ISSN 2186-5647

6-16

自動車走行時における運転姿勢の筋骨格数理モデル作成に関する研究

日大生産工(院)　○渡辺 開人　　日大生産工（院）　伊澤 正樹
日大生産工　　見坐地 一人

1 まえがき

現在，車両走行時の筋骨格モデルを用いたドライバーへの身体にかかる疲労度の定量化に関する研究は，ドライビングシュミレーターを用いた解析が行われている[*1]．一方，車両走行時においては，表層筋の筋活性度の測定や官能評価によるものが中心であり[*2]，走行時における運転姿勢の筋骨格モデルを作成している研究は少ない．そこで本研究では，自動車運転時の身体にかかる疲労を定量化するための第一歩として運転姿勢の筋骨格数理モデルを作成する．

2 解析手法

2・1 剛体リンクモデル(骨格モデル)

被検者に反射マーカーを貼付しモーションキャプチャカメラを用いて撮影することによってそれぞれの反射マーカー位置座標を3次元位置座標データとして取得できる．取得した3次元座標データをそれぞれラベリングすることで図1に示すような被験者の体格に合った剛体リンクモデルを作成することができる．剛体リンクモデルは，座標定義に基づき各セグメントの姿勢や各関節の角度を算出することができる．尚，本研究の測定では解析ソフトCortex(Motion Analysis社製)を用いる．

2・2 筋骨格数理モデル

被検者の体格に合った剛体リンクモデルから図 2 に示すような被験者の体格にスケーリングされた筋骨格数理モデルを作成することができる．筋骨格数理モデルは筋繊維と腱組織をまとめた筋腱複合体をモデル化したものをいう．筋腱複合体の中の筋肉は，一般的に主動筋と呼ばれる筋収縮によって能動的に力を発揮する活性収縮要素(CE)と一般的に拮抗筋と呼ばれる筋収縮によって受動的に伸張され，弾性体として力を発揮する並列弾性要素(PEE)を併せ持っている．一方，腱は筋収縮によって受動的に伸張され，弾性体としてのみ力を発揮するため，直列弾性要素(SEE)と呼ばれる要素を持っている．本研究で用いる筋骨格数理モデルは，A.V.HILL により提案された HILL タイプモデルを基に F.E.Zajac により提案されたモデル[*3]を用いる．F.E.Zajac により提案されたモデルは図 3 のような筋と腱の力学的性質を表現する直列弾性要素の伸展-張力関係，筋肉の長さ-張力関係，筋肉の速度-張力関係を明確に示している．尚，本研究の解析には運動解析ソフトウェア SIMM(Motion Analysis 社製)を用いた．

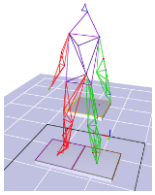

Fig.1 Rigid-body-link model

Fig.2 Musculoskeletal model

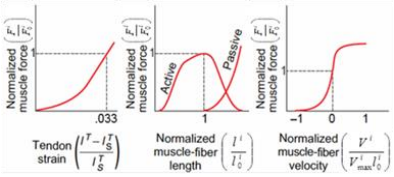

Fig.3 Mechanical property of any muscle and tendon

2・3 逆運動学計算

逆運動学計算では，測定した 3 次元位置座標データと身長・体重等の体格情報から剛体リンクモデルを用いることで各関節角度や各関節まわりの駆動トルク(関節トルク)を算出することができる．例として膝関節の伸展運動時の模式図を図 4 に示す．

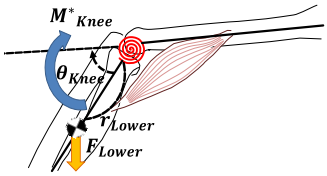

Fig.4 Driving torque around the knee joint

この時，各反射マーカーの位置座標から膝関節角度 θ_{knee} が算出できる．また，力の作用点から関節中心位置までの距離 r_{Lower} と下腿部にかかる自重による力 F_{Lower} の関係から膝関節トルク M^*_{Knee} を算出することができる．

2・4 逆動力学計算

逆動力学計算では，筋骨格数理モデルを用いることで，逆運動学計算から算出した各関節トルクから筋活性度を推定し各関節まわりに働く各筋肉の駆動トルク(筋トルク)を算出することができる．例として，

Modeling of Driving Posture during Automobile Running Using a Musculoskeletal Mathematical Model

Kaito WATANABE, Masaki IZAWA and Kazuhito MISAJI

膝関節の伸展運動時の模式図を図 5 に示す.

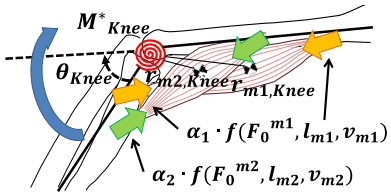

Fig.5 Muscle torque around the knee joint

この時，α_i は i 番目の筋肉における筋活性度，$f(F_0^i, l_i, v_i)$ は 2・2 で示した i 番目の筋肉の力学的性質と最大等尺性収縮力の関数，$r_{i,j}$ は j 番目の関節まわりに対する i 番目の筋肉のモーメントアーム長を示している．ここで，i 番目の筋肉の筋活性度と i 番目の筋肉の力学的性質の積は i 番目の筋肉の発揮筋力となり，さらに i 番目の筋肉のモーメントアーム長との積をとることにより i 番目の筋肉の筋トルク $M_{i,j}$ を算出することができる．i 番目の筋肉の筋トルク $M_{i,j}$ を算出する式を式(1)に示す.

$$M_{i,j} = a_i \cdot f(F_0^i, l_i, v_i) \cdot r_{i,j} \quad (1)$$

また，逆運動学計算によって算出された j 番目の関節と逆動力学計算によって算出された j 番目の関節に対する i 番目の筋肉の筋トルクの総和が釣り合うことから式(2)が成り立つ.

$$\sum_{i=1}^{n} \{ a_i \cdot f(F_0^i, l_i, v_i) \} r_{i,j} = M_j^* \quad (2)$$

ここで $f(F_0^i, l_i, v_i)$，$r_{i,j}$ は既知の値であり，α_i は未知の値であるため最小二乗法を用いて最適化計算を行うことで i 番目の筋肉における筋活性度 α_i を推定することができる．尚，表層筋は筋電計を用いることで表面筋電位を測定することができる．測定した筋電位を最大筋力で正規化することで測定した筋肉の筋活性度推定の際のガイドとして用いる．推定した i 番目の筋肉における筋活性度 α_i を式(1)に適用することで i 番目の筋肉の筋トルク $M_{i,j}$ を算出することができる.

3 測定方法

3・1 3 次元位置座標データの測定

自動車車室内にモーションキャプチャカメラ 6 台を設置する．被検者(男性，31 歳，身長 175cm，体重 66kg)の上半身に反射マーカー29 点と筋電計 6 点を貼付し，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する．次に，自動車を運転してもらい動作データの測定を行う．本測定時の概略図を図 6 に，作成した剛体リンクモデルを図 7a に示す.

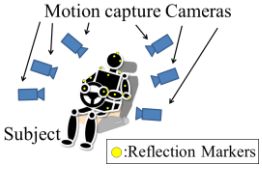

Fig.6 Outline of the measurement set up

3・2 筋肉活性度の測定

モーションキャプチャと同時に 6 台の筋電計(MQ-Air:キッセイコムテック社製)を左右の胸鎖乳突筋，三角筋(鎖骨部)，長掌筋に装着し，筋電位を測定した. 各筋肉の作用[*4]を基に等尺性最大筋力発揮時の筋電位を測定し，自動車走行時に測定した筋電位を正規化した.

4 筋骨格数理モデルの構築

4・1 筋骨格数理モデルの構築

作成した剛体リンクモデルと筋電位の測定によって算出した筋活性度から図7bの様な被験者の体格にスケーリングされた上半身筋骨格数理モデルを構築した.

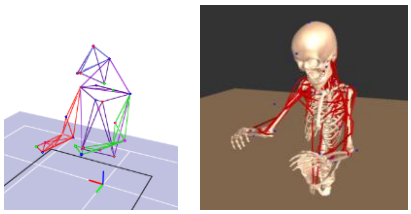

Fig.7 Model scaled to physique of the subject
a(left):Rigid-link model, b(right): Musculoskeletal model

4・2 精度検証

図8に構築したモデルの精度検証結果を示す.

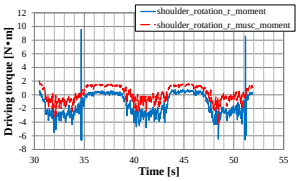

Fig.8 Torques rotation on right shoulder joint

図8の精度検証で示す精度検証は，肩関節の回旋時における逆運動学計算によって算出された肩関節トルクと逆動力学計算によって算出された各筋肉の駆動トルクの総和を比較した結果である．比較結果から駆動トルクの値の差は生じたものの，時間軸上における駆動トルクの傾向は一致した.

5 結言

測定データを基に筋骨格数理モデルを構築することができた．今後は，より精度の高い筋骨格数理モデルを検討し，動力学解析を行い，自動車運転時の身体にかかる疲労を定量化する手法を考察していく.

参考文献

1) 尾林史章，ドライバの挙動の計測と運転に対する集中力の評価指標の提案，電子情報通信学会技術研究報告，2010，110巻,150号,pp37-42
2) 岡本裕司，筋電位測定による自動車の乗り心地評価，東京大学生産技術研究所 生産研究，2010， Vol.62 ,No3, p267-270
3) 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.
4) 坂井建雄，プロメテウス 解剖学アトラス解剖学総論／運動器系 第2版，医学書院，2011，pp236-399.