

# 有限要素法を用いたロボット機構内の衝撃力予測

## Prediction of Impact Force Produced in Robotic Mechanisms by Using FEM

廣田 直也 (筑波大院) 正 磯部大吾郎 (筑波大)

Generally, an impact force or a shock wave produced in constituting members of a robotic architecture was not a serious issue. But as the robotic architecture becomes maneuverable in faster motion, the shock wave produced in the mechanism increases, as well as the danger of the mechanical destruction. In this research, a prediction system using Finite Element Method, which computes the impact force produced in the contact situation is developed, and it is verified by carrying out some simple numerical tests with a biped, robotic model. As a result, it is observed that the vibration produced by impact force increases not only in the case of grounding, but also in the case of releasing contact with short time interval.

*Keywords:* Impact force, Biped, robot, Finite Element Method, Contact, Impact analysis

### 1. はじめに

ロボットが物体と接触する際、接触時には物体からの反力を衝撃的に受ける場合が多い。このような衝撃力を受けたときに破損の危険性が高くなる部位は、ロボットの構造形態や外力に依存すると考えられる。そのため、破損の危険性が高い部位を設計段階で把握しておくことや、構造強度上の危険性が少ない動作を計画すること[1]などは、ロボットの構造・機構設計を行う上で極めて重要である。しかしこれまでの研究では、機構を完全剛体とみなして設計されることが多く、ロボットの機構を構成する部材の強度や安全性を加味した機構設計、姿勢決定、動作計画などについてはほとんど議論されていなかった。そのため、重量が重くかつ高速な動作を意図したロボットの場合、内部に生じる衝撃力が増し、部品損壊やZMPの振動[2]による制御の困難を招く可能性が高くなる。

そこで本研究では、ロボット機構を動作させる際に発生する衝撃力を予測する手法として、有限要素法(FEM)を用いた解析アルゴリズムを構築した。そして、接地・離地時に2足歩行ロボットの足部分に生じる衝撃力について検証を行った。

### 2. FEMを用いた衝撃力解析アルゴリズム

仮想仕事の原理より、時刻 $t + \Delta t$ における運動方程式は、部材の移動量を考慮すると以下のように定式化される。

$$[M]\{\ddot{u}_m\}_{t+\Delta t} + [M]\{\ddot{u}_d\}_{t+\Delta t} + [C]\{\dot{u}_d\}_{t+\Delta t} + [K]\{\Delta u_d\} = \{F\}_{t+\Delta t} - \{R\} \quad (1)$$

ここで、 $[M]$ は全体質量マトリクス、 $[C]$ は全体減衰マトリクス、 $[K]$ は全体剛性マトリクス、 $\{\ddot{u}_m\}$ は部材が移動することによって生じる加速度ベクトル、 $\{\dot{u}_d\}$ 、 $\{\Delta u_d\}$ はそれぞれ部材が変形することによって生じ

る加速度、速度、変位増分ベクトル、 $\{F\}$ は外力ベクトル、 $\{R\}$ は内力ベクトルである。ただし本解析では簡略化のために $[C]$ は無視する。この式にNewmarkの法より導かれる速度、加速度を代入すると式(1)は次式ようになる。

$$([K] + \frac{1}{\beta \Delta t^2} [M])\{\Delta u_d\} = \{F\}_{t+\Delta t} - \{R\}_t + [M](\frac{1}{\beta \Delta t} \{\dot{u}_d\}_t + (\frac{1}{2\beta} - 1)\{\ddot{u}_d\}_t) - [M](\frac{1}{\beta \Delta t^2} \{\Delta u_m\} - \frac{1}{\beta \Delta t} \{\dot{u}_m\}_t - (\frac{1}{2\beta} - 1)\{\ddot{u}_m\}_t) \quad (2)$$

上式を解いて、累積することにより変位量ベクトル $\{u_d\}_{t+\Delta t}$ を求める。さらに、これを要素座標系の情報へ変換し、 $\{\cdot\}_{t+\Delta t}$ とおく。すると、ひずみ-節点変位関係式は次式ようになる。

$$\{\cdot\} = [B]\{\cdot\}_{t+\Delta t} \quad (3)$$

ひずみと節点変位の関係が求まると、次式の断面力-ひずみ関係式を用いて各要素に生じる断面力が算出される。

$$\{\sigma\} = [D]\{\cdot\} \quad (4)$$

本アルゴリズムでは、目標軌道データを逐次入力し、各ステップでは静的な解析を行う。ステップごとに算出される物体の変形量による速度、加速度ベクトルと物体の移動量による速度、加速度ベクトルを逐次加算することで、動作するロボット機構内に発生する、時々刻々の衝撃力を算出することが可能となる。また、目標軌道データの各節点の鉛直方向座標値から接地・離地が判定され、その時に速度・加速度情報などを組み換える作業が行われる。

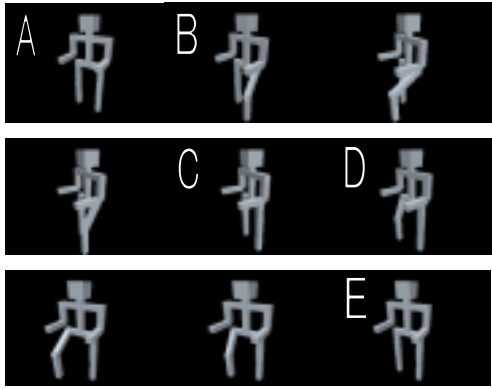


Fig.1 Target trajectory for bipedal robotic model

### 3. 2足歩行ロボット機構内の衝撃力予測

本報告では、簡単な2足歩行ロボットが3次元運動を行う際に、機構内に発生する衝撃力の予測を行った。26のほり要素で分割・モデル化し、高さ1.8 m、総重量15.54 kg、部材の材質はアルミニウムを想定した。CGソフトを利用して作成した目標軌道をFig.1に示す。左足を離地・接地し、その後すぐに右足を離地・接地するという、計2歩の動作を行っている。また、Fig.1の主な姿勢に対し、動作の順にA, B, C, D, Eの記号を付けた。

最初に、全動作時間が40sという、動作速度が遅い場合の解析を行った。その結果をFig.2に示す。この図を見ると、ゆっくりした動作時には衝撃力が発生しないことが分かる。また、両足接地時(図中 A,E)には、両足に均等に自重がかかっていることも確認できる。

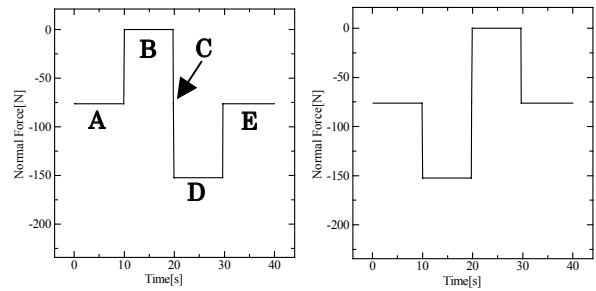
次に、全動作時間を2sとした場合の解析を行った。その結果をFig.3に示す。この場合、接地・離地の際には両足ともに衝撃力が生じている。また、左足接地時と右足接地時とを比較すると、左足接地時の方が発生する衝撃力が大きいことが分かる。これは、左足接地後すぐに右足を離地したため、衝撃による振動が重なったと推察できる。

次に、両足接地時(Fig.1のC)に0.8秒の静止時間を設けて解析を行った。その結果をFig.4に示す。左足に着目してFig.3(a)と比較すると、Fig.4(a)では接地後(図中C,D)の振動振幅が若干小さくなっていることが分かる。また、動作終了後(図中E)の振動が全体的に小さくなっている様子も見られる。

### 4. 結論

近年のロボット工学の目覚ましい発展から推測すると、将来的にはロボットの動作が高速化することが考えられ、機構の強度に目を向けた設計や動作計画の必要性が高まることが予想される。本報告に示すような手法を用いれば、動作時のロボット機構内に発生する衝撃力を予測し、無理のない動作計画を立てることが可能となると考える。また、設計段階においては、破損の危険性がある部位をあらかじめ強化するなどの措置を取り、無駄のない省材料コストのロボットを製作する一助になるであろう。

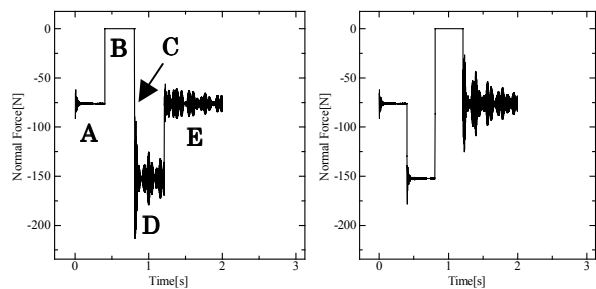
今後は、ロボット機構内に生じる内力および衝撃力をリアル



(a) Left foot

(b) Right foot

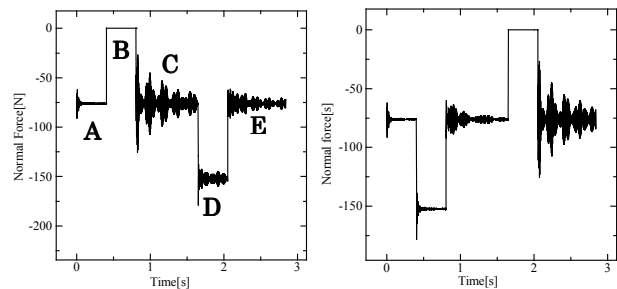
Fig.2 Normal force in slower motion with short time interval



(a) Left foot

(b) Right foot

Fig.3 Normal force in faster motion with short time interval



(a) Left foot

(b) Right foot

Fig.4 Normal force in faster motion with long time interval

タイムに予測するシステムの開発を目指す。このシステムを実機に搭載し、センサからの信号に頼ることなく、フィードフォワード的に衝撃に対する制御を行うことを可能としたい。

### 参考文献

- [1] 石井悠一郎, 磯部大吾郎: ひずみエネルギーの抑制を目的としたマニピュレータの動作計画, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, (2002).
- [2] F. Kanehiro, et al., Virtual Humanoid Robot Platform to Develop Controllers of Real Humanoid Robots without Porting, IEEE IROS01, (2001), pp. 1093-1099.