

80×60画素サーマルダイオード 赤外線センサ“MeIDIRシリーズ”

高橋貴紀*
Yoshinori Takahashi
前川倫宏*
Tomohiro Maegawa

80x60 Pixels Thermal Diode Infrared Sensor "MeIDIR Series"

要 旨

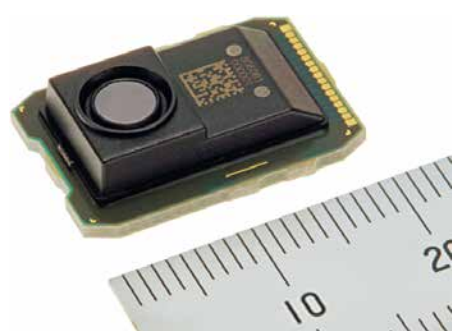
波長380nm(青)～780nm(赤)の可視光よりも波長の長い領域の光を赤外線と呼ぶ。中でも8～14μmの赤外線は、LWIR(Long-Wavelength InfraRed)と呼ばれており被写体温度の判別が可能で、可視光や微粒子による影響を受けにくい特長を生かし、単画素の人体センサから、高画素の監視カメラ用途まで幅広い用途で活用されている。

三菱電機では2019年に一般民生用向けに当社独自のサーマルダイオード方式の赤外線センサモジュール“MeIDIRシリーズ”の機種“MIR8032B1”を開発した。市場で一般的に採用されている16×16画素のサーモパイル方式の赤外線センサと比べて約10倍(80×32)の高画素化と5倍の温

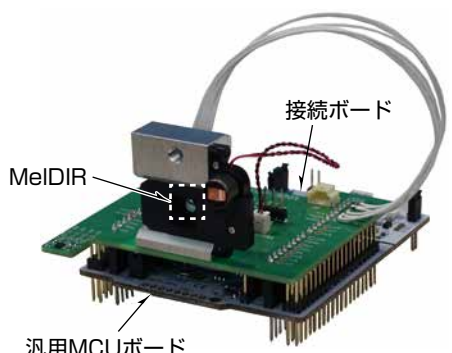
度分解能(100mK)を実現し、当社ルームエアコン“霧ヶ峰”の“ムーブアイ mirA.I.+ (ミライプラス)”を始め、その他人体の表面温度測定等の製品にも搭載されている。

今回、“より広い範囲で高精度で人・物の識別や行動把握を行いたい”という防犯、見守り、スマートビルなどの市場からの新たな要請に対応するため、センササイズを変えることなく80×60画素に拡大したセンサモジュール“MIR8060B1”を開発してラインアップを追加した。

また赤外線センサモジュールとともに、顧客側の評価・開発を支援するユーザーサポートツールを提供している。



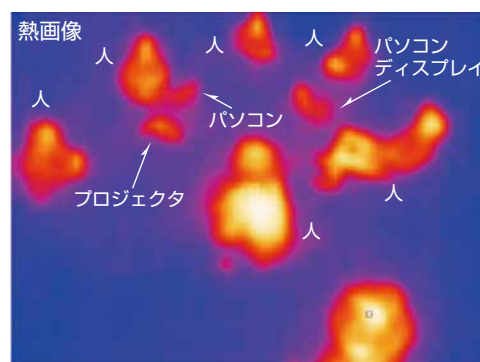
MIR8060B1



MeIDIR評価キット



可視画像



熱画像

撮像イメージ

MCU : Micro Controller Unit

赤外線センサモジュール“MIR8060B1”の撮像イメージ

左上は赤外線センサモジュールMIR8060B1の外観を示す。左下はMeIDIRシリーズで提供するユーザーサポートツールの一つMeIDIR評価キットである。右下はMIR8060B1を使用して会議の様子を撮像した熱画像であり、熱源である人、パソコン、ディスプレイ、プロジェクタが識別可能であることが分かる。

1. ま え が き

当社は2019年に一般民生用向けに当社独自のサーマルダイオード方式の赤外線センサモジュールMeiDIRシリーズの機種MIR8032B1を開発した。市場で一般的に採用されている16×16画素のサーモパイル方式の赤外線センサと比べて約10倍(80×32)の高画素化と5倍の温度分解能(100mK)を実現した。

本稿では、MeiDIRシリーズの技術的な特長と、新たに画素数を80×60画素に拡大したMeiDIRシリーズの新機種であるMIR8060B1の特長について述べる。

2. サーマルダイオード赤外線センサ

2.1 赤外線の種類

絶対温度0 K以上の全ての物体は電磁波を放射する性質を持っており、黒体(全ての波長の放射を吸収するような物体)に対する波長当たりの放射量(放射発散度)は次の式で表される(プランクの放射則)。

$$M(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5} \left[\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]^{-1} \left(\frac{W}{(\mu m \cdot m^2)} \right)$$

$$C_1 = 3.74 \times 10^8 (W \cdot \frac{\mu m^4}{m^2})$$

$$C_2 = 1.44 \times 10^4 (\mu m \cdot K)$$

λ : 波長, T : 絶対温度(K), C_1, C_2 : 放射定数

図1に波長に対する黒体温度ごとの電磁波の放射量を示す。LWIRは低温から放射され300K付近の常温域でピークを迎えるのに対して、可視光は現実的な人間活動の温度領域ではほとんど放射されない。

実際の物体の電磁波の放射量は物体の種類や表面状態によって異なる。黒体と比べた物体の放射量の割合は、例えば人体であれば0.98程度であるのに対して、研磨したアル

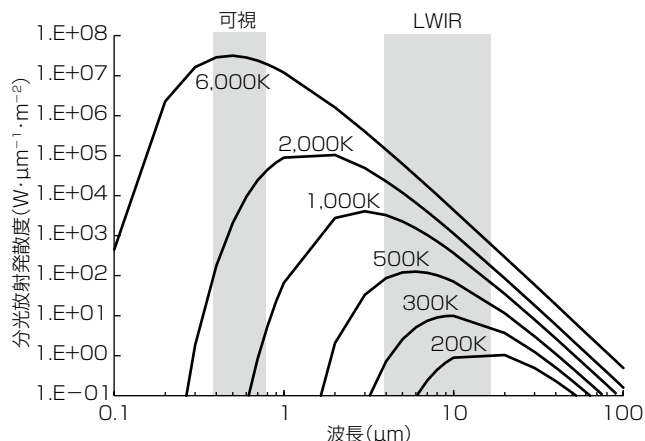


図1. 黒体からの分光放射発散度

ミニウムだと0.04程度になる。また、電磁波は大気中で水蒸気や二酸化炭素によって吸収される性質があるが、波長がLWIRの領域は吸収が少なく、“大気の窓”と呼ばれて遠方の熱源の検出に特に優れた特性を持っている。さらに赤外線は可視光との波長の差が大きいため、その影響を受けにくく、波長が長いと可視光と比べて散乱しにくい性質を持っている。

このような性質から赤外線は簡単な熱源検知から、長距離の温度分布測定やリモートセンシングまで幅広い用途で利用されている。

2.2 赤外線センサ

赤外線センサとは、受光した赤外線を電気信号に変換して非接触で物体の熱を検知するサーマルセンサである。赤外線センサは①暗視が可能②外乱光の影響を受けにくい③散乱の影響を受けにくい(例：煙が充満した状況でも対象の識別が可能)という特長がある。また、画像化しても可視光線に対して感度を持たず、人体の認識は可能であるが個人認識まではできないためにプライバシー保護が必要な用途にも適している。図2に赤外線画像(熱画像)例を可視画像との比較で示す。

赤外線センサは検知方式から大きく量子型と熱型に分類される。量子型は一般的な可視光センサと同様に光電効果によって発生する電荷を検出する方式であり、感度は高いが熱雑音の影響を低減するために冷却装置を必要とし、利用分野が限定される。熱型は赤外線を検知部が吸収した結果生じる温度変化を電気信号に変換する方式で、量子型と比べて感度は低いですが冷却が不要で幅広い用途に活用されている。

一般的に広く使われている熱型赤外線センサは、温度変化の検出方法が異なる、焦電センサ方式、サーモパイル方式、ボロメータ方式の3方式が主流であった。



図2. 赤外線センサの特長

焦電センサ方式は強誘電体の分極変化を検出する方式で、温度変化に対して起電力が発生するために静止した物体の検知に不向きであり、製造方法から多画素化には不向きであるが、消費エネルギーが小さく製造コストも安いという利点があり、簡単な人感センサなどに利用されている。

サーモパイル方式は異種金属を接合した熱電対を温度検知部に利用する方式で、一つの熱電対の感度が低い実用的な感度を得るために一つの画素を多数の直列接続された熱電対で構成する。そのため画素サイズが大きくなり、画素数増加に伴って急激に価格が高くなる傾向があるが、省電力で校正が容易なため比較的画素数の少ないセンサに利用されている。

ボロメータ方式は抵抗の温度による抵抗値の変化を利用する方式で、半導体製造工程と相性が良く、抵抗体の熱電変換効率が優れているため感度が高いという利点がある。しかし、熱電変換の特性が非線形なため、受光面内の画素ごとの出力特性を一定にするための補正処理が必要で、補正演算や補正值を記憶するために規模の大きな半導体素子が必要になる。また補正值の取得のための調整・検査コストが大きいこともあってセンサ価格が高価になる傾向がある。

2.3 サーマルダイオード方式

当社ではこれまでの赤外線センサと異なり、ダイオードを温度検知部とする独自のサーマルダイオード方式を開発した。サーマルダイオード方式は一般的なシリコン半導体製造工程で形成されるPN接合ダイオードを使用することが特徴で、ボロメータ方式と同様に半導体工程との相性が良く高感度を得やすく多画素化が容易な方式である。温度検知部のダイオードは順方向に一定電流で駆動し、温度変化による電圧変動を検出することで熱電変換を行っている。

ダイオードの順方向電圧は温度に対して線形に変化する特性を持つため補正が容易で、その電圧特性は半導体工程の注入条件等で決まるため、ばらつきが少なく同一チップ内の画素の均一性が高いという特長を持つ。

の赤外線センサモジュールとしてMelDIRシリーズ(以下“MelDIR”という。)を開発した。

3.1 MelDIRの高感度化技術

熱型赤外線センサは温度検知部の温度変化を熱電変換するため、温度検知部と周辺環境との間の熱コンダクタンスが高いと検知感度が低下する。また、周辺画素との間の熱コンダクタンスが高いと画素で検出した熱が周辺画素に伝わるために空間分解能が低下する。そのためMelDIRでは画素であるダイオードと画素を形成する母材であるシリコン基板との間を中空化し、ダイオードを支持脚で保持する構造を形成し、この支持脚の中に配線を通すことでシリコン基板との間の熱コンダクタンスを下げつつ、構造維持と電気的な接続を実現している。この支持脚構造は温度検知部のダイオード構造と周辺の読み出し回路をシリコン半導体製造工程で形成後ドライエッチングを行うことで形成しており、低コストで製造できる。図4にMelDIRの温度検知部の拡大写真を示す。25μmピッチの温度検知部が支持脚構造によって保持される中空構造が均一に形成できていることが確認できる。

温度検知部は中空構造形成するとともに真空状態にすることで更に感度を高くできる。MelDIRは3.3節に述べるチップスケールパッケージ技術を併用することで高感度を実現している。

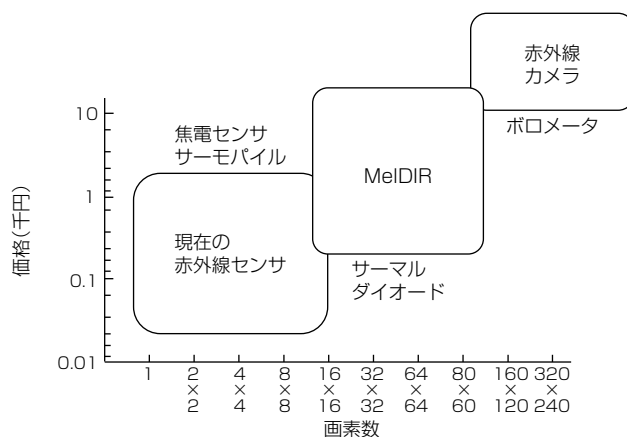


図3. 赤外線センサの要求価格と画素数

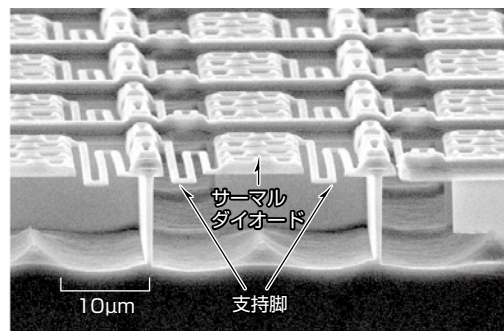


図4. MelDIRの温度検知部の拡大写真

3. 赤外線センサモジュールMelDIRシリーズ

従来の赤外線センサ市場は低画素・低価格の熱検知用途の製品と、高画素・高価格の赤外線イメージング用途の赤外線カメラに2極化していた。より高度な熱源の状態の把握が可能で低価格な製品に対する市場からの要求は以前からあったが、従来のセンサ技術の制約から高画素かつ低価格なセンサを提供できなかった。

当社は独自のサーマルダイオード方式のセンサ素子を使用し、図3に示すように従来なかった画素数と価格帯

3.2 チップスケールパッケージ技術

高感度化のため温度検知部周辺を真空状態で維持するためには、赤外線を透過しつつ真空状態で封止するパッケージ技術が必要である。従来はセラミックパッケージ上にセンサチップを実装し、赤外線を透過する窓材を真空環境下でセラミックパッケージ上に張り合わせることで真空状態を形成していた。このパッケージ方法だと部品点数と工程数が増加し、またチップごとの処理のために生産性も低く高コストになる。

MeIDIRは上記課題を解決するため、図5に示すようにセンサチップ上に封止枠を形成してチップ上に直接窓部材で封止するチップスケールパッケージを開発した。この技術によってMeIDIRは従来パッケージと比べて体積比で15%まで小型化を実現し、同時に製造コストの低減を実現している。

3.3 モジュール技術

赤外線センサは赤外線を検知するセンサ素子以外に、遠方から放射された赤外線を温度検知部に集光する光学系と、センサ素子を駆動する制御機能、温度検知部から熱電変換されて出力された電圧をデジタル信号に変換する機能を必要とする。

MeIDIRはこれらの機能に加えて、センサ画素ごとの感度ばらつきを補正する感度補正機能と、モジュール基板温度を監視するための温度計測機能、外部MCUとの間のデータ通信を少ない端子数で実現するSPI(Serial Peripheral Interface)通信機能を内蔵している。それによってユーザーは3.3V電源、センサリセット電圧、SPI通信の3端子を接続するだけで簡単に赤外線画像を取得できる。

図6にMeIDIRのモジュール構成のブロック図を示す。モジュールは赤外線をセンサ温度検知部に集光するシリコンレンズ、赤外線を検知するセンサ素子、基板の温度を計測するサーミスタと、センサの制御・信号処理・MCU通信機能を内蔵したASIC(専用集積回路)で構成されている。ASIC内には主要な制御機能とともに、出荷時に各種パラメータを記憶させるOTP ROM(One Time Programmable Read Only Memory)を内蔵しており、出荷時に各

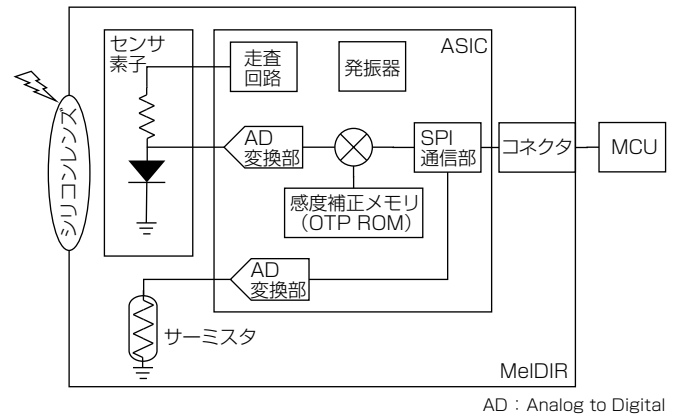


図6. MeIDIRのモジュール構成のブロック図

モジュール固有の情報を記憶させることができる。

図7にMeIDIRのモジュールの外観を示す。サーマルダイオードセンサとMeIDIR用に開発されたASICはシリコンレンズを実装したレンズキャップ内部に実装されている。センサ裏面に基板温度計測を行うサーミスタやセンサ外部との信号のやり取りを行うためのコネクタ、その他表面実装部品が実装されている。

MeIDIRには画素ごとの感度ばらつきを補正する感度補正機能を内蔵している。センサの感度はダイオードの出来映えのばらつきとレンズの集光特性による光学系の利得分布によって画素ごとに異なる特性を持つ。サーマルダイオード方式のセンサは線形な熱電変換特性を持つため各画素の感度補正係数を求めることが容易で、補正処理もASICに内蔵された乗算回路だけで可能である。

図8は全面が40℃の熱源と25℃の熱源を測定した際の

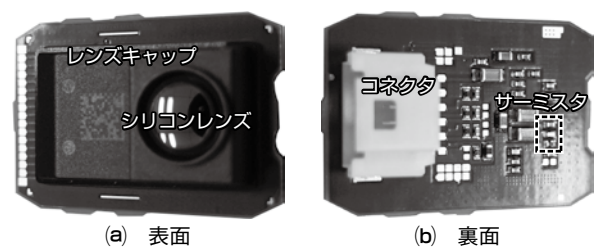


図7. MeIDIRのモジュール

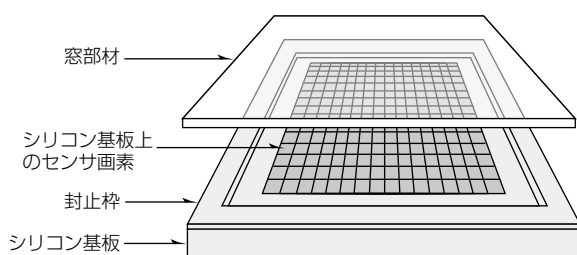


図5. チップスケールパッケージの構造図

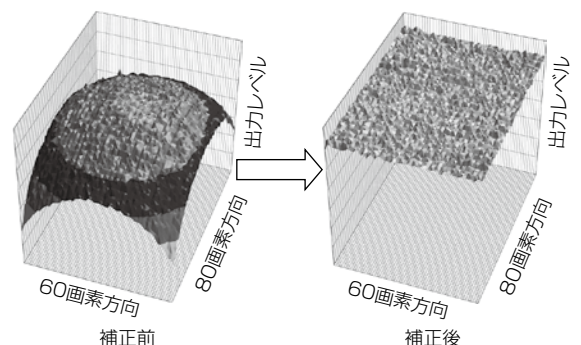


図8. 全面一定温度の熱画像の感度補正前後の特性

感度補正前後の出力レベル差の分布を示す。感度補正前は、レンズの集光特性や個々の画素の出来映えの差によるばらつきがあるが、補正後は一様な出力特性が得られており、補正の結果面内の感度が一定になっていることが確認できる。

4. MIR8060B1

4.1 MIR8060B1の特長

2019年MelDIRシリーズの最初の機種としてMIR8032B1の販売を開始し、空調や体表面温度測定などの用途に適用されている。2021年に新たにMIR8032B1からモジュールサイズ、形状をそのままに画素数と画角を拡大するとともに、従来の4fps(frames per second)のフレームレートに加えて8fpsへの切替え機能を追加し、速く動く熱源の検知に対応した機種MIR8060B1を開発した。表1にMelDIRの主要諸元を示す。

MIR8060B1はMIR8032B1と比べて画角で約1.8倍、画素数で約1.9倍拡大されており、MIR8032B1と同等の空間分解能で検知できる面積を2～4倍に拡大した(図9)。この広画角化と高画素化によって、広範囲での熱源の識別と行動把握検知を可能にした。

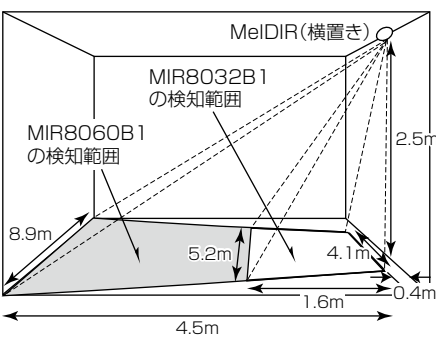
図10に一般的なオフィスの天井(約2.5m)に設置して廊下を撮影した可視画像及びMIR8032B1とMIR8060B1で撮影した熱画像の画角による比較を示す。

MIR8032B1の画角では廊下の端の人が画角から外れるため、はっきりと認識できていないがMIR8060B1では空間分解能を下げずに広角化を行っているため端の人まではっきり認識できていることが分かる。

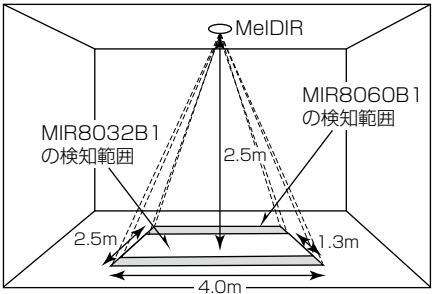
4.2 ユーザーサポートツール

MelDIRはMIR8032B1の発売開始から、顧客による評価・開発をサポートするためのユーザーサポートツールを拡充してきている。新たに発売するMIR8060B1も発売と同時にこれらのツールを提供する。

ユーザーサポートツールは各用途での適用提案などの資料や製品評価が可能な評価キット(図11)、顧客の製品開



(a) 検知範囲が4倍の設置例



(b) 検知範囲が2倍の設置例

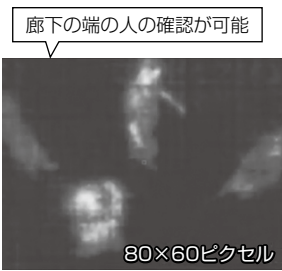
図9. MelDIRの設置条件による検知範囲の比較



(a) 可視画像



(b) MIR8032B1の熱画像(画角: 78×29°)



(c) MIR8060B1の熱画像(画角: 78×53°)

図10. MelDIRで撮影した熱画像の画角による比較

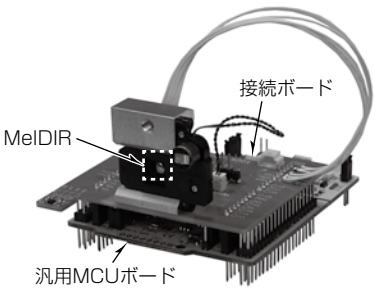


図11. MelDIR評価キット

発で行われるソフトウェア／ハードウェア設計をサポートするためのリファレンスコード、リファレンスデザインを提供することで、顧客の製品開発期間の短縮に貢献する。

5. む す び

当社は従来の赤外線センサが提供できなかった市場に向けて赤外線センサモジュールMelDIRシリーズを開発した。2019年に販売を開始した80×32画素のMIR8032B1に加えて、2021年新たにセンササイズを変更することなく画素数を80×60画素として画角を拡大するとともに、フレームレートを従来の4fpsに加えて8fpsの切替えを可能にしたMIR8060B1を開発して製品ラインアップを強化した。従来採用されていた空調と体表面温度測定分野に加えて、より広い画角と動く熱源の検知性能を生かして防犯、見守り、人数カウント、スマートビルなどの新たな適用分野で用途を拡大して社会に貢献していく。

表1. MelDIRシリーズの主要諸元

型名	MIR8060B1	MIR8032B1
モジュールサイズ	19.5×13.5×9.5(mm)	
画素数	80×60	80×32
画角	78×53(°)	78×29(°)
フレームレート	4／8fps	4fps
消費電流	50mA	