

医用データに基づく患者別数値モデルの作成法に関する研究

351004165 柴田 俊輔

論文要旨

患者別の数値モデルを作成することは患者固有の成因と治療法を数値解析によって検討する上で基礎となる．本研究では，特発性側弯症患者のX線CT画像から有限要素モデルを作成する方法を開発することを目的として，次の方法について検討した．

- (1) \mathcal{V} を椎体番号全体の集合， $\mathcal{V}_0 \subset \mathcal{V}$ をX線CT画像が得られている椎体番号の集合， $D \subset \mathbb{R}^3$ をX線CT画像の領域とする． D 上の画像から第 $i \in \mathcal{V}_0$ 椎体の境界 Σ^i のボクセルを抽出し， Σ^i 上で零値をとる符号付き距離 $d: D \rightarrow \mathbb{R}$ を求める．
- (2) $\Omega^i \in \mathbb{R}^3$ を正常有限要素モデルの第 $i \in \mathcal{V}_0$ 椎体の領域， $\mathbf{q}^i \in \mathbb{R}^{11}$ を並進，回転，スケール，テーパ変換の変数， $\omega_p^i: \Omega^i \times \mathbb{R}^{11} \rightarrow \mathbb{R}^3$ を患者モデルへのパラメトリック写像として，

$$\min_{\mathbf{q}^i \in \mathbb{R}^{11}} \left\{ \int_{\omega_p^i(\Omega^i, \mathbf{q}^i)} d(\mathbf{x}) \, d\mathbf{x} \right\}$$

を満たす $\omega_p^i(\Omega^i, \mathbf{q}^i)$ を求める． $\mathbf{q} = (q_1^T, \dots, q_{|\mathcal{V}_0|}^T)^T$ とおく．

- (3) $\Omega \supset \bigcup_{i \in \mathcal{V}} \Omega^i$ を正常脊柱モデル全体の領域， $\mathbf{C}: \Omega \rightarrow \mathbb{R}^{d \times d \times d \times d}$ を剛性， $\theta \in \Theta = W^{1, \infty}(\Omega; \mathbb{R})$ として， $\phi(\theta) = \tan^{-1} \theta / \pi + 1/2$ を患者モデルの密度， $\phi^3 \mathbf{C}$ を患者モデルの剛性，(2)で得られた \mathbf{q} を用いて， $i \in \mathcal{V}_0$ に対して $\zeta^i: \partial\Omega^i \ni \mathbf{x} \mapsto \omega_p^i(\mathbf{x}, \mathbf{q}^i)$ が既知でそのときの変位を $\mathbf{u}_0^i(\mathbf{x}) = \zeta^i(\mathbf{x}) - \mathbf{x}$ とする．このとき

$$\min_{(\phi, \mathbf{u}) \in \Theta \times U} \sum_{i \in \mathcal{V}_0} \int_{\partial\Omega_0^i} \alpha \|\mathbf{u}_0^i - \mathbf{u}\|^2 \, d\gamma$$

such that $\int_{\Omega} \mathbf{S}(\phi, \mathbf{u}) \cdot \delta \mathbf{E}(\mathbf{u}, \mathbf{v}) \, dx = \sum_{i \in \mathcal{V}_0} \int_{\partial\Omega^i} \alpha (\mathbf{u}_0^i - \mathbf{u}) \cdot \mathbf{v} \, d\gamma \quad \forall \mathbf{v} \in U$

を満たす密度と変位 (ϕ, \mathbf{u}) を求める．ただし， $U = \{H^1(\Omega; \mathbb{R}^3) \mid \mathbf{u} = \mathbf{0} \text{ on } \Gamma_0\}$ ， Γ_0 は正常モデルと患者モデルの位置を合わせる部分境界とする． $\mathbf{S}(\phi, \mathbf{u}) = \phi^3 \mathbf{C} \mathbf{E}(\mathbf{u})$ は第2 Piola-Kirchhoff 応力， $\mathbf{E}(\mathbf{u})$ はGreen-Lagrange ひずみ， $\delta \mathbf{E}(\mathbf{u}, \mathbf{v})$ は \mathbf{u} の変分 \mathbf{v} に対する $\mathbf{E}(\mathbf{u})$ の変分， $\alpha: \Gamma^1 \rightarrow \mathbb{R}$ ， $\alpha > 0$ ，は固定関数とする．

本研究では，(1)，(2)，(3)を計算するプログラムを開発し，実際のX線CT画像(T12, L1, L2)から患者モデルの密度，変位，ひずみが得られることを確認した．

