

拘束環境下における人間-機械系の等価慣性

羽田 昌敏*・山田 大介*・辻 敏夫**

Equivalent Inertia of Human-Machine Systems under Constraint Environments

Masatoshi HADA*, Daisuke YAMADA* and Toshio TSUJI**

In this paper, we propose a new method to derive equivalent inertia of human-machine systems taking contact and constraint conditions into account. First, it is theoretically demonstrated that the inertia tensor in a generalized frame of the human can be transformed, with Jacobian and contact constraint matrix, into any frames on the object he/she is manipulating. Next, constraint inertia of the human-machine system is newly defined by using orthogonal complementary projection to the null space of the constraint conditions of the human and the object. Then the proposed equivalent inertia of a driver-steering-seat system is simulated under several contact and constraint conditions. The result gives a significance of drivers' steering strategy from a mechanical point of view, and a possibility to evaluate the human posture interacting the object by using the equivalent inertia.

Key Words: Human-machine system, equivalent inertia, contact constraint, orthogonal complementary projection

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調節するだけでなく、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の上に置くことで、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。われわれが日常行なうほとんどの作業は、人間も対象物も多様な拘束を受けているが、われわれは無意識のうちにその拘束を積極的に利用して、力の伝達経路を作業に対して有効に変化させているのである。

人間と機械をひとつの系として捉えた人間-機械系の特性を解析する研究では、対象物の特性とともに人間の特性も剛性¹⁾や、粘弾性と慣性からなる機械インピーダンス^{2),3)}を用いてモデル化する場合が多い。特に慣性特性は、筋の形状変化による重心移動を無視すれば、姿勢と環境からの拘束によってその特性がすべて決定される。したがって人間-機械

系の等価慣性を調べることで、上記のような人間の巧みな戦略がもつ物理的意味を明らかにできる可能性がある。

従来から、人間が対象物を操作する際の慣性特性を解析する研究がいくつか行なわれている^{4)~7)}。たとえば辻らは一連の実験を通して、人間の腕の慣性もつ空間特性が、腕の力学パラメータと運動学を用いてほぼ説明できることを確認している。ただしこれらの研究では、人腕の手先における等価慣性のみを議論しており、人間と対象物との接触状態や対象物の慣性までは考慮されていない。

一方、ロボット工学の分野では、複数のロボットアームや多指ロボットハンドがひとつの対象物に対して作業する際の操作性^{8),9)}や、アームの制御方法^{10),11)}に関する研究がすでに行なわれている。これらの研究では、アームと対象物の間の接触点において力が伝達される方向と伝達されない方向を与えることで接触を表現している。人間と対象物の間の接触も同様な方法にて考慮できるが、これらの研究では、アームや対象物が受ける拘束までは考慮されていない。また複数のロボットアームで、外部環境からの拘束を受けている対象物を制御する際の運動方程式を導出している研究もある^{12),13)}。しかしながら、これらの研究は与えられた拘束を満たしながらアームに作業させるための制御方法に関するものであり、アームに対する拘束が存在する場合や、拘束が系全体の等価慣性に与える影響については言及されていない。

そこで、本論文では人間と対象物の間の接触のみならず、人間や対象物が受ける拘束までを考慮した、新しい人間-機械系の等価慣性を導出する。まず、人間および対象物の一般化座標で表現されたそれぞれの慣性テンソルを、対象物上の

* (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 March 28, 2005)

(Revised September 9, 2005)

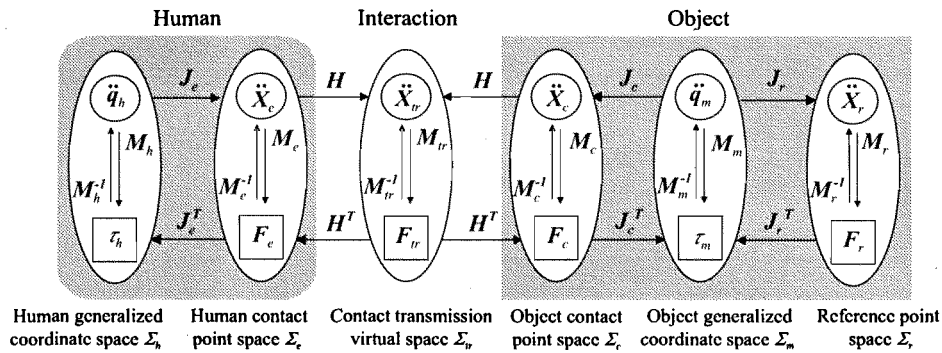


Fig. 1 Force/acceleration relationships of a human-machine system

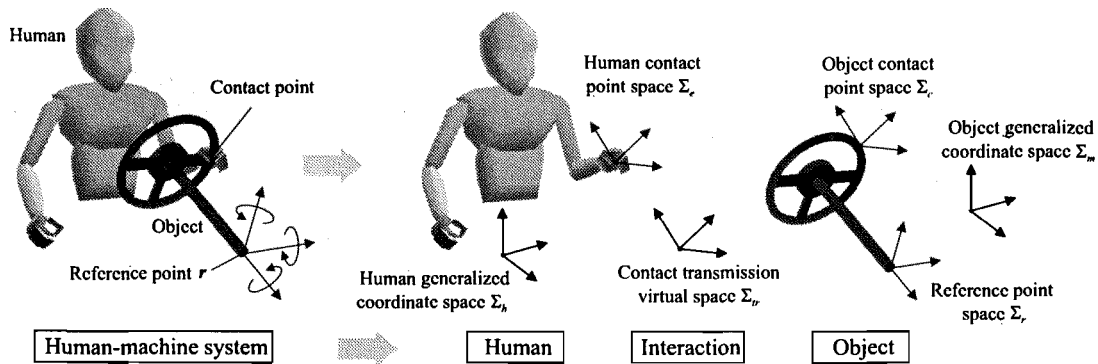


Fig. 2 An example of human-machine systems in a single contact case

任意の座標系へ変換および合成できることを示す。つぎに、人間および対象物の加速度に関する拘束式と運動方程式を用いて、それぞれに対する拘束を考慮した人間-機械系の等価慣性を定義する。最後に、最も身近な例のひとつであるドライバーステアリングシート系を取り上げる。そして、操舵するドライバの姿勢変化や、ステアリングやシートとの間に生じる接触や拘束の違いにより、人間-機械系の等価慣性が変化するようにシミュレーションにより調べ、われわれの動作がもつ物理的意味を考察する上で、人間-機械系の等価慣性が有用であることを示す。

2. 接触を考慮した人間-機械系の等価慣性

2.1 人間-機械系における力/加速度の関係

本論文で扱う人間-機械系とは、人間と対象物が力の相互作用を生じながら運動するひとつの機械システムのことである。ここで、人間-機械系が静止状態にある場合を考えよう。このとき、人間-機械系における力/加速度の関係は Fig. 1 のようになる。 Σ_h は人間の運動を表現する一般化座標 $q_h \in \mathbb{R}^n$ を構成する座標系で、 Σ_e は人間の対象物に対する接触点座標 $X_e \in \mathbb{R}^{n_c}$ を構成する座標系である。同様に Σ_m は対象物の運動を表現する一般化座標 $q_m \in \mathbb{R}^m$ を構成する座標系、 Σ_c は対象物の人間に対する接触点座標 $X_c \in \mathbb{R}^{m_c}$ を構成する座標系である。 Σ_{tr} は人間と対象物の接触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¹⁰⁾。人間と対象物が接触している状態では、 Σ_e 、 Σ_{tr} 、 Σ_c の3つの座標系は、接触面の法線方向を z 軸として常に重なって

おり、接触点において滑りは発生しないものとする。 Σ_r は等価慣性を考える位置 r に原点をもつ座標系であり、対象物上の任意の位置で定義できる。なお、本論文では簡単のため、静止状態に議論を限定するが、あらかじめ非線形力を無視できるような一般化座標系で構成されているとすれば、以降の議論は静止状態以外でも成り立つ¹⁴⁾。

今、人間の慣性テンソル $M_h \in \mathbb{R}^{n \times n}$ および対象物の慣性テンソル $M_m \in \mathbb{R}^{m \times m}$ が、それぞれ Σ_h と Σ_m にて既知であるとする。このとき、対象物上の点 r で定義された Σ_r にて、人間-機械系の等価慣性テンソル ${}^{hm}M_r \in \mathbb{R}^{m_r \times m_r}$ を求める問題を考える。 m_r は点 r がもつ自由度であり、 $0 < m_r \leq 6$ である。また人間と対象物はともに特異姿勢ではなく、 $n \geq 6$ 、 $n_e = m_c \geq n_{tr}$ 、 $m \geq 6$ とする。

2.2 接触点がひとつの場合

最初に、人間と対象物の間に接触が1ヶ所だけ存在する場合 ($n_e = 6$) を考える。前小節にて定義した人間-機械系の各座標系は Fig. 2 に示すように定義できる。以下の議論では、特に断らない限り一般化座標系における慣性テンソルを単に慣性と呼び、そのほかの座標系で表現された慣性テンソルを等価慣性と呼ぶ。また接触が1ヶ所であることを明示的に表現するため、必要に応じて添え字1をつける。

Σ_h と Σ_e の間にはヤコビ行列 $J_{e1} \in \mathbb{R}^{6 \times n}$ 、 $\text{rank}(J_{e1}) = 6$ により、

$$\ddot{X}_{e1} = J_{e1} \ddot{q}_h \quad (1)$$

$$\tau_h = J_{e1}^T F_{e1} \quad (2)$$

Table 1 Contact constraint matrix in various contact conditions

Point contact	Knob grasping contact	Rigid contact
$\mathbf{H}_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\mathbf{H}_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$	$\mathbf{H}_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$

という関係が存在する。よって

$${}^h\mathbf{M}_{e_1} = (\mathbf{J}_{e_1} \mathbf{M}_h^{-1} \mathbf{J}_{e_1}^T)^{-1} \quad (3)$$

を用いて \mathbf{M}_h を Σ_{e_1} に座標変換した ${}^h\mathbf{M}_{e_1} \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$ を得る。

つづいて、人間と対象物の間の接触に関する行列 (contact constraint matrix) を $\mathbf{H}_1 \in \mathbb{R}^{n_{tr_1} \times 6}$ にて表現する¹¹⁾。 \mathbf{H}_1 は人間から対象物に対して力学的には力を加えることができる方向を、運動学的には拘束され相対運動が生じない方向を示す行列である。たとえば対象物を掌部で押しつけて操作する (surface contact) 場合には $n_{tr_1} = 4$ となり、

$$\mathbf{H}_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

となる。これは人間と対象物の間に働く接触力 $\mathbf{F}_{tr_1} \in \mathbb{R}^{n_{tr_1}}$ が、3方向の並進力および接触面の法線軸まわりのトルクとなることを意味する。ほかの主な接触状態における \mathbf{H}_1 を Table 1 に示す。これにより Σ_{e_1} にて表現された ${}^h\mathbf{M}_{e_1}$ を、

$${}^h\mathbf{M}_{tr_1} = (\mathbf{H}_1 {}^h\mathbf{M}_{e_1}^{-1} \mathbf{H}_1^T)^{-1} \quad (5)$$

$${}^h\mathbf{M}_{c_1} = \mathbf{H}_1^T {}^h\mathbf{M}_{tr_1} \mathbf{H}_1 \quad (6)$$

にて座標変換する。 ${}^h\mathbf{M}_{tr_1} \in \mathbb{R}^{n_{tr_1} \times n_{tr_1}}$ 、 ${}^h\mathbf{M}_{c_1} \in \mathbb{R}^{m_{c_1} \times m_{c_1}}$ は、それぞれ Σ_{tr_1} 、 Σ_{c_1} で表現された人間の等価慣性である。

一方、対象物に対してもヤコビ行列 $\mathbf{J}_{c_1} \in \mathbb{R}^{m_{c_1} \times m}$ にてより、

$$\ddot{\mathbf{X}}_{c_1} = \mathbf{J}_{c_1} \ddot{\mathbf{q}}_m \quad (7)$$

$$\boldsymbol{\tau}_m = \mathbf{J}_{c_1}^T \mathbf{F}_{c_1} \quad (8)$$

という関係が Σ_m と Σ_{c_1} の間に存在する。よって ${}^h\mathbf{M}_{c_1}$ を、

$${}^h\mathbf{M}_m = \mathbf{J}_{c_1}^T {}^h\mathbf{M}_{c_1} \mathbf{J}_{c_1} \quad (9)$$

により座標変換する。 ${}^h\mathbf{M}_m \in \mathbb{R}^{m \times m}$ は \mathbf{M}_m が定義されている座標系 Σ_m で表現された人間の等価慣性である。したがって ${}^h\mathbf{M}_m$ と \mathbf{M}_m とは加算可能となり、さらに Σ_r へのヤコビ行列 $\mathbf{J}_r \in \mathbb{R}^{6 \times m}$ を用いれば、

$${}^{hm}\mathbf{M}_r = (\mathbf{J}_r {}^h\mathbf{M}_m^{-1} \mathbf{J}_r^T)^{-1} \quad (10)$$

$${}^{hm}\mathbf{M}_m = {}^h\mathbf{M}_m + \mathbf{M}_m \quad (11)$$

となり、対象物上の任意の位置 \mathbf{r} にて人間-機械系の等価慣性 ${}^{hm}\mathbf{M}_r$ を得る。なお質量は必ず正であることから、 ${}^h\mathbf{M}_m$ は準正定、 \mathbf{M}_m は正定である。したがって任意の $\mathbf{0}$ でない

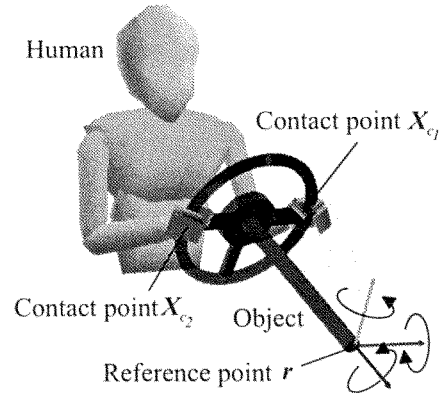


Fig. 3 An example of human-machine systems in a multi contact case

$\ddot{\mathbf{x}}_m \in \mathbb{R}^m$ に対して、 $\ddot{\mathbf{x}}_m^T {}^h\mathbf{M}_m \ddot{\mathbf{x}}_m \geq 0$ 、 $\ddot{\mathbf{x}}_m^T \mathbf{M}_m \ddot{\mathbf{x}}_m > 0$ となる¹⁵⁾。このとき、

$$\begin{aligned} \ddot{\mathbf{x}}_m^T {}^{hm}\mathbf{M}_m \ddot{\mathbf{x}}_m &= \ddot{\mathbf{x}}_m^T ({}^h\mathbf{M}_m + \mathbf{M}_m) \ddot{\mathbf{x}}_m \\ &= \ddot{\mathbf{x}}_m^T {}^h\mathbf{M}_m \ddot{\mathbf{x}}_m + \ddot{\mathbf{x}}_m^T \mathbf{M}_m \ddot{\mathbf{x}}_m > 0 \end{aligned} \quad (12)$$

が成り立つ、よって ${}^{hm}\mathbf{M}_m$ は正定となる。

2.3 複数の接触点をもつ場合

つぎに、人間と対象物の間に k 個の接触がある場合 ($n_e = 6k$) を考える (Fig. 3 参照)。まず Σ_h と Σ_e の関係を表わすヤコビ行列 $\mathbf{J}_e \in \mathbb{R}^{n_e \times n}$ を、 Σ_h からそれぞれの接触点へのヤコビ行列 $\mathbf{J}_{e_i} \in \mathbb{R}^{6 \times n}$ 、 $i = 1, 2, \dots, k$ を縦に並べて、

$$\mathbf{J}_e = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_{e_1} \\ \mathbf{J}_{e_2} \\ \vdots \\ \mathbf{J}_{e_k} \end{bmatrix} \quad (13)$$

と定義する。同様に接触に関する行列 $\mathbf{H} \in \mathbb{R}^{n_{tr} \times n_e}$ 、 $n_{tr} = \sum_{i=1}^k n_{tr_i}$ および Σ_m から Σ_c へのヤコビ行列 $\mathbf{J}_c \in \mathbb{R}^{m_c \times m}$ を、

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_1 & \cdots & \mathbf{0} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{H}_k \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\mathbf{J}_c = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_{c_1} \\ \mathbf{J}_{c_2} \\ \vdots \\ \mathbf{J}_{c_k} \end{bmatrix} \quad (15)$$

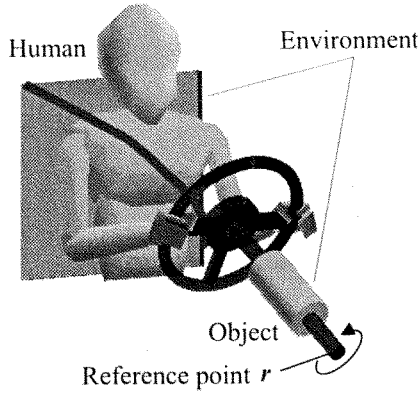


Fig. 4 An example of human-machine systems in the case that the human and the object are constrained

とする。これにより (3), (5), (6), (9), (10) 式と同様に、

$${}^h M_e = (J_e M_h^{-1} J_e^T)^{-1} \quad (16)$$

$${}^h M_{tr} = (H {}^h M_e^{-1} H^T)^{-1} \quad (17)$$

$${}^h M_c = H^T {}^h M_{tr} H \quad (18)$$

$${}^h M_m = J_c^T {}^h M_c J_c \quad (19)$$

$${}^{hm} M_r = (J_r {}^{hm} M_m^{-1} J_r^T)^{-1} \quad (20)$$

となり、 ${}^{hm} M_r$ を求めることができる。なお、 ${}^{hm} M_m$ は (11) 式で与えられる。したがって過拘束 ($n_{tr} > n$) となるような接触状態を除き、対象物上の任意の位置 r にて、人間と対象物間の接触を考慮した人間-機械系の等価慣性を算出可能となる

3. 拘束を考慮した人間-機械系の等価慣性

Fig. 4 に示すように、人間と対象物がそれぞれ拘束を受けている場合を考える。まず人間に対する拘束を考慮したヤコビ行列と慣性を Σ_h にて定義し、つぎに対象物に対する拘束までを考慮した人間-機械系の等価慣性を求めることを考える。なお、本論文で扱う拘束は等式で表現可能なホロノミック拘束のみとする。

3.1 拘束を考慮したヤコビ行列

人間に対する拘束 $\Phi_h \in \mathcal{R}^{c_h}$ は、 q_h および時間 t の関数として、

$$\Phi_h(q_h, t) = 0 \quad (21)$$

と表わすことができる。(21) 式を時間 t で微分すると、

$$G_h \dot{q}_h = -c \quad (22)$$

となる。ここで、 $G_h = \partial \Phi_h / \partial q_h \in \mathcal{R}^{c_h \times n}$ は Σ_h で表現された拘束に関するヤコビ行列、 $c = \partial \Phi_h / \partial t \in \mathcal{R}^{c_h}$ である。(22) 式をさらにもう一度微分すると、

$$G_h \ddot{q}_h = -b_h \quad (23)$$

$$b_h = \dot{G}_h \dot{q}_h + \dot{c} \quad (24)$$

と加速度に関する拘束式を得る¹⁴⁾。人間が完全拘束もしくは過拘束となる場合を除いて $\text{rank}(G_h) = c_h < n$ となる。

したがって、(23) 式を \ddot{q}_h について解くと、

$$\ddot{q}_h = -G_h^+ b_h + P_h \eta \quad (25)$$

となり、無限個の解が存在する。 G_h^+ は G_h の擬似逆行列、 $\eta \in \mathcal{R}^n$ は任意のベクトルである。また $P_h \in \mathcal{R}^{n \times n}$ は G_h の零空間 $\text{null}(G_h)$ への射影を表わす行列であり、 $P_h G_h^T = 0$ 、 $P_h^2 = P_h$ 、 $P_h^T = P_h$ という性質がある¹⁷⁾。 $\text{null}(G_h)$ とは、人間がもつ運動自由度のうち、拘束 Φ_h を受けてもなお動くことが許容される自由度からなる部分空間のことである。したがって P_h はこの部分空間への射影となるので、

$$\bar{J}_e = J_e P_h \quad (26)$$

として人間に対する拘束を考慮したヤコビ行列 $\bar{J}_e \in \mathcal{R}^{n \times n}$ を定義できる¹⁶⁾。

3.2 拘束を考慮した慣性

対象物と接触し、外部環境から拘束を受ける人間の運動方程式は、

$$M_h \ddot{q}_h + h_h(q_h, \dot{q}_h) + G_h^T F_{\phi_h} = \tau_h - J_e^T F_{e_m} \quad (27)$$

のように記述できる。 $h_h(q_h, \dot{q}_h) \in \mathcal{R}^n$ は重力項と遠心力・コリオリ力項、 $F_{\phi_h} \in \mathcal{R}^{c_h}$ は Φ_h による拘束力、 $\tau_h \in \mathcal{R}^n$ は筋により関節に発生する関節トルク、 $F_{e_m} = H^T H F_c \in \mathcal{R}^{n_r}$ は対象物から伝達された接触力である。

一方、(25) 式の両辺に $\text{null}(G_h)$ の直交補空間への射影を表わす行列 $(I_n - P_h)$ を左からかけ、 $P_h^2 = P_h$ であることに注意すると、

$$(I - P_h) \ddot{q}_h = G_h^+ b_h \quad (28)$$

を得る¹⁷⁾。 $I_n \in \mathcal{R}^{n \times n}$ は単位行列である。ここで (28) 式の両辺に左から M_h をかけて、さらに (27) 式の両辺に左から P_h をかけたものを加え、 $P_h G_h^T = 0$ に注意して整理すると、

$$M'_h \ddot{q}_h = P_h d_h - M_h G_h^+ b_h \quad (29)$$

$$M'_h = M_h + \bar{M}_h \quad (30)$$

$$\bar{M}_h = P_h M_h - (P_h M_h)^T \quad (31)$$

$$d_h = \tau_h - h_h(q_h, \dot{q}_h) - J_e^T F_{e_m} \quad (32)$$

として、拘束を考慮した運動方程式を得る。ここで $M'_h \in \mathcal{R}^{n \times n}$ が、 Σ_h にて表現された人間に対する拘束を考慮した慣性である。なお $\bar{M}_h \in \mathcal{R}^{n \times n}$ は $\bar{M}_h^T = -\bar{M}_h$ であるから歪み対称行列となる。ゆえに任意の 0 でない $\ddot{x}_h \in \mathcal{R}^n$ に対して、

$$\begin{aligned} \ddot{x}_h^T \bar{M}_h \ddot{x}_h &= \ddot{x}_h^T (P_h M_h \ddot{x}_h) - (P_h M_h \ddot{x}_h)^T \ddot{x}_h \\ &= 0 \end{aligned} \quad (33)$$

が成り立つ。よって (30) 式より、

$$\ddot{x}_h^T M'_h \ddot{x}_h = \ddot{x}_h^T M_h \ddot{x}_h \quad (34)$$

となり、 M_h が正定るときには必ず M'_h も正定となる¹⁷⁾。

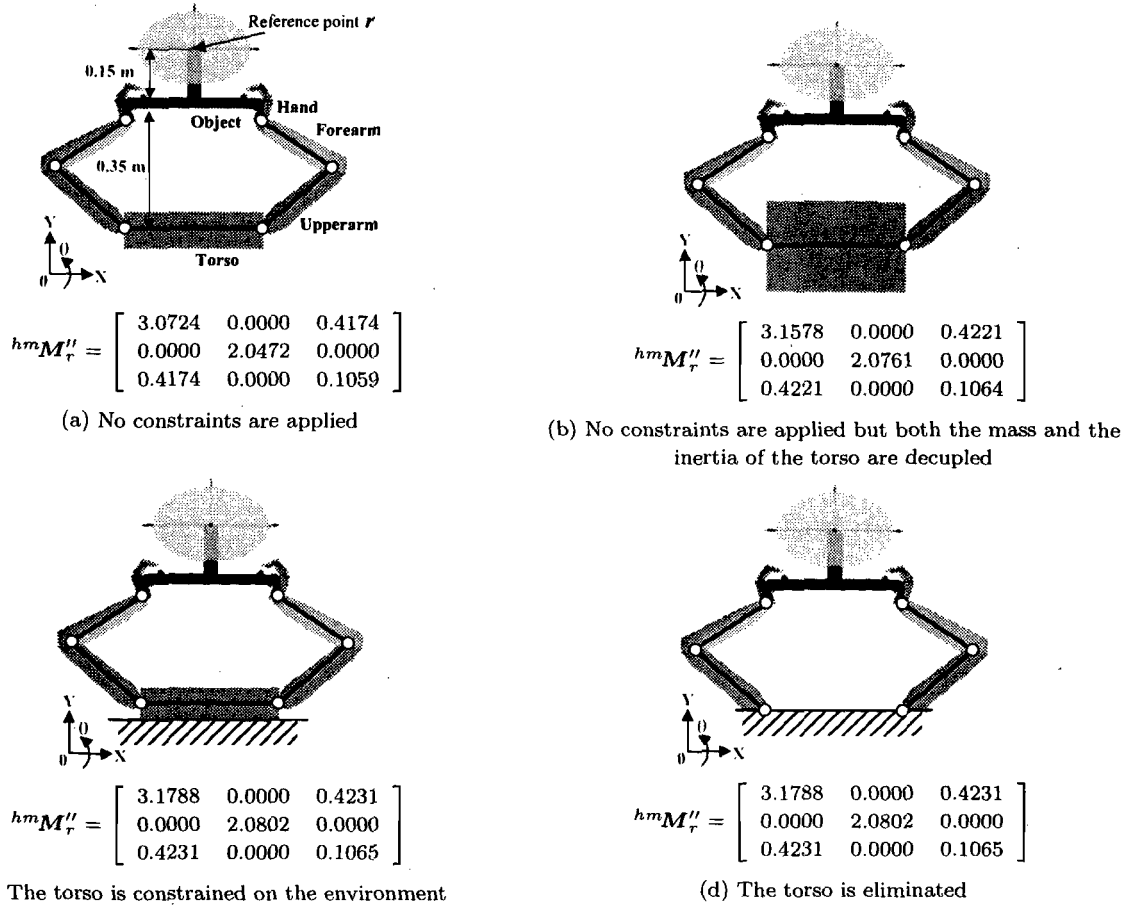


Fig. 5 Equivalent inertias of a two-dimensional driver/steering-wheel system under different constraints against the torso

3.3 拘束を考慮した等価慣性

Σ_h にて表現された人間に対する拘束を考慮した慣性 M'_h は, (16)(17)(18)(19) 式と同様にして,

$${}^hM'_e = (\bar{J}_e M'_h {}^{-1} \bar{J}_e^T)^{-1} \quad (35)$$

$${}^hM'_m = J_c^T H^T (H {}^hM'_e {}^{-1} H^T)^{-1} H J_c \quad (36)$$

のように, Σ_m へ座標変換された等価慣性 ${}^hM'_m \in \mathcal{R}^{m \times m}$ となる.

さらに対象物に対する拘束についても, 前項までの議論と同様にして, Σ_m にて表現された拘束 $\Phi_m \in \mathcal{R}^{c_m}$ に関するヤコビ行列 $G_m \in \mathcal{R}^{c_m \times m}$, $\text{rank}(G_m) = c_m < m$, および G_m の零空間 $\text{null}(G_m)$ への射影を表わす行列 $P_m \in \mathcal{R}^{m \times m}$ を用いて, (11)(26)(30)(31) 式と同様に,

$$\bar{J}_r = J_r P_m \quad (37)$$

$${}^{hm}M''_m = {}^hM'_m + {}^{hm}\bar{M}'_m \quad (38)$$

$${}^{hm}\bar{M}'_m = P_m {}^hM'_m - (P_m {}^hM'_m)^T \quad (39)$$

$${}^{hm}M'_m = {}^hM'_m + M_m \quad (40)$$

にて, 対象物に対する拘束を考慮したヤコビ行列 $\bar{J}_r \in \mathcal{R}^{m_r \times m}$ および慣性 ${}^{hm}M''_m \in \mathcal{R}^{m \times m}$ を得る. したがって対象物上の点 r における人間および対象物に対する拘束を考

Table 2 Parameters of the driver/steering-wheel system

	Length(m)	Mass(kg)	Inertia (kgm ²)
Torso	0.380	8.00	5.96×10^{-2}
Upperarm	0.272	1.38	7.56×10^{-3}
Forearm	0.255	0.90	4.45×10^{-3}
Hand	0.058	1.00	0.36×10^{-3}
Steering wheel	0.380	0.00	0.00

慮した人間-機械系の等価慣性 ${}^{hm}M''_r \in \mathcal{R}^{m_r \times m_r}$ は, (20) 式と同様に,

$${}^{hm}M''_r = (\bar{J}_r {}^{hm}M''_m {}^{-1} \bar{J}_r^T)^{-1} \quad (41)$$

となる.

ここまでの議論により, 人間と対象物の間のさまざまな接触のみならず, 人間と対象物に対する拘束までを踏まえた上で, 対象物上の任意の位置 r のもつ自由度に応じた人間-機械系の等価慣性 ${}^{hm}M''_r$ を定義することができた.

4. 数値例

4.1 外部環境からの拘束の物理的意味

拘束を考慮した人間-機械系の等価慣性をもつ物理的意味を明確にするため, つぎのような計算を行なった.

Fig. 5 に示すように, 胴体の正面前方 0.35m の位置に配置されたステアリングホイールを, 人間が両手で把持 (rigid

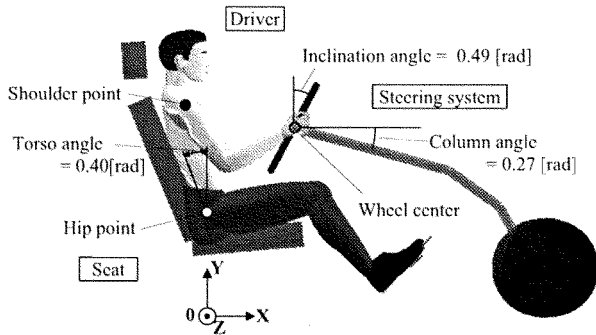


Fig. 6 A driver-steering-seat system

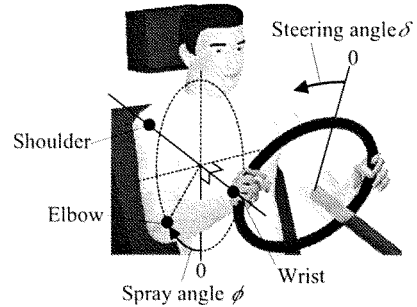


Fig. 7 The steering angle and the spray angle

Table 3 Inertia properties of the human upper limb

	$(\times 10^{-3} \text{ kgm}^2)$		
	I_{xx}	I_{yy}	I_{zz}
Upperarm	7.22	0.93	7.28
Forearm	3.99	0.73	3.76
Hand	0.17	0.04	0.51

Table 4 Position of hip, shoulder and steering wheel

	x (m)	y (m)	z (m)
Hip point	0.000	0.302	0.000
Shoulder point (right)	-0.104	0.437	0.189
Shoulder point (left)	-0.104	0.437	-0.189
Center of the steering wheel	0.302	0.360	0.000

contact) している場合を想定した, 2次元平面内のドライブステアリング系を考える。このとき, (a) 拘束なし, (b) 胴体の質量および慣性モーメントを10倍する, (c) 胴体を完全拘束する, (d) 胴体を取り除く, という4通りの異なる条件にて, 対象物上の点 r (Fig. 5(a) 参照) での等価慣性 ${}^{hm}M_r'' \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ を求めた。2次元平面であるにもかかわらず ${}^{hm}M_r''$ が3次元となるのは, 紙面に垂直な軸まわりの回転運動を考慮に入れたためである。計算に用いた人体各部位および対象物の寸法と, それぞれの質量および慣性モーメントは Table 2 に示す通りである。また質量中心位置は各部位の幾何学的中心位置と一致しているものと仮定した。

Fig. 5 に計算された等価慣性 ${}^{hm}M_r''$ の左上小行列を用いて描いた慣性楕円および行列の値を示す。 ${}^{hm}M_r''$ が対角行列とはならないのは, 点 r とドライブステアリング系の慣性中心がずれているためである。(a),(b),(c) を比較すると, 拘束を受けない場合の等価慣性に比べて拘束を受けた場合の等価慣性が大きな値を示すこと, 質量および慣性モーメントを大きくすることで, 拘束を受けた場合の等価慣性に値が近づくことを読み取ることができる。また完全拘束された胴体は運動することが不可能となるため外部環境の一部としてみなされるが, (c) と (d) の示す値が等しくなることは, この考え方が正しいことを示している。

4.2 接触や拘束による等価慣性の変化

つぎに, Fig. 6 に示すようなドライブステアリングシート系にて, 人間と対象物の間の接触および人間に対する

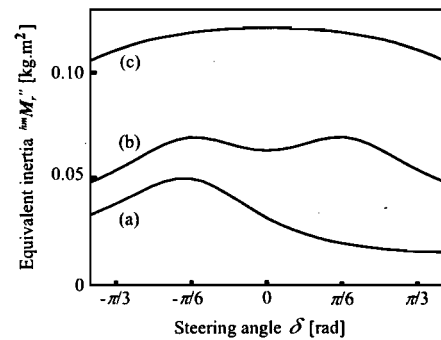


Fig. 8 Equivalent inertia characteristics with respect to the steering angle of the driver-steering-seat system

拘束の組み合わせが等価慣性に与える影響を調べた。

ドライバ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。上肢の寸法および力学パラメータは Table 3 に示す値とした。人間による影響を明確にするために, ステアリングおよびシートの慣性はすべて0とした上で, あらかじめ人間に定義されたヒップポイント, ショルダーポイントが Table 4 に示す値となるようにそれぞれを配置した。このとき, シートおよびシートベルトにてドライバの胴体は完全拘束されているものとして, ドライバが (a) 右掌部で触れる (surface contact), (b) 両手把持 (rigid contact), (c) 両手把持 (rigid contact) かつ左右の手首関節を拘束する, という3通りの異なる条件でステアリングを操舵した際の, ステアリングコラム回転軸まわりの等価慣性 ${}^{hm}M_r'' \in \mathbb{R}^1$ を計算した。

操舵角度 δ は直進時を0として右操舵を正とし, $\delta = 0$ のときドライバの右手はステアリングの3時の位置を, 両手把持の場合の左手は9時の位置をそれぞれ把持しており, 操舵中は持ち替えないものとした。また上肢は冗長な自由度をもっているため, ステアリングとの接触条件のみではその姿勢を一意に決定できない。そこで, Schneider らの運転姿勢に関する研究¹⁸⁾を参考に, 肘の開き方を決定する spray angle ϕ が常に $0.15[\text{rad}]$ となるように, Tolani らの方法を用いて腕の姿勢を一意に決定した¹⁹⁾。ここで spray angle ϕ は Fig. 7 で示すように, 肩関節と手首関節を結ぶ線分まわ

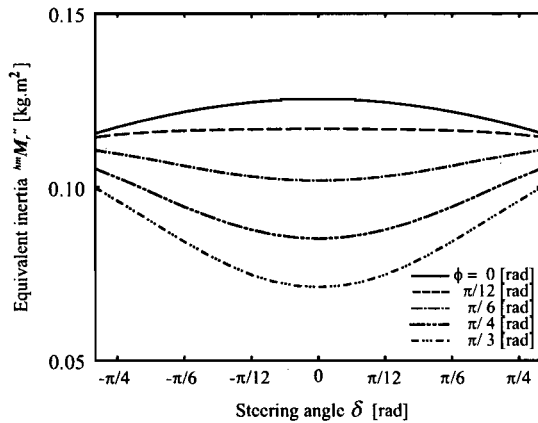


Fig. 9 The equivalent inertia characteristics with respect to the steering angle under different spray angle

りに肘関節が描く円周上で、鉛直下向きの軸から肘関節が外側へ開く向きを正として定義した。

Fig. 8 は 3 通りの操舵をした際の計算結果である。横軸は操舵角度を、縦軸は人間-機械系の等価慣性を示す。(a)の場合、慣性が左右で非対称な変化を示し、操舵角度 δ が $-\pi/6$ になる付近で最大になること、一方 (b) の場合にはほぼ左右対称な変化を示すとともに (a) よりも大きな値となるが、操舵に対する変化量は逆に小さくなることわかる。(c) を (b) と比較したときにも同様の傾向があり、さらに操舵角度に対して双峰性の特性から単峰性の特性に変化する。これらのことから、ドライバは (a) よりも (b)、(b) よりも (c) のように操舵することで、ステアリングコラム回転軸まわりの等価慣性を大きくして、路面から伝わる加速度に対する感度を高くすると同時に、操舵した際の自分自身の慣性変化を少なくすることで、サスペンションやタイヤなどの姿勢変化により生ずる対象物(車両)慣性変化の影響をより感じやすくしていると考えられる。このように、人間-機械系の等価慣性を用いることで、われわれが日常行なう操作のもつ物理的意味を考察することが可能になる。

4.3 腕姿勢による等価慣性の変化

前節ではドライバの spray angle ϕ が、操舵角度 δ に対して変化しないという条件の下で計算を行なった。そこで、spray angle ϕ を $0, \pi/12, \pi/6, \pi/4, \pi/3$ の 5 通りに変化させ、前節の (c) と同様の条件にて等価慣性を求めることで、腕姿勢が等価慣性 $^{hm}M_r''$ に与える影響を調べた。

Fig. 9 に計算結果を示す。図より、spray angle ϕ が大きくなるにつれて等価慣性 $^{hm}M_r''$ が減少していくことがわかる。これは脇が開くにつれて両腕の重心位置が上方へ移動し、ステアリングコラムの回転軸に近づくためである。また $\phi = \pi/12$ の場合、操舵角度 δ に対する等価慣性 $^{hm}M_r''$ の変化がほとんどないことがわかる。前節の議論にしたがえば、等価慣性が大きく、かつ操舵に対してその変化が少ないという意味で最適な spray angle ϕ 、すなわち最適な腕姿勢が存在すると考えられる。より詳細には、シートやステアリ

ングの配置、および実際のドライバ腕姿勢を考慮に入れた解析を行なう必要があるが、人間-機械系の等価慣性により、対象物を操作する際の人間の姿勢を、拘束を考慮した上で定量的に評価することが可能となる。

5. おわりに

本論文では、人間と対象物間の接触のみならず、人間や対象物に対する拘束までを含めて考慮できる、新しい人間-機械系の等価慣性を導出する方法を示すとともに、ドライバーステアリングシート系に対するシミュレーションを通してその有用性を示した。具体的には、

- (1) 人間および対象物の一般化座標で定義された慣性テンソルは、ヤコビ行列および contact constraint matrix を用いて対象物上の任意の座標系に座標変換および合成可能となること、
- (2) 人間および対象物の運動方程式と加速度拘束式を用いて、線形写像における値域と零空間への射影の直交性に着目することで、拘束を考慮した人間-機械系の等価慣性を定義できること、
- (3) 人間-機械系の等価慣性により、ドライバーステアリングシート系におけるドライバの操作がもつ物理的意味を考察でき、またドライバの姿勢を評価する際の指標としても利用できる可能性があること、

などを示した。本論文で提案した等価慣性は、作業内容や作業目的に応じて人間が自らの姿勢および拘束を利用して、どのように人間-機械系の制御特性を調節しようとしているかを調べる際に利用できる。

なお、本論文では等式で表現できるホロノミックな拘束条件のみを取り扱った。今後は、不等式拘束条件やノンホロノミックな拘束条件を取り扱えるよう本手法を拡張すること、また本研究で提案した人間-機械系の等価慣性を 3 次元空間内で理解しやすく表現する方法を考える必要がある。さらに、最適化手法と組み合わせることで人間-機械系の等価慣性を設計する方法を具体化するとともに、慣性のみならず粘弾性を含めた人間-機械系の等価インピーダンスまで拡張することで、人間-機械系における制御やハードウェア設計の新たな戦略を考えるためのツールとしたいと考えている。

参考文献

- 1) S. Park and T. B. Sheridan: Enhanced Human-Machine Interface in Braking, IEEE Trans. on SMC-Part A, **34**-5, 615/629 (2004)
- 2) 辻, 神宇, 加藤, 金子, 川村: インピーダンス・トレーニング: 人間は手先インピーダンスを訓練により調節できるのか?, 計測自動制御学会論文集, **35**-10, 1300/1306 (1999)
- 3) 辻, 加藤, 金子: 人間-ロボット系の追従制御特性, 日本ロボット学会誌, **18**-2, 285/291 (2000)
- 4) F.A. Mussa-Ivaldi, N. Hogan and E. Bizzi: Neural, mechanical and geometrical factors sub-serving arm postures in humans, Journal of Neuroscience, **5**-10, 2732/2743 (1985)
- 5) 辻, 後藤, 伊藤(宏), 長町: 姿勢維持中の人間の手先インピーダンスの推定, 計測自動制御学会論文集, **30**-3, 319/328 (1994)

- 6) T. Tsuji, P. G. Morasso, K. Goto and K. Ito: Human hand impedance characteristics during maintained posture, *Biological Cybernetics*, **72**, 457/485 (1995)
- 7) 辻, 森谷, 金子, 伊藤 (宏): 等尺性筋収縮における人間の手先インピーダンスの解析, 計測自動制御学会論文集, **32-2**, 271/280 (1996)
- 8) 鄭, 友近, 吉川: 複数のロボット機構による協調的操り時の動的可操作性, 日本ロボット学会誌, **11-6**, 892/900 (1993)
- 9) P. Chiacchio, S. Chiaverini, L. Sciacivco and B. Siciliano: Global Task Space Manipulability Ellipsoids for Multiple-Arm Systems, *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, **7-5** 678/685 (1991)
- 10) 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)
- 11) 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)
- 12) 吉川, 鄭: 拘束運動下にある対象物の複数台ロボットによる協調ハイブリッド制御, システム制御情報学会論文誌, **3-10**, 326/334 (1990)
- 13) A. Jazidie, T. Tsuji, M. Nagamachi and K. Ito: Dynamic Modeling of Closed-chain Mechanisms for Multi-arm Robots, *Trans. of the SICE*, **29-6**, 628/636 (1993)
- 14) E. J. Haug: *Computer-Aided Kinematic and Dynamics of Mechanical Systems Volume I: Basic Methods*, Allyn and Bacon (1989)
- 15) 児玉, 須田: システム制御のためのマトリクス理論, コロナ社 (1978)
- 16) D. N. Nenchev: Restricted Jacobian Matrices of Redundant Manipulators in Constrained Motion Tasks, *The International Journal of Robotics Research*, **11-6**, 584/597 (1992)
- 17) F. Aghili and J. C. Piedbceuf: Simulation of Motion of Constrained Multibody Systems Based on Projection Operator, *Multibody System Dynamics*, **10**, 3/16 (2003)
- 18) 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*, No.990962 (1999)
- 19) D. Tolani, A. Goswami and N. Badler: Real-time inverse kinematics techniques for anthropomorphic limbs, *Graphical Models*, **62-5**, 353/388 (2000)

山田 大介



1979年1月16日生。2003年慶応大学大学院理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、人体力学モデルの開発および生体力学に関する研究に従事。現在、生体力学研究室に所属。日本機械学会の会員。

辻 敏夫 (正会員)



1959年12月25日生。1985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)、日本医科器械学会論文賞(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



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年米国ペンシルベニア大学 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。