上肢の可操作性評価手法の自動車ドア操作への適用

○山田直樹, 米澤泰延, 正守一郎(マツダ株式会社), 辻 敏夫(広島大学)

Application of manipulability evaluation method to door operation of vehicle

○Naoki Yamada, Hironobu Yonezawa, Ichiro Masamori(Mazda Motor Co.),

Toshio Tsuji (Hiroshima Univ.)

1. はじめに

各種操作機器の設計/評価を行う場合、筋骨格系の力学的特性との適合性を考慮に入れることは重要である。上肢の力学的特性を解明するため、ロボット工学で用いられる操作力楕円体による「力の発揮し易さ」の解析手法をもとに上肢の可操作性評価手法を構築した。本手法を自動車ドア操作へ適用し、実験により定性的にその有効性を確認した。

2. 上肢の可操作性評価手法

生体の筋骨格系は多関節リンク構造と見なすことができる。上肢の力学的特性を解明するにあたり、ロボット工学で用いられる可操作性評価手法¹⁾に生体のトルク特性を考慮したモデルによる可操作性評価手法を構築した。

一般に、 n 個の回転関節リンク構造において関節トルク τ は手先力 f を用いて

$$\tau = J^T f \quad (1)$$

で得られる。ただし、手先位置姿勢ベクトル $x \in R^m$ の関節変位ベクトル θ に関するヤコビ行列を $J(\theta) \in R^{m \times n}$ とする。

生体の各関節における可動域や実現しうる最大関節トルクなどの特性は、関節の骨格構造や関節運動に対応する筋群によって決まり、一般に関節毎に変化する²⁾。このような関節運動の特性を考慮した新しい評価指標を提案する。各関節が最大随意トルク発生時を1としてどの程度関節トルクを発揮しているか、その割合を関節トルク発揮度ベクトル $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)^T \in R^n$ と定義する。このとき α を用いて、関節トルクベクトル $\tau \in R^n$ を

$$\tau = T(\theta) \alpha \quad (2)$$

と定義する。ただし、 $T(\theta) = \text{diag.}(\tau_{1j}^{\max}(\theta_1), \tau_{2j}^{\max}(\theta_2), \dots, \tau_{nj}^{\max}(\theta_n))^T \in R^{m \times n}$ ($j \in \{1, -1\}$ は回転方向を表す)は、各関節が角度 θ_j で発生できる最

大関節トルクの絶対値を要素とする対角行列である。 α_j ($|\alpha_j| \leq 1$) は第 i 関節の最大関節トルクに対する比率であり、 α_j の符号は関節の回転方向を表す。

式(1)、(2)より、

$$\alpha = T(\theta)^{-1} J(\theta)^T f \quad (3)$$

を得る。 $T(\theta)$ は常に正則であるから、上式を用いて力 f に対する各関節の負担を α として表現できる。このとき、 $\|\alpha\| \leq 1$ の下で実現可能な手先力 f の集合を考えると、式(3)を用いて

$$\alpha^T \alpha = f^T (J T^{-1}) (J T^{-1})^T f \leq 1 \quad (4)$$

で与えられる R^m 空間の楕円体となり、関節トルク特性を反映した変換行列 T によって操作力楕円体を変形したものに相当する。この楕円体の主軸半径が長い方向には大きな手先力を発生することができ、短い方向には小さい力しか発生できない。そして、楕円体が球に近ければ、あらゆる方向にまんべんなく力を発生することができることになる。

楕円体の各主軸の方向及び長さは式(4)における $(J T^{-1})$ を特異値分解して求めることができる。

本手法を上肢に適用し、肩3自由度、肘2自由度、手首2自由度からなる3リンク7関節自由度モデルを構築した。

3. 自動車ドアへの適用と考察

自動車の操作機器への可操作性評価手法の適用については、運転操作の快適性評価指標として最適運転姿勢の机上検討への適用³⁾が報告されている。本稿では自動車ドア操作を対象とし、実際のドア操作実験をもとに定性的な有効性の確認を行なった。

ドア操作実験は、スライドドア(グリップハンドルタイプ)開け操作を対象にした(図1)。ドアの機械的特性である操作力-ストローク特性(F-S特性)を図2に示す。被験者3名のスライドドア操作時の筋電図による筋負担計測、光学式三次元動作計測装置によ

図1 スライドドア開け操作概略図

る上肢の動作計測をおこなった。筋電図を図3に、動作中の上肢姿勢及び姿勢から算出した操作力楕円体(本実験では定性的検討を目的としたため T は単位行列としている)をドアグリップ位置(上肢手先位置)軌跡とともに図4に示す。

ドア側操作力(図2)は開け開始直後ピークを示すがその後低下し、開け途中から開け終了にわたりほぼ1/2以下の値で推移している。一方、筋電図(図3)より、筋負担(三角筋)はドア側操作力が低い開け途中において顕著になっていることがわかる。

これには、上肢の力学的特性である「力の発揮し易さ」が関係していると考えられる。図4より「力の発揮し易さ」を表す操作力楕円体の主軸半径が長い方向(力の発揮し易い方向)とグリップ位置軌跡方向とはドア開け開始から開け途中の半ばまで、開度が大きくなるに連れ角度が大きくなっていき、開け途中の半ばで直交していることがわかる。この操作力楕円体の主軸半径が長い方向とグリップ位置軌跡とが直交している領域ではドア進行方向に上肢は力を発揮しにくい姿勢になるため、操作力が低くなるにもかかわらず、筋負担は増加すると言える。

以上により操作力楕円体による可操作性評価手法はドア操作時の上肢の筋骨格系力学的特性解明に有効であり、姿勢変化を伴う場合の筋負担の現象解明、予測に有効であると考えられる。

4. まとめと今後の課題

上肢の力学的特性を解明のため、操作力楕円体による解析手法をもとに、生体の関節トルク特性を表現可能な3リンク7関節自由度モデルにより上肢の可操作性評価手法を構築した。

本手法を自動車ドア操作に適用し、操作時のドアF-S特性と筋負担との関係解明を通じ本手法の定性的な有効性を確認した。

今後は、本手法に生体の力学的基礎特性に関する

図2 スライドドア 操作力ストローク特性

図3 スライドドア開け操作時筋電図

図4 各姿勢における操作力楕円体とグリップ位置軌跡

データを加えていくことにより、より詳細な現象解明及び定量的な検討を可能とするとともに適用の拡大を図っていきたい。

本研究にご協力頂きました澄田康光氏、後藤孝夫氏ほか関係者の皆様に対しまして、ここに改めて感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 吉川恒夫：ロボット制御基礎論，コロナ社，第4章，1988.
- 2) 佐藤方彦ほか：人間工学基礎数値式便覧，技報堂，1992.
- 3) M. Hada et al : An Evaluation of Vehicle Steering Arrangement with Dexterity Measures of Virtual Human, SAE technical paper 2001-01-2109, 2001.