手腕系の動力学シミュレーションと実験による物性同定*

薦 紀夫^{*1}, 白 傑^{*2}, 藤井 康二^{*3}Dynamic Response Analysis of Human's Hand-Arm Vibration System
and Identification of joint Spring by Experiments

Toshio Tsuta, Jie Bai and Kouji Fujii

This paper presents a two-dimensional dynamic analysis and experiments on the human hand-arm system with various configurations under strong and weak gripped conditions, subjected to sinusoidal acceleration. The direct integration method is adopted, and joint spring and damping parameters have been determined by partial optimization technique with a least squares approach, in which the discrepancy between the theoretical and the observed is iteratively corrected in a multistep manner so that at first the gap for wrist responses is minimized, then followed by the gap for the elbow, and finally the gap for the shoulder. Finally, a more simplified model for the hand-arm system with reduced joint parameters is proposed and its adequacy is verified through simulation. It is shown that the spring and damper of each joint do not depend on their shape configuration, and that phase, response and joint parameter are strongly influenced by the grip condition.

Key Words: Human Hand-Arm System, Dynamic Analysis, Experiments, Identification of joint, Spring and Damping, Partial Optimization Technique, Reduced-Freedom Modeling

1. まえがき

自動車や単車のドライバーが凹凸路面走行中に受ける身体各部の振動特性、自動車の衝突時の人体応答特性、および高速走行時の不安定振動に対する操作影響などを明らかにするためには、人体多関節系の動特性を明らかにする必要がある。

手腕系の振動応答特性に関する研究としては、D. D. Reynoldsの1次元系モデル⁽¹⁾⁽²⁾やバイクのライタモデリング⁽³⁾⁽⁴⁾などがある。D. D. Reynoldsのモデルでは、手腕系の上腕、前腕、手部が各1自由度系のマス-バネ要素として取り扱われており、回転運動の影響が考慮されていない。一方、ライダーに関しては、剛体のライタがバイクフレーム上に固定されたモデルが主流をなしている⁽³⁾⁽⁴⁾。一般に手腕系ではグリップ力によって関節バネ特性などが変化するが、このような、人体多関節系の関節バネ特性や振動応答への影響に関してはまだあまり明らかになっていない。

そこで、人体多関節系の動特性を明らかにするための基礎的研究として、本研究では、このうちまず、手腕

系を取り出して、2次元動力学モデルを作成し、運転中の種々の姿勢角やグリップ条件および加振条件で、実人間モデルを用いた動特性実験を行うと共に、動力学モデリングに基づく数値シミュレーションを行って、関節バネの同定や系の動特性、および動特性に及ぼす姿勢パターンとグリップ力の影響を明らかにした。

図1 手腕系の各関節の回転系

* 平成3年10月16日 第69期全国大会講演会において講演、原稿受付 平成3年9月11日。

^{*1} 正員、広島大学工学部(〒724 広島市鏡山1-4-1)。

^{*2} 准員、広島大学大学院。

^{*3} トヨタ車体(株)(〒448 刈谷市一里山町金山100)。

2. 手腕系のモデリング

人間の手腕部における筋骨格の関節運動を司る構成部材は図1のようなものである。肩関節は前後運動と左右及び上下運動を、肘関節は前後及び左右の運動と前腕の捻り運動を行う。また手首も前後及び左右運動を行う。ここでは3部材、3関節系で構成される前後、上下、回転(以下面内運動)から成る2次元のモデルを考える(図1(a),図4及び図9参照)。

3. 手腕系の特性実験

3・1 実験の概要

手腕系である、上腕、前腕、手部および肩関節、肘関節、手首の各関節より成る2次元系(図1(a)参照)を対象とする。運転状態にあるドライバーが取る主要な数タイプの関節角姿勢を代表的に取り出して、ハンドルグリップ部より受ける種々の加振入力条件に対する応答特性を、加振周波数とグリップ力(グリップ力により関節の回転バネ特性が変化する)をパラメータとして検出する。

準備事項として実験による同定に必要な事項の検討を以下に行なう。

- (1)グリップ力検出装置を試作して検定曲線を作成する。
- (2)手腕系の姿勢を検出するための装置を試作し、姿勢パターン毎の姿勢角条件を定める。
- (3)シミュレーションに必要な手首、前腕、上腕の部分重量、重心位置及び腕長さを計測する。

3・2 グリップ力の検出

図2(a)に示すようなT型塩ビ管にスリットを設け、適当な断面位置の円周中央の円周方向に歪計を貼付したグリップ力検出装置(以下グリップバ)を試作した。この装置をベルト巻付重錘方式の载荷装置にセットし、重錘による荷重の増加と歪出力の関係を求めた。得られた検定曲線の例を同図(b)に示す。

3・3 姿勢パラメータの検出

運動の定義に必要な姿勢パラメータを図3に示す。図4のようにドライバーが自動車の標準座席位置にゆ

ったりと座りハンドルを握った状態(同図(a))、シートを前寄せにして腕を曲げた上握り運転姿勢(同図(b))、およびツアラー型バイクのように腕を伸ばした姿勢(同図(c))の3種類の代表的な姿勢を取り出し、その各々について図3に定義される各姿勢角の測定を行った。モデルは研究室の学生である。この結果を表1に示す。以下の研究では代表的に姿勢パターン PA, PB, PCに共通な身長168 cm、体重580 Nのモデルを選んで用いた。

なお、各姿勢パターン毎の姿勢パラメータの検出は図5に示す特殊な姿勢パラメータ検出装置を試作しこれを用いて行った。これは上腕、前腕、手部の各々

図3 姿勢パラメータの定義

図4 代表的な姿勢パターン

表1. 姿勢パターン計測結果

angle parameter	Posture type				
	PA	PB	PC		
θ_c (deg.)	78	75	70	50	115
θ_b	96	105	91	135	135
θ_a	106	105	98	115	115
ψ_c	0	0	0	0	10
ψ_b	0	10	8	-15	-5
ψ_a	20	20	20	-5	0
ψ_d	90	80	80	70	90
stature(m)	1.68	1.75	1.80	1.68	1.68
weight (N)	580	634	768	580	580

図2 グリップ力検出装置と検定曲線

図5 姿勢検出装置

図6 部分重量と重心の検出

表2 部分重量、重心、腕長さ計測結果

parameter	hand	fore-arm	Upper-arm
length (m)	0.105	0.270	0.310
partial weight (N)	3.4	9.5	10.6
center of gravity(m)	0.056	0.110	0.108
stature (m)	1.68		
weight (N)	580		

について腕長さの調整装置(L_a, L_b, L_c)と各回転部に角度計を持つ、面内姿勢角($\theta_a, \theta_b, \theta_c$)と面外姿勢角(ψ_a, ψ_b, ψ_c)の検出部及び前腕部のねじり角の検出部 ψ_a より成る。

3・4 部分重量、腕長さの計測

図6に示す20kg計量計(M1)に、腕部が肩まで入る細長容器をセットして、適量の水を入れ、浮力による腕浸水前後の計量計(M1)及び体重計(M2)の両方の重量変化を読みとる事により部分重量の計測を行う。この場合コンポーネントを分離して計測する場合と比べて、沿水部とそれより上部との境界に作用する内力分だけ誤差が含まれる事によるから、実験では、モデルができるだけこの内力を感じない条件を設定した上で、手部、手部+前腕部、手部+前腕部+上腕部のように順次計測を進めて、それらの差から各部分重量を同定した。なお、同定結果は排除体積に人体の平均比重を乗じたもので、その妥当性を確認した。手腕系各コンポーネントの重心位置は、各コンポーネント毎の重量の1/2となる浸水深さを試行錯誤により求める。得られた身長168cmのモデルの計測データを表2に示す。

4. 手腕系の加振実験

4・1 実験装置及び計測方法

上述の姿勢検出に用いたPA~PCの各姿勢について、加振周波数とグリップ力を変えて、標準モデルの学生の手腕系について一連の加振実験を行なった。図7に示す 1.6×10^5 (N) サーボ型加振機に、グリップを装着して 5~50Hzの間の適当な周波数で正弦波加振を行ない、モデルの3姿勢パターンとグリップ力大/小の2種を組合わせて、手首、前腕、上腕の各重心位置ほか各1カ所で腕の垂直方向の加速度を計測した。加速度ビ

図7 加振実験の状況

図8 入力波形と応答波形の例

ックアップの手腕系への取付に際しては、軟組織部の局所振動の影響を避けるために、図7のように関節部を除いた部分にスポーツ用の布製テーピングを行うと共に、加速度計もできるだけ軽い0.2gのものをを用いた。

4・2 実験結果

図8に実験結果の1例を示す。5 Hzの正弦波入力加振の場合について、手腕系重心位置での応答加速度を、グリップの強弱、及び姿勢パターンを変えて求めた例の一つである。これよりグリップ力が弱の状態で見られる手部の入力加速度波形と上腕重心の応答加速度(同図(b))では、同図(a)のグリップ強の場合に比べて顕著な位相のずれ θ が現われ、手部と上腕部はほぼ逆位相で運動している事がわかる。3種類の姿勢パターンのいずれにおいてもグリップ弱の場合には図8(a)の状態が現れる、一方逆にグリップ力が強の状態ではこのような位相のずれは小さい(同(a)図)。

5. 手腕系の動力学シミュレーション

5・1 手腕系の運動方程式

図9に示すように姿勢角 $\theta_a, \theta_b, \theta_c$ で構成される3部材、3関節系の2次元モデルを考える。図1(b)で示す肩胛骨部の上下及び前後の応答は、肩関節部の上下及

び水平バネで置き換える事とし、上腕部、前腕部及び手部の各重心の上下、水平及び回転運動(それぞれ Y_c , X_c , ψ_c , Y_b , X_b , ψ_b および Y_a , X_a , ψ_a) を独立変数として各方向の動的な力の平衡方程式を組み立てる。手首、肘および肩部の各関節バネは水平、垂直及び回転の相対量に比例するものとして定義し、同部の減衰力、減衰モーメントの抵抗も同様に定義する。各部材両端に $(X_0, Y_0) - (X_6, Y_6)$ で定義される局所座標系を解析の便宜上定義すれば、これらと各運動パラメータおよび姿勢角の関係はそれぞれ次のようになる。

$$X_i = X_j + L_i \{ \sin(\theta_j - \psi_j) - \sin(\theta_j) \}$$

$$Y_i = Y_j + L_i \{ \cos(\theta_j - \psi_j) - \cos(\theta_j) \}$$

但し、 $i=0, 1, 2, 3, 4, 5$; $j=a, b, c$ 。

又手部の加振入力条件は：

$$X_a = \bar{X}_0 + L_0 \{ \sin(\theta_a - \psi_a) - \sin(\theta_a) \}$$

$$Y_a = \bar{Y}_0 + L_0 \{ \cos(\theta_a - \psi_a) - \cos(\theta_a) \}$$

$L_0 \sim L_5$ は図3で定義されるように、各部材の重心位置から部材端または関節点までの距離である。図9を参考に、各部材のX方向(水平方向)およびY方向(垂直方向)および重心回りの回転に対する運動方程式を作ればそれぞれ式(2)～(4)のようになる。

(1). 手部aの運動方程式

$$\left. \begin{aligned} M_a \ddot{X}_a + C_{12x}(\dot{X}_1 - \dot{X}_2) + K_{12x}(X_1 - X_2) &= 0 \\ M_a \ddot{Y}_a + C_{12y}(\dot{Y}_1 - \dot{Y}_2) + K_{12y}(Y_1 - Y_2) &= 0 \\ I_a \ddot{\psi}_a + \{ C_{12x}(\dot{X}_1 - \dot{X}_2) \cos(\theta_a - \theta_b) + C_{12y}(\dot{Y}_1 - \dot{Y}_2) \cdot \\ \sin(\theta_a - \theta_b) \} (L_1 - L_0) + C_{M1}(\dot{\psi}_a - \dot{\psi}_b) &+ \{ K_{12x}(X_1 - X_2) \cos(\theta_a - \theta_b) + K_{12y}(Y_1 - Y_2) \cdot \\ \sin(\theta_a - \theta_b) \} (L_1 - L_0) + K_{M1}(\psi_a - \psi_b) &= 0 \end{aligned} \right\} (2)$$

(2). 前腕部bの運動方程式

$$\left. \begin{aligned} M_b \ddot{X}_b + C_{12x}(\dot{X}_2 - \dot{X}_1) + C_{34x}(\dot{X}_3 - \dot{X}_4) + \\ K_{12x}(X_2 - X_1) + K_{34x}(X_3 - X_4) &= 0 \\ M_b \ddot{Y}_b + C_{12y}(\dot{Y}_2 - \dot{Y}_1) + C_{34y}(\dot{Y}_3 - \dot{Y}_4) + \\ K_{12y}(Y_2 - Y_1) + K_{34y}(Y_3 - Y_4) &= 0 \\ I_b \ddot{\psi}_b + \{ C_{34x}(\dot{X}_3 - \dot{X}_4) L_3 + C_{12x}(\dot{X}_2 - \dot{X}_1) L_2 \} \cos(\theta_b - \psi_b) &+ \{ C_{34y}(\dot{Y}_3 - \dot{Y}_4) L_3 + C_{12y}(\dot{Y}_2 - \dot{Y}_1) L_2 \} \sin(\theta_b - \psi_b) \\ + C_{M1}(\dot{\psi}_b - \dot{\psi}_a) + C_{M2}(\dot{\psi}_b - \dot{\psi}_c) &= 0 \end{aligned} \right\} (3)$$

$$\left. \begin{aligned} &+ \{ K_{34x}(X_3 - X_4) L_3 + K_{12x}(X_2 - X_1) L_2 \} \cos(\theta_b - \psi_b) \\ &+ \{ K_{34y}(Y_3 - Y_4) L_3 + K_{12y}(Y_2 - Y_1) L_2 \} \sin(\theta_b - \psi_b) \\ &+ K_{M1}(\psi_b - \psi_a) + K_{M2}(\psi_b - \psi_c) &= 0 \end{aligned} \right\}$$

(3). 上腕部cの運動方程式

$$\left. \begin{aligned} M_c \ddot{X}_c + C_{34x}(\dot{X}_4 - \dot{X}_3) + C_{56x}(\dot{X}_5 - \dot{X}_6) + \\ K_{34x}(X_4 - X_3) + K_{56x}(X_5 - X_6) &= 0 \\ M_c \ddot{Y}_c + C_{34y}(\dot{Y}_4 - \dot{Y}_3) + C_{56y}(\dot{Y}_5 - \dot{Y}_6) + \\ K_{34y}(Y_4 - Y_3) + K_{56y}(Y_5 - Y_6) &= 0 \\ I_c \ddot{\psi}_c + \{ C_{56x}(\dot{X}_5 - \dot{X}_6) L_5 + C_{34x}(\dot{X}_4 - \dot{X}_3) L_4 \} \cos(\theta_c - \psi_c) &+ \{ C_{56y}(\dot{Y}_5 - \dot{Y}_6) L_5 + C_{34y}(\dot{Y}_4 - \dot{Y}_3) L_4 \} \sin(\theta_c - \psi_c) \\ + C_{M2}(\dot{\psi}_c - \dot{\psi}_b) + C_{M3} \dot{\psi}_c &+ \{ K_{56x}(X_5 - X_6) L_5 + K_{34x}(X_4 - X_3) L_4 \} \cos(\theta_c - \psi_c) \\ + \{ K_{56y}(Y_5 - Y_6) L_5 + K_{34y}(Y_4 - Y_3) L_4 \} \sin(\theta_c - \psi_c) &+ K_{M2}(\psi_c - \psi_b) + K_{M3} \psi_c = 0 \end{aligned} \right\} (4)$$

但し、 M_i と I_i ($i=a, b, c$)⁽⁴⁾ は質量及び慣性モーメント、また $K_{12x}, K_{12y}, C_{12x}, C_{12y}, K_{M1}, C_{M1}$ ($i=1 \sim 3$) はそれぞれ、関節のXおよびY方向のバネ、減衰、回転バネ及び回転減衰である。

なお境界点6で次の条件が成立する。

$$X_6 = Y_6 = \dot{X}_6 = \dot{Y}_6 = 0 \quad (5)$$

4・2 時刻歴応答計算法

式(1)、(5)を式(2)～(4)の各式に用いて、局所座標系 X_i, Y_i を消去する。但し手部のみは重心点の (X_a, Y_a) の代わりに既知の入力変位 $\bar{X}_0, \bar{Y}_0$ と変数 ψ_a で表す事にすれば、以上の運動方程式は若干の演算の後、

$$\{u\}^T = \{X_b, X_c, Y_b, Y_c, \psi_a, \psi_b, \psi_c\} \quad (6)$$

を独立変数として、マトリックス形で書けば

$$[M] \{\ddot{u}\} + [c] \{\dot{u}\} + [K] \{u\} = \{F\}$$

のように書ける。ここに、右辺の $\{F\}$ は式(2)～(4)中のコンポーネント両端の局所座標系の運動 (X_i, Y_i) ($i=1 \sim 6$) を各コンポーネント重心点の並進と回転の運動 $(X_a, Y_a, \psi_a, \dots)$ に置き換えた後、式(1')より得られる外力

図9 手腕系の動力学モデル

$$\{F\}^T = \{F_1, F_2, F_3, F_4, F_5, F_6, F_7\}$$

6. 部分最適化法による関節パラメータの同定

である。 $f_1(t)$ の最小化条件は：

前節迄に求めた運動方程式及び関節物性同定法を用いて計算用プログラムを開発した。これを用いて、動特性実験に用いた3種類の姿勢、2種類のグリップ条件について、数値シミュレーションを行った。各姿勢

毎にグリップ力弱と強の両場合について（それぞれ10 N, 及び100 N）、各部の関節バネ特性を同定した。シミュレーションと実験の加振入力はいずれも正弦波形とし、1.30(mm)の加振片振幅を、垂直（Y）方向に手首重心位置で与えた。加振周波数は自動車等の固有振動特性に近い5 Hzである。シミュレーションにより得られた手腕系応答振幅分布を各姿勢パターン毎に、またグリップ強弱の別に実験結果と比較して図11に示した。なお実験モデルは表1の身長168cmの男性である。これより、グリップ強の場合には姿勢パターンの如何にかかわらず、上腕、前腕及び手首はいずれもほぼ同相のモードで運動しているのに対し、グリップが弱の場合には位相が入力点である手首から肩部にかけて逆転する現象が現れている。これは後出の表3のパラメータ同定結果から次のように説明できる。肩部の回転バネ K_{M1} はグリップ強弱の影響を受けないので、グリップ強の条件によって手首、肘等の回転バネが固くなると、腕全体は肩部の回転バネと腕全体を剛体とする振動モードとなる一方、グリップ弱の条件で、肘関節の回転バネが $2.8 \rightarrow 0.01$ のように柔らかくなると、肘部で逆相の運動モードが現れる事になる。この事は、固有モード解析の結果より確認されている。図中破線は実験値であり、また実線は数値シミュレーション結果であるが、いずれの姿勢パターン及びグリップ力条件の場合においてもシミュレーションによる応答振幅の分布は実験結果とよく一致している事がわかる。次に

図11 手腕系応答解析結果と実験結果の比較

表3はこの時得られた各関節パラメータの同定結果である。同定は加振半周期0.1秒に対し、0.001秒単位の各ステップ位置で行った。これより関節パラメータは姿勢角の如何にかかわらず、グリップ力に応じてほぼ一定の値を示し、表中の各値はいずれの姿勢パターンにも共通の結果として得られたものである。これより、関節バネ定数のうち回転バネ及びダンパ K_{M1} 、 C_{M1} が並進バネに比べて著しく小さく、またグリップ力の強弱に応じてその値がかなり変化している事がわかる。図12は手首の回転バネ K_{M1} 及び回転ダンパ C_{M1} に対する、繰り返し計算に伴う解の収束状況である。

7. 簡易モデルによる関節バネ同定

上記の数値シミュレーションと実験より、次の現象が明らかになっている：

(1). 直線運動方向のバネ定数($K_{12x}, \dots$)は回転バネ定

表3 関節バネの同定結果

単位： $K[Nm^{-1}]$, $C[Nm^{-1}s]$

joint parameter	strong grip	weak grip
K_{M1}	2.5	0.50
C_{M1}	2.0	0.50
K_{M2}	2.8	0.01
C_{M2}	1.7	0.005
K_{M3}	2.8	2.1
C_{M3}	2.0	1.10
K_{12x}	100	10
C_{12x}	50	10
K_{12y}	100	10
C_{12y}	50	10
K_{34x}	350	70
C_{34x}	150	25
K_{34y}	350	70
C_{34y}	150	25
K_{56x}	1500	650
C_{56x}	750	215
K_{56y}	1500	650
C_{56y}	750	250

図12 繰り返し計算による解の収束状況

図 13 簡略化モデルとフルモデルの応答波形の比較

表 4 フルモデルと簡略化モデルの比較 (姿勢 PA)

response at center of gravity f=5Hz	experi- mental U _{a1} 10 ⁻² m	full modelling		simplified modelling	
		U _{c^F} 10 ⁻² m	Δ _F 10 ⁻² m	U _{c^S} 10 ⁻² m	Δ _S 10 ⁻² m
Hand	1.08	1.11	0.03	1.05	0.05
fore-arm	0.34	0.36	0.02	0.35	0.01
upper-arm	-0.09	-0.10	0.01	-0.11	0.01

$$\Delta F = |U_{c^F} - U_{a1}| \quad \Delta S = |U_{c^S} - U_{a1}|$$

U_{a1}: amplitude of experimental

U_{c^F}: amplitude of simulation with full modelling

U_{c^S}: amplitude of simulation with simplified modelling

数(K_{M1},...)より著しく大きい。従って、手腕部の運動は主として回転バネにより支配されて生じ、直線バネの振動応答に及ぼす影響は小さいと考えられる。

(2). 手部加振方向より考えて各部材の関節両端を結ぶ方向の変位は非常に小さい。

以上の事より、X、Y方向直線バネの影響を省略した取扱いが可能と考えられた。そこで、直線バネK₁₁、C₁₁を省略し、肩部のX、Y方向の並進バネ(K_{56X}, C_{56X}, ...)と関節点の回転バネとダンパ(K_{M1}, C_{M1}; i=1, 2, 3)より成る二次元簡略モデルを考えて、同様の方法で動的応答と関節バネを同定した。簡略モデルの運動方程式は次のように書ける。

(1). 手部Aの運動方程式

$$I_a \ddot{\psi}_a + C_{M1}(\dot{\psi}_a - \dot{\psi}_b) + K_{M1}(\psi_a - \psi_b) + M_a L_c \sin(\theta_a + \psi_a) \ddot{X}_a + M_a L_c \cos(\theta_a + \psi_a) \ddot{Y}_a = M_a L_c^2 (\ddot{Y}_0 \cos(\theta_a + \psi_a) - \ddot{X}_0 \sin(\theta_a + \psi_a)) / (L_1 + L_c) \quad (14)$$

(2). 前腕部bの運動方程式

$$I_b \ddot{\psi}_b + C_{M1}(\dot{\psi}_b - \dot{\psi}_a) + C_{M2}(\dot{\psi}_b - \dot{\psi}_c) + K_{M1}(\psi_b - \psi_a) + K_{M2}(\psi_b - \psi_c) = 0 \quad (15)$$

(3). 上腕部cの運動方程式

$$M_c \ddot{X}_c + C_{56X}(\dot{X}_5 - \dot{X}_6) + K_{56X}(X_5 - X_6) = 0 \quad (16)$$

$$M_c \ddot{Y}_c + C_{56Y}(\dot{Y}_5 - \dot{Y}_6) + K_{56Y}(Y_5 - Y_6) = 0 \quad (17)$$

$$I_c \ddot{\psi}_c + C_{M2}(\dot{\psi}_c - \dot{\psi}_b) + C_{M3} \dot{\psi}_c + K_{M2}(\psi_c - \psi_b) + K_{M3} \psi_c = 0 \quad (18)$$

式(14)~(18)の簡略化モデルを用いて、式中の関節パラメータを前章の手法により実験と合うように同定した結果、シミュレーションの結果が実験により得られた振動モードをよく再現することがわかった。図13にフルモデルとの応答波形の比較を示す。また、これより得られた関節バネの同定結果を、先に求めた二次元フルモデルの結果と比較すれば表4のようになる。これより、簡略モデルによる同定結果とフルモデルによる同定結果はほぼ一致し、手腕系の運動はこのような簡略モデルにより容易に取扱える事が明らかとなった。

8. ま と め

本研究により次の事が明らかとなった。

- (1) 手腕系の2次元モデルの応答を支配する運動方程式を求めると共に、関節バネとダンパ特性を運動解析と実験の比較から求めた。この結果、いずれの姿勢パターンでもシミュレーションによる応答は実験結果をよく表す事が分かった。
- (2) 手首、肘、肩部のバネは手部、前腕、上腕の各姿勢角によって変化せずほぼ一定の値となる。
- (3) グリップ力の強弱によって、手部よりの加振入力に対する手腕系の応答及び関節バネには、かなりの差異が生じ、グリップ弱の場合には位相の逆転する振動モードが生じる。
- (4) 手腕系の運動支配パラメータのうち、手首や肘の並進バネやダンパは省略して取扱える。
- (5) 手首、肘、肩の各関節に各6自由度の関節バネやダンパを有する、本解析モデルのような場合、多段最適化手法が有効である。

9. 参 考 文 献

1. D.D.Reynolds, et al.: Hand-Arm Vibration, Part I. J. of Sound AND Vibration, 1977, 51(2), 237-253,
2. D.D.Reynolds, et al.: Hand-Arm Vibration, Part II. J. of Sound AND Vibration, 1977, 53(4), 545-558,
3. T.Tsuta et al., "Development Of CAET, CAE System for Frome Design of Motorcycle", SAE Paper, 891776.
4. T.Tomita, et al.: Analysis of Longitudinal Motion of the Rider/Motorcycle System. e.g., Jumping over an Obstacle. SAE paper, 840247.
5. J.Wismans, et al.: Status of the MADYMO Crash Victim Simulation Package 1985 by TNO..

付録 A 式(7)の外力{F}について

座標変換式(1),(1')を式(2)~(4)に用いて、局所座標系 $X_i, Y_i (i=1, 6)$ と X_a, Y_a を消去する。この結果式(2)の三つの方程式は一つになる共に、(2)~(4)式で併せて7自由度の運動方程式に纏められる。この結果得られる荷重ベクトルは次のように書ける。

$$\begin{aligned} \{F\}^T &= \{F(1), F(2), F(3), F(4), F(5), F(6), F(7)\} \\ \text{ここでは、簡単の為 } \ddot{x}_0 \text{ と } \ddot{y}_0 \text{ を } x_0 \text{ と } y_0 \text{ で略記して示す事に} \\ \text{すれば、上式中の各成分はそれぞれ次の様に書ける。} \\ F(1) &= C_{12x} \ddot{x}_0 + K_{12x} (x_0 + L_2 (\sin(\theta_b - \psi_b) - \sin(\theta_b)) + \\ &\quad L_1 (\sin(\theta_a - \psi_a) - \sin(\theta_a))) - K_{34x} (L_3 (\sin(\theta_b - \psi_b) \\ &\quad - \sin(\theta_b)) + L_4 (\sin(\theta_c - \psi_c) - \sin(\theta_c))) \\ F(2) &= -K_{34x} (L_3 (\sin(\theta_b - \psi_b) - \sin(\theta_b)) + L_4 (\sin(\theta_c - \\ &\quad \psi_c) - \sin(\theta_c))) - K_{56x} (L_5 (\sin(\theta_c - \psi_c) - \sin(\theta_c))) \\ &\quad + C_{12x} \ddot{x}_0 + K_{12x} x_0 \\ F(3) &= -C_{12y} \ddot{y}_0 - K_{12y} (y_0 + L_1 (\cos(\theta_a - \psi_a) - \cos(\theta_a)) \\ &\quad + L_2 (\cos(\theta_b - \psi_b) - \cos(\theta_b))) - K_{34y} (L_3 (\cos(\theta_b \\ &\quad - \psi_b) - \cos(\theta_b)) + L_4 (\cos(\theta_c - \psi_c) - \cos(\theta_c))) \\ F(4) &= -K_{34y} (L_3 (\cos(\theta_b - \psi_b) - \cos(\theta_b)) + L_4 (\cos(\theta_c \\ &\quad - \psi_c) - \cos(\theta_c))) + K_{56y} (L_5 (\cos(\theta_c - \psi_c) - \cos(\theta_c))) \\ F(5) &= -(M_a \ddot{x}_0 + K_{12x} (x_0 + L_1 (\sin(\theta_a - \psi_a) - \sin(\theta_a)) \\ &\quad + L_2 (\sin(\theta_b - \psi_b) - \sin(\theta_b))) + C_{12x} \ddot{x}_0 + \\ &\quad K_{12x} (y_0 + L_1 (\cos(\theta_a - \psi_a) - \cos(\theta_a)) + L_2 (\cos(\theta_b \\ &\quad - \psi_b) - \cos(\theta_b))) + C_{12y} \ddot{y}_0 - K_{12y} (L_1 - L_0) \sin(\theta_a - \\ &\quad \psi_a) (y_0 + L_1 (\cos(\theta_a - \psi_a) - \cos(\theta_a)) + L_2 (\cos(\theta_b \\ &\quad - \psi_b) - \cos(\theta_b)) + C_{12y} \ddot{y}_0 - K_{12x} (L_1 - L_0) \cos(\theta_a - \\ &\quad \psi_a) (x_0 + L_1 (\sin(\theta_a - \psi_a) - \sin(\theta_a)) + L_2 (\sin(\theta_b \\ &\quad - \psi_b) - \sin(\theta_b)) + C_{12x} \ddot{x}_0) \\ F(6) &= K_{12y} L_2 \sin(\theta_b - \psi_b) (y_0 + L_2 (\cos(\theta_b - \psi_b) - \\ &\quad \cos(\theta_b)) + L_1 (\cos(\theta_a - \psi_a) - \cos(\theta_a))) - K_{34y} L_3 \cdot \\ &\quad \sin(\theta_b - \psi_b) (L_3 (\cos(\theta_b - \psi_b) - \cos(\theta_b)) + \\ &\quad L_4 (\cos(\theta_c - \psi_c) - \cos(\theta_c))) - C_{12y} L_2 \sin(\theta_b - \psi_b) \ddot{y}_0 \\ &\quad - C_{12x} L_2 \cos(\theta_b - \psi_b) \ddot{x}_0 + K_{12x} L_2 \cos(\theta_b - \psi_b) \\ &\quad (L_2 (\sin(\theta_b - \psi_b) - \sin(\theta_b)) + x_0 + L_1 (\sin(\theta_a - \psi_a) \\ &\quad - \sin(\theta_a))) - K_{34x} L_3 \cos(\theta_b - \psi_b) (L_3 (\sin(\theta_b - \psi_b) \\ &\quad - \sin(\theta_b)) + L_4 (\sin(\theta_c - \psi_c) - \sin(\theta_c))) \\ F(7) &= K_{34y} L_4 \sin(\theta_c - \psi_c) (L_4 (\cos(\theta_c - \psi_c) - \cos(\theta_c)) + \\ &\quad L_3 (\cos(\theta_b - \psi_b) - \cos(\theta_b))) + K_{34x} L_4 \cos(\theta_c - \psi_c) \\ &\quad (L_4 (\sin(\theta_c - \psi_c) - \sin(\theta_c)) + L_3 (\sin(\theta_b - \psi_b) - \\ &\quad \sin(\theta_b))) - K_{56y} (L_5 (\cos(\theta_c - \psi_c) - \cos(\theta_c))) L_5 \\ &\quad \sin(\theta_c - \psi_c) - K_{56x} (L_5 (\sin(\theta_c - \psi_c) - \sin(\theta_c))) \\ &\quad L_5 \cos(\theta_c - \psi_c) \end{aligned}$$