

二足歩行ロボット開発のための 歩行実験システム構築と逆動力学解析

Dynamic Analysis of Biped Locomotion for Development of Bipedal Robot

川角 祐一郎
Yuichiro KAWASUMI

川田工業㈱航空・機械事業部
HRIS開発室

鈴木 利明
Toshiaki SUZUKI

川田工業㈱航空・機械事業部
製品開発部

金平 徳之
Noriyuki KANEHIRA

川田工業㈱航空・機械事業部
HRIS開発室

本研究は、社内研究用二足歩行ロボットisamuを利用してロボットハードウェア開発を支援することを目的とする。今回その準備段階として、多リンク系の逆動力学計算ライブラリ、それを利用した歩行軌道設計ルーチンと実験解析ルーチン、およびモータ電流の計測システムを作成した。そして、足踏み運動やスクワット運動といった基本的な動作による実験を行い、各リンクに働く内力、曲げモーメント、関節トルクを推定した。また、関節トルクの推定値と、モータ電流値から減速機の特性を考慮して求めた関節トルクとの比較を行い、実験システムの有効性を確かめた。今後、要求仕様を満たすために、ハードウェアと制御系はどのようなものが望ましいかということ、シミュレーションと実験を繰り返すことで追求していく予定である。

キーワード：二足歩行ロボット、逆動力学

1. はじめに

航空・機械事業部では、ヒューマノイドロボットの研究開発を行っている。これまで、東京大学の井上・稲葉研究室と共同で、H6およびH7を開発し、国が進めるHRPプロジェクトにおいても、脚モジュール、HRP2Pを設計製作した。さらに今年度中にHRPプロジェクトの成果機としてHRP2を製作し、研究用プラットフォームとして、今後研究機関等に提供していく方針である。

数度の開発を重ね、徐々に優れたハードウェアを提供できる環境になってきたが、制御系およびソフトウェアに関しては、その多くを社外研究機関に委ねているのが現状である。しかし、ハードウェアに改良を加えていくためには、シミュレーション計算や、歩行運動の動力学的解析、制御系に関するノウハウが重要であるため、社内でもそのような技術確立しておく必要がある。そこで、当社航空・機械事業部では社内研究用プラットフォームとして、isamu（Integrated System of Advanced Motion-control Units、写真1および表1）を製作した。本研究は、isamuによる実験の結果を、ハードウェア設計にフィードバックすることを目的とする。今回はまず実験環境を整えるために、多リンク系の逆動力学計算ライブラリと、それを利用した歩行軌道生成ルーチンを作成した。歩行軌道生成法は、西脇¹⁾による。また、両脚各モータに流

れる電流を計測するシステムを作成した。そして、足踏み運動やスクワット運動等の基本的な動作による実験を行い、各関節に働く内力、曲げモーメントを推定した。さらに、モータ電流値から求めた関節トルクと逆動力学計算結果との比較を行い、データの妥当性を確認した。

今後は、具体的な目標（ジャンプ運動、転倒復帰運動等）を掲げ、それを達成していくことで、ハード面、ソフト面の両方から、二足歩行制御技術の向上を目指していく予定である。

表1 isamuの諸元

身長	1 468 mm
体重	55 kg
O S	RT-Linux
関節構成	首2軸 腕6軸×2 グリップ×2 脚7軸×2 計30軸
センサ	胴体部： 加速度計 角速度計 両足裏： 6軸力計 各モータ軸： エンコーダ 頭部： ステレオカメラ



写真1 isamuの外観

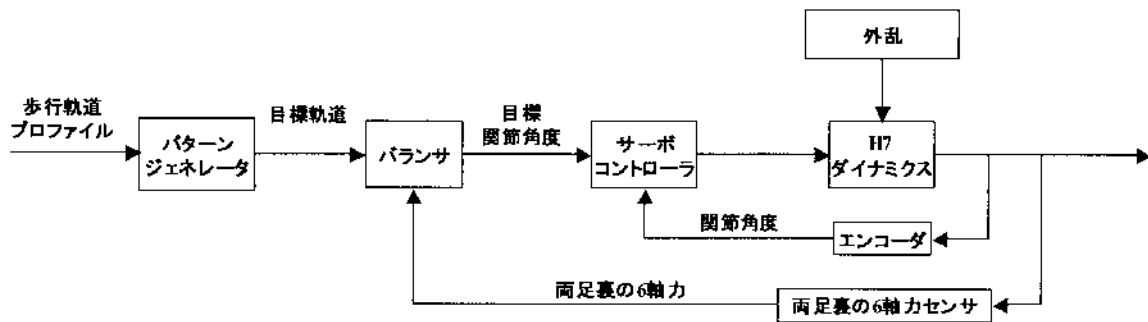


図1 isamu制御系の概略

2. isamuの歩行制御システム

(1) 制御系

isamuはH7と同型で、その制御系ソフトウェアは、加賀美、西脇らによって開発されたものである。リアルタイムOSであるRT-Linuxを採用することで、1 msec周期の実時間制御を行っている。図1に制御システムのブロック線図を示す。この制御系は大まかに3つの階層からなっている。上層側から簡単に説明しておく。

パターンジェネレータは、与えられた軌道プロファイルから目標運動軌道を作成し、バランスに伝える。

バランスは、足裏6軸力から目標運動軌道を修正し、対応する関節軸角度をサーボコントローラに渡す。

サーボコントローラは、関節軸角度制御を行う。

その他、片足支持期には、構造のたわみにより胴体が遊脚側に傾き、遊脚が予定より早く着地してしまうので、バランスには支持脚の股関節ロール軸角度の修正量をフィードフォワードして、正常な姿勢に戻す機能も備わっている。このフィードフォワード量は、事前に20歩程度の歩行を行って獲得する。

(2) 歩行軌道生成

以上述べた制御系のうち、今回は、最上層のパターンジェネレータを、西脇による“目標ZMP追従動作高速生成法¹⁾”に従って作成し、それ以外の制御系ルーチンについては手を加えていない。また、動力学的に安定なisamuの運動軌道が作成できさえすれば、歩行実験を行うことができるので、軌道計算はオフラインで行うこととした。

安定な軌道を生成するためには、歩行軌道の安定性をなんらかの形で評価する必要がある。そのために、ZMP (Zero Moment Point) と呼ばれる概念を導入する。ZMPとは、重力および慣性力によって、物体が床から受ける反トルクの内、床平面内の軸周りの成分がゼロになる点のことである。ZMPがロボットの支持多角形の中にあるとき、転倒することなく歩行を続けることができる。すなわちパターンジェネレータは、ロボットの数値モデルを利用してZMPが支持多角形の中に位置するような歩行軌道を作成するためのルーチンである。

3. 歩行実験の逆動力学解析

この章では、歩行実験におけるセンサ出力(エンコーダ、6軸力計、胴体の角速度、加速度計)から、リンク両端に働く内力、曲げモーメントを推定するための計算方法について述べる。センサ出力からロボットの運動を再構築することができるため、逆動力学計算による推定が可能である。推定結果は、二足歩行ロボットの構造設計や、モータ等のコンポーネントの選定に、有効なデータとなる。

(1) 座標系と基準姿勢の定義

地球固定座標系を、xy平面が水平面、z軸が鉛直上向きになるようにとる。また、左右股関節軸の中間点(図2の黒丸)を胴体リンクおよびisamuの原点とし、胴体固定座標系を、x軸が胴体前方、y軸が左方、z軸が上方になるようにとる。その他のリンク固定座標系についても、isamu原点に近い方の関節軸上の代表点を原点として、直立姿勢時(図2)に胴体固定座標系と各軸が平行になるように定義する。直立姿勢は関節角度の基準でもあり、図2の姿勢における関節角度を0°としている。

(2) 二足歩行ロボットの運動

二足歩行ロボットは、胴体と、胴体に固定された数本のロボットアームからなる。各リンクの地球固定座標系に関する運動を、地球固定座標系に関する胴体の運動と、胴体に関する各リンクの運動に分けて考えることで、既存のロボットアームに関する計算法を利用することができる。胴体の運動は、胴体部に搭載された加速度計と角速度計の出力から求める。ただし、今回の実験に関しては、胴体の角運動がほとんどないため、角速度計の出力は使用しない。

各リンクの運動は、次節に示す、漸化式形式の計算法を利用した。詳細は文献²⁾等を参照されたい。

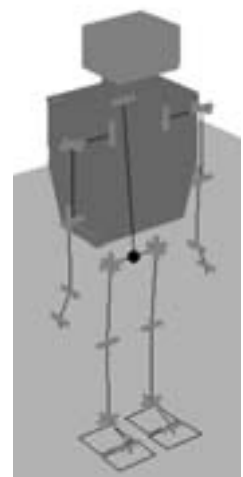


図2 基準姿勢

(3) 各リンクの運動（加速度，角速度）の再構築

各リンクの形状，軸配置，慣性モーメント等の形状，および動力学パラメータは全てわかっているため，各エンコーダ出力から求めた関節角度が時系列で与えられれば，各リンクの胴体に関する運動（加速度，角速度）を求めることができる。まず，角速度，角加速度は，漸化式を用いて，

$$\omega_i = \omega_{i-1} + s_i \dot{\theta}_i \quad (1)$$

$$\dot{\omega}_i = \dot{\omega}_{i-1} + s_i \ddot{\theta}_i + \omega_i \times (s_i \dot{\theta}_i) \quad (2)$$

と表される。胴体の角速度は0であるとして，胴体に近いリンクから順に角速度，角加速度を求めることができる。加速度については，先に各関節軸位置での加速度を(3)式に従って求め，その値を利用して，(4)式から重心位置での加速度を求める。胴体の加速度は測定されているので，角速度の場合と同様に，胴体リンクに近いリンクから順に決定していく。

$$a_i = a_{i-1} + \dot{\omega}_{i-1} \times l_{i-1} + \omega_{i-1} \times (\omega_{i-1} \times l_{i-1}) \quad (3)$$

$$a_{Gi} = a_i + \dot{\omega}_i \times l_{Gi} + \omega_i \times (\omega_i \times l_{Gi}) \quad (4)$$

なお，各値は地球固定座標系で表した値とする。

ω_i ：リンク*i*角速度

s_i ：関節軸方向ベクトル $s_i = {}^0R_i \hat{s}_i$

$\hat{s}_i$ ：基準姿勢における関節軸方向ベクトル

0R_i ：リンク*i*固定座標系から地球固定座標系への回転変換行列。関節角度による回転変換行列の積で，

$${}^0R_i = R_{yaw} R_{roll} R_{pitch} \cdots R_{\theta_{i-1}} R_{\theta_i}$$

と表される。

θ_i ：関節*i*（リンク*i*の胴体側の関節軸位置）の角度

a_i ：関節*i*位置での加速度

l_i ：関節*i*から関節*i+1*へのベクトル $l_i = {}^0R_i \hat{l}_i$

a_{Gi} ：リンク*i*の重心位置における加速度

l_{Gi} ：関節*i*からリンク*i*の重心へのベクトル

$$l_{Gi} = {}^0R_i \hat{l}_{Gi}$$

(4) リンク間に働く力と曲げモーメント

図3より，リンク*i*の並進運動，および重心周りの回転運動の運動方程式は次式で表される。

$$m_i a_{Gi} = f_i - f_{i+1} + m_i g \quad (5)$$

$$I_i \dot{\omega}_i + \omega_i \times I_i \omega_i = n_i - n_{i+1} + l_{G_i \rightarrow P_i} \times f_i + l_{G_i \rightarrow P_{i+1}} \times (-f_{i+1}) \quad (6)$$

f_i ：関節*i*に働く力

n_i ：関節*i*に働くモーメント

$l_{G_i \rightarrow P_i}$ ：リンク*i*の重心から関節*i*へのベクトル

ここで(5)式を変形すると，

$$f_i = f_{i+1} + m_i (a_{Gi} - g) \quad (5)'$$

となり，先端リンクにかかる外力がわかれば，関節にかかる力を，先端リンクから順に求められることがわかる。力が求まり，先端リンクにかかる床モーメントがわかれば，

$$n_i = n_{i+1} + I_i \dot{\omega}_i + \omega_i \times I_i \omega_i - l_{G_i \rightarrow P_i} \times f_i - l_{G_i \rightarrow P_{i+1}} \times (-f_{i+1}) \quad (6)'$$

より，同様の計算で曲げモーメントも求められる。このように，この計算方で内力を求めるためには，床反力とトルクを知る必要がある。今回のように，歩行実験を行った場合は，6軸力センサによって足裏に働く力とモーメントを測定できるので，これを利用することにより内力を推定することができる。シミュレーション計算の場合は，全リンクの床に対する運動から床反力とトルクの総和を求めることができるが，不静定となる両足支持期には，摩擦力や内力に関する条件から最適解を求めなければならない。

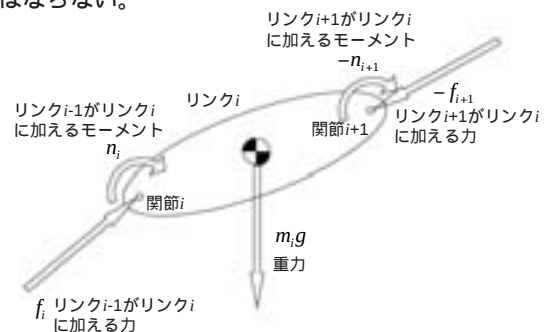


図3 リンク*i*に働く力とモーメント

4. 実験システム

歩行実験では，isamu内蔵のセンサ（6軸力計，エンコーダ，加速度計，角速度計）の出力と，両脚モータの電流値を記録する。後者については，今回新たに計測システ

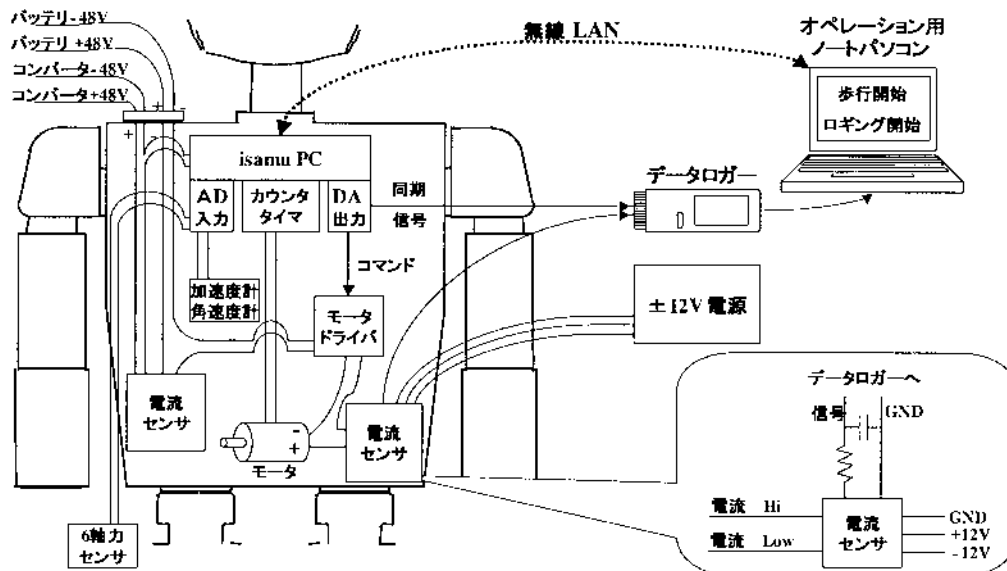


図4 実験システム

ムを導入した。図4に，isamuによる実験システムを示す。
以下では，この実験システムについて述べていく。

両脚全てのモータ，ドライバ間の電流を計測できるように，定格20Aの電流センサ（P10-20/4，HINODE）14個をisamuの背面に配置し，CRフィルタ，データロガー（NR2000，KEYENCE）を介してノートパソコンに記録した。また，両脚だけでなくPCおよびサーボ系全体の電流もそれぞれ測定できるようにした。ただし，サーボ系全体の電流用には，定格25Aの電流センサ（HPS-AP，U_RD）を用いた。電流センサは左脚のモータ用，右脚モータ用，PCとサーボ系全体用の3つのユニットにまとめた（図では簡単にするため，両脚分を一つにまとめて示している）。

記録したモータ電流値から関節にかかるトルクを計算するには，トルク定数と減速機（ハーモニックドライブ）の効率を考慮して，(7)式から求める。

$$T_{\text{output}} = \eta (T_{\text{input}} \dot{\theta}_{\text{input}}) K_T i_{\text{meas}} \quad (7)$$

K_T ：トルク定数

η ：減速機（ハーモニックドライブ）の効率。

今回は，カタログ値を利用して算出した。

一方，内蔵センサの出力はインターフェースボードを介してisamu上で記録する。従って，2種のトルク推定値を比較するためと，(7)式で関節角速度が必要であることから，isamuとNR2000の同期をとる必要がある。これは，isamuのインターフェースボード（RIFボード）の余っていたDAチャンネルを利用して，isamu上のロギングプログラムを走らせると同時に，NR2000のトリガー入力に信号を送信することで同期をとることにした。

5. 実験結果

その場足踏み運動，スクワット運動，前進運動等の基本的な運動パターンを作成して実験を行った。その内，足踏み運動とスクワット運動の実験結果を示す。

(1) その場足踏み運動（4歩）の逆動力学解析結果

まず，その場足踏み運動による実験を行った。表2に作成した歩行軌道の主な設計パラメータを示しておく。

表2 足踏み軌道の設計パラメータ

歩数	4（歩）
遊脚のx方向移動量	0（mm）
遊脚のy方向移動量	0（mm）
1歩の時間	1（sec）
片足支持期	0.8（sec）
両足支持期	0.2（sec）
遊脚の高さ	45（mm）
両腕，首の関節	固定
目標ZMP軌道	片足支持期：支持脚足裏の中央 両足支持期：片足支持期の目標ZMP間を等速直線運動

設計パラメータは，全て西脇¹⁾による値を参考にして決定した。その場で足踏みをするだけなので，床面に対する目標ZMPのx座標は変化せず，左右足裏それぞれの中点の間をy方向（ロボットの左右方向）に往復するのみである。図5a)に，目標ZMPのy座標と，実験により計測されたZMPのy座標，そして重心のy座標を示した。各値は，歩行開始時の胴体基準点を原点とする地球固定座標系による表示である。また，図5b)に，関節軸のエンコーダ出力から足踏み歩行運動の様子を再現したものを示す。 ， ， は，それぞれ右足支持期，両足支持期，左足支持期の様子であり，図5a)中の番号に対応している。

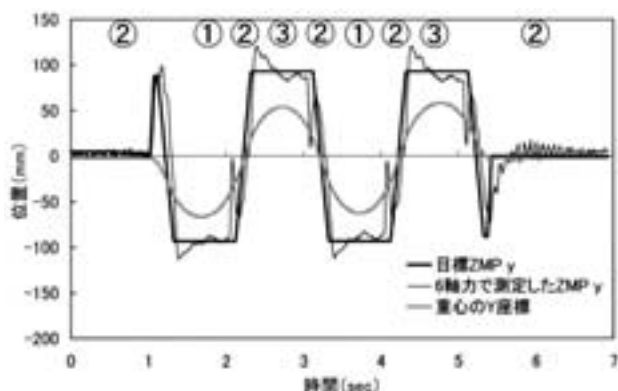


図5a) 目標ZMP軌道と計測したZMP軌道との比較 (y方向)

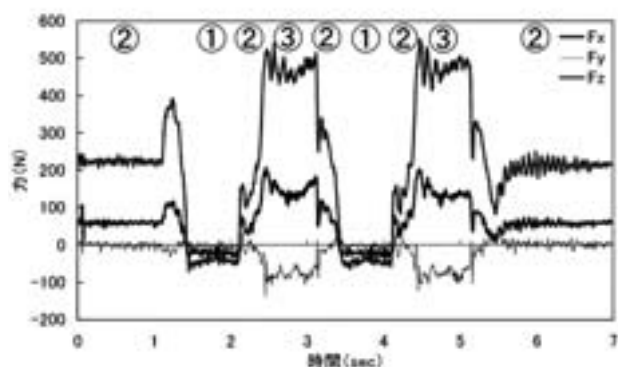


図6 LCPリンクの膝関節部分に働く力

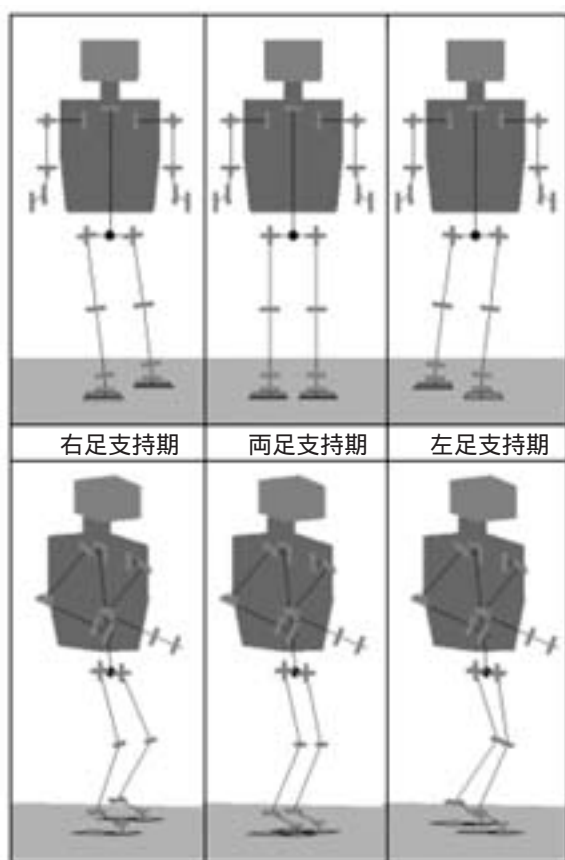


図5b) その場足踏み歩行運動の再現

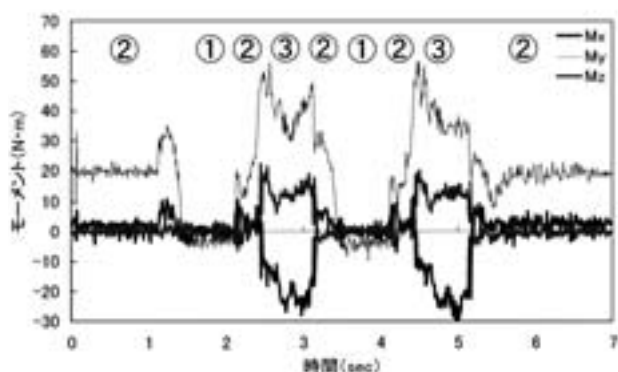


図7 LCPリンクの膝関節部分に働くモーメント

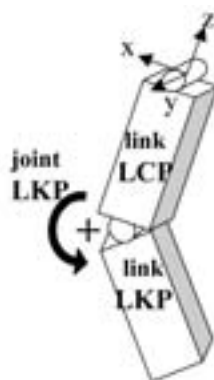


図8 LCPリンク固定座標系

図5a) より，目標ZMPと計測したZMPは，片足支持期（図の ① と ③）の初めと終わりの部分でずれているが，全体としては良く一致している。ずれの原因は，モデルの誤差によるものと考えられる。これは，安全を考慮してZMP制御のゲインを低めに設定しているからである。したがって，ゲインを高めに設定することで多少は改善できる。

次に，同様の運動で，3章で示した方法で左膝ピッチ軸にかかる力とモーメントを推定した結果を，図6，図7に示す。図6は，左股関節ピッチリンク（以下，LCPリンクと記す）が，隣接する左膝ピッチリンク（以下，LKPリンクと記す）から，膝関節部分に受ける力を，図7

はモーメントをそれぞれ示している。構造設計で利用する場合には，各リンク固定の座標系で表す方が都合が良いため，LCPリンク固定座標系（図8）における値として示した。図6より，z方向に最大で550 N程度の荷重がかかっていることがわかる。また，膝を曲げ，腰を少し落とした姿勢での歩行であるため，x方向にも圧縮荷重がかかっている。図7において，支持脚期にMy（膝モータにかかるトルクに等しい）がV字型に減少しているが，これは，支持脚（左足）の膝を伸ばすことで，モーメントアームが短くなることが原因である。また，上体が少し上昇し，遊脚を上げやすくなるので，遊脚側のモータの回転速度も下がる。

表3 足踏み歩行中の膝関節にかかる最大6軸力

x方向荷重	200 [N]
y方向荷重	- 120 [N]
z方向荷重	550 [N]
x軸周りのモーメント	- 30 [N・m]
y軸周りのモーメント	55 [N・m]
z軸周りのモーメント	20 [N・m]

表4 足踏み歩行中の各関節の実効トルク（1周期分）

関節軸名	実効トルク [N・m]	割合 [%]
左脚股関節ヨー軸	2.62	1.96
左脚股関節ロール軸	37.1	27.8
左脚股関節ピッチ軸	11.3	8.47
左脚膝関節ピッチ軸	45.4	34.0
左脚足首ピッチ軸	30.0	22.5
左脚足首ロール軸	6.95	5.21

最後に、足踏み運動における6軸力の最大値（表3）と、左足の各関節の実効トルク（表4）を示しておく。表4より、isamuの歩行では主に膝関節ピッチ軸、股関節ロール軸、足首ピッチ軸を利用していることがわかる。股関節のロール軸が大きな実効値をとっているのは、片足支持期に胴体を片持ち支持することと、胴体重心移動のy成分が比較的大きく、大きな加速度が発生することが原因である。

（2）計算の妥当性

図9に、（7）式で求めた膝関節トルク推定値と、逆動力学計算による推定値を示す。計算に用いたデータは、先の足踏み運動によるもので、LKPリンクがLCPリンクに加えるトルクである。膝関節角速度は、図8に示すように、膝を曲げる方向が正方向であり、トルクはLCP固定座標系のy軸周りの値である。

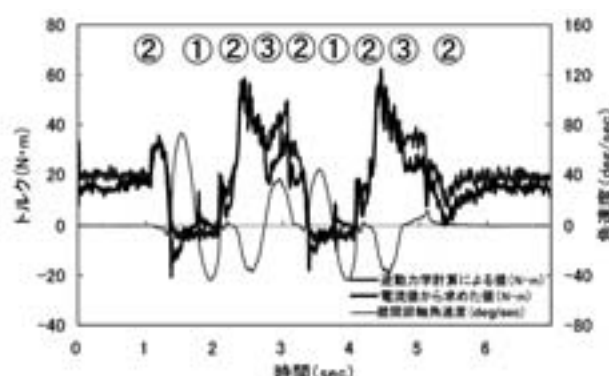


図9 足踏み歩行中の膝関節トルク

図9をみると、非常に良く一致している部分と、そうでない部分とがある。支持脚期（正のトルクがかかっている時）に、重力に逆らってモータが仕事をするとき（関節角速度が負の時）に良く一致し、反対に、重力が仕事をするとき（関節角速度が正の時）、電流から算出したトルクは小さい値を取る。これは、電流値からトルクを求める計算で、ハーモニックドライブの逆入力効率

を考慮していないためであると考えられる。このことは、次の図10に示す、スクワット運動による実験結果を見ると明らかである。

運動の内容は、胴体の姿勢を水平に保ったまま、およそ5秒かけて膝関節が120°曲がるまでしゃがみこみ、そのまま5秒かけて直立姿勢に戻るというもので、ほぼ静的な運動とみなせる。

この場合も図9と同様に、膝関節が曲がって、上体が下降するとき、2つの推定値にずれが生じている。これより、やはり重力による減速機への逆入力に影響していると考えられる。しかし、図10のグラフの対称性と、後半部分の一致を見る限り、逆動力学計算によるトルクは、ほぼ正常な値を示していると考えられる。

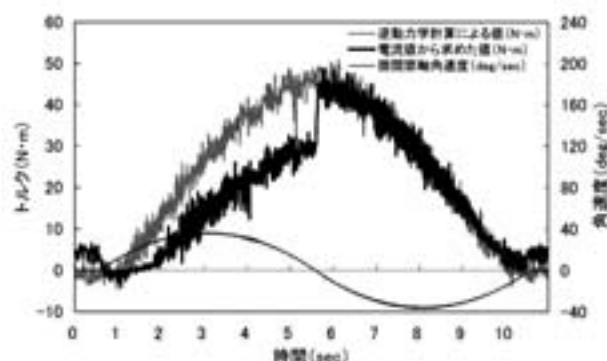


図10 スクワット運動における膝関節トルク

6. まとめ

今回、二足歩行ロボットの歩行軌道生成ルーチンを作成し、歩行実験によって、生成した歩行軌道のZMPが実際に目標軌道に追従することを確認した。そして、その時のセンサ出力から、各関節部にかかる力とモーメント、関節軸にかかる実効トルクを求めた。また、両脚のモータに流れる電流の計測値から関節トルクを求め、逆動力学計算で推定した値と比較した。減速機に逆入力がかかる場合と、モータの回転方向の正負が変わる時を除いて、両者はほぼ一致し、内力推定計算の妥当性が確かめられた。

今後は、シミュレーション計算と歩行実験を繰り返し、ハードウェア設計に役立てていくと共に、効率良く歩く、より速く歩く、走行するといった目標に対して、運動軌道の生成法と制御方式を検討していく予定である。

参考文献

- 1) 西脇：人間型ロボットの歩行システム構築と動作のオンライン生成制御，東京大学，学位論文，2002.
- 2) 広瀬：機械システムのベクトル解析，ロボット工学（改訂版），裳華房