

球面調和関数展開による脳表面形状特性解析

1 T-03

箱田直子¹ 三浦直樹² 志田和人³ 川島隆太⁴ 川添良幸⁵ 福田寛⁶ 清水俊夫^{1,2}¹ 弘前大学大学院理学研究科情報科学科² 弘前大学理工学部電子情報システム工学科³ 東北大学学際科学研究センター⁴ 東北大学未来科学技術共同研究センター⁵ 東北大学金属材料研究所⁶ 東北大学加齢医学研究所

1. はじめに

我々は、日本人健常者の脳画像データベースを行っており、脳画像データの収集と並行して、脳機能・形態画像から得られる特徴量を用いた様々な解析技術の開発を行っている。

本研究では、脳画像データから脳形態を解析するために、脳の全体的な表面形状を球面調和関数で表現する手法を提案する。本手法の手順は、二つからなる。第一に、おおまかな脳表面を決定し、第二に、脳領域の重心から決定された脳表面までの距離を球面調和関数展開する。

2. MRI 3次元脳画像データ

通信放送機構青葉脳画像リサーチセンターで収集された MRI 3次元脳画像 54 画像を使用する。被験者の年齢は、20代(19画像)と60代(36画像)である。なお、使用データは、あらかじめ頭部の脳以外の組織を削除し、脳領域抽出処理を行っている。更に、ソフトウェア AIR3.0.8[1]を用いて脳の位置と向きを整合した。

3. 方法

3.1 脳表面決定法

脳領域の表面形状は、複雑に入り組んでいるため、同一動径方向で脳領域の表面を構成するボクセルが複数存在することが多い。そこで、以下の脳表面決定法により、動径方向の脳表面ボクセルを一意的に決定する。ここで MRI 3次元脳画像を構成するボクセルの信号強度が“0”であれば背景ボクセル、“0以外”であれば脳領域ボク

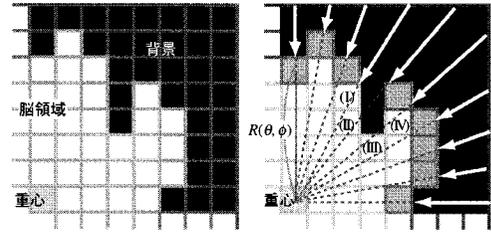


図1 脳表面決定法

セルとしている。はじめに、 $(\theta, \phi) = (0, 0)$ の動径方向上で、脳領域から十分に遠い点から、脳領域の重心に向けて探索ベクトルを伸ばす。そして、探索ベクトルが最初に接触する脳領域ボクセルを“脳表面ボクセル”と定義する。“脳表面ボクセル”が発見されれば、探索ベクトルの伸長を終了し、重心から“脳表面ボクセル”までの距離を $R(\theta, \phi)$ とする。引き続き、 $0 \leq \theta \leq 2\pi, 0 \leq \phi \leq \pi$ の範囲で θ, ϕ をそれぞれ 0.5度ずつ変化させ“脳表面ボクセル”を決定し、 $R(\theta, \phi)$ を求める。以上の処理の例を図1に示す。白ボクセルは脳領域、黒ボクセルは背景、そして図1(b)中の灰色ボクセルが“脳表面ボクセル”である。ここで、(I)~(IV)の脳領域ボクセルのように、背景ボクセルに隣接するものの、脳表面決定法では、脳組織の表面として選択されない場合がある。

3.2 脳表面形状の球面調和関数展開

まず、脳表面形状を球面調和関数展開するときの座標系は脳領域の重心を中心とした球座標系を用いる。ここで、脳領域の重心は、全脳領域ボクセルの座標平均値である。

重心から、ある動径方向上の“脳表面ボクセル”までの距離 $R(\theta, \phi)$ は球面調和関数 $Y_{lm}(\theta, \phi)$ $l=0, 1, 2, \dots; -l \leq m \leq l$ の正規完全直交性から、

$$R(\theta, \phi) = \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=-l}^l C_{lm} Y_{lm}(\theta, \phi) \quad (1)$$

と展開可能である。(1)式で示されるように、 $R(\theta,$

Morphological Analysis of MR brain images by spherical harmonic function

Naoko Hakoda¹, Naoko Miura², Toshio Shimizu³, Kazuhito Shida³, Ryuta Kawashima⁴, Yoshiyuki Kawazoe⁵, Hiroshi Fukuda⁶

¹Department of Information Science, Graduate School of Science, Hirosaki University, ²Department of Electronic and Information System Engineering, Faculty of Science and Technology, Hirosaki University, ³Center of Interdisciplinary Research, Tohoku University, ⁴New Industry Creation Hatchery Center, Tohoku University, ⁵Institution of Material Research, Tohoku University, ⁶Institution of Development, Aging and Cancer, Tohoku University

¹Institution of Development, Aging and Cancer, Tohoku University

ϕ)が一値の関数となることから、重心から、ある動径方向上で一意の“脳表面ボクセル”を決定している。このときの展開係数 C_{lm} は、

$$C_{lm} = \int_0^\pi \sin \theta d\theta \int_0^{2\pi} d\varphi Y_{lm}'(\theta, \varphi) R(\theta, \varphi) \quad (2)$$

である。脳表面形状を1次まで展開する場合には、 $(l+1)^2$ 個の展開係数を求める必要がある。

3.3 球面調和関数展開した脳表面形状の評価

得られた展開係数を用いて、式(1)によって復元した脳表面形状が、どの程度原画像の脳形状を表現できているか評価する。原画像と展開係数から復元した形状において、0.5度毎に、重心から脳表面までの距離の差を求め、そして、式(3)に示すように距離の差の二乗平均平方根を求め、これを復元誤差 d_{rec} と定義する。

$$d_{rec} = \sqrt{\frac{\sum_a \sum_b d_{ab}^2}{N}} \quad (3)$$

ここで d_{ab} は、原画像の脳表面から復元画像の脳表面までの距離、 N は、評価点の合計である。

4. 結果と考察

本手法により、球面調和関数展開する原画像と、この原画像の展開によって得られた5次、及び15次までの展開係数を用いて再現した結果を図2に示す。

5次までの展開係数で復元した形状は、原画像で見られる全体的な形の傾向を形状を再現できている。更に10次までの復元形状では、5次までの復元形状では再現されなかった前頭葉、後頭葉、側頭葉、脊髄などの特徴的な形状も再現できている。

54画像を関数展開し、各展開回数までで復元したときの復元誤差を求めた結果 展開回数が増えるにつれて、復元誤差 d_{rec} の平均値は、減少していく。つまり、展開回数を上げれば形状が、より、正確に再現されることになる。また、若年層に比べ、老年層の復元誤差 d_{rec} の平均値が大きい。このことは、加齢により老年層の脳溝が開大し、若年層よりも脳表面形状が複雑になるために、復元誤差が大きくなるためであると考えられる。

次に、あるMRI 3次元脳画像データを線形変換したときの3次までの展開係数の変動例を図3

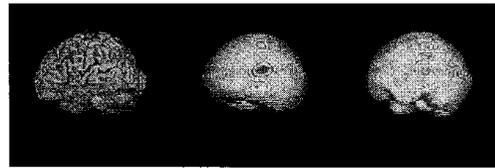


図2 左方向から見た脳画像 (原画像, 5次までの復元画像, 15次までの復元画像)

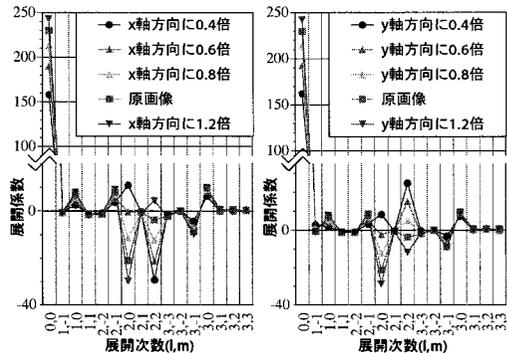


図3 x軸,y軸方向に方向に拡大縮小した場合の展開係数の変動

に示す。x軸方向に脳形状を拡大(y軸方向に縮小)したときに、 $(l, m) = (2, 2)$ の展開係数は大きく増加し、逆にx軸方向に縮小(y軸方向に拡大)したときには、大きく減少していることが確認できる。そのため、低次の展開係数の中で特に $(l, m) = (2, 2)$ の展開係数値が脳形状の縦横比に関係していると言える。

変形させた脳形状から得られる展開係数値が、規則的に変化することから、球面調和関数展開によって得られる展開係数は、脳形状特徴を表現する値となっており、本手法は脳形状特徴解析に有効である。更に、展開係数を用いたクラスター解析による脳形状分類や、脳形状からの脳画像データベース検索が可能になると考えられる。

文献

[1] Karl Zilles, Ryuta Kawashima, Andreas Dabringhaus, Hiroshi Fukuda, Thorsten Schorman, "Hemispheric Shape of European and Japanese Brains:3-D MRI Analysis of Intersubject Variability", *NeuroImage* 13:262-271,2001.
 [2] Woods RP, Grafton ST, Holmes CJ, Cherry SR, Mazziotta JC., "Automated image registration:I.General methods and intrasubject, intramodality validation", *Journal of Computer Assisted Tomography*, 22: 155-165, 1998.