

(図1)しかし、この図をちょっとみただけで、各部のパターンをすべて理解することができるかという、そう簡単ではない。

この分割円や断面を写真にしてみたら、じっくり見てもらえる。そうすれば理解が進むのではないかというのが我々のアイデアである。

視覚伝導路学習ソフトの概要

この学習ソフトの仕組みは極めて簡単である。1)画像ファイルを読み込んで、視野画像とする。2)網膜上のユニット1つ1つに対応する視野の画素を取得する。3)このユニットを、視覚伝導路のそれぞれ部位(視野と網膜を含む)ごとに配列し、その画素を与えることで、画像を表示する。4)それぞれの画像上で一部あるいはすべてのユニットの画素を黒に置き換え、障害ユニットとし、全画像を再表示するというものである。

ソフト作成で最も問題になるのは、視覚伝導路の各部でユニットをどのように配置するかである。しかし、網膜対応座標は視中枢を除いてほとんど研究が進んでおらず、臨床的な間接的なもの以外、証拠はほとんどない。そこで、この学習ソフトで使う座標系は、臨床的な証拠に矛盾しない範囲で、なるべく単純なモデルを作り、徐々に変更していく方法をとることとした。現在の座標モデルによる画像を図3に示した。

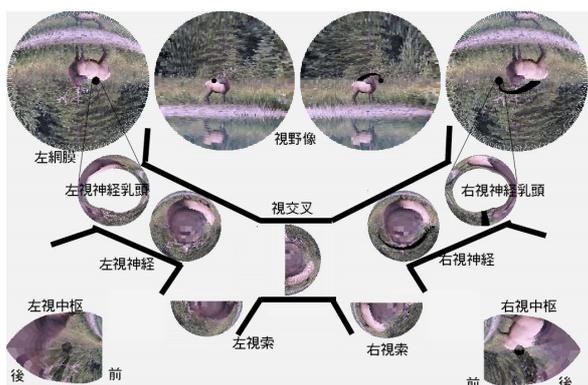


図3 視覚伝導路学習ソフトのプロトタイプ。画像ファイルを指定すると、その画像を読み込んで、視覚伝導路各部の画像を同時に表示する。この図では、視神経乳頭部の一部が障害されたとして、その部分を黒くした。他の画像でも、それに対応する部分が黒く表示される。

座標系のモデル

網膜面は曲率半径 11mm の凹面と考えた。網膜ユニットは、小さな円形とし、中心から周辺に向かって同心円状に詰まっていくモデルとした。ユニットの直径(mm)は、ヒト網膜神経節細胞の密度分布(Curcio & Allen, 1990)から求めた近似式を使用した。中心窩付近では、網膜神経節細胞がなくなるため、錐体細胞の最高密度(Curcio et al., 1990)よりユニットの最小値を求め、それが周辺に向かって直線的に増加するとした。

視野は平面と考えた。網膜ユニットと結節点を通る直線が、その平面と交叉する点の座標を視野座標とした。ユニットの画素は、視野座標に画像があるとして取得することにした。

視覚伝導路各部は、神経線維の束と考えた。神経線維の直径をすべて同じとし、その断面を画像化することにした。つまり、同じサイズの小円が一定のルールで密に詰まっているモデルとした。

視神経では、小円を網膜ユニットの位置から中心に向かってまっすぐ移動させて密に詰めていったモデルとした。つまり、中心に近い順に、なるべく極座標角度を維持する順番で、中心から同心円状に詰めていった。

しかし、視神経が網膜から出て行く直前の視神経乳頭では、少し複雑になる。視神経乳頭が網膜中心部から鼻側に約 4mm ずれているためである。

網膜ユニットから出た神経線維は視神経乳頭に向かって走り、視神経乳頭に近いものが中心に入ることが知られている。網膜ユニットは網膜中心部に密集しているため、神経線維がそのまま視神経乳頭に向って直進すると、耳側に偏って集まることになる。しかし実際には、中心部周辺からの神経線維は上下に迂回しており(図4B)、視神経乳頭周辺部の神経線維層の厚さは、むしろ上下が厚くなっている(山田他, 2005)。

今回用いた数学モデルでは、まず視神経乳頭周縁部を 360 分割し、1 度ごとに入りうるユニット数をその厚さから決めた。耳側水平線から上下別々に、1 度ごとに入るユニットの優先順位を決め、入りうるユニット数を超えると、次の角度に進むという方法で行った。優先順位は、

視神経乳頭中心を中心とする極座標で、中心からの距離がどれだけ短いかと、極座標角度が進入角度よりどれだけ小さいかの両方で決まっているはずである。これを表現する関数 r^*

(r は極座標の長さ、 θ は1より小さい定数、 α は極座標角度と進入角度の差) を仮に設定し、その小さい順としてみた。そして、 r^* を様々に変えて、緑内障の視野欠損と神経線維変性パターンに最も近くものを求めた(図4)。完璧とはいえないが、ある程度近い分布が得られた。図3では、右眼の視神経乳頭部での障害をシミュレーションしている。

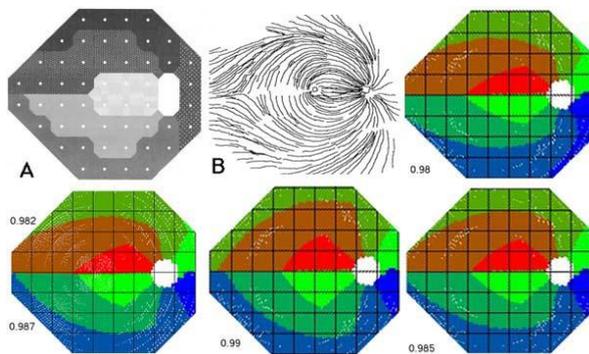


図4 網膜ユニットが視神経乳頭周縁部に進入するモデルの検討。A: 緑内障の視野欠損パターンと神経線維の変性像からえられたパターン(Garway-Heath DF et al., 2000より)。B: 実際の神経線維の走行(Fitzgibbon & Taylor, 1996より)。カラーの図は、進入する順位を決める関数 r^* の r^* を様々に変えたときのパターンの変化。いずれもBに似ているが、左下のものが、Aに最も近いと考え、これを図3の座標系で使用した。

視交叉と視索の断面は、それぞれ視神経断面の内側半分と外側半分を回転・反転したものとした。左右の網膜からの線維はそのまま重なる考えた。つまり、これらの部分の画像の点は2つのユニットに対応することになる。

左右の視中枢は、それぞれ網膜の右半分と左半分からのユニットを並べたものとした。左右の眼球からきたユニットはここでも重ねた。横軸は、網膜上でユニットが並び同心円の中心からの順位とし、縦軸はその同心円上の並びで水平線からの順位とした。結果は、図のように弾丸型となり、機能的MRIで示された視中枢の像(Duncan & Boynton, 2003)とよく一致した。

今後の展望

このソフトはまだ完成しておらず、学習効果の検討もこれからである。しかし、実際に像を表示してみると、学習ソフトとしてだけではなく、臨床でも使えるのではないかと考えるようになった。このソフトは、見え方・見えにくさを画像として表示することから、患者の見え方・見えにくさを共有できる可能性があるからである。そのためにも、完成を急ぐとともに、座標をさらに正確にする努力や、実際の患者の見え方・見えにくさにあわせた画像表示の工夫が必要になる。

引用文献

Curcio CA, Allen KA: Topography of ganglion cells in human retina. *J Comp Neurol*, 300: 5-25, 1990.

Curcio CA, Sloan KA, Kalina RE, Hendrickson AE: Human photoreceptor topography. *J Comp Neurol*, 292: 497-523, 1990.

Duncan RO, Boynton GM : Cortical magnification within human primary visual cortex correlates with acuity thresholds. *Neuron*, 38: 659-671, 2003.

Fitzgibbon T, Taylor SF: Retinotopy of the human retinal nerve fibre layer and optic nerve head. *J Comp Neurol* 375:238-251, 1996.

Garway-Heath DF, Poinsoosawmy D, Fitzke FW, Hitchings RA: Mapping the visual field to the optic disc in normal tension glaucoma eyes. *Ophthalmology*, 107: 1809-1815, 2000.

山田秀之、山川 曜、千葉マリ、若倉雅登：光干涉断層計を用いた健常者乳頭周囲網膜神経線維層厚の年齢による変化の検討。日眼会誌, 110: 165-170, 2006.