有限要素法を用いたリンク機構の逆動力学計算

磯 部 大吾郎*

Deriving Inverse Dynamics for Link Mechanisms by Using Finite Element Method

Daigoro Isobe*

In this study, a scheme using the Finite Element Method (FEM) for calculating inverse dynamics is proposed and applied to open- and closed-loop link mechanisms. In this scheme, the entire system is subdivided into discrete elements and evaluated as a continuum. A single-link structure of a pin joint and a rigid bar is expressed by using the Shifted Integration (SI) technique. The proposed scheme calculates nodal forces by evaluating equations of motion in a matrix form, and thus information from the entire system can be handled in parallel. The obtained nodal forces are then used to calculate the joint torque in the system. Simple numerical tests on open- and closed-loop link mechanisms are carried out, and it is verified that the scheme can be used as a unified numerical scheme independent of the system configuration.

Key Words: Finite Element Method, Inverse Dynamics, Link Mechanisms, Nodal Force, Shifted Integration Technique

1. 緒 言

ロボットの歩行動作や複数のマニピュレータによる協調動作などでは、系内に開ループと閉ループが交互に発生し、動力学方程式（または計算アルゴリズム）を瞬時に入れ替える必要性が生じる場合がある。しかし、ニュートン・オイラー法やラグランジュ法など[1]の従来の手法によるリンク機構の逆動力学計算では、閉ループ系が存在する場合としない場合とではその動力学方程式（または計算アルゴリズム）が大きく異なるため、その実行に大きな困難を伴う。特にロボットの動作が高速化・複雑化して力制御の重要性が増すと、系の変化に対して柔軟に対応できる統一的な逆動力学計算法の必要性が増すことが考えられる。

本研究では、リンク機構の形態によらない統一的な逆動力学計算法として、有限要素法（FEM）を用いた手法を提案する。ニュートン・オイラー法が再帰的な処理によって動力学方程式を求める直列的なアプローチを取るのに対し、FEMは、要素座標系における個々の要素の離散情報を全体座標系の情報に変換してから重ね合わせる、いわゆる並列的なアプローチを取る（Fig. 1 参照）。そのため、各節点に働く節点力は並列的に求められ、これを関節トルクに変換することによって逆動力学が計算される。すなわち、従来の手法のように関節トルクを求める方程式を系に合わせて導出するのではなく、並列的に求めた節

点力情報の中から必要な情報を抽出し、系に合わせて関節トルクを求めるのである。このような特長を用いると、対象とするリンク系の構成が変化した場合にもアルゴリズムの変更は必要なく、入力データを変更するのみで柔軟に対処することが可能となる。しかし本来、FEMは系を細かく離散化（要素分割）することで精度の高い近似解を求める手法であるため、このように有用な逆動力学計算法となり得る特長を持ち合わせながら、リアルタイム処理を必要とするリンク機構の動力学問題に対しては適用の範囲外であった。本研究では、骨組構造のFEM解析でその有効性が立証されているShifted Integration (SI) 法[2]をリンク機構のモデル化に適用し、この問題を解決した。

リンク機構にFEMを適用した既存の研究としては、フレキシブル・マニピュレータの先端に生じる振動特性の把握や制御にFEMを適用した報告例[3]~[5]、大変形角が生じる柔軟体に

Fig. 1 Various approaches in deriving inverse dynamics

原稿受付 2001年10月31日
*筑波大学機能工学系
*University of Tsukuba

Fig. 2 Linear Timoshenko beam element and its physical equivalent

対する有限要素定式化 [6] および剛体慣性の FEM 解析 [7] などの報告例はあるが、機構全体の逆動力学計算に適用した例は見当たらない。また、FEM を連続体の制御法として直接適用した例としては、筆者らが圧電アクチュエータ集合体の制御を FEM によって試みた例 [8]~[11] がある。この際には、連続体の一部としてのアクチュエータに必要な電圧が算出され、個々のアクチュエータが独立にではなく、系の一部として制御されることが実験的に確認された。

本論文では、平面リンク機構に対する FEM を用いた逆動力学計算法について記述し、従来の手法の計算結果との比較により、開リンク機構の逆動力学計算における本手法の有効性を論じる。さらに、節点力を並列的に求解可能である本手法の特長を利用して閉リンク機構の場合に適用し、脚ごとのトルク配分比や受動関節位置が変化した場合などについて考察する。

続く第 2 章では、SI 法によるリンク機構のモデル化および陰解法を用いた逆解析アルゴリズムについて記述する。第 3 章では、平面 n リンク機構の場合の FEM による逆動力学計算過程について述べる。また、第 4 章では開リンク機構に対する計算を実施し、従来の手法による結果と比較・検討する。第 5 章では閉リンク機構に対する計算例を示し、本手法の適用範囲について考察する。第 6 章には結論を述べる。

2. SI 法によるリンク機構のモデル化および逆解析アルゴリズム

2.1 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]。

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

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

Fig. 3 Modeling of link mechanism by Shifted Integration technique

置に数値積分点をあらかじめ配置することにより、精度よく骨組構造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 [12]~[16]。

剛体ばねモデルのばね剛性を正規化した剛度値を C_{mot} とおくと、この値を 0 とすればピン、1 とすれば剛節が表現される。本研究では関節をピン状態 ($C_{mot} = 0$) と仮定し、剛体マニピュレータの逆動力学について従来の手法と比較・検証する。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二つの線形チモシェンコはり要素によって表現される。

2.2 逆解析アルゴリズム

本研究では、Newmark の β 法 [17] による陰解法を時間積分法として採用した。また、積分法の中のパラメータを $\gamma = 1/2$, $\beta = 1/4$ とし、定加速度法とした。

時刻 $t + \Delta t$ における運動方程式は、以下のように与えられる。

$$[M]\{\ddot{u}\}_{t+\Delta t} + [C]\{\dot{u}\}_{t+\Delta t} + [K]\{\Delta u\} = \{F\}_{t+\Delta t} - \{R\}_t \quad (2)$$

$$\{u\}_{t+\Delta t} = \{u\}_t + \{\Delta u\} \quad (3)$$

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、 $\{\Delta u\}$: 変位増分ベクトル、 $\{u\}$: 変位ベクトル、 $\{\dot{u}\}$: 速度ベクトル、 $\{\ddot{u}\}$: 加速度ベクトルである。Newmark の β 法では、時刻 $t + \Delta t$ において加速度ベクトル $\{\ddot{u}\}_{t+\Delta t}$ が求められたとき、速度ベクトル $\{\dot{u}\}_{t+\Delta t}$ および変位ベクトル $\{u\}_{t+\Delta t}$ を以下のように仮定する。

$$\{\dot{u}\}_{t+\Delta t} = \{\dot{u}\}_t + \frac{1}{2}(\{\ddot{u}\}_t + \{\ddot{u}\}_{t+\Delta t})\Delta t \quad (4a)$$

$$\{u\}_{t+\Delta t} = \{u\}_t + \{\dot{u}\}_t\Delta t + \left(\left(\frac{1}{2} - \beta \right) \{\ddot{u}\}_t + \beta \{\ddot{u}\}_{t+\Delta t} \right) \Delta t^2 \quad (4b)$$

式 (3) と式 (4) より、時刻 $t + \Delta t$ における速度、加速度ベクトルについて、次の関係が得られる。

$$\{\dot{u}\}_{t+\Delta t} = \frac{1}{2\beta\Delta t}\{\Delta u\} - \left(\frac{1}{2\beta} - 1\right)\{\dot{u}\}_t - \frac{1-4\beta}{4\beta}\{\ddot{u}\}_t\Delta t \quad (5a)$$

$$\{\ddot{u}\}_{t+\Delta t} = \frac{1}{\beta\Delta t^2}\{\Delta u\} - \frac{1}{\beta\Delta t}\{\dot{u}\}_t - \left(\frac{1}{2\beta} - 1\right)\{\ddot{u}\}_t \quad (5b)$$

式 (5) を式 (2) に代入し整理することで、運動方程式は次のような未知ベクトルが一つの連立方程式となる。

$$\begin{aligned} & \left([K] + \frac{1}{2\beta\Delta t}[C] + \frac{1}{\beta\Delta t^2}[M] \right) \{\Delta u\} \\ &= \{F\}_{t+\Delta t} - \{R\}_t \\ &+ [C] \left(\left(\frac{1}{2\beta} - 1 \right) \{\dot{u}\}_t - \left(\frac{1}{4\beta} - 1 \right) \{\ddot{u}\}_t\Delta t \right) \\ &+ [M] \left(\frac{1}{\beta\Delta t}\{\dot{u}\}_t + \left(\frac{1}{2\beta} - 1 \right) \{\ddot{u}\}_t \right) \end{aligned} \quad (6)$$

さらに、時刻 $t + \Delta t$ における外力項が時刻 t の外力項と節点力増分との和で表されることに注意して上式を変形すると、節点力増分 $\{\Delta f\}$ は

$$\begin{aligned} \{\Delta f\} &= \{R\}_t - \{F\}_t \\ &+ \left([K] + \frac{1}{2\beta\Delta t}[C] + \frac{1}{\beta\Delta t^2}[M] \right) \{\Delta u\} \\ &- [C] \left(\left(\frac{1}{2\beta} - 1 \right) \{\dot{u}\}_t - \left(\frac{1}{4\beta} - 1 \right) \{\ddot{u}\}_t\Delta t \right) \\ &- [M] \left(\frac{1}{\beta\Delta t}\{\dot{u}\}_t + \left(\frac{1}{2\beta} - 1 \right) \{\ddot{u}\}_t \right) \end{aligned} \quad (7)$$

と与えられる。

一方、本研究では、断面力-ひずみマトリックス $[D]$ 内のすべての成分に C_{mot} を掛けることにより、要素剛性マトリックス $[k]$ を以下のように表した。

$$[k] = C_{\text{mot}} \int_V [B]^T [D] [B] dV \quad (8)$$

ここで、 $[B]$ は変位-ひずみマトリックスである。また、数値積分点位置を $s_1 (-1 \leq s_1 \leq 1)$ とし、要素ごとに以下のような集中質量マトリックス $[m]$ を定義した。対角項成分のみを示すと、

$$[m] = \begin{bmatrix} m_1 & m_1 & m_1 & \frac{m_1 l^2}{12} & \frac{m_1 l^2}{12} & t_1 & m_2 & m_2 & m_2 & \frac{m_2 l^2}{12} & \frac{m_2 l^2}{12} & t_2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

ここで、

$$m_1 = \rho A l (1 - s_1) / 2, \quad m_2 = \rho A l (1 + s_1) / 2 \quad (10a)$$

$$t_1 = \rho I_z l (1 - s_1) / 2, \quad t_2 = \rho I_z l (1 + s_1) / 2 \quad (10b)$$

である。また、 ρ 、 A 、 l 、 I_z はそれぞれ、部材密度、部材の断面積、要素長、断面二次極モーメントである。上記の質量マトリックスでは、関節が $r_1 = -1$ (すなわち $s_1 = 1$) の位置にある場合、 $r_1 = 1$ の位置に要素の質量が集中する。一方、関節が $r_1 = 1$ (すなわち $s_1 = -1$) の位置にある場合には $r_1 = -1$ の

位置に要素の質量が集中する。すなわち、1 リンクを上記の要素二つで表現することにより、重心位置に質量を集中させた部材の表現が可能となる (Fig. 3 参照)。

本研究では、剛体リンク系を表現するために $C_{\text{mot}} = 0$ として $[K]$ を無視した。さらに、減衰マトリックス $[C]$ を無視すると式 (7) は簡単となり以下のように表される。

$$\begin{aligned} \{\Delta f\} &= \{R\}_t - \{F\}_t \\ &+ [M] \left(\frac{1}{\beta\Delta t^2}\{\Delta u\} - \frac{1}{\beta\Delta t}\{\dot{u}\}_t - \left(\frac{1}{2\beta} - 1 \right) \{\ddot{u}\}_t \right) \end{aligned} \quad (11)$$

本アルゴリズムでは、上式に変位増分および時刻 t における速度、加速度を入力することにより節点力増分が算出され、これが逐次的に足し合わされて目標の変形を得るために必要な節点力が求められる。後述するトルク算出式にこの節点力を代入することによって、リンク機構の各関節トルクが得られる。なお目標軌道データとしては、直交座標系に基づく全体空間内の各関節位置と回転角の時系列を使用する。

3. FEM による平面 n リンク機構の逆動力学計算

FEM では連続体の挙動を直交座標系で記述するため、回転座標系に特有の見掛けの力 (コリオリ力) などの非線形項と呼ばれる力について、独立に考える必要はない。また、いわゆる重力補償項については、各節点に静的に自重をかけることで対処する。そのため、直交座標系における関節トルク算出式は比較的簡潔となる。

Fig. 4 に n リンク機構内の i 番目のリンクに働く力、およびリンク番号と節点番号との間の関係を示す。 i 番目のリンクには、その重心に作用する並進力に起因する回転モーメント、先の関節に作用する $i+1 \sim n$ リンクの並進力の合力に起因する回転モーメント、および重心回りに作用する慣性モーメントが生じる。したがって i 番目のリンクの関節トルク τ_i は、これらの和に $i+1$ 番目のリンクの関節トルク τ_{i+1} を加算したものとな

Fig. 4 Nodal force acting on i -th link in n -link mechanism

り、リンク（または要素）座標系の節点力を用いると

$$\tau_i = l_{iC} F_{iCx} + l_i \left(\sum_{j=i+1}^n F_{jC} \right)_x + F_{iC\phi} + \tau_{i+1} \quad (12)$$

と与えられる。ここで、 l_{iC} は関節から重心位置までの距離、 l_i はリンクの長さ、 $(\sum F_{jC})$ は合力を示す。以後、変数右下の添字 i, j などは対象とするリンクの番号、 h, k は節点番号を示し、 C は重心位置での成分、 x, z は要素座標系の各軸方向成分、 X, Z は全体座標系の各軸方向成分、 ϕ は Y 軸回りの成分であることを示す。また、変数右上の添字 n は対象とする機構の総リンク数を示す。

式 (12) を $i = 1, \dots, n$ について並べてマトリックス形式に直し全体座標系で整理すると、関節トルクベクトルは

$$\{\tau^n\} = [L^n][T^n]\{P^n\} \quad (13)$$

と表現できる。平面 n リンク機構の場合、 $\{P^n\}$ は次のように定義される $5n \times 1$ の節点力に関するベクトルである。

$$\{P^n\} = \begin{Bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ \vdots \\ P_n \end{Bmatrix} \quad (14)$$

ただし、

$$\{P_i\} = \begin{Bmatrix} F_{iCX} \\ F_{iCZ} \\ \sum_{j=i+1}^n F_{jCX} \\ \sum_{j=i+1}^n F_{jCZ} \\ F_{iC\phi} \end{Bmatrix} \quad (15)$$

である。また、 $[T^n]$ は次のように表される $5n \times 5n$ の座標変換マトリックスである。

$$[T^n] = \begin{bmatrix} T_1 & & & & 0 \\ & T_2 & & & \\ & & T_3 & & \\ & & & \ddots & \\ 0 & & & & T_n \end{bmatrix} \quad (16)$$

ただし、 $[T_i]$ は i 番目のリンクの全体座標系からリンク（または要素）座標系への座標変換マトリックスで、座標系間の回転角を ϕ_i とおくと

$$[T_i] = \begin{bmatrix} \cos \phi_i & -\sin \phi_i & 0 & 0 & 0 \\ \sin \phi_i & \cos \phi_i & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos \phi_i & -\sin \phi_i & 0 \\ 0 & 0 & \sin \phi_i & \cos \phi_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

と表される。従来の方法で関節トルクを算出する場合にはリンク間の座標変換を繰り返し行う必要があるが、本手法では平面リンク機構の場合に全体座標系から要素座標系への変換が一回行われるのみで済む。このため特にリンク数が多い場合には、従来の方法に比べてトルク算出の計算時間が大幅に短縮される。次に、 $[L^n]$ は以下のように表される $n \times 5n$ の部材長マトリックスである。

$$[L^n] = \begin{bmatrix} L_1 & L_2 & L_3 & \cdot & \cdot & \cdot & L_n \\ & L_2 & L_3 & \cdot & \cdot & \cdot & L_n \\ & & L_3 & \cdot & \cdot & \cdot & L_n \\ & & & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ & & & & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & & & & & \cdot & \cdot \\ & & & & & & L_n \end{bmatrix} \quad (18)$$

ただし、

$$[L_i] = [l_{iC} \quad 0 \quad l_i \quad 0 \quad 1] \quad (19)$$

である。要素座標系に変換された節点力に関するベクトル $[T^n]\{P^n\}$ が上記マトリックスと掛けられることによって、対象とするリンクより先の節点力情報が加算される。部材長マトリックスをさらに次式のように複数の領域に分けることにより、受動関節の位置、および各能動関節が受け持つトルク配分が操作可能となる。

$$[L^n] = \begin{bmatrix} L^a & 0 \\ 0 & L^b \end{bmatrix} \quad (20)$$

上式は、閉リンク機構を a 本と b 本のリンクに分け ($a+b=n$)、その連結部に受動関節がある場合の部材長マトリックスである。開・閉リンク機構の両者で、アルゴリズムが異なるのはこの点のみである。

次に、リンク i に生じる節点力増分に関するベクトル $\{\Delta p_k\}$ を以下のように定義する。

$$\{\Delta p_k\} = \begin{Bmatrix} \Delta f_{kX} \\ \Delta f_{kZ} \\ \sum_{h=k+1}^{2n+1} \Delta f_{hX} \\ \sum_{h=k+1}^{2n+1} \Delta f_{hZ} \\ \Delta f_{k\phi} \end{Bmatrix} \quad (21)$$

このベクトルを用いると、時刻 $t + \Delta t$ における i 番目のリンクの節点力に関するベクトルは、以下のように逐次的に求められる。

$$\{P_i\}_{t+\Delta t} = \{P_i\}_t + \{\Delta p_k\}, \quad (k=2i) \quad (22)$$

節点力増分に関するベクトル $\{\Delta p_k\}$ の各成分はそれぞれ、節点 k の全体座標系 2 軸方向並進力増分、 $k+1 \sim 2n+1$ 番目の節点までの全体座標系 2 軸方向並進力増分の和、節点 k の全体座標系 Y 軸回りのモーメント増分となっている。式 (22) によって逐次的に求められたベクトル $\{P^n\}$ を式 (13) に代入することにより、 n 個の関節トルクの逐次的な値が並列的に計算される。

Fig. 5 Target trajectory for 8-link mechanism

4. 開リンク機構の計算例

本章では、トルク曲線の算出例として $n = 8$ の開リンク機構の場合について取り上げる。ここでは、ニュートン・オイラー法によって求められたトルク曲線と比較し、本手法の有効性を確認する。

Fig. 5 に 8 リンク機構に与えた目標軌道を示す。長さ 20 [cm] のリンク部材（重心位置：中央，質量 107.5 [g]）を 8 本連結し、1 秒間（100 [step]）で動くように軌道を設定した。また、初期および終端速度を 0 [m/s] とし、鉛直下向きに重力が作用していると仮定した。Fig. 6 には、従来のニュートン・オイラー法および FEM を用いた手法によって算出されたトルク曲線を示す。この数値例では、全長 160 [cm] にも及ぶ機構に短時間で急激な動きを与えているため、重力や遠心力などの影響が大きいことが予想される。しかしこのような問題でも、重力を補償しコリオリ力を独立に考慮している従来の手法の結果に対し、FEM による解がほぼ一致していることが確認できる。両手法とも Microsoft 社の Fortran PowerStation 4.0 でコンパイルし、Dell の Dimension XPS T600（CPU: Intel Pentium III 600 [MHz], RAM: 383 [MB]）上で実行した。本手法では、制御対象時間 1.0 [s] に対して計算時間はわずかに 0.094 [s]（100 [step]）に抑えられた。また、さらにリンク数の多い $n = 20$ の場合でも、0.57 [s] で計算が終了した。

5. 閉リンク機構の計算例

Fig. 7 に示すようなはり中央部に質点を載せた簡単な閉リンク機構に目標軌道を与え、算出されるトルク曲線を考察して本アルゴリズムの有効性について検証した。初期および終端速度は 0 [m/s] とした。モデルは六つの能動関節を有し、機構上部の受動関節に 1 [kg] の質量を配している。各リンク部材の長さを 0.5 [m] とし、それぞれの部材の重心位置にも部材の質量を分配した。動作時間が 10 秒間の場合（case 1）と 1 秒間の場合（case 2）について解析を行い、算出されたトルク曲線を Fig. 8 に示す。Fig. 8 (a) の case 1 の場合には非線形項の影響が少ないため、初期トルクが関節 3 および 6 で質量 m と部材の質量を支えるのに必要なトルクと一致している。また、機構が傾くにつ

(a) Newton-Euler method

(b) FEM

Fig. 6 Calculated torque curves

Fig. 7 Target trajectory for closed-loop link mechanism

れてトルク値が負の方向に増大している（トルクは時計回りが正）。最終的なトルクの値も、理論的な値と一致した。Fig. 8 (b) の case 2 の場合には、動作時間が短いために初期トルクや曲線の下幅などに変動が見られ、非線形項の影響が考慮された妥当な結果であることが分かる。

次に、本モデルの向かって左側と右側の関節のモータが受け持つトルク配分比を変え、このときのトルク曲線の変化を調べ

(a) Case 1

(b) Case 2

Fig. 8 Calculated torque curves

Fig. 9 Calculated torque curves (torque distribution ratio = 4 : 1)

た、Fig. 9 に配分比を 4 : 1 にした場合のトルク曲線を示す。左側の関節 1, 2, 3 の負担が全体的に増加し、一方、右側の関節 4, 5, 6 の負担が減少していることが確認できる。FEM を用いた手法では、個々の節点に作用する節点力を独立に求めるため、このように各関節が受け持つトルク配分比を自由に变化させることが可能である。これは、例えば複雑な運動をする歩行ロボットの機構設計をする際に有用な特長であると考えられる。

さらに、Fig. 10 のように質点を配した受動関節を右側の節点に配置した場合の解析を行った。この場合にはトルク配分比を 1 : 1 に戻した。Fig. 11 にこの場合のトルク曲線を示すが、

Fig. 10 Target trajectory (passive joint at different point)

Fig. 11 Calculated torque curves (passive joint at different point)

質点までの距離が長くなった分だけ左側の関節の負担が増大していることが分かる。逆に右側の関節は、質点までの距離が短くなった分だけ負担が減少している。関節 4 では、質点と部材の重量を支えるためのトルクが算出されている。このように、受動関節の位置が変化するなど機構に構成変化が生じた場合にも、本手法では入力データを書き換えるのみで対処が可能である。また、受動関節での拘束条件を考慮する必要がなく、ソフトウェア内の運動方程式などの記述を変える必要がない。本手法が有するこの簡便性は、様々な閉リンク機構のパラメータ設計をする際に有用であると考えられる。

6. 結 言

本研究では、リンク機構のモデル化に対して Shifted Integration 法に基づく有限要素を適用し、FEM による逆動力学計算アルゴリズムを構築した。形態に応じた動力学方程式を再構築する必要がある従来の方法に比べ、並列的に算出した節点力の情報に基づいて逆動力学を求める本手法は、その算出過程が非常に簡潔である。また、対象とするリンク系の構成が変化した場合にも入力データを変更するのみで柔軟に対処することが可能であり、様々な形態のリンク系が混在、または交互に発生する場合についても有効であると考えられる。現在、三次元リンク機構への拡張、部材剛性の考慮によるフレキシブル・マニピュレータへの適用、逆動力学によるフィードフォワード制御を組み込んだ実機の開発などが進められている。

謝 辞 本研究の遂行に当たり、独立行政法人産業技術総合研究所の竹内裕喜氏、(株)ボッシュの上田健夫氏(研究当時大学院生)には多大なご協力を得ました。また、本研究の一部は文部科学省(旧文部省)の科学研究費補助金(課題番号:12750176)の援助の下で実施されました。ここに謝意を表します。

参 考 文 献

- [1] J.J. Craig, 三浦宏文・下山勲 訳: ロボティクス—機構・力学・制御—, pp.155-188, 共立出版, 1991.
- [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, no.168, pp.369-377, 1990.
- [3] W.H. Sunada and S. Dubowsky: “On the Dynamic Analysis and Behavior of Industrial Robotic Manipulators with Elastic Members,” ASME J. Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design, vol.105, pp.42-51, 1983.
- [4] E. Bayo: “A Finite-Element Approach to Control the End-Point Motion of a Single-Link Flexible Robot,” J. Robotic Systems, vol.4, no.1, pp.63-75, 1987.
- [5] R.J. Theodore and A. Ghosal: “Comparison of the Assumed Modes and Finite Element Models for Flexible Multilink Manipulators,” Int. J. Robotic Research, vol.14, no.2, pp.91-111, 1995.
- [6] A.A. Shabana: “Constrained Motion of Deformable Bodies,” Int. J. Numer. Methods Eng., vol.32, pp.1813-1831, 1991.
- [7] A.A. Shabana: “Finite Element Incremental Approach and Exact Rigid Body Inertia,” ASME J. Mechanical Design, vol.118, pp.171-178, 1996.
- [8] 磯部大吾郎, 中川恒: “FEM による圧電アクチュエータ集合体のリアルタイム並列制御”, 日本機械学会論文集 (A 編), vol.65, no.629, pp.120-126, 1999.
- [9] D. Isobe and H. Nakagawa: “A Parallel Control System for Continuous Architecture Using Finite Element Method,” J. Intelligent Material Systems and Structures, vol.9, no.12, pp.1038-1045, 1999.
- [10] 磯部大吾郎, 中村博, 清水隆太: “圧電アクチュエータ集合体のリアルタイム FEM 制御システムの開発”, 日本機械学会論文集 (A 編), vol.66, no.645, pp.861-866, 2000.
- [11] D. Isobe, H. Nakamura and R. Shimizu: “A Real-Time Control System for Connected Piezoelectric Actuators: A Finite-Element Approach,” J. Robotics and Mechatronics, vol.12, no.2, pp.172-179, 2000.
- [12] Y. Toi and D. Isobe: “Adaptively Shifted Integration Technique for Finite Element Collapse Analysis of Framed Structures,” Int. J. Numer. Methods Eng., vol.36, pp.2323-2339, 1993.
- [13] Y. Toi and D. Isobe: “Finite Element Analysis of Quasi-Static and Dynamic Collapse Behaviors of Framed Structures by the Adaptively Shifted Integration Technique,” Computers and Structures, vol.58, no.5, pp.947-955, 1996.
- [14] 磯部大吾郎, 都井裕: “順応型 Shifted Integration 法による脆性骨組構造体の動的崩壊挙動の有限要素解析”, 日本造船学会論文集, no.180, pp.471-478, 1997.
- [15] 磯部大吾郎, 森下真臣: “ASI 有限要素法による大規模宇宙骨組構造のデブリ衝突解析”, 日本機械学会論文集 (A 編), vol.64, no.627, pp.2726-2733, 1998.
- [16] D. Isobe and Y. Toi: “Analysis of Structurally Discontinuous Reinforced Concrete Building Frames Using the ASI Technique,” Computers and Structures, vol.76, no.4, pp.471-481, 2000.
- [17] N.M. Newmark: “A Method of Computation for Structural Dynamics,” A.S.C.E. J. Engineering Mechanics, vol.85, pp.67-94, 1959.

磯部大吾郎 (Daigoro Isobe)

1965 年 7 月 1 日生。1994 年東京大学大学院工学系研究科船舶海洋工学専攻修了, 博士(工学)。同年東京大学生産技術研究所助手。1995 年より筑波大学構造工学系講師。1999 年より同大学機能工学系講師, 2002 年より助教授, 現在に至る。構造工学や計算力学的な手法を積極的にロボット工学に導入した研究に従事。日本造船学会, 日本計算工学会, 日本機械学会, 日本建築学会などの会員。(日本ロボット学会正会員)