

眼底画像からの眼底形状の3次元復元・表示

出口 光一郎 川又大典 水谷香苗 本谷 秀堅 (東大工学部)
若林貴和 (東大医学部)

眼底カメラをわずかにずらして撮影した2枚の眼底画像から、ステレオの原理を用いて眼底形状を復元・表示する。ただし、単純なステレオ復元では、眼底の3次元形状は得られない。眼のレンズ、視野を広げるための広角接眼レンズを通して眼球内を観察しているからである。さらに、眼底カメラでは、特殊な光学系を用いているので、ステレオ画像として用いるためには、光学系のキャリブレーションとそれに基づく画像の歪み補正が必要である。カメラの光学系は装置に固有であるため歪み補正は一度キャリブレーションをしておけばよい。しかし生体眼は個人差があり、広角レンズの影響は撮影ごとに異なるため、あらかじめその光学系を同定し画像を補正することはできない。ここでの手法は、まず、生体眼と撮影用広角レンズを併せた光学系を単レンズでモデル化する。そして、眼底のおおまかな形状がほぼ球面と見なせることを用いて、この単レンズの位置、傾き、焦点距離を推定するとともに、眼底形状を復元する。結果を3次元表示することで、眼底形状の疾患の部位の特定などが容易になった。

3D Reconstruction and Display from Stereo Fundus Images

Koichiro Deguchi Daisuke KAWAMATA Kanae MIZUTANI
Hidekata HONTANI Kiwa WAKABAYASHI (University of Tokyo)

This paper proposes a method to recover and display 3D fundus shape from stereo fundus image pair. Because the fundus is observed through eye lens and wide-angle enlarging lens, a simple stereo technique does not work. In this method, utilizing the fact that fundus forms a part of sphere, we identify, from the difference between stereo images, the optical parameters of those lenses, and correct the skews of the lines-of-sight. Then, we obtain 3D images of the fundus by back-projecting the stereo images. We constructed total system including the optical calibration for fundus camera and 3D display of the reconstructed fundus pattern.

1 はじめに

眼底は血管や神経を直接見ることができる、人間の身体内で数少ない部分の一つで、眼底画像は、眼の疾患の診断、治療のみならず、全身疾患の状態を知ることにも利用できる。しかし、眼底撮影カメラを用いて取得される画像は視野が狭く、2次元表示である。広範囲にわたる表示は困難で、3次元空間での位置情報が得られない。そのため医師間のオリエンテーションが難しく、レーザー治療のための位置表示も不完全である。

そこで、眼底カメラをわずかにずらして撮影した2枚の眼底画像から、ステレオの原理を用いて眼底形状を復元・表示する手法を開発した。ただし、単純なステレオ復元では、眼底の3次元形状は得られない。眼のレンズ、視野を広げるための広角レンズを通して眼球内を観察しているからである。さらに、眼底カメラでは、特殊な光学系を用いているので、ステレオ画像として用いるためには、光学系のキャリブレーションとそれに基づく画像の歪み補正が必要である。

カメラの光学系は装置に固有であるため歪み補正は一度キャリブレーションをしておけばよい。しかし生体眼は個人差があり、広角レンズの影響は撮影ごとに異なるため、あらかじめその光学系を同定し画像を補正することはできない。

ここでの手法は、まず、生体眼と撮影用広角レンズを併せた光学系を単レンズでモデル化する。そして、眼底のおおまかな形状がほぼ球面と見なせることを用いて、この単レンズの位置、傾き、焦点距離を推定するとともに、眼底形状を復元する。その、具体的な手順と実験結果を以下に示す。

2 眼底形状復元の原理

眼底カメラと、眼底の撮影の際の光学的な配置を、Fig.1に示す。眼底撮影装置の視野角は50度である。視野を広げるための接眼型広角眼底レンズは、使用する場合としない場合がある。

本研究では、Fig.1の右側の眼底カメラの光学系は、2 plane method[1]を用いて校正した。本稿では、カメラの校正については、省略する。

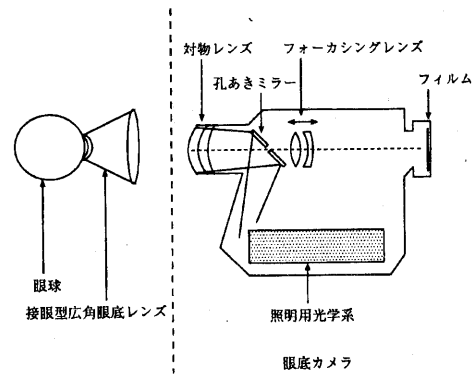


Fig.1: 眼底画像撮影の光学系の構成

実際の眼球は正確にはわずかに歪んだ楕円球面である。しかし歪みはごくわずかであるため、眼底部は球面であるとみなせる。

まず、わずかに左右に眼底カメラを移動して、2枚の眼底画像を撮影する。この2枚の画像から対応する点を抽出する。この2枚の画像は、ステレオ画像対となるが、単純に両画像上の対応点から空間に逆投影した視線の交点を求めても、眼底の形状は得られない。眼のレンズ、視野を広げるための接眼広角レンズが中間にあるからである。

得られた2枚の画像を単純なステレオ画像であるとして、両画像の対応点から前方空間での対応点の3次元形状を、その視線の交点を求めることで再現してみる。

いま、眼と眼底レンズの組合わさった光学系を単レンズでモデル化できると仮定する。すると、ステレオ画像として観測されるのは、接眼眼底レンズを用いていない場合は、Fig.2に示すような眼底面の眼の光学系による虚像であり、接眼眼底レンズを用いている場合は、Fig.3に示すような実像である。つまり、ステレオ画像としては、偽の眼底曲面が観測されることになり、いずれの場合も、この偽の眼底の形状は2次曲面（双曲面）となる[2]。

これを正しく補正するためには、モデル化した単レンズの位置、姿勢、焦点距離などのパラメータ、眼球の位置が必要となる。しかし、これらは個人差があり、また、撮影ごとに変化しあらかじめ、また、眼底

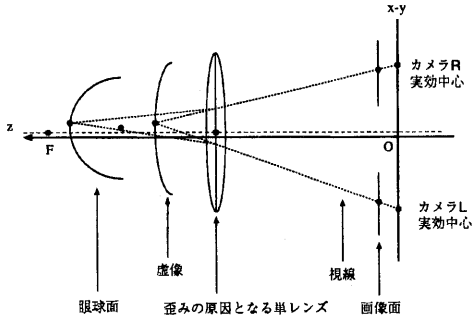


Fig.2: ステレオ眼底画像の結像モデル (接眼眼底レンズなしで撮影をした場合)

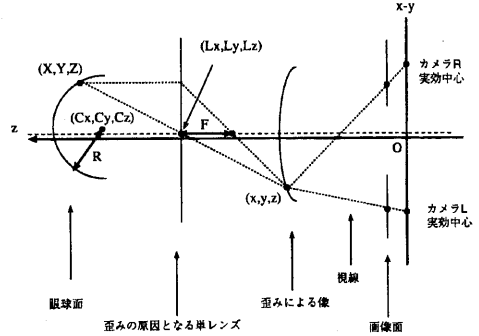


Fig.4: 眼底レンズを使用する場合の座標系

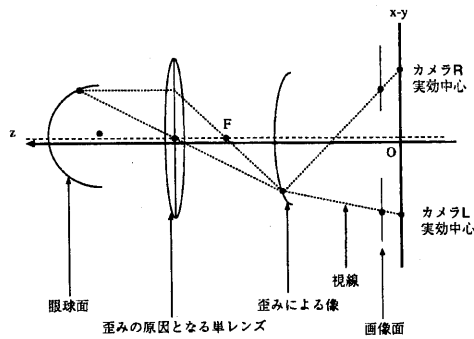


Fig.3: ステレオ眼底画像の結像モデル (接眼眼底レンズを付けて撮影をした場合)

3 結像系の記述と形状復元

3.1 眼球面とステレオ像との対応

接眼の眼底レンズを用いて眼底画像を撮影する場合 (Fig.3) について、その光学的な結像系の記述とステレオ画像との対応を述べるとともに、ここでの眼底形状の再現の原理を定式化する。

Fig.3について、座標系とそれぞれのパラメータを、Fig.4に示すように定義する。

モデル化した単レンズの中心を (L_x, L_y, L_z) 、レンズの焦点距離を F とする。レンズの厚みは考えない。また、眼底を模した球面の中心を (C_x, C_y, C_z) 、球面の半径を R とする。

球面上の点を (X, Y, Z) とすると、その点の単レンズによる像 (x, y, z) は次式で表せる。

$$\begin{aligned} x &= L_x - F \frac{X - L_x}{Z - (L_z + F)} \\ y &= L_y - F \frac{Y - L_y}{Z - (L_z + F)} \\ z &= L_z - F - \frac{F^2}{Z - (L_z + F)} \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、点 (X, Y, Z) は、上記の球面上の点であるので、

$$(X - C_x)^2 + (Y - C_y)^2 + (Z - C_z)^2 = R^2 \quad (2)$$

を満たす。

一方、この点の像 (x, y, z) は、前期のように2次曲面上にある。この曲面を、Fig.4に示す、ステレオカ

画像撮影時にもそれらをもとめることはできない。

そこで、ここでは以下の手法によって、眼底形状を再現する。

まず、このステレオ画像の対応点をもとに、この単レンズの像である偽の2次曲面を求める。続いて、元々が球面であったときにここで復元された2次曲面が像として得られるような、単レンズの位置、姿勢、焦点距離を求めると同時に、その球面の位置、半径も求める。この球面が眼底の形状である。そこで、この球面上に同定された光学系を通して、画像上のパターンを逆投影し、眼底形状の3次元復元、表示を得る。

すなわち、眼底形状が元々、球面であったという手がかりのみから、眼底形状とその眼底面上のパターンを再現する。

メラの2つのカメラ中心の中心を原点とする座標系で、次式のように表す。

$$x^2 + y^2 + pz^2 - 2axz - 2byz - 2c_x x - 2c_y y - 2c_z z + k = 0 \quad (3)$$

すると、もし、ステレオ画像対からこの2次曲面(3)が再構築できたとすると、(1)、(2)の関係から、眼球面およびモデル化した単レンズのパラメータが導き出せることになる。ただし、 a, b, \dots から C_x, C_y, \dots を求める際、パラメータが1つ増えるので冗長性が生じる。このうち眼球の半径は、超音波を用いた装置で容易に計測することができる。また、これが分からないときでも、レンズの焦点距離を任意の値にすることは、眼球全体のスケールを任意に変えられることを意味するので、相対的な位置関係が再現できれば良いのであれば、 F に適当な値を用いればよい。

具体的な対応は、以下のように与えられる。まず、 F と L_z は関係式(4)または式(5)を満たす必要がある。

$$(a^2 + b^2 - p)(L_z - F)^2 + 2(c_z + ac_x + bc_y)(L_z - F) + F^2 + c_x^2 + c_y^2 = k \quad (4)$$

$$L_x^2 + L_y^2 - p(L_z - F)^2 + 2c_z(L_z - F) + F^2 = k \quad (5)$$

すると、残りのパラメータは次のように求まる。

$$\begin{aligned} L_x &= a(L_z - F) + c_x \\ L_y &= b(L_z - F) + c_y \\ C_x &= c_x + aL_z \\ C_y &= c_y + bL_z \\ C_z &= (1 + p - a^2 - b^2)L_z + \\ &\quad (1 - p + a^2 + b^2)F - (ac_x + bc_y + c_z) \\ R &= \sqrt{(a^2 + b^2 - p)(k - c_x^2 - c_y^2) + (c_z + ac_x + bc_y)^2} \end{aligned} \quad (6)$$

Fig.2の、接眼広角レンズを使用しない場合についても、ほとんど同様の関係式が得られる。

3.2 シミュレーション実験による原理の確認

眼底画像のデータを、眼底形状が球面であるとして人工的に用意し、先述したアルゴリズムによって、そ

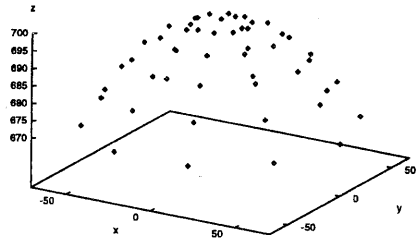


Fig.5: シミュレーションのために球面上に配置した点

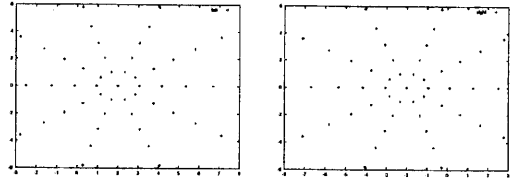


Fig.6: 合成したステレオ画像

の画像データからもとの球面が再現できることを確認した。

シミュレーションにおいて、眼球の角膜、水晶体と接眼眼底レンズをそれぞれ単レンズでモデル化し、眼球内は屈折率1.336の透明体で満たされているものとした。

とカメラの種々のパラメータである。眼球を半径 R 、中心 (C_x, C_y, C_z) の球面とし、単レンズの焦点距離を F 、レンズの中心を (L_x, L_y, L_z) とした。カメラについては焦点距離を $f = 20\text{mm}$ 、base line の長さを $d = 4\text{mm}$ とした。

眼球上に Fig.5 に示すように点を用意した。これらの目と眼底レンズをモデル化したレンズ群を通して撮影したとする合成ステレオ画像は、Fig.6 のように与えられる。この画像には、標準偏差が 1.0 ピクセル相当のノイズが加えてある。

この、ステレオ画像から再構成した2次曲面を、Fig.7 に示す。そして、この再構成された2次曲面から、前節の原理にしたがって求めたパラメータを、Table 1 に、合成に用いたもとの値とともに示す。ま

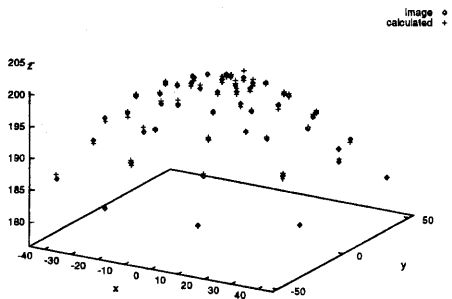


Fig.7: 2次曲面の fitting

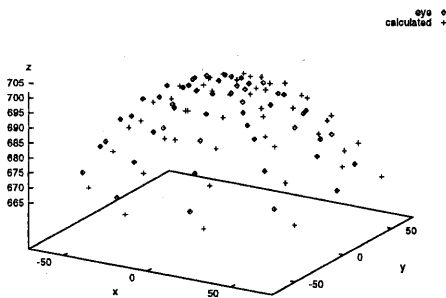


Fig.8: 復元した眼球

た、これらのパラメータを用いて、ステレオ画像から逆投影して求めた各点の空間位置を、最初の点配置と重ねて、Fig.8に示す。

両者はよく一致している、この原理に基づいて眼球形状の復元が可能であることが示されている。

実際には、ここで示したようにまず2次曲面を求めた後に、これらの式によって眼球面のパラメータへと変換するのは得策ではない。ステレオ画像からの2次曲面の再構成の際に画像ノイズを克服するためのフィッティングの操作を必要とする。しかし、この2次曲面は仮想的なものであり、この曲面に対して最適なフィッティングを行うことは意味をなさないからである。

そこで、次のように、直接に眼球面への当てはめを行うことで、各パラメータを求める。

Table1: 画像合成に用いたパラメータとその復元された値

パラメータ	設定値	計算値
F	120	118
R	100	102
C_x	0	11.0
C_y	0	-1.38
C_z	600	594
L_x	0	4.42
L_y	0	-0.581
L_z	400	390

4 視線を利用した球面の再現

画像上に1点を与えられた時、その対象は空間中のある直線上にある。この直線を画像上の点の視線という。

上記の原理に基づいた眼底球面の復元は、実際には、以下に述べるように、両画像上の対応点の視線を追って、その交点が球面上にのるように、レンズ、眼球の未知パラメータを最適化していくことで行う。ここで、未知のパラメータは、眼球の半径 R 、中心の座標 (C_x, C_y, C_z) 、レンズ面の法線方向を表す θ, ϕ と、レンズ面と z 軸との交点の z 座標 L_z 、レンズの焦点距離 F の8個であった。

両画像からの対応点の視線が、レンズで屈折された後、球面と交わるとする。レンズでの屈折は、与えられたレンズの位置と焦点距離のパラメータで決定される。そしてその後、図に示すように、両画像で対応する点の視線同士は眼球面上で出会う。これらの視線の、半径 R 、中心の座標 (C_x, C_y, C_z) の球との交点を求め、両視線の球面上での交点の距離を d_i (i は、対応点の番号を表す) とする。こうして得られるステレオ画像上でのすべての対での2乗和

$$D = \sum_i d_i^2$$

が最小になるように、反復法を用いて、以上のすべてのパラメータを最適化する。ここでは、最適化法としてPowell法を用いた。また、眼球の半径 R は、超音

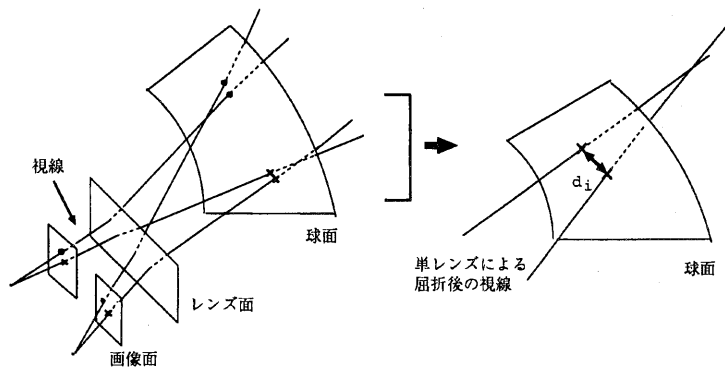


Fig.9: パラメータフィッティングと評価関数

波による計測で大体の値は得られるので、それを初期値とした。

とともに、眼底形状を復元する。その、具体的な手順と実験結果を示した。

5 実眼底画像からの形状再現結果

Fig.10 に示すのは、眼底画像のステレオ対の例である。

このようなステレオ画像から対応点を精度良く安定に抽出するアルゴリズムが開発されている [3]。この2枚の画像上の対応点約 300 点を自動的に抽出した結果が Fig.11 である。

これらの特徴点の組から、レンズ、眼球のパラメータを再現し、求められた球上に配置したものを、Fig.12 に示す。

さらに、これらの点を元にして、眼底画像をその球面上に逆投影して得られた、眼底の 3 次元復元表示を、Fig.13 に示す。4 方向から見た、眼底形状を表示している。

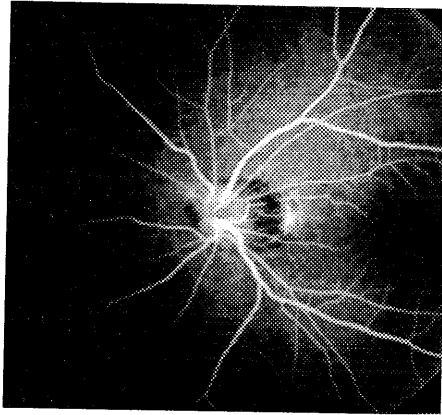
6 おわりに

眼底カメラをわずかにずらして撮影した 2 枚の眼底画像から、眼底形状を復元・表示する手法を開発した。

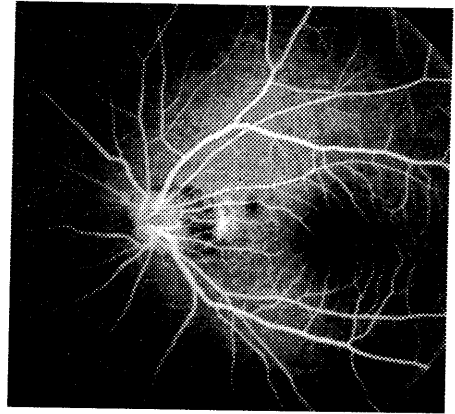
ここでの手法は、まず、生体眼と撮影用広角レンズを併せた光学系を単レンズでモデル化し、そして、眼底のおおまかな形状がほぼ球面と見なせることを用いて、この単レンズの位置、傾き、焦点距離を推定する

参考文献

- [1] Deguchi, K. and Morishita, I. : A Unified Linear Camera Calibration Method Using Two Parallel Calibration Planes, *Trans. of the Society of Instrument and Control Engineers*, Vol. 29, No. 9, pp. 1023-1032 (1993).
- [2] 三宅和夫: 幾何光学, 光学技術シリーズ 8, 共立出版 (1979).
- [3] 出口, コンピュータビジョンのための幾何学 (2) - ステレオの仕掛けを解き明かす -, 情報処理学会誌, 37-7, pp.662-670 (1996)

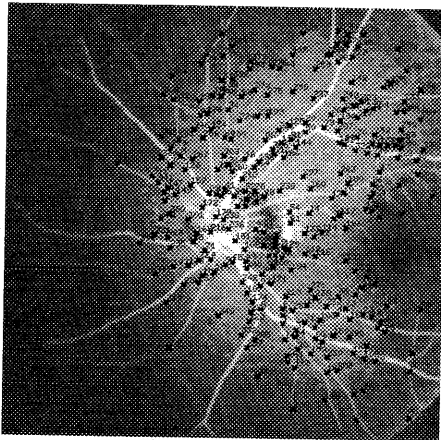


左

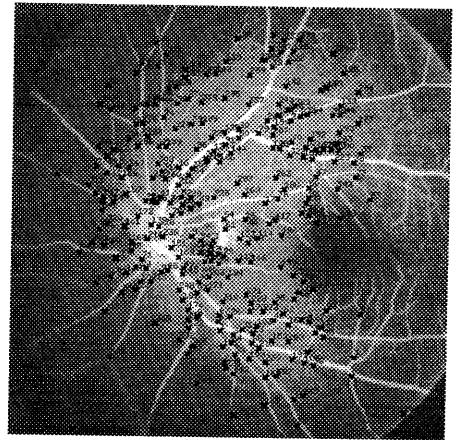


右

Fig.10: 眼底画像のステレオ対



左



右

Fig.11: ステレオ眼底画像の対応する特徴点

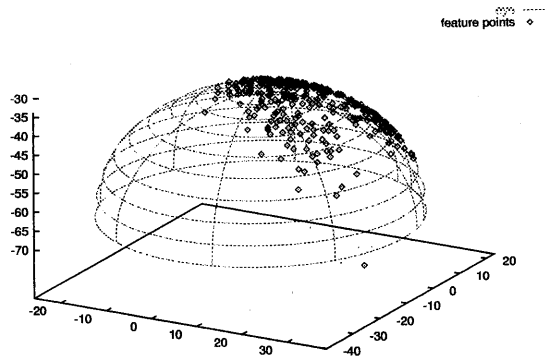


Fig.12: 再現された特徴点の眼球上の分布

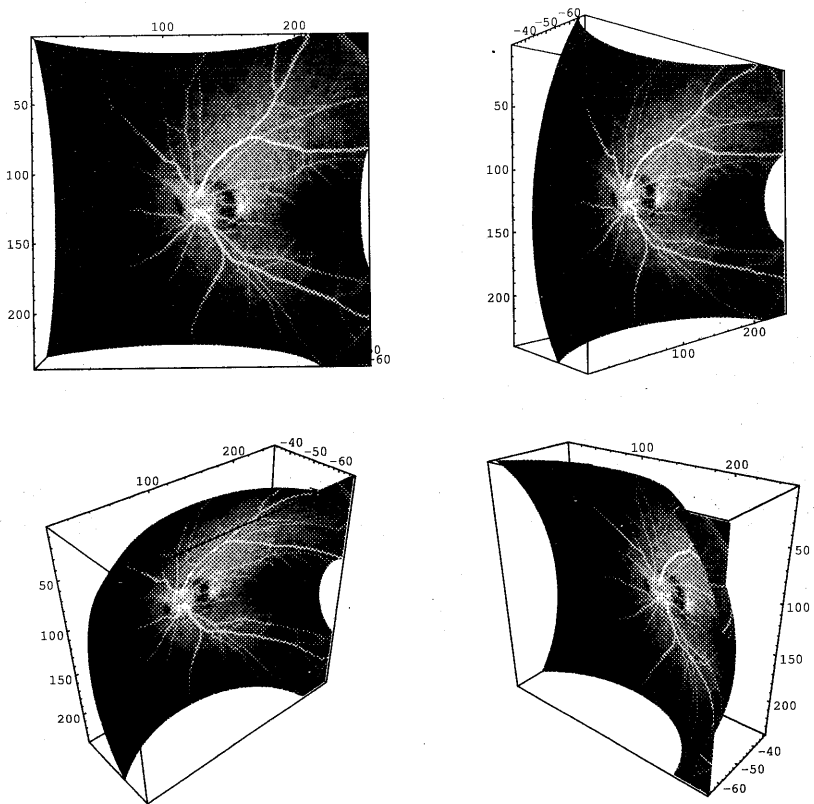


Fig.13: 復元された眼底の3次元表示