

DDM によるワイヤーけん引式球面モータの動作解析

東京都立科学技術大学 工学部 本田 智

論文概要：ワイヤーけん引式球面モータとは、肩関節のようにX・Y軸を回転軸として2方向に回転でき、かつ、Z軸を回転軸として旋回できる新しいアクチュエーターであり、ボール状の球殻と円筒状の軸受け、および、球殻表面にその端を取り付けた4本のワイヤーで構成されている。球殻表面に取り付けた各ワイヤーは、球殻表面に沿って弛むことなく、軸受け部に開けた小穴に導かれ、各々のワイヤーを、引っ張ったり、または、送り出すことで球殻を回転・旋回させるようになっている。

このワイヤーけん引式球面モータの研究では、球殻上に取り付けるワイヤー端部の位置およびワイヤーを導き入れる軸受け部の小穴の位置によって、球殻が回転・旋回できる可動範囲が異なり、また、回転・旋回時の出力トルクが異なるため、最適なワイヤー取り付け位置および最適なワイヤーの引き込み穴位置を理論的に解析する必要があった。

この研究命題に対して、DDMを用いて、その最適取り付け位置および引き込み穴位置の検討を行ったので、これについて発表する。

1. はじめに

近年、ロボットには、単純作業の担い手としての役割から、人間の能力を超える知的で、かつ、精密・複雑な作業の担い手としての役割が求められ、この役割を実現するために冗長自由度を有する多自由度多関節ロボットの開発が進められている。そして、この多自由度ロボットの関節を駆動するために数々の関節アクチュ

Fig.1-1 Spherical motor manipulated by four wires. ユーザーコンファレンス2001。しかし、これら多自由度関節アクチュエーターは、一つのモータで一つの自由度を実現するため、駆動軸が直交する場合などでは、複数のモータとその減速機が複雑に組み合わせられ、構造が複雑で、かつ、大形で、制御も難しいものになっていた。そこで、構造が単純・コンパクトであり、1つの駆動部で複数の自由度を実現する多自由度アクチ

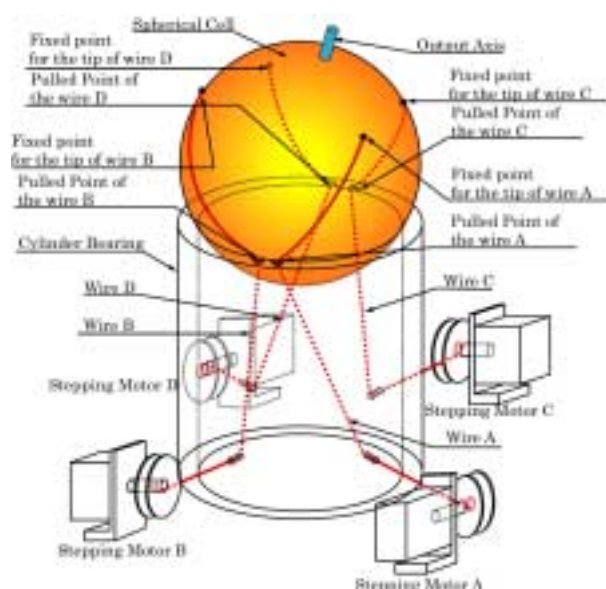


Fig.1-2 Structure of the spherical motor
 ュエーターの開発が求められている。
 本解析では、多自由度アクチュエータの一つとして考案したワイヤーけん引式球面モータの動作特性を解析し、かつ、内視鏡カメラの先端を3方向に回転駆動できる程度に小型・軽量・コンパクトで、かつ、制御が簡単なワイヤーけん引式アクチュエータを試作することを目的としている。以下では、ワイヤーけん引式球面モータの構造と動作原理、および、ワイヤーを取り付ける最適位置を理論的に解析した結果について述べる。DDMによる解析結果は、紙面の都合上、発表時に提示する。

2. 構造と動作原理

本研究で考案したワイヤーけん引式球面モータは、図1-2に示すように、ボール状の球殻(Spherical Cell)と円筒状の軸受け(Cylinder Bearing)で構成され、球殻表面に取り付けた4本のワイヤーA,B,C,Dを弛ませることなく球面に沿って軸受けに開けられたワイヤー吸い込み穴に導き、このワイヤーを4個のステッピングモーターで引っ張り、または、送り出すことによって、球殻を回転、旋回させる構造になっている。図2は、このワイヤーけん引式球面モータの動作原理を示したもので、球殻の中心を直交座標XYZの原点とし、図2-1で示す姿勢を基準姿勢とすると、1)ワイヤーAとBの2本のワイヤーを同時に引っ張り、CとDの2本のワイヤーを同時に送り出すと、図2-2に示すように、X軸を回転軸として球殻が回転し、また、2)図2-3に示すように、ワイヤーBとDの2本のワイヤーを同時に引っ張り、AとCの2本のワイヤーを同時に送り出すと、Y軸を回転軸として球殻が回転するようになる。さらに、3)基準姿勢から、ワイヤーBとCの2本のワイヤーを同時に引っ張り、AとDの2本のワイヤーを同時に送り出すと図2-4に示すように、Z軸を回転軸として球殻が回転することになる。そして、実際には、上述の3つの動作を組み合わせた任意の動作を得ることができる。

3. 球面姿勢の定義

本研究では球面モータの姿勢を以下の角度で定

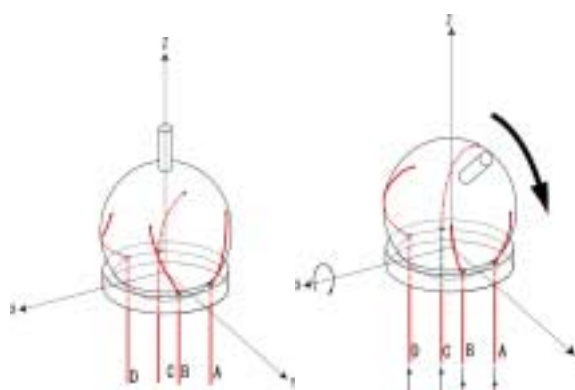


Fig.2-1 Standard posture

Fig.2-2 Rotation against X-axis

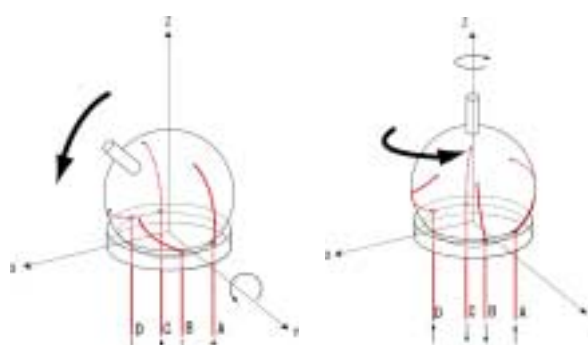


Fig.2-3 Rotation against Y-axis

Fig.2-4 Rotation against Z-axis

義する。まず、球殻の中心に空間座標XYZの原点と取り、図3に示す出力軸(Output Axis)がZ軸と一致している姿勢を基準姿勢(Standard Position)とし、また、出力軸が姿勢()に傾いた姿勢を図中の h , v , r で表すことにする。ここで、 h は、出力軸を倒す方向角で、X軸を基線とし矢印の方向を正とし、その値を $(-180^\circ < h < 180^\circ)$ の範囲とした。 v は、出力軸の傾き角とし、Z軸を基準としてその値を $(-180 < v < 180)$ とした。また、 r は、 h , v 回転させた後、出力軸を回転軸として矢印の方向に出力軸をひねった自転角度で、矢印の向きを正としてその値を $(-180 < r < 180)$ とした。ここで、球殻の姿勢は、 h , v , r によって一義的に定まるので、基準姿勢にある球殻上の任意の点は、 h , v , r 回転することによって、以

下の関係式(1)で一義的に定まる点に移動することになる。ここで、回転前の球面上の点の位置ベクトルを $P_b(X_b, Y_b, Z_b)$ とし、回転後の球面上の点の位置ベクトルを $P_a(X_a, Y_a, Z_a)$ とする。

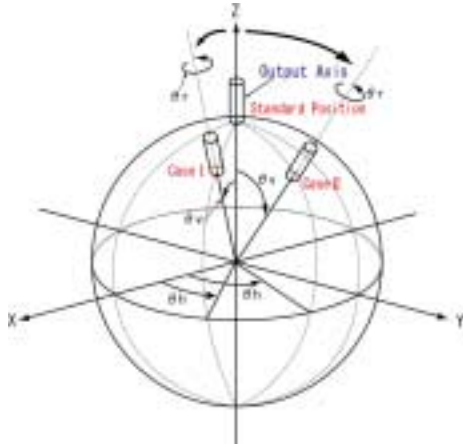


Fig.3 Definition of posture

$$\begin{pmatrix} x_a \\ y_a \\ z_a \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A \cos h \cos v - B \sin h \cos v - A \sin h \cos v \\ A \sin h \cos v + B \cos h \cos v + A \cos h \cos v \\ -A \sin v \\ B \sin v \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} x_b \\ y_b \\ z_b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos h \sin v \\ \sin h \sin v \\ \cos v \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_a \\ y_a \\ z_a \end{pmatrix}$$

$$A = \cos r \cos h + \sin r \sin h$$

$$B = \sin r \cos h - \cos r \sin h$$

-----(1)

4 . 球面姿勢とワイヤー長さとの関係

ワイヤーけん引式球面モータでは、その姿勢が h, v, r によって一義的に定まり、また、球殻上に張られた4本のワイヤーは、ワイヤー取り付け点と軸受けのワイヤー吸い込み点を最短距離で結ぶことになるので、ワイヤー取り付け点(P点)とワイヤー吸い込み点(Q点)に張られたワイヤーの長さ L は、P点Q点の位置ベクトルをそれぞれ $P(X_p, Y_p, Z_p), Q(X_q, Y_q, Z_q)$ とするとき、

$$L = R * \cos^{-1} \left(\frac{X_p * X_q + Y_p * Y_q + Z_p * Z_q}{R^2} \right)$$

で与えられることになる。これは、ワイヤーの長さが、図4に示すように、取り付け点Pと球殻中心部(O点)、吸い込み点Qで構成する扇形の円弧の長さに等しくなり、その長さは球殻の半径を R とし、位置ベクトル OP, OQ が成す角度 θ とすると、 $L = R \theta$ で与えられ、角度 θ は、位置ベクトルの内積から求めることができ

るからである。

よって、球殻が基準姿勢から姿勢 (Position)、さらに姿勢 (Position)へ回転した場合に、基準姿勢のワイヤーの長さを L_0 、姿勢 のワイヤーの長さを L_1 、姿勢 のワイヤー長さを L_2 とするとき、ワイヤーを $D = L_0 - L_1$ だけ

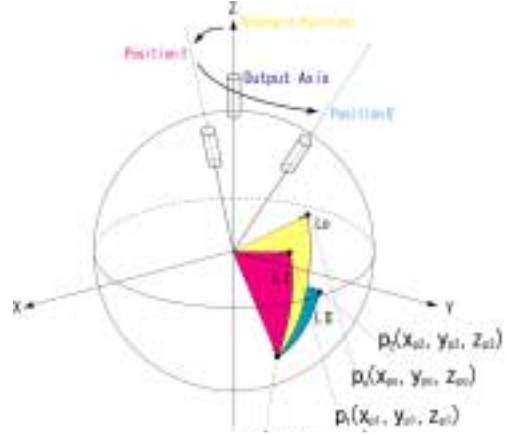


Fig.4 Coordinates fram and length of the

引っ張ると球殻の姿勢を から に移動させることができ、また、ワイヤーを $D = L_1 - L_2$ だけ引っ張ると球殻を の姿勢にすることができ、この球面モータがワイヤーの簡単な長さの制御によって任意の姿勢が得られることがわかる。

5 . ワイヤー張力と回転方向の可能性

本球面モータの動作範囲は、基本姿勢におけるワイヤー取り付け点および吸い込み点の位置によってその大きさおよび特性が異なるため、最適なワイヤー取り付け点と吸い込み点を求める必要がある。そこで、この球面アクチュエータの動作範囲を、基本姿勢から h, v, r 回転した後、その姿勢からさらに h, v, r 回転可能な範囲と定め、この動作範囲が最大となるようなワイヤー取り付け点および吸い込み点を求めることにした。

図5 - 1は、球殻が基本姿勢から h, v, r 回転した状態で4本のワイヤーの取り付け点が $P_i (i = a, b, c, d)$ 、吸い込み点が $Q_i (i = a, b, c, d)$ となり、取り付け点 P_i にワイヤー張力 $T_i (i = a, b, c, d)$ が作用するとき、このワイヤー張力 T_i によって球殻を回転させる回転トルクベクトル $P R_i (= R \times P_i, i = a, b, c, d)$ が示したもので、この回転トルクベクトル $P R_i$ によっ

て球殻は、その回転面に垂直で、かつ、座標原点 O を通る軸を回転軸として回転することになるので、それぞれのワイヤーの回転トルクベクトルを合成することで、球殻が h, v, r 回転した後、その姿勢からさらに h, v, r 回転可能であるかを判断することができる。

実際には、回転トルクベクトルの単位ベクトル

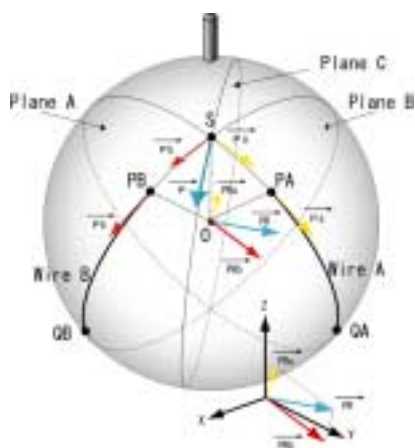


Fig.5-1 Distributed direction of the wire's tension and spherical cell rotate.

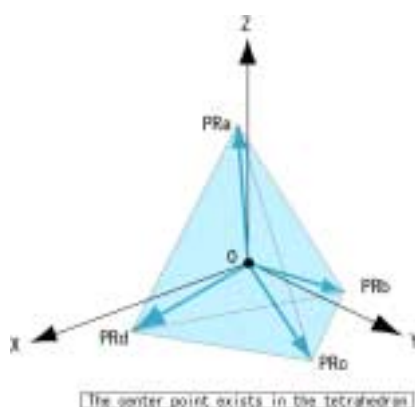


Fig.5-2 Four rotation vectors

を座標原点 O を始点とし、球殻の回転面に垂直なベクトル PR_i で表し、この回転方向ベクトルを評価することで球殻の回転可能性を判断することができる。

図5-2は、4本のワイヤーによるそれぞれの回転方向ベクトルを示したもので、4つの回転方向ベクトル PR_a, PR_b, PR_c, PR_d が作る四面体の内部に原点 O が存在するとき、球殻が3方向に自由に回転できることになるので、任意に定めたワイヤー取り付け点 P_i と吸い込み点 Q_i に対して、回転方向ベクトルが作

る四面体の内部に原点が存在する h, v, r の範囲を求め、その面積を次節で述べる評価方法によって算出することで、最適なワイヤー取り付け点および吸い込み点が定まることになる。

6. 取り付け点、吸い込み点配置の定義

数値解析によって動作範囲を求めるために、任意の取り付け点と吸い込み点配置を、図6に示

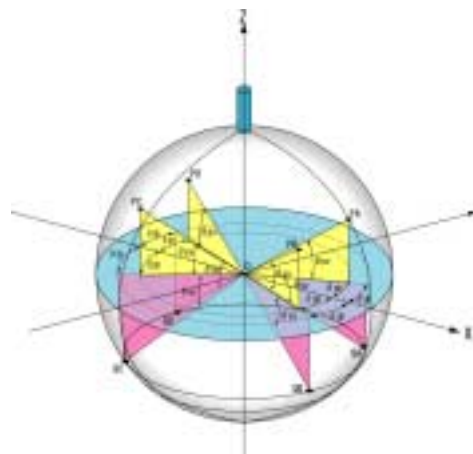


Fig.6 Setting angles

(p_v, p_h, q_v, q_h)

すよう、ワイヤーの取り付け点を p_v, p_h , 吸い込み点を q_v, q_h で定義し、 X 軸に対して、対照的にワイヤーを配置することにした。

7. 回転可能条件

球殻が基準姿勢から回転させるために必要な条件をまとめると以下ようになる。

- 1) 動作範囲条件：球殻は、基準姿勢から、回転方向角 h へ、回転角 v , 回転ひねり角 r 回転させた後、3軸周りのどの回転方向にも姿勢を変えることができる。
- 2) 吸い込み点条件：構造的、機構的回転可能条件として、4本のワイヤーを吸い込む4つの吸い込み点は、常に XYZ 軸上における負の Z 座標領域に存在しなければならない。
- 3) ワイヤー境界条件：ワイヤーが軸受けに巻き込まれない。
- 4) ワイヤー重なり条件：ワイヤー同士が重なりを起こさない。
- 5) 出力軸条件：出力軸は軸受け下に移動でき

ない。

これら条件を全て満たす姿勢を球殻が回転できる範囲と定め、基準姿勢からの回転姿勢を数値計算することにした。

8. 任意の配置における動作範囲

図7は、 h 、 v 、 r の値を微小変化させながら、球殻姿勢の微小回転を想定し、6節で示した回転可能条件を全て満たして姿勢を求めたもので、図は、 $pv=45^\circ$ 、 $ph=75^\circ$ 、

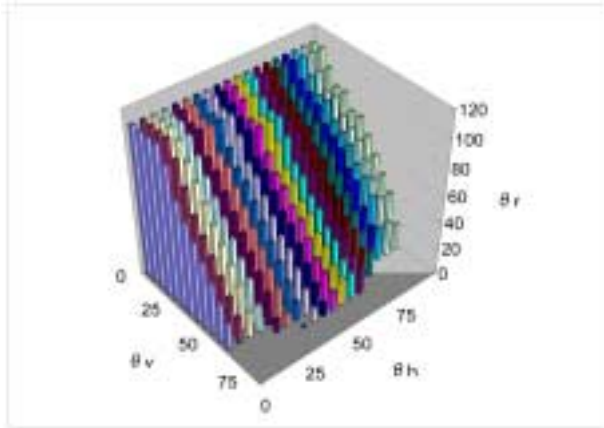


Fig.7 Range2 of rotation

($pv=45^\circ$ 、 $ph=75^\circ$ 、 $qv=45^\circ$ 、 $qh=15^\circ$)

$qv=45^\circ$ 、 $qh=15^\circ$ に配置された球殻において、 h 方向へ回転させ、 v が存在した場合に、 r 方向への回転可能角を棒グラフの高さとして示したものである。数値解析では、任意の取り付け点および吸い込み点に対して動作範囲を求めたが、 h を最大にする場合、 r を最大にする場合など動作範囲を評価する指標によって Fig.6 Setting angles(pv 、 ph 、 qv 、 qh) ことが for the wires

上記解析は、ワイヤーの取り付け点および吸い込み点の最適点を一つの評価基準で求めたものであり、他の評価によっても最適点を求める必要がある。

9. 考察

ワイヤーでけん引することで回転する球面モータは、制御が容易であるが、球殻上に存在するワイヤー位置によって、回転可能な方向、不可能な方向が存在する。これらは、回転後の姿勢においても存在し、ワイヤーで制御する上で動作範囲を求めることが重要であることがわかった。

10. まとめ

任意のワイヤー配置における球面モータの動作範囲を数値計算により明らかにし、配置と動作範囲の関係について評価した。また実際に試作した球面モータの動作を確認することができた。

参考文献

- 1) 遠山 茂樹, 波多江 茂樹, 芳賀 是: 超音波モータによるロボット用アクチュエーターの開発, 日本ロボット学会第9回学術講演予稿集, No 1 (1991)39.