

サーモパイル型赤外線センサアレイと死角内歩行者 警報システムへの応用技術

廣田, 正樹
日産自動車株式会社総合研究所

中島, 靖志
日産自動車株式会社総合研究所

齋藤, 誠則
日産自動車株式会社総合研究所

佐藤, 文紀
日産自動車株式会社総合研究所

他

<https://hdl.handle.net/2324/7361474>

出版情報 : The Journal of the Institute of Image Information and Television Engineers. 56 (6),
pp.941-945, 2002-06-01. 映像情報メディア学会
バージョン :
権利関係 : © 社団法人 映像情報メディア学会



サーモパイル型赤外線センサアレイと死角内歩行者警報システムへの応用技術

Thermoelectric Infrared Sensor Array and Blind-Spot Pedestrian Warning System

廣田 正樹[†], 中島 靖志[†], 齋藤 誠則[†], 佐藤 文紀[†], 内山 誠[†]
Masaki Hirota[†], Yasushi Nakajima[†], Masanori Saito[†], Fuminori Satou[†] and Makoto Uchiyama[†]

Abstract A 48×32 element thermoelectric infrared sensor array with a responsivity of $R = 2100 \text{ V/W}$ has been developed. An array with both high responsivity and low-cost potential was fabricated using the CMOS IC process, a precisely patterned Au-black infrared absorber, and micromachining technology. A blind-spot pedestrian warning system using the array has been fitted to Nissan's ASV-2 (advanced safety vehicle). It alerts the driver to the presence of a pedestrian in the blind spot by detecting infrared radiation from human bodies. It also prevents the vehicle from moving in the direction of the pedestrian.

キーワード: 赤外線, センサ, サーモパイル, 自動車, Au-black

1. ま え が き

近年エレクトロニクス技術の進歩によって, 自動車には, 圧力センサ, 加速度センサ, さらに可視CCDをはじめとする様々なセンサが使われており, 排気ガス浄化, 省燃費, 快適性や安全性向上などの社会的な要請に応えてきている。

日本においては, 1980年台後半からの交通事故死者の増加に呼応して自動車の安全性能への関心が高まり, レーザレーダやミリ波レーダによる車間距離警報または車間距離自動制御システムなどの様々な予防安全装置が搭載されるに至っている。我々は, 1991年より運輸省(現国土交通省)提唱の第一期および第二期ASV(Advanced Safety Vehicle, 先進安全自動車)プロジェクトへ参画し, 赤外線センサアレイを用いた夜間歩行者警報システム¹⁾や死角内歩行者警報システムの開発に取り組んできた。

人体から放射される赤外線は可視光線に比べてエネルギーが小さく, 従来はHgCdTeなどの高価な半導体センサを極低温に冷却し熱ノイズの影響を排除する必要があった。しかし, 昨今米国における半導体技術の発展および軍事技術の民生品への転用によって高性能非冷却赤外線イメージセンサ²⁾³⁾が実用化され, 夜間視覚補助装置が1999年から一般ユーザ向け乗用車に搭載され注目を集めている。冷却型赤外線イメージセンサに比べて部品点数が少ない非冷却型赤外線イメージセンサでさえも, 未だにコストが高く最

高級車だけに搭載されているのが現状である。今後自動車用途に広く普及させるためには一層の低コスト化が必要である。本稿のサーモパイル型赤外線センサは, マイクロマシンニング技術とCMOS IC技術を融合して作製した安価なセンサで, 非冷却動作および静止物体検知が可能な特徴があり, 自動車用赤外線センサとして極めて有望である。

本稿では, まず赤外線および自動車用赤外線センサを概説し, 次に開発したサーモパイル型 48×32 画素赤外線センサアレイの構造, 性能, 取得画像等を説明し, 最後に応用システムとして日産ASV-2に搭載した死角内歩行者警報システムを紹介する。

2. 人体放射赤外線および自動車用赤外線センサの特徴

歩行者や乗員検知などの自動車用途に利用可能な赤外線波長は, ①物体の絶対温度と放射率から決定される放射発散強度, ②分光大気透過特性, の2つによって決定される。

初めに顔表面温度の気温依存性および日射の影響を自動車用環境実験設備を用いて測定した。日陰条件(照明および空調用送風のみ)では, 図1に示すように, 30°C の気温変化に対して顔表面温度変化は 4.1°C と非常に少なかった。さらに, 真夏日射条件下(日射用照明高さ3m, 床面でのエネルギー密度 $2.76 \text{ MJ/m}^2 \cdot \text{h}$)でも日陰条件に対して 1°C 程度の温度上昇に留まる事が明らかになった。さらに, 気温 27°C (300K)以下で顔表面温度と温度差が 5°C 以上得られる事も明らかになった。

次に人体放射赤外線特性を求めた。光の完全吸収体を黒体と呼び, キルヒホッフ(Kirchhoff)の法則によって同時に

2001年7月9日受付, 2002年1月11日最終受付, 2002年2月14日採録

[†]日産自動車株式会社 総合研究所

(〒237-8523 横須賀市夏島町1, TEL 0468-67-5183)

[†]Nissan Research Center, Nissan Motor Co., Ltd.

(1 Natsushima, Yokosuka-Shi Kanagawa 237-8523, Japan)

完全放射体となる。人体の放射率は0.98程度で黒体に近い。黒体からの分光放射発散度は、プランク (Planck) の法則

$$W_{\lambda} = 2\pi hc^2 / [\lambda^5 (e^{hc/\lambda kT} - 1)] \quad (1)$$

で決定される。ここで、 W_{λ} : 単位波長, 単位面積当たりの放射量 ($W/(cm^2 \cdot \mu m)$), T : 絶対温度 (K), h : プランク定数 ($=6.63 \times 10^{-34} W \cdot s^2$), k : ボルツマン定数

($=1.38 \times 10^{-23} W \cdot s/K$) である。最大放射強度波長 λ_m はウィーン (Wien) の変位則でも求められ

$$\lambda_m \cdot T = 2897.8 \mu m \cdot K \quad (2)$$

となる。

図1からわかるように、顔表面温度が31~36℃ (304~309K) でほぼ一定しているため、人体放射赤外線最大の放射強度波長は、図2に示すように $\lambda_m \approx 9.5 \mu m$ になる。

一方、赤外線の大気透過領域は図3のように、3つの波長領域に限定される。人体検知には、波長領域8~13 μm (10 μm 帯とも呼ぶ) を用いる。波長10 μm 帯の赤外線を検出するセンサは、量子型と熱型に大別される。量子型IRセンサでは、ナローギャップ半導体を極低温に冷却する必要があるシステムが大型で高価になる。一方、光のエネルギーを一旦熱エネルギーに変換して検出する熱型IRセンサでは冷却の必要がなく小型で安価なシステムを作れるため自動車用途に適している。ただし、感度や応答速度は量子型IRセンサに劣る。熱型IRセンサは、大別して、①ゼーベック効果を利用したサーモパイル^{4)~6)}、②VOx等の電気抵抗の温度変化を利用したボロメータ、③BST等焦電効果を利用した焦電センサ、の3種類がある。ボロメータでは精密な温度コントロールが必要で機構が複雑になる。一方、焦電センサは基本的にアレイ化が難しく静止物体検知にチョッパが必要でやはり機構が複雑になる問題を抱えている。サーモパイル型は、このような制限がなく自動車用途に適している上に製造プロセスも汎用CMOSICとの適合性が高く低価格化が可能なため、我々はサーモパイル型を選択しアレイセンサの開発を行った。

3. サーモパイル型赤外線センサアレイ

今回製作した赤外線センサアレイの1画素のセンサ構造図を図4、センサを構成する各層の材料および膜厚を表1、SEM写真を図5に示す。まず、センサ各部のディメンションを以下に示す。画素サイズ: 190 $\mu m \times 190 \mu m$, Au-black吸収膜サイズ: 116 $\mu m \times 116 \mu m$, サーモパイル対数: 6対, サーモパイル長: 119 μm , サーモパイル幅: 0.8 μm , サーモパイルピッチ: 3 μm 。

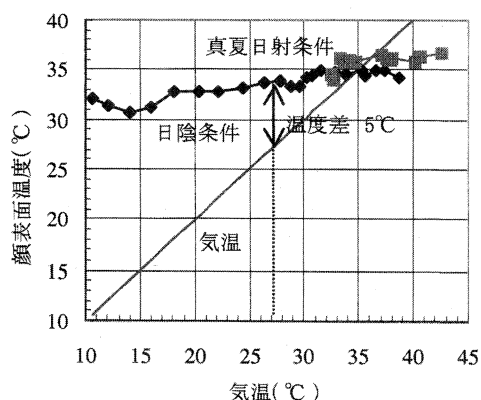


図1 顔表面温度の気温および日射依存性
(顔高さ1.7m, 空調用送風のみ, 日射用照明高さ3m, 日射エネルギー密度2.76MJ/m²・h)
Surface temperature of a human face versus on temperature and daylight intensity.

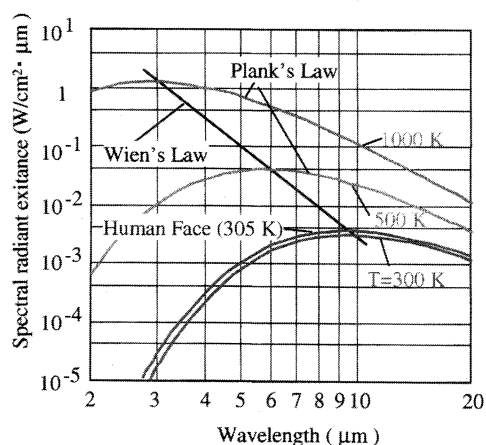


図2 黒体の分光放射発散度
Spectral radiant exitance of black body.

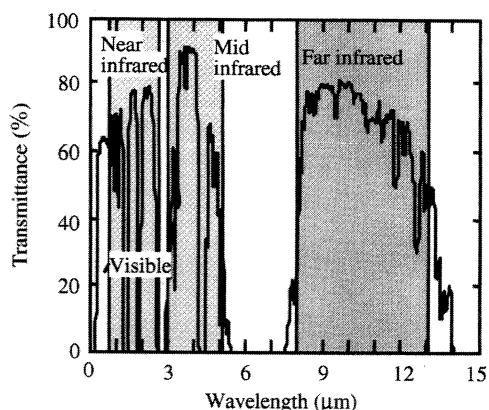


図3 大気分光透過特性
Atmospheric spectral transmittance.

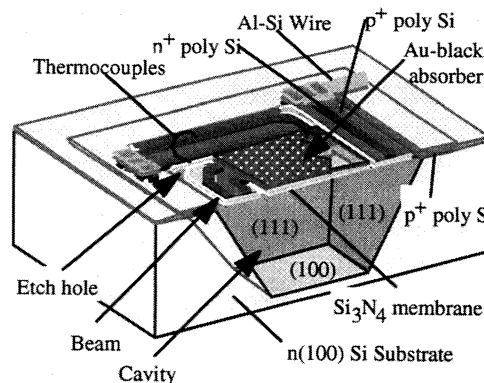


図4 サーモパイル型赤外線センサのデバイス構造図
Device structure of the thermoelectric infrared sensor.

表1 センサ各層の材料と膜厚
Materials and thickness of each layer.

Layers	Materials	Thickness (nm)
Substrate	Single crystal Si	625000
Sacrificial layer	Poly Si	350
Membrane	SiN by LPCVD	100
Thermopile	Poly Si	350
1st isolation layer	BPSG	600
1st wiring layer	Al-Si	700
2nd isolation layer	P-TEOS	600
Au-black underlay	Amorphous Si	100
3rd isolation layer	PSG	300
2nd wiring layer	Al-Si	800
Passivation layer	SiN by PECVD	300
Sacrificial layer	PSG	2000

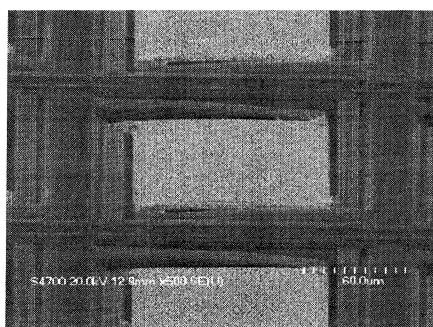


図5 サーマピル型赤外線センサのSEM写真
SEM microphotograph of a prototype sensor.

サーモパイル型赤外線センサの感度 R および応答時定数 τ はそれぞれ式(3), 式(4)で表される.

$$R = n \cdot a \cdot R_{th} \cdot \eta \quad (3)$$

$$\tau \propto C_{th} \cdot R_{th} \quad (4)$$

ここで, n はサーモパイルの対数, a はSeebeck係数(p 型と n 型の和), R_{th} は温接点と冷接点間の熱抵抗, η は赤外線吸収率, C_{th} は熱容量である. 式(3), 式(4)から, 感度 R の向上には n と R_{th} の向上が有効で, 応答時定数 τ を小さくするには R_{th} と C_{th} を減らす必要がある. よって, 感度 R と応答時定数 τ を両立させるにはセンサを小型化して C_{th} の削減が有効である. また, n と R_{th} は相反する関係にあるため最適化を行い $n=6$ とした. 開口率向上のために図5のように屈曲した梁を持つ凹型パターンを, η 向上のために高吸収率Au-black膜を用いており, 開口率は37%, 吸収率は波長 $10\mu\text{m}$ で90%以上を得ている.

次にセンサ構造および作製プロセスを述べる. 表1に示すように $n(100)$ Si基板上に熱分離領域を囲むリング状にドーパ量 $1 \times 10^{16}\text{cm}^{-2}$ でBをドーパした p^+ poly Si犠牲層を形成している. poly Siはマクロ的には面方位が存在しないため, ヒドラジンを用いた異方性エッチング時にも等方的にエッチング進行し, 表面エッチング孔からのエッチングにおいてもメンブレン形成が可能となる⁷⁾. さらに, リング状 p^+ poly Si犠牲層は, ヒドラジンへの溶出速度がアンドープ領域の1/20に減少する自己停止機能によって, ① 正確なメン

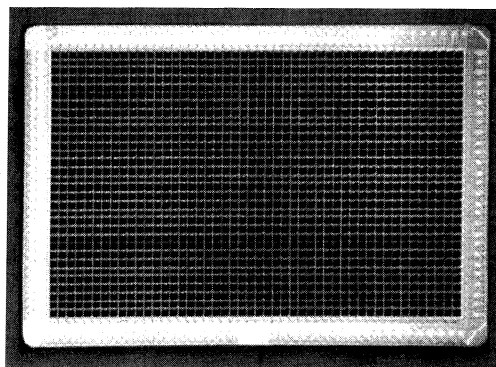
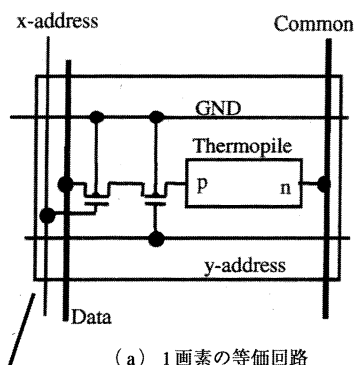
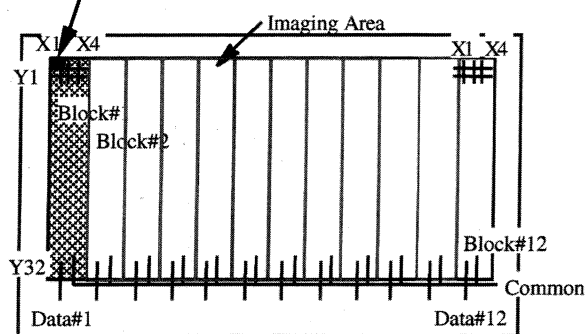


図6 48×32画素サーモパイル型赤外線センサアレイの顕微鏡写真
(チップサイズ: 10.5mm×7.44mm)
Microphotograph of a 48×32 element infrared focal plane array.
(chip size: 10.5mm×7.44mm)



(a) 1画素の等価回路



(b) チップダイアグラム

図7 48×32画素サーモパイル型赤外線センサアレイのダイアグラム
Diagram of a 48×32 element infrared focal plane array.
(a) equivalent circuit of one element, (b) chip diagram

ブレン形状の形成, ② メンブレン屈曲部を補強, ③ 冷接点近傍のメンブレン段差の解消を達成した. この上にLPCVD (Low Pressure CVD, 成膜温度 780°C) 法で Si_3N_4 薄膜メンブレンを形成した. Si_3N_4 薄膜には, Si^+ を $1 \times 10^{16}\text{cm}^{-2}$ イオン注入して低応力化を行っている⁸⁾. メンブレン上には, p^+ 型および n 型のpoly Siからなる一対の熱電対を, 各画素あたり6対直列に接続している. さらに, メンブレン中央部には赤外線吸収膜として微細パターン化したAu-black膜を用いている. Au-black膜は, 圧力266Pa下で蒸着法によって成膜した $2\mu\text{m}$ 厚の綿状のAu薄膜である. 綿状のために従来困難だった微細パターン化には, $2\mu\text{m}$ 厚のPSG犠牲層を用いたリフト法を用いた⁹⁾. 図5の白い部分がAu-blackである.

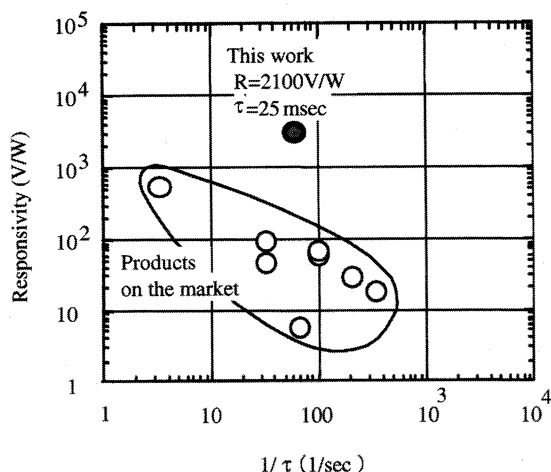


図8 サーマバイル型赤外線センサの感度および応答速度
Measured responsivity and time constant versus pressure.

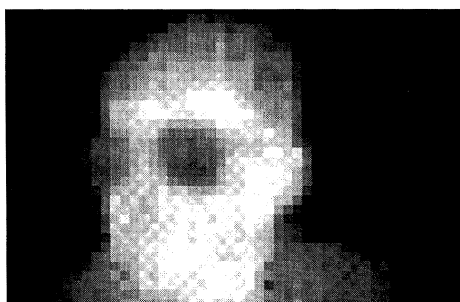


図9 48×32画素サーモバイル型赤外線センサアレイによって
取得した赤外線画像
Infrared images with a prototype 48×32 element infrared focal plane array.

48×32画素赤外線センサアレイの顕微鏡写真を図6、ブロックダイアグラムを図7に示す。チップサイズは10.5mm×7.44mm、画素ピッチは190μmである。各画素は、図7(a)に示すように、外部入力信号によって制御される2つの内蔵NMOSトランジスタを通して出力線(Data#)に接続される。なお、各画素のマイナス型端子はすべての同じcommon端子に接続されている。

本センサの内部抵抗は、116kΩと比較的高く、Johnson Noise(熱雑音)の低減に後段回路の帯域制限が必要である。取得画像レートを確保するため、図7(b)のように4列毎に計12個のブロック(Block#1~Block#12)に分割され、信号は12本の出力線(Data#1~Data#12)から並列に出力される。

アレイセンサは、高感度化のために真空封止し、図8のように感度 $R=2100\text{V/W}$ 、応答速度 $\tau=25\text{msec}$ と市販品に比べて高い性能を達成した。図9に、48×32画素赤外線センサアレイによって得られた眼鏡を掛けた人間の顔の画像を示す。10μm帯の赤外線はガラスを透過しないので眼鏡部が黒く示されている。

4. 死角内歩行者警報システム

本システムは、日産ASV-2に搭載したシステムで、車両4隅に設けられた4台の48×32画素赤外線センサアレイ内蔵の赤外線カメラによって車両死角にいる歩行者を検知し、

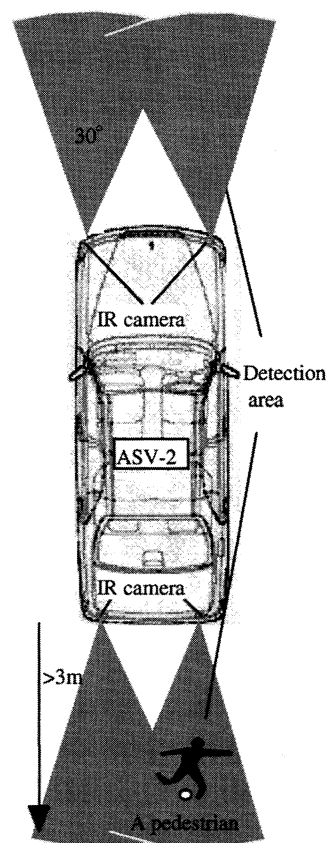


図10 赤外線カメラによる死角内歩行者警報システムのシステム
概要図
System concept of blind spot pedestrian warning system.

発進時に発進方向に歩行者がいる場合は警報を発すると共に発進を抑止するシステムである。

従来から用いられている車両死角補助アイテムとしては、ミラー、可視カメラおよび超音波センサがある。ミラーおよび可視カメラは画像情報をドライバーに提供する機能のみで検出および判断機能を有しない。一方超音波センサは、距離情報が得られる特徴があるが空間分解能が乏しいため検知対象の大小や形状を捉えることができない。さらに、いずれのシステムも発進抑制制御は行っていない。本システムは、赤外線カメラによって人体等の熱源を選択的に検出して、発進抑制制御を世界ではじめて実現したものである。図10に概念図、図11に実車写真を示す。なお、図11(b)のリア部だけは、デザイン上の理由から赤外線カメラをバンパー外皮に取り付けたGe窓で覆っている。2台のカメラの間隔は、前側1,580mm、後側1,000mmと前側を広くした。これは、前輪転舵のため前側の側方検知範囲を後側に比べて広げる必要があるからである。この赤外線カメラは、焦点距離 $f=15\text{mm}$ 、口径比 $f/0.7$ のGeレンズを用いており、水平画角 $30^\circ \times$ 垂直画角 20° の画角を有する。NETDは、 0.4°C である。

4台の赤外線カメラはそれぞれ車両コントローラから送られる要求信号に応じて車両停車時に取得した初期画像データと発進時画像データを比較し検知範囲内に所定の温度

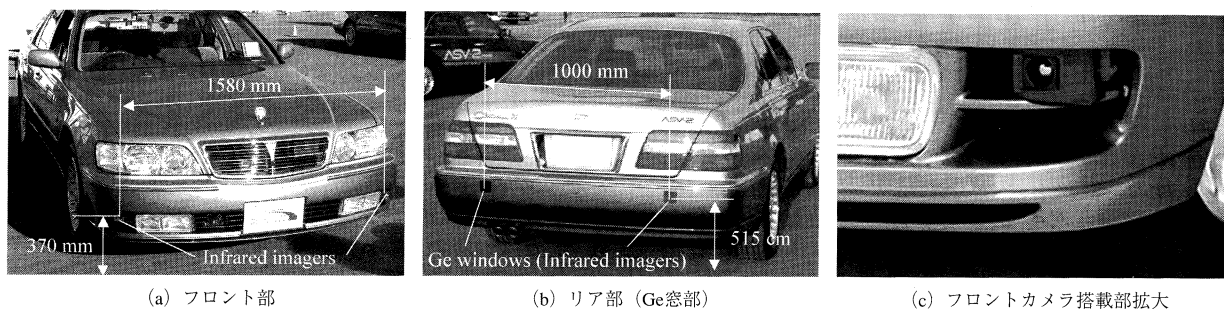


図11 赤外線カメラによる死角内歩行者警報システムを搭載した日産ASV-2

Appearance of infrared imagers.
(a) front, (b) rear, (c) front enlargement

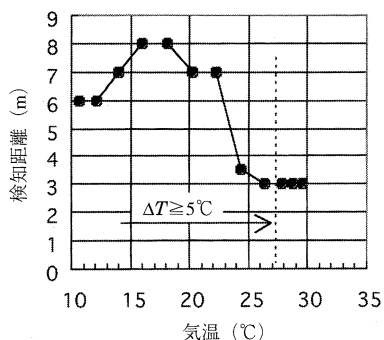


図12 IRイメージャの検知距離と気温との関係
Detection range versus atmospheric temperature.

差および大きさの熱源を検知した場合には熱源を歩行者と見なし、検知信号を車両コントローラへ送る。車両コントローラは警報および表示ユニットによってドライバーへ警告すると共に、スロットルおよびブレーキアクチュエータによって強制的に発進動作を抑止する。

本システムの動作確認のために異なった人体検知距離の気温依存性を測定した。図12に結果を示す。気温が10～22℃では6～8mの検知距離が得られた。一方、気温が24～30℃で、人体表面温度に近い条件では検知距離が3～3.5mであった。気温、すなわち背景温度 (T_e) と人体表面温度 (T_t) との温度差 $\Delta T = T_t - T_e \geq 5^\circ\text{C}$ の条件、すなわち、気温 (背景温度) が27℃以下で本システム仕様である3m以上の検知距離が得られた。さらに、実車 (日産ASV-2) で人体を検知して発進抑止を確認し、本システムが死角内歩行者保護に有効である知見を得た。

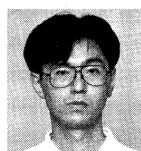
6. む す び

微細パターン化Au-black膜を含む高精度半導体プロセス技術およびマイクロマシニング技術を適用し自動車用途に有望な感度 $R=2100\text{V/W}$ 、 48×32 画素サーモパイル型赤外線アレイセンサを開発した。さらに、赤外線センサアレイ内蔵の死角内歩行者警報システムを開発し、日産ASV-2に搭載し歩行者検知方向への発進抑止動作に成功した。

〔文 献〕

- 1) 廣田, 齋藤, 森田, 福原: “夜間歩行者警報システムと熱型赤外線技術”, 自動車技術, 50, 11, pp. 58-63 (Nov. 1996)

- 2) C. Hanson: “Uncooled Thermal Imaging at Texas Instruments”, SPIE, 1689, pp. 330-339 (1993)
- 3) R. A. Wood, C. J. Han, and P. W. Kruse: “Integrated Uncooled IR Detector Imaging Arrays”, Proceedings of the IEEE Solid State Sensor and Actuator Workshop, pp. 132-135 (1992)
- 4) A. W. Herwaarden and P. M. Sarro: “Thermal Sensors Based on the Seebeck Effect”, Sensors and Actuators A, 10, pp. 321-346 (1986)
- 5) R. Lenggenger, H. Baltes, and T. Elbel: “Thermoelectric Infrared Sensors in CMOS Technology”, Sensors and Actuators A, 37-38, pp. 216-220 (1993)
- 6) T. Kanno, and M. Saga: “Uncooled Infrared Focal Plane Array Having 128×128 Thermopile Detector Elements”, SPIE, 2269, pp. 451-459 (1994)
- 7) M. Suzuki, K. Makino, A. Tanaka, R. Asahi, O. Tabata, S. Sugiyama, and M. Takigawa, : “An Infrared Detector Using Poly-Silicon p-n Junction Diode”, Technical Digest of the 9th Sensor Symposium, pp. 71-74 (1990)
- 8) M. Hirota, F. Satou, M. Saito, and S. Morita: “ 48×32 Element Thermoelectric Infrared Focal Plane Array with Precisely Patterned Au-black Absorber” Sensors and Materials, 12, 5, pp. 289-300 (Dec. 2000)
- 9) M. Hirota, S. Morita: “Infrared Sensor with Precisely Patterned Au-black Absorption Layer”, SPIE, 3436, pp. 623-634 (Jul. 1998)



ひろた まさき
廣田 正樹 1985年, 早稲田大学理工学部電気工学科卒業。1987年, 東京工業大学大学院理工学研究科修士課程修了。1987年, 日産自動車 (株) 入社。総合研究所電子情報研究所にて, 自動車用赤外線センサ, および応用システムの研究に従事。



なかじま やすし
中島 靖志 1985年, 法政大学工学部電気工学科卒業。1985年, 沖電気工業 (株) 超LSIセンター入社。1989年, 日産自動車 (株) 入社。総合研究所電子情報研究所にて, 電気自動車用パワーデバイス, および赤外線センサの研究に従事。



さいとう まこと
齋藤 誠則 1987年, 工学院大学専門学校機械科卒業。1989年, 日産自動車 (株) 入社。総合研究所研究実験製作部にて, 予防安全装置, および赤外線応用システムの研究に従事。



さいとう ふみのり
佐藤 文紀 1988年, 東北大学工学部電気工学科卒業。1988年, 日産自動車 (株) 入社。総合研究所電子情報研究所にて, 自動車用半導体プロセス, マイクロマシニング, および赤外線センサの研究に従事。



うちやま まこと
内山 誠 1982年, 早稲田大学大学院理工学研究科博士後期課程修了。1982年, ロンドン大学ユニバーシティカレッジ化学科助手。1983年, 早稲田大学理工学部助手。1986年, 日産自動車 (株) 入社。現在, 総合研究所電子情報研究所主管研究員。工学博士。