

人体筋骨格数理モデルを用いた自動車の乗り心地解析に関する研究

- 関節まわりの駆動パワーと筋肉まわりの角運動量による解析 -

日大生産工(院) ○廣瀬 貴大 日大生産工(院) 張 思齊
日大生産工 高橋 亜佑美 日大生産工 見坐地 一人

1. まえがき

近年の自動車の乗り心地解析に関する研究では、アンケート調査など運転者の主観的な評価で行われている最新の調査⁽¹⁾では、「運転のしやすさ」に次いで、「乗り心地の良さ」「安全性・安心感」「燃費の良さ」「スタイル・デザイン」をユーザーが求めているという結果がでた。つまり、近年のユーザーは性能の良い車はもちろん、運転に対する快適性をより求めている傾向にあることが分かる。運転者の感覚だけでは、自動車の乗り心地向上設計にすることが出来ない。そのためには、運転者に対する乗り心地を物理量で定量化する必要があると考えられる。そこで、自動車運転時における運転者の身体に關与する筋肉への疲労度を解析することで、乗り心地の評価を物理量で定量化することが可能になると考えた。また、物理量で定量化することでサスペンション等の乗り心地向上の設計に反映することが考えられる。本報告では、走行モードの違いによる関節まわりの本質的な単位時間当たりの運動性能を示す駆動パワーと運動全体を通した定量的な評価の角運動量を用いて、ドライバーに作用する筋肉への負担を定量化し考察することである。

2. 解析手法

2. 1筋活性度の推定

筋骨数理モデルには、SCOTT L. DELPら⁽²⁾の上肢筋骨格モデルを利用する。Fig. 1 に示す SCOT L. DELP ら⁽²⁾の 3 次元下肢筋骨格モデルを使用する。また、筋のパラメータである i 番目の筋肉の最大等尺性収縮力 F_0^i 、筋の長さ l_i 、筋が骨や腱に付着する角度 ϕ に関する値においても SCOT L. DELP ら⁽²⁾の値を使用する。筋の収縮特性を含む筋モデルには、Hill モデルに基づくモデルは多数あるが、本研究では Fig. 2 に示すまた、筋肉モデルに関しては、F. E. Zajac⁽³⁾が提案した Hill タイプモデルを用いた。筋活性度推定計算は筋骨格数理モデル動作解析ソフトウェア SIMM を用いた。

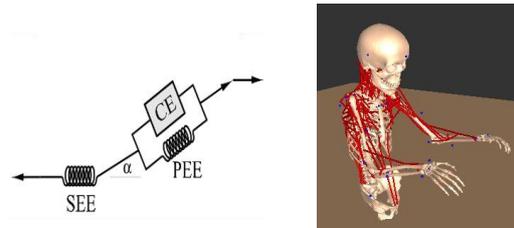


Fig. 1 Hillタイプモデル Fig. 2 筋骨格数理モデル

そして、各筋肉の活性度の推定として、動作時における関節位置や静止データを入力し、逆運動学計算によって各関節角度、各関節まわりの関節トルク(駆動トルク)を求める。そして、逆運動学計算によって求めた各関節まわりの関節トルク(駆動トルク)から筋活性度を推定し、逆動力学計算によって各関節における各筋肉まわりの駆動トルクを算出する。例として、膝関節の伸展運動時の模式図を Fig. 3 に示す。

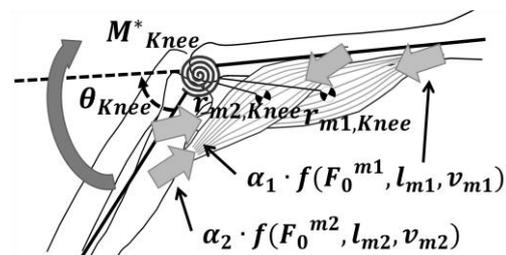


Fig. 3 膝関節まわりの筋肉の駆動トルク

式(1)を満たし、筋活性度 α_i ($0 \leq \alpha_i \leq 1$) の残差の 2 乗が最小となる α_i の組み合わせを求める。

$$\sum_{i=0}^n \{\alpha_i \cdot f(F_0^i, l_i, v_i)\} \cdot r_{i,j} = M_j^* \quad (1)$$

ここで、 i は i 番目の筋肉を表わして、 j は、 j 番目の関節を表している。 F_0^i は i 番目の筋肉の最大等尺性収縮力、 l_i は i 番目の筋肉の力-長さ関係、 v_i は i 番目の筋肉の力-速さ関係を表しこれらから筋肉の性能を示している。 M_j^* は駆動トルク、 $r_{i,j}$ は i 番目の筋肉の関節中心からのモーメントアーム長を示す。モーメントアーム長 $r_{i,j}$ は l_i と関節周りの角度 θ により式(2)から求める。

$$r_{i,j} = \frac{dl_i}{d\theta_j} \quad (2)$$

式(1)により求めた筋活性度 α_i に最大筋力の関数 $f(F_0^i, l_i, v_i)$ とモーメントアーム長 $r_{i,j}$ を掛け合わせることで, j 番目の関節まわりに対する i 番目の筋肉における筋トルク $M_{i,j}$ となる. それを下の式(3)に示す.

$$M_{i,j} = \alpha_i \cdot f(F_0^i, l_i, v_i) \cdot r_{i,j} \quad (3)$$

2. 2駆動パワーの算出

関節まわり駆動トルク M_j^* に対して角度で積分し, 運動時間 $t_1 \sim t_2$ の時間で割ることで, 単位時間当たりの本質的な運動性能を示す駆動パワー P_j を求めることができる. 上記のことから式(4)が得られる.

$$P_j = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{\theta_j(t_1)}^{\theta_j(t_2)} M_j^* d\theta \quad (4)$$

2. 3角運動量の算出

次に各関節における各筋肉の角運動量を求めるための運動方程式を構築する. 例として, 膝関節の伸展運動時の模式図を Fig. 2 に示す.

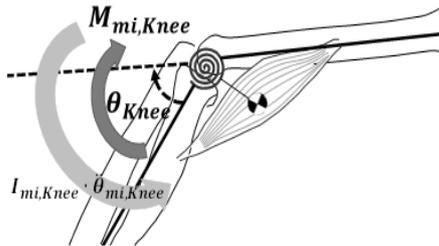


Fig. 2 関節まわりの筋肉の簡略図

式(3)で求めた j 番目の関節に対する i 番目の筋肉の筋トルク $M_{i,j}$ から, 式(4)に示す運動方程式が求まる.

$$I_{i,j} \cdot \ddot{\theta}_{i,j} = M_{i,j} \quad (5)$$

ここで, $I_{i,j}$ は j 番目の関節まわりに対する i 番目の筋肉における慣性モーメント, $\ddot{\theta}_{i,j}$ は j 番目の関節まわりに対する i 番目の筋肉における角加速度を示す. ここで, 式(5)の両辺を運動の 1 周期にあたる $t_1 \sim t_2$ で定積分すると式(6)となり, 式(6)の左辺を整理すると角運動量を示す式(7)が得られる.

$$I_{i,j} \int_{t_1}^{t_2} \ddot{\theta}_{i,j} dt = \int_{t_1}^{t_2} M_{i,j} dt \quad (6)$$

$$I_{i,j} \cdot \dot{\theta}_{i,j}(t_2) - I_{i,j} \cdot \dot{\theta}_{i,j}(t_1) = \int_{t_1}^{t_2} M_{i,j} dt \quad (7)$$

3. 実験方法および測定方法

本研究では Motion Analysis 社製の MAC3D System という光学式モーションキャプチャシステムを

用いた. Fig. 4 は, 自動車の車室内にモーションキャプチャカメラを 6 台設置した.

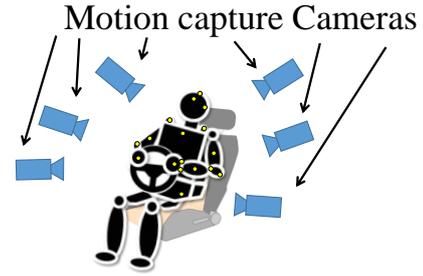


Fig. 4 カメラの設置位置

そして, 被験者の上半身に反射マーカを 32 点, 筋電計を胸鎖乳突筋, 三角筋(鎖骨部), 長掌筋の左右に計 6 台貼付し, 静止データの測定を行い, 被験者の体格に合った剛体リンクモデルを作成した. 反射マーカ及び筋電位計の貼付位置を Fig. 5, Fig. 6 に示す.

table. 1 被験者の基本情報

性別	年齢[歳]	身長[cm]	体重[kg]	運動歴	利き腕
男	33	175	66	10年	右



Fig. 5 反射マーカの位置

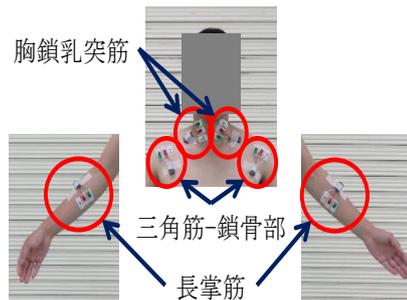


Fig. 6 筋電位の位置

次に, 被験者に自動車を運転してもらい動作データの測定を行い撮影した. 走行モードは, sin スラローム(車速 80[km/h], 舵角 25[°])と J ターン走行(車速 50[km/h])である. 本測定で用いた車両は, 可変ダンパーを採用し, Comfort モードと Sports モードの車両モードで各 2 回測定した. Fig7 に本測定で行った 2 つ車両モードダンパー特性を示す. また, Fig. 8, Fig. 9 は, 走行モードの図である.

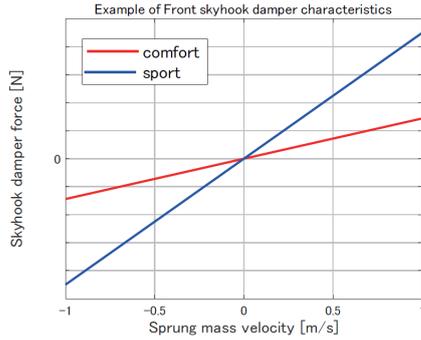


Fig. 7 ダンパー特性

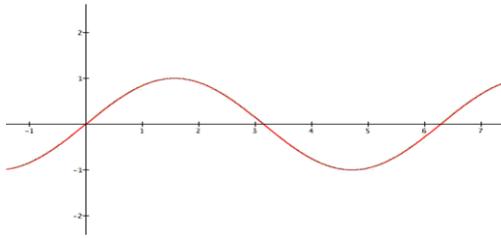


Fig. 8 sinスラローム走行

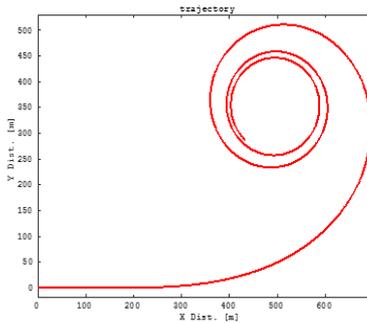


Fig. 9 Jターン走行

4. 解析結果及び考察

4. 1 駆動パワー

sinスラローム走行のcomfortモードとsportモードの各関節の駆動パワーを示す。

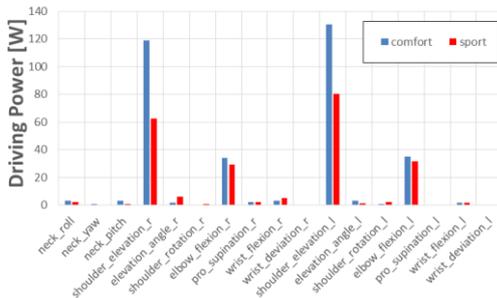


Fig. 10 sinスラローム走行の駆動パワー

次にJターン走行のcomfortモードとsportモードの各関節の駆動パワーを示す。

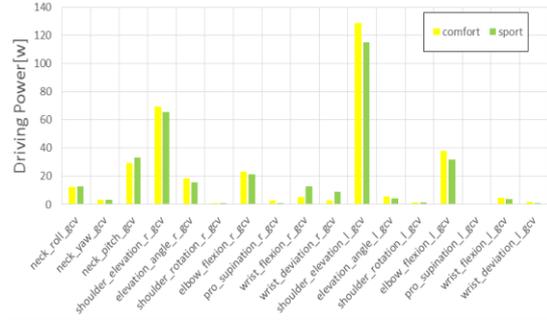


Fig. 11 Jターン走行の駆動パワー

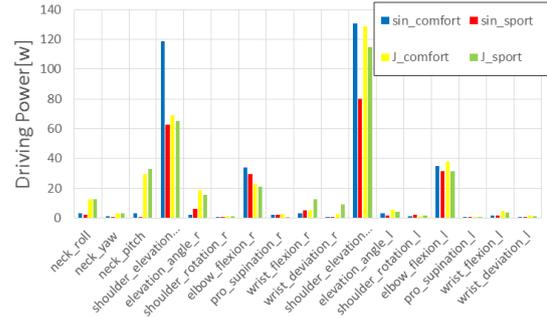


Fig. 12 走行モード比較

Fig. 10 より大きな挙動を感じる sin スラローム走行では、左右の肩関節の伸展屈曲動作時に大きな駆動パワーがかかることがわかった。これは、自動車のハンドルを操舵する際に肩関節の伸展屈曲動作が必要不可欠となるためである。Fig. 11の結果より、J ターン走行は、左肩関節の伸展屈曲動作の駆動パワーが大きいことだった。これは、J ターン走行では、右操舵をしているため、左肩に大きな瞬発力が働いたためであると考えられる。

Fig. 12の結果より、sin スラローム走行は、sport モードより comfort モードの方が約 2.0 倍大きな駆動パワーを発揮していることがわかった。これは、comfort モードの方がダンパー特性のダンパーの硬さが比較的柔らかく、ロール量が大きいためから瞬間的に働く力が大きくなったと考えられる。しかし、J ターン走行では大きい差はなかった。これは、sin スラローム走行のような大きな挙動がダンパー特性に影響したが、J ターン走行には、ダンパー特性の影響は少ないのではないかと考えた。

以上より、大きな挙動を示す sin スラローム走行では、sport モードの方が安定して走行できることがわかったが、J ターン走行では、各車両モードでは変わらないと考えられる。

4. 2 角運動量

sinスラローム走行のcomfortモードとsportモードの肩関節の伸展屈曲動作の各筋肉の負担度と考えられる角運動量を示す。

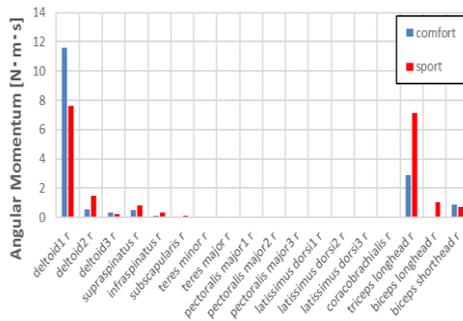


Fig. 13 sinスラローム走行の角運動量

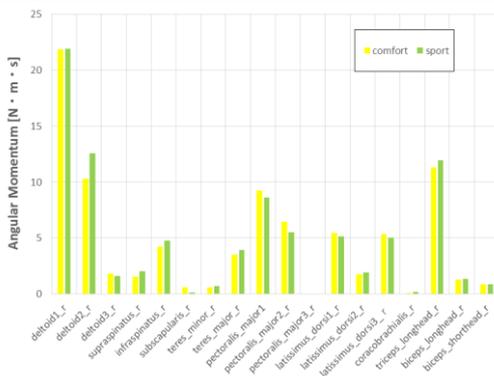


Fig. 14 Jターン走行の角運動量

次に、Jターン走行のcomfortモードとsportモードの肩関節の伸展屈曲動作の各筋肉の負担度と考えられる角運動量を示す。

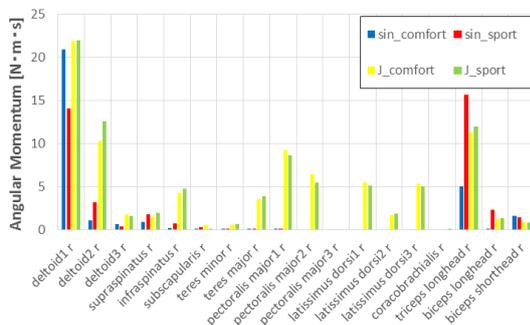


Fig. 15 走行モードの比較

Fig. 13の結果より、sinスラローム走行の角運動量から、comfortモードは、三角筋 (deltoid1) に負担がかかっている sportモードは、三角筋 (deltoid) , 上腕三頭筋長頭(triceps longhead)の2つ筋肉に負担が大きいことがわかった。上腕三頭筋長頭では、sportモードの方が約2.5倍筋肉に負担がかかっている。 Fig. 14より、Jターン走行の角運動量では、三角筋(deltoid) , 上腕三頭筋長頭 (triceps longhead), 大胸筋(pectoralis major), 広背筋 (latissimus dors)の筋肉に負担がかかっていることがわかった。これは、Jターン走行では、sinスラローム走行のような大きな挙動がないが、横にかかる

重力が非常に大きいので、身体を維持するために多くの筋肉に負担がかかったのではないかと考えられる

Fig. 15の結果より、全体的にJターン走行の方が肩関節まわりの各筋肉の角運動量が大きいと考えられる。以上よりJターン走行の方がsinスラローム走行より肩関節まわりの各筋肉の負担は大きいことが考えられる。

5. まとめ

本研究で示す各関節まわりの各筋肉への影響 (負担度) を解析した結果、以下のことがわかった。

1. 本研究で示す各動作において、各関節まわりの駆動パワーと各筋肉の角運動量を定量的に求めることができた。
2. 角運動量の考察した結果からsinスラローム走行では、三角筋, 上腕三頭筋長頭の2つの筋肉に負担が大きいことがわかった。Jターン走行では、三角筋, 上腕三頭筋長頭に加え、全体的に各筋肉に負担がかかっていると考えられる。
3. 駆動パワーの考察した結果からsinスラローム走行では、肩関節の駆動パワーがsportモードの方がcomfortモードより約2倍小さくなっているため、sportモードの方が安定して走行できると考えられる。しかしJターン走行では、肩関節の駆動パワーが2つのモードで大きな差はなかったため、操縦の安定性は、変わらないと考えられる。

今後は、解析精度を向上させるため、実験回数及び走行モードを増やしていきたい。また、肩関節まわり以外の関節まわりの各筋肉についても定量化していきたい。そして、本手法をその他の運動評価に応用し、本手法の価値と有用性をさらに検証していきたい。

参考文献

- 1) 株式会社クロス・マーケティング:自動車に関する実態調査, 2017
- 2) F. E. Zajac. :Muscle and tendon: Properties, models, scaling, and application to biomechanics and motor control,"in CRC Critical application to biomechanics and motor control,"in CRC Critical vol. 17. Issue4. pp,359-411,1989
- 3) Delp S. , Loan P. , Hoy M. , Zajac F. E. , Fisher S. , Rosen J. :An interactive graphics-based model of the lower extremity to study orthopaedic surgical procedures, IEEE Trans. on Biomedical Engineering, 37(8), pp. 757-767, 1990.