

脳機能画像の位置と形状を補正する方法の考察

大村 蓉子 (指導教員: 瀬々潤)

1 はじめに

脳機能画像は脳の活動や病状の診断に有益であるが、撮影中には被験者の位置がずれてしまう可能性があり、この位置ずれが原因でタスクに対する正確な脳の活動部位を推定できなくなる。例えば fMRI では血流量の 2 次微分を観測しており、観測値の変化が血流量によるものなのか、それとも位置ずれによるものなのかは判断しがたい。そこで、位置の補正を正確に行うため複数の補正方法を考察することに正確かつ高速な補正方法を調査した。脳機能画像には複数の撮影法があるが、本研究では医療用としても撮影されている磁気共鳴を用いた fMRI を利用する。しかし他の脳機能画像に対しても、本研究の考察は適用可能である。脳機能画像は撮影装置の中で被験者が所定のタスクを行い、タスク中の脳の活動状況を撮影する。脳機能の解析前に必要となる画像補正には撮影中のずれによる誤差の補正、画像の輝度を一定にするための補正などがあるが、今回は頭部の位置と形状の補正に着目して研究を行った。利用したデータは、被験者にタスクを行っている間 2 秒ごとに合計 351 枚の脳画像を撮影したデータ [1] であり、各画像は $64 \times 64 \times 24$ の解像度である。

2 研究方法と考察

位置の補正は 1 回目に撮影した画像の位置を標準位置として、2 回目以降の各画像を xyz 軸 3 次元座標に置き換えて、アフィン変換行列を使った平行移動、回転によって標準位置となるべく一致するように移動させる。ここでは一致度として全ボクセルの二乗誤差の和を最小にするパラメータを見つける最適化手法について比較、考察した。

2.1 補間方法の比較

値が離散的にしか取られていないため、移動後の位置の値は観測値を使って補間する。今回は画像補間に頻繁に利用され、大量データの補間が可能な上、微量の移動に対しても補間可能な 2 つの補間方法 [2] を利用した。

2.1.1 trilinear 補間 (三次元線形補間)

ボクセル値は 3 次元格子状に与えられている。この格子上の点を $(x1[i], x2[j], x3[k])$ ($i, j = 0, \dots, 63, k = 0, \dots, 23$) とする。またこの点のボクセル値を $y[i][j][k]$ と表し、座標 (x_1, x_2, x_3) の補間値を $y(x_1, x_2, x_3)$ で表す。 $y[i][j][k] = y(x1[i], x2[j], x3[k])$ となる。この時

$$x1[i] \leq x_1 \leq x1[i+1]$$

$$x2[j] \leq x_2 \leq x2[j+1]$$

$$x3[k] \leq x_3 \leq x3[k+1]$$

である時、

$$t \equiv (x_1 - x1[i]) / (x1[i+1] - x1[i])$$

$$u \equiv (x_2 - x2[j]) / (x2[j+1] - x2[j])$$

$$s \equiv (x_3 - x3[k]) / (x3[k+1] - x3[k])$$

とすると、

$$\begin{aligned} y(x_1, x_2, x_3) &= (1-s)\{(1-t)(1-u)y[i][j][k] \\ &+ t(1-u)y[i+1][j][k] + tuy[i+1][j+1][k] \\ &+ (1-t)uy[i][j+1][k]\} \\ &+ s\{(1-t)(1-u)y[i][j][k+1] \\ &+ t(1-u)y[i+1][j][k+1] \\ &+ tuy[i+1][j+1][k+1] \\ &+ (1-t)uy[i][j+1][k+1]\} \end{aligned}$$

と補間値を計算することができる。

2.1.2 B-spline 補間

3 次 B-spline 曲線を用いボクセル値を推定する。spline 曲線の中でも特に滑らかな曲線である。 x_1, x_2, x_3, i, j, k は trilinear 補間と同様に扱うとして、まず次のような関数を定義する。

$$\begin{aligned} F_0(t) &= \frac{1}{6}(1-t)^3 \\ F_1(t) &= \frac{1}{2}t^3 - t^2 + \frac{2}{3} \\ F_2(t) &= -\frac{1}{2}t^3 + \frac{1}{2}t^2 + \frac{1}{2}t + \frac{1}{6} \\ F_3(t) &= \frac{1}{6} \end{aligned}$$

とおく。

$$\begin{aligned} X_{j,k}(x_1) &= \sum_{l=0,\dots,3} F_l(x_1)y[i+l-1][j][k] \\ Y_k(x_2) &= \sum_{l=0,\dots,3} F_l(x_2)X_{j+l-1,k}(x_1) \end{aligned}$$

とすると、

$$y(x_1, x_2, x_3) = \sum_{l=0,\dots,3} F_l(x_3)Y_l(x_2)$$

となる。

2.1.3 疑似移動による位置補正の考察

図 1 は 1 枚目の画像を擬似的に x, y, z 方向に 1.0×10^{-7} 平行移動、 x, y, z 軸について 1.0×10^{-7} 回転したとき $y = 29, z = 9$ の位置の上記 3 手法によるボクセルの補間値をグラフにしたものである。

図 1 より B-spline 補間が最もボクセル値の変化を自然かつ滑らかにとらえ少し平滑化されたようになっているが、trilinear 補間を用いた場合と比べると近傍値から大きく離れてしまっている。これらの事から、大幅に位置を変換する場合は滑らかに点と点をつなげる B-spline 補間が適しているが、本位置補正のように微幅移動の場合は特に近傍点値を反映する trilinear 補間の方が適していると思われる。よって、以下では trilinear 補間を用いる。

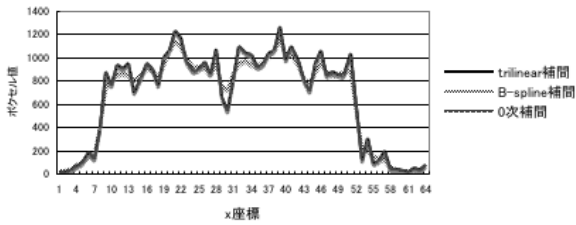


図 1: 補間の値を 3 手法で比較

2.2 移動方法の比較

標準位置の画像と各画像とのボクセル値の差の二乗和が最小になるように位置を動かす。ここでは脳の活動が微弱であることから、補正前の位置を初期値とし局所解を探索する。解析ツールとして知られている SPM[1] では Gauss-Newton 法を用いているのに対して、今回は一階微分のみで求められるアルゴリズムの中から大域的収束性を持つ次の 2 つの方法で比較した。 x_n, y_n, z_n を現在の座標値、 $f(x_n, y_n, z_n)$ をその関数値として小さくなる様に移動した所の座標値を $x_{n+1}, y_{n+1}, z_{n+1}$ とする。

2.2.1 最急降下法

探索点の勾配のみを使って最小化した解を求める。一定の割合で勾配が負になる方向へ順次位置を移動する [2]。

$$\begin{aligned} x_{n+1} &= x_n - \alpha f'(x_n, y_n, z_n) \\ y_{n+1} &= y_n - \alpha f'(x_{n+1}, y_n, z_n) \\ z_{n+1} &= z_n - \alpha f'(x_{n+1}, y_{n+1}, z_n) \end{aligned}$$

(α :1 より小さい定数)

2.2.2 共役勾配法

6 つのパラメータの移動方向を全て参照し探索点の勾配だけでなく今まで下ってきた方向ベクトルも考慮して解を求める [2]。 R_n を n 回目に移動した点の座標ベクトルとする。

$$\begin{aligned} R_{n+1} &= R_n + \alpha_n p_n \\ p_{n+1} &= -f'(R_{n+1}) + \beta_{n+1} p_n \\ \beta_{n+1} &= \frac{\|f'(R_{n+1})\|^2}{\|f'(R_n)\|^2} \end{aligned}$$

(p_{n+1} は次の探索方向、 β_{n+1} は重み係数、 α_n は 1 次探索により決定される)

2.2.3 比較結果と考察

図 2 は最急降下法と共役勾配法で最小化位置を求め勾配が収束した時点での標準画像のボクセル値との差の二乗和の時系列グラフである。時間によってより二乗和が小さい位置に動かしている方法は異なっている。が実際に計算を行い計測した正位置での値により近づけているのは共役勾配法であった。次に、位置が動いた幅を比較する。図 4 は各手法を用いた時、最小化位置までに動いた x, y, z 位置座標の幅を示したグラフである。最急降下法はより小さい移動幅で最小化した解を見つけることが出来ており、これは位置ずれの補正後に行われる磁気や補間の影響を取り除く作業に適していると思われる。一方実行時間を比較すると、最急

降下法で 2 時間 53 分、共役勾配法で 6 時間 30 分 (OS は Mac OS X 10.4, 言語は Java5, CPU は Core 2 Duo 2GHz、メモリは 64MB を使用) とどちらも大幅に時間がかかってしまい非常に実用性にかけてしまっていたが、上の 3 点を考慮すると最急降下法の方が有効と考えられた。しかし別のデータとして、被験者がタスク中に 7 秒毎に 96 枚の画像を撮影した実験の観測結果でも比較を行ったところ、3 点全てにおいて共役勾配法の方がより良い結果が得られた。このことから、データの量や計測時間、タスクによって適している手法は異なるのではないかと予想される。

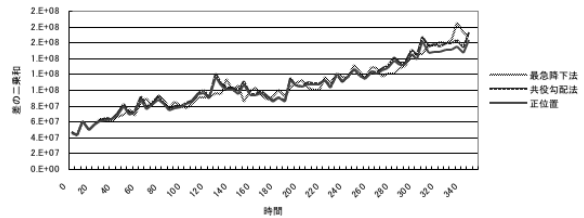


図 2: 推定した最小化した位置の二乗和

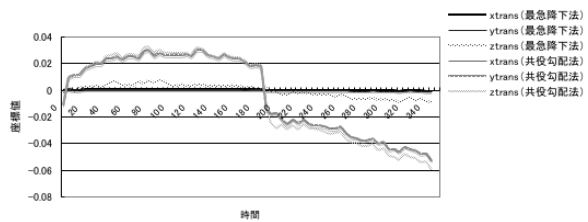


図 3: 最小化した位置 (平行移動)

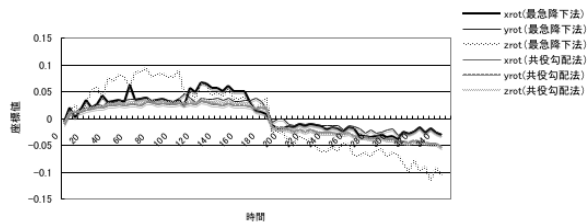


図 4: 最小化した位置 (回転)

3 今後の課題

最適化については共に実行速度向上のためのプログラムの見直しと、より多くのデータで実施することにより各手法の比較を行いたいと考えている。また今研究で使用したデータの試験では 1 人を対象としていたため補正の必要がなかった形状の補正についても考察していきたい。

参考文献

- [1] Ashburner, K. Friston, and W. Penny, "HUMAN BRAIN FUNCTION", Academic Pr, 1997.
- [2] W. Press, W. Vetterling, Saul Teukolsky, and Brian Flannery (丹慶勝市ら訳), 『ニューメリカルレシピ. イン. シー』, 技術評論社, 1983 年.