

# IMAD: 操作とその表示を統合した設計支援システムの実装

御手洗 潔\*・田中 二郎\*\*

IMAD: An Implementation of Design Support System  
Based on Integration of Manipulation and Display

Kiyoshi MITARAI\* and Jiro TANAKA\*\*

A lens design is usually designed using a program based on ray tracing algorithm. In addition, lens designers must satisfy the complicated constraints about the production of optical equipments. Therefore, when designers perform a hand-operated design, we support that the designers change the lens shape and lens power layout, just as wanted, and do higher-level judgement for the optical performance improvement. We integrated *Modification of Design Parameters, Optical Calculation, Result Indication* and *Judgement of Optical Performance*, which are the four basic operations of the lens design, and implemented lens design support tool IMAD by using this technique. Furthermore we show the effectiveness of IMAD based on the result of the evaluation experiment.

**Key Words:** lens design, user interface, direct manipulation, animation, stacked display

## 1. はじめに

最近の VLSI 技術の発展とともに、CCD/CMOS などの撮像素子を用いたデジタルカメラが普及してきている。デジタルカメラのレンズ設計では、デジタルカメラの撮像素子の画素ピッチの微細化やデジタル画像の出力機器の 1 つである液晶ディスプレイの大画面化などにより、スポットダイアグラムのスポットサイズ<sup>1)~3)</sup>や収差<sup>4)~7)</sup>を従来より小さくする必要がある。また、手振れ補正機能やズームレンズの高倍率化などエンドユーザの要望を満足させる、より高性能なレンズ設計が求められる。同様に、ほかの光学機器についても目を追うごとにレンズ性能に対するユーザの要求は高まっている。

通常レンズ設計は光線追跡アルゴリズム<sup>8),9)</sup>をベースとしたプログラムにより設計(収差補正)されるが、極めて困難な問題として知られている<sup>10)</sup>。このことはレンズ系が有する設計パラメータ(たとえばレンズの曲率半径、レンズの厚さ、レンズの間隔、レンズに使用する硝子の種類など)空間の多次元性に由来している。加えて、設計者は光学機器の製造に関わる複雑な制約条件を満足する設計をしなければならないことも、難しさの要因の 1 つと考えられている。そのためレ

ンズ設計には減衰最小二乗法(DLS)<sup>11),12)</sup>、遺伝的アルゴリズム(GA)<sup>13)~15)</sup>などの最適化手法を用いた自動収差補正プログラムを用いることが多いが、初期データの作成やローカルミニマムからの脱出には手動設計が必要である。

そこで、われわれは設計の原点に立ち返り、設計者が手動設計を行う際にレンズ形状や power 配置<sup>16)</sup>などのレンズ構成を思い通りに変更することやよりよい性能改善のために必要な直感的なひらめきやアイデアの実現、設計者のより高度な判断処理を促進させることを目標にした。また、設計者にとって最も自然かつ直接的な方法、たとえば芸術作品を直接手でさわって仕上げるような操作感を設計ツールで実現することを目的とした。そのために、設計者が手動設計にて行う 4 つの基本動作である設計パラメータの変更、光学計算、結果表示、判断をディスプレイ上で統合し、直接操作感を持ったユーザインタフェース手法<sup>17)</sup>を考案した。

本論文では、まず最初にレンズ設計プロセスの問題点を分析する。この分析結果により従来の方法やほかのシステムを鑑みたうえで、設計者の持つ直感的なひらめきやアイデア実現の支援および設計者のより高度な判断処理を促進させるためのユーザインタフェースを設計し、その実装方法について述べる。さらに、実験対象者による設計評価実験結果および設計実務経験者の評価をもとに手法の有効性を示す。最後に関連研究とともに本研究についてまとめる。

## 2. レンズ設計プロセスの分析と問題点

本章で述べる初期データ作成、手動収差補正、自動収差補正それぞれの問題点は従来からあるレンズ設計プログラム全

\* 株式会社ニコン

\*\* 筑波大学大学院システム情報工学研究科

\* Nikon Corporation, Shinagawa-ku, Tokyo

\*\* Graduate School of Systems and Information Engineering, University of Tsukuba, Tsukuba-shi, Ibaraki

(Received August 2, 2010)

Table 1 Example of lens data

Surface No.	Radius	Thickness	Diameter	Material
				air
1	60.638	3.0	17.870	BK7
2	-35.444	0.05	17.764	air
3	-35.877	1.5	17.736	F2
4	-147.1947	-	17.613	air

体に言えることである。一般的に、初期データの作成および自動収差補正では手動設計は必須であり、初期データの作成および自動収差補正での問題点の解決方法の1つは手動設計に集約される。本システムとほかのレンズ設計プログラムでの手動設計におけるユーザインタフェースの考え方の違いについて、詳しくは6章の関連研究で述べる。

### 2.1 初期データ作成時の問題点

レンズ設計を行う際、手動による収差補正あるいは自動収差補正プログラムを利用するにせよ、設計を始める初期データが良くないと膨大な時間をかけた設計操作/光学計算を行ってもあまり良い結果は得られない。すなわち、最初にいかに素性がよく、潜在的に優れた能力を持つ初期データを見つけることができるかがレンズ設計では重要である。そのためには、すでに設計された過去のデータの中からこれから設計する光学系の設計仕様に近いものを選び、power 配置などの光学系の持つ基本構造と性能の関係を十分に吟味する必要がある。初期データの作成はほとんどの場合、手動による設計で行なわれ、このステップの作業効率化が図れば、設計時間を大幅に短縮することが可能となる。

### 2.2 手動収差補正の問題点

手動で収差補正を行なう場合、設計パラメータの変更方法はキャラクタコマンド入力(特定の入力領域より実施する機会が多い)とスプレッドシート形式による入力方法がある。手動で収差補正を行う場合の第1の問題点はレンズデータ(Table 1)<sup>(注1)</sup>とレイアウト図(Fig. 1)のレンズ面の面番号の対応が取れないことである。

キャラクタコマンド入力により設計パラメータを変更する場合には必ず面番号が必要となる。Fig. 1のようにレンズが2枚程度であればレイアウト図より簡単に面番号を把握できる。しかしながら、数十枚とレンズ枚数が増えるとレンズ面を数える必要がある。いったん数えたレンズ面番号を暗記すればよいという考え方もあるがレンズ構成を大きく変更したり、仮想面<sup>(注2)</sup>を多用すると数えなおしや数え間違い、勘違いが多くなる。レイアウト図のレンズ面に引き出し線をつけて面番号を表示するという方法もある。しかし、レイアウト図が見づらくなるといった欠点がある。また、スプレッドシート形式(イメージとしてTable 1の内容をそのままスプ

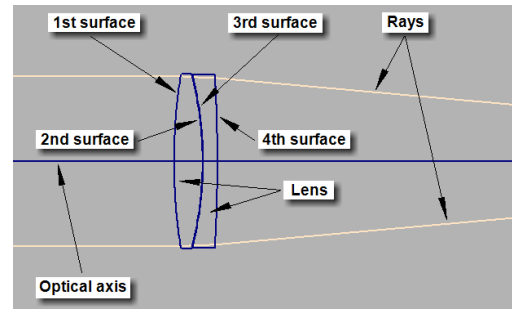


Fig. 1 Lens layout

レッドシートのセルへマッピングしたもの)の場合はキャラクタコマンド入力の場合と比べてレンズデータ全体を一覧できるという利点はある。しかしながら、実際の設計では設計パラメータの変更の際には変更したい設計パラメータのセルにマウスを移動し、数値をキー入力して設計パラメータを変更しなければならず、本質的にはキャラクタコマンド入力方式となら変わらない。また、スプレッドシートの面番号のセルとレイアウト図のレンズ面は依然として対応が付かないままである。セルの面番号の値に対応するレイアウト図のレンズ面をハイライトさせる実装例(ZEMAX)<sup>(注3)</sup>もあるが、レイアウト図とスプレッドシートが重なってしまい見づらといった欠点がある。以上の理由により『レイアウト図のレンズ面とレンズデータの面番号の対応』については根本的に解決していない。

一方で、設計者は設計パラメータの変更により、変更前より良くなったのかあるいは悪くなったのか、現状よりさらに収差補正状態を良くするためにはどの設計パラメータを変更すべきなのか、現状の収差補正状態から数ステップ、あるいは数十ステップ前へ戻り、光学系の構成を新しい視点から見直すべきか、あるいは、現状の収差補正状態に行きづまっているのであれば、レンズ系の構成を大胆に変更すべきであるか、といった多種多様の判断を求められている。このような設計者の置かれた状況を考えると手動設計の場合、さらに以下の問題点が考えられる。

- 設計パラメータ変更による収差値/レイアウト図の変化が把握しづらい
- 収差値を壊してしまったときにすぐに戻せない
- 設計パラメータの変更を何ステップも素早く戻せない

### 2.3 自動収差補正の問題点

計算機の高性能化および個人利用が一般的になったことにより、自動収差補正プログラムを利用する機会が増えている。前述したDLSやGAなどの最適化手法を利用した自動収差補正プログラムは数式を用いて、計算機上でいろいろ工夫した計算/評価を行っているが、計算結果の解釈が設計者の解釈と一致していないことが多い。

このことは、自動収差補正プログラムが計算を進めていく

(注1) 小穴 純: 幾何光学, (株)新技術コミュニケーションズ, pp. 228 (1986) の表 4-2 を一部改変して転載し, レイアウト図として表示したものが Fig. 1 である。

(注2) 設計の都合上挿入する曲率ゼロの面で, 面の前後の屈折率は 1.0 (空気) とする場合が多い。

(注3) <http://www.zemax.com/>

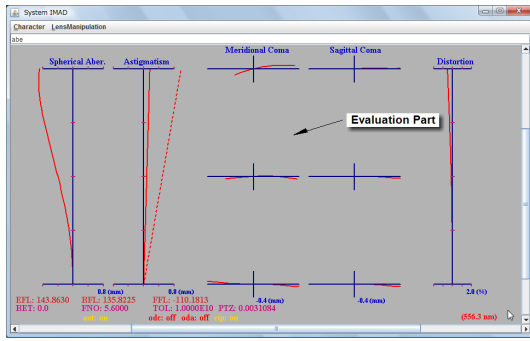


Fig. 2 A snapshot of aberration diagram

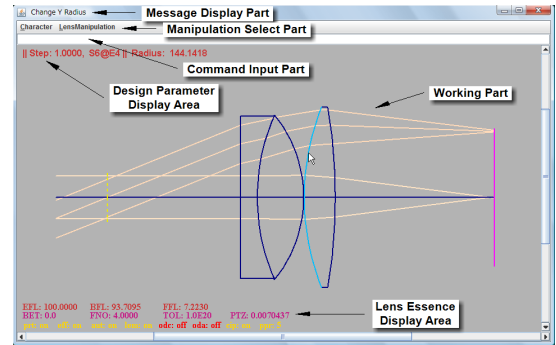


Fig. 3 A snapshot of tool IMAD

過程で、次々に訪れる場面（設計解探索の途中の状態）での適切な判断ができず、複数の場面の前後関係やこの場面が実際のレンズ系とどのような関係にあるかを自動収差補正プログラムは認識/評価することが難しいからである。これは、たとえるならば広大な樹海の中で迷子になり、進んでも進んでも元の場所に戻ってしまい、安全な遊歩道へ辿りつけない状態に似ている。

また、ローカルミニマム状態に陥ってしまうとなかなかその状態から抜け出せないという問題点がある。ローカルミニマム状態からの脱出には手動設計が必要となる。

#### 2.4 問題解決へのアプローチとシステム設計

**アプローチ** 本研究では、初期データ作成やローカルミニマム状態からの脱出に必要な、言わば設計の原点である手動設計を支援するユーザインタフェースを実現する。設計者にとって最も自然かつ直接的な方法、すなわち、レンズを直接手でさわるような操作感を実現したいと考えている。また、ひらめきやアイデアをより効果的に実現し、設計者のより高度な判断処理を促進させることを目標としたユーザインタフェースを実現する。

たとえば、設計者が自動収差補正プログラムを実行中にローカルミニマム状態に陥った場合、その状態から脱するには手動設計が不可欠であり、現在の収差の値を壊してレンズ構成を変更する必要がある。そのとき設計者はレンズの形状、レンズ系を通過する光線の状態を二次元あるいは三次元の図形パターンとして視覚的に認識し、さらに収差などの評価値、レンズ群の power 配置や過去の経験などを基に高度な判断処理を行い、自動収差補正プログラムに与えるレンズデータや自動収差補正プログラムの束縛条件を変更している。

設計者は手動設計による収差補正あるいは自動収差補正プログラムを利用するにせよ、設計の最初から最後までレイアウト図 (Fig. 1) と収差図 (Fig. 2)<sup>(注4)</sup>は必ず見ている、つぎに行うべき事を考えている。すなわち、レンズ設計におけるすべての判断処理はレンズの形状、レンズ系を通過する光線の状態の図形パターン、収差図をベースに

行っている。

**システム設計** 以上のことを鑑みて、われわれが設計するユーザインタフェースは Fig. 3<sup>18)</sup>に示すレイアウト図を中心としたグラフィカルユーザインタフェース (GUI) とすべきであると考えた (以降、ユーザインタフェースはグラフィカルユーザインタフェースを意味する)。われわれが設計したユーザインタフェースはレイアウト図を見ていれば、設計者が行う 4 つの基本動作である、設計パラメータの変更、光学計算、結果表示、判断の設計サイクルがスムーズに進行するように、ディスプレイ上のレイアウト図で 4 つの基本動作を統合し、さらに直接操作感を持たせた。

レイアウト図での 4 つの基本動作の統合および直接操作感も持ったユーザインタフェースを実現するにあたっては 1 つのウィンドウの中に複数のウィンドウを作成する Multiple Document Interface (MDI) ではなく、1 つのウィンドウにすべての情報を表示させる Single Document Interface (SDI) を採用し、複数のウィンドウの重なり操作の煩わしさを軽減するようにした。以下われわれが設計したユーザインタフェースの概要を述べる。

レイアウト図はマウスのドラッグにより生成される四角形で指定した範囲を拡大、Esc キーとマウスクリックで縮小可能とした。マウスのドラッグ操作でレイアウト図の上下左右の平行移動を可能とし、レイアウト図の細部を確認しやすくした。さらに、マウスクリックで、拡大/縮小/平行移動した状態を元の状態に戻せるようにした。レイアウト図のレンズ面または面と面間の光軸をマウスポインタで直接ピックすることにより、レンズ面や光軸の面間隔部分を紺色からライトブルーに変化させ面番号やレンズのエレメント番号を認識するようにした。また、↑ or F3 キーを押すことによりあらかじめ設定された変化量を設計パラメータに加え、↓ or F1 キーを押せば変化量を設計パラメータから減らすようにし、即座に設計パラメータの変化に応じた光学計算を行い、レイアウト図をリアルタイムに再描画すると同時に、変更している面番号の設計パラメータの数値を表示するようにした。

設計を進める上で設計パラメータの変化とともにレイアウト図と収差図は頻繁に表示する。レイアウト図について

(注 4) 中川治平, レンズ設計光学, 東海大学出版会, pp.25 の図 2.16 を基に著者が実装した。

S0	0.0	1.0E20	
S	0.0	78.20844	
ST0			
S	0.0	9.995966	'GLASS_A'
S	118.2323	27.34896	'GLASS_B'
S	-76.48913	0.3998387	

Fig. 4 Data which are based on CODE V

は常時表示させているが、収差図は単独あるいは同時に重ねて表示<sup>19)</sup>(リアルタイムに描画)させる機能を持たせた。重ね表示方法は収差図を背景に、前景にレイアウト図を重ねて表示するようにした。本システムでは情報の視認性を損なうことなく重ね表示可能としている。

### 3. Integration System of Manipulation and Display (IMAD) の概要

本章では前章でわれわれが考案したユーザインタフェースを有するシステム IMAD の概要を説明する。IMAD はレンズ設計の基本動作である、設計パラメータの変更、光学計算、結果表示、判断をディスプレイ上で統合し、直接操作感を有したユーザインタフェースを特徴とする設計ツールであり、以下のレンズ操作機能を備えている。

- 曲率半径の変更
- 面間隔の変更
- 硝子の変更
- レンズの追加/削除
- レンズの移動
- レンズの分割/貼り合わせ
- レンズの反転
- 絞り面の変更

これらは Fig. 3 の Working Part のレンズ図形に対して直接操作され、操作された結果はリアルタイムに Working Part に反映される。さらに、レンズの性能評価機能として収差図を表示することも可能である。

#### 3.1 IMAD の画面説明

システム IMAD は Fig. 4 に示す CODE V<sup>(注5)</sup> 準拠のデータを読み込むと最初に、画面の Working Part にレンズ系のレイアウト図をレンズ系の全体が Working Part に収まるように表示スケールを調整して表示する (Fig. 3)。Working Part (画面中央) はレンズ系のレイアウト図を表示し、レンズ設計作業を行う部分である。Working Part の左上は Design Parameter Display Area である。Design Parameter Display Area には Step (1 回のキー操作で変化する設計パラメータの量)、設計操作の対象となる面番号@レンズエレ

(注5) <http://www.opticalres.com/>

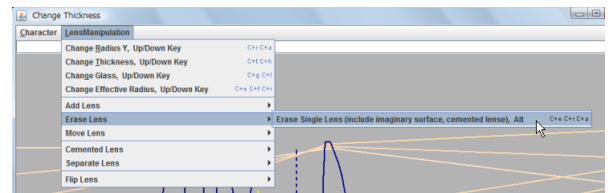


Fig. 5 Select erase lens operation by pull down menu

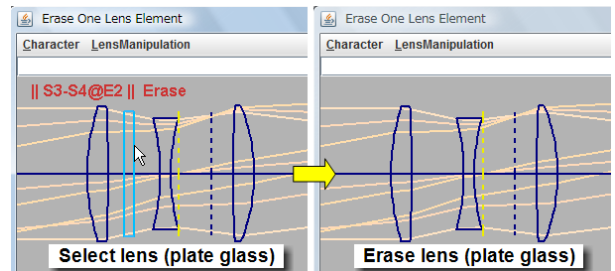


Fig. 6 Select erase lens and operation

メント番号 (||S 正整数@E 正整数 ||), 設計パラメータの種類 (Radius, Thickness など), 設計パラメータ値の変化をリアルタイムに表示する。さらにその上方に Command Input Part, Manipulation Select Part, Message Display Part を用意した。Command Input Part はレンズデータの入出力など補助的に用いるキャラクタコマンドを入力する部分である。Command Input Part と Working Part はフォーカスを同時に持つことができないのでフォーカスの切り替えが必要である。切り替え方法は Tab キーあるいはマウスクリックで行い、Command Input Part が桃色だとフォーカスを持っている状態を表し、白色だと Working Part がフォーカスを持っている状態を表している。

Manipulation Select Part ではレンズ設計に必要な操作をプルダウンメニューにより選択でき、Message Display Part には入力されたレンズデータ名、エラーメッセージなどの補助的なメッセージを表示する。また、Lens Essence Display Area には入力したレンズデータが有する、焦点距離などの光学系の本質にかかわるデータを表示している。この領域も Design Parameter Display Area と同様に設計パラメータの変化とともにリアルタイムに変化する。

#### 3.2 IMAD のレンズ構成変更方法

本節ではレンズ設計のためのレンズ構成の変更方法について説明する。レンズ構成の変更は、レンズの追加/削除、移動、分割/貼り合わせ、反転および絞り面の変更の 7 種類で行う。選択したレンズまたは仮面に対して 7 つの変更は実施される。変更方法は 7 つとも同様 (ただし、反転の場合は異なる) なので、レンズの削除を例に説明する。

##### (1) レンズ削除モードへの移行:

モード変更方法は 2 種類ある。1 つは LensManipulation のプルダウンメニューからの選択ともう 1 つはショートカット (Ctrl+e Ctrl+r Ctrl+a) による方法である。プルダウンメニューからのレンズ削除 (Erase Single Lens) 選択の



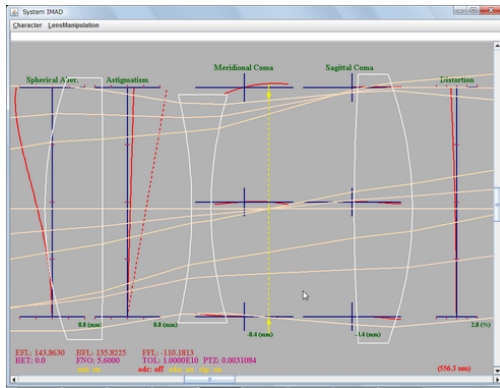


Fig. 7 A example of stacked display

様子をに示す (Fig. 5). Ctrl+e Ctrl+r Ctrl+a は Ctrl を押しながら e, r, a<sup>(注 6)</sup> と連続してキーを押すことによりプルダウンメニューからの選択と同様にレンズ削除モードへ移行する。

#### (2) 削除レンズの指定:

レンズ指定方法は 2 種類ある。1 つはマウスポインタをレンズ面に近づけ、マウスの左ボタンをクリック (選択レンズがライトブルーにハイライト) し選択する方法。もう 1 つは ← または → キーを押すことでハイライトしているレンズを順次左または右に移動させて選択する方法である。マウスポインタによる削除レンズの選択の様子を示す (Fig. 6 の左側)。2 つの方法ともにレンズが選択されるとそのレンズに属する面番号、レンズエレメント番号が Working Part の左上の Design Parameter Display Area に表示される。

#### (3) 削除の実行:

Alt キーを押すと削除が実行され (Fig. 6 の右側)、ニュートラルモードに移行する (ただし、反転の場合は ↑ / ↓ キーを使用する)。

### 3.3 重ね表示

本システムの特徴の 1 つに重ね表示がある。設計時における Working Part ではレイアウト図を常に表示している。設計がある程度進展して、レンズの形状や像面での光線の収斂状態が良くなり、レンズ形状と光線の通過状態の全体のバランスが整ってくると収差が気になってくる。そのときは収差図を見ることが多いが、設計パラメータの値を変更して、レイアウト図を確認し、それから収差図に切り替えるのは煩雑なことである。また、設計パラメータ値の変更に対してリアルタイムに細かい収差のバランスをとりながら、さらにレイアウト図を確認しながら設計を進めたい状況もある。方法としてレイアウト図、収差図を別ウィンドウにすると見たいウィンドウを最前面にする必要があり、確認したいウィンドウを最前面にする操作が常に必要である。レイアウト図、収差図双方を縮小して Working Part 内に収まるようにして同時に表示するという選択肢もあるが、細部が見づらいといっ

(注 6) Erase の最初の 3 文字 era でレンズ削除コマンドを表している。

た難点がある。

そこで本システムではレイアウト図を前景、収差図を背景に重ねて表示するようにした。オプション Overlap Display Aberration (oda) on 状態で、Ctrl+z により背景に収差図を表示するようにし、再び Ctrl+z で背景の収差図を非表示にしている (Fig. 7)。重ね表示ではレイアウト図のレンズ図形は紺から白へ変更することにより、レイアウト図と収差図の双方を認識しやすくした。前景は拡大/縮小/平行移動/リセット (最初にデータを読み込んだ時に表示される状態) が可能である。Ctrl+x (再び Ctrl+x でもとに戻る) により前景のレイアウト図と背景の収差図を交換可能とし、レイアウト図と収差図双方で拡大/縮小/平行移動/リセットが行えるようにした。さらに、レンズ系を構成する英字/数値情報であるレンズデータ (曲率半径、面間隔、硝子名、屈折率など) も重ねて同時に表示させるようにした。本システムでは最大 3 種類の情報の視認性を損なうことなく重ね表示可能とした。

### 3.4 拡大/縮小/平行移動/リセット

設計操作をする際に Working Part の図を拡大/縮小、上下/左右の平行移動を行えるようにしている。拡大方法はマウスの左ボタンを押した状態でドラッグすると、マウスボタンを押した時点でのマウスポインタの位置を始点として青い枠が表示されるので拡大したい部分を枠内に収め、ボタンのリリースで青い枠内が Working Part に収まるように拡大される。Working Part 内でマウスの右クリックでリセットされる。

縮小については 1 回の操作で現在の表示状態から 13% (5 回の操作でリセットからの線分比で約 0.5 倍) の縮小を行うようにした。マウスの右ボタンを押した状態でドラッグすると、マウスポインタの動きに応じて Working Part 内の図は上下/左右に平行移動する。

## 4. 実 装

本章ではシステム内のレンズデータ構造、処理方式、IMAD のプログラム構成について記述する。

### 4.1 レンズデータ構造

光学計算、設計操作、ユーザインタフェースに影響を与えるシステム内のレンズデータ構造は、システムを構成する上で極めて重要である。従来から用いられている面単位でのデータ管理方式では曲率半径、面間隔、硝子名、屈折率などのデータ管理を配列構造で行っている。一方、レンズ単位のデータ管理方式ではレンズ単体 (物面、像面、絞り、仮想面もレンズとして扱う) を 1 単位としてレンズオブジェクトを要素とする双方向リスト構造 (以降リスト構造と記述) で実現している。

われわれはユーザインタフェースの実装にあたり、面単位のデータ管理方式とレンズ単位のデータ管理方式について考察を行った。Table 2 にそれぞれのデータ構造を用いた場合に期待できる、システムとしての優位性についての星取り表を示す。星取り表に示すようにリスト構造は光線追跡アルゴ

Table 2 Comparison of system advantage by difference of data structure

Comparison item	Data structure(unit to handle data)		
	Surface unit	Lens unit	Lens unit+surface unit(with delay operation)
Design operation	×		
Performance of ray trace		×	
Expansibility			
Implementation cost			

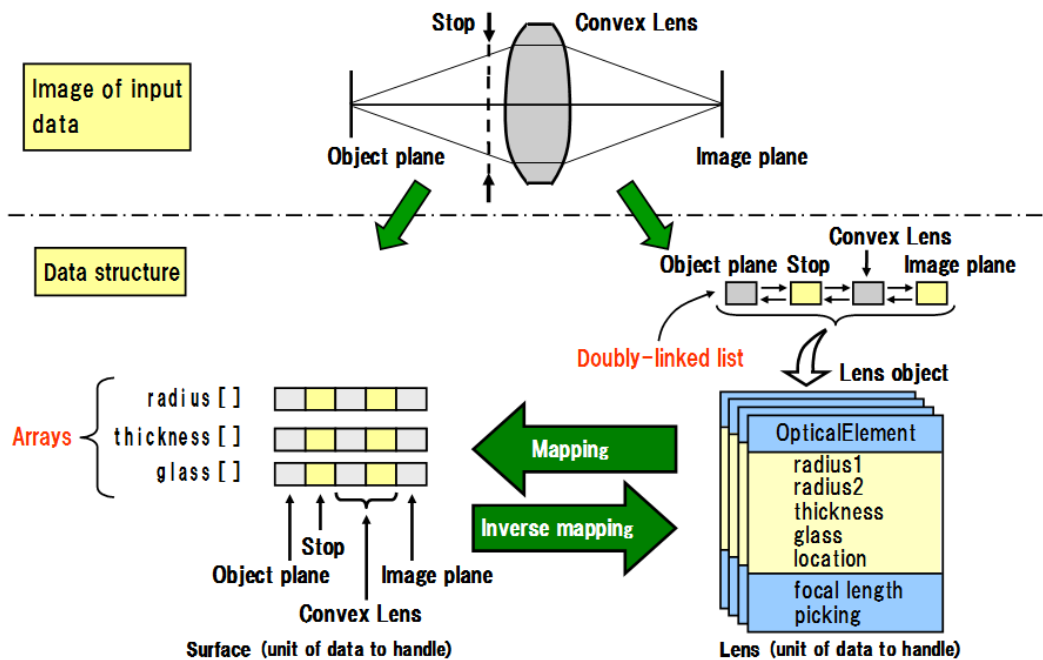


Fig. 8 System of multiple data management

リズムとの親和性が良くない．リスト構造はレンズの追加/削除などの設計操作性との相性は良いが，高速のメモリアクセスには難点がある．配列構造を実現するメモリの連続領域で，光線追跡アルゴリズムは威力を発揮する．しかしながら，設計操作性（データ操作性）はあまり良くない．

そこで，それぞれの欠点を補うために，われわれは従来の面単位のデータ管理方式の代わりに，レンズ単位のデータ管理を主に，面単位のデータ管理を補助的に用いる複合データ管理方式 (Fig. 8) を採用した．また，レンズ1個をレンズオブジェクトに対応させ，レンズオブジェクトは `OpticalElement` クラスで定義した．`OpticalElement` クラスは Fig. 8 に示すように曲率半径，レンズ厚，硝子名，屈折率，レンズ配置位置などのデータを規定している．1個のレンズは `OpticalElement` クラスのインスタンス化の際，パラメータの与え方により仮面オブジェクト，1枚レンズオブジェクト，2枚貼り合わせレンズオブジェクト，3枚貼り合わせレンズオブジェクトとして生成される．レンズが1個，絞り1個のレンズ系のデータをシステムに入力すると Fig. 8 のように4個の `OpticalElement` クラスのインスタンスをリストに格納し，同時に配列データとしても格納される．この複合データ管理方式により，われわれが考案したユーザインタフェースおよび光線追跡は効率

よく実装できる．そしてシステムの拡張性に優れた実装を可能にする．

複合データ管理方式では適宜リスト構造，配列構造双方のデータの同期を取る必要がある．リスト構造 ⇒ 配列構造への同期をマッピング，配列構造 ⇒ リスト構造への同期を逆マッピングと定義した．設計操作では必ず光線追跡を実行するが，光線追跡は配列構造のデータを使用している，リスト構造のデータは使用していない．したがって，リスト構造に変化があると直ちにマッピングを行う必要がある．一方，配列構造に変化があっても逆マッピングはすぐに行わなくてよい．逆マッピングを行うタイミングはリスト構造に変化があった場合に行えば良い．すなわち，逆マッピングはつぎにリスト構造の変化があるまで逆マッピング実施の遅延が許される．われわれはこのことを遅延操作と呼んでいる．

#### 4.2 処理方式

本節では Working Part での処理方式について説明する．Working Part (`OpticalSystem` クラス) は `VCanvas` クラス (グラフィックツール) のサブクラスとして定義され光学計算，光線描画，レンズ図形描画，レンズ/面間隔ピックアップ処理などをスケジュール化した関数 `OpticalScheduler` を有している．`OpticalSystem` クラスがインスタンス化されると

同時に Working Part 専用のマウスイベントスケジューラとキーイベントスケジューラが利用可能となるように実装している。マウスイベントスケジューラはマウス操作に関わる一連の処理を行い、キーイベントスケジューラはキー操作に関わる一連の処理を行う。マウスによる Working Part 内の表示の拡大/縮小/平行移動/リセット、設計対象面選択あるいはキー操作を行うとマウス操作ではマウスイベントスケジューラ、キー操作ではキーイベントスケジューラが起動し、その後直ちに OpticalScheduler を起動することで、設計操作のための光学計算、表示などすべての処理を直接操作感を持ってリアルタイムに Working Part 内に反映させている。また、設計パラメータ変更モードで↑/↓キーを押し続けると連続的にキーイベントが発生し、設計パラメータの変化とともにレイアウト図や収差図の変化の様子を簡易的にアニメーションとして見ることもできる。本システムの処理はすべて、イベント駆動により処理されている。

#### 4.3 開発環境およびプログラム構成

ほかのレンズ設計ツールにおいては光学計算部分はレガシー言語である FORTRAN, C などで実装されていることが多いためレガシーシステムとなっている場合が多い。本システムではレンズ面選択などはマウスポインタによる直接操作感を持ったユーザインタフェースを用い、さらにリアルタイムに光学計算結果を表示させるためにイベント駆動方式を採用している。また、レンズ単体を基本単位としたレンズオブジェクトと配列構造のレンズデータ用をいた複合レンズデータ構造を採用している。また、昨今のインターネットの普及も考慮してプログラムの利用に際し、インターネット透過性をもたせることにした。上記の内容を比較的容易に実現できる言語として Java があり、光線追跡などの光学計算部分を含めてオール Java で実装することにした。

Java コンパイラおよび java 実行環境は javac 1.5.0.16, Java (TM) Platform, Standard Edition Edition for Business (build 1.5.0.16-b02) を使用し、実行形態はアプリケーション/アプレットの双方に対応した。グラフィカルユーザインタフェースを構築するためのツールキットは Swing を使用した。プログラムはアクション設定、イベント処理、グラフィックツール、GUI ツール、レンズデータ構成および入出力、メイン処理、ユーティリティの7つのパッケージから構成されている。プログラムは 250 個のクラスを約 51,100 行で定義し、実際に使用したクラスは 181 個であり、約 27,400 行となっている。

## 5. 評価

本章では、われわれの考案したユーザインタフェースの有効性を検証するにあたり、どのような評価実験を行えば良いかを検討するために、まず予備的な評価実験を行った。その結果に基づき実験内容を決定し、本評価実験を行った。さらに設計実務経験者に本システムを使用してもらい、評価してもらった。この評価実験では single surface model (ssm) と

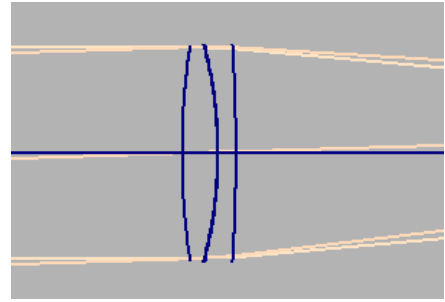


Fig. 9 Lens shape only in surface

lens element model (lem) の2つの方式を比べて設計操作の優位性について調べる。

#### 5.1 予備評価実験

予備評価実験では single surface model (ssm) と lens element model (lem) の2つの方式にて実際にレンズ設計を行ってもらい、比較対象とした。ssm 方式と lem 方式はいずれも本システムで実現している。ssm 方式と lem 方式の本質的な違いは Character User Interface (以後 CUI と記述) と GUI および設計パラメータデータの実装の方法にある。詳しくは以下のようなものである。

##### ● ssm 方式

ssm 方式は独立した面が順に並んだ考え方で、レンズを1つのエレメント単位とは考えていない。レイアウト図ではレンズに見えるが、便宜上レンズの形で表示しているに過ぎない (Fig. 9 は Fig. 1 に対してレンズ形状処理を行なわなかった場合)。設計操作はすべて指定された面に対して行なわれる。CODE V などの市販のレンズ設計ツールで採用されている。代表的なレンズ設計ツールである CODE V<sup>(注7)</sup>に準じた CUI 方式を模倣し、実装した。ssm 方式では CUI 形式で設計を行う。また、自動描画は機能せず、CUI による表示更新が必要である。本システム内に擬似的に独立した面が順に並んだデータ構造をシミュレートし実装した。

##### ● lem 方式

一方、lem 方式は本システムで採用したレンズ単位の詳細データ構造+面データ(補助的)を有し、CUI 機能に加えて直接操作感のある GUI、表示においては SDI を特徴としている。

予備評価実験では以下の4項目についての精査を行うことを目的とした。

##### ● 課題としてのレンズ設計の難易度の設定

著者の1人の光学設計の経験から判断して、設計データは最も基本的なダブルレット(レンズ2枚貼り合わせ構成、焦点距離は 80mm, 140mm とともに F ナンバー 4 の2種類を用意)型をベースに予備評価実験を行うことにした。

##### ● 評価項目の検討

設計終了までの時間はヒントの与え方や設計スタートデー

(注7) CODE V を用いた実際の設計では CUI 形式またはスプレッドシート形式と自動収差補正機能を併用する。

**Table 3** A design method and the combination of the task that considered order

Pattern	Method		
		ssm	lem
Pattern A		task 1	⇒ task 2
Pattern B		task 1	⇐ task 2
Pattern C		task 2	⇒ task 1
Pattern D		task 2	⇐ task 1

タにより変わる．そこで，評価実験では 1 課題あたり 1 時間程度で終了することを目標として，設計スタートデータの与え方の明確な終了条件とヒントの与え方について精査した．さらに，課題に対する学習効果や慣れの影響があるかについても調べることにした．

#### ●実験対象者の選定

予備評価実験では ssm 方式と lem 方式での操作感の違いやレンズ設計に要する時間をレンズ設計の経験のない人に対して行うことで，純粋にわれわれが考案した GUI の有効性を確認することにした．予備評価実験は筑波大学の研究室の 4 年生 2 人を対象として実施した．

#### 5.2 本評価実験

本節では，予備評価実験から得られた結果および学生へのヒアリング結果を基にして，本評価実験の手順，課題，内容，対象者について述べる．

##### 5.2.1 本評価実験の手順

本評価実験は以下の手順にしたがって実施した．

- (1) 実験概要の説明および設計ツール稼動のための WINDOWS PC の設定 (20 分)
- (2) 評価実験に必要な光学の知識の説明 (30 分)
- (3) ツールの機能説明 (30 分)
- (4) 練習データによる設計ツールのトレーニング (30 分)
- (5) 評価実験実施要領書理解 (10 分)
- (6) 評価実験 (120 分)

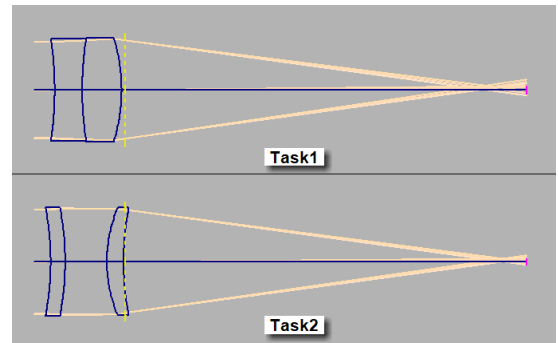
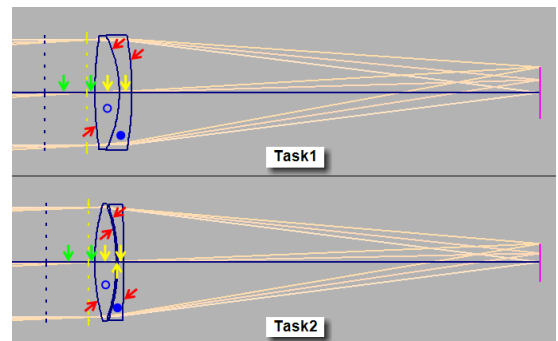
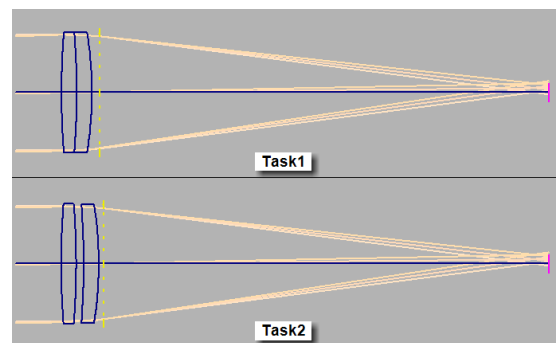
##### 5.2.2 本評価実験の課題

予備評価実験の結果から課題 1：波長  $d$  線 最大像高 6mm 焦点距離 100mm F ナンバー 4 ダブルレット (貼り合わせ)，課題 2：波長  $d$  線 最大像高 6mm 焦点距離 140mm F ナンバー 4 ダブルレット (2 枚独立) の 2 つの課題<sup>(注 8)</sup>を設定した．課題 1 はレンズ面数 4 (開口絞り含)，面間隔 4 (最終面と像面の間隔は自動で決まる)，一方，課題 2 はレンズ面数 5 (開口絞り含)，面間隔 5 (最終面と像面の間隔は自動で決まる) となっており，設計パラメータは課題 2 の方が多いので収差補正能力は高いが，課題 1 より設計は少し難しくなる．

##### 5.2.3 本評価実験の内容

本評価実験では課題の学習効果や操作の慣れの影響を少なくするために Table 3 に示すように ssm, lem の 2 つの方

(注 8) 小穴純，幾何光学，新技術コミュニケーションズ，色消しダブルレットの設計，pp.223-239 に記載のデータを基に課題 1，課題 2 の設計完了データを作成した．

**Fig. 10** Initial design layout diagram of task1, task2**Fig. 11** Final design layout diagram of task1, task2**Fig. 12** Hint of task1, task2

式と課題 1，課題 2 の組み合わせ，さらに ssm 方式，lem 方式の使用順序も考慮してパターン A～パターン D のグループを設け，4 つのパターンのうち A, B に実験対象者各 3 名を C, D に実験対象者各 4 名を割り振った．実験対象者は所属するグループにしたがって課題 1，課題 2 の設計終了までの時間を計測してもらった．

Table 3 の説明をパターン A, B を例に説明する．パターン A は課題 1 を ssm 方式にて設計を行い，つぎに lem 方式で課題 2 の設計を行うことを意味する．パターン B は課題 2 を lem 方式で設計を行い，つぎに ssm 方式で課題 1 の設計を行うことを示している．パターン C, D についても同様の考え方である．

Fig. 10 に設計の課題 1, 2 の設計スタートデータのレイアウト図を示す．Fig. 11 に課題 1, 2 の設計完了データのレイアウト図および Fig. 13 に課題 1 の設計完了条件の収



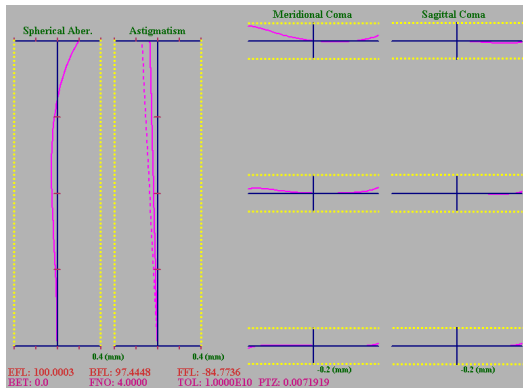


Fig. 13 Final design aberration diagram of task1

差図を示す（課題 2 についても同様の図なので省略した）。設計課題の終了条件は課題 1 については  $99\text{mm} \leq$  焦点距離（注 9） $\leq 101\text{mm}$ ，Fig. 13 に示した黄色の点線の範囲にグラフが収まりかつ Fig. 11 の設計完了のレイアウト図（上段）に近い形とした。課題 2 についても  $139\text{mm} \leq$  焦点距離  $\leq 141\text{mm}$  となるだけで残りの 2 つの条件は同様である。本評価実験の終了目標である課題 1 つあたり 1 時間程度で終了するようにヒントを与えた。ヒントの内容は以下のようである。

Fig. 11 の の部分の曲率半径はたとえば  $40.0\text{mm} <$  曲率半径  $< 150.0\text{mm}$ ，の部分の間隔は  $2.0\text{mm} <$  間隔  $< 15.0\text{mm}$  にある（すべての矢印で示す部分にレンズ設計で決定する値の存在する範囲を与えた）。の間隔はそれぞれ  $10.0\text{mm}$ ， $2.0\text{mm}$ ，の部分の硝子は BK7，の部分の硝子は F2 とするように指示した。さらに Fig. 10 の課題 1，課題 2 のレンズ形状からそれぞれ Fig. 12 のレンズ形状にして，Fig. 11 の最終レンズ形状，絞り，仮想面の配置となるよう設計するようにヒントを与えた。予備評価実験結果から課題あたりの設計終了までの時間は平均 1 時間程度であると見積もっているが，4 時間たっても終了しないときは設計終了せずという制限を設けた。

#### 5.2.4 本評価実験の対象者

本評価実験は 22~25 歳までの筑波大学でコンピュータサイエンスを専攻する 4 年生 5 名および大学院生 9 名の合計 14 名（内 2 名は女子）を対象に実施した。本評価実験を実施するに際し，以下の 3 項目を口頭質問形式で実験対象者に確認した。

- レンズ設計は始めてであること
- レンズ設計は何をすることが知らない
- パソコンのキーボード/マウス/タッチパッドなどの操作に十分慣れていること

#### 5.3 本評価実験の結果

4 つのパターン（A，B，C，D）別に ssm 方式，lem 方式での設計平均時間の結果を Fig. 14 に載せる。4 つのパターンの内容は Table 3 の通りである。パターン C の ssm 方式で

（注 9） Fig. 3 の Lens Essence Display Area の中にある Effective focal length(EFL) に表示される。

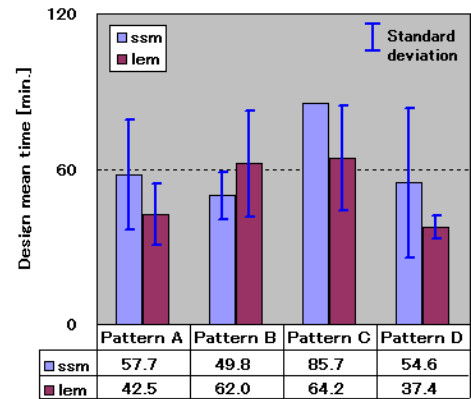


Fig. 14 A design mean time by the ssm method and the lem method in pattern A~D (exclude ssm of pattern C)

Table 4 A design mean time by the first design (exclude the ssm method of pattern C)

Method	ssm	lem
Mean t.		
Mean time of task 1	57.7min. (pattern A)	37.4min. (pattern D)
Mean time of task 2	1 person: 85.7min. , 3 people: without ending (pattern C)	62.0min. (pattern B)

は 4 名中 3 名が設計時間制限である 4 時間を超えたため設計終了せずとし，Fig. 14 には正常終了した 1 名の設計時間を参考として載せた。パターン B は ssm 方式の方が lem 方式の設計平均時間より短い，t 検定の結果パターン A，パターン B，パターン D の ssm 方式と lem 方式での設計平均時間に 5%水準で有意差は見られなかった。

つぎに設計方式に対する課題の影響を Table 4 に示す。Table 4 は ssm 方式，lem 方式それぞれ 1 回目の設計課題だけの設計平均時間を表にしたものである。lem 方式では課題 1 のパターン D グループと課題 2 のパターン B グループでの設計平均時間は 1 時間程度で終了しており，平均時間差は 20 分ほどの差があるが設計終了時間の見積もりどうりの結果である。

しかしながら，ssm 方式では課題 1 のパターン A グループの設計平均時間は 57.7 分であり，課題 2 のパターン C グループでは 3 名が設計終了せずとなり，正常終了した 1 名も 85 分を超えた結果であった。ssm 方式では CUI での設計になるため設計パラメータ値の変化量を決めるのが難しく，どれくらいで光学系が破綻するのかわかると見極めが難しくなる。また，設計パラメータ値の変化量を小さくすると CUI での操作回数が増えてしまうため設計者の負担が増える。

一方，lem 方式では設計者の負担を軽減させるための工夫すなわち，われわれの考案したユーザインタフェースが有効に機能していることで，パターン B グループは時間内に設計を完了できたと考えている。lem 方式でほかのグループの中で設計終了せずとなった実験対象者がいなかったことから

設計者の負担を軽減させるための工夫が有効に働き、設計課題に対しての設計可能な範囲が広がったと考えている。最後に、“あなたはシングルサフェースモード (ssm) の操作に習熟していたとして、今後 ssm で設計する気持ちになれますか。lem ではどうですか。”, “レンズ設計全般についての感想および今回の評価実験全般についての感想/意見ををお願いします。”というアンケートの質問の回答をまとめる。

レンズ設計は退屈で根気のいる作業で好きになれず、向いていないとほとんどの実験対象者は回答している。ssm 方式のようなキャラクタコマンドベースの設計方式では設計する気にはなれず、lem 方式であれば設計しても良いとのコメントがあった。また、ssm 方式に比べて lem 方式は大変設計しやすかったという意見も多数見うけられた。一方で、ssm 方式のスピード、レスポンスの良さを見抜き評価する実験対象者もいた。

#### 5.4 設計実務経験者の評価

設計実務経験者 7 名 (定年退職者 4 名含) に対して本システムを評価してもらった。設計実務経験者はいずれも市販の設計ツール、設計者の社内開発の設計ツールにて設計業務を行なってきていて、本システムのようなユーザインタフェースを有する設計ツールでの設計経験はない。また、設計実務経験者はタブレット、トリプレット、ガウスタイプなどの代表的な光学系の基本的なタイプは知識として持っている。したがって、基本的なタイプを設計課題としたのでは設計評価実験としては成立しない。また、設計者が実務で取り組んでいる多くの課題は数ヶ月単位で設計されていて、機密に関するものであるという理由から設計評価実験ではなく、本システムを使用してもらい、その結果をアンケートとしてまとめて本システムの評価とした。

設計実務経験者に評価してもらうにあたっては学生に対する評価実験で用いたバージョンに対してつぎの機能を追加した。

- ペンディング<sup>(注 10)</sup>
- マウスホイールによるレンズ面選択および設計パラメータの変更
- マウスポインタの接近でレンズ面を認識

設計実務経験者に対するアンケートは以下の通りである。

項目 1: あなたはこのプログラムで光学設計機能が充実すれば、光学設計ツールとして使用したいですか

項目 2: このソフトを使用するとしたらどのような段階 (フェーズ) で使用したいですか

項目 3: 評価全般についての感想/意見ををお願いします

アンケート項目 1 に対して定年退職者 2 名より “光学性能がすべてであり、方法に関係なく収差が補正できればよく、本システムのようなユーザインタフェースには関心がない” という否定的な回答を得た。別の定年退職者 1 名より “ユーザインタフェースの改良には興味がある” という回答を得た。ま

(注 10) 設計パラメータの変更による焦点距離の変化を吸収するために光学系の任意の面 (最終面とすることが多い) の曲率半径を変化させて焦点距離を一定に保つこと。

た、別の定年退職者 1 名は “収差など光学性能至上主義であるが、ユーザインタフェースの改良には興味ある。本システムは変化表<sup>(注 11)</sup>のビジュアル化であるといえる” という回答を得た。現役の設計実務経験者 3 名についてはすべて “使用したい” という肯定的な回答を得た。本システムに欲しい機能としては偏芯光学系対応、MTF 計算<sup>(20)</sup>、スポットダイアグラム計算、光学系で使用しているレンズ単体ごとのペンディング機能などの意見があった。

アンケート項目 2 に対しては、自動収差補正の補助、タイプの試行錯誤、最後の詰め、収差のバランス調整、間隔修正、加工ミス対応、教育などの意見があった。また、“新人は新人教育で使用したツールを引き続き実務設計で使用する人が多いので、現時点では教育には使用できない” という意見もあった。

アンケート項目 3 に対して、

- 改良の積み重ねでかなり使い勝手が良くなっている
- 昔の光学設計者なので『こうだったら良いな』と考えていた夢の形の一つである
- 実際の設計者に使ってもらうためのステップを考えて更に良いものに仕上げたい
- 前バージョンに比べて実用的になった、設計操作の間違いが起きにくい
- レンズデータとレイアウト図のレンズ面の対応がわかりやすい
- リアルタイムでレイアウト図が変化していく様子は、感動的
- 設計パラメータ変化の前後の比較もしやすい
- ちょっと設計パラメータ変えればすぐに結果がわかるので、変化表は不要かも
- マウスのホイールが使えるのはとても直感的で使いやすいという回答を得た。

以上をまとめると、年配の設計実務経験者ほどユーザインタフェースの改良には否定的な傾向にあるという評価結果となったが、おおむねわれわれの考案したユーザインタフェースは受け入れられたのではないかと考えられる。

## 6. 関連研究

レンズ設計に関して自動修正、性能評価、光学製品量産時の統計的な公差解析、画像評価などの研究は見受けられるが、レンズ設計のユーザインタフェースに関する研究の知見は得られなかった。したがって、現在利用している市販 (デモバージョン含) のレンズ設計ツールのユーザインタフェースの先行例をあげ、本システムとの関連を調査し、関連研究とした。

(注 11) 各十数の行/列を有する数表であり、左端の行にはレンズ各面の曲率半径、面間隔、ガラスの屈折率/分散値などの変更可能な設計パラメータを記載し、上端の列には焦点距離、球面収差などの諸収差などの補正対象項目を置き、おのおのマス目には設計パラメータをプラス/マイナス数パーセント変化させたときの補正すべき対象の変化量を記載したもの。

ADOS version 1.1<sup>(注 12)</sup>, ATMOS- DEMO 8.0<sup>(注 13)</sup>, MODAS Version 4.14<sup>(注 14)</sup>, OPT98 (簡易版)<sup>(注 15)</sup>, 上記の4つのレンズ設計ツールはいずれもスプレッドシートウィンドウのみで入力を行い, レイアウト図などの設計結果表示はスプレッドシートとは別のウィンドウで表示される. また, スプレッドシートのレンズデータの面番号とレイアウト図のレンズの面番号が対応するような表示になっておらず, 設計時にレンズの面番号を数える (面数が多い場合や構成を変更した場合) 必要がある. 一方, 本システムではマウスポインタでレイアウト図のレンズ面を直接指定できる点や必要に応じて設計パラメータを連続的に変化させて設計したり, 指定された設計パラメータ値を直接入力することも可能になっている. また, 設計結果は自動で再描画し, リアルタイムに設計パラメータ値の変化の状態をレイアウト図などで確認できる点で大きく異なる.

CODE V 8.30 は入力インターフェースとしてコマンドモード (キャラクタコマンド入力形式) と GUI モード (スプレッドシート形式) を有している. コマンドモード, GUI モードは同時に使用することができるようになっていて, フォーカスを与えることにより切り替えを行っている. コマンドモードでは (コマンド, 面番号, 入力値) というスタイルで値の変更を行う. GUI モードでは面番号に対する曲率半径, 面間隔などのセルに数値を入力し, レイアウト図のウィンドウの左上部の execute ボタンを押すことにより設計パラメータ値の変更を行う. レイアウト図や収差図はそれぞれキャラクタコマンドを入力 (コマンドモード) またはプルダウンメニューより選択 (GUI モード) することで表示される. CODE V もキャラクタコマンド入力可能である点を除いて上記の ADOS, ATMOS, MODAS, OPT98 と同様に本システムとは異なる.

ZEMAX Version April 4, 2006 DEMONSTRATION VERSION はスプレッドシートウィンドウ形式 (設計パラメータ値の変更後のレイアウト図などへの結果の反映は手動) で入力を行い, 変更したい設計パラメータのセル部分をマウスポインタで選択するとレイアウト図のその面番号に対応するレンズ面が黒から赤に変わり変更対象となる面を把握することができる. さらに, スプレッドシートウィンドウにフォーカスした状態で ↑ / ↓ キーまたはマウスホイールの回転で入力セルの場所を動かすことが可能となっている. また, Slider control というダイアログのスライダバーを操作し, リアルタイムに設計パラメータ値を変更しながら設計する機能を有している. Slider ダイアログを表示させ, 変更パラメータの種類, 面番号, パラメータの範囲 (デフォルトでは現在の値の 1.01 倍を範囲の上限下限値に設定) を指定する. ダイアログの面指定番号とレイアウト図のレンズ面の対応は上記のような方法で行う必要がある. スライダバー 1 回の操作の刻

み量は (上限 - 下限) ÷ 50 に設定される.

OSLO EDU Edition Revision 6.4.6<sup>(注 16)</sup> は OPT98 と同様のスプレッドシート形式のダイアログウィンドウを有している. 違いはセルにフォーカスを与えると対応するレイアウト図の面番号のレンズ面が実線から破線に変わるように実装されている. ZEMAX と同様に ↑ / ↓ キーまたはマウスホイールで面選択が可能である. 設計パラメータ値の変更後のレイアウト図などへの結果の反映は自動で行われる. また, ZEMAX と同様に Slider 機能も有していて, 必要な数だけスライダバーを確保できる. 変更するパラメータの種類, 面番号, 1 回の操作の刻み量 (スピンボタンで指定) を指定する必要がある.

WineLens3D Basic Version:1.1.6<sup>(注 17)</sup> は ZEMAX と同様のスプレッドシートウィンドウ形式 (設計パラメータ値の変更後のレイアウト図などへの結果の反映は自動/手動が選択可) で入力を行う. また, OSLO のようにスプレッドシートのレンズデータの面番号とレイアウト図のレンズの面番号との対応がわかる表示になっていない. スライダバーはメインウィンドウの最下部にあらかじめ 8 個設定 (1 個はデフォーカス<sup>(注 18)</sup>用, 残りは任意の設計パラメータが設定可能) しており, 設定ダイアログを表示させて, 可動させる設計パラメータの種類とスライダバー 1 回の操作の刻み量を入力する.

SYNOPTSYS Version: 13.24<sup>(注 19)</sup> は上記した 8 つのレンズ設計ツールと違ってスプレッドシートウィンドウは光学データの作成および設計パラメータ値の変更に特化した実装となっている (小さなレイアウト図のウィンドウが表示されるのみ). SYNOPTSYS は多くの点で本システムと似ている. レイアウト図でレンズ面をマウスポインタでクリックすると面が選択され, WorkSheet Lens Edit ダイアログのスライダバーを操作すると設計パラメータ値が変化し, レイアウト図などに設計パラメータ値の変更状態がリアルタイムに反映される. しかしながら, スライダバー 1 回の操作の刻み量が設定できなかつたり, レンズ面選択の際のマウスポインタの場所が面の存在する  $x$  座標値の範囲 ( $y$  座標値はレンズ面から離れていてもよい) といったあいまいな実装となっている点がわれわれのシステムとは違う.

今まで述べたレンズ設計ツール類はすべてマルチドキュメントインターフェース (MDI) の考え方に基いて実装されているが, 本システムではシングルドキュメントインターフェース (SDI) を採用しているのが根本的に表示の考え方が違う.

## 7. 終わりに

本論文では, レンズ設計プロセスである収差補正, レンズ

(注 12) <http://www.diginaut.com/shareware/ados/>

(注 13) <http://www.atmos-software.it/>

(注 14) <http://www.myoptics.at/modas/>

(注 15) <http://www.astrophotoclub.com/opt98/opt.htm>

(注 16) <http://www.lambdaires.com/>

(注 17) <http://www.winlens.de/>

(注 18) 集光状態の最も良い場所を探すために, 像面をスライドさせておのおののポイントでの性能を評価すること.

(注 19) <http://www.osdoptics.com/>

形状や power 配置などのレンズ構成を思い通りに変更することや性能改善のための高度な判断処理, アイデア実現の支援を目的として, 設計者が行う 4 つの基本動作である設計パラメータの変更, 光学計算, 結果表示, 判断をディスプレイ上で統合し, 直接操作感を有するユーザインタフェース手法を考案した。また, こうしたユーザインタフェース手法を組み込んだレンズ設計支援システム IMAD を実装した。

本実装では光学設計における主表示であるレイアウト図に対してマウスポインタにより設計に必要な面番号を直接指定する GUI を採用している。さらに, キー操作により設計パラメータを変化させ, リアルタイムに計算結果を表示させている。また, シングルドキュメントインタフェース (SDI) を採用することで設計の評価基準である収差図, レンズデータをレイアウト図と重ね表示させ複数のウィンドウを操作することなく上記の 4 つの基本動作をディスプレイ上で統合した。

今回行った実験対象者による評価実験および設計実務経験者の評価結果からわれわれの考案したユーザインタフェースの有効性を確かめることができた。今後は光学計算部分はほかの設計ツールとの入出力インターフェース (現在は CODE V のみ) を充実させることで補う方針とし, ユーザインタフェースにおける更なる設計作業の包括的な支援を行っていきたい。

#### 参 考 文 献

- 1) 久保田広: 応用光学, 51/52, 岩波書店 (1995)
- 2) 日置隆一編: 光用語事典, 127, オーム社 (1989)
- 3) Warren J. Smith: Modern Optical Engineering Second Edition, 340/353, McGraw-Hill, Inc. (1990)
- 4) Max Born, Emil Wolf (草川徹・横田英嗣 訳): 光学の原理 I, 277/316, 東海大学出版会 (1988)
- 5) 岸川利郎: ユーザーエンジニアのための光学入門, 71/162, オプトロニクス社 (1990)
- 6) 宮本健郎: 光学入門, 77/94, 岩波書店 (1995)
- 7) 三宅和夫: 幾何光学, 77/132, 共立出版 (1979)
- 8) Donald P. Feder: Optical Calculations with Automatic Computing Machinery, JOURNAL OF THE OPTICAL SOCIETY OF AMERICA, 41-9, 630/635 (1951)
- 9) G. H. Spencer and M. V. R. K. Murty: General Ray-Tracing Procedure, JOURNAL OF THE OPTICAL SOCIETY OF AMERICA, 52-6, 672/678 (1962)
- 10) 高橋友刀: レンズ設計, 1/13, 東海大学出版会 (1994)
- 11) 松居寛: レンズ自動設計における最適化技術, オペレーション・リサーチ, 45-8, 382/387 (2000)
- 12) 草川徹: レンズ光学, 314/319, 東海大学出版会 (1988)
- 13) 小野功, 小林重信, 吉田幸司: 遺伝的アルゴリズムによる光学系の最適化, 光アライアンス, 10-4, 26/31 (1997)
- 14) 佐々木邦泰: 遺伝的アルゴリズムを用いたレンズ設計の自動化, 北陸先端科学技術大学院大学 修士論文 (2004)
- 15) 玉村弘志: クラスタリング GA を用いたレンズ設計, 北陸先端科学技術大学院大学 修士論文 (2007)
- 16) 松居吉哉: レンズ設計法, 77/128, 共立出版 (1972)
- 17) 御手洗潔: 光学系を設計するためのプログラムを記録したコンピュータ読み取り可能な記録媒体及び光学系設計システム (特願 2000-247864) (2000)
- 18) M. H. Sussman: 10X TWO ELEMENT EYEPIECE (U.S. Patent 3994570) (1976)
- 19) 御手洗潔: 表示方法及びプログラムを記録したコンピュータ読み取り可能な記録媒体 (特願 2002-007706) (2002)
- 20) レンズ性能研究委員会編: 写真レンズとレスポンス関数, カメ

ラ工業技術研究組合 (1961)

#### [ 著 者 紹 介 ]

御 手 洗 潔



1986年日本光学工業株式会社 (現株式会社ニコン) 入社。現在に至る。その間 1995年4月から 1997年3月まで筑波大学大学院理工学研究科に在籍。修了。並列プログラミング, ビジュアルプログラミング, ヒューマンインタフェースに興味を持つ。情報処理学会, 日本ソフトウェア科学会各会員。

田 中 二 郎 (正会員)



1975年東京大学理学部卒業。1984年米国ユタ大学計算機科学科博士課程修了。Ph.D. in Computer Science。1993年から筑波大学に勤務。現在, 筑波大学大学院システム情報工学研究科教授。ヒューマンインタフェースやソフトウェアシステムに興味を持つ。ACM, IEEE, 情報処理学会, 電子情報通信学会各会員。