人体上体系の三次元動力学モデリングと 実験による力学物性の同定*

葛 紀 夫*¹, 白 傑*²

Dynamic Modeling of the Upper Part of a Human Body and Identification of Joint Parameters by Experiment

Toshio TSUTA and Jie BAI

This paper presents a three-dimensional dynamic modeling of the upper part of a passenger's body, carried out using a three-mass system for the head, chest and hip. The equations of motions for the system are formulated using the Lagrange method. A dynamic excitation apparatus for the human body was manufactured, and experiments on the human body have been conducted for three exciting directions, the frontal, the transverse, and the vertical. Joint parameters, such as damping and spring constants of the neck, abdomen, and lower-hip portion are identified using the multistage method of the partial optimization technique with a least squares approach, for minimizing the discrepancy between the theoretical and excitation test results. It is shown through the comparison of calculated results with those of experimental results that the motion of a human upper body under sinusoidal excitations can be easily analysed using this approach.

Key Words: Human Body, Dynamic, Modeling, Identification, Joint, Damping, Spring, Excitation, Experiment, Partial Optimization Technique

1. ま え が き

近年, 乗用車の高級化, 高性能化に伴い, 快適性の一つである乗り心地に対する性能が高まってきた。乗り心地性能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。また, 性能向上とともに, 衝突事故や死亡事故も増加傾向にあって社会問題となっている。衝突現象のシミュレーションには人体多関節系の動特性の解析を含めた, 乗員挙動シミュレーションが必要となる。

人体動力学特性に関する研究は, 自動車衝突シミュレーションの研究とともに進められてきた。オランダのTNOにより人体モデリングMADYMO⁽²⁾(2Dと3D)が開発された。このモデルの構造は, 関節がヒンジ結合のリング状剛体連接体である。しかし, このモデルに関するデータおよび研究等は一般に公開されていない。

本研究では, 人体上体系である頭部, 胸部, 腰部の3質点と, これらを接続する首, 腹部および腰下部の

各部関節の並進および回転ばね, ダンパから成る系について, 上下, 前後, 左右および各軸回りの回転の6自由度の運動に関する, 多関節系の動力学モデリングをラグランジュ法により行った。得られた質点系の運動方程式の解と, 実人間モデルを用いた加振実験の結果

図1 上体系の筋骨格系と関節運動

* 平成4年9月30日 第70期全国大会において講演, 原稿受付 平成4年9月2日。

*¹ 正員, 広島大学工学部(〒724 東広島市鏡山1-4-1)。

*² 准員, 広島大学大学院。

果に、最小二乗法と部分最適化手法を用いて、関節ばね等の系の動特性を同定した。また得られた関節定数を用いて、上体系の振動シミュレーションを行えるかどうかを正弦波加振実験結果との比較により明らかにした。

2. 人体上体系の動力学モデルと運動方程式

上体系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。上体系は腰と胸間の腹関節および胸と頭部間の首関節で構成される3部材、2関節系の三次元モデルと考えることができる。ここでは、さらに上体系の腰とシート間に並進および回転のばねとダンパを付加して図2のような上体系のモデルを考える。

図2に示すように姿勢角 $\alpha_j, \theta_j, \beta_j (j=1, 2, 3)$ で構成される3部材、3関節系の三次元モデルを考える。首部および腰部の質量は半分ずつに分けてそれぞれ隣接質点に振り分ける。X, Y を水平面内、また Z を垂直方向に取った直交座標系を決める。ここに X-Y 面内の回転角度を α 、部材 j の X-Y 面への投影角を θ 、また部材軸回りの回転角を β とする。以下に用いる変数と記号の意味は次のとおりである。

m_1, m_2, m_3 : 腰, 胸, 頭の質量

$\alpha_j, \theta_j, \beta_j$: 各部材 j 重心回りの回転角

X_j, Y_j, Z_j : 各部材重心の x, y, z 方向の変位

$I_{\alpha j}, I_{\theta j}, I_{\beta j}$: 各回転角と対応する慣性モーメント

$C_{\alpha j}, C_{\theta j}, C_{\beta j}$: 回転角と対応する関節の回転ダンパ

$K_{\alpha j}, K_{\theta j}, K_{\beta j}$: 回転角と対応する関節の回転ばね

K_x, K_y, K_z : 腰部とシート間の並進ばね

C_x, C_y, C_z : 腰部のシート間の並進ダンパ

ϕ_{ij} : 各部材 j の α, θ, β 面内姿勢動角の初期値

一次元上体系の動力学モデル⁽⁴⁾⁽⁵⁾ 研究結果より、首および腰部については、X, Y, Z 方向の並進ばねの影響を省略して取扱えることが知られているので、本研究

図2 上体系の動力学モデル

でもこの条件で問題を取扱った。すなわち、腰と胸間および胸と頭部の関節は、各方向 (α, θ, β) の回転ばね、ダンパでモデル化する。また、シートと腰部の関節は上下、前後、左右および回転のばねでモデル化する。

ラグランジュ法により図のモデルに基づいて運動方程式を作ればそれぞれ次のようになる。

$$\frac{d}{dt} \cdot \frac{\partial L}{\partial \dot{\psi}} - \frac{\partial L}{\partial \psi} = Q_{\psi} \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 T は運動エネルギー、 U は位置エネルギー、 Q は一般化力、またラグランジュ関数は $L = T - U$ であり、

また、

$$\psi^T = \{ \{X\}^T, \{Y\}^T, \{Z\}^T, \{\alpha_j\}^T, \{\theta_j\}^T, \{\beta_j\}^T \}$$

$$\{X\}^T = \{X_1, X_2, X_3\}, \{\alpha\}^T = \{\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \dots\}$$

である。

上式の Q, T および U は図2を参考に次のように書ける。

$$\begin{aligned} Q = & -(C_{\theta 1} \dot{\theta}_1 + \theta_{\theta 2} (\dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_1) + C_{\theta 3} (\dot{\theta}_3 - \dot{\theta}_2)) - (C_{\alpha 1} \dot{\alpha}_1 + C_{\alpha 2} (\dot{\alpha}_2 - \dot{\alpha}_1) + C_{\alpha 3} (\dot{\alpha}_3 - \dot{\alpha}_2)) \\ & - (C_{\beta 1} \dot{\beta}_1 + C_{\beta 2} (\dot{\beta}_2 - \dot{\beta}_1) + C_{\beta 3} (\dot{\beta}_3 - \dot{\beta}_2)) - C_x \dot{X}_0 - C_y \dot{Y}_0 - C_z \dot{Z}_0 \\ & - (m_1 \cdot \dot{Y}_0^2 \cdot L_0 \cdot \cos(\theta_1 + \phi_{\theta 1})) \cdot (\theta_1 + \phi_{\theta 1}) - (m_2 \cdot \dot{Y}_0^2 \cdot L_2 \cdot \cos(\theta_2)) \theta_2 \\ & - (m_3 \cdot \dot{Y}_0^2 \cdot L_4 \cdot \cos(\theta_3 + \phi_{\theta 3})) (\theta_3 + \phi_{\theta 3}) - (m_1 \cdot \dot{X}_0^2 \cdot L_0 \cdot \cos(\alpha_1 + \phi_{\alpha 1})) (\alpha_1 + \phi_{\alpha 1}) \\ & - (m_2 \cdot \dot{X}_0^2 \cdot L_2 \cdot \cos(\alpha_2 + \phi_{\alpha 2})) (\alpha_2 + \phi_{\alpha 2}) - (m_3 \cdot \dot{X}_0^2 \cdot L_4 \cdot \cos(\alpha_3 + \phi_{\alpha 3})) (\alpha_3 + \phi_{\alpha 3}) - M(\beta_1 + \phi_{\beta 1}) \quad \dots \dots \dots (2) \end{aligned}$$

$$T = \sum_{i=1}^3 \left(\frac{1}{2} I_{\theta i} \dot{\theta}_i^2 + \frac{1}{2} I_{\beta i} \dot{\beta}_i^2 + \frac{1}{2} I_{\alpha i} \dot{\alpha}_i^2 \right) + \frac{1}{2} \{m_1, m_2, m_3\} (\{\dot{X}^2\} + \{\dot{Y}^2\} + \{\dot{Z}^2\}) \quad \dots \dots \dots (3)$$

$$U = \frac{1}{2} K_{\theta 1} \theta_1^2 + \frac{1}{2} K_{\theta 2} (\theta_2 - \theta_1)^2 + \frac{1}{2} K_{\theta 3} (\theta_3 - \theta_2)^2 + \frac{1}{2} K_{\alpha 1} \alpha_1^2 + \frac{1}{2} K_{\alpha 2} (\alpha_2 - \alpha_1)^2 + \frac{1}{2} K_{\alpha 3} (\alpha_3 - \alpha_2)^2$$

$$+\frac{1}{2}K_{\beta 1}\beta_1^2+\frac{1}{2}K_{\beta 2}(\beta_2-\beta_1)^2+K_{\beta 3}(\beta_3-\beta_2)^2+\left(\frac{1}{2}K_X X_o^2+\frac{1}{2}K_Y Y_o^2+\frac{1}{2}K_Z Z_o^2\right) \quad (4)$$

ここに、 $M(\beta_j + \phi_{\beta j})$ は各部材 j に作用する β 角面内のモーメント、添字 “ o ” はシートの運動、また、“ $\dot{}$ ” = $\partial/\partial t$, “ $\ddot{}$ ” = $\partial^2/\partial t^2$ を表す。

(a) 腰部の X, Y, Z 方向の運動方程式：

$$\{m_1, m_2, m_3\}\{\ddot{X}\} + C_x \dot{X}_o + K_x X_o = 0 \quad (5)$$

$$\{m_1, m_2, m_3\}\{\ddot{Y}\} + C_y \dot{Y}_o + K_y Y_o = 0 \quad (6)$$

$$\{m_1, m_2, m_3\}\{\ddot{Z}\} + C_z \dot{Z}_o + K_z Z_o = 0 \quad (7)$$

(b) 各部の角度 α に関する回転力の平衡方程式：

$$I_{a1} \ddot{\alpha}_1 + (C_{a1} + C_{a2}) \dot{\alpha}_1 - C_{a1} \dot{\alpha}_2 + (K_{a1} + K_{a2}) \alpha_1 - K_{a1} \alpha_2 = m_1 \cdot \dot{X}_o^2 \cdot L_o \cdot \cos(\alpha_1 + \phi_{a1}) \quad (8)$$

$$I_{a2} \ddot{\alpha}_2 - C_{a2} \dot{\alpha}_1 + (C_{a2} + C_{a3}) \dot{\alpha}_2 - C_{a3} \dot{\alpha}_3 - K_{a2} \alpha_1 + (K_{a2} + K_{a3}) \alpha_2 - K_{a3} \alpha_3 \\ = m_2 \dot{X}_o^2 L_2 \cos(\alpha_2 + \phi_{a2}) \quad (9)$$

$$I_{a3} \ddot{\alpha}_3 - C_{a3} \dot{\alpha}_2 + C_{a3} \dot{\alpha}_3 - K_{a3} \alpha_2 + K_{a3} \alpha_3 = (m_2 \cdot \dot{X}_o^2 \cdot L_4 \cdot \cos(\alpha_3 + \phi_{a3})) \quad (10)$$

(c) 各部の角度 θ に関する回転力の平衡方程式：

$$I_{\theta 1} \ddot{\theta}_1 + (C_{\theta 1} + C_{\theta 2}) \dot{\theta}_1 - C_{\theta 1} \dot{\theta}_2 + (K_{\theta 1} + K_{\theta 2}) \theta_1 - K_{\theta 1} \theta_2 = m_1 \dot{Y}_o^2 L_o \cos(\theta_1 + \phi_{\theta 1}) \quad (11)$$

$$I_{\theta 2} \ddot{\theta}_2 - C_{\theta 2} \dot{\theta}_1 + (C_{\theta 2} + C_{\theta 3}) \dot{\theta}_2 - C_{\theta 3} \dot{\theta}_3 - K_{\theta 2} \theta_1 + (K_{\theta 2} + K_{\theta 3}) \theta_2 - K_{\theta 3} \theta_3 \\ = m_2 \dot{Y}_o^2 L_2 \cos(\theta_2 + \phi_{\theta 2}) \quad (12)$$

$$I_{\theta 3} \ddot{\theta}_3 - C_{\theta 3} \dot{\theta}_2 + C_{\theta 3} \dot{\theta}_3 - K_{\theta 3} \theta_2 + K_{\theta 3} \theta_3 = (m_3 \cdot \dot{Y}_o^2 \cdot L_4 \cdot \cos(\theta_3 + \phi_{\theta 3})) \quad (13)$$

(d) 各部の角度 β に関する回転力の平衡方程式：

$$I_{\beta 1} \ddot{\beta}_1 + (C_{\beta 1} + C_{\beta 2}) \dot{\beta}_1 - C_{\beta 1} \dot{\beta}_2 + (K_{\beta 1} + K_{\beta 2}) \beta_1 - K_{\beta 1} \beta_2 = M(\beta_1 + \phi_{\beta 1}) \quad (14)$$

$$I_{\beta 2} \ddot{\beta}_2 - C_{\beta 2} \dot{\beta}_1 + (C_{\beta 2} + C_{\beta 3}) \dot{\beta}_2 - C_{\beta 3} \dot{\beta}_3 - K_{\beta 2} \beta_1 + (K_{\beta 2} + K_{\beta 3}) \beta_2 - K_{\beta 3} \beta_3 \\ = M(\beta_2 + \phi_{\beta 2}) \quad (15)$$

$$I_{\beta 3} \ddot{\beta}_3 - C_{\beta 3} \dot{\beta}_2 + C_{\beta 3} \dot{\beta}_3 - K_{\beta 3} \beta_2 + K_{\beta 3} \beta_3 = M(\beta_3 + \phi_{\beta 3}) \quad (16)$$

上式中の各重心点の並進運動パラメータには、図2の諸元を参照して、それぞれ次のような座標変換関係がある。

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= x_0 - L_0 \cdot \sin(\theta_1 + \phi_{\theta 1}) \cdot \cos(\alpha_1 + \phi_{a1}) \\ x_2 &= x_1 - (L_1 - L_0) \cdot \sin(\theta_1 + \phi_{\theta 1}) \cdot \cos(\alpha_1 + \phi_{a1}) - L_2 \cdot \sin(\theta_2 + \phi_{\theta 2}) \cdot \cos(\alpha_2 + \phi_{a2}) \\ x_3 &= x_2 - (L_3 - L_2) \cdot \sin(\theta_2 + \phi_{\theta 2}) \cos(\alpha_2 + \phi_{a2}) - L_4 \cdot \sin(\theta_3 + \phi_{\theta 3}) \cos(\alpha_3 + \phi_{a3}) \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

$$\left. \begin{aligned} y_1 &= y_0 - L_0 \cdot \sin(\theta_1 + \phi_{\theta 1}) \cdot \sin(\alpha_1 + \phi_{a1}) \\ y_2 &= y_1 - (L_1 - L_0) \cdot \sin(\theta_1 + \phi_{\theta 1}) \cdot \sin(\alpha_1 + \phi_{a1}) - L_2 \cdot \sin(\theta_2 + \phi_{\theta 2}) \sin(\alpha_2 + \phi_{a2}) \\ y_3 &= y_2 - (L_3 - L_2) \cdot \sin(\theta_2 + \phi_{\theta 2}) \sin(\alpha_2 + \phi_{a2}) - L_4 \cdot \sin(\theta_3 + \phi_{\theta 3}) \sin(\alpha_3 + \phi_{a3}) \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

$$\left. \begin{aligned} z_1 &= z_0 - L_0 \cdot \cos(\theta_1 + \phi_{\theta 1}) \\ z_2 &= z_1 - (L_1 - L_0) \cdot \cos(\theta_1 - \phi_{\theta 1}) - L_2 \cdot \cos(\theta_2 + \phi_{\theta 2}) \\ z_3 &= z_2 - (L_3 - L_2) \cdot \cos(\theta_2 + \phi_{\theta 2}) - L_4 \cdot \cos(\theta_3 + \phi_{\theta 3}) \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

上式中添字 “ 0 ” はシートの運動を表す。

式(5)～(16)に上式を用いれば、若干の計算の後 $u^T = \{x_1, y_1, z_1, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \theta_1, \theta_2, \theta_3, \beta_1, \beta_2, \beta_3\}$ を独立変数として、次のようなマトリックス形で書き表せる。

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F\} \quad (20)$$

連立1階の形

$$\left. \begin{aligned} \dot{u} &= v \\ v &= M^{-1}\{F(t) - C \cdot v - K \cdot u\} \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

に変換して、Runge-Kutta 法により：

$$\left\{ \begin{aligned} \Delta u_1 &= \Delta t \cdot v \\ \Delta u_2 &= \Delta t \{v + \Delta t \cdot M^{-1}[F(t) - Cv - Ku]\} \\ \Delta u_3 &= \Delta t \{v + \Delta t \cdot M^{-1}(F(t + \Delta t/2) - Cv - Ku)\} \\ \Delta u_4 &= \Delta t \{v + \Delta t \cdot M^{-1}(F(t + \Delta t) - Cv + Ku)\} \end{aligned} \right.$$

と置けば、時刻 t_i の応答を与えて、 $t_i + \Delta t$ の応答は次式により求められる。

$$u(t_i + \Delta t) = u(t_i) + (\Delta u_1 + 2\Delta u_2 + 2\Delta u_3 + \Delta u_4)/6 \dots\dots\dots (22)$$

ここに,

$$[M] = \begin{bmatrix} m & & & & & & & & \\ & m_{14} & m_{15} & m_{16} & m_{17} & m_{18} & m_{19} & & \\ & & m & m_{24} & m_{25} & m_{26} & m_{27} & m_{28} & m_{29} \\ & & & m & & & & m_{37} & m_{38} & m_{39} \\ & & & & I_{a1} & & & & & \\ & & & & & I_{a2} & & & & \\ & & & & & & I_{a3} & & & \\ & & & & & & & I_{\theta 1} & & \\ & & & & & & & & I_{\theta 2} & \\ & & & & & & & & & I_{\theta 3} \\ & & & & & & & & & & I_{\beta 1} \\ & & & & & & & & & & & I_{\beta 2} \\ & & & & & & & & & & & & I_{\beta 3} \end{bmatrix}$$

ただし, 上式中において, $m = m_1 + m_2 + m_3$

$$m_{14} = -(m_2 + m_3)(L_1 - L_0) \cdot \sin(\theta_1 + \phi_{\theta 1}) \\ \times \cos(\alpha_1 + \phi_{a1})$$

$$m_{15} = -(m_2 L_2 + m_3 L_3) \cdot \sin(\theta_2 + \phi_{\theta 2}) \\ \times \cos(\alpha_2 + \phi_{a2})$$

$$m_{16} = -m_3 L_4 \cdot \sin(\theta_3 + \phi_{\theta 3}) \cos(\alpha_3 + \phi_{a3})$$

$$m_{17} = -(m_2 + m_3)(L_1 - L_0) \cdot \cos(\theta_1 + \phi_{\theta 1}) \\ \times \sin(\alpha_1 + \phi_{a1})$$

$$m_{18} = -(m_2 L_2 + m_3 L_3) \cdot \cos(\theta_2 + \phi_{\theta 2}) \\ \times \sin(\alpha_2 + \phi_{a2})$$

$$m_{19} = -m_3 L_4 \cdot \cos(\theta_3 + \phi_{\theta 3}) \sin(\alpha_3 + \phi_{a3})$$

$$m_{24} = -(m_2 + m_3)(L_1 - L_0) \cdot \sin(\theta_1 + \phi_{\theta 1}) \\ \times \sin(\alpha_1 + \phi_{a1})$$

$$m_{25} = -(m_2 L_2 + m_3 L_3) \cdot \sin(\theta_2 + \phi_{\theta 2}) \\ \times \sin(\alpha_2 + \phi_{a2})$$

$$m_{26} = -m_3 L_4 \cdot \cos(\theta_3 + \phi_{\theta 3}) \cos(\alpha_3 + \phi_{a3})$$

$$m_{27} = -(m_2 + m_3)(L_1 - L_0) \cdot \cos(\theta_1 + \phi_{\theta 1})$$

$$m_{28} = -(m_2 L_2 + m_3 L_3) \cdot \cos(\theta_2 + \phi_{\theta 2}) \\ \times \cos(\alpha_2 + \phi_{a2})$$

$$m_{29} = -m_3 L_4 \cdot \cos(\theta_3 + \phi_{\theta 3}) \cos(\alpha_3 + \phi_{a3})$$

$$m_{34} = (m_2 + m_3)(L_1 - L_0) \cdot \sin(\theta_1 + \phi_{\theta 1})$$

$$m_{35} = (m_2 L_2 + m_3 L_3) \cdot \sin(\theta_2 + \phi_{\theta 2})$$

$$m_{36} = m_3 L_4 \cdot \sin(\theta_3 + \phi_{\theta 3})$$

[K] および [C] も同じように求められる(付録参照)

3. 上体系の加振実験

3.1 上体系の部分重量, 重心位置の計測 浮力の原理による計測方法を用いて[文献(1)参照], 上体系の腰部, 胸部, 頭部等各部分の重心位置および各部分重量の計測を行った。モデルは研究室の学生3人を対象とした。その測定結果をまとめて表1に示す(記号は図2参照)。

なお, 各軸まわりの慣性モーメントは分布質量とその位置から近似計算⁽³⁾により求めた。

3.2 上体系の加振実験 上体系である, 頭部, 胸部, 腰部および首関節, 腹部関節等より成る三次元系(図2参照)を対象とする。代表的な座姿勢について, 腰部より受ける左右, 前後, 上下方向の加振入力条件に対する応答を, 加振周波数と加振振幅を変化させ, 計測センサであるひずみ-変位変換器を用いて, 3人の学生について, その各部分の重心点応答特性を求める実験を行った。

(1) 加振装置

試作した上体系の加振装置の概念図を図3に示す。

この加振装置は着座姿勢の人間を前後, 左右, 上下に加振することができる。また, 加振振幅を変化させることができる機構をそなえ, 駆動源のvsモータの回転数を変化させることで加振周波数も変化させることができる。

(2) 計測システム

表1 上体系の各部分寸法, 重量, 重心位置

parameter	model A	model B	model C
stature (m)	1.65	1.73	1.80
weight(10N)	50.5	55.4	77.3
L ₄ (m)	0.13	0.13	0.14
head L ₅ (m)	0.24	0.23	0.25
m ₃ (10N)	3.37	3.74	5.20
L ₂	0.25	0.24	0.26
chest L ₃	0.48	0.47	0.47
m ₂	11.2	12.2	17.4
L ₀	0.08	0.08	0.09
waist L ₁	0.13	0.13	0.14
m ₁	12.2	13.2	19.3

図 3 上体系の加振装置

図 4 モデル A の加振応答

各重心点と加振点の変位の計測については、ビデオカメラによる撮影、コンピュータ処理を用いた画像処理システムによる方法と、ひずみ-変位変換器と動ひずみ測定器、FFT アナライザなどを用いたシステムによる方法との 2 種類の計測法を併用した。

3.3 計測結果 一例として、モデル A(表 1)についての計測結果を図 4 に示す。図 4 中(a)および(b)は加振周波数 0.8 Hz, 加振片振幅 0.1 m の入力加振の場合について、上体系各重心点の変位応答を、加振方向が前後および左右の場合についての計測結果である。これより上体系各重心の水平運動は、加振台車の運動と比べて、顕著な位相のずれが現れ、例えば頭部重心と加振台車は逆位相で運動していることがわかる。

また台車の加振周波数と加振振幅を変化させた実験

を、3 人の学生モデルについて行った。一例として、前後加振の場合のモデル A の頭部重心の応答振幅の計測結果を同図 4 (c) に示す。一定の台車加振振幅の場合、頭部の応答振幅は加振周波数の増加とともに大きくなる。実人間の加振実験では、危険を避けるために、今回は 1 Hz と 20 cm の振幅までの実験を行った。次に加振振幅 0.1 [m] の場合に同定した関節定数を用いて、周波数ごとの頭部重心点の応答解析を行った。これを実験結果と比較して同図 4 (c) に示す。これより両結果はほぼ一致していることがわかる。

図 4 (d) は計算による前後加振時の固有振動数と振動モードであり、一次モードが 0.40 [Hz], 二次モードが 1.02 [Hz], また三次モードは 1.71 [Hz] 付近にあることがわかる。このうち二次モードでは、頭部と腰部が逆位相で運動するため、1 Hz 付近の加振の場合に

表 2 モデル A の関節定数の同定結果

	Joint Parameter			
	k_{α_2}	C_{α_2}	k_{α_3}	C_{α_3}
K: Nm^{-1}				
C: Nm^{-1}s				
model	1.74	0.657	1.24	11.2
A	2.15	0.677	1.36	31.8

図 5 関節定数同定のフローチャート

は、頭部と腰部が逆位相で運動することになる。

4. 上体多関節系の力学物性の同定

4.1 同定法 4章に求めた上体系の運動方程式と、多段最適化同定法⁽¹⁾を用いて、関節の力学物性の同定計算用プログラムを開発した。計算のフローチャートを図5に示す。ただし、図中の記号の意味は次のとおり(図2参照)。

$\{b_{m1}\}^T = \{K_{\theta 2}, C_{\theta 2}, K_{\theta 3}, C_{\theta 3}\}$: 首関節のばね参数

$\{b_{m2}\}^T = \{K_{\theta 3}, C_{\theta 3}, K_{\theta 3}, C_{\theta 3}\}$: 腹関節のばね参数

$f_i(t)$: 最小二乗法の部分目的関数

$U_{ci}(t)$: 時刻歴応答の計算値

$U_{ei}(t)$: 時刻歴応答の実験値 ($i=1$: 胸部; $i=2$: 頭部)

$F(t)$: 胸部+頭部の目的関数

また各ステップの計算の流れは次のとおり。

(1) 第1ステップ: 計算応答と実験値の差の二乗

(a) 胸部重心応答

(b) 頭部重心応答

図 6 前後加振実験と同定結果の比較(加振振幅 $L=0.1$ m, 周波数 $f=0.8$ Hz)

図 7 シミュレーションと実験の比較(加振振幅 $L=0.2$ m, 周波数 $f=0.5$ Hz)

を部分目的関数として、この残差が最小となるように腹部の関節定数 $\{b_{m1}\}$ を、 $\partial f_i(t)/\partial \{b_{m1}\}=0$ 条件より決める。

(2) 第2ステップ: 第1ステップで求めた腹部ばねを既知量として与えて、目的関数 $f_2(t)$ の最小条件から首節のばねの部分最適化をステップ1と同様に行う。

以下同様にして首節ばねを既知量として、腹部ばねをもう一度決め直す。このプロセスを両者の解が収束するまで繰返すことにより、腹部と首節の関節ばねが求められる。

5. 結 論

本研究の結果より次のことが明らかとなった。

(2) 試作した前後、左右、上下加振装置によって、実人間の上体系の加振振動特性を求め実験的にこれを明らかにした。その結果は、頭部の応答は加振波形と逆位相となることがわかった。

(3) 人体上体系の各関節部のばねやダンパ特性を、実験とシミュレーションにより得られる応答を比較しながら、多段階最適化同定システムにより首、腰部及び腰下部についてこれを同定することができた。

(4) ばねやダンパを同定した上体系のモデルを用いて、腰下部に任意の正弦波加振を受けるシミュレーションと実験の結果を比較した。その結果、シミュレーションによる応答は実験結果をよく表すことがわかった。

(5) 以上の結果, 上体系の動特性はこのようなシミュレーションによって, その応答特性が予測できるようになった。

付 録

$$C = \begin{pmatrix} C_x & & & & & \\ & C_y & & & & \\ & & C_z & & & \\ & & & C_{\alpha_1} + C_{\alpha_2} & -C_{\alpha_1} & \\ & & & -C_{\alpha_2} & C_{\alpha_2} + C_{\alpha_3} & -C_{\alpha_3} \\ & & & & -C_{\alpha_3} & C_{\alpha_3} \\ & & & & & C_{\theta_1} + C_{\theta_2} & -C_{\theta_1} \\ & & & & & -C_{\theta_2} & C_{\theta_2} + C_{\theta_3} & -C_{\theta_3} \\ & & & & & & -C_{\theta_3} & C_{\theta_3} \\ & & & & & & & C_{\beta_1} + C_{\beta_2} & -C_{\beta_1} \\ & & & & & & & -C_{\beta_2} & C_{\beta_2} + C_{\beta_3} & -C_{\beta_3} \\ & & & & & & & & -C_{\beta_3} & C_{\beta_3} \end{pmatrix}$$