

レンズ選択—システム全体を念頭に

クリス・マクルーン

ビジョンシステムを成功に導くために、開発者はプロセスのできるだけ初期の段階で、システムのカメラとレンズを正しく適合させる必要がある。

ビジョン／イメージングシステムは、まさにシステムである。複数のコンポーネントが連携して動作することによって、エンドユーザーに対するソリューションが提供される。それらが適切に動作するには、すべてのコンポーネントが適切に適合していなければならない。カメラとそのイメージセンサは、ビジョンシステムの重要な要素である。しかし、それらに適切なレンズが組み合わされていないならば、ビジョンシステムの開発者は、自分自身だけでなく、最終的には顧客をも失敗へと追い込んでしまう。タイミングがすべてというのは、私たちの人生のあらゆる側面について言えることだが、レンズ選択も同様である。ビジョン／イメージングシステムの開発プロセスにおいてレンズと光学系の選択は、早ければ早いほど良い。

共通の評価基準

画質は、ビジョンシステム用のレンズを選択する際の1つの出発点である。「システムインテグレータはまず、対象のイメージングシステムで必要となる画質を慎重に定める必要がある」と、米カルル・ツァイス社(Carl Zeiss)の産業用レンズ担当者であるシルビア・エーインガー氏(Sylvia Ehinger)は述べた。「レンズは、イメージングシステムの中のかかなり複雑なアナログコンポーネントで、センサが進化してますますピクセルサイズが縮小してフォーマットサイズが拡大していくにつれて、イ



図1 「TCEL」シリーズは、テレセントリック光学系と液体レンズ技術の組み合わせによって、DOFが大幅に向上されている。(写真提供:オプトエンジニアリング社)

メージングシステムにおけるレンズの役割はこれまで以上に重要になってくる。最大限の性能を確保するために、時間をかけてレンズ選択を行うべきである。レンズがイメージングシステム全体の性能に与える影響を理解することが、システム統合を成功させるために非常に重要である」(エーインガー氏)。

センササイズも、レンズと光学系の選択を左右する。「センササイズがわかるように、必ず最初にカメラを選択することだ」と、米コンピュータ・オプティクス・グループ社(Computar Optics Group)でイメージング・技術部門のセールス及びマーケティングマネージャーを務めるテリー・セキヤ氏(Terry Sekiya)は述べた。「次に、所望の画角(Field Of View : FOV)と作動距離が得られていることを確認する。FOVと作動距離の組み合わせに

よって、レンズの最適な焦点距離が決まる。また、画像に必要な被写界深度(Depth Of Field : DOF)が得られるカメラとレンズの組み合わせを、必ず使用するようにする」(セキヤ氏)。

当然ながら、どのようなビジョンシステム実装でもそうであるように、評価基準は用途によって異なる。米アーチャー・オプティクス社(Archer OpTx)の国際セールスマネージャーを務めるジャネイル・ローリン氏(Janeil Lorin)は次のように述べた。「サイズ／重量が重要な用途もあれば、コストは問わないからとにかく解像度が求められる用途もある。ひずみや色バランスに非常に厳しい要件が課される場合もある。顧客には対象用途に関する知識があり、当社にはイメージングに関する知識がある。従って、顧客が優先順位を当社に伝えてくれることが重要

だ。そうすれば、トレードオフを一緒に検討して、用途の実際のニーズを満たす適切なソリューションにたどり着くことができる」。

米エドモンド・オプティクス社 (Edmund Optics) のイメージングセールスオペレーション担当マネージャーを務めるニック・シシュカ氏 (Nick Sischka) は、「具体的な評価基準は用途によって変わる可能性があるが、一般的にどの用途にも共通する評価基準がいくつか存在する。当社はこれを、イメージングシステムの基本パラメータと呼んでいる」と付け加えた。

1つめはFOV、すなわち、検査対象物のサイズだと同氏は述べた。「通常、エンドユーザーがその他の条件は何もわからないという場合は、FOVがほぼ必ず当てになる」と同氏は言う。しかし、その値は必ずしも単純明快ではない。使用するカメラセンサのアスペクト比と、対象物の位置の不確かさによって、この値の正確な調整は難しくなる可能性があることに注意する必要がある。2つめは、レンズから対象物までの距離を表す作動距離である。

3つめは解像度で、最もよく議論される項目である場合が多い。これは、文脈によって全く異なる意味を持ち、対象物上の解像可能な最小フィーチャサイズ、カメラの解像度 (ピクセル数/ピクセルサイズ)、あるいは、レンズの解像度 (レンズの変調伝達関数 [Modulation Transfer Function : MTF] と言ったほうが通常は適切である) を指す場合がある。4つめはカメラのセンササイズで、これに作動距離とFOVを組み合わせることで、対象用途に必要なレンズの焦点距離が決まる。

最後に検討するパラメータは、DOF である。「この評価基準は、焦点を再

度合わせることなく作動距離を変化させた場合の、レンズの解像度 (MTF) の変化を表す」とシシュカ氏は述べた。平らな物体を検査する場合など、一部の用途ではこのパラメータはほとんど関係ないと同氏は付け加えた。しかし、これが最も重要な仕様となる用途も存在する。

ヴァイ・エス・テクノロジーの製品開発部門ディレクターを務めるユウジ・スガハラ氏によると、バランスの取れた安定した画像をキャプチャするレンズを選択するための重要な評価基準には、対象物の検査に必要なピクセル数、必要なピクセル数と物体面に基づく適切なセンササイズと倍率、作動距離、照明などがあるという。

米シュナイダー・オプティクス社 (Schneider Optics) の最高経営責任者 (CEO) を務めるスチュアート・シンガー氏 (Stuart Singer) も、ピクセルサイズについて次のようにコメントした。「レンズを選択した後にレンズ性能がピクセルサイズと整合するように、(ビジョンシステム設計者は) 選択したカメラのセンサ上の個々のピクセルサイズを考慮に入れる必要がある」。

米シーア・テクノロジーズ社 (Theia Technologies) のビジネス開発担当副社長を務めるアンドレア・ヴァン・ランディングハム氏 (Andrea Van Landingham) は、次のように述べた。「インテグレートはまず、カメラのセンササイズをレンズのイメージフォーマットに合わせて、レンズからのイメージサイズがセンサ全体をカバーして、暗角 (ダークコーナー) が生じないようにする必要がある。2つめに、鮮明な画像を確保するために、レンズがセンサのピクセルサイズを解像できるかどうか注意を払う必要がある。言い換えると、レンズのMTF解像度が、センサのピ

クセルサイズによって求められる性能に合致していなければならない。単純に5メガピクセルのセンサに対して5メガピクセル定格のレンズを選択するだけでは十分ではない。5メガピクセルのセンサのピクセルサイズは、センササイズによって異なる可能性があり、メーカーはセンササイズを仮定して、レンズのメガピクセル定格値を選択しているためである」。

「3つめに、レンズが許容範囲の性能を発揮できる最小距離が、対象用途で求められる距離に合致しているかを確認する必要がある。4つめに、動作する波長領域を定めて、その光条件下で優れた性能を示すレンズを選択する必要がある。最後に、カメラ解像度、作動距離、レンズのFOVまたは焦点距離など、対象用途のパラメータが、(システム内で) 連携して動作する場合に、対象用途のニーズを満たす、適切な画像解像度とカバレッジエリアが得られることを確認する必要がある」とヴァン・ランディングハム氏は続けた。

韓国ビューワークス社 (Vieworks) の光学イメージング部門ソリューションビジネスTFチームに所属する主席リサーチエンジニアであるケリー・キム氏 (Kelly Kim) は、光学システムを設定する際の重要な要素は、最小欠陥サイズによって異なる可能性があると考えている。「最小欠陥サイズが定義されたら、カメラ、レンズ、ライトが選択されて、それを基に解像度が確定する」と、同氏は述べた。解像度が同じでも、カメラ、レンズ、ライトの設定によって検出能力は異なる可能性がある、同氏は付け加えた。「開口数が高いレンズを選択すると、検出能力を最大限に高めることができる。倍率が高いレンズを選択すると、FOVが小さくなるために、必然的に光学部品の



図2 「ELM-25-2.8-18-C」レンズは、焦点距離が25mm、F値は2.8、ピクセルサイズは $2.4\mu\text{m}$ で、1.1インチのセンササイズとCマウントのカメラに対応する。(写真提供:オプトチューン社)

数は増加する」(キム氏)。

米ナビター社(Navitar)のビジネス開発副社長を務めるクレイグ・フィッツジェラルド氏(Craig Fitzgerald)は、光学系を選択する際に検討すべき点として、以下の項目を挙げた。

- ・ほとんどの場合、カメラを先に決定してから光学系を選択する。
- ・カメラのセンササイズと解像度(カメラのメガピクセル値)によって、適切なレンズが決まる。
- ・カメラマウントは、レンズ選択に影響を与える可能性がある。
- ・検査するサンプルと検査の細かさも、光学系の選択に影響を与える。

「多くの要素が、システムの使用法やシステムの制約に依存する」と、タムロンの米国法人(Tamron USA)で、ビジネス開発、ブランニングと管理、産業用光学系担当マネージャーを務めるサトキ・トリゴエ氏は述べた。「画角と集光能力は必ず既知で、画質は必ず主要な懸案事項になると当社は考えているため、中心から四隅までのシャープネス(尖鋭度)に優れ、所望のFOVと輝度を備えるレンズを選択することが、第1の基準となる可能性が



図3 「Xenon Jade」シリーズは、ソニーの第4世代「Pregius S™」などの新しいセンサを対象とした一連のレンズで構成されている。(写真提供:シュナイダー・オプティクス社)

高い。最大解像度出力も重要な要素である。当然ながらサイズも、システムにサイズ制約がある場合は、基準の1つになる可能性がある。最後に、用途と環境によって求められる許容誤差も、目的に最も適したレンズを左右する要素となる」(トリゴエ氏)。

結局のところ、重要なのは入念な下調べである。「単純化しすぎているように聞こえるかもしれないが、光学系をセンサと用途に確実に適合させることが重要だ。レンズはどれも同じではない。レンズが光学的にシステム要件を確実に満たすように、調査を行うことが必要だ」と、富士フィルムの北米現地法人(FUJIFILM North America Corporation)の東部地区担当セールスマネージャーを務めるユージン・ダイアス氏(Eugene Dyas)は述べた。

ソリューション

レンズと光学系を選択する際には、無数の企業と製品が選択肢として存在する。以下では、市場で提供されているいくつかの製品とその仕様の一部を紹介してから、ビジョン/イメージングシステムのためのそうした重要な要素の選択に対する、一般的なアドバイスを示す。

伊オプトエンジニアリング社(Opto

Engineering)が提供する「TCEL」シリーズ(図1)は、テレセントリック光学系と液体レンズ技術の組み合わせによって、DOFが大幅に向上されている。DOFと倍率の関係から、これは画角が小さい場合に対して特に重要である。TCELレンズは、その光学設計によって、動作範囲全体にわたるテレセントリシティとひずみという点での光学性能が確保されるため、エレクトロニクスや半導体分野、自動車、製薬などの用途に対して適している。

スイスのオプトチューン社(Optotune)でシニアグローバルセールスマネージャーを務めるマルコ・ピゴッツィ氏(Marco Pigozzi)によると、固定焦点レンズがマシンビジョン業界で広く使われているが、それらは被写界深度が限られている場合が多く、複数の用途においてそれが問題になっているという。この問題を解決するために、「オプトチューン社は、最適化された統合型ソリューションを開発した。幅広い用途に対応できるように、焦点が調整可能なレンズを搭載している。焦点可変レンズ技術の主要なメリットは、被写界深度が深く、焦点合わせが数ミリ秒以内と高速で、寿命が長く、精度が高いことである」とピゴッツィ



図4 「TECHSPEC® LHシリーズ固定焦点レンズ」は、APS-Hフォーマットの120メガピクセルセンサ用に設計された、超高解像度の大型レンズである。(写真提供:エドモンド・オプティクス社)

氏は述べた。

オプトチューン社の「ELM」シリーズは、センササイズが最大1.1インチのSマウントとCマウントのカメラに対応し、焦点距離は5~300mmである。「ELM-25-2.8-18-C」レンズ(図2)は、焦点距離が25mm、F値は2.8、ピクセルサイズは $2.4\mu\text{m}$ で、1.1インチのセンササイズとCマウントのカメラに対応する。ロボットビジョン、バーコード読み取り、パッケージ仕分け、ボトル検査など、多数の用途に使用することができる。

シュナイダー・オプティクス社の「Xenon Jade」シリーズ(図3)は、マシンビジョン分野での使用に向けて最適化されており、ソニーの第4世代「Pregius S™」などの新しいセンサを対象とした一連のレンズで構成されている。

エドモンド・オプティクス社が提供する「TECHSPEC® LHシリーズ固定焦点レンズ」(図4)は、APS-Hフォーマットの120メガピクセルセンサ用に設計された、超高解像度の大型レンズである。LHシリーズは、 $2.2\mu\text{m}$ ピクセルサイズを採用するCanon 120MP CMOSセンサをサポートする。これらのレンズは、APS-Hセンサ(対角35.5mm)や、より大きな35mmのフ

ルフレームセンサ(対角43.3mm)に対応する。FマウントとTFL-IIマウントのバージョンが提供されている。

コンピュータ・オプティクス・グループ社が提供する、「MPT」シリーズの45メガピクセル、1.4"のマシンビジョンレンズ(図5)は、最新の産業用CMOSイメージセンサの機能を最適化するように設計されたコンパクトで軽量のレンズである。フローティングデザインにより、任意の作動距離で高い性能を実現する。このレンズには、ハイレベルな収差補正とレンズ調芯・調整技術が搭載されている。高屈折率ガラスと低部分分散ガラスを適切な位置に配置することにより、像面湾曲と非

点収差を徹底的に補正する。

カール・ツァイス社は最近、産業用Cマウントアプリケーションを特に対象とした「Dimension」という新しいレンズファミリー(図6)をリリースした。これらのレンズは、最大で4/3型までのイメージセンサ用に設計されており、コンパクトで軽量の堅牢なアルミ管体が提供されている。Dimensionファミリーは、8~50mmの6つの焦点距離で構成されている。革新的な調整機構により、カメラマウントにおける誤差を簡単に補正できる。Cマウントの一般的なネジ接続に加えて、絞りとフォーカスリングに固定ネジが付いており、高い安定性を保証するとともに、設定



図5 「MPT」シリーズの45メガピクセル、1.4"のマシンビジョンレンズは、最新の産業用CMOSイメージセンサの機能を最適化するように設計されたコンパクトで軽量のレンズである。(写真提供:コンピュータ・オプティクス・グループ社)



図6 「Dimension」レンズファミリのレンズは、最大で4/3型までのイメージセンサ用に設計されており、8～50mmの6つの焦点距離で構成されている。(写真提供:カール・ツァイス社)

を正しい位置に確実に維持する。これらのレンズは、最小で $2.0\mu\text{m}$ までのピクセルサイズに対応する解像度を備える。中心からエッジに至るまで低ひずみ(2%未満)で高コントラストの画像が得られるため、要件の厳しい産業用途に適したレンズとなっている。

富士フィルムの「Fujinon CF-ZA-1S」シリーズ(図7)は、1.1型で $2.5\mu\text{m}$ ピクセルピッチ(23メガピクセル相当)の大型で高解像度のイメージセンサに対応する。周辺光量比90%以上を実現し、画像中心部から周辺部まで明瞭な画像が得られる。

ビューワークス社と独シュナイダー社(Schneider-Kreuznach)が共同開発

した「VEO」レンズシリーズ(図8)は、Viewworks TDI(VTDI)カメラの感度と光波長に合わせて最適化されている。VTDIカメラとVEOレンズの組み合わせによって最大限の性能が発揮されるように、カメラ仕様は、レンズ設計プロセスの最初の段階から慎重に検討されている。

ナビター社は最近、「Super Wide Angle 4K Imaging Lens」(超広角4Kイメージングレンズ)(図9)を発表した。産業やライフサイエンス分野で顕微鏡を使用する顧客に対し、低倍率で高解像度のイメージングのための代替手段を提供することを目的に設計されている。このシステムは、各画像でよ

り多くのサンプルをキャプチャするための広いFOVを備えており、より高速な物体検出を可能にしてスループットを向上させる。

ヴィ・エス・テクノロジーの「VS-HX」シリーズの大型素子対応8K解像力固定焦点レンズ(図10)は、最大32mmのイメージサークルと $2.74\mu\text{m}$ のピクセル解像度をサポートして、高い鮮明度を達成する。このレンズシリーズは、高速、高分解能を必要とする用途向けに設計されている。コンパクトで軽量化により、限られたスペースに組み込むことができる。

タムロンの産業用固定焦点レンズ「SMA11F12」(図11)は、可視光から



図7 「Fujinon CF-ZA-1S」シリーズは、1.1型で $2.5\mu\text{m}$ ピクセルピッチ(23メガピクセル相当)の大型で高解像度のイメージセンサに対応する。(写真提供:富士フィルム北米現地法人)



図8 「VEO」レンズシリーズは、Viewworks TDIカメラの感度と光波長に合わせて最適化されている。(写真提供:ビューワークス社)

SWIR領域までの広い範囲で高い分光透過率を実現しつつ、その領域全体でピントずれを極限まで抑制する。400～1700nmの波長領域にわたって、可視光領域とSWIR領域の間のピントずれが大幅に低減される。タムロン独自のレンズコーティング技術により、約80%の一貫した分光透過率が、可視光からSWIRまでの全波長領域で保証される。このレンズは、ピクセルピッチ5 μ mのイメージセンサに対応する。

シーア・テクノロジー社のCマウントレンズ「MY125」(図12)は、樽型ひずみを生じることなく、最大135度の水平FOVを提供する。樽型ひずみを光学的に補正するシーア社の特許であるLinear Optical Technologyが採用されており、ソフトウェアは不要で、ソフトウェア補正に本質的に伴う遅延も生じない。MY125レンズは、可視光で200lp/mmの解像性能を備え、最短撮影距離は10cm、パンフォーカス範囲は0.3mから無限遠である。手動



図9 この「Super Wide Angle 4K Imaging Lens」は、産業やライフサイエンス分野で顕微鏡を使用する顧客に対し、低倍率で高解像度のイメージングのための代替手段を提供する。(写真提供:ナビター社)



図10 「VS-HX」シリーズの大型素子対応8K解像力固定焦点レンズは、最大 ϕ 32mmのイメージサークルと2.74 μ mのピクセル解像度をサポートして、高い鮮明度を達成する。(写真提供: ヴィ・エス・テクノロジー)

アイリスまたはDCオートアイリスの最大1/2.5インチのセンサに対応し、CSマウント版(SY125)も提供されている。「このレンズは、1/2.5インチまでのサイズと5メガピクセルまでの解像度のセンサに対して、適切な選択肢だ」とヴァン・ランディングハム氏は付け加えた。

アーチャー・オプティクス社は、「PerfectLens SIVA」(System Imaging Vision Assembly)シリーズ(図13)を提供している。このシリーズは、コンピュータ設計モデルに非常に近い形で機能する。高解像度広角(250/300lp/mm、10メガピクセルセンサ)、高解像度狭角(350lp/mm、15メガピクセルセンサ)、高解像度(225lp/mm、3メガピクセルセンサ)のカメラレンズが提供されている。

レンズ選択に対するアドバイス

フィッツジェラルド氏は、最初にその分野の専門家に相談することを提案した。「専門家との議論は、対象用途に対する正しいカメラとレンズの組み合わせを特定する上で役に立つ可能性がある。また、専門家が推奨したカメラとレンズを評価することも、適切な

ソリューションを構築する際にミスを犯す可能性を取り除くために有効である」と同氏は述べた。

ビジョンシステムのレンズを選択するには多くの検討項目があり、中でも重要なのが、対象用途に必要なレンズの種類を把握することである。システム全体を念頭に置くことが、良い結果につながる。「顧客のシステムと環境全体を議論することが当社にとって非常に重要だ。ビジョン/イメージシステムのエラーを引き起こすいくつかの外的要因が存在するためである」とスガハラ氏は述べた。

「対象とする物体を必ず十分に理解することだ」とシシュカ氏はコメントした。「エッジケースに相当する状況が、必ず最も判断が難しいので、合否の間のしきい値を正確に把握していることが、システムの成功に大きな影響を及ぼす可能性がある。また、システムレベルのすべての制約を理解するよ



図11 産業用固定焦点レンズ「SMA 11F12」は、可視光からSWIR領域までの広い範囲で高い分光透過率を実現しつつ、その領域全体でピントずれを極限まで抑制する。(写真提供:タムロン)

うに努めて、『光学系で補正できるだろう』という仮定の下で、他の至る箇所で妥協することのないように、注意する必要がある」(シシュカ氏)。

トリゴエ氏は次のように付け加えた。「特定のプロジェクトや目的に何が実際に必要かを評価して、それに基づいて選択を行うことだ。必要以上のものを選択してはならない。レンズの仕様が、理論的に『良さそうに見える』からといって、必ずしも『良さそうに見える』結果が得られるとは限らない。一方の選択肢がもう一方の選択肢よりも最初はコストが低かったとしても、必要な機能を果たさない場合、しかもそれが長い期間にわたって続くと、長い目で見れば実際にはより高いコストがかかってしまう。何が実際に必要で、何が最終的に得られるかを意識して、両者が同一になるようにすることだ」。

ローリン氏は、「レンズに必要以上の要件を課さないように注意することだ。デジタルシステムのMTFについて調べて、デジタルイメージングシステムに対して何が合理的に期待できるかを学ぶことを推奨する。ピクセル1個では何も見えないので、そこでMTFを定めることには何の意味もない。データの処理方法によってはピク



図13 「PerfectLens™ SIVA」(System Imaging Vision Assembly)シリーズは、コンピュータ設計モデルに非常に近い形で機能し、高解像度広角、高解像度狭角、高解像度のカメラレンズを提供する。(写真提供:アーチャー・オプティクス社)

セル2個でも疑問だ」と言い添えた。

繰り返しになるが、タイミングがすべてで、レンズの仕様を開発プロセスの初期の段階で定めることが、後の時間短縮とコスト削減につながる。ヴァン・ランディングハム氏は、「レンズ選択は後付けになる場合が多いが、最初にレンズ要件を検討することを強く推奨する。正しい解像度、センササイズ、ピクセルサイズでレンズをカメラに組み合わせて、そのすべての要素が特定

用途の性能に与える影響を調査してほしい。それによって、遅延やコストのかかる誤りを防ぐことができる」と述べた。セキヤ氏はこれに付け加える形で、「先にカメラを決めてからレンズを決めることだ。MTF、すなわちコントラストに優れたレンズを必ず使用する。MTFが高いほど、画像のコントラストは高くなり、最適な解像度が得られる。次に、レンズの解像度がカメラに対して必ず十分であるようにする。レンズのピクセルピッチがカメラ上のピクセルピッチと等しいか、それよりも小さいことを必ず確認する。最後に、レンズのフォーマットサイズがカメラのセンサフォーマットと等しいか、それよりも大きいことを確認する」と述べた。

ダイアス氏は、「光学系についてはまだかなり誤解がある。レンズを高く見積もっても低く見積もってもいけない。私は、『システムは、使用するガラス以上に良くはならない』という古い格言が好きだ」と付け加えた。



図12 Cマウントレンズ「MY125」は、樽型ひずみを生じることなく、最大135度の水平FOVを提供する。(写真提供:シーア・テクノロジーズ社)