ニューロ逆モデルとファジィによる
形状可変柔軟構造物の運動制御*西 垣 英 一^{*1}, 川 嶋 紘 一 郎^{*2}Motion Control of a Variable-Geometry Flexible Structure
using Neural-Network Inverse Model and Fuzzy-Set Theory

Hidekazu NISHIGAKI and Koichiro KAWASHIMA

This paper presents a numerical method for motion control of a variable-geometry flexible beam structure. The transient response of the structure is calculated using updated nodal coordinates and internal forces, and the stiffness matrix for the beam elements in a finite element model. Using the results of various quasi-static finite element analyses, the neural-network feedforward controller learns an inverse model of the controlled flexible structure. To minimize the tracking error and to damp the vibration, the fuzzy feedback controller is combined with feedforward controller, which uses the above inverse model to estimate the sensitivity of the controlled structure. As an example, this method is applied to an arm-like flexible, lightweight beam structure which has 21 elements including two variable links, and the motion is analyzed.

Key Words: Variable Geometry, Flexible Structure, Finite Element Method, Neural Network, Fuzzy

1. 緒 言

福祉・医療分野では介護やリハビリテーション(機能回復訓練)の支援を目的として, 人間の活動を支援するパワードスーツやゴム人工筋マニピュレータの開発が試みられている⁽¹⁾⁽²⁾。また, 今後迎える高齢化社会では, 在宅看護, 家事手伝い, 工場での生産などのために, 人力に代わりもち上げ・移動を担うロボットのようなものが必要と考えられる。しかし, この際必要とされる性能は, 従来の産業用ロボットに求められた高速性や精度などではなく, 容易な操作性や人に対する安全性である。安全性として最も重要な点は, 万一誤動作を起こしたときに周囲の人に与える危害を最小限に抑えることである。そのため柔軟な構造にすることが考えられる。柔軟な構造でありながら物をもち上げたり移動させる機能を確保するためには, 軽量で柔軟なトラス・ラーメン部材と伸縮機構を組合せた宇宙展開構造物のような構成が有利だと考えられる。このような構成であれば, 人があたかもスーツを着るごと

く手や足を入れることも可能となり, 人力を補助する形での協調作業が行いやすいという利点もある。

ところで, このような形状可変柔軟構造物を考える際に必要とされる技術の多くは, すでに前述の宇宙展開構造物に関する研究で開発されてきた。すなわち, 展開後の振動制御^{(3)~(5)}, 展開過程の構造形態変化^{(6)~(8)}, 有限要素法を利用して複雑な構造物の形態変化と幾何学的非線形性を伴う変形や振動⁽⁹⁾, 剛体リンク機構や先端に柔軟材を有する構造物の運動制御^{(10)~(12)}などが報告されている。

しかし, 現在まで, 人と協調作業を行う形状可変柔軟構造物という概念は実現されていない。ここで重要なことは, 使用者の身体に適合するように形状可変柔軟構造物の腕の長さや太さを調整した際, それに伴う変形・振動解析や運動制御のモデル化にも容易に対応できることである。

そこで, 本報では, 形状可変柔軟構造物の概念設計段階の支援システムの構築を目的とし, 構造の形態変化を含めた大変形・振動の解析に有限要素法を用い, 運動制御に予備学習されたニューロ逆モデルとファジィ制御を用いる手法を提案する。本報の特徴点は, 有限要素法を用いることでほぼ自動的に構造解析モデルが作成されることと, ニューロ逆モデルを用いること

* 原稿受付 1995年9月4日。

^{*1} 正員, (株)豊田中央研究所(〒480-11 愛知県愛知郡長久手町大字長湫字横道41-1)。^{*2} 正員, 名古屋工業大学(〒466 名古屋市昭和区御器所町)。

で、腕の長さや太さ調整など使用現場でなされる構造変更に対応した運動制御が可能となることである。

2. 問題の設定

人力を補助して、病人や重量のある日常生活用品をもち上げ・移動させるための形状可変柔軟アームの設計問題を想定する。設計者は考案した形状可変柔軟アームの構造案の良否をチェックするため、予想される運動下での挙動解析を行うものとする。

形状可変柔軟アームへの入力は、可変長部材の長さの変化量ともち上げ・移動させる物の質量とする。挙動解析により得られる出力は、形状変化と柔軟構造のために生ずる弾性変形や振動である。特に、ここでは、目標とする位置へ物をもち上げ・移動させる作業に対する達成度として位置精度や制振性に注目し、アーム先端点の目標軌跡への追従能力を評価する。

3. 解析方法

3.1 形状可変柔軟構造物の解析法 大たわみを伴う構造形状の変化と振動を同時に考慮した解析を行うため、本報では、微小時間間隔ごとに構造形状を更新し、直接数値積分により構造の動的応答を求める有限要素法⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾を用いた。

使用要素ははりおよびトラス要素とする。さらに、初期ひずみと同様の考え方をを用いて、要素に強制変形速度を与えることにより、可変長部材を取扱う。

構造の幾何学的位置を基準座標系 (X, Y, Z) で、各要素を要素座標系 (x, y, z) で表現し、その部材力は図1のように定義する。図1中、 S_1 は軸力、 S_2, S_3, S_5, S_6 は曲げモーメント、 S_4 はねじりモーメントを表す。 j 番めのはり要素の一般化節点力 $\{S\}_j$ およびこれに対応する一般化変位を $\{s\}_j$ とし、基準座標系におけるはり要素両端節点の位置および方位角を $\{r\}_j$ とする。こ

こで、 $\{s\}_j$ と $\{r\}_j$ の関係は要素の座標変換マトリックス $[a]_j$ を用いて、

$$\{s\}_j = [a]_j \{r\}_j, \dots \dots \dots (1)$$

と表す。なお、 $\dot{}$ は時間微分である。節点集中質量系とした質量マトリックスを $[M]_j$ とし外力を $\{R\}$ とすれば、節点の運動方程式は式(2)の形で導かれる。

$$\sum_{j=1}^{Ne} ([M]_j \{\ddot{q}\}_j) = - \sum_{j=1}^{Ne} [a]_j^T \{S\}_j + \{R\} \dots \dots \dots (2)$$

ここに、 Ne は全要素数、 $\{q\}_j = \{r\}_j$ である。

はり要素の一般化節点力 $\{S\}_j$ と一般化変位 $\{s\}_j$ に対し振動の減衰を考慮するため、弾性要素と粘性要素を並列結合した Voigt 型粘弾性モデルを用いる。ここで、はり要素の減衰特性は、要素剛性マトリックス $[k]_j$ に比例するものとし、その比例係数を α とする。さらに、可変長部材の強制変形速度ベクトル $\{\dot{\delta}\}_j$ も考慮すると、はり要素の構成方程式は次式(3)の形で与えられる。

$$\{\dot{S}\}_j = [k]_j [\{a\}_j (\{q\}_j + \alpha \{\dot{q}\}_j) - \{\dot{\delta}\}_j] \dots \dots \dots (3)$$

$\{r\}_j$ および $\{S\}_j$ に関する連立常微分方程式を直接数値積分するために、ここでは簡便な Newmark β 法 ($\beta=1/4$) を用いる。すなわち、

$$\{q_1\}_j = \{q_0\}_j + (h/2)(\{\dot{q}_0\}_j + \{\dot{q}_1\}_j) \dots \dots \dots (4)$$

$$\{S_1\}_j = \{S_0\}_j + (h/2)(\{\dot{S}_0\}_j + \{\dot{S}_1\}_j) \dots \dots \dots (5)$$

を仮定した Newmark β 法を式(2)、(3)に適用すると、次式(6)～(8)が得られる。

$$\begin{aligned} & \sum_{j=1}^{Ne} ([M]_j + (h/2)(h/2 + \alpha)[a]_j^T [k]_j [a]_j) \\ & \times (\{q_0\}_j + \{q_1\}_j) \\ & = \sum_{j=1}^{Ne} (2[M]_j + ah[a]_j^T [k]_j [a]_j) \{q_0\}_j \\ & - h \sum_{j=1}^{Ne} [a]_j^T \{S_0\}_j - (h/4)[k]_j (\{\delta_0\}_j + \{\delta_1\}_j) \\ & + (h/2)(\{R_0\} + \{R_1\}) \dots \dots \dots (6) \\ & \{r_1\}_j - \{r_0\}_j = (h/2)(\{q_0\}_j + \{q_1\}_j) \dots \dots \dots (7) \\ & \{S_1\}_j = \{S_0\}_j + [k]_j [\{a\}_j ((h/2 + \alpha)(\{q_0\}_j + \{q_1\}_j) \\ & - 2\alpha \{q_0\}_j) - (h/2)(\{\delta_0\}_j + \{\delta_1\}_j)] \\ & \dots \dots \dots (8) \end{aligned}$$

式(4)～(8)中の添字1は添字0から微小時間 h (時間ステップ) を経過した時刻における値を示す。

3.2 柔軟構造物の逆モデル 本報で扱う制御対象としての柔軟構造物は、はりやトラス要素を組合せた複雑な構造をしている。また、その構造形状の変化が大たわみを伴う領域までを想定している。さらに、腕の長さや太さ調整など使用現場でなされる構造変更に対応する必要がある。

この柔軟構造物を運動制御するためには、そのような形状変化特性を精度よく簡単に表すモデルが求めら

Fig. 1 Local and global coordinates, internal load vector components of beam element

れる。そこで、本報では、入出力信号の対からなる有限個の学習セットからそこに内在する写像関係を模擬することのできるニューラルネットワーク⁽⁸⁾を用いる。

すなわち、柔軟構造物の有限要素モデルを用いて、図2に示すように準静的解析により可変長部材の長さや負荷を変化させたときの先端点座標を求め、可変長部材の長さが入力で先端点座標が出力となる対象構造物と、入出力方向が逆となる逆モデル(ただし、負荷は外的要因と考え入力とする)をニューラルネットワークに学習させて作成しておく。この逆モデルをフィードフォワード径路の前向き制御器、および、フィードバックコントローラが用いる可変長部材の長さに対する先端点座標の感度の計算に用いることとした。

なお、ここでは、ニューラルネットワークとして、結合係数(シナプス結合の強さ)の学習則として誤差逆伝ぱん学習を用いる写像ネットワークを用いることとする。

3.3 柔軟構造物の運動制御 形状可変柔軟構造物の運動制御系を図3に示す。

この制御系は、制御対象の柔軟構造物に対して可変長部材長さを指示するもので、おもに次の二つの径路から構成される⁽¹⁵⁾。

一つは、ニューラルネットワークを用いた逆モデルが構成するフィードフォワード径路で、与えた目標先端点座標 X^* と得られた先端点座標 X_t が静的状態で誤差がなければ一致するように組まれている。

Fig. 2 Preliminary learning of neural network inverse model for flexible structure

Fig. 3 Motion control of variable geometry flexible structure

もう一つは、ファジィ制御を用いたフィードバックコントローラが構成するフィードバック径路である。ここでは、与えた目標先端点座標 X_t^* と得られた先端点座標 X_t との誤差、および、その速度成分を零とするように組まれている。 i を可変長部材番号、 j を座標成分、 n を解析ステップ数、 h を時間ステップとし、 $t = nh$ である。一つ一つの可変長部材長さの修正量 $\Delta l_{fd}(i)$ は、式(9)に示す $e_1(j)$ と $e_2(i, j)$ を入力とするファジィ制御から得られる値 f を用いて決定される。

$$\left. \begin{aligned} e_1(j) &= C_p(X_t^*(j) - X_t(j)) \\ &\quad + C_D(\dot{X}_t^*(j) - \dot{X}_t(j)) \\ e_2(i, j) &= C_f \Delta l_{fd}(i) / \Delta X_t^*(j) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (9)$$

$$\Delta l_{fd}(i) = C_a \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^3 f(e_1(j), e_2(i, j))$$

この決定の際には、上記の値 f を座標成分に対して同じ重みで足し合せて解析開始時から累積したものに定数 C_a を掛けている。入力 $e_1(j)$ は目標先端点座標とその変化速度に対する誤差、入力 $e_2(i, j)$ は前述のニューロ逆モデルから得られる目標先端点座標 $X_t^*(j)$ に対する可変長部材長さ $l_{fd}(i)$ の感度から構成される。大まかにいえば、この二つの入力が、同符号のときに、出力としての可変長部材長さの修正量を増加させる特性を、ファジィ制御則(図4)に与える。ファジィ制御では、メンバシップ関数として三角形および台形を使用し、IF-THEN 形式で表されたファジィ制御ルールに対し、マックスミニ合成重心法を用いて各ルールごとに求められた結論値の論理和の重心を制御値とした⁽¹⁶⁾。

なお、目標先端点座標 X_t^* は、あらかじめ時間 t の関数として写像ネットワークに学習させておいて用いた。また、この時間関数で与えられた目標先端点座標からその速度成分 $\dot{X}_t^*$ を導くために、式(10)に示す中心差分法を用いた。

$$\dot{X}_t^* = (X_{t+h}^* - X_{t-h}^*) / 2h \dots\dots\dots (10)$$

Fig. 4 Fuzzy control rule and membership functions

4. 例題解析

本手法の有効性を確認するため、人の腕が物をつかんで肩と肘を曲げる動作を簡易的に模擬した、可変長部材二つを含む21個のはり要素からなる二次元柔軟構造物を対象に解析を行った。

対象とした柔軟構造物の有限要素法モデルを図5に示す。節点数14、はり要素数21で要素3と15が可変長部材で軸方向に伸縮可能である。節点1, 2, 4, 7, 9, 10は、Z軸回りに回転できる。また、腕の先端部に相当する節点14におもりが取り付けられている。重力は-Y方向に作用している。材質はアルミニウム合金を想定し、断面形状は、要素1~17が直径10mmで肉厚0.3mm、要素18~21が直径20mmで肉厚0.3mmの円管である。なお、図5中a→b→cは、先端部の目標軌跡を示している。

Fig. 5 Finite element model of flexible structure

Fig. 6 Preparation for learning data of inverse model using results of quasi-static finite element analyses at varying axial length of element ③ and ⑮

の目標軌跡を示している。

最初、図2に示す方法で、あらかじめ対象構造物の逆モデルの学習をしておく。逆モデル学習用データの準備のため、図6に示すように、二つの可変長部材(要素3と15の初期長さは、それぞれ80mmと138.6mm)の長さをそれぞれ5種類(要素3は48.5~112.3mm、要素15は109.4~162.7mmの間で等分)、先端部おもりの質量を2種類(0kgと50kg)の組合せの計50種類の条件下でそれぞれ準静的解析を行った。先端部の節点14のX, Y座標と先端部おもりの質量を入力データとし、2個の可変長部材の長さを出力とする全3層(中間層のニューロン数は7個)のニューラルネットワークの学習を行った。図7は、この学習結果を確認するため、先端部の節点14のX, Y座標に対する可変長部材の長さの学習データを丸印、推定値を網目で示して比較したものである。推定値は、学習データをよく近似できていることがわかる。また、先端部は、おもりの質量により-Y方向にたわみ、要素3の伸縮でもX軸方向に移動し、要素15の伸縮でもY軸方向に移動するようすがうまく表現されていることがわかる。

(a) Element ③

(b) Element ⑮

Fig. 7 Learned results of neural network inverse model (X, Y coordinates of tip node 14 vs. length of variable-link)

Fig. 8 Time domain response of desired X, Y coordinates of tip node 14

(a) Feedforward control

(b) Feedforward and feedback control

Fig. 9 Time domain response of displacement $\Delta X, \Delta Y$ from starting point a for tip node 14

次に、図5中で $a \rightarrow b \rightarrow c$ で示された先端部の節点14の目標軌跡を、時間の関数としてあらかじめニューラルネットワークに学習させておく。すなわち、図8に示した先端節点の目標軌跡の時刻歴応答を、時間を入力とし、先端節点の目標軌跡の X, Y 成分を出力とする全3層(中間層のニューロン数は4個)のニューラルネットワークに学習させた。

次いで、図3に示す流れに従って、対象構造物の運動制御を行った。(1)重量物の把握作業を最初の1秒間で行い、(2)この重量によりたわむため、次の2秒間で先端節点を出発点 a に戻し、(3)その後に先端節

(a) Feedforward control

(b) Feedforward and feedback control

Fig. 10 Calculated trajectory for tip node 14

点の目標軌跡追従(点 $a \rightarrow b \rightarrow c$)の運動制御を行った。なお、上記(2)は、2個の可変長部材の長さを、先端節点が出発点にあるとして逆モデル(図2, 6, 7)を用いて推定した値へ滑らかに近づけることで実現している。

計算結果を図9, 10に示す。これらの図は、ファジィ制御を用いたフィードバック径路を省略してニューラルネットワークを用いた逆モデルが構成するフィードフォワード径路のみで運動制御したものと、図3に示すとおりフィードフォワード径路とフィードバック径路を組合せて運動制御したものとを比較して示している。なお、フィードバック径路を用いる際には、先端節点の位置情報(X, Y 座標)が必要となる。

図9は、先端節点座標の出発点 a からの差 $\Delta X, \Delta Y$ の時刻歴応答を、目標値と計算結果とについて示したものである。フィードバック径路を含むものは、過渡応答の過程で次第に目標値に近づき微小振動も抑えられていくことがわかる。さらに、 $X-Y$ 平面上の先端点の軌跡(図10)によって、重力の作用によるたわみや過渡応答時のオーバシュートなどもわかる。これらの図から、フィードフォワード径路のみでもおおむね良好な目標軌跡追従の運動制御が行われるが、さら

に先端節点の位置情報を得てフィードバック径路を組合せれば、位置精度や制振効果が向上することがわかる。

なお、式(9)中の各係数は、先端節点目標軌跡の X, Y 成分中の最大変化量を $\Delta D_{\max}$ 、最大変化速度を $\Delta V_{\max}$ 、予備学習時の各可変長部材中の最大長さ変化量 $\Delta L_{\max}$ を用いて以下のように定めた。

$$C_p = 1/(0.8\Delta D_{\max}) = 15.63 \quad 1/\text{m}$$

$$C_D = -1/(8\Delta V_{\max}) = -1.56 \quad \text{s/m}$$

$$C_f = 1/(0.4\Delta L_{\max}/\Delta D_{\max}) = 3.14$$

$$C_d = \Delta L_{\max}/20/3 = 1.06 \times 10^{-3} \quad \text{m}$$

また、時間ステップ h は 0.1 s、式(3)中のはり要素の減衰特性を表現するための比例係数 α は今回零とした。

5. 結 言

本報では、しなやかに動く柔軟構造物の概念設計支援を目的とし、形状が可変な柔軟構造物のモデル化とその運動制御を容易に行う手法について述べてきた。その手順をまとめると、

(1) はり要素を用いた柔軟構造物の有限要素モデルの作成。

(2) 準静的解析(可変長部材長さや負荷を変化)結果を用いた逆モデルの学習。

(3) 直接数値積分により大変形動的応答を求める有限要素解析を行いながらの運動制御。

となる。なお、上記(3)の運動制御系は、逆モデルが構成するフィードフォワード径路と、フィードバックコントローラ(入力：逆モデルから得られる可変長部材長さに対する先端点座標の感度と、目標先端点座標とその変化速度に対する誤差の和、出力：可変長部材長さの修正量)が構成するフィードバック径路とからなっている。

さらに、本手法の有効性を確認するため、人の腕が物をつかんで肩と肘を曲げる動作を簡易的に模擬した、軽量の二次元柔軟構造物を対象とした解析を行った。その結果、フィードフォワード径路のみでもおお

むね良好な目標軌跡追従の運動制御が行われたが、さらに先端節点の位置情報を得てフィードバック径路を組合せることで位置精度や制振効果が向上することが確認できた。

なお、本手法は三次元構造を扱えるように構築されているが、今回はトラス・ラーメン部材を二次元的に組合せた構造を例題として用いた。そのため、手を柔軟アームの中に入れて操作することはせず、運動制御はあらかじめ与えられた目標軌跡追従方式とした。しかしながら、三次元構造にして手の中に入れ、目から得られた情報をもとに指でジョイスティックのようなものを操作して運動制御するという実際的な問題へ容易に展開することができる。

文 献

- (1) 山本圭治郎・兵頭和人・八高隆雄, 日本機械学会第72期通常総会講演論文集(I), (1995), 533-534.
- (2) 安藤文典・則次俊郎・高岩昌弘・山中孝司, 第11回日本ロボット学会学術講演会, (1993), 993-996.
- (3) Robertshaw, H. H., Wynn, R. H., Kung, Jr., H. F., Hendricks, S. L. and Clark, W. W., *AIAA Paper*, No. 89-1328(1989).
- (4) Clark, W. W., Robertshaw, H. H. and Warrington, T. T., *AIAA Paper*, No. 89-1330(1989).
- (5) Warrington, T. J., Clark, W. W. and Robertshaw, H. H., *AIAA Paper*, No. 92-2403(1991).
- (6) Utku, S., Ramesh, A. V., Das, S. K., Wada, B. K. and Chen, G. S., *AIAA Paper*, No. 89-1286(1989).
- (7) Matsuzaki, Y. and Abe, S., *AIAA Paper*, No. 92-2402(1992).
- (8) 田中正夫, ニューラルネットワーク 計算力学・応用力学への応用(矢川元基編), (1992), 2章, 培風館.
- (9) Geradin, M., Cardona, A. and Granville, D., *AGARD Conf. Proc.*, No. 489(1990), 28*1-28*11.
- (10) Zomaya, A. Y. and Nabhan, T. M., *Neural Networks*, **6** (1993), 223-244.
- (11) Gomi, H. and Kawato, M., *Neural Networks*, **6**(1993), 933-946.
- (12) 新井史人・栄莉莉・福田敏男, 機論, **59** 568, C(1993), 3749-3756.
- (13) Ishiyama, S., Takagi, J., Yamamoto, K. and Nishimura, T., *Int. J. Impact Engng.*, **7** 2(1988), 197-212.
- (14) Akasaki, F., Shimojima, S., Nishigaki, H. and Ishiyama, S., *25th ISATA Symposia*, (1992), 663-670.
- (15) 川人光男, 計測と制御, **33** 4(1994), 296-303.
- (16) 菅野道夫, ファジィ制御, (1989), 67-90, 日刊工業新聞社.