

技術白書

サーマルカメラ

(熱画像カメラ)

2025年9月

Contents

1. 序論

- 1.1. 映像セキュリティ市場におけるサーマルカメラの役割
- 1.2. 本書で扱う内容

2. サーマルセンサーの理解

- 2.1. 赤外線スペクトルと赤外線センサー
- 2.2. サーマルセンサーとそれを用いた映像処理
- 2.3. サーマルカメラの性能指標：NETD
- 2.4. サーマルセンサー理解のための仕様用語

3. HanwhaVision のサーマルカメラソリューションの種類と特徴

- 3.1. サーマルカメラの分類
- 3.2. サーマルカメラの主要特徴

4. サーマルカメラの設置および運用時の考慮事項

- 4.1. 設置環境に応じた一般的な考慮事項
- 4.2. 関心領域（ROI）の設定
- 4.3. 放射率（Emissivity）
- 4.4. 撮影角度
- 4.5. 温度精度に影響を与える要因

5. 参考文献

1. 序論

1.1. 映像セキュリティ市場におけるサーマルカメラの役割

世界中のあらゆるカメラは、人間の目で見えるレベル、あるいはそれを超える性能を実現するために、絶えず進化を遂げてきた。映像セキュリティ市場におけるカメラも、その目的の特殊性から、人間の目よりも「より遠く」「より詳細に」見ることを目指して発展を重ねてきた。近年では、さまざまな環境や条件下で継続的に映像監視を行うことに加え、AI 技術を取り入れた映像解析によって、ユーザーにより効果的で意味のある情報を提供する技術が市場をリードしている。

さらに、可視光カメラによるモニタリングが困難な環境で、長年にわたり主に軍事および特殊用途で利用されてきたサーマルカメラ（熱画像カメラ）も、ここ数年で一般的な映像セキュリティ市場において確固たる地位を築きつつある。半導体技術および MEMS 技術の進歩により、2000 年代以降、熱画像技術は急速に発展し、従来の可視光センサーや映像処理技術の進化では克服できなかった課題を補うことが可能になった。

映像セキュリティ市場の継続的な成長に加え、産業オートメーション需要の拡大、そして COVID19 のような時代的要因を経て、サーマルカメラへの需要は今後も持続的に拡大していくと予測されている。

1.2. 本書で扱う内容

本ホワイトペーパーでは、赤外線および赤外線センサーを用いた熱画像処理の原理をもとに、熱画像の測定と解析を通じて、映像セキュリティ市場においてサーマルカメラ（熱画像カメラ）がどのように活用できるのかを考察する。また、サーマルカメラをより効果的に運用するための方法についても取り上げる。

本書の構成は、以下の 3 つの大きなパートで構成されている。

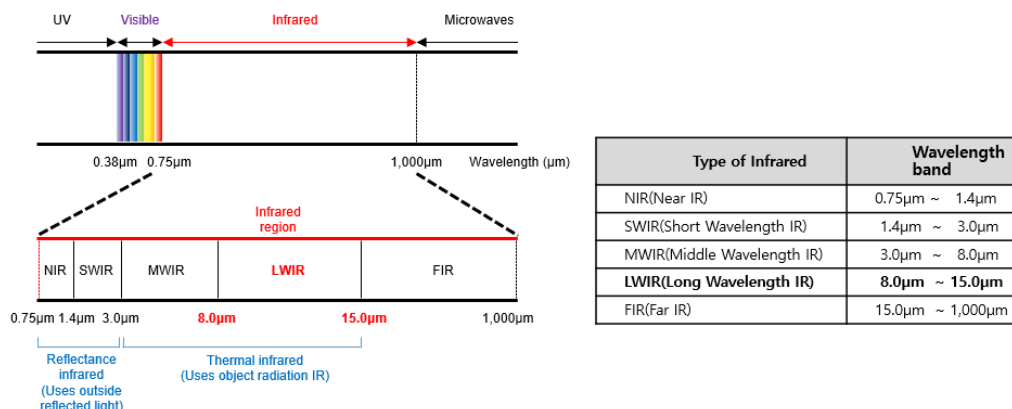
- ① 熱画像センサーの理解
- ② Hanwha Vision サーマルカメラソリューションの種類と特徴
- ③ サーマルカメラの設置および運用時に考慮すべき事項

2. サーマルセンサーの理解

2.1. 赤外線スペクトルと赤外線センサー

電磁波スペクトルにおける赤外線（IR, Infrared）の領域は、図 1 に示すように波長 0.75 μm から 1,000 μm に相当する。赤外線は波長によって特性が異なるため、近赤外線（NIR, Near Infrared）、短波赤外線（SWIR, Short Wavelength IR）、中波赤外線（MWIR, Middle Wavelength IR）、長波赤外線（LWIR, Long Wavelength IR）、遠赤外線（FIR, Far IR）と細分化される。これらの分類基準は、国際標準化機構（ISO, International Organization for Standardization）や国際照明委員会（CIE, International Commission on Illumination）などの機関によって異なるが、一般的には図 1 のような基準が用いられる。

また、NIR および SWIR 領域の赤外線を用いたアプリケーションでは、主に被写体から反射された光を利用するため、これらを反射赤外線（Reflected IR）と呼ぶ。一方、MWIR および LWIR 領域の赤外線を利用するアプリケーションでは、被写体から放射される赤外線を利用するため、これらは熱赤外線（Thermal IR）とも呼ばれる



[図 1. 電磁波スペクトルにおける赤外線の領域]

下の図 2 は、可視光と赤外線を用いて得られた被写体映像の違いを示している。NIR（近赤外）および SWIR（短波赤外）は、可視光と同様に被写体から反射された光を利用して映像を取得するため、その映像は可視光映像とよく似た見た目になる。一方、MWIR（中波赤外）および LWIR（長波赤外）は、被写体（ここでは皮膚表面）から放射される赤外線を利用するため、可視光映像とは異なる特徴を示す。（出典：Shuowen Hu ほか, 2017）



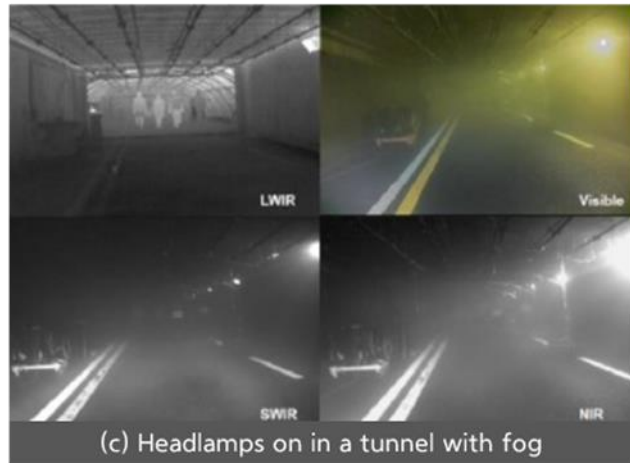
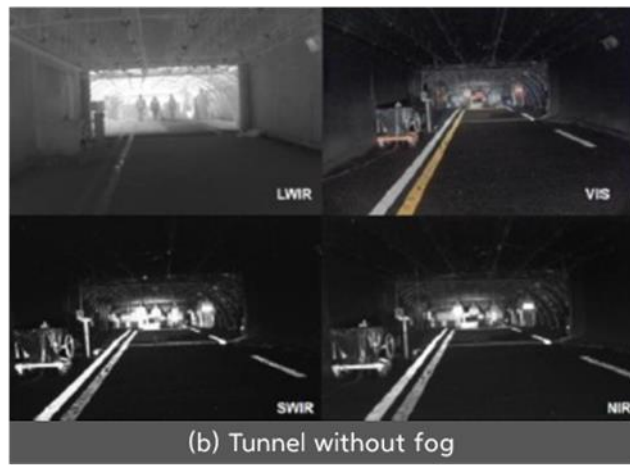
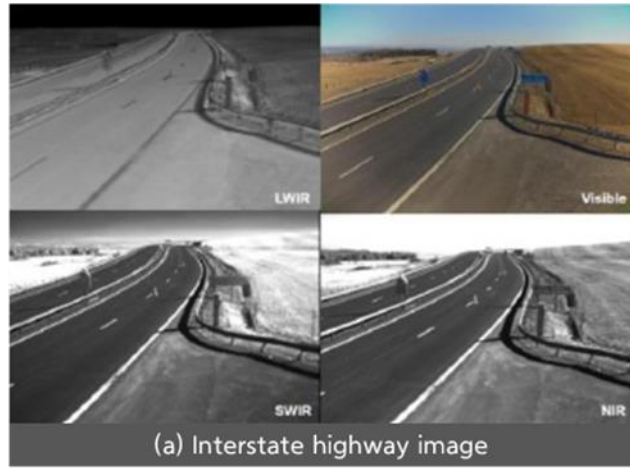
[図 2. 可視光と赤外線を用いた被写体映像の比較]

SWIR カメラは、可視光映像と同様に被写体から反射された光を利用して映像を取得する。近年では、InGaAs 半導体材料を用いた非冷却方式のセンサーの生産が可能となり、センサーのコストは低下することが予想されるが、それでも MWIR や LWIR センサーに比べると高価である。SWIR カメラは、昼間や星明かりのある夜間でも映像を取得でき、ガラスや雲を透過して映像を取得できるという利点がある。SWIR カメラは、農産物の識別・分類、電子基板の検査、太陽電池の検査、偽造防止などの分野で利用されている。

MWIR カメラは、LWIR カメラと同様に被写体から放射される赤外線を利用して映像を取得する。MWIR は SWIR に比べて大気中での散乱が少ないため、煙、粉塵、霧などの影響を受けにくい。MWIR カメラは、軍事用途に加え、メタン、プロパン、エタノール、六フッ化硫黄などの特定ガスの検出にも用いられる。

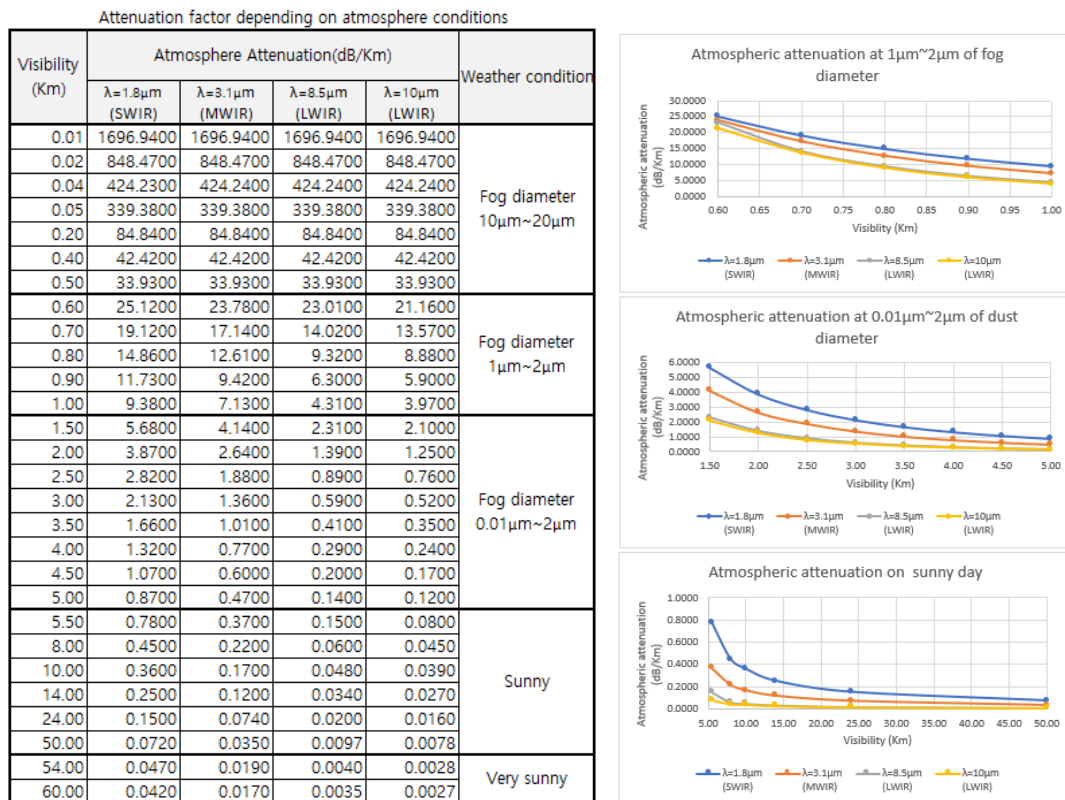
LWIR カメラも MWIR カメラと同様に被写体から放射される赤外線を利用して映像を取得する。LWIR カメラは、映像セキュリティ機器で最も一般的に使用されている。その理由は、酸化バナジウム (VO_x, VanadiumOxide) やアモルファスシリコン (a-si, AmorphousSilicon) などの熱型 (thermal) 材料を用いた MEMS 製造プロセス技術の発展と、非冷却方式センサーの商用化により、他の赤外線センサーに比べて価格が安価になったことに加え、煙・霧・粉塵・雨・低照度など、可視光カメラが動作上制約を受ける環境でも優れた性能を発揮するためである。

下の図 3 は、さまざまな条件下で可視光、NIR、SWIR、LWIR を用いて取得した映像を比較したものである。昼間の条件 (図 a) では、可視光、NIR、SWIR 映像が LWIR 映像よりも優れている。しかし、暗いトンネル (図 b) や濃霧で車両の強いヘッドライトがある状況 (図 c) では、LWIR 映像が最も優れていることがわかる。図 b のように完全に暗い環境で歩行者を検知できるのは LWIR カメラのみである。また、図 c のように濃霧の中で車両の前照灯が点灯していても、歩行者を見逃さず確認できるのも LWIR カメラによるものである。(出典：N. Pinchon ほか, 2018)



[図 3. さまざまな条件下での映像比較]

霧、煙、粉塵などが存在する条件下で、LWIR カメラが他の波長帯のカメラよりも優れた特性を示す理由は、以下の表から理解できる。表 1 は、大気条件に応じた波長の減衰率を実験式により求めたものである。霧の粒径が 10 μm ~20 μm と大きい場合、LWIR カメラも他のカメラと同様の減衰特性を示すため、この場合は LWIR カメラを使用しても鮮明な映像を得ることは難しい。しかし、それより小さな霧や粉塵が大気中に存在する条件では、LWIR カメラは影響を受けにくく、他の赤外線カメラに比べて鮮明な映像を取得できる。（チョン・ヨンテク、「赤外線センサーの最新技術動向」、ホンルン科学出版、2014）



[表 1. 大気条件における減衰率]

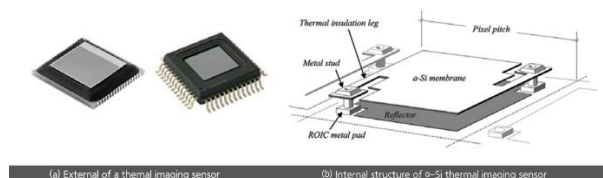
2.2. サーマルセンサーとそれを用いた映像処理

これまでに、赤外線を利用した3種類のカメラ、すなわちSWIRカメラ、MWIRカメラ、LWIRカメラの特徴を確認し、LWIR波長帯が映像セキュリティ用カメラで一般的に使用される理由を理解することができた。以下では、LWIR波長帯の赤外線信号を検知するマイクロボロメータ型熱型（thermal）センサーを「熱画像センサー」、これを搭載したカメラを「熱画像カメラ」と呼称する。

2.2.1 サーマルセンサー

絶対温度 0K（ケルビン）以上の温度を持つすべての物体は、赤外線という形態のエネルギーを放射する。赤外線を測定するということは、物体の放射エネルギーを測定することを意味し、これは物体の温度を測定するのと同じ概念である。赤外線を測定できるセンサーは、半導体材料を用いた量子型（quantum）と、半導体材料以外を用いた熱型（thermal）の2種類に分類できる。ここでは、さまざまな赤外線センサーの中でも、監視目的で主に使用される熱型センサーであるボロメータ（bolometer）センサーについて取り上げる。ボロメータという名称は、ギリシャ語で光線（ray）を意味する「bolo」と、測定することを意味する「meter」が組み合わさったもので、直訳すると「赤外線を測定する装置」という意味を持つ。ボロメータは、赤外線が入射したり温度が変化したりすると、内部の抵抗が変化する性質を利用したセンサーである。そのため、熱画像センサーの性能は、入射する赤外線放射エネルギーによる温度上昇と、温度変化による電気的変化という二段階の伝達プロセスの効率と特性によって決まる。近年では、MEMSプロセス技術の発展により、高解像度を持つマイクロボロメータ（microbolometer）が一般的な熱画像カメラに用いられている。

下の図4は、一般的なマイクロボロメータタイプの熱画像センサーの外観と内部構造を示している。（出典：J.L. Tissot ほか, 2013）

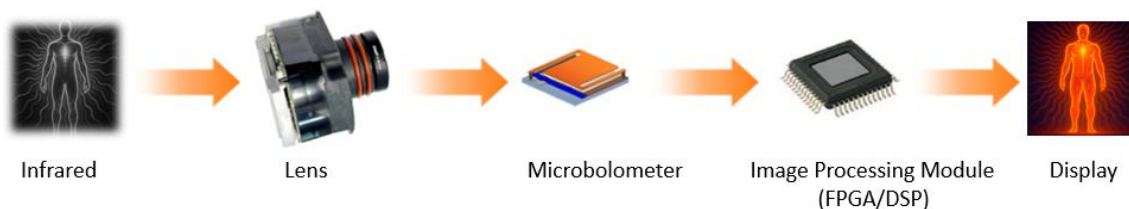


[図4. 熱画像センサーの外観と構造]

ボロメータに赤外線が入射すると、赤外線を吸収して熱的に隔離された（isolated）膜状（membrane）の抵抗体の温度が上昇する。抵抗体の温度変化は吸収された赤外線の量に応じて変化する。フィルファクター（fill factor）は、入射する赤外線を吸収するために使用されるピクセル面積として定義され、一般的にピクセルの約80%程度のフィルファクターを持つ。LWIR赤外線の吸収を強化するために、膜と反射板（reflector）の間に $\lambda/4$ の共振空洞（resonant cavity）が設けられている。ボロメータが周囲温度の影響を受けにくくするため、熱的に隔離された支持脚（thermalisolation leg）は、低い熱伝導率を持つ材料で作られている。支持脚は、FPA（Focal Plane Array、二次元焦点配列）をROIC（Readout Integrated Circuit）と接続する役割と、膜と反射板間の間隔を調整する役割を果たす。ROICはマルチプレクサとしてFPAセンサーと接続され、抵抗変化による各電気出力を読み取り、小さな信号を測定可能な大きな出力電圧に増幅する役割を持つ。

2.2.2 サーマルセンサーを用いたサーマルカメラ

熱画像センサーを用いたカメラの構造は、検出部とハードウェアモジュール部に大きく分けることができる。



[図 5. 熱画像カメラの概略図]

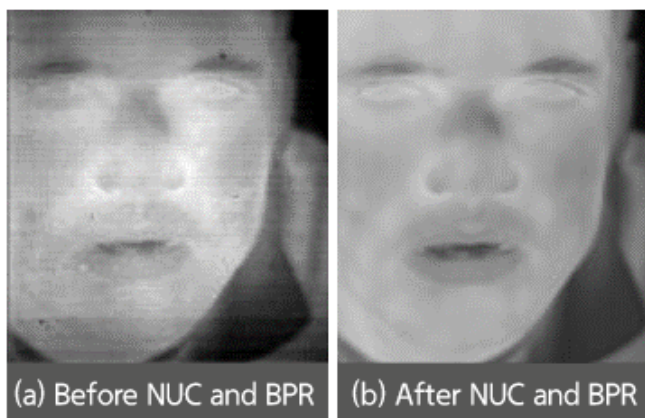
図 5 のように、レンズを通して入射する赤外線は熱画像センサーにより電気信号として出力され、Image Processing Module でさまざまな映像処理技術を通じて熱画像として出力される。

CMOS センサーとは異なり、熱画像センサーで必須となる映像処理の一つに非均一性補正 (NUC, Non-Uniformity Correction) プロセスがある。FPA 構造の熱画像センサーでは、以下の 3 つの要因により非均一性の問題が生じる。

- ① 入射する赤外線に対する各ピクセルの不均一な非線形特性
- ② ピクセル間のゲイン (gain) およびオフセット (offset) 値の不均一な特性
- ③ 時間および設置環境に応じてオフセット値が非線形に変化する特性

これらの問題を解決する方法が NUC プロセスである

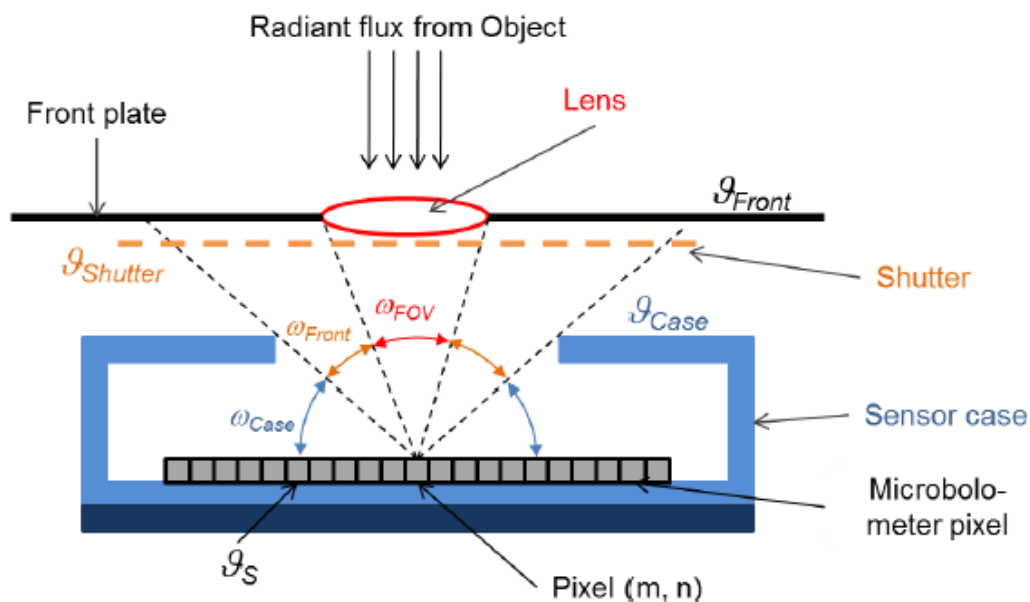
下の図 6 は、NUC 処理前後の映像比較を示し、NUC プロセスの必要性を示すものである。NUC プロセスにより各ピクセル間の偏差が補正されない場合、図(a)のように FPN (Fixed Pattern noise) が現れ、鮮明な映像を得ることができない。NUC プロセス後は、図(b)のように高画質の映像を得ることができる。(出典 : Vladimir I. Ovod ほか)



- ・NUC(Non-Uniformity Correction)
- ・BPR(Bad Pixel Replacement)

図 6. NUC 前後の映像比較]

NUC (NonUniformityCorrection) プロセスを理解するためには、サーマルカメラの検出器部分について理解する必要があります。以下の図 7 は、検出器部分の簡略構造を示しています。



[図 7. 熱画像カメラの検出器構造]

センサーの各ピクセルに入射する赤外線源は、被写体から放射される赤外線、前面ハウジングから放射される赤外線、シャッターから放射される赤外線、センサーを囲むケースから放射される赤外線、そしてセンサー自体から放射される赤外線などがある。被写体による赤外線量のみを測定するためには、次のように行う。

センサーの出力は、センサーに入射する赤外線量とセンサーの温度変化の両方に影響を受ける。そのため、センサーが熱的平衡状態、すなわちセンサー温度が一定の状態を維持すれば、出力は入射する赤外線量のみに応じて変化する。

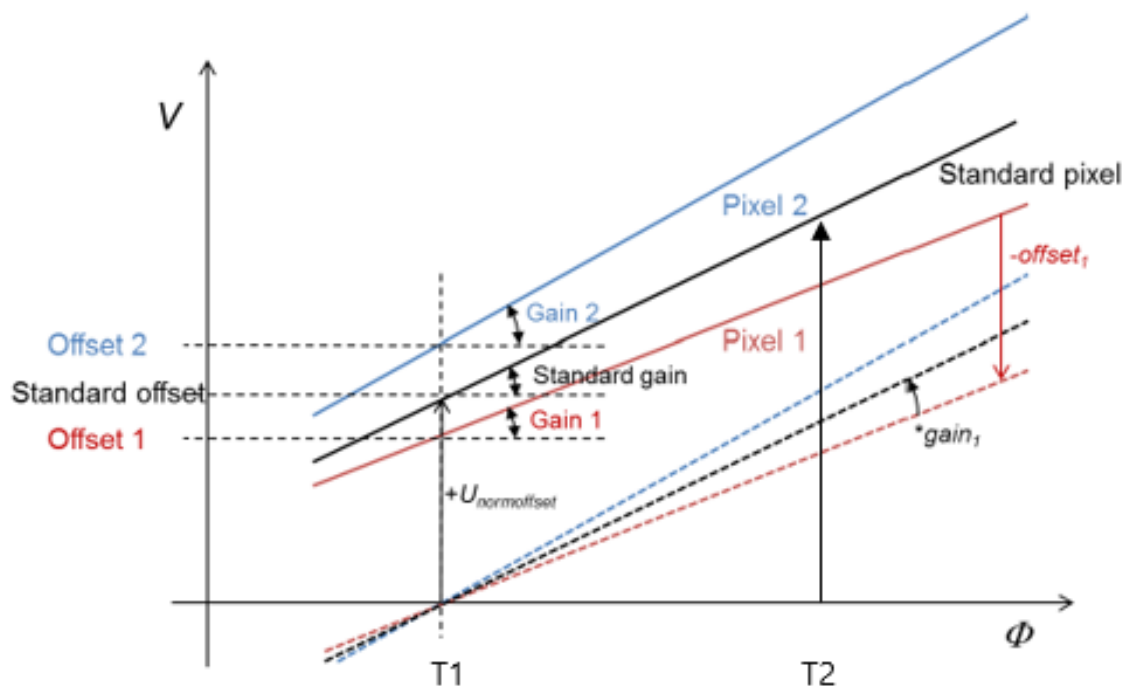
したがって、まずセンサーを熱的平衡状態にする。その後、被写体の温度 T_1 、 T_2 ($T_1 < T_2$) のみを変化させて順に撮影し、各センサーの出力値を測定する。最後に、 T_2 の出力値から T_1 の出力値を差し引くと、その他の赤外線源による影響は打ち消され、被写体による赤外線量のみを測定した結果が得られる。

この方法を用いることで、FPA 構造の熱画像センサーにおける各ピクセル間のばらつきを補正するための 2-Point NUC (利得 Gain とオフセット Offset) を求めることができる

以下の【図 8】は、2つのピクセル（1 および 2）について、標準カーブ（standard curve）の特性に一致するよう、それぞれのゲイン（Gain）とオフセット（Offset）を求める過程を示している。黒体（blackbody）の温度を T_1 、 T_2 に設定した後、すべてのピクセルの平均値を求め、それを標準カーブとして定義する。その後、各ピクセルの個別値がこの標準カーブの特性を持つように、各ピクセルごとにゲインとオフセットを計算によって決定する。

このような過程を通じて、個々にばらつきを持っていたピクセルの出力は、最終的に標準カーブと同じ共通の出力特性を示すようになる。

（出典：H. Budzier and G. Gerlach, 2015）



[図 8. 2-Point NUC におけるゲイン（Gain）とオフセット（Offset）を求める模式図]

2.3. サーマルカメラの性能指標：NETD

2.3.1 NETD の本質

熱画像カメラは、物体が放射する赤外線エネルギーを捉え、目に見えない熱エネルギーを可視化する技術であり、産業、セキュリティ、医療など幅広い分野で不可欠な技術である。この技術の性能を評価する指標のひとつに、雑音等価温度差（NETD, Noise Equivalent Temperature Difference）がある。NETD は熱画像センサーの温度分解能を示す主要な指標であり、カメラが識別可能な最小の温度差を意味する。具体的には、センサーが持つ雑音（Noise）と同等の信号を生成する最小の温度差を指す。NETD 値が小さいほど温度分解能が高く、発生するノイズが少ないことを意味し、より鮮明で詳細な画像を提供できる。

すべての電子システムは必然的にノイズを発生させるため、検出器設計、光学系設計（F ナンバー、透過率）、および信号処理系など、熱画像カメラを構成するすべての要素の複合的な相互作用によって NETD が決まる。

NETD の温度単位はミリケルビン（mK）で表され、1 mK（ミリケルビン）は 1/1000 K に相当する。ケルビンと摂氏（Celsius）の目盛間隔は同じであるため、1 mK は 0.001°C と等しい。たとえば、熱画像センサー自体の物理的な NETD 特性が 20 mK の熱画像カメラは、0.02°C 未満の微細な温度差も識別できることになる。

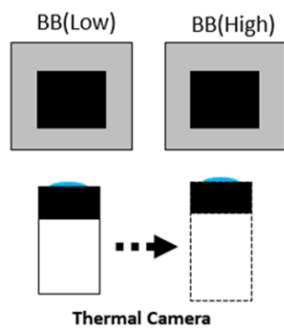
2.3.2 NETD の測定方法

NETD は単に IR デテクター（赤外線検出器）の性能だけを示すものではなく、センサーで発生した信号がカメラの全体システム（レンズ、電子回路、信号処理プロセスなど）を通過する過程で生じるすべての雑音を考慮した最終的な値である。そのため、カメラメーカーは信号処理過程で発生するノイズを効果的に除去し、最終的な NETD 値を低くする技術を適用している。NETD 測定の核心は、黒体から得られる安定した熱信号とカメラシステムで発生するノイズを正確に分離して定量化することである。

データ取得は 50 フレーム以上を連続で取得し、各 20°C および 35°C の黒体の前に整列させた表面の熱画像データを取得して基準信号を得る。各ピクセルについて、全フレームにおける標準偏差を計算しノイズを定量化する。温度応答性（Responsivity）は、各黒体で取得したデータ値の差（ ΔV ）を黒体間の温度差（ ΔT ）で割った値（ $\text{Responsivity} = \Delta V / \Delta T$ ）で求められる。

測定された標準偏差（ σ_{noise} ）を温度応答性（Responsivity）で割ることで最終的な NETD 値を算出する（ $\text{NETD} = \sigma_{\text{noise}} / \text{Responsivity}$ ）。

（基準温度例：25°C、レンズ F ナンバー例：F/1.0 の条件で明示）



Accumulated data frame counts : 50 Frame
 BB 20°C(Cool) data acquisition → Whole pixel average value(Low data)
 BB 35°C(Hot) data acquisition → Whole pixel average value(High data)

- 1) $NETD(mK) = \frac{Noise(mV)}{Responsivity(mV/K)}$
- 2) $Responsivity(mV/K) = \frac{Response(mV)}{\Delta T(K)}$
- 3) $\Delta T(K) = Temp. \text{ difference of } BB$
- 4) $Response(mV) = BBH(data) - BBL(data)$

デジタルノイズ低減（DNR, Digital Noise Reduction）を適用する前後での NETD 値は、約 65%のノイズ差があり、以下のような結果となる。



Before DNR (NETD: approximately 60 mK)



After DNR (NETD: approximately 20 mK)

2.3.3 NETD の限界と実務上の考慮点

NETD は強力な指標であるが、単に低い NETD 値だけを追求することは最適なソリューション選択を妨げる可能性がある。というのも、NETD 値は測定条件によって変化するためである。NETD は測定時の温度、レンズの F 値、積分時間などの条件によって異なる。製造者が提示する NETD 値は特定の基準条件下で測定されたものであり、他の条件では結果が異なる場合がある。

NETD はカメラの純粋な熱感度を示すが、実際にユーザーが微細な温度差を識別できる能力である MRTD (Minimum Resolvable Temperature Difference) とは異なる。MRTD は NETD に加えて、解像度、レンズの品質、画像処理アルゴリズム、さらには観察者の視覚認知能力までが複合的に影響する。低い NETD は良好な MRTD のための必要条件であるが、十分条件ではない。

最適な熱画像カメラのソリューションを選定するには、NETD 値だけでなく、カメラの解像度、レンズ構成、フレームレート、高度な画像処理機能、そして特定アプリケーションへの適合性など、すべての要素を総合的に評価する必要がある。

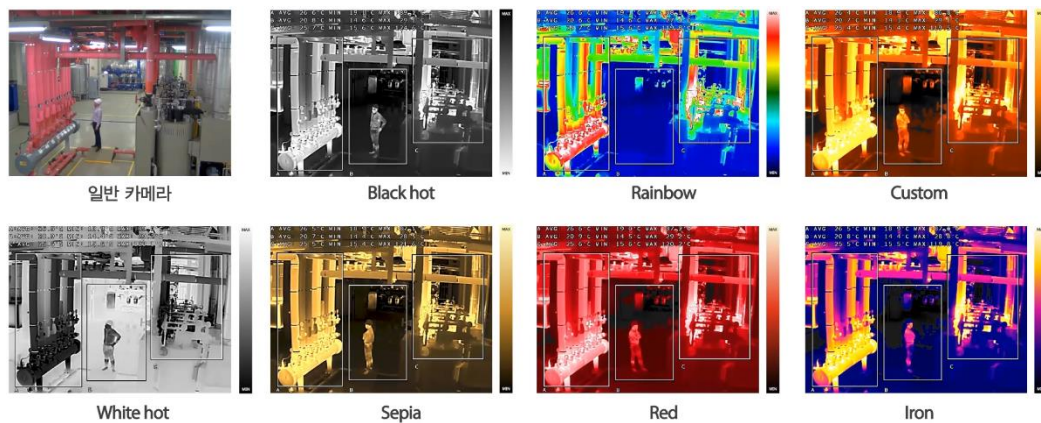
2.4. サーマルセンサー理解のための仕様用語

- ・ ピクセルピッチ(Pixel Pitch): 赤外線カメラの FPA(Focal Plane Array)を構成する各ピクセルの大きさを示す。赤外線カメラに用いられるピクセルピッチは、一般的に 17 μ m または 12 μ m である。
- ・ スペクトル応答(Spectral Response): 入射する電磁波に対して赤外線センサーが反応する波長帯を示す。赤外線カメラでは、主に 8 μ m~14 μ m の波長帯が使用される。
- ・ 解像度(Resolution): 赤外線センサーで変換された画像をどれだけ小さな単位 (ピクセル) に分割できるかを示す指標。監視用途の赤外線カメラでは QVGA(320x240)または VGA(640x480)が一般的で、最近では XGA(1024x768)、SXGA(1280x1024)解像度のカメラも市場に出ている。
- ・ NETD(Noise Equivalent Differential Temperature): NETD と同義。
- ・ NUC (Non-Uniformity Correction): FPA 形式の赤外線センサー内の各ピクセル間の出力特性のばらつきをなくし、同一の出力特性を得られるよう補正すること。通常は 1 点または 2 点の基準を用いた線形補正法が使われ、各ピクセルが同一のゲイン(Gain)とオフセット(Offset)を持つように補正することで高品質な映像を得る。
- ・ 2-Point NUC: 2 つの基準温度を使用してピクセル間のばらつきを補正する NUC 方式。製造工程で 2 つのブラックボディ(blackbody)を用いて実施し、求められた補正值はメモリに保存され、運用時に適用される。
- ・ 1-Point NUC: 1 つの基準温度を用いてピクセル間のばらつきを補正する NUC 方式。基準温度としてレンズ前に設置されたシャッターを使用する。1-Point NUC を実施する際はシャッターを閉じ、シャッター面の温度を基準に各ピクセルのオフセットを補正する。シャッターが閉じている間はシャッター閉鎖直前の映像が出力されるため、連続映像の出力ができない欠点がある。しかし、設置場所の温度変化をリアルタイムで反映することで、高画質な映像を得るためには 1-Point NUC が必要である。
- ・ NUC 周期: 2-Point NUC は製造工程で実施され、得られたゲインとオフセットはメモリに保存されるため一度だけで十分である。1-Point NUC は設置場所の周囲温度変化を反映するため必要があるため、温度変化に応じて随時実施される。周囲温度変化が少ない環境では 1-Point NUC の実施周期を長く設定でき、赤外線カメラの設定メニューで必要に応じて調整可能である。
- ・ デッドピクセル(Dead Pixel): Bad Pixel と呼ばれる。FPA を構成するピクセルのうち、平均的な出力特性と異なる反応を示すピクセルを指す。デッドピクセルの判定基準は製造メーカーにより異なる。FPA 構造を持つ赤外線センサーでは製造上、デッドピクセルが存在することは避けられず、センサー納入時にメーカーはデッドピクセルの座標を仕様書で提供する。赤外線カメラの製造工程では、既知のデッドピクセルは映像処理により正常な赤外線映像として出力される。出

荷後に発生するデッドピクセルについても、1-Point NUC の過程でリアルタイムに監視し、赤外線映像に影響が出ないように処理する。

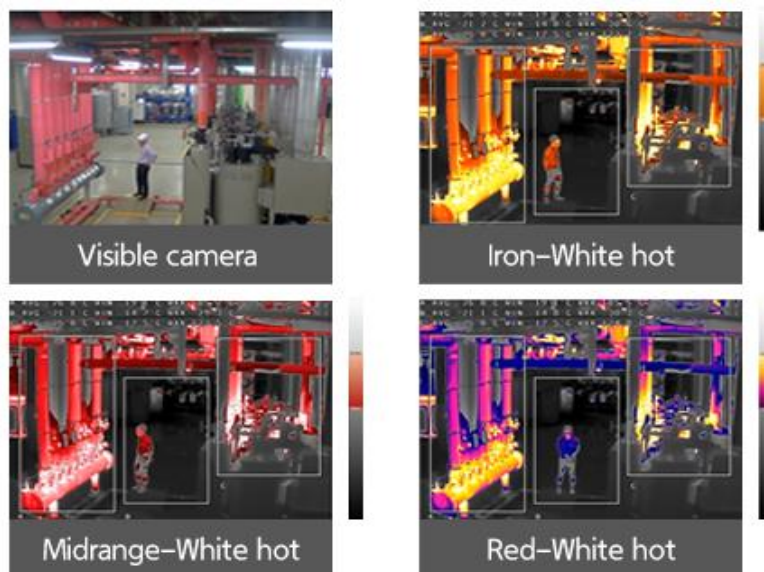
- ・ カラーパレット(Color Palette): 赤外線センサーに入力された物体の赤外線量は内部の画像処理を経て、設定に応じてさまざまな色で表現できる。使用環境に応じて適切なカラーパレットを設定し、最適な監視映像を提供できる。カラーパレットの色や種類は、予告なしに変更または追加される場合がある。

図 9 は、基本的に提供されるカラーパレットモードの種類を示している。



[図 9. 基本カラーパレットモード]

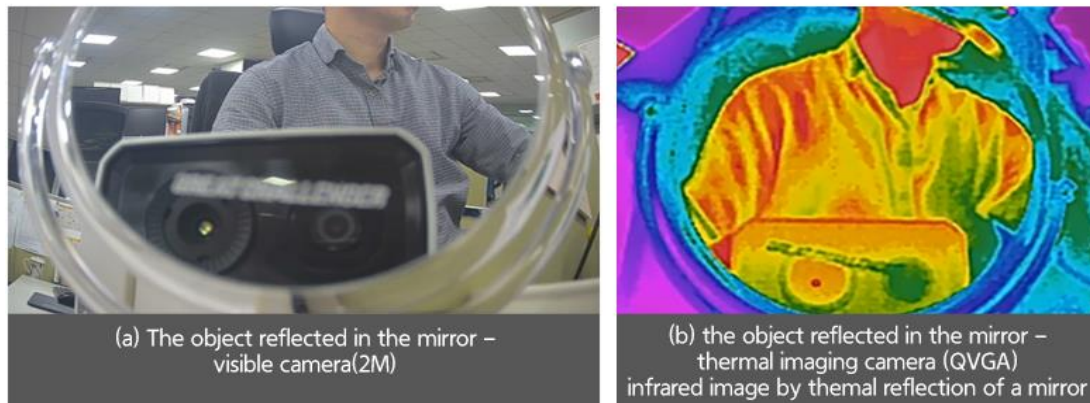
図 10 は、ハイブリッドパレットの設定例を示している。ハイブリッドパレットは、関心のある温度範囲、例えば特定の温度範囲に属する被写体のみ色を付けて強調することで、効率的なモニタリングを行う際に有用な機能である。図 10 のように設定されたハイブリッドパレットの種類に応じて、設定された温度範囲に属する被写体が強調表示されることを確認できる。



[図 10 ハイブリッドパレットモード]

熱反射：ガラス、金属、または滑らかな表面では、周囲の熱源による赤外線放射の反射が容易に起こる。このような熱反射は、赤外線サーモグラフィ画像の解析において注意が必要な要因である。

図 11 は、熱反射によって赤外線サーモグラフィ画像がどのように表れるかを示している。下の図は、画角を同様に調整した後に得られた、鏡に映った被写体の実写画像(a)とサーモグラフィ画像(b)である。(b)に示すように、被写体から発せられた赤外線が鏡で反射されて見ることが確認できる。



[図 11. 熱反射による赤外線サーモグラフィ画像]

実際の熱画像分析において、熱反射によって熱源があると誤解しないよう、常に注意する必要がある。一般的に、鏡（放射率 0.10）のように放射率の低い材料の物体は、熱反射の影響を大きく受ける。そのため、放射率の低い材料を測定する場合は、表面を放射率の高い材料（例：電気用テープ 0.95～0.97）に変更することで、より正確な温度を測定することができる。

- ・ 安定化時間：熱画像センサーの出力は、入射する赤外線の強さだけでなく、センサー自身の温度の影響も受ける。そのため、熱画像カメラは電源投入後、熱画像センサーが熱的平衡状態に達するまで安定化時間が必要である。センサーが熱的平衡状態に達する間、センサーに適した設定値が適用されるように、シャッターによる 1PointNUC は平衡状態時よりも頻繁に実行される。そのため、熱画像センサーが安定化状態に達する前は、温度測定や温度検知の動作が正確でない可能性がある。熱画像カメラが動作する周囲温度条件に応じて安定化時間は変動するが、一般的には約 30 分程度が必要とされる。
- ・ IFoV: [Instantaneous Field of View] の熱画像カメラの空間分解能を示す。FoV は熱画像カメラの光学系の視野角に基づき検出される全体画像範囲を表し、IFoV は熱画像センサーの単一ピクセルが視野(FoV)内で対象を幾何学的に分解または認識できる、温度を検知可能な能力を示す。簡単に定義すると、IFoV は熱画像カメラが特定のレンズ・センサーサイズ・距離条件下で識別できる最小のターゲットサイズである。単位はミリラジアン(milliRadians)で表され、視野角が狭くカメラの解像度が高いほど IFoV 値は小さくなる。IFoV は一般的に以下の 2 つの式で計算される。
- ・ ① $IFoV(mRad) = [pixel\ pitch(mm)] / lens\ focal\ length(mm) \times 1000$
- ・ ② $IFoV(mRad) = FOV(degrees) / Pixel \times (\pi/180) \times 1000$

例えば、ピクセルピッチが 17 μm、焦点距離が 4.4mm の熱画像カメラの場合、IFoV は 3.9 mrad となる。3.9mrad は、距離 1メートルで 1ピクセルが温度を測定できる対象の最小サイズが、辺の長さが 3.9m の正方形であることを意味する。距離が 10メートルになると、最小サイズの正方形は辺の長さが 39 mmとなる。

しかし、これは理論上の最小値であるため、熱画像カメラで温度を測定する場合には、センサーのデッドピクセルや対象周辺での熱反射など、実際の使用時に発生し得る影響を考慮する必要がある。そのため、対象のサイズと検出距離を考慮し、最低でも 3×3 ピクセルを条件としてカメラを選定することが推奨される。

SSR（スポットサイズ比）：熱画像カメラを用いて物体の温度を測定する際には、対象物の大きさと検知距離を考慮する必要がある。理論的には、対象物が熱センサーの 1つのピクセルにマッピングされれば温度測定は可能である。しかし、1つのピクセルの値だけに依存して物体の温度を測定すると誤った判断をする可能性がある。したがって、実際には対象物が 3×3ピクセルにマッピングされる条件で温度を測定する。

$$SSR = \text{検知距離 (m)} \div (\text{IFOV} \times 3)$$

1mの大きさの対象物が、サーマルセンサーの 3×3ピクセルにマッピングされる距離との関係は以下の通りです。

Model classification	QQVGA		Thermal imaging QVGA					
Model name	TNM-C2712TDR	TNM-C2722TDR	TNO-3010T	TNO-3020T	TNO-3030T TNO-L3030T	TNO-3040T	TNO-3050T	TNM-C3620TDR TNM-C3622TDR
Lens focal length(mm)	1.2	1.9	2.7	4.7	13.7	19	35	4.7
Thermal imaging sensor pixel pitch(um)	12	12	12	12	12	12	12	12
IFOV(mRad) ⁽¹⁾	10.000	6.316	4.444	2.553	0.876	0.632	0.343	2.553
SSR	33	53	75	131	381	528	972	131
Horizontal angle (HFOV)(degree)	95	57	92	50	16	11.5	6.3	50
Number of horizontal pixels	160	160	320	320	320	320	320	320
IFOV(mRad) ⁽²⁾	10.363	6.218	5.018	2.727	0.873	0.627	0.344	2.727
SSR	32	54	66	122	382	531	970	122

Model classification	Single-sensor model series (Thermal imaging 384x288)							
Model name	TNO-C3010TRA TNO-C3012TRA	TNO-C3020TRA TNO-C3022TRA	TNO-C3030TRA TNO-C3032TRA	TNO-C3040T TNO-C3042T	TNO-C3050T TNO-C3052T	TNO-C3060T TNO-C3062T	TNO-C3080T TNO-C3082T	
Lens focal length(mm)	4.4	6.6	9.7	13	19	35	60	
Thermal imaging sensor pixel pitch(um)	17	17	17	17	17	17	17	
IFOV(mRad) ⁽¹⁾	3.864	2.576	1.753	1.308	0.895	0.486	0.283	
SSR	86	129	190	33	53	131	528	
Horizontal angle (HFOV)(degree)	90	60	37.9	28.5	19.3	10.7	6.2	
Number of horizontal pixels	384	384	384	384	384	384	384	
IFOV(mRad) ⁽²⁾	4.091	2.727	1.723	1.295	0.877	0.486	0.282	
SSR	81	122	194	32	54	122	531	

Model classification	VGA Model					
Model name	TNO-4030T TNO-4030TR TNO-L4030T TNO-L4030TR	TNO-4040T TNO-4040TR TNO-L4040TR TNO-4041T TNO-4041TR	TNO-4050T TNO-4051T	TNM-C4940TD TNM-C4940TDR TNM-C4942TDR	TNM-C4950TD	TNM-C4960TD
Lens focal length(mm)	13	19	35	9.1	13.5	35
Thermal imaging sensor pixel pitch(um)	17	17	17	12	12	17
IFOV(mRad) ⁽¹⁾	1.308	0.895	0.486	1.319	0.889	0.486
SSR	255	373	686	253	375	686
Horizontal angle (HFOV)(degree)	48.6	32	17.2	50	31.9	17.4
Number of horizontal pixels	640	640	640	640	640	640
IFOV(mRad) ⁽²⁾	1.325	0.873	0.469	1.364	0.870	0.475
SSR	252	382	711	244	383	702

[表 2. サーマグラフィーカメラの SSR 計算値]

(注 1) IFOV(mRad) = [ピクセルピッチ(mm)] / レンズ焦点距離(mm) × 1000、関係式を使用した場合

(注 2) IFOV(mRad) = FOV(度) / 画素数 × (π/180) × 1000、関係式を使用した場合 (デュアルセンサーモデルの SSR)

計算値

例えば、TNO-C3030TRA を使って 1m の大きさの被写体の温度を測定する場合、被写体が 190m 以内であれば温度測定が可能である。この関係を利用すると、もし 2m の被写体の温度を測定したい場合、被写体は 380m 以内にある必要があることがわかる。

ただし、SSR は熱画像カメラを用いた温度測定が理論的に可能な最大距離を示すものであり、環境条件 (大気温度、周囲温度、相対湿度など)、被写体の放射率、カメラの設置角度などによって測定可能距離は変化することを常に考慮する必要がある。

3. HanwhaVisionのサーマルカメラソリューションの種類と特徴

ハンファビジョンでは、さまざまな解像度や形状を持つ多数の熱画像カメラモデルのラインアップを構築し、顧客の目的に応じた熱画像カメラを提供している。図 12 は、現在発売されているハンファビジョンの熱画像カメラの一部モデルの写真である。



[図 12. ハンファビジョン熱画像カメラモデル]

3.1. サーマルカメラの分類

3.1.1 温度検知型モデルと温度表示型モデル

熱画像カメラは一般的に、温度検知型モデルと放射測定カメラモデルとして知られる温度表示型モデルの 2 つの主要なタイプに分けられる。どちらも吸収された赤外線量を測定し、内部で温度に変換するプロセスを経るが、温度検知型モデルでは、ユーザーに測定された温度値を表示せず、関心領域で設定された変化の程度のみを判断して通知する。ユーザーは関心領域の最高、最低、または平均温度を基準にアラーム発生の有無を設定できる。温度表示型モデルは温度検知機能に加え、ユーザーに実際に変換された温度値を表示する点異なる。

		温度表示型モデル	温度感知型モデル
目的		装置（対象）の温度データを利用した状態モニタリング	地域監視 (人／車両の検知および警告)
使用環境		固定された場所・固定された物体	地域監視-動く物体
出力	メイン	温度データ	映像データ
	サブ	映像（温度位置に確認）	解析データ（AI 活用）

[表 3. 熱画像カメラ別の使用目的と環境の比較]

3.1.2 単一センサーモデルとデュアルセンサーモデル

熱画像カメラは、実映像カメラが十分に性能を発揮できない霧・煙・埃・雨・雪・低照度などの条件下で、その弱点を補う役割を果たす。しかし、熱画像カメラの解像度は過去に比べて大幅に向上しているものの、通常の条件下では実映像カメラほど鮮明な映像を得ることはできない。そのため、両方のカメラの利点を活かすことを目的として、1 台のカメラに 2 つのセンサーを搭載したモデルも、映像セキュリティ市場で注目されている。

3.2. サーマルカメラの主要特徴

3.2.1 カメラごとの探知・認識・識別距離 (DRI)

熱画像カメラでは、対象をどれだけ遠くから検知できるかを測定する指標として、検知 (Detection)、認識 (Recognition)、識別 (Identification) の 3 つの段階が用いられる。これを DRI 標準と呼ぶ。DRI (Detection, Recognition, Identification) 標準は 1950 年代に米陸軍によって初めて使用され、以下のように定義されている。

- ・ 検知 (Detection) : 対象を背景と区別できるレベル
- ・ 認識 (Recognition) : 対象の種類 (動物、人間、車両、ボートなど) を分類できるレベル
- ・ 識別 (Identification) : 対象の詳細な区別が可能なレベル (帽子をかぶった男性、犬、ジープなど)

以下の表 4 は、熱画像カメラモデルごとの DRI 距離を計算式に基づいて算出した値である。

Maximum distance (m)	Model Name		TNM-C2712TDR	TNM-C2722TDR	TNO-3010T	TNO-3020T	TNO-3030T TNO-L3030T	TNO-3040T	TNO-3050T	TNM-C3620TDR TNM-C3622TDR
	Horizontal angle of view		95	57	92	50	16	11.5	6.3	50
	Number of horizontal pixels		160	160	320	320	320	320	320	320
	Object	PPM								
Detection	Vehicle	0.65	112	226	237	526	1746	2436	4458	526
	Human	1.67	44	88	93	206	683	953	1744	206
Recognition	Vehicle	2.61	28	56	59	132	436	609	1114	132
	Human	6.67	11	22	23	51	171	238	436	51
Identification	Vehicle	5.22	14	28	30	66	218	305	557	66
	Human	13.33	5	11	12	26	85	119	218	26

Maximum distance (m)	Model Name		TNO-C3010TRA TNO-C3012TRA	TNO-C3020TRA TNO-C3022TRA	TNO-C3030TRA TNO-C3032TRA	TNO-C3040T TNO-C3042T	TNO-C3050T TNO-C3052T	TNO-C3060T TNO-C3062T	TNO-C3080T TNO-C3082T
	Horizontal angle of view		90	60	37.9	28.5	19.3	10.7	6.2
	Number of horizontal pixels		384	384	384	384	384	384	384
	Object	PPM							
Detection	Vehicle	0.65	294	510	857	1159	1731	3144	5436
	Human	1.67	115	200	336	454	678	1230	2127
Recognition	Vehicle	2.61	74	127	214	290	433	786	1359
	Human	6.67	29	50	84	113	169	308	532
Identification	Vehicle	5.22	37	64	107	145	216	393	679
	Human	13.33	14	25	42	57	85	154	266

Maximum distance (m)	Model Name		TNO-4030T TNO-4030TR TNO-L4030T TNO-L4030TR	TNO-4040T TNO-4040TR TNO-L4040TR TNO-4041T TNO-4041TR	TNO-4050T TNO-4051T	TNM-C4940TD TNM-C4940TDR TNM-C4942TDR	TNM-C4950TD	TNM-C4960TD
	Horizontal angle of view		48.6	32	17.2	50	31.9	17.4
	Number of horizontal pixels		640	640	640	640	640	640
	Object	PPM						
Detection	Vehicle	0.65	1090	1717	3255	1056	1723	3217
	Human	1.67	424	668	1267	411	670	1252
Recognition	Vehicle	2.61	272	428	811	263	429	801
	Human	6.67	106	167	317	103	168	314
Identification	Vehicle	5.22	136	214	405	131	214	401
	Human	13.33	53	84	159	51	84	157

[表 4. 熱画像カメラ別 DRI 距離計算表]

DRI (Detection, Recognition, Identification) 計算式は以下の通りです。

$$\text{距離} = (\text{レンズ焦点距離}) \times (\text{対象物の大きさ}) / [(\text{ピクセル数}) \times (\text{ピクセルピッチ})]$$

ただし、熱画像カメラを使用する際には、熱画像カメラの DRI 距離だけでなく、Video Analytics (映像解析) を使用する場合は検知距離も考慮する必要があります。熱画像カメラの検知距離は、対象物や使用環境の温度、空気中の湿度などの影響を受け、実際の検知距離が短くなる可能性があるため、設置環境での PoC (概念実証) などを通じて検証することが推奨される。

Motion Detection Range	TNO-4030T	TNO-4040T	TNO-4050T	TNO-3010T	TNO-3020T	TNO-3030T	TNO-3040T	TNO-3050T
Vehicle	130m	200m	390m	70m	130m	420m	570m	1090m
Human	17m	27m	50m	7m	17m	56m	75m	140m

[表 5. 熱画像カメラの VA (Video Analytics) 検知距離]

表 5 は、単一センサー搭載の熱画像カメラモデルごとの映像解析 (VideoAnalytics) による検知距離を示した表である。これは限定的な条件下での理論上の最大値であるため、実際の使用時には対象物や周囲環境の影響により検知距離が変動する可能性があることを常に考慮する必要がある。

表 6 は、AI ベースの映像解析をサポートする熱画像カメラの検知距離を実際に測定した値を示した表である。これは限定的な条件下で測定された値であり、設置環境や対象物の状態によって変動する可能性があることを常に考慮する必要がある。

AI based Object Detection	TNM-C4940TD	TNM-C4950TD	TNM-C4960TD
Vehicle	2.4m	72m	112m
Human	1.8m	54m	84m

AI based Object Detection	TNO-C3010TRA TNO-C3012TRA	TNO-C3020TRA TNO-C3022TRA	TNO-C3030TRA TNO-C3032TRA	TNO-C3040T TNO-C3042T	TNO-C3050T TNO-C3052T	TNO-C3060T TNO-C3062T	TNO-C3080T TNO-C3082T
Vehicle	2.4m	34m	54m	85m	115m	170m	312m
Human	1.8m	26m	41m	64m	87m	128m	234m

[表 6. 熱画像カメラの AI ベース物体検知距離の実測例]

3.2.2 サーマルモニタリングにおける AI ベースの物体検出/分類および IVA 機能

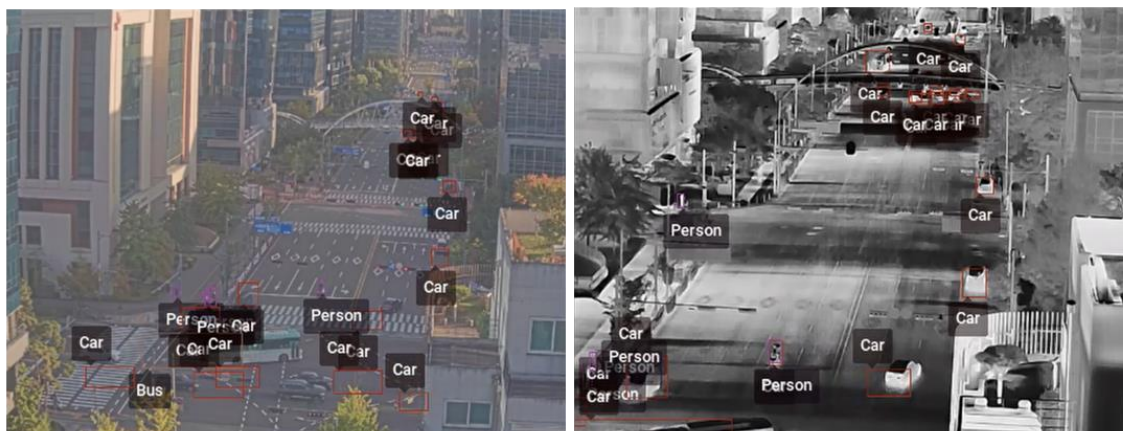
実映像 AI だけでなく、熱画像映像セキュリティ分野でも AI 技術を活用して、物体検出・分類をサポートしている。特に夜間や低照度環境など、実映像では肉眼での識別が困難な場合でも、熱画像映像ベースの AI 物体検出により誤警報や未検知を改善することが可能である。

熱画像カメラを利用して、人や車両の検出が可能である。ただし、発熱物体を検出対象とする熱画像カメラの特性上、発熱していない物体 (例: 自転車、駐車中の車両など) は検出されない場合がある。また、色情報がないため、実映像カメラに比べて物体が重なった場合の検出性能は低下する可能性がある。図 13 のように熱画像も実映像も同様に AI モデルの検出結果に基づき、IVA 機能 (方向検知、動作検知、出入検知、仮想線) を提供する。



[図 13. 実映像および熱映像における物体検出]

図 14 は、建物の屋上に設置されたデュアルセンサーカメラ TNM-C4960TD を使用して確認した、AI ベースの物体検出画面を示している。実映像および熱映像の両方で、AI による物体検出（OD, Object Detection）機能が正常に動作していることが確認できる。このときの検出距離については、上記の表 6 の測定値を参照する。



[図 14. TNM-C4960TD を用いた AI 検知機能の例]

3.2.3 Handover サポートによるサーマルモニタリングの限界補完サービス

イベントが検知された際、設置された PTZ カメラのハンドオーバー機能により、対象物をより明確に確認できるよう支援する。また、IP スピーカーとのハンドオーバー機能により、侵入者に対して即座にアラームを発することも可能である。

3.2.4 バイスpektrumカメラによる効果的で持続的なモニタリングの提供

AI 対応の熱画像カメラであっても、通常の可視光カメラのように対象物の特徴を明確に判断することは難しい。また、低照度環境で優れた画質を発揮する可視光カメラも、夜間や霧・煙などの環境要因によって制限を受ける。

バイスペクトラムカメラは、こうした熱画像カメラと可視光カメラの限界を補うために、熱画像センサーと可視光センサーを組み合わせたデュアルセンサーカメラである。これにより、あらゆる環境下でも効果的かつ継続的な映像監視を可能にする。

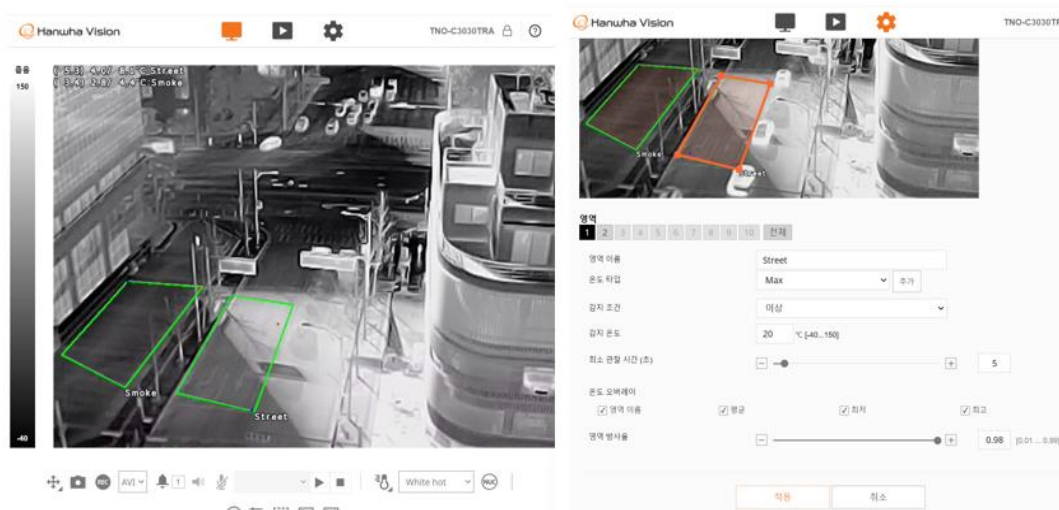
また、可視光チャンネルと熱画像チャンネル間でメタデータを共有することで、双方の限界を補い、現場状況を迅速に検知・把握できる。例えば、[図]のように夜間や雨、霧、火災、煙などの悪天候で視界が確保しにくい状況でも、状況をより正確に把握することが可能である。



[図 15. 夜間環境における可視光映像（左）と熱画像映像（右）の視認性の違い]

3.2.5 効率的な施設・設備管理のための ROI/スポット温度モニタリング機能

温度モニタリングのために、多角形の関心領域（ROI）設定機能を提供しており、温度監視が必要な領域をより効果的に設定できる。TNOC30xyTDR（x=1,2,3、y=0,2）モデルでは設定可能な ROI の数は 10 個であり、その他のモデルでは最大 6 個まで設定可能である。また、それぞれの ROI に設定された温度基準に応じて、個別にアラームを受け取ることができる。下図 16 は、使用目的に合わせて ROI を設定した例を示している。火災監視や物体監視など、ユーザー環境に応じた設定機能を通じて、詳細な温度検知範囲を決定し、関連する座標をユーザーに通知できる。



[図 16. ROI 設定例]

図 17 のように、ROI を指定することで、各領域の平均・最大・最小温度をリアルタイムで表示し、アラーム通知を行うことで即時対応を可能にする。



[図 17. ROI ごとの平均・最大・最小温度モニタリングの例]

ROI で設定された部分以外で特定の位置の温度をモニタリングする必要がある場合、確認したい位置をマウスでクリックすると、スポットポインター（Spot Pointer）を使用してその特定位置の温度を確認することができる。下の図 18 は、ライブモニタリング画面でスポットポインターを使って特定位置の温度を確認する例を示している。



[図 18. スポットポインター（Spot Pointer）を使用した温度モニタリング]

無人施設や分散設置された機器の温度をモニタリングするためにハンドヘルド型の温度計を使用する場合、測定ポイントが 1 か所または限られた範囲に限定されるため、人員の運用に伴うコストや時間が多くかかる。しかし FPA 型の赤外線センサーを搭載したサーモグラフィカメラを用いた温度モニタリングでは、センサーの各ピクセルが個別の温度計として機能するため、より広範囲の温度監視が可能となり、人員運用にかかるコストや時間を効果的に削減できる。

さらに、Hanwha Vision のサーモグラフィカメラの中で MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) プロトコルをサポートするモデルを使用する場合、MQTT を利用してカメラが発行する温度情報を購読することで温度モニタリングシステムを構築することも可能である。MQT は実装が容易で軽量かつ柔軟であり、他の IoT プラットフォームやアプリケーション間での優れた連携性により注目されているプロトコルである。MQTT を通じて各 ROI 領域の最大・最小・平均温度や座標情報を提供するとともに、温度検知イベントの発生情報も提供される。以下は、MQTT を通じて ONVIF イベント標準に基づき発行された温度およびイベント発生情報の例である。

< Temperature Reading >

Topic: C3020TRA/onvif-ej/VideoAnalytics/Radiometry/BoxTemperatureReading/&VideoSourceToken-0/
VideoAnalyticsConfigToken-0/TemperatureDetectionModule-01

```
{
  "UtcTime": "2024-01-17T06:29:13.480Z",
  "Source": {
    "VideoSourceToken": "VideoSourceToken-0",
    "VideoAnalyticsConfigurationToken": "VideoAnalyticsConfigToken-0",
    "AnalyticsModuleName": "TemperatureDetectionModule-01"
  },
  "Data": {
    "Reading": {
      "BoxTemperatureReading": {
        "@ItemID": "Z",
        "@MaxTemperature": "324.4",
        "@MaxTemperatureCoordinatesX": "28",
        "@MaxTemperatureCoordinatesY": "208",
        "@MinTemperature": "307.8",
        "@MinTemperatureCoordinatesX": "227",
        "@MinTemperatureCoordinatesY": "228",
        "@AverageTemperature": "307.9"
      }
    },
    "TimeStamp": "2024-01-17T06:29:13.480Z"
  }
}
```

< Temperature Detection >

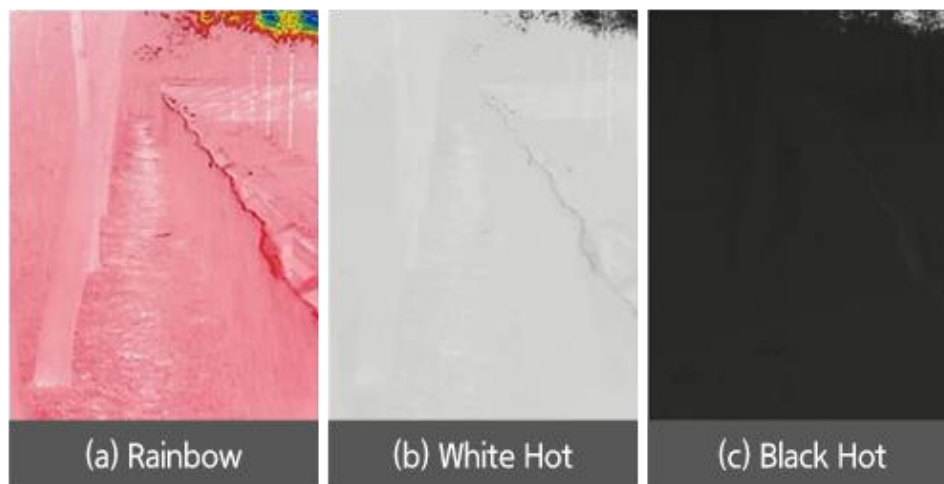
Topic: C3020TRA/onvif-ej/RuleEngine/Radiometry/TemperatureAlarm/&VideoSourceToken-0/VideoAnalyticsConfigToken-0/AAAA/TemperatureDetection-A

```
{  
  "UtcTime": "2024-01-17T06:38:47.958Z",  
  "Source": {  
    "VideoSource": "VideoSourceToken-0",  
    "VideoAnalyticsConfigurationToken": "VideoAnalyticsConfigToken-0",  
    "Areaname": "AAAA",  
    "RuleName": "TemperatureDetection-A"  
  },  
  "Data": {  
    "AlarmActive": "true",  
    "TimeStamp": "2024-01-17T06:38:47.958Z"  
  }  
}
```

4. サーマルカメラの設置および運用時の考慮事項

4.1. 設置環境に応じた一般的な考慮事項

サーモグラフィカメラの映像は、対象物と周囲環境との温度差が大きいほど、鮮明な熱画像を得ることができる。対象物と背景との温度差が小さい場合、鮮明な熱画像を取得することは難しい。これは、低照度環境で可視光カメラを使って鮮明な映像を得るのが難しいのと同じである。下の[図 19]はその例を示している。



[図 19. 対象物と周囲環境との温度差が小さい場合の映像]

サーモグラフィカメラは熱エネルギーを測定し、サーモグラフィ画像と温度情報を提供する装置であるため、カメラや観察対象の周囲にある熱源、対流、湿度、雨や雪などの大気条件、さらにはサーモグラフィセンサーの温度安定状態によって、画像や温度情報が歪む可能性がある。

一般の可視光カメラとは異なる撮像特性を持つ点も、設置時に考慮する必要がある。例えば、可視光カメラはガラス越しでも映像を取得できるが、サーモグラフィカメラは熱反射の影響によりガラス越しではサーモグラフィ映像を得ることができない。同じ材質の対象物を撮影しても、特に金属の場合は表面の滑らかさや腐食度合いによってサーモグラフィ画像に大きな差が現れる。

したがって、周囲の影響を最小限に抑えられる安定した設置場所の選定、対象物と周囲環境との十分な温度差が確保できる視野の確保、さらに対象物の表面状態などを常に考慮する必要がある。加えて、以下のような環境的制約要素がサーモグラフィカメラの性能に影響を与える可能性がある。

- ・ 背景との温度類似性：対象物の表面温度が背景と似ている場合、熱コントラストが低下し、識別が難しくなることがある。

- ・ 悪天候：雪、雨、霧などは赤外線透過率を低下させ、映像品質や検知距離を制限する可能性がある。
- ・ 時間帯および気温の変化：同じ設置場所でも、時間帯や季節の変化により背景温度が変動し、検知性能に影響を与えることがある。

これらの要因を十分に認識し、設置および運用時に反映させることが、最適な熱画像の取得には不可欠である。

4.2. 関心領域 (ROI) の設定

関心領域 (ROI) を設定する際に基本的に考慮すべき点は、関心対象以外に周囲の背景や他の物体が含まれないように設定することである。以下の[図]は、関心領域を誤って設定した例を示している。図から設定された関心領域を見ると、ROI を通じてどの部分を確認したいのかが不明確であることが分かる。さらに、関心領域に空が含まれているため、予想外の温度測定値が得られる可能性がある。



[図 20. 関心領域を誤って設定した例]

関心領域のサイズ：サーマルカメラの映像は、関心領域の物体と周囲環境との温度差が大きいほど、鮮明なサーマル映像を得ることができます。しかし、関心領域をあまりに小さく設定したり、大きく設定しすぎたりすると、使用目的に適した映像を得ることはできません。関心領域の設定サイズは、最低でも 50×50 以上を推奨し、他の物体に遮られないように設定する必要があります。

4.3. 放射率 (Emissivity)

放射率とは、物体の表面から実際に放射される放射エネルギーの量と、同じ温度の黒体から放射される放射エネルギーの比を指します。黒体とは、振動数や入射角に関係なく入射するすべての電磁放射を吸収する理想的な物体です。商業用に製作される黒体の放射率は通常 0.95～0.99 の範囲であり、赤外線センサーの較正に必須の装置として使用されます。物体の放射率は 1 未満です。下表 7 は主要な物質の放射率を示しています。

Material	Emissivity
Asphalt	0.93
Charcoal	0.96
Cloth	0.95
Concrete	0.94
Food stuff	0.80 - 0.90
Graphite	0.97
Paints (value may vary depending on color)	0.90 - 0.96
Metals (unoxidized)	< 0.10
Oil paint (value may vary depending on paint types)	0.92 - 0.96
Plastics (value may vary depending on surface finish and paint types)	0.92 - 0.95
Porcelain	0.92
Rubber (hard)	0.94
Rubber (soft)	0.86
Skin (human)	0.98
Soil	0.93
Tape (electrical)	0.95 - 0.97
Tar paper	0.93
Textiles	0.94
Wood (value may vary depending on wood type, finish and so on)	0.90 - 0.95

[表 7. 素材別放射率表]

放射率に影響を与える要因には以下のようなものがあり、これらを理解することは、サーマルカメラを正しく使用し、熱画像を理解・解析する上で必須です。(出典：Michael Vollmer et al., 2010)

4.3.1 材料の種類

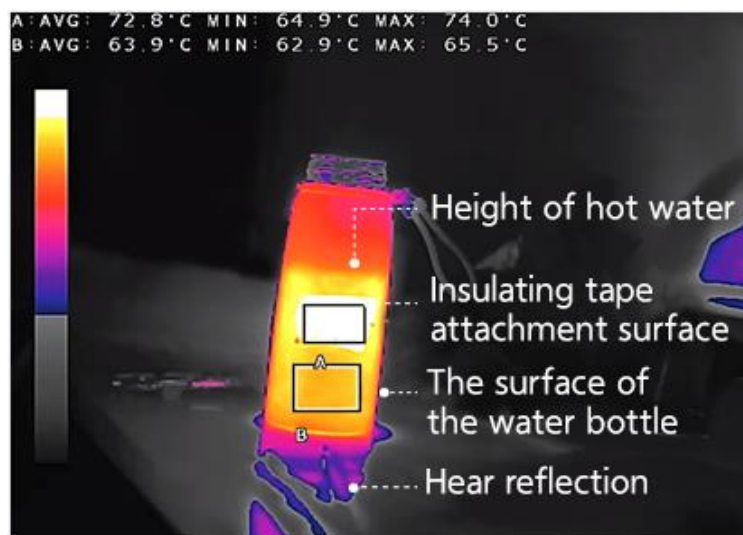
単純に金属と非金属に分類して理解する必要があります。鋳造または研磨された金属表面は放射率が低い場合、正確な温度を測定することが困難です。研磨された金属の場合、放射率は 0.2 以下となり、サーマルカメラでこれらの金属の温度を測定することには意味がありません。

4.3.2 表面構造

先に述べたように、研磨された金属の放射率は 0.2 以下ですが、金属表面が酸化や腐食を起こすと、放射率は 0.8 以上になることがあります。表面構造による放射率の違いを説明する際によく例として用い

られるのが、レスリーキューブです。このキューブは、それぞれの面が異なる処理を施された空洞の銅製キューブであり、内部に熱い水を入れた後、サーマルカメラで赤外線のを測定すると、面ごとに異なる値が得られます。サーマルカメラは赤外線のを温度に変換して表示するため、放射率を考慮しないと温度測定が不正確になる可能性がある点に注意が必要です。

下図 21 は、一般的な水筒の中央に絶縁テープを貼り、熱い水を入れたときの熱画像の違いを示しています。絶縁テープを貼った部分は、貼っていない部分に比べて約 9℃高く表示されています。



[図 21. 水筒に熱い水を入れたときの、放射率による熱画像の違い]

4.3.3 視野角

被写体とサーマルカメラが成す角度を 0°～85°まで変化させながら放射率の違いを測定すると、0°～45°の範囲では放射率はほとんど変化せず一定です。つまり、それ以上の角度から被写体を観測すると放射率が低下し、正確な測定が困難になります。したがって、サーマルカメラを設置する際は、関心領域とカメラの視野角が 45°以内になるように設置する必要があります。

4.3.4 その他

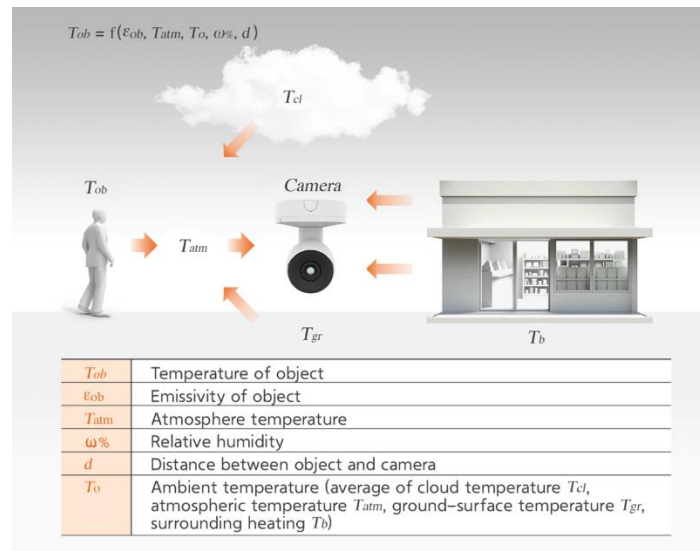
その他、材料の温度範囲、波長範囲（LW、MW、SW）、形状などによって変化することもあります。実使用条件では一般的に重要ではありません。

4.4. 撮影角度

サーマルカメラは被写体をどの角度から観測するかによって測定値が変わるため、設置時には関心領域のある被写体とカメラの撮影角度を考慮する必要があります。一般的には 45°以内の角度になるように設置すべきであり、その理由は 4.3.3 節の視野角の項目を参照してください。

4.5. 温度精度に影響を与える要因

下図 22 のように、サーマルカメラを用いて被写体の温度を測定する場合、正確な温度測定に影響を与える要因は以下の通りです。被写体の温度は、被写体の放射率、大気温度、周囲温度、相対湿度、そして被写体とカメラの間の距離の関数として表されます。（出典：W. Minkina and D. Klecha, 2015）



[図 22. 温度測定に影響を与える要因]

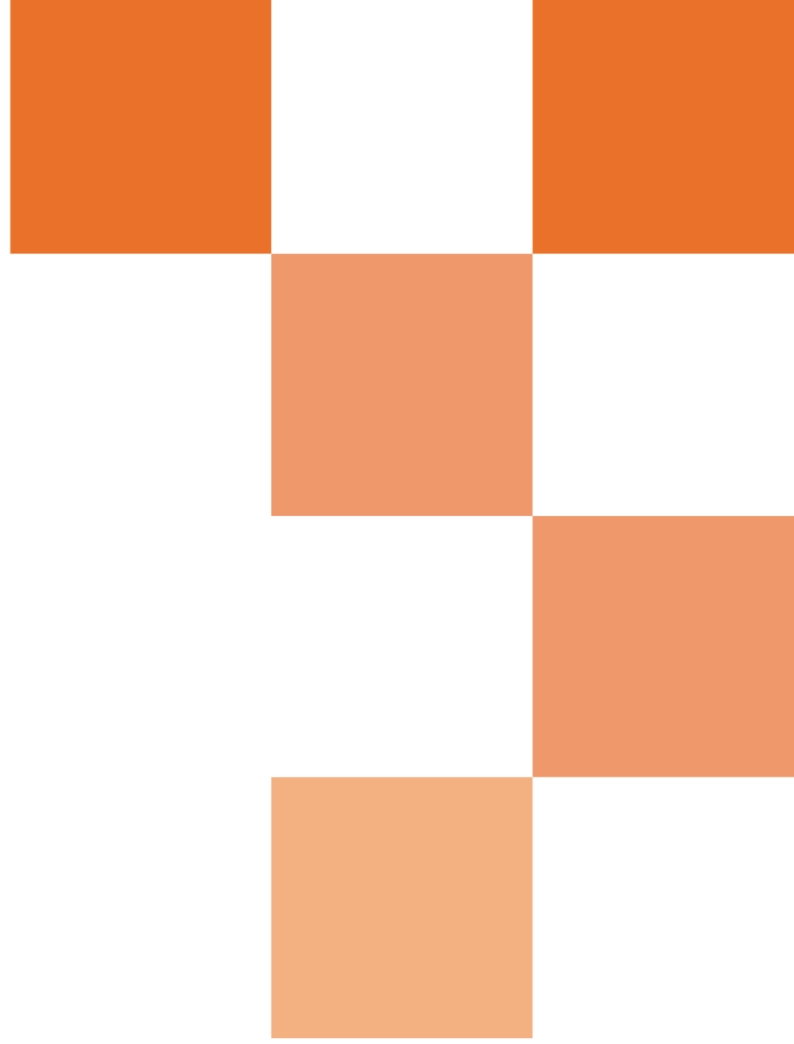
被写体から放出される赤外線は大気を通過する際に吸収や散乱が起こり、大気中の水蒸気（H₂O）や二酸化炭素（CO₂）が最も大きな影響を与えます。

そのため、サーマルカメラを用いた温度測定の精度は、カメラが動作する周囲環境条件によって変化する可能性があります。サーマルカメラの精度性能を確保するためには、前述の環境要因だけでなく、カメラの設置角度、被写体の材料の違い、熱反射の影響なども考慮する必要があります。



5. 参考文献

- ・ N. Pinchon, M. Ibn-Khedher, O. Cassignol, A. Nicolas, F. Bernardin, P. Leduc, J-P. Tarel, R. Brémond, E. Bercier, G. Julien, 「自動車安全のための全天候型ビジョン：どのスペクトル帯か？」、AMAA (Advanced Microsystems for Automotive Applications) 、2018 年
- ・ 鄭用澤, 「赤外線センサーの最新技術動向」、pp18-23、洪陵科学出版社、2014 年
- ・ J.L. Tissot, P. Robert, A. Durand, S. Tinnes, E. Bercier, A. Crastes, 「フランス U LIS における非冷却赤外線検出器技術の現状」、Defence Science Journal, Vol.63, No.6, 2013 年
- ・ Vladimir I. Ovod, Christopher R. Baxter, Mark A. Massie, 「FPGA ベース再プログラム可能ミニチュア電子機器のための高度画像処理パッケージ」、SPIE, 2005 年
- ・ H. Budzier, G. Gerlach, 「非冷却サーマル赤外線カメラの較正」、JSSS, 2015 年
- ・ Michael Vollmer, Klaus-Peter Moellman, 「赤外線サーマルイメージングの基礎、研究と応用」、WILEY, 2010 年
- ・ W. Minkina, D. Klecha, 「熱画像測定における赤外線の大気透過係数モデル」、JSSS, 2015 年



Hanwha Vision Co.,Ltd
13488 **Hanwha Vision** R&D Center,
6 Pangyo-ro 319-gil, Bundang-gu, Seongnam-si, Gyeonggi-do
TEL 070.7247.8771 **FAX** 031.8018.3715
www.HanwhaVision.com