

車両挙動を考慮した筋骨格数理モデルに おける乗り心地解析に関する研究

日大生産工(院) ○鈴木 悠哉 日大生産工(院) 飯島 有咲 日大生産工(院) 種橋 潤也
日立 Astemo 伊澤 正樹 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

現代の技術と生活の質の向上により、自動車産業は発展してきた。自動車の普及によって生活は豊かになり、欠かせないものとなった。近年車を利用する人たちは、車の快適性を求める傾向がでてきた。[1]しかし、わたしたちが車を利用している際に車酔いを経験している人の割合は多い。運転時の快適性の向上には旋回時におけるドライバーが感じるロールフィール等の改善が重要である。そのためには、このロールフィール等をドライバーに対する物理量で定量化して自動車の設計に反映することが必要である。身体の負担度解析はモーションキャプチャシステムを用いて測定を行い、対象の動

作から逆運動学計算と逆動力学計算によって各関節や各筋肉の発生する駆動トルクや筋活性度を算出することができる手法である。筋骨格数理モデルの解析を行うと、実際の走行車両に比べて大きな違いが生じる可能性がある。そこで本研究では、モーションキャプチャシステムを用いてドライバーの運転行動を撮影し、同時に車両行動情報収集装置を用いて運転時車両挙動データを記録することにより、3次元筋骨格モデルを構築した。また、車両の各軸 x、y、z 軸（左右、前後ろ、上下）に沿った並進運動のデータ、x、y、z 軸を横切る3つの回転運動（ロール、ピッチ、ヨー）のデータをそれぞれモデルに取り込み、実際にドライバーが感じられたことを再現できる方法を提案した。なお、本研究では各関節と筋肉の本質的な運動パフォーマンスを示す駆動パワー、運動全体を通して時間軸上の筋肉負荷度を定量的に評価できる角運動量に焦点を当て、考察した。その分析結果をもとに、実際の走行車両における運転者の身体への負

担を定量化し、車両ダンパーモードの違いによる乗り心地の違いを比較した。

2. 解析手法

2.1 筋活性度の推定

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. 2に示す。

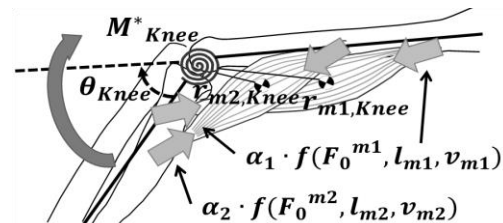


Fig. 2 膝関節まわりの筋肉の駆動トルク

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。

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(2)に示す。

$$M_{i,j} = \alpha_i \cdot f(F_0^i, l_i, v_i) \cdot r_{i,j} \quad (2)$$

Research on ride comfort analysis in musculoskeletal mathematical models
considering vehicle behavior

Yuya SUZUKI, Arisa IIJIMA, Junya TANEHASHI, Masaki IZAWA,
Ayumi TAKAHASHI and Kazuhito MISAJI

2.2 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。

式(2)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 $M_{i,j}$ より、式(3)に示す運動方程式が求まる。

$$I_{i,j} \cdot \ddot{\theta}_{i,j} = M_{i,j} \quad (3)$$

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(3)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(4)となり、式(4)の左辺を整理すると角運動量を示す式(5)が得られる。

$$I_{i,j} \int_{t_1}^{t_2} \ddot{\theta}_{i,j} dt = \int_{t_1}^{t_2} M_{i,j} dt \quad (4)$$

$$I_{i,j} \cdot \dot{\theta}_{i,j}(t_2) - I_{i,j} \cdot \dot{\theta}_{i,j}(t_1) = \int_{t_1}^{t_2} M_{i,j} dt \quad (5)$$

2.3 駆動パワー

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 $t_1 \sim t_2$ の時間で割ることにより、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 を求めることが出来る。上記のことから式(6)が得られる。

$$P_j = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{\theta_j(t_1)}^{\theta_j(t_2)} M_j^* d\theta \quad (6)$$

3. 実験方法および測定方法

本研究で解析対象とした動作及び測定方法に関して説明する。本研究では、エルクテストによるロールフィール量の違いや異なる車両モードによるフィールの違いを定量化するため、自動車走行を実施した。測定には、モーションキャプチャカメラを用いてドライバーである被験者に貼付した反射マーカを撮影した。本測定では、筋骨格解析ソフトウェア MAC3Dsystem (Motion Analysis 社製

:CORTEX2) というモーションキャプチャシステムを用いて行った。モーションキャプチャシステムでは、モーションキャプチャカメラを用いて、被験者につけた光学式反射マーカを撮影することで、3次元位置座標を読み込む測定手法である。Fig. 3.1 にモーションキャプチャカメラ、Fig. 3.2 に光学式反射マーカ、モーションキャプチャカメラ設置

状況を Fig. 3.3 に、Fig. 3.4 に反射マーカ貼付の場所を示す。

Fig. 3.5 ではダンパー特性を示しており、Fig. 3.6 では実際に走った走行モードを示している。



Fig. 3.1 モーションキャプチャカメラ



Fig. 3.2 光学式反射マーカ

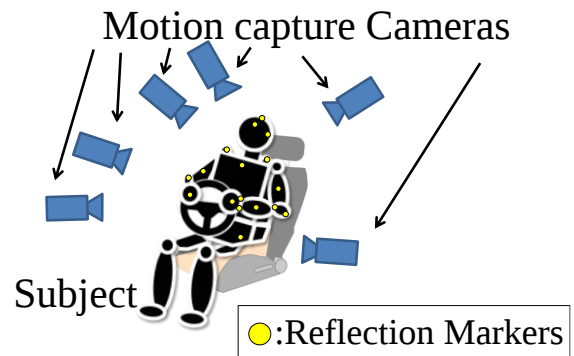


Fig. 3.3 モーションキャプチャカメラ設置状況

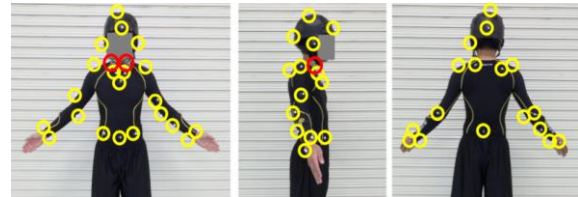


Fig. 3.4 反射マーカ貼付場所

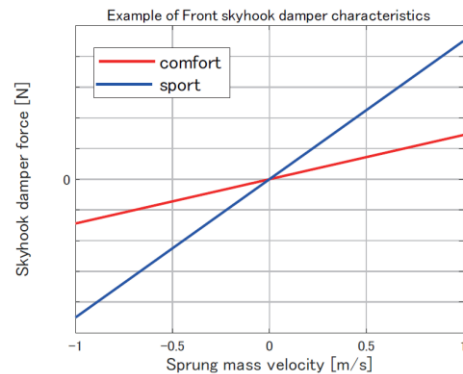


Fig. 3.5 ダンパー特性

comfortモードの特徴は、ダンパーの硬さが比較的柔らかく、ステアフィール

が軽くて、ロール量が多いという点が挙げられる。一方、sportsモードの特徴は、ダンパーの硬さが比較的硬く、ステアフィールが重い、ロール量が少ない、ステアリング操舵時のステアリングホイールが重いという点が挙げられる。

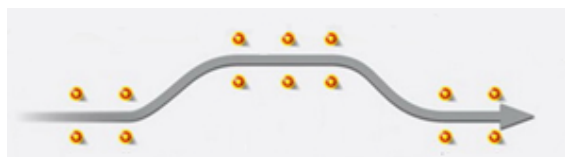


Fig. 3.6 エルクモード

4. 実験結果および検討

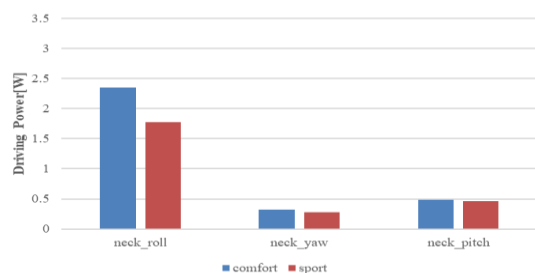


Fig. 4.1 首関節の駆動パワー

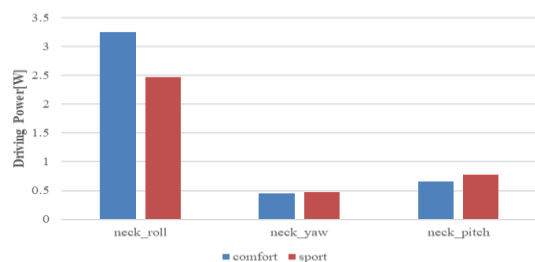


Fig. 4.2 車両挙動と慣性力を考慮した首関節の駆動パワー

Fig. 4.1とFig. 4.2で示した解析結果によると、ドライバー動作データだけ考慮した解析結果は、車挙動と慣性力を考慮した解析結果より、頭の側屈動作（ロール方向）が小さい数値が出た。両方ともコンフォートモードはスポーツモードの1.3倍ぐらいパワーをかけることがわかった。つまり、単なるドライバーの動作を考察しても、コンフォートモードとスポーツモードの違いを明らかにすることができる。慣性力を考慮した解析結果は予想通り大きい数値が出ており、慣性力が一番大きい方向（左右方向）に対応し、頭の側屈動作（ロール方向）も1.4倍ぐらいパワーをかける。

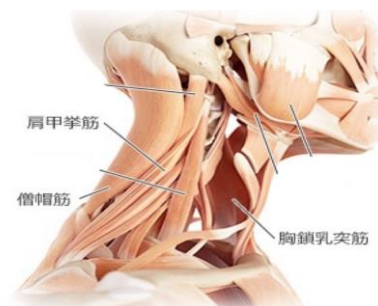


Fig. 4.3 首関節の主な筋肉^[12]

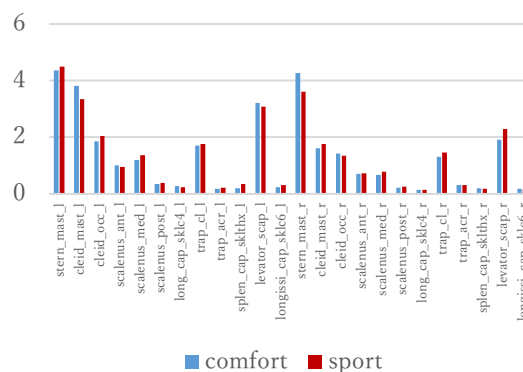


Fig. 4.4 首関節回りの筋肉の角運動量 (側屈動作)

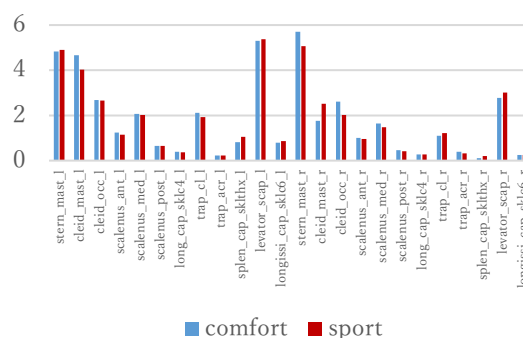


Fig. 4.5 車両挙動と慣性力を含まれた首関節回りの筋肉の角運動量 (側屈動作)

Fig. 4.4 で示すドライバー動作データだけ考慮した首関節の側屈動作時に作用する各筋肉における角運動量と Fig. 4.5 で示す車両挙動から算出した慣性力を考慮した首関節の側屈動作時に作用する各筋肉における角運動量の解析結果を比較した。ドライバー動作データだけ考慮したグラフでは左右同じ名称の筋肉の角運動量は大きな変化はないことがわかる。一方、車両挙動から算出した慣性力を考慮したグラフでは、左右同じ名称の筋肉の角運動量にばらつきがあることが考えられる。例えば、Fig. 4.5 の車両挙動を含んだ時の首

関節の側屈動作のグラフを見ると Levator_scap_l と Levator_scap_r では約 1.8 倍もの差が見え左右の同じ筋肉でも大きく差が出ていることがわかる。これは車両挙動から算出した慣性力を考慮したため精度がよくなったことから左右の負担度が詳細に見れていると考えられる。

5. まとめ

本研究での解析結果からは以下のことが得られた。

1. 走行中の車両にモーションキャプチャシステムを使用することにより、運転中のドライバーの筋骨格数理モデルを構築することができた。
2. 車両の並進運動のデータ、回転運動のデータをそれぞれモデルに取り込み、車両挙動を考慮した解析をできた。よって実際の運転の状況と同じように再現することができたと考える。
3. 駆動パワーの結果から、スポーツモードのダンパー設定は、ロールフィールが少ないため、さらに乗り心地を向上させる可能性があると考えられる。
4. 角運動量の結果から、車両挙動と慣性力を考慮した場合、筋肉の角運動量が大きい数値は出たが、筋肉によって増加の量も異なることが分かった。

以上の結果により、3次元筋骨格数理モデルを用いて、ドライバーのロールフィールの定量化をすることができたと考えられる。

また、モーションキャプチャシステムと車両行動情報収集装置を組み合わせることで、ロールフィールを定量的に測定するのが妥当な方法であると考えることができた。

さらに調整と実験の繰り返しをすることにより、この方法がロールフィールを科学的に測定するストリーミング方法になる可能性があると考えているため、実験回数を増やしていきたいのと、AI識別技術と組み合わせることで、テスト直後のロールフィールの分析と計算も可能になるのではないのかと考えた。よってより研究していきたいと考えている。

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] Schmidt, E.A.; Kuiper, O.X.; Wolter, S.; Diels, C.; Bos, J.E. An international survey on the incidence and modulating factors of carsickness. *Trans. Res. Part F Traffic Psychol. Behav.* 2020, 71, 76-87. [CrossRef]
- [3] Yuji Okamoto, Evaluation of automobile riding comfort by measuring myoelectric potential, Institute of Industrial Science, University of Tokyo Production 9Research, 2010, Vol.62, No3, p267-270
- [4] Kaito Watanabe, Quantifying Roll Feel of a Car by Using a Musculoskeletal Mathematical Model
- [5] 深代千之, 川本竜史, 石毛勇介, 若山章信: バイオメカニクスで読み解くスポーツ動作の科学, 東京大学出版会, pp.104-120
- [6] 石田明允, 廣川俊二, 宮崎信次, 阿江通良, 林豊彦: 身体運動のバイオメカニクス, コロナ社, 日本エム・イー学会, pp.1-24
- [7] 川島敏生: ぜんぶわかる筋肉・関節の動きとしくみ事典, 成美堂出版, pp.10-92
- [8] Zajac, F.E.: Muscle and tendon: properties, models, scaling, and application to biomechanics and motor control. In: Bourne, J.R. (Ed.), *CRC Critical Reviews in Biomedical Engineering.*, Vol. 19. CRC Press, Boca Raton, 1989, pp359-411.
- [9] A.V. Hill: The heat of shortening and the dynamic constants of muscle. *Proc. Roy. Soc.*, vol.126, 1938, pp.136-195
- [10] 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.
- [11] Delp, S.L., Loan, J.P.: A computational framework for simulating and analyzing human and animal movement, *IEEE Computing in Science and Engineering*. vol. 2, pp. 46-55, 2000
- [12] Slope、首の筋肉の名前&作用！画像付きで解説！部位別の筋トレメニューも！、2021、<https://www.uroom.jp/case/neck.php>, 2021 10 13