

サーマルイメージング： どこまで遠くが見えるのか？

赤外線（熱画像）カメラの購入を考えているお客様から最初に聞かれる質問に「どの程度遠くまで見えるのか？」と言うものがよくあります。とても妥当な質問ですが、簡単に答えられるものでもありません。FLIRの赤外線カメラはどれも、地球から1億4600万キロメートル以上離れた太陽を見ることができます。しかしこれでは答えになっていません。FLIR Systemsの赤外線カメラは、あらゆるところにあるセキュリティ上の脅威を検知できます、と言うのと同じになってしまいます。



FTZ - 35 x 140 MS: 中・長距離監視向けの2個の非冷却マイクロボロメータを組み込んだ赤外線カメラシステム

サーマルイメージング（熱画像観察）とは、完全な暗闇や非常に多様な気象条件のもとで人や監視対象を検知できる技術です。サーマルイメージングの代表的な用途として国境警備があげられます。主に夜に問題が発生するからです。4Km以上の間隔で設けられた監視塔で国境警備を完全に保障するには2Km以上先の問題を検知しなければなりません。赤外線カメラでどの程度先まで見えるかを知り、その範囲内で起こりうる状況は監視可能かどうかを知ることは極めて重要になります。

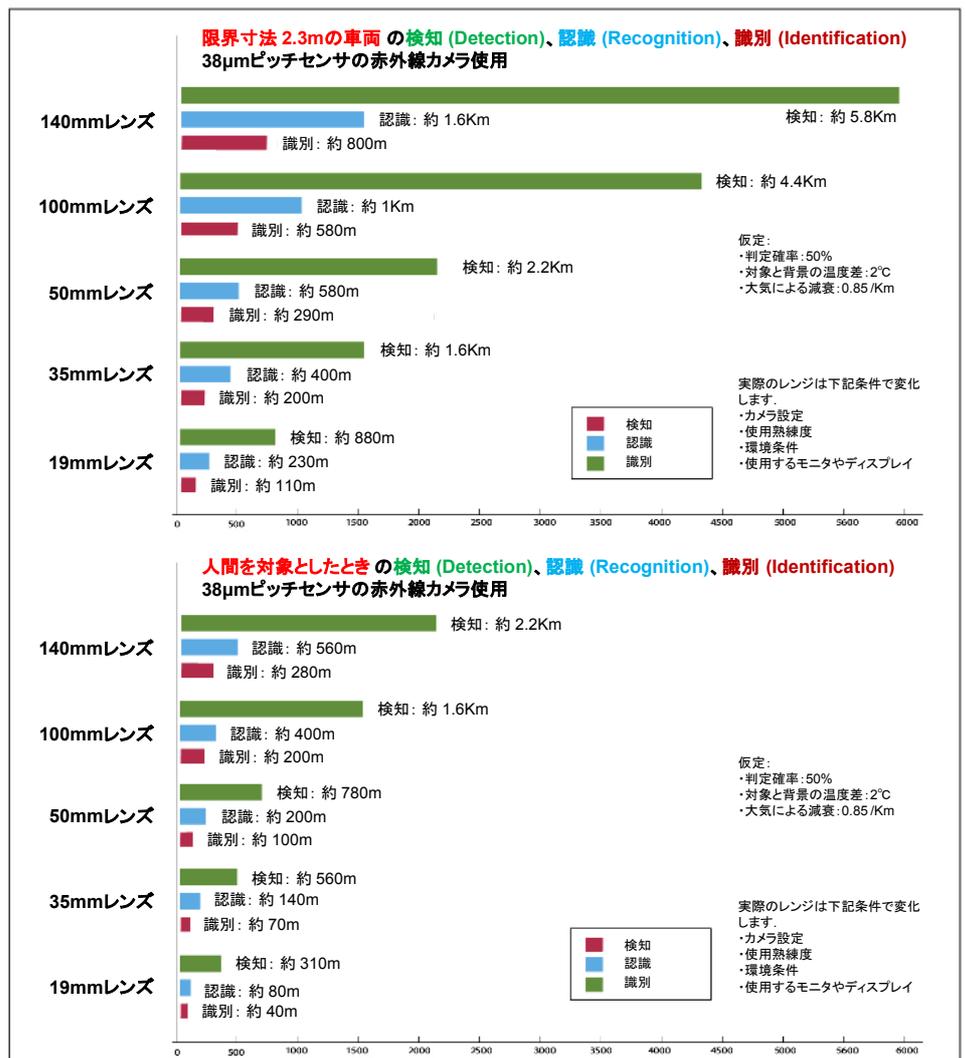
サーマルイメージングで監視対象が見える距離は、赤外線カメラの業界では「レンジ」と呼ばれています。赤外線カメラのレンジを正しく判定するためには、精密なモデル化が必要になります。そこでは実際に用いられる赤外線カメラの特性、検出対象の大きさ、大気の状態、対象物を「見る」とはまさにどうということかの定義など、考慮すべき要因が多くあります。

対象を「見る」と言うこと

「観察対象を見る」を定義するには、ジョンソン基準と呼ばれるものが用いられます。これは、Night Vision & Electronic Sensors Directorateの科学者であるジョン=ジョンソン (John Johnson) が開発した赤外線カメラの有効レンジに関する基準です。この基準は軍事目的で開発され、興味の対象が「ターゲット=標的」と言う言葉で表現されていますが、民生用のサーマルイメージング・システムを評価するためにも広く用いられています。この判定基準に基づけば、ターゲットが「見える」度合いに区別を付けられます。

検知 (Detection): 対象の存在の有無を「検知」と言い、センサ上の像の大きさが1.5 ピクセル以上であることが条件。ジョンソンによる元々の定義ではシステムの解像度の単位を「サイクル」と言い、1.5 ピクセルは0.75サイクルに相当します。

認識 (Recognition): 対象の「認識」とは対象がどんな種類のものであるかが見ること。つまり、人間、乗用車、トラック、何か他のものかを区別できることです。対象を識別するには、センサ上の像が少なくとも6ピクセルの範囲に入らなければならないと規定されます。



識別 (Identification): この用語は軍事的な敵味方の識別と言う意味でよく使われます。識別を行うには、問題の対象がセンサ上で少なくとも12ピクセルの範囲に入らなければなりません。

このようなジョンソン基準は、観察者が対象を50%の確率で特定すると規定されています。例えば大人の人間は1.8m x 0.5m程度の大きさです。観察者の判断と熱画像データの統計分析を経験的に合わせると、人間の限界寸法は0.75mとなります。十分な解像度を持った赤外線カメラ、例えば1000m先にある限界寸法0.75mの対象をセンサ上の6ピクセルの範囲で捕らえられる構成を考えます。さらに、冷えた夜間の風景を背景にした人間といったように観察対象と背景の間の十分な熱コントラストがセンサで捕らえられることも考慮すべき点です。以上のような赤外システムは、1000mレンジで適度な認識 (Recognition) 確率を有することになります。

FLIR Systemでは、赤外線カメラでどの程度遠くまで見えるかどうかは、カメラシステムが人間の大きさの対象を十分な熱コントラストで検知できる距離で規定しています。レンズの大きさにもよりますが、FLIRの赤外線カメラは数キロメートル先の人間の行動を検知できます。検知対象物の寸法が大きくなれば、それだけ最大検知レンジは長くなります。

焦点距離: 重要なパラメータ

赤外線カメラでどの程度遠くまで見えるかに影響を及ぼす重要なパラメータには、レンズの焦点距離があります。この焦点距離から瞬間視野 (IFOV) が決まります。IFOVはセンサの1ピクセルの視野角で、十分な熱コントラストが得られる条件下での解像可能な最小の角度です。

従ってIFOVがわかれば、対象物の限界寸法が定義で決められたピクセル数の範囲に収まる時の距離を計算すれば、検知、認識、識別が可能になる距離が求まります。レンズの焦点距離が長いほどIFOVは小さくなるので、同じ距離にある観察対象はIFOVが小さいほど、より多くのピクセルで見ることになります。国境警備のような長距離監視の用途では、非常に小さなIFOVが

要求されるわけです。と言うのも数キロメートル先の人間の寸法の観察対象を検知する必要があります。ここで注意すべきは、焦点距離が長くなれば全体の視野は狭くなる点です。

長いレンズは視野が狭い。つまり長いレンズをカメラに取り付けると、視野を犠牲にして距離を稼ぐこととなります。言い換えると、観察対象を識別するには、対象がどこにあるかが分かっている必要があります。細いストローを通して見るようなものです！

そこで長距離監視用の赤外線カメラシステムは、焦点距離の異なる複数のレンズを搭載し、素早く観察対象を視野に収めて検知し、レンズを切り替えてズームインして対象を識別できるようになっています。

1Kmレンジにある人間を想定しましょう。効率よく対象を捕捉できる視野角は、限界寸法をレンジで割り算したもので、つまり0.75m/1000mあるいは角度で750マイクロラジアン(μrad)となります。この距離でその人間を赤外線カメラで識別するには、1000m先の0.75mをセンサ上の12ピクセルに収める必要があります。注意頂きたいのは、この場合の識別は個人の特定と言う意味ではなく、例えばその人がライフル銃を持っているのかシャベルを持っているかを区別することを意味します。焦点距離500mmのレンズをピクセルサイズ15 μm のセンサと組み合わせると、IFOVは30 μrad となります。観察対象のセンサ上の像のピクセル数は、対象への視野角をIFOVで割り算したものです。従って、750 μrad を1ピクセル当たり30 μrad で除算して得られる25ピクセルで対象を見るわけです。12ピクセル以上が識別の定義です。

冷却と非冷却の赤外線カメラ

どの程度遠くを見られるかは、赤外線カメラのセンサが冷却と非冷却で異なります。冷却カメラシステムはコストが高い反面、様々な条件下でも非冷却カメラよりも長いレンジを観察できます。多くの冷却カメラは通常15 μm ピクセルピッチ (ピクセル中心間の距離) です。500mmレンズを使えばIFOVは30 μrad です。限界寸法0.75mとすると2.1Km先の人間を12ピクセルで捕らえることができます。この事例での試算結果から、

数キロメートルレンジで人間を識別するためには焦点距離500mのレンズが必要だと結論付けられます。

非冷却センサを用いる場合を考えてみます。冷却センサに比べて非冷却センサは、同じ光学系を用いる場合には本質的に感度が低く、またピクセルが大きくなっています。一般的な非冷却センサは38 μm ピッチです。ピクセルサイズが大きいため500mmレンズを用いても識別レンジが0.8Kmと短くなります。非冷却センサ用の焦点距離500mmのレンズを使うとしても、F値が非常に小さいため、冷却カメラシステムと同等な熱感度を簡単に得られないという現実的な問題があります。非冷却センサ用のF1.6の500mmレンズを考えるとその直径が313mmとなり、大きく大変高価なレンズとなります。つまり非常に高価なレンズのために、非冷却赤外線カメラのコストメリットが全く意味を持たなくなり、冷却カメラよりもトータルコストが増えてしまいます。実際に現時点で最も長い非冷却用のレンズは367mmです。38 μm ピクセルピッチの非冷却カメラに367mmレンズを用いると、識別レンジは最大で600mとなります。

この事例から、非常に長いレンジでのサーマルイメージングの用途では、冷却カメラが最適であると結論付けられます。高湿度な大気条件下で、中赤外域 (3~5 μm)を用いる際は冷却センサの効果 が特に顕著になります。

大気の状態

赤外線カメラは完全な暗闇、薄霧、小雨、降雪でも対象が見えるのですが、見える距離は大気条件の影響を受けます。快晴であっても、大気は本質的に赤外線を吸収するので、赤外線カメラで見える距離に限度がでてきます。観察対象からカメラまでの赤外線の通過距離が長いほど、大気による吸収のため赤外線強度は弱まります。

赤外線監視の距離が制限されるのは、雨や霧の水滴が赤外線を散乱するためです。霧は、地表近くの大気中に浮遊した小さな水滴の集合体で、水平方向の視程を1Km以下に低下させます。大気温度と露点がほぼ同じになり、結露の核が十分にあり、霧は発生します。

霧には異なる種類のものがあり、霧堤(厚い霧の層)は水滴が互いに付着することで大きく成長するので、非常に濃い霧です。この種の濃い霧は赤外線透過を大きく妨げ、赤外線カメラのレンズを低下させます。豪雨や降雪でも同様です。加えて降雨は観察対象の表面温度を下げるので熱コントラストを低下させます。しかし霧、雨、雪での性能低下にもかかわらず、赤外線カメラは可視光カメラよりも依然として対象を見易いのです。

レンズは多くの変動要因の影響を受ける

要するに、「赤外線カメラでどこまで遠くが見えるか？」への答えは単純ではありません。その答えは、多くの環境条件やシステムの要因、さらに観察対象の特性(駐車車両か走行車両か)、背景(熱い砂漠か冷たい雪か)、大気条件(快晴か霧か)にも依存します。また、観察に用いるカメラやレンズにも依存します。

FLIR Systemの技術陣は、実際に使用する様々な条件下で、様々な対象を赤外線カメラで観察する際のレンジ推定のお手伝いができます。

ノモグラフ

赤外線カメラでどのくらい遠くが見えるのかを推測する良い方法の1つに、ノモグラフがあります。ノモグラフは、焦点距離、レンジ、観察対象を捕らえるピクセル数などの要因の数値関係を図表に表したものです。以下の2つのノモグラフ(非冷却と冷却カメラシステム)は、人間を検知、認識、識別可能なレンジを推定するための簡略化されたモデルです。これらのモデルでは大気の効果や熱コントラストを含んでおらず、非常に高いコントラストで鮮明な画像が得られる条件で、幾何光学のみに基づいてレンジ求めています。

非冷却 320 x 240 センサ 38μm ピッチ 50mm レンズ

人間の高さを捕らえるセンサ上のピクセル数



計算例:

ジョンソン基準では、人間の限界寸法を0.75mと仮定します。DRI(検知・認識・識別の英語の頭文字)の条件を求めるには、対象の位置にある0.75mがセンサ上で捕捉された際のピクセル数が、それぞれ最低1.5ピクセル、6ピクセル、12ピクセルでなければならない。つまり;

- 検知: $1.5 \text{ ピクセル} / 0.75\text{m} = 2 \text{ ピクセル}(1\text{m あたり})$
- 認識: $6 \text{ ピクセル} / 0.75\text{m} = 8 \text{ ピクセル}(1\text{m あたり})$
- 識別: $12 \text{ ピクセル} / 0.75\text{m} = 16 \text{ ピクセル}(1\text{m あたり})$

人間の大きさを1.8m x 0.5mと仮定してみると、これに上記計数を掛けて以下を得る.

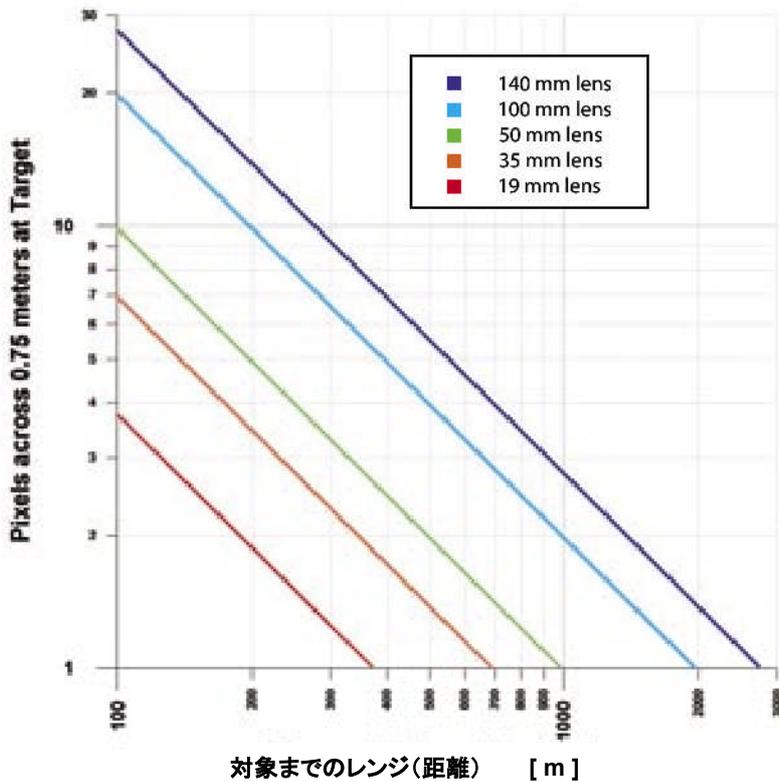


検知条件=
3.6ピクセル x 1ピクセル
そこに何かがあることが分かる

認知条件=
14.4ピクセル x 4ピクセル
そこに人間が居ることが分かる

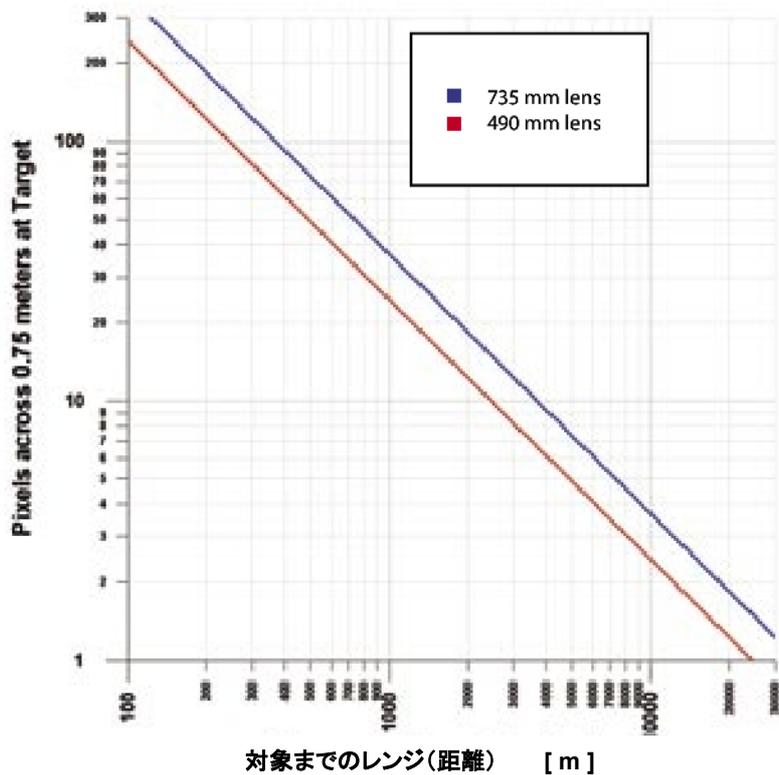
識別条件=
28.8ピクセル x 8ピクセル
人間がライフルを持っていることが分かる

基本的な考え方を表現するための図です



ノモグラフ:
非冷却 320 x 240 センサ
38µm ピッチ

人間の大きさの対象の
限界寸法0.75mを
捕らえるピクセル数と
レンジの関係



ノモグラフ:
冷却 640 x 480 センサ
15µm ピッチ

人間の大きさの対象の
限界寸法0.75mを
捕らえるピクセル数と
レンジの関係



FLIR System HRC-59x735 あるいは HRC-40x490 は、極めて長距離の先にある潜在的な脅威を検知できる

Acknowledgement to Dr. Austin Richards Ph. D. for authoring the article and calculating the nomographs and to Mr. T. Hoelster for valuable input and advice.



FineSensing

ファインセンシング株式会社

〒273-0025千葉県船橋市印内町568-1-3

TEL: 047-495-9120 FAX: 037-495-9121

URL: <http://finesensing.com>

E-mail: inquiry@finesensing.com