

# 数値モデルによるマニピュレータ内の衝撃力予測

## Impact-Force Prediction for Manipulators by Using Numerical Models

○正 磯部大吾郎（筑波大） 廣田 直也（サトー）

Daigoro ISOBE, University of Tsukuba, 1-1-1 Tennodai, Tsukuba-shi, Ibaraki  
Naoya HIROTA, Sato Co.

Generally, force sensors do not have high reliability in their detected values, especially for dynamic forces. We discuss a new methodology to obtain the distribution of impact forces in manipulators, by considering the numerical model of the mechanism. In this research, a prediction system of impact force using the Finite Element Method is developed, based upon the incremental equation of motion considering the volume force generated by the motion. Expression of contact is discussed, in this paper, on two ways; (a) the impulse method and (b) the gap-element method. A sensor output in an experiment and the numerical result are compared. Although further investigation on the impulse time is required, the peak values of the impact force are practically in good agreement.

*Key Words:* Impact force, Manipulators, Finite Element Method, Contact, Gap elements

### 1. 緒言

ロボットは目的に応じて様々な機構を有し、動作時には姿勢が変化することでその構造的強度が時々刻々変化する。特に、他物体との接触などによって外力を受けた場合、部材破損の可能性のある部位はその機構、姿勢、動作によって大きく変わる[1]。しかし現状では、ロボットは完全剛体として扱われる場合が多く、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、動作計画、姿勢決定などの議論はあまりされていない。そのため、動作時や他物体との接触時などに、応力集中や衝撃波の伝播などにより、予期していない部位が破損してしまうという危険性がある。また、これにはひずみ系センサなどの貼付による対応手段もあるが、動的な荷重に対するセンサの校正法は未だ確立されておらず、周辺機器や環境に依存してその計測値に再現性が得られない、などの扱いにくさが存在する。このような状況を踏まえると、ロボット機構の強度的危険性を回避するために、それを数値モデル化し、機構内に生じる衝撃力や応力集中を数値的に把握するののも一つの解決手段であると考えられる。

本報告では、このような観点で開発された衝撃力予測手法に対し、被接触物体を表現するための2種類の手法、すなわち力積法およびギャップ要素法を付加した。そして、簡単なリンク機構での数値実験を行い、それぞれの手法での力積付加時間およびギャップ要素の物性値が解析結果に与える影響について検証した。さらに、実機に対し解析と同様の衝突動作をさせ、その際のセンサ出力値との比較を行った。

### 2. 衝撃力予測と被接触物体の表現法

部材の移動による体積力変化を考慮すると、仮想仕事の原理より、時刻  $t+\Delta t$  における運動方程式は以下のように定式化される。

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

ここで、 $[M]$ は全体質量マトリクス、 $[K]$ は全体剛性マトリクス、 $\{\ddot{u}_m\}$ は移動量の加速度ベクトル、 $\{\ddot{u}_d\}$ 、 $\{\dot{u}_d\}$ 、 $\{\Delta u_d\}$ は部材変形量の加速度、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。また、 $[C]$ は比例減衰型の減衰マトリクスで、その係数には実験などから取得したものを使用する。上式に代表的な陰解法の一つである Newmark の  $\beta$  法を適用し、 $\{\ddot{u}_m\}$ に軌道を入力して変位量ベクトル  $\{u_d\}$  を求める。この値から各要素に生じるひずみ・断面力を算出し、モデル内の内力分布を計算する。

被接触物体の表現法として、力積法とギャップ要素法を開発した。力積法では、リンク先端の節点を衝突ステップから力積付加時間  $\Delta t_f s$  だけ完全拘束し、その値を変化させることで被接触物体との接触を表現する。ただし、力積は矩形の形で与え、その総和は変わらないものとする。本手法では、先端節点が完全拘束されることで先端の変形量が0となり瞬間的に内力が発生するのに加え、衝突時に各質点に慣性力が発生し、リンク機構内に衝撃力が発生する。設定パラメータが少ない上に計算時間が短い、被衝突物体の剛性を設定できないという欠点がある。一方、ギャップ要素法は、衝突が判定された瞬間にリンク先端にギャップ要素を新しく設け、その材質や形状によって被接触物体を表現する手法である。接触時に要素数が増えるため計算時間が長くなる一方で、被接触物体に発生する応力波の伝播も考慮でき、さらに接触・非接触を繰り返す跳ね返りなどの現象を表現可能であるという利点を持つ。

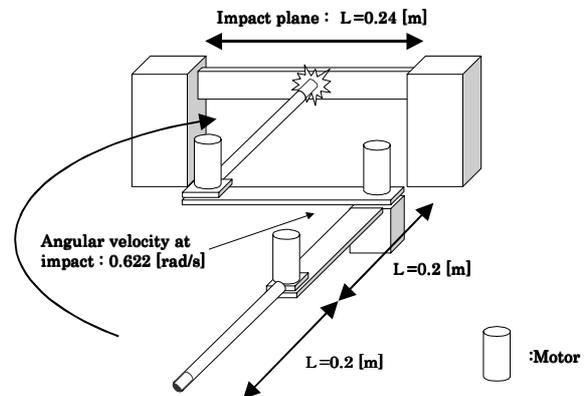
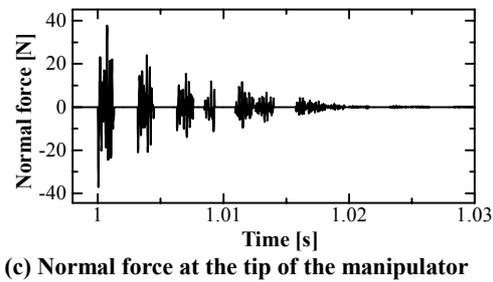
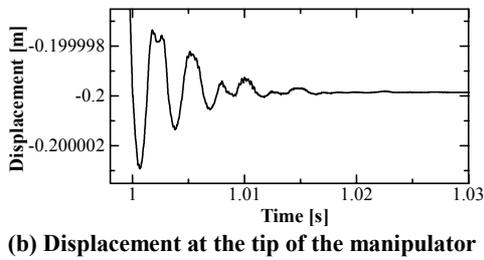
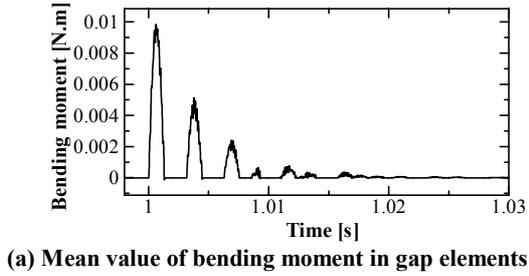
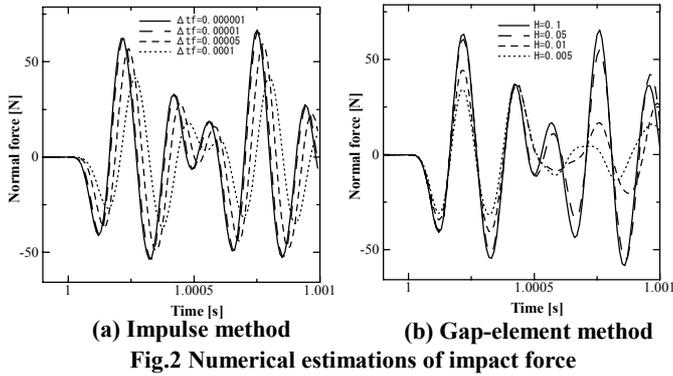


Fig.1 Schematic of the model and motion



### 3. 衝撃力予測例

衝撃力予測例として、Fig.1 に示すような 2 リンク機構が水平面内で他物体と衝突をする際の解析結果を示す。1 リンク部材（長さ：0.2 m、質量：0.1344 kg、材質：アルミニウム）を 2 つの線形要素で分割し、リンクの質量は重心位置に集中させた。ギャップ要素にも同様の物性値を用い、時間増分は  $\Delta t = 1.0 \times 10^{-5} \text{ s}$  とした。

力積法で被接触物体を表現した場合、リンク根要素における軸力の時刻歴を Fig.2(a) に示す。力積付加時間  $\Delta t_f$  を短くしていくと衝撃力のピーク値が次第に大きくなり、特定の曲線に収束していくことが分かる。これは、物体表面での力のやり取りが短時間で行われ、より剛体に近い状態に近づいているためと思われる。実験などから  $\Delta t_f$  値や力積付加形状を決定するのは一般的に困難であるが、実験値からピーク値を求め、材質ごとの  $\Delta t_f$  を決めればある程度の衝撃力予測は可能だと思われる。

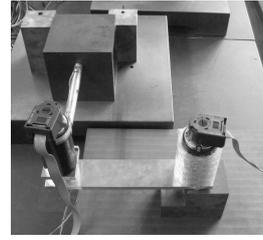
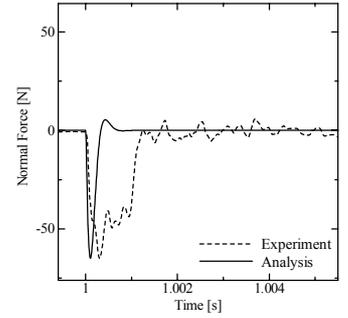


Fig.4 Experimental setup



一方、ギャップ要素法による予測例を Fig.2(b) に示す。ギャップ要素の厚み  $H$  が増すにつれ衝撃力が大きくなり、次第に特定の曲線に収束していくことが分かる。これもまた、衝突物体に対してギャップ要素の寸法が相対的に大きくなることで、剛体に近い物体を表現することになるためと思われる。衝撃力が力積法の場合よりも若干大きいのは、被衝突物体からの応力波の伝播などが考慮されるためである。また、跳ね返りを考慮した解析結果を Fig.3 に示す。ギャップ要素の曲げモーメントの平均値 (Fig.3(a)) を用いて跳ね返りを判定し、再接触のたびにギャップ要素を新設する。マニピュレータ先端が衝突面近傍で接触・非接触を繰り返し (Fig.3(b))、接触のたびに発生する衝撃力が次第に減衰していく様子が観察できる (Fig.3(c))。

最後に、Fig.4 に示すような実機による衝突実験を行い、センサ出力値との比較を行った。剛体として十分に近似可能な物体に対し、リンク先端を 0.124 m/s の速度で衝突させた。衝撃力の計測にはリンク機構先端部に取り付けた圧力センサ (Entran 社製 ELFS-T3M) を用いた。Fig.5 に実機での計測値、および減衰を考慮したギャップ要素法による解析結果を示す。衝撃力のピーク値については良好に一致するが、両者の定常状態へ落ち着く速さについては相違が見られる。これは、実機ではリンク先端で面接触を起こし、力積付加時間が若干長いのに対し、解析では接触が瞬時に (1 ステップの間) 起こることが原因と思われる。今後、ギャップ要素法に力積法を取り込んだ手法を開発する必要があるものと考えられる。

### 4. まとめ

自由度数の少ないはり要素を用いる背景には、計算時間を短縮化し、機構の動作中にその制御に反映させたいという意図がある。本報告では 2 種類の被接触物体の表現手法を紹介したが、計算時間の短縮化、アルゴリズムの簡素化という意味では力積法が優位性を持つ。しかし、被接触物体の剛性の考慮、跳ね返りなどの表現が必要な場合は、ギャップ要素法が有利である。いずれの手法でも剛体に近い状態を表現可能であることから、それに基づいて各パラメータの設定は可能だと思われる。

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] 磯部 大吾郎, 石井 悠一郎, 構造強度に着目したロボット機構の姿勢決定および動作計画, 日本ロボット学会誌, 第 22 巻, 第 1 号, pp.75-82, 2004.