

網膜からの波面追跡法による高速視力シミュレーション

柿本正憲¹⁾ 立川智章²⁾ 西田友晃³⁾

1) 日本SGI株式会社 2) 日本SGI株式会社, 東京大学大学院工学系研究科
3) 東京大学大学院新領域創成科学研究科

人間の眼球を光学系としてモデル化し, 視力に応じて網膜中心窩に映る画像を高速表示する手法を提案する. 筆者らはすでに, 点光源の網膜への投影結果は一般に楕円形で, 波面追跡法により計算できることを示した. 従来は空間各点から波面追跡を行っていたが, 逆に網膜から空間各点に向けて波面追跡を行うことにより, より高精度な焦点ボケ情報を高速に計算できた. さらに実際の眼の視野角と両眼球の回旋を考慮した拡大表示法も提案する. 本手法を用いて人間の眼で見た見え方を表示する視力シミュレータを開発し, メガネレンズ設計評価のために有用な結果を得た.

Fast Visual Acuity Simulation Using Wavefront Tracing from the Retina

Masanori Kakimoto¹⁾ Tomoaki Tatsukawa²⁾ Tomoyuki Nishita³⁾

1) SGI Japan 2) SGI Japan and the University of Tokyo 3) The University of Tokyo

This paper proposes a method for modeling the human eye as an optical system and displaying image at the fovea of the retina taking visual acuity into account. Our previous research shows that image of a point light source projected onto the retina forms an ellipse and can be computed with wavefront tracing. The previous method traced a wave from each point in the world space. We employed reverse wavefront tracing from the fovea of the retina to each world space point, acquiring the defocus information faster and more robustly than the previous methods. We also propose methods for high resolution rendering considering the field of views and the eyeball rotations of both eyes. Based on these methods we developed an image generator as a visual acuity simulator and obtained results useful for eyeglass lens design evaluation.

1 はじめに

人間の眼をモデル化し, 焦点ボケをシミュレートすることは, 眼鏡レンズ設計において重要な課題である. 近年は, 高齢化による老視患者の増加や, 日常生活でPCを使う作業の長時間化にともない, 遠方だけでなく近方の見やすさも重視される. そのため複雑な曲面で構成される累進焦点レンズの需要が高まっている.

累進焦点レンズは, 近視・遠視・老視・乱視など入力パラメータが多い. さらに最近ではQuality of Visionを重視する傾向が強く, 眼鏡レンズ上で遠方・中距離・近方の優先度をきめ細かく定めることが要求され, 設計には多くの試行錯誤が必要となる. そこで, 実際の見え方を高速表示して評価する設計検証ツールが効果的である. 本稿では, このような見え方の表示技術を視力シミュレーションと呼ぶことにする.

なお, 視力シミュレーションの生成画像は通常のCG描画と異なり, 視野内の各方向に向けて眼球を回旋させ, 最良の調節を行い網膜中心窩で捕らえた像を集約したもので, 祁らはこれを回旋網膜像と呼んでいる^[1].

2 従来手法

焦点ボケをシミュレートする基本手法として分散レイトレーシングが知られている. しかし, 通常のレイトレーシングにサンプリング数を乗じた処理時間を要するため高速処理には向かない. 加えて, 正確な視力シミュレーションのためには眼球内のレンズ形状モデルが必要で, 分散レイトレーシングよりもさらに多くの処理時間を要する^{[1] [2] [3] [4]}.

グラフィックスハードウェアを利用した焦点ボケの表示手法^[5]は, 実時間処理が可能であるが, ピンホールカメラモデルに基づいており, 正確な屈折処理もできないため, そのままでは視力シミュレーションやレンズ設計には利用できない.

筆者らは, 先行研究^[6]で, 視野ボリューム内の焦点ボケ情報(ブローフィールド)を前計算する手法と, 屈折物体の頂点ごとにレイトレーシングを行う描画法とを組み合わせ, 高速に視力をシミュレートする方式を提案した.

前処理では, まず視野ボリュームを分割した各ボク

セルから網膜にいたる光路を求める。そして、各ボクセルに配置した点光源からの光がその光路に沿って伝達する過程を波面追跡法によって解析し、網膜上での拡がり計算をする。この拡がり度合いの空間分布をブローフィールドとし、中間データとして保管する。

表示処理では、ブローフィールドを参照して空間内の全物体の頂点データを変位させながら複数回描画した結果を合成することで、焦点ボケ画像を得る。

本提案手法では、前処理での波面追跡の向きを逆にし、網膜上の中心窩（もっとも視力の高い点）から空間に向けて波面を解析することで効率よくかつより正確なブローフィールドを求める。

先行研究での表示処理は、ブローフィールドとの整合性により眼鏡レンズ全体が視野に入るようにするという制限があった。現実には眼球（角膜前面）と眼鏡レンズとの距離は1.2cmが設計標準とされており、眼鏡レンズの径は約5cmであることから視野角は130度以上となる。その結果、生成画像の鮮明度が低く、レンズ設計検証のためには十分でなかった。

提案手法では、上記の制限を解決し、視野角を狭め画面上に拡大表示することを可能にした。くわえて、眼球の回旋も考慮した、より実用的な視力シミュレータを実現することができた。

以降、本稿では、3章で新しい前処理法について、4章で新しい表示方法についてそれぞれ述べる。5章では実験結果を示し、6章で本提案手法の利点について述べてまとめを行う。

3 網膜からの波面追跡法

3.1 波面追跡法における5変数

波面追跡法^[7]は、波の発生地点から与えられた向きの光路に沿って波が伝播する際の光路上の点における以下の5つの変数（図1参照）を計算によって追跡し、光路の到達点における波の形状を求める手法である。

- 波面の法線（光路方向）ベクトル \mathbf{N}
- 波面の最大曲率 κ_1
- 波面の最小曲率 κ_2
- κ_1 に対応する主方向ベクトル \mathbf{e}_1
- κ_2 に対応する主方向ベクトル \mathbf{e}_2

ここで、 \mathbf{N} 、 \mathbf{e}_1 、 \mathbf{e}_2 はそれぞれ単位ベクトルで、つねに互いに直交する関係にある。曲率 κ_1 および κ_2 は曲率半径の逆数であり、曲率半径中心が波の前面つまり進行方向にあるとき（波が収束する状況）正の値を、曲率半径中心が波の後面にあるとき（波が拡がる状況）負の値をとる。 $\kappa_2 < 0 < \kappa_1$ のときはその点での波面形状は馬蹄形、 $\kappa_1 > 0, \kappa_2 = 0$ のときは円柱内面、 $\kappa_1 = 0, \kappa_2 < 0$ のときは円柱外面、 $\kappa_1 = \kappa_2 \neq 0$ のときは球面、 $\kappa_1 = \kappa_2 = 0$ のときは平面であることをそれぞれ示す。

3.2 波面追跡法の演算

波面追跡とは、以下の各状況で、変換式によって5変数の値を変化させる演算を行い、これを光路に沿って繰り返すことを意味する。

- 移動
- 屈折
- パーゼンズ変換（薄いレンズでの垂直入射）
- 反射

たとえば、距離 d の波の進行（移動）によって各変数はつぎのように変換される。

$$\kappa'_1 = \frac{\kappa_1}{1-d\kappa_1}, \quad \kappa'_2 = \frac{\kappa_2}{1-d\kappa_2} \quad (1)$$

他の3変数 \mathbf{N} 、 \mathbf{e}_1 、 \mathbf{e}_2 は移動によって不変である。

屈折では、スネルの法則を5変数の変換式の形で記述する。レンズ表面などの媒体境界面は、光路との交点（光線の入射点）において波面と同様に5変数によってその形状を与える。変換式は文献[3]、[6]に記載されており本稿では省略する。

パーゼンズは波面の曲率に媒体の屈折率を乗じた値として定義される。薄いレンズに光線が垂直に入射する場合、パーゼンズの変換式を使うと屈折よりも簡単な計算で波面を追跡できる^[6]。提案手法では眼球レンズにおける屈折計算でパーゼンズ変換を使う。

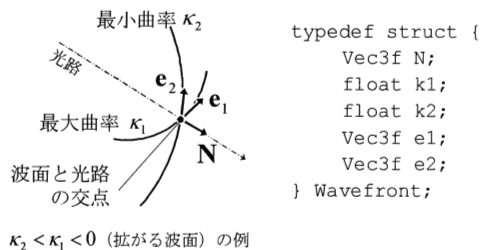
反射についても変換式はある^[7]が、本提案手法では反射は行わない。

3.3 焦点ボケ情報生成のための波面追跡法

本節では、提案手法でどのような波面追跡を行うかを説明する。

(1) 処理の概要

波面追跡の目的は、焦点ボケ、すなわち網膜からの点光源が視野ボリューム内の各標本点でどのくらい拡がるかを評価することである。この拡がり情報は、視野ボリュームを分割した全ボクセルについて計算し、投影面に平行な楕円形を表す 2×2 の行列として求める。この情報をブローフィールドと呼び4成分テクセルの3Dテクスチャとして格納する。描画時には、頂点シェーダでブローフィールドの値を参照して全モデルの頂点位置をそれぞれ変位させる処理を一定回数繰返しながらか描画・合成を行うことで焦点ボケ画像を生成する。



$\kappa_2 < \kappa_1 < 0$ (拡がる波面) の例

図1. 波面追跡法における5変数(左)とC言語での構体実装例(右)。

表 1. 提案手法（網膜からの波面追跡）の処理

演算順序	場所/媒体	演算種類※	繰返回数	
1	眼球～標本点	(光路計算)	$O(n^2)$	
2	眼球	網膜	波の生成	
3		硝子体	移動	
4		レンズ	バージェンス	
5		瞳	拡がり初期化	
6	空気	移動	$O(2n^2)$	
7	後面	屈折		
8	眼鏡	ガラス		移動
9	前面	屈折		
10	空気	移動	$O(2n^3)$	
11	標本点	拡がり計算	$O(n^3)$	
12		調節		

※カッコで示す演算種類は波面追跡以外の演算
 ※※弛緩時/調節時の2種類を処理するため、以降同様。

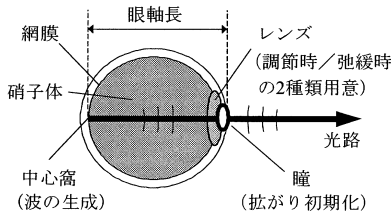


図 2. 眼球モデルと波面追跡光路

ブラーフィールドを求めるには、ボクセルの個数分だけ拡がり評価計算を行う必要がある。典型的には、ボクセルの個数は $64 \times 64 \times 128$ である。

表 1 に、提案する波面追跡演算処理を示す。計算オーダーに使う n は一辺のボクセル個数である。従来手法(表 2)に比べ、繰返回数が大幅に少ないことが特徴である。とくに屈折・スケーリングの計算処理は重いので、これらの回数が n^3 オーダーからそれぞれ n^2 オーダー、0 になる効果は大きい。また、従来手法の最後に行うスケーリング処理は誤差が生じやすく、提案法では直接標本点での拡がりを求めることでこれを解決した。

眼球側から追跡することにより、眼球部分での処理は一度だけ行えば、すべての標本点で計算する際に共通して結果を再利用できる。眼球を回旋させて評価するという視力シミュレーションの特性をうまく利用している。

また、眼鏡レンズ部分はレンズ表面をサンプリングし n^2 オーダー(典型的には 64×64) の回数だけ波面追跡をする。眼鏡レンズ前面から屈折した一つの光路を、図 3 に示すように奥行方向の n^1 オーダー(典型的には 128) の標本点で共有する。

(2) 入力条件

入力データは、眼球モデル、眼鏡レンズモデル、および両者の位置関係である。図 2 に示すように、眼球レ

表 2. 従来手法の前処理

演算順序	場所/媒体	演算種類※	繰返回数	
1	眼球～標本点	(光路計算)	$O(n^2)$	
2	標本点	波の生成	$O(n^2)$	
3	空気	移動		
4	眼鏡	前面		屈折
5		ガラス		移動
6	後面	屈折		
7	空気	移動		
8	眼鏡	レンズ		調節
9		バージェンス		
10	網膜	拡がり計算		
11	標本点	(スケーリング)		

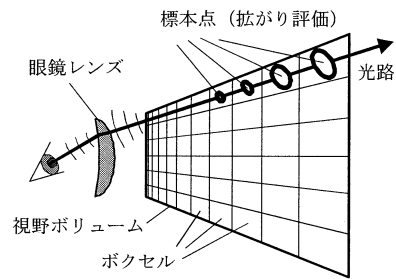


図 3. レンズモデル、視野ボリュームと波面追跡光路

ンは1つの薄いレンズとみなした簡易モデルである。眼光学的なパラメータの一部を表3に示す。標準値^[8]からずらすことによって、近視・遠視・老視・乱視をシミュレートすることができる。

眼は対象物の距離に応じて屈折力を変えてピント調節する。これをシミュレートするため、提案手法では、表1、図2に示すように、眼球レンズの屈折力として弛緩時(最小)と最大調節時の2つの値を用い、以降標本点に達するまで両ケースを並行に処理する。

(3) 光の拡がり評価

焦点ボケの主要因は瞳の開口である。提案手法では開口は円形と仮定し、網膜中心窩の点光源からの光線がそこを通って拡がり、最終的に標本点での拡がりを評価する。

ただし、実際の開口径値は使わず、太さが限りなく0に近い光路に沿って「無限小の拡がり」が変化するとみなし、その変化の比を求める。そして最後に実際の開口径の値にこの比を乗じることで拡がり評価を行う。

まず瞳の開口を無限に小さい半径 ϵ_0 の円形とする。波面の移動により半径は変化し、一般には拡がりは主方向に沿った楕円形となる。この楕円の二つの径を ϵ_1 , ϵ_2 とする。

波面の移動により ϵ_1 , ϵ_2 はつぎのような変換式による変化を示す(図4参照)。

表 3. 眼球のパラメータ (抜粋)

パラメータ名		記号	標準値
屈折力	弛緩時屈折力	\bar{P}_{min}	~58.64 ~ (D)
	最大調節力	Δ_{max}	~11.93 (D)
眼軸長 (角膜前面から網膜までの距離)		z_r	~22.785~ (mm)
屈折率	硝子体	n_2	1.336
	空気	n_1	1.000

D は屈折力の単位 diopter で, m^{-1} と等価

$$\varepsilon'_1 = \frac{\kappa_1}{\kappa'_1} \varepsilon_1, \quad \varepsilon'_2 = \frac{\kappa_2}{\kappa'_2} \varepsilon_2 \quad (2)$$

波面の屈折による径の変換はやや複雑で, $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ を $E_1 = 1/\varepsilon_1^2, E_2 = 1/\varepsilon_2^2$ と変数変換することにより, 屈折前後の変換式は式3のようになる. $\varepsilon'_1, \varepsilon'_2$ の符号はそれぞれ $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ と同じとする.

$$\begin{pmatrix} E'_1 \\ E'_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e'^2_{1x} & e'^2_{2x} \\ e'^2_{1y} & e'^2_{2y} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} e^2_{1x} & e^2_{2x} \\ e^2_{1y} & e^2_{2y} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \end{pmatrix} \quad (3)$$

ただし, e_{1x}, e_{1y} は屈折前の波面の主方向ベクトル \mathbf{e}_1 の, e_{2x}, e_{2y} は \mathbf{e}_2 のそれぞれ x 成分と y 成分である. ここで座標系は屈折点を原点とし媒体法線方向を z 方向としている. e'_{1x}, e'_{1y} 等の変換後主方向ベクトルの値は波面追跡の屈折変換^{[3][6]} 結果を利用する. 図5は屈折時の微小楕円の変化を図示したものである.

(4) 最良の調節を行ったときの拡がりの計算

標本点での楕円形状は, 眼球レンズの弛緩時 (屈折力最小) と最大調節時 (屈折力最大) の2通りを求める. これらの径をそれぞれ $\varepsilon_{R1}, \varepsilon_{R2}$ および $\varepsilon_{A1}, \varepsilon_{A2}$ とすると, 最良の調節は2点 $\mathbf{\varepsilon}_R = (\varepsilon_{R1}, \varepsilon_{R2}), \mathbf{\varepsilon}_A = (\varepsilon_{A1}, \varepsilon_{A2})$ をむすぶ線分上で選択する必要がある.

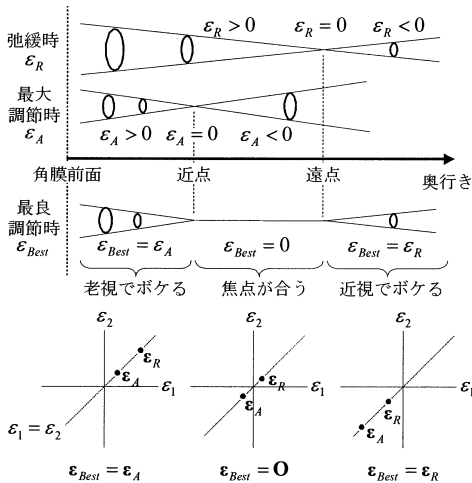


図 6. 乱視なしの裸眼で最良の調節を行った場合の拡がり (拡がりは真円で, $\varepsilon_{R1} = \varepsilon_{R2}, \varepsilon_{A1} = \varepsilon_{A2}$).

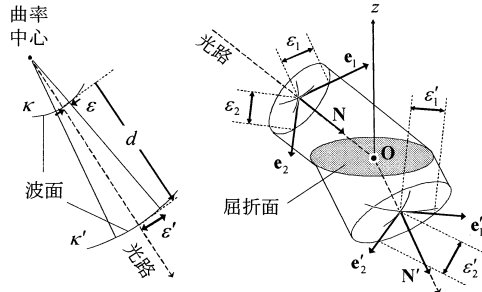


図 4. 移動時の微小拡がりの変化

図 5. 屈折時の微小拡がりの変化

乱視がない裸眼では, 点光源が眼球レンズを通った拡がりは真円で, つねに $\varepsilon_1 = \varepsilon_2$ となる. 図6に奥行きに応じて拡がりがどう変わるかを図示する. 図6下には, $\varepsilon_1 - \varepsilon_2$ 平面上で $\mathbf{\varepsilon}_R$ および $\mathbf{\varepsilon}_A$ をプロットした結果を示す. 最良の調節を行った結果は, この2点の範囲内で原点にもっとも近い点にすればよいことがわかる.

乱視の眼球, あるいは非球面の眼鏡レンズは縦方向と横方向の屈折力が異なるため, そこから射出した光は一般には焦点を結ばない. 代わりに前焦線と後焦線という二つの焦線が生じる. このような状況で人間の眼は, 図7に示すような二つの焦線の間に存在する最小錯乱円 (circle of least confusion) と呼ばれる真円に対象物が合うよう屈折力の調節を行うことが知られている.

最小錯乱円の条件は $\varepsilon_1 = -\varepsilon_2$ である. 図8に示すように $\varepsilon_1 - \varepsilon_2$ 平面で $\mathbf{\varepsilon}_R$ と $\mathbf{\varepsilon}_A$ を結ぶ線分上で, 直線

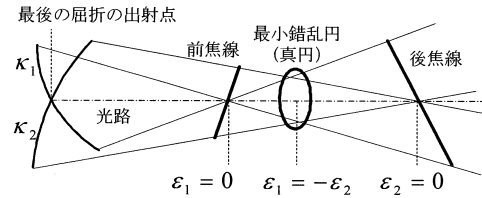


図 7. 最小錯乱円

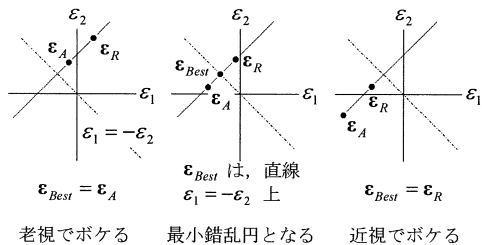


図 8. 調節 (乱視または非球面眼鏡レンズ使用時) による拡がり ε_{Best} の計算. 可能なかぎり拡がりが最小錯乱円 ($\varepsilon_1 = -\varepsilon_2$) に近くなるように ε_R と ε_A の間で調節する.

$\varepsilon_1 = -\varepsilon_2$ にもっとも近い点が調節後の楕円形状となる。この楕円形状を、対象標本点での拡がり情報とする。

実際のブローフィールドは視野ボリュームが正規化デバイス座標系 (NDC) に変換されたときに直交等間隔ボクセルとなるように分割されており、標本点での値をボクセルの値とする。最後に拡がり情報を楕円形状と等価な 2×2 行列として格納する。

4 視力シミュレータのための視野設定

4.1 拡大回旋網膜像の表示

筆者らの先行研究^[6]では、眼鏡レンズを通した描画は眼鏡全体を見るような広い視野角となっていた。これは、眼鏡レンズ面の任意の点での焦点ボケを取得可能なブローフィールドに常に視野ボリュームを合わせていたためである。

しかし、この従来の視野ボリュームでは視野角が広すぎて、画面上に表示したときの実質的な解像度が低くなってしまふ。また、通常、視点からディスプレイ上の画面にいたる画角は40度程度なので、視力シミュレーションでの画角も同程度にできることが望ましい。さらに、眼球の回旋によるスクロール表示を可能にするためにも、図9に拡大視野ボリュームとして示すような視野角の狭い設定をすることが望まれる。

単純に視野角を狭くすると、表示物体頂点のNDC座標値が変化し、正しいブローフィールドの値を参照できなくなる。そこで、頂点シェーダの処理に、拡大視野ボリュームのNDC座標値から従来の視野ボリュームのNDC座標値への変換処理を挿入することでこれを解決した。

4.2 ステレオ表示のための視線一致

両眼での視力シミュレーションを行うため、立体視表示を実現した。眼鏡レンズでの屈折があるため、左右の視線一致を行うには、フェルマーの原理に基づいて注目点と視点 (眼球の回旋中心) とを結ぶ屈折光路を求める必要がある。これは単純な問題ではない。

筆者らは、毎フレームの正確な屈折表示のために求める、眼鏡レンズ後面に各頂点 L_n における屈折テクスチャ座標 (s, t) を再利用するアルゴリズムを考案した。

注目点 P は直前のフレームの画面上でクリックすることで指定されるため、対応する (s, t) は容易に計算できる。一方、 (s, t) をキーにした二次元空間分割法によりレンズ後面全頂点 L_n をソートし、 (s, t) の値から対応

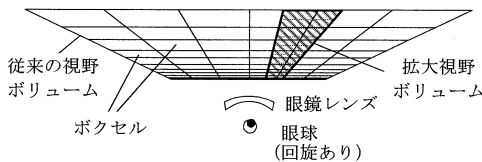


図9. 拡大表示のための視野ボリューム

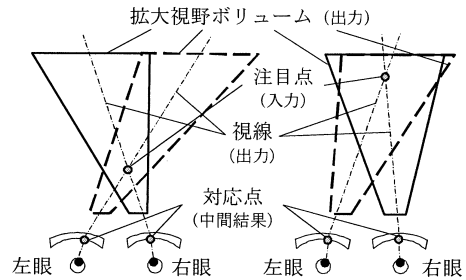


図10. 両眼立体視表示のための視線一致

する近傍3頂点 L_i, L_j, L_k を求める。それらのテクスチャ座標 $(s_i, t_i), (s_j, t_j), (s_k, t_k)$ と (s, t) との距離関係を加味すると、注目点 P に対応するレンズ後面の対応点 L_p を L_i, L_j, L_k の重みつき平均から求めることができる。

つぎに、視点 (眼球の回旋中心) V から点 L_p に向けて視線を設定すれば、その視線が屈折した延長線上に注目点 P が存在することになる。最後にその視線が画面の中央に来るように視野ボリュームを設定する。

図10は、両眼のそれぞれについて、与えられた注目点 P と対応点 L_p を求め、左右眼それぞれの画面上の中央に注目点に来るように視野を設定した結果を示す。左図は注目点に近い場合、右図は注目点が高い場合である。

5 実験結果

本章で示す実験は、Intel Core2 Duo 2.6GHz / 2GBメモリおよびNVIDIA GeForce 8400MのPCで行った。

5.1 網膜からの波面追跡による高速化

表4に波面追跡法の処理時間を示す。表1で示す提案法は、表2に示す従来法よりおおむね5倍の高速化を実現した。

5.2 拡大回旋網膜像の表示

図11は、拡大表示の利点を示す比較結果である。黒く見える曲線は眼鏡フレームで、眼球を下方に回旋させ、眼鏡レンズ下部を使うようにした状態である。拡大表示の右上にはレンズのどの部分が視野に対応するか枠で示してある。レンズ下部で老視が矯正されていることが明確に判別できる。

表4. 波面追跡法の性能比較 (単位: 秒)

ボクセル サイズ	モデル1			モデル2		
	提案 法	従来 法	性能 比	提案 法	従来 法	性能 比
32×32×64	0.37	1.87	5.1	0.36	1.67	4.6
32×32×128	0.4	2.04	5.1	0.39	1.87	4.8
32×32×256	0.46	2.45	5.3	0.46	2.23	4.8
64×64×128	1.09	5.01	4.6	1.09	4.63	4.2
64×64×256	1.35	6.46	4.8	1.34	5.98	4.5

5.3 ステレオ拡大表示のための視線一致

図12は、ステレオ拡大表示における視線一致の2つの例を示す。図13は、実現した2つの方式によるステレオ表示の様子を示す。

5.4 焦点ボケの等高線表示

焦点ボケを正しく表示しても、レンズの場所による微妙な違いを見分けることは難しい。そこで、ボケ量に対応する等高線をレンズ後面上に描くようにした。

眼鏡レンズ後面各頂点に、1次元テキスト座標として、その頂点に映る物体のボケ量から得たスカラー値を割り当てる。これにより、設計者がレンズ特性をひと目で把握できるようになった。

図14にその例を示す。眼球パラメータとしては近視と老視を設定した。左はレンズ上方を近視矯正、下方を老視矯正とした眼鏡である。右はレンズ上方を素通し、下方を老視矯正とした眼鏡である。等高線で区切られた白の強い領域ほどボケ量が大きいことを示す。

6 おわりに

視力シミュレーションの中核となる処理である波面追跡の向きを逆にするすることで、焦点ボケ情報生成の高速化を実現した。波面追跡高速化の利点は、インタラクティブ性の改善だけではない。レンズ変更処理が5倍速くなったことにより、単なる目視の設計検証にと

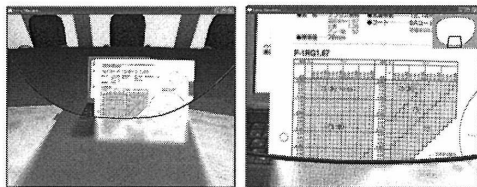


図 11. 従来の表示 (左) と拡大表示 (右)。

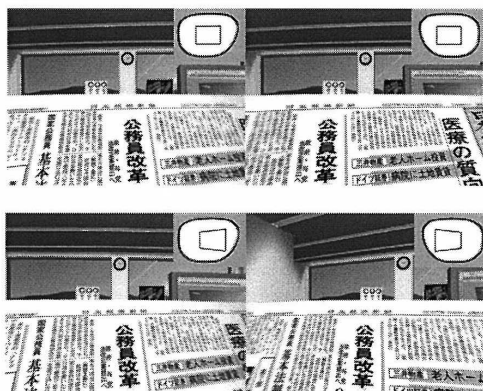


図 12. レンズを通してのステレオ表示における視線一致の例。上：遠方の時計を注目点とした場合。下：近方の新聞（「公」の字）を注目点とした場合。

どまらず、繰返処理によるレンズ形状自動最適化が現実的になった。

また、広い視野に分布した焦点ボケ情報（ブローフィールド）を利用しながら狭い視野の拡大表示を実現した。そのほか、視力シミュレータとして実用上重要な機能を実現した。本シミュレータは眼鏡レンズ設計検証ツールとして活用されている。

謝辞

本研究に際して多大なアドバイスをくださり、レンズデータ等も提供して下さった、セイコーエプソン株式会社光学事業部の篠原俊英氏に感謝いたします。

参考文献

- [1] 祁華ほか, 累進レンズの見え方のシミュレーション, *視覚の科学* (日本眼光学学会誌), 21(2), pp. 52-58 (2000).
- [2] Mostafawy, S. et al., Visualization of the human eye, *IEEE CG&A*, 17(1), pp. 8-12 (1997).
- [3] Loos, J. et al., Using wavefront tracing for the visualization and optimization of progressive lenses, *Computer Graphics Forum*, 17(3), pp. 255-263 (1998).
- [4] Barsky, B. A., Vision-realistic rendering: simulation of the scanned foveal image from wavefront data of human subjects. *Proc. APGV '04*, pp. 73-81 (2004).
- [5] Haerberli, P., Akeley, K., The accumulation buffer: hardware support for high-quality rendering, *Proc. SIGGRAPH '90*, pp. 309-318 (1990).
- [6] Kakimoto, M. et al., Interactive simulation of the human eye depth of field and its correction by spectacle lenses, *Computer Graphics Forum*, 26(3), pp. 627-636 (2007).
- [7] Stavroudis O. N., *The Optics of Rays, Wavefronts and Caustics*, Academic Press (1972).
- [8] Gullstrand, A. et al., *Handbuch der Physiologischen Optik*, p. 335 (1909).



図 13. 2台のプロジェクタと偏光メガネによるステレオ表示システム (左) および Xpol 方式の偏光メガネ式ステレオ液晶モニターによる表示システム (右)。

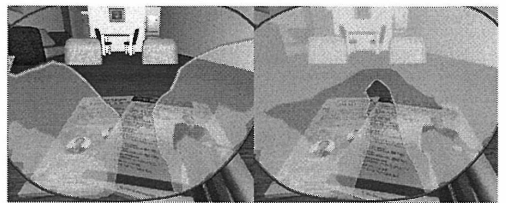


図 14. ボケ量の等高線表示例。透明の領域はボケ量が小さく、白が強い領域ほどボケ量が多い。