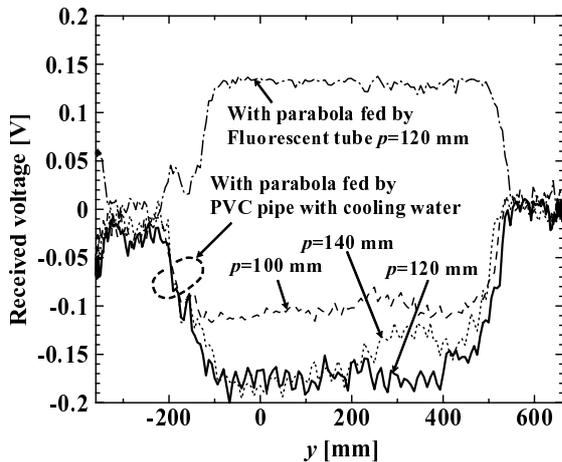
3.1 開口分布

冷却管パラボラ反射鏡と人体を被写体とした光学系の構成および座標系を図 4 に示す . 人体の背景に位置する背景面を $z = z_b$ とし , $z = z_b$ にパラボラの頂点が一致するように配置した . ここで $z_b = -2880$ mm , $z_{im} = 1081$ mm とし , 物体面 $z = z_{ob}$ と背景面 $z = z_b$ の差は $l = 930$ mm とする . なお , パラボラ反射鏡の上端領域にはアルミ導体板を配置しており , この上端領域におけるイメージング素子アレーの出力電圧が全て 0 V となるように校正している [4] . 上端領域に導体板を配置することは , 導体板に対する鏡像 , すなわち測定した部屋の壁面等の周囲環境の熱雑音強度を計測することを意味し , 周囲環境の熱雑音強度に対する相対レベルを計測していることに対応する .

図 4 の光学系において , 人体がない状態で冷却管 , 蛍光管を使用したパラボラ反射鏡の開口分布をそれぞれ測定した . $p = 120$ mm の場合の開口分布を光学画像と共に



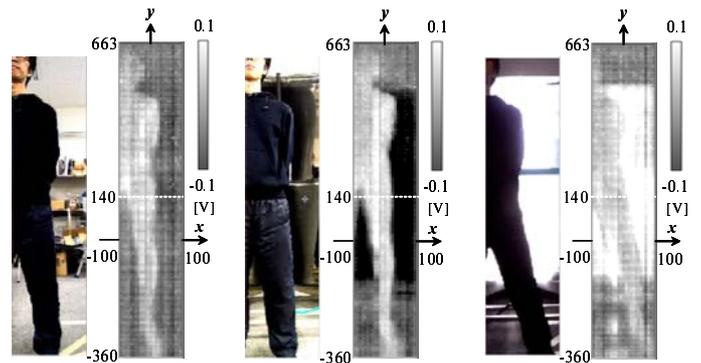
(i) 光学画像 (ii) 冷却管 (iii) 蛍光管
(a) xy 面



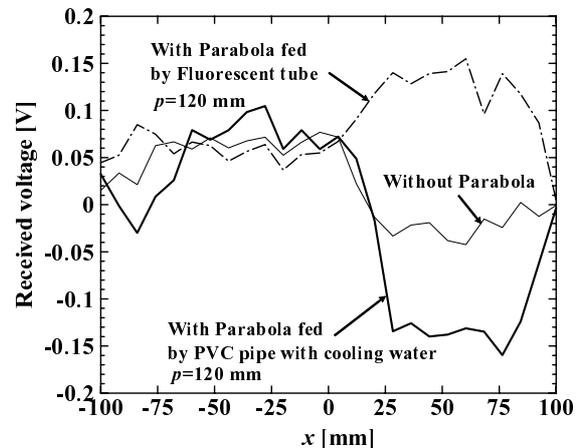
(b) y 軸 ($x=0$)

図 5: 冷却管パラボラ反射鏡と蛍光管パラボラ反射鏡の開口分布 ($z_b=-2880$ mm, $z_{im}=1081$ mm, $p=120$ mm) .

図 5(a) に示す . 冷却管と蛍光管いずれの場合についても開口面内ではほぼ一様な分布が得られた . $p=100$ mm , 120 mm , 140 mm の冷却管パラボラ反射鏡の y 軸に沿う開口分布を図 5(b) に示す . $p=120$ mm のときに一様かつ背景との電圧差が最大となった . 蛍光管パラボラ反射鏡においても $p=120$ mm において一様分布が得られた . $p = f$ の平面波よりも $p > f$ の集光波の場合に一様分布が得られることは興味深い . また , 冷却管パラボラ反射鏡の受信電圧は約 -0.18 V , 蛍光管パラボラ反射鏡の場合は約 0.13 V が得られ , 冷却管の場合が蛍光管の場合に比べて周囲環境の熱雑音強度に対するコントラストが高くなる結果となった .



(i) パラボラなし (ii) 冷却管パラボラ (iii) 蛍光管パラボラ
(a) xy 面



(b) $y=140$ mm

図 6: パラボラ反射鏡を用いた逆光によるパッシブイメージング ($z_b=-2880$ mm, $z_{ob}=-1950$ mm, $z_{im}=1081$ mm, $p=120$ mm) .

3.2 イメージング

冷却管パラボラ反射鏡を人体背後の背景面 z_b に配置した逆光によるパッシブイメージングを行った . パラボラ反射鏡がない場合 , 背景面 $z = z_b$ に冷却管パラボラ反射鏡を配置した場合および蛍光管パラボラ反射鏡を配置した場合のミリ波画像を光学画像と共に図 6(a) に示す . 冷却管パラボラ反射鏡があることにより人体と背景のコントラストが向上する結果が得られた . 一方 , 蛍光管パラボラ反射鏡の場合は人体よりも大きな熱雑音強度が観測されており , 人体の輪郭に置かれた物体の検知特性が改善されることを既に報告している [5-6] .

図 6 の $y=140$ mm における x 軸方向の受信電圧分布を図 6(b) に示す . 人体と冷却管パラボラ反射鏡の電圧差 $\Delta V_c=0.2$ V , 人体と蛍光管パラボラ反射鏡の電圧差 $\Delta V_f=0.08$ V , 人体と周囲環境の電圧差 $\Delta V_b=0.08$ V が得られ , 背景と人体のコントラストは冷却管パラボラ反射鏡を用いた場合が大きくなる結果が得られた .

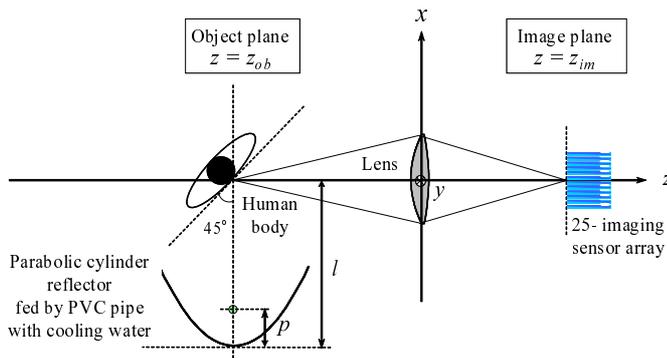


図 7: 冷却管パラボラ反射鏡による順光の光学系の構成 .

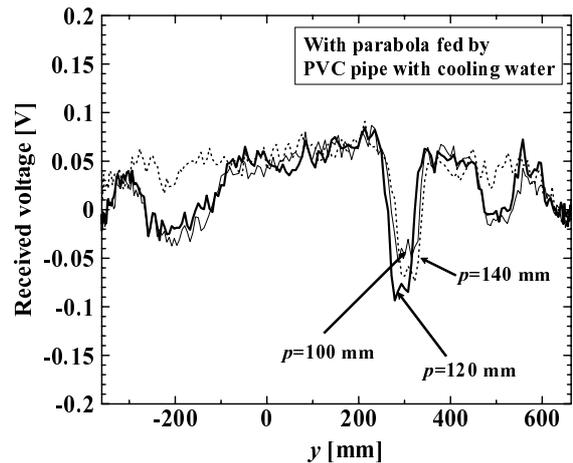
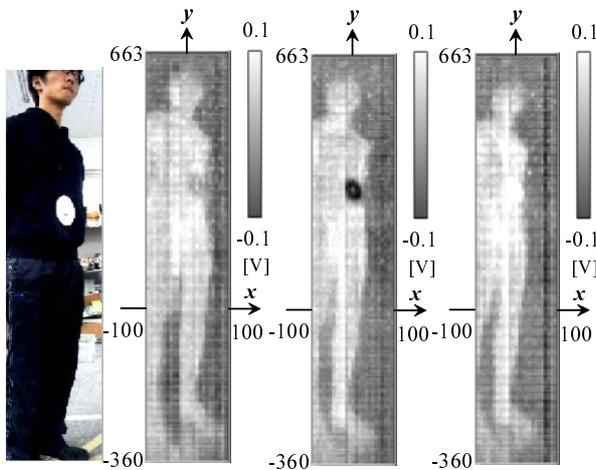
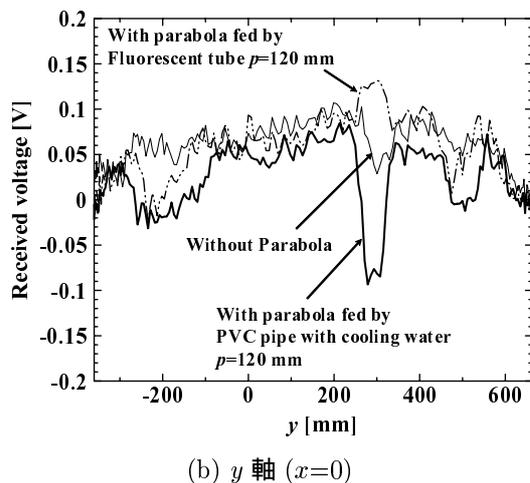


図 9: p を変化したときの冷却管パラボラ反射鏡による順光パッシブイメージング ($l=930$ mm, $z_{ob}=-1950$ mm, $z_{im}=1081$ mm) .



(i) 光学画像 (ii) なし (ii) 冷却管の場合 (iii) 蛍光管の場合
(a) xy 面



(b) y 軸 ($x=0$)

図 8: パラボラ反射鏡を用いた順光によるパッシブイメージング ($l=930$ mm, $z_{ob}=-1950$ mm, $z_{im}=1081$ mm, $p=120$ mm) .

4. 順光を用いたパッシブイメージング

パッシブイメージングによる物体の検知特性は、人体と物体の熱雑音強度差が大きいほど向上する。検知する物

体が散乱導体の場合、イメージング装置は散乱導体に入射した周囲環境からの熱放射による散乱波を観測することになるので、散乱導体を所持した人体へパラボラ反射鏡からのミリ波帯熱雑音を照射する順光イメージングを行い、検知特性に対する基礎実験を行った。

検討した順光の光学系の構成を図 7 に示す。パラボラ反射鏡の向きを $+x$ 軸方向とし、人体は z 軸に対して 45° 回転した位置とした。ここで、反射鏡の頂点と人体の回転軸の距離を $l=930$ mm とした。この光学系は、鏡像の原理により無限に広い導体板が z 軸に対して角度 45° で配置された場合に図 4 の光学系に一致する。

CD-ROM を腹部に所持した人体のミリ波画像を図 8(a) に示す。冷却管パラボラ反射鏡を用いた場合に高いコントラストの CD-ROM の像が得られた。図 8(a) の y 軸に沿う受信電圧分布を図 8(b) に示す。人体と冷却管パラボラ反射鏡の電圧差 $\Delta V_c=0.15$ V、人体と蛍光管パラボラ反射鏡の電圧差 $\Delta V_f=0.05$ V、人体と周囲環境の電圧差 $\Delta V_b=0.05$ V が得られ、人体と物体のコントラストは冷却管パラボラ反射鏡の場合が大きくなる結果が得られた。

冷却管パラボラ反射鏡において $p=100$ mm, 120 mm, 140 mm のとしたときの y 軸に沿う受信電圧分布を図 9 に示す。 $p=120$ mm のときに CD-ROM の位置における受信電圧が最も低下する結果が得られ、逆光を用いたイメージングと同様に平面波よりも集光波の方がコントラストの向上に寄与する結果を得た。

以上の結果から、散乱導体が平面状で、かつ鏡像の原理が成り立つ specular な角度 (この場合は 45°) で人体が装置に向いている場合は散乱導体の検知特性が向上するものと考えられる。

5. まとめ

ミリ波帯熱雑音の熱源として冷却水を通した直管形塩化ビニル管を放物筒面の焦線に配置した冷却管パラボラ反

射鏡を提案した .77 GHz 帯ミリ波パッシブイメージング装置を用いて冷却管が放射している熱雑音の強度を測定した結果、冷却管は背景よりも約 0.1 V 小さいことがわかった。提案した冷却管パラボラ反射鏡を人体の後方に配置した場合、開口面にわたり人体よりも約 0.2 V 小さい熱雑音強度が得られ、人と背景のコントラストを向上できた。さらに、この冷却管パラボラ反射鏡を順光を用いたパッシブイメージングに利用することにより、鏡像の原理が成り立つ specular な角度に置かれた平面状導体の検知特性が改善されることを示した。今後、任意の入射角を実現可能なパラボラ反射鏡を検討する予定である。

ングにおける物体検知特性の改善, "信学技報, vol. 111, no. 172, AP2011-52, pp. 19-24, 2011 年 8 月.

謝辞

本研究の一部は文部科学省科学技術振興調整費「安全・安心な社会のための犯罪・テロ対策技術等を実用化するプログラム」の助成の下に行われた。また、パラボラ反射鏡の作製および冷却システムの構築にあたり株式会社システムリンケージ千葉康明氏から多大なる協力を頂いた。

参考文献

- [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), "計測と制御, 第 42 巻, 第 1 号, pp. 748-753, 2009 .
- [2] 佐藤弘康, 澤谷邦男, 水野皓司, 植村順, 武田政宗, 高橋順一, 山田康太, 森近慶一, 平井晴之, 新倉広高, 松崎智彦, 中田淳, " 77GHz 帯ミリ波パッシブ撮像装置の開発, "2009 年電子情報通信学会総合大会, CS-4-1, 2009 .
- [3] 佐藤弘康, 澤谷邦男, 水野皓司, 植村順, 武田政宗, 高橋順一, 山田康太, 森近慶一, 平井晴之, 新倉広高, 松崎智彦, 中田淳, " 77 GHz 帯ミリ波パッシブイメージング装置, "2010 年電子情報通信学会総合大会, B-1-150, 2010 .
- [4] H. Sato, K. Sawaya, Y. Wagatsuma and K. Mizuno, J. Uemura, M. Takeda, J. Takahashi, K. Yamada, K. Morichika, T. Hasegawa, H. Hirai, H. Niikura, T. Matsuzaki, S. Kato, J. Nakada, "Passive millimeter-wave imaging for security and safety applications," SPIE Proceedings, vol. 7671, Orlando, USA, 2010 .
- [5] 栗山弘平, 中田 淳, 佐藤弘康, 澤谷邦男, " 蛍光管オフセットパラボラアンテナを利用したミリ波パッシブイメージングにおける物体検知特性の改善, " 電子情報通信学会 2010 年総合大会, B-1-82, March 2011 .
- [6] 栗山弘平, 中田淳, 佐藤弘康, 澤谷邦男, " 蛍光管パラボラアンテナを利用したミリ波パッシブイメージ