



遠赤外線カメラの車室内乗員検知システムへの応用

泉 達也*・齋藤 裕昭・萩原 剛志
畑 中 健一・澤井 孝典

Development of Occupant Detection System Using Far-infrared Ray (FIR) Camera —— by Tatsuya Izumi, Hiroaki Saito, Takeshi Hagihara, Kenichi Hatanaka and Takanori Sawai —— In recent years, to reduce the risk of airbag-related injuries, “smart” airbag systems that get activated depending on occupant position and crash condition are increasingly being developed. The use of various occupant detection methods such as weight/pressure sensors, ultrasonic sensors or image sensors is being proposed, but it is difficult to accurately sense the size and position of an occupant. FIR cameras, which offer thermographic images, are useful for detection of human presence. The authors have developed a low cost FIR camera using Sumitomo Electric's advanced material technology on polycrystalline sintered zinc sulfide (ZnS) lens, and also developed an algorithm for detecting automobile occupants. This paper presents the overviews of the FIR camera and the occupant detection algorithm both developed by the authors.

1. 緒 言

自動車の安全性向上を目的として、衝突時に乗員を保護するSRS（Supplemental Restraint System）エアバッグ装置が広く普及しており、運転席、助手席のみならず、座席側面や後部座席への搭載が進んでいる。一方、エアバッグ搭載率の上昇に伴い、エアバッグが原因とされる死亡事故も報告されており、米国においてスマートエアバッグの義務化が進むなど、さらなる安全性の向上が期待されている⁽¹⁾。スマートエアバッグは、衝突の状況や乗員の着座状態を検知し、エアバッグの展開を最適制御するというものであり、乗員の姿勢や体格を高精度に検知できるセンサが求められている。

車室内の乗員検知手段としては、圧力センサや超音波センサ、可視カメラなどを用いた各種方式が提案されている。当社では乗員が発する熱（遠赤外線）を映像化する遠赤外線カメラに着目し、独自の遠赤外線光学材料技術（焼結ZnS）を用いた遠赤外線カメラ、および遠赤外線カメラ向け車室内乗員検知アルゴリズムを開発した。本稿では、開発したカメラの要素技術（レンズ設計・評価技術・信号処理技術）の概要、乗員検知アルゴリズムの詳細、および検知システムの検証実験結果について報告する。

2. 遠赤外線カメラを用いた車室内乗員検知システム

車室内の乗員検知センサとしては、圧力センサや超音波センサなどが一般に知られている。これらのセンサは物体の有無は検知できるが、乗員と荷物の判別や乗員の体格や姿勢の正確な検知が難しい。また、可視カメラや近赤外線

カメラを用いて画像処理にて乗員を検知する手法も用いられているが、環境光の反射光を検出して映像化するという原理上、外乱光の影響を受けやすいという問題点がある。これに対して、遠赤外線カメラは物体の「熱」を映像化するため、乗員や歩行者といった人間を検知する用途で有望視されている。遠赤外線カメラで乗員を撮影した画像を写真1に、車両前方の歩行者を撮影した画像を写真2に示す。



写真1 遠赤外線カメラ画像（車室内の乗員）



写真2 遠赤外線カメラ画像（車両前方の歩行者）

遠赤外線カメラは一般に以下の長所・短所を有すると言われている。

①長所

- ・乗員の肌がカメラ映像中で比較的高輝度（高温）に映るため、乗員の有無の判別、乗員と荷物の判別が容易
- ・可視カメラや近赤外線カメラと異なり、太陽光やヘッドライトなどの外乱光の影響を受けにくい

②短所

- ・車室内の温度が上昇すると、乗員と背景物体との輝度差（温度差）が得られにくくなる
- ・レンズ、撮像素子共に高価である

今回開発した車室内乗員検知システムの構成を図1に示す。高い乗員検知性能を実現するため、本システムでは助手席の乗員を遠赤外線カメラで撮影した後、乗員の肌温度情報を利用した画像処理を行うことで、乗員の有無、体格、姿勢等を検知し、結果をモニタに表示する。当社では、遠赤外線カメラの上記短所を補うために、乗員と背景の輝度差（コントラスト）を確保する明るいレンズ、乗員の絶対温度を計測可能なカメラ信号処理技術、および肌温度を利用した乗員検知アルゴリズムの開発を行っており、詳細を以下に述べる。

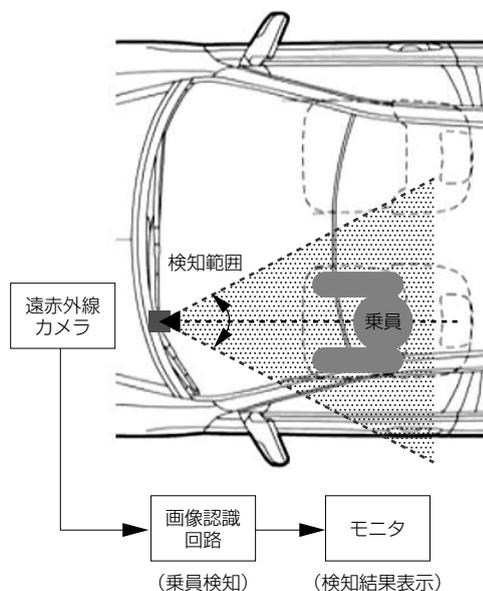


図1 遠赤外線カメラを用いた車室内乗員検知システム

2-1 車室内乗員検知システム向けレンズの設計・評価

硫化亜鉛を材料とする当社独自の光学材料（以下、焼結ZnS）は、ゲルマニウムやカルコゲナイドガラスなどの他の遠赤外線光学材料と比較して、原料コストが安価であり、粉末冶金法を活用した成形プロセスを用いることで、製造コストを大幅に低減できる点に強みがある。一方、他材料と比べて屈折率の波長依存性が大きいこと、材料の内部吸

収が大きく透過率が低下することなど、材料特性における短所も知られている（表1）。当社では、独自の光学設計技術により、材料特性に起因する光学性能低下を補償し、MTF（Modulation Transfer Function）^{*1} や温度分解能^{*2} に関して良好な光学性能を実現している。また、焼結ZnSをレンズ材料として用いた光学設計はあまり一般的ではないため、独自の設計データベースを作成し、様々な光学仕様に対応できる設計環境を構築している。

表1 遠赤外線光学材料の特性比較（代表値）

	Sintered ZnS	Germanium	Chalcogenide glass
Refractive index at 10μm	2.2	4.0	2.5-2.6
Abbe number 8-12μm	22.7	942	100-120
Thermal coefficient of refractive index (dn/dT) [10 ⁻⁶]	39	400	55-58
Thermal expansion coefficient [10 ⁻⁶]	6.65	6.1	16-17
Density [g/cm ³]	4.08	5.33	4.4-4.8
Absorption coefficient at 10μm [cm ⁻¹]	0.20	0.020	0.007-0.015

(1) 高コントラスト広角レンズの設計

今回開発した乗員検知システムでは、カメラを車室内に設置し、比較的近距离に存在する乗員を撮影対象とするため、ナイトビジョンシステム等の歩行者をターゲットとするアプリケーションと比べて、より広角なレンズが求められる。試作したカメラの仕様を表2に示す。撮影対象までの距離（0.5～2m）、使用する撮像素子の画素数（320×240）、乗員検知アルゴリズムに求められる解像度等を考慮して、レンズの水平視野角を52度とした。また、乗員検知に必要なコントラスト（温度分解能）が得られるよう、MTFやディストーション^{*3}などの光学性能が確保できる範囲でF値をできるだけ小さく設計した。

表2 試作した遠赤外線カメラの仕様

項目	仕様
F値	F/0.94
視野角	H52[°] × V40[°]
解像度	320 × 240 [pixel]
画素ピッチ	25 [μm]
波長帯	8-12 [μm]
階調	8ビット（256階調）グレースケール
サイズ	H45 × W55 × D95 [mm]
画像出力	NTSC

設計したレンズの光路図を図2に示す。第1レンズ、第2レンズ、第3レンズの3枚のレンズで光学系を構成し、各面には非球面*4を使用した。少ないレンズ枚数で広角化を図るには、一般にレンズの曲率を大きくする必要があるが、球面収差*3やコマ収差*3、ディストーションが大きくなるという問題点があった。当社では、各面の中心部と周辺部で屈折力の正負が反転するような非球面形状を作製することで、軸上光線および軸外光線の挙動を精密に制御し、

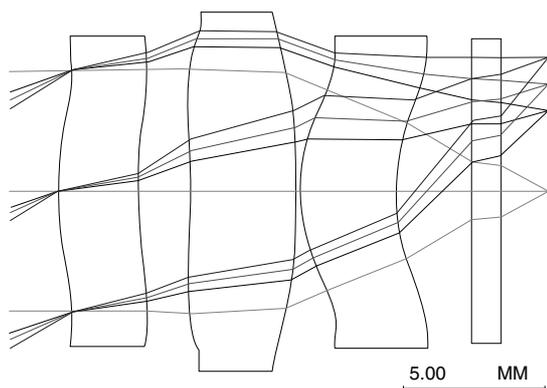


図2 設計したレンズの光路図

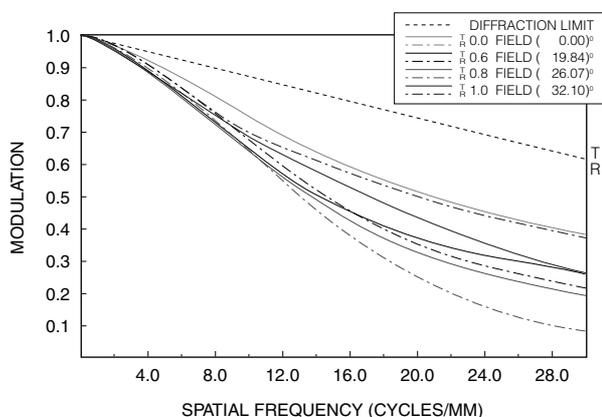


図3 設計したレンズのMTF特性、収差図

球面収差、コマ収差を良好に補正することに成功した。また、屈折率の波長依存性に起因して発生する色収差に関しては、DOE (Diffractive Optical Element)*5を導入することで低減を図った。設計したレンズのMTF特性及び収差図を図3に示す。

(2) レンズの性能評価

MTF特性の評価には、OPT-IR (Optikos Corporation製 LWIR OpTest Lens MTF System)を使用した。本装置は、被検レンズの画角調整及び、焦点位置調整が自動化されており、測定速度が高速化されると共に、測定再現性が高いという特徴を有している。試作した広角レンズのMTF評価結果を図4に示す。ナイキスト周波数である20lp/mmでのMTFは、画角0度で0.47、画角20度で0.36、画角20度で0.26、画角32度で0.42となっており、軸上から軸外画角にかけて良好なMTFが得られている。

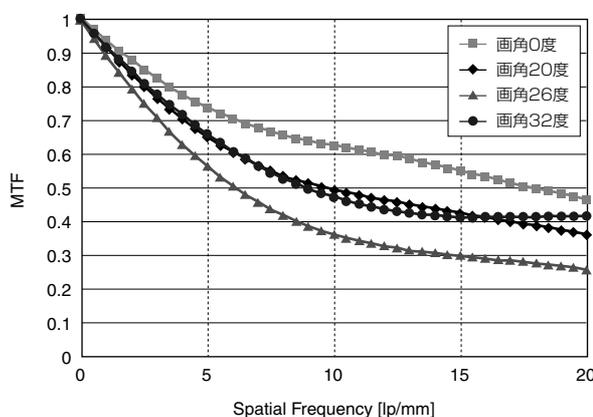


図4 試作したレンズのMTF評価結果

温度分解能に関しては、当社のマスターレンズ (F/1.01) と試作カメラの組み合わせで測定した時のNETD (Noise Equivalent Temperature Difference)*6を100mKと仮定し、マスターレンズとの相対NETDにて評価を行った。図5のような測定系を構築し、差温度黒体炉を用いてテスト

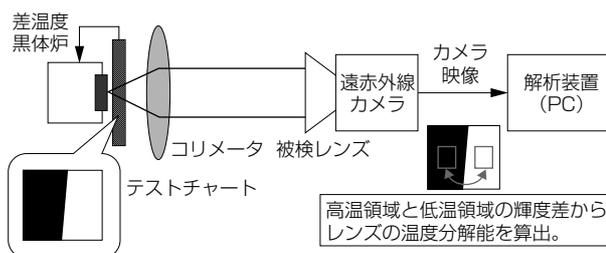
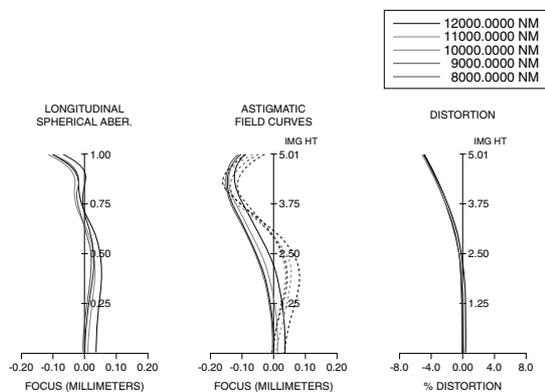


図5 温度分解能の測定系

表3 温度分解能の評価結果

項目	F値	相対NETD (設計値)	相対NETD (実測値)
マスターレンズ	1.01	100	100
試作レンズ	0.94	86.6	83.3

チャートを生成し、被検レンズを取り付けたカメラにて撮影した画像を解析することで相対NETDを算出した。表3に示すように、試作した広角レンズはほぼ設計通りの温度分解能が得られている。

2-2 絶対温度計測可能なカメラ信号処理技術 車外環境と比較すると車室内には発熱体が少ないため、乗員を検知する際には温度情報は非常に有用である。例えば、カメラ映像をもとに乗員の肌温度(30度前半)を正確に計測できれば、乗員検知アルゴリズムにおいて乗員と背景の切り分けを容易に行うことができるため、乗員の検知精度向上が期待される。物体の温度を精度よく計測するカメラとしてはサーモグラフィーなどが市販されているが、非常

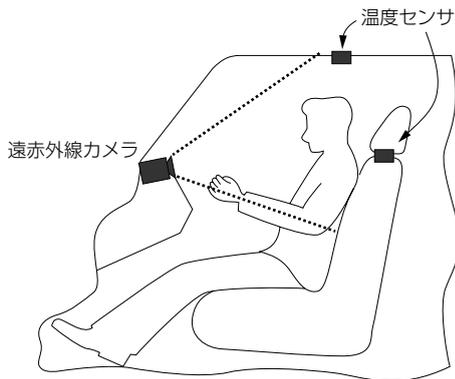


図6 絶対温度計測システム

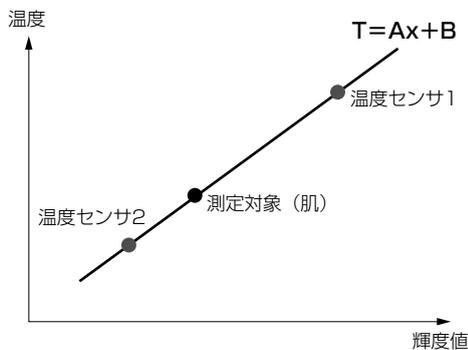


図7 絶対温度の算出方法

に高価であり、車載用途には適さないと考えられる。当社では安価な構成で精度よく物体の絶対温度を計測する技術を開発したので、以下に詳細を報告する。

開発した絶対温度計測システムは、絶対温度を測定可能な温度センサを遠赤外線カメラの撮影視野内に設置し、温度センサの出力(温度データ)をカメラに入力するような構成とした(図6)。ここで、カメラ映像に映っている温度センサ(もしくは温度センサが設置されている物体)の輝度値と温度センサから得られた絶対温度の対応付けを行い、ゲインAとオフセットBを算出する(図7)。本システムでは、測定対象物の輝度値xをもとに、絶対温度Tを算出する($T = Ax + B$)。

試作したカメラの外観を写真3に、信号処理回路のブロック図を図8に示す。信号処理回路では、撮像素子の出力をA/D変換した後、固定パターンノイズ補正や欠陥画素補正等のキャリブレーション処理を行う。続いて、ゲイン制御やオフセット制御等の映像補正処理を行い、映像出力変換処理を経て映像データ(アナログ信号orデジタル信号)をPCやモニターへ出力する。絶対温度算出処理はキャリブレーション処理時に実施しており、映像補正処理時には指定した絶対温度範囲の切り出しなども合わせて行っている。

以上のように温度センサを用いた簡易な構成の下、カメラ映像から算出した温度と実測温度(接触式温度計を使用)とを比較した結果、測定誤差が±1℃以内(+20~40℃



写真3 遠赤外線カメラ外観

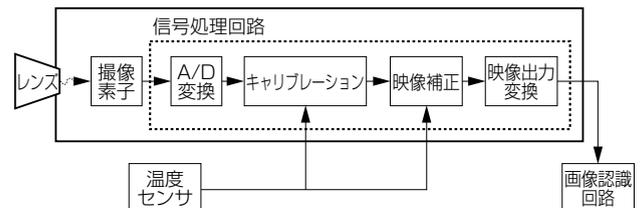


図8 信号処理回路のブロック図



写真4 遠赤外線カメラを用いた絶対温度計測

の範囲内) という非常に高い精度で乗員の肌温度を測定することに成功した。写真4にカメラ画像の一例を示す。

2-3 車室内乗員検知アルゴリズム 今回開発したアルゴリズムでは、2-2節で示した絶対温度計測技術をベースとして遠赤外線カメラ画像中より肌温度相当領域を頭部として検出し、乗員有無、姿勢などの検知を行っている。ここで、単純に温度情報を利用するのみでは以下に示す現象に対応できず、乗員有無検知や姿勢検知に誤りが生じる恐れがあった。

- ・夏のエンジン始動直後など車室内温度が高い場合には、背景と肌との温度差が小さくなるため乗員が背景に同化してしまう
- ・乗員の「手」が頭部近傍に存在する場合には、頭部と手が一体となって検出されるためサイズや位置にずれが生じる
- ・遠赤外線はガラスに反射されるため、乗員側方の窓ガラスに乗員の虚像が生じる

これらの対策として、画像中の輝度エッジを利用して乗員頭部のみを精度よく検出する技術を開発し、高精度な乗員検知を実現したため、以下に詳細を報告する。

開発したアルゴリズムのフローチャートを図9に示す。まず、車室内温度と乗員の肌温度には一定の相関関係が存在することを利用して肌温度範囲を決定し、肌温度に相当する領域のみを検出する。肌温度相当領域には乗員以外に背景物体も含まれている可能性があるため、事前に準備した乗員が映っていない画像（背景画像）と現画像との両方においてエッジ検出処理を行い、エッジの差分を計算することで背景に属する画素を除去する。次に乗員の「頭部」と「手」を分離するため、検出したエッジを用いて肌温度相当領域を複数領域に分割した後、カメラと乗員との幾何学的位置関係に基づいた頭部サイズ条件を満たす分割領域同士を再結合し、頭部のみを検出する。最後に窓に映る虚像対策として、事前に背景エッジ画像中から窓に属するエッジを選択しておき、現時刻のエッジ画像との差分より窓エッジの欠損有無を判定して虚像の除去を行う。具体的には、窓部に存在する領域は①窓方向に身体を傾けた（窓に重なっている）乗員、②ガラスに反射した虚像、のいずれかであるため、窓エッジが欠損している場合のみ虚像と判断して領域の除去を行なう。最後に、検出した頭部位置に基づいて乗員の体格および姿勢を判定し、モニタへの出力を行う。

2-4 検証実験 開発したアルゴリズムによる乗員有無・体格・姿勢検知性能の検証実験を行った。エアコンを用いて車室内温度を+20～40℃の間で変化させた画像に対してアルゴリズムを適用し、表4に示す分類を図った結果、良好な分類性能が得られていることを確認した。写真5にアルゴリズム処理結果の例を示す。

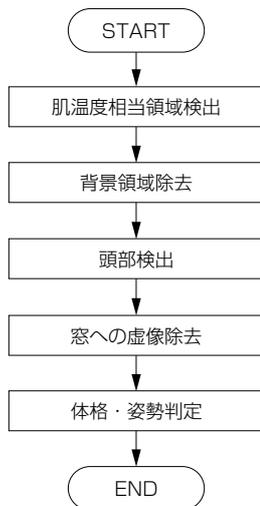


図9 乗員検知アルゴリズムの処理フローチャート

表4 乗員有無・体格・姿勢検知の分類

No.	乗員有無	体格	姿勢
1	無	—	—
2	有	大人	中央
3	有	大人	左寄り
4	有	大人	右寄り
5	有	大人	判定不可
6	有	子供	中央
7	有	子供	左寄り
8	有	子供	右寄り
9	有	子供	判定不可

※ 姿勢の左右はカメラから見た場合の向き



(a) 乗員有・大人・中央



(b) 乗員無



(c) 乗員有・大人・左寄り

写真5 乗員検知アルゴリズムの処理結果

3. 結 言

当社独自の光学材料である焼結 ZnS レンズを用いた遠赤外線カメラを開発し、車室内乗員検知システムにおいて検知性能の評価を行った。高いコントラストを有する広角レンズと安価で簡易な構成で乗員の肌温度を計測できる信号処理回路技術を適用することで、乗員有無・体格・姿勢に関して良好な検知性能を得ることができ、当社の遠赤外線カメラが車室内の乗員検知センサとしても有効であることを確認した。

今後は、①カメラの小型化・低コスト化（低解像度センサによる性能確保）、②他のアプリケーションへの応用検討、などを進める予定である。

用語集

※1 MTF (Modulation Transfer Function)

レンズの解像度の指標。値が高いほど鮮明な画像が得られる。

※2 温度分解能

遠赤外線カメラ（レンズ）がどれだけ小さい温度を検知できるかを表した値で、画像の明暗（コントラスト）の指標として用いられる。

※3 収差

光線がレンズを通過する角度や位置、波長の違いなどが原因で、光束（光線の束）が1点に像を結ばなくなる現象。像のぼけやゆがみ、色のにじみに応じて、球面収差、コマ収差、非点収差、像面湾曲、ディストーション、色収差などに分類される。

※4 非球面

多項式で表される曲面。一般に、複雑な形状変化を実現できるため、各種収差の補正に用いられる。

※5 DOE (Diffractive Optical Elements)

光の回折現象を利用して光線の挙動を制御する光学素子。回折レンズはレンズ表面に同心円状の微細な起伏形状を施すことで形成され、色収差の補正などに用いられる。

※6 NETD (Noise Equivalent Temperature Difference)

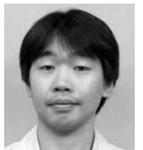
遠赤外線カメラの温度分解能の指標。値が小さいほど、より小さい温度差を検知できる。

参 考 文 献

- (1) U.S. Department of Transportation, National Highway Traffic Safety Administration, "Federal Motor Vehicle Safety Standards (FMVSS) 571.208, Occupant crash protection"
- (2) 齋藤他, 「遠赤外線カメラを用いた夜間歩行者検知システムの開発」, SEIテクニカルレビュー第169号、(2006)
- (3) S. Saito et al., "Development of Pedestrian Detection System Using Far-Infrared Ray Camera," SEI Technical Review, No.66、(April, 2008)
- (4) M. Hasegawa et al., "Optical Characteristics of an Infrared Translucent Close-Packed ZnS Sintered Body," SEI Technical Review, No.54、(June, 2002)

執 筆 者

泉 達也* : 自動車技術研究所
車載安全システム向け機器の研究開発に従事



齋藤 裕昭 : 自動車技術研究所
萩原 剛志 : 自動車技術研究所 主査
畑中 健一 : 自動車技術研究所 グループ長
澤井 孝典 : 自動車技術研究所長

*主執筆