

マニピレータの可動範囲を考慮した逆運動学による目標軌道の生成

2018sc095 若村高弘

指導教員：中島明

1 はじめに

ロボットに人間の動きを認識させ、動きを真似させる研究が進んでいる。実際にロボットと人間では、関節の可動域が異なるため実際の人間の細かな動きに合わせることは現段階では困難である。ただ、無理にロボットを制御し動きを指示することは非常に危険であり、事故などにもなりかねない。また、ロボットは自動的に不可能な動きをする際に自動的に指示を無視し、不自然な動きをする場合もある。ロボットアームに人間と同じ様な動きをさせる場合には、人間の動きを予測しアーム部分に対する制御を行う必要がある。実際に、人間の腕の動きを真似する場合には、人間の手先の位置からロボットの関節に対しての制御が必要になる。また、危険な動きやアーム関節が伸び切った状態などを避けるように制御する必要がある。本研究では、ロボットの手先が指定した範囲から飛び出したとき、範囲内の目標値に修正する手法を提案する。

2 逆運動学

図1にあるような平面での2関節マニピュレータについて、関節変数から手先位置を順運動学により求める。

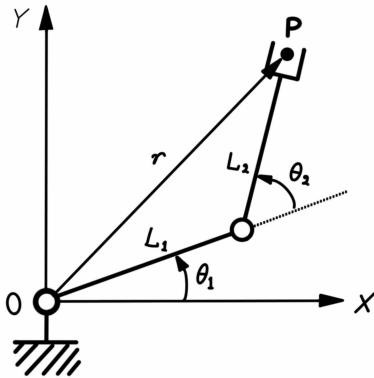


図1 2DOF マニピレータのリンク機構

手先の位置を r 、関節変数 θ とする。

$$r = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}, \quad \theta = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{bmatrix}$$

このとき、手先位置は関節を用いて以下のように表現される。

$$x = L_1 \cos \theta_1 + L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \quad (1)$$

$$y = L_1 \sin \theta_1 + L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \quad (2)$$

ここで、 L_1, L_2 はそれぞれリンク 1, 2 の長さである。

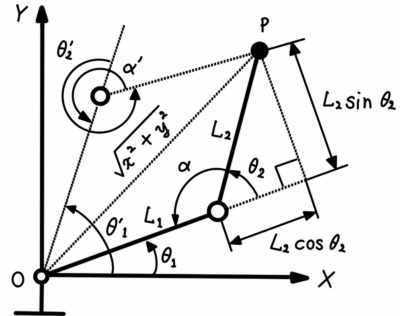


図2 マニピレータの逆運動学

ここでは手先位置 r が与えられた場合に、それに対応する関節角 θ を式 (2.1), (2.2) より求める。そのために図2にあるような補助変数 α を導入する。この α は、リンクが構成する三角形について、第2関節の内側について余弦定理を適用することで求めることができる。

$$\alpha = \pm \text{atan2}(\sqrt{1 - \cos^2 \alpha}, \cos \alpha) \quad (3)$$

$$\cos \alpha = \frac{-(x^2 + y^2) + L_1^2 + L_2^2}{2L_2L_1} \quad (4)$$

ただし $\text{atan2}(\dots)$ は引数に対応する逆正接を求める四象限逆正接関数である。この α を用いて、第1リンクを延長した直線に手先位置 P から垂線をおろして形成される三角形に着目すれば、関節角 θ を以下のように得ることができる。

$$\theta_2 = \pi - \alpha \quad (5)$$

$$\theta_1 = \text{atan2}(y, x) - \text{atan2}(L_2 \sin \theta_2, L_1 + L_2 \cos \theta_2) \quad (6)$$

3 動作範囲を考慮した逆運動学による軌道の生成

図3のようにロボット手先の目標値が動作範囲の外にある状況を考える。ここで、 $p_d = [x_d, y_d]^T$ は手先目標値、実線の円は可動範囲である。目標位置が可動範囲外にあるとき逆運動学は解を持たない。そこで、動作範囲の制限を考え、可動範囲の内側に制限された動作範囲（破線の円）を考える。修正の方法としては、目標位置から制限範囲の円に垂線を下ろし、その点を新たな目標値 $\tilde{p}_d = [\tilde{x}_d, \tilde{y}_d]^T$ とする。

\tilde{p}_d の導出を以下で説明する。目標値が制限範囲の外にあるとき、目標値から制限範囲の円に下ろした垂線の座標

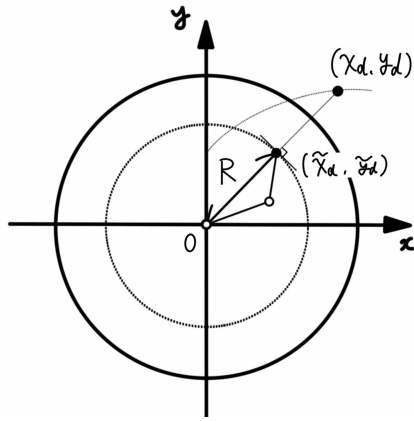


図3 目標値と制限された動作範囲に修正した目標値

は以下の2つの方程式を解けば得ることができる。

$$\begin{cases} y = \frac{y_d}{x_d} x \\ x^2 + y^2 = R^2 \end{cases} \quad (7)$$

ここで R は事前に設定する制限範囲の半径であり、 $R < L_1 + L_2$ である。これらを解くと $(\tilde{x}_d, \tilde{y}_d)$ は以下のように求められる。

$$\tilde{x}_d = \frac{R x_d}{\sqrt{x_d^2 + y_d^2}} \quad (8)$$

$$\tilde{y}_d = \frac{R y_d}{\sqrt{x_d^2 + y_d^2}} \quad (9)$$

ここで、(7)の解自体は2通りあるが、(8)、(9)式は、 (x, y) 平面において、必ず目標値 (x_d, y_d) と同じ象限にあることに注意されたい。

4 シミュレーション

提案手法をシミュレーションにより検証する。図4は (x, y) 平面を表しており、黒の実線が可動範囲、その内側の円が制限した可動範囲である。赤の破線が修正前の目標軌道 $(x_d(t), y_d(t))$ であり、このように、初期位置から x 方向に進んでいき、制限範囲を飛び出すように設定した。

このときの数値シミュレーション結果を図4~6に示す。なお、関節角度の軌道追従制御については、目標軌道の偏差に関するPID制御とし、ゲインはそれぞれ $K_P = 1000$, $K_I = 50$, $K_D = 50$ とした。図4において緑の破線が修正された目標軌道であり、オリジナルの目標軌道が制限範囲から外れてからは制限範囲の円に沿った軌道になっていることがわかる。このときの手先位置の追従結果を図5に示す。赤の破線が修正前の目標軌道、緑の破線が修正後の目標軌道、青の実線が実際の手先位置であり、修正された目標位置に追従していることがわかる。さらに、図6がこのときの関節角の追従結果であり、プロットの種別・配色は図5と同様である。修正された手先目標値により適切な逆運動学の解が関節角の目標値として得られており、関節角度がそれに追従していることがわかる。

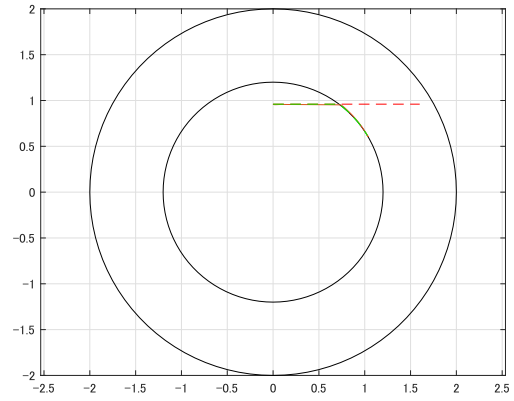


図4 ロボットの手先位置の軌跡

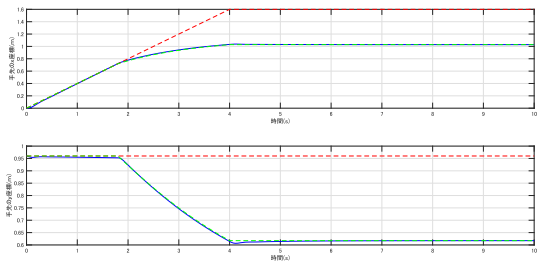


図5 ロボットの手先位置の軌道追従

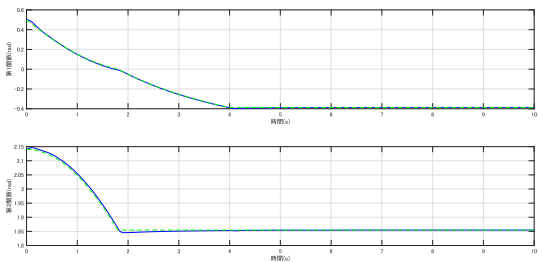


図6 ロボットの関節角の軌道追従

5 おわりに

本研究では、平面における2リンクマニピュレータの手先の起動追従制御において、手先目標値の逆運動学の解がない場合を扱い、制限した範囲に目標値を修正する手法を提案した。今後の課題として、滑らかな軌道の生成、3次元への拡張が考えられる。

参考文献

- [1] 永井 清・土橋 宏規：ロボティクスシリーズ 8 ロボット機構学，コロナ社，東京，2015。
- [2] 吉川 恒夫：ロボット制御基礎論，コロナ社，2016。