Shape Control of Flexible Object
by Multiple Wires' Constrains

○ 林 喜章 (九大)   正 山本 元司 (九大)   正 毛利 彰 (九大)

Yoshiaki HAYASHI, Kyushu University, 6-10-1 Hakozaki, Higashi-ku, Fukuoka

Motoji YAMAMOTO, Kyushu University

Akira MOHRI, Kyushu University

Key Words : Shape Control, Flexible Object, Wire's Constraints

1 はじめに

福祉・介護用メカトロニクス機械においては人に接触しながらの動作が必要となるため、安全性や人との親和性が重要となる。このため従来のような硬い動作をおこなう機械ではなく、アクチュエータや機構全体に受動的柔軟さを持つものが望まれる。このような受動的や柔軟さを持つ機械の機構部・駆動部としては、バネなど弾性要素を機構部に用いて電気モータで駆動するものや、ワイヤや形状記憶合金で駆動することで駆動部に弾性要素を持たせるものなどがある[1][2]。この研究ではコンパクトに機構構成可能である利点を考え、複数ワイヤにより柔軟物を拘束・制御し、結果的に受動的柔軟さを持つ機構を提案する。ここではこの機構に多くの動作自由度を持たせるため、複数個所で柔軟物をワイヤ拘束し、その形状制御をおこなう。本報ではワイヤ操作量に対する提案機構の動作解析をおこない、実験によりその有効性を示す。

2 複数ワイヤによる柔軟物拘束機構

この研究では、柔軟物の自在な形状制御を目標とし、特に、柔軟物の複数注目点の形状(位置)を操作することを目的とする。ここでは2組のワイヤを腱駆動方式により拘束・制御することを考え、4本のワイヤで注目点の制御をおこなう。これを複数個所でおこなうことで、柔軟物全体の形状制御が可能となる。

なお、ワイヤを用いて1つの剛体の n 自由度を拘束・操作するためには、最低 $n+1$ 本のワイヤが必要となることが知られている。ここでは1つの注目点に対して4本のワイヤを使用しており、残りの3自由度に関して機構の弾性や重力を利用することで受動的にその自由度が決定され、結果的に受動的柔軟さを持つ機構になる。

図1に提案するワイヤによる拘束機構を示す。この研究では柔軟物として空圧機器用ゴムホースを用いている。このホースには一定間隔でディスクと呼ぶ部品をホースに貫通させており、このディスクを通してワイヤを拘束し先端部および途中の形状を制御する。

3 変位解析

3.1 座標系の設定

ワイヤ操作により、柔軟物であるホースの形状を制御するため、ワイヤ操作量 l に対する x 軸方向(図1参照)変位の解析をおこなう。ここでは先端部のディスクおよび途中のディスクの2箇所で行ったモデルに対して解析をおこなう。ホースの自然状態は重力下向きであるとする。図1のように座標系を設定し、以下で用いる主な記号をまとめる。

 N :全ディスクの枚数 l :ワイヤ操作量 h :ディスク間距離 r :ディスク中心とワイヤ貫通孔との距離

Fig.1 Coordinate systems

 m :操作する途中のディスクより先のディスクの枚数

ただし h は一定の値とする。ここでは2箇所で行ったため合計8本、4組のワイヤを用いることになる。このとき、先端操作点ディスクおよびそのワイヤに関するものに添字1(l_1, r_1 など)を、中間操作点のディスクおよびそのワイヤに関するものに添字2(l_2, r_2 など)を用いる。 l_1 を $l_1 = l_{m1} + l_{s1}$ とおき、

 l_{m1} :途中のディスクまでを操作するときに必要な操作量 l_{s1} :途中から先の操作に必要な操作量

とする。

3.2 途中ディスクの位置

各ディスク間でのワイヤ操作量変化分 Δl とディスクの傾きの変化分 $\Delta\theta$ との間には

$$\Delta l = r \Delta\theta \quad (1)$$

の関係がある。ホースに加えられる曲げモーメントを M_0 とすると、各ディスク間においてホースの傾きとたわみ量は梁の曲げ理論より

$$\Delta\theta = \frac{1}{EI} \int -M(z) dz = \frac{M_0 h}{EI} \quad (2)$$

$$\Delta x = \int \Delta\theta dz = \frac{M_0 h^2}{2EI} = \frac{\Delta\theta}{2} h \quad (3)$$

となる。これらの関係より操作する途中のディスクの中心位置、傾き角は

$${}^0x_m = \frac{nh}{2r_2} l_2 \quad (4)$$

$${}^0z_m = (N-m)h - \frac{(n^2-1)h}{6nr_2^2} l_2^2 \quad (5)$$

$$\theta_m = \frac{l_2}{r_2} = \frac{l_{m1}}{r_1} \quad (6)$$

Fig.2 Model of hose bending

Fig.3 Shape control by multiple wires' constraints

と書くことができる [3]. ここでベース (Σ_0 原点) に近い数枚のディスクは重力の影響によりほとんど動かないとし、途中までのディスクの枚数 ($N - m$) 枚からその枚数分だけ減らしたものを n としている. また式 (6) より

$$l_{m1} = \frac{r_1}{r_2} l_2 \quad (7)$$

$$l_{s1} = l_1 - l_{m1} = l_1 - \frac{r_1}{r_2} l_2 \quad (8)$$

3.3 先端ディスクの位置

ベース座標系 (Σ_0) での先端ディスクの位置を求めるため、まず座標系 Σ_1 での値を求める. Σ_1 における先端ディスクの傾き角 ψ は

$$\psi = \theta - \theta_m = \theta_s - \phi \quad (9)$$

ここで θ_s は重力を考慮しないときのワイヤ操作量 l_{s1} による座標系 Σ_1 から見た先端ディスクの傾き角であり、

$$\theta_s = \frac{l_{s1}}{r_1} \quad (10)$$

と書ける. また ϕ は重力による影響により鉛直向きに戻る角度を表しており、これはミオソテスの方法 [4] を用いると次式で表される.

$$\phi = \left\{ \frac{m(m+1)(2m+1)}{2} p + m^3 h q \right\} \frac{gh^2}{6EI} \sin \theta_m \quad (11)$$

ここで p, q はそれぞれディスク 1 枚の質量、ホースの単位長さあたりの質量、 g は重力加速度である.

途中のディスクより先では EI およびモーメント M の変化が小さいとして EI, M を一定とみなすと、梁の曲げ理論より曲率 ρ が一定となりホースは円軌道を描くことになる. 図 2 に示すようにこの円軌道の半径を R , 途中のディスクと先端ディスクとの中心間距離を L とするとこの弧の長さは mh なので半径 R は

$$R = \frac{mh}{\psi} \quad (\psi \neq 0) \quad (12)$$

ここで余弦定理より、途中ディスクと先端ディスク中心点間距離 L を求めると

$$L = \begin{cases} \frac{2mh}{\psi} \sin \frac{\psi}{2} & (\psi \neq 0) \\ mh & (\psi = 0) \end{cases} \quad (13)$$

この L を用いて座標系 Σ_1 から見た先端ディスクの中心位置を表すと

$$\begin{cases} {}^1x_s = L \sin \frac{\psi}{2} \\ {}^1z_s = L \cos \frac{\psi}{2} \end{cases} \quad (14)$$

式 (4)~(6) および式 (14) より座標系 Σ_0 から見た先端ディスクの中心位置、傾き角は

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^0x_m \\ 0 \\ {}^0z_m \end{bmatrix} + {}^0R_1 \begin{bmatrix} {}^1x_s \\ 0 \\ {}^1z_s \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\theta = \theta_m + \theta_s - \phi \quad (16)$$

Angle of the last disk for wire's length

Position of the last disk for wire length

Fig.4 Experimental result

ただし、 ${}^0R_1$ は Σ_1 から Σ_0 への回転行列であり

$${}^0R_1 = \begin{bmatrix} \cos \theta_m & 0 & \sin \theta_m \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_m & 0 & \cos \theta_m \end{bmatrix} \quad (17)$$

と書ける.

4 動作実験

解析結果と試作実験装置による実験結果とを比較をする. 図 3 にその装置の写真を示す. この実験では x 方向に、 l_2 を一定とし l_1 を操作したときの先端ディスクの中心位置と傾き角を測定した. ワイヤにより拘束したディスクの位置は全ディスク枚数 $N = 7$ に対してベースから 5 枚目と 7 枚目 (先端部) である. このときのワイヤ操作量と先端ディスクの傾き角との関係を図 4 上に、ワイヤ操作量と先端ディスクの中心位置との関係を図 4 下に示す. 図に示す実験機構パラメータの値は $h = 70[\text{mm}]$, $r_1 = 42[\text{mm}]$, $r_2 = 52[\text{mm}]$, $m = 2$, $l_2 = 47[\text{mm}]$. 実験では各パラメータをこの値以外の場合でも試し、実験値と解析値がほぼ等しいことを確認した.

5 おわりに

この研究は複数箇所でのワイヤ拘束による柔軟物の形状制御をおこなうため、ワイヤ長変化に対する機構の注目部位に対する変位解析をおこなった. また、実験によりその解析の有効性を検証した. 今後はワイヤ長とワイヤ操作力の関係を明確にし、ワイヤ拘束箇所と機構注目部の剛性 (弾性) に関する性質を調べる予定である.

References

- [1] 木野, 他: 受動内力を利用した柔軟チューブのワイヤ駆動制御, 第 20 回日本ロボット学会学術講演会, 1F18, 2002
- [2] 広瀬, 他: 形状記憶合金アクチュエータの開発, 日本ロボット学会誌, Vol.5, No.2, pp3-17, 1987
- [3] 山本, 他: ワイヤによる柔軟ホース拘束機構の動作解析, 第 22 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.1H18, 2004
- [4] 村上: 材料力学, 森北出版, pp104, 1994