

運転操作を対象とした筋活動の数理モデリング

351104089 加藤 大地

論文要旨

自動車の操縦安定性を向上させる設計を実現するためには、自動車を人間-機械システムとしてモデル化しておく必要がある。ステアリングホイールの保舵状態に注目すれば、ステアリングホイールからの外力に対するドライバの筋活動を再現できるモデルを構築することが必要となる。本研究では、筋活動のエネルギーと筋の特性に関する評価関数を用いて最適化問題を構成して、その解により筋活動を予測できるモデルを構成することを目指した。

本研究では、ステアリングホイールの保舵状態にある人間の筋骨格系を図 1 のような 2次元の 4 関節と 8 筋をもつリンク結合された剛体システムと仮定した。筋骨格系の姿勢は与えられているとする。 $\mathbf{u}_S = (u_{S1}, u_{S2})^T \in \mathbb{R}^2$ を手元の変位とする。ただし、ステアリングホイールの運動制約により $u_{S2} = 0$ を仮定する。一方、 $\mathbf{p}_S = (p_{S1}, p_{S2})^T \in \mathbb{R}^2$ をステアリングホイールからの外力として、 $p_{S1} = 1$ とおく。さらに、筋は収縮のみに筋力 $\boldsymbol{\psi} = (\psi_1, \dots, \psi_8) \in \mathbb{R}^8$ を発生し、図 2 の関係により剛性が変化すると仮定する。このとき、 $p_{S1} = 1, u_{S2} = 0$ および $\boldsymbol{\psi}$ が与えられたならば、 p_{S2} と u_{S1} は手元における力の釣り合い方程式

$$\mathbf{K}_S(\boldsymbol{\psi}) \mathbf{u}_S = \mathbf{p}_S \quad (1)$$

によって決定されると仮定する。ここで、 $\mathbf{K}_S : \mathbb{R}^8 \rightarrow \mathbb{R}^{2 \times 2}$ は全関節の回転変位に対する剛性行列を縮約した手元の剛性である。このような定義の下で、筋力 $\boldsymbol{\psi}$ を

$$\min_{\boldsymbol{\psi} \in \mathbb{R}^8} \{f_0(\boldsymbol{\psi}) = \boldsymbol{\psi} \cdot \boldsymbol{\psi} \mid f_1(u_{S1}) = |u_{S1}| - c \leq 0, f_2(\boldsymbol{\psi}) = -\boldsymbol{\psi} \leq \mathbf{0}_{\mathbb{R}^8}, (1)\}$$

を満たすように決定するモデルを提案した。ただし、 c は正定数である。ここで、 f_0, f_1, f_2 は筋活動のエネルギー、手先変位に対する制約、筋力の一方向性を表す。

この問題を MATLAB® で解いた結果、数値解の中に実験で確認されている次の現象を得た。

- (1) 筋の拮抗現象
- (2) ステアリングホイールを押しつける動作

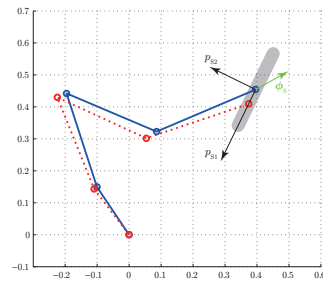
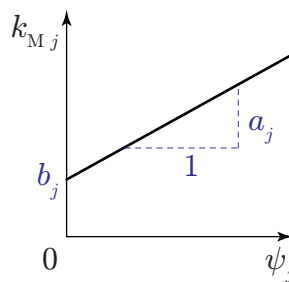
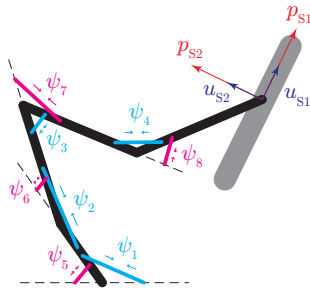


図 1: 2次元筋骨格モデル

図 2: 筋力と筋剛性の関係

図 3: 最適筋力時の変形