

## 複数方向より取得した眼底画像の 重合せによる眼底3次元形状の復元・表示

野網 順子 本谷 秀堅 出口 光一郎

東京大学工学系研究科

様々な角度より取得した複数枚の眼底画像から、眼底形状を復元・表示する手法を提案する。眼底画像は患者の眼の光学系により歪んでいる。この眼の光学系は患者によりまちまちであり、校正することができない。このため、画像からの3次元形状復元に、いわゆるステレオの原理を用いることはできない。そこで本手法は眼の光学系を単レンズでモデル化し、眼底の形状がほぼ球面とみなせることを利用する。単レンズによる球面の実像は2次曲面となり、各眼底画像はこの実像を撮影したものとみなすことができる。眼底画像の歪み方は、実像に対するカメラの位置・姿勢を反映している。それぞれ歪み方の異なる眼底画像が同一の実像を撮影したものであることに基づき、各カメラの位置・姿勢および2次曲面の形状を推定する。ついで、得られた実像から眼底の形状を復元することができる。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 Fundus Pattern Reconstruction and Display from a Set of Fundus Images Obtained from Several Different Viewing Angles

Junko Noami, Hidekata Hontani and Koichiro Deguchi

Faculty of Engineering, University of Tokyo,  
Bunkyo-ku, Tokyo, Japan

This paper proposes a method to reconstruct and display 3D fundus pattern from a set of images of different parts of fundus. The images are taken from different viewing angles. But, because they are distorted by eye lens, a simple stereo technique does not work for the reconstruction. In this method, we utilize the fact that a fundus has spherical shape, and that the image of sphere by the eye lens results in a quadric surface. The differences of distortions of every fundus image are caused from these two fact and their difference of viewing angles. So, by matching every image on the quadric image surface, first, we determine each camera viewing positions and the shape of the quadric surface. Then, we calibrate the eye lens parameters so that the quadric image surface should be originated from a spherical surface. As the final result, we obtain a wide area 3D fundus pattern reconstructed from the set of fundus images, and which will be helpful for medical diagnoses.

## 1 はじめに

眼底とは眼球の内面部のことであり、血管や神経を直接見ることができる、人の身体内では数少ない部分の一つである。このため、患者の瞳を通して直接眼底を撮影することが行なわれる。取得される眼底画像は眼の疾患の診断のみならず、全身疾患の状態を知ることなどに利用できる。

眼底画像の取得には専用のカメラが用いられる。このカメラには、患者の瞳を通して眼の内部を照らし、なおかつ瞳からカメラへの照り返しを防ぐ工夫が施されている。しかし、このカメラにより取得される画像は視野が狭く、眼底の広範囲の画像を得るためには、様々な角度から複数枚の画像を取得する必要がある (Fig.1)。

眼底画像を医師間のオリエンテーションやレーザー治療のための位置表示などに用いるためには、眼底の広範囲に渡る画像が、3次元形状とともに表示されることが望ましい。そこで本稿では、様々な角度で取得した複数枚の眼底画像を一枚に繋ぎ合わせ、眼底の3次元形状を復元する手法を提案する。

ところで、取得される眼底画像は患者の眼の光学系により歪んでいる。この眼の光学系は患者によりまちまちであり、校正することができない。このため、画像からの3次元形状復元に、いわゆるステレオの原理を用いることができない。

そこで著者らは眼の光学系を単レンズでモデル化し、眼底の形状がほぼ球面とみなせることを利用することで眼底の3次元形状を復元する手法を提案した [1]。眼の光学系を単レンズでモデル化すると、各眼底画像は、単レンズによる眼底の実像を撮影したものともみなすことができる。

先に提案した手法 [1] においては眼底カメラの校正を行ない、眼底撮影時のカメラ位置を求めておき、眼底に相当する球面上で両眼底画像が丁度重なるようにレンズパラメータおよび球面形状を表すパラメータを求めた。求められた球面上のパターンは、眼底の3次元パターンとなっている。

ところで、先に述べた通り、実際には眼底の広い範囲の画像を得るために、様々な方向から、複数枚の眼底画像を取得する。これら画像は、眼の光学系

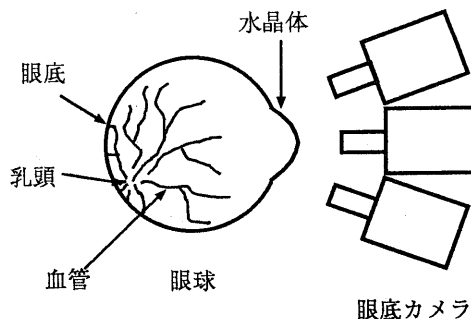


Fig. 1: 眼底を多方向から撮影する。

による眼底の実像を撮影したものであり、取得される眼底画像の歪み方は、各カメラの実像に対する位置・姿勢により決まっている。眼底の同一箇所の画像であっても、カメラの位置・姿勢が異なれば歪み方も異なっている。

これら複数の眼底画像を取得する間、患者の頭部を固定し、厳密にカメラの位置・姿勢を計測することは困難である。そこで本手法は、複数方向から取得した眼底画像を実像上で重ね合わせることで、眼底の実像の形状およびカメラの位置・姿勢を同時に推定し、眼底形状を復元・表示する。歪み方の異なる同一箇所を重ね合わせることで、これら推定が行なえる。

本手法では眼の光学系を単レンズでモデル化し、眼底の形状がほぼ球面とみなせることから、眼底の実像が2次曲面となることを積極的に利用する。2次曲面の形状を仮定し、各眼底画像をこの2次曲面に投影することにより、実像を作ることができる。これら実像が丁度重なり合うよう、各カメラの位置・姿勢および2次曲面の形状を推定する。

2次曲面の形状が推定できれば、推定された形状から眼の光学系のモデルである単レンズのパラメータを求めることができ、結果として、眼底の形状を復元することができる。各カメラの位置・姿勢の推定もなされているので、復元された眼底に各眼底画像を投影することも可能である。以下、具体的な手順および実験結果を述べる。

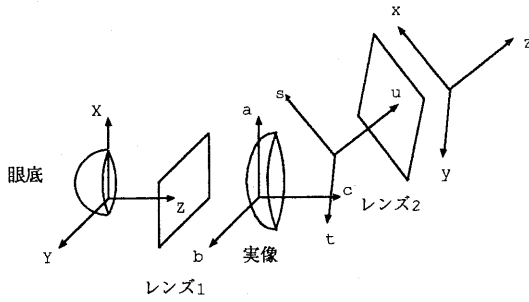


Fig. 2: 眼底は眼の光学系を通し実像を結ぶ。それをいくつかの角度から撮影する。

## 2 眼底画像の結像系

先に述べた通り、本手法は眼の光学系を単レンズでモデル化する。この単レンズをレンズ1と呼ぶ。また、眼底カメラのレンズをレンズ2と呼ぶことにする。このときの座標系をFig2に示す。

単レンズは3次元空間中の各点に対応する像点をつくる。この対象のある3次元空間を物空間、像点がつくる空間を像空間と呼ぶ[2]。ここでX-Y-Zは、レンズ1の物空間で眼底のある実世界の座標系とし、a-b-cは、レンズ1の像空間で実像を表わす座標系とする。またs-t-uはレンズ2の物空間、x-y-zはレンズ2の像空間をそれぞれ表わすものとする。また、これらの座標の原点を各々のレンズの焦点にとる。

レンズ1において、眼球内の像空間X-Y-Zの焦点距離をF、レンズ1を通したあとの像空間の焦点距離をG/2とすると、軸対称な射影変換とみなすことができ、座標変換は次式で表すことができる。

$$\begin{cases} a = F\frac{X}{Z} \\ b = F\frac{Y}{Z} \\ c = \frac{G}{Z} \end{cases} \quad (1)$$

ここで、眼底を球面

$$(X-O)^2 + (Y-P)^2 + (Z-Q)^2 - R^2 = 0 \quad (2)$$

で表わすと、眼底の実像は式(3)で表される2次曲

面となることがわかる。

$$\alpha_1(a^2 + b^2) + \alpha_2c^2 + \alpha_3ac + \alpha_4bc + \alpha_5c + 1 = 0$$

ただし

$$\begin{cases} \alpha_1 = 1/F^2 \\ \alpha_2 = (O^2 + P^2 + Q^2 - R^2)/G^2 \\ \alpha_3 = -2O/FG \\ \alpha_4 = -2P/FG \\ \alpha_5 = -2Q/G \end{cases} \quad (3)$$

各眼底画像は未知の方向から式(3)で表される実像を撮影しているとみなすことができる。レンズ1の像空間a-b-cからレンズ2の物空間s-t-uへの変換は平行移動ベクトルtと回転行列Rとで表わすことができる[3]。

$$\begin{bmatrix} s \\ t \\ u \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} + t \quad (4)$$

各カメラはピンホールカメラであるとする。レンズ2の焦点距離をf、像空間の焦点距離をu/2とすると、座標変換は次式で表すことができる。

$$\begin{cases} x = f\frac{s}{u} \\ y = f\frac{t}{u} \\ z = \frac{u}{u} \end{cases} \quad (5)$$

このようにして、画像上の各点が眼底画像上の各点へと変換される。

各カメラの位置・姿勢を表すパラメータには、回転行列Rに3つ、平行移動tに3つの合わせて6つのパラメータがある。また、実像の形状を表わす2次曲面のパラメータが5つある。ゆえに、眼底画像がN枚あるとき、6N+5個のパラメータが存在することになる。後に、眼底画像から眼底形状を求めるためには、これらのパラメータを推定する必要がある。

次にパラメータの値の推定手法を述べる。

## 3 眼底パターンの復元手法

まず、各眼底画像から、特徴点を抽出し、画像間に対応付けを行なう。この特徴点として眼底の血管の分岐点などを選択する。

各眼底画像から抽出された特徴点は眼底の実像である2次曲面上の1点とみなすことができる。この2次曲面の形と各々のカメラの位置・姿勢を定めれば、画像上の特徴点に対応する2次曲面上での点の位置を求めることができる。

ところで眼底の実像上の全ての特徴点が、全てのカメラにより撮影されるわけではない。ここでは実像上の特徴点を  $P_i$  ( $1 \leq i \leq M$ )、眼底を撮影するカメラ番号を  $j$  ( $1 \leq j \leq N$ ) とおき、特徴点  $P_i$  を撮影したカメラ番号の集合を  $D_i$  とおく。また、点  $P_i$  のカメラ  $j$  にある像を  $p_{ij}$  ( $j \in D_i$ ) とおく。眼底画像中の点  $p_{ij}$  は、空間中の直線に対応している (Fig3)。この直線を視線と呼ぶ。

レンズ1の像空間における視線は式(4)(5)より求めることができる。ただし、本報告では推定すべきパラメータ数を減らすために、カメラによる結像を正射影であるとみなすことにした。このことにより、カメラ1台のもつ自由度を5とみなせることになる。

実像の形状をあらわすパラメータ5つを与えると、偽の2次曲面がひとつ定まる。さらにカメラ  $j$  の位置・姿勢を定めるパラメータ5つを与えると、点  $p_{ij}$  に対応する視線と偽の2次曲面との交点とし

て、2次曲面上の点  $P_{ij}$  が定まる。 $P_{ij}$  は、観測誤差やパラメータの推定誤差のため  $P_i$  と必ずしも一致しない。

各眼底画像上の点  $P_i$  ( $j \in D_i$ ) に対応する偽の2次曲面上の点  $P_{ij}$  を求め、それらの重心  $\hat{P}_i$  を  $P_i$  の推定位置とする。実像の形状とカメラの位置・姿勢が正しく推定できていれば、各  $i$  について点  $P_{ij}$  ( $j \in D_i$ ) は一致する。そこで、次の評価関数を最小とする2次曲面の形状、各カメラの位置・姿勢を求める。対応する特徴点が2次曲面上で一致すればこの評価関数の値は0となる。

$$E = \sum_{i=1}^M \left[ \frac{1}{N_i - 1} \sum_{j \in D_i} [P_{ij} - \hat{P}_i]^2 \right] \quad (6)$$

ただし、 $N_i$  は集合  $D_i$  の要素の数とする。また、この評価関数の最小化にはパウエル法を用いる。パラメータ数は  $5N + 5$  である。

求められた実像から眼底となる球面への写像は、式(1)の逆変換で求まる。この時の  $F, G$  の値を設定する必要がある。式(3)より、 $F = \frac{1}{\sqrt{\alpha_1}}$  として求めることができる。 $G$  の値は眼球内の像空間  $X-Y-Z$  座標のスケール変換にしか作用しないので、適当に定めてよい。このようにして、眼底形状が球面であることのみに基づいて、各カメラの位置・姿勢と実像の形状を同時に推定し、眼底の3次元形状の復元・表示が可能となった。

## 4 実験結果

実験には、眼底の実画像9枚 (Fig4) を用いた。

まず、各眼底画像より特徴点を抽出し、対応づけを行なう。この作業は手により行なった。まず各眼底画像の赤色成分を用いて2値化、細線化を行い、血管を抽出する。血管を細線化した画像を Fig5 に示す。これら細線化された画像から、血管の分岐点や曲率の大きな点を特徴点として抽出し、対応づけを行なった。抽出結果の一部を Fig6 に示す。

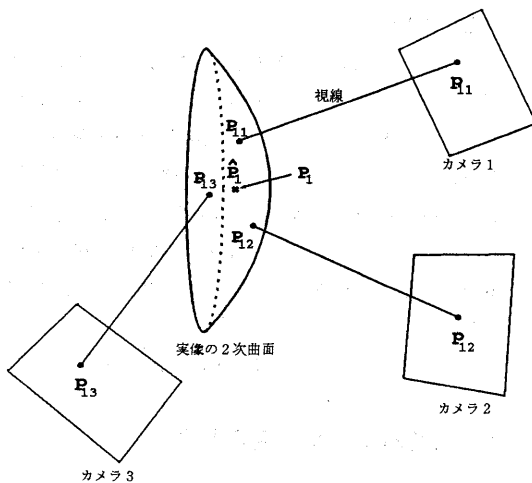


Fig. 3: 同一な特徴点の2次曲面上でのばらつきを最小にする

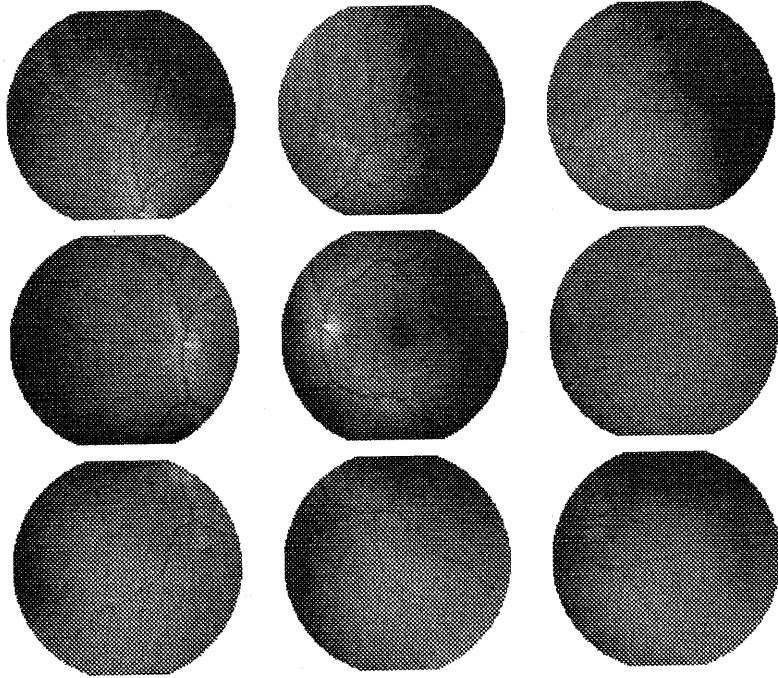


Fig. 4: 眼底撮影カメラで撮影された9枚の画像

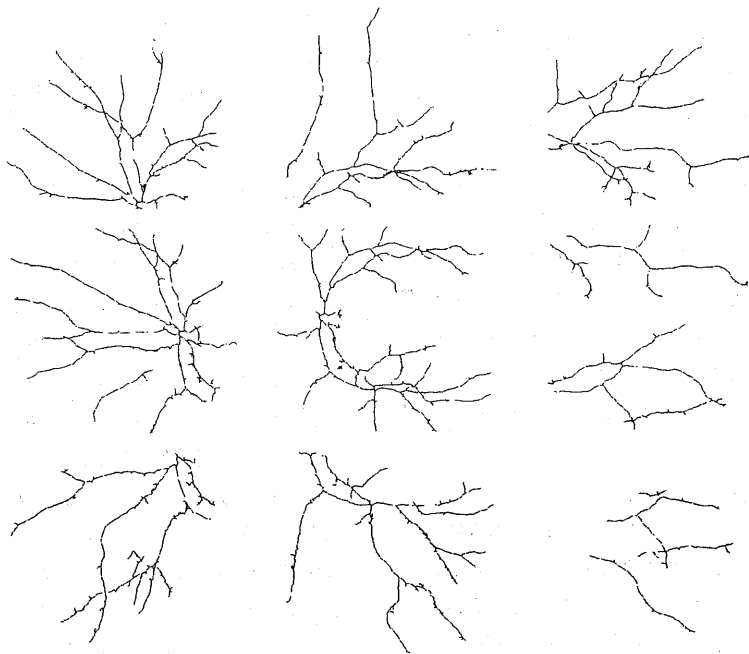


Fig. 5: 血管部分を細線化した画像 (この画像から対応点を抽出した)

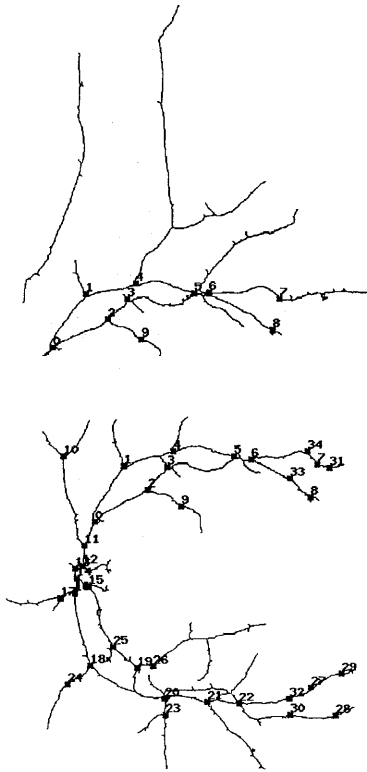


Fig. 6: 細線データ上で対応付けられた特徴点(一部)。右上および中央部の画像の間での対応づけ。対応づけは9枚の画像の全組み合わせで行なう。

9枚の画像から得られた特徴点の数はのべ177点であった。これら特徴点は眼底上の78点に対応していた。ここで用いた特徴点は、2枚以上の画像間で対応付けられたものである。78点のうち、画像4枚で対応付けられたものが2点、3枚で対応付けられたものが16点、残り59点が2枚の画像の間で対応付けられた。

次に式(6)で表される評価関数  $E$  の値をパウエル法により最小化する。全パラメータの初期値は式(3)の  $\alpha_5 = 1$ 、それ以外を全て0とした。これは、全カメラが同じ姿勢で原点に位置し、また虚像として平面( $z = 1$ )を与えたことを意味する(Fig7上)。

パウエル法を直接用いると、パラメータの数が多

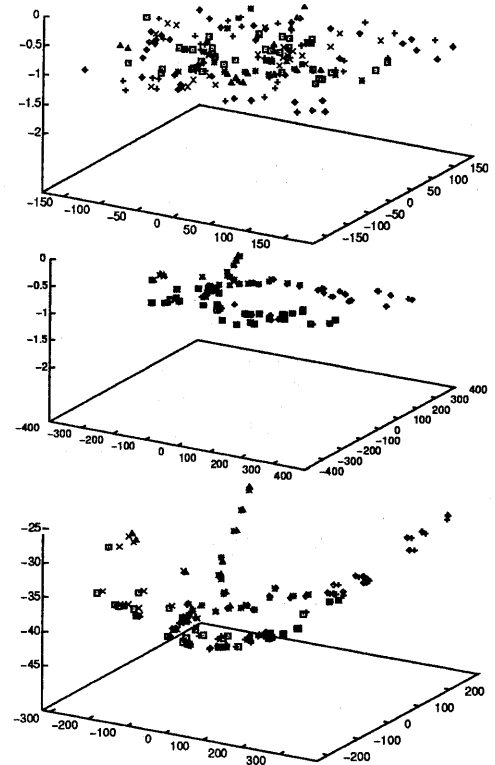


Fig. 7: 特徴点の重ね合わせによる実像の構築. 9枚の眼底画像中の特徴点を、2次曲面上に投影した結果を表示する。上:初期状態( $z = -1$ )。中:カメラの位置のみの移動による収束結果。下:収束結果。

いこともあり、極小解に陥ることが多かった。そこで、まず最初に2次曲面のパラメータおよびカメラの姿勢パラメータを初期値で固定したまま、カメラの位置のみを変化させることで評価関数  $E$  を最小化した。このことにより、Fig7中に示したように、特徴点のおおまかな位置合わせを行なうことができる。ついで、全カメラの位置・姿勢を変化させることにより、評価関数を最小化した。

得られた2次曲面上の特徴点の分布をFig7下に示す。対応する特徴点どうしが重なり、湾曲した2次曲面が得られている。この時、9つのカメラの位置・姿勢を表すパラメータも同時に推定された。

得られた2次曲面の2次の係数より、目の光学系をモデル化した単レンズの焦点距離  $F$  を求めるこ

とができる。 $G$ を適当に与え、2次曲面上の点の座標値を式(4)により変換することにより、眼の光学系の物空間における眼底上のパターンを得た。実像上の特徴点の各点を、式(4)により変換したものをFig8上に示す。得られた実像が式(3)を満足しているため、式(4)の変換により、球の具体的な式を陽に使うことなく、球面上に分布する特徴点を得ることができている。

評価関数  $E$  を最小化することで得られた各カメラの位置・姿勢および実像である2次曲面の形状を元に、各眼底画像上の全点を、この2次曲面上に投影することができる。ついで2次曲面上に投影されたこれら画像上の点を、式(4)により変換することで、眼底上のパターンを得ることができる。9枚の眼底画像それぞれの全点を、推定されたパラメータを元に球面へと変換した結果をFig8に示す。互いに一部分重なり合いながら、眼底の広い範囲を覆っている様子が分かる。

最終結果として得られた眼底パターンをFig9に示す。複数の眼底画像の重ね合わせにより、眼底の広い範囲にわたるパターンを得ることができた。異なる画像の間にまたがる血管などは、きちんと連なって表示されている。球面上のパターンが得られているので、任意の角度からの画像を提示することができる。

## 5 おわりに

様々な角度より取得した複数枚の眼底がぞうから、眼底形状を復元・表示する手法を提案した。本手法は眼の光学系を単レンズでモデル化し、眼底の形状が球面であることを利用する。単レンズによる球面の実像は式(3)で表される2次曲面となり、各眼底画像をこの実像を撮影したものとみなす。取得される眼底画像の歪みは、この実像とカメラとの位置関係により定まる。歪み方の異なる眼底画像をそれぞれ実像上に投影し、ぴったりと重なり合うよう各カメラの位置・姿勢および2次曲面の形状を推定する。ついで、得られた2次曲面の形状から眼底形状を復元する。この復元の具体的手順および実験結果を報告した。

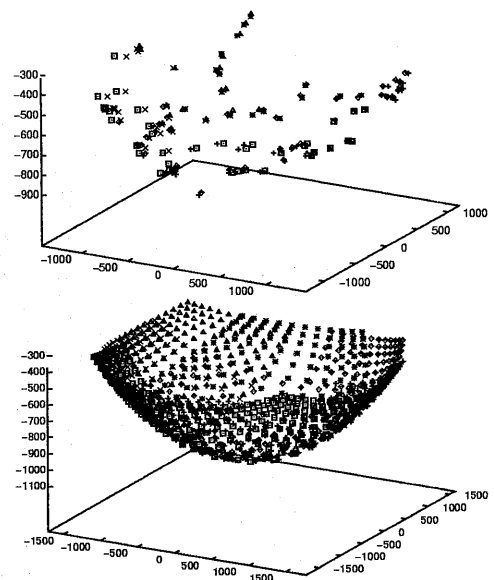


Fig. 8: 実像から球面への変換結果。この変換により、眼の光学系の像空間より物空間へと変換される。上：特徴点の分布。下：9枚画像の、球面での重なり具合。

## 参考文献

- [1] 出口光一郎, 川又大典, 水谷香苗, 本谷秀堅, 若林貴和: 眼底画像からの眼底形状の3次元復元・表示, CVIM 111-7, pp. 49-56
- [2] マックス・ボルン, エミル・ウォルフ: 光学の原理 I, 東海大学出版会.
- [3] 出口光一郎: 画像と空間 - コンピュータビジョンの幾何学, 昭晃堂.

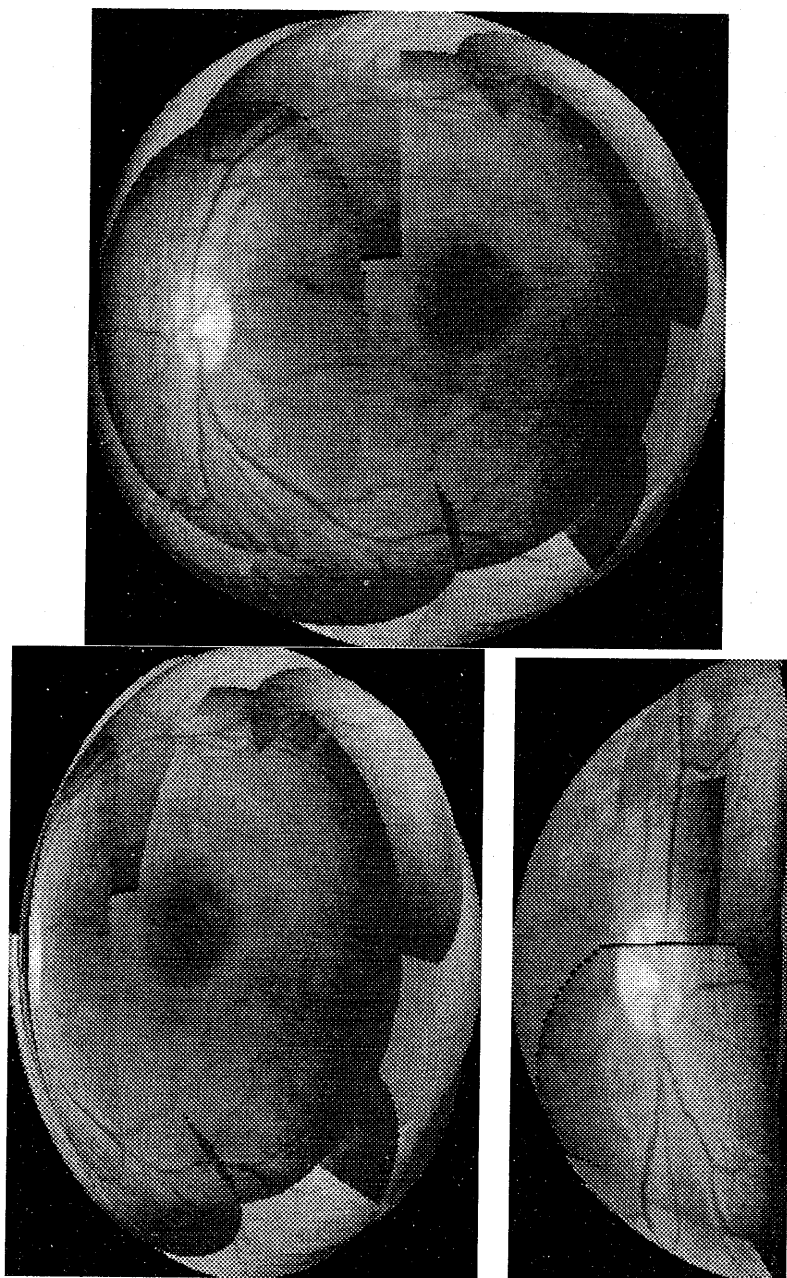


Fig. 9: 復元された眼底パターン