計測自動制御学会東北支部第 259 回研究集会(2010.7.9)
資料番号 259-1

広角球面関節の姿勢制御

Postural control of the wide angle spherical joint

○小林 拓生，齋藤 直樹

○Takumi Kobayashi, Naoki Saito

秋田県立大学

Akita Prefectural University

キーワード：球面関節(Spherical joint)，空気圧シリンダ(Pneumatic Cylinder)
2 自由度(2 degree of freedom)，姿勢制御(Postural control)，逆運動学(Inverse kinematics)

連絡先：〒015-0055 秋田県由利本荘市土谷字海老ノ口 84-4 秋田県立大学 システム科学技術学部
機械知能システム学科 小林拓生，Tel.:0184-27-2217，Fax.:0184-27-2188，E-mail:b09a026@akita-pu.ac.jp

1. はじめに

近年のロボットには，人間の作業を補助することが期待されている．こうしたロボットは作業の複雑性から，多関節，多自由度を有することが有利であると考えられる．このような観点から，球面関節は省スペースで多自由度を実現する可能性を持っており，この関節機構のロボットへの応用もいくつか見られる．八重樫らは球面関節を有するロボットアームを開発した[1]．小笠原らは人間の手首機構に球面軸受けを用いている[2]．また，細田らはロボットアームの肩機構に球面関節を用いている[3]．しかし，市販の球面関節では自由度は多いものの十分な可動域が得られていないという問題点がある．一方で細田らは球面上を滑る関節機構を提案し，多くの空気圧ゴム人工筋による可動域の広い動作が実現できている．しかしながらこの関節機構の逆運動学解析は見当たらず，一般的なロボット制御技術で利用することは難しいと考えられる．以上のことから本研究では，従来の球面関節をより広い可動域で，かつ従来のロボット制御技術で利用の実現を目指して，広角球面関節の提案およびこの関節の逆運動学モデルを提案し，その妥当性を姿勢制御を通して確認する．

2. 広角球面関節の構造

図 1 に広角球面関節の外形図を示す．この球面関節は球とリングから成り，リングから 4 本のワイヤが伸び，このワイヤを牽引することによりリングを駆動させる．

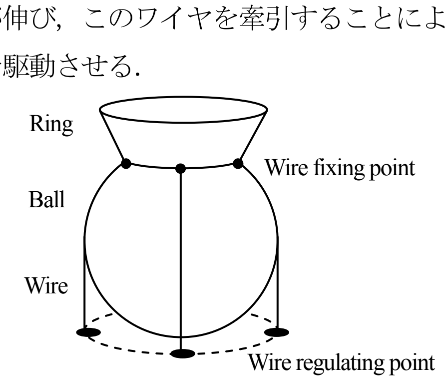

Fig.1 Wide angle spherical joint

図1に示すように，リング側のワイヤ固定点をリング側ワイヤ固定点，そのワイヤが球に沿って直線に伸びるある点をワイヤ調節位置と呼ぶ．図 2に広角球面関節の断面図を示す.

3. 逆運動学の導出

3.1 リング姿勢の導出

球面関節周りの座標を図3に示す．原点を球中心とし，Z軸正方向がリング方向とする．リングの目標姿勢は，X軸周りの回転角度ϕと，Y軸周りの回転角度θにより決まる．リング側とワイヤ調節位置側のワイヤ位置をそれぞれ，p_r，p_cとする．図2のようにリング側，ワイヤ調節位置側それぞれの配置円半径をr_{ri}，r_cとする．また，球面関節の球半径はr_cとする．座標原点中心からリング側ワイヤ固定点の中心位置までの距離をLとする．X軸からなす角を$\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$とすると，

$$p_r = r_{ri}\begin{bmatrix} cos\varphi_1 & cos\varphi_2 & cos\varphi_3 & cos\varphi_4 \\ sin\varphi_1 & sin\varphi_2 & sin\varphi_3 & sin\varphi_4 \\ \frac{L}{r_r} & \frac{L}{r_r} & \frac{L}{r_r} & \frac{L}{r_r} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$p_c = r_c\begin{bmatrix} cos\varphi_1 & cos\varphi_2 & cos\varphi_3 & cos\varphi_4 \\ sin\varphi_1 & sin\varphi_2 & sin\varphi_3 & sin\varphi_4 \\ -1 & -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

である．また，Lは，幾何学的解析から，

$$L = \sqrt{{r_c}^2 - {r_{ri}}^2} \quad (3)$$

である.

次に，リングの姿勢について定義する．球面関節の構造上，Z軸はXY平面上の任意の方向へ倒すことができる．このため，リングの姿勢はY軸周りの回転角θとX軸の回転角ϕによって決定する．この時の姿勢を決める座標変換行列$Rot(\theta,\phi)$は，

$$Rot(\theta,\phi) = R_{\mathrm{Y}}(\theta)R_{\mathrm{X}}(\phi) \quad (4)$$

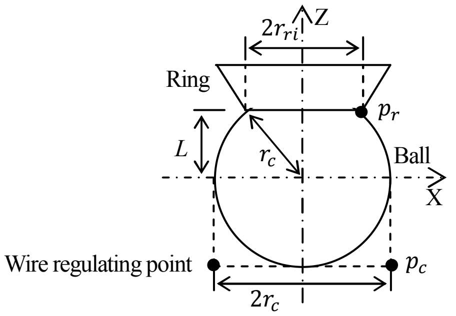

Fig.2 The overview of spherical joint

となる．ここで，$R_{\mathrm{Y}}(\theta)$，$R_{\mathrm{X}}(\emptyset)$はそれぞれY軸，X軸周りの座標変換行列である．従って，姿勢角度θ，ϕを与えた時のリング側ワイヤ固定点Δp_rは，

$$\Delta p_r = Rot(\theta,\phi)p_r \quad (5)$$

で求めることができる.

3.2 ワイヤ変化量の導出

球面関節姿勢が変化した後のワイヤ変化量ΔZ_{c}は，姿勢変化前と姿勢変化後のリング側ワイヤ固定点とワイヤ調節位置側ワイヤ固定点のワイヤ長さの差によって求めることが可能であり，

$$\Delta Z_c = \overline{p_r p_c} - \overline{\Delta p_r p_c} \quad (6)$$

となる．しかし，初期位置からある範囲にリング側ワイヤ固定点が存在する時には，ワイヤが球面に巻き付いている．このため，式(6)を用いるためにはワイヤ経路の幾何学関係を解かなければならない.

3.3 ワイヤ経路の幾何学関係

4箇所あるワイヤの1箇所について考える．XZ座標面での球面関節とワイヤ経路の1箇所の各座標について図4に示す. ワイヤ経路の導出方針は,

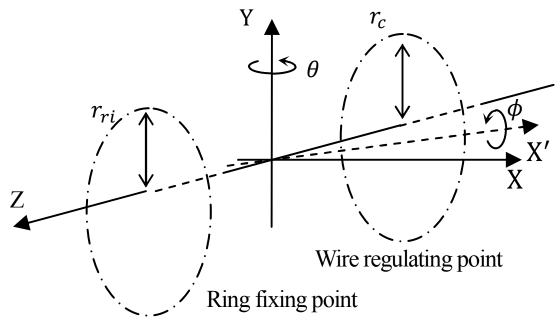

Fig.3 Coordinate of a spherical joint

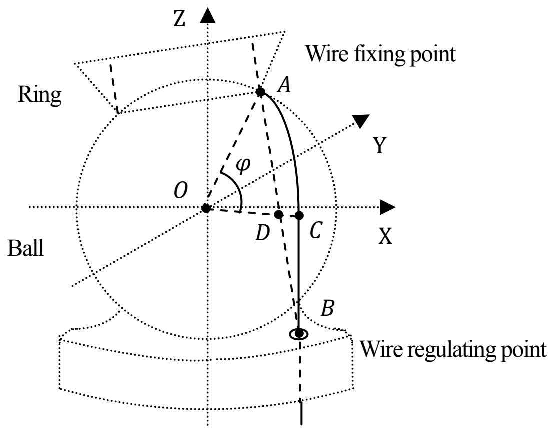

Fig.4 Coordinate of wire position

①直線ABとXY平面の交点である点Dの導出
②点Dの座標ベクトル変換による点Cの導出
③導出した点A，点Cによる$\widehat{AC}$の導出
④導出した点B，点Cによる$\overline{CB}$の導出
⑤導出した$\widehat{AC}$，$\overline{CB}$による$\overline{\Delta p_r p_c}$の導出
とする．

原点を点$O(0,0,0)$とし，リング側ワイヤ固定点を点$A(x,y,z)$，ワイヤ調節位置を点$B(a,b,c)$，$Z=0$で球に接している点を点$C(\alpha,\beta,0)$とする．点Aと点Bの座標は式(2),式(5)より既知である．はじめに点Dを考える．点Dは$Z=0$でXY平面上にあるので，XZ平面とYZ平面についての直線ABを考え，$Z=0$とすることで点Dの座標を求めることができる．点 Dを$(X,Y,0)$とすると，幾何学的な関係より点Dの座標は，

$$\overrightarrow{OD}=\left(x-\frac{(x-a)z}{z-c},y-\frac{(y-b)z}{z-c},0\right) \tag{7}$$

となる．

$\overrightarrow{OD}$,$\overrightarrow{OC}$は同直線上である．$\overline{OC}=r_c$より点$C(\alpha,\beta,0)$の座標は,

$$\overrightarrow{OC}=\frac{\overline{OC}}{\overline{OD}}\overrightarrow{OD} \tag{8}$$

である．

以上の結果から$\widehat{AC}$を求める．$\widehat{AC}$は$\angle AOC$のなす角φと球半径r_cを用いて

$$\widehat{AC}=r_c\varphi \tag{9}$$

で求められる．ここでφは余弦定理より，

$$\varphi=cos^{-1}\left(1-\frac{\overline{AC}^2}{2{r_c}^2}\right) \tag{10}$$

で求められる．$\overline{AC}$は点と点Cの座標を用いて

$$\overline{AC}=\sqrt{(x-\alpha)^2+(y-\beta)^2+z^2} \tag{11}$$

で求められる．以上より，$\widehat{AC}$は式(9),(10),(11)より求めることができる．

次に$\overline{CB}$を求める．点Bは式(2)，点Cは式(8)より既知である．これより$\overline{CB}$は,

$$\overline{CB}=\sqrt{(a-\alpha)^2+(b-\beta)^2+c^2} \tag{12}$$

により求めることができる．

これらの結果より，リング姿勢変化後のワイヤの長さ$\overline{\Delta p_r p_c}$は式(9),式(12)より，

$$\overline{\Delta p_r p_c}=\widehat{AC}+\overline{CB} \tag{13}$$

である．この幾何学関係式(13)を式(6)に代入することでワイヤの変化量を導出することができる．

4. 計算不可回避条件

3 章で述べた逆運動学において点Dから点Cを求める際に，ベクトル変換を用いた．図 5 に示すように，直線ABが原点の反対になる場合，正しい点Cの導出が不可能なため，リング内径を制限する条件式を立てる必要がある．最大可動域に移動したときに計算不可領域が発生しなければ全可動域において計算不可領域は発生しないため，最大可動域の時を考える．図 6 に最大可動域にリングが移動したときを示す. 点Dが原点より実際の点C側に来れば良いので，$\angle OBF=\tau$と$\angle ABK=\upsilon$を考える．$\Delta\ AOJ$は直角二等辺三角形なので,

$$\tau=\frac{\pi}{4} \tag{14}$$

また$\overline{AK}=r_c+r_{ri}$, $\overline{KB}=r_c+L$より$\overline{AB}$は,

$$\overline{AB}=\sqrt{(r_c+r_{ri})^2+(r_c+L)^2} \tag{15}$$

である．これよりυは,

$$\upsilon=cos^{-1}\left(\frac{r_c+L}{\sqrt{(r_c+r_{ri})^2+(r_c+L)^2}}\right) \tag{16}$$

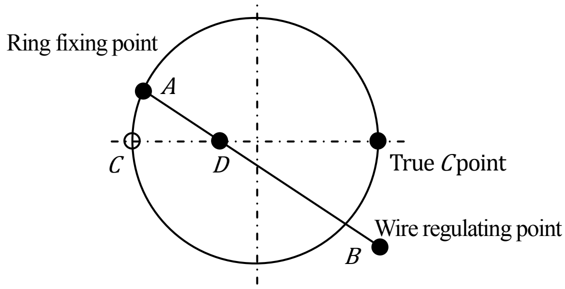

Fig.5 The singular point

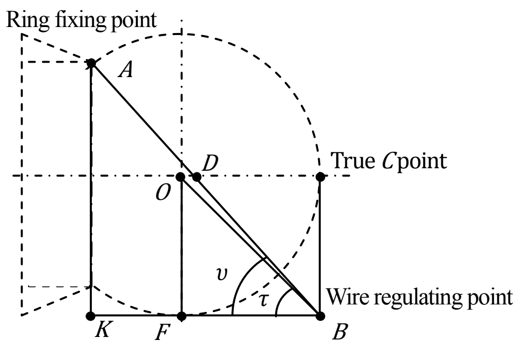

Fig.6 Points of spherical joint to consider singular point

となる．よって，計算不可回避条件は，

$$\upsilon > \frac{\pi}{4} \tag{17}$$

である．

5. 広角球面関節の駆動システム

本研究で作製した駆動装置を図 7 に示す．駆動源は空気圧シリンダを用い，この空気圧シリンダを拮抗配置にすることにより 2 自由度を実現している．球とリングは ABS 樹脂である．図 8 は制御システムの概略である．空気圧シリンダ内の圧力は電空レギュレータによって調整される．シリンダの変位量は，各シリンダのロッドに取り付けたリニアエンコーダによって計測される．PC はこれらの情報を基に制御量を決定し，出力している．

6. 姿勢制御実験

この時のリング側ワイヤ固定点とワイヤ調節位置は図 9 に示すように配置しているため，$\varphi_1 = {}^{\pi}/_{2}, \varphi_2 = \pi, \varphi_3 = {}^{3\pi}/_{2}, \varphi_4 = 2\pi$ となる．これらの値を式(1),(2)に代入することにより，ワイヤ固定点ベクトル p_r，p_c が決まる．姿勢制御実験は図 9 に示すようにリング先端にマーカーをつけ，図 10 に示すように，このマーカーをカメラで撮影することによりマーカーの軌道を算出する．マーカーの目標軌道は姿勢角度が 20 度になるような半径 18 mm の円とする．この時の Ch.1, Ch.2, Ch.3, Ch.4 の位置制御の様子をそれぞれ図 11，12, 13, 14 に示す．

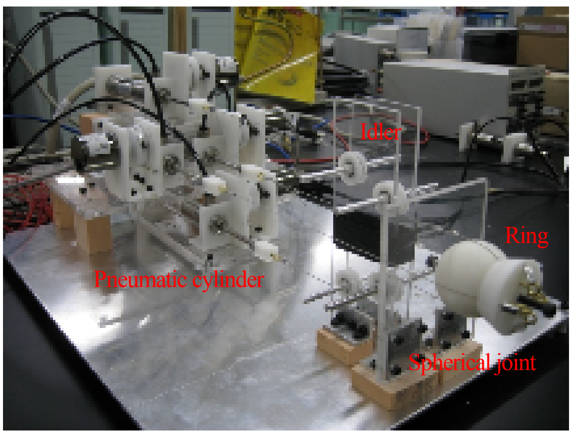

Fig.7 The device of wide angle spherical joint

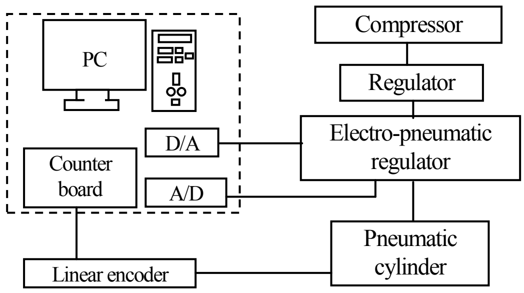

Fig.8 System of the wide angle spherical joint

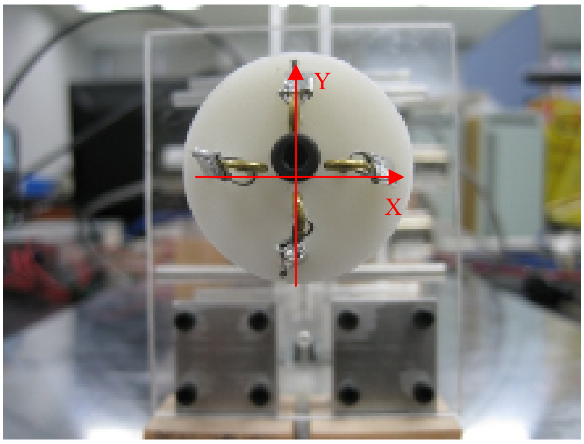

Fig.9 XY coordinate

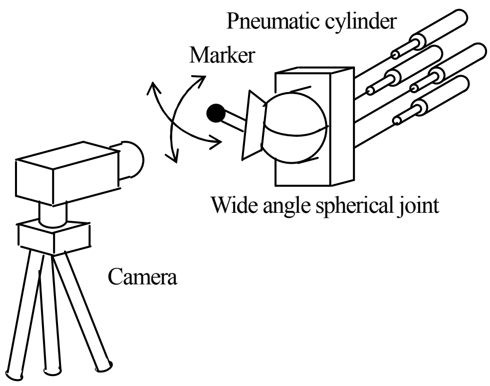

Fig.10 Landscape of shooting

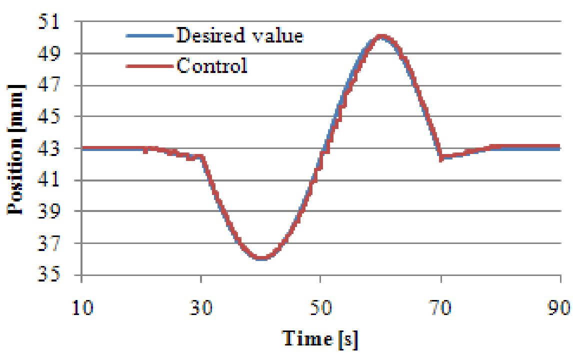

Fig.11 Result of position control (Ch1)

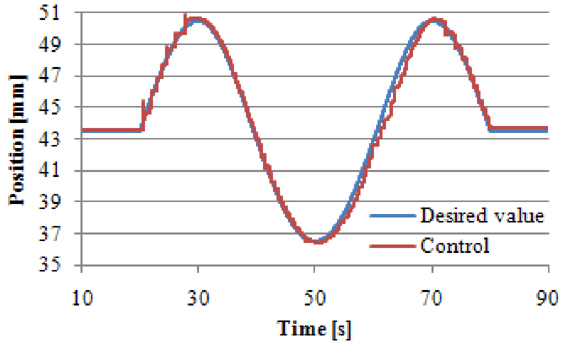

Fig.12 Result of position control (Ch2)

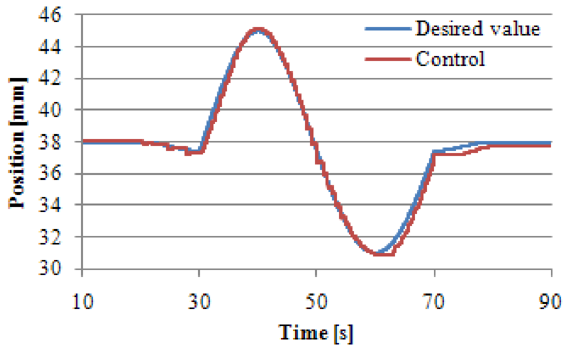

Fig.13 Result of position control (Ch3)

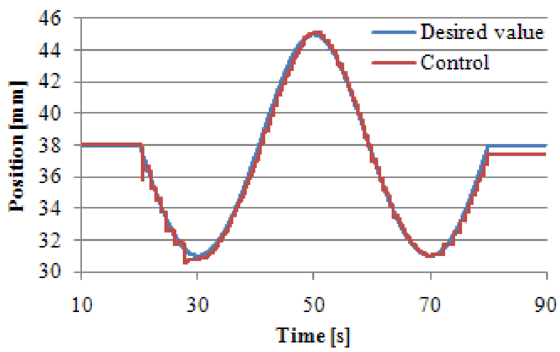

Fig.14 Result of position control (Ch4)

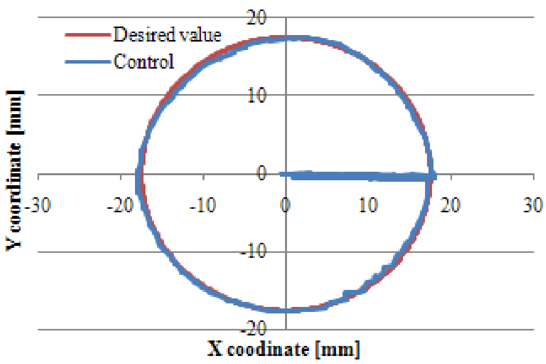

Fig.15 Result of coordinate control

図 11, 12, 13, 14 より各空気圧シリンダの位置制御は若干の stick-slip 現象がみられるが大きな遅れもなく目標値に追従している.

図 15 にマーカー軌道を示す. 図 15 よりリングの先端に取り付けたマーカーの軌道は目標軌道によく追従していることが分かる. このことから逆運動学は妥当性を得ていると考えられる.

7. まとめ

広角球面関節の提案とその逆運動学の導出方法を明らかにした. この逆運動学の導出は幾何学解析において計算不可領域が発生するため, 計算不可を回避する条件についても明らかにした. また, 広角球面関節を駆動させる装置を作製し, 実際に導出した逆運動学を用いて, 2 自由度における広角球面関節の姿勢制御を行った. 目標通りの動作を実現できたことから, 逆運動学の妥当性を確認した. これよりロボット関節としての有用性を示した.

今後はより可動域を広くした場合の動作の実現について, 関節構造と逆運動学の両面から考察を加えていく予定である.

参 考 文 献

1) 八重樫憲司, 嵯峨宣彦, 球面関節を有する空気圧人工筋ロボットアームの H_∞制御, 計測自動学会東北支部第 221 回研究集会, 221-4, 2005
2) 小笠原隆倫, 齋藤直樹, 嵯峨宣彦, 佐藤俊之, 空気圧人工筋を用いた手首ロボットの関節剛性変化についての検討, ロボティクス・メカトロニクス講演会'10 予稿集, Vol.CD-ROM, 1A1-E21, 2010
3) 近藤英明, 細田耕, 空気圧人工筋によって駆動される 6 自由度人間型ロボットアームの開発, ロボティクス・メカトロニクス講演会'07 予稿集, Vol.CD-ROM, 1A2-M10, 2007