

等価慣性指標にもとづく人間-自動車系のレイアウト設計法

羽田 昌敏*・辻 敏夫**

A Layout Design Method of Human-vehicle Systems Based on Equivalent Inertia Indices

Masatoshi HADA* and Toshio TSUJI**

This paper deals with a design method for layout of controls based on the equivalent inertia of human-machine systems. In this method, both the human and the object are modeled as articulated rigid bodies, and the posture of the human, the configuration of the object, the contacts between the human and the object, and the constraints on the human and on the object are respectively defined prior to the analysis. The equivalent inertia of the human-machine system is then calculated at some points on the object taking the contacts and the constraints into consideration. Finally, optimization is carried out by choosing design variables and by employing the indices of equivalent inertia as the objective function. In this paper, layout designs of a steering wheel and an accelerator pedal optimized by using newly defined effective and ineffective equivalent inertia indices, are compared with subjective layout evaluated by human drivers. The results show the effectiveness of this method to design user-friendly layout for various physical sized drivers.

Key Words: equivalent inertia, human-machine system, optimum design, effective and ineffective inertia

1. はじめに

われわれ人間は作業内容や作業目的に応じて身体各部位の姿勢や力を巧みに調節するだけではなく、環境との間の拘束を巧みに利用している。たとえば紙面に文字を書く場合、鉛筆をもった手を机上におくことで、小さく複雑な文字でも速く正確に書くことができる。また自動車を運転中に急制動を行なう場合、腰をシートに押しつけてその反作用を利用することで、より大きな力をブレーキペダルに伝えることができる。したがって、人間にとって使いやすい操作系とするためには、操作系がもつ動特性のみならず、操作する人間までを含めた人間-機械系の中で、操作系をどのように配置すべきかを考えることも重要な設計項目となる。

人間-機械系における操作系配置に関する研究は、おもに人間工学の分野で行なわれてきている¹⁾。そこでは計算機内に構築した人体モデルをもとに、関節可動域と関節角度に着目してリーチや操作姿勢の評価が行なわれている²⁾。しかしながら、対象物との間にはたらく相互作用を前提とした評価とはなっていないため、異なる作業にも適用できる汎用的な指

標や設計手法を導出するまでは至っていない。

一方、ロボット工学の分野などで知られる可操作性の考え方を用いて操作系配置を評価する研究も行なわれている。田中ら³⁾は、実験により求めた生体の関節トルク発揮特性をもとにした可操作力棒円体を提案し、三浦らはそれを自動車ドアや幌の開閉性評価へ適用している⁴⁾。しかしながら、これらの研究では人間の手先位置での操作性をもとに評価を行なっており、人間と操作系との間の接触条件や拘束条件までは考慮されていない。ところで生体の唯一のアクチュエータである筋には、筋紡錘やゴルジ腱器官といった変位や速度、力を感じるセンサがあることが知られている。また同時に筋は可変粘弾性特性をもつことも知られており⁵⁾、力の発揮特性のみならず、人間-機械系のもつ等価インピーダンス特性を考慮することが重要であると考えられる。

そこで本論文では人間-機械系の等価インピーダンス特性に基づいた、新しい操作系配置の設計手法を提案する。筆者らはすでに人間-機械系の等価慣性を拘束条件および接触条件を考慮して導出する手法⁶⁾と、筋の粘弾性特性を考慮して等価インピーダンス特性を解析するシステム⁷⁾を提案している。本論文ではこれらのうち等価慣性指標を用いた最適化手法により、人間-機械系のレイアウト設計問題を考える。本論文では、まず提案する設計法の概要を述べる。つぎに人間-機械系の等価慣性を用いた評価関数を提案し、人間-自動車系へ適用する。そこでは自動車の主要な操作機器であるステアリングとアクセルペダルの配置に関する官能評価実験を行ない、提案する評価関数による計算結果と比較することでその妥当性を検証し、さまざまな体格のドライバに対する本手法の有用性を示す。

* (株) 豊田中央研究所

愛知県愛知郡長久手町大字長湫字横道 41-1

** 広島大学大学院工学研究科 東広島市鏡山 1-4-1

* TOYOTA Central Research and Development Labs., INC., 41-1 Yokomichi, Nagakute-cho, Aichi-gun, Aichi

** Graduate School of Engineering, Hiroshima University, 1-4-1 Kagamiyama, Higashi-hiroshima

(Received October 31, 2006)

(Revised January 25, 2007)

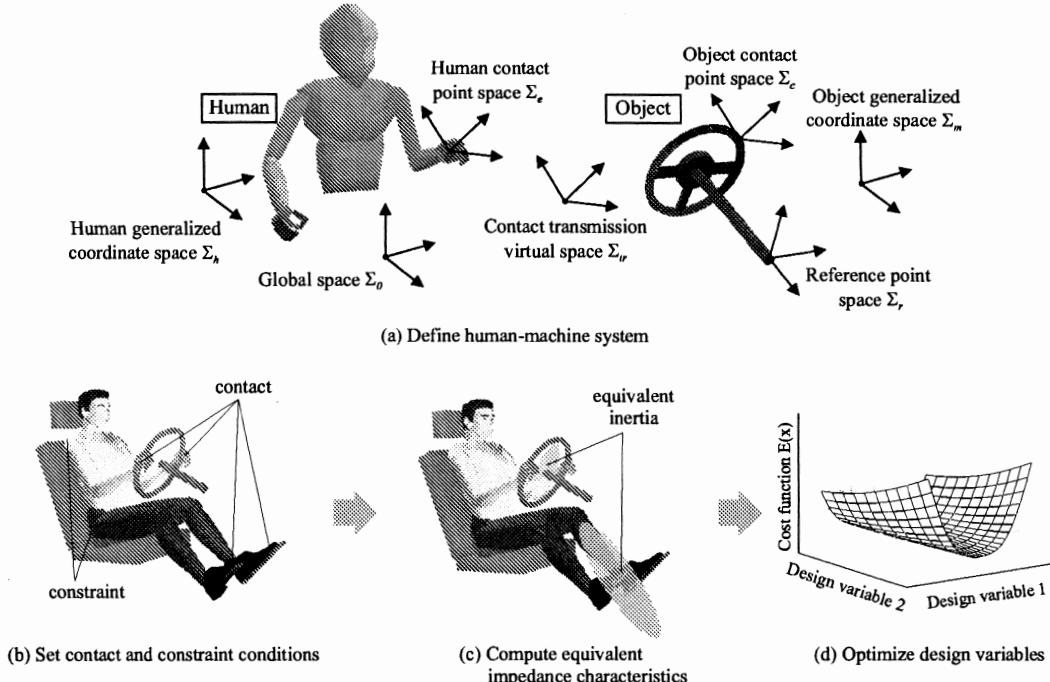


Fig. 1 A framework of layout design based on equivalent inertia of human-machine systems

2. レイアウト設計法の概要

Fig. 1 に本論文で提案する、人間-機械系の等価インピーダンス特性に基づく設計法の流れを示す。設計法は 4 つのステップから成る。以下に各ステップの処理について述べる。

2.1 人間-機械系モデルの構築

まず最初に計算機内に人間と対象物からなる人間-機械系モデルを構築する。本論文では人間も対象物もマルチボディシステムとしてモデル化する。そこでは上腕・前腕など人体各部および対象物の各部品を剛体として取り扱い、それぞれに質量・重心位置・慣性モーメントを定義する。そして剛体上に座標系をもつ特徴点(マーカと呼ぶ)を定義し、関節やジョイント、接触および拘束点を表現する。

Fig. 1(a) に人間-機械系モデルで用いる座標系を示す。 Σ_h は人間の運動を表現する一般化座標 $q_h \in \mathbb{R}^{n_h}$ を構成する座標系で、 Σ_e は人間の対象物に対する接觸点座標 $X_e \in \mathbb{R}^{n_e}$ を構成する座標系である。接觸点は k 個存在するものとする。同様に Σ_m は対象物の運動を表現する一般化座標 $q_m \in \mathbb{R}^{n_m}$ を構成する座標系、 Σ_c は対象物の人間にに対する接觸点座標 $X_c \in \mathbb{R}^{n_c}$ を構成する座標系である。 Σ_{tr} は人間と対象物の接觸点において力の伝達を表現するための n_{tr} 次元の座標系である⁸⁾。人間と対象物が接觸している状態では、 Σ_e 、 Σ_{tr} 、 Σ_c の 3 つの座標系は、接觸面の法線方向を z 軸として常に重なっており、接觸点において滑りは発生しないものとする。 Σ_r は等価慣性を評価する位置 $r \in \mathbb{R}^6$ に原点をもつ座標系であり、対象物上の任意の位置に定義できる。 Σ_0 はグローバル座標系である。ここで人間と対象物はともに特異姿勢ではなく、 $n_h \geq 6$ 、 $n_e = n_c \geq n_{tr}$ 、 $n_m \geq 6$ とする。

2.2 姿勢・拘束・接觸条件の決定

つぎに構築した人間-機械系モデルの姿勢および拘束条件を決定する(Fig. 1(b) 参照)。人間-機械系モデルの姿勢は、 $q = [q_h^T, q_h^T, q_m^T, q_m^T]^T \in \mathbb{R}^n$, $n = n_h + n_m + 12$ を用いて表現できる。 $q_h \in \mathbb{R}^6$ および $q_m \in \mathbb{R}^6$ はそれぞれ全体座標系 Σ_0 から人体座標系 Σ_h 、自動車座標系 Σ_m への座標変換に必要な変数である。ここで k 個ある人間と自動車の接觸点座標 $X_e \in \mathbb{R}^{n_e}$ と $X_c \in \mathbb{R}^{n_c}$ は常に一致することから、

$$J_e \dot{q}_h - J_c \dot{q}_m = 0 \quad (1)$$

が成り立つ。 $J_e \in \mathbb{R}^{n_e \times n_h}$, $J_c \in \mathbb{R}^{n_c \times n_m}$ はそれぞれ Σ_h から Σ_e , Σ_m から Σ_c へのヤコビ行列で、 $\text{rank}(J_e) = \text{rank}(J_c) = r_e \leq n_e = n_c = 6k$ とする。

いま、 q のうちの p 個 ($p \leq n - 2r_e$) の変数を、レイアウトを決定する変数 $x \in \mathbb{R}^p$ とし、さらに適切な初期値が設定されているものとする。したがって $n - p - 2r_e$ 個の独立な条件式からなる

$$\Phi_L(q) = 0 \quad (2)$$

を設定することで、人間-機械系モデルの姿勢 q を一意に求めることができる。

k 個存在する人間と対象物の接觸点に関しては、接觸拘束行列⁹⁾ $H \in \mathbb{R}^{n_{tr} \times 6k}$, $n_{tr} = r_e = \sum_{i=1}^k n_{tr_i}$ を

$$H = \begin{bmatrix} H_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & H_k \end{bmatrix} \quad (3)$$

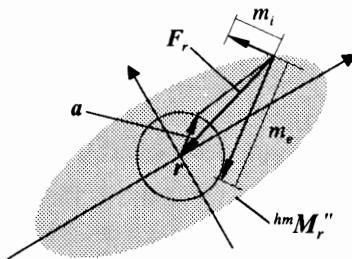


Fig. 3 Effective and ineffective equivalent inertia concept

実際のレイアウト設計問題に適用する際には、(15)式で示す評価関数 $\mathcal{J}(\mathbf{x})$ を問題に応じて適切に設定する必要がある。次節では人間-自動車系のレイアウト設計問題に対して、等価慣性を用いた評価関数 $\mathcal{J}(\mathbf{x})$ を設定することを検討する。

3. 人間-自動車系への適用

ここでは、有効等価慣性および無効等価慣性という概念を用いた評価関数を提案し、自動車の主要な操作機器であるステアリングおよびアクセルペダルの配置に対する評価関数の妥当性を検証する。

3.1 有効等価慣性と無効等価慣性を用いた評価関数

説明を簡単にするため、評価位置 \mathbf{r} がもつ運動の自由度が Σ_r の $x-y$ 平面内のみに限定されている場合を考える。このとき、 ${}^{hm}\mathbf{M}_r''$ の左上 2×2 小行列を用いて慣性楕円を描くことができる (Fig. 3 参照)。いま、点 \mathbf{r} に加速度 $\mathbf{a} \in \mathbb{R}^2, |\mathbf{a}| = 1$ が入力されたとすると、発生する慣性力 $\mathbf{F}_r \in \mathbb{R}^2$ は

$$\mathbf{F}_r = {}^{hm}\mathbf{M}_r'' \mathbf{a} \quad (18)$$

となる。慣性楕円のいずれかの主軸と \mathbf{a} が同じ方向である場合を除いて、 \mathbf{F}_r は \mathbf{a} とは異なる方向となる。そこで \mathbf{F}_r を \mathbf{a} と同じ方向の成分と直交する方向の成分に分割することを考える。 \mathbf{a} と同じ方向の成分の大きさ $m_e \in \mathbb{R}^1$ を有効等価慣性 (effective equivalent inertia), \mathbf{a} と直交する成分の大きさ $m_i \in \mathbb{R}^1$ を無効等価慣性 (ineffective equivalent inertia) と呼ぶこととする。有効等価慣性 m_e はレイリー-商¹¹⁾を用いて、

$$m_e = \frac{\mathbf{a}^T {}^{hm}\mathbf{M}_r'' \mathbf{a}}{\mathbf{a}^T \mathbf{a}} \quad (19)$$

で求められる。また無効等価慣性 m_i は、

$$m_i = |{}^{hm}\mathbf{M}_r'' \mathbf{a} - m_e \mathbf{a}| \quad (20)$$

にて計算することができる。

有効等価慣性 m_e はベクトル \mathbf{a} が等価慣性 ${}^{hm}\mathbf{M}_r''$ の最大固有値に対応する固有ベクトルと同じ方向となったときに最大となり、最小固有値に対応する固有ベクトルと同じ方向となったときに最小となる。また無効等価慣性 m_i はベクトル \mathbf{a} が等価慣性 ${}^{hm}\mathbf{M}_r''$ のいずれかの固有ベクトルと同じ方向となったときに最小値 0 となる。

いま、 \mathbf{x} で与えられる人間-自動車系のレイアウトにおいて、

Table 1 Statue of the subjects.

Subject	A	B	C	D	E
height (m)	1.61	1.67	1.68	1.72	1.80
weight (kg)	50.0	60.0	65.0	62.0	70.0

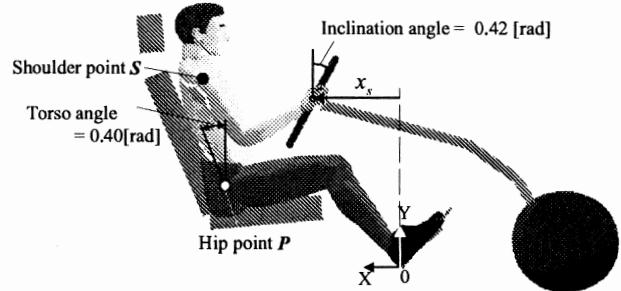


Fig. 4 Experimental condition

Table 2 Driving position parameters and appropriate longitudinal position of the steering wheel

Subject	A	B	C	D	E	
hip point (m)	x y z	0.715 0.255 0.134	0.711 0.255 0.128	0.741 0.252 0.127	0.738 0.252 0.123	0.794 0.247 0.115
right shoulder point (m)	x y z	0.854 0.685 -0.052	0.851 0.704 -0.065	0.881 0.705 -0.067	0.879 0.717 -0.075	0.935 0.737 -0.093
wheel center (m)	y z	0.616 0.134	0.616 0.128	0.616 0.127	0.616 0.123	0.616 0.115
x_s (m)		0.429	0.415	0.428	0.417	0.439

ドライバが対象物 (ステアリングやアクセルペダル) を操作する方向が \mathbf{a} であるとする。このとき有効等価慣性 m_e が大きければ、ドライバに作用する外力により対象物上の点 \mathbf{r} に発生する加速度が小さくなる。一方、無効等価慣性 m_i が小さければ、ドライバの操作力を対象物上の点 \mathbf{r} の加速度に無駄なく伝達することができる。以上の議論から、本論文では人間-自動車系のレイアウト設計に対する評価関数 $\mathcal{J}(\mathbf{x})$ として、

$$\mathcal{J}(\mathbf{x}) = w_e \frac{1}{m_e} + w_i m_i + w_j \sum_{i=1}^{n_h} K_i(q_{h_i}) \quad (21)$$

$$K_i(q_{h_i}) = k_{1_i} e^{k_{1_i}(k_{2_i} - q_{h_i})} + k_{3_i} e^{k_{3_i}(q_{h_i} - k_{4_i})} \quad (22)$$

を提案する。ここで w_e, w_i, w_j は重み係数である。なお (22) 式は人体の関節 i の受動剛性を表わしており、自然な操作姿勢を実現するために導入した。パラメータ $k_{j_i}, (j = 1, 2, 3, 4)$ には $k_{1_i} > 0, k_{3_i} > 0, k_{2_i} < k_{4_i}$ という関係がある、詳細は文献¹²⁾を参照されたい。

3.2 ステアリング配置への適用

提案した評価関数の妥当性を検証するために、車両評価に熟練した 5 名の男性被験者 (年齢 25 才~40 才) に対して、つぎのような官能評価実験を行なった。なお各被験者の身長および体重を Table 1 に示す。

Fig. 4 に実験に使用したレイアウト可変ベンチの概念図を示す。実験ではステアリングやシートの位置を一般的な乗用

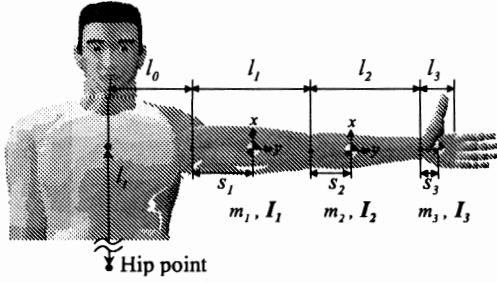


Fig. 5 A multibody human model of upper extremity

Table 3 Inertial parameters of upper extremity

Subject	A	B	C	D	E	
l_t (m)	0.524	0.543	0.546	0.559	0.584	
l_0 (m)	0.206	0.214	0.215	0.220	0.229	
l_1 (m)	0.251	0.265	0.267	0.277	0.296	
l_2 (m)	0.230	0.247	0.250	0.261	0.283	
l_3 (m)	0.053	0.055	0.056	0.057	0.060	
s_1 (m)	0.128	0.135	0.137	0.141	0.151	
s_2 (m)	0.085	0.091	0.092	0.096	0.041	
s_3 (m)	0.038	0.039	0.040	0.041	0.043	
m_1 (kg)	1.15	1.38	1.50	1.43	1.61	
m_2 (kg)	0.75	0.90	0.98	0.93	1.05	
m_3 (kg)	0.35	0.420	0.46	0.43	0.49	
I_1 ($\times 10^{-3}$ kg.m ²)	x y z	5.109 0.659 5.153	6.846 0.882 6.904	7.549 0.973 7.613	7.724 0.996 7.790	9.967 1.285 10.05
I_2 ($\times 10^{-3}$ kg.m ²)	x y z	2.705 0.492 2.550	3.733 0.680 3.519	4.135 0.753 3.898	4.307 0.784 4.060	5.735 1.044 5.406
I_3 ($\times 10^{-3}$ kg.m ²)	x y z	0.129 0.031 0.113	0.167 0.041 0.198	0.183 0.045 0.159	0.183 0.045 0.159	0.226 0.055 0.197

車の運転席を参考に設定し、各被験者はシートバック角度およびステアリング傾斜角を調整することなく、ステアリングと正対するように着座する。そのときのヒップポイント、右のショルダーポイント、前後方向を除くステアリングホイールの中心位置を Table 2 に示す。これらはデジタイザを用いて 3 次元計測した値である。提案した評価関数の妥当性を検討することを目的としたため、被験者には右手をステアリングホイールの 3 時の位置に、左手を 9 時の位置にて把持するよう指示した。そしてステアリングホイールの前後位置のみを移動させ、最も操作しやすいと感じる前後位置 x_s を官能評価により求めた。各被験者の x_s を Table 2 に示す。

つぎに各被験者と同様な体格をもつ人体モデルを作成する (Fig. 5 参照)。人体モデルは肩関節および手首関節を 3 自由度の回転関節として、また肘関節を 1 自由度の回転関節として取り扱い、胴体部を含め計 20 自由度をもつリンク系としてモデル化した。各部の長さ、重心位置、質量、慣性モーメントは、あらかじめ計測した値と生体力学の文献¹³⁾を参考にして、各被験者ごとに Table 3 に示すように設定した。

作成した各被験者の人体モデルを実験時に計測したヒップポイント、ショルダーポイントと合わせるように着座させ、右手はステアリングの 3 時の位置にて、左手は 9 時の位置にて

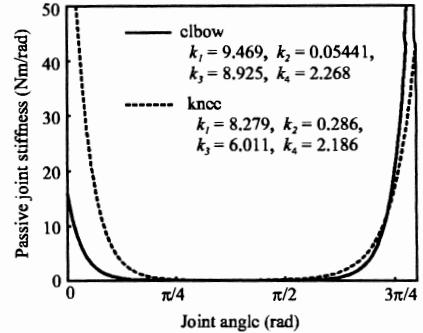


Fig. 6 Joint passive stiffness of elbow and knee joint

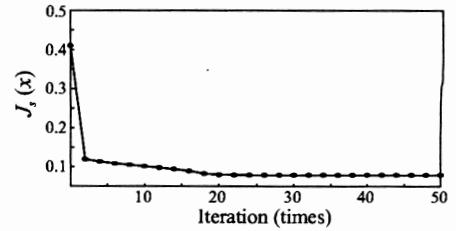
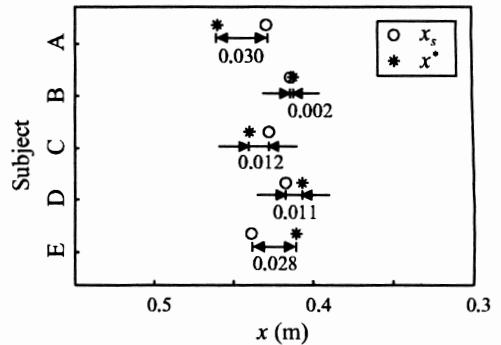
Fig. 7 $J_s(x)$ during optimization (Subject E)

Fig. 8 Comparison between optimized and ergonomically comfortable longitudinal position of the steering wheel

それぞれ把持 (rigid contact) させた。上肢は冗長自由度をもつが、Schneider らの運転姿勢に関する研究¹⁴⁾を参考に、肘の開き方を決定する splay angle ϕ が 0.15 rad となるよう、Tolani らの方法を用いて腕の姿勢を決定した¹⁵⁾。後述する最適化計算中にステアリング位置が変化した場合にも、この方法を用いて腕の姿勢を決定することとした。そしてステアリング中心位置を r 、ステアリング回転方向を a として等価慣性を求め、右下 3 × 3 小行列を用いて有効等価慣性 m_{es} と無効等価慣性 m_{is} を算出した。その際、胴体はシートおよびシートベルトにより固定されていると考え、シートに対して完全拘束した。またステアリングを把持するために手首まわりの筋が収縮して剛性が増加していること、微小操舵時に手首の橈尺屈および回内外は起こりにくいことを考慮し、そこで手首関節 3 自由度のうち掌屈・背屈を除く 2 自由度を、初期位置で上述した腕姿勢計算を行なった後に拘束することとした。

評価関数 J_s は

$$J_s(\mathbf{x}) = w_{es} \frac{1}{m_{es}} + w_{is} m_{is} + w_{js} K_e(q_e) \quad (23)$$

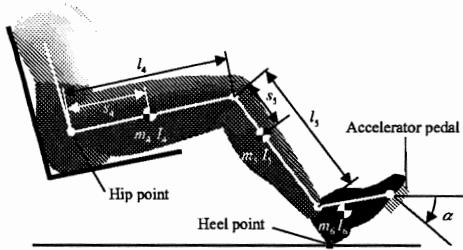


Fig. 9 A multibody model of lower extremity

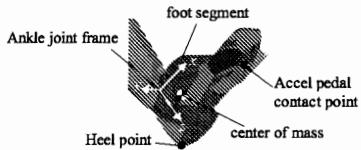


Fig. 10 Foot segment of the lower extremity model

Table 4 Inertial parameters of lower extremity

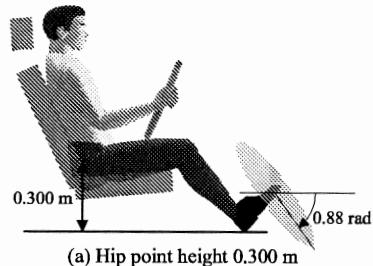
Subject	A	B	C	D	E
l_4 (m)	0.408	0.423	0.425	0.435	0.456
l_5 (m)	0.345	0.358	0.360	0.368	0.386
s_4 (m)	0.183	0.189	0.190	0.195	0.204
s_5 (m)	0.119	0.124	0.124	0.127	0.133
center of mass in foot segment (m)	x y z	0.031 0.012 0.047	0.032 0.013 0.048	0.032 0.013 0.049	0.033 0.014 0.050
m_4 (kg)	4.40	5.28	5.72	5.46	6.16
m_5 (kg)	2.10	2.52	2.73	2.60	2.94
m_6 (kg)	0.80	0.96	1.04	0.99	1.12
I_4 ($\times 10^{-2}$ kg.m ²)	x y z	5.649 2.185 6.022	7.293 2.821 7.775	7.996 3.093 8.524	7.995 3.092 10.537
I_5 ($\times 10^{-2}$ kg.m ²)	x y z	1.441 0.205 1.444	1.861 0.265 1.864	2.040 0.290 2.044	2.040 0.290 2.043
I_6 ($\times 10^{-2}$ kg.m ²)	x y z	0.090 0.199 0.195	0.116 0.257 0.252	0.127 0.282 0.276	0.127 0.282 0.276

$$K_e(q_e) = k_{1e} e^{k_{2e}(k_{2e}-q_e)} + k_{3e} e^{k_{3e}(q_e-k_{4e})} \quad (24)$$

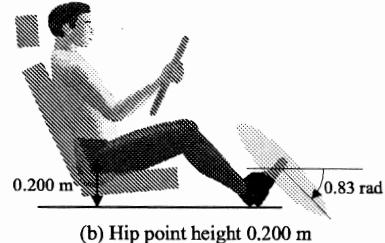
とした。重み係数は $w_{es} = 0.01$, $w_{is} = 1.0$, $w_{js} = 0.5$ とし、肘関節の受動剛性特性 (Fig. 6 参照) を (24) 式に用いた。

以上の準備のもと、初期値依存性を考慮して 10 種類の異なる前後位置を初期値とし、各被験者の x^* を求めた。Fig. 7 に最適化計算中の J_s の変化の一例を示す。なお最適化アルゴリズムには Levenberg-Marquardt 法¹⁶⁾を用い、Windows 上で稼動する等価インピーダンス特性解析システム⁷⁾に C 言語を用いて実装した。そして Pentium IV 3.0 GHz, 2.0 GByte RAM の環境下にて計算を実行した。

Fig. 8 に被験者 5 名の x_s と x^* を示す。 x^* は異なる初期値から計算を始めても同じ値に収束したため、ばらつきは示していない。運転姿勢に関する Schneider の研究¹⁴⁾では、ドライバのヒップポイントやアイポイントの予測精度が誤差 30.5 mm であることが報告されている。本手法による最適位置の予測精度は Fig. 8 からわかるとおり最大で 30 mm であ



(a) Hip point height 0.300 m



(b) Hip point height 0.200 m

Fig. 11 Examples of effective equivalent inertia angle

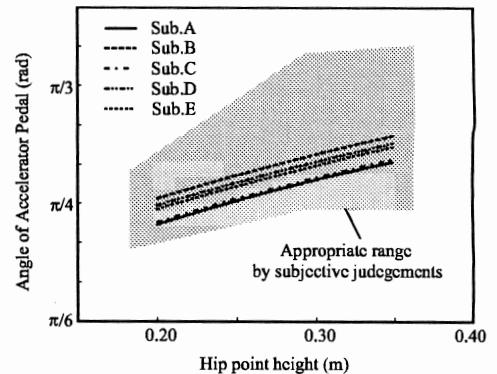


Fig. 12 Effective equivalent inertia angle and appropriate range of accelerator angle

ることから、(23) 式を用いることで操作しやすいステアリング前後位置を従来研究と同程度に予測できていると考えられる。ただし被験者個人ごとの誤差を見ると、身長が低い被験者は x^* が x_s より小さくなり、身長の高い被験者は x^* が x_s より大きくなる傾向があることがわかる。この点に関しては、腕姿勢の計算に用いた条件、拘束条件の妥当性、人体モデルパラメータの精度をより詳細に検討する必要があろう。

3.3 アクセルペダルへの適用

車両の速度を制御するアクセルペダルは、ドライバの意志を忠実に無駄なく反映できた方が良い。この意味ではペダルの踏み込み方向を a としたときの無効慣性 m_{ia} ができるだけ小さい方が好ましい。また走行時の外乱に対しても所望の速度を保つには、有効等価慣性 m_{ea} が大きい方が良いと考えられる。そこで計算した等価慣性の最大固有値に対応する固有ベクトルと水平面のなす角度を有効等価慣性角度 α とし (Fig. 9 参照)，これと官能評価により求めたアクセルペダル踏み込み角度の範囲とを比較することとした。

計算は各被験者の人体モデルと前小節で得られたレイアウトにもとづき、ヒップポイント高さを変更しながら右足とアクセルペダルとの接触点における等価慣性を求めた。人体モ

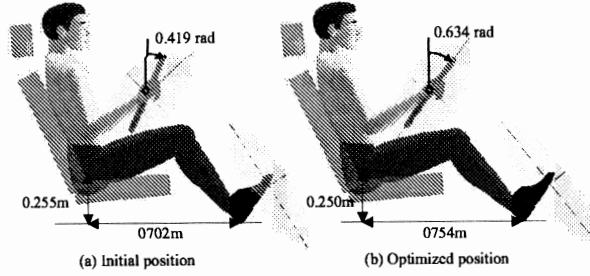


Fig. 13 Initial and optimized driving position (Subject E, Case II)

モデルは Fig. 9 のように股関節および足関節を 3 自由度の回転関節として、また膝関節を 1 自由度の回転関節とした。各被験者の下肢各部の長さ、重心位置、質量、および慣性モーメントは上肢と同様にあらかじめ計測した値と文献¹³⁾を参考にして設定した (Table 4 参照)。足部の重心は足関節座標系における座標で示していることに注意されたい (Fig. 10 参照)。下肢各部の姿勢は膝関節位置、踵位置、アクセルペダルとの接觸点を文献¹⁴⁾の方法を参考に決定することで一意に決定した。

被験者 D の人体モデルを用いて、異なる 2 種類のヒップポイント高さにおいて計算した等価慣性の右上 3×3 行列を用いて描いた楕円体を Fig. 11 に示す。ヒップポイントが高くなると角度 α が大きくなることがわかる。

同様に Fig. 12 には、5 名の被験者の人体モデルを用いて計算したヒップポイント高さを 0.200 m から 0.350 m まで 0.010 m おきに変化させたときの α の変化とともに、5 名の被験者を含まない 29 名の官能評価実験により得た α の範囲を示す。5 名全ての被験者において有効等価慣性角度 α がこの範囲の中にあることがわかる。このことから、操作しやすいアクセルペダルの配置を求める際にも、(21) 式による評価手法が有効であると考えられる。ただし計算される α は、各ヒップポイント高さにおける範囲の中央値と比較すると小さくなる傾向がある。この点は前小節と同様に、ヒップポイント高さによる足姿勢の変化や人体モデルのパラメータに関して、より詳細な検討が必要であると考えられる。

3.4 ドライビングポジションへの適用

前小節までにステアリングおよびアクセルペダルについて等価慣性指標の有効性を示した。そこで評価関数 $J_{sa}(x)$ を

$$J_{sa}(x) = J_s(x) + J_a x \quad (25)$$

$$J_a(x) = w_{ea} \frac{1}{m_{ea}} + w_{ia} m_{ia} + w_{ja} K_k(q_k) \quad (26)$$

$$K_k(q_k) = k_{1k} e^{k_{1k}(k_{2k}-q_k)} + k_{3k} e^{k_{3k}(q_k-k_{4k})} \quad (27)$$

として、被験者 5 名の最適レイアウトを求めた。その際、(26) 式中の重み係数は (23) 式と同じ値とし、膝関節の受動剛性特性を (27) 式で表現した (Fig. 6 参照)。また初期値は全ての被験者について、3.2 小節にて得た被験者 A の x^* を用いたレイアウトとし、このとき (I) シート前後スライド量 (傾斜角 $\pi/36$) のみ、(II) シート前後スライド量とステアリング傾斜

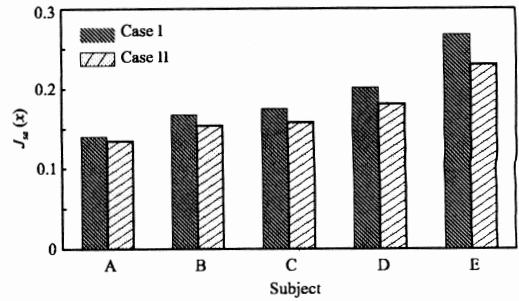


Fig. 14 Comparison of converged values of $J_{sa}(x)$

角、の 2 通りの設計変数を用いて前小節と同様の最適化計算を行なった。

Fig. 13 に被験者 E の条件 (II) での初期値と収束後の姿勢を、Fig. 14 に各被験者の収束後の $J_{sa}(x)$ を示す。シートの前後スライドとともにステアリング傾斜角を調整することで、どの被験者も $J_{sa}(x)$ が減少して操作性が改善されることがわかる。このように評価位置が複数存在した場合でも、 $J_{sa}(x)$ を用いることで、さまざまな体格をもつドライバの操作性を定量的に取り扱うことが可能となる。ただし、求められた解が大域的な最適解であるかどうかについては、今後さらに検証する必要があると考えている。

4. おわりに

本論文では、人間-機械系の等価慣性指標に基づいた新しい操作系レイアウトの設計手法を提案するとともに、人間-自動車系へ適用した結果を示した。そこでは自動車の主要な操作機器であるステアリングとアクセルペダルの配置に対して、有効等価慣性および無効等価慣性を用いた評価関数を提案し、官能評価と比較することで本手法の有用性を示した。

本論文で提案した等価慣性指標は、個人の身体寸法や運転姿勢、普段の癖や好みを詳細に調べて用いることで、ドライバごとにレイアウトを調整できる個人適合型のレイアウト設計を考える際に利用可能である。今後、より多くの被験者の身体寸法や運転姿勢のデータベースを用いることが可能となれば、万人にとって操作性が良くなるように調整するレイアウト設計の評価指標につながる可能性もある。

今後は、大域的な最適解を求めるための最適化手法を導入するとともに、本手法を操作系の反力特性を含めた設計法に拡張する必要があると考えている。そのためには人間の筋粘弾性を含めた等価インピーダンス特性による評価関数を設定することが重要となる。また自動車の操作系レイアウトには力学的な評価のみならず、視野や認知・判断にかかる要素を考慮に入れた設計法も必要となるであろう。

参考文献

- 1) Don B. Chaffin: Digital Human Modeling for Vehicle and Workplace Design, Society of Automotive Engineers (2001)

- 2) T. Sinokrot, J. Yang, R. Fetter and K. Abdel-Malek: Workspace Analysis and Visualization for SantosTM Upper Extremity, SAE Technical Paper, 2005-01-2739 (2005)
- 3) 田中, 山田, 正守, 辻: 生体関節トルク特性を考慮した下肢操作特性の解析, 計測自動制御学会論文集, **40**-6, 612/618 (2004)
- 4) 三浦, 山田, 田上, 黒田, 山田: オープンカー幌の人間工学的考察, 自動車技術会学術講演会前刷集, 20065222 (2006)
- 5) 伊藤宏司: 身体知システム論, 共立出版, 123/130 (2005)
- 6) 羽田, 山田, 辻: 拘束環境下における人間-機械系の等価慣性, 計測自動制御学会論文集, **42**-2, 156/163 (2006)
- 7) 羽田, 山田, 三浦, 辻: 人間-機械系の等価インピーダンス特性解析システム, 計測自動制御学会論文集, **42**-9, 1083/1091 (2006)
- 8) A. Jazidie, T. Tsuji, M. Nagamachi and K. Ito: Multi-Point Compliance Control for Dual-Arm Robots Utilizing Kinematics Redundancy, Trans. of the SICE, **29**-6, 637/646 (1993)
- 9) M. R. Cutkosky and I. Kao: Computing and Controlling the Compliance of a Robotic Hand, IEEE Trans. on Robotics and Automation, **5**-2, 151/165 (1989)
- 10) F. Aghili and J. C. Piedbœuf: Simulation of Motion of Constrained Multibody Systems Based on Projection Operator, Multibody System Dynamics, **10**, 3/16 (2003)
- 11) L. N. Treffethen and D. Bau: NUMERICAL LINEAR ALGEBRA, Society for Industrial and Applied Mathematics, 202/210 (1997)
- 12) 山崎他: 平成10年度即効的知的基盤整備委託調査研究「人間の動作等に係る動的特性の計測評価」(関節特性計測)調査報告書, (社) 人間生活工学研究センター (2000)
- 13) R. F. Chandler: Investigation of inertia properties of the human body, AMRL-TR-74-137 (1975)
- 14) L. W. Schneider, M. P. Reed, R. W. Roe, M. A. Manary, C. A. C. Flannagan, R. P. Hubbard and G. L. Rupp: ASPECT The next-generation H-point machine and related vehicle and seat design and measurement tools, SAE Technical Paper, 990962 (1999)
- 15) D. Tolani, A. Goswami and N. Badler: Real-time inverse kinematics techniques for anthropomorphic limbs, Graphical Models, **62**-5, 353/388 (2000)
- 16) W. H. Press: Numerical Recipes in C, CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS, 681/689 (1993)

辻 敏夫 (正会員)



1959年12月25日生。85年広島大学大学院工学研究科博士課程前期修了。同年広島大学工学部助手。94年同助教授を経て、2002年より同大学大学院工学研究科教授。現在に至る。工学博士。本会学術奨励賞(1986), 論文賞(2002), バイオメカニズム学会論文賞(1990), 日本義肢装具学会論文賞(2000), 日本医器械学会論文賞(2003), 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス部門学術業績賞(2004), IEEE R&A Society The K. S. Fu Memorial Best Transactions Paper Award(2004)などを受賞。人間とロボットの運動制御, 生体信号解析, ニューラルネット, ヒューマン・マシンシステムなどの研究に従事。

[著者紹介]

羽田 昌敏 (正会員)



1967年6月14日生。92年広島大学大学院工学研究科博士課程前期修了。同年(株)豊田中央研究所に入社。以来、ドライバおよびタイヤのシミュレーションモデル開発およびこれらを適用した人間-機械系に関する研究に従事。2002年米国ベンシルベニア大学 Center for Human Modeling and Simulation の客員研究員。現在、生体力学研究室に所属。日本機械学会、自動車技術会の会員。