球面連鎖を用いた手首関節機構に関する研究*

大 泉 哲 哉^{*1}, 大 島 健 一^{*2}

Wrist Joint Mechanism Using Triple Spherical Linkage

Tetsuya OIZUMI and Ken-ichi OSHIMA

Using the theory of degrees of freedom, we have developed a constant velocity joint mechanism which has triple spherical linkages and applied it to the wrist joint of manipulators. The wrist joint mechanism features are as follows: revolute type lower pairs only; singularity-free motion; pitch and yaw angles greater than 180 degrees; 360-degrees continuous roll motion; internal cable routing passage; high precision; high rigidity; remote driveability; back driveability. In this paper, the process of the mechanism development is described, the performance of the mechanism is discussed, and the practical design conditions are explained. Trial wrist models have been designed and built, and one was mounted on an industrial robot.

Key Words: Manipulator, Robot, Constant Velocity Coupling, Wrist Joint

1. 緒 言

溶接や塗装用のロボットの手首関節機構は、作業面に対して自在に作業角度を実現するために、立体角で 2π 以上の可動範囲を持つことが普通である。そのような機構を考えると、Fig.1 のような球面对偶だけの関節、あるいは回転対偶を組み合わせた機構が思い浮かぶ。これらは非常に単純な機構であり、簡単に関節機構として実現できそうである。ところが、例えば後者の機構の駆動方法を考えると、非常に小形軽量の高トルクモータを各回転対偶に取り付ける必要がある。しかし、実用に絶えるような小形軽量の高トルクモータは、著者の知る限り、まだ存在していない。たとえ存在しても、モータを関節に直接取り付けることによ

って腕先端の質量が大きくなり、腕の運動性能を劣化させることになる。そのゆえ、アクチュエータは腕の根元にまとめて配置することが多い。この場合、アクチュエータの作用を腕の先端までどのように伝えるかが問題である。ひとつの方法に、Fig.2 のような、ロッドの出し入れによる駆動方法がある。この方法は、先にあげた単純な関節機構を容易にかつ操作性よく駆動できる。しかし、可動範囲が立体角で 0.6π 程度と狭い。立体角 2π 以上の可動範囲を得るためには特別な工夫が必要になる。実際にこの工夫がなされた関節機構がいくつか存在する⁽¹⁾。しかし、加工法が難しかったり、剛性や耐久性が不足したり、いまだ問題を残しているように思われる。

本研究は等速自在継手の研究⁽²⁾で独自に得られた連鎖、すなわち球面連鎖を組み合わせた等速自在継手が上記の関節機構に応用できるのではとの考えから着手されてきた⁽³⁾⁽⁴⁾。残念なことにその後の調査の結

Fig.1 Simple mechanisms for wrist joint.
(a); ball and socket joint. (b); Hooke-type joint.

Fig.2 Driving method using push/pull rods.

* 原稿受付 1996年3月21日.

^{*1} 正員, 仙台電波工業高等専門学校 (〒989-31 仙台市青葉区上愛子字北原1).

^{*2} 正員, (株) 日立製作所 (〒329-44 栃木県下都賀郡大平町富田800).

Fig.3 Structure of the wrist joint.

果、この等速自在継手は、米国の I.H.Culver の発明として、1969 年に米国特許になっていた⁽⁶⁾。この等速自在継手を用いた関節機構の特徴は、まず第一に、すべての対偶が 1 自由度の回転対偶のみから構成されていることにある。また、この機構の構造は、Fig.3 のように固定部、中間部、先端部の 3 つの部分からなり、中間部を固定部に対して折れ角 $\theta_I = \pm 45^\circ$ の範囲で駆動すると、先端部は、固定部に対して折れ角 $\theta_M = \pm 90^\circ$ の範囲で動作させることができる。それゆえ、駆動範囲が狭いロッド方式でも中間部をロッドで駆動することによって立体角 2π 以上の可動範囲で先端部を動作させることができる。

本論文では、著者らが提案する関節機構の原理と構造を説明し、実際に試作した結果について報告する。

2. 機構の説明

この関節機構の鍵となっている等速自在継手について説明する。この継手は球面連鎖を多重に組み合わせている。そこでまず、本論文で取り扱う球面連鎖について確認し、次にこれを組み合わせた等速自在継手について検討し、この継手の成立条件、作動軸角とリンク長の関係について論ずる。

2.1 球面連鎖 球面連鎖の各リンクは、単位半径の球面上の大円弧とする。リンク長は球の中心角で表現する。同じ機能の機構の重複を避け、解析を簡単にするために、「隣合うリンクの弧長の和は π 以下とする」という条件を設定する。例えば、2 つのリンク長をそれぞれ α , β とすると、

$$0 < \alpha + \beta \leq \pi \quad \text{-----}(1)$$

いま、ひとつの球面 4 節機構を考える。各リンク長を α , β , γ , δ とする。同時にこれらの角度記号を各リンクの呼称とする。ここで、リンク β をカップラとし、リンク δ を固定節とする。等速自在継手へ発展させるためには、連続回転運動が伝達されなければならない、ダブルリンク機構が基本となる。

Fig.4 Hooke-type joint.

リンク α と γ がリンク δ に対して完全回転する条件は、式(1)の条件を考慮した上で、式(2)のようになる。これは Grashof の定理に相当する。

$$\delta \leq \delta_i = \min (\gamma - |\alpha - \beta|, \alpha + \beta - \gamma) \quad \text{-----}(2)$$

ここで、等号が成立する機構を著者らは貫通機構と称している。貫通機構は、すべてのリンクが一本の直線すなわち大円弧上に重なる状態になることができ、この状態を貫通点と呼んでいる⁽⁶⁾。貫通点では 4 節機構のふたつのコンフィギュレーションが接続し、機構の運動は、この点から、どちらのコンフィギュレーションへも移行できる。この意味で、この点は思案点になっている。そのため確実に動作すべき機構の動作範囲内に、このような点が含まれてはならない。

2.2 球面連鎖を多重にした等速自在継手 球面 4 節機構がひとつだけでは、交差軸間に等速回転運動を伝えることはできない。しかし、これを 2 つ継いで、中間軸に対して対称に入出力軸を配置すれば、等速継手可以实现できる。これは、例えば、Fig.4 のように同じふたつの球面 4 節機構をまったく対称に配置することによって、入力軸のリンク α' と出力軸のリンク α の運動が鏡面对称になるからである。ここで問題になるのはこの対称配置をいかにして実現するかである。そのための特許が多数申請されている⁽⁷⁾。

本研究の等速自在継手の発明は、低次対偶だけからなる球面 4 節機構を多重にするだけで対称配置が実現できる事実を発見したことによるものである。この事実を確認するために機構の自由度について述べる。

球面機構は空間機構のようであるが、実際は、球面上の 2 次元的機構である。それゆえ自由度 F の考察は平面機構の式、すなわち式(3)を用いることができる。

$$F = 3(n-1) - 2p_1 \quad \text{-----}(3)$$

ここで、 n は機素数、 p_1 は自由度 1 の対偶数である。

Fig. 5 DOF of single chain of spherical linkages. The number of links $n=6$, and the number of one degree of freedom pairs $p_1=6$. From Eq.3, the number of degrees of freedom is $F=3$.

Fig. 6 DOF of triple chains of spherical linkages. The number of links $n=12$, and the number of one degree of freedom pairs $p_1=16$. From Eq.3, the number of degrees of freedom is $F=1$.

さて、Fig.5は、球面4節機構をふたつ継いで、入力軸と中間軸を固定節で支えたものである。これは、機素数 $n=6$ 、対偶数 $p_1=6$ である。自由度 F を式(3)で計算すると $F=3$ となる。Fig.5からも出力軸の姿勢が一意に定まらないことが諾ける。Fig.6は、球面連鎖を3重にした機構である。機素数 $n=12$ 、対偶数 $p_1=16$ となり、式(3)より、 $F=1$ となる。すなわち、固定節で入力軸と中間軸の角度を与えると、出力軸の姿勢が固定されて、入力軸の回転のみが出力軸へ伝えられる。したがって、入力軸と出力軸が鏡面对称になるように各リンク長を定めて置けば、この3重連鎖は等速継手となる。そして、これは、固定節を換えて中間軸と入力軸の間の折れ角を変えても、鏡面对

称性と等速性が維持される等速自在継手であり、また、出力軸が、入力軸に対して、中間軸の折れ角の2倍の折れ角を保つ関節機構となる。

2.3 等速自在継手の成立条件 この3重連鎖を等速自在継手として利用するにあたり、回転運動伝達中に思案点や貫通点に達することは好ましくない。思案点で動きが逆転したり、貫通点で他のコンフィギュレーションへ遷移したりすると、はじめに設定した鏡面对称性が崩れるからである。それゆえ、動作範囲内にこれらの特別な点が含まれていないことをあらかじめ確認しておく必要がある。死点の問題は、この機構の場合、3重連鎖であることによって解消される。

一般にリンク機構は、思案点でたとえばFig.7のような関係になる。Fig.7はリンク γ を駆動節、リンク α を従動節としたときの思案点である。このとき、対偶 b で連鎖を切つて、リンク α 上の b 点が描く曲線 Γ とリンク β 上の b 点が描く円 C は接する。

本研究の3重連鎖機構の場合をFig.8に示す。Fig.8は球面上の3重連鎖機構を平面状に描いている。入力軸側の連鎖は図の左側、出力軸側は右側である。中間軸に対する入力軸の折れ角が固定されているとすると、入力軸側の対偶 a' と d' の紙面上の位置は固定される。リンク α_1 の回転によってリンク γ_1 には、対偶点 d' を中心とする回転運動を生じる。この運動が出力軸側のリンク γ_1 へそのまま伝わり、リンク α_1 が駆動される。しかし、Fig.8の状態では思案点にあるために必ずしも、入力軸と対称な動きをしてくれるとは限らない。そして、いったん非対称な動きが選択されると出力軸側の対偶 a の位置が移動し、鏡面对称の関係が崩れてしまう。

思案点の状態であるFig.8で、いま、対偶 b_1 を切り放して、対偶 c_1, c_2, c_3 を移動させずに α_1 と β_1 両リンク上の点 b_1 の描く軌跡を描くと、曲線 Γ とこれ

Fig. 7 Change-point of a planar 4-bar linkage. Link γ is the driver. Link α is the follower.

Input(driver)-side triple linkage

Output(follower)-side triple linkage

Fig. 8 Change-point in the triple spherical linkages.

Fig.9 Intersection of great circles at change-point.

に接する円Cとなる。点 b_1 で切り放されたリンク α_1 の瞬間中心は、点 b_2, b_3 の動きから、点 o となり、もちろん直線 ob_1 は曲線 Γ に直交する。そして、リンク $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ の各々は直線 ob_1, ob_2, ob_3 の各々に重なる。ゆえに、思案点では、3つのリンク $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ の各々の延長線は一点に会する。このことを球面上で考えると、直線は大円となり、3つの大円が一点に会するということは、Fig.9のように各々の大円に垂直な単位方向ベクトル n_1, n_2, n_3 のすべてがひとつの平面に乗ることを意味する。すなわち、式(4)の3重積で、 $V=0$ となる点が思案点である。

$$V = n_1 \cdot (n_2 \times n_3) \quad \text{----- (4)}$$

なお、貫通点は、あらかじめ設定したリンク長 α, β, γ を式(2)に代入して得られる δ_i に、実際の δ が一致するような軸角となったときに生じる。この貫通点の存在位置は式(4)を用いて直接確認することはできない。しかし、入力軸の回転角を径数とする V 曲線において、遷移するであろう他のコンフィギュレーションの V 曲線と貫通点で交差することから貫通点の位置を特定することができる。

2.4 作動軸角とリンク長 機構の動作範囲内で式(4)が $V=0$ とならないように機構を総合することはかなり複雑である。機構のパラメータ数が13であるうえ、コンフィギュレーションが8通りあるからである。そこで、簡単化のためと現実的な観点から、リンク長に式(5)の制限を設ける。

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= \alpha_2 = \alpha_3 = \alpha \\ \beta_1 &= \beta_2 = \beta_3 = \beta \\ \gamma_1 &= \gamma_2 = \gamma_3 = \gamma \end{aligned} \quad \text{----- (5)}$$

3重連鎖の位相：120°

Table1 Link length γ [°] for $\delta \geq 60^\circ$

$\beta \backslash \alpha$	60°	70°	80°	90°	100°	110°	120°
60°	60°	70°	80°	90°	100°	110°	120°
70°	70°	60° ~80°	70° ~90°	80° ~100°	90° ~110°	100° ~110°	
80°	80°	70° ~90°	60° ~100°	70° ~100°	80° ~100°		
90°	90°	80° ~90°	70° ~90°	60° ~90°			
100°			80°

Fig.10 V curves as functions of the revolute angle θ of the input shaft

(a); An example where the linkages have a change-point.
(b),(c); Examples where the linkages have no change-point.

また、リンク相互の衝突や干渉を避けるために、3つの連鎖のコンフィギュレーションはすべて同じとする。これらに、さらにリンク長を 10° の倍数とする制限を加えて、作動軸角が最大になる機構について以下のように検討した。

作動軸角を 120° 以上、すなわち $\delta \geq 60^\circ$ となる α , β , γ の組合せを求めると、式(1),(2)より、Table1 のようになる。これらの組合せのすべてについて思案点の有無を確認するために、入力軸回転角 θ を 0° から 120° までの範囲で式(4)の値を計算した。その結果の一部を Fig.10 に示す。Fig.10 には、 δ が $10^\circ \sim 60^\circ$ まで、 10° おきの作動軸角の場合の V 曲線をプロットしている。これらの軸角の各々の V 曲線の存在域が、Fig.10(a)のように異符号の領域に別れて存在すれば、 δ が $30^\circ \sim 40^\circ$ の範囲のどこかで V の値が 0 となる。すなわち思案点が存在して、対称性が崩れてしまう可能性がある。 V 曲線が一方の領域だけに存在するリンク長の組合せは、Fig.10(b)と(c)の2つの場合だけであった。その組合せは、次のごとくである。

$$\alpha = 90^\circ, \beta = 90^\circ, \gamma = 60^\circ \text{ ----- (6)}$$

$$\alpha = 80^\circ, \beta = 80^\circ, \gamma = 60^\circ \text{ ----- (7)}$$

これらの組合せは、式(2)よりいずれも $\delta_i = 60^\circ$ となる。言いかえると、これらは作動軸角を 120° にすると貫通点を生じ、対称性を失う可能性がある。

以上の検討の結果、式(5)の制限のもとで、対称性を安定的に保つ機構の作動軸角は 120° 以上とはならず、最大作動軸角が得られるリンク長の組合せは式(6)と式(7)の場合のみであることがわかった。ここで、作動軸角 120° というのは、関節の可動範囲が立体角 3π であることに相当する。

3. 試作関節機構

節 2.4 の考察結果をもとに機構学的構造を決定することはできる。しかし、実際の機構としての構造には様々なものが考えられる。例えば、中間部を3重パイプにする構造や、3個の二股ジョイントを用いる構造、3枚の板状リンクを用いる構造などが考えられる。ここでは、工作や組立のしやすさから板状リンクの構造を採用した。また、ロッドの取り付け方法は、機構の中間部に直接取り付けるのではなく、この機構の外側にシェル状のフックス継手を設け、これの中間軸部にロッドを取り付けた。それゆえこの機構はシェルのなかで回転でき、等速自在継手としても機能する。すなわち、手首の振りばかりでなく捻りも腕の根元から

駆動可能な構造になっている。

機構の設計では、機素同士が互いに干渉し合わないよう機素の形状を決める機構学的検討と、伝えるべき力から機素のサイズを決める力学的検討を行う必要がある。しかし、ここでは、機構学的検討の結果をもとにできるだけ丈夫になるように配慮してリンク形状を決定するにとどめた。機構学的検討は、動作中の各リンク間の相対位置を調べるプログラムを作成して計算機上で行った。

試作した機構の写真を Fig.11 に示す。各リンク長は $\alpha = 90^\circ$, $\beta = 90^\circ$, $\gamma = 55^\circ$ である。この場合、最大作動軸角は 110° になるが、肉付けしたリンクの干渉のため、最大作動軸角は 100° に抑えてある。この機構をシェル状のフックス継手の内部に納めた関節機構の試作例を Fig.12 に、その駆動装置を含めた全体像を Fig.13 に示す。これは、産業用垂直多関節型アームロボットの先端に取り付けられるように小型化したものである。この関節に納めてある等速自在継手のリンク長は Fig.11 と同じである。外側シェルの直径が 80mm、関節本体の質量が 1.0kg である。駆動部の2つのサーボモータによって立体角 2π の範囲で折れ角を与え、ロボットのロール軸の回転で、関節先端の捻りを実現している。この機構の付加によって、このアームロボットは 8 自由度になっている。

(a)

(b)

Fig.11 A model of the triple spherical linkages. Link lengths are $\alpha=90^\circ$, $\beta=90^\circ$, and $\gamma=55^\circ$, and the maximum angle of flexion is 110° theoretically, but actually 100°

Fig.12 The second model of the wrist joint mechanism.
The outer-diameter of the shell is 80mm.
The mass is 1.0kg.

4. 結 言

本研究は、等速自在継手の研究過程で得られた機構を関節機構として応用することを試みている。本論文では、機構の原理と構造を説明し、等速自在継手としての成立条件を思案点の観点から整理した。そして最大動作軸角を得る節長の組合せを確認した。また、この機構をシェル状のフックス継手の中に納めた関節機構を試作したこと、産業用垂直多関節型ロボットに搭載できる質量 1kg の小形関節機構も試作していることを紹介した。この関節機構は、対偶のすべてが 1 自由度の回転対偶から構成されているため、ガタを小さくできる。また、現在のところ、シェル状のフックス継手の中に等速自在継手をすっかり納めているが、駆動方法を変えることによって、もっと高い剛性が期待できる構造も実現可能であり、関節機構として非常に有望であると考えている。

5. 謝 辞

本研究の出発点である等速自在継手に関する研究において酒井高男東北大学名誉教授のご指導と励ましがあつたことをここに記し、心からの謝意を表する。

また、この関節機構の製作を、仙台電波工業高等専門学校の佐藤克己元教官、ならびに岡義次技官、遠藤雄定技官に担当して頂き、また、多くの技官の方々にも協力頂いたことをここに記し謝意を表する。

Fig.13 The second model system actually mounted on an industrial robot.

さらに、関節機構の試作は、みやぎ産業科学振興財団の援助を得て始まり、その後、文部省科学研究補助金によって進められてきたことをここに記し謝意を表する。

参 考 文 献

- (1) 例えば, M.E.Rosheim, Robot Wrist Actuators, (1989), JOHN WILEY & SONS
- (2) 大島健一, 等速自在継手に関する研究, 東北大学修士論文(昭 59)
- (3) 大泉, みやぎ産業科学, 第 2 号(昭 63), 37
- (4) 大泉・大島, 第 1 回ロボットシンポジウム予稿集, (平 3), 25, 日本ロボット学会
- (5) I.H.Culver, CONSTANT VELOCITY UNIVERSAL JOINT, US patent 3,477,249, (1969)
- (6) 大泉哲哉, 貫通機構に関する研究, 東北大学修士論文(昭 53)
- (7) 例えば, 高橋幸一: 等速二重自在継手 特許公報 昭 43, 昭 38-6607