

上肢筋群における筋パワーとトラッキング成績による筋疲労の評価

Evaluation of Upper Limb Muscle Fatigue by Muscular Power and Tracking Result

○遠藤彰¹, 大島徹¹, 小柳健一¹, 田島孝光², 西野智子², 有賀友恒²

1. 富山県立大学工学部知能デザイン工学科 (大学院工学研究科知能デザイン工学専攻)

2. 株式会社本田技術研究所

○Akira ENDO¹, Toru OSHIMA¹, Ken'ichi KOYANAGI¹,

Dept. of Intelligent Systems Design Eng., Toyama Prefectural Univ.

Takamitsu TAJIMA², Tomoko NISHINO², Tomohisa ARUGA², Honda R&D Co., Ltd.

Abstract: It is very important for better design of man-machine-interfaces to obtain experimental results on human functions. The interfaces are preferable to be designed by quantitative analyses based on appropriate theories, however, many of them have been designed using qualitative analyses. In this study, a coordination control theory of mono- and bi-articular muscles of human upper limb was introduced for the most suitable layout design of automobile steering wheel. Relations among output force, output velocity, muscle fatigue and tracking results were clarified. There were correlations between the muscle power and the tracking results, and between the tracking results and the muscle fatigue. Thereby, the muscle fatigue could be estimated with the power. Using these results, the suitable layout of steering wheel will be designed, and the theory examined in this study will be useful for design of man-machine-interfaces.

Keywords: man-machine-interface, mono-articular muscle, bi-articular muscle, muscular power, tracking experiment

1. はじめに

ヒトの生活は道具を活用することで進化を遂げてきた。その道具の中でもヒトが取り扱い操作するものを、マンマシンインターフェースと言う。マンマシンインターフェースは、直接ヒトが関与し、使用機器(目的)によって仕組みや操作の方法や方向が異なる。日常で使用されている水道の蛇口やドアノブ、自動車のステアリングホイールや、車いすのハンドリム、ジョイスティック、更には建設機械の操作レバーなどがマンマシンインターフェースの例である。これらのマンマシンインターフェースは、各用途に特化している為、ヒトは各機器毎に操作を合わせたり、慣れる必要がある。またヒトがマンマシンインターフェースをより扱いやすいように設計する必要性もある。そうしたヒトが操作しやすくヒトにやさしい、ヒューマンフレンドリーな機器の開発が近年盛んに行われるようになってきている⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾。操作性の良いマンマシンインターフェースを検討する上で、従来の人間工学的な定性的手法から、コンピュータマネキン⁽⁴⁾などによる定量的評価技術の検討が進められている。定性的評価手法は各人のフィーリングによる部分が多く、実験は労力と時間がかかっている。近年では一関節筋と二関節筋の協調制御モデルに基づいた運動制御が理論的、実験的に構築されており、定量的検証が進んでいる⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾。

本研究では、マンマシンインターフェースの1つである自動車のステアリングホイールを例に定量的評価を試みた。ステアリング操作における上肢の出力を一関節筋と二関節筋による協調制御モデル⁽⁵⁾⁽⁶⁾を基盤として、操作力から操作速度までモデルを拡張してモデル化した。さらに、それらから導き出した筋パワー⁽⁷⁾(瞬発力)とトラッキング実験の成績によって、ヒトがより取り扱いやすい(より安定した、操作がしやすい)という評価の可能性を示し、評価方法の1つとして提案する。

2. 操作力

2-1 力出力における筋の協調制御理論

筋の協調制御理論は、図1に示すように上肢の2関節2自由度の運動を三対6筋でモデル化し、各筋の発生筋力と系先端の力出力分布の関係を明確にした理論である。モデルは体幹、上腕(l_1)、前腕(l_2)からなり、肩関節(J_1)、肘関節(J_2)を機能別実効筋と定義される6つの筋($f_1 \sim f_3$, $e_1 \sim e_3$)によって駆動する。そして、各筋により発揮される系先端での6つの力出力ベクトルの合成により、力出力分布は六角形で表現できることが示されている。力出力分布を図2に示す。直接筋力を測定することは不可能であるが、理論により系先端での力出力分布から機能別実効筋力を推定することが可能であり、これより他姿勢の力出力分布を推定することが可能となる。また、肘関節角度 θ_1 が大きくなるにつれて、力出力分布が図3のように変化することも明らかになっている⁽¹⁾。

2-2 実験

図4にステアリングホイールを握るヒトのモデルを示す。図4中の θ_1 は肘関節角度、 θ_2 はステアリング傾斜角度を示す。実験は肩関節と系先端を通る直線が水平となる姿勢で力

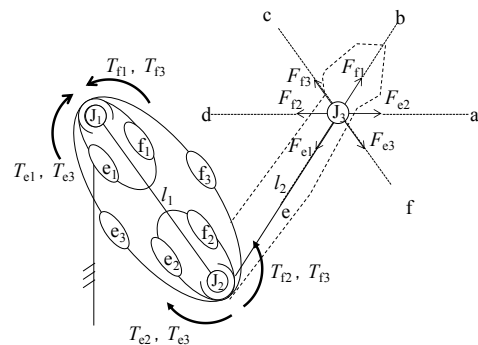


Fig.1 Functional effective muscle and output force

出力の測定を行った。被験者は肘関節角度 θ_1 を 90, 120, 150[deg]に調節し,ステアリング傾斜角度 θ_2 を 90, 105, 120, 135, 150[deg](手首関節のひねりは,各角度で変化する)の計 15 姿勢で測定を行った。図 5 にステアリング操作における操作力 F とトルク T の関係を示す。ステアリングの径は一定であるので最大トルク T は操作力 F に相当する。実験方法は被験者の最大努力により,ロードセル上に回転しないように固定したステアリングホイールを 2 秒間回し最大トルクの測定をした。これを 5 回行い,その平均を最大トルクとした。(ステアリングホイールは時計まわりに回し,利き腕は考慮せず)また,イスの傾斜角度は地面に垂直から 25[deg] 寝かした状態(トルソ角 25[deg])とし,体幹は動かないように 4 点式シートベルトで固定した。ステアリングホイールの把持方法は様々なパターンがあるが本実験では実験条件を統一する為,ステアリングホイールの把持方法は,ハンマーを握るときのように親指以外の指を完全に曲げ,親指は反対側から他の指の上側へ曲げる筒握りを採用した。(以下筒握りと表現)

2-3 実験結果

被験者は,表 1 に示す A~E の 5 名によって行った。またすべての実験を被験者 A~E により行った。実験は富山県立大学人を対象とする。研究倫理審査部会の承認を得た後,被験者には,研究の目的および内容を十分に説明し,実験に参加することの同意を得た。

図 6 に被験者 A の,肘関節角度 θ_1 を 90, 120, 150[deg]に調節し,ステアリング傾斜角度 θ_2 を 90, 105, 120, 135, 150[deg]の計 15 姿勢の各ステアリング傾斜角度の最大トルクの変化を示す。肘関節角度 θ_1 が大きくなるに従って,ステアリング傾斜角度 $\theta_1=90\sim 120$ [deg]では最大トルクは減少し,ステアリング傾斜角度 $\theta_2=135\sim 150$ [deg]では最大トルクは増加する傾向が見られた。図 3 より筋の協調制御理論の傾向を大きく 2 分すると,肘関節角度 θ_1 が大きくなるにつれて水平方向の力出力が大きいという傾向が見られる⁽¹⁾⁽²⁾。ステアリング操作においてもステアリング傾斜角度 θ_2 が大きくなるにつれて水平方向への力出力に近づく。また,他の被験者からもほぼ同様の傾向が見られた。

3. 操作速度

3-1 筋の協調制御理論の速度出力への拡張

手先速度においても筋の協調制御理論を適用した。モデルは力出力の場合と同様である。図 7 に示すように上肢の 2 関節 2 自由度の運動を三対 6 筋でモデル化し,各筋の発生筋速度と系先端の速度出力分布の関係を示した。直接筋速度を測定することは不可能であるが,理論により系先端での速度出力分布から機能別実効筋速度を導出することが可能であり,筋速度を得ることで他姿勢の速度出力分布を推定することが可能となる。図 8 は推定された作業域での速度出力分布である。また,肘関節角度 θ_1 が大きくなるにつれて,分布が図 9 のように変化した。

3-2 実験

実験は肩関節と系先端を通る直線が水平となる姿勢で速度出力の測定を行った。被験者は肘関節角度 θ_1 を 90, 120, 150[deg]に調節し,ステアリング傾斜角度 θ_2 を 90, 105, 120, 135, 150[deg] の計 15 姿勢で測定を行った。操作力同様に考慮すると,図 5 で示した最大トルク T は最大角速度に,操作力 F は操作速度に相当する。これよりステアリングホイールの径は一定であるので最大角速度は操作速度に相当する。被験者の最大努力によりステアリングホイールを回し測定点通過時の最大角速度をポテンショメーターで測定した。ステアリングホイールを動かす量は約 ± 10 [deg]で,3 秒間の往復運動中の測定点通過時の最大角速度を測定した。被験者

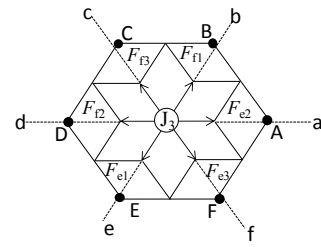


Fig.2 Output force distribution

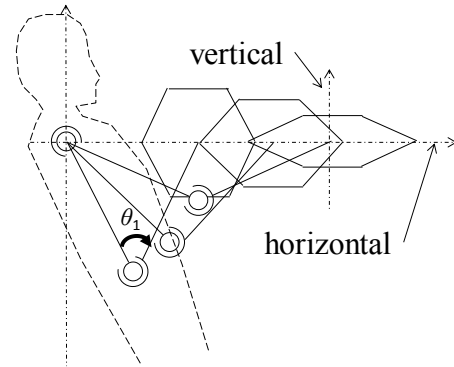


Fig.3 Change of force by angle of elbow joint

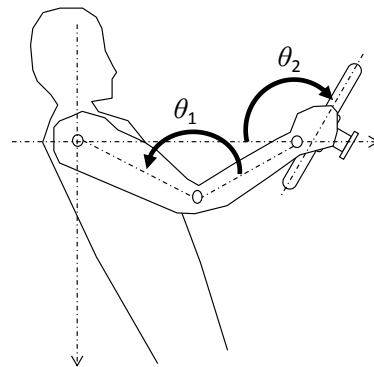
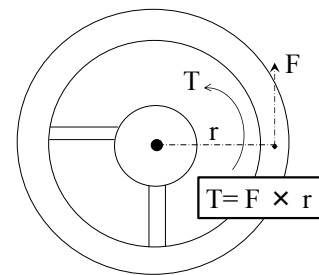


Fig.4 Experimental posture



T : Torque F : Output force
r : Radius of steering wheel

Fig.5 Relations of output force and torque

Table 1 Subjects

Subject	A	B	C	D	E
Age	21	21	21	22	21
Sex	♂	♂	♂	♂	♂
Body height [m]	1.86	1.73	1.83	1.76	1.72
Body weight [kg]	68.0	70.0	73.0	55.0	93.3
Upper arm [m]	0.31	0.30	0.31	0.33	0.30
Lower arm [m]	0.29	0.27	0.27	0.27	0.27

は同じ姿勢で5回の測定を行い、得られた最大角速度の平均値を最大角速度とした。サンプリングタイムは0.03[sec]とした。イスの傾斜角度は地面に垂直から25[deg]寝かした状態(トルソ角25[deg])とし、体幹が動かないように4点式シートベルトで固定した。把持方法は、操作力測定と同じく筒握りを採用した。

3-3 実験結果

図10に被験者Aの、肘関節角度 θ_1 を90, 120, 150[deg]に調節し、ステアリング傾斜角度 θ_2 を90, 105, 120, 135, 150[deg]の計15姿勢の各ステアリング傾斜角度の最大角速度の変化を示す。肘関節角度 θ_1 が大きくなるに従って、ステアリング傾斜角度 $\theta_2=90$ [deg]では最大角速度は増加し、ステアリング傾斜角度 $\theta_2=105\sim 150$ [deg]では最大角速度は減少する傾向が見られる。図9より筋の協調制御理論の傾向を大きく2分すると、肘関節角度 θ_1 が大きくなるにつれて垂直方向の速度出力が大きいう傾向が見られる。ステアリング操作においてもステアリング傾斜角度 θ_2 が大きくなるにつれて水平方向の速度出力に近づく。また、他の被験者からもほぼ同様の傾向が見られた。

4. トラッキング実験

4-1 実験

トラッキング実験とは、目標ターゲットとトラッキング軌道(被験者の操作点)との偏差を測定し、時間経過と共に変化する偏差量の推移を評価する実験である。実験は肩関節と系先端を通る直線が水平となる姿勢で測定を行った。被験者は肘関節角度 θ_1 を90, 120, 150[deg]に調節し、ステアリング傾斜角度 θ_2 を90, 105, 120, 135, 150[deg]の計15姿勢で行った。偏差の変化をより顕著に表すためにステアリングホイールに負荷を約19[Nm]与えた。被験者は十分に習熟したのち30分間ステアリング操作を行った。イスの傾斜角度は地面に垂直から25[deg]寝かして(トルソ角25[deg])行った。モニターから被験者までの距離は約1.6[m]で、体幹が動かないように4点式シートベルトで固定した。今回は特性計測の初期段階として目標ターゲットは正弦波とし、周期6[sec]、振幅 ± 100 [mm] (ステアリングホイールの操作量は ± 45 [deg])とした。把持方法は、操作力、操作速度測定と同じく筒握りを採用した。また、被験者には十分に休息した上で実験を行った。また筋負担の状態を確認するため、トラッキング実験と同時に筋放電量を測定し、時間経過による筋放電量の変化を確認した。

4-2 実験結果

実験を行った肘関節角度 $\theta_1=90, 120, 150$ [deg]においてすべての肘関節角度 θ_1 でステアリング傾斜角度 θ_2 の変化によるトラッキング実験の成績にほぼ同様の傾向が見られた。このことより図11に結果の一例として肘関節角度 θ_1 を120[deg]、ステアリング傾斜角度 θ_2 を90, 105, 120, 135, 150[deg]におけるトラッキング実験により得られた偏差量から求めた標準偏差を示す。この条件下ではステアリング傾斜角度 $\theta_2=120$ [deg]で最小値となった。図12,13に肘関節角度 $\theta_1=120$ [deg]、ステアリング傾斜角度 $\theta_2=90, 120$ [deg]における実験開始直後(1分後)と実験終了直前(29分後)の時間推移における筋放電量の変化を示す。標準偏差が小さい場合(操作のばらつきが小さい)、ヒトが扱いやすい傾向にあると考えられる。また、他の被験者からもほぼ同様の傾向が見られた。

4-3 筋パワーとの比較

筋パワーは「力×速度」で表すことができ、値が大きいほど瞬発的に出せる力が大きくなることを示す。表2に被験者Aの肘関節角度 θ_1 を90, 120, 150[deg]、ステアリング傾斜角度 θ_2 を90, 105, 120, 135, 150[deg]の計15姿勢での

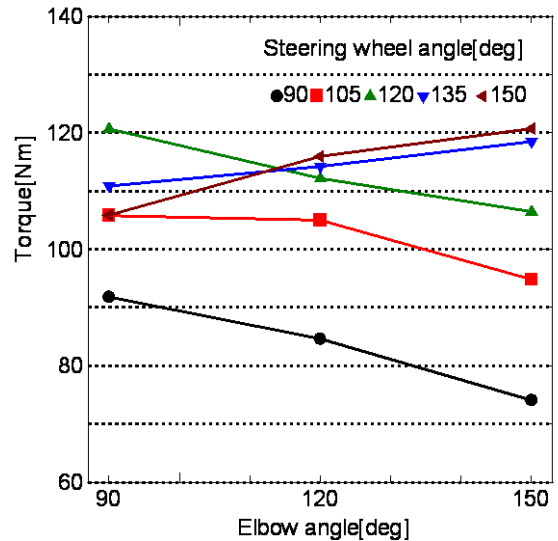


Fig.6 Max. torque characteristic

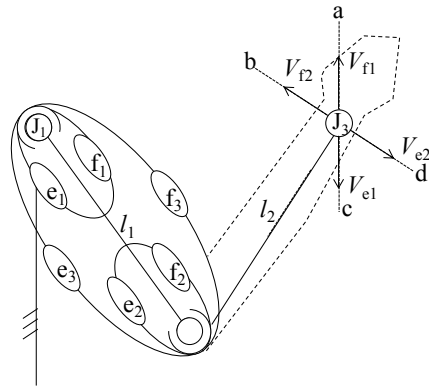


Fig.7 Functional effective muscle and output velocity

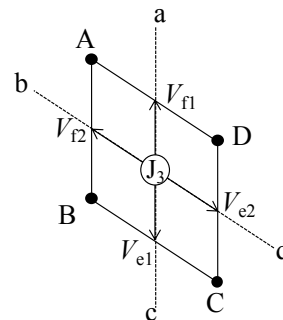


Fig.8 Output velocity distribution

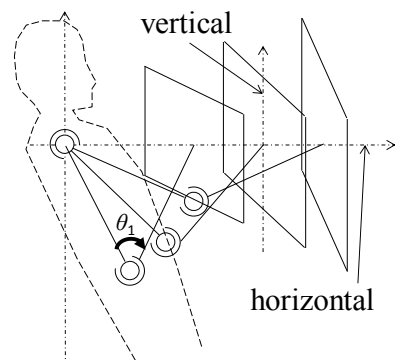


Fig.9 Change of velocity by angle of elbow joint

操作力と操作速度を掛け合わせたものを示す. 表 2 と図 11 を比べると標準偏差が大きいほど筋パワーが小さく, 標準偏差が小さいほど筋パワー大きくなるという傾向が見られた. また, 他の被験者からもほぼ同様の傾向が見られた.

5. おわりに

本研究は, マンマシンインターフェースの操作力, 操作速度を理論的に解析し, 実験検証を行った. また, 操作力, 操作速度から求められた筋パワーが扱いやすさ(より安定して, 操作しやすい)との関連性がある傾向を確認した. この関係をより明らかにしていくことで, マンマシンインターフェースの設計において, 定性的評価と共に, 理論式より設計初期段階で, 被験者の負担を予測できる可能性を確認した. また, 今回の実験条件は一条件(1 パターン)の実験であり, 手首のひねりの条件が一定でない為, 今後は条件を拡大した実験と考察を行い, 予測技術の確立を進めていく.

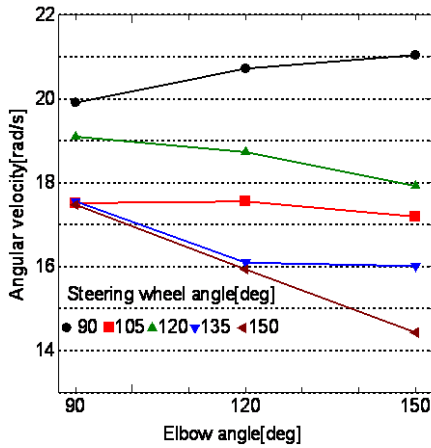


Fig. 10 Max. angular velocity

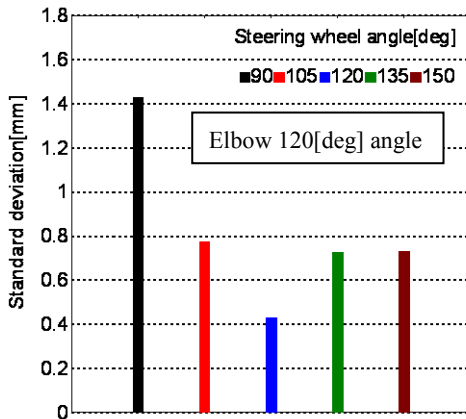


Fig. 11 Tracking result in elbow 120 degree angle

Table 2 Muscle Power

θ_2 [deg]	Power = Torque \times Angular velocity [W]		
	Elbow angle θ_1 [deg]		
	90	120	150
90	1827.9	1753.3	1558.8
105	1852.6	1843.2	1629.8
120	2304.2	2101.3	1907.6
135	1946.1	1838.5	1897.5
150	1849.8	1847.5	1742.4

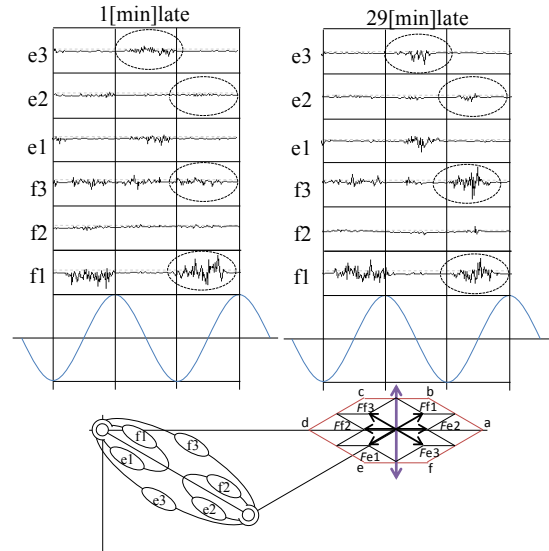


Fig. 12 Electromyogram of tracking experiment ($\theta_1=120$ [deg] $\theta_2=90$ [deg])

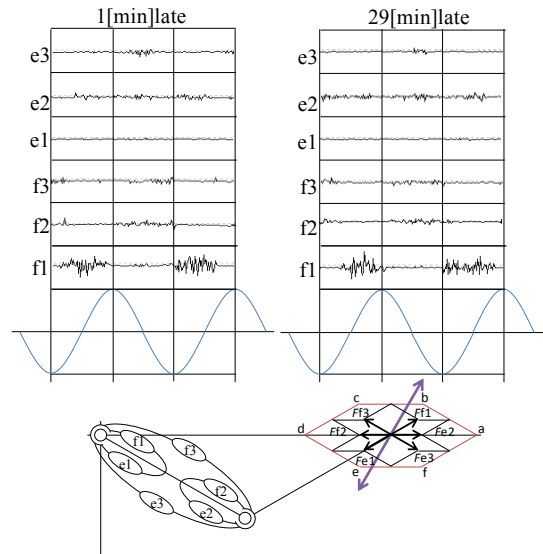


Fig. 13 Electromyogram of tracking experiment ($\theta_1=120$ [deg] $\theta_2=120$ [deg])

参考文献

- (1) 田島孝光, 大島徹, 筋の協調制御理論に基づいた次世代操縦システムの研究, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.52-04, pp.17-20, 2004
- (2) 田島孝光, 大島徹, 筋の協調制御理論に基づいた次世代操縦システムの研究 (第2報), 自動車技術会学術講演会前刷集, No.62-04, pp.9-12, 2005
- (3) 田島孝光, 大島徹, 筋の協調制御理論に基づいた次世代操縦システムの研究 (第3報), 自動車技術会学術講演会前刷集, No.57-06, pp.25-28, 2006
- (4) 長谷和徳, コンピュータマネキンにおける身体運動の生成, バイオメカニズム学会誌, vol.23, pp.18, 1999
- (5) 藤川智彦, 大島徹, 熊本水頼, 横井信安, 拮抗筋群による協調制御機能, 日本機械学会論文集, vol.63, no.607, pp.769-776, 1997
- (6) 大島徹, 藤川智彦, 熊本水頼, 一関節筋および二関節筋を含む筋座標系による機能別実効筋力評価(筋力と四肢先端の出力), 精密工学会誌 vol.65, no.12, pp.1772-1777, 1999
- (7) 川初清典, 自転車の脚筋パワーおよび力 - 速度関係について, 体育学研究, 1970