

論文・解説

34

## 操作性向上のための上肢可操作性予測手法の開発 Development of Arm Manipulability Forecast Technique for Ease of Operation

山田直樹<sup>\*1</sup> 米澤泰延<sup>\*2</sup> 三浦泰彦<sup>\*3</sup>

Naoki Yamada Hironobu Yonezawa Yasuhiko Miura

正守一郎<sup>\*4</sup> 川口克也<sup>\*5</sup> 中村誠之<sup>\*6</sup>

Ichiro Masamori Katsuya Kawaguchi Seishi Nakamura

### 要約

人にとってより扱いやすい自動車操作機器の実現をめざし、開発の初期段階で人間の筋骨格系の力学的特性と操作機器特性の適合性を評価する手法の開発を試みている。近年、設計段階において人間骨格系寸法データや発揮可能な力を予測する機能を備えた居住性・作業性検討用コンピュータマネキンが活用されているが、筋骨格系の力学的特性を十分予測できるものは見当たらない。

今回、ロボット工学のリンク解析を上肢に適用し、手先で発揮される力学的特性を楕円体としてビジュアルに表現可能な可操作性評価手法<sup>(1)</sup>に着目した。この一手法である操作力楕円体による解析に生体特性を考慮することで「力の発揮しやすさ」を解析する手法を構築した。更にこれとコンピュータマネキンとを組み合わせることで、上肢筋骨格系力学的特性をわかりやすく表現可能な予測手法を開発した。本手法の定性的な検証のため数例の操作へ適用し、筋負担変化が予測できることが示唆された。

また、後ヒンジを持つRX-8フリースタイルドアのリヤドアの開発において、本予測手法によって得られる「力の発揮しやすさ」を考慮した設計が、操作時の筋負担低減の観点から操作性向上に有効であることが確認できた。

### Summary

For ease of operation of vehicle operating equipment, we have been attempting to consider the adaptability of the mechanical characteristics of operating equipment with those of the human muscular-skeletal system at an early development stage.

We have developed a forecast technique ( analysis of manually manipulating effort ) for mechanical characteristics of the muscular-skeletal system by a combination of manipulating force ellipsoid, one of manipulability evaluation techniques of robotics, with a computer manikin.

This technique has worked satisfactorily in qualitative basic experiment and the operation development of the rear door of RX-8 Center-opening freestyle door system.

These results have suggested the potential of this technique for muscular load forecast and effectiveness of consideration to the mechanical characteristics muscular-skeletal system ( analysis of manually manipulating effort by this technique ) for improvement in the operating equipment.

\* 1 ~ 4 技術研究所  
Technical Research Center

\* 5 CAE部  
CAE Dept.

\* 6 ボデー開発部  
Body Development Dept.

### 1. はじめに

ドアやステアリングをはじめとする自動車操作機器と人間との適合性を評価する操作性の評価手法として、これまで主観評価や人間計測（筋電位、動作）による評価が用いられているが、より効率的に人間との適合性を向上させるには、設計段階での操作性の予測手法が望まれている。

近年、設計段階で居住性・作業性検討用にコンピュータマネキンが活用されているが、操作性の予測で考慮すべき筋骨格系の力学的特性を十分予測できるものは見当たらない。そこで、ロボット工学の可操作性評価手法に生体特性を考慮し、これとコンピュータマネキンを組み合わせることで、上肢筋骨格系の力学的特性に基づく「力の発揮しやすさ」を解析する予測手法を構築した。

これを本手法の定性的な検証のため数例の操作へ適用し、筋負担が予測できることが示唆された。更に、RX-8フリースタイルドアのリヤドアの操作性開発のなかにおいても本予測手法によって得られる上肢の力学的特性である「力の発揮しやすさ」を考慮することが、操作時の筋負担低減の観点からの操作性向上に有効であることが確認できたので報告する。

### 2. 開発のねらい

上肢筋骨格系の力学的特性予測手法の開発にあたり、

- ・人間工学の専門的知識がなくとも予測結果を直感的に理解可能とする図形による結果の提示
- ・計算負荷低減、及び、必要な人間特性データの絞り込みを可能とするシンプルなモデル化

をねらいとした。そこでロボット工学のリンク解析を上肢に適用し、手先で発揮される力学的特性を楕円体として表現可能な可操作性評価手法<sup>1)</sup>に着目した。

今回、ドア操作時の筋負担予測・低減をねらい、可操作性予測手法の一手法である操作力楕円体による解析手法に生体特性を考慮し、上肢の静力学的特性の予測手法を構築した。Fig.1にドア操作時の操作力楕円体の概念図を示す。楕円体（Fig.1では楕円で表示）の主軸半径の長い方向に



Fig.1 Manipulating Force Ellipsoid

は大きな手先力を発揮することができ、短い方向には小さい力しか発揮できないことをビジュアルに表現できる。

### 3. 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。そこで上肢の力学的特性を解明するにあたり、ロボットアームの可操作性評価手法<sup>1)</sup>に生体のトルク特性を考慮したモデルを構築した。

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

$$= J^T f \tag{1}$$

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  $q$  に関するヤコビ行列を  $J \in R^{m \times n}$  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、一般に関節ごとに変化する<sup>2)</sup>。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  $\tau = (\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n)^T \in R^n$  と定義する。この時  $\tau$  を用いて、関節トルクベクトル  $T \in R^n$  を

$$= T(\tau) \tag{2}$$

と定義する。ただし、 $T(\tau) = \text{diag}(\tau_1^{j_1^{max}}, \tau_2^{j_2^{max}}, \dots, \tau_n^{j_n^{max}}) \in R^{n \times n}$  ( $j_i \in \{1, -1\}$  は回転方向を表す) は、各関節が角度  $\theta_i$  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。 $\tau_i \in [0, 1]$  は第  $i$  関節の最大関節トルクに対する比率であり、 $\tau_i$  の符号は関節の回転方向を表す。

式(1), (2)より、

$$= T(\tau)^{-1} J(\tau) f \tag{3}$$

を得る。 $T(\tau)$  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  $\tau$  として表現できる。この時、 $\tau$  の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

$$\tau = f^T (J^T)^{-1} \chi (J^T)^{-1} f \leq 1 \tag{4}$$

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、関節トルクを考慮しない楕円体を変形したものに相当する。この楕円体は操作力楕円体と呼ばれ、主軸半径の長い方向（長径方向）には大きな手先力を発生することができ、短い方向（短径方向）には小さい力しか発生できない。また、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を表現している。

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。

今回これを上肢に適用し、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関節自由度のモデルを構築した。

#### 4. 実験による評価手法の検証

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<sup>3)</sup>等が報告されているが、実験検討がなされた例は見当たらない。本稿では、上肢姿勢が変化する動作として、前額面での肩の外転を中心とする「横スライド動作」と矢状面での肩の屈曲が主な「上下動作」を取り上げ、実車における操作実験をもとに手法の定性的な有効性検証を行い、更に、コンピュータマネキンと組み合わせた予測手法を用い「前後動作」を取り上げた検証を行った。

##### 4.1 横スライド動作

本動作については後席スライドドアの車外からの開け操作を対象にした (Fig.2)。ドアの機械的特性である操作カストローク特性 (F-S特性) をFig.3に示す。このスライドドアを操作する時の筋電図 (EMG) による筋負担計測、光学式三次元動作計測装置による上肢の動作計測を、被験者3名を用いて行った。筋電図例をFig.4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を上肢手先位置の軌跡とともにFig.5に示す。なお、本稿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。

ドアの操作力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 (Fig.3)。一方、三角筋における筋負担はド

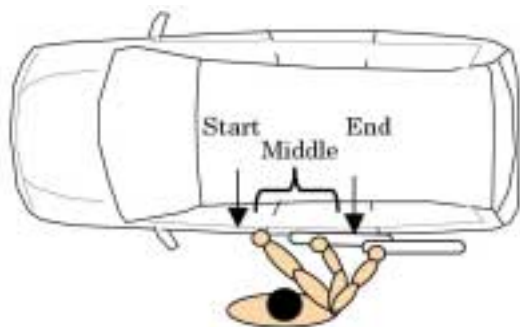


Fig.2 Operation of Slide Door

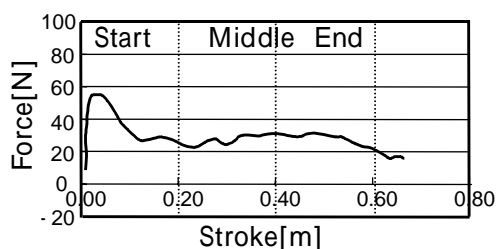


Fig.3 Force-Stroke Characteristics

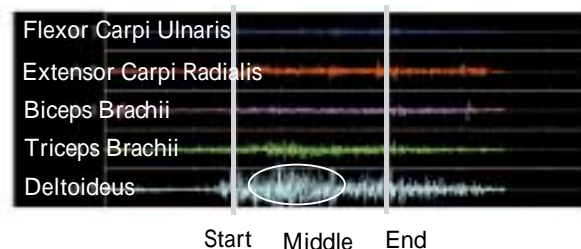


Fig.4 EMG during Slide Door Operation

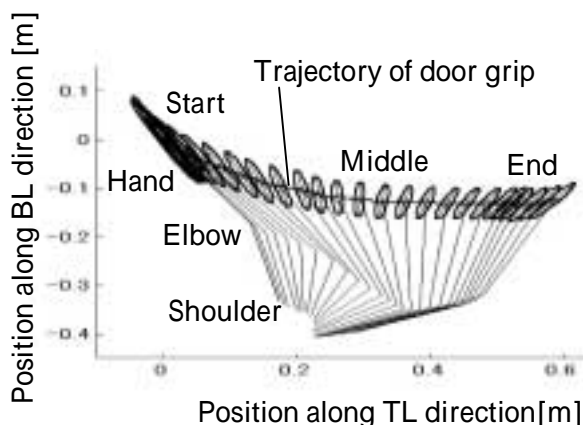


Fig.5 Manipulating Force Ellipsoid and Trajectory of Door Grip

ア側操作力が低い開け途中で大きい (Fig.4)。

これには、上肢の力学的特性である「力の発揮しやすさ」が関係していると考えられる。Fig.5より「力の発揮しやすさ」を表す操作力楕円体の長径方向 (力の発揮しやすい方向) 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つ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分かる。この操作力楕円体の長径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いえる。

##### 4.2 上下動作

上下動作はリフトゲート閉め操作をとり上げ、操作時の腕姿勢における操作力楕円体と筋負担 (筋電位) の比較を行った。リフトゲート操作時の動作姿勢と筋負担との関係については、Fig.6に示す保持動作時に筋負担が増大する傾向にある (Fig.7)<sup>4)</sup>。本動作での操作力楕円体をFig.8に示す。筋負担が大きい保持動作時に操作力楕円体の長径方向と操作方向とのずれが大きくなり、力を発揮しづらくなっていることが分かる。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のような姿勢変化を伴う場合の筋負担の現象説明、推定に有効であるといえる。

#### 5. コンピュータマネキンと組み合わせた予測手法の開発

操作力楕円体による可操作性評価手法を、コンピュータ

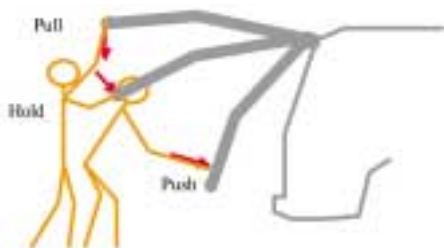


Fig.6 Operation of Lift Gate

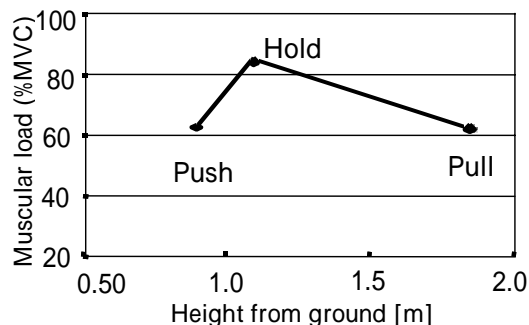


Fig.7 Muscular Load during Lift Gate Operation

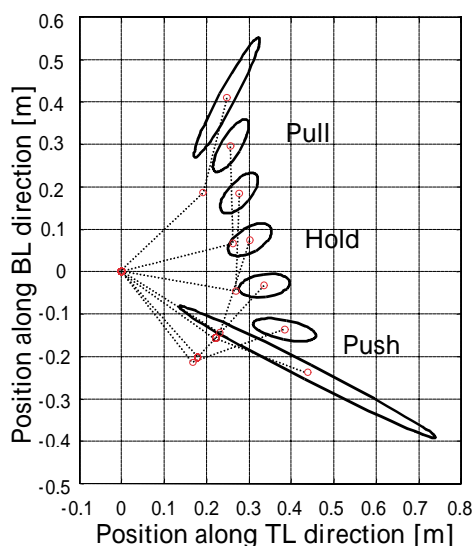


Fig.8 Manipulating Force Ellipsoid during Lift Gate Operation

マネキンと組み合わせ、「力の発揮しやすさ」の予測手法を構築した。コンピュータマネキンは手先位置を指定すると、逆動力学問題を解くことにより、腕姿勢を予測することが可能である。

Fig.9に本予測手法の概念図を示す。可操作性評価手法に必要な腕の寸法データ及び操作時の姿勢での関節角度データを、コンピュータマネキンより取得する。これにより可操作性評価を行い、結果図をコンピュータマネキン上にCAD図とともに表示するものである。

一般の前ヒンジタイプのドア操作をとり上げ、本予測手法について前章同様に定性的検証を行った。Fig.10に本予測手法による「力の発揮しやすさ」の予測結果を示す。(a)の開き始めでは、操作方向と操作力楕円の長軸方向がほ

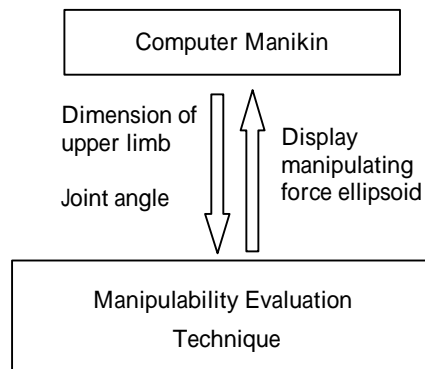


Fig.9 Forecast Technique of Manipulability

ぼ一致しているが、開き途中の(b)では不一致となっている。Fig.11に示す筋電図によるとドアを開けるにつれ筋電位が高くなっており、前章と同様の傾向が得られた。

本手法によって得られる上肢の力学的特性である「力の発揮しやすさ」の予測結果は操作時の筋負担の現象説明や推定に有効であるといえる。

## 6. 予測手法を用いたドア操作性向上の事例

### 6.1 予測手法の適用

本予測手法を後ヒンジを持つRX-8フリースタイルドアのリアドアの車室内からの開閉動作に適用した事例を紹介する。

本手法により予測された上肢の力学的特性をベースに、筋負担の低減を効果的に行うためのドア操作力の目標特性を導出した。

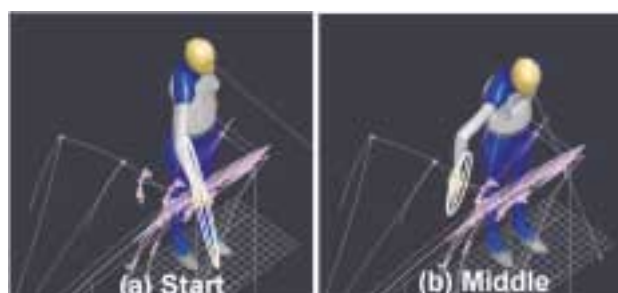


Fig.10 Manipulating Force Ellipsoid (Front Hinge Type Door)

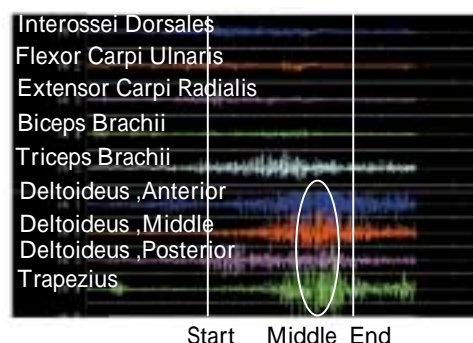


Fig.11 EMG (Front Hinge Type Door)



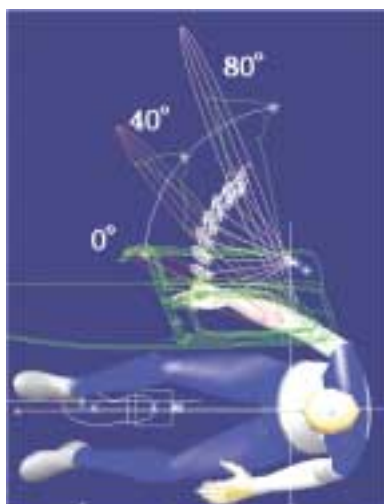


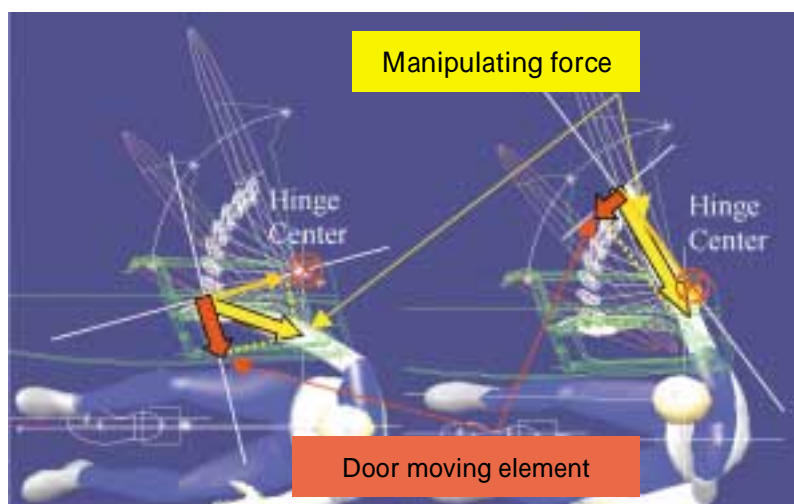
Fig.12 Manipulating Force Ellipsoid  
(RX-8 Rear Door)

### (1) インナーグリップのレイアウト検討

上肢とドアの接点であり、ドアの回転に作用する力を伝えるインナーグリップ（以下グリップ）のレイアウトに着目した。Fig.12に、車室内からの開閉動作におけるドア開度0°、40°、80°での操作力楕円体を示す。いずれの開度においてもドア回転操作軌跡の方向と「力の発揮しやすい」方向のずれが大きく、操作時の筋負担低減の必要性が示唆された。人間の特性を考慮せずドア回転モーメントのみで考えた場合、ドアを回転させるトルクはグリップとドアヒンジセンターとの距離に関係し、グリップは、よりドア外側にレイアウトされた方が有利である。ところが、届きやすさを考慮すると逆に不利となる。ここでは、ドアの回転への作用の効率の観点では不利になるが、まず届きやすさの観点でグリップをレイアウトし、「力の発揮しやすい」方向をうまく利用して筋負担を低減する構造を検討した。

まず人間が発揮する力がドアの回転にどのように作用するか検討するため、再度人間の動作について考察を行った。「人間は単純にドア軌跡方向のみの力でドアを操作しているのか？」日常生活では極めて巧みな動作を行っている人間が、力の発揮しづらいドア回転操作軌跡方向にのみ力を発揮するとは考えにくく、『力の発揮しやすい方向の力を利用し、ドア回転操作軌跡方向への力としている』と考えた。こうすることで筋負担をできるだけ小さくする動作を行っていると考えられる。

そこでFig.12の「力の発揮しやすさ」の予測結果をもとに、「力の発揮しやすい」方向の力をドア回転操作軌跡方向の成分とそれに直行する成分に分解した（Fig.13）。これによると「力の発揮しやすい」方向に力を発揮し、そのドア回転操作軌跡方向の成分で操作することにより、単純にドア回転操作軌跡方向に力を発揮するより大きな力を発揮できることから、筋負担を低減できる可能性があることが分かる。この「力の発揮しやすい」方向の力をうまく利用するため、手首関節に負担をかけないでこの方向



Easy to operate                      Difficult to operate  
(a) 0°                                      (b) 80°

Fig.13 Element of Manipulating Force Ellipsoid

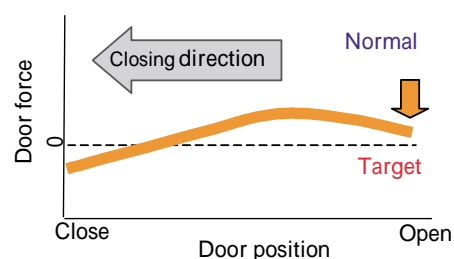


Fig.14 Target of Door Force

(Fig.13の人間側に向かう方向)に引っ張ることが可能な縦型のグリップが有効であると考えた。

### (2) チェッカー特性の検討

ドア開度に着目すると、ドア開度が大きくなるに従い「力の発揮しやすい」方向の力がドア回転操作軌跡方向の成分として作用しづらくなり、ドア全開付近で最も閉めにくくなることが予測される。そこでドア操作力の目標特性をFig.14のように全開時に操作力が減じるよう設定した。この目標特性を実現するために、チェッカー部分に閉まり方向のモーメントを発生させる特性を持たせた。

### 6.2 実験検証

「力の発揮しやすさ」を考慮した設計が、操作時の筋負担低減に有効であることを確認するため実験検証を行った。Fig.15にドア操作の実験の様子を示す。筋電位と同時に、グリップにかかる力を圧力分布センサで計測した。被験者は日本人の平均的体格（JF50）の女性を用いた。Fig.16は圧力分布により算出した肩方向への力とドア回転操作軌跡方向への力を時系列に図示したものである。力が必要と予測した閉め始めにおいて、「力の発揮しやすい」方向である肩方向に力がかけられていることが分かる。このことから、『力の発揮しやすい方向の力を利用し、ドア回転操作軌跡方向への力としている』という仮説が妥当と考える。

目標特性に沿った操作力アシストを行っているチェッカ



Fig.15 Door Operation Test

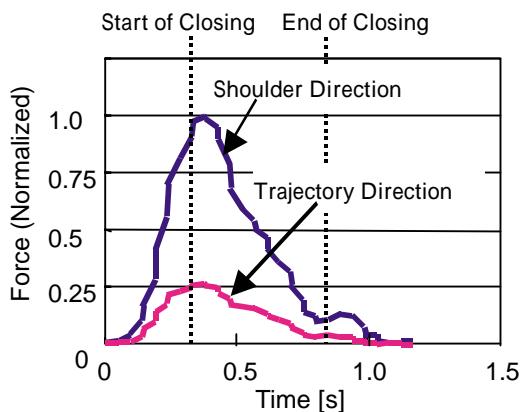


Fig.16 Analysis of Operating Force Direction

ーを装着したドアと、通常のチェッカーのドアにおけるドア閉め始めでの筋負担比較をFig.17に示す。操作力アシストを行っているチェッカーを用いたドアにおいて筋負担が半減していることが分かる。

またRX-8と同様に後ヒンジを持つ車との比較をFig.18に示す。この車はグリップがドア外側にレイアウトされており、ドアを回転させるモーメントを発生させやすい一方、グリップに手が届きにくい。これに対しRX-8では、上肢の力学的特性を考慮に入れたグリップレイアウトや操作力特性を採用することで、届きやすさとドアの動かしやすさの両立を実現している。

### 7. まとめ

ロボット工学の可操作性評価手法に生体特性を考慮し、これとコンピュータマネキンを組み合わせることで、上肢筋骨格系の力学的特性に基づく「力の発揮しやすさ」を解析する予測手法を構築した。定性的な実験検証により、操作途中の姿勢が大きく変化する動作において、筋骨格系の力学的特性に起因する筋負担の推定が可能であることが明らかになった。更に、RX-8フリースタイルドアのリヤドア開発への適用事例により、「力の発揮しやすさ」を考慮に入れることが操作性向上に有効なことが確認できた。

最後に本研究にご協力頂きました広島大学 辻敏夫教授，広島県立保健福祉大学 大塚彰教授をはじめ関係者の皆様方に深く感謝致します。

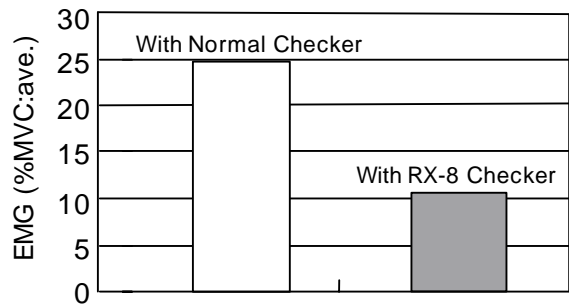


Fig.17 EMG Comparison to Normal Checker

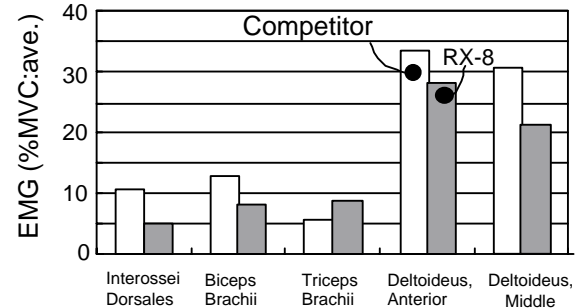


Fig.18 EMG Comparison to a Competitor

### 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：人間工学基礎数値数式便覧，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）
- (4) 正守一郎ほか：筋電位計測技術を用いた操作性解析 - リフトゲート閉め動作への適用 - 自動車技術会学術講演会前刷集，No.45-99，p.13-16（1999）

### 著者



山田直樹



米澤泰延



三浦泰彦



正守一郎



川口克也



中村誠之