嚥下運動の形状観測データに基づく筋活動同定に関する研究

351604095　栗本 涼太

論文要旨

生体の運動は筋肉の収縮運動によって引き起こされる．筋肉の収縮運動をとおして嚥下運動と誤嚥のメカニズムを解明するためには，筋肉の収縮運動を同定することが必要となる．本研究では，筋肉の収縮運動を非等方的な非弾性ひずみの発生による有限弾性変形であると仮定して，有限弾性変形した形状が観測された形状になるような筋肉の収縮運動を同定する問題として定式化し，その数値解法を開発し，数値解析によってその妥当を実証した．

本研究では，筋活動同定問題を次のように定式化した．図 1 において，$\Omega_0 \subset \mathbb{R}^d$ $(d \in \{2,3\})$ と $\Omega(\boldsymbol{u})$ はそれぞれ筋が伸縮する前と後の領域を表すとする．このとき，境界 $\Gamma_{\mathrm{D0}} \subset \partial\Omega_0$ が境界 $\Gamma_{\mathrm{D}}(\boldsymbol{u}) \subset \partial\Omega(\boldsymbol{u})$ に移動したときの変位 $\boldsymbol{u}_{\mathrm{D}} : \Gamma_{\mathrm{D0}} \to \mathbb{R}^d$ は CT 画像によって既知であると仮定する．筋は次のように伸縮するとモデル化する．設計変数を $\theta \in X = H^1(\Omega_0; \mathbb{R})$ とおく．θ に対して，筋の伸縮量 $\phi(\theta)$ とそれによる非弾性 Green-Lagrange ひずみ $\bar{\boldsymbol{E}}_{\mathrm{M}}(\theta)$ は，

$$\phi(\theta) = -a_{\mathrm{M}} \left(\frac{1}{2} \tanh\theta + \frac{1}{2} \right), \quad \bar{\boldsymbol{E}}_{\mathrm{M}}(\theta) = (\bar{e}_{\mathrm{M}ij})_{ij} = \phi(\theta) \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\nu_{\mathrm{M}} & 0 \\ 0 & 0 & -\nu_{\mathrm{M}} \end{pmatrix} \tag{1}$$

のように与えられると仮定する．ただし，$\bar{\boldsymbol{E}}_{\mathrm{M}}(\theta)$ は，弾性 Green-Lagrange ひずみ $\boldsymbol{E}(\boldsymbol{u})$ の主ひずみの方向を座標系にとった局所座標系 ($\bar{(\cdot)}$ をつける) に対して定義されるものとする．また，a_{M} と ν_{M} は筋の特性から決定される実定数とする．$\theta \in X$ に対して $\bar{\boldsymbol{E}}_{\mathrm{M}}(\theta)$ が発生し，同時に Γ_{D0} 上で $\boldsymbol{u}_{\mathrm{D}}$ の強制変位が与えられたときの超弾性体の変位 $\boldsymbol{u}$ は，有限変形弾性問題

$$-\boldsymbol{\nabla}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\Pi}(\theta,\boldsymbol{u}) = \boldsymbol{0}^{\mathrm{T}}_{\mathbb{R}^3} \ \text{ in } \Omega_0, \quad \boldsymbol{\Pi}^{\mathrm{T}}(\theta,\boldsymbol{u})\boldsymbol{\nu} = \boldsymbol{0}^{\mathrm{T}}_{\mathbb{R}^3} \ \text{ on } \Gamma_{\mathrm{N0}}, \quad \boldsymbol{u} = \boldsymbol{u}_{\mathrm{D}} \ \text{ on } \Gamma_{\mathrm{D0}}$$

の解であるとする．ここで，$\boldsymbol{\Pi}(\theta,\boldsymbol{u}) = \boldsymbol{F}(\boldsymbol{u})\boldsymbol{S}(\theta,\boldsymbol{u})$ は第 1 Piola-Kirchhoff 応力を表し，第 2 Piola-Kirchhoff 応力 $\boldsymbol{S}(\theta,\boldsymbol{u})$ は超弾性体の構成則と Duhamel-Neumann 則を組み合わせた

$$\bar{\boldsymbol{S}}(\theta,\boldsymbol{u}) = \frac{\partial p\left(\boldsymbol{E}(\boldsymbol{u}) - \boldsymbol{E}_{\mathrm{M}}(\theta)\right)}{\partial\left(\boldsymbol{E}(\boldsymbol{u}) - \boldsymbol{E}_{\mathrm{M}}(\theta)\right)}$$

によって与えられると仮定する．ただし，p は弾性ポテンシャルを表す．これらの条件の下で，評価関数に

$$f(\theta,\boldsymbol{u}) = \int_{\Gamma_{\mathrm{D0}}} \left(\boldsymbol{\Pi}^{\mathrm{T}}(\theta,\boldsymbol{u})\boldsymbol{\nu}\right) \cdot \left(\boldsymbol{\Pi}^{\mathrm{T}}(\theta,\boldsymbol{u})\boldsymbol{\nu}\right) \, \mathrm{d}\gamma$$

を用いる．筋活動同定問題は，f が最小となる $\theta \in X$ を求める問題として定式化した．

本研究では，θ 型 H^1 勾配法に基づいた反復法による筋活動同定問題を解く数値解析プログラムを開発した．図 2 に立方体を圧縮したときの変形モデルを示す．色は変位を示す．この結果より，最適解 θ によって変形が再現されることが確認された．

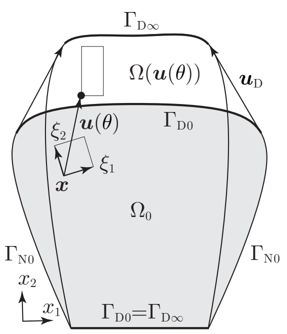
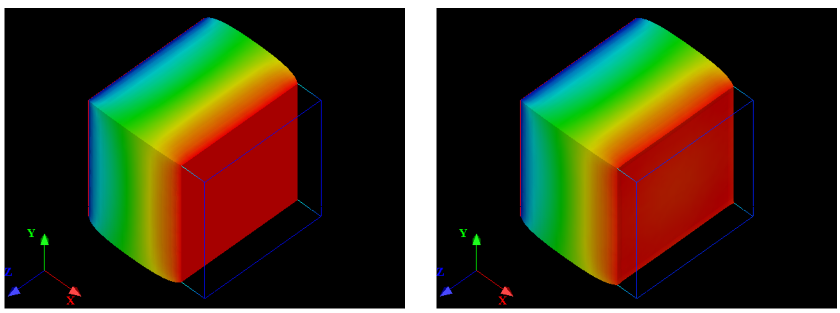


図 1: 問題設定



$\boldsymbol{u}_{\mathrm{D}}$ and θ による変形　　最適解 θ による変形

図 2: 立方体の収縮