

床反力計測に基づくヒューマノイドの全身力学パラメータの同定

鮎澤 光^{*1} ベンチャー ジェンチャン^{*2} 山本 江^{*1} 中村 仁彦^{*2}

Contact Force Sensor Based Identification of Humanoid Robot

Ko Ayusawa, Gentiane Venture, Kou Yamamoto, and Yoshihiko Nakamura

The University of Tokyo, Dept. of Mechano-Informatics
7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, Japan

When simulating and controlling robot dynamics, it is necessary to know the inertial parameters and the joint dynamics accurately. As these parameters are usually not provided by manufacturers, identification is then an essential step in robotics. In addition with the up coming wide-spreading of humanoid robots in the society, the identification of humanoid dynamics has become mandatory to insure safety. This paper proposes a method to estimate humanoid robots inertial parameters without torque sensor, using generalized coordinates of baselink, joint angles and external forces information. The method has been tested on small-size humanoid robot, and simulation results as well as experimental results are given.

Key Words : humanoid robot, inertial parameters, identification

1. はじめに

リンクの重心・慣性テンソルなどの力学パラメータを実測することは、ロボットの高度な運動制御をする上で重要である。ロボットを設計する際に、力学パラメータをCADから概算することも可能だが、電装系などの付属部品やアクチュエータも含めた全力学系を考慮することは困難である。CADなどに基づく理論的なモデル化に留まらず、ロボットの力学パラメータを同定によって実測することが望ましい。

力学同定は、ロボティクスにおける大きな研究分野であり、ロボットマニピュレータの同定法⁽¹⁾や産業ロボットの同定法⁽²⁾が発達してきた。また、一般的なロボットの有用な理論と同定法も発展してきた⁽³⁾。より複雑な機構への応用例⁽⁴⁾⁽⁵⁾もみられるが、特にヒューマノイドロボットのように接触状況によって刻々と変化する構造への応用例は少ない。ヒューマノイドは、労働力や介護など人間社会への進出が今後期待されており、ヒューマノイドの運動性能や安全性の実現のために、同定法は確立すべき技術課題である。

力学パラメータを同定する上で、各関節の運動方程式の構造を利用することが多く、その場合は関節トルクや関節角度のセンサ情報を必要とする。しかし、多くのヒューマノイドは各関節にトルクセンサを搭載していないため、トルク計測は困難である。一方で、6軸センサやフォースプレート等を利用して地面からの接触力を計測することは比較的容易である。本稿

では、ヒューマノイドのベースリンクの運動方程式のみを利用し、ロボットの胴体の位置と姿勢、関節角度、床反力を計測することで、ヒューマノイドの全身の力学パラメータを同定する手法について述べる。

2. 一般化座標と外力の計測による同定法

2.1 力学パラメータの線形性 ヒューマノイドロボットの運動方程式は、式(1)のようになる⁽⁶⁾⁽⁷⁾。

$$\begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}_0 \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau \end{bmatrix} + \sum_{k=1}^{N_c} \begin{bmatrix} K_{k1} \\ K_{k2} \end{bmatrix} F_k \quad (1)$$

ただし、

- H_{ij} は慣性行列
- q_0 はベースリンクの一般化座標 (6 自由度)
- θ は関節角度ベクトル
- b_i はコリオリ力・遠心力・重力項
- τ は関節トルク
- N_c はロボットと環境との接触点の総数
- F_k は接触点 k に働く外力 (6 軸力)
- K_{ki} は接触点 k における外力を一般化力へ変換する行列で、点 k へのヤコビ行列の転置行列

ベースリンクは基底であり、どのリンクにも設定可能であるが、一般的に体幹リンクとする。多リンク系の運動方程式は、質量・重心・慣性テンソルなどの力学パラメータに対して、線形な関係式で表わすことができる⁽⁸⁾⁽⁹⁾。このとき、式(1)は式(2)のように変形できる。

^{*1} 学生員, 東京大学 (〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

^{*2} 正員

E-mail: ayusawa@ynl.t.u-tokyo.ac.jp

$$\begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \end{bmatrix} \phi = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau \end{bmatrix} + \sum_{k=1}^{N_c} \begin{bmatrix} K_{k1} \\ K_{k2} \end{bmatrix} F_k \quad (2)$$

ただし、

- ϕ は全リンクの力学パラメータを並べたベクトル
- $Y = [Y_1^T \ Y_2^T]^T$ は ϕ にかかるリグレッサ行列であり、 $q_0, \dot{q}_0, \ddot{q}_0, \theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}$ の関数行列

一般的に力学パラメータ ϕ は冗長であり、一意に同定できず、動力学モデルの計算に必要最小限なパラメータに定式化する必要がある、数値的・解析的に計算する手段が確立されている⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾⁽¹²⁾。この最小力学パラメータ ϕ_B を用いて、式 (3) が得られる。

$$\begin{bmatrix} Y_{B1} \\ Y_{B2} \end{bmatrix} \phi_B = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau \end{bmatrix} + \sum_{k=1}^{N_c} \begin{bmatrix} K_{k1} \\ K_{k2} \end{bmatrix} F_k \quad (3)$$

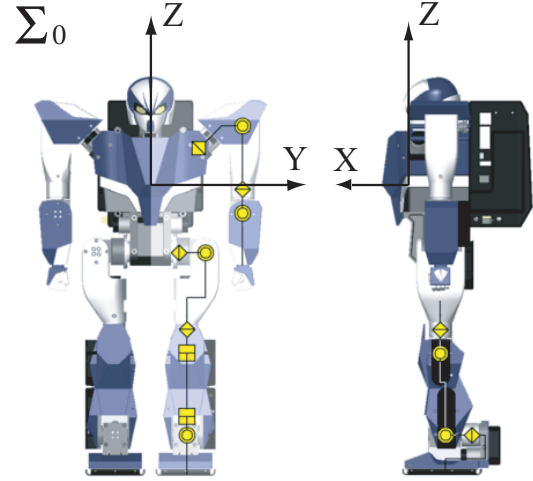
式 (3) から、よく用いられる手法として、最小二乗法を用いて、 ϕ_B の推定値 $\hat{\phi}_B$ を同定できる。

2.2 床反力計測を利用した同定法 一般的には、式 (3) から関節トルクを計測して同定する。しかし、多くのヒューマノイドは各関節にトルクセンサを搭載しておらず、またアクチュエータの入力から出力トルクの推定も可能だが、ギアなどの動力伝達部は複雑であり、正確なトルク計測は困難である。その一方で、足首に 6 軸力センサを搭載するなど、床反力を計測できるケースは多い。そこで、トルク計測の代わりに、床反力計測を用いた同定を目指す。

マニピュレータにおいて関節トルクの計測を利用せずに、土台に働く拘束力を計測して同定する研究例⁽¹³⁾がある。そこで、式 (3) のうち上段のみ、すなわちベースリンクの運動方程式のみに注目する。

$$Y_{B1} \phi_B = \sum_{k=1}^{N_c} K_{k1} F_k \quad (4)$$

式 (4) の大きな特徴は、一般化力がゼロという力学的拘束条件である。式 (4) 中には、関節トルク τ は含まれず、また一般化力は常にゼロなので、どちらも計測不要である。よって式 (4) を利用した同定に必要な情報は、各接触点 k とそこに働く外力 F_k 、および関節角度 θ とベースリンクの一般化座標 q_0 となる。これらの情報は、エンコーダ、6 軸力センサ、加速度センサ、ジャイロセンサ等で計測可能であり、多くのヒューマノイドに対してこの同定法が適用できる。また式 (4) の右辺は、ベースリンク原点にかかる 6 軸の全外力 F となり、 F を外部から直接計測できる場合は、片脚支持、両脚支持というような接地条件によら



Name:	UT-μ2:magnum
Height:	540 [mm]
Weight:	8.0 [kg]
Number of Joints:	20 (12 for legs, 8 for arms)

Fig.1 Kinematic structure and specifications of the humanoid robot

ずに同定できる。さらにベースリンクの同定は、式 (4) 中に個々の関節の摩擦力などを含まないため、これらの影響を受けないという大きな利点もある。

一方、式 (4) だけを用いて式 (3) の最小パラメータ ϕ_B を同定するためには、 ϕ_B が式 (4) においても最小パラメータである必要がある。そこで、シミュレーションを用いて、式 (4) だけを用いた場合でも ϕ_B が同定可能かを次節で検証する。

3. シミュレーション結果

図 1 に示す小型ヒューマノイドロボット UT-μ2⁽¹⁴⁾を用いて、力学パラメータの同定を行った。下半身の同定に焦点を絞り、運動中は上半身を動作させない（ブレーキがかかった）状態とする。このとき UT-μ2 は、各脚に 6 個の回転関節を持つため、全 13 リンク、全 18 自由度となる。

各リンクの最小力学パラメータ ϕ_B は、解析的な手法⁽¹¹⁾を用いて計算した。 ϕ_B 、及びそれに対応するリグレッサ行列 Y_{B1} の計算の詳細は付録 A にのせる。また、CAD から得られた質量・重心・慣性テンソルを用いて計算した、UT-μ2 の最小力学パラメータ $\phi_{B, \text{apriori}}$ の詳細は付録 B にのせる。

まず、動力学シミュレーションを行い、そのときの運動データを用いて同定を行った。シミュレーションの目的は、ベースリンクの運動方程式 (4) によって、全リンクの運動方程式 (3) における最小力学パラメータ ϕ_B を同定可能かの検証を行い、また ϕ_B の同定

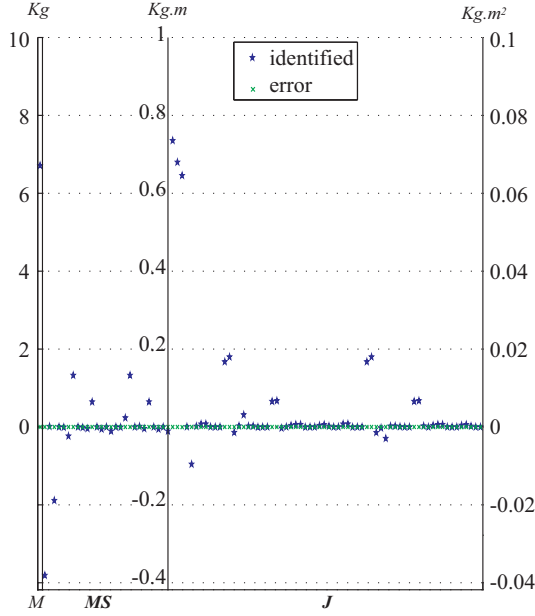


Fig.2 Identification results with simulated data

が可能な持続的励振をもつ運動を求めることである。シミュレーションは、山根ら⁽¹⁵⁾の開発した動力学計算ソフトウェアライブラリを利用した。地面との接触力はパネ・ダンパモデルを利用して計算した。またシミュレーションで利用した力学パラメータの真値 ϕ_B には、付録 B 中の図 6 の値 $\phi_{B_{apriori}}$ を用いた。

10 歩の前進歩行を行ったシミュレーションデータを用いて、同定したパラメータ $\hat{\phi}_B$ と、誤差 $e = \hat{\phi}_B - \phi_{B_{apriori}}$ を図 2 にのせる。同定した 94 個の各パラメータの誤差は小さく、前節の同定法が有効であり、歩行データから下半身の同定が成功したことが分かる。

4. 実験結果

各リンクの力学パラメータは、CAD から概算できる。しかし、電気系の配線やハードウェアの追加部品、アクチュエータの慣性などを考慮に入れると、実際の力学パラメータとは誤差が生じる。例えば、CAD 上でのロボットの全質量は 6.7[kg] であるが、実計測した全質量は 8.0[kg] となった。両足先に追加パーツを加えていることもあるが、誤差が 16.25[%] もあり、ロボット全体の力学パラメータに大きな影響を与え、力学パラメータの同定の重要性が理解できる。

UT- μ 2 は、現状では加速度・ジャイロセンサによる胴体の一般化座標 q_0 の正確な計測ができないため、実験では光学式モーションキャプチャを利用して q_0 を計測する。胴体に光学マーカをつけて、10 個のカメラを用いて運動を計測する。外力計測には、ロボットの足首に搭載した力センサの代わりに、6 軸の接触

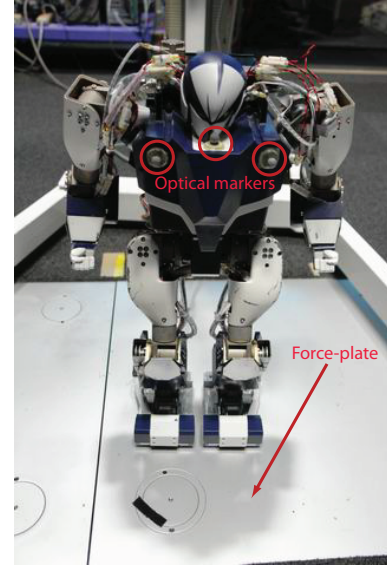


Fig.3 UT- μ 2 during the experiments: equipped with optical markers for motion capturing and walking on the force plate

力を計測可能なフォースプレートを利用する。フォースプレートはモーションキャプチャと同期して、約 70[g] の分解能で 6 軸の全接触力 F を計測できる。また、ロボットの関節角度 q は、関節に搭載されているエンコーダで計測する。実験の様子を図 3 にのせる。次の二種類の運動データを計測した。

- 4 歩だけ前進歩行する (1 歩は 0.5[s] で踏み出す)
- 体幹を x, y, z 軸周りにゆっくり折り曲げる

まず上記の歩行データのみを利用して、力学パラメータ $\hat{\phi}_{B_{walk}}$ を同定した。次に、 $\hat{\phi}_{B_{walk}}$ を用いて、上記の両方の運動時の外力を再構成し、実際に計測した外力とを比較した。

同定結果を図 4、図 5 にのせる。データのサンプリングタイムは共に 3[ms] であり、図中の赤い太実線が、計測された外力 $K_1 F$ 、黒い細実線が、同定した力学パラメータ $\hat{\phi}_{B_{walk}}$ から計算した外力 $Y_{B1} \hat{\phi}_{B_{walk}}$ 、青い細点線が、CAD から得られた力学パラメータ $\phi_{B_{apriori}}$ から計算した外力 $Y_{B1} \phi_{B_{apriori}}$ となる。

94 次元の力学パラメータを同定し、同定したパラメータから求めた外力はよく推定できていることが分かる。また、歩行データから同定したパラメータは、体幹を曲げる動作においても外力パターンを再現できている。一方、同定したパラメータと予め CAD から求めたパラメータでは、 FZ, NX, NY において明らかに違いがあり、同定したパラメータの方がより正確に外力パターンを再現できている。

一方、同定されたロボットの全質量は 7.93[kg] となり、実際の全質量の計測値に対して 0.07[kg] の誤差が

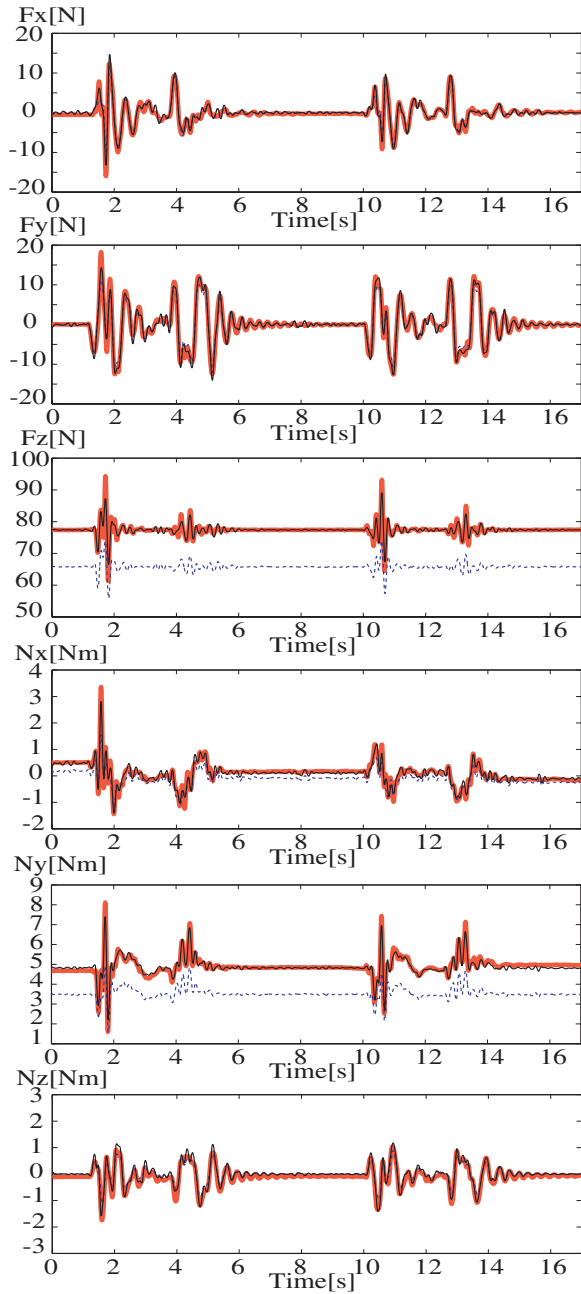


Fig.4 Validation figures of the identification results from top to bottom: FX, FY, FZ, NX, NY, NZ for the 4 steps walking motion (red thick line: force plate data, blue thin dotted line: reconstructed force from CAD data, black thin line: reconstructed force from identified data of walking motion)

生じている．また， NY ， NZ において， $0.2[\text{Nm}]$ 程度の誤差が生じている．これらは，フォースプレートの分解能 $0.7[\text{N}]$ の範囲内である．

5. おわりに

本稿の結論は以下のようにまとめられる．

- 各関節のトルクを計測せず，ベースリンクの運動方程式のみから，全外力を計測することで全身の最小力学パラメータを同定する手法につい

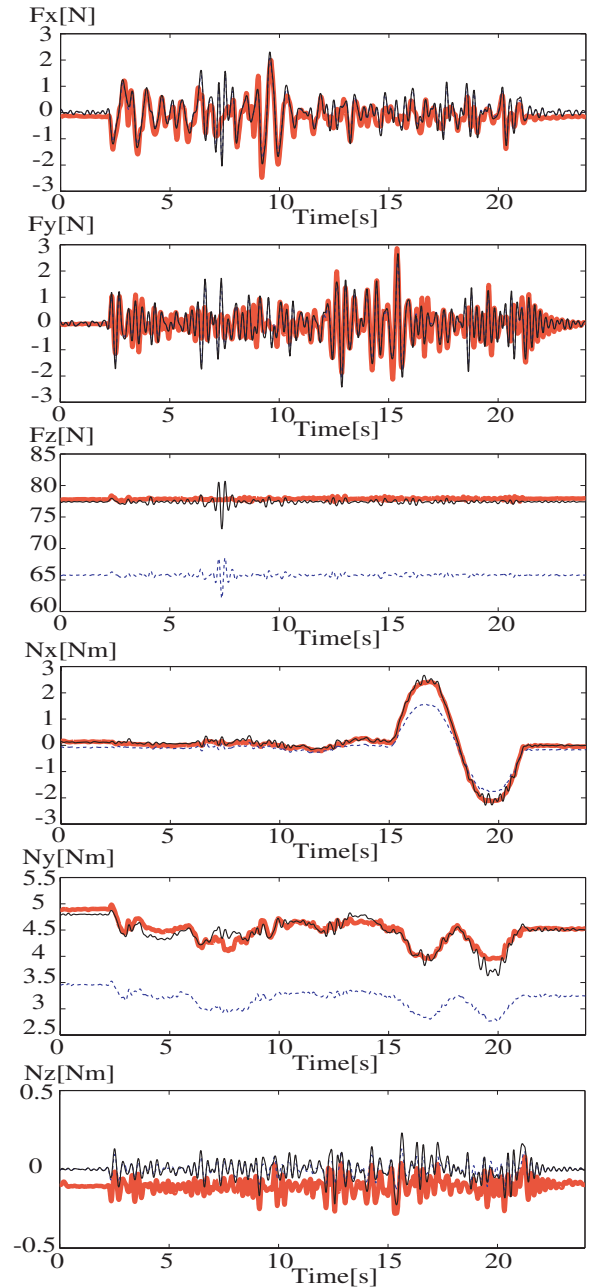


Fig.5 Validation figures of the identification results from top to bottom: FX, FY, FZ, NX, NY, NZ for the bending motion (red thick line: force plate data, blue thin dotted line: reconstructed force from CAD data, black thin line: reconstructed force from identified data of walking motion)

て述べた．

- 上半身を動作させないようにブレーキをかけた状態の $UT-\mu 2$ を用いて，シミュレーションを行い，10 歩の歩行データから，94 次元の最小力学パラメータを誤差なく同定できた．
- 実験を行い，4 歩の歩行データのみから力学パラメータを同定した．同定したパラメータを用いて，歩行データと体幹を曲げる動作の二種類に対して，外力パターンを再構成した．同定し

たパラメータを用いて再構成した外力パターンは、CAD から概算したパラメータを用いた場合よりも、実験データをよく再現できており、同定の重要性を示している。

なお本研究は、文部科学省「先端融合領域イノベーション創出拠点の形成：少子高齢社会と人を支えるIRT 基盤の創出」の支援を受けたものである。

A Y_{B1} および ϕ_B の計算

ここでは、 n 個の回転関節のみをもつヒューマノイドの力学パラメータ ϕ_B 、及びそれに対応するベースリンクのリグレッサ行列 Y_{B1} を導出する。始めに付録で用いる変数について述べる。

- リンク i ($0 \leq i \leq n$) は閉リンクを含まず、リンク 0 はベースリンクとする
- リンク座標 i ($1 \leq i \leq n$) の z 軸は、回転関節 i の回転軸にとり、リンク座標 0 はベースリンクにとる
- iR_j は i 座標から j 座標への姿勢行列
- ip_j は i 座標から j 座標へ向かうベクトル (i 座標で表記)
- ${}^i\ddot{p}_i$ はリンク i の加速度 (i 座標で表記)
- ${}^i\omega_i, {}^i\dot{\omega}_i$ はリンク i の角速度、角加速度 (i 座標で表記)
- m_i はリンク i の質量
- is_i は i 座標からリンク i の重心へ向かうベクトル (i 座標で表記)
- iI_i は i 座標原点まわりのリンク i の慣性テンソル (i 座標で表記)
- M_i はリンク i の質量に関する力学パラメータ
- MS_i はリンク i の重心に関する力学パラメータ
- J_i はリンク i の慣性テンソルに関する力学パラメータ

通常の力学パラメータ ϕ は次のようになる。

$$\phi = \begin{bmatrix} \phi_0^T & \phi_1^T & \dots & \phi_n^T \end{bmatrix}^T \quad (5)$$

$$\phi_i = \begin{bmatrix} m_i & m_i {}^is_{i,x} & m_i {}^is_{i,y} & m_i {}^is_{i,z} & {}^iI_{i,xx} & {}^iI_{i,yy} & {}^iI_{i,zz} & {}^iI_{i,yz} & {}^iI_{i,zx} & {}^iI_{i,xy} \end{bmatrix}^T \quad (6)$$

まず、 ϕ に対応するリグレッサ行列 Y のうち、ベースリンクにかかる上部分の行列 Y_1 を求める⁽⁹⁾。

$$Y_1 = \begin{bmatrix} y_0 & y_1 & \dots & y_n \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$y_i = \begin{bmatrix} {}^0R_i & 0 \\ [{}^0p_i^0 \times] {}^0R_i & {}^0R_i \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} {}^i\ddot{p}_i [{}^i\dot{\omega}_i \times] + [{}^i\omega_i \times]^2 & 0 \\ 0 & -[{}^i\ddot{p}_i \times] \quad [{}^i\dot{\omega}_i \bullet] + [{}^i\omega_i \times][{}^i\omega_i \bullet] \end{bmatrix} \quad (8)$$

ただし、 $[w \times]$ 、 $[w \bullet]$ は次のような行列とする。

$$[w \times] = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_z & \omega_y \\ \omega_z & 0 & -\omega_x \\ -\omega_y & \omega_x & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$[w \bullet] = \begin{bmatrix} \omega_x & 0 & 0 & 0 & \omega_z & \omega_y \\ 0 & \omega_y & 0 & \omega_z & 0 & \omega_x \\ 0 & 0 & \omega_z & \omega_y & \omega_x & 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

次に、最小力学パラメータ ϕ_B を求める⁽¹¹⁾。まず、 M_i 、 MS_i 、 J_i を計算する。 M_i 、 MS_i 、 J_i は、リンク i の末端側に属する全リンクの力学パラメータの組み合わせで表わされ、末端リンクから順に計算する。ここでは全関節が回転関節であり、またベースリンクが 6 自由度を持つため、次のように計算できる。

$$M_{i-1} = m_{i-1} + M_i \quad (11)$$

$$MS_{i-1} = m_{i-1} {}^{i-1}s_{i-1} + M_i {}^{i-1}p_i^{i-1} + {}^{i-1}r_i \quad (12)$$

$$J_{i-1} = {}^{i-1}I_{i-1} + M_i [{}^{i-1}p_i^{i-1} \times]^T [{}^{i-1}p_i^{i-1} \times] + [{}^{i-1}p_i^{i-1} \times]^T [{}^{i-1}r_i \times] + [{}^{i-1}r_i \times]^T [{}^{i-1}p_i^{i-1} \times] + J_{i,yy} {}^{i-1}R_i U {}^{i-1}R_i^T \quad (13)$$

ただし、 ${}^{i-1}r_i$ 、 U は次のようにおく。

$${}^{i-1}r_i = {}^{i-1}R_i \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ MS_{i-1,z} \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$U = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

M_i 、 MS_i 、 J_i から、全リンクの最小力学パラメータ ϕ_B は次のようになる。

$$\phi_B = \begin{bmatrix} \phi_{B0}^T & \phi_{B1}^T & \dots & \phi_{Bn}^T \end{bmatrix}^T \quad (16)$$

$$\phi_{Bi} = \begin{cases} [M_i MS_{i,x} MS_{i,y} MS_{i,z} J_{i,xx} J_{i,yy} J_{i,zz} J_{i,yz} J_{i,zx} J_{i,xy}]^T & (i = 0) \\ [MS_{i,x} MS_{i,y} J_{i,xx} J_{i,zz} J_{i,yz} J_{i,zx} J_{i,xy}]^T & (i > 0) \end{cases} \quad (17)$$

上記の最小力学パラメータ ϕ_B に対応する行列 Y_{B1} は次のようになる。

$$Y_{B1} = \begin{bmatrix} y_{B0} & y_{B1} & \dots & y_{Bn} \end{bmatrix} \quad (18)$$

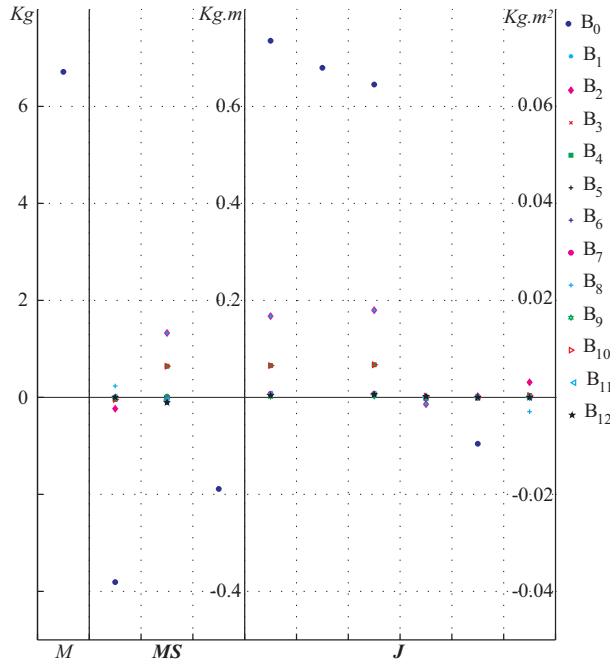


Fig.6 $\phi_{B_{apriori}}$, the a priori values of the base parameters of the humanoid robot UT- μ 2

$$y_{Bi} = \begin{cases} y_0 & (i = 0) \\ \begin{bmatrix} y_{i2} & y_{i3} & y_{i5} & y_{i7} & y_{i8} & y_{i9} & y_{i10} \end{bmatrix} & (i > 0) \end{cases} \quad (19)$$

B UT- μ 2の最小力学パラメータ

UT- μ 2は21リンク, 26自由度を持つが, 本稿では上半身を固定して考え, 両脚各6関節, 全13リンク, 全18自由度とする. ここで, 胴体リンクをベースリンク B_0 , 右脚6リンクを胴体側から $B_1 - B_6$, 左脚6リンクを胴体側から $B_7 - B_{12}$ と表わす.

$B_j (0 \leq j \leq 12)$ リンクの力学パラメータを ϕ_j とし, 全身の力学パラメータ ϕ を次のように構成する.

$$\phi = [\phi_0^T \ \phi_1^T \ \cdots \ \phi_{12}^T]^T \quad (20)$$

CAD から求めた ϕ を用いて, 付録 A の手法から計算した 94 次元の最小力学パラメータ $\phi_{B_{apriori}}$ を図 6 にのせる. 各リンク B_i ごとの最小力学パラメータ $\phi_{B_{apriori}}$ の値が同じグラフ上にプロットされており, 左から, M_j , $MS_{j,x}$, $MS_{j,y}$, $MS_{j,z}$, $J_{j,xx}$, $J_{j,yy}$, $J_{j,zz}$, $J_{j,yz}$, $J_{j,zx}$, $J_{j,xy}$ と並んでいる. ただし, ベースリンク以外のリンク $B_j (j > 0)$ は, 最小力学パラメータとして M_j , $MS_{j,z}$, $J_{j,yy}$ を持たない.

文献

- (1) V.A. Sujan and S. Dubowsky. An optimal information method for mobile manipulator dynamic

- parameter identification. *IEEE/ASME Trans. on Mechatronics*, Vol. 8, No. 2, pp. 215 – 225, 2003.
- (2) W. Khalil, M. Gautier, and P. Lemoine. Identification of the payload inertial parameters of industrial manipulators. In *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 4943–4948, May 2007.
- (3) J. Swevers, C. Ganseman, D. Bilgin, J. De Schutter, and H. Van Brussel. Optimal robot excitation and identification. *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol. 13, No. 5, pp. 730–740, 1997.
- (4) G. Venture, P.J. Ripert, W. Khalil, M. Gautier, and P. Bodson. Modeling and identification of passenger car dynamics using robotics formalism. *IEEE Trans. on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 7, No. 3, pp. 349–359, September 2006.
- (5) M. Tounsi, G. Lebre, and M. Gautier. Dynamic identification and control of a nonholonomic mobile robot. In *Proc. of the 4th IEEE Conf. on Control Applications*, pp. 520–525, September 1995.
- (6) Y. Fujimoto, S. Obata, and A. Kawamura. Robust biped walking with active interaction control between foot and ground. In *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 2030–2035, 1998.
- (7) K. Yoshida, D.N. Nenchev, and M. Uchiyama. Moving base robotics and reaction management control. In *Proc. of the 7th Int. Symp. of Robotics Research*, pp. 100–109, 1995.
- (8) H. Mayeda, K. Osuka, and A. Kanagawa. A new identification method for serial manipulator arms. In *Pre. IFAC 9th World Congress*, Vol. 2, pp. 74–79, 1984.
- (9) C.H. Hollerbach J.M. Atkeson, C.G. An. Estimation of inertial parameters of manipulator loads and links. *Int. J. of Robotic Research*, Vol. 5, No. 3, pp. 101–119, 1986.
- (10) Gautier M. Numerical calculation of the base inertial parameters of robots. *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Vol. 2, pp. 1020–1025, May 1990.
- (11) H. Kawasaki, Y. Beniya, and K. Kanzaki. Minimum dynamics parameters of tree structure robot models. In *Int. Conf. of Industrial Electronics, Control and Instrumentation*, Vol. 2, pp. 1100–1105, 1991.
- (12) W. Khalil and F. Bennis. Symbolic calculation of the base inertial parameters of closed-loop robots. *The Int. J. of Robotics Research*, Vol. 14(2), pp. 112–128, April 1995.
- (13) G. Liu, K. Iagnemma, S. Dubowsky, and G. Morel. A base force/torque sensor approach to robot manipulator inertial parameter estimation. In *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 3316–3321, 1998.
- (14) T. Sugihara, K. Yamamoto, and Y. Nakamura. Architectural design of miniature anthropomorphic robots towards high-mobility. In *Proc. of the 2005 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1083–1088, Edmonton, August 2005.
- (15) K. Yamane and Y. Nakamura. Dynamics computation of structure-varying kinematic chains and its application to human figures. *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol. 16, No. 2, pp. 124–134, 2000.