ワイヤ牽引駆動機構の先端位置決め制御*
(第1報, モデリングと目標値補償フィルタの設計)小林 正人*¹, 井村 進也*²Tip-Positioning Control of a Tendon-Wire-Driven Mechanism
(Modeling and Reference Compensator Design)Masahito KOBAYASHI*³ and Shinya IMURA*³ Research & Development Group, Hitachi, Ltd.,
502 Kandatsu, Tsuchiura-shi, Ibaraki, 300-0013 Japan

A tip position of a wire-driven mechanism is controlled by an electric motor, so the three problems: slack in the wire, friction between the wire and coil sheaths protecting it, and change in the form of the tube must be solved. A model of the wire-driven mechanism was devised, and a method for controlling the wire-driven mechanism was then developed. First, a model base on a nonlinear dynamic equation including friction and wire slack was made, then a reference-filter controller, which compensates the phase delay of the wire-driven positioning system, was designed. Positioning experiment was confirmed that the controller effectively improved the following performance regarding the target trajectory without the need for an additional sensor.

Key Words: Tendon-Wire-Driven Mechanism, Nonlinear Modeling, Reference Filter, Positioning Control

1. は じ め に

ワイヤ牽引駆動は、リンク構造による力の伝達と比べ、著しい軽量化が可能となるため、比較的長い柔軟物の先端を位置決めするのに適しており、指ハンドロボット、医療用内視鏡、工業用内視鏡などで広く使われている。指ハンドロボットでは、人口指やその関節に用いられている。医療用内視鏡では、体腔内に細長の挿入部を挿入することにより、体腔内の臓器を観察したり、各種治療の処置をしたりしている。また、工業分野においても、ボイラやタービンなどの内部の傷や腐食を観察したり検査するために用いられている。これらワイヤ牽引駆動装置は、ワイヤによって先端の湾曲部を駆動するワイヤ牽引機構となっており、操作者はワイヤが巻きついている操作ノブを直接手で回転させたり、電動モータによって2本のワイヤを交互に引いたりすることで、先端の位置決めを行うものである。

図1に本研究で対象としている電動駆動モータによってワイヤの牽引動作を行う位置決め装置を示す。

本ワイヤ牽引駆動型位置決め装置は、操作部に取り付けられた操作者の指令値を与えるジョイスティック、湾曲部を有する細長のチューブ、湾曲部を上下/左右に湾曲させるための牽引ワイヤ、牽引ワイヤを牽引するプーリ、プーリを回転駆動させるためのモータから成る。チューブ先端の湾曲部は、複数の節輪を互いに回転自在に連結した蛇管からなり、ここでは上下方向に湾曲するように図示している。湾曲部の最先端には各々の牽引ワイヤの端が取り付けられる。各々のワイヤは、それぞれコイルシースの内部を通り、ワイヤの他の端がプーリに互いに反対側から巻き付けられて固定されている。プーリは、ギヤを介してDCモータと連結されている。つまり、モータを回転してプーリを回転すると、そのプーリに巻き付けられているワイヤの一方は引かれ、他方は繰り出される。なお、本研究においては、上下に湾曲させることができる一対の牽引ワイヤのみを対象としている。

本位置決め装置の先端部には、小型CCDカメラが取り付けられており、CCDでとらえた画像を映し出すモニタを操作者が見ながらジョイスティックによってチューブの先端湾曲部を上下/左右に湾曲操作できる構成となっている。操作者はモニタをみてチューブ先端から見た動きをリアルタイムに観察することができるため、モータを適切に駆動することにより先端の

* 原稿受付 2003年7月11日。

*¹ 正員、(株)日立製作所研究開発本部(〒300-0013 土浦市神立町502)。*² 正員、(株)日立製作所機械研究所。

E-mail: kobaya@rd.hitachi.co.jp

Fig. 1 Structure of wire-driven positioning mechanism equipment

Fig. 2 Model of wire-driven mechanism

動きが自在に制御できれば操作者の操作負担が軽減され操作性の大幅な向上が期待される。

さて、ワイヤ牽引機構は、柔軟であるがゆえに牽引ワイヤの張力を一定以上にあげることができない。このため、チューブの先端湾曲部を牽引ワイヤによって制御する上で以下に示す問題が生じる。(1) ワイヤとそれを保護するコイルシース間の摩擦の問題、(2) プーリによって牽引されていない側の(繰り出される)ワイヤに発生するたるみの問題、(3) モデルがチューブの途中の屈曲形状(ほぼストレート状態にあるか、途中がぐるりと回転しているループ形状状態にあるか等々)によって変化する特性変動の問題。

従来より、ロボット指ハンドをワイヤ牽引により力制御で駆動する方法は検討されている^{(1)~(6)}。しかしながら、ワイヤたるみのモデリングや目標指令値に対す

る先端位置追従を目的とした制御系の設計に関する報告はみあたらない。本論文においては、位置センサと張力センサをチューブの両端に備えるワイヤ牽引駆動型位置決め装置を用いてモデリングを行い、次に、それらセンサの測定信号を用いず操作指令値に先端湾曲部のワイヤの変位を追従させることを目的とした目標値フィルタの設計とその実験結果について述べる。

2. ワイヤ牽引機構のモデリング

ワイヤ牽引機構のモデリングを行う。ワイヤのたるみやワイヤ・コイルシース間の摩擦など非線形系モデルを導出する。

2.1 実験装置とシステム構成 図1を用いて本研究で用いるワイヤ牽引機構の実験装置とそのシステム構成を説明する。図1の実験装置は、チューブの先

Fig. 3 Block diagram of wire-driven positioning mechanism with wire slack

端側と手元側のワイヤにそれぞれ位置センサと張力センサが装着されており、動作を解析するための位置決め装置である。塩化ビニール樹脂からなるチューブの全長は約 2m, 先端の湾曲部の長さは 130mm, チューブの直径は約 15mm である。ワイヤはステンレス材を用い、直径は約 1mm である。モータは、DC サーボモータを用いる。モータの回転角は、ロータリーエンコーダを用いて検出し、カウンタ出力結果を DSP (デジタル・シグナル・プロセッサ) に取り込む。操作者はモニタを見ながらジョイスティックを操作し、その操作指令値が DSP に取り込まれる。図 1 では次章で述べる目標値フィルタ (R) を図示しているが、本章では使用しない。操作指令値とモータ位置との偏差をとり、PID (比例・積分・微分) 補償器で操作量を演算し、D/A (デジタル・アナログ) 変換器によりアナログ信号に変換してサーボドライバアンプに送出する。DSP 内の演算サンプリングは 1ms である。チューブ両端のワイヤ位置信号は、ワイヤに取り付けられた小板をレーザ変位センサを用いて検出する。張力信号はテンションメータにより検出する。

2.2 たるみのモデル化 図 2 に、ワイヤ牽引機構モデルの原理図を示す。モータによりプーリを回転すると、そのプーリに巻き付けられているワイヤの一方 (上側) は引かれ、他方 (下側) は繰り出される。

このとき、先端の湾曲部は上側に湾曲するとともに、下側のワイヤのプーリ側にはたるみが生じる。このワイヤのたるみを不感帯の関数 $\phi(x)$ を用いてモデル化した。たるみは、プーリの位置とワイヤ手元側の位置の偏差が負になったときに、張力がかかなくなることに生じるとし、偏差が正になった瞬間にワイヤ剛性 k_1 により張力がはり、モータの駆動力がワイヤに伝達されるとした。この関係を図 3 のたるみモデルのブロック線図に示す。

なお、モデル化するにあたって以下の点に考慮した。(1) たるみ変位を表現するためにワイヤ牽引機構を 3 質点系バネマス系とした。(2) ワイヤとワイヤを取り巻くコイルシース間の摩擦をクーロン摩擦 f_4 で表現した。モデルのパラメータは、時間応答と周波数応答の実験結果に基づいてストレート・ループ形状状態に分けて決定した。以下に導出した数式モデルとそのパラメータを示す。

$$\frac{J_m}{R_m} \ddot{x}_m = K_f i_m - R_m k_{1L} \phi_L(x_m - x_{Lr}) - R_m k_{1R} \phi_R(x_m - x_{Rr}) \quad (1)$$

$$m_{1L} \ddot{x}_{Lr} = k_{1L} \phi_L(x_m - x_{Lr}) - k_{3L}(x_{Lr} - x_{Lf}) - k_{2L}x_{Lr} - c_{2L}\dot{x}_{Lr} \quad (2)$$

$$m_{1R} \ddot{x}_{Rr} = k_{1R} \phi_R(x_m - x_{Rr}) - k_{3R}(x_{Rr} - x_{Rf}) - k_{2R}x_{Rr} - c_{2R}\dot{x}_{Rr} \quad (3)$$

$$m_2 \ddot{x}_f = -k_{3L}(x_f - x_{Lr}) - k_{3R}(x_f - x_{Rr}) - k_4 x_f - c_4 \dot{x}_f - f_4 \text{sign} \dot{x}_f \quad (4)$$

ただし、たるみモデルを表現するために導入した不感帯関数は以下とする。

$$\phi_L(x) = \begin{cases} x + x_0 & (x \geq -x_0) \\ 0 & (x < -x_0) \end{cases}$$

$$\phi_R(x) = \begin{cases} 0 & (x \geq x_0) \\ x - x_0 & (x < x_0) \end{cases}$$

ここで、

J_m : モータ軸の慣性モーメント ($0.0012 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$)

R_m : プーリ半径 (10mm)

K_f : モータトルク係数 ($37.6 \text{ N} \cdot \text{m/A}$)

m_{1L}, m_{1R} : 手元ワイヤ等価質量 (0.01kg)

m_2 : 先端湾曲部の等価質量 (1.4kg)

k_{1L}, k_{1R} : 手元位置のワイヤ剛性 (40 kN/m)

k_{2L}, k_{2R} : 手元ワイヤとチューブの間の剛性 (0 N/m)

c_{2L}, c_{2R} : 手元ワイヤとチューブの間の剛性 (1 Ns/m)

k_{3L}, k_{3R} : 手元から先端のワイヤ剛性 (4 kN/m)

k_4 : 先端ワイヤとチューブの間の剛性 (1kN/m)

c_4 : 先端ワイヤとチューブの間の粘性

(ストレート 10Ns/m ; ループ形状 20Ns/m)

f_4 : 先端ワイヤとチューブの間の摩擦

(ストレート 10N ; ループ形状 20N)

x_0 : 不感帯オフセット量

(ストレート 0.1mm ; ループ形状 0.2mm)

i_m : モータ電流 (A)

x_m : プーリ回転変位 (m), (図中: $posm$)

x_{Lr} : 手元ワイヤ変位 (m), (図中: $posLr$)

x_{Rr} : 手元ワイヤ変位 (m), (図中: $posRr$)

x_f : 先端ワイヤ変位 (m), (図中: $posf$)

$tenLr$: 手元ワイヤ張力; $k_{1L}\phi_L(x_m - x_{Lr})(\text{N})$

$tenRr$: 手元ワイヤ張力; $-k_{1R}\phi_R(x_{Rr} - x_m)(\text{N})$

$tenLf$: 先端ワイヤ張力; $k_{3L}(x_{Lr} - x_f)(\text{N})$

$tenRf$: 先端ワイヤ張力; $-k_{3R}(x_f - x_{Rr})(\text{N})$

である。

2.3 シミュレーション結果と実験結果 (時間応答波形の評価) 図1に示すワイヤ牽引機構位置決め装置によってチューブ先端の湾曲位位置決め動作を実施したときの実験結果と前節で示したモデルに基づいたシミュレーション結果を以下に示す。ここではジョイスティックによる目標指令値の代わりに、三角波をモータ位置指令値に直接送出して湾曲制御を行った。制御系はモータ制御のみとした (目標値フィルタを使用しない: $R=1$)。すなわち、ロータリーエンコーダから得たモータ位置をフィードバックして目標指令値との偏差を取り、PID(比例・積分・微分)制御で偏差を補償する。よって、ギヤのたが等を無視すれば、プーリの回転によって移動したプーリ近傍のワイヤ移動量は、目標指令値にギヤ比とプーリの半径を積算することで算出できる。しかしながら、プーリが回転することによって移動したプーリ近傍のワイヤの移動量と先端のワイヤの移動量は比例関係にはならない。これは、ワイヤとコイルシース間の摩擦によってワイヤの引っ張り張力が途中で減衰するとともに、プーリの回転方向が逆転した時に生じるたるみを巻き取るまでの時間的空白 (デッドゾーン) による位相の遅れ、そして先端の蛇管とチューブからなる湾曲部の曲げを阻止しようとするダイナミクスが原因として考えられる。

さて、チューブがほぼ真っ直ぐな状態をストレート状態とし、途中が一回転している状態をループ状態とする。それぞれの場合において、周期 3.48ms の三角波

(a) Simulation result

(b) Experiment result

Fig. 4 Time response of tip position and target position (motor control: straight tube shape)

(a) Simulation result

(b) Experiment result

Fig. 5 Time response of tip position and target position (motor control: loop tube shape)

Fig. 6 Simplified model of wire-driven positioning mechanism

形を目標指令値として印加した場合の先端位置と目標位置の時間応答波形を評価する。図4にストレート状態のシミュレーション結果と実験結果を示す。図5にループ状態のシミュレーション結果と実験結果を示す。実験結果とシミュレーション結果はほぼ一致し、前節で示したモデルの有効性を確認することができた。

図4(b)のストレート状態の実験結果においては、先端ワイヤ位置の遅れは、5度程度であり、操作性の上でも特に問題にはならなかった。一方、図5(b)のループ形状状態においては、先端ワイヤ位置は目標指令値に対し、位相が20度程度遅れ、ゲインも三角の頭がつぶれ台形となっており、ストレート状態に比べより非線形性の強い系となっていることが分かる。このことより、モータ位置のみをフィードバック制御するモータ制御技術のみでは操作性に問題が生じる。

3. 目標値フィルタ追従制御系の設計

ワイヤ牽引機構に特別なセンサを用いずに、目標指令値に対する追従性を向上させることを可能とする目標値フィルタ追従制御系の設計を行う。

3.1 目標値補償フィルタの設計法 図1に示す目標値フィルタ(R)の設計法を示す。これは、ワイヤ牽引機構にセンサが取り付けられない場合を想定してフィードフォワード制御系を従来のモータ制御に前向きに追加した構成となっている。目標値フィルタは、湾曲部の弾性特性、ワイヤたるみ、摩擦等によって生じるモータ指令値 r_f から先端湾曲部位置までの間の位相遅れ特性を、目標値フィルタの進み特性により補償するものである。

以下、詳細の設計法について説明する。まず、2章で導入した非線形モデル(式(1)から式(4))を、湾曲部のみに着目した1質点系の線形な簡略化モデルに変更する(図6)。以下では、ワイヤの両方に張力がかかっているたるみの生じていない状態で摩擦モデルが無視できるものとする。このときの線形簡略化モデル

は次式となる。

$$m_f \ddot{x}_f = -k_{3L}(x_f - x_m) - k_{3R}(x_f - x_m) - k_4 x_f - c_4 \dot{x}_f \quad (5)$$

これより、次式を得る。

$$\{m_f s^2 + c_4 s + (k_4 + k_{3L} + k_{3R})\} x_f = (k_{3L} + k_{3R}) x_m \quad (6)$$

ただし、 s はラプラス演算子、 x_f は先端ワイヤ変位、 x_m はプーリ回転変位、 m_f は等価質量とする。ここで、モータのロータリーエンコーダを用いた位置フィードバックにより次式が達成するものとする。ただし、 r_f はモータ位置フィードバック(モータ制御)への指令値とする。

$$x_m \approx r_f \quad (7)$$

以上より、モータ位置フィードバック系と湾曲部モデルを結合すると次式の拡大プラント $P(s)$ となる。

$$\begin{aligned} x_f &= \frac{k_{3L} + k_{3R}}{m_f s^2 + c_4 s + (k_4 + k_{3L} + k_{3R})} r_f \\ &= P(s) r_f \end{aligned} \quad (8)$$

ここで、目標値フィルタ $R(s)$ を次式、

$$r_f = R(s) r \quad (9)$$

で定義し、拡大プラント $P(s)$ の逆ダイナミクスで構成する。ただし、 r は目標指令値とする。逆ダイナミクスのプロパー性は、安定な極を追加することで解決する。これにより、目標値 r から先端位置 x_f までのゲインは式(8)と式(9)より理想的には1となり、目標値に遅れなく追従可能となる。拡大プラント $P(s)$ の逆ダイナミクスは次式となる。ただし、質量 m_f や外部負荷はバネ剛性 k_3 に比べ小さいとして無視する。

$$\begin{aligned} P^{-1}(s) &= \frac{m_f s^2 + c_4 s + (k_4 + k_{3L} + k_{3R})}{k_{3L} + k_{3R}} \\ &\approx \frac{c_4}{k_{3L} + k_{3R}} s + \frac{k_4 + k_{3L} + k_{3R}}{k_{3L} + k_{3R}} \end{aligned} \quad (10)$$

以上より、目標値フィルタ $R(s)$ は上式の分子多項式と、安定な分母多項式を追加して

$$R(s) = \frac{s/\alpha + 1}{s/\beta + 1} \quad (11)$$

(a) Reference filter

(b) Experiment result (before compensation)

(c) Experiment result (after compensation)

Fig. 7 Frequency characteristics from target position to tip position (motor control with reference filter: straight tube shape)

で構成できることが分かる。なお、実際には、式(10)に至るモデルの簡略化と非線形の影響を考慮しなければならないため、目標値フィルタを上式の1次位相進みフィルタと次式のノッチフィルタを直列に結合して

(a) Reference filter

(b) Experiment result (before compensation)

(c) Experiment result (after compensation)

Fig. 8 Frequency characteristics from target position to tip position (motor control with reference filter: loop tube shape)

周波数特性に基づいて設計する。

$$N(s) = \frac{s^2 + 2\zeta_{N1}\omega_{NS} + \omega_N^2}{s^2 + 2\zeta_{N2}\omega_{NS} + \omega_N^2} \quad (12)$$

目標値フィルタの設計例、および評価については、次節で説明する。

(a) Straight tube shape

(b) Loop tube shape

Fig. 9 Time response of target trajectory r and compensated r_f (with/without notch filter)

3.2 シミュレーション結果と実験結果

3.2.1 周波数特性の評価 図7にストレート状態における目標値フィルタの周波数領域での設計例を示す。前節で目標値フィルタは基本的には、位相進み要素で構成すればよいことが分かった。目標値フィルタは(図7(a)), 次式の位相進みフィルタとノッチフィルタにより構成した。

$$\alpha = 2 \cdot \pi \cdot 1.5, \beta = 2 \cdot \pi \cdot 100$$

$$\zeta_{N1} = 0.4, \zeta_{N2} = 2.5, \omega_N = 2 \cdot \pi \cdot 10$$

図7(b)と図7(c)に目標値フィルタの補償前と補償後のそれぞれの目標指令値 r から先端ワイヤ位置 x_f までの周波数特性の実験結果を示す。目標値フィルタを補償することにより、1Hz から 3Hz の間の位相特性の遅れが抑えられていることが分かる。よって、目標値フィルタは、より高周波数成分を含む目標値にたいしてもゲインの劣化や位相の遅れが最小となり、目標値への追従性が向上できることが分かる。

一方、図8にループ形状状態の目標値フィルタの設計例を示す。同様に、位相進みフィルタとノッチフィルタで目標値フィルタの設計を行った。位相進みフィルタは次式で構成し、ノッチフィルタに関しては、ス

(a) Straight tube shape

(b) Loop tube shape

Fig. 10 Experiment time response of target position and tip position (motor control with reference filter)

トレート状態で用いたのと同じ特性とした。位相進みフィルタの分子多項式の係数のみがストレート状態と異なっていて、より進みの系となっていることがわかる。

$$\alpha = 2 \cdot \pi \cdot 1.0, \beta = 2 \cdot \pi \cdot 100$$

目標値フィルタを補償する前の周波数特性と比較して、ストレート状態と同様に、位相特性の遅れが改善されていることが分かる。

3.2.2 時間応答波形の評価 図9は、目標値フィルタによって目標の三角波指令値がどのように整形されるかを示したものである。ノッチフィルタを構成せず、位相進みフィルタのみで目標値フィルタを構成した場合には、方向の切り替わりにおいて急峻に目標値がオフセットし、摩擦力を打ち消すように整形されていることが分かる。モータに直接この波形を印加すると高周波数成分を励振しやすく、ギヤのがたや信頼性の点から問題である。一方、実際に設計で用いた、位相進みフィルタとノッチフィルタを組み合わせた目標値フィルタにおいてはスムーズに方向が切り替わっていることが分かる。また、ストレート状態(図(a))とループ形状状態(図(b))を比較すると、ループ形状状態のほうがより三角波を前向きに位相を進めている

ことが分かる。

2章と同様に周期 3.48ms の三角波形を目標指令値として印加した場合の先端位置の時間応答波形を評価する。図 10(a) と図 10(b) に目標値フィルタ補償後のストレート状態とループ形状状態の実験結果をそれぞれ示す。

図 10(a) のストレート状態の実験結果においては、図 4(b) のモータ制御のみの実験結果と比較して、先端ワイヤ位置の遅れが減少していることがわかる。目標指令値に対する先端ワイヤ位置の追従偏差の平均をとると、モータ制御のみの場合は 1.8mm であったのに対し、本目標値フィルタを構成することで 1.4mm に 23% 追従性を向上させることができた。一方、図 10(b) のループ形状状態においては、図 5(b) のモータ制御のみの実験結果と比較して、三角頂点の不感帯の幅が減少しているだけでなく、位相が全体的に進んでおり、より追従性が向上していることが分かる。この場合、目標指令値に対する先端ワイヤ位置の追従偏差の平均をとると、モータ制御のみの場合は 2.7mm であったのに対し、本目標値フィルタを構成することで 1.9mm に 30% 追従性を向上させることができた。

4. お わ り に

ワイヤ牽引駆動機構のモデリングとその位置決め制御として目標値フィルタ追従制御系を設計し、以下の結論を得た。

(1) ワイヤ牽引機構のたるみ (不感帯モデルでモデル化)、ワイヤとコイルシース間の摩擦 (クーロン摩

擦でモデル化) を考慮したワイヤ牽引機構のモデル化を行った。位置センサと張力センサをチューブの先端部と手元部に備える位置決め装置を用いて、本モデル化の妥当性を検討し、シミュレーション結果と実験結果がほぼ一致することを確認した。

(2) 目標指令値からチューブの先端位置までの伝達関数の逆特性に基づいた目標値フィルタの設計を行った。目標値フィルタは 1 次の位相進みフィルタと周波数整形として用いたノッチフィルタより構成される。位置決め装置を用いて本目標値フィルタ追従制御系を評価し、目標指令値に対し、チューブの先端位置の追従性が 30% 程度向上することを確認した。

文 献

- (1) 金子真：蛇管機構とその力制御，日本ロボット学会誌，Vol.9, No.4, (1991), pp.512-515
- (2) 金子真，他 3 名：ワイヤ駆動ロボットハンドの力サーボ系に関する考察，日本ロボット学会誌，Vol.9, No.4, (1991), pp.437-444
- (3) 金子真：ロボットハンドトルクサーボ系の入力依存形安定性，日本ロボット学会誌，Vol.7, No.6, (1989), pp.40-40
- (4) 今村信昭，他 3 名：コンプライアンス制御機能を備えた 2 本指ハンドの試作，日本機械学会論文集 (C 編)，Vol.55, No.516, (1989), pp.2083-2090
- (5) 岡田徳次：ワイヤを用いた人工指の力制御，計測自動制御学会論文集，Vol.14, No.2, (1978), pp.155-162
- (6) 兵頭和人，小林博明：非線形バネ要素を持つ腱制御手首機構の研究，日本ロボット学会誌，Vol.8, No.8, (1993), pp.1244-1251