

数値モデルによるリンク機構内の衝撃力同定

○守屋 良昭 (筑波大院) 磯部 大吾郎 (筑波大学)

Impact Force Identification of Link Mechanisms by Using Numerical Models

*Yoshiaki MORIYA, Graduate School, Univ. of Tsukuba, Daigoro ISOBE, Univ. of Tsukuba

Abstract — In the case of a manipulator operating at a high speed, stresses within it may be of large values. The manipulator can also be subjected to an unexpected, exclusive reaction force due to a high-speed impact with other bodies. It is a major problem since the shock wave generated in such cases may damage the mechanism. In this study, the Finite Element Method (FEM) that can be used to analyze the shock wave generated within a link mechanism is developed. The gap-element method is also developed to simulate the impact phenomenon. In order to check the validity of the gap-element method, some numerical tests and experiments are performed and the results are compared. The results show that impact analyses considering member stiffness are possible. The peak values of shock waves obtained from numerical analyses are practically in good agreement with those of the experimental results.

Key Words: Impact analysis, Finite Element Method, Link mechanisms, Gap elements

1. はじめに

現在、マニピュレータはその生産性を向上させるため、今まで以上に高速かつ安定に稼動することが求められている。マニピュレータが高速で稼動する際、内部に発生する応力は増大する。また、高速移動時は接触によって思わぬ反力を衝撃的に受ける。このような応力増大や衝撃力が発生した場合、部品破損や振動による制御の困難を招く可能性がある^[1]。

これまでの研究では、マニピュレータやロボットといった能動的に変形する機構を完全剛体として扱うことが多く、それらが受ける衝撃に対し、機構の安全性を考慮した構造設計、姿勢決定、動作計画などについて議論されることは少なかった。今後、機構が移動することで発生する内力分布や、接触によって生じる衝撃力を設計段階で考慮することがますます重要になってくると考えられる。

そこで本研究では、衝撃力解析手法の開発の一環として、衝突時に被接触物体を表現するための解析手法であるギャップ要素法を開発し、リンク機構の衝撃力同定に適用した。そして、実験値との比較を行うことで、ギャップ要素法を用いた手法の有効性について検証した。

2. 解析アルゴリズム

2.1 内力解析手法

マニピュレータ機構のように能動的に姿勢を変化する機構に対して有限要素法を用いるため、部材の移動による体積力変化を考慮する必要がある。このため時刻 $t+\Delta t$ における運動方程式は、系の移動によって発生する慣性力を考慮すると以下のように定式化される。

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

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、 $\{u_m\}$ は系の移

動量ベクトル、 $\{u_d\}$ は要素が変形することによって生じる変形量ベクトル、 $\{F\}$ は外力ベクトル、 $\{R\}$ は内力ベクトルである。また、全体減衰マトリクスは比例定数 α, β を用いて以下の式で表される。

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad (2)$$

本解析は動的問題であるため、時間積分法を使用する。陰解法の一つであるNewmarkの β 法を式(1)に適用し、変位増分ベクトルを求める。この値から各要素に生じる断面力を算出し、リンク機構の内力分布解析を行う。

2.2 ギャップ要素法

ギャップ要素法は、衝突した瞬間に要素節点に新しくギャップ要素を設けることで、被接触物体との衝突を表現する手法である。ギャップ要素法を用いることで、モデル化したリンク機構の要素を完全拘束せずに解析できるため、被接触物体の材質や形状を考慮することができる。

ギャップ要素法を適用した衝撃力解析の例を示す。Fig.1のように2リンク機構が水平面内を移動し衝突を起こす場合についての衝撃力解析を行った。解析モデルは、リンク部材(Link 1, Table 1参照)を2つ連結したリンク機構である。Fig.2はギャップ要素(長さ: 0.1[m], 幅: 0.05[m], 材質: ジュラルミン)の厚みHを変化させた場合の、リンク先端要素における衝撃

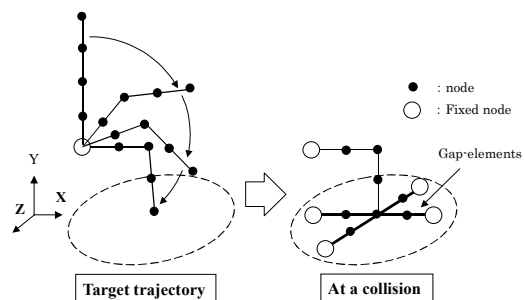


Fig.1 Finite element analysis of a manipulator in contact with a wall

Table 1 Parameter of a link member

Parameter	Link 1	Link 2
Length: $L[m]$	0.20	0.20
Sectional area: $A[m^2]$	2.40×10^{-4}	1.27×10^{-4}
Mass: $M[kg]$	0.134	0.071
Young's Modulus: $E[N/m^2]$	6.90×10^{10}	6.90×10^{10}
Moment of inertia: $I[m^4]$	7.20×10^{-10}	1.28×10^{-8}

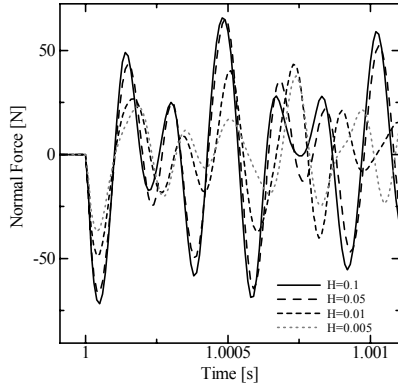


Fig.2 Impact force obtained by the gap-element method

力の変化を表している。この図より、ギャップ要素の厚みが増すにつれて衝撃力が大きくなり、ある程度の厚みで解が収束していることがわかる。これは、リンク機構に対してギャップ要素の寸法を相対的に大きくすることで、剛体に近い被接触物体を表現できるようになるためである。

3. 壁面衝突をするリンク機構の実験

3.1 実験概要

Fig.3のような2リンク機構が水平面内で壁と衝突をする際に発生する衝撃力の計測を行う。リンク部材は根元リンク部材にLink 1を、先端リンク部材にLink 2となる部材を使用した(Table 1)。使用したモータ(maxon社製 RE40)の質量は0.475[kg]である。動作に関しては、全体の動作時間を1.5[s]とし、衝突までの動作で1.0[s]、静止時間が0.5[s]となる目標軌道を設定した。衝突時、リンク根元の角速度は0.622[rad/s]、Y軸方向の先端速度は0.124[m/s]となる。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)を用いる。

3.2 実験と解析の検証

実験では剛体に近い壁面と衝突を行う。そのため、解析においても被接触物体を剛体として表現する必要がある。2.2節の解析結果 (Fig.2) より、収束解である厚さ0.1[m]のギャップ要素(長さ:0.1[m],幅0.05[m],材質:ステンレス)を使用し剛体を表現した。解析には減衰定数を $\alpha = 3.0 \times 10^3$, $\beta = 1.0 \times 10^{-4}$, 時間増分 $\Delta t = 0.01[ms]$ として解析を行った。その結果をFig.4に示す。ここで、衝撃力のピーク値に着

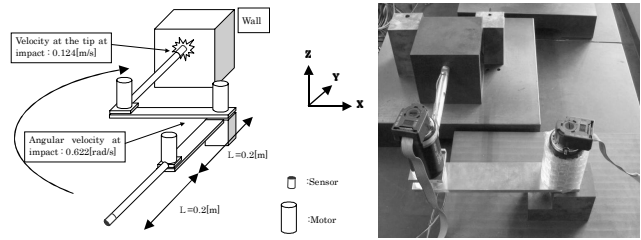


Fig.3 Target trajectory for 2-link mechanism

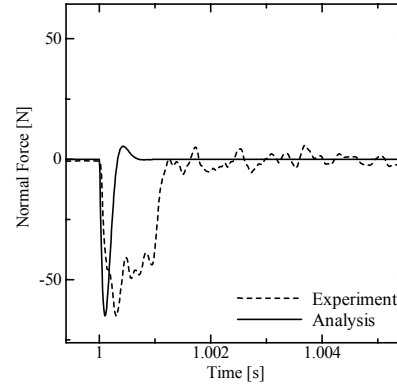


Fig.4 Time histories of normal force

目すると、ほぼ同等の力が発生しているのが確認できる。衝撃力のピーク値を解析できることは、部材破損の危険性の高い衝突を回避する上で有効である。また、今回の実験では衝突時に先端部が面接触を起こしており、被接触物体への力の作用にある程度時間がかかることが確認された。一方、解析では被接触物体と点接触で瞬時に力積が付加される。そのため、力の付加時間を考慮した解析を導入することで、より精度の高い解が求められるものと考えられる。

4. まとめ

衝突解析では被接触物体の材質等によって衝撃力が変化するため、これを考慮する手法が必要である。本研究では、物体間の衝突の表現にギャップ要素を用いた解析アルゴリズムを構築し、その検証を行った。その結果、被接触物体の剛性を考慮した解析が可能であり、かつ剛体に近い被接触物体の表現も可能であることが確認できた。また、実験値との比較を行った結果、衝撃力のピーク値については妥当な解を算出できることが確認できた。

今後は、解析値と実験値の波形が合致するよう、被接触物体の表現法に力の付加時間を考慮する手法を導入し、解析の精度向上を図る予定である。

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, pp75-82, 2004.