3 自由度球面機構による多自由度関節アクチュエータの開発

九州工業大学　○福丸　浩史，　髙木 俊樹，林　朗弘

1.　緒言

多くの産業用ロボットに用いられているシリアルリンク機構は，モータを介して複数のリンクを直列に繋ぐ機構であり，効果器(手先など)の作業領域を広く確保できる反面，強度，剛性，位置決め精度が問題となる．一方，パラレルリンク機構[1] [2]は，効果器を複数のリンクで支持する，すなわちリンクを並列に繋ぐ機構であり，作業領域が狭くなる問題はあるが，複数のモータ出力を効果器に集中させるため，高出力，高精度，省スペース化が期待できる．これにより，例えば，人間の肩関節など多自由度，高出力が必要な関節アクチュエータに利用することが考えられる．

本研究では，肩関節のように多自由度が必要な関節アクチュエータにパラレルリンク機構の一つである 3 自由度球面機構を適用することを目的とし，球面三角法による逆運動学計算を提案し，運動解析を行う

2.　3 自由度球面機構

2.1　球面運動機構

パラレルリンク機構の一つである球面運動機構[3][4]を Fig.1 に示す.この機構では，すべての関節の回転軸が 1 点(不動点)を通り，かつ，すべての関節と中心点は，不動点を中心とする同一球面上を運動する．本機構では，サーボモータなど角度制御可能な関節(能動関節)の角度が決まれば，角度制御できない関節(受動関節)の角度が一意に決まり，これにより，全体の位置，姿勢が決まる．

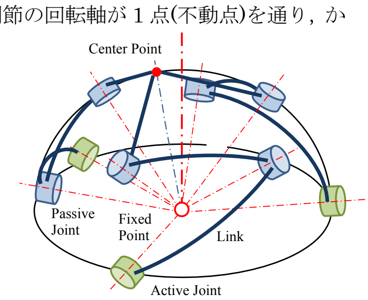

Fig.1 Spherical Mechanism

2.2　3 自由度球面機構

本研究で対象とする 3 自由度球面機構を Fig.2 に示す.ベース上に等間隔に 3 つの能動関節(関節 1i(i=1,2,3))が配置されている．能動関節からエンドプレートまでをリンク 1i(中心角 75°)，2i(中心角 60°)[4]とエンドプレートに固定されたリンク 3i で繋ぎ，各リンクは，関節 2i，3i(受動関節)で接続されている．また，エンドプレートの中心点は球面運動の球面の接点となっている． 3 つの能動関節の回転により，エンドプレートは折れ(各関節の回転軸周りの回転)，旋回(Z 軸回りの回転)，回転(不動点と中心点を結ぶ直線を回転軸とする回転)の運動をする．能動関節の角度が決まるとエンドプレートの位置・姿勢は一意に決まるため，これにより，能動関節の角度によりエンドプレートの位置・姿勢を制御することができる．

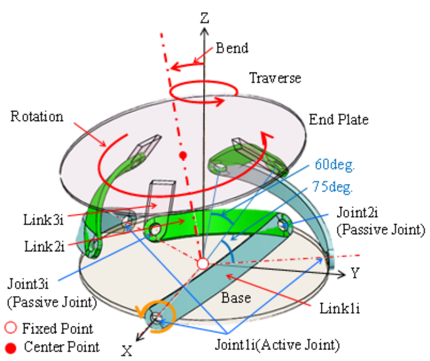

Fig.2 3DOF Spherical Mechanism

3.　逆運動学計算モデル

3.1　逆運動学計算の手順

目標とする位置・姿勢が与えられた時，その能動関節の角度を求める逆運動学計算について説明する．本機構のエンドプレートの位置・姿勢は，関節 3i の位置で定まる．そこで，折れ，旋回，回転の角度が与えられ，中心点がある位置となった時の関節 3i の位置を目標姿勢とし，この時の関節 1i(能動関節)の角度を球面三角法により求める．以下に，その手順を示す．

①関節 11 の回転軸を X 軸とし，3 自由度球面機構の関節が単位球面上を運動するとする．この時，エンドプレートとベースが平行で関節 31 が XZ 平面上となる位置を初期姿勢とする．

②エンドプレートが，初期姿勢から目標姿勢となった場合の関節 31 の位置を求める．

③②の時の関節 11 の角度を球面三角法により計算する．

3.2　目標姿勢の関節 3i の計算

Fig.3 を目標姿勢とし，関節 31 について考える．不動点を原点 O，関節 11 の回転軸を X 軸，その位置を点 C(1,0,0)，単位球と Y 軸の交点を点 D(0,1,0)とする．また，初期姿勢の時，関節 31 は XZ 平面上にあり，その位置を点 A_0（x_{A0},y_{A0},z_{A0}）とする．エンドプレートを初期姿勢から Y 軸回りに θ_B，Z 軸回りに θ_T 回転した時のエンドプレートの中心点を点 P，OP を回転軸として θ_R 回転した時の関節 31 の位置を点 A(x_A,y_A,z_A)とする．ここで θ_B(折れ角)の回転を表す行列を R_B，θ_T(旋回角)の回転を表す行列を R_T，$\overrightarrow{OP}$を回転軸とし θ_R(回転角)の回転を表す回転を R_R(ロドリゲスの回転公式による)すると，点 A_0 から点 A への変換は次式となる．なお，回転角は，面 AOP と XZ 面のなす角度とし，これが平行な場合を 0°とする．

$$\begin{pmatrix} x_A \\ y_A \\ z_A \end{pmatrix} = R_R R_T R_B \begin{pmatrix} x_{A0} \\ y_{A0} \\ z_{A0} \end{pmatrix}$$

$$R_R R_T R_B$$

$$= \begin{pmatrix} cos\theta_B cos\theta_T \cos\theta_R - sin\theta_T \sin\theta_R & -cos\theta_B cos\theta_T \sin\theta_R - sin\theta_T \cos\theta_R & sin\theta_B cos\theta_T \\ cos\theta_B sin\theta_T \cos\theta_R + cos\theta_T \sin\theta_R & -cos\theta_B sin\theta_T \sin\theta_R + cos\theta_T \cos\theta_R & sin\theta_B sin\theta_T \\ -sin\theta_B \cos\theta_R & -cos\theta_B sin\theta_T \sin\theta_R + cos\theta_T \cos\theta_R & cos\theta_B \end{pmatrix} \quad \cdots(1)$$

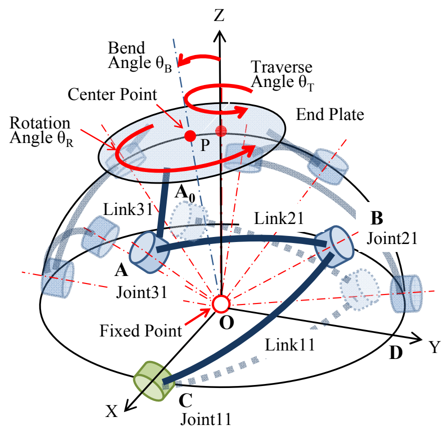

Fig.3 Transformation of Point A

以上により関節 31 の位置を求める．

また，関節 32，33 の位置は，関節の回転軸が X 軸にあるとして同様の計算を行い，その後，Z 軸回りに+120°，－120° 回転することにより求めることができる．

3.3 球面三角法による逆運動学計算

関節 31 が点 A にある時の関節 11(点 C)の角度 ϕ_1 を球面三角法により求める．その様子を Fig.4 に示す．球面三角法によって，単位球面上の大円で囲まれた三角形(球面三角形)について，3 つの角，3 つの辺のうち 3 つの要素が決まれば，残りの 3 つの要素を求めることができる．点 A,C,D は単位球面上の点のため，球面三角形 ACD の辺 CD，AD，AC は，∠COD=a，∠AOD=b，∠AOC=c となる．∠ACD=β とすると球面三角法の余弦定理より次式が成り立つ．

$$\cos\beta = \frac{\cos b - \cos a\ \cos c}{\sin a\ \sin c} \quad \cdots(2)$$

ここで，a=90° であり，b, c は，点 A の座標，$|\overrightarrow{OA}|=|\overrightarrow{OC}|=|\overrightarrow{OD}|=1$ および余弦定理より以下となる．

$$\cos b = \frac{\overrightarrow{OA}\cdot\overrightarrow{OD}}{|\overrightarrow{OA}||\overrightarrow{OD}|} = \overrightarrow{OA}\cdot\overrightarrow{OD} \quad \cdots(3)$$

$$\cos c = \frac{\overrightarrow{OA}\cdot\overrightarrow{OC}}{|\overrightarrow{OA}||\overrightarrow{OC}|} = \overrightarrow{OA}\cdot\overrightarrow{OC} \quad \cdots(4)$$

よって，β（=∠ACD）は，(2)式より次式となる．

$$\angle ACD = \cos^{-1}\left(\frac{\overrightarrow{OA}\cdot\overrightarrow{OD} - \cos(90°)\,\overrightarrow{OA}\cdot\overrightarrow{OC}}{\sin(90°)\sqrt{1-(\overrightarrow{OA}\cdot\overrightarrow{OC})^2}}\right) \quad \cdots(5)$$

また，球面三角形 ABC について，辺 AB，辺 BC はリンク 21，リンク 11 の中心角(60°，75°)，辺 AC は(4)式にて求まるので，∠ACB は，次式となる．

$$\angle ACB = \cos^{-1}\left(\frac{\cos(60°) - \cos(75°)\,\overrightarrow{OA}\cdot\overrightarrow{OC}}{\sin(75°)\sqrt{1-(\overrightarrow{OA}\cdot\overrightarrow{OC})^2}}\right) \quad \cdots(6)$$

以上より，関節 11 の角度 ϕ_1 は次式となる．

$$\varphi_1 = \angle ACD - \angle ACB \quad \cdots(7)$$

他の能動関節も同様にして計算後，Z 軸回りに+120°，－120° 回転させることで求めることができる．

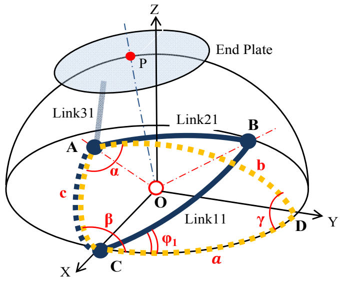

Fig.4 Inverse Kinematics by Spherical trigonometry

4. 回転角と折れ角の影響

4.1 CAD モデルとの比較

提案した逆運動学計算の手法(以下，本手法)を検証するため，関節 1i の角度を CAD モデル上の値と比較した．折れ角 θ_B=20°，回転角 θ_R=0°，旋回角 θ_T を 0° ～360° まで 10° ずつ変え，エンドプレートを旋回させた時の本手法と CAD モデル上の関節 1i の角度を Fig.5 に示す．その結果，これらの値は，ほぼ一致したため，これにより，本手法の妥当性を示すことができた．

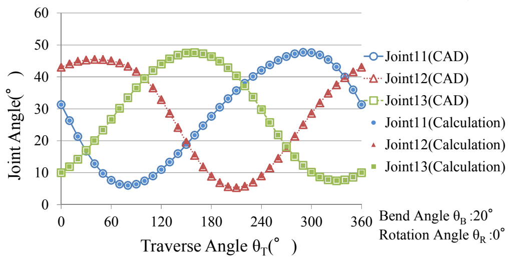

Fig.5 Calculation result and CAD model

4.2 回転角と折れ角の影響

まず，回転角による能動関節への影響を確認する．折れ角 θ_B=25°，回転角 θ_R を 0° ～25° まで 5° ずつ変え，エンドプレートを旋回させた時の関節 11 の角度を Fig.6 に示す．回転角が大きくなるに従い，位相が若干ずれながら関節 11 が動く範囲が全体的にマイナス方向にずれた．関節 12，13 においても同様の状況であった．以上より，回転角の大きさが能動関節の動く範囲に影響し，回転角が大きくなるとすべての能動関節の動く範囲がマイナス方向にずれることを確認した．

次に，折れ角による能動関節への影響を確認する．回転角 θ_R=0°，折れ角 θ_B を 0° ～30° まで 5° ずつ変え，エンドプレートを旋回させた時の関節 11 の角度を Fig.7 に示す．その結果，折れ角が大きくなると能動関節の動く範囲が大きくなった．また，旋回角が 10～20°，170～180° の間で，折れ角が初期姿勢時の関節の角度となった．関節 12，13 においても，ある旋回角の間で同様の状況となった．以上より，折れ角は，回転角よりも能動関節の動く範囲に影響し，ある旋回角付近で初期姿勢時の角度となることを確認した．

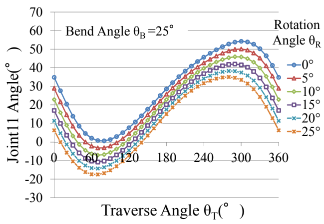

Fig.6 Joint11 Angle (Changing θ_R)

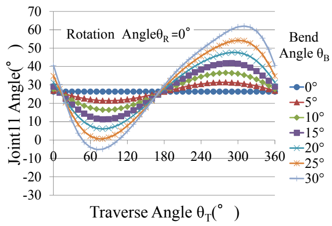

Fig.7 Joint11 Angle (Changing θ_B)

5. 試作

試作した 3 自由度球面機構のモデルを Fig.8 に示す．本手法による角度計算をエクセルで行い，その結果をシリアル通信によって(株)近藤科学製のサーボモータ KRS-4034HV に送るしくみとなっている．本試作機において，エンドプレートを旋回させ，問題なく動作することを確認した．

Fig.8 Prototype Model

6. 結言

3 自由度球面機構を多自由度関節アクチュエータに適用することを目的とし，球面三角法を用いた逆運動学計算を提案し，その妥当性を CAD モデルにより検証した．回転角と折れ角の能動関節への影響について回転角より折れ角の方が能動関節の動く範囲に大きく影響することを確認した．今後，3 自由度球面機構の特異姿勢，可動範囲の把握を行い，試作機に本手法による逆運動学計算プログラムの実装を行う．

参考文献

[1] 大岩孝彰，“パラレルメカニズムの工業応用”，日本機械学会論文集(C 編) 77 巻 778 号, pp. 252-261，2011.
[2] 津坂祐司，福泉武史，井上博允，“パラレルマニピュレータの設計と機構特性”，日本ロボット学会誌. 5, 3 180. pp. 12-20, 1987.
[3] 野瀬賢蔵, 磯部浩, 坂田清吾, 丸井直樹, 小長井直哉”パラレルリンク型拘束角度制御装置-改良による性能向上-”，精密工学会春大会学術論文集, pp. 483-484, 2016.
[4] 岡本大河，林朗弘，福丸浩史，“パラレルリンク型多自由度関節機構とその制御手法の開発”，第 19 回計測自動制御学会ＳＩ部門講演会ＳＩ2018，pp. 840-843，2018.