

光学レンズの変遷

土 肥 寿 秀

最近何かと温故知新という言葉が語られるようになってきた。世の中が何か技術の方向を模索しているのかまたは価値観の変化が起こってきたのか、いずれ両方のことから何か違った、あるいはもうすこしすっきりした技術の見届けが必要になってきたのは確かなようだ。さて、光学技術においてもこのテーマが取り上げられることになった。そのなかでレンズについて、この古くてさりとて必要不可欠の光学要素あるいは機能のありかたについて、筆者なりの知見を述べる。そもそもレンズと上段に構えて聞けば、はっきりと定義のわからないことになるが、言葉そのものは豆の形をしたものというのが語源らしい。単に光をあつめるための手段から「結像」という像情報を扱う手段としてレンズをとらえてみる。

1. レンズの目的別発展

レンズの目的は古くは望遠鏡、拡大鏡、顕微鏡、眼鏡などとしたいわゆる「スコープ情報」として人間の視覚機能を補助したりまたは未知なる視覚情報を提供することにあった。ここでは日常体験できない視覚情報を個人に提供するというところで産業としても大いに発展することになった。

次に像の記録材料が開発され、今まで眼でしか認識できなかった視覚情報の代りに銀塩材料でこの情報が記録できるようになった。このことは視覚情報の記録、保存、再現、複製というものの必要性を生じ、いわゆる写真機、写真、映写機、投映機を作り出すことになる。このことは従来の眼に代る「記録材料にマッチする結像系としてのレンズ」を生み出すことになる。このころから

いわゆる記録するための結像レンズとそれをモニターするための表示系としてのレンズが必要となり、いわゆる「画像記録システム」としての役割が必要になってきた。ここではレンズの役割は単に結像するための機能を満たすためだけではなく、像情報をいかに扱って記録することができるかに応えることが要求されてきた。レンジファインダーカメラ、2眼レフ、1眼レフ、映画撮影機などが銀塩記録材料の発展とともに商品化され、いわゆるカメラ産業として形成されていった。

このような画像記録システムはその後電子管による撮像システムのなかでもほとんど同じく応用されていくことになる。しかしながらこのシステムはテレビカメラとして通信システムの発展とともに銀塩による画像記録システム産業とはべつの電子映像産業として道をとり発展していくことになる。

これらの2つの流れはその後も像情報を扱うレンズとしてはまったく同じ技術の流れをとってきた。すなわちレンズはそれぞれのシステムにあつて各構成機能および要素に「最も適した像情報の供給手段」として、例えばイメージフォーマットとの最適化、記録材料あるいは撮像素子の感度とのマッチング（大口径化）、モニターシステムとの最適化などが図られる。またレンズ特有の望遠化、広角化、ズーム化といった「画像情報記録の多様化」も図られてきた。

この間に発展したレンズ設計技術、光学材料技術、加工技術、評価技術などの進歩は民生機器産業の支えとともにわが国では大発展を遂げた。

一方、このような画像記録システムのなかでのレンズの最適化方向とは別に、結像という物理的能力そのものを追及する努力もはらわれてきた。結像能力には当然物

ミノルタ(株)高槻研究所 (〒569 高槻市桜町 1-2)
E-mail: dohi@minolta.or.jp

理的限界が存在するわけである。すなわちいかにレンズで無収差の状態を作り出しても光の回折現象によって幾何学的な結像に限界が生じる。このことはレンズの分解能に制限があることを意味している。この克服はレンズの開口を上げるか使用波長を短くすることによってのみ可能である。従来の顕微鏡では実用上、理論的分解能を達成することができても、それが人間の眼の視野と分解力に必要な結像能力を提供することさえできれば十分であるという能力の目標が設定されていた。

しかしながら理論的分解能を有したレンズがどれ位までこの画像情報を取り出したり記録したりする能力を拡大できるのか、その限界を規定することは非常に困難である。レンズ仕様では単に解像力やコントラスト（あるいはMTF値）とレンズの必要画角としてしか表現していない。このレンズの大変重要であるが曖昧模糊としたテーマが現代の半導体製造用露光機の主テーマにもなっている。半導体デバイスの焼付けパターンの必要精細度と面積はデバイスの能力そのものを決定している。レンズによる超高精細パターン大面積一括露光の実現によって半導体デバイス製造技術が実現し、近年産業化された。が、しかしこの結像能力の物理的限界を予測するのはいまだに困難である。

これまでレンズの最も得意とする二次元の情報を同時に並列的に結像するという手段としてみた場合であったが、一方では二次元情報の同時性が必ずしも必要でなかったり、あるいは二次元情報を扱うためには空間的にも立体的スペースの占有が必要になりそのことが必ずしも有利ではなくあることがある。二次元情報の一部を時間軸方向にもたせることによって、システムの情報伝送能力の帯域や空間の負担を減少させたりして総情報量を合理的に増すことができる。これらは一般に走査露光光学系と呼ばれる。

電子写真分野で最もよく使われている複写光学系は短冊状の露光で、原稿の短辺側をスキャンすることによって結果的に原稿の長辺側情報を時間的に重畳して感光材に記録してゆく。そのことによって記録容量の増大や機械スペースの削減や総合複写スピードの改善がはかられる。また変倍系の場合も倍率変化と同時に露光原稿側スキャンと記録側のスキャンのスピードを倍率分変えることによって同様に上の記録方式が達成できる。これらはいずれもフォトリソ用露光光学系にも適用されたり、されようとしている非常に特徴的なレンズの結像系である。

近年通信を伴った電子情報産業の発展はわが国でもそ

の民生応用のために著しく発展してきた。そのなかで、レーザー光の出現によって時系列信号を電気信号ではなく直接変調したレーザー光で操作するシステムが発展してきた。これはレンズを使ってレーザー光を空間的に操作することによって実現される。従来のさまざまな直接信号記録あるいは読取り方式には電子機械的操作のために機構的限界からくる制限が生じる。光による伝送、記録、読取り法はこれらの問題を解決する方向を提案することができた。最も代表的でかつ特徴的であるのが以下に述べる光ディスクシステムとレーザースキャンニングシステムである。

光ディスクシステムの場合、ディスク上で回転系を使ってトラックを形成し情報の記録、再生を行うものである。その使用する光の波長の物理的短さのために集光されたビーム径は非常に小さく、高密度の信号の記録が可能になる。また逆に光をその記録された媒体から読み取るための検出プローブとして信号を取り出すことができる。そこでレンズは光ピックアップとして、非常に微細な記録トラックと信号発生源である半導体レーザーとを、またはトラック上の信号ピット情報と信号検知部とを空間的に非接触でかつ忠実に連結するフレキシブルな情報のインターフェイスを演じている。

光ピックアップで扱われる信号は単に情報信号だけではなく、同時にフォーカス方向やトラック方向の制御のための信号も同時に得られる。これらの情報はフィードバック信号として働き、光ピックアップ全体のオートフォーカスやトラック補正に寄与する。光ディスクシステムは記録媒体を回転系とトラックを使うという最も機械的に安定した方法を取り、一方高密度のためのその系の機械的不安定さをレンズで空間的に補償する新しい高密度信号記録、再生系を完成し産業化を達成することができた。同じく時系列信号で2次元画像を扱うために光によるスキャンニングシステムがある。すくなくとも二次元の画像を光学的走査によって時系列な信号に置き換えて読取りや記録するためのシステムがレンズ系で実現された。ポリゴンミラーによるビームの偏向方法が一般的であるが、これも二次元画像読取りあるいは再生のために必要な走査を達成するために、走査方向の角度に対して直線的な特性をもつ $f-\theta$ レンズが開発された。これはレンズに入斜する光束がその入斜角に対して一般の結像レンズが $\tan \theta$ の変換を行うのに対して単に θ に比例する変換系をとっている。また副走査方向に対して回転モーターの軸振れやポリゴン反射面の面振れがレーザーの走査ピッチの乱れを生じ、画像を乱す原因になる。

そこで走査の誤差を自動補正するための補償光学系がレンズによって達成された。レーザー光による走査をその走査特性や機械的不安定さを補償して画像の読取りや記録するための空間的信号伝送路を実現したものである。半導体レーザーを信号記録光源とした電子写真プリンターはその代表的な応用例である。

これら近代の情報産業と密着したレンズは周辺の技術の発展や市場の拡大とともに大いなる発展をすることになる。

2. 情報伝送手段としてみた場合のレンズ

上に述べたようにレンズは一方、このような産業目的別にではなく一般的に光学情報を空間的な信号として送信する空間伝送路として取り扱ってみることができる。レンズをその伝送容量という面からとらえてその能力別に分類してみると以下のようにまとめることができる。

最も簡単な光ディスクシステムの場合は時間的な情報容量がほとんどであるため、そのピックアップレンズの空間的伝送容量はビーム径とピットとのフォーカスおよびトラックずれを機械的補償するための空間的余裕との和ということになる。しかしこれは空間的情報連結能力をもつというレンズ特有の伝送系であることを意味している。

光走査光学レンズも空間的伝送容量は時間的伝送容量とともに走査方向に対する必要な解像力とその走査幅で決まる成分および機械的走査誤差補償のための付加的容量の和として見ることができる。

次に走査露光光学レンズであるが、走査露光域に含まれる面積と必要解像力とそのレンズの伝送容量として定義できる。

前に述べたスコープとしてのレンズは人間の眼に必要な空間情報伝送系であるので、必要空間伝送容量は伝統的には網膜の分解力とその面積によって決められる。

次に記録材料によって決定される写真記録系や電子画像記録系においてもそれぞれの記録系のもつ二次元記録容量によって必要な空間伝送容量が求められてくる。銀塩写真の場合はその感光材料の解像力と有効面積、撮像管の場合はその総走査線数と解像本数、個体撮像素子の場合はその総ピクセル数によってそれぞれの記録容量が決められる。そして基準となる記録系の容量はその時代の技術、市場の要請、あるいは商業的理由によって標準化されてきた。

最後にレンズのこのような空間的伝送容量の限界を追及したのものとして半導体露光用レンズが挙げられる。光

ステッパーの対物レンズで実現される露光パターンの精細度とその露光面積は現代では最も容量の大きい画像情報伝送路といえる。

ここで各々の伝送路で容量の拡大を予測するのがこの技術の最大の関心事である。少なくとも解像力に関してはその物理的な量が予測できる。一方伝送容量としてみたとときその伝送可能な面積に関しても重要であるが、これの予測の仕方が未解決という課題を現在もっている。

以上、レンズを空間情報伝送手段としてとらえ、その伝送容量別に分類してみたが、この特徴としてさまざまな伝送形態によっても実現できる伝送容量が大幅に異なることがわかる。しかしこれらの伝送形態はそれぞれの特徴をもっているためにその適応の多様性を生み各々独自の産業を興すことに寄与してきた。そしてこれらがそのなかでお互いに置き換わることなく、それぞれの産業のなかで最適の伝送容量を確立し発展をしているといえる。

3. 今日のレンズの課題

レンズのもっている潜在的能力について考えるとき常にその時代の周辺技術との融合が不可欠になっている。現在の高度情報通信社会の中でコンピューターワークステーションの個人レベルの普及は大きな技術展開の可能性を秘めている。それは個人レベルで情報の発信、受取りあるいは加工が自由にできるからである。前に述べた情報伝送容量という面からみた場合レンズのもつ潜在的能力はこれに因應するべくあるいは価値を上げるものとして十分に適しているものである。コンピューターシステムのもつ通信の双方向性、情報の加工可能性をそれに委ねたうえで空間情報伝送系としてのレンズの機能を多様に発揮することができる。以下に挙げる例¹⁻³⁾は非常に初歩的ではあるがひとつの方向を示唆したものと見える。

図1は従来の結像レンズに要求していた像面上での結像の直線性を改め、中心から任意の非直線性に置き換えたものである。画像を結像面中心にウエイトをつけ周辺を圧縮するよう歪曲収差を発生することによって実質的に限られた画像記録能力のシステムのなかで最大限の必要画像情報を供給しようとするものである。取り込まれた画像情報はその後容易に加工されたり、あるいは転送、再生されることになる。

同じような必要情報の最大限の供給方法として図2のようなレンズも挙げられる。これはアナモフィックレンズを用いて画像情報を水平成分と垂直成分に区別してウ

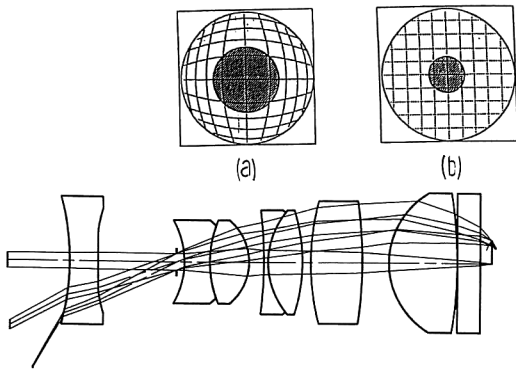


図1 歪曲レンズ，全画角 120° では(a)は得られた電子画像，(b)は再生像，光軸中心に向かって精細度が高い。

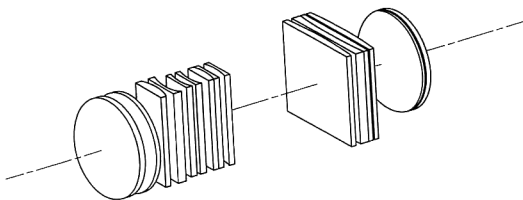


図2 スーパーナモフィックレンズ，縦，横倍率が約 $80:1$ に圧縮されている。

エイトをつけ，一方の情報を圧縮したものである。これも限られた情報処理系のなかで観察の方向に選択性を与え必要最大画像情報を供給しようとするものである。

図3は結像レンズの瞳面上で光軸を2つに分割し異なった瞳から得られる像情報を取り込もうとしたものである。それぞれから得られる電子画像は視差に対応した情報となり，その後容易に合成，加工される。最も代表的な応用として立体情報の抽出が挙げられる。

またコンピューターから出力される virtual な像をレンズで合成，再生し実世界画像情報と共有することも大いに期待される。そのほかコンピューターのもつ情報処理能力を最大限発揮するために最も適した情報入力系あるいは出力系としてレンズがその解を提供することが期待されている。今レンズがもっている情報伝送能力はこれらコンピューターの処理能力に対してはるかに余裕をもっているので大胆な試みが可能と思われる。

4. レンズとして追及されるべきこと

これまでは今までにレンズが実現してきた空間の情報伝送手段としての特徴を述べてきたが，レンズがもっている潜在的特徴としてさらに次のものがある。

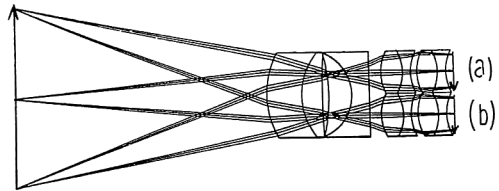


図3 ステレオビジョンレンズ，瞳を分割することによって(a)，(b)の異なった電子画像が得られる。これらは加工，合成されステレオ画像を創生する。

その第一に挙げられるのが情報伝送の双方向性である。光ピックアップのように比較的単純な光学系で実現しているが，さらなる情報の高度な双方向空間情報交換系として期待されるであろう。

次にレンズのもっている特徴にその空間情報伝送の多チャンネル性がある。結像情報とフォーカス情報を同時に伝送するオートフォーカスレンズや，空間的にシフトして2板あるいは3板でカラー電子画像を同時に記録，あるいは表示したりするレンズ系が代表的である。しかしこれは単に記録素子の不備を補って最適化しているにすぎない。今後さらなる応用展開が期待される。

また別の意味での特徴に空間情報の並列的伝送能力がレンズがもっていることがある。これは二次元マイクロレンズアレイといった非常に初歩的なもので実現されている程度でまだ有用なシステムが実現されていないが，レンズで大いに期待されるものである。

そのほか現在のレンズはその使用波長に対して他の情報伝送系と比較して幾何学的に異常に大きいことも問題視してもよいのであろう。可視域波長が $0.5 \mu\text{m}$ 程度に対してレンズの口径が数 mm から数十 cm であるとか，あるいは焦点距離にしても同等である。上記諸元のさらに短い数値を有した高度情報伝送系の実現も期待される。

以上レンズは空間情報伝送系としてとらえたとき，未知，未実現の項目がたくさんあり，多様な展開能力を潜在的にもつことから今後も新しい技術を開発することが期待される。

文 献

- 1) Y. Suematsu, *et al.*: "A wide angle vision sensor with fovea—design of distortion lens and the simulated images—," IECON '93, 1 (1993) 1770.
- 2) ミノルタ，鉄道総合技術研究所広報，1995年3月8日号。
- 3) H. R. McKinley: U. S. Patent No. 5122650 (1992).

(1997年1月7日受理)