

ステアリング操作における人間の手先インピーダンス特性の解析

田中良幸*・神田龍馬*・武田雄策**・山田直樹**
福庭一志**・正守一郎**・辻敏夫*

Analysis of Human Hand Impedance Properties during the Steering Operation

Yoshiyuki TANAKA*, Ryoma KANDA*, Yusaku TAKEDA**, Naoki YAMADA**,
Hitoshi FUKUBA**, Ichiro MASAMORI** and Toshio TSUJI*

The present paper investigates human mechanical impedance during the operation of a virtual steering system according to dual-arm configurations. The developed steering system using an impedance-controlled robot can accurately estimate mechanical impedance properties around the rotational axis. Experimental results demonstrate that a human changes his/her impedance properties in both the grip position on a steering wheel and the magnitude of steering torque. Overall stability of a human-steering system is then discussed by means of the measured human impedance parameters.

Key Words: human-machine system, human arm impedance, and steering operation

1. はじめに

われわれは日常生活において自動車をはじめとするさまざまな機械システムを意図通り操ることにより、人間だけでは実現できない作業目的を効率よく達成している。このとき、人間は機械システムの操縦系と接触してその機械特性を知覚し、作業目的に応じて身体各部位の姿勢や筋を調節して自らの運動特性を巧みに変化させている¹⁾。たとえば、自動車運転におけるステアリング操作を例に挙げると、車両スピードやカーブの緩急に応じた操舵反力などを知覚して、時々刻々と変化する運転状況に応じて両腕の姿勢や手先力の大きさを積極的に調節している。このように、一般的な機械システムの操作では、基本的に人間側が機械側に合わせるという形態をとる。そのため、人間に過度な操作量や無理な体勢による操作を強いる状況が発生し、操作感の悪化や疲労感を引き起こす大きな要因となる。もし、人間の身体特性や運動特性に合わせて機械システムの操縦系を設計することができれば、人間にとって快適に操作できる機械システムの研究・開発に適用できる可能性がある。

このような問題に対し、これまでに著者らはロボット工学で用いられる可操作性理論²⁾に実験的に解析した四肢の単関節トルク特性を導入し、生体関節トルク特性を考慮した可操作性を提案した³⁾。そして、姿勢情報のみから人間が発揮できる四肢先端の操作力特性を楕円体指標を用いて可視化および定量化するとともに、自動車操縦系のレイアウト設計への応用を試みてきた⁴⁾。しかしながら、腕のかたさ・やわらかさといった、人間が作業中に随時調節をしている運動特性までは考慮していないため、ステアリングの重さ・軽さといった操作感に大きな影響を与える操縦系の動特性の設計開発までには至っていない。

一方、人間の運動特性は、剛性、粘性、慣性といった機械インピーダンスを用いて表現することができる。Mussa-Ivaldiら⁵⁾が二次元水平面上に拘束された姿勢維持中の手先剛性を計測して以来、これまでに数多くの研究が報告されている^{6)~10)}。たとえば、辻ら^{7)~9)}は剛性だけでなく粘性と慣性も含めて手先インピーダンスを推定するとともに、手先の粘弾性は定性的に似た空間特性となり、筋収縮レベルに応じて大きく変化することを報告した。これらの従来研究により、二次元水平面上における姿勢維持中の手先インピーダンス特性と調節メカニズムについてある程度明らかにされている。そして、黎ら^{11),12)}は自動車のステアリング剛性と操作者の手先剛性との関係を理論的および実験的に解析し、系全体の剛性は手先とステアリングの間に発生する内力と両腕の筋収縮レベルに応じて変化することを示している。また、池浦ら¹³⁾は可変インピーダンス制御を用いてステアリング装置を構築し、設定したステアリング動特性に対する操舵感とステアリング操作中に計測した手先剛性との関係を実験的に解析している。しかしながら、これらの研究報告ではステアリング操作における人間の手先インピーダンスそのものの推定精度が明示され

* 広島大学大学院工学研究科 東広島市鏡山 1-4-1

** マツダ(株) 広島県安芸郡府中町新地 3-1

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

** Mazda Motor Corp., 3-1, Shinchi, Fuchu-cho, Aki-gun Hiroshima

(Received May 19, 2006)

(Revised September 18, 2006)

ておらず、定性的な解析評価に留まっている。

そこで本論文では、ステアリング操作における人間の運動インピーダンス特性を解析することを目的として、開発した仮想ステアリング装置¹⁴⁾を用いて計測・解析を行なう。以下、2では、仮想ステアリング装置による回転系における人間の手先インピーダンス特性の計測法について説明するとともに、既知物理量を用いて開発装置のインピーダンス推定精度を示す。3では、ステアリングの保持位置と操舵力の大きさによる人間のインピーダンス特性を実験的に解析するとともに、推定結果を用いて人間—ステアリング系における操作安定性の解析評価を行なう。

2. ステアリング操作時の手先インピーダンス計測

2.1 計測方法

ステアリング操作における人間の手先運動は、Fig. 1に示すような半径 r の1次元の回転運動となる。このとき、ステアリング回転軸周りの手先運動特性は、次式のインピーダンスモデル⁵⁾を用いて

$$M_{\theta e}\ddot{\theta}(t) + B_{\theta e}\dot{\theta}(t) + K_{\theta e}(\theta(t) - \theta_v(t)) = -T_e(t) \quad (1)$$

で近似することができる。ただし、 $T_e(t)$ は操作者が発揮したステアリングの操舵力、 $\theta(t)$ は回転角度、 $\theta_v(t)$ は手先の平衡点（仮想軌道）であり、 $M_{\theta e}$ 、 $B_{\theta e}$ 、 $K_{\theta e}$ はそれぞれ回転系で表現した手先の慣性、粘性、剛性である。いま、強制変位中の手先インピーダンスと平衡点は一定と仮定すると、強制変位によって生じる回転角度の変分 $d\theta(t) = (\theta(t) - \theta(t_0))$ とトルクの変分 $dT(t) = (T_e(t) - T_e(t_0))$ から

$$M_{\theta e}d\ddot{\theta}(t) + B_{\theta e}d\dot{\theta}(t) + K_{\theta e}d\theta(t) = -dT(t) \quad (2)$$

を得る。ここで、 t_0 は強制変位の開始時刻である。

一方、回転半径 r の強制変位 $d\theta$ に対する手先位置の変分 dX と手先力の変分 dF は、

$$dX(t) = rd\theta(t) \quad (3)$$

$$dF(t) = \frac{1}{r}dT(t) \quad (4)$$

となる。したがって、ステアリングの接線方向に寄与する人間の手先運動特性は、

$$M_e d\ddot{X}(t) + B_e d\dot{X}(t) + K_e dX(t) = -dF(t) \quad (5)$$

と記述することができる。ここで、 M_e 、 B_e 、 K_e はそれぞれステアリング接線方向の手先慣性、粘性、剛性であり、

$$M_e = \frac{1}{r^2}M_{\theta e}, \quad B_e = \frac{1}{r^2}B_{\theta e}, \quad K_e = \frac{1}{r^2}K_{\theta e} \quad (6)$$

である。計測したステアリング回転角度とトルクの時系列データを(2)式に最小自乗法でフィッティングすることにより、 M_e 、 B_e 、 K_e が推定できる。

2.2 実験装置¹⁴⁾

本論文で開発した仮想ステアリング装置の概要図を Fig. 2

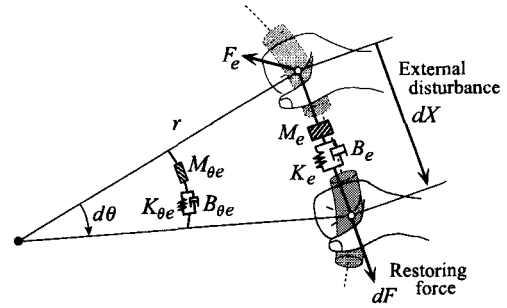


Fig. 1 Schematic description of hand impedance measurement during steering operations

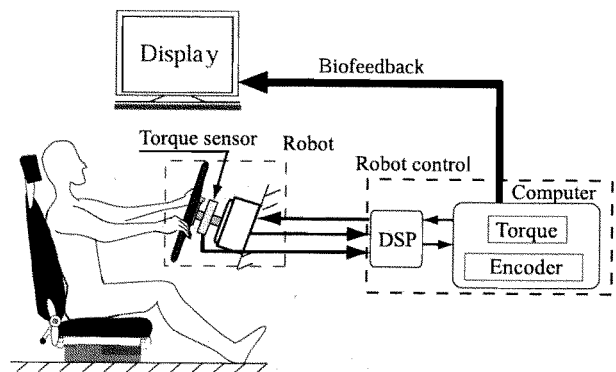


Fig. 2 A virtual steering system¹⁴⁾

に示す。本装置はダイレクト・ドライブ型の回転モータ（(株)日本精工製：最大出力トルク 20 [Nm]）、その制御を行なう計算機、計測したステアリングの操舵角と操舵力やドライビング画面を表示するディスプレイから構成される。モータの回転可動部には操舵力計（(株)総合計装製：定格トルク 50 [Nm]）とステアリング（半径： $r = 0.185$ [m]）を取り付け、操作者が発揮するステアリング操舵力を計測する。ステアリング回転角度は、モータに内蔵されたエンコーダ（分解能：51200 [pulse/r]）から求められる。なお、モータ制御には計算機を介して DSP ボード（dSPACE 社製：ds1104）を使用し、高サンプリングかつ安定した計測・制御を実現している。

ステアリング操作における手先インピーダンス計測では、モータに目標角度軌道を与えて次式の PID 制御則により追従させることで強制変位を実現した。

$$T = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (7)$$

ここで、 T はモータの駆動トルク、 $e(t)$ は目標角度と現在角度の差であり、 K_p 、 K_i 、 K_d はそれぞれ比例ゲイン、積分ゲイン、微分ゲインである。なお、本論文で使用したゲインは $K_p = 375$ [Nm/rad]、 $K_i = 40$ [Nm/srad]、 $K_d = 0.75$ [Nms/rad] である。

2.3 推定精度

実際に人間の手先インピーダンスを推定する前に、既知の

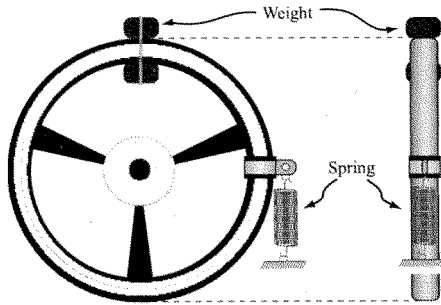


Fig. 3 Experimental conditions using a known spring-mass system

物理量に対して仮想ステアリング装置による機械インピーダンスの推定精度を検証した。なお、本論文では強制変位中の手先慣性、粘性、剛性は一定と仮定してインピーダンス推定を行なうことを考慮して、初期位置から変位した後に 0.3 [sec] で変位前の位置に戻るような強制変位パターンを用いた。

Fig. 3 に実験環境の概略図を示す。実験では、ステアリング上に質量（慣性）が既知の重りを固定し、ステアリングに設置した治具と固定した環境との間に弾性係数（剛性）が既知のバネをそれぞれ取り付け、慣性と剛性を同時に推定した。Fig. 4 に推定時のステアリングの回転角度ならびにトルク波形の一例を示す。図は質量 0.5 [kg] の重りと弾性係数 879 [N/m] のバネを取り付け、反時計回りに強制変位を加えた場合である。なお、トルク波形における図では、計測したトルク（実線）と推定したインピーダンスを用いて算出したトルク（点線）を重ね描いている。実線と点線がほぼ一致していることから、設定した剛性と慣性の値を精度良く推定できていることがわかる。

Table 1 に本論文で設定した既知の剛性と慣性に対する 5 試行における推定値の平均値と標準偏差を示す。推定した剛性と慣性は真値とほぼ一致し、各推定値の標準偏差はそれぞれ 28.753 [N/m], 0.022 [kg] 以下であった。以上の推定実験結果から、開発した仮想ステアリング装置は機械インピーダンスを安定して高精度で推定できることを確認した。

3. 手先インピーダンス計測実験

3.1 実験条件

自動車運転における直進走行時を想定して、被験者 4 名（22～23 歳の男子大学生）によるステアリング操作時の手先インピーダンス特性を計測・解析した。

実験では、Fig. 5 (a) に示すように被験者を装置正面に座らせ、シートベルトを着用させてステアリング操作中に体幹が動かないようにした。また、両手にはギプスを装着させてステアリングに固定することで、指や掌による受動インピーダンスの影響をできるだけ排除した。そして、実験中はステアリング操舵力の大きさをリアルタイムでディスプレイ画面に棒グラフで表示し、被験者にはフィードバック情報に基づ

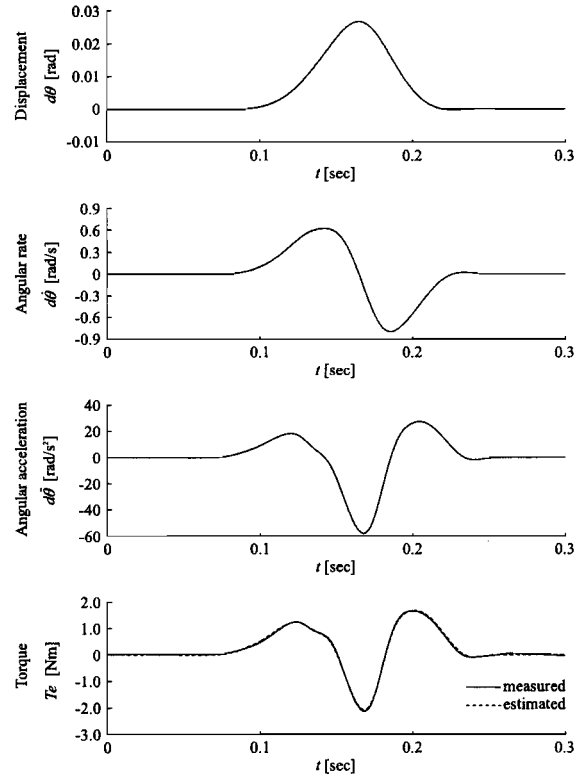


Fig. 4 An example of the measured signals for estimating mechanical impedance

Table 1 Accuracy of the estimated impedance for the known spring-mass system

(a) Stiffness accuracy

	Desired stiffness, K_e [N/m]				
	110	238	404	607	879
Desired inertia, M_e [kg]					
0.5	113.76 ± 7.216	239.27 ± 17.988	410.64 ± 26.151	606.64 ± 14.015	874.93 ± 28.560
1.0	104.63 ± 9.178	233.37 ± 22.677	396.95 ± 23.794	609.47 ± 15.436	875.22 ± 15.685
1.5	107.81 ± 13.381	238.99 ± 12.634	402.80 ± 14.351	610.15 ± 14.468	879.03 ± 18.067
2.0	105.89 ± 14.871	235.36 ± 16.882	397.69 ± 20.557	609.98 ± 4.879	879.22 ± 18.392
2.5	116.73 ± 8.731	245.27 ± 6.908	412.70 ± 12.612	610.11 ± 10.092	879.97 ± 7.942
3.0	115.90 ± 12.033	244.06 ± 14.198	415.81 ± 28.753	614.32 ± 10.538	896.67 ± 3.728

(b) Inertia accuracy

	Desired stiffness, K_e [N/m]				
	110	238	404	607	879
Desired inertia, M_e [kg]					
0.5	0.53 ± 0.009	0.53 ± 0.009	0.53 ± 0.011	0.51 ± 0.007	0.52 ± 0.012
1.0	1.03 ± 0.005	1.03 ± 0.008	1.03 ± 0.013	1.03 ± 0.010	1.02 ± 0.008
1.5	1.51 ± 0.010	1.50 ± 0.011	1.50 ± 0.005	1.51 ± 0.015	1.51 ± 0.010
2.0	2.05 ± 0.016	2.03 ± 0.011	2.02 ± 0.012	2.02 ± 0.009	2.03 ± 0.011
2.5	2.50 ± 0.016	2.49 ± 0.003	2.49 ± 0.008	2.49 ± 0.009	2.48 ± 0.010
3.0	2.98 ± 0.011	2.98 ± 0.004	2.98 ± 0.022	2.97 ± 0.009	2.98 ± 0.006

いて時計回りに目標操舵力を姿勢維持して発揮するように指示をした。なお、姿勢維持中の手先インピーダンスを推定するため、被験者の手先に摂動を印加しない時は $\theta_r = 0$ [rad] をステアリングの目標操舵角度として位置制御を施し、ステアリング操舵角を固定した。

本論文では両手の把持位置は左右対称として右手の把持位

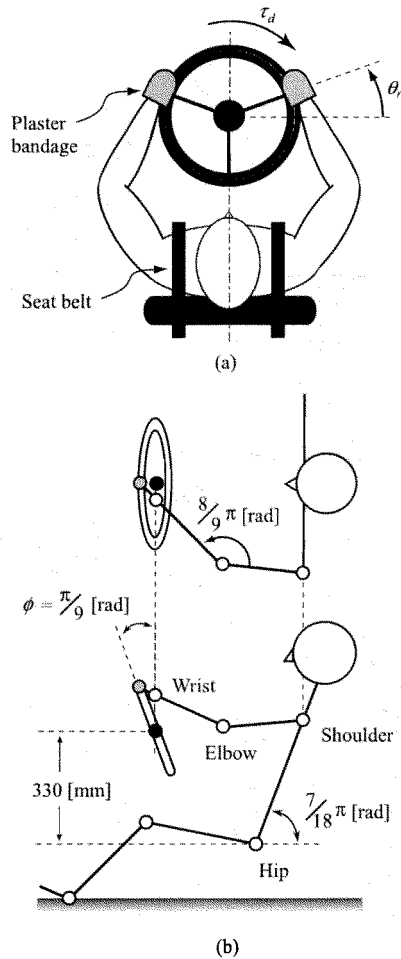


Fig. 5 Experimental conditions for measuring human hand impedance in the steering operation

置を水平軸からの角度が $\theta_r = -\frac{\pi}{6}, 0, \frac{\pi}{6}, \frac{\pi}{3}$ [rad] となる位置に設定し、目標操舵力を $\tau_d = 0, 3, 6$ [Nm] とした。また、ステアリングの高さと傾きならびにシート角度は Fig. 5 (b) のように設定し、シートの前後位置は右手でステアリング上部を保持したときの肘関節角度が $\frac{8\pi}{9}$ [rad] となる位置に各被験者で設定した。

3.2 実験結果

Fig. 6 に Subject A による手先インピーダンスの推定結果を一例として示す。図はステアリングの各保持位置で発揮した右操舵力に対する変化であり、5 試行における剛性、粘性、慣性の平均と標準偏差を上から順に表わしている。なお、慣性はステアリングの等価慣性を除いた値である。剛性はステアリングの目標操舵力が大きくなるにつれて、増加していることがわかる。粘性に関しては、操舵力が増加するにしたがって小さくなる傾向が確認できる。また、慣性は保持位置に対して大きく変化し、 $\theta_r = \frac{\pi}{6}$ [rad] 付近で最も大きくなっている。Table 2 に、全被験者に対する手先インピーダンス特性の推定結果を示す。若干の個人差が見られるが、他被験者においても同様な特徴を確認することができた。

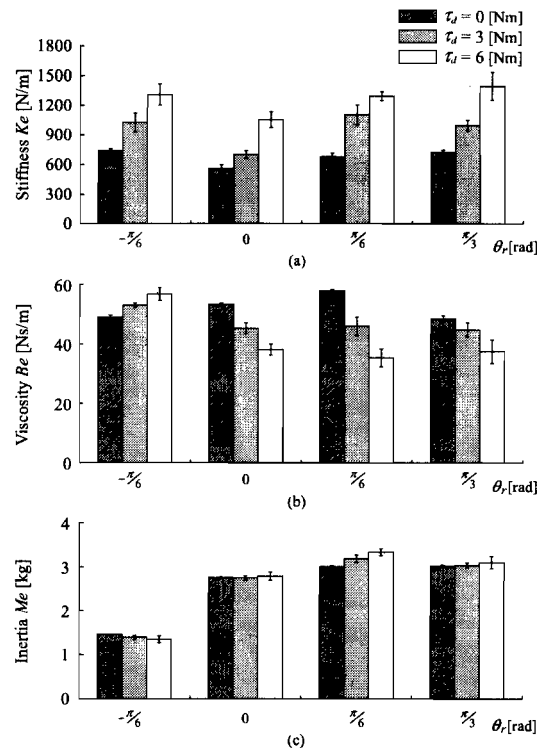


Fig. 6 Measured hand impedance properties by Subject A

一般に、上肢姿勢保持における手先剛性は腕の筋収縮レベルに比例して大きくなることが知られている⁹⁾。したがって、被験者の剛性が操舵力に比例して大きくなったのは、被験者が指定された操舵力を実現するために両腕の筋収縮レベルを上げたことによるものと考えられる。しかしながら粘性に関しては、従来研究における報告内容とは異なった傾向を示した。この原因は、従来研究では上腕を同一水平面上に拘束して手先インピーダンス計測を行なっているのに対して、本論文では重力の影響を受ける3次元作業に対して無拘束姿勢で計測をしたこと、使用した実験装置ではステアリング回転軸周りの操舵力しか計測できないため、両手とステアリングの間に作用する内力の影響等が考えられる。この点に関しては、今後、実験装置を改良するとともに、実験的および理論的な解析が必要であると考えている。慣性が操舵力に対してほとんど変化していないのは、同一姿勢を保持して目標操舵力を発揮するように指示をしたためである。また、ステアリング下部において極端に小さくなっているのは、脇を閉めて腕を折りたたんだ姿勢となっていることが顕著に現れた結果である。

3.3 ステアリング操作における安定性

ステアリング操作における人間のインピーダンス特性は、ステアリングの把持位置に応じて変化することが明らかとなった。そこで、両手によるステアリング操作を人間—機械系として捕らえ、把持位置による系全体の安定性について解析する。

Fig. 7 に本論文でモデル化した人間—ステアリング系を示す。半径 r のステアリング上に両手の剛性と慣性を左右対称

Table 2 Measured human hand impedance depending on the different hand positions. Mean values and standard deviations for 5 sets of the estimated results are shown for all subjects

θ_r [rad]	Stiffness, K_e [N/m]			Viscosity, B_e [Ns/m]			Inertia, M_e [kg]			
	$\tau_d = 0$ [Nm]	$\tau_d = 3$ [Nm]	$\tau_d = 6$ [Nm]	$\tau_d = 0$ [Nm]	$\tau_d = 3$ [Nm]	$\tau_d = 6$ [Nm]	$\tau_d = 0$ [Nm]	$\tau_d = 3$ [Nm]	$\tau_d = 6$ [Nm]	
Sub. A	$-\pi/6$	740.76 ± 20.967	1025.29 ± 95.525	1308.70 ± 108.027	48.92 ± 0.800	52.95 ± 0.673	56.70 ± 2.158	1.45 ± 0.013	1.39 ± 0.046	1.34 ± 0.078
	0	559.22 ± 36.909	698.76 ± 39.069	1051.91 ± 79.721	53.14 ± 0.443	45.17 ± 1.794	38.05 ± 1.842	2.75 ± 0.016	2.74 ± 0.045	2.78 ± 0.090
	$\pi/6$	681.48 ± 35.034	1104.82 ± 100.104	1295.50 ± 45.677	57.71 ± 0.479	45.89 ± 3.071	35.35 ± 2.986	2.99 ± 0.024	3.17 ± 0.089	3.32 ± 0.077
	$\pi/3$	724.69 ± 25.116	996.14 ± 56.234	1395.92 ± 139.352	48.37 ± 1.062	44.76 ± 2.326	37.46 ± 3.915	3.01 ± 0.025	3.02 ± 0.052	3.09 ± 0.140
Sub. B	$-\pi/6$	822.26 ± 15.108	1019.33 ± 59.472	1295.55 ± 199.542	57.76 ± 1.384	56.49 ± 1.743	54.43 ± 3.430	1.81 ± 0.019	1.80 ± 0.049	1.92 ± 0.118
	0	565.62 ± 51.312	1021.19 ± 26.350	1287.73 ± 76.360	42.67 ± 0.793	41.05 ± 1.682	33.20 ± 2.806	3.25 ± 0.036	3.12 ± 0.026	3.04 ± 0.075
	$\pi/6$	659.96 ± 26.496	1159.06 ± 28.105	1301.70 ± 145.350	41.07 ± 1.161	33.10 ± 2.004	28.85 ± 3.507	2.81 ± 0.016	2.99 ± 0.045	3.03 ± 0.123
	$\pi/3$	487.92 ± 41.555	967.54 ± 54.524	1118.45 ± 85.114	35.05 ± 1.176	26.35 ± 1.947	16.90 ± 5.418	2.70 ± 0.02	3.04 ± 0.023	3.00 ± 0.163
Sub. C	$-\pi/6$	1387.07 ± 101.578	1745.16 ± 88.767	1927.54 ± 72.816	63.49 ± 1.863	59.85 ± 4.142	67.65 ± 5.875	1.47 ± 0.033	1.66 ± 0.028	1.54 ± 0.048
	0	885.38 ± 57.785	1258.82 ± 136.784	1601.04 ± 43.717	67.67 ± 2.586	60.05 ± 2.799	54.64 ± 2.524	3.00 ± 0.065	3.10 ± 0.081	3.20 ± 0.050
	$\pi/6$	940.94 ± 97.691	1350.36 ± 113.701	1723.62 ± 260.913	62.37 ± 2.856	53.93 ± 3.241	43.18 ± 6.452	3.77 ± 0.067	3.92 ± 0.097	4.16 ± 0.199
	$\pi/3$	976.78 ± 78.327	1203.04 ± 79.658	1243.56 ± 65.814	61.98 ± 0.433	54.53 ± 2.185	47.60 ± 1.865	3.71 ± 0.046	3.75 ± 0.059	3.59 ± 0.095
Sub. D	$-\pi/6$	757.45 ± 100.799	962.32 ± 114.493	1615.36 ± 116.161	57.75 ± 3.112	55.19 ± 2.473	48.61 ± 6.896	1.50 ± 0.036	1.37 ± 0.056	1.63 ± 0.070
	0	750.55 ± 51.592	837.43 ± 125.159	1371.04 ± 52.249	61.11 ± 2.490	56.03 ± 4.125	42.55 ± 5.212	2.55 ± 0.055	2.53 ± 0.069	2.89 ± 0.105
	$\pi/6$	600.65 ± 51.763	1053.10 ± 77.707	1411.79 ± 289.610	72.26 ± 1.650	57.67 ± 2.137	45.10 ± 9.304	3.22 ± 0.041	3.25 ± 0.071	3.65 ± 0.323
	$\pi/3$	516.93 ± 59.150	814.03 ± 158.245	1233.90 ± 266.021	62.21 ± 1.106	53.00 ± 6.308	39.76 ± 8.740	3.84 ± 0.071	3.77 ± 0.121	3.87 ± 0.209

位置 ($\theta_r + \theta_l = \pi$) に配置し、ステアリング下端を位置エネルギーの基準点とする。なお、本論文では議論の簡単化のため、ステアリング自体の機械インピーダンスは省略して1自由度の回転系において考える。このとき、ステアリングが初期状態から微小角度 α だけ変位し静止したとすると、系全体が持つエネルギー U は、

$$U = \frac{g \cos \phi}{r} (M_{\theta_{el}} + M_{\theta_{er}}) (1 + \sin \theta_r \cos \alpha) + \frac{1}{2} (K_{\theta_{el}} + K_{\theta_{er}}) \alpha^2 \quad (8)$$

で与えられる。ただし、 $M_{\theta_{ei}}$ ($i \in \{r, l\}$) は回転系で表現した手先慣性、 $K_{\theta_{ei}}$ は初期位置 ($\alpha = 0$ [rad]) を平衡位置とする手先剛性、 g は重力加速度、 ϕ はステアリングの傾きである (Fig. 5 (b) 参照)。つぎに、上式を α について2階微分すると、

$$\frac{d^2 U}{d\alpha^2} = K_{\theta_e} - \frac{M_{\theta_e} g \cos \phi \sin \theta_r}{r} \cos \alpha \quad (9)$$

が得られる。ただし、 $M_{\theta_e} = M_{\theta_{el}} + M_{\theta_{er}}$ 、 $K_{\theta_e} = K_{\theta_{el}} + K_{\theta_{er}}$ である。(9) 式の右辺が正であれば初期位置において系は α に対して安定平衡であり、負であれば不安定平衡であることを意味する¹⁵⁾。そこで本論文では、初期位置近傍 ($\alpha \approx 0$ [rad]) における $\frac{d^2 U}{d\alpha^2}$ の値を用いて系全体の安定性に対する評価指標 E を次式のように定義する。

$$E = K_{\theta_e} - \frac{M_{\theta_e} g \cos \phi \sin \theta_r}{r} \quad (10)$$

E の値が正でかつ大きいほど系は安定性は高くなることに注意されたい。

Fig. 8 は Table 2 で示した $\tau_d = 0$ [Nm] に対する各被験者のステアリング保持位置における手先剛性と手先慣性を用

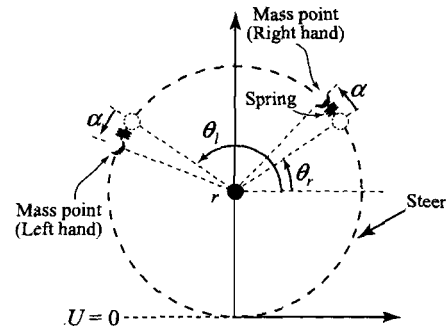


Fig. 7 A model of a human-steering system

いて (10) 式により計算した評価指標 E の解析結果である。ここで、 $r = 0.185$ [m]、 $g \approx 9.21$ [m/s²] である。図より、全被験者に共通して、系全体の安定性は両手の保持位置がステアリング下部で関数 E は最も大きくなり、上部になるほど小さくなるのがわかる。つまり、ステアリングの操舵角を一定に保ちたい場合にはステアリング下部を、逆に大きく変化させたい場合には上部を把持するのが効率的であるといえる。このことは、高速道路など変化の乏しい道路を運転する場合にはステアリング下部を、市街地などステアリングを頻繁に操作する必要がある場合には上部を把持するという、われわれが比較的楽に感じるという運転感覚と一致している。人間の操作感の向上と運転負荷の軽減を考慮したステアリングを実現するためには、人間とステアリングの各動特性だけでなく、このような人間-ステアリング系の安定性を考慮してステアリング特性を設計することが必要と考えられる。

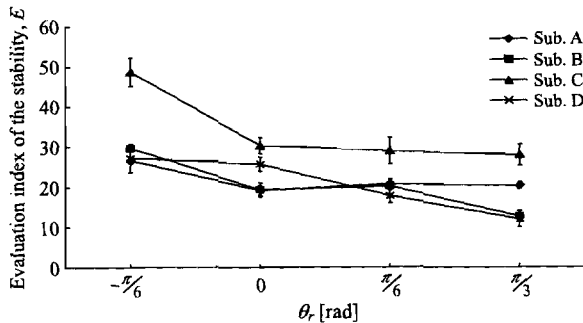


Fig. 8 Overall stability of a human-steering system depending on the different grip positions

4. まとめと今後の課題

本論文では、自動車運転におけるステアリング操作に対する人間の四肢運動特性の解明を目的として、仮想ステアリング装置を構築した。そして、両腕による直進時のステアリング操作に着目して、両手の保持位置に対する手先インピーダンス特性の解析を行なった。その結果、1) ステアリングの保持位置に対して人間の運動インピーダンス特性は変化すること、2) ステアリング操舵力に対して剛性は比例して大きくなること、3) ステアリング操舵力に対して粘性は小さくなることが明らかになった。そして、実験で得られた推定結果を用いて人間—ステアリング系の安定性を解析し、運転状況に適したステアリングの保持位置について議論した。

今後は、被験者の体格も考慮した上で、ステアリング保持位置に対する手先インピーダンス特性のさらなる検証を行なうとともに、ステアリング姿勢や持ち手による変化を詳細に解析していく予定である。また、ステアリング操作において発生する内力の影響を考慮した計測を行なっていきたいと考えている。そして、実験により得られた知見を基にして、人間の手先インピーダンス特性に基づいたステアリング操舵特性の設計手法の確立を目指していく。

参考文献

- 1) 伊藤宏司, 伊藤正美: 生体とロボットにおける運動制御, 計測自動制御学会 (1991)
- 2) 吉川恒夫: ロボット制御基礎論, コロナ社, 第4章 (1988)
- 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) Y. Tanaka, N. Yamada, K. Nishikawa, I. Masamori and T. Tsuji: Manipulability Analysis of Human Arm Movements during the Operation of a Variable-Impedance Controlled Robot, *Proceedings of the 2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robotics and Systems*, 3543/3548 (2005)
- 5) F.A. Mussa-Ivaldi, N. Hogan and E. Bizzi: Neural, Mechanical and Geometric Factors Subserving Arm in Humans, *Journal of Neuroscience*, **5-10**, 2732/2743 (1985)
- 6) J.M. Dolan, M.B. Friendman and M.L. Nagarka: Dynamics and Loaded Impedance Components in the Maintenance of Human Arm Posture, *IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics*, **23-3**, 698/709 (1993)
- 7) 辻, 後藤, 伊藤, 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)

- 8) T. Tsuji, P.G. Morasso, K. Goto and K. Ito: Human Hand Impedance Characteristics during Maintained Posture in Multi-joint Arm Movements, *Biological Cybernetics*, **72**, 475/485 (1995)
- 9) 辻, 森谷, 金子, 伊藤: 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)
- 10) Y. Takeda, Y. Tanaka and T. Tsuji: Measurement of Human Hand Impedance Characteristics Depending on Dual Arm Configurations, *Journal of Robotics and Mechatronics*, **16-6**, 635/642 (2004)
- 11) 黎, 久保, 川村: ハンドルの回転剛性に及ぼす腕の内力効果, 計測自動制御学会論文集, **33-8**, 766/772 (1997)
- 12) 黎, 久保, 川村: 自転車のハンドル回転剛性に及ぼす手先力の効果, 計測自動制御学会論文集, **38-11**, 915/921 (1996)
- 13) 池浦, 星野, 横井, 兼原, 星野, 水谷, 澤井: インピーダンスに基づく車のステアリング操舵感評価, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.105-5, 15/20 (2005)
- 14) Y. Tanaka, R. Kanda, N. Yamada, H. Fukuba, I. Masamori and T. Tsuji: Virtual Driving Simulator for Measuring Dynamic Properties of Human Arm Movements, *Journal of Robotics and Mechatronics*, **18-2**, 177/185 (2006)
- 15) J.M.T. Thompson: 不安定性とカタストロフ, 産業図書 (1985)

[著者紹介]

田中良幸 (正会員)



2001年広島大学大学院工学研究科博士課程後期修了。同年5月広島市立大学情報科学部助手、2002年10月より広島大学大学院工学研究科助手、現在に至る。博士(工学)。主として、人間とロボットの運動制御、マン・マシンシステムに関する研究に従事。日本ロボット学会、日本人間工学会、IEEE等の会員。

神田龍馬



1982年4月11日生。2007年広島大学大学院工学研究科博士課程前期修了見込み。主として、自動車操作系における人間の運動制御に関する研究に従事。日本ロボット学会学生会員。

武田雄策



2005年広島大学大学院工学研究科博士課程後期修了。同年マツダ(株)に入社。博士(工学)。主として、自動車操作系における人間の運動制御に関する研究に従事。

山田直樹



1992年京都大学大学院工学研究科博士課程前期修了。同年マツダ(株)に入社。以来、マシンビジョンなどの計測技術開発およびこれを適用した人間工学研究に従事。現在、技術研究所(広島)に所属。自動車技術会、日本人間工学会、日本機械学会の会員。

福庭 一 志



1988年広島大学大学院生物圏科学研究科博士課程前期終了。同年マツダ（株）に入社。以来、センサ用機能材料研究およびこれを適用した計測技術開発に従事。現在、技術研究所（広島）に所属。自動車技術会の会員。

正 守 一 郎



1983年広島大学大学院工学研究科博士課程前期終了。同年マツダ（株）に入社。以来、光干渉計測および人間工学の自動車開発への応用研究に従事。現在、技術研究所（広島）に所属。自動車技術会、日本人間工学会の会員。

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。

.....