

動力学的分析のための身体パラメータ同定

小池 関也^{*1}, 永井 悠樹^{*2}, 仲谷 政剛^{*3}

Identification of the Body Specific Parameters for Dynamic Contribution Analysis

Sekiya KOIKE^{*1}, Yuki NAGAI^{*2} and Seigo NAKAYA^{*3}

^{*1} University of Tsukuba, Faculty of Health and Sport Sciences
Ten-nodai 1-1-1, Tsukuba City, Ibaraki Pref., 305-8574 Japan

The purpose of this study was to propose a methodology which realizes residual error reduction of whole-body CG's acceleration by modifying body specific parameters (e.g. mass, moment of inertia, and position of CG at each segment) for a dynamic contribution analysis of human movements. Since the dynamic contribution analysis, which decomposes generalized acceleration vector of target system into joint torque, gravity, and motion dependent terms, is based on the equation of whole-body motion, a type of analytical formula of the equation of motion was derived by the combination of 1) equations of motion for individual segments and 2) geometric constraint equations of segments connecting to its adjacent segments with the joints. In order to obtain the relationships between the inertia parameters and the whole-body CG's accelerations, a sensitive matrix relating inertia parameter vector to the whole-body CG's acceleration vector was calculated by adding 1% perturbation in nominal value of each inertia parameter. And then by using the sensitive matrix and the error acceleration vector at each time, an error equation with respect to the inertia parameters was derived in matrix form expression. A renewal parameter vector was calculated by the method of least square from the error equation with use of a constraint condition and a step size coefficient in order to deal with the significant nonlinearity of the system. A linked multi-segment simple simulation model, 4-link rigid segment model connecting to the ground via a virtual joint, was used to clarify the efficiency of the proposed method. From the results obtained in the simulation, the proposed method enables us to reduce residual errors of CG acceleration in the dynamic contribution analysis for a whole-body system.

Key Words : Dynamic Contribution, Parameter Identification, Multi-body Dynamics, Whole-body CG acceleration

1. はじめに

動作の分析を行う際に、剛体セグメントとしてモデル化した身体各節の質量、慣性モーメント、質量中心位置といった身体慣性パラメータ(Body Specific Parameters)⁽¹⁾が必要となる分析手法がいくつか用いられている。たとえば、逆動力学演算手法として良く用いられているキネティクスの分析法では、身体を構成する各節を剛体セグメントと仮定してモデル化を行い、身体の末端から、各セグメント単体の運動方程式を利用して、各関節の発揮トルクおよび関節力といったキネティクス量を順次算出する分析が行なわれる。他方、各セグメント単体の運動方程式ではなく、対象とする系を構成するセグメント群全体の運動方程式の解析式を導出し、その構成要素を、関節トルク項、外力項、重力項、そして運動依存項に分けて、評価指標として設定した各種物理量の生成にこれら各項が動力学的にどれくらい貢献しているかを定量化する動力学的分析がある。例えば、主に矢状面の運動を対象として、身体各セグメントの単体の運動方程式、および各関節部における隣接セグメント間の連結方程式を連立することによって導出した全身の運動方程式を用いて、跳躍動作ならびに走動作における支持脚関節トルク

^{*1} 正員, 筑波大学 (〒305-8574 つくば市天王台 1-1-1)

^{*2} 筑波大学

^{*3} 正員, (株)アシックス, 筑波大学大学院

E-mail: koike@taiiku.tsukuba.ac.jp

あるいは筋の機能の定量化を行った研究が報告されている^{(2),(4)}。

これらの分析手法では、ハイスピードカメラあるいはモーションキャプチャーなどを用いて計測した各セグメントの変位、速度、加速度、あるいは姿勢、角速度などのキネマティクスの変量に加えて、各セグメントの慣性パラメータが用いられている。このパラメータの値は、人種、性別、年齢、および体格などによって異なることから、個々の身体特性を反映していない慣性パラメータを用いた分析を行うことは、分析の際の誤差を生じさせることになる。このため、各種分析における誤差を低減させる適切な慣性パラメータを得ることは重要となる。

多体系を構成する各セグメントの慣性パラメータを同定する手法には、ロボットを対象とした数多くの報告がある^{(5),(6)}。また、身体を対象とした同定手法も提案されている⁽⁷⁾。しかしながら、これらの手法では、動力的貢献を分析する際の系全体の加速度誤差を直接低減するような定式化はなされていない。他方、動力的貢献の分析手法における身体重心加速度の分析誤差を直接低減する手法が報告されている^{(8),(4)}が、慣性パラメータの変更ではなく、動作を微調整することによって重心加速度誤差を低減する手法であるため、修正後の動作は計測値とは異なってしまふことになる。

そこで本研究では、矢状面運動を例にとり、多体系の運動方程式から導出した系全体の重心加速度式への貢献式を用いて、この重心加速度誤差を低減し、動力的分析の精度を改善する慣性パラメータの同定法について述べる。具体的には、複数の剛体リンクよりなる多セグメントモデルが地面と仮想関節によって連結しているとしたシミュレーションモデルを構築し、解析的に求めた仮想関節の関節力を地面反力と想定して、慣性パラメータの真値に誤差を与えた公称値を用いて求めた多体系の重心加速度、ならびに地面反力を多体系の総質量で除することによって得た真の重心加速度を用いて、貢献式を利用した慣性パラメータの更新を行い、動力的分析において適切な貢献を算出可能な慣性パラメータの算出を可能としている。

2. 方法

2・1 動力的分析手法

本節では、剛体セグメントにより構成される多体系の運動方程式について簡単に述べる。その際、身体動作に対する関節トルクの役割を定量化する動力的分析手法について、各セグメントの慣性パラメータが誤差を有する場合の貢献式について示す。

・解析モデルの構築

まず、シミュレーションを行うために、慣性パラメータに真値を与えたときについて考える。剛体セグメントによってモデル化された多体系を構成する剛体セグメントリンクモデルを図 1(a), (b)に示す。このときのセグメントモデルの並進および回転の運動方程式は、それぞれ次式として表される。

$$m_i \ddot{\mathbf{x}}_i = \mathbf{f}_{i-1} - \mathbf{f}_i + m_i \mathbf{g} \quad (1)$$

$$\hat{\mathbf{I}}_i \dot{\boldsymbol{\omega}}_i + \boldsymbol{\omega}_i \times (\hat{\mathbf{I}}_i \boldsymbol{\omega}_i) = \mathbf{r}_{i,\text{cgP}} \times \mathbf{f}_{i-1} - \mathbf{r}_{i,\text{cgD}} \times \mathbf{f}_i + \mathbf{n}_{i-1} - \mathbf{n}_i \quad (2)$$

ここで、 m_i ならびに \mathbf{x}_i は、セグメント i の質量ならびに重心位置ベクトル、 \mathbf{F} ならびに \mathbf{N} はそれぞれセグメントに作用する関節間作用力ならびに関節作用モーメントベクトル、 \mathbf{g} は重力加速度ベクトル、 \mathbf{I} はセグメントの主慣性行列、 $\boldsymbol{\omega}$ は基準座標から見たセグメントの角速度ベクトルを示す。

これより、関節力および関節トルクを入力として、各セグメント単体の運動方程式を全セグメント分まとめて行列形式として表すと、次式となる。

$$\mathbf{M}\dot{\mathbf{V}} = \mathbf{P}\mathbf{F} + \mathbf{Q}\mathbf{N} + \mathbf{H} + \mathbf{G} \quad (3)$$

ただし、

$$V = [\dot{x}_1^T \quad \dot{\omega}_1^T \quad \dot{x}_2^T \quad \dot{\omega}_2^T \quad \cdots \quad \dot{x}_N^T \quad \dot{\omega}_N^T]^T, F = [f_1^T \quad f_2^T \quad \cdots \quad f_N^T]^T, N = [n_1^T \quad n_2^T \quad \cdots \quad n_N^T]$$

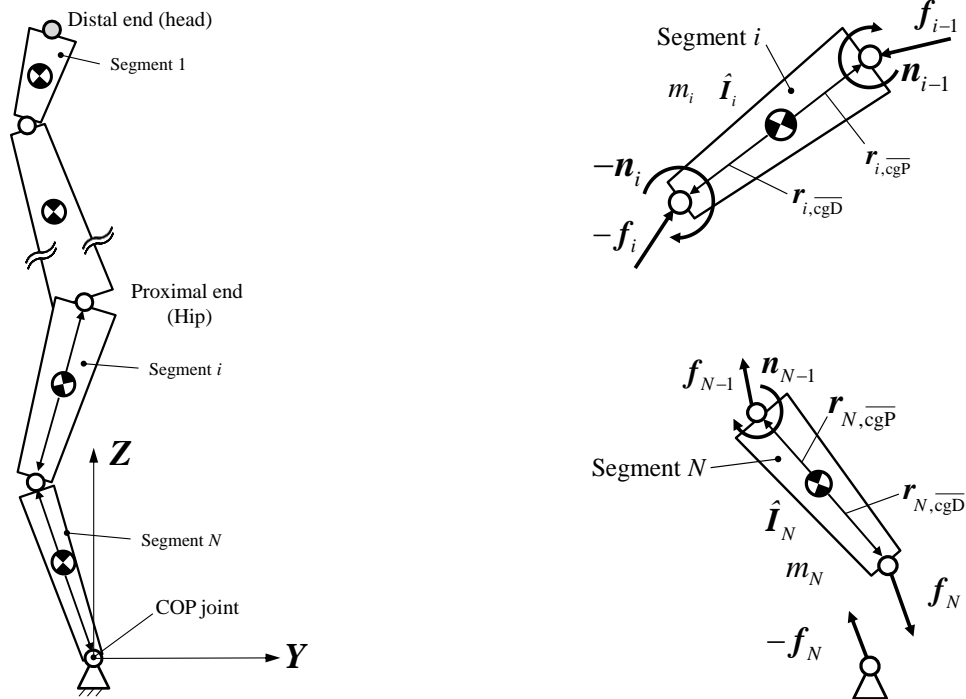
$$M = \begin{bmatrix} m_1 E & O & \cdots & \cdots & O \\ O & \hat{I}_1 & & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & & m_N E & O \\ O & \cdots & \cdots & O & \hat{I}_N \end{bmatrix}, H = \begin{bmatrix} O \\ -\omega_1 \times (\hat{I}_1 \omega_1) \\ \vdots \\ O \\ -\omega_N \times (\hat{I}_N \omega_N) \end{bmatrix}, G = \begin{bmatrix} m_1 E \\ O_{3 \times 1} \\ \vdots \\ m_N E \\ O_{3 \times 1} \end{bmatrix} g,$$

$$P = \begin{bmatrix} -E & O & & O & O \\ -[r_{1, \text{cgP}} \times] & O & \cdots & O & O \\ E & -E & & O & O \\ [r_{2, \text{cgD}} \times] & -[r_{2, \text{cgP}} \times] & & O & O \\ \vdots & & \ddots & \vdots & \vdots \\ O & O & & -E & O \\ O & O & & -[r_{i-1, \text{cgD}} \times] & O \\ O & O & \cdots & E & -E \\ O & O & & [r_{N, \text{cgP}} \times] & -[r_{N, \text{cgD}} \times] \end{bmatrix}, Q = \begin{bmatrix} O & O & O \\ -E & O & O \\ O & O & O \\ E & -E & \cdots & O \\ O & O & & O \\ O & E & & O \\ & & \ddots & \vdots \\ \vdots & & & -E \\ O & O & \cdots & E \end{bmatrix}$$

ここで、 M は慣性行列、 P および Q は各関節に加わる関節間作用力 F および関節作用モーメント N に対する係数行列、 G は重力加速度項を示すベクトルであり、 H はコリオリ・遠心力等の運動依存力による項を表すベクトルを示している。

次に、隣接するセグメントが関節によって連結されているという、関節間の幾何学的拘束式は、接地部における圧力中心点(COP)を仮想の関節として、身体が地面と連結していると仮定すると、

$$C\dot{V} + \dot{C}V = \ddot{\eta} \quad (4)$$



(a). a picture of linked segments

(b). free body diagram of individual segments

Fig.1 Schematic representation of the multi-body system

と表すことができる。ここで \mathbf{C} は拘束式の係数行列であり、 $\boldsymbol{\eta}$ は COP の変位を表している。

式(3)および式(4)から、関節間の作用力ベクトル \mathbf{F} が次式として求まる。

$$\mathbf{F} = -(\mathbf{C}\mathbf{M}^{-1}\mathbf{P})^{-1}(\mathbf{C}\mathbf{M}^{-1}\mathbf{Q}\mathbf{N} + \mathbf{C}\mathbf{M}^{-1}\mathbf{H} + \mathbf{C}\mathbf{M}^{-1}\mathbf{G} + \dot{\mathbf{C}}\mathbf{V} - \dot{\boldsymbol{\eta}}) \quad (5)$$

すなわち、この \mathbf{F} のうちの地面との仮想関節力成分を地面反力計の出力として取り扱うことができる。

・慣性パラメータによる残差

続いて、慣性パラメータに誤差が存在する一般的な場合に、式(3)に相当する各セグメント単体の運動方程式を全セグメント分まとめたものを、

$$\mathbf{M}\dot{\mathbf{V}} = \mathbf{P}\mathbf{F} + \mathbf{Q}\mathbf{N} + \mathbf{P}_r\mathbf{F}_r + \mathbf{Q}_r\mathbf{N}_r + \mathbf{H} + \mathbf{G} \quad (6)$$

によって表すこととする。ここで、 \mathbf{F}_r および \mathbf{N}_r は、慣性パラメータに誤差が存在する際に、末端セグメントの末端部に作用する外力ベクトルおよび外モーメントベクトルであり、ここでは残差力および残差モーメントとする。また、 \mathbf{P}_r および \mathbf{Q}_r はこれらのベクトルに対する係数行列である。また、式(4)と式(6)とを連立することにより、慣性パラメータに誤差が存在する際の多体系の運動方程式が以下のように求まる。

$$\dot{\mathbf{V}} = \mathbf{A}_{Ta}\mathbf{T}_{act} + \mathbf{A}_v\mathbf{V} + \mathbf{A}_G\mathbf{G} + \mathbf{A}_{Fr}\mathbf{F}_r + \mathbf{A}_{Nr}\mathbf{N}_r \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_{Ta} &= -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{P}(\mathbf{C}\mathbf{M}^{-1}\mathbf{P})^{-1}\mathbf{C}\mathbf{M}^{-1}\mathbf{Q}\mathbf{K}^{-1} + \mathbf{M}^{-1}\mathbf{Q}\mathbf{K}^{-1} \\ \mathbf{A}_v &= -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{P}(\mathbf{C}\mathbf{M}^{-1}\mathbf{P})^{-1}(\mathbf{C}\mathbf{M}^{-1}\mathbf{H} + \dot{\mathbf{C}}\mathbf{V} - \dot{\boldsymbol{\eta}}) + \mathbf{M}^{-1}\mathbf{H} \\ \mathbf{A}_G &= -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{P}(\mathbf{C}\mathbf{M}^{-1}\mathbf{P})^{-1}\mathbf{C}\mathbf{M}^{-1} + \mathbf{M}^{-1} \\ \mathbf{A}_{Fr} &= -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{P}(\mathbf{C}\mathbf{M}^{-1}\mathbf{P})^{-1}\mathbf{C}\mathbf{M}^{-1}\mathbf{P}_r\mathbf{K}^{-1} + \mathbf{M}^{-1}\mathbf{P}_r\mathbf{K}^{-1} \\ \mathbf{A}_{Nr} &= -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{P}(\mathbf{C}\mathbf{M}^{-1}\mathbf{P})^{-1}\mathbf{C}\mathbf{M}^{-1}\mathbf{Q}_r\mathbf{K}^{-1} + \mathbf{M}^{-1}\mathbf{Q}_r\mathbf{K}^{-1} \end{aligned}$$

ここで、 \mathbf{A}_{Ta} 、 \mathbf{A}_v および \mathbf{A}_G は、それぞれ関節作用モーメントベクトルの係数行列、コリオリ・遠心力等の運動依存項に関するベクトル、および重力加速度を含むベクトル \mathbf{G} の係数行列を表す。さらに \mathbf{A}_{Fr} および \mathbf{A}_{Nr} は、慣性パラメータ誤差に起因する残差力および残差モーメントに関する係数行列を表す。

式(7)を系全体の重心への変換行列である \mathbf{S} を用いて、身体重心加速度を求める式に変換すると、

$$\ddot{\mathbf{x}}_{\text{cg,body}} = \mathbf{S}\dot{\mathbf{V}} \quad (8)$$

となる。ただし、

$$\mathbf{S} = \frac{1}{m_{\text{body}}} [m_1\mathbf{E} \quad \mathbf{O} \quad m_2\mathbf{E} \quad \cdots \quad \mathbf{O} \quad m_N\mathbf{E} \quad \mathbf{O}] \quad (9)$$

である。

慣性パラメータの誤差に起因した残差による身体重心加速度は、

$$\ddot{\mathbf{x}}_{\text{cg,body,residual}} = \mathbf{S}\mathbf{A}_{Fr}\mathbf{F}_r + \mathbf{S}\mathbf{A}_{Nr}\mathbf{N}_r \quad (10)$$

と表すことができる。

2・2 パラメータの同定法

式(7)および(8)において、残差力および残差モーメントを抜いて求めた公称値としての系全体の重心加速度式は

$$\mathbf{a}_{\text{cg,body}} = \mathbf{S}\mathbf{A}_T\mathbf{T}_{\text{act}} + \mathbf{S}\mathbf{A}_V + \mathbf{S}\mathbf{A}_G\mathbf{G} \quad (11)$$

となる。この公称値の重心加速度式は、慣性パラメータ \mathbf{p} の関数であるため、

$$\mathbf{a}_{\text{cg,body}} = \mathbf{f}(\mathbf{p}) \quad (12)$$

と表すことにする。ここで \mathbf{p} は各セグメントの慣性パラメータよりなるベクトルであり、各セグメントの質量、各セグメントの重心まわりの慣性モーメント、および各セグメントのセグメント長に対する近位端から重心位置までの長さ比から構成されるベクトルである。

式(12)から、慣性パラメータ \mathbf{p} の変化に起因する変分量に関する式を求めると次式となる。

$$\mathbf{a}_{\text{cg,body}} + \Delta\mathbf{a}_{\text{cg,body}} = \mathbf{f}(\mathbf{p}) + \frac{\partial\mathbf{f}(\mathbf{p})}{\partial\mathbf{p}}\Delta\mathbf{p} \quad (13)$$

式(13)と式(12)との差を取ることによって、時刻 k における、慣性パラメータ \mathbf{p} の変動分による系全体の重心加速度の変動分が次式のような行列形式によって求まる。

$$\Delta\mathbf{a}_{\text{cg,body},k} = \begin{bmatrix} \frac{\partial\mathbf{f}(\mathbf{p})_k}{\partial p_1} & \frac{\partial\mathbf{f}(\mathbf{p})_k}{\partial p_2} & \dots & \frac{\partial\mathbf{f}(\mathbf{p})_k}{\partial p_{np}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta p_1 \\ \Delta p_2 \\ \vdots \\ \Delta p_{np} \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\Delta\mathbf{a}_{\text{cg,body},k} = \mathbf{A}_k\Delta\mathbf{p}, \quad \mathbf{A}_k = [\mathbf{A}_{1,k} \quad \mathbf{A}_{2,k} \quad \dots \quad \mathbf{A}_{np,k}], \quad \mathbf{A}_{i,k} = \frac{\partial\mathbf{f}(\mathbf{p})_k}{\partial p_i} \quad (15)$$

ここで、感度行列 \mathbf{A} の各成分 \mathbf{A}_i は、式(11)を \mathbf{p} によって解析的に偏微分して求めるのではなく、各慣性パラメータの公称値の1%の誤差を与えたときの、系全体の重心加速度の変化分を数値的に算出することによって求める。

そして、この式を利用して、全時刻における系全体の重心加速度誤差を生じさせる慣性パラメータ誤差を次式により求めることにする。

$$\Delta\mathbf{p} = \mathbf{A}^\# \Delta\mathbf{a}, \quad \mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{A}_k \\ \vdots \\ \mathbf{A}_{n_{\text{Fr}}} \end{bmatrix}, \quad \Delta\mathbf{a} = \begin{bmatrix} \Delta\mathbf{a}_{\text{cg,body},1} \\ \vdots \\ \Delta\mathbf{a}_{\text{cg,body},k} \\ \vdots \\ \Delta\mathbf{a}_{\text{cg,body},n_{\text{Fr}}} \end{bmatrix} \quad (16)$$

ここで $\mathbf{A}^\#$ は感度行列 \mathbf{A} に対する疑似逆行列であり、 n_{Fr} は対象とする時間フレーム数である。なお、パラメータの変化分が、その公称値の10%を超えないような制約条件を設けている。

そして式(16)によって得られた誤差パラメータを、更新前のパラメータに下記のように足し込むことによって、パラメータを更新することとする。

$$\mathbf{p} = \mathbf{p} + \beta\Delta\mathbf{p} = \mathbf{p} + \beta\mathbf{A}^\# \Delta\mathbf{a} \quad (17)$$

ここで、係数 β は慣性パラメータベクトルの更新式におけるステップ係数を示し、式(16)にて算出される慣性パラメータの変化分をそのまま用いてパラメータを更新するのではなく、多体系の強い非線形性に対応するために1より小さな値を掛けて更新することとする。

3. 結果および考察

本章では、多体系のシミュレーションから、提案したパラメータ同定法によって、動学的分析結果が改善されることを示す。

3.1 シミュレーションモデル

ここでは、簡単のためリンク数を4とした多体セグメントモデルによる矢状面内運動のシミュレーションを行った。ここで、各セグメントにおける慣性パラメータは、その質量、重心周りの慣性モーメント、およびセグメント長に対する近位側関節点から重心点までの長さの比を対象としており、各セグメントあたり3種類、計12のパラメータが同定の対象となっている。また、矢状面内運動に簡易化していることから、慣性モーメントについては、矢状面垂直軸周り成分を対象パラメータとして扱った。さらに重力項は省略している。

まず、慣性パラメータの真値を用いて、式(5)により得られる地面との仮想関節での関節作用力を用いて、各関節の作用力および作用トルクを逆動力学演算により求めた。そして、同じく慣性パラメータの真値を用いたときの、各関節トルクの系全体の重心加速度への貢献を算出した。つぎに、慣性パラメータとして、誤差を含んだ公称値を用いたときの逆動力学演算を行い、関節トルクの貢献を算出した。なお、その際、地面反力については、地面反力計によって真の値が測定されることを想定して、真値を用いている。

3.2 パラメータ同定の結果および考察

まず図2(a), (b)は、多体系全体の重心加速度に対する真値からの誤差の水平前後成分および鉛直成分を示したものである。ここで公称値をそのまま用いたときの誤差を三角印付きの点線によって、また、パラメータ同定を行ったときの誤差を丸印付きの実線にて示している。同図から、同定後の慣性パラメータを用いることによって、系全体の重心加速度の誤差が低減されていることがわかる。

つぎに、図3(a), (b)は、総関節トルクによる系全体の重心加速度ベクトル生成への貢献を示したものである。同図において、真値を用いて算出したものを中実三角印付きの細実線によって、公称値を用いて算出したものを中空三角印付きの点線によって、そして、同定後の慣性パラメータを用いて算出したものを丸印付きの太実線によって示している。なお、同図(a)は、加速度の水平前後成分を、同図(b)は鉛直成分をそれぞれ示している。同図から、同定後の慣性パラメータを用いることによって、系全体の重心加速度生成に対するトルクの貢献の総和が、トルクの貢献の真値に近づいており、誤差が低減されていることがわかる。

なお、本稿では、セグメントの伸縮を考慮したモデルとしては取り扱っていない。実際には、マーカーのずれにより、計測されたセグメント長が変動することが生じるため、その平均長がセグメント長として用いられている。今後はセグメントの伸縮の扱い方についても考慮可能な手法を考案する必要がある。

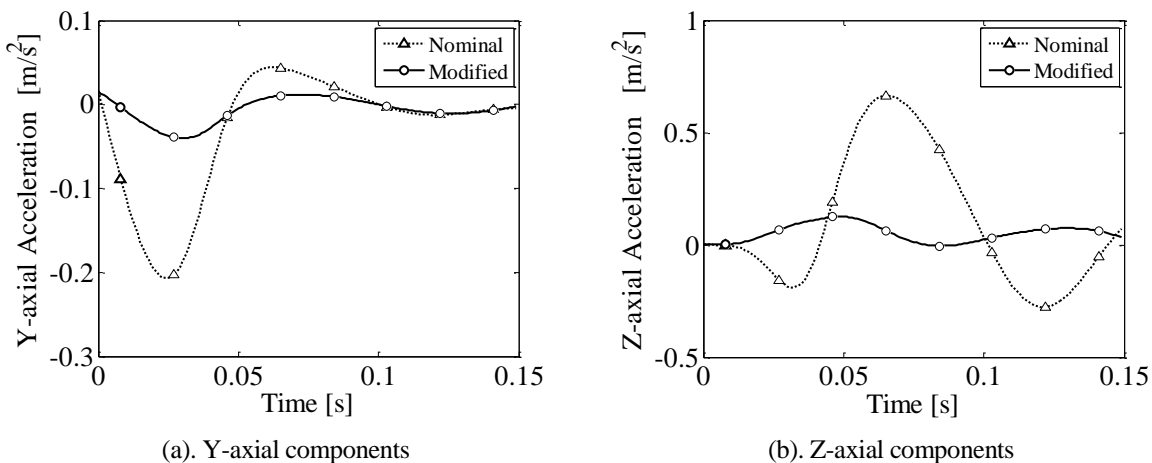


Fig.2 Residual errors of whole-body CG acceleration with parameter modification

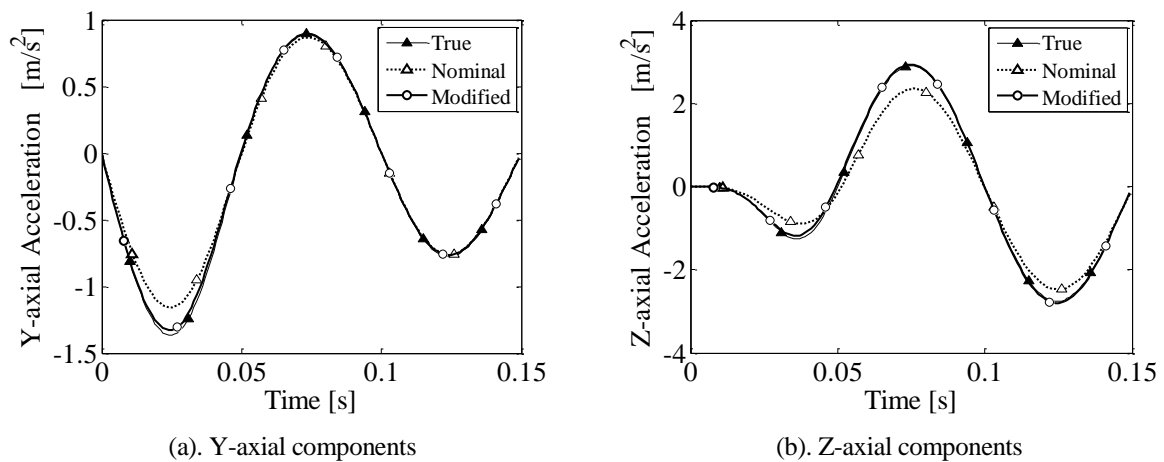


Fig.3 Time curves of contribution of joint torques to whole-body CG acceleration with parameter modification

4. おわりに

本研究では、動作分析における関節トルクの身体重心加速度生成への貢献に対する、慣性パラメータ誤差の影響を低減する手法を提案し、簡単な平面多体系モデルによるシミュレーションデータを用いて、その有効性についての検討を行った。その結果、系全体の重心加速度を地面反力および系の質量から算出される重心加速度ベクトルの真値を用いて、慣性パラメータの同定を行った結果、その同定パラメータを用いた動学的的分析によって得られる関節トルクの貢献は真の貢献の値に近づき、その誤差が低減されることがわかった。今後は、セグメントの伸縮を考慮して、実際の身体動作の動学的分析に適用する予定である。

文 献

- (1) 阿江通良, 湯海鵬, 横井孝志: 日本人アスリートの身体部分慣性特性の推定, バイオメカニズム 11, 23-33, 1992.
- (2) 小池関也, 森洋人: 順動学的貢献度によるスポーツ動作における関節トルク・筋張力の機能抽出, バイオメカニクス研究, 12(1), 58-65, 2008.
- (3) 仲谷政剛, 小池関也: 収縮様式を考慮した定速走動作における支持脚筋群の動学的な役割, バイオメカニズム学会誌, (印刷中).
- (4) Hamner, S. R., Seth, A. and Delp, S: Muscle contribution to propulsion and support during running, Journal of Biomechanics, 43(14), 2709-2716, 2010.
- (5) 美多勉, 大須賀公一: ロボット制御工学入門, 第4章. 初版, コロナ社, 1992.
- (6) 鮎澤光, ベンチャー ジェンチャン, 中村仁彦: ベースリンクの運動方程式を利用した脚型ロボットの最小力学パラメータの同定, 日本ロボット学会誌 Vol. 27 No. 9, pp.1066-1077, 2009.
- (7) K.Ayusawa, G.Venture and Y.Nakamura: Real-time implementation of physically consistent identification of human body segments. Proc. Of the 2011 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, 6282-6287, 2011.
- (8) Delp SL, Anderson FC, Arnold AS, Loan P, Habib A, John CT, et al. OpenSim:open-source software to create and analyze dynamic simulations of movement. IEEE Trans Biomed Eng ,54,1940-50,2007.