

# 有限要素法によるロボット機構の歩行動作における衝撃力の予測

筑波大学 磯部大吾郎 小澤一裕

## Prediction of Impulsive Force in Walking Operation of Robotic Architecture by Using Finite Element Method

Univ. of Tsukuba Daigoro ISOBE Kazuhiro KOZAWA

**Abstract:** In general, impulsive force produced in constituting members of a robotic architecture was not a main issue. But as the robotic architecture becomes maneuverable in high-speed motion, the stress wave produced in the structure is due to increase, as well as the danger of mechanical destruction. In this research, an algorithm calculating inertial force distributed in multi-link mechanisms is constructed by using Finite Element Method. It is verified by carrying out some simple numerical tests, along with a simulation of a biped. robotic model. By using the proposed scheme, the procedure of shifting mass, for example, can be designed suitably to reduce the impulsive force occurring in the mechanisms.

**Key Words:** Impulsive Force, Stress Propagation, Robotic Architecture, Finite Element Method, Biped. Robot

### 1.はじめに

構造力学的見地からロボット機構を観察すると、これらはやはり、モータや部材を介して力を伝達する“構造物”の一種である。介護、あるいはエンターテインメントロボットなどの人間共存型ロボットに注目が集まる中、未だにロボット機構は完全な剛体として設計・製作され、剛体の固まりとして制御されている感が否めない。人間と接触した場合に危険を伴うだけでなく、機構内の応力集中や衝撃波の伝播によって機構自体が破損する可能性が存在する (Fig.1 参照)。また、特に2足歩行ロボットなどでは、足の裏に作用する反力をセンサで検知し、これから機構全体のZMPを求め、転倒しないように制御することが重要な課題の一つとなっている [1]。このように機構内に発生する力を知ることは、無駄のない機構設計や無理のない動作計画を行う上で、必要不可欠な要素となることが多い。

他方、多くのロボットは近い将来、高速で移動することを目標としており、その機構内に生じる衝撃力が増し、構成部材や部品の破壊の危険性が高くなると考えられる。また、動作が高速になるとセンサからの情報をフィードバックするだけでは間に合

わず、機構内の発生力がある程度予測し、フィードフォワード的に制御する必要性が増すことが考えられる。

そこで本研究では、リンク機構が目標軌道上を動作する際に、機構内に発生する衝撃力を短時間で計算する手法を開発することにした。そのアルゴリズムには、構造解析などのツールとして用いられる有限要素法(FEM)を適用した。また、リンク機構のモデル化には、骨組構造の有限要素解析でその有効性が立証されている Shifted Integration 法 (SI 法)

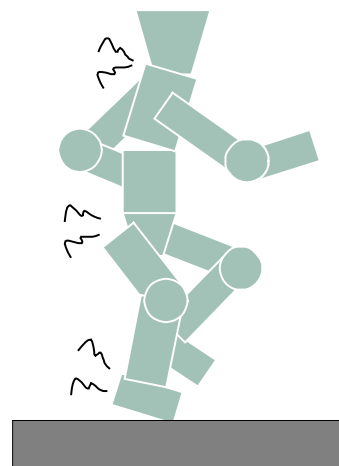


Fig.1 Impulsive force causing damage in robots

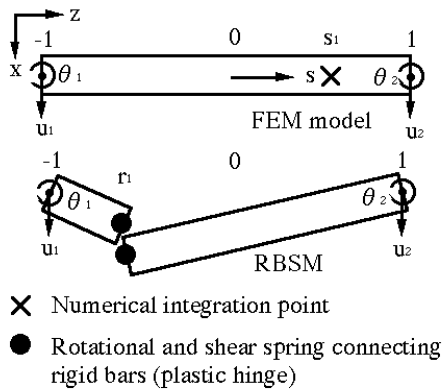


Fig.2 Linear Timoshenko beam element and its physical equivalent

を用い,要素数を削減して計算時間の短縮化を図った. FEM を用いたリンク機構の内力分布解析アルゴリズムを構築し,その動作確認を行った上で,歩行動作を行う 2 足歩行ロボットモデルの衝撃力予測解析を実施し,重心移動が機構内に発生する衝撃力に与える影響について有益な情報を得た.

## 2. SI 法によるリンク機構のモデル化

本研究でリンク機構のモデル化に導入する SI 法は,本来は骨組構造の有限要素解析に用いられる手法である. Fig.2 に示す線形チモシェンコはり要素と,ヒンジが回転ばねおよびせん断ばねによって陽に表現される剛体ばねモデル(RBSM)のひずみエネルギー近似式の考察により,次式のような数値積分点とばねの位置関係が導出されている[2].

$$s_1 = -r_1 \text{ または } r_1 = -s_1 \quad (1)$$

ここに,  $s_1$  および  $r_1$  はそれぞれ, 数値積分点位置および形成されるべき塑性ヒンジ(またはばね)の位置である.

SI 法では, 上式にしたがってヒンジが生じうる点と対称の位置に数値積分点をあらかじめ配置することにより, 精度良く骨組構造物の崩壊荷重解を得ることができる. また, 本手法を順応型に発展させることにより, 様々な条件下において最小限の計算コストで精度の高い解が得られることが立証されている[3].

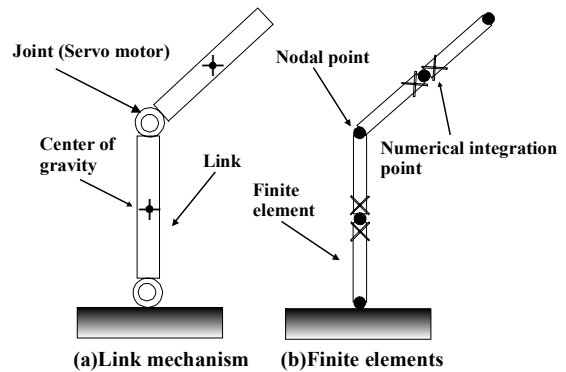


Fig.3 Modeling of link mechanism by Shifted Integration technique

Fig.3 に, SI 法によるリンク機構のモデル化概念図を示す. 図に示すように, モータとリンク部材によって構成されたリンク機構は, リンクの重心位置に節点を設け, 関節位置の反対側に数値積分点をシフトした 2 つの線形チモシェンコはり要素によって表現される[4].

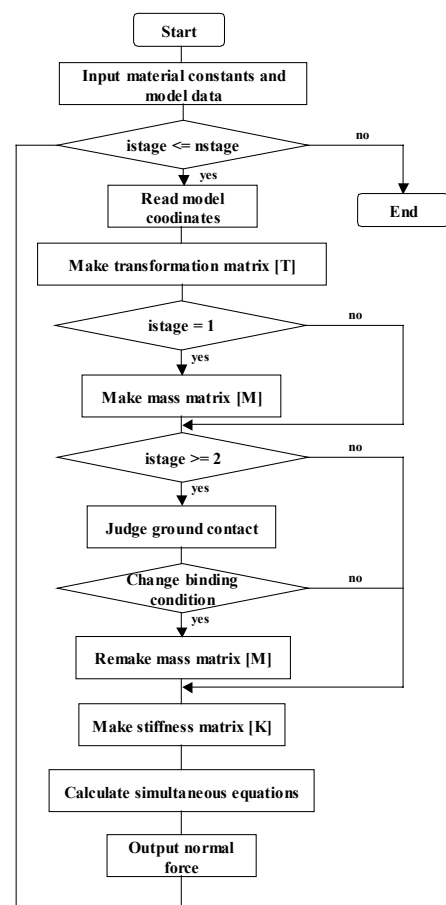


Fig.4 Flow chart

### 3. FEM を用いた内力分布解析アルゴリズム

本研究で構築したアルゴリズムのフローチャートを Fig.4 に示す. 本アルゴリズムでは, 動的変形を伴うモデルデータ (すなわち, 目標軌道) を逐次入力し, ステップ毎には静的な解析を行い, 自重に伴う変形量を算出する. また, 時間積分法の一つである Newmark の法 ( $\gamma=1/4$ ) を用い, 次式で表される速度・加速度情報をステップ毎に算出する.

$$\begin{aligned} \{\dot{u}\}_{t+\Delta t} = & \frac{1}{2\beta\Delta t}\{\Delta u\} - \left(\frac{1}{2\beta} - 1\right)\{\dot{u}\}_t \\ & - \frac{1-4\beta}{4\beta}\{\ddot{u}\}_t\Delta t \end{aligned} \quad (2a)$$

$$\{\ddot{u}\}_{t+\Delta t} = \frac{1}{\beta\Delta t^2}\{\Delta u\} - \frac{1}{\beta\Delta t}\{\dot{u}\}_t - \left(\frac{1}{2\beta} - 1\right)\{\ddot{u}\}_t \quad (2b)$$

これらの値を逐次的に加算し, 次式の運動方程式に代入することにより, 機構が能動的に変形する際の内力分布が算出される.

$$\begin{aligned} ([K] + \frac{1}{2\beta\Delta t}[C] + \frac{1}{\beta\Delta t^2}[M])\{\Delta u\} = & \{F\}_{t+\Delta t} - \{R\}_t \\ & + [C]\left(\left(\frac{1}{2\beta} - 1\right)\{\dot{u}\}_t - \left(\frac{1}{4\beta} - 1\right)\{\ddot{u}\}_t\Delta t\right) \\ & + [M]\left(\frac{1}{\beta\Delta t}\{\dot{u}\}_t + \left(\frac{1}{2\beta} - 1\right)\{\ddot{u}\}_t\right) \end{aligned} \quad (3)$$

ここで,  $[M]$ : 全体質量マトリックス,  $[C]$ : 全体減衰マトリックス,  $[K]$ : 全体剛性マトリックス,  $\{F\}$ : 外力ベクトル,  $\{R\}$ : 内力ベクトル,  $t$ : 時間増分である. 今後, 衝撃力予測システムを実機に搭載する際には減衰マトリックスの同定が必要となるが, 現段階では, 簡単のためにそれを無視した.

接地・離地を伴う運動を行う機構の場合には, 各節点の鉛直方向座標を随時監視し, その接地・離地の判定後に, 鉛直方向自由度を拘束または自由にする. またこの時, 自由度番号の更新を行って質量マトリックスなどの情報を組み替える操作を行う. 本

アルゴリズムでは, 最後に, 式(3)にしたがって算出されたひずみ情報から部材内の軸力を算出する.

### 4. 数値例

本章では, 有限要素法による内力分布解析アルゴリズムを用いていくつかの解析を行い, 本手法の有

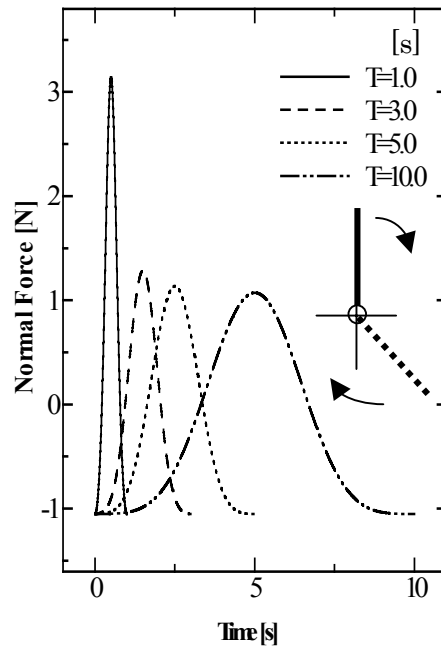


Fig.5(a) Normal force calculated from orbit data

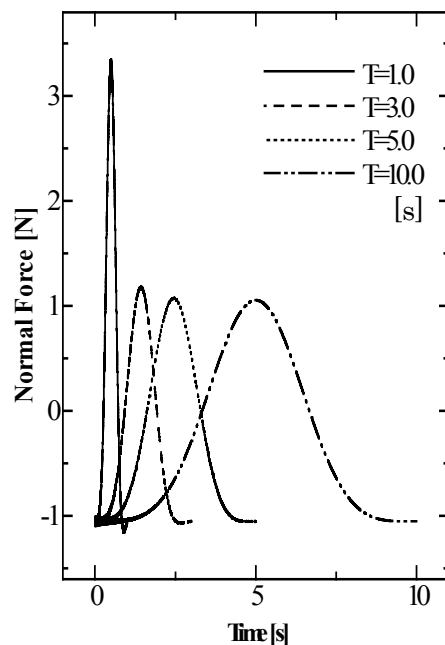


Fig.5(b) Normal force calculated by FEM

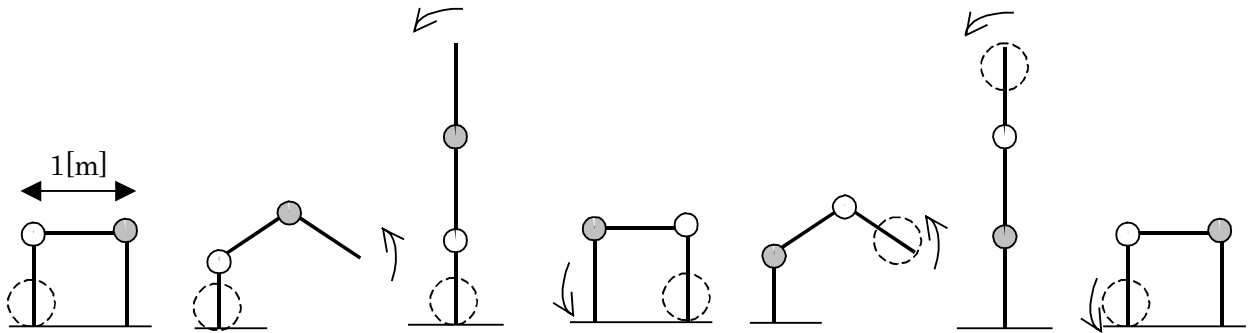


Fig.6 Trajectory for a 3-link mechanism

効性について検証した。

#### 4.1 軸力の検証

部材内に発生する軸力の計算結果を検証するため、加速・減速によって周回する円運動軌道を1リンク機構に与え、目標軌道データから求めた結果と本手法による結果とを比較した。Fig.5(a)に目標軌道データから算出した遠心力と自重の軸方向成分和の時刻歴、Fig.5(b)にFEMにより算出した軸力の時刻歴を示す。運動周期が長い場合には両者の結果は一致しているが、運動周期が短くなるにつれて相違が生じる。これは、前者の計算にはコリオリカの影響が含まれていないためである。一方、FEMによる算出結果では、 $T=1.0[s]$ の場合に回転運動の最後に若干の振れが見られ、コリオリカの影響が生じている様子が確認できる。

#### 4.2 衝撃力の検証

次に、接地・離地する際に機構内に生じる衝撃力の計算結果を検証するため、Fig.6のような3リンク機構に接地・離地を繰り返す運動軌道を与えた。破線の で囲ったリンク部材に生じる軸力の時刻歴をFig.7に示す。その部材が接地する時のみならず、他方の脚が離地する際にも相当量の衝撃力が発生していることが分かる。これは、機構の全重量が瞬時にこのリンク部材に載荷されることに起因している。さらに、Fig.7の破線の で囲った部分を拡大したFig.8を見ると、振動の半周期が求められる。この値と、部材のヤング率と密度から算定した応力伝播速度を用いて応力伝播距離を求めると、約

2.98[m]となりモデルの両端間距離とほぼ一致した。すなわち、機構内の応力波伝播の状態が正確に計算されていることが判明した。

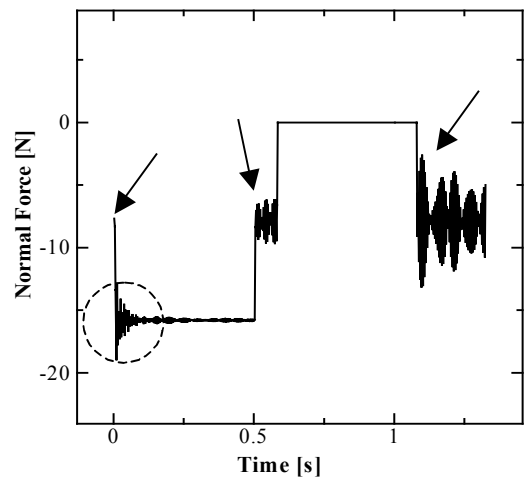


Fig.7 Impulsive force propagated in the link member

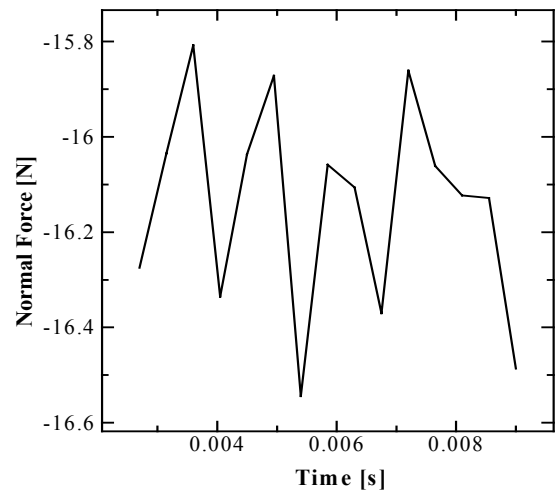


Fig.8 Cycle of stress propagation

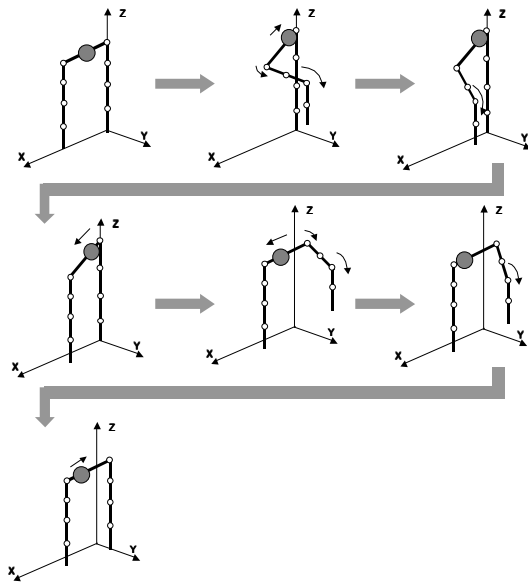


Fig.9 Trajectory for a biped. mechanism

## 5. 歩行ロボットにおける衝撃力の予測

本章では、第3章に示したアルゴリズムを用い、歩行動作を行う5リンク機構の衝撃力予測解析を行った。また、衝撃を緩和する方法として重心移動によるものを取り上げ、重心を移動する場合としない場合とを比較した。さらに、計算コストの面から本手法の有効性を検証した。

Fig.9に、2足歩行ロボットを模擬した5リンク機構に与えた目標軌道を示す。紙面に向かって右側を左脚、左側を右脚とし、両脚を連結する部分をボディ部と称することにする。脚は、長さ0.3[m]の部材が2本結合しており、ボディ部は、0.4[m]の部材1本から構成されている。また、ボディ部中央に2.0[kg]の質量を配置し、この質量を図のように移動させることにより衝撃緩和を図った解析を行う。本例題では、ロボットが1.5[s]で2歩前進するように設定しており、両脚が接地し次の動作に移る前には、0.1[s]弱の静止時間を設けてある。

Fig.10(a), (b)には、重心を移動しない場合のそれぞれの脚に作用する軸力の時刻歴を示す。また、Fig.11(a), (b)には、重心を移動した場合の時刻歴を示す。左脚に着目すると、反対の右脚を上げた瞬間に衝撃力が生じていることが分かる。これは、両脚で支えていた自重が瞬時に左脚に掛かるために

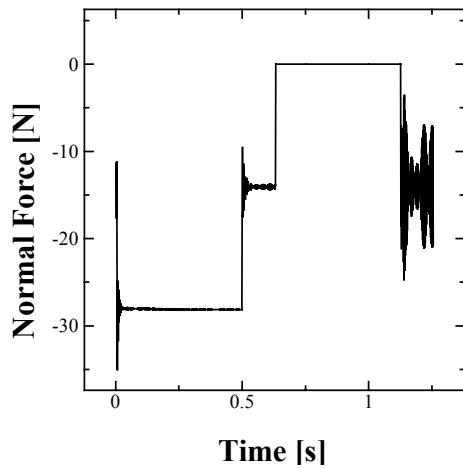
生じる振動であると考えられる。また、最後に着地する際に左脚に大きな振動が生じているが、重心を適切に移動させることにより、この時に生じる衝撃力を最大約40%減少できることがFig.10, Fig.11の比較から分かった。また、今度は右脚に着目すると、自らが接地する場合と同様に、右脚のみが機構を支える場合にも大きな振動が続けて生じていることが確認できる。これは、全重量が瞬時に右脚に掛かったことによる振動と、右脚の着地時に生じた衝撃が減衰する前に次の運動に移ったために生じた振動によるものであり、右脚を構成する部材には相当な負荷が掛かっているものと思われる。またこの際の衝撃力も、Fig.9に示すような重心移動を行うことにより、重心移動しない場合に比べ約40%の緩和が可能であることを確認できた。

本解析はCPU: Intel Pentium 600[MHz], RAM: 384[MB]を有するPC上で実行した。1ステップ当りの時間増分を0.005[s], 合計200ステップで解析を行った場合に要した計算時間は0.35[s]であり、現時点においても十分リアルタイム処理に対応できる結果である。

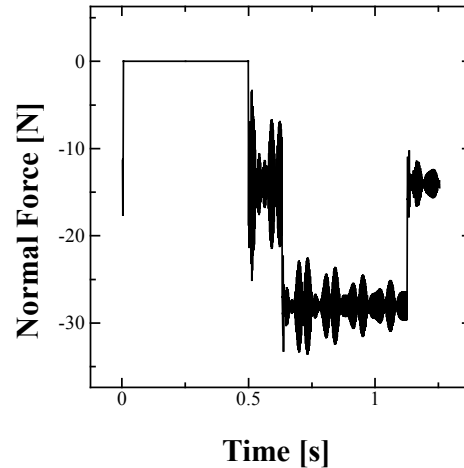
## 6.最後に

本研究では、能動的に変形する機構をShifted Integration法を用いてモデル化し、FEMによる内力分布解析アルゴリズムを構築した。歩行動作を行うモデルに対して解析を実施した結果、機構内に生じる軸力の時刻歴を短い計算時間で得ることができた。接地・離地の際に生じる衝撃力が十分な精度で求められ、さらに、適切なタイミングによる重心移動によって衝撃力が大幅に緩和できることなど、有益な情報が得られることを確認した。長距離を速く歩くような場合、例えば競歩のフォームなどのように、上半身をひねって着地する脚と反対側の脚の方へ重心を交互に移動する方法は、衝撃力を緩和する上でも非常に合理的な歩行法である。

提案した手法は、リアルタイム処理も可能であるため、今後はロボット機構の設計時およびオフラインによる事前の衝撃予測のみならず、実機に搭載し

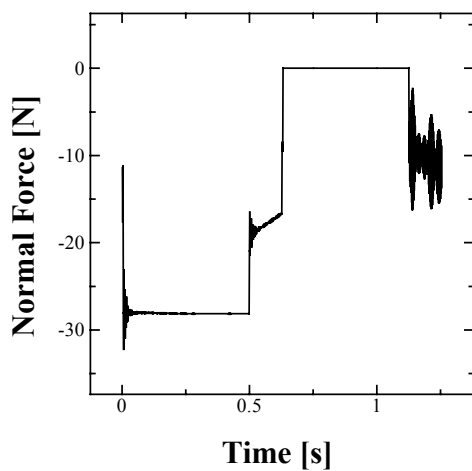


(a) Left leg

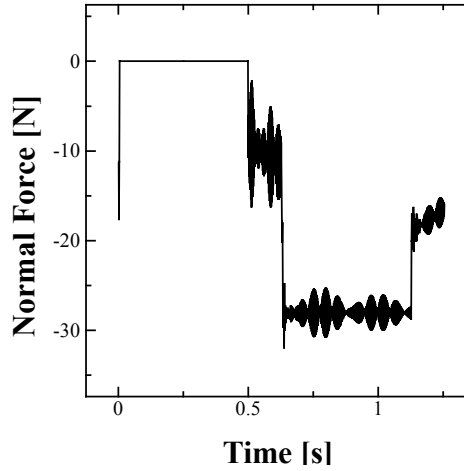


(b) Right leg

Fig.10 Impulsive force propagated in each leg



(a) Left leg



(b) Right leg

Fig.11 Influence of shifting mass on propagation of impulsive force

てオンライン制御に適用していく予定である。その際には、センサからの情報に頼る従来の制御とは違い、予測情報に基づいた速い制御が可能となることを期待している。今後、ロボットの動作が高速化するにつれ、ロボットおよびその周辺の安全性を考え、構造力学的な見地からの設計および動作計画が練られる必要があると考える。

#### 参考文献

[1] Kanehiro, F. *et al.*, Virtual Humanoid Robot Platform to Develop Controllers of Real Humanoid Robots without Porting, Proc. of 2001 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and

Systems (IROS'01), pp1093-1099, 2001.

[2] 都井 裕, 骨組構造および回転対称シェル構造の有限要素解析におけるShifted Integration 法について, 日本造船学会論文集, **168**, pp.357-369, 1990.

[3] Isobe, D. and Toi, Y., Analysis of Structurally Discontinuous Reinforced Concrete Building Frames Using the ASI Technique, *Computers and Structures*, **76-4**, pp.471-481, 2000.

[4] Isobe, D., A Unified Numerical Scheme for Calculating Inverse Dynamics of Open/Closed Link Mechanisms, Proc. of the 27th Annual Conf. of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON'01), pp.341-344, 2001.