

光軸制御型オプトメータの  
開発設計手法に関する研究

橋本 幸夫

光軸制御型オプトメータの  
開発設計手法に関する研究

福井幸男

# 目次

第1章 序論	1
1.1 本研究の背景と必要性	2
1.1.1 視覚障害が生じないVDT作業環境条件の究明	2
1.1.2 視覚情報処理機構の理解と製品開発への応用	4
1.1.3 実作業中における焦点調節機能測定の必要性	6
1.2 本研究の目的	8
1.3 本論文の構成	9
第2章 オプトメータ開発と新規機能の必要性	14
2.1 はじめに	15
2.2 従来の状況と光軸固定型オプトメータの開発	16
2.2.1 オプトメータの原理と装置化の歴史	16
2.2.2 調節応答測定のための光軸固定型オプトメータの開発	20
2.2.3 焦点調節機能から疲労指標の算出	26
2.2.4 光軸固定型オプトメータの測定上の問題点	30
2.3 光軸固定型オプトメータにおけるの視線拘束緩和の課題	32
2.3.1 測定時における視線方向の無拘束化	32
2.3.2 開発すべき光学系に必要な特性	35
2.3.3 リレー光学系の挿入によるオプトメータの光軸制御化	36
2.4 光軸制御型オプトメータ開発に関する設計支援上の課題	38
2.4.1 光軸操作型CADシステム開発の必要性	38
2.4.2 新規設計用CADシステム開発のための指針の必要性	40
2.5 第2章のまとめ	42
第3章 新規設計用CADの開発コンセプト	44
3.1 はじめに	45
3.2 従来のCAD方法論	47

3.2.1	形状モデラーを基本とした対象モデリング	47
3.2.2	設計技術のエキスパート化	49
3.2.3	設計診断や設計作業の論理操作によるモデル化	50
3.3	アイデアの展開と新規設計用CADへの応用	52
3.3.1	網羅的探索によるアイデアの発掘	52
3.3.2	異種機能の組合せによるアイデアの生成	53
3.3.3	3次元表示による理解とひらめきの促進	54
3.4	新規設計用CADの開発指針	57
3.4.1	特性比較に基づく設計者とCADシステムとの役割分担	57
3.4.2	工数比較によるプログラム化の判断基準	58
3.4.3	プログラム言語の特徴を生かした機能開発	62
3.5	第3章のまとめ	65
第4章	光軸操作型CAD GAUSSの開発	66
4.1	はじめに	67
4.2	従来の光学CADシステムの機能と限界	68
4.3	光軸操作型CADシステムGAUSSに必要な機能構成	70
4.4	光線追跡部GAUSS/Rに必要な諸機能と実現法	72
4.4.1	光学特性を保存した光軸方向変換操作機能	72
4.4.2	光学特性を保存した光路長変換操作機能	75
4.4.3	プログラムモジュール間での通信機能	79
4.5	三次元表示部GAUSS/Vにおけるデータ駆動型プログラミング	86
4.6	第4章のまとめ	91
第5章	疑似等価光学系理論の構築とCADへの応用	92
5.1	はじめに	93
5.2	凹凸両レンズ間の疑似等価性	95
5.3	合成レンズ系の疑似等価性	99
5.3.1	合成レンズの主面の機能	99
5.3.2	合成レンズの疑似等価レンズの導出	99



5.4	疑似等価光学系理論を用いた配置設計法	103
5.4.1	疑似等価レンズを利用した置換法則	103
5.4.2	再帰的置換による一般リレー光学系の生成方法	105
5.5	推論部 GAUSS/I における光学系の論理表現	112
5.5.1	光源とレンズ機能の論理表現	112
5.5.2	リレー光学系の論理表現	113
5.5.3	光軸制御型リレー光学系の論理表現	116
5.5.4	光線追跡部 GAUSS/R への通信インタフェース	120
5.6	第5章のまとめ	123
第6章	光軸制御型オートメータの開発設計	124
6.1	はじめに	125
6.2	光軸操作型 CAD システム GAUSS による推論設計と光軸移動機能の発見	126
6.2.1	光軸制御型リレー光学系の推論による機能開発	126
6.2.2	推論結果の組合せによる機能拡張	129
6.2.3	光軸移動を実現する機能の発見	131
6.2.4	光軸の移動・回転機能の一般法則	134
6.3	リレー光学系の実用的構成	138
6.3.1	光軸方向の実用的制御角に関する問題点	138
6.3.2	球面鏡対と入射面の直交化による光学歪補正法	138
6.3.3	光軸はずし状態の球面鏡における光路長補正法	139
6.3.4	レンズの光軸はずしによる表面反射光の分離	144
6.3.5	ビーム特性を考慮した設計評価関数	146
6.4	リレー光学系の類似設計のための設計手順の確立	155
6.5	光軸制御型オートメータの機能構成	157
6.5.1	光軸制御型オートメータの全体構成	157
6.5.2	零位法による眼球運動の検出方法	157
6.5.3	積分型最適追従制御理論を用いた揺動鏡制御法	161
6.5.4	多変数多項式行列を用いた測定データの校正法	165

6.6	頭上搭載型オプトメータの設計・開発	166
6.6.1	設計目的	166
6.6.2	類似設計上の留意点と光軸移動機能の実装	166
6.6.3	詳細設計時の光路調整	167
6.7	第6章のまとめ	171
<b>第7章</b>	<b>光軸制御型オプトメータの評価実験</b>	<b>172</b>
7.1	はじめに	173
7.2	装置の基本特性	174
7.2.1	光軸制御型オプトメータの基本特性	174
7.2.2	頭上搭載型オプトメータの特性	181
7.3	評価基礎実験	188
7.3.1	焦点調節と眼球運動の同時測定実験	188
7.3.2	VDT作業中の焦点調節測定実験	191
7.4	応用評価実験	193
7.4.1	静止画に対する視覚反応測定	193
7.4.2	ランダムドットパターンへの動きに対する視覚反応測定	196
7.5	考察	201
7.6	第7章のまとめ	203
<b>第8章</b>	<b>結論</b>	<b>204</b>
8.1	本研究の内容と成果	205
8.2	今後の課題と展望	207
8.2.1	無意識計測の可能性	207
8.2.2	携帯化、高機能化の可能性	208
	付章	209
	謝辞	264
	参考文献	266
	発表文献等	277

## 第 1 章 序 論

## 1.1 本研究の背景と必要性

### 1.1.1 視覚障害が生じないVDT作業環境条件の究明

技術革新にともない、コンピュータを利用する業務が盛んになってきた。このため、職場で長時間ディスプレイ端末装置(VDT、Visual Display Terminal)の画面を見つめながらキーボードを操作することが一般的な作業スタイルとして定着してきている。しかしこれらの作業員の中で、目の痛みや肩のこり、頭痛、吐き気などを訴える人の割合が増えており、特に視力低下や眼のかすみ、色覚異常などという従来の職業病とは異なるタイプの視覚障害の症状が数多く見られるようになり、新たな職業病になることが懸念されてきた<sup>1-11)</sup>。そしてVDTはオフィス部門ばかりでなく、一般工場の設計業務や監視業務、航空関連業務、医療業務などで使う機器類にも広く使われており、さらにCAI教育システム、ホビー用ゲームといった教育・娯楽機器にも使用されている。このようにVDTを使用する人は大人から学童にいたるまで広範囲にわたっている。したがって、VDTを長時間使用することによって視覚障害が生じるのであれば、広範囲の人々の健康状態を損ない、作業能率を低下させるという点のみならず、重大な事故につながりかねないという点からも緊急の課題となりうるため早急な調査と対策が望まれてきた。

このようなVDTによる障害は、まず欧州で注目され、アンケートを主とした実態の調査が1970年代の半ばより開始された<sup>1-2)</sup>。そしてスウェーデンでは1979年にOccupational Health and Safety Boardによって、照明・休憩時間および眼鏡使用に関するガイドラインが設定された。翌1980年には西ドイツのTrade Cooperative Associationによって、フリッカ(ちらつき)やグレア(まぶしさ)を抑えた画面、読みやすい文字と蛍光体、着脱可能なキーボード、画面の傾斜角度の調節可能化、等のハードウェア設計上のガイドラインが制定された。また、アメリカでも1982年から実態調査を開始

し、作業時間、環境などに関するガイドラインが示された。一方わが国では、1982年になってようやく、上記ガイドラインが紹介されて<sup>1-2)</sup>、学会やマスコミにとりあげられるようになった。

しかしながら上記の研究は調査研究が主体であり、測定データを得るにしてもフリッカー値（点滅光の点滅周波数を高くしてゆくと、ちらつきを感じなくなる周波数）や、近点距離（眼を極度に調節して、物体が明瞭に見える最も近い点までの距離）等に代表される自覚式測定法による測定値を利用するものであった。ところが、自覚式測定法による測定値は被験者の意欲で大幅に変動し、信頼性がきわめて乏しいという欠点があった<sup>1-4), 1-5)</sup>。

その後、Dastbergらは、視覚疲労については客観的データの測定が重要であることを主張し、レーザーレフラクトメータと呼ばれる装置で焦点調節機能を測定する実験を行った<sup>1-6)</sup>。彼らが測定に用いたレーザーレフラクトメータは、眼の焦点位置（物体が明瞭に見える位置）までの距離を自覚的に測定する装置である<sup>1-7)</sup>。その原理は、レーザー光線が動く物体表面に当たって乱反射するときにギラギラしたスペckルパターンが見られるが、そのパターンの動く方向が、眼の焦点位置の前後で変化することを利用したものある<sup>1-8), 1-9)</sup>。このスペckルパターンが静止するように、眼から物体までの距離を変えることにより、眼がどの距離に焦点を合わせているかを測定するものである。本装置の利点は、ハーフミラーを通して、自然視に近い状態での眼の焦点位置を測定できることである<sup>1-11), 1-12)</sup>。しかしながら、被験者にとってスペckルパターンが静止して見えるようになるまで、乱反射させる物体までの距離を変化させるため、測定に時間がかかることと、やはり自覚式測定方法なので測定精度が低いという欠点があった。

以上の経過をふまえた考察の結果、視覚疲労による視力低下の原因として、焦点調節を生じさせる水晶体の屈折力変化を司る毛様筋

などの機能が低下すると仮定できる。そして、毛様筋の特性変化は直接水晶体の光学特性変化として現れるため、作業中の水晶体の光学特性変化をとらえることが、視覚疲労の指標を得る手がかりになると思われる。特に、疲労によって機能が弱まる結果、焦点調節が遅れる、あるいは、一定の調節状態を保ちにくくなるといった現象が現われると予想される。したがってこの仮説を検証するために、眼の焦点調節機能を実作業中に連続的に測定することが必要となる。

#### 1.1.2 視覚情報処理機構の理解と製品開発への応用

VDT は二次元の動画像表示装置であるが、より自然に視覚情報を提示する表示法として立体画像表示への要求が、現在高まっている<sup>1-17)</sup>。立体表示への要求は、単に表示上の迫力感が増すからだけでなく、対話操作を行う機器のインタフェースには欠かせない機能となるからである<sup>1-18)</sup>。たとえば、宇宙空間や放射線環境下といった極限空間での作業を遠隔操作する場合、操作者はできる限り空間知覚に負担の少ない立体画像を見ながら操作する必要があるからである。ところが現在開発が進められている立体ディスプレイは、長時間見続けると眼が疲れるという問題点が指摘されている<sup>1-19)</sup>。立体ディスプレイは古くから研究が行われており、その原理は様々な方式がある<sup>1-20)</sup>。大別すると、実際に三次元映像を生成する方式と、両眼による立体視機構を利用する方式とがある。実用的には、立体視機構を利用する方式が取り扱う情報量が少なく有利であり、製品化されているものもある。ところが、立体視機構を利用する方式は次に示すいくつかの問題点がある。

- (1)多方向からの情報が不足しているため、視点の変化に像が対応しない。
- (2)スクリーン面と映像再現位置が異なっている。
- (3)両眼視差の情報を、正確に均等に左右の眼に与えられない。



これらの問題点によって生じる現象として、(1)の問題点に関しては、頭を左右にわずかに振ったとき、本来立体像が変化すべきであるのに同じ像が見えるため、見かけ上立体像がゆがむように感じる。また(2)に関しては、観察者は眼の焦点位置をスクリーン面に固定しながら、映像が再現される別の位置に視線方向を合わせなければならない。日常生活のなかにおいて両眼で一点を見つめる場合には、対象物までの距離に応じて、焦点調節と輻輳運動とを連動させて制御している。ところが立体ディスプレイの場合には、この両者が独立して働かなければならなくなる。さらに、(3)の問題に関しては、透過性の異なる偏光眼鏡や液晶シャッター方式を用いて左右の眼に別々の情報を与えるが、その二つの映像の間で、わずかながら輝度のずれが発生する。また、画素が並ぶラスタ型ディスプレイでは、視差情報を正確に呈示するには精度が現状では不十分であり、量子化誤差によるずれが発生する。これらのずれは視差情報に重畳するノイズとなる。したがって、これらの現象の相乗効果により、立体ディスプレイを長時間見続けていると眼が疲れると考えられる。

以上のことから考察すると、立体情報を呈示するときの呈示条件が、通常の物体を見るときと異なるために生じる疲労に関しては、情報を受ける眼の反応状態を実験的にとらえることが、まず必要になる。特に、影響が大きいと思われる視差情報による眼の輻輳（眼球運動）と、焦点調節機能との関連性を把握する必要がある。そうすることによって初めて、疲労と画像提示条件の関係を明確に把握し、人間の立体視機構の特性に整合した立体ディスプレイの設計条件を求めることができるはずである。したがって、疲労の少ない立体ディスプレイを設計するためには、まず人間の立体視機構の特性を理解することが必要である。そのためには焦点調節の変動と眼球運動を同時に測定し、客観的なデータとしてとらえる必要がある。



### 1.1.3 実作業中における焦点調節機能測定の必要性

上に述べた1.1.1項、および、1.1.2項の結果から次のことが言える。すなわち、実作業中での焦点調節機能と眼球運動とを連続的に同時計測することが可能となれば、視覚疲労の客観的評価基準の確立、疲労の少ないVDT作業環境の設計基準の確立、今後普及が予想される立体ディスプレイの人間特性適合化設計など、幅広く応用できることになる。それは、作業環境の様々な環境要因を変化させたときの焦点調節機能と眼球運動との関連性が把握でき、視覚メカニズムにおよぼす環境要因の影響を定量的に解析・評価できるからである。さらに、焦点調節と眼球運動(輻輳)、そして瞳孔変化は中枢神経的に密接に絡み<sup>1-22), 1-23), 1-24)</sup>、それらの同時計測は人の視覚システムをより深く理解する上でもきわめて重要である。したがって、この焦点調節と眼球運動が同時計測できれば、眼光学や実験心理学、大脳生理学の分野において空間知覚のメカニズムの解明に寄与できる。さらにロボット工学において、遠隔操作ロボットにおけるより自然なヒューマンインタフェースの実現に貢献することも可能となる。

一方、従来の眼球計測技術を概観してみると、市販されているリフラクトメータが原理的に焦点調節機能を測定していることになる。リフラクトメータとは、主に眼鏡処方のために使われ、明瞭に見える最も遠い点(遠点)までの距離を測定する装置である。微弱な測定光を眼球正面から照射し、網膜上での投影像を状態から測定するものである。しかし、実用化されているリフラクトメータは、遠点のみを測定するように設計されている。またこのほかに、焦点調節機能の実験的な測定法として、角膜反射像、水晶体の表面および、裏面での光源の反射像を検出し、その反射像の大きさ等から屈折状態を測定する方法<sup>1-25), 1-26)</sup>や、毛様筋のインビダグンスを測定する方法<sup>1-27)</sup>などがあるが、測定条件の設定が難しく精度が良くない。

また、眼球運動の測定に関しては、外界を認識する人間の認知活

動を分析する研究などで使われており、以下のような方法がある<sup>1-28)</sup>、<sup>1-29)</sup>、<sup>1-30)</sup>、<sup>1-31)</sup>、<sup>1-32)</sup>。

- (1) 角膜反射像の位置を画像処理でとらえる。
- (2) 虹彩の外周部での光の反射量の差をとらえる。
- (3) 眼球の分極（角膜側が+電位、網膜側が-電位に帯電）を、EOG (Electro-Oculography)の原理を用い眼球付近に付けた電極で検出する。

このように、眼球に関する単機能の測定については従来行われてきた。しかし、複数機能の同時計測は原理的に困難で行われていない。

ゆえに、自然な状態、すなわち測定に意識を集中させる必要がなく、実際の作業中において眼球運動をしている最中で、眼球運動と焦点調節機能を同時に測定する技術開発が強く望まれてきた<sup>1-33)</sup>。

## 1.2 本研究の目的

視覚障害が生じないVDT作業環境条件を究明し、また人間の視覚情報処理特性にあった視覚表示装置の開発を行うためには、人間の視覚システム機構を深く理解する必要がある。このためには、眼の焦点調節機能と眼球運動、さらに瞳孔反応を同時計測する無侵襲オンライン計測装置が必要である。したがって、眼に関する複数の機能を同時計測できる装置を開発することを本研究の目的とする。

この目的を達成するためには、まず、視軸を固定した状態で、連続的に焦点調節機能を測定するオプトメータを開発し、焦点調節の応答性と疲労との関連性を確認する。その後、このオプトメータの光軸を可制御化し、眼球運動を補償しながら焦点調節を連続測定するオプトメータを開発する。眼球運動を補償する光軸制御型オプトメータは従来にない機能であるため、新規設計によって具体化させる必要がある。そのためには、設計手法が既に明らかになっている類似設計を前提とした従来のCADシステムではなく、新規設計におけるCADシステムのあり方を再構築し、これに基づいてCADシステムを開発して、その支援のもとに設計を進めなければならない。したがって、上記目的を達成するための課題は以下のようになる。

### (1) 光軸固定型オプトメータの開発

#### 1.1 調節反応を利用した視覚疲労の評価法の確立

### (2) 光軸制御型オプトメータの開発

#### 2.1 新規設計用CADシステム開発のあり方の検討

#### 2.2 新規設計用CADシステムの開発

#### 2.3 CADシステムを援用した新規設計による要求機能の具体化

#### 2.4 新規設計した装置の製作と評価

#### 2.5 類似設計に利用できる設計手法の確立

### 1.3 本論文の構成

本論文の構成とフローを図1に示す。本論文の第1章では、VDTによる視覚障害に関して、従来の研究に無い視覚疲労の客観的データとして、調節応答性に着目した。そしてこれを測るには、焦点調節機能を他覚的、かつ、連続的に測定することが必要となる。また、今後の立体ディスプレイ開発に必要な、人間の統合的視覚特性との整合性という課題を解決するためにも、焦点調節機能を連続的に測定すること、そしてさらに、眼球運動をしている通常の作業状態でも焦点調節を連続的に測定することが必要であることを示した。

以上の理由から新しい装置開発が必要となり、本研究を開始した。したがって、本研究の目的は、VDT作業中での眼の焦点調節機能と眼球運動を他覚的、連続的に測定する装置を開発することである。

第2章では、焦点調節機能を測定するオプトメータの開発状況を概観し、焦点調節応答が測定できる光軸固定型オプトメータの開発経過と、それを用いた実験結果、新たな課題などを述べる。

まず、視覚疲労では調節を司る毛様筋が疲労し、この結果、焦点調節反応が遅れるという仮説を設定する。そして、焦点調節機能を連続的に測定できるオプトメータを開発し、測定実験によって仮説の検証をするとともに、視覚疲労の指標を求めた。また、測定実験によって明らかになった新たな課題として、測定時の過度の拘束が生じた。これを解決するために、リレー（中継）光学系を新規に設計する必要があることを示す。そして、この新規設計のためには、思考過程に沿った操作が可能なCADシステム開発が必要であることを明らかにする。さらに、このような新規設計の目的でのCADシステムの開発方針が従来無いことから、新規設計用CADシステム開発のあり方を検討する必要性を説く。

第3章では、光学装置の新規設計に利用できるCADを開発するための方法論を検討する。そのために従来の設計支援技術を、形状

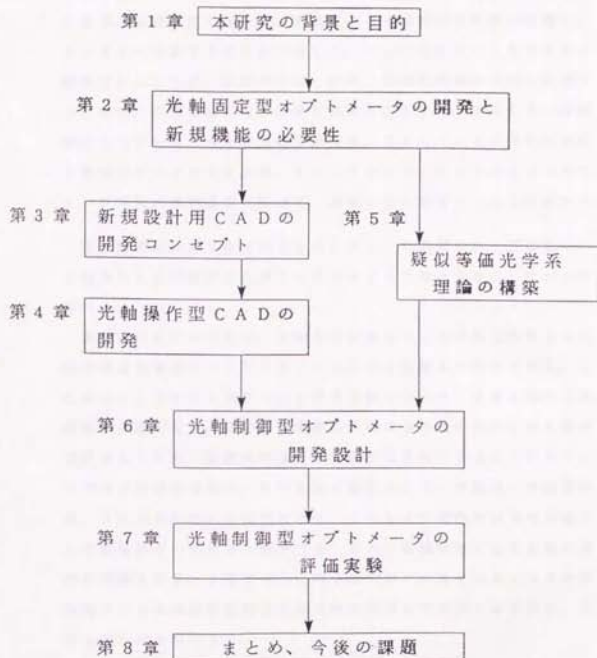


図1 本研究の全体の流れ

モデルを基本とする方法、設計ノウハウをエキスパート化する方法、論理操作による設計シミュレーションの方法の3つに分類して考察した。そのなかからアイデアの展開に利用できる手法として、網羅的探索、異種機能の組合せ、視覚化による設計者の理解の手助け、という3つの基本方針を見いだした。そして実際のCADシステム開発方針としては、有限の人的、物的、時間的資源を有効に活用するために、開発段階における実行基準を設定する。すなわち、設計者とCADシステムとの機能分担基準、CADシステム開発における機能のプログラム化基準、そしてプログラム化におけるプログラミング言語の選択基準を設けて、無駄な作業を省くことを提案する。

第4章では、第3章で明らかにしたCAD開発のあり方に基づいて開発した新規設計用光学CADシステム「GAUSS」について述べる。

本研究における課題は、光軸方向が変化する光学系と固定した光軸方向の光学系とのインタフェースとなる光学系の設計である。したがって、CADシステムにも思考過程に沿って「光軸を操作する」機能が必要であり、設計評価基準も特殊なものとなる。しかも新規設計であるため、装置の概念設計段階でも支援できるCADシステムでなければならない。そのための構成として、推論部、光線追跡部、3次元表示部に分散化させる。これにより段階的开发を可能として開発済みの部分から利用でき、かつ、協調処理と独立処理の選択が可能となる。本章では、これらのなかで、本CADシステムの特徴である光軸操作機能を光線追跡を利用して実現する手法と、3次元表示部を説明する。

第5章では、第2章で述べたリレー光学系の概念設計に必要な基礎光学理論として、新しく疑似等価光学系という概念を導入し、それを利用した設計法を提案する。さらに、これを概念設計に利用できるように実用化した。

ここで、疑似等価光学系の概念とは、直観的には「一枚の凸レン



ズによる光の屈折効果を、別の位置に一枚の凹レンズを置いたときと、像の倒立を無視すれば、全く同じ状態にすることができる」というものである。このときの、2つのレンズ関係を互いに疑似等価系と定義する。この関係は厚レンズや組み合わせレンズにも適用でき、さらに、一枚のレンズを疑似等価な2つのレンズで置き換えることができる。この規則を推論規則とすれば、再帰的置換により一般の疑似等価光学系が系統的に生成できる。そして、リレー光学系の概念設計段階での利用法を確立させて、CADシステム「GAUSS」に組み込む手法を概説する。

第6章では、第4章、第5章で開発したCADシステムの概念設計過程での有効性を実際の設計事例で示し、さらに、CADシステムを利用した設計過程で新たに発見した光軸移動機能を解説する。その後の詳細設計においても、CADシステムの光軸操作機能を利用することが有効であることを例証しながら、光軸を制御できるタイプのリレー光学系の設計経過を述べる。

まず、アイデアの展開時での利用例として、リレー機能と光軸回転機能の論理操作による結合、推論結果の組み合わせによる自由度を増やす機能拡張などを示す。次に詳細設計段階においては、レンズを球面鏡で置換するアイデアを実行したときの問題点をCADシステムによって解決する経過を示す。さらに、ビームの変化に着目した設計評価法の開発や、画像歪の影響を受けない零位法によるモニター画像からの眼球運動検出法など、具体化に際して生じたさまざまな問題点とその解決方法を詳述する。

第7章では、第6章の設計結果に基づいて製作されたリレー光学系を組み込んだ光軸制御型オプトメータのハードウェア特性を記述し、さらに被験者を使ったいくつかの測定実験に応用することを通して、本研究で開発した手法および測定装置が実用的にも価値があることを明らかにする。

まず、人眼と光学的にほぼ等価な模型眼を用いて、測定値の校正



を行う。次に実際のVDT作業における、焦点調節と眼球運動を同時計測し、その有効性を確認する。その後、奥行き知覚に関する静的、および動的画像に対する調節反応を、開発した光軸制御型オートメータで測定した。その結果、物理的距離からみると調節の必要がないにも関わらず、構図や動きといった遠近感を感じさせる手がかりだけで、実際には調節を生じていることが明らかとなった。これは、立体ディスプレイの設計場面で必要となる新しい知見である。

第8章では、第1章から第7章までの一連の研究経過をまとめる。すなわち、眼の調節応答特性を測定できる光軸固定型オートメータを開発して、視覚疲労の一指標を提案した。さらに、この測定法が自然視の状態でも利用できるようにするために、以下に示す手順で光軸制御型オートメータを開発した。

まず、新規設計におけるCADシステム開発のあり方を提案し、これにもとづいて光軸操作型CADシステムGAUSSを開発した。また、疑似等価光学系という新しい概念を提案し、これを設計に利用できるように実用化した。さらに、開発したCADシステムを活用して、新しい原理に基づく光軸制御型オートメータを設計・製作し、評価実験を行った。その結果、設計仕様を満たすことを確認し、さらに、眼光学分野における新しい知見が得られた。また、CADによる設計過程で新機能を発見し、今後の装置開発に生かすことができた。

結論として、本研究で開発した新規設計に関する諸手法の有用性が確認できた。今後の課題として、より自然な状態における測定方法の開発方針として、巨大化と小型化という全く異なる方向での可能性を展望する。

## 第2章 オプトメータ開発と 新規機能の必要性

## 2.1 はじめに

前章で述べた視覚疲労の原因究明に関する社会的要請の下で、視覚疲労の手がかりとなる基礎データとして、眼の焦点調節力と焦点調節の応答性に注目し、これを他覚的に測定することを基本方針とした技術開発について述べる。さらに、開発した装置による実験結果を示し、成果と問題点を明らかにする。

まず2.2節で、眼の焦点調節機能を測定するオプトメータの従来の開発状況を概説し、その後、焦点調節機能の連続測定を可能とした光軸固定型オプトメータの開発内容を述べる。そして、このオプトメータを使った実験結果から、主観的な視覚疲労に対応した疲労の指標を求め、その有効性を確認する。2.3節では、光軸固定型オプトメータを使った実験によって明らかとなった測定上の問題点を整理し、新たな設計課題としてまとめる。最後に2.4節では、前節で明らかとなった新しい設計課題を解決するためには、新しい概念に基づくCADシステム開発と、そのCADシステム開発のための指針確立を実現させなければならないことを論じる。

ここで眼光学で使われる用語の説明をしておく。

近点……………明瞭に見える最も近い点

遠点……………明瞭に見える最も遠い点

ディオプタ(D)…距離の単位で、メートルで表わしたときの数値の逆数で表わす。通常無限遠を0とし、それより近い距離を負数とし、無限遠より光学的に遠い点までの距離を正数として表現する。

焦点調節力……………概念的には、どの程度の距離範囲まではっきり見えるかを示す指標であり、定義上は、ディオプタで表現した遠点と近点の差

オプトメータ……………眼が焦点を合わせている点(網膜の光学的共焦点)までの距離を測定する装置

リフタクトメータ…遠点距離を測定する装置

## 2.2 従来の状況と光軸固定型オプトメータの開発

### 2.2.1 オプトメータの原理と装置化の歴史

焦点調節機能を測定するという事は、具体的には眼の網膜の光学的共約点（光学系を通して結像する点）までの距離を測定することである。この測定原理として、(1)Scheinerの原理、(2)反射影の動き、(3)最小ぼけ、を使ったもの等がある<sup>2-11</sup>。これらの中で、測定精度、測定時間等で現時点で、実用上有利である(1)の方法について、原理を説明しそれを実際に利用している装置の構造を示す。

図2.1はオプトメータの測定原理の一つであるScheinerの原理を示すものである。複数本の赤外光ビームを角膜上に照射し、それらが網膜上で一点に重なるようにビームの角度を調節すれば、このときのビームの間隔と角度から網膜の眼球光学系に対する共約点を求めることができる<sup>2-2,2-3,2-41</sup>。すなわち正視眼に対しは、平行なビームが照射されたとき網膜上では一点に重なるが、近視眼では2点となる。そこで近視眼において、ビーム間角度をかえて網膜上の像が一点に重なるように調整するとき、このビーム間角度から共約点までの距離を算出することができる。この原理を用いて他覚的に焦点調節量を自動測定する装置を最初に開発したのはCampbellらである<sup>2-51</sup>。それ以前には、1870年代にSchmidt-Rimplerが眼底検査に使う凸レンズの設定を装置化してレフラクトメータを試作している。そして、1920年代に、Thornerは、測定光を眼球に照射して網膜からの反射光をみて測定する実用的なレフラクトメータを製作した。1950年代に、Campbellらは測定光をまぶしく感じない赤外光にし、フォトセル検出器を用いて自動測定化を実現した。網膜上に映る2本のビームの光点を区別するために、ビームの途中にメカニカルシャッターを用いてビームを時分割して照射し、照射時期に同期させて各光点位置を検出していた。その後、Cornsweetら<sup>2-53</sup>は提示する視標をサーボ系で制御し、眼の状態の如何に関わらず明瞭に視標が見え

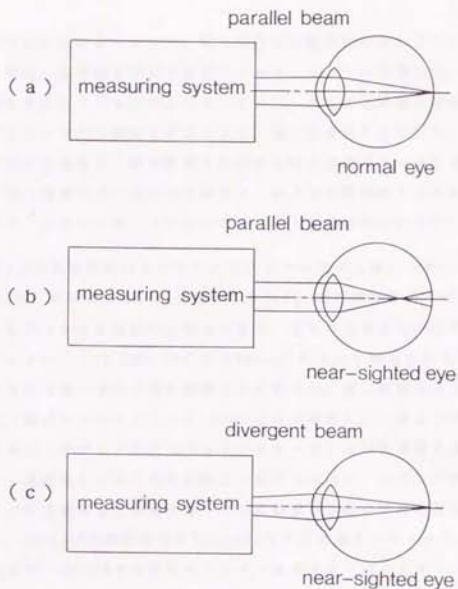


図 2.1 Scheinerの原理による眼球屈折力の測定法

- (a) 平行な2本のビームを、無限遠に焦点が合っている眼球正面から照射すると、網膜上の一点に重なる。
- (b) 近視眼に同じ平行光を照射すると、網膜上では2点に分かれて映る。
- (c) 近視眼でも網膜上で1点になるように、照射角度を変化させる。この時の照射角度から、眼球の焦点調節位置を算出する。

るようにすることによって、眼の遠点を自動測定できるようにした。また最近、赤外線を反射するダイクロミックミラーを用いて、視野を開放するタイプも試作されている<sup>2-7)</sup>。そして乱視軸の方向と乱視の大きさを共に測定できるように、電子化されてきた<sup>2-8)</sup>。乱視軸に関する情報は、眼科医等で眼鏡処方時に必要なデータである。現在視力検査などで使われる装置は、遠点を自動測定するものが一般的で、これらはオートリフラクトメータと呼ばれている<sup>2-4)</sup>。

図2.2は現在市販のオートリフラクトメータ（株）ニデック社製、AR-1100）を例にとり、その光学系を示す。測定機構を以下に説明する。まず上から3番目の光軸上にある、交互に光る2つの赤外線発光ダイオード（IR LED、中心波長880nm）によって照らされたダイアフラム中央部の小穴の像が網膜上に結像する。次に網膜からの反射光の一部がビームスプリック（BS）で上方に反射し、一番上の光軸上にあるフォトディテクタ（フォトダイオード）上に再結像する。そして、再結像した2つの反射像が一致するように、ダイアフラムとレンズを連動させて移動させ、その移動量から眼の焦点位置を計算する。AR-1100の動作原理はCampbellらの赤外線オプトメータと同じであるが、AR1100では赤外オプトメータのメカニカルチョッパを2つのLEDに置き換えて信頼性を向上させるとともに、眼のテレビモニタ系を付加することによって、測定前のアライメント（光軸合わせ）を大幅に容易化するなどの改良が加えられている。AR-1100におけるアライメントは、まずTV画面に映されたレチクル（小さな円形マーク）の中に、図2.2の上から2番目の光軸上にあるアライメント用赤外LEDの、角膜による反射像（第1 Purkinje像と呼ばれている）が入るように、顔面が固定されたあご台を上下左右方向に位置合わせをする。次に、Purkinje像の直径が極小化するように、前後方向（視軸方向）にあご台を動かして位置合わせをする。視標（target）は、眼の調節弛緩時よりさらにわずかに見かけ上遠方に位置するように自動設定され、このため眼の調節が生じにくい状態になっている。こ

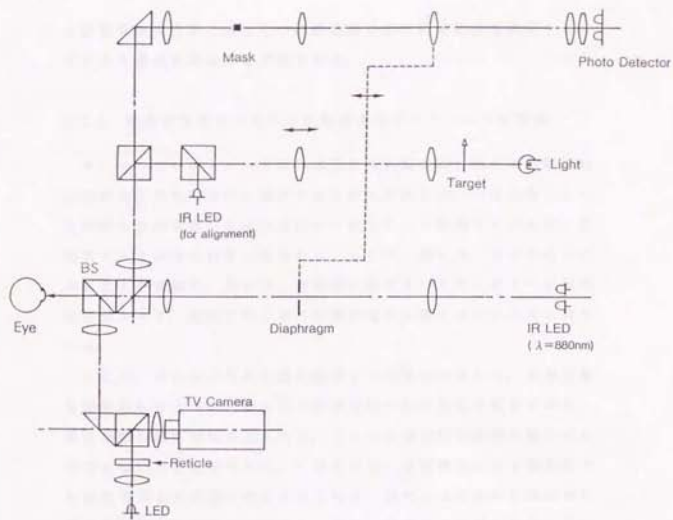


図 2.2 リフラクトメータの光学系

上から3段目の水平光軸上の2つのLEDから交互に出る赤外光はダイヤフラムの穴を通過して2本のビームとなって眼球に照射される。網膜からの反射光は、最上段右端の検出器で検出する。Maskは角膜反射光を除くため。2段目の光軸は視標を眼球に表示させるため。最下段は、光軸合わせのためのモニター系



の状態を遠点状態とみなし、網膜位置の光学的共役点を測定することにより遠点を算出する方式である。

### 2.2.2 調節応答測定のための光軸固定型オプトメータの開発

オートリフラクトメータは、水晶体や角膜を通したときの網膜の光学的共役点を他覚的に測定できる利点があるが、一方欠点として、測定時に被測定眼の焦点が遠点に一致している状態でなければ、正確なデータが得られない点がある。そこで一般には、のぞき込んだ時に見える視標を、見かけ上無限遠の距離よりも更に遠くへ自動的に移動させて、被測定眼の焦点位置を遠点に導くように工夫されている。

ここで、見かけの視標距離を制御する機構を利用して、視標距離を測定時に変化させ、その時の被測定眼の調節反応を測定すれば、焦点調節の応答特性が得られる。それが視覚疲労の指標の基になるのではないかと推定できる。なぜならば、視覚疲労による視力低下も調節を司る毛様筋の疲労と考えれば、疲労により筋肉応答が遅れることが考えられるからである。また、疲労により筋肉応答の乱れが生じる<sup>2-9)</sup>、すなわち、調節変動が考えられるからである。そこで、この仮定のもとで、市販のオートリフラクトメータを改造してすることにした。これを以降光軸固定型オプトメータと呼ぶことにする。光軸固定型という意味は、被測定眼の視線方向をつねに一定方向に固定した状態、いかえれば、被験者はつねに一定方向を見つめ続ける状態で焦点調節機能を測定するという意味である。

見かけ上の視標位置を制御し、眼の調節機能を他覚的に連続測定できることを特徴として、新しく開発した光軸固定型オプトメータの機能構成を図2.3に示す<sup>2-10)</sup>。左上に示すオートリフラクトメータに視標提示系と測定系が含まれており、測定された焦点調節量の値と視標の位置信号を出力する。これらの信号はデータレコーダーやXYレコーダーなどの記録計や、マイクロコンピュータに入力さ

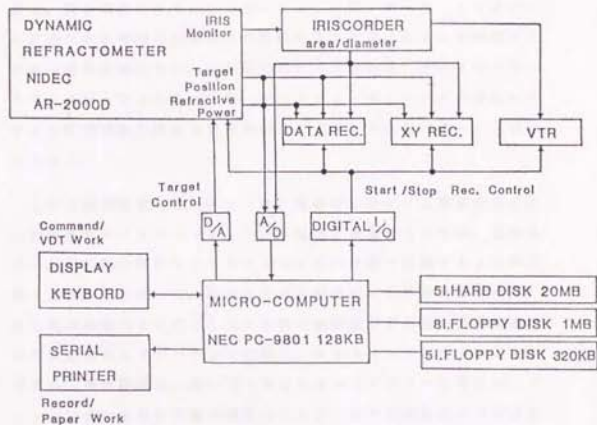


図 2.3 視軸固定型オプトメータの構成

中央下のマイコンから、左上のリフラクトメータの視標距離を制御する。リフラクトメータからの焦点調節の測定信号はマイコンや、データレコーダなどに記録される。モニター用の瞳孔画像はアイリスコーダに入力され瞳孔径が計算され、データレコーダなどで記録される。

れる。またオートリフラクトメータからは光軸合わせ（アライメント）用のモニター画像信号が出力しており、これは瞳孔計（IRIS-CORDER）に入力される。瞳孔計は、眼球の画像信号を2値化して、瞳孔の直径や瞳孔面積を算出し、その結果をマイクロコンピュータに送る。図の中央下のマイクロコンピュータは、オートリフラクトメータ内にある視標の見かけ上の距離をプログラムによって制御するための信号を発生する。この信号はD/A変換後、オートリフラクトメータに入力される。また、マイクロコンピュータは全体のシステムの測定開始や停止などの制御を、デジタル入出力ポートを経由して行う。

この光軸固定型オプトメータは、被験者に提示する視標の見かけ上の距離をマイクロコンピュータで動的に制御できるため、視標を追いかける眼の反応をリアルタイムで高い精度で記録することが可能である。したがって、視標までの距離をゆっくり変化させたり、また急激に変化させたりしたとき眼の調節量がどの様に変化するか、その応答特性をオンラインで記録し、オフラインで解析することができる。視標距離は、約 $-12D$ （単位 $D$ はディオプターと呼ばれ、メートルで表わされた距離の逆数のことで、負号は無限遠より手前側を表わす）から $+12D$ まで変化させることができる。しかも、その変化は見かけの大きさを変えずにボケの情報のみ変化させるように設定しなければならない。なぜならば、大きさが変化すればそれが経験上の調節の手がかりとなり、視標のボケ情報のみで調節を生じさせようとする測定意図に反するからである。そこで、像の大きさを変えずにボケ具合を変化させるために使われているBadal光学系と呼ばれるレンズ系について考察する。

この視標提示光学系は図2.4に示す構成である。レンズ $L$ の左側焦点位置 $F$ を視標の原点位置とし、そこからの距離を $x$ とする。レンズ $L$ から視標 $T$ までの距離は $x-f$ で、レンズ $L$ から像 $T'$ までの距離を $b$ とすると（ここで、光の進む右方向を常に正符号とする）、

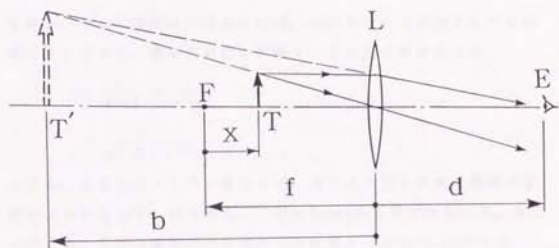


図 2.4 視標提示系

目Eから視標Tまでの見かけの距離（ディオプタ値）は  $d=f$  のとき、 $x$  に比例する。さらにこのとき、見かけの視標の大きさが変化しない。

良く知られた薄レンズの公式（付章A3.2、(A3.2.2)式参照）より

$$\frac{1}{b} - \frac{1}{x-f} = \frac{1}{f} \quad \dots \dots \dots (2.1)$$

となり、これから

$$b = \frac{f(x-f)}{x} \\ = -\frac{f^2}{x} + f \quad \dots \dots \dots (2.2)$$

を得る。そして見かけの大きさ  $m$  は、レンズ  $L$  から視点  $E$  までの距離を  $d$  とすると、像の見かけの距離  $d-b$  に反比例するから、

$$m = \frac{b}{x-f} \times \frac{1}{d-b} \\ = \frac{f}{(d-f)x + f^2} \quad \dots \dots \dots (2.3)$$

となる。ここで  $d=f$  で一定ならば、見かけの大きさ  $m$  は視標の位置  $x$  にかかわらず一定である。これはBadal系と呼ばれている。またこのとき、目から視標までの見かけの距離  $d-b$  は(2.2)式より

$$d-b = \frac{f^2}{x} \quad \dots \dots \dots (2.4)$$

である。これは、視標までのみかけの距離をディオプタ（距離の逆数）で表現すれば、 $x$  に比例することになる。また、(2.3)式によれば、見かけの大きさ  $m$  は  $d$  と  $x$  に次のように依存する。

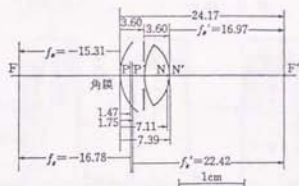
- (1)  $0 < d < f$  のとき  $x$  が増加する（眼前に近づく）と、  
 $m$  は大きくなる（見かけ上大きくなる）。
- (2)  $d > f$  のとき  $x$  が増加する（眼前に近づく）と、  
 $m$  は小さくなる（見かけ上小さくなる）。

したがって、眼球の位置により、視標距離に対する見かけ上の視標の大きさの変化率が変ることになるため、眼球位置の設定は測定上、重要な要素である。ところが、眼球の水晶体の実効位置も細かく見れば、調節によって変化している。眼は焦点調節した場合、

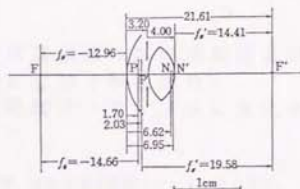
角膜位置が一定でも図2.5に示すように、水晶体の位置が変化する。図2.5は人眼の無調節時と極度に調節したときに光学的にはほぼ等価な模型眼を示す。そこで、眼球水晶体の実効位置が、調節に従って直線的に変化すると仮定した場合における、視標の大きさの変化率を定量的に解析した<sup>2-111</sup>。その結果、最適な位置から1mm程度の誤差であれば、焦点調節による水晶体の実効位置の変化による像の大きさは、実用上、ほとんど無視できる程度であることがわかった。

### 2.2.3 焦点調節機能からの疲労指標の算出

光軸固定型オプトメータの特徴を生かして、従来正確な測定ができなかった焦点調節の応答性を測定すれば、視覚疲労の客観的な指標が得られると考えられる。そこで、測定条件として、長時間のVDT作業を被験者に与え、その作業の前後で被験者の眼の焦点調節の応答特性を測定した<sup>2-121, 2-131</sup>。その結果、視標が近づいて来るに連れて被験者は焦点調節を行うが、その時の応答がVDT作業による疲れで遅れることがわかり、疲労による筋肉の応答性の遅れが光学的に検証できたことになる。そこで、視標距離をステップ状に変化させたときの調節応答が、どの程度視標距離の変化刺激に追従できるかを定量的に評価するために、刺激距離と応答距離との差を時間積分した値を算出した。実験の結果、この値が自覚的な疲労状態とよく一致していることがわかり<sup>2-131, 2-141, 2-151, 2-161, 2-171, 2-181</sup>、これまでの自覚的な実験では得られなかった新しい視覚疲労の指標として位置づけることができた<sup>2-191</sup>。図2.6にその一例を示す。これは、横軸を時間軸に、縦軸を被験者の目からの距離をディオプター（メートルで測定した値の逆数）を単位としてとった。負数は無限遠から近づくことを意味している。視標距離はこの図のなかで方形波で示されており、距離が急激に移動していることがわかる。このときの目の調節位置の変化を測定した波形を重ねて表示している。VDT作業前と3時間後の波形をそれぞれ細線と太線で



(a) 静的屈折状態



(b) 調節 8.62D の状態

図 2.5 Gullstrand模型眼の光学データ



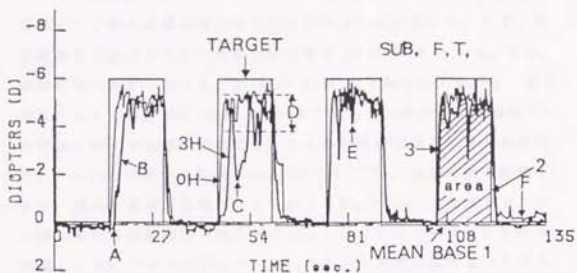


図 2.6 VDT 作業前後の焦点調節応答測定例  
と調節面積 (斜線部分)  
(視標距離をステップ状に変化させたとき)

横軸は測定時間、縦軸は視標距離 (ディオプター単位、0は無限遠、-4は眼前25cm) を示す。  
視標距離は方形波、目の調節変動は曲線で表わされる。  
細い実線は作業前、太い実線は3時間の作業後の反応。  
疲労によって調節反応開始点(A)、反応速度が遅れる(B)。  
また、調節変動が激しくなり(D)、瞬き(CとE)が増える。

調節面積は方形波と調節曲線と MEAN BASE で囲まれた斜線の部分として定義される。

プロットした。3時間後では特に立ち上がりが遅れていることが明瞭に示されている(A点、B点)。C点、E点は瞬きを示す。疲労により焦点調節量がかなり低下している(D幅)。そこで、疲労の指標として調節面積と呼ぶものを以下のように定義する。まず、視標距離が無限大のときの調節応答距離をMEAN BASEとする。次に、視標距離の波形(方形波)とMEAN BASEとで囲まれた部分と、焦点調節による応答波形とMEAN BASEとで囲まれた部分の論理積をとり、方形波に対する面積の割合をとったものを調節面積とする(斜線部分)。これを利用した結果を図2.7に示す<sup>2-12)</sup>。縦軸に調節面積をとり、横軸に累積作業時間をとったときの、ペーパー作業とVDT作業における調節面積の変化をプロットしたものである。3時間の作業により、VDT作業とペーパー作業とも調節面積が減少しており、これは自覚的な定性的疲労感とも一致しており、疲労指標として有効であることがわかった。

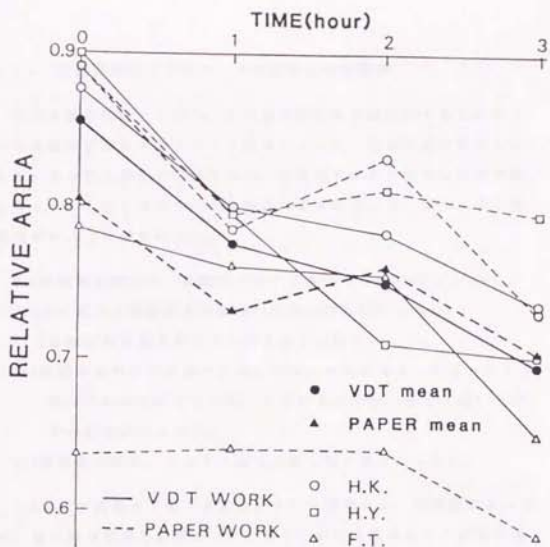


図 2.7 V D T 作業とペーパー作業時の調節面積変化の測定結果

長時間作業による疲労の程度を調節面積の変動で示す。V D T 作業と従来のペーパー作業の違いを実線と破線で示した。横軸に作業時間、縦軸に調節面積をとって、3人の被験者による各データと3人の平均を黒点で表わした。ペーパー作業は、慣れによって一時疲労が少なくなっているが、V D T 作業では疲労が増す一方となっている。

#### 2.2.4 光軸固定型オプトメータの測定上の問題点

視標距離を制御しながら、焦点調節機能を連続測定することができる光軸固定型オプトメータの開発によって、視標距離が変化するときの眼の焦点調節の時間遅れや、追従幅などが他覚的に測定可能となった。しかしながら、この装置による測定には、以下に示す問題点があることがわかった。

- (1)被験者は測定中、装置の中をのぞき込まなければならない。
- (2)中に見える視標のみを凝視し続けなければならない。  
(視線方向を変えることが許されていない。)
- (3)視標の見かけの位置が変化してぼけて見えるようになったとき、他の手がかりがないため、手前にきたのか、遠くに退いたのかの区別が付かない。
- (4)測定のために、VDT作業を中断しなければならない。

(1)に示す問題は「のぞき込む」という意識から、被験者によっては、既に眼は緊張し調節をしてしまういわゆる器械近視の状態が発生しやすい。この状態になれば、測定したデータは客観的で精度がよいにもかかわらず、通常の状態とかけ離れたものになってしまう。これは、データの取得方法は客観的であっても測定対象が意識ある人間のため、測定中の心理的な影響が焦点調節というデリケートな生理状態に影響をおよぼし、この結果、自然な状態とは異なる焦点調節状態となりやすくなるためである。

また(2)の問題に関しては、日常は無意識のうちに眼球を動かしているにもかかわらず、意識的に同一方向を見ることを余儀なくされるため、過度に緊張して測定そのもので眼が疲労することが考えられる。これは、測定自体は物理的に非接触で無侵襲であるにもかかわらず、測定行為によって被験者に大きな外乱を与えていることになる。

(3)に示す問題は、装置に係わるより物理的な問題で、視標が急激

に動く場合、その変化幅が大きくかつその時間が短いと、凝視している眼は、通常の場合得られているような周辺視野からの情報が少しも得られないため、手前側に来たのか、奥行き側に退いたのかが全くわからない。そのために調節が遅れたり、試行的な調節を行うといった過度の緊張状態が出現する場合がある<sup>2-28)</sup>。一般に、自然な状態で物を見る（自然視の場合、焦点調節の変化は一般に眼からの距離が異なる2つの物体間で、視線を移動させるときに生じる場合が多い。ところが光軸固定型オプトメータの測定実験では、眼球運動を伴わずに同一方向で視標距離を急激に変化させるため、手前きたのか遠のいたのかつかめず、被験者が心理的にも戸惑う場合が多く、適切な測定方法とはいえないことがわかった。

(4)の問題は、作業を中断することが、測定における大きな外乱要因となり、測定時のみ煩張る傾向がみられることである。また、作業中の状態が測定できないという問題でもある。

このように精度良く客観的に、かつ、時間的な変化を測定できる光軸固定型オプトメータを開発したが、測定対象が無生物でなく意識を持つ人間であるために、被験者が測定時に緊張し続けなければならない。したがって得られるデータが、通常の状態とは異なった特殊な状態のものである可能性が高い、という問題点が存在することがわかった。

そこでこれらの諸問題を根本的に解決するには、被験者が特殊な状態になりにくい測定環境を開発しなければならない。すなわち、通常の作業を行っている状態で測定可能な装置を開発することが必要となる。

## 2.3. 光軸固定型オプトメータにおける視線拘束緩和の課題

### 2.3.1 測定時における視線方向の無拘束化

前節で指摘したように、光軸固定型オプトメータを用いた従来の測定で生じる問題点を根本的に解決するためには、作業状態のまま眼球の焦点調節機能を測定する装置を開発しなければならない。従来の測定方法と、作業中の状態での測定方法との大きな違いの一つは、被験者の意識状態の差である。従来の方法では、被験者は常に測定に意識を集中させる必要がある。なぜならば、のぞき穴を通して見える視標を、測定中、凝視し続けなければならないからである。そして、意識の違いは生理状態の違いとなりやすい。すなわち、被験者の意識が作業に向けられているときは、画面内の文字や図形を見ているため、視線方向は数十度の視野範囲を常時動いている。ところが、光軸固定型オプトメータで焦点調節機能を測定するときは、視線は常に一定方向を向いているため眼は緊張し続ける。このため、不必要な焦点調節を起こしやすくなっていく。

測定対象が人間であるために生じるこのような心理的要因が絡む問題点を減少させるためには、測定時の状態がなるべく自然な通常の状態に設定されている必要がある。眼球調節力の変化を、自然な状態で他覚的に測定するために、実現可能な測定環境条件に次のようなレベル分けをして考察する。

- (1) 眼球の視線方向を固定して、視野の狭い特定の人工視標のみに対する反応を測定する。
- (2) 視線方向を固定して、自然物の視標とそのまわりの視野が同時に存在するときの、視標に対する反応を測定する。
- (3) 顔面位置は固定で、視線方向は自由に動かすことができる状態で、広い視野の中に自然物の視標を距離を変えて設置したときの反応を測定する。



(4) 顔面も自由に動かすことができ、自然の視野のなかにある視標に対する反応を測定する。

(1)のレベルは、既に本章で開発した光軸固定型オプトメータのレベルであり、その有用性と問題点は既に述べた。(2)のレベルは、視標呈示方法の改善であり、(1)のオプトメータに可視光を反射させ赤外線を通すダイクロイック・ミラーを設置すれば、実現可能である。しかしこの場合、周辺視野の中に動くものや輝度の変化などがあれば、視線は無意識にその方向に向いてしまう。そうすれば、基準方向から視線が外れることによって、測定値が不正確になる度合が高くなり、問題点が生じる。したがって(3)のレベルの技術開発が測定環境を自然に近づけるために必要である。そしてその開発の過程で、理想に近い(4)のレベルの技術開発の方向を探るのが望ましいと考えられる。これらのことを図に表わしたのが、図2.8である。レベル分けした(1)から(4)に対応した位置を図内にも示している。

したがって、後続の章では(3)のレベルの技術開発のために必要な機能を考察する。このレベルを実現させるために、全体の機能を2つに大別して機能分散させることにする。すなわち、測定部とインタフェース光学部である。第一の測定部は、既に開発済みの光軸固定型オプトメータの測定部と同様に、赤外線を用いて非接触、かつ、無侵襲に焦点調節力の変化を測る機能をもつ。そして第二のインタフェース光学系は、眼球の視線方向の変化に追従して、視線方向の変化を補償し、見かけ上、眼球光軸を固定させて測定部に橋渡しをする機能とする。このように分けた理由は、オプトメータから出る測定光は常に一定方向であるが、その測定光で測定されるべき被測定眼の視線方向は、一般に常に変化しているからである。そこで、インタフェースとなる光学系をオプトメータと被測定眼の間に挿入し、この光学系の一方の固定光軸をオプトメータの光軸と一致させ、他の回転光軸を被測定眼の視線方向に一致させるように設定する。そして被測定眼の視線方向に、インタフェース光学系の回転光軸が



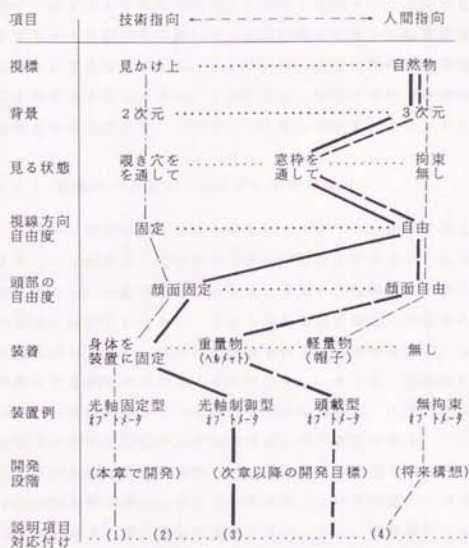


図 2.8 本研究のオプトメータの特徴

- (1) 人工視標による焦点調節の応答特性が測定可能
- (2) 更に、自然の背景と視標を使って測定可能
- (3) 更に顔面固定だが、視線方向を自由にして測定可能
- (4) 更に、顔面も自由に動かす中で測定可能

常に一致するように光学系の回転光軸を制御することができれば、オプトメータ側からは見かけ上視線方向が固定した被測定眼が見えるようになるはずである。したがって、光軸の回転制御機構が重要な意味を持つことになる。このように、眼球光学像を空間的に回転移動させる光学系を、「リレー（中継）光学系」と呼ぶことにする。

### 2.3.2 開発すべきリレー光学系に必要な特性

前項で必要性を示した新たな開発すべきリレー光学系がまず第一に持つべき機能は、光学系の外部に回転中心があるような光軸回転機能である。一般に光軸を回転させる場合、回転中心に回転可能な平面鏡を設置すればよい。ところが本課題の場合、回転中心は眼球の回転中心であり、そこに平面鏡を置くことはできない。すなわち、単純に平面鏡で解決することはできない。そこで、回転中心が眼球の中心に位置するような光学系を新たに開発し、2軸方向に数十度の範囲を光軸が回転する機能を実現させる必要がある。

さらに必要な第二の機能は、測定光がリレー光学系を通過したとき、光学特性が変化しないことである。これを直観的に説明すれば、度の無いガラス板を通して見るときのように、直接見たときと同じ映像をこのリレー光学系を通して見ることができなければならない。このような機能が必要である理由は、この光学系を通して眼の焦点調節機能を測定しなければならないからである。焦点調節機能の測定では、2.2.1項で説明したように、2本の赤外線ビームが互いの相対角度関係を保ちながら、測定装置からある距離にある眼球の瞳孔正面に照射される。そして網膜上で反射した光は、同じ経路を通過して再度測定装置に入射する。したがって、被測定眼とオプトメータとの間に挿入されるリレー光学系は基本的には、上記測定光の性質を変えてはならない。すなわち測定光は、リレー光学系に入射するときの相対位置と角度と全く同じ状態で、この光学系から出ていく必要がある。

しかも、この光学系の通過による光の減衰をできる限り抑えなければならぬ。なぜなら、被測定眼に過度の負担を与えないためである。測定光はオプトメータと被測定眼との間を往復することから、この経路の途中にあるリレー光学系を二回通過する。このため、リレー光学系通過で光が減衰すれば、往復で二重の減衰となり、最終段階で検出できなくなる。したがって、リレー光学系による光の減衰を可能な限り抑える必要がある。

このリレー光学系に必要な「光学特性を変えない機能」は、言い換えれば、光学像の大きさを、光軸方向にも、光軸と直角方向にも変化させないで、光軸上の別の位置に移動させることに相当する。これは、等倍率望遠鏡系と呼ばれるリレー光学系となる。

以上の考察から、インタフェースとなるリレー光学系に必要な機能をまとめると以下のようになる。

- (1) 光軸を2軸方向に数十度回転させる
- (2) 光軸の回転中心には光学部品が存在しない
- (3) 光学特性が変化しない（光学系全体として屈折力をもたない）
- (4) 通過する光の減衰と反射を抑える。

### 2.3.3 リレー光学系の挿入によるオプトメータの光軸制御化

前項までに述べたように、透過光の強さを大幅に減衰させないで、かつ、光学特性も変えずに光軸方向のみを変化させる機能を持つリレー光学系が開発されれば、従来の問題点が以下のように解決できる。すなわち、光軸固定型オプトメータと被測定眼との間に、上記の機能を持つリレー光学系を挿入し、眼球運動によって視線方向が変化しても、リレー光学系の眼球側光軸方向を、眼球の視線方向に一致するように制御することにより、焦点調節機能を測定することができる。さらにこのとき、オプトメータの測定光が赤外光であることを利用して、可視光を通過させ赤外光を反射させるダイクロイックミラーを被測定眼の直前に挿入すれば、実際の作業内容が見え

る状態で測定可能となるため、作業中での焦点調節機能が測定できる  
オプトメータを実現することができる。これにより、被験者への  
過度の負担がなくなり自然な状態でのデータが得られることになる  
2-211, 2-221, 2-231)。このようなリレー光学系を以降、「光軸制御型  
リレー光学系」と呼ぶことにし、光軸制御型リレー光学系を利用し  
たオプトメータを「光軸制御型オプトメータ」と呼ぶことにする。  
したがって、この光軸制御型オプトメータの構成は、本研究で既に  
開発した光軸固定型オプトメータに、眼球運動による視線方向の変  
化に追従して光軸を制御できるリレー光学系を光学的に直列に接続  
したものとイえる。

## 2.4 光軸制御型オプトメータ開発に関する設計支援上の課題

### 2.4.1 光軸操作型 CAD システム開発の必要性

光軸制御型オプトメータを開発するためには、光軸制御型リレー光学系とその光軸制御システムを開発しなければならない。その中でも特に、まだ世の中に存在しない光軸制御型リレー光学系を開発することが重要である。そこで、この機能について考察する。

2.3.2項であげた、光軸制御型リレー光学系に必要な機能のうち、1軸方向だけに光軸を振るシステムは試作された報告がある<sup>2-24)</sup>。これは、光学部品が無い空間内に可変光軸の回転中心が来るようにする第一の機能を凹面鏡を利用して実現している。原理的には、球面鏡とハーフミラーを使って空間内の一点からでた光を他の一点に集光させる方式である(図2.9参照)。この場合、凹面鏡Sの曲率中心に揺動鏡Mの回転中心を一致させ、さらに、この点と眼球回転中心EとをハーフミラーHに関して鏡像位置関係におく。そうすると、光線は、上方からM、H、S、H、E、H、S、H、Mの順に当たって、もとの方向に戻ることができる。ただしこの場合、球面鏡が凸レンズと同じ正の屈折力をもつ光学系となる点を留意しなければならない。しかしながらこの方式では、ハーフミラーによる光量の損失が大きい。さらに、凹面鏡Sの反射光がハーフミラーHを透過してもどる光の強度が、眼球に入ってからもどる光の強度よりはるかに強いため、S/N比がきわめて悪くなる。このような原因で測定が困難になる可能性が高い。一方、減衰を抑えて空間内の一点から他の一点に光を集める容易な方法に楕円鏡を用いる方式がある。楕円鏡の2つの焦点位置を利用するものである。しかし、この場合は減衰はほとんどないが、楕円鏡に光が当たる位置によって等価な屈折力が変化するという新たな問題が生じる(理由は付章A1を参照)。このために、リレー光学系に楕円鏡をそのままでは使うことができない。

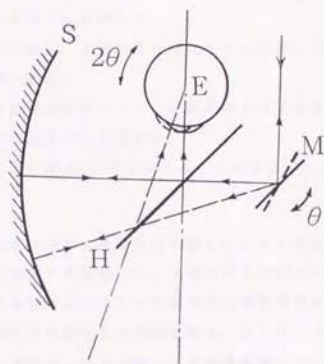


図 2.9 球面鏡とハーフミラーを用いて  
光軸制御可能な集光系を構成する例

凹面鏡 S の曲率中心に揺動鏡 M の回転中心を一致させ、  
さらに、この点と眼球回転中心 E とをハーフミラー H に  
関して鏡像位置関係におく

光線は、M から H、S、H、E、H、S、H、M の順に  
当たって、もとの方向に戻る

しかし、M から H、S、H、M の順に当たって戻る光線  
の方がはるかに光量が多いため、眼球から戻る光線での  
測定が困難である

したがって、光軸制御型リレー光学系の開発設計方針は、まず固定光軸型である通常のリレー光学系を基本として、これを改良して他の機能を付加するようにして設計を進める必要がある。すなわち、設計手順として以下のような見通しをたてる。

- (1) 光学像を空間的に歪なく移動させるリレー光学系を、レンズを用いて直線光軸上に構成する。
- (2) この光学系に対し、光軸方向を変化させるために光路上に揺動平面鏡を挿入する。
- (3) 挿入する平面鏡が他のレンズと空間的に干渉する場合は、リレー光学系の部品構成を変更する。
- (4) 部品間の干渉問題が(3)で解決できないときは、(1)からやり直す。

ここで、光学系の光路上に平面鏡を挿入するということは、その位置より光路上後方の光学部品を、光軸の折り曲げと一緒に移動させなければならない。このような部品の空間移動操作は、CADシステムの支援がなければ実行が困難である。したがって、この空間移動操作は、CADシステムが持つべき基本機能の一つである。これを「光軸操作機能」と呼ぶことにする。ところが、従来の光学CADシステムには、このような思考過程に沿った操作概念がないため直接利用できない。さらに、新たに機能を追加したいとしても市販のパッケージではそれができない。そこで、光軸制御型リレー光学系を設計するために、思考過程に沿った操作が直接できるCADシステム開発を行い、それを利用しながらリレー光学系の設計を進めなければならない。

#### 2.4.2 新規設計用 CAD システム開発のための指針の必要性

類似した設計物がなく、全く新しい概念を構築して進める設計を「新規設計」と呼ぶことにする。上に議論したリレー光学系のよう



な新規設計の設計過程を支援するCADシステムについては、その持つべき機能の全容が最初はわからない。それは、対象の新規設計を進めていくにしたがって、その設計を支援すべきCADシステムに必要な機能が順次明確になってくるからである。新規設計を支援する専用CADシステムも、一般には存在しない。一般のCADシステムは、設計手法が確定したルーチンワークを効率化するために導入されるもので、手法としていくつかの機能がCADシステムに内蔵されている。ところが、新規設計の当初においては設計手法が未確定のため、必要な機能が未定なことが多い。いきおい、新たに開発しなければならない機能が多い。市販のCADシステムには、新たな機能の追加が容易でないから、CADシステム自体も開発しなければならなくなる。

そこで、CADシステム自体の設計を行うときの方針として、まず、基本的な機能を持つCADシステムを開発し、それを実行させて設計を行いながら、CADシステム自身に必要な機能設計とプログラム開発を継続することとする。したがって、製品の設計とそれを支援するCADシステムの開発を交互にやる必要がある。しかも、新規設計では初期段階の概念設計に多くの時間がとられるため、この概念設計の段階での支援も可能なかぎりするべきである。従来、このような目的意識でのCADシステム開発はあまり行われていない。大部分は、設計工程が確立した段階で、すなわち既知の設計工程をどうCAD化するかという目的意識で、開発される場合が多かった。したがって、本研究では、要求仕様全体がわからないため、一度に全機能を開発できず、利用しながら機能設計を継続するような形態でのCADシステム開発となり、このような場合での開発のあり方を明確にする必要がある。

## 2.5 第2章のまとめ

本章では、人眼における焦点調節機能の測定に関する従来の研究経過や装置開発をもとに、焦点調節応答が測定できる光軸固定型オプトメータを新たに開発した。この理由として、眼球疲労による視力低下が調節を司る毛様筋の疲労に起因し、筋肉疲労によって応答反応が遅れること、また、反応変動が大きくなるという仮説を設定した。その結果、調節応答特性も遅れ、または、調節変動が顕著になることになる。したがって調節応答を調べることにより、視覚疲労の指標が得られるとの考えのもとで開発したものである。そして、焦点調節機能の応答特性測定実験からこの考えを実証し、仮説の正当性を確認した。そして、考案した視覚疲労の指標が主観的な疲労に一致していることがわかり、本手法の有効性を確認できた。さらに、この光軸固定型オプトメータの問題点を明らかにした。それは、測定条件があまりに自然状態とかけ離れていることである。そこで、自然視状態での焦点調節機能の測定に必要な「リレー光学系」の仕様として、光軸を制御するという新しい機能が必要であることを述べ、この機能を次の3点にまとめた。

- (1) 光学系の一端のみ、光軸方向が制御できること。
- (2) 光軸方向の制御によって光軸方向が変化しても、全体の光学特性が変化しないこと。
- (3) 光量の減衰が少ないこと

複雑なこれらの機能を実現する光学系を設計するためには、CADシステムの支援が必要になる。ところが、従来、類似機能をもつ製品が知られていないので、設計手順が明らかでない。すなわち、支援すべきCADシステムに必要な機能があらかじめわからない。したがって、設計を進めながら機能を追加できるCADシステムでなければならない。そのためには、新しいCADシステムを開発する必要がある。とくに、光軸を制御するという新しい機能を実現す

るための設計では、従来のCADシステムにない、アイデアの検討段階でも支援できることが望ましい。そして、この新規設計CADシステムは、設計手順も評価基準も定まっていない新たに開発する装置の設計を支援するものであるため、CADシステム自身の仕様も明らかでない。したがって、このようなCADシステムを開発するに先だって、そのための開発指針をまず確立することが重要である。

### 第3章 新規設計用CADの 開発コンセプト

### 3.1 はじめに

設計とは、要求された機能を実現するために、具体的な形状や形状の組合せを求める知的作業である。設計には、全く新しいものをつくるための「新規設計」と、過去に類似したものや既に存在するものの仕様を変更したり、改良するための「類似設計」の大きく2通りに分類することができる。本章では、設計手法や設計手順が確定しておらず、試行錯誤でそれを求めながら作業を進める新規設計の場合に、これを支援するCADシステム開発のための方法論を確立させることを目的とする。

このような新規設計の場合は、適用する設計手法が未定のため、設計支援するCADシステムの開発仕様を前もってすべて決定することが困難である。いきおい、CAD開発は設計の進展と同時進行とせざるを得ない。したがって、このようなCADシステムの開発において考慮しなければならない重要な点は、完成後のCADシステムがどのような機能を持っておれば必要十分かということより、むしろ開発中のCADシステムでいかに設計支援ができるかということと、いかにして必要な機能を容易に追加できるか、という2点である。そのための機能として

- (1)設計の進展にもとって必要となる機能を容易に追加できること、
- (2)アイデアの展開段階から支援できること、

が必要である。ここで(1)の機能に関しては、既に市販され、あるいはオンラインサービスによるプログラムでは内部構造が公開されておらず、カスタマイズ機能等を利用してもなお、ユーザの必要な新たな機能が実現できないことが多い。したがって、新規設計に用いるCADシステムは新たに開発しなければならない。そこで、このCADシステム開発に先だって、(2)の機能を実現するために、従来のCADシステムのなかで参考にすべき点を調査する必要がある。

まず3.2節では、従来のCADシステムの機能を大まかに分類し、利用形態を調査してアイデアの展開に活用できる部分の抽出を試みる。次に3.3節では、その結果を利用しながら、設計者がアイデアを練るのが容易になるようなCADシステムの支援手法を展開する。それは、試行錯誤における繰り返し手続きや単純作業をCADシステムに任せ、得られた結果をわかりやすく呈示させる手法である。そして3.4節でこのようなCADシステムを開発する際に必要となる開発基準を定めることにより、限定された時間、人的、物的資源を有効に利用して、効率的な設計が進むように考慮した結果を提示する。

## 3.2 従来のCAD方法論

### 3.2.1 形状モデラーを基本とした対象モデリング

形状に関わる設計作業は、機械設計を例にとれば、まず設計構想を練り、概念設計を行い、構造や機構の設定、形状・諸元の決定と次第に詳細化を進める作業である。この各段階で、設計案を解析・評価しながら仕様の修正を行う。この設計作業にCADシステムが使われるが、ここで、CADシステムの歴史を概観してみる。

形状が絡む設計作業に、コンピュータを援用することは1960年代から試行されていた。しかし、当時はハードウェアが高価な上、形状を表現する手法もあまり発達していなかったため、十分な成果はすぐには得られなかった。ところが1970年代になって、3次元形状を、曖昧さを残さず数学的に完全に表現できる表現法、いわゆるソリッドモデルが開発されてから、急速に3次元CADシステムの開発が盛んに行われるようになった。初期のころの代表的な形状モデラーとして、BUILD、EUCLID、PADL、GEOMOD、GEOMAP、TIPSなどがある<sup>3-13, 3-21</sup>。これらのシステムは、3次元形状のソリッドモデルをコンピュータ上で表現することが主な機能であった。

しかし本格的に設計に利用されるためには、モデラーは形状表現のみならず、それらの持つ機能をシミュレーションしたり評価できることが必要である。このため、3次元形状を表現する形状モデラーを中心に多くの機能モジュールを統合したエンジニアリングデータベースの必要性が論じられた<sup>3-31</sup>。この考え方の特徴は、一つのデータベースが、設計に必要な対象領域固有の機能モジュール、すなわち、解析、製図、加工、検査などに利用されることである。そのために、各機能モジュールが、統合されたデータベースにアクセスするためのインタフェースを持っている。このように、様々な独立した機能モジュールがインタフェースを介して互いにアクセスできる環境は、統合された設計支援システムに必要である。



さらに製品全体の観点から、形状モデルは設計対象の属性の一つに過ぎないという立場で、プロダクトモデルという考え方も提案されている<sup>3-4)</sup>。プロダクトモデルの特徴は、設計に必要な形状情報と非形状情報(形状特徴、寸法・公差、組み立て法等)を記述し、特に各形状要素間の拘束関係を述語論理で表現している。述語論理表現を用いる理由の一つは、知識処理的手法が適用でき、パラメトリックな設計変更や、運動修正が容易で、公差の配分、分解可能性の検証などができる点をあげている。製品を規定する様々な制約条件や形状情報を述語論理に依って表現した場合、幾何学的制約条件と生成された形状情報との依存関係の管理を行うことが必要になり、ATMS (Assumption-based Truth Maintenance System)<sup>3-5)</sup>を利用した幾何学的推論システムを構築している例もある<sup>3-6)</sup>。また、設計過程で頻繁に行われる試行錯誤を、コンピュータ上の形状操作で行うための取り消しや後戻りができる逆操作機能を導入したシステムもある<sup>3-7)</sup>。

以上、概観した形状モデルと関連のある従来のCADシステムの中で、新規設計のためのCADシステム開発に参考になる点を抽出してみると、

- (1)独立した機能モジュールの間での相互アクセスによる協調処理、
  - (2)述語論理による拘束関係の記述、
  - (3)試行錯誤のための逆操作、
- などがある。その理由としては以下のようなものがある。

(1)に関しては、一般に設計においては複数の観点から検討しなければならないが、これにCADシステムの構成も合致させるのが望ましく、(1)は異なった観点での作業は異なったモジュールに任せるという考え方で、自然な形態と考えられる。

また、(2)の観点は、設計における論理的思考を、無理なくCADシステム上に表現することができるため、きわめて有用と考えられる。

さらに、(3)に関しては、一般の設計作業で行われる試行錯誤を、CAD上にも機能としてもたせ、設計者の思考過程に直接沿った手続きをとることが必要と考えられる。

### 3.2.2 設計技術のエキスパート化

設計技術のエキスパート化とは、知識工学の分野で発達した知識ベース、あるいはエキスパートシステムを利用して、設計手順をコンピュータ上にモデル化しようとするものである<sup>2-9)</sup>。エキスパートシステムは、問題領域の専門知識を利用して、十分に複雑な問題を、エキスパート(熟練者)と同等の能力で解決する知的プログラムと定義できる。熟練者の知識とは、次のような構造と考えられている<sup>3-9)</sup>。

熟練者の知識 = 事実 + 信念 + 経験的知識

従って、単に教科書的事実だけでは、熟練者の知識とはならない。そこで、CADシステムに熟練者の知識を与えるためには、長年設計業務に携わってきた熟練設計者のもっているノウハウを、知識工学者であるシステム開発者が設計者にインタビューすることによって、if-then ルールに当てはまるように抽出し、知識ベースとして記述することになる。そして、設計仕様が与えられたとき、知識ベースと推論機構を起動させ、具体的な設計案を導くものである。レンズ系の設計に関して、熟練設計者の設計ノウハウを知識工学者がインタビューすることで引出してエキスパートシステムとしてまとめ、従来型の各種性能評価や最適化を主としたCADシステムと連携させるシステムを構築している例がある<sup>2-10), 2-11)</sup>。これは、機能が類似した製品を設計するときには基本的な設計手法が共通であるため、効果的にエキスパートシステムを利用できた典型例である。

しかし前例のない新規設計の場合で考えると、設計手順は未知であるから、教科書の知識を除いた経験で得られる設計ノウハウとしての知識は皆無に等しい。したがって、予めエキスパートシステム

を構築して利用することはできない。しかし、そのなかの推論機構自体は、設計者の考えを進める過程を代行するのに利用することができると考えられる。そこで、新規設計に利用するCADシステムでは、教科書の知識を論理表現で記述し、推論機構を利用してそれを展開して支援する形態が望ましい。

### 3.2.3 設計診断や設計作業の論理操作によるモデル化

設計過程において使われる知識を、設計対象に関するもの（設計対象の拘束条件や機能、構造など）、設計操作に関するもの（要求仕様から設計案を求める操作や設計案の診断・修正など）、設計制御に関するもの（設計者が経験的に獲得した探索戦略や設計手順など）、に分類した場合<sup>3-8)</sup>、新規設計においては、設計操作に関する知識を利用する手法が論理操作で利用できると考えられる。

設計案を求める操作型のシステムとしては、化学式とスペクトルから化学構造式を求めるDENDRAL、診断型のシステムとしては、確信度を使ったプロダクション・ルールを用いて感染症の診断と治療に関する助言を行うことを目的としたシステムMYCIN等が初期の例である<sup>3-12), 3-13), 3-14)</sup>。機械設計の分野で設計診断に論理操作を利用したものに、形状記述言語を使って、油漏れ、熱膨張による軸ロックという望ましくない機能が設計案に含まれているかどうかをパターンマッチングに帰着させて求める例<sup>3-15), 3-16), 3-17), 3-18)</sup>や、運動機能を自動抽出する研究がある<sup>3-19)</sup>。

一方、設計過程の形式化に述語論理を用いることで、演繹を基本とした操作によって、手順や経験的な方法に関する知識も含めた統一的な表現が可能となることが指摘されており<sup>3-20)</sup>、概念設計操作に論理操作を関連付ける研究も行われている<sup>3-21)</sup>。また、設計過程の論理的な側面を追求すると、抽象的な数学的操作になる。設計過程一般を機能空間から属性空間への写像とみなして、公理論的方法を展開することにより、設計の基礎理論の確立を目的とする研究も

ある(3-22), (3-23)。

これらのなかで新規設計に応用可能な面を考察すると、設計の一過程を論理操作で代用することは可能であろう。ただし、設計対象の機能を論理的な表現形式で表わせることが前提となる。これに対し、設計診断などは設計対象に関する知識が豊富に蓄積された段階で可能となるため、新規設計段階ではまだ利用することは期待できないと考えられる。

### 3.3 アイデアの展開と新規設計用CADへの応用

新規設計においては、様々なアイデアを検討して可能性を評価する必要がある。このとき、いかにして多様なアイデアを引き出せるか、という点に関して、コンピュータで支援可能な方法を本節で考察する。

#### 3.3.1 網羅的探索によるアイデアの発掘

設計に適用可能な構成要素の種類や手法が限定されている場合、その中の最適な組合せを求める方法を考察すると、まず組合せの個数が少ないときは、全ての場合について概略を計算して結果の最良のものを採用する方法がある。積算見積り結果を比較するコスト計算などはこのような方法の例である。また、外注依頼の場合の相見積りをとる作業も、設計工程の一つとみなせば、この種類に属すると考えられる。

次に組合せの個数が増えると、全ての場合を考えることは無駄が多くなるので、どの構成要素をどう変えたら全体がどのように変化するかという傾向を把握し、個々の構成要素の動きを定性的に理解して、最適な組合せを推定する方法が考えられる。たとえば、リンク機構の各アームの長さの設計では、連続的に変えられる長さの最適値を求めることは容易ではないが、個々のアームの変化がどのように全体の動きに影響するかは推定できる。また、組合せの個数は多くないが、個々の組合せの例を求めるのが非常に手間のかかる場合も同様に、傾向を把握する方法が採用できる。

ところがリレー光学系では、光学部品とそれらの配置関係は、通常の結像光学系と異なり、離散的な関係である。すなわち、凸レンズを同一光軸上に配置して等倍率のリレー光学系を構成する場合、凸レンズどうし間の相対的な焦点距離も、レンズ間距離も連続的に変化させることができなくて、離散的な値しか許されていない。本

課題では、様々な構成が考えられるリレー光学系のなかで、最適なものを選択しなければならない。この場合、一つのリレー光学系の構成例がわかっている、他の例を推定できない。それは、系が線形でないため定性的な検討が困難だからである。

そこで対策として、リレー光学系を構成する基本ルールを見いだして、系統的に全ての組合せを生成させて検討する必要がある。このような場合、コンピュータを離散的な組合せの生成に利用すれば、手間のかかる作業はすべてコンピュータに任せることができ、設計者はその結果だけを検討すれば良い。そして検討結果を定量的にチェックするためには、結果のデータを解析モジュールに自動的に渡す必要がある。

以上をまとめると、全ての組合せを生成し、かつそれと連結した定量評価のためのシミュレーションシステムが、アイデアの発掘のために必要な機能であるといえる。

### 3.3.2 異種機能の組合せによるアイデアの生成

設計過程において、目的とする機能を直接実現する手段がない場合、その機能を要素機能に分解して副次的目標を設定し、これを実現する手段をまず検討することが一般に行われる。そして、一旦副次的目標が達成された後に、それらを組み合わせて、当初の目的が達成できることを確認することは、複雑な作業ではあるが、高度の判断は必要とはしない。この場合重要なことは、どのような副次的目標に分割するかという選択であって、これはやはり設計者の経験や方針に依存せざるを得ない。

たとえば機械系設計の例でいえば、一つの軸の回転を、位置と方向が変化可能な軸に伝達するという目的が設定された場合、これを、回転を伝えることと位置・方向が変化する軸の構成との副次的目標に分解して考えてみる。それぞれの副次的目標を実現する手段として、回転を伝えることは歯車やベルトを利用する方法が一般的であ



り、位置・方向が変化する軸の構成は多自由度関節を直列に用いたアームが考えられる。これらを組み合わせるとユニバーサル・ジョイントの組合せや、歯科医で使用されていた旧式のベルト式グライnderのイメージが考えられる。また、回転を伝える機能を、電気信号を仲介することで考えれば、発電機と同期電動機で原理的に回転を伝えることができ、この場合電動機の軸の方向は、機構的な制約がないため、任意にとれる。

このような異種機能の組合せ作業自体をCADシステム側で行うと、設計者は思考のベースを保って設計判断が可能となる。したがって、異種機能を組み合わせるような機能を簡単にサポートすることが、概念設計段階で使うCADシステムには必要である。

本研究に即して具体的に考察すると、設計目標である光軸制御型オプトメータの開発のためには、まず、光軸制御型リレー光学系を開発する必要がある。光軸制御型リレー光学系の機能を分けると、リレー光学系とその光軸制御性となる。そこで、述語論理によってリレー光学系と光軸制御性が記述できれば、これらの組合せは容易に実現できることになる。そこで、本研究では異種機能の組合せの例として、光軸制御性とリレー光学系の組合せを実証することにする。

### 3.3.3 3次元表示による理解とひらめきの促進

従来、設計者を高度にサポートすることを目標に考えられてきたインテリジェントCADシステムも、現在論理的な動作に限定されている。これに対して設計者は、「ひらめき」という論理の飛躍により新しいアイデアを取り込むことができる。これは、過去の経験のなかから、直接にはおよそ関連がないと思われる事象を設計者が熟考の末、あるいは全く別の場面において、インスピレーションを得て思い浮かべ、現在の設計問題に関連付けて解決の糸口を見つけた行為である<sup>3-24)</sup>。これをコンピュータで代行しようとする、仮



に設計者の過去のあらゆる経験を蓄積でき、かつ、高速検索できるような巨大データベースシステムが構築できたとしても、ひらめきによる問題解決法に相当する機能を実現させるアルゴリズムが考案されるとは考えにくい。仮に考案されたとしても、その演算の手間と時間は、天文学的な量になると考えられる。そもそも「ひらめき」は論理的作用でないため、コンピュータで近未来に表現できるとは思えない。従って当面は、このようなひらめき模擬システムが一般的に使われるようになる見通しはないと考えられる。

したがって、新規設計においては、設計者自身のひらめきを重要視しなければならない。そこで新規設計におけるCADシステムの支援方法として、設計者のひらめきを促すような方式を考えるのが現実的である。そのためには、逆に、設計者のひらめきを阻害する要因を除外することを考える。ひらめきを阻害する要因は、一言で言えば、設計者の思考のベースを乱すものである。CADシステムを使って設計作業を行う場合に、設計者の思考のベースを乱すものには、

- (1)システム操作や解釈に関する余分な思考を設計者にさせる場合、
- (2)システムによる設計過程が設計者の思考過程にそぐわない場合、
- (3)遅いシステム反応で、設計者の思考の連続性が保てなくなる場合

等が考えられる。最初の例としてデータ入力問題で、CADシステムに入力するためにデータフォーマットをシステム側の読み取り形式に合わせるための整理作業がある。またデータ出力の問題では、CADシステムが設計案を設計者に提示したとしても、それを理解するために設計者が考え込んだり、再度計算をしなければならないような提示方法がある。特に出力表示の場合、提示は直ちに理解ができる図形を使う方が、文字列や数列を示すより優れていることは明白である。しかし、図形に変換することで応答が極端に遅くなるとは上記(3)で示した思考の中断をもたらし、マイナスの要因となる。

また上記(2)の例では、モデリングの問題がある。例えば、形状モ

デルを生成する場合、設計者はまず形状を持つ機能から大まかな構造を考えながら、次第に詳細な寸法を決めて行く。ところが、従来のCADシステムでは、寸法を与えて形状を定義してゆく。もちろん、パラメトリックに定義されていて後で変更は出来るようになってはいるが、発想の基本が設計者のそれと異なっている。これは設計者の思考過程にそったシステムとはいえない。もちろん、技術的な困難さがある、完全に設計者の思考に沿うようにすることはできないにしても、CADシステムの設計に際しては、これらの点を十分考慮して設計しなければならない。

これらのことから、設計者のひらめきを助長させるCADシステムとして、以下の方針を採用することにする。

- (1) 同じ組合せの入力操作が何度もある場合、まとめた形の操作を導入し、また、出力は理解が容易な3次元グラフィックスを用いる。
- (2) 設計者の思考過程に沿った方向で、簡単な例から次第に複雑な系に変更しながら設計が進めるようにシステム設計する。
- (3) 3次元グラフィックスの導入によるシステムの応答性の低下を防ぐために、グラフィックス処理を分散処理で独立させて行う。

### 3.4 新規設計用CADの開発指針

新規設計に際して開発されるCADシステムは実際に使えるシステムでなければならないという観点から、これを開発するときには心がけなければならない点として、次のものをあげる。

- ・必要以上の無駄な開発を避けること。
- ・適切な機能別にモジュール化して各システムを独立させること  
(デバッグ領域を局在化させて開発能率をあげること)。
- ・適切な開発言語を選択できるようにすること。

また、実際の設計環境では開発のための人的資源も、時間も無限ではないことから、どのような配分で資源を設計と設計支援のためのCADシステム開発に分けるのが最適かという問題も重要である。新規設計用CADシステムの開発のためには、これらの点を考慮した指針が必要になる。そこで、本節ではこの指針について考察する。

#### 3.4.1 特性比較に基づく設計者とCADシステムとの役割分担

新規設計が類似設計と異なる困難な点は、参考にするような設計原案がないため、要求仕様のみをもとにアイデアを練らなければならないことである。しかも、得られたアイデアは実績の裏付けがないから、詳細にその実現可能性を検討しなければならない。そして、実現可能性の検討もその方法論が確立しているとは限らないから、CADシステムで支援するとしても、定型的な機能しか持たない既存の市販CADシステムで必ずしもすべて対応できる訳ではない。さらに、既存CADシステムは内部構造を一般に公開していないので、ユーザが機能を追加できない。したがって、新規設計支援のためには、独自にCADシステムを開発しなければならない場合が多い。このような理由から、新規設計過程で処理しなければならない課題には、本来の設計自体の他に、それを支援するCADシス

テムの開発が追加される。

そこで、効果的に設計を進めて行くためには、設計者とコンピュータとの役割分担が重要になってくる。役割分担を効率よく行うためには、作業内容を明確にするとともに、設計者とコンピュータとの特性の違いを明確にして、合理的な配分を計画する必要がある。

図3.1に示すように新規設計では、基本アイデアを確認するプロセスが全体的な作業量からみてかなり大きいと思われる。また表3.1に設計者とコンピュータの処理特性を定性的にまとめた。これら図表から以下のことが考えられる。すなわち、設計者の役割として、基本的な概念の整理、処理方針の策定、アイデアの選出、必要なプログラム開発、設計案の取捨選択と評価などが考えられる。一方、コンピュータの担当として、大量の記憶と網羅的な探索、設計者によるケアレスミスの検出、与えられたアイデアの合成と詳細な数値計算によるシミュレーション、計算結果の図による提示などである。このような役割分担によって、設計者とコンピュータが互いに長所を生かしながら、協調して作業が進めるようにすべきである。

### 3.4.2 工数比較によるプログラム化の判断基準

新規設計におけるCADシステムには、新アイデアの実現可能性の検証という側面と、詳細設計における数値解析支援という2つの機能側面をもつ必要がある。新しい機能をCADシステムに実現するためには、それをまずプログラム化する必要がある。これはすなわち、本来の設計対象とは異なる開発対象が生じることになり、開発者のパワーの一部を効率よくCADシステム開発に割り当てなければならないことを意味する。一般にプログラム開発はコストがかさむために、できる限り無駄な開発を避けなければならない。具体的な例としては、外見上の形態を統一させるために、開発効率、実行効率を無視してでも同一様式で全てのプログラムを記述したり、あるいは、図的表現が理解しやすいからといって、数値で十分な出

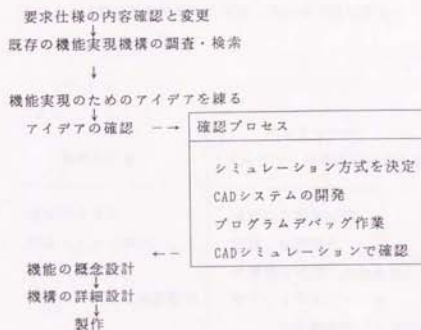


図 3.1 新規設計作業の特徴

類似設計と異なり、新規設計では設計初期段階で得られたアイデアを検証する確認プロセスが重要である。

表 3.1 設計者とコンピュータとの処理の特徴比較

コンピュータは決められた論理にしたがう処理しかできないが、人間は論理を越えた思考、創造が可能である。

熟練設計者	コンピュータ (プログラムの理想的稼働を前提)
抽象的な思考	具体的な数値計算
概念イメージ操作	記号・論理操作
小量情報処理	大量情報処理(高速処理)
時間オーダーの連続処理	サブミリ秒オーダーの 時分割処理(多重処理)
時間オーダーで休憩必要	月オーダーの連続作業可能
プログラム開発	プログラム実行
減衰する記憶特性	完全な記憶保持
新しい判断処理可能	単純繰り返し作業
ケアレスミス有り	処理自体にはミスがない
生理的外乱に左右される	電気的外乱に左右される

力表示部を凝ったグラフィック表現に変換するために、かえって応答が遅くなるようなプログラムの開発は避けるべきである。

次に、設計作業の途中でのプログラム開発について考察する。アイデアの検証段階にある概念設計や、数値計算による詳細設計のときに、新たな機能がCADシステムに必要となった場合の対処の仕方には、次の2つの方法が考えられる。

- (1) 設計時の思考の連続性をなるべく保つために、電卓を駆使したり、または、すでに開発済みの他の機能を複雑に組み合わせる等で、目的とする機能の新たな代替方法を探しながら処理する。
- (2) CADシステムの完備性のために、あるいは、後の再利用のために、一旦本来の設計作業を中断して、必要となった新しいプログラム機能の開発を始める。

いずれも設計作業全体からみた大まかな方向としては間違っていないが、トータルな設計コストという観点からは、場合によってはその差が顕著になる。そこで、このような場合に、新たにプログラム化するかどうかの判断基準をあらかじめ考察しておく必要が生じる。

まず、新しい機能の内容を検討して、これまでに開発してきた機能の組合せや電卓などによって実現できないかどうかを調べる。既に存在する機能のいかなる組合せや電卓などによっても新しい機能が実現できない場合、これは、新たにプログラム開発をせざるを得ない。しかし、そうでない場合には、まず、次に示すような検討を行ってから行動に移すべきである。

電卓などの補助計算機を用いて実行する手間の時間換算値を $a$ とする。また、既存の機能の組合せ利用による新機能実行の手間の推定時間換算値を $c$ とし、一方、新機能のプログラム開発に要する手間の推定時間換算値を $p$ とする。次に、現設計時点において、問題の機能を今後どのくらいの頻度で使うことが予想されるか、その推



定使用回数を  $n$  としたとき、次に示す(3.1)式が成り立つようであれば、新規プログラム開発はやめて代替手段で設計を続行すべきである。すなわち、上記(1)の方法を採用すべきである。

$$n \times \sin(c, a) < p \quad \dots \dots (3.1)$$

ただし、設計が一回限りであれば、(3.1)式でよいが、類似設計に今後CADシステムが再利用されることが予想される場合は、その予想回数倍だけ(3.1)式の左辺が大きくなることを考慮しなければならない。(3.1)式では、各項は推定値であり正確な数値を求めることは当然できないが、設計とCADシステム開発を同時進行させるときの考え方を一般的に表現していると考えべきである。なぜならば、一般に人間は一つのことには没頭しがちとなり、そうなれば一旦プログラム開発を開始したら、集中しすぎて本来の設計がおろそかになりやすいという傾向性をもつからである。したがってこの数式は定量的な評価というよりも、定性的に常に考慮しておくべき項目としての意義をもつ。そして、常に最終目的のために最適な行動を探らなければならない、ということ象徴している。

### 3.4.3 プログラム言語の特徴を生かした機能開発

有限の資源・時間を有効に使うために、3.4.1項では設計者とコンピュータとの役割分担を明確にしたが、同様なことが再帰的に、コンピュータ内部のプログラム同志でも考慮されなければならない。すなわち、適材適所という役割分担の考え方を言語処理系にも適用することが望ましい。そこで新規設計作業において、コンピュータ側で処理する内容を以下のように分類した。

- ・アイデアの内部表現
- ・アイデアの組み合わせ
- ・複雑かつ大量の数値計算
- ・計算結果の3次元表示

一方、コンピュータのハードウェアとして一般的になったワークス

テーションを用いることにすれば、使用できる代表的なプログラム言語は、C、FORTRAN、LISP(XCL)、Prolog(X-prolog)等がある。それぞれの言語の特徴を以下に簡単に示す(1-25)、(2-26)、(3-27)、(3-28)。

C: ワークステーションの基本OS(Operating System)であるUnixがCで書かれていることもあって、サポートしている機能・演算子が多く、システムコールが使いやすい融通性の高い手続き型言語

FORTRAN: 数値計算分野で最も歴史が古くよく使われている言語で、ライブラリーも豊富で互換性が高い手続き型言語

LISP: 記号処理用で、関数とデータが同じ形をしている。リスト分解処理用関数CAR、CDRを用い、括弧を多用する関数型言語

Prolog: 述語論理に基づいて、問題を解決するための言語であり、パターン照合に依って、事実や手続きを呼び出す。また、自動復帰により探索を行う特徴を持つ論理型言語

従って、これらの各言語の特徴を考慮し上記の作業を遂行する機能を開発するために、以下の選択を行った。すなわち、アイデアを表現しその組合せを求める言語として、また、論理的な内容を簡潔に表現でき、かつ、自動的に探索を行う Prolog 処理系を採用する。また、複雑かつ大量の数値計算手順を記述するには FORTRAN が適切である。3次元表示に関しては、2次元画面上で自由に立体知覚を得るためには、運動視差や奥行き方向の濃淡表示による手がかりなどを利用した線画表示方式が必要である。運動視差を具体的に実現するためには、ダイヤルなどで視点変換のデータを与え、実時間で表示図形を回転させる必要がある。ところが一般的には、この3次元処理にかなりの計算パワーを必要とする。また、アイデアの検証のみならず、詳細設計結果の表示も兼ねるCADシステムとするには、表示品質は優れたものが要求される。特に光線のような細かな線画表現では、ラスタディスプレイのエリアシングが表示品質のネックになってくる。そこでこれらを考慮して、3次元処理をロ

ーカル処理で行い、エリアシングが原理的に生じないベクトルスキャン型ディスプレイPS300を用いることにした。その場合、PS300の3次元処理用プログラムはデータ駆動型の並列型言語である。一方、3次元表示部が動作するPS300にデータを送る相手のコンピュータとして、ワークステーションSUN4を用い、通信処理用プログラムを開発する言語としては、システムコールが使える融通性の高いC言語で記述するのが有利である。以上のような言語選択を行ってCADシステムを開発する。まとめると以下の通りである。

- ・基本アイデアの記述と組合せ (SUN4) → Prolog
- ・部品の記述と光線追跡 (SUN4) → FORTRAN
- ・ベクトルスキャン式線画表示 (PS300) → 専用並列型言語
- ・プログラム間通信 (SUN4+PS300) → C

### 3.5 第3章のまとめ

第3章では、第2章で示された新規設計のためのCADシステムを開発するために必要な方法論について考察を行った。まず、従来のCADシステムの方法論を調査し、アイデアの展開に関連する手法を整理した。そして、アイデアの展開を支援する場面として次の3つを考慮した。

- (1) 網羅的探索によるアイデアの発掘
- (2) 異種機能の組合せによるアイデアの生成
- (3) 3次元表示による理解の容易さとひらめきの助長

これらをサポートすることが、新規設計用CADシステムとして必要である。そして、実際にシステムを開発する際の指針として、次の3点を提案した。

- (1) 適材適所の考えを、設計者とCADシステムとの役割分担に生かす。
- (2) 限定された資源を有効に使うために、工数比較によるプログラム化の判断基準を設定する。
- (3) コンピュータ内部での処理内容についても、そのプログラム言語の選択において、適材適所の原理を適用する。

## 第 4 章 光軸操作型 C A D

### G A U S S の 開 発

#### 4.1 はじめに

本章では、前章の考察にしたがって、新規アイデアの作成と検証、詳細設計支援のために開発した光学CADシステムについて述べる。本CADシステムは、アイデアを練る段階から設計を支援することを目的としているが、それに必要な機能は、設計前には大まかにしか明らかでない。そこでシステム構成として、大まかな機能毎にその機能に適した言語を用いた別モジュールとし、各々が独立でも、連携しても実行が可能になるように配慮した。この光学CADシステム全体を、特に光軸操作型シミュレーションシステムGAUSS (Geometrical Axes Usage Simulation System) と名付ける。

4.2節ではまず、従来の光学CADシステムの典型的な機能について述べる。そのなかで、従来のシステムでは、本研究のリレー光学系の設計に必要な推論機能や光軸操作機能等がなく、また機能追加も困難であるため、新規設計に対する支援機能が不十分であることを示す。したがって、本設計で必要とする機能をもつCADシステムを、新たに開発することにした。4.3節では、この開発すべき光学CADシステムの全体像を、前章の考察をもとに描き、推論部、光線追跡部、3次元表示部、という3つのモジュール構成とした過程を説明する。そして、4.4節では、これら3つのモジュールのうち、主要な光線追跡部 GAUSS/R (Ray tracing) において、通常の光線追跡に関する機能以外に必要な要求仕様を示し、その実現法を説明する。4.5節では、光線追跡部の出力結果をグラフィック表示するための3次元表示部 GAUSS/V (Visualization) のプログラミングについて説明する。なお、アイデア検討段階で利用する推論部 GAUSS/I (Inference) は第5章のなかで、新たに開発した光学理論と関連付けて述べる。

## 4.2 従来の光学CADシステムの機能と限界

一般に利用されている汎用の光学CADシステムは、通常の光学機器の設計を支援することを目的としている。たとえば、代表的な光学CADプログラムとして使われているCODE V (コードファイブ)<sup>2-1)</sup>を参考にとりあげてみる。このプログラムで支援可能な設計対象となる光学機器としては、カメラ、顕微鏡、望遠鏡、投影機などの光学像を得ることを目的とした像生成系、フライングスポットスキャナ、レーザ走査系などの光ビームの移動を主としたビーム走査系、ホログラフィ、スペクトロメータなどの回折系その他がある。これらの光学系の設計のためにこのプログラムがもつ機能には、光学部品の定義、レイトレシング、その結果のグラフ表示などの基本機能の他に、収差量計算、スポットダイアグラム、点像分布関数、モジュレーショントランスファ関数などの解析評価機能、そして、限界設計、最適設計のためのパラメータ自動変更機能がある。データの入力方法は、光学部品の各光学面の曲率や材質を数値または記号で入力するカードイメージ方式である。出力は数値、あるいはプロットイメージの2次元的な図形出力となっている。

本研究では、一直線状の光軸上でリレー光学系を設計し、その光軸を動的に制御しなければならないことから、光軸を揺動平面鏡で折り曲げる操作を概念設計段階で導入する必要がある。このような操作は、上記のような汎用プログラムで直接行うことが困難である。光軸を折り曲げるということは、折り曲げる位置以降の全ての光学部品に対し、揺動平面鏡に関する鏡像変換を施す必要がある。これはかなりの計算量があり、設計時に頻繁に行うには別途専用のプログラムを必要とするほどである。その場合、バッチ的入力にしても、対話入力形式にしても、従来のCADシステムに結果を取り込んで、システムを対話的に使うのは困難である。しかも、計算結果によっては光軸が3次元的に折れ曲がることにより、部品同志が複雑に入り込むことが予想される。このような結果が生じた場合、従来のC



A D システムの 2 次元的なイメージでは、3 次元的な配置を理解するのが困難である。そこで、本設計用途に適した支援が可能な光学 C A D システムを、新たに開発する必要性が生じた。

従来の C A D システムにない新たな必要機能をまとめると、以下のようなになる。

(1) 光線追跡 (レイ・トレーシング) 機能

- ・ 光線追跡順序の無指定化
- ・ 光線の遮断機能 (口径の制限や他の部品によるもの)

(2) 光軸操作機能 (光学特性を変えない部品配置変換機能)

- ・ 光軸の折り曲げ、軸振り、ねじり、光軸に沿った移動
- ・ 光学部品の移動、回転、挿入

(3) 結果の 3 次元表示機能

- ・ 運動視差や濃度変化を利用
- ・ 任意方向からの表示

(4) 推論機能

- ・ 基本設計案の自動提案
- ・ 設計案の組合せ呈示

(5) モジュールの組合せの自在化

- ・ モジュール間の協調作業による機能の段階的複雑化

#### 4.3 光軸操作型 CAD システム GAUSS に必要な機能構成

光軸制御型リレー光学系の設計方針の具体的なイメージとしては、2.4.1項で述べたように、まず、直線光軸上でのリレー光学系を求める。その後、光線追跡を行いながら光軸を折り曲げることによって、光軸制御性の可能性を検討する。このとき、部品相互の干渉などをチェックして部品配置等を修正する必要がある。以上のような手順を想定すると、これを支援するCADシステムに必要な機能は、大まかにまとめて次の3点になる。したがって、この3つを独立させたモジュールに分けて処理することにした。

- (1) 単一直線光軸上でリレー光学系の構成例を網羅的に探索し、また、複数機能の組合せなどを求める推論処理機能
- (2) 光学的に等価性を保って光軸を操作する（折り曲げ、ねじり、挿入、回転、移動など）機能をもつ光線追跡機能
- (3) 運動視差や濃淡表示による3次元表示機能

本研究で開発する光学CADシステムは、有用性を重視し設計過程の広い範囲で使うために、完全に完成してから使うというよりもむしろ、開発しつつ使うことを前提とする。その理由は、設計がある程度進んで初めて、次にどのようなことを確認しなければならないかがわかり、それが分かって初めてCADシステムにどのような機能が要請されるかが明確になってくるからである。その他、別の観点から設計内容を検討し、さらに新しい機能がCADシステムに必要なようになってくる場合もある。このようにいくつかの必要な機能が明確になり、それらがなければもはや設計が進まなくなった時点で、CADシステムに機能を追加する作業を行うことになる。つまり、必要性が生じた段階で、必要な部分の機能開発（プログラム開発）を行うことにする。

しかしながら、たとえ設計支援のためとはいえ、プログラム開発や演算実行に時間がかかりすぎるとは、本来の設計作業はスムーズに

は進展できない。そこで、支援機能の種類に応じてプログラミング言語を選択して、円滑に開発・実行することが必要となる。そのためには、大まかな支援機能の種類毎に、CADシステムをモジュール化することが適切と考える。すなわち、モジュール化によって、各モジュールを独自に開発でき、使うときは単独でも、協調させて大きな問題を解決する手段としても使うことができるようにする。そしてより詳細に、より広範囲に、設計内容を検討する必要が生じるにしたがって、より大きなシステムとして計算実行できるように各モジュールを結合して利用する形態とする。

そこで、設計過程のなかでアイデアの案出・検討段階、具体的な展開段階、視覚的な検証段階の各段階で有効に支援できるようなモジュールとして、それぞれ、推論部GAUSS/I(Inference)、光線追跡部GAUSS/R(Ray tracing)、3次元表示部GAUSS/V(Visualization)に分割した。これら3つのモジュールの機能開発においては、それぞれの特徴に合致したプログラム言語を選択する必要がある。推論部では、基本アイデアを簡潔に表現でき、組合せの自動探索を行わせることができるProlog処理系を用いる。また、光線追跡部は数値計算を効率よく行う必要があるため、FORTRANを用いることにし、3次元表示部はローカルで3次元透視変換を行うPS300を選択し、それに適した言語を使用する。そして、モジュール間の通信部分は主としてシステム記述言語であるC言語を用いる。

#### 4.4 光線追跡部 GAUSS/R に必要な諸機能と実現法

光学設計支援システムに必要な基本的機能に光線追跡がある。光線追跡に関しては、それを眼球に適用したのは60年代にさかのぼる<sup>4-27, 4-31</sup>。そして、応用としてコンピュータグラフィックスの分野でリアルな画像を生成するための手法の一つとして注目されてから、光線追跡は数多く使われるようになった<sup>4-21, 4-51, 4-61, 4-71, 4-91, 4-91</sup>。したがって、基本的機能としてもつ光線追跡法自体の説明はここでは省く。本節では、本設計のために開発した光軸操作型CADシステムのみ特有の機能について説明する。

##### 4.4.1 光学特性を保存した光軸方向変換操作機能

本光学設計で用いる光線追跡部には、単なる光線追跡に加えて、設計を進めるにしたがって、単純な光路から次第に複雑な光路にする思考過程に沿った設計が行えるような光軸操作機能をもたせる。このような光軸操作機能のなかの一つに、光軸方向変換操作機能がある。この機能には次のようなものがあり、以下に説明を加える。

- (1)光軸の折り曲げ機能
- (2)光軸の軸振り機能
- (3)光軸のねじり機能
- (4)光軸に沿った移動機能

まず、「光軸の折り曲げ」という表現は以下に示すような意味で用いる。すなわち、ある光学系の光軸が一直線状に構成されている場合、光路の途中に平面鏡を挿入して光路を反射させて折り曲げることをいう。このとき、反射鏡を挿入する以前と挿入した後で光学系の性質を同一に保つために、反射による光路の変更とともに、それ以降の光学部品も一緒に移動させる必要がある。すなわち、たとえば反射鏡を光路上に挿入して光軸を反射させた場合、その位置より光路上下方にある光学部品に対して、挿入した反射鏡に関する鏡像変換を行わなければならない。これらの操作をまとめて「光軸の

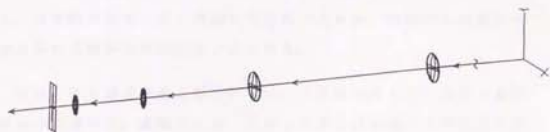
折り曲げ」機能と呼ぶ。この単純な例を図4.1に示す。したがって、光軸の上流側からみれば「光軸の折り曲げ」によって光学的な性質は、左右反転を除いて全く変化しない光学系となる。

この光軸折り曲げ操作の類似操作として、「軸振り操作機能」がある。軸振り操作は、既に折り曲げられている光軸の折り曲げ部分に位置する鏡の傾きを変えて、その鏡からの反射光の光軸方向を、設計意図にしたがう特定の方向に向くように鏡の向きを変える操作である。このときにも、光路上下方の部品も同時に移動させなければならぬ。これらの機能が必要な設計場面としては、

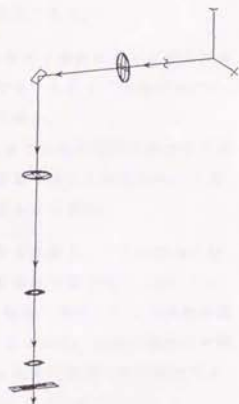
- (1) 光の進路上に別の部品が存在して、干渉している場合にこれを選択するとき
- (2) 光軸を回転させる機能を実現するために、揺動平面鏡を光路に押入するとき
- (3) レンズの代わりに球面鏡を用いる場合に、往復の光路が重ならないようにずらすとき
- (4) 配置として軸対称でない光学系を設計するとき
- (5) 製作上の精度保持のために方向を特定させるとき

などがある。

これらの機能の実現方法を以下に説明する。各光学部品にはその姿勢を記述するために、中心位置座標  $x$ 、 $y$ 、 $z$  の3つのパラメータと、部品に固定された座標系の3つの各座標軸の方向余弦を表わす9つのパラメータを用いた合計12個の姿勢記述パラメータをもっている。これを  $4 \times 4$  の座標変換行列として使う。このとき、光軸の折り曲げによる鏡像変換は、各部品毎の座標変換行列に鏡像変換行列を掛けたものを新しい座標変換行列とすることで実現している。具体的な変換処理式は、付章A4.1に示す<sup>4-10)</sup>。一方、「軸振り操作」は、まず、望まれる反射光軸方向となるように部品(鏡面)方向を計算する。次に、現在の部品を光軸の折り曲げ操作の逆操作で取り除き、さらに、計算された方向にて再度光軸を折り曲げ



(a) 折り曲げ前



(b) 折り曲げ後

図 4.1 光軸の折り曲げ機能

- (a) 折り曲げ操作前の光軸と部品配置で、座標軸原点から光線が出ている
- (b) 光路途中に平面鏡を挿入し、光路と下方の部品を鏡像変換させる操作を1コマンドで実行する

るように部品を挿入する。すなわち、鏡像変換を2回施すことにより、光学的にはまったく等価な光学系であるが、物理的には異なった方向に光軸が折れ曲がることになる。

次に、折り曲げ機能と似ているが、「光軸のねじり」機能の意味について述べる。直観的には、光路上のある点以降の光学部品全体を、その点での光線方向を回転軸にして回転させる機能である(図4.2参照)。この機能は、最適設計を行うための光学系の調整手段として、以下のような場合に必要な支援機能である。

- (1) 光学部品単独、あるいはそれらの組合せで構成される光学系において、光学特性が光軸回りで軸対称でないときに「光軸のねじり」によって特性を変化させて改善させる場合、
- (2) 反射鏡に依って光軸を折り曲げた場合にも光学部品の組合せ全体としてみれば、幾何学的に軸対称な配置ではなくなるため、「光軸のねじり」によって空間配置を変化させる場合。

この機能は2通りに分かれる。すなわち光路上、下方の部品に対して、光軸を回転軸とした機械的な回転変換を施す場合(図4.2(a)から(b))と、光学的には全く等価な「軸振り操作」による光軸の回転を実現する場合(図4.2(a)から(c))とである。前者の場合の光軸のねじりに対する部品配置の変換も、 $4 \times 4$ の変換行列で記述できる。その具体的な内容は付章A4.2に示している<sup>4-11)</sup>。

#### 4.4.2 光学特性を保存した光路長変換操作機能

既に光学部品が定義されて光軸が定まっているとき、新たに光軸上にガラス板を挿入する必要性が生じる場合がある。たとえば、2方向のビームが空間的に重なっているとき、その重なる手前で一方だけのビームを反射させるために部分的に鏡になっているガラス板を使う。このとき、一方のビームは鏡面上の反射を利用し、他の一方はガラス部での屈折・透過を利用することになる。したがって、



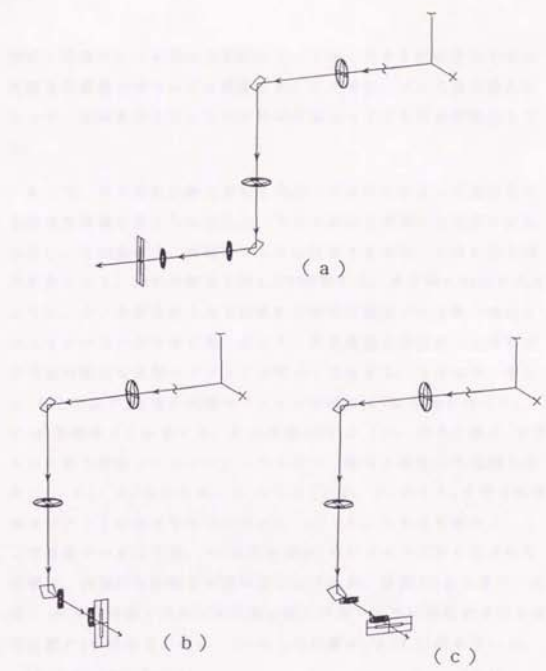


図 4.2 光軸のねじり機能

- (a) ねじり操作前の光軸と部品配置
- (b) 光軸を回転軸にして、機械的に下方光路上の部品群を回転させたもの
- (c) 光軸の回転に伴い、光学的等価になるように部品を回転・移動させたもの

屈折・透過のビーム側の光学系にとっては、ガラス板が無いときに光路長が最適になるように調整されていた場合、ガラス板の挿入によって、光路長が変化して光学特性が異なってくるため不都合となる。

そこで、ガラス板が挿入された場合、その厚みによって変化した光路長を補償するように光路上、下方の部品を移動させなければならない。この操作は、原理そのものは簡単であるが、かなりの手間を必要とする。操作の経過を図4.3で説明する。まず図4.3(a)に示すように、ガラス板を挿入する箇所の前後の部品間での光軸の長さをレイトレーシングで求める。ここで、部品表面と部品表面との間での光軸の線分を光軸セグメントと呼ぶことにする。すなわち、部品 $C_1$ から部品 $C_2$ までの光軸セグメントの長さ $d_1$ を光軸上の点 $P_1$ 、 $P_2$ の座標値より計算する。次に同図(b)のように、ガラス板 $C_3$ を挿入した後で再度レイトレーシングを行い、新たに発生した光軸上の点 $P_3$ 、 $P_4$ 、 $P_5$ を求める。 $P_1$ から $P_4$ まで、 $P_2$ から $P_5$ までの各光軸セグメントの長さをそれぞれ $d_2$ 、 $d_3$ とし、それらを求める。ここで注意すべきことは、 $d_3$ は屈折率 $n_1$ のガラス中だから光学的な距離は、物理的な距離とは異なることである。部品 $C_1$ から見て、部品 $C_2$ が挿入前後で見かけの位置の変化が無いように移動させたときの位置 $P_6$ を求めるために、 $P_3$ からの距離 $d_4$ を(4.1)式を用いる。

$$d_4 = d_1 - d_2 - d_3 / n_1 \quad \dots \dots \dots (4.1)$$

$P_6$ の位置がわかれば、元の位置 $P_2$ から部品 $C_2$ を移すべき移動ベクトルを求めることができる。この移動ベクトルを光路上、下方の全ての光学部品に対して与えることで、光学的に変化が近似的に無い構成が実現する。これを「等価挿入操作」と呼ぶことにする。

ここで述べたガラス板の等価挿入操作には、逆操作が必要で逆操作は手順を全く逆に行うだけでよい。また、一度挿入したガラス板を回転させる場合にも光学的な距離が変化するので、このような補正が必要になる。この場合も回転の前後でレイトレーシングを行い、

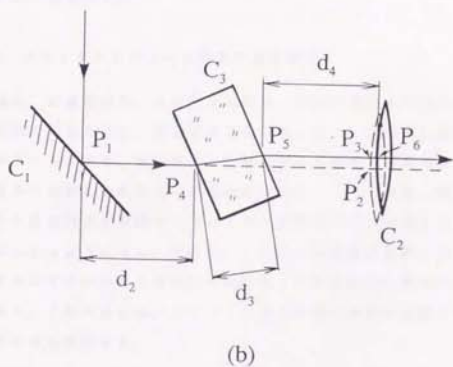
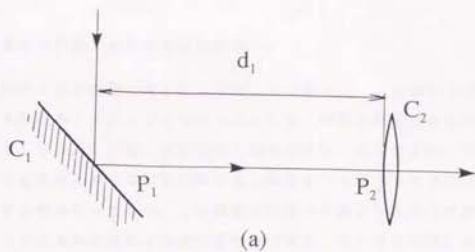


図 4.3 部品挿入時の光路補正

(a) 原配置例

(b) ガラス板挿入による光路補正のための部品移動

光路差分を移動させなければならない。

設計時に試行錯誤でガラス板を挿入する場合に、この様な手間のかかる操作を1ステップずつやっていたら、操作の目的そのものを忘れてしまう。しかも、何度も行う場合が多い。そうすると、このような設計時における煩雑な繰り返し操作を一つのコマンドで行う機能が必要になってくる。この機能は開発の手間よりも他の方法で行う方がはるかに煩雑な機能の典型例であり、第3章で提案した開発指針にかなっている。そのため、プログラム化が必要となったものである。その他の機能も含めて表4.1に現在の処理機能とそのメッセージの一覧を示す。

#### 4.4.3 プログラムモジュール間での通信機能

推論部、光線追跡部、3次元表示部は、設計で最初に利用する時期がずれていることと、開発能率を上げるために、それぞれ独立したプログラムとする。設計のごく初期段階での原理的な検討時点ではわずかの数値しか求めないのでも数値出力で十分であるが、数量が増えたり位置関係が複雑になるともはや数値だけでは理解するのに手間がかかるようになる。そこで、これらの結果を直観的に理解できるようにするために3次元表示部に渡して図形出力に変換する必要がある。そのためには、プログラム間での通信機能が必要となり、ここでそれを検討する。

設計情報の流れからみれば、推論部で設計例を求め、光線追跡部でその機能の確認をし、結果を3次元表示部で視覚化する順序となる。この他にも、設計過程で頻繁に行われる作業として、部品の特性や位置をわずかに変えたり、新たに部品を挿入したりする細かい試行錯誤の操作があるが、これらは光線追跡部で実行され、その結果は3次元表示部で表示される。したがって、プログラム間通信は、推論部と光線追跡部との間、および、光線追跡部と3次元表示部間

表 4.1 処理メッセージ一覧

移動・回転			
POSITION	世界座標系での位置	WIROT	世界座標系 X 軸回りの回転
ORIENTATION	光軸方向の向き	WYROT	同上 (Y 軸回り)
XORIENT	光軸と直角方向の向き	WZROT	同上 (Z 軸回り)
LXROT	固有座標系 X 軸回りの回転		
LYROT	同上 (Y 軸回り)	LMOVE	固有座標系での移動
LZROT	同上 (Z 軸回り)	WMOVE	世界座標系での移動
形状指定			
DIAMETER	円形の外径	FLAT	表面が平
RECTANGLE	矩形の外径	CONCAVE	凹表面の曲率半径
HOLE DIAMETER	円形穴の内径	CONVEX	凸表面の曲率半径
HOLE RECTANGLE	矩形穴の内径	Y-FOCAL	横円焦点の Y 座標
THICKNESS	表面間隔の距離	Z-FOCAL	横円焦点の Z 座標
特性指定			
FOCUS	レンズの焦点距離	NOREFLECT	反射率指定解除
INDEX	レンズ材の屈折率	ABSORB	吸収率指定
REFLECT	表面の反射率	INTENSITY	画面表示輝度
REFLECT INOUT	内部からの反射率		
環境指定			
OVERAY	光線軌跡連続表示	LEFTHAND	環境の鏡像反転
ONERAY	光線軌跡表示解除	FINALRAY	最終光線の表示長
SHOW	全部品を表示	LIMIT	光線追跡の限界回数
CLEAR	全部品・全光線の消去	FOLD	光路折曲げ (鏡挿入)
AXES	部品毎の固有座標系の表示	UNFOLD	光路折り曲げ解除
READ	部品光線ファイルの読込	TURN	光軸折曲げ (鏡挿入)
INIT	環境の初期化	UNTURN	光軸折り曲げ解除
TWIST	光軸回りの配置のねじり	SCALE	環境のスケールリング
LENGTH	光軸長または光路長の出力	DISP	文字列の表示
GRAPH	精度データの 3 次元表示		
部品・光線指定			
LENSE	レンズの生成	DELETE	部品・光線の消去
MIRROR	鏡の生成	RECOVER	部品・光線の消去取消し
STOP	絞りの生成	TYPE	部品・光線のデータ表示
RAY	光線の生成	MAGNIFY	部品の拡大縮小
LXSWING	固有 X 軸回りの振動	BRIGHT	光線の表示輝度指定
LYSWING	固有 Y 軸回りの振動	PART	コマンド受入れ部品指定
WZSWING	世界 Z 軸回りの振動	REVERSE	光線の方向の反転
WYSWING	世界 Y 軸回りの振動	WZSWING	世界 Z 軸回りの振動

の2つの通信経路を設定すれば十分である。

次に通信量をみてみると、推論部と光線追跡部とは通信量が比較的少ないので、データの形態は原データそのままの文字列を用いてよい。ところが、光線追跡部と3次元表示部との間は、光線追跡部から3次元表示部へは光線追跡結果のほかに光学部品のデータなども送る必要があるため、場合によっては数十キロバイトにもなり、一般にデータ量が多い。設計者側からみれば、3次元表示部がユーザインタフェースとしてみえている。3次元表示部には設計者が直接コマンドなどの操作を与えるので、それらを光線追跡部に送らなければならない。この場合は一度に百バイト前後と少ない。そこで、光線追跡部から3次元表示部に対しては、コマンドなどの短いデータは文字列で送り、数値データは一旦エンコードして圧縮して送ることにした。3次元表示部から光線追跡部へは文字列を用いた。3次元表示部は運動視差と輝度変化を利用して3次元データを視覚的に理解しやすく表示できる分散型3次元表示装置PS300 (Evince & Sutherland社製)を用いており、このハードウェアに適したデータ形式にエンコードする必要がある<sup>4-12)</sup>。

PS300は3次元表示のための座標変換処理機能を内部にもつ独立した計算機であるが、汎用計算機でないためPS300との通信には特殊な仕様が必要になる。以下はPS300固有の仕様に関して、通信の観点から述べる。PS300は、内部モードを切り換えることにより、ターミナルモード、インタプリタモードなどをもち、インタプリタモードで図形データを取り込んで表示する機能がある。PS300を動作させるには、まずワークステーション上のプログラムである光線追跡部からPS300に送るデータの種類をPS300に知らせる必要がある。データの種類には、コマンドやデータの文字列、エンコードされた3次元データ、PS300側にいるユーザへのメッセージ(ターミナルモードの場合)、そのほかがある。PS300側でこれらを識別する方法は、光線追跡部から送られるデータの先頭の識別記号による。識別記号は、PS



コード（十進数で28）とそれに続く1バイトの文字である。例えば、FSと`>`ならば、以降のデータはターミナル用データとして画面に表示し、FSと`0`ならば文字列、FSと`2`ならば以降のデータはエンコードされた3次元データと解釈される。

一般にワークステーションの端末からキー入力した文字列は、既定では、エコーバックして端末側ディスプレイに表示されるように設定されている。ところが、PS300を使う場合そのままでは問題が生じる。PS300のキーボードは常に端末の入力装置としてワークステーション側は認識している。ところが、ワークステーション側からみたら出力装置であるPS300のディスプレイ機能は、端末モードだけではない。インタープリタモードでワークステーションから送られるエンコードされた図形データを解釈している途中に、エコーバックされた文字列が挿入されると正しく解釈できない。そこで、図形データを送り終るまでエコーバックを禁止しなければならない。その機能をUNIXワークステーションSUN4で実現するために図4.4に示すプログラムを用いている。

次に、光線追跡部から3次元表示部へ送るための3次元データのエンコーディング方式を説明する。これは1つの3次元データを、図4.5(a)のように4ワード（ここではPS300仕様で1ワード=16ビットとする）に変換する。すなわち、 $x$ 、 $y$ 、 $z$ の値の絶対値の最大値より小さくない2の倍数で座標値を割って正規化し、この仮数部16ビット×3と共通指数部8ビットを順次並べ、輝度情報7ビットと、ペンアップ/ダウンの情報1ビットを加えて構成する。全てのデータについて4ワードに変換して順次並べる。先頭に全バイト数、バージョン識別番号、データバイト数を表現した3ワードを付加し、さらに座標値データの最後にはダミーの1ワードを加えてパケット化する（図4.5(b)参照）。パケットをホストからPS300に送るときは、2ワードずつ取り出し、一列に並べて32ビットにして、最下位のビットから6ビットずつ区分けし、できた6個のデータにそれぞれ48



を加算して、各1バイトの印刷可能文字列に変換した後、上位バイトから送り出す。FS300はこのような形式でエンコードされたデータに対し、高速に処理する機能をもつ。

```

#include      <stdio.h>
#include      <ctype.h>
#include      <sys/ioctl.h>

struct sgttyb newsgttyb, oldsgttyb;

echohost_() /* エコー制御をセットする */
{
    if (ioctl(0, TIOCGETP, &oldsgttyb) < 0) {
        perror("ioctl GET Error"); exit(1); }
    newsgttyb = oldsgttyb;
    newsgttyb.sg_flags &= ~ECHO;
    newsgttyb.sg_flags |= CBREAK;
    if (ioctl(0, TIOCSETP, &newsgttyb) < 0) {
        perror("ioctl SET Error"); exit(1); } }

echoon_() { newsgttyb.sg_flags &= ECHO; } /* 以降エコーON */

getln_(line, no) /* キーボード入力文字列をバッファlineに格納 */
char line[]; int *no;
{
    char c, *ptr; int i;
    ptr = line;
    for(i=0; i<*no; i++) *ptr++ = ' ';
    ptr = line;
    while ((c = getchar()) != '\n') {
        if (c != 127) {putchar(c); *ptr++ = c; }
        else { putchar('\010'); putchar(' ');
              putchar('\010');
              if(((int)ptr>(int)line) {
                  *ptr = ' '; ptr--; } } }
    *ptr = '\0'; putchar('\n'); }

echooff_() { newsgttyb.sg_flags &= ~ECHO; } /* 以降エコーOFF */

echohost_() { newsgttyb.sg_flags &= ECHO; /* エコー制御をリセット */
              ioctl(0, TIOCSETP, &oldsgttyb); }

```

図 4.4 エコーバック制御プログラム

正規化x座標値 (16ビット)		
正規化y座標値 (16ビット)		
正規化z座標値 (16ビット)		
共通指数部 (8ビット)	輝度 (7ビット)	$\frac{1}{0}$



全バイト数		
バージョン識別番号		
ベクトルデータバイト数		
最初の 3Dベクトルデータ		
最後の 3Dベクトルデータ		
ダミーバイト		

1 = 描画

0 = 移動

図 4.5 バイナリーデータの形式

- (a) (x, y, z)座標を浮動小数点方式の表現とし、それらの共通の指数部を8ビット、仮数部を16ビットとし、全体で8バイトで一つの点データとする
- (b) 一つの図形を表すために、8バイトの点データを多数集めて前後に必要な情報を加えてパケットを構成する

#### 4.5 三次元表示部 GAUSS/V におけるデータ駆動型プログラミング

機能的側面から言えば、PS300は送られてきた3次元図形データを表示するグラフィック端末と見なすことができる。しかし、内部はただの端末ではなく、CPUをもつ計算機である。したがって、キーボード、ダイヤル、タブレットなどの入力装置からのデータをもとに座標変換行列を計算し、これにワークステーションから送られてくるところの光学部品形状や光線に関するデータを掛けて表示することがプログラムで実現できる。この計算機は多種類の入力機器を実時間処理でサポートするために、そのプログラムはデータ駆動型の専用言語となっている。この計算機上のプログラムが、ここでは3次元表示部(GAUSS/V、Visualization)の実体である。

PS300のプログラミング環境では、スカラーのベクトル化、基本行列の生成、行列演算、など座標変換に必要な基本演算を行う「ファンクション」と呼ばれる演算要素が、システムにより定義されている。各ファンクションは入力端子と出力端子があるブラックボックスとみなしてよい。これら呼び出して組み合わせ、所望の機能を発揮させることがプログラミングである。ただし、通常のプログラムのように逐次的にデータ処理を行うのではなく、仮想的には予め設定された各ファンクションとそれらの間にネットワーク状に定義されたバス(通路)にデータが流れることにより処理が行われる。従って、プログラミングは各ファンクション間にデータが流れるバスを定義することである。プログラムの制御はデータによってなされ、データが届いたファンクションが活性化して、そのファンクション特有の処理をデータに施す。そしてバスを通じて次のファンクションにデータとともに制御を渡す。バスが枝分かれしていれば、データは2つに分かれて同じデータが流れて行く。したがってこのプログラミングはあたかも配線図をつくるようなものである。アナログコンピュータのプログラミングに酷似している。このプログラムのデバック作業は、従来の逐次型プログラムに比較してより困難

となる。その理由は、時間的な要因が入り込むからである。すなわち、データが枝分かれした複数のパスを經由して同時に複数のファンクションで処理されるため、追跡も枝分かれし併行して行わなければならないからである。

図4.6に本システムで用いたネットワーク型プログラムの主要部を示し、そのなかで数字で示された基本ファンクション機能の説明を表4.2にまとめた。これは、INSTANCEで示された表示物体に回転変換ROTをかけ、さらに移動変換TRAN、スケール変換SCALE、ウィンドウ・ビューポート変換WINDOWをかけて、表示するプログラムである。各変換のパラメータは、アナログ入力ダイヤルDIALS（表4-2に示している）が回転されたときのみ、新しい値に変更される。図中二重円は、メッセージを受けて状態が変化するファンクション類で行列や、選択スイッチを内部にもっている。また、一重円は固定ノード、三角形とその下の小円は条件分岐を示す。

このようにPS300のプログラムは、通常の計算機の場合のようなりストではなく、回路図となる点がきわめて特徴的である。この回路図プログラムをホストのワークステーションからダウンロードして駆動させる。ワークステーション上に光学部品LENSと光線RAYをファイルによって与え、光線追跡部で解釈して図形データとして3次元表示部へ送って表示した例を図4.7に示す。

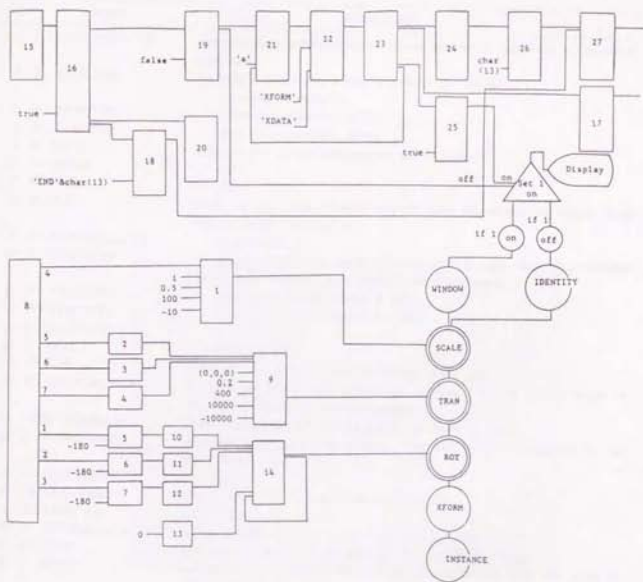


図 4.6 ファンクションネットワークプログラム例

PS300内部に定義される「ファンクション」に入力がある  
と、固有の機能にしたがってデータを加工して出力する。  
様々な機能をもつファンクションを組み合わせて全体と  
して所要の機能を実現させる。

表 4. 2 PS300 ネットワークに用いられるファンクション例

No.	Name	Description
1	F: ACCUMULATE	Accumulate a series of input values and sends the sum at specified intervals.
2	F: XVECTOR	Accepts a real number and outputs a 3D vector (x component only)
3	F: YVECTOR	ditto (y component only)
4	F: ZVECTOR	ditto (z component only)
5	F: MULC	Accepts two inputs and outputs their products.
6	F: MULC	ditto
7	F: MULC	ditto
8	DIALS	Produces eight real number outputs that correspond to inputs from control dials 1 through 8
9	F: ACCUMULATE	Same as No. 1
10	F: XROTATE	Accepts a number of degrees about the X axis that the rotation matrix generated by this function is to represent.
11	F: YROTATE	ditto (except that about Y axis)
12	F: ZROTATE	ditto (except that about Z axis)
13	F: XROTATE	Same as No. 10
14	F: MULC	Same as No. 5
15	FKEYS	Converts a character from keyboard to an code.
16	F: SWITCHC	Accepts an integer and switch the message on the second input to the output specified by this integer.
17	HOST_MESSAGE	Puts characters into output buffer readable by host.
18	F: CONSTANT	Accepts messages on the second input and output it triggered by the first input.
19	F: CONSTANT	ditto
20	CLEARLABELS	Clears all LEDs on keyboard and dials.
21	F: SYNC	Synchronizes the output
22	F: XFORMDATA	Sends transformed data to a specified destination.
23	F: LIST	Converts output of F:XFORMDATA into ASCII string.
24	F: SPLIT	Compares the first and the second input data and split the first by the second.
25	F: CONSTANT	Same as No. 18
26	F: CONCATENATEC	Accepts two ASCII strings and output concatenated string.
27	HOSTOUT	Accepts a string and outputs it to the host.



```

LENS
  CONVEX  300
  CONVEX  100
  THICKNESS 30
  DIAMETER 100
  INDEX    1.5
  POSITION  0 0 -200

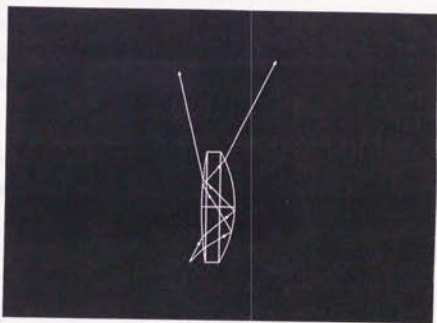
```

```

/*  POSITION  ORIENTATION
RAY  0 -50 -175  0 0.5 -0.5
RAY  0 -50 -175  0 1.0 -0.5

```

(a) 入力ファイル例



(b) 表示例

図 4.7 凸レンズによる屈折・全反射例

- (a) 光線追跡部に入力させるレンズと光線の定義例  
 (b) 定義にしたがって部品と光源を生成し、  
 光線追跡を行った例

#### 4.6 第4章のまとめ

第4章では、第2章で示した機能を持つ光学CADシステムを、第3章で明らかにした手法を活用して開発したなかで、他のシステムに見られない特徴を示した。まず、従来のCADシステムは、機能的には類似設計を前提にして開発されており、設計評価も各種そろっているものの、新しい設計評価手法をとりこめないことと、アイデアを練る段階でのサポート機能が乏しいという限界がある。そこで、新たに開発した光学CADシステムの特徴を解説したが、本設計における光学設計に必要な支援機能として

- (1)新規設計のアイデア展開段階で支援できること。
- (2)光学設計の進展にともなって生じる機能の拡張に容易に対処できること。
- (3)理解が容易な出力様式であること。

をあげた。これは、大まかな光学系から次第に複雑にしてゆく思考過程に沿う詳細化手順である。この手順をCADシステムにもたせるべく光軸操作機能として実現した。この特徴は、光線追跡を行う光軸(光路)を任意位置で、光路上後方の部品を含めて、(1)折り曲げ、(2)軸振り、(3)ねじり、(4)移動等が、逆操作を含めてできる機能である。さらに、3次元的な配置を視覚的に確認するために、輝度差と運動視差を利用した3次元表示部分を別モジュールとして開発し、プログラム間通信で統合的に結合した。

## 第 5 章 疑似等価光学系理論の 構築と CAD への応用

## 5.1 はじめに

本設計では、光軸方向を制御することができるリレー光学系を開発することが主な目的となる。従来、リレー光学系は光学機器の一部に使われている場合があるが、それらは基本的な形式のリレー光学系を用いていることが多い。すなわち、同一焦点距離の凸レンズを2つ、それらの焦点距離の和だけ間隔をおいて同一光軸上に設定したものである。この配置によって光学像を一定距離（焦点距離の4倍）だけ光軸方向に移すことができる。しかし、このレンズ配置の情報だけでは、本設計に必要な光軸制御機能をいかに実現させるかがわからない。そもそもリレー光学系はこの場合だけではない。どのような構成例があり、それらをどう利用できるかということから考えなければならない。そこで、最適なリレー光学系を設計するためには、リレー光学系の配置構成方法をまず検討する必要がある。ところが、従来の光学理論では光学収差の補正法などは良く研究されているが、このような配置問題には対処できない。そのためにリレー光学系を実際の設計に用いるときは、上に示した単純な配置か、または、設計者の経験によって特殊な場合のリレー光学系の構成を開発してきた<sup>9-11</sup>。しかしこれでは一般的な構成法が得られないため、最適かどうかの判断ができない。

そこで、本章では新たに疑似等価光学系理論を構築し<sup>9-2), 9-3), 9-4)</sup>、これを用いて、従来経験的に行われていたリレー光学系の配置設計問題に対し新たな構成法を与え、さらにそれを推論設計に応用することを目的とする。

まず、5.2節では疑似等価光学系という新しい基本概念を単レンズで説明する。次に5.3節では、この概念を複数のレンズを組み合わせた合成レンズに拡張し、設計に利用できる形態に整備する。5.4節では、さらに一般化して、本章での課題である配置問題を解決する手法を導く。そして最後に、5.5節ではリレー光学系の推論設計に応用するためにまとめた推論部プログラム GAUSS/I (Inference) につい

て述べる。

なお、本章では基本配置を問題にするために、一般の設計での主な関心である光学的歪（収差）の低減に関しては全く考慮していない。その理由は、収差低減のためのレンズパラメータなどの最適化設計は、配置が決定した後、既存の手法によって可能だからである。しかし、配置問題は既存の光学理論ではできないため、本章で新たに開発したものである。したがって、収差が少ない光軸付近での光線のみを対象として考える近軸光学系が成り立つことを前提とするから、レンズ系を何段重ねてもそれ自体による収差の増加を考慮していない。また、レンズと球面鏡は全く等価と考える。

## 5.2 凹凸両レンズ間の疑似等価性

凸レンズは平行な入射光を一旦焦点位置に集め、その後発散させる。これに対し、凹レンズは平行光を屈折直後から発散させる。このとき、同じ入射光に対し、両方のレンズからの光が同じ発散状態（同じ角度と位置の関係になる発散光）になるためには、図5.1(a)と同図(b)に示すような位置関係に設置すればよい。すなわち、平行光が凸レンズで屈折して最終的に発散するときと同じ状態を、凹レンズを用いて実現するとすれば、凸レンズの位置よりも光路上後方に $2f$  ( $f$ は凸レンズの焦点距離)の距離に、凸レンズと同じ屈折力を持つ凹レンズを置けばよい。この性質は光の入射方向に依存しないから、図5.1(c)のように凸レンズの両側 $2f$ の距離のいずれか光の進行方向の下方の位置に、凹レンズ(破線位置)が存在するものとみなすことができる。もちろん、上下左右が逆になるから正確な意味で等価ではない。そこで、上下左右が逆になることを無視した意味で光学的に等価となることを以降「疑似等価」と呼ぶことにする。ここで、注意すべきことは図5.1(c)において、前側の疑似等価レンズ位置 $H_1$ は、レンズ $L_1$ の左側から見た場合、この位置に凹レンズが存在するかのように振舞い、後側の疑似等価レンズ位置 $H_2$ は、レンズ $L_1$ の右側から見た場合に疑似等価レンズの存在する位置を示す。前側と後側を区別するために、図上では $H_1$ 位置では左半分の凹レンズ半片として表わし、 $H_2$ 位置では右半分の凹レンズ半片で表わす。この2つの疑似等価な凹レンズの位置は、厚レンズの主面と呼ばれる面と同様な意味あいをもつことになる。すなわち、焦点距離 $f$ の薄凸レンズは、同じ屈折力で2つの主面間の距離が $4f$ 離れた厚凹レンズと「疑似等価」となる。疑似等価性の議論は厚レンズにも同様に適用できる。すなわち、一つの厚凸レンズは、その各主面から外側に焦点距離の2倍の位置に主面があるような厚凹レンズと疑似等価となる(図5.1(d)参照)。

ここで主面とは、薄レンズに関するよく知られたGaussの公式(付

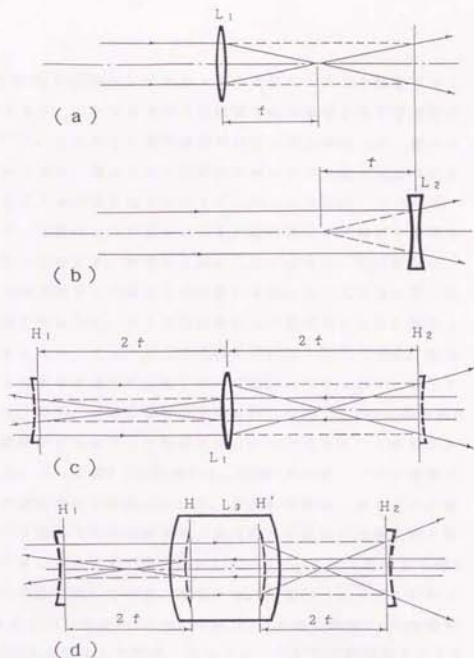


図 5.1 疑似等価光学系の定義

- (a) 薄凸レンズは平行光を、一旦焦点距離  $f$  の位置に集光させた後、発散させる
- (b) 薄凸レンズと同じ発散角度、発散位置にするためには薄凹レンズはその後方  $2f$  の位置でなければならない
- (c) 薄凸レンズは、その後方  $2f$  の位置  $H_2$  に凹レンズを置いたものと上下逆になることを除けば等価となる  
(この上下逆を無視した等価性を疑似等価と定義)  
凸レンズに入射する方向が逆の場合は逆の位置  $H_1$  に疑似等価な薄凹レンズがくる
- (d) 厚凸レンズでも主面からの距離を考慮すれば、同様に疑似等価な凹レンズを考えることができる



章A3.2のA3.22式参照)が厚レンズや合成レンズでも成立すると仮定したときに、レンズ表面からの距離を測る基準となる仮想的な面である<sup>9-51)</sup>。すなわち正確な表現ではないが比喩的には、厚レンズや合成レンズを、薄レンズと屈折力の無いガラス板と仮想的に分けて考察するときの境界面とみなすことができる面のことである。したがって、主面は一つの厚レンズまたは合成レンズに対して前方と後方の2つ存在する。前方の主面に入射する光は、作図的には、主面との交点の高さ(光軸からの距離)を保ったまま光軸と平行に後方の主面まで伝わり、そこで再度屈折して出て行くものと見なし設計することができる。そこで光軸に平行な入射光の場合、前方の主面では屈折せず後方の主面で初めて屈折して出て行くことと見なすことになる。結局、前方と後方の主面の間の空間は、Gaussの公式においては距離が0と見なし設計することができるような特徴があると言える。これを図5.2で説明する。同図(a)は薄レンズの場合の、物体と像の位置関係を表わしている。実際の光線は、薄レンズの表面と裏面の2箇所で折れ曲がるが、便宜的に作図上中央部で折れ曲げて表示することにしてある。図5.2(b)は、(a)と同じ屈折力を持つ厚レンズの場合を示している。すなわち、物体からレンズにむかって(a)の場合と同じ角度 $\theta_1$ で出た光線が(a)と同じ角度 $\theta_2$ で結像するとき、(a)と同じように物体、像からレンズまでの距離をとるとすれば、レンズ部で光線が仮想的に平行になる区間を考えることにより、薄レンズと同じ結像の公式が使えることになる。この仮想的な距離基準となる面 $H_1$ 、 $H_2$ が主面である。主面は2つ存在し、前側主面( $H_1$ )と後側主面( $H_2$ )と呼ばれている。

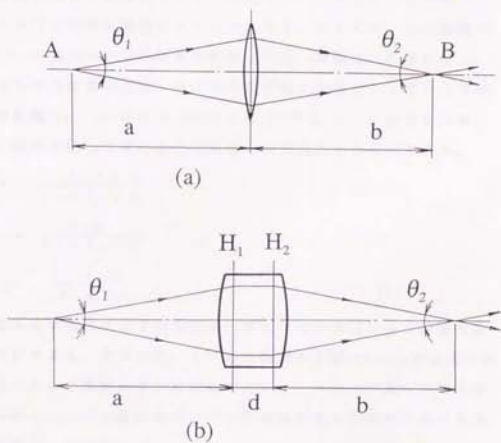


図 5.2 薄レンズと厚レンズの比較による主面の特徴

- (a) 薄レンズによって A 点からでた光は B 点に集光する
- (b) 厚レンズでは主面を考慮すれば薄レンズと同様な関係が成立する

### 5.3 合成レンズ系の疑似等価性

#### 5.3.1 合成レンズの主面の機能

2つの薄レンズを同一光軸上に一定の間隔をあけて設置すると、特性が合成されて組合せレンズ（合成レンズ）となり、見かけ上一つのレンズと同等な機能をもつようになる。たとえば、焦点距離が $f_1$ 、 $f_2$ の薄凸レンズを間隔 $d$ を保って同一光軸上に設置すると、組み合わせた結果の合成レンズの焦点距離 $f$ と各レンズ面から主面までの距離 $h_1$ 、 $h_2$ は次式で表わされる<sup>5-6)</sup>。ここで注意すべきことは、符号に関して光の進行方向を+の方向とすることである。

$$f = \frac{f_1 f_2}{f_1 + f_2 - d} \quad \dots \dots \dots (5.1)$$

$$h_1 = \frac{f_1 d}{f_1 + f_2 - d} \quad \dots \dots \dots (5.2)$$

$$h_2 = -\frac{f_2 d}{f_1 + f_2 - d} \quad \dots \dots \dots (5.3)$$

上式で求まる合成レンズの主面は、厚レンズの主面と全く同様な意味付けができる。すなわち、2つの主面間の空間はGaussの公式を使う場合において距離が0と見なしてよい。したがって薄レンズの場合と同様に、この主面が合成レンズの疑似等価な光学系を求める基準面にもなっている。

#### 5.3.2 合成レンズの疑似等価レンズの導出

図5.3(a)に示すように、焦点距離がそれぞれ $f_1$ 、 $f_2$ の2つの薄レンズを距離 $d$ の間隔を保って同一光軸上に設置すると、見かけ上一つの合成レンズになる。この見かけのレンズに対する疑似等価なレンズを考察する。

いま $d > (f_1 + f_2)$ ならば、(5.1)式より $f < 0$ となり、図5.3(b)に示すように組合せレンズは一つの厚凹レンズと等価になる。ここで図5.3(b)において、破線のレンズ片部の位置が主面となること

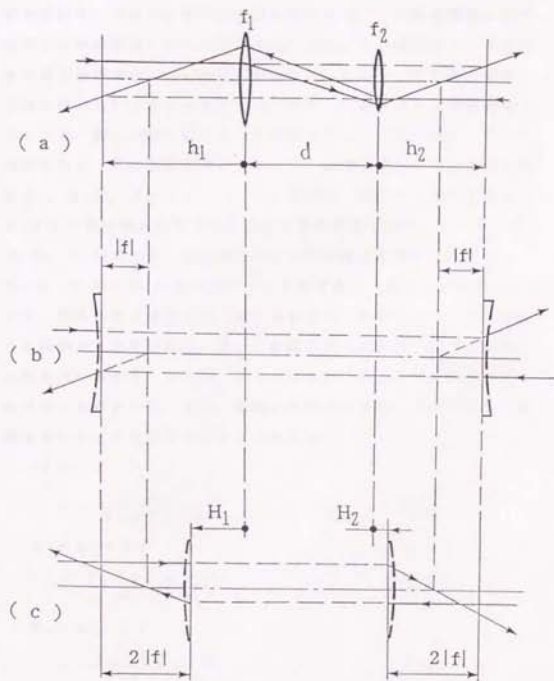


図 5.3 組合せレンズに対する疑似等価なレンズの位置

- 2つの薄凸レンズによる組合せレンズで、厚凹レンズと等価になる構成例
- 等価な厚凹レンズの主面位置（2箇所）を、破線のレンズ半片で表わす
- 等価な厚凹レンズに疑似等価な厚凸レンズの位置を破線のレンズ半片で表わす

を表わしている。そして、左半分のレンズ片部の位置が前側主面で、右半分のレンズ半片が後ろ側主面を意味する。この等価厚凹レンズに対する疑似等価な凸レンズを考えてみる。この組合せレンズに対する疑似等価な凸レンズの焦点距離 $F$ は、合成レンズの焦点距離 $f$ と絶対値が等しくなるはずである。また、一般に互いに疑似等価なレンズは、図5.1(d)に示すように外側に凹レンズの主面が、そして内側に凸レンズの主面が存在するから、疑似等価レンズの主面の位置 $H_1$ 、 $H_2$ は、 $d > (f_1 + f_2)$ の場合で、合成レンズの主面 $h_1$ 、 $h_2$ より内側に焦点距離の絶対値の2倍の距離となる。したがって、(5.2)、(5.3)式より、疑似等価なレンズの焦点距離 $F$ と主面 $H_1$ 、 $H_2$ は、(5.4)～(5.6)式で表わすことができる(図5.3(c)参照)。ここで、符号は光の進行方向(図では右方向)を常に正としていることに注意する必要がある。そして距離を測る方向は、図の・印から矢印方向にはかることにし、この方向が負方向であれば距離の値も負になるものとする。また、両端が矢印の場合は、方向性はなく距離は常に0または正とみなすことにする。

$$F = -f$$

$$= -\frac{f_1 f_2}{f_1 + f_2 - d} \quad \dots \dots \dots (5.4)$$

$$H_1 = h_1 + 2F$$

$$= \frac{f_1 (d - 2f_2)}{f_1 + f_2 - d} \quad \dots \dots \dots (5.5)$$

$$H_2 = h_2 - 2F$$

$$= \frac{f_2 (2f_1 - d)}{f_1 + f_2 - d} \quad \dots \dots \dots (5.6)$$

(5.4)～(5.6)式は、(5.1)～(5.3)式に対する唯一の疑似等価光学系となっている(唯一性の証明は付章A4参照)。(5.4)式より $d$ を求めると、(5.7)式となる。

$$d = f_1 + f_2 + \frac{f_1 f_2}{F} \quad \dots \dots \dots (5.7)$$

すなわち、焦点距離がそれぞれ $f_1$ および $f_2$ の薄凸レンズを用いて

焦点距離  $F$  の疑似等価レンズを作るには、(5.7)式で示される距離間隔  $d$  で設置すればよいという、きわめて実用的な公式が導かれた。

## 5.4 疑似等価光学系理論を用いた配置設計法

### 5.4.1 疑似等価レンズを利用した置換法則

前節の結果から、焦点距離 $F$ の疑似等価レンズは、別の焦点距離 $f_1$ および $f_2$ の2つの薄凸レンズを用いて生成できることがわかる。これはすなわち、焦点距離 $F$ の1つの凸レンズがあるときに、そのレンズの代わりに別の2つの薄凸レンズと置き換えれば、機能的に疑似等価な光学系を生成できることを意味している。ただし、置き換える場合は新たにレンズを設定する位置が重要となる。そこで、1つのレンズをそれと疑似等価なレンズ(群)に置き換えるときの位置関係をここで考察する。

前節で、合成レンズの主面、および、それと疑似等価なレンズの主面を求めた。この主面は光軸上2箇所あるが、これらは光学系に入射するときの入射基準面と、系から出て行くときの射出基準面である。一般には、光が進む方向に対し、手前側の主面が前側主面で前節で示した $h_1$ や $H_1$ であり、後方が後側主面で $h_2$ や $H_2$ となる。そこで、一つのレンズを別の疑似等価なレンズに置き換えるときを考えると、疑似等価なレンズの前側で置き換えるときは、前側主面の位置に置き換えられるもとのレンズが来るように設定する必要があり、疑似等価なレンズの後方で置き換えるときは、後側主面の位置にもとのレンズが来るように設定しなければならない。これを図で示したのが、図5.4である。この図では、破線でレンズ半片を描いた位置が、疑似等価レンズとみなしたときの主面であり、左半分のレンズ半片を描いた位置が前側主面で、右半分のレンズ半片を描いた位置が後側主面を意味している。

図5.4(a)は、通常のリレーレンズ系で同じ焦点距離 $f$ の凸レンズ2枚をその焦点距離の和 $2f$ の間隔において設置している。また、(b)は、(a)と同じ焦点距離のレンズを焦点距離の3倍の距離間隔 $3f$ で設定した系である。(b)は合成されて1つの厚凹レンズと等価と



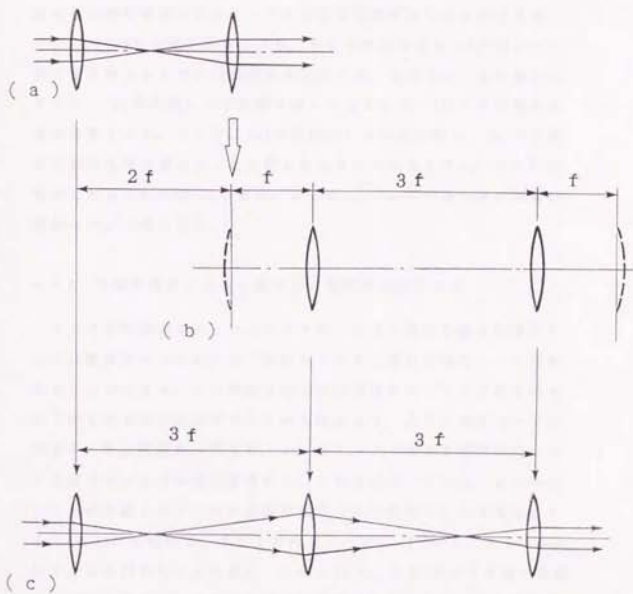


図 5.4 疑似等価レンズによる置換例

- (a) 望遠鏡系リレーレンズ
- (b) 2つのリレーレンズの右側のレンズと同じ屈折力をもつ疑似等価な凸レンズを生成するレンズ系の一例
- (c) リレーレンズ(a)の右側のレンズを(b)に示す疑似等価なレンズ(破線で示す位置)で置き換えたときの実際のレンズ配置

なり、また同時に、その厚凹レンズと疑似等価な厚凸レンズとも見なせる。(b)に示す破線のレンズ半片の位置は、(5.5)、(5.6)式より算出した疑似等価な厚凸レンズの主面の位置を示したものである。ここで、(a)の右側の凸レンズを、それと疑似等価な(b)の凸レンズ対で置き換えるときの位置関係を説明する。光が左から右に進むとすると、(a)の右側レンズを置き換えるときには、(b)では左側の主面が対象となる。そこで、(a)の右側のレンズの位置に、(b)の左側の主面の位置が重なるように置き換えなければならない。この結果を示したものが同図(c)である。これは(a)のレンズ系に対する疑似等価なレンズ系となる。

#### 5.4.2 再帰的置換による一般リレー光学系の生成方法

レンズ系を構成する一つのレンズを、それと疑似等価な組合せレンズに置換することにより、最初のレンズと疑似等価なレンズ系を作ることができる。この置換は再帰的に適用することができるので、あらゆる組合せを生成することが可能となる。以下に例を用いて説明する。焦点距離が、例えば、 $f$ 、 $2f$ 、 $f/2$ の3種類の凸レンズを組合せレンズの構成要素とし、これらのレンズの内、2つを用いて焦点距離 $f$ のレンズに疑似等価なレンズを作ること考えてみる。(5.7)式において、 $F$ に $f$ を代入し、 $f_1$ 、 $f_2$ に $f$ 、 $2f$ 、または $f/2$ を代入して $d$ を求め、さらに(5.5)、(5.6)式より主面の位置 $H_1$ 、 $H_2$ を求める。6通りのすべての組合せについてこれらを求めた結果を図で示したのが図5.5である。同図において、各レンズ面から破線で示したレンズ半片表示位置までの距離が $H_1$ 、 $H_2$ である。すなわち、その位置に焦点距離 $f$ の疑似等価な凸レンズが存在すると見なすことができる。図5.5(a)の例は、焦点距離 $f$ のレンズを2つ用いて一つの焦点距離 $f$ の疑似等価レンズを構成する場合である。次に図5.5を置換辞書として利用して、レンズ系の構成要素を再帰的に置換する方法を説明する。まず、図5.6の基本リレー光学系(a)に

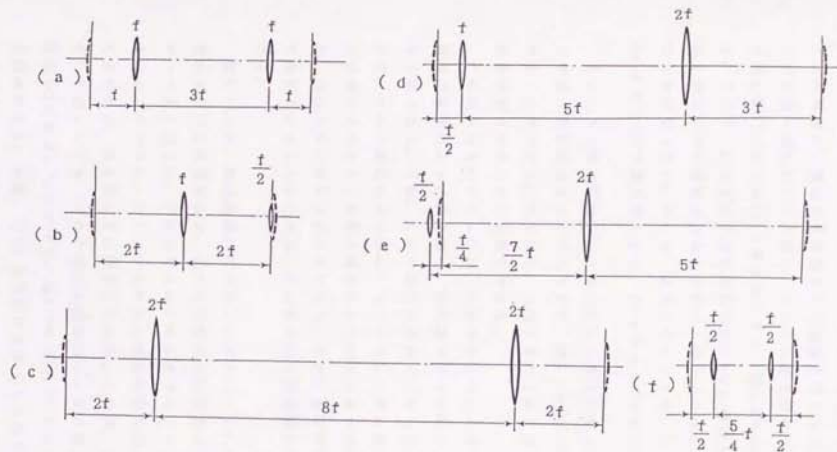


図 5.5 3種類のレンズの組合せによる同一疑似等価レンズの全生成結果

焦点距離  $f$  の疑似等価な凸レンズを 3 種類の薄凸レンズ  
 (焦点距離が  $f$ ,  $2f$ ,  $0.5f$ ) 2 枚で構成する組合せの  
 全例 (破線によるレンズ半片の位置が疑似等価なレンズ  
 位置)

において、光軸を揺動させるために、入射基準面 A にある点光源からでた発散光が、集光する位置 B に平面鏡を置くとする。ところが、この位置が図 5.5(a)の右側のレンズの位置と重なるのでこのレンズを図 5.5の(a)または(b)に置き換えると、図 5.5の(b)または(c)となる。ここで、たとえば小さな部品を使う(c)に着目し、さらに再度光軸を別の方向に揺動させるとすれば、集光点 C 点にも平面鏡を置かなければならない。そこで、再度このレンズを、たとえば、図 5.5の(a)または(b)で置き換えると、(d)または(e)が生成される。

このように疑似等価レンズを利用した置換法則によって、一つの光学系と疑似等価な様々な光学系を、図 5.5を用いれば容易に生成させることができる。すなわち、光軸上での干渉を避けるために光学像を移動させることが容易にできる。

この例からもわかるように、本節で明らかにしたリレー光学系の再帰的置換による設計手法は、制約条件下での設計上きわめて有効な手法である。なお、ここでは合成されてできた凹レンズを直接用いず、それと疑似等価な凸レンズとみなして置き換えたが、本来の合成凹レンズとしても置き換えることができるのは当然である。また、合成しない単レンズにおいても、それと疑似等価なレンズとして機能させることもできる。その基本的な例を図 5.7および図 5.8に示す。

図 5.7(a)は、焦点距離が  $f$  の凸レンズと  $(-f)$  の凹レンズを密着させている状態を示す。これは結果的に屈折力のない(度のない)ガラス板と同じで、平行入射光はそのままできていく。そこでこの 2枚のレンズのうち、凹レンズをそれと疑似等価な凸レンズで置き換えるために、置き換える位置を正しく示したのが、同図(b)である。そして凹レンズを、それと疑似等価な凸レンズで置き換えたものが、同図(c)である。したがって、図 5.7の(a)と(c)とは互いに疑似等価な関係になる。実際、(c)の光学系は全体として屈折力のない系となっている。(a)は通常のガラス板と同じであり、また、(c)は一般に

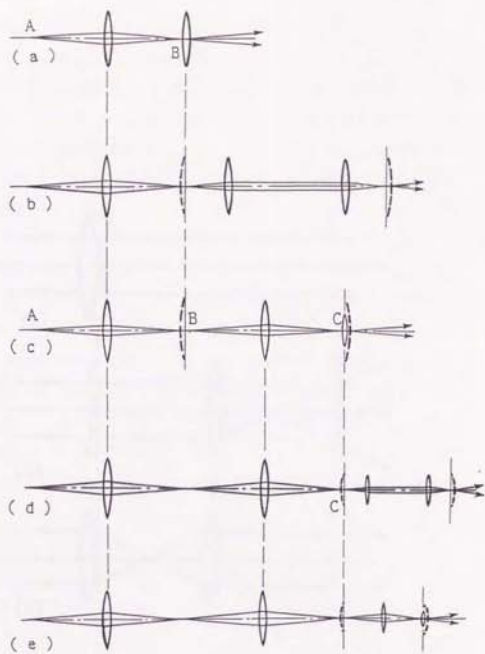


図 5.6 再帰的置換による疑似等価光学系の生成例

- (a) 望遠鏡系リレーレンズ
- (b) リレーレンズ(a)のB点にあるレンズを疑似等価なレンズペアで置き換えた例
- (c) リレーレンズ(a)のB点にあるレンズを別の疑似等価なレンズペアで置き換えた例
- (d) レンズ群(c)の点Cにあるレンズを疑似等価なレンズペアで置き換えた例 ((a)から(b)への置換と同様)
- (e) レンズ群(c)の点Cにあるレンズを別の疑似等価なレンズペアで置換した例 ((a)から(c)への置換と同様)

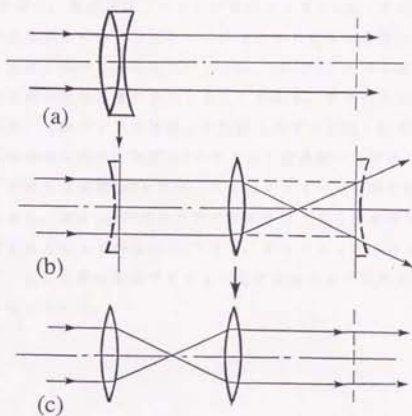


図 5.7 疑似等価系の単純な例

- (a) 同じ屈折力の凹凸レンズを密着させると度の無いガラスと等価
- (b) (a)の凹レンズ部分を、それと等価な凸レンズで置換
- (c) 置換の結果、度の無い望遠鏡系リレーレンズ系が生成

使われるリレー光学系の基本形である。

図5.8(a)は、焦点距離 $f$ の薄凸レンズ $L_1$ が、これと疑似等価な焦点距離 $(-f)$ の凹レンズとして使われるときの主面の位置を示す。薄凸レンズを、疑似等価な凹レンズとみなすときは、その主面は図に破線で示すように焦点距離 $f$ の2倍だけ外側となる。また同図(b)はその逆で、焦点距離 $(-f)$ の薄凹レンズ $L_2$ を、それと疑似等価な焦点距離 $f$ の凸レンズとして使うときの主面の位置を示す。ここで、注意しなければならないことは、(a)と(b)とでは前側主面と後ろ側主面が反対位置に来ていることである。すなわち(b)では後ろ側主面が、実際のレンズ位置より光路上前方(左側)に来ている。この疑似等価な関係を同図(c)のガイレイ望遠鏡の光学系に適用すれば、その結果は同図(d)となり、これはケプラー望遠鏡と呼ばれる光学系となる。逆に(d)の凸レンズのかわりにそれと疑似等価な凹レンズで置き換えたものが同図(c)である。すなわちこれらの2つの望遠鏡系は、互いに疑似等価であり上下左右が逆になる以外は等価な光学系となっている。



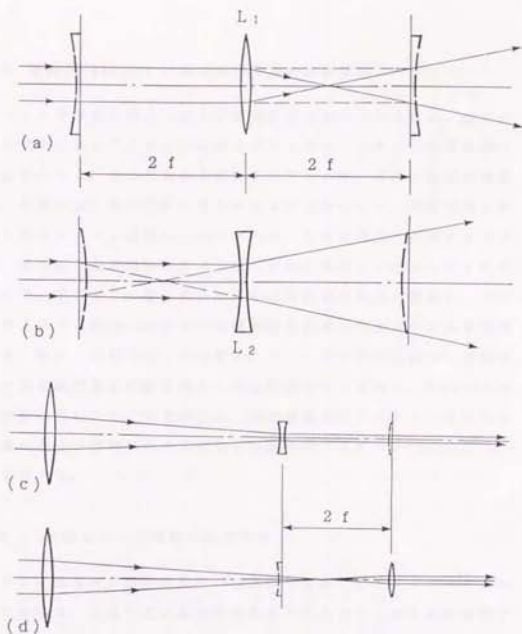


図 5.8 単レンズの疑似等価的側面

- (a) 薄凸レンズと、その疑似等価な凹レンズの位置  
 (b) 薄凹レンズと、その疑似等価な凸レンズの位置  
 (前側と後ろ側が(a)と逆になっていることに注意)  
 (c) ガリレオ望遠鏡の接眼レンズの凹レンズは、(b)によって凸レンズに置換可能になる(破線位置)  
 これは(d)の系と同等  
 (d) ケプラー望遠鏡の接眼レンズの凸レンズは、(a)によって凹レンズに置換可能(破線位置)  
 これは(c)の系と同等、  
 すなわち、(c)と(d)は互いに疑似等価な光学系

## 5.5 推論部 GAUSS/1 における光学系の論理表現

リレー光学系の最適な基本配置設計例を求めるためには、設計条件を様々に変えたときの設計例を求めてみて、それらの性能を調べる必要がある。そのために必要なプログラムは、条件の変更が簡易で、結果の設計例が容易に得られなければならない。述語論理を利用したプログラム言語Prologであれば、条件を述語で表現するだけで、具体的な設計例はシステムが自動的に探索して出力してくれる。そこで、前節までに得られた知見を述語論理の形式に表現し、プログラミング言語Prologのもつ推論機能を利用したプログラムを開発する。特に、前節で示した再帰的にリレー光学系を生成する法則は、そのまま論理表現に置き換えられる記述となっており、Prologとの親和性が高い。そこで本節では、論理表現を用いてリレー光学系を推論によって求めるために開発した推論部プログラム GAUSS/1 について述べる。

### 5.5.1 光線とレンズ機能の論理表現

リレー光学系の設計例をProlog言語を使用したプログラムで求めるためには、光線や光学系の構成要素であるレンズ等を述語論理で表現する必要がある。ところが、レンズに与える幾何光学的な影響を考慮して光線を論理表現することはかなり困難である。そこで、光線を球面波とみなし<sup>5-7)</sup>、その曲率中心の位置で記述すれば、位置座標というパラメータのみで光線の波面を表現することができるのでこの方式を用いることにする。しかしこの場合、頻繁に使われる平行光線が数値として記述できない。なぜならば、曲率中心の座標が無限大となるためである。そこで、この平行光線の場合は位置座標として仮の値、例えば99999.0を使い、この数値は無限大の値とみなして用いれば、数値的な問題は解決できる。

単一凸レンズの機能を述語表現するために、一般的な性質として知られているGaussの公式を用いることにした。これは、レンズから

物体までの距離の逆数と、レンズから像までの距離の逆数の和が、符号も含めて焦点距離の逆数に等しいというものである（付章A3.2のA3.22式参照）も。この場合も、レンズからの距離が無限大の場合が数値的に表現が困難である。そこで、この場合も距離が9999.0以上の場合は無限大と見なすことにして表現した<sup>5-83</sup>。図5.9にレンズの特性を表現するlens\_character述語を示す。

### 5.5.2 リレー光学系の論理表現

前節で、再帰的に拡張できる形式でリレー光学系を求める手法を開発した。この再帰的定義方法は、そのまま論理表現として表わすことができ、Prologのプログラムになる利点をもっている。そうすれば、再帰的にリレー光学系を求めて行く過程は、Prologシステムがもつ推論機構の実行過程として直ちに求まることになる。そこで、前節での結果を論理表現化し、Prolog言語で表現したものを図5.10に示す。構成要素となるレンズは、図5.9に示すようにlens述語で宣言しておく。基本的なリレー光学系はbasis述語で記述する。構成要素となるレンズ群と、疑似等価レンズの焦点距離Focusが与えられたときに、どのような構成があるかを求めるのが、find\_rule述語である。これで求めたレンズ対の疑似等価レンズで実際のレンズを置き換える述語がsubstituteである。shift述語は、単一レンズを合成レンズに置き換えることによって影響を受ける後方のレンズ群の位置を変更させる機能をもつ。relay\_r述語で、与えられた距離以上に再帰的にリレーレンズ系を拡張する機能をもつ。最後にrelayruled述語でこれらの機能を統括する。

また、リレー光学系の論理表現は上記方法とは別に、リレー光学系の定義を論理表現に変換することによってもできる。そこで、リレー光学系の一般的な表現を考察する。以前にリレー光学系とは、歪を生じさせないで光学像を光軸上一定の距離の位置に生成させる光学系と述べた。さらに一般化していえば、リレー光学系とは光軸

```

/* 薄凸レンズの性質 (一般波入射の場合) */
lens_character(Focal_posi, Lens, Lens_posi, Focal_next):-
    Focal_posi < 9999.0, lense(Lens, F),
    A is Lens_posi - Focal_posi,
    A = Y * F,
    B is A * F / (A - F),
    Focal_next is Lens_posi + B.

/* 薄凸レンズの性質 (平面波入射の場合) */
lens_character(Focal_posi, Lens, Lens_posi, Focal_next):-
    Focal_posi >= 9999.0, lense(Lens, F),
    Focal_next is Lens_posi + F.

/* 薄凸レンズの性質
   (前側焦点位置に波面の曲率中心をもつ球面波の入射の場合) */
lens_character(Focal_posi, Lens, Lens_posi, 99999.0):-
    Focal_posi < 9999.0, lense(Lens, F),
    F is Lens_posi - Focal_posi.

lense(lense1, 100.0). /* 焦点距離が100のレンズ例 */
lense(lense2, 50.0). /* 焦点距離が50のレンズ例 */

```

### 図 5.9 薄凸レンズの光学特性の論理表現

薄レンズの光学特性を3つの述語で表現  
 レンズ的具体例は、宣言文で表現

```

/*疑似等価光学系理論から演繹されるリレー光学系生成述語*/
relayruled(Limit,Lenset):-
    basis(Lset,Ref),
    relay_r(Limit,Lset,Ref,Lset2,Ref2),
    append(Lset2,[Ref2],Lenset).

relay_r(Limit,Lenses,Ref,Lenses,Ref):-
    Limit < Ref.
relay_r(Limit,Lenses,Ref,L,R):-
    Limit > Ref,
    pickone(Lenses,Before,[Lens,Posi],After),
    lens(Lens,Focus),
    find_rule(Focus,Paira,Dist),
    substitute([Lens,Posi],Paira,Dist,Pairs,Dist2),
    shift(Dist,After,Afterz),
    append(Before,Pairs,Temp),
    append(Temp,Afterz,Lset),
    Ref2 is Ref + Dist,
    relay_r(Limit,Lset,Ref2,L,R).
basis([[L1,P1],[L2,P2]],P3):- /*基本リレー光学系*/
    lens(L1,F1), lens(L2,F2),
    P1 is F1, P2 is F1*2.0+F2, P3 is (F1+F2)*2.0.
/* ルール適用述語 */
find_rule(Focus,[[Lens1,P1],[Lens2,P2]],P3):-
    lens(Lens1,F1), lens(Lens2,F2),
    D is F1+F2+(F1*F2)/Focus, FD is F1+F2-D,
    H1 is F1*(D-2.0*F2)/FD, H2 is F2*(2.0*F1-D)/FD,
    P1 is -H1, P2 is P1+D, P3 is P2+H2.
substitute([Lens,Posi],[[L1,P1],[L2,P2]],P3, /*置換述語*/
    [[L1,P4],[L2,P5]],P6):-
    P4 is P1+Posi, P5 is P2+Posi, P6 is P3+Posi.
shift(D,[],[]).
shift(D,[[Lens,Posi]|L],[[Lens,Pd]|L1]):-
    Pd is Posi + D, shift(D,L,L1).
pickone([X|L],[X|A],B,C):-
    pickone(L,A,B,C).
pickone([A|L],[],A,L). % This order search from last

```

図 5.10 疑似等価光学系理論から導かれる  
リレー光学系表現

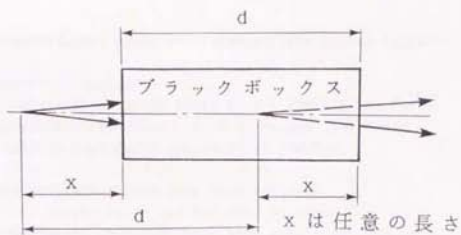
上の離れた2点 $O_1, O_2$ を、光軸上の別の2点 $I_1, I_2$ にそれぞれ結像させる光学系である<sup>5-9)</sup>。本設計でいうリレー光学系ではさらに光学系全体で屈折力がないことという条件がつく。この条件を満たすものは、いわゆる望遠鏡系とよばれるリレー光学系（付章A3.5の(A3.39)、(A3.40)である式において、縦倍率と横倍率の絶対値が等しい場合）<sup>5-10)</sup>。望遠鏡系の光学系では、平行な入射光（曲率中心が無限大の位置にある平面波）が入った場合、射出光も平行な光線となる。一方、有限の距離にある物体の像を一定距離だけ移す機能があるから、有限の位置にある点から出た光（その点の位置が曲率中心となる球面波）は一定光路長だけ移動した別の点に集まる（図5.11参照）。そこで、この特徴を論理表現化して、Prologで表現したものが図5.12である。relay\_g述語において、リレー光学系の次の特徴を記述している。すなわち、

- (1) 入射基準面に平行にはいる入射光に対し、射出基準面から出る射出光も平行でなければならない。
- (2) 入射基準面に集まる集光光に対し、射出光は射出基準面に集光してから発散する光でなければならない。

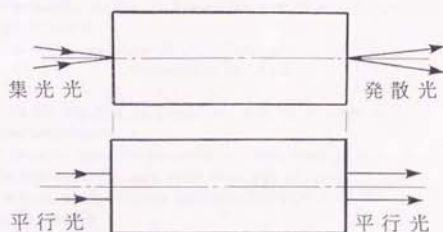
という、入射光と射出光の波面の曲率中心位置が2通りの状態で伝達する条件として記述している。ray\_transfer述語がリレー光学系に光線が入射するときと射出するときの曲率中心と射出面の位置を求める述語になっている。

### 5.5.3 光軸制御型リレー光学系の論理表現

前項は、光軸が固定された場合のリレー光学系を求めるためのプログラムであるが、光軸制御型リレー光学系ではさらに光軸方向も偏向させなければならない。そこで、光軸が固定されるリレー光学系をまず推論で得て、その光軸の途中で揺動平面鏡を挿入することで光軸制御型リレー光学系を求めることにした。揺動平面鏡の挿入



( a ) リレー光学系の機能説明図



( b ) リレー光学系の成立条件

### 図5.11 リレー光学系の条件

- (a) リレー光学系は、それに入る光線の発散状態を保ちながら、長さ  $d$  だけ状態を移動させるブラックボックスと見なせる
- (b) リレー光学系の特徴を二つの典型例で表現するすなわち、一端に集まる集光光は、他端から点光源的な発散光として出て行く  
また、平行光はそのまま平行光で出て行く



```

relay_general(Limit, Lense):- relay_g(Limit, Lense, Fc_pos).

relay_g(Limit, Plan, Fcs):-
    ray_transfer(Limit, Plan, 99999.0, 0.0, 99999.0, Pos, Fcs1),
    ray_transfer(Limit, Plan, 0.0, 0.0, Fc_pos, Pos, Fcs2),
    append(Fcs1, Fcs2, Fcs3), extract(Fcs3, Pos, Fcs).

ray_transfer(Limit, [[Lens, Lens_pos], Pos_out],
    Fc_in, Pos_in, Fc_out, Pos_out, [Fc_out]]:-
    ray_passing(Fc_in, Pos_in, Lens, Lens_pos, Fc_out, Pos_out),
    Limit < Pos_out.
ray_transfer(Limit, [[Lens, Lens_pos]|List], Fc_in,
    Pos_in, Fc_out, Pos_out, [Fc_out|Fcs]):-
    ray_passing(Fc_in, Pos_in, Lens, Lens_pos, Fc_out, Pos_out),
    Pos_out < Limit,
    ray_transfer(Limit, List, Fc_out, Pos_out, Fcs).

ray_passing(Fc_pos, Pos_in, Lens, Lens_pos, Fc_out, Pos_out):-
    lense(Lens, Focus),
    try_locate_lense(Fc_pos, Pos_in, Focus, Lens_pos),
    lense_character(Fc_pos, Lens, Lens_pos, Fc_out),
    reference_point(Fc_out, Lens_pos, Focus, Pos_out),
    Pos_out > Pos_in.

try_locate_lense(S, P, F, Y):- S < 9999.0, Y is S + 2.0*F.
try_locate_lense(S, P, F, Y):- S < 9999.0, Y is S + F.
try_locate_lense(S, P, F, Y):- S < 9999.0, Y is S.
try_locate_lense(S, P, F, Y):- S >= 9999.0, Y is P + 2.0*F.
try_locate_lense(S, P, F, Y):- S >= 9999.0, Y is P + F.
try_locate_lense(S, P, F, Y):- S >= 9999.0, Y is P.

```

## 図 5.12 リレー光学系の性質の論理表現 (続く)

relay\_generalで、レンズの組合せ例を出力  
 relay\_gは、図5.11の特徴をもつ光学系として定義  
 ray\_transferで、レンズ群による像点の移動を記述  
 ray\_passingで、単レンズによる像点の移動を記述  
 try\_locate\_lenseで、レンズを導入する試みを記述

```

reference_point(S,P,F,Y):- S < 9999.0, Y is S.
reference_point(S,P,F,Y):- S >= 9999.0, Y is P + F.

/* 一般のリレー光学系を求める述語 */
relayall(Limit,Lenset):-
    setval( cases,0 ),
    relay_g( Limit,Lenset,Fcs ),
    send_message( Lenset ).

/* 光軸制御型リレー光学系を求める述語 */
relayrot(Limit,Lenset):-
    setval(cases,0),
    relay_g(Limit,Lenset,Fcs),
    result(Lenset,Fcs).

result(Lenset,Set):-
    send_message(Lenset); pickup(Fcs,Set), send_another(Fcs).

extract([],_,[]).
extract([A|List],X,B):-
    A<9999.0,A/=X -> add(A,C,B),
    extract(List,X,C);
    extract(List,X,B).

pickup(E,[_|L]):-pickup(E,L).
pickup(E,[E|_]):-!.

append([],E,E).
append([A|L],E,[A|R]):-append(L,E,R).

add(X,List,[X|List]).

```

## 図 5.12 リレー光学系の性質の論理表現 (続き)

reference\_pointで、レンズによる像点位置を求める  
relayallで、リレー系を求めて3次元表示部へ送る  
relayrotで、光軸制御するリレー光学系を求める  
resultで、回転制御する光学部品配置を表示部へ送る  
extractで、特定の成分Xをリストから排除する  
pickupで、リストから成分を一つずつ取り出す

位置としては、光束が絞られている位置が適切であると判断した。その理由は、光束が絞られれば、平面鏡の面積が小さくでき、したがって揺動平面鏡の慣性質量を小さくすることができて制御特性が良くなると考えられるからである。そこで、入射基準面にはいる平行光が集光する位置、または入射基準面に集まる集光光がリレー光学系内部で、再度集光する位置に平面鏡を挿入することにした。この位置は、図5.13のなかのrelay\_g述語のなかでFesに書えられる。この中からひとつずつ挿入位置を取り出すための述語がresult述語のなかのpickup述語である。そして、具体的な光軸制御型リレー光学系として求める述語がrelayrotとなっている。

#### 5.5.4 光線道跡部 GAUSS/R への通信インタフェース

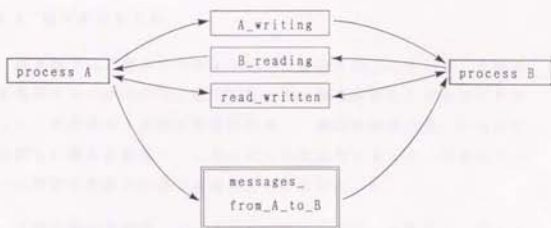
推論部 GAUSS/1 の出力は通常、リストすなわち文字列である。設計例の文字列による提示では、設計者は内容が直ちに理解できるとはいえない。しかも、その設計例で実際にどの様に光線が屈折するか動作確認ができない。これでは支援システムとしては、機能的に不十分である。そこで推論部の出力を、第4章で開発した光学CADシステムに送り、推論結果に基づいた光学部品を自動的に生成して、レイトレーシングによって視覚的・数値的に、設計例の光学特性と動作の確認を行うことにする。このためには、これら2つのプログラムモジュール間でメッセージの交換を行うための通信プログラムが必要となる。この通信で用いる通信方式は (1)ファイル経由、(2)ソケットと呼ばれるユニックス (UNIX) の通信制御プロトコルを利用する、の2通りの方法で実現した。(2)の方式は、通信制御を意識しなくてよい反面、Prologシステムにソケットをサポートする機能を付加するというシステムの改造が必要となる。以下にこれらの2通りの方法を簡単に説明する。

まず、ファイル経由の通信制御プログラムでは、自分と相手の現在の状態 (ファイルを読んでいるか、書いているか、いずれでもな

いか)と過去の状態(既に読み終えているか、まだ読んでいないか)をそれぞれ1バイトのステータスファイルに記録しておいて、このステータスファイルを参照してから同一のメッセージファイルの読み書きを行う。ステータスファイルは読みだし専用と書き込み専用を設けて、相手と同じ書き込み動作で一つのファイルにアクセスしないようにした。具体的には、図5.13に示すように一方向の情報伝達に4つのファイルを使ったアルゴリズムである。矢印は情報の流れる方向を示す。これを実現する、CとPrologで書かれたプログラムを付章A5.1に示す。逆方向の情報伝達もまったく同じ方式が使える。

一方、ユニックスの基本機能としてサポートしているソケットを利用すれば、伝送時のプロトコルをシステム側で行うためにユーザは特にプロトコルを意識する必要がない。ソケットは、通信のための仮想経路であり、2つのプログラム間で経路を結合することによって、通常のread/writeの感覚でプログラムを組むことができる。ソケットを結合させるための具体的手順は付章A5.2に示す(UNIX 4.2BSD版以上の版で有効)。

これらの通信制御方式に対応したインタフェースプログラムを推論部 GAUSS/I と、光線追跡部 GAUSS/R 上にプログラム化して実現した。ユーザからの推論プログラムへのメッセージは、GAUSS/R 経由で受取り、出力は GAUSS/R 上でモデル化し、3次元表示部 GAUSS/V で3次元表示してユーザに提示する方式とした。このような整備をして初めて、条件を様々に変えた場合の設計例を、具体的に即座に確認、検討できるようになった。



```

try_count = 0;
while( try_count < MAX_TRY_COUNT ) { /* 制限範囲内で試行を繰り返す */
  if( B_reading == FALSE ) { /* B が今、読んでいないならば */
    if( read_written == ALREADY_READ ) { /* 既に読み終えていれば */
      A_writing = TRUE; /* A が書く準備をする */
      if( B_reading == FALSE ) { /* B がアクセスしていなければ */
        file_out( message ); /* メッセージを出力 */
        read_written = NEWLY_WRITTEN; /* 出力終了 */
        A_writing = FALSE; /* A はアクセス終了 */
        return( TRUE ); /* リターン (成功) */
      }
    }
    else { /* A が書こうとしたとき、B がアクセスしていたら */
      A_writing = FALSE; /* A はアクセスを見合わせる */
    }
  }
  try_count = try_count + 1; /* 試行回数をカウント */
}
return( FALSE ); /* リターン (失敗) */

```

図 5.13 ファイル経由プロセス間通信アルゴリズム (片方)

プロセス A からプロセス B にメッセージを送るために、  
 3 種類のフラグを用いて確認する対称アルゴリズム  
 (全く同様にプロセス B からプロセス A に送れる)

## 5.6 第5章のまとめ

第5章では、第2章で明らかにした設計仕様であるリレー光学系を実現するための手法の開発を行った。従来経験的に行われていたリレー光学系の一般的な配置問題を、「疑似等価光学系」と名付けた新しい概念を構築し、これを用いて理論的にまとめ、任意のリレー光学系の配置を生成する規則として実用化した。

「疑似等価光学系」というのは、凸レンズは、本質的に、凹レンズと同じように最終的には光線を発散させる機能をもつと見なして、これらのレンズ間での等価的な位置関係を明らかにした概念である。この「疑似等価光学系」理論を用いて、一般的なリレー光学系の配置を求める推論プログラム GAUSS/I を作成した。このプログラムは第4章で開発した光学プログラム GAUSS/R と結合することができる。したがって、GAUSS/I の推論結果を第4章で開発した CAD プログラム GAUSS/R にプログラム間通信で送り、そこで光線追跡によって検証するという機能構成で光学 CAD システム全体をまとめ、新規設計用 CAD システム「GAUSS」を開発した。

## 第6章 光軸制御型オプト メータの開発設計



## 6.1 はじめに

前章までに開発した3つのプログラムモジュールである光線追跡部 GAUSS/R、推論部 GAUSS/I、3次元表示部 GAUSS/V をプロセス間通信により結合させた統合システム GAUSS を支援システムとして用いて、光軸制御型オプトメータの新規設計を行う過程を本章で述べる。

まず6.2節では、基本的設計方針を固めるために推論部 GAUSS/I を使って基本設計案を求める。このとき、第3章で考察したアイデアの展開手法を利用して設計案の改良を行う。この過程で GAUSS の支援レベルが高かった（設計者にとって負担が少なかった）ために、新しい光学機能を発見することができた。そこで、発見した光学機能である光軸移動機能について説明を加える。

次に6.3節では、基本設計案を実用化するときの問題点、および、それらの解決方法を説明する。特に、基本案ではレンズを中心に考察してきたが、実用化するためには口径比を大きくとれる球面鏡におきかえなければならない。この変更に伴って必要となる取差などの検討を行った。そしてこれまでに行ってきた設計過程を6.4節で整理して、今後の類似設計に役立てる設計手順としてまとめる。

6.5節では、これまでの検討結果である最終設計結果をもとに光軸制御型リレー光学系を製作し、このリレー光学系を構成要素とした光軸制御型オプトメータを開発した。この光軸制御型オプトメータ全体の機能構成を説明する。

最後に6.6節では、アイデアの展開段階で GAUSS 利用により発見した光軸移動機構を、実際に組み込んで開発した頭上搭載型オプトメータに関して、類似設計の観点からの留意点についてまとめる。

## 6.2 光軸操作型 CAD システム GAUSS による推論設計と光軸移動機能の発見

まず、第5章で開発したリレー光学系設計のための推論部プログラム GAUSS/I を用いて基本設計を行う。ここでの設計目的は、直線光軸上でレンズによるリレー光学系の構成例を求めた後、その中から適切な例を抽出して光軸制御型に機能拡張することである。GAUSS/Iの出力は文字列であるので、それを光線追跡部 GAUSS/R に渡すことにより、光学部品を自動生成し光線追跡を行う。さらに、その結果を3次元表示部 GAUSS/V に渡して視覚化し、設計案の検討が容易にできるようにした。図6.1にGAUSS/IからGAUSS/Rに送られたメッセージ例を示す。GAUSS/Vの出力は、3次元的に任意の視点から見る事ができる線画である。以下にこの画面上の図形を提示して設計を行う過程を示す。

### 6.2.1 光軸制御型リレー光学系の推論による機能開発

図6.2に推論により得られたリレー光学系を数例示す。これは焦点距離が $f$ と $2f$ の2つのレンズを用いて、与えられた距離( $20f$ )以上の間隔でリレーレンズ系の例を提示したものである。右方に見える座標系の原点と左方の四角の枠の位置とが、リレー光学系の両端の基準面である。直径の大きい方が焦点距離の長いレンズである。この図は、推論部で得られたレンズ情報をもとに、光線追跡部でレンズを生成しレイトレーシングを行い、その結果を3次元表示部で表示したものである。このリレー光学系に、原点位置から平行ビーム光線を入射したときの屈折状態を示している。これらの例の中で光軸可変型に応用する準備として、最も単純な部品点数の少ない同図(b)を次の思考ステップへ進むための候補とした。

そこで次にこの(b)の例について、光軸方向可変性を付加した場合の実現例を推論により求めた。この推論は、リレー光学系の機能を實現する機能と、光軸を回転させるために揺動鏡を挿入する機能と

```

DISP =case= 1:
CLEAR
RAY 0 0 0 .02 .02 1 .7
RAY 0 0 0 -.02 -.02 1 .7
RAY 0 0 0 -.02 .02 1 .7
RAY 0 0 0 .02 -.02 1 .7
LENS
  FOCUS 100.000000
  POSITION 0 0 300.000000
DISP Lens of focus 100.000000 at 300.000000
LENS
  FOCUS 50.000000
  POSITION 0 0 500.000000
DISP Lens of focus 50.000000 at 500.000000
LENS
  FOCUS 50.000000
  POSITION 0 0 650.000000
DISP Lens of focus 50.000000 at 650.000000
LENS
  FOCUS 100.000000
  POSITION 0 0 800.000000
DISP Lens of focus 100.000000 at 800.000000
LENS
  FOCUS 100.000000
  POSITION 0 0 1000.000000
DISP Lens of focus 100.000000 at 1000.000000
STOP
  POSITION 0 0 1100.000000
  RECTANGLE 40 40
  HOLE RECTANGLE 30 30
DISP Stop at 1100.000000
SHOW

```

図 6.1 推論部から光線追跡部へのメッセージ例

各行の最初の文字列が、基本的なコマンドを表わす  
 DISP は、以降の文字列を画面に表示させる  
 CLEAR は、グラフィック画面を消去  
 RAY は光源を生成し、続いて位置、方向、強度を示す  
 LENS は、レンズ部品を生成する  
 FOCUS は、部品の焦点距離を指定する  
 POSITION は、部品中心の絶対座標位置を指定する  
 STOP は、絞り部品を生成する  
 RECTANGLE は、部品の外形が長方形で以下の寸法を指定  
 HOLE RECTANGLE で、穴の形状を長方形で指定

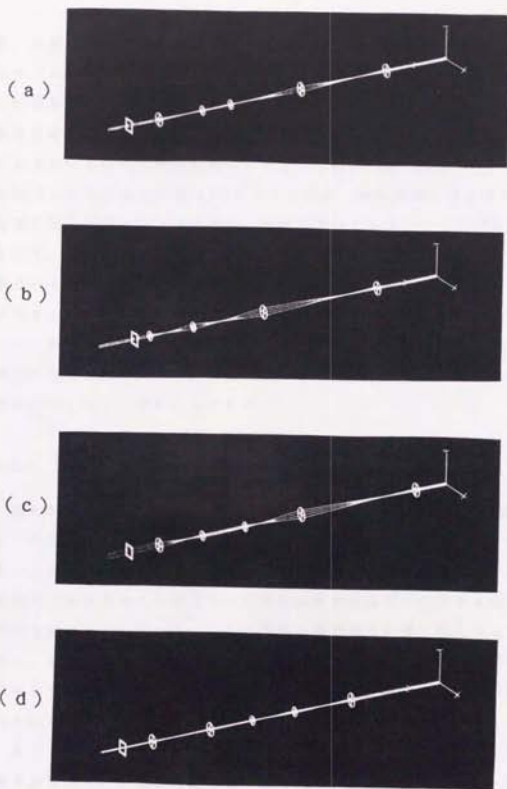


図 6.2 固定光軸型リレー光学系の例

GAUSSの推論部で求めたリレー光学系の例

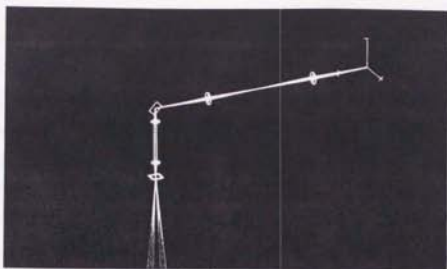
(a)、(b)は等倍率であるが、(c)と(d)はビーム径がそれぞれ拡大、縮小されている

を、文字列を操作する推論プログラムのなかで組み合わせることにより「光軸方向を変化させることができるリレー光学系」という新しい機能を実現させる例である。揺動鏡の挿入位置は、入射光線の集光位置とした。この推論結果のリレー光学系に対し、揺動鏡にわずかな回転を与えて光線を回転させた例を図6.3(a), (b)に示す。回転角が大きすぎると同図(c)のように口径比(焦点距離に対する有効直径の比)が小さいレンズでは、光線が外れてしまうことが容易にわかる。推論結果に対して、このようにその場でただちに部品の回転という、推論設計プログラムとは関係ない別の指示を与えることができるのも、推論部と光線追跡部が全く独立したプログラムになっていることの利点である。なぜならば、回転メッセージは特定の部品に与えており、これは光線追跡部内部の状態変化であり、推論部は関知しなくて済むからである。

#### 6.2.2 推論結果の組合せによる機能拡張

図6.3において、推論の結果得られた結果に関して2つの点に注目してみることができる。一つは、異なる構成で同じ機能を実現できることが示されていることである。すなわち、光路上に挿入した揺動鏡を回転させることにより、光軸を回転させることができる推論例が2通り示されている。これは推論の結果独立に得られたものであり、推論の過程ではそれぞれの間で互いの関連性は無い。関連性は無いが、同じ機能が2つの異なった揺動鏡で実現できることが明らかになった。

もう一つの注目すべき点は、揺動鏡の回転軸と光軸の回転軸に関する点である。揺動鏡の回転軸の方向について考察してみると、揺動鏡の回転軸の方向と、最終的に光軸の回転する軸方向とが、レンズを使ったリレー光学系の場合、完全に一致していることが容易に理解できる。その結果、揺動鏡の回転軸の方向を変化させれば、光軸の回転軸方向が変えることができることがわかる。



( a )



( b )



( c )

図 6.3 光軸可変型リレー光学系の表示

GAUSSのrelayrot述語により求めたもの

- (a)、(b)は異なる位置に揺動鏡が挿入されているが、同じ働きをしている（揺動鏡は手動で振らせたもの）
- (c)は(a)の場合で揺動鏡を大きく振りすぎた状態例

以上の2点を組み合わせて考察すると、以下のように機能を拡張できることに気づく。まず、図6.3のなかの光軸方向を変化させる2つの推論例において、一方の揺動鏡の回転軸の方向を、他方の回転軸方向に対して90度回転させる。その後、この2つの揺動鏡を組み合わせる操作を行う。すなわち、同一光軸上に2つの、互いに回転軸方向が90度ずれた揺動鏡を挿入した光学系となる。揺動鏡を光軸上に挿入する操作は、部品の鏡像変換を伴い、本来かなりの計算量を必要とする操作であるが、光軸操作型光学CADシステム GAUSS ではこれを1つの指示で行う独自の機能をもっている。この結果、概念設計段階における重要な設計試行を直ちに行うことができ、しかもその結果を視覚化して確認できる。そして、図6.4に示すように図6.3の2例を同時に適用し、2つの平面鏡を使って各々の平面鏡に1自由度の回転を与えるだけで、射出光線を2自由度で振らせることが出来ることが確認できた<sup>(6-1)</sup>。入射基準面である原点からの光線を、最初の鏡だけで振らせた場合を示したのが図6.4(a)で、2番目の鏡だけを振らせた場合が(b)で、両方の鏡を振らせた場合が(c)となる。したがって、2つの平面鏡を独立に動かすことによって、光軸方向を2次元的に変化させ得ることがシミュレーション実験でも確認できた。これは、第3章で述べた機能の組合せによる新規アイデアの生成例の一つである。

### 5.2.3 光軸移動を実現する機能の発見

揺動鏡を光路上に挿入した光軸可変型のリレー光学系の提示例の中には、平面鏡を揺動させた場合に光軸の方向ではなく、位置が変化する例があった(図6.5参照)。すなわち、光の方向を変化させる目的で当初揺動鏡を挿入したのであるが、揺動鏡の置く位置によっては光軸の方向ではなく、位置を変化させる場合があることを発見した。様々な場合で検討した結果、これは実は、平面鏡の回転で、光線の平行移動を実現できる重要な機能であることが判明した。一



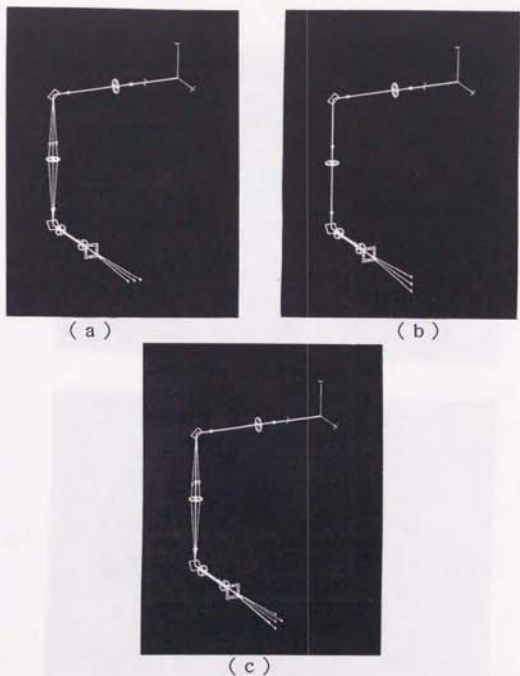


図 6.4 光軸を 2 段階折り曲げたりレー光学系

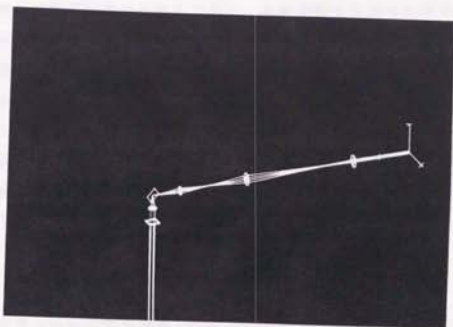
図 6.3 の 2 つの例からヒントを得て、それらを重ねたもの

(a) 上の揺動鏡で水平方向に光軸が最終的に振れる

(b) 下の揺動鏡で垂直方向に光軸が最終的に振れる

(c) 2 つの揺動鏡は独立に制御でき、2 次元的に光軸を振らせることが確認できる

( a )



( b )

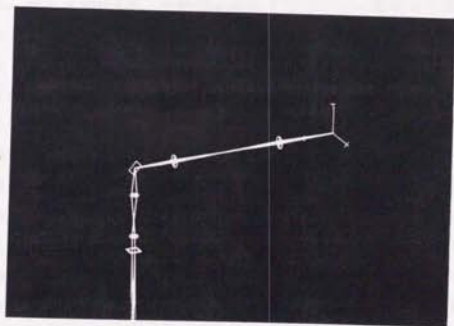


図 6.5 揺動平面鏡で光軸が移動するリレー光学系の例

GAUSSのrelayrot述語により求めたものの一部  
(a)、(b)ともに、揺動鏡の回転で光軸が移動しているのを発見

般に、光軸を揺動平面鏡で回転させれば、最終光軸の方向もそれに対応して回転すると予想される。しかしこの例は、設計者が光軸の回転を予想して与えた条件から、設計者も予測しなかった現象が見つかり、光軸の移動という機能を発見できたことを示す。この発見につながった理由として、設計上の試行錯誤を簡潔な表現で記述できる論理型言語の持つ記述の容易さと、さらにはその結果に対して自由に光線追跡を揺動状態で行うことができ、加えてその結果の3次元表示という評価環境が整っていたことがあげられる。

#### 6.2.4 光軸の移動・回転機能の一般法則

推論例で得られた結果を考察した結果、次のような新しい知見が得られた。例えば図6.6は、最終的に選択されたりレー光学系の構成例であるが、図中に示す実線、破線はそれぞれ平行光、発散光が入射したときの屈折状態を示している。同図に示される光線は、通常は光線そのものの進路を示すと解釈されている。ところが、これまでのシミュレーションから得られた結果によって、この線が光軸の振れ範囲を表わしているという新しい解釈ができる。この観点に立てば、平行に入った2つの線が交わる位置(AまたはB点)に揺動平面鏡をおいてそれを揺動制御することにより、光軸を平行移動させることができることが容易に理解できる。同様に、CまたはDの位置に揺動平面鏡を置いてこれを揺動制御すれば、光軸を点Eを中心として回転制御できることがわかる。さらに、レー光学系の複数ヶ所に光軸が交わる点が存在すれば(例えば、AとB、またはCとD)、光軸制御のための揺動平面鏡を分散させて置くことができる。そして分散させた揺動平面鏡の回転軸の方向を変えることにより、光軸制御の自由度を増やすことが可能となる。これは、機構的に複雑になる2軸方向の揺動平面鏡を1つ置く代わりに、1軸方向の揺動平面鏡を2ヶ所に軸方向をずらして置くのと等価になることを意味しており、その実用的価値は大きい。これらの発見は、機構

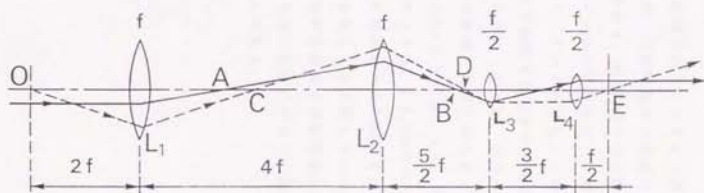


図 6.6 最終的に選択されたリレー光学系の寸法

実線の光路と光軸が交差する点A、Bに揺動鏡を挿入  
すると、光軸を平行移動させることができる

破線の光路と光軸が交差する点C、D、Eに揺動鏡を挿  
入すると、光軸を回転させることができる

設計上の自由度を著しく高める効果があることが判明した<sup>6-2), 6-3</sup>  
1, 6-4)。

同一焦点距離の凸レンズを2つ用いた基本的なリレー光学系でこの光軸の移動、回転機能を平面鏡の回転だけで実現したのが、図6.7に示す例である。同図(a)では光線が当たる最初の平面鏡を回転させたときのビームの振れを示し、最後に光線が通過する四角枠位置を中心として、ビームが回転しているのが見られる。また、同図(b)は2番目の平面鏡を回転させた状態を示す。この場合、四角枠位置ではビームは回転しなくて、平行移動していることがわかる。これらの2つの平面鏡を同時に振らせても、それぞれの機能は独立して働き、同図(c)に示されるように、ビームの回転と移動が同時に生じている。このことは、2.3.1項でレベル分けした測定条件に対する要求機能の中の最終レベルの頭部を自由に動かせるオプトメータの機能が開発できることを示唆している。なぜならば、頭部を動かすときは、眼球は平行移動と回転運動が同時に行われるので、図6.7に示す原理機構を用いればこの2つの動きに追従補償できる光学系が開発できるからである。

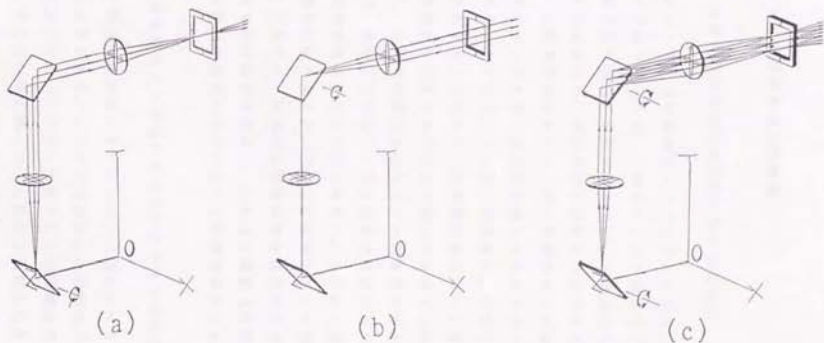


図6.7 基本リレー光学系の光軸制御例

- (a) 原点から出た光線は、最初の揺動鏡の回転により四角棒位置を中心として回転している  
 (b) 原点から出た光線は、2番目の揺動鏡の回転により四角棒位置では平行移動している  
 (c) 2つの揺動鏡の回転で(a)、(b)の効果を重ね合わせる

### 6.3 リレー光学系の実用的構成

#### 6.3.1 光軸方向の実用的制御角に関する問題点

前節において、光軸制御型リレー光学系の基本的な構成方法を得た。この方法を用いれば、1軸まわりの平面鏡を2つ用いて2自由度の視線方向の変化に追従するように、光軸方向を制御することが原理的にできるため、眼球運動を補償した光学系を実現できるはずである。この光学系において、常に視線方向に光軸を合わせるように制御されているとき、光学系を通して見ると常に静止した眼球像が得られることになる。この静止眼球像を、従来のオプトメータの測定対象とすることにより、眼球運動をしている実際の作業中での眼球調節機能を測定することが可能となるはずである。

しかし、レンズで構成されたリレー光学系は固定光軸の場合は問題ないが、光軸方向を変化させる用途では口径比が小さいため、高々数度の光軸角の変化しか得られない。それ以上変化させようとして揺動鏡を回転させると、回転した光軸がレンズ視野からはずれてしまう。これでは、原理的に眼球運動を補償する光学系が可能でも、実用的なものは設計できない。これでは概念上の設計はできても、実用的な設計に適用できないという問題点が生じる。

#### 6.3.2 球面鏡対と入射面の直交化による光学歪補正法

前項の問題点を解決するためには、口径比を大きくとれる光学部品を使う必要がある。レンズでは製作上の限界から口径比のおおきいものが無いため、レンズの代替として球面鏡を用いることが考えられる。ところが球面鏡には、入射光と反射したあとの射出光とが空間的に重なるという別の問題点が存在する。たとえば、凹面鏡の曲率中心から出た光は反射の後、同じ曲率中心に集光してしまう。これを避ける一つのアイデアに楕円鏡を使うことがある。楕円鏡は、空間的に異なる2点を焦点に持つため、球面鏡のような光軸の重な



りという問題はない。しかし、楕円鏡は2.4.1項でも別の表現で述べたが、付章A6.1に示すように入射位置によって倍率が変化している。これは、光線があたる楕円鏡の入射位置によって焦点距離が変化する光学系と見なすことができる。この特徴を生かす用途もあるだろうが、本設計で使うリレー光学系の構成要素としては光学特性が変化するので不適切である。

そこでやはり、球面鏡を使わざるを得ないことになるが、光軸が入射と反射とで重なるのをさけるため、球面鏡に入射する光軸の角度を90度からずらして、光軸の重なりが生じないように設定する必要がある。すなわち球面鏡の曲率中心をわずかにはずした点に眼球中心を置き、この点からでた光が、再度集まる点を平面鏡で位置をずらし、この点に回転鏡を置く図5.8の使い方が最適であることがわかった。この場合、中心位置Cからずらした距離 $a$ だけ光学歪（非点収差）が生じるので、できるだけこの光軸からはずす距離（以降この距離 $a$ を軸はずし距離と呼ぶ）を小さくしなければならない。しかしながら小さくすれば、他の部品との干渉が生じ易くなる。そこで干渉が生じなくかつ、歪を最小限に抑える構成を、設計時点ですべて3次元的に正確に求める必要が生じる。このためには綿密な光線追跡が必要であり、他の部品による干渉等のシミュレーションを行うことが出来る設計支援システムGAUSSを有効に活用した。

### 5.3.3 光軸はずし状態の球面鏡における光路長補正法

球面鏡の光軸をはずして使う場合、入射面内とその直角方向の面内とで焦点位置が異なる、いわゆる非点収差が生じる。凹面鏡を用いたときの軸はずしによる非点収差は、光軸回りの方向に依存している。これに着目して2つの凹面鏡を用い、互いに入射面が直交するように配置することにより、最終的な非点収差を小さくすることが期待できる。そこで、この入射面直交配置に関する適切な部品間距離の検討を行った。これは三面図で示す図5.9の配置において、三

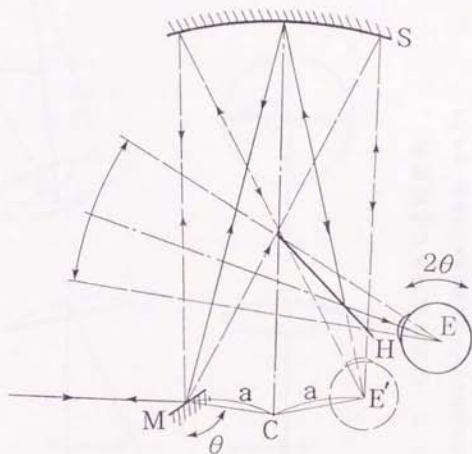


図 6.8 軸はずしを利用した回転補償機構

本来  $a = 0$  が望ましいが、空間的に重なるので  $a > 0$  とする（軸はずしと呼ぶ）。E が  $2\theta$  だけ回転しても M が  $\theta$  回転すれば補償可能。H は測定光だけ反射する平面鏡

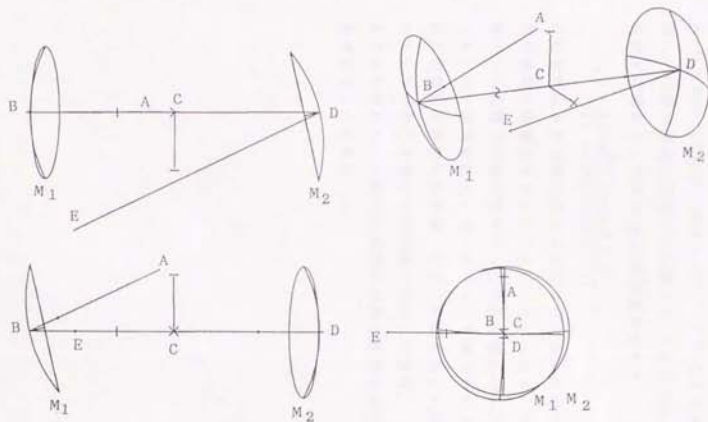


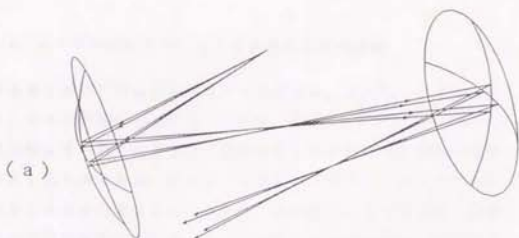
図 6.9 収差を低減させる配置例

2つの球面鏡を互いに反射面が直交する配置とすることにより、軸はずしの歪を低減できる  
 $\angle ABC \perp \angle CDE$

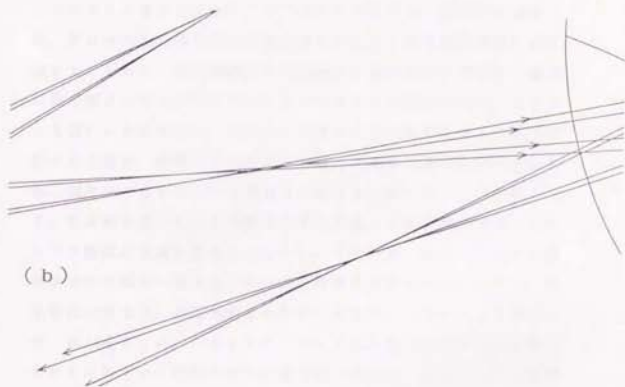
角形 A B C を含む球面鏡  $M_1$  の入射面と、三角形 C D E を含む球面鏡  $M_2$  の入射面とを直角に配置する<sup>6-51, 6-52</sup> ことである。この場合、 $M_1$ 、 $M_2$  間の最適な距離  $b$  は付章 A 6.2 に示すように、軸はずしの角度  $\theta$  の関数として次の (6.1) 式で表わされる

$$b = \frac{2(\cos^2 \theta - \cos \theta + 1)}{(2 - \cos \theta)(2 \cos \theta - 1)} R \quad \dots \dots \dots (6.1)$$

この関数は  $\theta$  が 10 度付近ではほぼ  $2R$  となっており、したがって両凹面鏡間の距離は  $2R$  として良いことがわかる。実際にこの解析に基づいた配置で光線追跡を行った結果を図 6.10 に示す。そのなかで、(a) の一部図を拡大している (b) で明らかのように、一点から出た拡散光が最初の凹面鏡で反射した後集光した箇所では一点になっていないが、2 番目の凹面鏡で反射した後は、一点に集光していることがわかり、入射面の直交化が非点収差を減少させることに有効であることを確認した。



( a )



( b )

図 6.10 2つの球面鏡による収差低減効果

図(a)において、上方の点光源からでた4本のビームは左側の球面鏡で反射した後、中央部で一度集光し、さらに右側の球面鏡で反射して、再度集光しているが、拡大図(b)でみると、最初の集光点では4本のビームが一点に集光していないが、右側の球面鏡で反射したあとは一点に集光しており、重が減少していることがわかる

#### 6.3.4 レンズの光軸はずしによる表面反射光の分離

球面鏡を用いた光軸制御型リレー光学系を、2次元上で模式的に表わしたものが図6.11である。これは、図6.8の大きい2つのレンズを凹面鏡に置き換え、さらに、光軸を変化させるための揺動平面鏡を挿入したものである。本リレー光学系が、単に一方方向に光学特性を保存したまま伝達するのであればこの構成で十分であるが、実際の適用状況では双方向に光ビームを伝達する必要がある。すなわち、測定部から出た赤外光の測定ビームは、リレー光学系を經由して眼球正面から眼球に入り、網膜上にスポット像を形成する。さらに、このスポット像から反射される赤外光が同じリレー光学系を經由して、再び測定部に取り込まれ解析されて初めて焦点調節機能が測定できる。しかも、眼球網膜上から反射される赤外光の強さは、最初に測定部から出る赤外ビームに比べてはるかに微弱である。したがって図6.11の配置では、レンズに赤外ビームが照射されて表面で反射する光量が、網膜上から反射して返って来る光量に比べて強いいため、測定ができないという問題点が生じる。そこで、この対策として、凹面鏡を用いたとき光軸をはずして使ったのと同様な使い方をレンズ配置にも採用することにした。すなわち、レンズの光軸と測定系での光軸を一致させずに一定の角度をもたせるようにする。両光軸間の角度は、表面反射光が測定に影響を与えないような値として、約15度とした。このように、レンズを光軸と直交する回転軸のまわりにわずかに回転させた状態で使う利点は、高いS/N比を得ることができるが、同時に非点収差を生じさせるという欠点もある。そこで、2つ用いるレンズにおいて、互いに回転軸が直交するように配置し、さらに、CADシステムGAUSSのねじり機能を用いて、歪が最小になるように凹面鏡との相対位置関係も光軸回りにねじって最適位置を見つけて設計した。

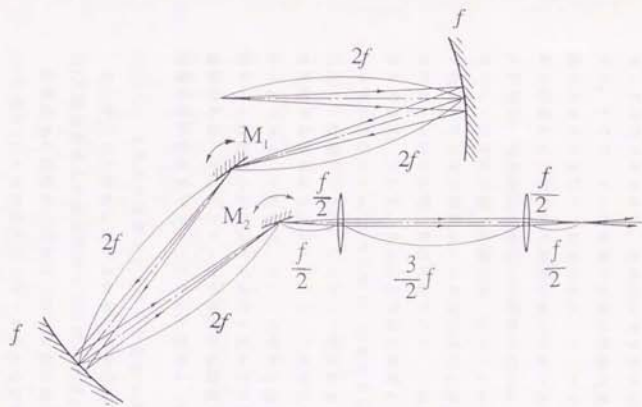


図 6. 1 1 光軸制御型リレー光学系の平面的模式図

光軸を2次元的に回転させるため、揺動鏡M1、M2を図に示す光路上に挿入して設計した。2つのレンズを球面鏡に置き換えている



### 6.3.5 ビーム特性を考慮した設計評価関数

本設計のリレー光学系では、2つの揺動平面鏡を用いて光軸を振らして使用するために、光学歪の大きさは光軸の振れた角度に依存する。そこで、2つの揺動平面鏡の揺動角度をパラメータとして、歪の大きさを検討する必要がある。ところが、レンズや球面鏡が複雑な配置をとり解析的な誤差評価が困難であるため、ここでは誤差の評価を、光線追跡を利用した数値計算によって行うことにした。本リレー光学系で扱う光線では、オブジェクトから出る直径最大約1 cm以内の2本の測定ビームが測定原理上重要である。それは、2本のビーム間の距離と角度の変化によって焦点調節機能を測定するからである。そして、リレー光学系を構成する球面鏡上で一度に当たる光の面積は1 cm<sup>2</sup>以内となり、結像を主目的にした一般の光学系に比べて極端に小さい。したがって誤差評価の基準は、光学像の歪を考慮する従来の方法よりも、リレー光学系の機能の変化で評価すべきである。すなわち、リレー光学系を通過したときに、この測定ビームの特性がどのように変化するかを予め評価しておくことが重要である。そこでリレー光学系の評価関数として、2つの揺動平面鏡の揺動角度をパラメータとした次の3つの関数を選定した。

- (1) リレー光学系を望遠系としてみた場合に含む誤差を評価するために、平行な入射光に対する射出光の平行度を求める。
- (2) 入射基準面上の点光源からでた同一平面上の発散光に対し、射出基準面での照射点の広がり（同一平面からのずれ）を評価する。
- (3) 上述の(2)の点の広がり（同一平面からのずれ）の方向性（発散光が含まれる平面を変化させたときの状態）の変化を調べるために、光の進行方向を軸として、軸を含む互いに直角な面における点の広がり位置の差（非点隔差）を評価する。

上にあげた各項目についての評価関数を $f_1$ 、 $f_2$ 、 $f_3$ として、各々の評価関数を以下に関数式で説明する。

(1)について、2つの射出光の単位方向ベクトルを $e_1, e_2$ とし、それらのなす角を $\theta$ とすると、

$$\begin{aligned}
 f_1 &= \theta \\
 &= \sin \theta \quad (\because \theta \approx 0) \\
 &= \sqrt{1 - \cos^2 \theta} \\
 &= \sqrt{1 - (e_1 \cdot e_2)^2} \quad \dots \dots \dots (6.2)
 \end{aligned}$$

(2)について、2つの射出光の位置ベクトル、単位方向ベクトルをそれぞれ、 $p_1, p_2; e_1, e_2$ とすると、おじれの距離が評価関数となるので次式となる<sup>6-7)</sup>。

$$\begin{aligned}
 f_2 &= |q_1 - q_2| \\
 &= \frac{|(p_2 - p_1) \cdot (e_1 \times e_2)|}{|e_1 \times e_2|} \quad \dots \dots \dots (6.3)
 \end{aligned}$$

(3)について、(2)と同様に1対の射出光の位置ベクトル、単位方向ベクトルをそれぞれ、 $p_1, p_2; e_1, e_2$ とするとき、おじれの中心位置 $c_{12}$ を求める。次に他の1対の射出光について、同様に位置ベクトル、単位方向ベクトルをそれぞれ、 $p_3, p_4; e_3, e_4$ とし、おじれの中心位置 $c_{34}$ を求める。2つの中心位置の距離(非点隔差)が評価関数である。

$$f_3 = |c_{12} - c_{34}| \quad \dots \dots \dots (6.4)$$

$$\text{ここで、} \quad c_{12} = \frac{q_1 + q_2}{2}, \quad c_{34} = \frac{q_3 + q_4}{2}$$

$$q_1 = p_1 + \frac{\{e_1 - (e_1 \cdot e_2)e_2\} (p_2 - p_1)}{1 - (e_1 \cdot e_2)^2} e_1$$

$$q_2 = p_2 + \frac{\{e_2 - (e_1 \cdot e_2)e_1\} (p_1 - p_2)}{1 - (e_1 \cdot e_2)^2} e_2$$

$$q_3 = p_3 + \frac{\{e_3 - (e_3 \cdot e_4)e_4\} (p_4 - p_3)}{1 - (e_3 \cdot e_4)^2} e_3$$

$$q_4 = p_4 + \frac{\{e_4 - (e_3 \cdot e_4)e_3\} (p_3 - p_4)}{1 - (e_3 \cdot e_4)^2} e_4$$

(以上の導出は付章7参照)

詳細設計においては、光学部品自身によって視野がさまたげられないように光路を固定平面鏡で折り曲げ、次に、上記の評価関数で最適な配置となるように微調整した。凹面鏡の軸はずし構成による歪を低減させるために、リレー光学系は3次元的な配置をとっている。さらに、実際に製作する場合、基準方向をとり図面化するために平面鏡を追加した。そして、測定赤外光と可視光とを分けるためのダイクロイックミラーを挿入している $0^{\circ}-90^{\circ}-0^{\circ}$ 。この最終的な配置を図6.12に示し、その三面図表示が図6.13である。この最終配置に対して、凸レンズの表面反射を考慮した光線追跡結果を表示したのが図6.14となっている。

このときの評価関数の値を、図6.15に3次元的に表示した。全体の関数値がなるべく小さくなるように、各部品の位置をGAUSS上で微調整した。

図6.16(a)に、揺動平面鏡の一つを揺動させて光軸上を進む光を鉛直方向に振った様子を示す。また同図(b)では、他の一つのみを揺動させて光軸を水平方向に振った様子を示し、(c)では、2つの揺動平面鏡によって2軸方向に光軸を振っている様子を示す。干渉の問題で、最もきわどい設計を必要とする箇所は、ダイクロイックミラーの位置である。ここでは、上下左右に振れた4角錐状の光束が、揺動平面鏡からでてダイクロイックミラーの上方を通過し、円形の凹面鏡で反射した後ダイクロイックミラーで反射しなければならない。凹面鏡の光軸をはずす角度を大きくとれば、ダイクロイックミラーの配置は尤度が大きくなるため容易になるが、光学歪が大きくなる。設計上の妥協点を決定する際、GAUSSによって定量的に検討することができた。最終的な各設計値は、表6.1に示す。

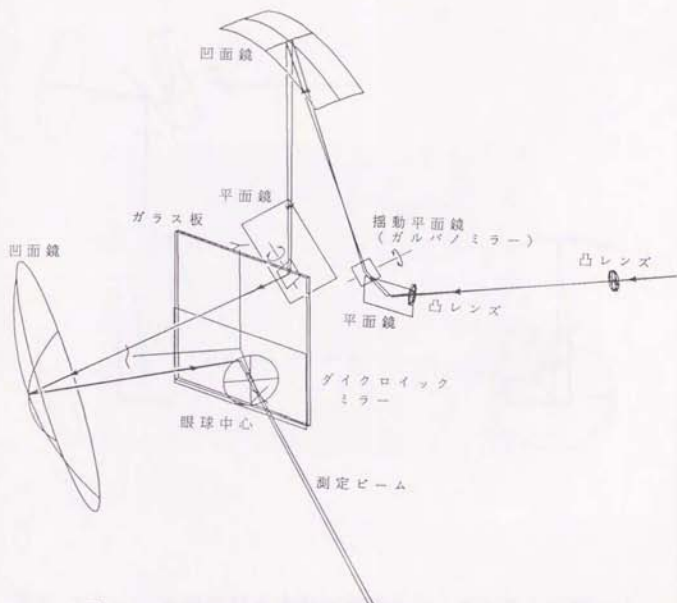


図 6. 1 2 最終設計の光軸制御型リレー光学系斜視図

赤外線ビームが右側から入り、最後に眼球中心となる円盤中央部の穴を通過する。平行光で入射した光は、最終的に再度平行光で眼球に入射する（リレー系の条件）。ダイクロイックミラーは可視光を透過させるので、被測定眼は透かしてまっすぐ前方をみることができる。

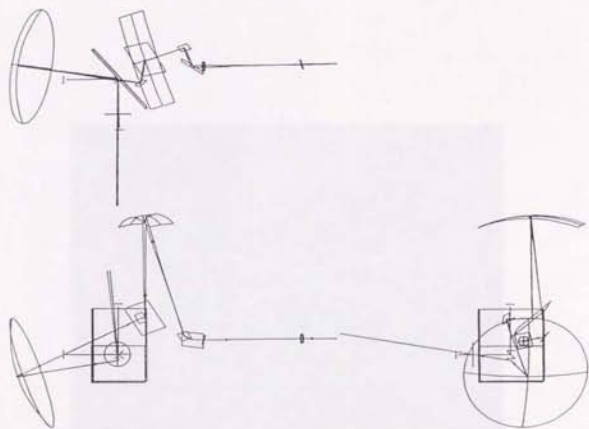


図 6.13 最終設計の光軸制御型リレー光学系三面図

図6.12の三面図表示版、視線方向が水平方向から10度下方に向いている（右側面図に示されている）

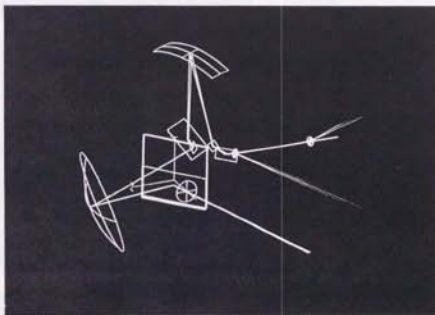
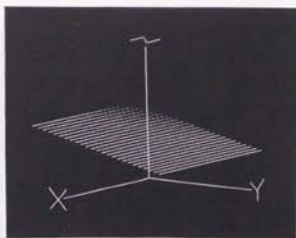


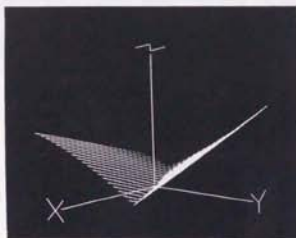
図 6.14 レンズ表面での反射を表示した例

測定光を眼球に照射し、網膜からの反射光を同じ光学系で取り出すためには、途中で部品に表面反射してもどる光を除く必要がある。ここでは、凸レンズの光軸を15度傾けてレンズ表面からの反射光を除いている



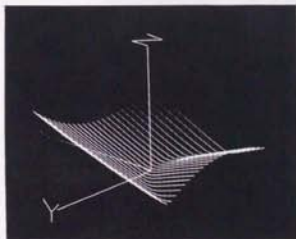
(a) 平行入射光に対する出力光の相対角度 (z軸長は1度のずれ)

本来、出力光も平行であるべきであるが、歪のため回転角によって平行からずれて来る



(b) 集光入射光に対する出力光のねじれ距離 (z軸長0.1mm)

リレー光学系に一点に集光する入射光があるとき、どの程度一点から光軸と直角方向にずれて出て行くかを評価



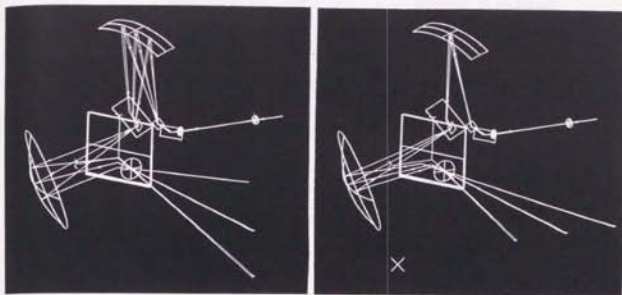
(c) 集光入射光に対する出力集光光の非点隔差 (z軸長2mm)

リレー光学系に一点に集光する入射光があるとき、どの程度一点から光軸方向にずれて出て行くかを評価

## 図 6.15 設計評価関数とそのグラフ

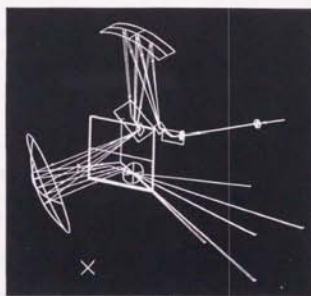
光軸制御型オプトメータは通常の光学機器と異なる仕様なので、設計評価関数を新たに設定した。X軸、Y軸は揺動鏡の回転角を表わし、軸長で10度の回転を示す。





( a )

( b )



( c )

図 6.16 揺動平面鏡を回転させて光軸を振った例

凹面球面鏡で設計したリレー光学系で、2つの揺動鏡を振らせて、光ビームが大きな角度振れることを確認する

表 6.1 光軸制御型オプトメータの光学部品仕様等

レンズ1

中心位置 (-25.408, 30.14, -359)  
 z軸方向 (0.259, 0, 0.966)  
 x軸方向 (0, 1, 0)  
 直径 20  
 曲率半径1 90.52  
 曲率半径2 90.52  
 中心厚 3.0  
 屈折率 1.68543

レンズ2

中心位置 (-25.47, 30.052, -165.369)  
 z軸方向 (0, 0.259, 0.966)  
 x軸方向 (-1, 0, 0)  
 直径 20  
 曲率半径1 90.52  
 曲率半径2 90.52  
 中心厚 3.0  
 屈折率 1.68543

平面鏡

中心位置 (-25.47, 30.14, -143.37)  
 z軸方向 (-0.807, 0.159, -0.568)  
 x軸方向 (-0.193, 0.981, 0)  
 大きさ 30 × 50

揺動平面鏡 (x軸回り)

中心位置 (-54.85, 37.85, -128.15)  
 z軸方向 (0.791, 0.609, -0.055)  
 x軸方向 (-0.293, 0.297, -0.909)  
 大きさ 20 × 20

上方凹面鏡

中心位置 (-41.632, 288.814, -53.022)  
 z軸方向 (-0.044, -0.989, -0.144)  
 大きさ 50 × 200  
 曲率半径 265.9

平面鏡

中心位置 (-41.5, 75.86, -52.6)  
 z軸方向 (0.696, 0.707, 0.123)  
 x軸方向 (0.198, -0.354, 0.914)

大きさ 50 × 90

揺動平面鏡 (y軸回り)

中心位置 (7.74, 75.86, -43.91)  
 z軸方向 (-0.804, -0.324, 0.499)  
 x軸方向 (0.5901, -0.322, 0.740)  
 大きさ 20 × 20

凹面鏡

中心位置 (-32.08, -47.19, 192.18)  
 z軸方向 (0.157, 0.321, -0.934)  
 直径 240  
 曲率半径 265.9

ダイクロイックミラー部

中心位置 (0, -20, 0)  
 z軸方向 (0.843, 0, 0.766)  
 x軸方向 (0, -1, 0)  
 大きさ 76 × 160

ガラス板部

中心位置 (-1.255, 20.0, -2.532)  
 z軸方向 (0.643, 0, 0.766)  
 x軸方向 (0, -1, 0)  
 大きさ 160 × 160  
 中心厚 4.0  
 屈折率 1.52

絞り

中心位置 (72.25, 0.74, 2.22)  
 z軸方向 (1, 0, 0)  
 直径 51  
 穴径 4.0

光線1

照射位置 (-24.47, 30.14, -420.12)  
 照射方向 (0 0 1)

光線2

照射位置 (-26.47, 30.14, -420.12)  
 照射方向 (0 0 1)

#### 5.4 リレー光学系の類似設計のための設計手順の確立

これまでの新規設計経過をまとめると、次のような類似設計のための手順を得ることができる。

- (1) 光軸を直線上にとり、レンズを用いて基本リレー光学系を GAUSS/I で求める。
- (2) 射出基準面において、光軸を回転（揺動）させる必要がある場合は、まず入射基準面に点光源を置き、その発散光がリレー光学系内部で再度集光する位置に、揺動平面鏡を挿入して光路を折り曲げる。
- (3) 射出基準面において、光軸を平行移動（振動）させる必要がある場合は、入射基準面に平行光源を置き、その平行光がリレー光学系内部で再度集光する位置に、揺動平面鏡を挿入して光路を折り曲げる。
- (4) 上記(2)または(3)の場合において、揺動平面鏡を置く位置にリレー光学系を構成するレンズがある場合は、そのレンズを疑似等価な（上下左右が逆になることを除けば、全く等価な）他のレンズ系に置換する。
- (5) 上記(2)または(3)の場合において、揺動平面鏡を2軸回りに揺動させる必要があるのに、1軸揺動機構の平面鏡しか入手できない場合、リレー光学系の内部で再度集光する位置に軸の方向をずらして2番目の揺動平面鏡を置くことで、2軸回りの移動、回転が得られる。再度集光する位置が存在しない場合、リレー光学系を構成するレンズを他の疑似等価なレンズ系に置換して光路をのばす。
- (6) 揺動角を大きくとらなければならない場合、レンズの代わりに凹面鏡を光軸をはずして使う。
- (7) 凹面鏡の光軸をはずす角度は、部品が干渉しないような最小限の角度に抑え、軸をはずすことによる生じる非点収差は、2つの凹面鏡を入射面を互いに直角にして用いることによって低減させる。

また、このときの見かけの焦点距離は曲率半径の1/2としてよい。

以上の設計手順が今回の新規設計によって新たに確立された。一度、設計手順が確立されれば、以降の類似設計は予め必要な設計支援機能がわかるのでさらに効率化を進めることができる。そこで、今回の新規設計で新たに発見した光軸移動機能を組み込んだ新しい光軸制御型リレー光学系を、類似設計として再設計した。この説明は後の6.6節で改めて行うことにする。

## 6.5 光軸制御型オプトメータの機能構成

### 6.5.1 光軸制御型オプトメータの全体構成

光軸制御型リレー光学系と光軸固定型オプトメータを組み合わせると、光軸制御型オプトメータが構成できる。この全体構成は図6.17に示すとおりである<sup>6-10), 6-11)</sup>。構成要素としては、以下のものがあり、全体的な機能を簡単にまとめておく。まず、本設計に先だって開発した光軸固定型オプトメータ（オートリフラクトメータの改造部）がある。このオプトメータに本設計で開発した光軸制御型リレー光学系が光学的に接続されている。また、オプトメータは眼球像をモニターしており、このモニター画像信号を取り込んで角膜反射像の位置を出力するXYトラッカー（浜松ホトニクス社製、CI055）がオプトメータに接続されている。さらに、XYトラッカーの出力を取り込んで、光軸制御用の揺動平面鏡を制御するためのドライバがある。

一方、マイクロコンピュータは、揺動平面鏡の回転角をモニターすることにより眼球の回転角を、また眼底から反射された測定光からオプトメータ部によって算出される焦点調節機能を、そしてオプトメータ内のモニター画像から瞳孔計によって算出される瞳孔面積を取り込んでいる。

したがって、本システム（光軸制御型オプトメータ）全体で2自由度の眼球運動量、焦点調節機能、瞳孔径を同時に測定することができる。

### 6.5.2 零位法による眼球運動の検出方法

光軸制御型オプトメータの焦点調節機能測定部である視軸固定型のオプトメータは、装置の光軸を眼の視軸に合わせるための赤外光のアライメント光を、測定光軸上に照射している。この光が角膜表面上で反射して、第一Parkinje像と呼ばれている見かけ上の点光源

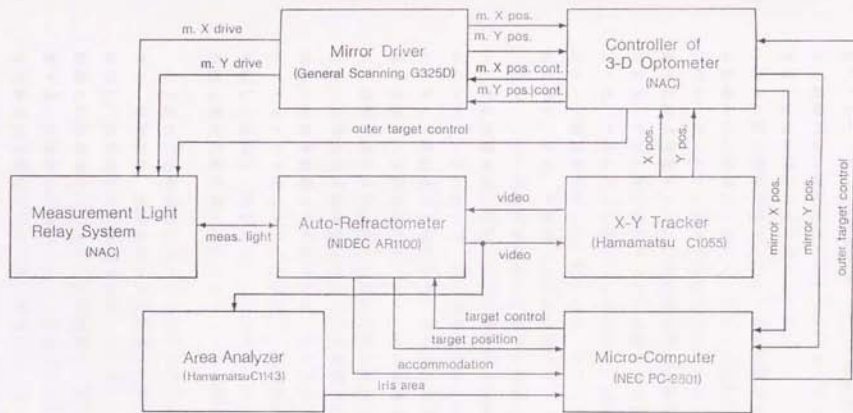


図 6.17

## 光軸制御型オプトメータの機器構成

市販のリフラクトメータ (AR1100) を改造したオプトメータが中央部にあり、その左に設計したリレー光学系がある。オプトメータの右は、眼球モニター画像から角膜反射光の位置を検出するトラッカで、画面中央からの反射光のずれを検出し、そのずれが無くなるように上方の制御部で振動鏡を制御する。

をつくる<sup>6-12)</sup>。この点光源が、正しく測定光と同軸上のテレビモニター画面の中心部に位置するように、オプトメータの位置を微調整することで光軸合わせを行っている。

次に、眼が回転運動するとき、回転運動の回転中心と角膜中央部の曲率中心の位置が一致していない(約5mmずれている)ため、一定方向のアライメント光が角膜に照射していても、反射像である点光源の位置は移動する。この移動量を眼の回転量の検出に使うことができる。すなわち、常にモニター画面の中央部に点光源が位置するように、アライメント光(そして同時に、測定光も)の照射方向を閉ループ制御すればよい。図6.18に、閉ループ制御のための機器構成を示す。まず、計測部(光軸固定型オプトメータ)のアライメント光が、リレー光学系を経由して眼球に照射される。このアライメント光は角膜表面で反射し、反射像は同じ経路でオプトメータ内部のテレビカメラにはいり、この画像は次に、XYトラッカーに入力され、そこで反射像は2値化され、その重心座標が出力される。この重心位置は、光軸制御型オプトメータの制御装置に入力される。次に、制御装置から出力された重心位置の原点からのずれ量に応じて、リレー光学系の光軸角度を変化させる揺動平面鏡のドライバーを駆動し、揺動平面鏡をずれ量が少なくなる方向に揺動させる。こうしてアライメント光(そして測定光も)の光軸を回転させて、眼球が回転した方向と一致させる。このようにして、眼球運動に追従して視軸と測定光軸が常に一致するリレー光学系を構成する。

以上述べた光軸制御の方法から明らかなように、この光軸制御型リレー光学系は、照射光の角膜反射像の移動から眼球の回転運動を検出し、光学的にその運動を補償している。しかし、角膜反射像は、眼球の回転運動だけでなく、顔面が動いて眼球が平行移動しても移動する。眼球が平行移動しても、制御系は回転運動をしたとみなして光軸方向を変化させるため、誤差が生じる。これを回転角検出誤差と呼ぶことにする。次にこの回転角検出誤差の検討を行う<sup>6-13)</sup>。



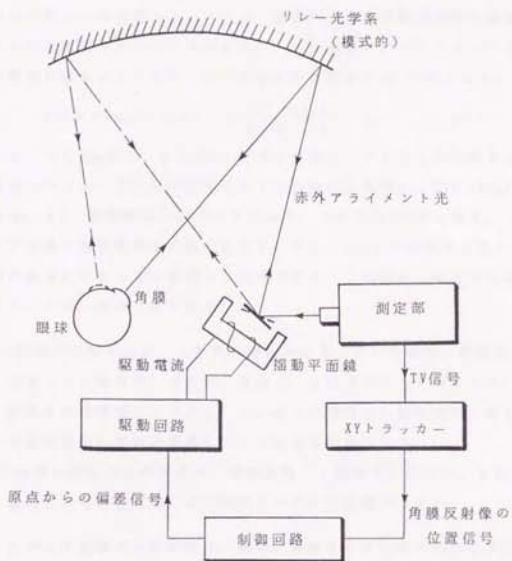


図 6.18 揺動平面鏡の閉ループ制御機構

図5.17のブロック図を概念的に示したものです。測定部からは、測定光の他に光軸合わせのための赤外線ビームが出ており、この角膜反射光の位置をモニターしており、常に原点位置にくるように揺動鏡を制御することにより、常に眼球正面から測定光を照射することができ、かつ、眼球運動が測定できる

図6.19(a)に示すように、視線方向をy軸、それと直角方向をx軸とし、リレー光学系の光軸回転中心を原点とする座標系をとる。眼球の回転中心の位置ベクトルをp、回転中心から角膜中央部の曲率中心の位置までのベクトルをqとし、回転角をθ、アライメント光の照射角度をφとすると、回転角検出誤差角φは(6.5)式となる。

$$\cos \phi = \cos(\phi - \theta) = \frac{(p+q) \cdot q}{|p+q| |q|} \dots \dots (6.5)$$

|q| = 5.8mmとし、θ = 0のときのφの値をベクトルpの位置を2次元のパラメータとして3次元ステレオ表示したのが、図6.19(b)である。x, y座標軸長はいずれも10mmで、z軸長は100度である。これは実際の変位範囲を大幅に越えているが、cosφの傾向を把握するのが容易になるように配慮したためである。この図から明らかになったことは、次の2点である。

- (1) 眼球の回転中心が、光学系の回転中心からずれる場合、視線方向前方(+y軸方向)の方が、後方(-y軸方向)にずれるより、回転角検出誤差φが小さく、しかもその傾向は、視線方向に対して直角方向のずれが重畳しているときに顕著になる。
- (2) 眼球の回転中心のずれは、視線方向(y軸方向)の方が、それと直角方向(x軸方向)より誤差φに与える影響が小さい。

したがって実際の実験時では、眼球の回転中心を光軸回転中心より、わずかに前方(視線方向奥より)に設定すべきであるという、実験の設定時に有益な指針が得られた。

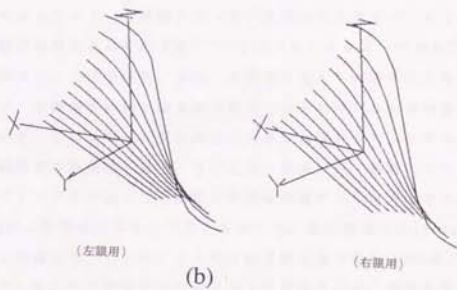
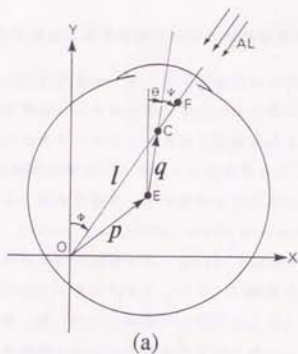
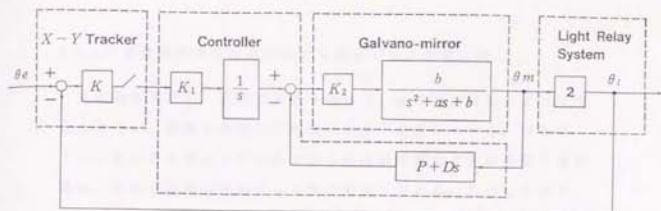


図 6.19 眼球平行移動時の角度検出誤差

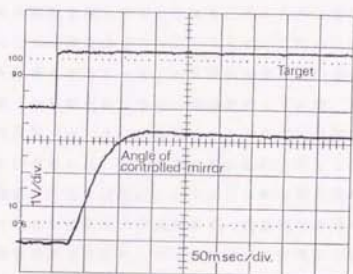
- (a) 図6.18の方式による眼球運動検出方法では、眼球が原点から  $p$  だけ平行にずれた場合、角度誤差  $\phi$  が生じる。
- (b)  $x$  軸方向が視線方向から直角方向に、眼球が平行移動したとき ( $x$  軸長で10mm)、 $y$  軸方向は視線方向に平行移動したとき ( $y$  軸長で10mm) で、+方向がリレー系に近づく方向、このとき  $z$  軸が誤差角度 ( $z$  軸長で100度)

### 6.5.3 積分型最適追従制御理論を用いた揺動鏡制御法

揺動平面鏡の回転制御は、モニター画像内の角膜反射像の位置をXYトラッカで測定し、その位置が常に原点位置に来るように制御する方式で、いわゆるレギュレータ系を構成することによって行う。図6.20(a)は光軸制御型オプトメータの制御系のブロックダイアグラムを示している。揺動平面鏡とその駆動系自体の伝達関数 $G(s)$ は、2次遅れ系で、 $G(s)=b/(s^2+as+b)$ ;  $a=849, b=36 \times 10^4$ であると推定された。すなわち共振周波数 $\omega$ は、 $\omega=600$  rad/sのかなり早い応答速度を持っている。一方、XYトラッカは1/60秒毎にモニター画像に映る角膜反射像(第一Purkinje像)の位置を計測しているので、揺動平面鏡の応答速度と比べるときわめて遅いサンプリング速度となっている。このような、速度の異なる要素を組み合わせたシステムは、わずかなパラメータ変動によって不安定になりやすい。そこで、積分制御型最適追従系設計理論<sup>(6-14)</sup>を用いることによって満足できる結果を得た。この理論は、本来、連続系に対して開発されたものであるが、制御偏差に対し直接積分器がつけられているのが特徴となっている。このために、安定余裕の大きい制御系となっており、多少制御対象の推定値が異なっても、あるいは、連続系でなくサンプリング系であっても安定な制御を実現することができる。図6.20(b)に制御系のステップ応答を示した。整定時間は約110msである。この速さは、サッケードと呼ばれる眼の速い動き(500度/秒程度まで)を正確に測定するためには十分ではないが、連続文字の読み取りなど通常の眼球運動には十分追従できるものである。



(a) ブロック図



(b) ステップ応答波形

図 6.20 揺動鏡制御系

- (a) XYトラッカは1/60秒毎にモニター画像から位置をサンプリングしている。揺動鏡(ガルバノミラ)の共振周波数は600rad/sとなっている。コントローラに積分器 $1/s$ があることで、安定余裕が大きな系となっている
- (b) 波形の立ち上がりから整定時間は約110msとなる

#### 6.5.4 多変数多項式行列を用いた測定データの校正法

光軸制御型リレー光学系の光学特性は、設計評価関数のグラフで見たように、揺動平面鏡の回転角に大きく依存している。つまり、リレー光学系を経由して測定される焦点調節機能や眼球運動の測定値は、揺動平面鏡の回転による誤差を含んでいる。しかしながら、この誤差は光学系の構成上現われる誤差であり、予測が可能な系統誤差である。すなわち、2つの揺動平面鏡の角度が同じであれば、誤差は常に一定のものである。したがって、揺動平面鏡の角度によってきまる関数で補正が可能である。ところが、揺動平面鏡の角度も誤差を含んだ測定値でしか得られない。これらの測定値はたがいに影響を及ぼしあうクロストーク誤差を含んでいる。そこで、焦点調節機能の測定値変数1つと、眼球運動上下方向、左右方向あわせて2つの変数、合計3つの変数の3次の多項式で校正することを考える。そのためには、予め既知の焦点調節状態となっている模型眼を、被験眼の位置に設置し、上下左右2軸方向に既知の角度だけ回転させたときの測定値を多数例求め、統計的な処理により校正のための係数を求めることにした。この詳細は付章8に示す。

## 6.6 頭上搭載型オプトメータの設計・開発

### 6.6.1 設計目的

光軸制御型オプトメータの特徴は、眼球正面からのモニター画像を利用して眼球運動を計測し、眼球運動による視軸の回転を補償するようにリレー光学系の光軸を制御しながら焦点調節機能を測定することである。それと同時に、モニター画像を利用して瞳孔径も測定可能としたことである。したがって、ディスプレイ端末を見ながら作業を行っている状態で、眼球屈折力の変化・眼球運動・瞳孔径の変化等、眼球疲労の手がかりとなる基礎データを同時に測定することができるというこれまでのオプトメータにない利点がある。

しかしながら、眼球運動は許されているが、頭部の移動は原理上測定誤差となるため制限されている<sup>6-13)</sup>。従って、被験者は透けて見える本装置のあご台に、計測中顔面を固定していなければならない。これではまだ一般の作業状態のように、自由に横を向いたり、首をかしげたりすることができなくて、被験者の負担が大きい。そこで、頭部をある程度自由に動かせるようにするために、光学系を頭上に載せる方式の頭上搭載型オプトメータを開発した。これは、最初の設計対象である光軸制御型オプトメータと比較して機能的にはほぼ同じであるが、頭上に載せるようにするため小型化した。しかし小型化してもなお重量がある(35kg程度)ため、上方から釣り下げる方式とした。

### 6.6.2 類似設計上の留意点と光軸移動機能の実装

詳細設計において、最初の光軸制御型オプトメータと比較して以下の点に留意した。ここで、混乱を避けて2つのオプトメータを区別するために、最初のをオプトメータⅠとし、頭上搭載型をオプトメータⅢと呼ぶことにする。(オプトメータⅡはオプトメータⅠの仕様改訂版である。)



- (1) 光学系の特性は、寸法をすべて比例して変化させても変わらないから、オプテメータⅢの設計に際しては、オプテメータⅠの各設計寸法を比例的に縮小し、頭上搭載化と凹面鏡の製作上の都合から凹面鏡の曲率半径を178.66と決め、従ってレンズの焦点距離はこの1/4である44.665とした。
- (2) 凹面鏡への入射角は、部品との干渉と取差との兼ね合いから、前回と同じ角度とし、約8.65度にした。
- (3) 眼球の回転角を、水平方向で左右20度ずつ（計40度）とこれと直角方向で上方5度、下方25度（計30度）まで許容するために、2つの揺動平面鏡で光軸を回転（揺動）させることにした。焦点調節機能測定部から出た赤外光の測定光が、眼球中心位置を回転中心として縦30度、横40度の範囲で振るようになり、眼球中心から47mm前方にダイクロイックミラーを斜めに挿入した。ダイクロイックミラーにより赤外光は反射し可視光線は通過するので、この範囲の作業視野を確保し、視線方向と測定光の照射方向を一致させることができた。
- (4) 基本リレー系の推論過程で発見された光軸位置を変化させる揺動平面鏡を導入し、さらに光路がなるべく鉛直方向や水平方向になって製作、組み立て、検査などが容易になるように平面鏡を数箇所挿入した。

最終的に設計された光学系を図6.21に示す。新たに、前回の設計時に発見した光軸移動機能を実装した。これにより、眼球位置がリレー光学系の光軸よりずれても、光軸移動用の平面鏡を回転させることにより容易に補償できることになった。

#### 6.6.3 詳細設計時の光路調整

推論設計で得られた揺動鏡の位置をもとに光学特性を評価関数で評価した結果、最適な値でなかったの以下のように光路調整した。

図6.21において、光はレンズ11方向から入って2つのレンズを通

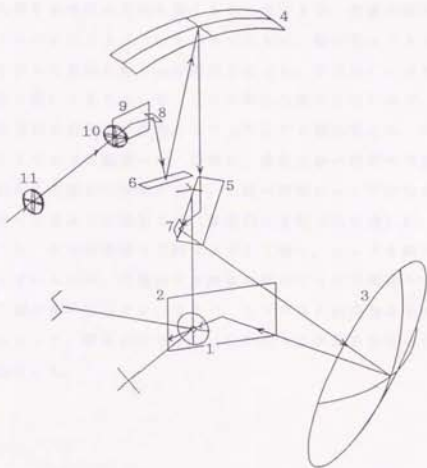


図 6.21 類似設計による頭載型オプトメータの光学系

揺動平面鏡 6 を押入することにより、眼球 1 を通過する  
光軸を平行移動させることが確認できた

過し、反射鏡で反射して、最終的に眼球中心に見立てた円盤1の穴を通過して行く。このとき平面鏡7,8を回転させることにより円盤1の穴へ入射する光線の方向を変えることができる。光線の振れ中心が円盤1の中心になるようにすべきであるが、提示例による寸法で平面鏡を挿入した場合約4mmの誤差が生じた。平面鏡7,8は光路上どの位置に置いてもしレー系としての特性は変化しないので、この2つの平面鏡を光路上で移動させて上下左右の振れ中心が、円盤の中央部にくるように調整した。同様に、最終光線の位置を可変にする平面鏡6も光路上で移動させて、光線の移動による平行性を最も良く実現できるように調整した。最終的な光路寸法を表6.2に示す。また、本リレー系は凹面鏡の光軸をはずして使い、レンズも斜めに傾けて使っているため、光軸回りの角度に依存する凹面鏡部とレンズ部との二重の歪が存在する。そこで、レンズ系と凹面鏡系との間の光軸をねじって、最も歪の少ない(前に述べた誤差の少ない)相対角度に設定した。

表 6.2 調整後の部品間光路長

(部品番号は図6.21による、単位mm)

入射基準面	40.661
レンズ11表面 (レンズ厚さ)	3.035
レンズ11裏面	130.977
レンズ10表面 (レンズ厚さ)	3.035
レンズ10裏面	23.113
平面鏡9	19.800
揺動平面鏡8	44.865
平面鏡6	133.995
球面鏡4	138.660
平面鏡5	35.920
揺動平面鏡7	182.740
球面鏡3	131.660
ダイクロイック・ミラー2	47.000
眼球回転中心1	

## 6.7 第6章のまとめ

第6章では、まずはじめに第5章で構築した新規設計用CADシステム「GAUSS」を用いて、第2章で明らかになった仕様のリレー光学系を概念的に求めた。ここで、第3章で考察したアイデアの展開手法に沿って、光軸制御型リレー光学系の基本設計を得ることができた。さらに、推論プログラムによる提示例を光線追跡で検証する段階で、リレー光学系内部で光軸を回転させることにより、リレー光学系終端部で光軸を移動させる機能が存在することを発見した。これは、新規設計用に開発したCADシステムが、新規アイデアの創造を支援できることを実証した例である。

その後の詳細化の段階で顕現した問題点の第一にあげられたことは、口径比（有効径と焦点距離の比）がレンズでは小さくて実用に耐えないということであった。このレンズの欠点を解決するために、レンズから球面鏡に置き換え、さらに、このことによって生じる非点収差の問題を、球面鏡の立体配置によって打ち消して解消できた。この点に関しても、新規開発したCADシステムが、立体的な空間配置を容易に表現でき、また、その効果を容易に視覚的に確認できるシステム構成になっていることに依るところが大きい。

このように設計段階で立体配置まで詳細に検討した後に、光軸制御型リレー光学系を製作した。そして、これと従来光軸固定型オプトメータを組み込んで、光軸制御型オプトメータを開発した。光軸の制御には、現代制御理論をさらに改良した手法を用いて、安定した制御を可能とした。

また、新規設計で得られた設計手順の有効性を確認するため、および、新規設計の過程で発見した光軸制御機能を実証するために、頭上搭載型オプトメータも開発して確認した。

## 第7章 光軸制御型オプトメータ の評価実験

## 7.1 はじめに

前章までに設計・製作した光軸制御型オプトメータ、および、頭上搭載型オプトメータに関して、実際に各機能を確認する評価実験を本章で説明する。光軸制御型オプトメータと頭上搭載型オプトメータの相違点は、後者が光軸移動機構を含んでおり、同時に、小型化して頭上にヘルメットのようにかぶる方式にしていることである。まず7.2節で、製作した光軸制御型オプトメータの基本特性データをまとめる。そして、7.3節において評価のための基礎実験として、従来のオプトメータでは測定ができない焦点調節機能と眼球運動の同時測定実験を行った経過を報告する。これにより、VDTを使用した状態での測定が可能となり、VDT実験も行った。また、頭上搭載型オプトメータの特徴として頭部の動きの同時測定も行った。そして7.4節において、焦点調節と眼球運動の同時測定の効果を示す応用実験として、透視的な構図のある静止画と、ランダムドットだけの奥行き情報がない画面であるが、動きによって見かけ上の奥行き感を出す動画を被験者に見せたときの反応を測定した結果を示す。最後に7.5節で実験結果の考察をまとめる。



## 7.2 装置の基本特性

### 7.2.1 光軸制御型オプトメータの基本特性

第6章の光学設計結果に基づいて製作したリレー光学系の外観を図7.1に示す。これを光軸固定型オプトメータの測定部に光学的に接続した状態が図7.2である。同じ状態をモニター画面方向から見た状態を図7.3に示している。

本オプトメータのリレー光学系は、前章までに詳しく述べたように、2つの球面鏡と2つのレンズを、いずれも光軸をはずして使用しているため、リレー（中継）された画像はかなりの歪を伴っている。そのために、歪んだ画像からの計測値で揺動平面鏡を制御して測定することによって得られる眼球回転角は、そのままでは、測定値間の干渉（クロストーク）を伴う誤差を含んでいる。図7.4に測定された眼球回転角の例を示す。同図は、3つの模型眼（○： $-0.06D$ ，△： $-4.89D$ ，□： $-9.09D$ ；D:Diopter、ジオプタ；焦点距離の逆数で定義される。すなわち、 $1m=1D$ ， $50cm=-2D$ となる）を、左右30度、上下20度の範囲で、5度ずつ回転したときの揺動平面鏡の回転角をプロットしてある。測定に際しては、回転面が水平面内にある小型の回転ステージの上に、回転面が垂直面内にあるステージにおいてその上に模型眼を固定し、ステージ上の目盛りを読みながら手動で回転させた。理想的には同図の格子点上に測定データが重なるべきであるが、このように測定値は歪んでいる。しかしながら、3つの模型眼による測定結果のばらつきは少なく、データの歪は系統誤差によるものであることを示している。そこで、前章で述べた多変数多項式型データ校正法<sup>7-11</sup>を用いて校正した。その結果を図7.5に示す。校正に用いた模型眼の3軸回転ステージの設定精度は、高々±0.1°程度だったので、十分な校正が行われたものと考えられる。光軸制御型オプトメータの最終的な特性を表7.1に示す<sup>7-21</sup>。ただし、上述の精度は、眼の回転中心点がリレー光学系の光軸回転中心に正確に

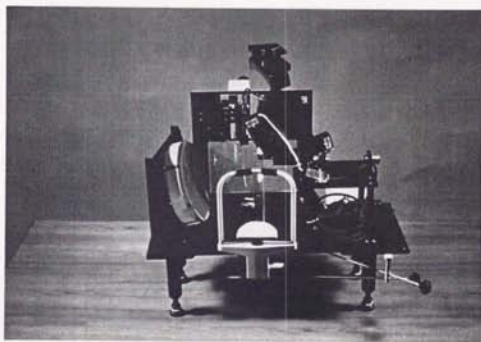


図 7.1 製作されたリレー光学系

左側に見える球面鏡の直径は240mmである。右下に見える  
つまみは、あご台を左右前後に手動で動かすため

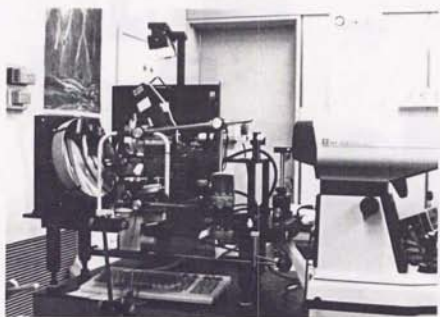


図 7.2 リレー光学系と測定部との光学的結合状態

右側に焦点調節機能を測定する測定部（オプトメータ）がある。リレー光学系の背後にディスプレイ画面があり透けて見える。下には操作可能なキーボードがある



図 7.3 三次元オプトメータの測定部・制御部

中央やや左に眼球正面からのモニター画面がある。このビデオ信号から角膜反射光の位置を計測し、揺動鏡を制御している

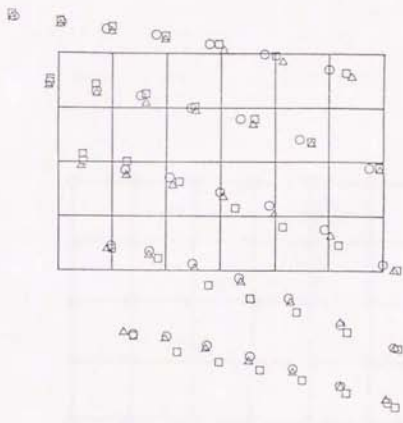


図 7.4 グロストークを含む校正前の回転角検出例

格子は揺動鏡を5度間隔で振らせたときの理想的な検出位置を示す。模型眼を回転ステージに載せて校正した角度は経緯度方式で指定

○: -0.06D, △: -4.89D, □: -9.09D 格子間隔は5度

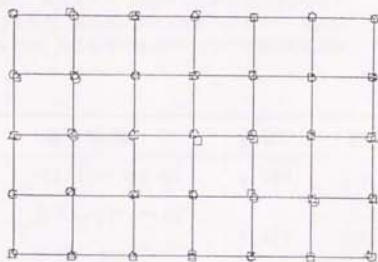


図 7.5 校正後の回転角検出特性

校正により、ほぼ格子上にデータがのることを示す

表7.1 光軸制御型オプトメータ（オプトメータI）の特性

焦点調節機能と眼球運動、さらには、瞳孔径まで同時測定可能な光軸制御型オプトメータの最初に開発した装置（オプトメータI）の特性である。

焦点調節機能は、オートリフラクトメータを改造し、眼球運動は、眼球モニター画像から角膜反射光を検出して、測定する方式、瞳孔径は眼球正面からのモニター像が得られるので、この画像を瞳孔計に入力して得られたもの

測定機能	測定範囲	速度	精度
焦点調節	-12.7D~+26.6D	4.7Hz	±0.25D
眼球運動	上下 -25° ~+5°	6.4Hz	±0.5°
	左右 ±20°		
瞳孔径	0~100%	6.4Hz	±2%



おかれたときのみ保証されるが、この点からずれた場合は、前章  
6.5.2項で解析したような誤差が生じることが実験的にも確認できた。

### 7.2.2 頭上搭載型オプトメータの特性

図7.6に頭上搭載型オプトメータの外観を示した(最初に開発した  
光軸制御型オプトメータをオプトメータIとし、頭上搭載型をオプ  
トメータIIIと呼ぶ)。光学系を頭上に載せる構造のため、重量が約  
35kgとなり、6自由度の天秤機構で自由に動かせる状態で釣り下  
げている。これを頭にかぶせて回転させようとするときの初期トル  
クは測定の結果、鉛直軸回りに $0.13\text{Kg}\cdot\text{m}$ 、左右軸回りに $0.085\text{Kg}\cdot\text{m}$ 、  
前後軸回りに $0.122\text{Kg}\cdot\text{m}$ ほどあり、回転中でのトルクはこれらの  
約8割となった。したがって、見た感じよりも被験者に与える負担  
は少なく、被験者自身も、頭の動き始めは多少抵抗感を感じるが、  
かなり自由に動けると報告している。装着した感じでは、拘束感  
は頭の動きよりも、むしろ、頭と装置を固定するベルトの拘束感の  
方が大きいことがわかった。

オプトメータIIIの光学系は、オプトメータIのそれとはほぼ同じ構  
成であるが、大きさが3分の2になっている。オプトメータIと同  
様なデータの校正式で校正した前後の模型眼による眼球運動の測定  
結果を図7.7(a),(b)に示す。図中、3種類の模型眼(○:  $-0.31\text{D}$ 、  
△:  $-5.14\text{D}$ 、□:  $-9.44\text{D}$ )を用いて、左右 $\pm 15$ 度、上下 $\pm 10$   
度の範囲で5度ずつ回転させたときの校正後の検出角度をプロット  
している。理想値は全てのデータが格子点に一致することであるの  
で、かなりよく校正されていると言える。焦点調節機能の測定につ  
いても、模型眼を使って測定値の校正を行った。校正した前後のデ  
ータを図7.8(a),(b)に示す。格子間隔を5D(ディオプター)とし  
て、上下方向に誤差をプロットしている。この測定も前出の模型眼  
を使って、回転ステージ上で回転させたときの測定誤差である。回  
転角は格子間隔が5度である。焦点調節機能の測定に関しても、か

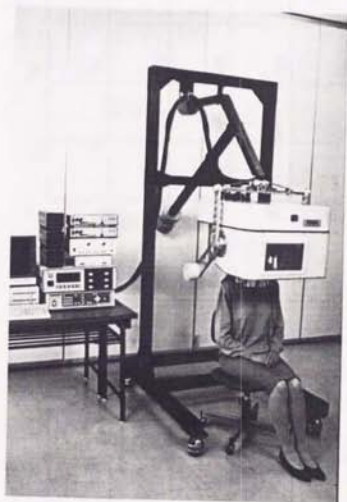
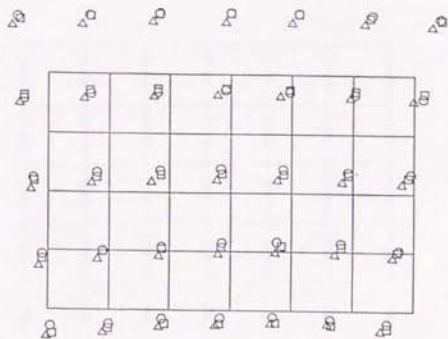


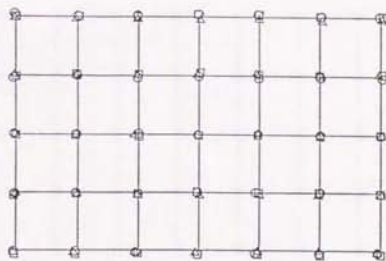
図 7.6 製作された頭載型オプトメータの外観

頭部の回転が可能となる。光軸平行移動機構を含む



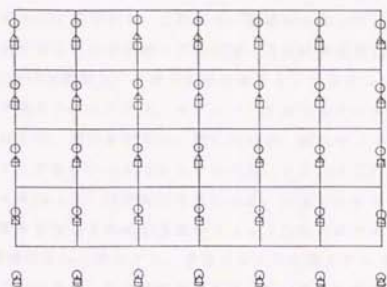
(a) 校正前

○:  $-0.31D$ ,  $\triangle$ :  $-5.14D$ ,  $\square$ :  $-9.44D$  格子間隔は5度



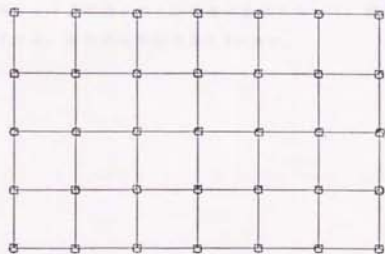
(b) 校正後

図7.7 眼球回転角測定値の校正



( a ) 校正前

○:  $-0.31D$ , △:  $-5.14D$ , □:  $-9.44D$  格子間隔は  $5D$  と  $5$  度

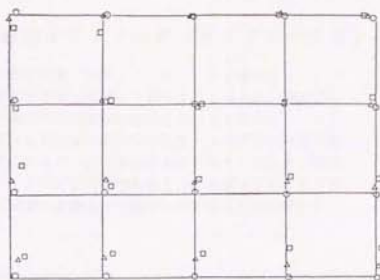


( b ) 校正後

図 7.8 焦点調節量測定値の校正

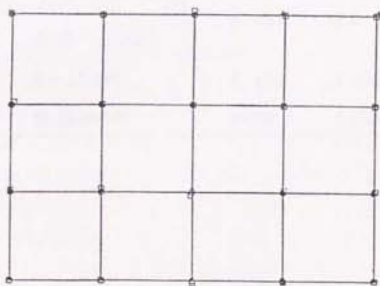
なりよく校正されているのがわかる。

またオプトメータⅢの特徴として、頭部を自由に動かしたときの動きを記録することができる。これには、磁界中においたコイルの起電力を検出する方式の非接触3次元位置・方向計測装置ISOTRAKを用いた。ISOTRAKは原理上、金属が近傍にあるとノイズとなってデータの信頼性が落ちる。ところが、オプトメータⅢでもケースのなかに金属を含むため、測定値が歪む。図7.9(a)は、磁気センサの位置を、オプトメータⅢのケース端からそれぞれ、20 cm (□)、30 cm (△)、40 cm (○)の距離の位置におき、2方向にオプトメータを平行移動させたときの検出位置をプロットしたものである。図7.9の格子間隔は5 cmに相当する。磁気センサの位置がケースから離れるほど格子点に近く、検出精度が良くなっていることがわかる。ケースから磁気センサを30 cm離れたときのデータを、同様な多項式で校正した結果を図7.9(b)に示す。しかし、頭部の回転中心位置の検出には、磁気センサから回転中心位置までの距離が影響を及ぼし、同じ磁気センサで検出される回転角の影響もあって、精度は10 mm程度である。総合的な特性を表7.2に示す。



(a) 校正前

20 cm (□)、30 cm (△)、40 cm (○) の距離間隔 (センサと本体ケース)  
格子間隔は 5 cm



(b) 校正後

図 7.9 頭部位置検出値の校正

表7.2 頭部搭載型オプトメータ（オプトメータⅢ）の特性

最初の測定装置（オプトメータⅠ）との違いとして、小型軽量化をはかって頭上に載せることにより、機能的に頭部を動かしても測定可能としたことである。頭を動かしたときの眼球中心位置も3次的に測定可能とした。さらに、この表には表わされていないが、眼球とオプトメータとの相対的取り付け位置がずれても、光学的に補償する機能（光軸平行移動機能）を内蔵する

測定機能	測定範囲	速度	精度
焦点調節	-12.7D～+26D	4.7Hz	±0.125D
眼球運動	上下 -25°～+5°	6.4Hz	±0.25°
	左右 ±20°		
瞳孔径	0～100%	6.4Hz	±2%
眼球位置	直径200球	20Hz	±10mm, ±1°



### 7.3 評価基礎実験

図7.10に光軸制御型オプトメータ（以降単にオプトメータIと呼ぶ）を用いた測定風景を示す。被験者はアゴ台に顔面を固定する必要がある。その後実験操作者が、アゴ台を前後左右上下に微調整して、左右いずれかの眼の回転中心を、オプトメータIの光軸回転中心に合致させる位置合わせ作業を行う。この位置合わせには、2自由度の光軸合わせと1自由度の距離合わせの合計3自由度があり、これらはオプトメータ光軸上においたCCDカメラと、眼を下方から直接モニタするCCDカメラの2つのモニタ画像を用いて三角測量的に行う。初めての被験者でも数分以内で位置合わせを行うことが可能であり、一度位置合わせが完了した後は、数十秒で測定は終了する。ここで行った2つの実験<sup>7-3), 7-4)</sup>の被験者は、男性の正視者(K.K. 19才、視力1.2、調節力8.1D)を被験者とした。

#### 7.3.1 焦点調節と眼球運動の同時測定実験

模型眼による校正実験の終了後、被験者を使った人眼で測定実験を行った<sup>7-5)</sup>。最初の実験では、被験者は眼前25cm(-4D、D:ディオプター)の視野の中心におかれた固視標をまず凝視し、次に眼前50cm(-2D)におかれたCRTの右上、次にその左下を見た後、眼前14cm(-7D)の左上に置かれた視標を見て、再度視野中心の固視標を見て終了した。この時の測定結果を図7.11に示した。同図の各点は10msec毎のデータで、円の半径は1mmが-1D(ディオプター)に相当している。この実験結果から、眼の動きは調節応答より速く、眼は物を捕らえてから焦点を合わせていることが明瞭に示されている。また、眼の動きは左右方向の方が、上下方向の動きよりも速いことが示されている。これらは、従来の方法では得られなかった実測データであり、焦点調節機能と眼球運動とが同時に測定できることを確認することができた。また、モニター画面の映像信号から瞳孔径も測定でき、今後様々な測定実験に利用できることを確認した。

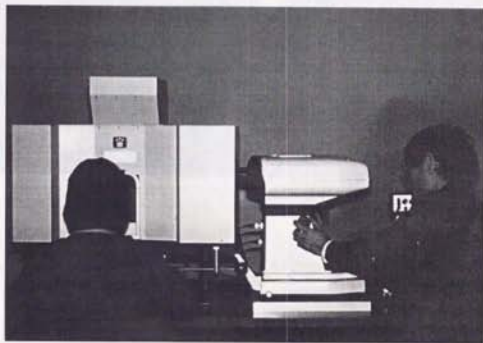


図 7.10 測定実験風景

左側が被験者で窓枠に顔を固定して、背後にあるVDT画面をみている。測定者は右側でモニターを見ながら測定している

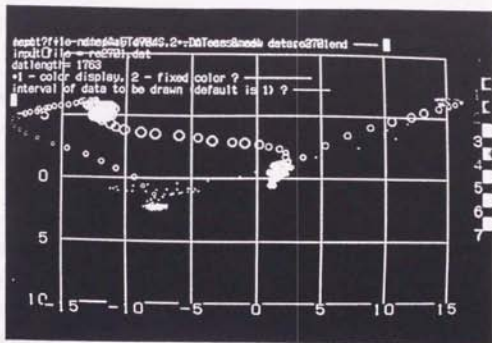


図 7.1 1 光軸制御型オプトメータによる測定表示例

画面の縦方向、横方向は、それぞれ眼球運動の縦方向、横方向の回転角（経緯度方式）を示すグラフで、プロットされた小円の列は、10msec毎に測定された眼球運動の変化を示す。さらに、小円の大きさで焦点調節量を表わし、直径の大きい円ほど近くに焦点を合わせていることを示す。被験者は、最初画面中央部の固視標、眼前50cmにおかれたCRTの右上角、同じく左下角、眼前約14cmに置かれた視標、最後に中央部の固視標の順に視線を移した。このグラフから眼球運動は調節応答よりも速く、物を捕らえてから焦点を合わせており、また、眼球運動は、上下より、左右方向が速いことが明瞭に観察される。

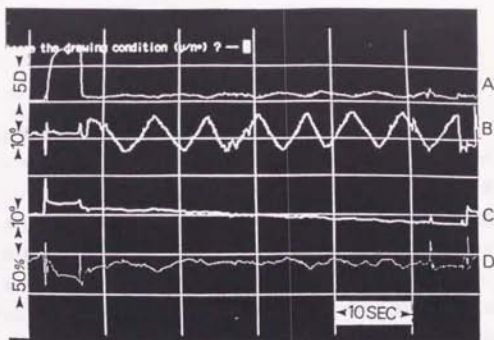
### 7.3.2 VDT作業中の焦点調節測定実験

人眼による焦点調節機能と眼球運動の同時測定が可能であることが確認できたので、次のステップとして、実際のVDT作業中の眼の状態変化を測定する実験を行った<sup>7-6)</sup>。オプトメータIの背後にVDT画面を置き、オプトメータIの足の間にキーボードをおいて、ブラインドタッチによるキーボード入力が可能となる状態で、VDT作業実験を行った。

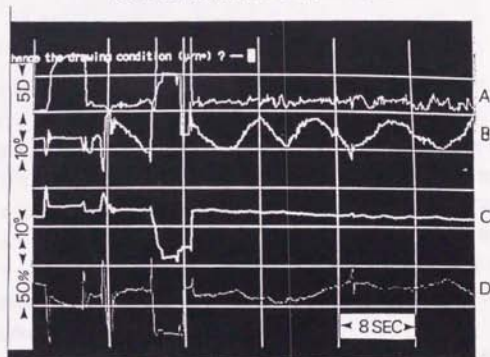
図7.12(a),(b)に被験者より50cm(-2D)のところにおかれたCRT画面に表示された2桁の乱数(19個×14行)の中から、指定された乱数の数を数える作業を1時間行った前後の測定波形を示した。両図とも上から順に調節、眼の左右の偏角(上が左、下が右に相当する)、上下の偏角、瞳孔面積を示している。測定前に被験者から14cm(-7D)に提示された視標を注視したのち、14行の乱数を探索している(左→右、右→左の探索をしている)。測定時間は約50秒である。図7.12(b)では2行目を読んでいる時、測定が不安定になって波形が大きく乱れているが、これは瞬きによって眼球運動の追跡が一時的に乱れたことに起因すると思われる。

調節応答においては、作業前に比べて、1時間後では、一定の距離を見ていたにもかかわらず、調節の変動が顕著に大きくなっていることが注目される。眼球運動もわずかであるが、動きが滑らかでなくなっている。また瞳孔面積の変化も作業前に比べ少し大きくなっている様子である。瞬目数は、3回から7回に増加している。こういった反応は視覚疲労の客観的な指標となりうるものと考えられる。

この実験において、長時間にわたってVDT作業を行うと、眼球の動きが乱れがちになることが明らかになった。さらにデータを積み重ね、焦点調節の変動と眼球運動のスムーズさとの相関、あるいは無意識のうちに行う瞬きを含めた相関性などを明らかにしていかなければならない。



(a) 文字列検索作業初期の測定



(b) 検索作業1時間後の測定

図7.1.2 VDT作業による文字列検索中の測定例

A:焦点調節、B:眼球運動(左右)、C:眼球運動(上下)、  
D:瞳孔径をそれぞれ表す。

画面に表示された文字列を上から下に、左右交互に探  
して行く作業中での測定で、波形の乱れは瞬きによる。  
(b)の方が、瞬きが多く、調節変動も多くなっていること  
がわかる

#### 7.4 応用評価実験

前節の実験により、製作した装置オプトメータⅠ、および、オプトメータⅢが設計目的をほぼ達成していることが確認できた。したがって、本節の応用測定実験では、光軸操作型オプトメータの特徴である焦点調節機能と眼球運動を同時に測定できる点を生かした測定実験を行うことにした。2人の女性正視者(0. R. 23才とB. S. 20才)を被験者とした。2人の裸眼視力は1.0以上であり、焦点調節力はそれぞれ、7.2、4.6ジオプター(D)であった。両者の応答傾向は良く似ていたので、実験の結果には調節力の大きな被験者0. R.の応答波形のみを提示する。

##### 7.4.1 静止画に対する視覚反応測定

透視的な構図を持つため奥行き感が感じられる静止画の例として、**図7.13**に示す絵画を対象物として実験を行った<sup>T-71, T-81</sup>。これは、大日本印刷製1985年カレンダーにある「ソドリア・ワイズ作『クリスティーナの世界1948』」である。同図中の固視点は、女性がいる手前の位置と、建物がある遠くの位置の2箇所である。実験時にこの2つの固視点を交互に見つめるように、口頭で被験者に指示が与えられた。絵は被験者から-4D(25cm)の位置におき、通常照明光の下で注視させた。被験者は同図の建物、女性位置は、それぞれ主観的には0D(無限遠)と-4D(25cm)の位置に感じられると報告した。

この時の結果を**図7.14**に示す。これは絵画を片眼で見た時の被験者0. R. (23才)の応答結果である。上から調節(Acc.)、眼の左右の動き(Hor.)、眼の上下の動き(Ver.)を表わす。縦軸の1目盛りは、それぞれ1D、5度、5度の変化を示している。眼の左右の動きについては、プラスが左、マイナスが右を意味している。眼の上下方向(Ver.)のステップ状の変化時に調節状態(Acc.)が変化していることが明瞭に示されており、Ver.が上のとき遠い点、下のとき近い点を注視している。調節応答には通常見られるような、遅れ(調節ラグ)がある。



図 7.13 測定時に示された遠近感のある絵画

心理学的に深い意味をもつ絵画、T・トリッー・ワは作  
「クリスティーナの世界」1948年である。  
被験者は、手前の女性位置と遠くの家を交互に見  
るように指示された。絵画は被験者の眼前25cm(-4D)に置  
かれた。



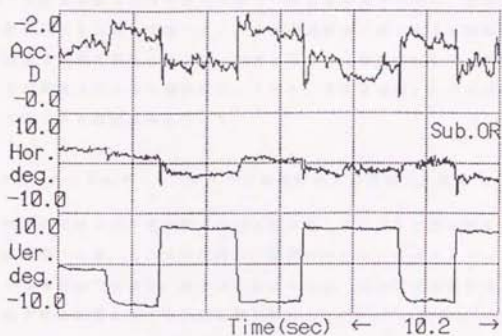


図 7.14 絵画による反応測定結果

横軸は時間、縦軸は上から、焦点調節距離(D)、水平方向  
 眼球運動回転角(度)、垂直方向眼球運動回転角(度)を  
 表わす。1目盛りがそれぞれ、5°.1Dである。  
 上方(家の位置)を見るととき、下方(女性の位置)を  
 見るときとで焦点調節距離が変化しているのがわかる

この実験の結果、絵画の透視的構図が持つ見かけ上の遠近感に対して、被験者が明瞭な調節反応を起こしていることが注目される。建物と女性を注視した時の定常状態での焦点調節量を平均し、その差を調節反応と定義して調べると、2名の被験者の両名ともに同程度の顕著な調節反応をしていた。両者の違いは、被験者O.R.では片眼の方が両眼より大きく調節反応しており、逆に被験者B.S.では両眼の方が大きく調節反応していた。

#### 7.4.2 ランダムドットパターンの動きに対する視覚反応測定

前項の実験では、構図的に奥行き感が感じられる静止画に対する反応を調べたが、ここでは反対に、構図の全くないランダムドットからなる画面であるが、動きをともなうため、見かけ上運動視差を生起させる動画に対する反応実験を行った<sup>7-21, 7-22</sup>。内容は、被験者から-4 D (25 cm)の位置に置かれたディスプレイ画面上に図7.15に示したようなランダムドットパターンを左右に振って提示した。このとき、図7.16右側に示したように、移動速度を上下方向に少しずつ変化させると、見かけ上の運動視差が生じる。速度変化を例えば正弦波状に変化させると、同図に示したような正弦波状の奥行きを持った面が知覚される。この奥行き感は運動視差のみによって生じ、構図、輻輳、見かけの大きさ、焦点のボケ等種々の他の手がかりによって得られる遠近感とは異質のものである。この実験で使用した刺激に対しては、被験者2人共に、主観的には、最遠面がCRT面より、片眼で15 cm、両眼で10 cm、画面より奥にあると感じ、最近面は画面上にあると報告した。

図7.17に両眼で見たときの被験者O.R.の応答を示した。波形を示す記号と目盛りの大きさは図7.14と同様で、上から調節(Acc.)、眼の左右の動き(Hor.)、眼の上下の動き(Ver.)を示している。縦軸の1目盛りは、1 D、5度、5度の変化をそれぞれ示している。眼の左右の動きについては、プラス(上側)が左、マイナス(下側)が

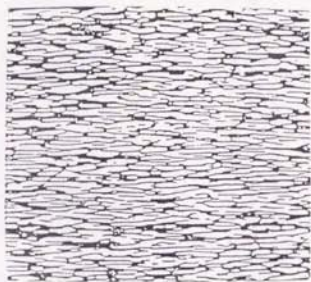


図 7.15 ランダムドットパターン

動きを表わすビデオ画像のある一瞬の画像 (NHK製作)

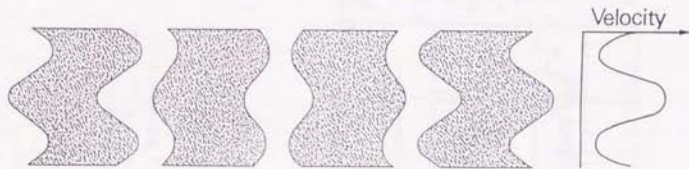


図7.1.6 動きのあるランダムドットパターンの視標

図7.15の画面の各ドットを縦方向に速度を変化させて横方向に振らせた様子を表わす。4つの画面で各時刻における各ドットの位置変化を模擬的に示す。

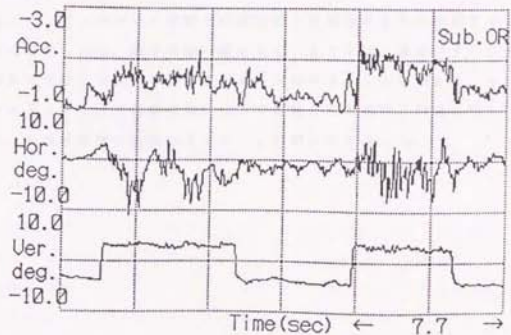


図7.17 動きのあるランダムドットパターンを見たときの測定結果

ドットの揺れが激しいところを見ている時間帯は、より調節していることがわかる。揺れは水平方向だから、垂直方向での眼球運動の揺れは現れていない

右を意味している。

この運動視差を生じる刺激に対しても、静止画のときと同様に2名の被験者は明瞭な調節反応を示した。被験者にはできるだけ眼を固定して、ディスプレイ画面上の最近面と最遠面を交互に注視するように指示したが、動きの速い面を見ているときは、眼はパターンの動きに同期して大きく動いているのがわかる。この結果から、ランダムドットによる運動視差によって知覚された奥行き刺激に対しても、人間は明確な調節応答することが明らかになった。

## 7.5 考察

光軸制御型オプトメータの精度を確保するためには、最初の位置合わせが重要である。すなわち、眼球の回転中心点とリレー光学系の光軸回転中心点を、いかに精度よく一致させるかが鍵となる。そのために、当初は光軸方向からのみ行っていたモニターカメラに加えて、顔面下方からも斜め上方をモニターできるカメラを設置し、三角測量の原理で角膜頂点の三次元的な位置を設定できるように改造した<sup>7-9)</sup>。この場合、角膜頂点から眼球回転中心までの距離がほぼ一定であるとみなしている。

前節の測定実験で示されたような、見かけの奥行き感で焦点調節を起こすという内容が明確な客観データとして測定された例は、これまで知られていなかった。この測定データは、眼の焦点調節が第一義的なボケや収差などの光学像的な手がかりのみによってではなく、提示内容を理解した上で行われたり、運動視差に見られるような見かけの距離感覚によって行われたことを示している。また、片眼と両眼とでは、知覚にずれが生じている。これらの結果は焦点調節の手がかりの多様性を意味し<sup>7-10), 7-11)</sup>、複雑なメカニズムで調節が制御されていることを表わしているといえる。

いずれにしても、従来自然視の状態で計測することが望まれていた<sup>7-12)</sup>にもかかわらず技術的な問題でできなかったが、本装置の開発でそれが容易に測定できるようになった。これまでは眼球運動のみを測定する装置はアイカメラと呼ばれるものがあり、一方調節のみを測定する装置は、オートリフラクトメータとして実用化されていた<sup>7-13)</sup>。しかしながら、眼の機能を正確にとらえるためには、互いに強い相関のある、これらの物理量を同時に測定しなければデータの意味が薄れるのであるが、これまでそれが実現されたとは言えなかった<sup>7-14), 7-15), 7-16)</sup>。したがって、ここに光軸制御型オプトメータを開発した意義は大きく、今後これを使って、ロボットビジョンの開発に役立てるほか、近視などの異常屈折の発生機構の解明



と治療法の開発に用いることができると考えられる<sup>7-17),7-18),7-19),7-20),7-21),7-22)</sup>。また、今後発展が予想される立体視ディスプレイの様々な方式の実用化において、発生すると予想される眼の疲労の問題<sup>7-23),7-24),7-25)</sup>を、人間の特性の面から実験し、その結果を立体視ディスプレイの設計にフィードバックできるようになった点で、きわめて意義深いと思われる。

## 7.6 第7章のまとめ

第7章では、第6章の結果得られた設計案をもとに開発された光軸制御型リレー光学系と、第2章で開発された固定光軸型オプトメータとを組み合わせて光軸制御型オプトメータを開発し、その評価実験を行った。校正実験は、人眼に光学的に等価に作られた模型眼を使用し、XYステージと割り出し盤を用い、得られた測定データを6.5.4項で説明した多変数多項式校正行列を用いて校正した。そして、人眼の焦点調節機能と眼球運動、そして、瞳孔面積の同時計測が実現できることを確認した。また、第6章で発見した光軸移動機能を搭載した頭上搭載型オプトメータについても、その機能を確認した。

応用評価実験として、平面図形を提示したときの被験者の焦点調節機能を測定する実験を行った。ただし、平面図形ではあるが、構図として立体的に見えるもの、一方、構図は無いが、動きとして立体的に見えるものをみえるもの、の2種類の平面図形を提示したが、いずれも焦点調節の変化が測定された。これによって、単に物理的な焦点位置合わせだけでないメカニズムが視覚システムに働いていることが判明した。これらはいずれも、焦点調節機能と眼球運動とを同時に測定することにより初めて明らかになる性質のものであり、本光軸制御型オプトメータによって初めて測定されたものである。以上の評価実験によって、新規設計のためのCADシステム開発から光軸制御型オプトメータの開発にいたるまでの一連の研究が有効であったことを確認できた。



## 8.1 本研究の内容と成果

本研究は、VDTなどによる視覚疲労の客観的な評価手法の開発という社会的な要請と、眼球から脳に至る視覚情報処理機構の解明という学術的な要請とから、自然視状態で目の3大機能（焦点調節機能、眼球運動、瞳孔面積）を同時計測する装置を開発することを目的とした。まず、視覚疲労に関しては、視覚疲労を客観的に測定するために、疲労によって焦点調節を司る毛様筋の反応が遅れるという仮説を設定した。この仮説のもとでは、筋肉反応の遅れが光学特性の遅れ、すなわち、焦点調節反応の反応速度の遅れを引き起こすことになる。したがって、調節反応の応答性を光学的に検出することにより疲労を測定することが可能となるため、これを検出するオプトメータを開発し、実験的に検証した。そして、仮説の正当性を確認するとともに、視覚疲労の一指標を導いた。そしてこの手法をさらに自然視の状態でも適用するためには、眼球運動中での測定が必要になった。しかし、原理的な制約のため、従来眼球運動中の焦点調節機能や瞳孔反応の測定は実現できなかった。そこで、さらに本研究でこの問題を解決すべく検討し、設計手法から新たに構築して、最終的に光軸制御型オプトメータを開発した。

まず、従来に類似製品がない新しい仕様での設計であるため、概念的に検討を重ねるためCADシステムの支援が必要になったが、新規設計に対応できるCADシステムがなかった。そこで、この要求を満たすCADシステム開発のための方法論をまず構築する必要があった。そこで、要求仕様から具体的な設計までの、すなわち、アイデアを練る段階から詳細設計までも支援できるようにCADシステムのあり方について考察した。その結果に基づいて開発したCADシステムを用いて、新アイデアの創造支援を実証した。一方、従来知られていない光学部品の等価的配置問題に関して、一般的にこれを解決する疑似等価光学系理論を構築した。この理論を、開発したCADシステムに導入して、光軸制御型リレー光学系を設計し、

これらを組み込んだ光軸制御型オプトメータを開発した。この光軸制御型オプトメータを使った評価実験の結果、要求仕様を満たすことが確認できたばかりでなく、人の眼の焦点調節は、物理的な位置だけでなく、心理的な手がかりによっても行われるという、従来推定の域をでなかった現象が実験データとして客観的に得られた。これら本研究の諸点について総括し、結論として以下に列挙する。

- (1) 焦点調節機能を連続的に測定することによって調節応答特性を測定できる光軸固定型オプトメータを開発した。
- (2) 視覚疲労の一指標として、調節応答特性から応答の遅れを客観的な数値で評価する手法を開発した。
- (3) 設計しながら開発を進める新規設計用のCADシステムの開発指針を提案した。
- (4) その結果に基づいて、光軸操作型CADシステム「GAUSS」を開発した。
- (5) 揺動鏡によって光軸を平行移動させる機能を発見し、CADシステムによるアイデア創造支援機能を実証した。
- (6) 一般光学系の設計などにみられる等価配置問題を、一般的に解決・評価するための疑似等価光学系理論を構築した。
- (7) 疑似等価光学系理論を導入した推論プログラムを開発し、それを利用して光軸制御型リレー光学系の基本設計案を得た。
- (8) 基本設計案を詳細化して光軸制御型リレー光学系を実用設計し、それらを組み込んだ光軸制御型オプトメータを開発した。
- (9) 光軸制御型オプトメータの新規設計の結果得られたノウハウを利用した類似設計として、頭載型オプトメータを開発した。
- (10) 開発したこれらのオプトメータを使った評価実験により、設計仕様を満たしていることを確認した。
- (11) さらに、焦点調節が単に物理的な注視点までの距離だけでなく、心理的な手がかりによっても行われることを、世界で初めて自然視の状態を実証した。

## 8.2 今後の課題と展望

### 8.2.1 無意識計測の可能性

一般的に、測定装置を開発するとき心がけなければならないことは、被測定者（物）に与える外乱や、測定のための付帯条件をできる限り少なくすることである。特に、被測定対象が意識ある人間であり、意識によって微妙に生理的に変化する眼球の特性を図るときに、外乱を避けるのはきわめて困難である。しかしながら、少しでも外乱の影響を少なくするためには、できるだけ生理的に自然な状態で測定することが必要となる。従来のオプトメータは、この点がまったく考慮されていなかった。本研究で開発した光軸制御型オプトメータでは、眼球運動を許容するという従来原理的に不可能だったことを実現させて、大幅に自然視に近い測定環境を実現した。

しかしながら、光軸制御型オプトメータにおいても、眼球運動は自由に行えるが顔面を装置の顎台に固定していなければならないという拘束条件が依然として存在する。この拘束を減少させるために開発した頭上搭載型オプトメータの場合でも、被験者は頭部を動かすことができるが、可動部の慣性が大きいためやはり負担を感じることになる。そこで今後の課題は、被測定者が測定のための余分な拘束感を生じないような装置の開発である。なぜならば、「測定のために拘束されている」という意識によって心理的に動揺が生じる場合があり、それに応じて生理状態が変化するからである。したがって、被測定者が測定を意識しないときでも測定可能となる装置が理想的な測定装置と考える。このような考え方を「無意識計測」と呼ぶことにする。その具体的な実現方向としては、装置の巨大化が考えられる。すなわち巨大化とは、リレー光学系部分を巨大化して実験室大に拡大することにより、自然な頭部の動きを光学的に補償可能な範囲内に入れてしまうことである。そうすれば、実験室にいるだけで、特に測定を意識しないでVDT作業をやっても測定

可能となる。これは、本研究において、頭を自由に動かしたときの眼の回転運動と、平行運動を共に補償できるリレー光学系が設計可能であることが発見できたから実現可能性が出てきた方法である。

### 8.1.2 携帯化、高機能化の可能性

巨大化とは全く逆の発想で、小型化させて装身具感覚で測定装置を身につけることが考えられる。これはフィールド実験で有用になる。現在市販されているアイカメラ程度に測定部を小型化して、信号をテレメータで送信すれば、身体は自由に動かすことができるようになると期待できる。この場合、リレー光学系をさらに大幅に小型化する必要がある、2軸駆動型揺動鏡や、構造が簡単な楕円鏡利用光学系の再検討が必要になると思われる。さらに、測定部も大幅に小型化するために、Scheinerの原理を利用した現在の方式よりも、検影法が有望と思われる。検影法は測定光の位相成分を保持する必要がないため、オプティカルファイバが利用でき、そうすれば、測定部を頭部に載せなくて済むため小型化が可能となる。

また、測定装置の機能面では両眼での同時計測という問題も今後検討を進めていかなければならない。それは、視覚機構の解明には、焦点調節や瞳孔径と密接に関連して、輻輳が重要な鍵となるからである。そして、高速応答性である。現在のシステムでは、サッケードと呼ばれる速い眼球運動に対応できないが、画像処理方式を変更することに依って、眼球運動の高速検出が可能になるはずである。

そして、各種環境条件での基礎データの蓄積によって、眼の調節機構が解明されれば、近視などの予防や治療方法を見つけることができ、さらに機器インターフェイスとして、人の特性に合致した、疲れにくい立体視覚表示装置を設計することができるものと期待できる。

いずれの方向にしても、実現のためには検討すべき技術的な課題が残されており、今後さらに検討を進めて行く必要がある。





### A 1 楕円鏡の倍率

一般に光学系において、横倍率（光軸に対し、直角方向の線分に対応する光学像の倍率）と角倍率（物体上の一点から出た光線が対応する光学像上の一点に届くときに、物体側と像側のそれぞれの光線と光軸とのなす角度の比）は反比例する（付章 A 3 の A3.27、A3.40、A3.42式を参照）。したがって、横倍率の変化を調べるかわりに、角倍率の変化を調べることにする。まず、一つの焦点から出た光が楕円面上に当たって反射したとき、他の焦点を通る方向に反射することを証明する。

いま、楕円鏡の 2 次元断面形状で考察する。図 A1 に示すような座標系をとる。楕円鏡の方程式を

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 \quad \dots \dots \dots (A1.1)$$

2 つの焦点位置を  $F(ae, 0)$ 、 $F'(-ae, 0)$  とし、楕円面上の点を  $P(x, y)$  とする。ただし、

$$a^2 e^2 = a^2 - b^2 \quad \dots \dots \dots (A1.2)$$

まず、一焦点  $F$  から  $P$  に当たるように出た光線が  $P$  位置で反射したあと、もう一つの焦点  $F'$  に届くことを示す。

$F$  から  $P$  に向かう光線の方向ベクトルを  $u_1$ 、 $P$  における外向き法線ベクトルを  $n$ 、法線ベクトルが  $x$  軸と交わる点を  $N$  とし、 $F'$  から  $P$  に向かった方向ベクトルを  $u_2$  とする。

このとき  $\theta_1 = \angle FPN$ 、 $\theta_2 = \angle F'PN$  とすれば、一焦点から出た光線が楕円面上で反射した後他の焦点を通ることを証明するには、 $\theta_1 = \theta_2$  を証明すればよい。

$$n = \left( \frac{x}{a^2}, \frac{y}{b^2} \right) \quad \dots \dots \dots (A1.3)$$

$$u_1 = (x - ae, y) \quad \dots \dots \dots (A1.4)$$

$$u_2 = (x + ae, y) \quad \dots \dots \dots (A1.5)$$

であるから、

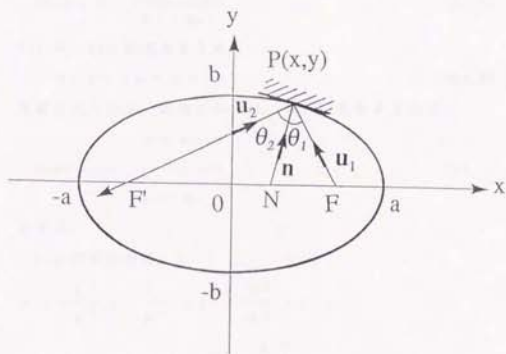


図 A 1 楕円鏡面の光学系

一焦点Fから出た光はつねに、楕円面で反射して他の焦点F'を通る性質がある

$$\cos \theta_1 = \frac{\mathbf{n} \cdot \mathbf{u}_1}{|\mathbf{n}| |\mathbf{u}_1|} \dots \dots \dots (A1.6)$$

$$\cos \theta_2 = \frac{\mathbf{n} \cdot \mathbf{u}_2}{|\mathbf{n}| |\mathbf{u}_2|} \dots \dots \dots (A1.7)$$

(A1.4), (A1.5)式をまとめて

$$\mathbf{u}_{1,2} = (x \pm a e, y) \dots \dots \dots (A1.8)$$

と書くことにし、同様に(A1.6), (A1.7)式をまとめて

$$\cos \theta_{1,2} = \frac{\mathbf{n} \cdot \mathbf{u}_{1,2}}{|\mathbf{n}| |\mathbf{u}_{1,2}|} \dots \dots \dots (A1.9)$$

とする。

((1.9)式の分母)<sup>2</sup>

$$\begin{aligned} &= \left\{ \frac{x^2}{a^2} + \frac{1}{b^2} \left( 1 - \frac{x^2}{a^2} \right) \right\} \\ &\quad \times \left\{ (x \pm a e)^2 + b^2 - \left( \frac{b}{a} \right)^2 x^2 \right\} \\ &= \left\{ \frac{x^2}{a^4} + \frac{1}{a^2(1-e^2)} \left( 1 - \frac{x^2}{a^2} \right) \right\} \\ &\quad \times \{ x^2 \pm 2 a e x + a^2 e^2 + a^2 - a^2 e^2 - (1-e^2)^2 x^2 \} \\ &\quad \quad \quad (\because (A1.1), (A1.2)式より) \\ &= \frac{(a^2 - e^2 x^2)(a \pm e x)}{a^4(1-e^2)} \dots \dots \dots (A1.10) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{(1.9)式の分子} &= \frac{x}{a^2}(x \pm a e) + \frac{y^2}{b^2} \\ &= \frac{a \pm e x}{a} \quad \left( \because \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 \text{ だから} \right) \\ &\dots \dots \dots (A1.11) \end{aligned}$$

(A1.10), (A1.11)式より

$$\cos \theta_{1,2} = \frac{a \sqrt{1-e^2}}{\sqrt{a^2 - e^2 x^2}} \dots \dots (A1.12)$$

よってxの位置の如何に関係なく $\theta_1 = \theta_2$ となる。これは、Fからでた光線が楕円面に反射して他の焦点を通ることを示している。

次に角倍率を調べる。楕円形状のどこに光が当たるかによって、角倍率が異なること証明すれば、反射鏡としての楕円鏡の屈折力が光の当たる位置によって異なることを証明したことになる。

$u_1$ 、 $u_2$ の、x軸からの方向角をそれぞれ、 $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ とすると、角倍率 $\gamma$ は

$$\gamma = \frac{\delta \alpha_2}{\delta \alpha_1} \dots \dots \dots (A1.13)$$

で定義される。図A1より

$$\tan \alpha_{1,2} = \frac{y}{x \pm a e} \quad \text{だから}$$

$$\delta (\tan \alpha_{1,2}) = \frac{\delta \alpha_{1,2}}{\cos^2 \alpha_{1,2}} = \frac{(x \pm a e) \delta y - y \delta x}{(x \pm a e)^2} \dots \dots \dots (A1.14)$$

(A1.1)より

$$\delta y = - \frac{b^2}{a^2} \cdot \frac{x}{y} \delta x \quad \text{だからこれを代入して}$$

$$\begin{aligned} \delta (\tan \alpha_{1,2}) &= \frac{-(x \pm a e) \frac{b^2 x}{a^2 y} - y}{(x \pm a e)^2} \delta x \\ &= \frac{-(b^2 x^2 \pm a b^2 e x + a^2 y^2)}{a^2 y (x \pm a e)^2} \delta x \\ &= - \frac{(a^2 b^2 \pm a b^2 e x)}{a^2 y (x \pm a e)^2} \delta x \\ &\quad (\because b^2 x^2 + a^2 y^2 = a^2 b^2) \end{aligned}$$

$$= - \frac{b^2 (a \pm e x)}{a y (x \pm a e)^2} \delta x \quad \dots (A1.15)$$

ここで、 $\cos^2 \theta_{1,2} = \left( \frac{x \pm a e}{a \pm e x} \right)^2$  だから

(A1.14), (A1.15) 式より

$$\delta a_{1,2} = - \frac{b^2}{a y (a \pm e x)} \delta x \quad \dots (A1.16)$$

したがって

$$\begin{aligned} \gamma &= \frac{\delta a_2}{\delta a_1} \\ &= \frac{a - e x}{a + e x} \quad \dots \dots \dots (A1.17) \end{aligned}$$

これは位置  $X$  に依存するので角倍率  $\gamma$  は一定でない。したがって横倍率も一定でない。したがって、楕円鏡は光があたる位置によって、光学的に等価な屈折力が異なることが証明できた。

## A 2 光軸操作機能

### A2.1 光軸の折り曲げ機能の実現

空間内に、絶対位置を記述する空間座標系0-XYZを定義する。一方、各々の光学部品は、その光軸がw軸に一致する固有のローカル座標系o-uvwを持つ(図A2参照)。レンズの場合、光軸と境界面との2つの交点(頂点)の midpoint をローカル座標系の原点とし、鏡の場合は光軸上で反射面上の点(頂点)を原点とし、反射面がw軸の正の方向に向くようにとる。いま、ローカル座標系を三次元空間内に配置したときローカル座標軸ベクトルu, v, wおよび原点の位置ベクトルoを空間座標系で表わしたものを、それぞれ  $(u_x \ u_y \ u_z)$ ,  $(v_x \ v_y \ v_z)$ ,  $(w_x \ w_y \ w_z)$ ,  $(o_x \ o_y \ o_z)$  としたとき、ローカル座標系で表現された部品上の一点(u v w)の、対応する空間座標系での座標値(X Y Z)は、変換行列Mを用いて、(A2.1)式で表わされる。

$$(X \ Y \ Z) = (u \ v \ w) M + (o_x \ o_y \ o_z) \dots \dots \dots (A2.1)$$

ここで、

$$M = \begin{pmatrix} u_x & u_y & u_z \\ v_x & v_y & v_z \\ w_x & w_y & w_z \end{pmatrix}$$

また、ローカル座標系で表現された方向ベクトル  $(e_u \ e_v \ e_w)$  を空間座標系で表現したものを  $(e_x \ e_y \ e_z)$  とすると、(A2.2)式が成り立つ。

$$(e_x \ e_y \ e_z) = (e_u \ e_v \ e_w) M \dots \dots \dots (A2.2)$$

(A2.1), (A2.2)式に関連した逆変換は、行列Mが回転行列で直交行列であることから(A2.3)式に示す関係を用いる。

$$M^{-1} = M^T \dots \dots \dots (A2.3)$$

ただしM<sup>T</sup>は、Mの転置行列を表わす。(A2.1)式を4×4の同次座標系を用いて表現すれば、(A2.4)式となる。

$$(X \ Y \ Z \ 1) = (u \ v \ w \ 1) X \dots \dots \dots (A2.4)$$

ただし



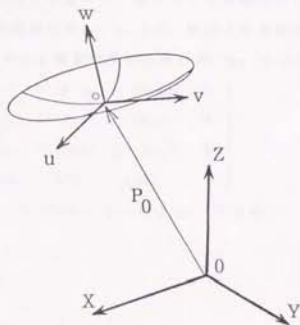


図 A 2 空間座標系とローカル座標系

各部品には、その部品の光軸を  $z$  軸に一致させたローカル座標系  $o-uvw$  を設定し、絶対空間には固定した空間座標系  $0-XYZ$  を設定する。この空間座標系の原点から各部品のもつローカル座標系原点への移動ベクトルと、座標系の回転行列で各部品の姿勢を記述する

$$X = \begin{pmatrix} & & & 0 \\ & M & & 0 \\ & & & 0 \\ 0, & 0, & 0, & 1 \end{pmatrix}$$

この座標変換行列  $X$  を用いて、挿入する平面鏡の面上の一点の位置ベクトルを空間座標系で  $(p_x, p_y, p_z)$ 、鏡面上の単位法線ベクトルを  $(n_x, n_y, n_z)$  とすると鏡像変換の変換行列  $M_m$  は(A2.5)式となる。

$$M_m = \begin{pmatrix} 1 - 2n_x^2 & -2n_x n_y & -2n_x n_z & 0 \\ -2n_y n_x & 1 - 2n_y^2 & -2n_y n_z & 0 \\ -2n_z n_x & -2n_z n_y & 1 - 2n_z^2 & 0 \\ 2dn_x & 2dn_y & 2dn_z & 1 \end{pmatrix} \dots (A2.5)$$

ここで  $d = p_x n_x + p_y n_y + p_z n_z$  である。

## A2.2 光軸のねじり機能

このとき、回転軸となる光路上の一点を $(p_x, p_y, p_z)$ 、この点での光線方向の単位ベクトルを $(e_x, e_y, e_z)$ とし、回転角を $\theta$ とすると、この点以降の光路上の光学部品にたいする変換行列  $M_i$  は、3つの行列の積の形式で(A2.6)式となる。

$$M_i = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -p_x & -p_y & -p_z & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} & & & 0 \\ & R_a & & 0 \\ & & & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ p_x & p_y & p_z & 1 \end{pmatrix} \dots \dots \dots (A2.6)$$

ただし、 $R_a = (r_{ij})$  ( $i, j = 1, 2, 3$ ) は(A2.7)式の $3 \times 3$ の回転行列である。

$$\left. \begin{aligned} r_{11} &= e_x^2 + (1 - e_x^2) \cos \theta \\ r_{21} &= e_x e_y (1 - \cos \theta) - e_z \sin \theta \\ r_{31} &= e_x e_z (1 - \cos \theta) + e_y \sin \theta \\ r_{12} &= e_x e_y (1 - \cos \theta) + e_z \sin \theta \\ r_{22} &= e_y^2 + (1 - e_y^2) \cos \theta \\ r_{32} &= e_y e_z (1 - \cos \theta) - e_x \sin \theta \\ r_{13} &= e_x e_z (1 - \cos \theta) - e_y \sin \theta \\ r_{23} &= e_y e_z (1 - \cos \theta) + e_x \sin \theta \\ r_{33} &= e_z^2 + (1 - e_z^2) \cos \theta \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (A2.7)$$

### A 3 屈折・反射の式

ここでは、幾何光学で用いられる既知の基本的な式を導いて、随時参照できるように整理しておく。

#### A3.1 球面による屈折

屈折の基礎式 Snellius の法則は、Maxwell の電磁場の方程式からも波動光学的に導かれるが<sup>5-5)</sup>、ここでは幾何光学の範囲で考えるため、一応 Snellius の法則を前提として、議論に必要な式を導く(5-1), (5-5), (5-6), (5-11), (5-12)。屈折に関する Snellius の法則は、

$$n \sin \theta = n' \sin \theta' \quad \dots \dots \dots (A3.1)$$

ここで  $n$ ,  $n'$  は最初、屈折後の媒質の屈折率、 $\theta$ ,  $\theta'$  はそれぞれ最初、屈折後の光の入射角、屈折角である。図 A3.1 において  $\triangle POC$ ,  $\triangle PIC$  に、正弦定理を用いて

$$\frac{\sin(\pi - \theta)}{s-r} = \frac{\sin \theta}{s-r} = \frac{\sin \phi}{r} \quad \dots \dots \dots (A3.2)$$

$$\frac{\sin \theta'}{s'-r} = \frac{\sin \phi'}{r} \quad \dots \dots \dots (A3.3)$$

また

$$\phi = \theta + \phi = \theta' + \phi' \quad \dots \dots \dots (A3.4)$$

近軸光線の場合、 $\sin x \approx x$  としてよいから (A3.1) 式から (A3.3) 式は、

$$n \theta = n' \theta' \quad \dots \dots \dots (A3.5)$$

$$\frac{\theta}{s-r} = \frac{\phi}{r} \quad \dots \dots \dots (A3.6)$$

$$\frac{\theta'}{s'-r} = \frac{\phi'}{r} \quad \dots \dots \dots (A3.7)$$

(A3.4), (A3.5), (A3.6) 式より、

$$\phi r = \phi s = \phi' s' = y \quad \dots \dots \dots (A3.8)$$

とおくと、

$$ny \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{s} \right) = n'y \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{s'} \right) \quad \dots \dots \dots (A3.9)$$

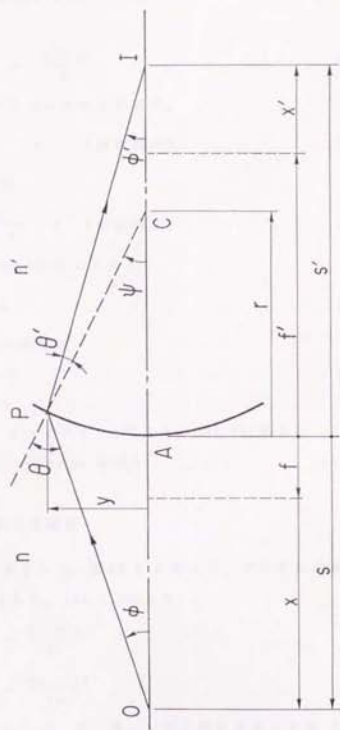


図 A 3 . 1 球面による屈折

$$n \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{s} \right) = n' \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{s'} \right)$$

(Abbe's null invariant) . . . . . (A3.10)

これより

$$\frac{n'}{s'} - \frac{n}{s} = \frac{n' - n}{r} \quad \dots \dots \dots (A3.11)$$

(A3.11)式において  $s = -\infty$  とおけば、

$$s' = \frac{n' r}{n' - n} = f' \quad (\text{後側焦点}) \quad \dots \dots \dots (A3.12)$$

$s' = \infty$  とおけば

$$s = -\frac{nr}{n' - n} = f \quad (\text{前側焦点}) \quad \dots \dots \dots (A3.13)$$

(A3.11)式から (A3.13)式までより

$$\frac{f'}{s'} + \frac{f}{s} = 1 \quad \dots \dots \dots (A3.14)$$

(A3.12), (A3.13)式より

$$n f + n' f' = 0 \quad \dots \dots \dots (A3.15)$$

$$f + f' - r = 0 \quad \dots \dots \dots (A3.16)$$

また、 $s = x + f$ ,  $s' = x' + f'$  とすると、(A3.14)式より

$$x x' = f f' \quad (\text{Newton の式}) \quad \dots \dots \dots (A3.17)$$

### A3.2 薄レンズによる屈折

屈折面が2つあるから、図A3.2において、それぞれの面に関して添え字を1,2とすると、(A3.11)式より

$$\frac{n_1'}{s_1'} - \frac{n_1}{s_1} = \frac{n_1' - n_1}{r_1} \quad \dots \dots \dots (A3.18)$$

$$\frac{n_2'}{s_2'} - \frac{n_2}{s_2} = \frac{n_2' - n_2}{r_2} \quad \dots \dots \dots (A3.19)$$

レンズ厚さ  $d = s_1' - s_2$  は、薄レンズと見なせるときは  $d = 0$  となり、また空気中では  $n_1 = n_2' = 1$ ,  $n_1' = n_2 = n$  とおくと、(A3.18),

(A3.19)式より

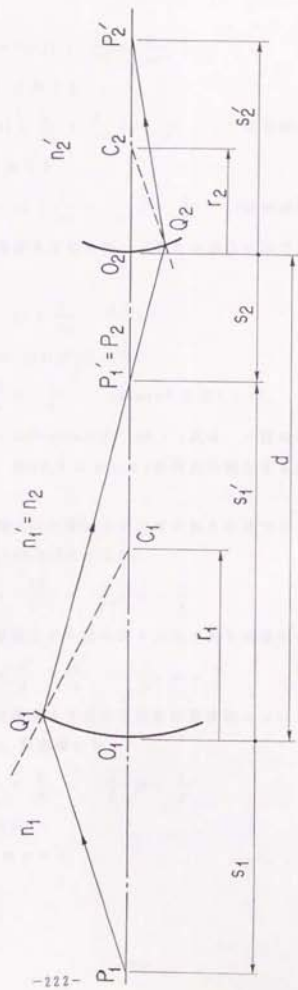


図 A 3 . 2 2 つの球面による屈折



$$\frac{1}{s_2'} - \frac{1}{s} = (n-1) \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad \dots \dots \dots (A3.20)$$

ここで  $s = -\infty$  とおくと

$$\frac{1}{s_2'} = (n-1) \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) = \frac{1}{f'} \quad (f' \text{ は後側焦点距離})$$

また  $s' = \infty$  とおくと

$$\frac{1}{s_1} = -(n-1) \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) = \frac{1}{f} \quad (f \text{ は前側焦点距離})$$

$f$  と  $f'$  は距離を測る方向の違いで符号が違うだけであるから、まとめて

$$\frac{1}{f} = (n-1) \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad \dots \dots \dots (A3.21)$$

また (A3.21)式と (A3.20)式より

$$\frac{1}{s'} - \frac{1}{s} = \frac{1}{f} \quad (\text{Gaussの公式}) \quad \dots \dots \dots (A3.22)$$

一つの面で成立したNewtonの式 (A3.17)式は、一枚の薄レンズの場合にも成り立つ。図A3.3において $f$ を焦点距離とすると、

$$x \cdot x' = -f^2 \quad \dots \dots \dots (A3.23)$$

が成り立つ。光軸上の小線分とその像の長さの比である縦倍率 $\mu$ は (A3.23)式より (A3.24)式となる。

$$\mu = \frac{\delta x'}{\delta x} = \frac{f^2}{x^2} = \frac{x'^2}{f^2} = -\frac{x'}{x} \quad \dots \dots \dots (A3.24)$$

光軸に直角の小線分とその像の長さの比である横倍率 $m$ は同図から

$$m = \frac{\delta y'}{\delta y} = \frac{y'}{y} = \frac{s'}{s} = -\frac{f}{x} = -\frac{x'}{f} \quad \dots \dots \dots (A3.25)$$

物体空間で光軸と角度 $\phi$ で交わる光線の像空間において光軸となす角を $\phi'$ とすると、角倍率 $\gamma$ は

$$\gamma = \frac{\tan \phi'}{\tan \phi} = \frac{s}{s'} = -\frac{x}{f} = -\frac{f}{x'} \quad \dots \dots \dots (A3.26)$$

これら3つの間には

$$\mu \gamma = m, \quad m \gamma = 1 \quad \dots \dots \dots (A3.27)$$

の関係がある。

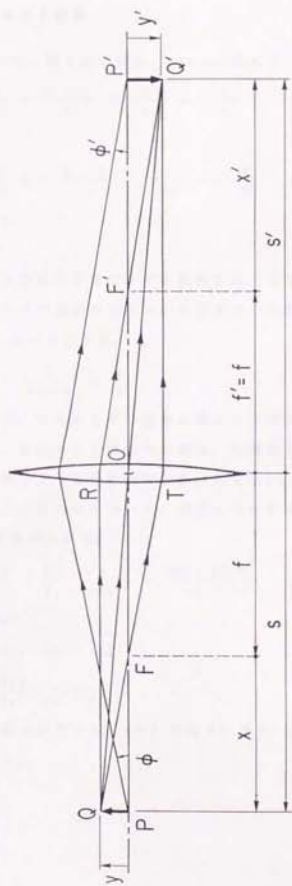


図 A 3 . 3 薄凸レンズによる結像系

### A3.3 厚レンズによる屈折

図A3.4において、第1面に対し、(A3.11)式より、

$$\frac{n'}{s_1'} - \frac{n}{s_1} = \frac{n' - n}{r_1} = \frac{n'}{f_1'} = -\frac{n}{f_1} \quad \dots (A3.28)$$

第2面に対し、

$$\frac{n}{s_2'} - \frac{n'}{s_2} = -\frac{n' - n}{r_2} = \frac{n}{f_2'} = -\frac{n'}{f_2} \quad \dots (A3.29)$$

レンズ厚さに対し、

$$s_2 = s_1' - d \quad \dots (A3.30)$$

薄レンズと同様な形式にするために仮想的な面(主面)を表裏2ヶ所に設定し、レンズの頂点から2つの主面までの距離をそれぞれ $h_1$ 、 $h_2$ で表わして、次の式とする。

$$\frac{1}{s_2' - h_2} - \frac{1}{s_1 - h_1} = \frac{1}{f} \quad \dots (A3.31)$$

すなわち主面とは、あたかもその位置に薄レンズがあるかのように見させる位置で、主面から主面までの間は、空間がなく2つの主面が密着しているかのように光が進むとみなしてよい。さて、(A3.28)から(A3.31)は、任意の $s_1$ について、成立しなければならないことより、(A3.32)式が得られる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{f} &= \frac{n' - n}{n} \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) + \frac{(n' - n)^2 d}{nn' r_1 r_2} \\ h_1 &= \frac{ndr_1}{n'(r_1 - r_2) - (n' - n)d} \\ h_2 &= \frac{ndr_2}{n'(r_1 - r_2) - (n' - n)d} \end{aligned} \right\} (A3.32)$$

特に空気中での厚レンズでは、 $n=1$ であり、また $n'$ をあらためて $n$ とおくと

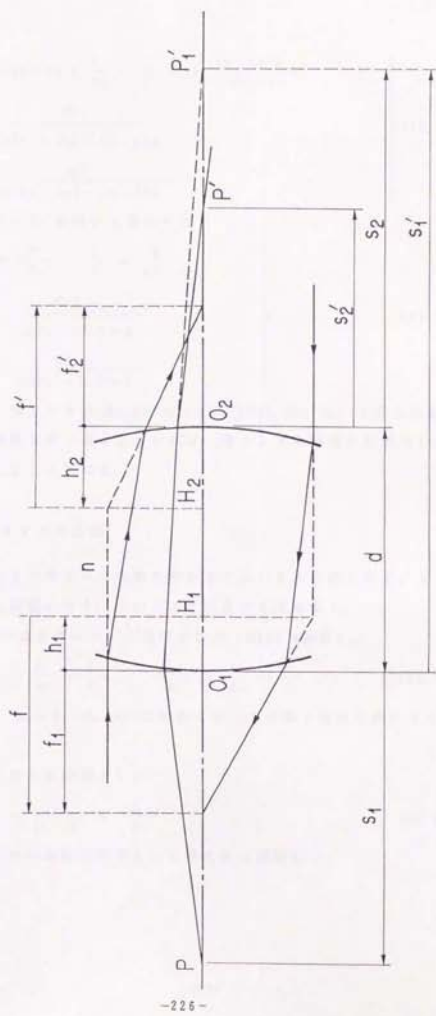


図 A 3.4 厚レンズによる屈折

$$\frac{1}{f} = (n-1) \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) + \frac{(n-1)^2 d}{nr_1 r_2}$$

$$h_1 = \frac{dr_1}{n(r_1 - r_2) - (n-1)d}$$

$$h_2 = \frac{dr_2}{n(r_1 - r_2) - (n-1)d}$$

} (A3.33)

また、 $f_1$ 、 $f_2'$ を用いて表わすと

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_2'} - \frac{1}{f_1} + \frac{d}{nf_1 f_2'}$$

$$h_1 = -\frac{df_1}{n(f_2' - f_1) - d}$$

$$h_2 = -\frac{df_2'}{n(f_2' - f_1) - d}$$

} . . . . . (A3.33)'

従って、厚レンズは(A3.33)式(または(A3.33)'式)で得られる主面からの距離を用いることにすれば、薄レンズと同様な形式の(A3.3)式が使えることになる。

#### A3.4 薄レンズの合成

一般に2つのレンズを組み合わせて用いると合成されて、1つのレンズと等価になる。このときに成立する式を導く。

(A3.22)式を各レンズに適用すると(図A3.5参照)、

$$\frac{1}{s_1'} - \frac{1}{s_1} = \frac{1}{f_1}, \quad \frac{1}{s_2'} - \frac{1}{s_2} = \frac{1}{f_2} \quad \dots \dots \dots (A3.34)$$

$s_1' = f_1$ 、 $s_2 = f_1 - d$ 、 $s_2'$ は組合せレンズの第2焦点距離 $f'$ となるから、

$s_1 = -\infty$ のとき同図より、

$$\frac{1}{f'} = \frac{1}{f_1 - d} + \frac{1}{f_2} \quad \dots \dots \dots (A3.35)$$

逆方向に光の進行方向をとって考えると同様に

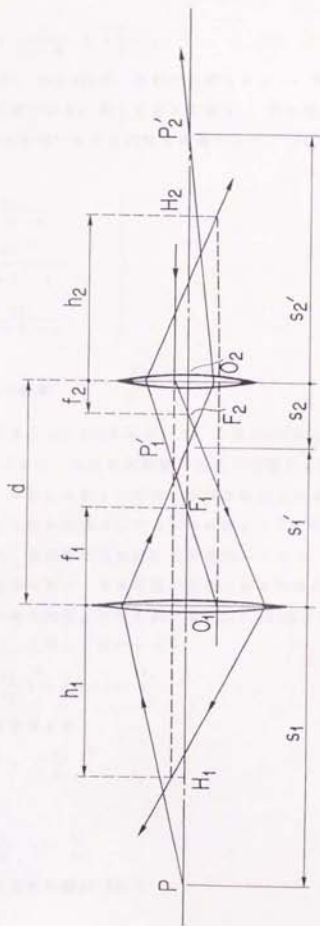


図 A 3 . 5 薄レンズの合成

$$\frac{1}{f} = - \left\{ \frac{1}{f_2 - d} + \frac{1}{f_1} \right\} \dots \dots \dots (A3.36)$$

となる。(A3.35), (A3.36)は、それぞれ第2レンズ、第1レンズの頂点から測った値である。新しく第1主面H<sub>1</sub>、第2主面H<sub>2</sub>を考えると、(A3.33)式を導いたのと同様な議論により、(A3.37)式が得られる。

$$\left. \begin{aligned} f &= \frac{f_1 f_2}{f_1 + f_2 - d} \\ h_1 &= \frac{d f_1}{f_1 + f_2 - d} \\ h_2 &= - \frac{d f_2}{f_1 + f_2 - d} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (A3.37)$$

### A3.5 望遠鏡系の倍率

組合せレンズ系の(A3.37)式において、分母が0となる場合すなわち  $d = f_1 + f_2$  のときは、合成焦点距離、主点の位置ともに無限遠となる。この場合、平行に入射した光は、平行で射出される。この場合は、2つの薄レンズが合成されても1つの厚レンズと等価にならない特殊な場合で、望遠鏡は基本的にこの光学系である。

さて、望遠鏡系において有限距離の位置にある物体の像について、1つのレンズの時と同様に倍率を調べる。(A3.34)式において、

$s_1' = f_1 + f_2 + s_2$  を用いて整理すると

$$s_2' = \left( \frac{f_2}{f_1} \right)^2 + (f_1 + f_2) \frac{f_2}{f_1} \dots \dots \dots (A3.38)$$

したがって、縦倍率  $\mu$  は

$$\mu = \frac{\delta s_2'}{\delta s_1} = \left( \frac{f_2}{f_1} \right)^2 \dots \dots \dots (A3.39)$$

横倍率  $m$  は

$$m = \frac{s_1' s_2'}{s_1 s_2} = - \frac{f_2}{f_1} \dots \dots \dots (A3.40)$$

角倍率  $\gamma$  を求めるため図A3.6から



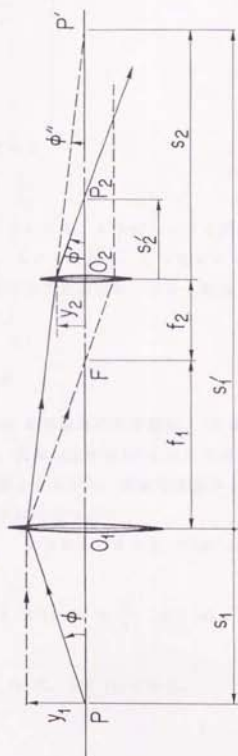


図 A 3 . 6 望遠鏡系の構成

$$\left. \begin{aligned} \tan \phi &= \frac{y_1}{-s_1} \\ \tan \phi'' &= -\frac{y_1}{s_1'} \\ \tan \phi' &= -\frac{y_2}{s_2'} \\ \frac{y_2}{y_1} &= \frac{s_2}{s_1'} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (A3.41)$$

(A3.41)式と(A3.34)式から

$$\gamma = \frac{\tan \phi'}{\tan \phi} = -\frac{f_1}{f_2} \dots \dots \dots (A3.42)$$

したがって望遠鏡系についても、1つのレンズと同様な倍率の公式(A3.27)式が成り立つ。しかしながら、1つのレンズの場合との大きな相違点は、望遠鏡系では各倍率がレンズから物体までの距離  $s_1$  に依存しないことである。

### A3.6 球面鏡による反射

図A3.7において、 $MOM'$ を凹面鏡の主切断面、 $C$ を球面の中心(球心)、 $O$ を鏡の頂点とする。光軸 $CO$ 上の点 $P$ から出た光線 $PD$ の反射方向を $DP'$ とすると、 $CD$ が法線となるから、反射の法則から $\angle PDC = \angle CDP'$ となるから、(A3.43)が成り立つ。

$$\phi - \phi = \phi' - \phi \quad \text{すなわち} \quad \phi + \phi' = 2\phi \quad \dots \quad (A3.43)$$

ここで、

$$\phi \approx \tan \phi = \frac{y}{a}, \quad \phi' \approx \tan \phi' = \frac{y}{b}, \quad \phi \approx \tan \phi = \frac{y}{r} \dots \dots \dots (A3.44)$$

と見なせるから、(A3.43)式、(A3.44)式から、

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{2}{r} \dots \dots \dots (A3.45)$$

特に  $a = -\infty$  のとき

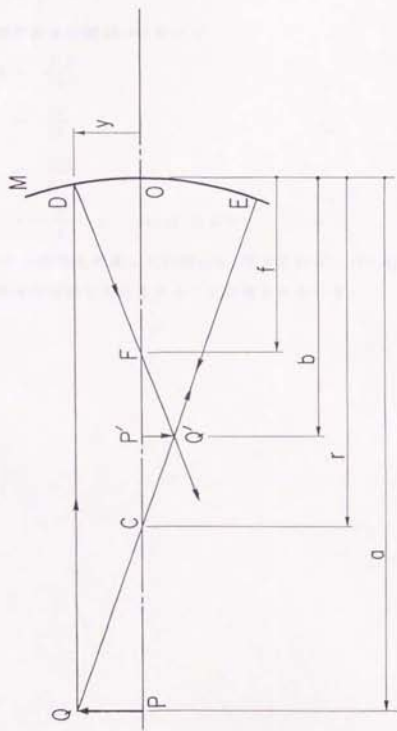


図 A 3 . 7 凹面球面鏡による結像

$$b = \frac{r}{2} = f \quad \dots \dots \dots (A3.46)$$

像の横倍率  $m$  は図 A3.8 において

$$\begin{aligned} m &= \frac{P'Q'}{PQ} \\ &= \frac{CP'}{CP} \\ &= \frac{b-r}{a-r} \\ &= -\frac{b}{a} \quad (\because (A3.45) \text{式より}) \quad \dots \dots \dots (A3.47) \end{aligned}$$

頂点  $O$  から符号を考慮した距離  $a, b, r$  等をとれば、(A3.45)式から (A3.47)式は凸面鏡でも成立することが確かめられる。

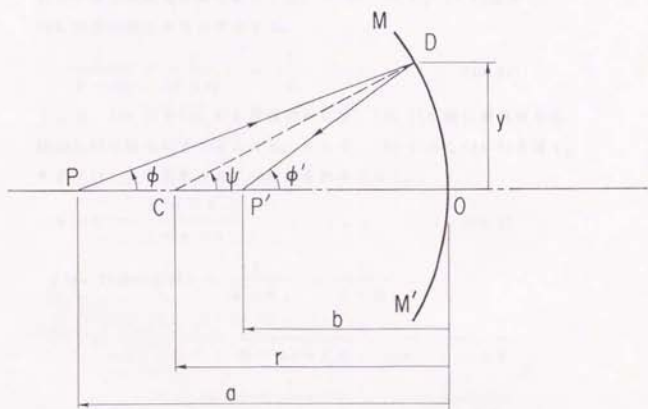


図 A 3 . 8 球面による反射

A 4 疑似等価光学系の唯一性の証明

(5.1)、(5.2)、(5.3)式が成立するということは、主面の定義から (A4.1) 式が成立することである。

$$\frac{l}{b-h_2} = \frac{l}{a-h_1} = \frac{l}{f} \dots\dots\dots (A4.1)$$

同様に疑似等価光学系においても、(5.4)、(5.5)、(5.6)式から、(A4.2)式が成立するはずである。

$$\frac{l}{b-H_2} = \frac{l}{a-H_1} = \frac{l}{F} \dots\dots\dots (A4.2)$$

ここで、(A4.1)と(A4.2)が同値であれば、(A4.1)の疑似等価光学系は(A4.2)に限られることになる。そこで、(A4.1)から(A4.2)を導く。まず、(A4.1)を変形させて(A4.3)を求めておく。

$$b-h_2 = \frac{f(a-h_1)}{f+a-h_1} \dots\dots\dots (A4.3)$$

$$\begin{aligned} \text{(A4.2)式の左辺} &= \frac{l}{b-H_2} - \frac{l}{a-H_1} \\ &= \frac{l}{b-h_2+2F} - \frac{l}{a-h_1-2F} \\ &= \frac{l}{b-h_2-2f} - \frac{l}{a-h_1+2f} \\ &= \frac{l}{\frac{f(a-h_1)}{f+a-h_1} - 2f} - \frac{l}{a-h_1+2f} \\ &= -\frac{l}{f} \qquad \qquad \qquad \text{(A4.3)式を代入)} \\ &= \frac{l}{F} \\ &= \text{(A4.2)式の右辺} \end{aligned}$$

上の変形過程は、同値であるから逆も成り立つ。

## A 5 インタフェースプログラムリスト (主要部)

### A5.1 ファイル経由通信インタフェース (推論部例)

```

/* This is for network communication via files.      Y.Fukui */
send_message(Lenset):-
    getval(cases,Times),
    Timeplus is Times+1,
    setval(cases,Timeplus),
    bopen, write('DISP =case= '), write(Timeplus),
    write(' ').nl, write('CLEAR').nl,
    write('RAY 0 0 0 .02 .02 1 .7').nl,
    write('RAY 0 0 0 -.02 -.02 1 .7').nl,
    write('RAY 0 0 0 -.02 .02 1 .7').nl,
    write('RAY 0 0 0 .02 -.02 1 .7').nl,
    writeform(Lenset), write('SHOW').nl.
send_another(Posi):-
    bopen, write('UNTURN').nl,
    write('DISP rotating mirror at '). write(Posi).nl,
    write('TURN 0 0 ').write(Posi), write(' x 90').nl,
    write('wswing last').nl.
writeform([M|L]):-
    writelens(M), writeform(L).
writeform([S|_]):-
    writestop(S).
writelens([Lens|[Position|N]]):-
    write('LENS').nl, lense(Lens,Focus),
    write(' FOCUS '). write(Focus).nl,
    write(' POSITION 0 0 '), write(Position).nl,
    write('DISP Lens of focus ').write(Focus),
    write(' at ').write(Position).nl.
writestop(Position):-
    write('STOP').nl,
    write(' POSITION 0 0 ').write(Position).nl,
    write(' RECTANGLE 40 40').nl,
    write(' HOLE RECTANGLE 30 30').nl,
    write('DISP Stop at ').write(Position).nl.
help:-
    bopen,
    write('DISP / use(lensel,50,0) & ');
    write(' / use(lense2,100,0) ').nl,
    write('DISP / del(lensel) / lenses ').nl,
    write('DISP / relayall(500,X) ').nl,
    write('DISP / relayrot(500,X) ').nl.
use(Lense,Focus):-
    name('asserta(lense(',S1), name(Lense,S2),
    name(' ',S3), name(Focus,S4), name(')')',S5),

```



```

append(S1,S2,S12). append(S12,S3,S123).
append(S123,S4,S1234). append(S1234,S5,S).
encode(S,X),X,!.
bopen, write('DISP newly defined'), nl.
del(Lense):-
name(' retract(lense(" ,S1), name(Lense,S2),
name(' ,Z)'),S3). append(S1,S2,S12).append(S12,S3,S).
encode(S,X),X,!.
bopen, write('DISP deleted'), nl.
lenses:-
bopen, lense(Name,Focus). write(' DISP ').
write(Name). write(' focus='), write(Focus),nl,fail.
/*****
bopen:-
repeat, bbuff(Timeout). Timeout is 0, !.
breceive(M):-
repeat, system("sleep 1"), brecv(M,Timeout),
Timeout is 0, !.
process:-
breceive(M). process1(M).
process1(M):-
process2(M) -> true_msg; fail_msg.
process2(M):-
M, flush_out, again.
again:-
breceive(M). M = 'more' -> fail; true.
true_msg:-
repeat, bsend('DISP Ok. ',Timeout), Timeout is 0, !.
fail_msg:-
repeat, bsend('DISP No more',Timeout), Timeout is 0, !.
readcommand:-
repeat, process, system("sleep 1"), fail.
/*****
status( F,S ):-
see(F), read(S), seen.
set_stat( F,S ):-
tell(F), write(S),nl, told.
pass_msg( Act,Me,You,Flag,File,Msg,Out ):-
setval(tm,0), confirm( You,T ).
T is 1 -> Out is 1:
act_go( Act,Me,You,Flag,File,Msg,Out ).
buff_msg( Me,You,Flag,File,Out ):-
setval(tm,0), setval(flag,Flag), setval(me,Me),
confirm( You,T ).
T is 1 -> Out is 1:
file_go( Me,You,Flag,File,Out ).

```

```

confirm( You, Out ):-
    repeat. you_time_check( You, Out ), !.
you_time_check( You, Out ):-
    time( T ), T is 1 -> Out is 1;
                                     Out is 0, you_check( You ).
time( Out ):-
    getval( tm, T ), T1 is T + 1, setval( tm, T1 ),
    T < 50 -> Out is 0;
                                     Out is 1.
you_check( You ):-
    status( You, S ), S is 0 -> true; fail.
flush_out:-
    told, getval( flag, Flag ), getval( me, Me ),
    set_stat( Flag, 1 ), set_stat( Me, 0 ).
act_go( Act, Me, You, Flag, File, Msg, Out ):-
    confirm_again( Act, Me, You, Flag, T ),
    T is 1 -> Out is 1;
                                     Out is 0,
                                     act_exe( Act, Me, Flag, File, Msg ).
file_go( Me, You, Flag, File, Out ):-
    confirm_again( 1, Me, You, Flag, T ),
    T is 1 -> Out is 1;
                                     Out is 0, tell( File ).
confirm_again( Act, Me, You, Flag, Out ):-
    repeat. confirm_0( Act, Me, You, Flag, Out ), !.
confirm_0( Act, Me, You, Flag, Out ):-
    time( T ),
    T is 1 -> Out is 1;
                                     Out is 0,
                                     confirm_1( Act, Me, Flag ),
                                     confirm_2( Me, You ).
confirm_1( Act, Me, Flag ):-
    confirm_flag( Act, Flag ), set_stat( Me, 1 ).
confirm_2( Me, You ):-
    you_check( You ) -> true; set_stat( Me, 0 ), fail.
confirm_flag( Act, Flag ):-
    status( Flag, S ), integer(S),
    S =:= Act -> fail; true.
act_exe( Act, Me, Flag, File, Msg ):-
    Act is 0 -> read_msg( Me, Flag, File, Msg );
                                     write_msg( Me, Flag, File, Msg ).
read_msg( Me, Flag, File, Msg ):-
    status( File, Msg ), set_stat( Flag, 0 ),
    set_stat( Me, 0 ).
write_msg( Me, Flag, File, Msg ):-
    set_stat( File, Msg ), set_stat( Flag, 1 ),

```

```

set_stat( Me, 0 ).
init_stat( Me_go, Me_ok, Me_rw, You_go, You_ok, You_rw ):-
    set_stat( Me_go, 0 ), set_stat( Me_ok, 0 ),
    set_stat( Me_rw, 0 ), !,
    display('Waiting..'), ttynl,
    repeat,
    status( You_go, S1 ), status( You_ok, S2 ),
    status( You_rw, S3 ), S1 is 0, S2 is 0,
    S3 is 0, display('Now ready. '), ttynl.
ainit:-
    init_stat( 'abgo.com', 'baok.com', 'abrw.com',
              'bago.com', 'abok.com', 'barw.com' ).

binit:-
    init_stat( 'bago.com', 'abok.com', 'barw.com',
              'abgo.com', 'baok.com', 'abrw.com' ).
asend( Msg, Out ):-
    pass_msg( 1, 'abgo.com', 'abok.com', 'abrw.com',
             'abm.com', Msg, Out ).
abuff( Out ):-
    buff_msg( 'abgo.com', 'abok.com', 'abrw.com',
             'abm.com', Out ).
brecv( Msg, Out ):-
    pass_msg( 0, 'abok.com', 'abgo.com', 'abrw.com',
             'abm.com', Msg, Out ).
bsend( Msg, Out ):-
    pass_msg( 1, 'bago.com', 'baok.com', 'barw.com',
             'bam.com', Msg, Out ).
bbuff( Out ):-
    buff_msg( 'bago.com', 'baok.com', 'barw.com',
             'bam.com', Out ).
arecv( Msg, Out ):-
    pass_msg( 0, 'baok.com', 'bago.com', 'barw.com',
             'bam.com', Msg, Out ).

monitor:-
    status( 'abgo.com', ABGO ), status( 'abok.com', ABOK ),
    status( 'abrw.com', ABRW ), status( 'bago.com', BAGO ),
    status( 'baok.com', BAOK ), status( 'barw.com', BARW ),
    display('abgo abok abrw bago baok barw'), ttynl,
    display(' '), display(ABGO), display(' '),
    display(ABOK), display(' '), display(ABRW),
    display(' '), display(BAGO), display(' '),
    display(BAOK), display(' '), display(BARW), ttynl.

test:-
    bbuff( Out ),
    Out is 1 -> display('Send time out'), ttynl;

```

```

display(' test ok' ). ttynl.
write(' echo '), write(' back '),
write(' test ok. '), nl. flush_out.

askme:-
    bsend(' tell me a number ', Out),
    Out is 1 -> display(' Send time out' ). ttynl;
    repeat. brecv(M, Out1), Out1 is 0, 1,
    display(' your no. is '), display(M), ttynl.

serve:-
    binit,
    display(' = waiting for message = '), ttynl.
    repeat. system("sleep 1"), servel. fail.

servel:-
    brecv(M, Out), Out is 0, display(' Received->'),
    display(M), ttynl. M.

:-[relay, pl].
:- readcommand.

```

```

/*****
/*   ファイル経由通信プログラム (光線追跡部例)   /*
/*                                     Y. Fukui '88.10   /*
*****/
#include <stdio.h>
#define ABGO "abgo.com"
#define ABOX "abok.com"
#define ABEW "abrw.com"
#define ABM "abm.com"
#define BAGO "bago.com"
#define BAOK "baok.com"
#define BARW "barw.com"
#define BAM "bam.com"
#define END_OF_FILE '¥377'
#define EOL 10
#define READ '0'
#define WRITE '1'
#define NOT_BUSY '0'
#define BUSY '1'
#define MAXTRY 2
/*-----*/
char status( file )
char *file;
{
    FILE *fp, *fopen();
    char c;

    fp = fopen( file, "r" );

```

```

    if( fp == 0 ) {
        fprintf(stderr, "status: Can't open %s\n", file);
        return( 'x' );
    }
    c =getc( fp );
    fclose( fp );
    return( c );
}
/*-----*/
int  set_stat( file, status )
char *file, status;
{
    FILE *fp, *fopen();

    fp = fopen( file, "w" );
    if( fp == 0 ) {
        fprintf(stderr, "set_stat: Can't open %s\n", file);
    }
    puts( status, fp );
    fclose( fp );
}
/*-----*/
int  pass_msg( action, me, you, actflag, msg_file, msg )
char action, *me, *you, *actflag, *msg_file, *msg;
{
    int i, try;

    try = 0;
    while( try < MAXTRY ) {
        if( status(you) == NOT_BUSY ) {
            if( status(actflag) != action ) {
                set_stat( me, BUSY );
                if( status(you) == NOT_BUSY ) {
                    if( action == READ ) {
                        i = read_msg( msg_file, msg );
                    }
                    else {
                        i = wrt_msg( msg_file, msg );
                    }
                    set_stat( actflag, action );
                    set_stat( me, NOT_BUSY );
                    return( i );
                }
            }
            else {
                set_stat( me, NOT_BUSY );
            }
        }
    }
}

```

```

        }
        }
        idletime( 1000 );
        try += 1;
    }
    return( 0 );
}
/*-----*/
int  wrt_msg( msg_file,msg )
char *msg_file,*msg;
{
    FILE *fp;
    int  i;

    i = 0;
    fp = fopen( msg_file,"w" );
    if( fp == 0 ) {
        fprintf(stderr,"wrt_msg: Can't open %s\n",msg_file);
    }
    else {
        while( *msg != NULL ) {
            putc( *msg++,fp );
            i++;
        }
        putc( 0,fp );
        i++;
    }
    fclose( fp );
    return( i );
}
/*-----*/
int  read_msg( msg_file,msg )
char *msg_file,*msg;
{
    FILE *fp;
    char  c;
    int  i;

    i = 0;
    fp = fopen( msg_file,"r" );
    if( fp == 0 ) {
        fprintf(stderr,"read_msg: Can't open %s\n",msg_file);
    }
    else {
        while( ( c = getc(fp) ) != END_OF_FILE ) {
            (*msg++) = c;

```

```

        i++;
    }
    *msg = 0;
}
fclose( fp );
return( i );
}
/*-----*/
int  init_stat( me_go, me_ok, me_rw, you_go, you_ok, you_rw )
char *me_go, *me_ok, *me_rw, *you_go, *you_ok, *you_rw;
{
    int  wait_msg = 0;

    existchk( me_go );
    existchk( me_ok );
    existchk( me_rw );

    existchk( you_go );
    existchk( you_ok );
    existchk( you_rw );

    set_stat( me_go, NOT_BUSY );
    set_stat( me_ok, NOT_BUSY );
    set_stat( me_rw, NOT_BUSY );
    set_stat( you_go, NOT_BUSY );
    set_stat( you_ok, NOT_BUSY );
    set_stat( you_rw, NOT_BUSY );
}
/*-----*/
int  idletime( t )
int  t;
{
    int  i, j;
    for( i=0; i<t; i++ ) j = 0;
}
/*-----*/
int  existchk( file )
char *file;
{
    int  fd;

    if( fopen( file, "r" ) == 0 ) {
        fd = creat( file, 0777 );
        close( fd );
    }
}

```



```

/*-----*/
int  ainit()      (init_stat( ABGO, BAOX, ABRW, BAGO, ABOX, BARW );)
/*-----*/
int  binit()      (init_stat( BAGO, ABOX, BARW, ABGO, BAOX, ABRW );)
/*-----*/
int  asend( msg )
char  *msg;
{
    return( pass_msg( WRITE, ABGO, ABOX, ABRW, ABM, msg ) );
}
/*-----*/
int  brecv( msg )
char  *msg;
{
    return( pass_msg( READ, ABOX, ABGO, ABRW, ABM, msg ) );
}
/*-----*/
int  bsend( msg )
char  *msg;
{
    return( pass_msg( WRITE, BAGO, BAOX, BARW, BAM, msg ) );
}
/*-----*/
int  arecv( msg )
char  *msg;
{
    return( pass_msg( READ, BAOX, BAGO, BARW, BAM, msg ) );
}
/*-----*/

void  input( msg, str )
char  *msg, *str;
{
    printf( "%s ", msg );
    while( ((*str)-getchar()) != EOL ) str++;
    *str = 0;
}
/*-----*/

```

## A5.2 ソケット経由通信制御プログラム (推論部側)

```

/* ソケット経由の情報伝達プログラム*/
/* This is for network communication only. Y.Fukui */
/* via socket '88.10 */
send_message(Lenset):-
    getval(cases,Times), Timeplus is Times+1,
    setval(cases,Timeplus),
    hold_server('DISP =case= '), hold_server_int(Timeplus),
    hold_server(':',nl_server),
    hold_server('CLEAR'),nl_server,
    hold_server('RAY 0 0 0 .02 .02 1 .7'),nl_server,
    hold_server('RAY 0 0 0 -.02 -.02 1 .7'),nl_server,
    hold_server('RAY 0 0 0 -.02 .02 1 .7'),nl_server,
    hold_server('RAY 0 0 0 .02 -.02 1 .7'),nl_server,
    writeform(Lenset), hold_server('SHOW'),nl_server.
send_another(Posi):-
    hold_server('UNTURN'),nl_server,
    hold_server('DISP rotating mirror at '),
    hold_server_num(Posi),nl_server,
    hold_server('TURN 0 0 '),hold_server_num(Posi),
    hold_server(' x 90'),nl_server,
    hold_server(' wxswing last'),nl_server.
writeform([M|L]):-
    writelens(M), writeform(L).
writeform([S|_]):-
    writestop(S).
writelens([Lens|[Position|N]]):-
    hold_server('LENS'),nl_server, lense(Lens,Focus),
    hold_server(' FOCUS '),hold_server_num(Focus),nl_server,
    hold_server(' POSITION 0 0 '),
    hold_server_num(Position),
    nl_server,
    hold_server('DISP Lens of focus '),
    hold_server_num(Focus),
    hold_server(' at '),hold_server_num(Position),nl_server.
writestop(Position):-
    hold_server('STOP'),nl_server,
    hold_server(' POSITION 0 0 '),
    hold_server_num(Position),nl_server,
    hold_server(' RECTANGLE 40 40'),nl_server,
    hold_server(' HOLE RECTANGLE 30 30'),nl_server,
    hold_server('DISP Stop at '),hold_server_num(Position),
    nl_server.
use(Lense,Focus):-
    name('asserta(lense('.S1), name(Lense,S2), name('.',S3),
        name(Focus,S4), name(')')',S5), append(S1,S2,S12).

```

```

append(S12, S3, S123), append(S123, S4, S1234),
append(S1234, S5, S), encode(S, X), X,
hold_server(' DISP newly defined'), nl_server.

del(Lense):-
name(' retract(lense(' ,S1), name(Lense, S2),
name(' ,Z))', S3), append(S1, S2, S12), append(S12, S3, S),
encode(S, X), X, hold_server(' DISP deleted'), nl_server.
lenses:-
lense(Name, Focus), hold_server(' DISP '),
hold_server(Name), hold_server(' focus='),
hold_server_num(Focus), nl_server, fail.
/*****
process:-
hold_server(' DISP No more'), nl_server, flush_server,
receive_server(Msg, 1024), encode(Msg, Cmd),
/* display(' Cmd1='), display(Cmd), ttyln, */
Cmd, flush_server, again, !.
again:-
receive_server(Msg, 1024), encode(Msg, Cmd),
/* display(' Cmd2='), display(Cmd), ttyln, */
Cmd = 'more' -> fail; true.
readcommand:-
open_server, repeat, process, fail.
:-[relay.pl].
:- readcommand.

```

```

/* ソケットハンドラをK-Prologシステムに組み込むCプログラム*/
#include <sys/types.h>
#include <sys/socket.h>
#include <netinet/in.h>
#include <netdb.h>
#include <errno.h>
#include <sys/un.h>
#include <stdio.h>
#include <signal.h>
#define SIGEX 26
#define BUFSIZE 1024
extern errno, sys_nerr;
extern char *sys_errlist[];
int  recex(), recintr();
struct sockaddr_in saddr;
struct sockaddr_in caddr;
struct hostent *hp;
int  sd, nsd, pid, namelen, len, eflag, stat, baklog=5;
int  no_s, no_c;
int  bufsize_s=BUFSIZE, bufsize_c=BUFSIZE;
char  buf_s[BUFSIZE], buf_c[BUFSIZE];
char  rev_s[BUFSIZE], rev_c[BUFSIZE];
/* char *msg101 = "YnOK. from clientYn";
   char *msg201 = "YnOK. from serverYn"; */
/* Inter-network domain communication library
   Y. Fukui */

open_server()
{
    no_s = -1;
    /* socket open */
    if( (sd = socket(AF_INET, SOCK_STREAM, 0)) < 0 )
        errext("Socket open error");
    /* socket bind */
    bzero( (char *)&saddr, sizeof(saddr) );
    saddr.sin_port = 2048;
    if(bind(sd, (struct sockaddr *)&saddr, sizeof(saddr)) < 0)
        errext("Socket bind error");
    /* socket listen */
    if( (stat = listen(sd, baklog)) < 0 )
        errext("Socket listen error");
    /* socket accept */
    /* printf("Waiting run Client processYn"); */
    len = sizeof( saddr );
    if( (nsd = accept( sd, &saddr, &len)) < 0 )
        errext("Socket acpt error");
    /* receive & send header message */
}

```

```

/*      if( (stat = recv(nsd, rcv_s, BUFSIZE, 0)) < 0 )
            errex("Header receive error");
    rcv_s[254]='Y0';
    printf("%s",rcv_s);
    len = strlen( msg201 );
    if( (stat = send(nsd, msg201, len, 0)) < 0 )
            errex("Header send error");
*/
}

hold_server( msgbuf ) char msgbuf[BUFSIZE];
{
    int    i,nmsgbuf;

    if( (nmsgbuf = strlen( msgbuf )) < 1 )
    {
        /*      printf("No message being held\n");      */
        return(1);
    }
    for(i = 0; i< nmsgbuf; i++){
        if( (++no_s) >= bufsize_s - 2 ){
            fprintf(stderr, " Buffer overflow(hld_serv)\n");
            no_s = bufsize_s; return(1);
        }
        *(buf_s + no_s) = *(msgbuf + i);
    }
}

hold_server_num( a )
float *a;
{
    int    i,nmsgbuf;  char strng[BUFSIZE];

    clearbuf(strng,BUFSIZE);
    sprintf(strng,"%f",*a);
    if( (nmsgbuf = strlen( strng )) < 1 ) return(1);
    for(i=0; i<nmsgbuf; i++) {
        if( (++no_s) >= bufsize_s - 2 ) {
            fprintf(stderr, " Buf ovrflw(hld_srv_num) ==\n");
            no_s = bufsize_s; return(1);
        }
        *(buf_s + no_s) = *(strng + i);
    }
}

hold_server_int( n )

```

```

int n;
{
    int i, nonsgbuf;
    char strng[BUFSIZE];

    sprintf(strng, "%d", n);
    if( (nonsgbuf = strlen( strng )) < 1 ) return(1);
    for(i=0; i<nonsgbuf; i++) {
        if( (++no_s) >= bufsize_s - 2 ) {
            fprintf(stderr, " Buf ovrflw (hld_srv_int) Yn");
            no_s = bufsize_s; return(1);
        }
        *(buf_s + no_s) = *(strng + i);
    }
}

flush_server() { send_server(); no_s = -1; }

send_server() { send_msg(nsd, buf_s, no_s); }

hear_server()
{
    clearbuf(rcv_s, BUFSIZE);
    if( (stat = recv(nsd, rcv_s, BUFSIZE, 0)) < 0 )
        errext("hear error");
    printf("%sYn", rcv_s);
}

receive_server(buffer, bufsize)
char buffer[];
int bufsize;
{
    if( (stat = recv(nsd, buffer, bufsize, 0)) < 0 )
        errext("receive error");
}

clearbuf(msgbuf, nobuf)
int nobuf;
char msgbuf[];
{
    int i;
    for( i = 0; i < nobuf; i ++ ) msgbuf[i] = 'Y0';
}

close_socket()
{

```

```

printf("YnReceived end markYn");
close( sd );
close( nsd );
}

nl_server() { hold_server("Yn"); }

open_client( host_name )
char *host_name;
{
    hp = gethostbyname( host_name );
    if( hp < 0 )errex("gethostbyname error");
    bzero( (char *)&caddr, sizeof(caddr) );
    bcopy(hp->h_addr, (char *)&caddr.sin_addr, hp->h_length);
    caddr.sin_family = hp->h_addrtype;
    caddr.sin_port = 2048;
    no_c = -1;
    signal( SIGINT, recintr );
    /* socket open */
    if((sd = socket(AF_INET, SOCK_STREAM, 0)) < 0)recintr();
    /* socket connect */
    len = sizeof( caddr );
    if( (stat = connect(sd, &caddr, len)) < 0 ) {
        fprintf(stderr, "Waiting run Server processYn");
        do {
            close( sd );
            if( sd = socket(AF_INET, SOCK_STREAM, 0)) < 0 )
                recintr();
        } while( connect( sd, &caddr, len) );
    }
    /* send & receive headder message */
    if( (stat = send(sd, msg101, len, 0)) < 0 )
        errex("Header send error");
    if( (stat = recv(sd, rcv_c, BUFSIZE, 0)) < 0 )
        errex("Header receive error");
    rcv_c[254]='Y0';
}

hold_client( msgbuf )
char msgbuf[BUFSIZE];
{
    int i, nomsgbuf;

    if( (nomsgbuf = strlen( msgbuf )) < 1 ) return(i);
    for(i = 0; i < nomsgbuf; i++){
        if( (++no_c) >= bufsize_c - 2 ){

```



```

        fprintf(stderr, "== Send buffer overflow ==\n");
        no_c = bufsize_e;
        return(1);
    }
    buf_c[no_c] = msgbuf[i];
}

flush_client() { send_client(); no_c = -1; }

recintr() { close( sd ); close( nsd ); exit(0);}

nl_client() { hold_client("\n"); }

send_client() { send_msg(sd, buf_c, no_c); }

send_msg(pid, msgbuf, nomsgbuf)
int pid, nomsgbuf;
char *msgbuf;
{
    if( nomsgbuf < 0) return(1);
    ++nomsgbuf;
    msgbuf[nomsgbuf] = '\0';
    nomsgbuf++;
    if( (stat = send(pid, msgbuf, nomsgbuf, 0)) < 0 )
        errex("send error");
}

hear_client()
{
    clearbuf(recv_c, BUFSIZE);
    if( (stat = recv(sd, recv_c, BUFSIZE, 0)) < 0)
        errex("hear error");
    printf("%s\n", recv_c);
}

receive_client(buffer, bufsize)
char buffer[];
int bufsize;
{
    clearbuf(buffer, bufsize);
    if( (stat = recv(sd, buffer, bufsize, 0)) < 0)
        errex("receive error");
}

recex() { close( sd ); close( nsd ); exit(0);}

```

```
errot( msg ) char *msg;
```

```
{
```

```
    fprintf(stderr, "== %s == ",msg);
```

```
    if( errno>0 && errno<sys_nerr )
```

```
        fprintf(stderr, " (%s)\n", sys_errlist[errno]);
```

```
    close( sd );
```

```
    close( nsd );
```

```
    exit(1);
```

```
}
```

## A 6 反射鏡の光学系

### A6.1 反射鏡による結像系

一点から出た広範囲の立体角の光を他の一点に集光する方法として、2焦点を持つ楕円鏡がある。図A6.1に示すように、一焦点Aから出たあらゆる方向の光は、他焦点Bに集まる。従って、A点に眼球の回転中心を置き、B点に回転鏡を置けば、光量の損失なく光を集めることができる。しかしながら、楕円鏡を等価なレンズで置き換えてみれば解るように、同倍率の等価光学像を移す目的の、リレー光学系を構成することが困難となる。図で説明すると、同図(a)において、実線で示した経路で光が進む場合、等価レンズ系は、同図(b)で示される。また、(a)において、破線で示された経路で光が進むと、等価レンズ系は同図(c)となる。(b)と(c)の場合を考えると、物体からレンズまでの距離が異なっているが、物体からレンズを経由して像点までの距離は、楕円鏡の性質から常に一定である。

ところが一般に、固定焦点距離のレンズを用いると、物体から像点までの距離 $d$ は、(A3.22)式によって、

$$\begin{aligned}d &= s' - s \\ &= \frac{fs}{s+f} - s \\ &= -s - \frac{f^2}{s+f} + f \quad \dots \dots \dots (A6.1)\end{aligned}$$

となり、物体からレンズまでの距離 $s$ に依存し、一定でない。(ここで、測定方向が負の方向になっている $s$ は負の値になっている。)言い換えれば、 $d$ が一定となるためには、明らかに物体からレンズまでの距離 $s$ に応じて焦点距離 $f$ を変化させる必要がある。この場合、明らかに倍率が異なるため、等倍率リレー光学系でなくなる。したがってこの光学系を使うと、倍率の変化を後で補償しなければならなくなり、全体の構成がさらに複雑になるという大きな欠点がある。したがって楕円鏡はリレー光学系の構成部品として使えない。

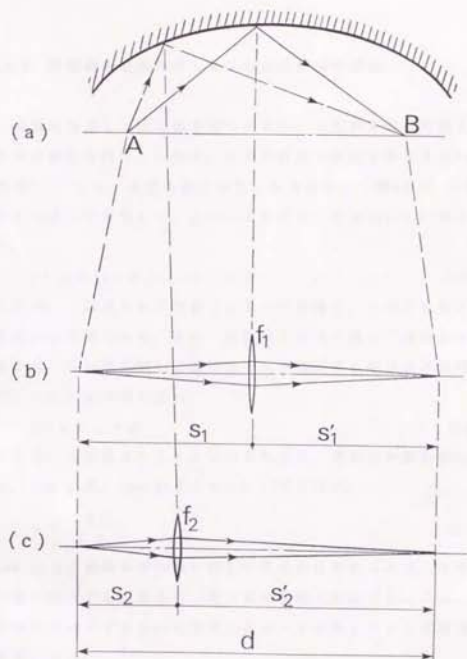


図 A 6.1 楕円鏡と等価レンズとの対応

楕円鏡の反射面は光学的に屈折力をもっており、等価的にレンズに置き換えることができる。しかし、楕円鏡の特徴として、主光線の当たる位置によって等価的なレンズの屈折力が異なることを示している。すなわち、AからBまでの光路長は楕円であるため、一定であるが、レンズの場合、Gaussの公式からこの条件が成り立つのは屈折力が異なるときに限るからである

## A6.2 球面鏡の光軸はずしによる非点収差の評価

光軸をはずして凹面鏡を使うときの、実質的な焦点距離を求めるための解析を行う。一般に、光が反射面で反射するときはFermatの原理<sup>6-14)</sup>より、光路の変分は零となるから、(図A6.2)において点Aから点Cで反射して、点Bへ進むばあいには(A6.2.1)式が成り立つ。

$$r + \rho = (r + \delta r) + (\rho - \delta \rho) \quad \dots \dots \dots (A6.1)$$

ここで、 $r$  は点Aから反射点Cまでの距離で、 $\rho$  は点Cから集光点Bまでの距離である。また、反射面における微小三角形CDEとCDFは、反射面に関して面対称となり対応する面の長さは等しいので、(A6.2)式が成り立つ。

$$r \delta \theta = \rho \delta \phi \quad \dots \dots \dots (A6.2)$$

ここで、 $\delta \theta$  および  $\delta \phi$  はそれぞれ点A、点Bでの微小振れ角である。(A6.1)式、(A6.2)式より(A6.3)式を得る。

$$\rho = \frac{r \delta \theta}{\delta \phi} \quad \dots \dots \dots (A6.3)$$

(A6.3)式の意味を球面鏡に即して具体的に考えてみる。半径Rの凹面鏡の曲率中心を原点に一致させた座標系を設定したとき、点 $\mathbf{x}_0$ から単位方向ベクトル $\mathbf{e}_0$ の方向に光ビームを発したとき反射方向 $\mathbf{e}_1$ は次式となる。

$$\mathbf{e}_1 = \mathbf{e}_0 - 2(\mathbf{n} \cdot \mathbf{e}_0)\mathbf{n} \quad \dots \dots \dots (A6.4)$$

ここで

$$\mathbf{n} = -\frac{\mathbf{x}_1}{R}$$

$$\mathbf{x}_1 = \mathbf{x}_0 + t_1 \mathbf{e}_0$$

$$t_1 = -C + \sqrt{C^2 - |\mathbf{x}_0|^2 + R^2}$$

となる。入射方向 $\mathbf{e}_0$ がわずかに変化したときに、 $\mathbf{e}_1$ がどの様に変化するかを調べるために、 $\delta R=0$ 、 $\delta \mathbf{x}_0=0$ とにおいて(A6.4)式の変分をとると(A6.5)式となる<sup>6-12)</sup>。

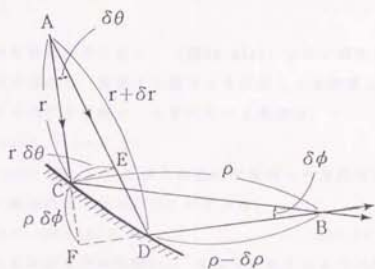


図 A 6.2 鏡面反射の状態

点 A から点 B へ、点 C で反射して光が届く場合、Fermat の原理から光路長は極値をとっているはずである。この条件から  $\delta r$  と  $\delta \phi$  の関係が求まる

$$\begin{aligned} \delta e_1 = & - \frac{2C(x_0 \cdot \delta e_0)}{R^2 D} x_0 \\ & + \frac{2(x_0 \cdot \delta e_0)(C-D)^2}{R^2 D} e_0 \\ & + \frac{2CD - 2C^2 + 2|x_0|^2 - R^2}{R^2} \delta e_0 \quad \dots (A6.5) \end{aligned}$$

ここで

$$C = x_0 \cdot e_0, \quad D = \sqrt{C^2 - |x_0|^2 + R^2}$$

である。

(A6.5)式の意味を理解するために、(図A6.3(a))に示す具体例で考察する。同図では原点と、球面上の極Rとを直径とする円周上に光源を置き、点Rに向けて光線ビームを照射する場合は、

$$x_0 = R \sin \theta (\sin \theta, -\cos \theta, 0)$$

$$e_0 = (\cos \theta, \sin \theta, 0), \quad (\theta \text{ は入射面 } xy \text{ 平面内での方向角})$$

であり、 $\delta e_0$ を入射面内にとれば、(A6.5)式より

$$\delta e_0 = (-\sin \theta, \cos \theta, 0) \delta \theta \quad \dots (A6.6)$$

となり、光源から反射点までの距離 $t_{11}$ 、反射後集光するまでの距離 $\rho_1$ は(A6.3)、(A6.4)、(A6.6)式より

$$\rho_1 = t_{11} = R \cos \theta \quad \dots (A6.7)$$

となる。また図A6.3(b)のようにy軸上に光源位置をとれば

$$x_0 = (0, -R \tan \theta, 0)$$

$$e_0 = (\cos \theta, \sin \theta, 0)$$

であり、 $\delta e_0$ を入射面と直角方向にとれば、(A6.5)式より

$$\delta e_0 = (0, 0, \delta \omega), \quad (\delta \omega \text{ は微小振れ角とする}) \dots (A6.8)$$

と置くことができ、(A6.3)、(A6.4)、(A6.8)式より光源から反射点までの距離 $t_{10}$ 、反射後集光するまでの距離 $\rho_0$ は、(A6.9)式となる。

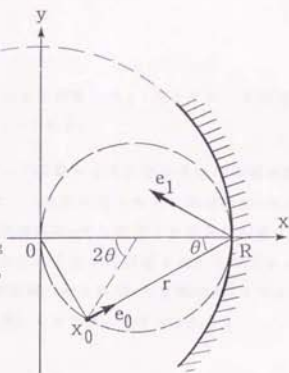
$$\rho_0 = t_{10} = R \sin \theta \quad \dots (A6.9)$$

(A6.7)、(A6.9)式は球面鏡の光軸をはずして使う場合、入射面内とその直角方向の面内とで焦点位置が異なるいわゆる非点収差の効



( a )

光が、点  $X_a$  から球面上の点  $R$  で反射して進む場合、点  $X_a$  からの発散面が紙面に含まれるときは、反射後、再度集光する点は、曲率中心  $O$  と反射点  $R$  とを直径とする円の円周上に存在する。



( b )

点  $X_a$  からの発散面が紙面に直交する面内のときは、反射後再度集光する点は、 $y$  軸上に存在する。

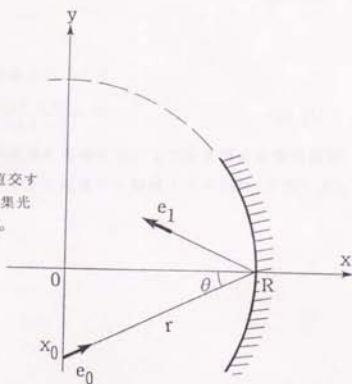


図 A 6 . 3 光源位置設定例

果を表わしている。

すなわち、入射面内方向での焦点距離 $f_1$ は $\rho_1/2$ となり、入射面と直角方向での焦点距離 $f_2$ は $\rho_2/2$ となる。

次に、2つの球面鏡を使って結像させるときの最適な距離間隔を求める。図6.9に示すように、三角形ABCを含む球面鏡 $M_1$ の入射面と、三角形CDEを含む球面鏡 $M_2$ の入射面とを直角に配置する場合、 $M_1$ 、 $M_2$ 間の距離 $b$ を次のようにして決定することができる。光源から $M_1$ の頂点Bまでの距離、および $M_2$ から集光点Eまでの距離を共に $R$ （球面鏡の曲率半径）とすれば、(A3.45)式より

$$b = b_1 + b_2$$
$$\frac{1}{R} + \frac{1}{b_1} = \frac{2}{\rho_1} \quad \dots \dots \dots (A6.10)$$
$$\frac{1}{R} + \frac{1}{b_2} = \frac{2}{\rho_2}$$

となり、(A6.7)、(A6.9)式を代入して

$$b = \frac{2(\cos^2\theta - \cos\theta + 1)}{(2 - \cos\theta)(2\cos\theta - 1)} R \quad \dots \dots \dots (A6.11)$$

が得られる。これは、凹面鏡を光軸をはずして使う場合の凹面鏡間の最適な距離 $b$ が、軸はずしの角度 $\theta$ の関数として(A6.11)式で表わされることを意味する。

A 7 おじれの関係にある直線間のおじれ位置の導出

2つの直線の式を(A7.1)式とする(図A7参照)。

$$q_i = p_i + t_i \cdot e_i, (i=1,2) \quad \dots \dots \dots (A7.1)$$

ここで、 $e_i$ は直線方向の単位ベクトル、 $q_i$ は2つの直線から互いにおろした垂線の足の位置ベクトルである。このとき、おじれの位置では、次の条件が成立する。

$$(q_2 - q_1) \cdot e_i = 0, (i=1,2) \quad \dots \dots \dots (A7.2)$$

(A7.1)、(A7.2)より $t_1$ 、 $t_2$ を求めると次のようになる。

$$t_1 = \frac{\{e_1 - (e_1 \cdot e_2)e_2\} \cdot (p_2 - p_1)}{1 - (e_1 \cdot e_2)^2} \quad \dots \dots \dots (A7.3)$$

$$t_2 = \frac{\{e_2 - (e_1 \cdot e_2)e_1\} \cdot (p_1 - p_2)}{1 - (e_1 \cdot e_2)^2} \quad \dots \dots \dots (A7.4)$$

(A7.3)、(A7.4)を(A7.1)に代入すれば(6.4)式の $q_i$ 、 $(i=1, 2, 3, 4)$ となる。

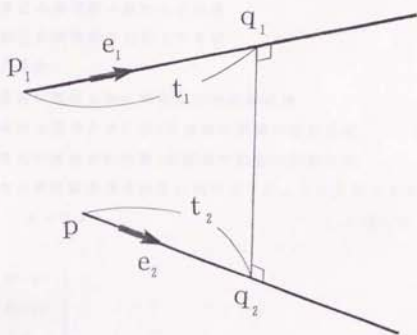


図 A 7      ねじれの位置関係にある 2 直線

2本の線がねじれの関係にあるとき、それぞれの線上の点を結ぶ直線が最短になる点が1箇所存在して、そのときこの線分は2本の直線と互いに直交する

### A 8 多変数多項式校正行列

以下に示す3次の多項式によって校正する校正行列を定義する。  
校正行列は校正実験で求める。すなわち、被検眼の位置に模型眼を  
設定し、その測定結果によって校正行列の係数を求める。

まず、以下の記号を定義する。

- $a_i$  :  $i$ -番目の模型眼の焦点調節量
- $b_i$  :  $i$ -番目の模型眼の設定水平角度
- $c_i$  :  $i$ -番目の模型眼の設定上下角度
- $f_i$  : 校正係数

- $x_i$  :  $i$ -番目に測定された模型眼の焦点調節量
- $y_i$  :  $i$ -番目に測定された第1の揺動平面鏡の回転角度
- $z_i$  :  $i$ -番目に測定された第2の揺動平面鏡の回転角度

すると、3次の多変数多項式校正行列は以下のように表現できる。

$$A = X F \dots \dots \dots (A8.1)$$

ただし、

$$A = \begin{pmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ : & & \\ : & & \\ a_n & b_n & c_n \end{pmatrix}$$

$$X = \begin{pmatrix} 1 & x_1 & x_1^2 & x_1^3 & y_1 & z_1 & y_1^2 & y_1 z_1 & z_1^2 & y_1^3 & y_1^2 z_1 & y_1 z_1^2 & z_1^3 \\ 1 & x_2 & x_2^2 & x_2^3 & y_2 & z_2 & y_2^2 & y_2 z_2 & z_2^2 & y_2^3 & y_2^2 z_2 & y_2 z_2^2 & z_2^3 \\ : & & & & & & & & & & & & \\ : & & & & & & & & & & & & \\ 1 & x_n & x_n^2 & x_n^3 & y_n & z_n & y_n^2 & y_n z_n & z_n^2 & y_n^3 & y_n^2 z_n & y_n z_n^2 & z_n^3 \end{pmatrix}$$

$$F = \begin{pmatrix} f_{10} & f_{20} & f_{30} \\ f_{11} & f_{21} & f_{31} \\ : & & \\ : & & \\ f_{112} & f_{212} & f_{312} \end{pmatrix}$$

で、 $A$ :  $n \times 3$  行列、 $X$ :  $n \times 3$  行列、 $F$ :  $13 \times 3$  行列である。

次に、左側から  $X$  の転置行列を掛けると

$$X^T A = (X^T X) F \dots \dots \dots (A6.2)$$

になる。もし、測定データがそれぞれ独立性の高いものであり、データの数  $n$  が校正係数の数  $m$  よりも十分に大きい場合、 $(X^T X)$  は逆行列を持つ。すると、 $F$  は次式のように表現される。

$$F = (X^T X)^{-1} X^T A \dots \dots \dots (A6.3)$$

$(X^T X)$  の次元は校正係数の次元  $m$  と同じなので、たとえ測定データの数  $n$  が大きくなったとしても、逆行列は容易に求めることができる。

ひとたび模型眼を使った測定で行列  $F$  が求めれば、実際に測定する場合に得られる測定値から行列  $X$  の 1 行だけのベクトルをつくり、これに行列  $F$  をかけることにより求めることができる。

## 謝 辞

本論文をまとめるまでに、多くの方々からのご指導、ご援助を賜りました。最後になりますが、ここで感謝の意を表します。

東京大学工学部の中島尚正教授には、論文にまとめる初期の段階より、初歩的な言葉使いから論文の構成方法、まとめ方にいたるまで、あらゆる段階で深いご指導を賜りました。

東京大学工学部の大園成夫教授、土肥健純教授、廣瀬通孝助教授、村上存先生には、貴重な時間を割いて本論文を査読いただき、それぞれ光学、医療応用、ユーザインタフェース、設計の立場から貴重なご意見を賜りました。

本研究の直接のきっかけを与えていただいた製品科学研究所基礎人間工学部生体システム課の武田常広課長には、研究を進めていく上で、つねに適切なご指導とご援助を賜るとともに、論文にまとめるにあたり、暖かな励ましを最後までいただきました。

製品科学研究所の飯田健夫所長には、実験の進め方、方法論などを細かな点からご指導いただき、また、常に暖かい励ましと本研究をとりまとめる貴重な機会を与えて下さいました。

製品科学研究所応用人間工学部システム設計課の吉岡松太郎主任研究官には、新規設計用CADシステム開発にあたって、富士通や三菱のコンピュータの詳細な仕様調査と、実験プログラム開発にご協力いただきました。また、基礎人間工学部の佐川賢主任研究官、斎田真也主任研究官には、人間の視覚特性とその関連研究について教えていただきました。

東京大学理学部の川合慧教授、東京工業大学工学部の中嶋正之教授、筑波大学電子・情報工学系の西原清一教授、東京都立大学工学部の井越昌紀教授には、グラフィックス技法に関して貴重なアドバ



イスをいただきました。また、前筑波大学教授で水戸済生会病院の大島祐之先生には、眼光学の基礎理論からオプトメータの光学原理にいたるまで、重要な学術情報を詳細にご教示賜りました。また、東京医科歯科大学の奥山文雄先生には、装置開発に関して貴重なノウハウを賜りました。福島県立医科大学眼科学講座の加藤桂一郎教授、奈良医科大学眼科学教室の西信元嗣教授、魚里博教授には、眼科医療の立場からの適切な助言をいただきました。

株式会社ナックの萩谷登志雄氏には、光学設計から機械設計、装置開発に精力的にご協力いただきました。また、株式会社ニデックの藤枝正直氏には、オプトメータの光学系に関して数多く教えていただきました。

NHK放送技術研究所の比留間伸行氏には、CADシステムの画面出力からレーザープリンタにハードコピーを作成するプログラムの開発に、多大なご協力をいただきました。また、株式会社キャノンの島山一男氏には、オプトメータを使った実験に多大な時間を割いてご援助いただきました。

その他、製品科学研究所、日本眼光学学会、情報処理学会、人間工学会などの数多くの方々にお世話になりました。これらの方々へ深く感謝致します。

## 参考文献

### 第1章の参考文献

- 1-1) T. Laubli, W. Hunting and E. Grandjean: Visual impairment in VDU operators related to environmental conditions, in *Ergonomic Aspects of Visual Display Terminals*, (E. Grandjean et al. ed.), 85-94, Taylor & Francis, London (1980)
- 1-2) H. Krueger : Ophthalmological aspects of work with display workstations, *ibid*, 31-40 (1980)
- 1-3) 小木和孝: VDT作業の問題点とチェックポイント、*労働の科学*、37、12、4-13 (1982)
- 1-4) 武田常広、福井幸男: VDTによる近視の研究の現状、*製品科学研究所研究報告*、98、57-69 (1984)
- 1-5) 武田常広、福井幸男: VDTによる視覚機能障害研究の現状、*製品科学研究所研究報告*、98、49-55 (1984)
- 1-6) O. Östberg: Accommodation and visual fatigue in display work, in *Ergonomic Aspects of Visual Display Terminal* (E. Grandjean et al. ed.) 41-52, Taylor & Francis, London (1980)
- 1-7) R. T. Hennessy and H. Leibowitz : Subjective measurement of accommodation with laser light, *Journal of optical society of America*, 60, 12, 1700-1701 (1970)
- 1-8) W. N. Charman : On the position of the plane of stationarity in laser refraction, *American journal of optometry and physiological optics*, 51, 832-836 (1974)
- 1-9) 大頭仁: コヒーレント光による眼光学の研究、*光学技術コンタクト*、11、2、11-17 (1974)
- 1-10) H. Ohzu : Application of laser in ophthalmology and vision research, *Memoirs of the school of science & engineering*, 40, 1-28, Waseda University (1976)
- 1-11) 坂田健夫: レーザー光によるAccommodationの測定(1)、*製品科学研究所研究報告*、73、15-18 (1974)

- 1-12) T. Iida : Accommodative response under reduced visual conditions, *Japanese Psychological Research*, 25, 4, 222-227 (1983)
- 1-13) T. Takeda, Y. Fukui, T. Iida and K. Karasuyama: An objective measurement apparatus for accommodation ability change caused by VDT work, *Journal of Ophthalmological optics society of Japan*, 6, 1, 59-66 (1985)
- 1-14) 福井幸男、武田常広、飯田健夫：視覚疲労の他覚測定のための動的屈折力測定システム、製品科学研究所研究報告、103, 3-8 (1985)
- 1-15) 笠井健、近藤、関口、藤井：眼の焦点調節における焦点深度の影響、*医用電子と生体工学*、9, 1, 26-36 (1971)
- 1-16) オートリフラクトメータAR-1100取扱説明書、朝ニデック (1982)
- 1-17) 畑田豊彦：VDTと視覚特性、*人間工学*、22, 2, 45-52 (1986)
- 1-18) J. D. フォーレイ：近未来のインタフェース、*サイエンス*、17, 12, 77-85 (1987)
- 1-19) 畑田豊彦：疲れない立体ディスプレイを探る、*日経エレクトロニクス*、444, 205-223 (1988)
- 1-20) 平田渥美、鈴木清明：3次元ディスプレイ、*テレビジョン学会誌*、41, 7, 610-618 (1987)
- 1-21) 岡本新生郎：眼科におけるME、*医用電子と生体工学*、18, 3, 1-7 (1980)
- 1-22) 外山敬介：大脳による視覚、*精密機械*、47, 9, 21-27 (1981)
- 1-23) 桜水晶徳：網膜の非線形解析、*精密機械*、47, 9, 14-20 (1981)
- 1-24) 板東武彦：小脳・大脳と焦点調節、*臨床科学*、18, 5, 605-611 (1982)
- 1-25) M. Koomen, R. Scolnik and R. Tousey : Measurement of accommodation in dim light and in darkness by means of the Purkinje images, *Journal of the optical society of America*, 43, 1, 27-31 (1953)
- 1-26) 福井幸男、武田常広、飯田健夫：水晶体屈折率測定装置、特許公告 昭63-1851 (1988)

- 1-27) J. J. Saladin, S. Usui and L. Stark : Impedance cyclography as an indicator of ciliary muscle contraction, *American Journal of optometry & physiological optics*, 51, 613-625 (1974)
- 1-28) 学版良二編：心理学研究法 3 実験Ⅱ、東京大学出版会 (1973)
- 1-29) T. N. Cornsweet and H. D. Crane : Accurate two-dimensional eye tracker using first and fourth Purkinje images, *Journal of the optical society of America*, 63, 8, 921-928 (1973)
- 1-30) H. Davson : *The eye*, Academic Press, New York (1969)
- 1-31) 池田光男：視覚の心理物理学、森北出版、(1975)
- 1-32) 笠井健、東野直巳、辻三郎：CCDイメージセンサを用いた眼球運動計測法とその測定分解能、電子通信学会論文誌、J65-D、2、274-281 (1982)
- 1-33) 板東武彦：焦点調節系と瞳孔調節系の中枢神経支配、日本生理学雑誌、47、11、705-717 (1985)

## 第2章の参考文献

- 2-1) 武田常広、福井幸男：VDTによる近視の研究の現状、製品科学研究所研究報告、98、57-69 (1984)
- 2-2) 納田昌夫：合致式レフラクトメータ、特許公告、昭52-28318、(1977)
- 2-3) 岡本新生郎：眼科におけるME、医用電子と生体工学、18、3、1-7 (1980)
- 2-4) 大島祐之：電子化レフラクトメータその1機器の原理・機構、眼科臨床医報、76、3、291-300 (1982)
- 2-5) F. W. Campbell and J. G. Robson : High-speed infrared optometer, *Journal of the optical society of America*, 49, 3, 268-272 (1959)
- 2-6) T. N. Cornsweet and H. D. Crane : Servo-controlled infrared Optometer, *Journal of the optical society of America*, 60, 4, 548-554 (1970)
- 2-7) 所敬、奥山文雄、西山文字、吉野幸夫：前面解放型赤外線オートメータの試作、日本眼科学会誌、4、1、14-19 (1983)

- 2-8)河鍋精美:各種自動レフラクトメータの比較検討、日本の眼科、54、9、797-806 (1983)
- 2-9)K.Tanii, T.Sadoyama and Y.Sanjo: Appearance of effort-dependent changes in static local fatigue. *Journal of Human Ergology*, 2, 31-45 (1973)
- 2-10)福井幸男、武田常広、飯田健夫:視覚疲労の他覚測定のための動的屈折力測定システム、製品科学研究所研究報告、103、3-8 (1985)
- 2-11)武田常広、福井幸男:検眼用視標提示装置、特許公告 昭63-5092 (1988)
- 2-12)武田常広、福井幸男、飯田健夫、鳥山一男:VDT作業による調節機能変化の他覚的測定法:テレビジョン学会技術報告、VVI66-1、37-42 (1984)
- 2-13)T.Takeda, Y.Fukui, T.Iida and K.Karasuyama: An objective measurement apparatus for accommodation ability change caused by VDT work. *Journal of Ophthalmological optics society of Japan*, 6, 1, 59-66 (1985)
- 2-14)T.Takeda, Y.Fukui, T.Iida, K.Karasuyama and T.Kigoshi: A new objective measurement method of visual fatigue in VDT work, in *Human Factors in Organizational Design and Management* (H.W.Hendrick et al. ed.), 193-197, North-Holland, Amsterdam (1984)
- 2-15)武田常広、福井幸男、飯田健夫:動的屈折力計によるVDT表示色の調節残効特性の測定、製品科学研究所研究報告、103、9-15 (1985)
- 2-16)T.Takeda, Y.Fukui and T.Iida: Accommodation after-effects with respect to CRT refresh rate. *Proceedings of the international scientific conference: Work With Display Unit*, 383-386 (1986)
- 2-17)T.Iida, T.Takeda and Y.Fukui: Visual fatigue and the dark focus of accommodation. *Proceedings of the international scientific conference: Work With Display Unit*, 871-874 (1986)
- 2-18)O.Ostberg and T.Takeda: Accommodation performance as a

function of time of day and line of view. Proceedings of the international scientific conference: Work With Display Unit, 1013-1016 (1986)

- 2-19) 武田常広、福井幸男、飯田健夫：視覚疲労測定器、特許公開番号、昭61-37129 (1986)
- 2-20) T. N. Cornsweet and H. D. Crane : Training the accommodation system. Vision Research, 13, 713-715 (1979)
- 2-21) Y. Fukui, T. Takeda and T. Iida: Dynamic optometer, US patent, No. 4772114 (1988)
- 2-22) 福井幸男、武田常広、飯田健夫：眼球屈折力測定装置、特許第1497701号、(1989)
- 2-23) 福井幸男、武田常広、飯田健夫：眼球屈折力測定装置、特許第1572763号、(1990)
- 2-24) 笠井健：焦点調節と眼球運動の協調適応制御機構、宇都宮敏男編、生体の制御情報システム、323-331、朝倉書店 (1978)

### 第3章の参考文献

- 3-1) A. Baer, C. Eastman and M. Henrion: Geometric modeling: a survey. Computer Aided Design, Vol. 11, No. 5, pp. 253-271 (1979)
- 3-2) W. Myers: An Industrial Perspective on Solid Modeling. IEEE Computer Graphics & Applications, Vol. 2, No. 2, pp. 86-97 (1982)
- 3-3) 木村文彦：エンジニアリングデータベース、精密機械、Vol. 47, No. 11, pp. 11-19 (1981)
- 3-4) 木村文彦：CAD/CAMシステム構築のための基礎技術、情報処理、Vol. 24, No. 1, pp. 17-25 (1983)
- 3-4) 鈴木宏正、木村文彦、寺沢幹雄、原田毅正、安藤英敏：プロダクトモデリングのための機械形状モデルの生成と処理、情報処理学会グラフィックスとCAD研究会シンポジウム論文集、pp. 167-174 (1986)
- 3-5) J. Kleer: An Assumption-Based Truth Maintenance System. Artificial Intelligence, Vol. 28, pp. 127-162 (1986)
- 3-6) 安藤英俊、鈴木宏正、木村文彦：機械設計のための幾何拘束処



- 理システム、情報処理学会、グラフィックスとCAD研究会資料、88-CAD-31 (1988)
- 3-7) H. Toriya, T. Satoh, K. Ueda and H. Chiyokura: UNDO and REDO operations for solid modelling, IEEE CG&A, Vol. 6, No. 4, pp. 35-42 (1986)
- 3-8) 長沢勲: 設計エキスパートシステム、情報処理、Vol. 28, No. 2, pp. 187-196 (1987)
- 3-9) 斉藤正男、溝口文雄: 知的情報処理の設計、p. 4、コロナ社 (1982)
- 3-10) 浅野俊昭、等: 光学設計エキスパートシステムの構想、情報処理学会第27回全国大会予稿集、6D-6 (1983)
- 3-11) 菊地一成、飛鳥井正道、加藤英二、佐々木貴幸、浅野俊昭: レンズ設計エキスパートシステム、情報処理学会研究報告、知識工学と人工知能、44-4 (1986)
- 3-12) Davis, R., Buchanan, B. G. and Shortliffe, E. H.: Production rules as a representation for a knowledge-based consultation system, Artificial Intelligence, No. 8 pp. 15-45 (1977)
- 3-13) Buchanan, B. G., Sutherland, G. L. and Feigenbaum, E. A.: Heuristic DENDRAL: A program for generating explanatory hypotheses in organic chemistry in Meltzer, B. and Michie, D. (Eds.) Machine Intelligence, 4, pp. 209-254, edinburgh University Press, Edinbrough (1969)
- 3-14) Barr, A. and Feigenbaum, E. A. 編、田中幸吉、淵一博監訳 人工知能ハンドブック、Ⅲ、第XII章、F、p. 178 (1984)
- 3-15) Takase, H. and Nakajima, N.: A Language for Describing Assembled Machines, Proceedings of the 1st International Symposium on Design and Synthesis, p. 600 (1984)
- 3-16) Ishida, T., Minowa, H. and Nakajima, N.: proceedings of International Symposium on Design and Synthesis (1984)
- 3-17) 石田智利、箕輪元、中島尚正: 設計対象物の非要求機能検出に関する研究、精密工学会誌、Vol. 52, No. 2, pp. 18-23 (1986)
- 3-18) 村上存、中島尚正: Feature Descriptionに基づく設計診断に関する研究、日本機械学会、精密工学会、第6回設計自動化工学講演論文集、pp. 7-9 (1988)



- 3-19) 中村篤史、中島尚正：機械構造から運動機能を自動抽出する方法の研究、日本機械学会、精密工学会、第6回設計自動化工学講演論文集、pp.1-3 (1988)
- 3-20) 武田英明、富山哲男、吉川弘之：インテリジェントCADのための設計過程の論理による形式化、第6回設計自動化工学講演論文集、pp.13-15 (1988)
- 3-21) 岸義樹：知識依存型概念設計システムの研究—数理構造の知識表現と操作—、精密工学会誌、Vol.52、No.8、pp.130-137 (1986)
- 3-22) 吉川弘之：一般設計過程、精密機械、Vol.47、No.4、pp.19-24 (1981)
- 3-23) 吉川弘之：一般設計学序説、精密機械、Vol.45、No.8、pp.20-26 (1979)
- 3-24) 原崎勇次：研究開発マネジメント、日刊工業新聞社 (1989)
- 3-25) Winston, P. H. and Horn, B. K. P.: LISP, Addison-Wesley (1981)
- 3-26) 白井良明、辻井潤一：岩波講座情報科学、人工知能、岩波 (1982)
- 3-27) 中島秀之：Prolog、産業図書 (1983)
- 3-28) Kernighan, B.W. and Ritchie, D.M. 著、石田晴久訳：プログラミング言語C、共立出版 (1981)

#### 第4章の参考文献

- 4-1) CODE V Designer's Reference Manual. Optical Research Associates (1983)
- 4-2) W. Brouwer: Matrix method in optical instruments design. W. A. Benjamin, Inc. (1964)
- 4-3) R. S. Ledley, G. C. Cheng and W. M. Ludlam: Computer ray tracing of the optical system of the schematic eye. Nature, 211, 930-932 (1986)
- 4-4) J. T. Kajiya: New techniques for ray tracing procedurally Defined objects. ACM transactions on Graphics, 2, 3, 191-181 (1983)
- 4-5) P. S. Heckbert and P. Hanrahan: Beam tracing polygonal

- objects, Computer Graphics, 18, 3, 119-127 (1984)
- 4-6) 安田、横井、鶴岡、三宅: 透明物体表示のための改良光線追跡法(2)、情報処理学会論文誌、Vol.26, No.4, 591-599 (1985)
- 4-7) A.H.Barr: Ray tracing deformed surfaces, Computer Graphics, 20, 4, 287-296 (1986)
- 4-8) T.L.Kay and J.T.Kajiya: Ray tracing complex scenes, Computer Graphics, 20, 4, 269-278 (1986)
- 4-9) S.Youssef: A new algorithm for object oriented ray tracing, Computer vision, graphics, and image processing 34, 125-137 (1986)
- 4-10) W.Newman and E.Sproull: Principles of interactive computer graphics, McGraw-Hill (1979)
- 4-11) D.Rogers and J.Adams: Mathematical elements for computer graphics, McGraw-Hill (1976)
- 4-12) PS300 User's Manual, Evans & Sutherland Co. (1983)

#### 第5章の参考文献

- 5-1) M.Born and E.Wolf: Principle of optics, Pergamon Press, Oxford (1975)
- 5-2) 福井幸男、武田常広、飯田健夫: 等価光学系の系統的生成方法、特開平3-96911(1991)
- 5-3) Y.Fukui, T.Takeda and T.Iida: Systematic generation method of relay optical systems, Applied Optics, Vol.29, No.13, pp.1947-1951 (1990)
- 5-4) 福井幸男、武田常広、飯田健夫: リレーレンズ系の組合せ方法の一般化と眼球計測への応用、日本眼光学学会誌、Vol.12, No.1, pp.59-63 (1991)
- 5-5) 久保田広、光学、岩波書店、p.22 (1964)
- 5-6) 山田幸五郎、幾何光学1、光学工業技術協会、p.245 (1981)
- 5-7) 飯塚啓吾: 光工学、共立出版、p.103 (1983)
- 5-8) 福井幸男、武田常広、岸義樹、飯田健夫: レイトレーシングと述語論理のリレー光学系設計への応用、第2回NICOGRAPH論文集、pp.143-149 (1986)
- 5-9) L.T.Sachtleben: Extending the content and expanding the

- usefulness of the simple Gaussian lens equations, RCA review, 3, 9, 340-379 (1978)
- 5-10) H. D. Crane and M. R. Clark : Three-dimensional visual stimulus deflector, Applied Optics, 17, 5, 708-714 (1978)
- 5-11) 龍岡静夫: 光工学の基礎、昭晃堂 (1984)
- 5-12) F. A. Jenkins and H. E. White : Fundamentals of Optics, McGraw-Hill (1957)

#### 第6章の参考文献

- 6-1) 福井幸男: 設計過程におけるグラフィックインターフェイス、情報処理学会グラフィックスとCAD研究会資料、25、3、113-118 (1987)
- 6-2) 福井幸男、武田常広、飯田健夫: 一軸駆動形多自由度リレー光学系、特開平1-248121 (1989)
- 6-3) 福井幸男、武田常広、飯田健夫: 位置可変形リレー光学系、特開平1-248122 (1989)
- 6-4) 福井幸男、武田常広、飯田健夫: 方向および位置可変形リレー光学系、特開平1-248123 (1989)
- 6-5) 福井幸男、武田常広、飯田健夫: 眼球屈折力測定装置、特許番号第1572763号 (1990)
- 6-6) Y. Fukui, T. Takeda and T. Iida : Dynamic optometer, U. S. Patent 4, 772, 114 (1988)
- 6-7) I. Paux and M. Pratt: Computational geometry for design and manufacture, John Wiley & Sons (1979)
- 6-8) 福井幸男、武田常広、飯田健夫: 眼球運動許容型動的屈折力計「DEMDAR」の設計とその支援プログラム、日本眼光学会誌、7、1、12-19 (1986)
- 6-9) Y. Fukui, T. Takeda and T. Iida : Development of free eye movement dynamic refractometer, Proceedings of the international scientific conference: Work With Display Unit, 1018-1021 (1986)
- 6-10) 武田常広、福井幸男、飯田健夫: 3次元オプトメータについて、あたらしい眼科、4、8、1139-1141、メディカル薬出版(1987)

- 6-11) T. Takeda, Y. Fukui and T. Iida : Three-dimensional optometer. Applied Optics, 27, 12, 2595-2602 (1988)
- 6-12) 仁田正雄: 眼科学, 文光堂 (1968)
- 6-13) 福井幸男、武田常広、飯田健夫: 3次元オプトメータの数値解析, 日本眼光学学会誌, 8, 1, 89-93 (1987)
- 6-14) 武田常広、北森俊行: 線形多人出力最適適従制御系の一設計法, 計測自動制御学会論文集, 14, 359-364 (1978)

#### 第7章の参考文献

- 7-1) 武田常広、福井幸男、飯田健夫: 多変数、多項式型測定値校正器, 特許公開番号 昭63-142215 (1988)
- 7-2) 武田常広、福井幸男、飯田健夫: 3次元オプトメータ, 製品科学研究所報告, 114, 17-29 (1989)
- 7-3) 武田常広、飯田健夫、福井幸男: VDT作業中の視覚反応特性, 人間工学, 25, 特別号, 264-265 (1988)
- 7-4) 武田常広、福井幸男、飯田健夫: 3次元オプトメータの開発と見かけの位置に対する眼の応答特性測定への応用, 計測自動制御学会, 第3回生体・生理工学シンポジウム (1988)
- 7-5) 武田常広、福井幸男、飯田健夫: 3次元オプトメータについて, あたらしい眼科, 4, 8, 1139-1141, メディカル発出版 (1987)
- 7-6) 武田常広、飯田健夫、福井幸男: VDT作業中の視覚反応特性, 人間工学, 25, 特別号, 264-265 (1988)
- 7-7) 武田常広、福井幸男、飯田健夫: 3次元オプトメータの開発と見かけの位置に対する眼の応答特性測定への応用, 計測自動制御学会, 第3回生体・生理工学シンポジウム (1988)
- 7-8) 福井幸男、武田常広、飯田健夫: 3次元オプトメータと調節・眼球運動・瞳孔面積の同時計測, 計測自動制御学会, ヒューマンインタフェース Vol. 4, No. 3, 233-238 (1989)
- 7-9) 武田常広、福井幸男、飯田健夫: 3次元オプトメータの改良, 日本眼光学学会誌, 9, 1, 136-140 (1988)
- 7-10) 板東武彦: 調節の神経解剖, 神経眼科, 5, 2, 124-130 (1988)
- 7-11) 板東武彦: 焦点調節系と瞳孔調節系の中樞神経支配, 日本生理学雑誌, 47, 11, 705-717 (1985)
- 7-12) 奥山文雄, 所敬: 自然視における目の焦点調節の測定, 計測自

動制御学会ヒューマンインタフェース部会 News and Report.  
4, 2, 27-34 (1989)

- 7-13) 河鍋楠美: 各種自動レフラクトメータの比較検討、日本の眼科、  
54, 9, 797-806 (1983)
- 7-14) H. D. Crane and C. M. Steele : Accurate three dimensional  
eye tracker. U. S. patent 4, 373, 787 (1983)
- 7-15) H. D. Crane and C. M. Steele : Accurate three-dimensional  
eyetracker. Applied Optics, 17, 5, 7-26 (1978)
- 7-16) H. D. Crane and C. M. Steele : Generation-V dual-Purkinje  
image eyetracker. Applied Optics, 24, 4, 527-536 (1985)
- 7-17) 佐藤 暹: 水晶体、毛様筋等が適応して起こす正視、弱度遠視、  
近業近視等の発生機構、臨床眼科、9, 2, 131-136 (1955)
- 7-18) T. N. Cornsweet and H. D. Crane: Training the accommodation  
system. Vision Research, 13, 713-715 (1973)
- 7-19) F. V. Malmstrom and E. J. Randle: Effects of visual imagery  
on the accommodation response. Perception & Psycho-  
physics, 19, 5, 450-453 (1976)
- 7-20) J. N. Trachman : Biofeedback of accommodation to reduce  
functional myopia: A case report. American journal of  
optometry & physiological optics, 55, 6, 400-406 (1978)
- 7-21) F. A. Young : Primate Myopia. American Journal of  
Optometry and Physiological optics, 58, 7, 560-566 (1981)
- 7-22) D. A. Goss and M. H. Criswell : Myopia development in  
experimental animals - A literature review. American  
journal of optometry & physiological optics, 58, 10,  
859-869 (1981)
- 7-23) 平田渥美、鈴木清明: 3次元ディスプレイ、テレビジョン学会  
誌、41, 7, 610-618 (1987)
- 7-24) 山崎敏正、上條憲一: VDT疲労における視覚機能の評価、人間  
工学、24、特別号、190-191 (1988)
- 7-25) 畑田豊彦: 疲れない立体ディスプレイを探る、日経エレクトロ  
ニクス、444、205-223 (1988)

## 発 表 文 献 等

### 本研究に関する発表論文

- 1) 福井幸男、武田常広、飯田健夫：視覚疲労の他覚測定のための動的屈折力測定システム、製品科学研究所研究報告、103、3-8 (1985)
- 2) 福井幸男、武田常広、飯田健夫：眼球運動許容型動的屈折力計「FEMDAR」の設計とその支援プログラム、日本眼光学学会誌、7、1、12-19 (1986)
- 3) 福井幸男、武田常広、飯田健夫：3次元オプトメータの数値解析、日本眼光学学会誌、8、1、89-93 (1987)
- 4) Y. Fukui, T. Takeda and T. Iida: Systematic generation method of relay optical systems, Applied Optics, 29, 13, 1947-1951 (1990)
- 5) 福井幸男、武田常広、飯田健夫：リレーレンズ系の組合せ方法の一般化と眼球計測への応用、日本眼光学学会誌、12、1、59-63 (1991)
- 6) 武田常広、福井幸男：VDTによる近視の研究の現状、製品科学研究所研究報告、98、57-69 (1984)
- 7) 武田常広、福井幸男：VDTによる視覚機能障害研究の現状、製品科学研究所研究報告、98、49-55 (1984)
- 8) T. Takeda, Y. Fukui, T. Iida, K. Karasuyama and T. Eigoshi:  
A new objective measurement method of visual fatigue in VDT work, in Human Factors in Organizational Design and Management (H.W. Hendrick et al. ed.), 193-197, North-Holland, Amsterdam (1984)
- 9) 武田常広、福井幸男、飯田健夫：動的屈折力計によるVDT表示色の調節残効特性の測定、製品科学研究所研究報告、103、9-15 (1985)
- 10) T. Takeda, Y. Fukui, T. Iida and K. Karasuyama: An objective measurement apparatus for accommodation ability change caused by VDT work, Journal of Ophthalmological optics society of Japan, 6, 1, 59-66 (1985)



- 12) T. Takeda, Y. Fukui and T. Iida: Three-dimensional optometer, Applied Optics, 27, 12, 2595-2602 (1988)
- 13) 武田常広、福井幸男、飯田健夫: 3次元オプトメータの改良、日本眼光学学会誌、9、1、136-140 (1988)
- 14) 武田常広、福井幸男、飯田健夫: 3次元オプトメータ、製品科学研究所報告、114、17-29 (1989)

本発表に関する特許取得および出願中の特許

- 1) 福井幸男、武田常広、飯田健夫: 水晶体屈折率測定装置、特公昭63-1851 (1988)
- 2) Y. Fukui, T. Takeda and T. Iida: Dynamic optometer, US patent No. 4772114 (1988)
- 3) 福井幸男、武田常広、飯田健夫: 眼球屈折力測定装置、特許第1497701号、(1989)
- 4) 福井幸男、武田常広、飯田健夫: 眼球屈折力測定装置、特許第1572763号 (1990) (昭和63年度注目発明選定)
- 5) 福井幸男、武田常広、飯田健夫: 光学系の屈折力の測定装置、特許第1633117号 (1992)
- 6) 福井幸男、武田常広、飯田健夫: 一輪駆動形多自由度リレー光学系、特開平1-248121 (1989)
- 7) 福井幸男、武田常広、飯田健夫: 位置可変形リレー光学系、特開平1-248122 (1989)
- 8) 福井幸男、武田常広、飯田健夫: 方向および位置可変形リレー光学系、特開平1-248123 (1989) (平成2年度注目発明選定)
- 9) 福井幸男、武田常広、飯田健夫: 等価光学系の系統的生成方法、特開平3-96911 (1991)
- 10) 福井幸男、武田常広、飯田健夫: 高精度ガルバノミラー駆動系、特願平2-189621 (1990)
- 11) 武田常広、福井幸男、飯田健夫: 視覚疲労測定器、特公昭61-37129 (1986)
- 12) 武田常広、福井幸男: 検眼用視標提示装置、特公昭63-5092 (1988)
- 13) 武田常広、福井幸男、飯田健夫: 頭上搭載型3次元オプトメータ、



- 特公平3-15894 (1991)
- 14) 武田常広、福井幸男: 三次元オプトメータ用光学リレー系、  
特公平3-15895 (1991)
- 15) 武田常広、福井幸男: 両眼視機能測定装置、特許公告、  
特公平3-15896 (1991)
- 16) 武田常広、福井幸男: 高精度眼球運動測定装置、  
特開昭63-54145 (1988)
- 17) 武田常広、福井幸男: 眼球運動許容型瞳孔計、  
特開昭63-302819 (1988)
- 18) 武田常広、福井幸男: 多変数多項式型測定値校正器、  
特開昭63-142215 (1988)
- 19) 武田常広、福井幸男: 高感度・高解像度半導体位置検出器、  
特開昭63-222203 (1988)
- 20) 武田常広、福井幸男、飯田健夫: 多変数多項式型測定値校正器、  
特開昭63-142215 (1988)
- 21) 武田常広、福井幸男、飯田健夫: 調節・輻輳同時計測装置、  
特開平3-21222 (1991)

#### 本研究に関する口頭発表

- 1) 福井幸男、武田常広、岸義樹、飯田健夫: レイトレーシングと  
述語論理のリレー光学系設計への応用、第2回NICOGRAPH論文集、  
pp. 143-149 (1986)
- 2) Y. Fukui, T. Takeda and T. Iida: Development of free eye  
movement dynamic refractometer, Proceedings of the  
international scientific conference: Work With Display  
Unit, 1018-1021 (1986)
- 3) 福井幸男、武田常広、飯田健夫: 3次元オプトメータの誤差  
解析、第22回日本眼光学学会予稿集、p. 4 (1985)
- 4) 福井幸男: 設計過程におけるグラフィックインターフェイス、  
情報処理学会グラフィックスとCAD研究会資料、28、3、113-118  
(1987)
- 5) 福井幸男、武田常広、飯田健夫: 3次元オプトメータと調節・  
眼球運動・瞳孔面積の同時計測、計測自動制御学会、ヒューマ

ンインタフェース Vol. 4. No. 3. 233-238 (1989)

- 6) 武田常広、福井幸男、飯田健夫、鳥山一男: VDT作業による調節機能変化の他覚的測定法: テレビジョン学会技術報告、VV166-1、37-42 (1984)
- 7) T. Takeda, Y. Fukui and T. Iida : Accommodation after-effects with respect to CRT refresh rate. Proceedings of the International scientific conference: Work With Display Unit, 385-386 (1986)
- 8) T. Iida, T. Takeda and Y. Fukui : Visual fatigue and the dark focus of accommodation. Proceedings of the international scientific conference: Work With Display Unit, 871-874 (1986)
- 9) 武田常広、飯田健夫、福井幸男: VDT作業中の視覚反応特性、人間工学、25、特別号、264-265 (1988)
- 10) 武田常広、福井幸男、飯田健夫: 3次元オプトメータの開発と見かけの位置に対する眼の応答特性測定への応用、計測自動制御学会、第3回生体・生理工学シンポジウム (1988)
- 11) 武田常広、飯田健夫、福井幸男: VDT作業中の視覚反応特性、人間工学、25、特別号、264-265 (1988)



