

イメージングレンズの基礎

クリストファー・ラッゼ

正しいレンズを選択することは、マシンビジョンシステムの開発における重要なステップである。

マシンビジョン、またはイメージングは、成長著しい分野である。ファクトリ・オートメーション、自律型システム、ライフサイエンス、航空宇宙、ロジスティクスなど、さまざまな分野のエンジニアが、自動化という目標の達成を支援するためにビジョンシステムを開発している。

正しいレンズを選択することは、マシンビジョンシステムの開発における重要なステップである。本稿では、この作業を正しく導くことを目的に、適切なレンズを選択する方法を解説する。

マシンビジョンシステムの要件定義

マシンビジョンシステムのレンズ選択における最初のステップは、アプリケーションの要件を定義することである。選択を左右する2つのパラメータは、作動距離と視野である。これらのパラメータの具体的な定義は以下のとおり。

- ・作動距離 (Working Distance : WD) – レンズの前面または第一面から検査対象物体までの距離
- ・視野 (Field of View : FOV) – 検査対象物体の撮影可能領域。物体のこの部分が、カメラのセンサの視野を占めることになる。この領域は一般的に、計算を容易にするために、水平視野 (HFOV) または垂直視野

(VFOV) の寸法に制限して算出される。

全体的なFOV (水平×垂直の寸法、HxV) を規定する際には、一般的なマシンビジョンセンサのアスペクト比 (縦に対する横の比率) が4:3になることに注意してほしい。(水平か垂直かにかかわらず) FOVという重要なパラメータを定義して、それを本稿で説明する計算に使用しなければならない理由は、そこにある。

WDとFOVを定義したら、次に規定するパラメータは、センササイズと必要解像度である。

センササイズ

カメラセンサのアクティブ領域のサイズは、1/1.1インチ、2/3インチ、1.2インチなど、インチ単位の分数または小数値で規定される。

この用語体系が、アナログ真空管のセンサに相当するものに基づいていることは特筆すべき点である。アナログ真空管はもう使われていないが、大多数のセンサメーカーが今でもこの仕様を採用している。センサのアクティブ領域の重要な項目は、水平方向と垂直方向の寸法 (FOVを求めるため) とセンサの対角寸法 (対応レンズを判断するため) である。

解像度

解像度とは、イメージングシステムで判別可能な、物体の最小フィーチャ



サイズである。解像度は、1mmあたりのラインペア (LP/mm) を単位とする空間周波数としてより正確に表される。

適切な解像度を決定するには、アプリケーションで解像する必要のある最小フィーチャのサイズを定義してから、そのフィーチャのピクセル数を定義する。この値は、アプリケーションの目的によって異なる。フィーチャあたりのピクセル数を選択する方法について具体的な定義は存在せず、定めた解像度で十分かどうかを知るにはそれを試してみるしかないが、いくつかの一般的なベンチマーク値を以下に示す。

	フィーチャあたりのピクセル数
3	検出
4	向きの検出
10	認識
16	識別

これを使用して最小ピクセルサイズを求め、以下の式でLP/mmに変換することができる。

$$\frac{LP}{mm} = \frac{1}{2 \times Pixel\ Size} \times 10000$$

この情報は、レンズのサイズの決定に

は必要ないが、特定のアプリケーションに必要なレンズの品質を決定するために使用される。

考察が必要なその他のパラメータは、被写界深度 (Depth Of Field : DOF) と、IP等級、振動耐性、アサーマル化などの環境的要件である。被写界深度とは、許容可能なフォーカスを完全に維持できる最大物体深度のことで、+/-X.Xmmの形式で一般的に表される。

上記の要件と レンズパラメータの関係

以上で、レンズに必要なすべての仕様が揃ったので、次は、必要な焦点距離 (Focal Length : FL) を計算する。この値は、以下の式で近似できる。

$$FL = (H \times WD) / HFOV$$

ここで、Hはセンサの水平寸法、WDは作動距離、HFOVは視野の水平寸法である。垂直寸法を重要な測定値として使用する場合は、水平寸法の部分を単に垂直寸法に置き換えるといふ。

これによって、規定したHFOVとWDに対して必要なFLの概算値が得られる。FLは、さまざまなメーカーの間で比較的標準化されていることに注

意してほしい。例えば、FLの概算値が19.7mmであったとすると、それと全く同じ値のレンズはおそらく見つからないので、システムの柔軟性に応じてその値を大きくまたは小さくする必要がある。

F値	回折限界 解像度	被写界 深度	光スルー プット	開口数
△	▽	△	▽	▽
▽	△	▽	△	△

上記の式に示されているように、FLとFOVは互いに反比例の関係にある。例えば、上記の式で使用したHFOVを、ビジョンシステムの最小要件とみなすのであれば、概算値よりも一段階小さなFLを選択してFOVを広げるのがよい。つまり、ここでは19.7mmの代わりに、より標準的な16mmのレンズを選択する。

以上の手順で、アプリケーションに使用するセンサをカバーするための、必要なFLを持つレンズを選択することができる。そのレンズでセンサのどれだけの大きさがカバーされるかに注意してほしい。大きすぎるものを選択すると、必要以上のコストを費やす可

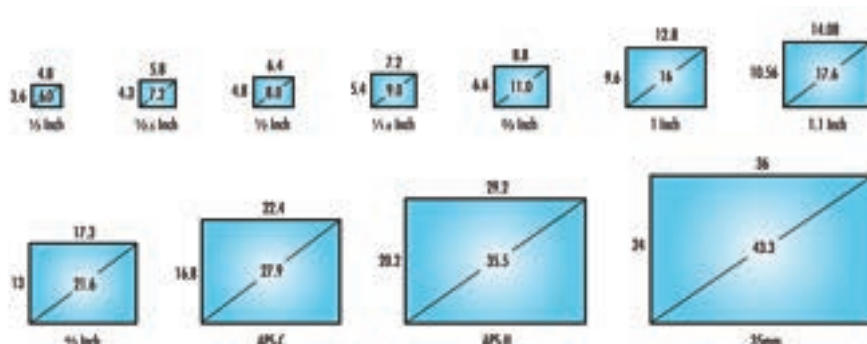


図1 一般的なマシンビジョンカメラのセンサフォーマット (提供: エドモンド・オプティクス社)

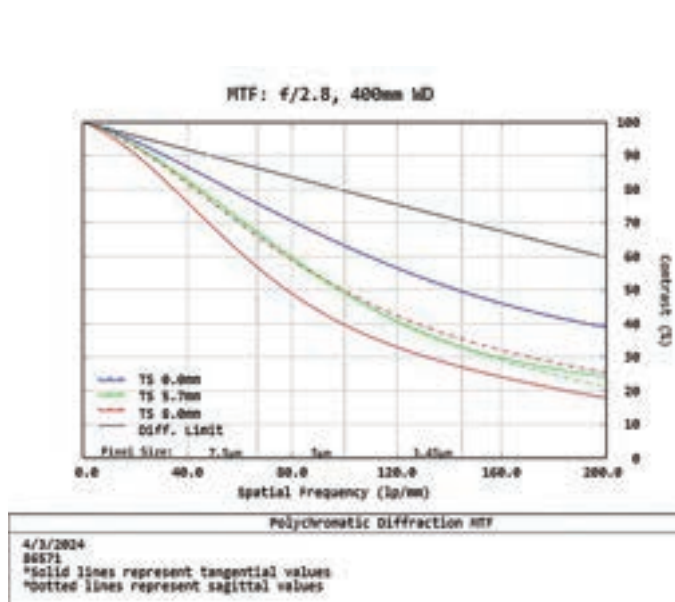


図2 レンズのMTF曲線の例。異なる空間周波数、すなわち、撮影対象物体のフィーチャサイズにおいて、達成可能なコントラストのレベルを示す(提供：エドモンド・オプティクス社)

主要なレンズパラメータ

以上の手順でレンズを選択したら、アプリケーションの要件を満たしていることを確かめるために、性能曲線を参照する。まず確認する最も重要な曲線は、変調伝達関数(MTF)曲線で、その定義は次のとおりである。

変調伝達関数。変調伝達関数(Modulation Transfer Function : MTF)は、空間周波数(解像度)の関数として、レンズがコントラストをどのように再現するかを表す、情報密度の高い指標である。

図2は、センサチップの任意の箇所におけるコントラストと空間周波数の関係を表している。マシンビジョン目的で必要となるおおよその最小コントラストは、20%である。これに基づき、20%のコントラストにおける空間周波数として、レンズ性能を大まかに定義することができる。このグラフから、イメージ領域(すなわちイメージセンサ上)において最も性能が低いフィールド(ここではチップの中心から8mmのコーナー部)は、20%のコントラストで約175lp/mmであることが、外挿によって推定できる。レンズ倍率をこれに乗算するだけで、これを物体領域に変換することができる。

被写界深度。アプリケーションの要件によっては、所定のWDとF値におけるレンズのDOFも知りたい場合がある。レンズのDOF曲線の例を図3に示す。

MTF曲線と同様に、Y軸はコントラストである。ただし、DOF曲線のX軸は、作動距離のずれである。このグラフにおいて、0.0のポイントは最良フォーカスを表し、X軸に沿った+/-の距離は、イメージのフォーカスが維持される深度を表す。これは、特定の解像度要件(この例では20lp/mm)で定

能性がある。しかし、小さすぎるものを選択すると、センサがカバーされず、ビネット(口径食、定義は以下のとおり)が発生する。

- ・ビネット—個々のレンズ素子の縁や機械的絞りによってレンズシステムの外側を通る光線が遮られ、センサに到達しない結果として生じる現象。ここで、仕様表を分析して、1つ前

のステップで定義したパラメータにレンズが対応するかどうかを確認することができる。WD/FOVの要件に関連する情報が、提供されている仕様の中に見つからない場合は、メーカーに問い合わせる。それらのグラフを入手するか、光学ソフトウェアが自分で使用できる場合は、ソフトウェアに入力する数値を問い合わせるとよい。

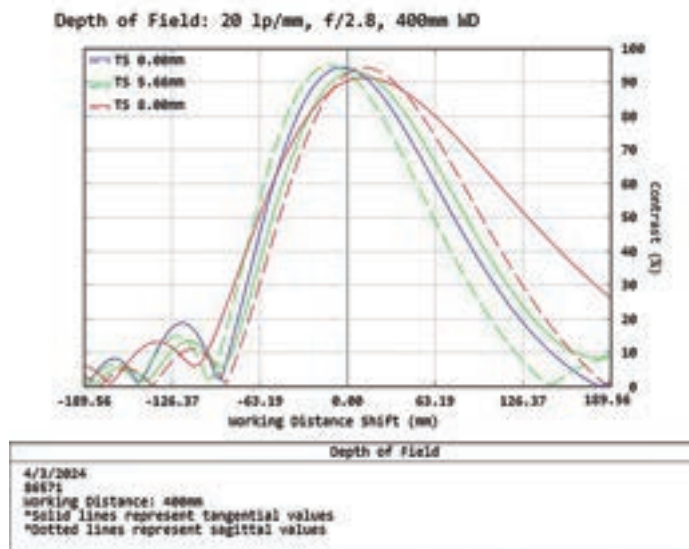


図3 レンズの被写界深度曲線。レンズの作動距離のずれがイメージの焦点に与える影響を、コントラスト(パーセント単位)で表している(提供：エドモンド・オプティクス社)

義され、一般的には20%のコントラストにおいて定義される。

与えられたDOFが十分でない場合は、レンズのF値($f/\#$)を大きくすることによってその値を大きくすることができる。このパラメータの定義は以下のとおり。

- ・F値 - 全体的な光スループット、DOF、所定の解像度におけるコントラストを生成する能力を制御する、レンズの設定。

F値を変更することの影響を、p15の表にまとめて示す。上の行はF値が大きくなった場合(Λ)、下の行は、F値が小さくなった場合(V)に、各パラメータが増加/改善するか(Λ)、それとも減少/悪化するか(V)を示している。

F値が小さなレンズほど高速で、より多くの光をシステムに通すことができ、F値が大きなレンズほど低速で、光スループットは低いと考えられている。図4は、先ほどと同じレンズを $f/2.8$ の代わりに $f/8.0$ で使用した例である。

このグラフでは、作動距離のずれのシミュレーション値が先ほどのグラフよりもかなり大きい(DOFは2~3倍)。しかし、解像度はやや低くなっている。

F値をさらに大きくしていっても、同じ傾向が観測される。解像度とDOFの適切なバランスは、アプリケーション毎に見定める必要がある。

陥りがちな落とし穴

ビジョンシステム設計において最も陥りがちな落とし穴の1つは、レンズとカメラに十分なスペースを用意しないことである。一般的に、大半のレンズの最小作動距離は、中程度の焦点距離(8~25mm)に対して100mm、焦点距離がそれよりも長い場合は最大で750~1000mmである。WD:FOVを

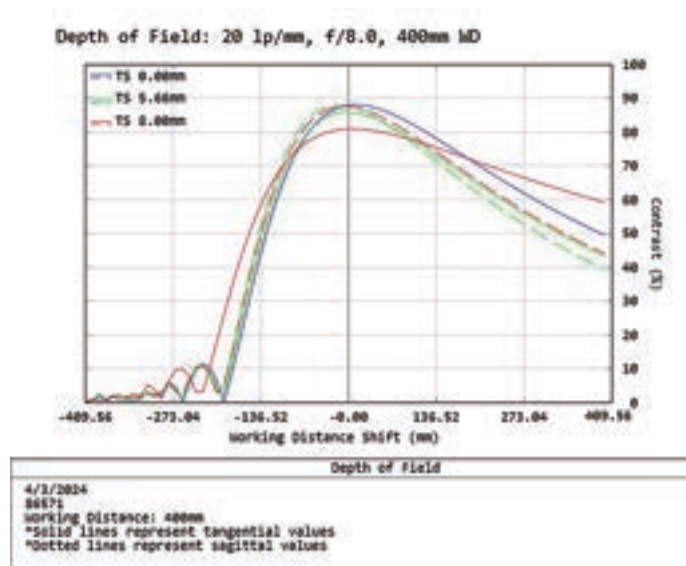


図4 図2および図3と同じレンズを $f/2.8$ の代わりに $f/8.0$ で使用した場合の被写界深度曲線(提供: エドモンド・オプティクス社)

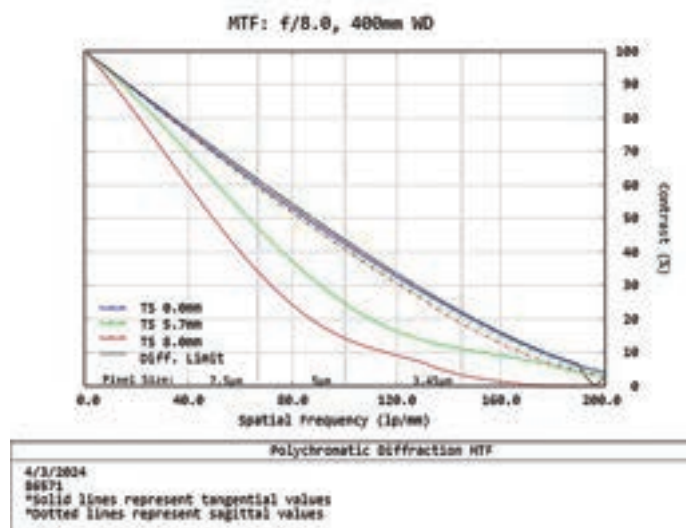


図5 図2および図3と同じレンズを $f/2.8$ の代わりに $f/8.0$ で使用した場合のMTF曲線(提供: エドモンド・オプティクス社)

4:1とするのが一般的な経験則である。これは万能の解決策ではないが、これを基準として採用することで、将来的な頭痛の種を回避することができる。良いマシンビジョンレンズは高価かもしれないが、フルカスタムのソリューションほど高価ではない。

結論

レンズの選択は、出発点がわからなければ気が重い作業かもしれない。微

妙な判断が必要で、実験室環境での試行錯誤が必要になる場合もある。正しいレンズソリューションの選定に悩む場合は、イメージングレンズのメーカーにガイダンスやアドバイスを求めてほしい。

著者紹介

クリストファー・ラッゼ(Christopher Razze)は、米エドモンド・オプティクス社(Edmund Optics)のマシンビジョンセールスエンジニア。