

不完全拘束状態での物体の搬送に関する研究

2020SC061 丹羽孝介 2020SC067 大島拓夢

指導教員：中島明

1 はじめに

自動車大国として海外で注目を集める日本産業において、ロボットアームへの需要は高まっている。これは、従来人間にのみ可能であった精密作業を人間に不可能な重量規格の作業において実現するには、ロボットアームは非常に理にかなっているためであると考えられる。精密作業という漠然としており抽象的であるため、本研究ではロボットアームを用いた、不完全拘束状態における物体の搬送に絞って研究を進めていく。本稿における完全拘束状態とは、あらゆる方向に対して力を受けても変化しない状態である。本実験における手先に設置したおぼんが完全拘束状態である。そこで本研究では、おぼんの上に搬送物を固定せずに設置することで、不完全拘束状態における搬送を行った。

本稿では、目標座標を各関節角の取りうる値域から設定し、逆運動学を用いて実験の始点および終点の座標を決定する。その後、決定した2点間を目標姿勢として細かく刻みながら逆運動学をループさせるプログラムを作成することで、不完全拘束状態の物体を安定して搬送する動作を実現した。

動作概要を図1に示す。

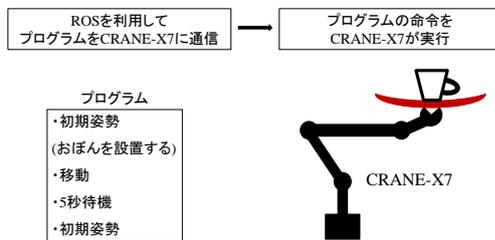


図1 動作概要

2 3DOF マニピュレータの逆運動学

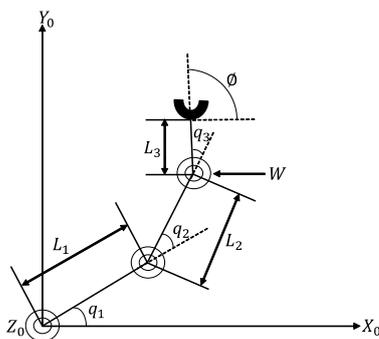


図2 XY平面における3DOF マニピュレータ

図2にある平面内で運動する3DOF マニピュレータについて、逆運動学の式を導出する ([1] p.23 逆運動学). X_0, Y_0, Z_0 軸はそれぞれ水平、鉛直および紙面垂直外向き方向である。関節について、回転軸は全て Z_0 軸に等しく、関節角は $\mathbf{q} := [q_1 \ q_2 \ q_3] \in \mathbb{R}^3$ である。初期状態は、 q_1 は第1リンクが X_0 軸と一致しているときであり、 q_2, q_3 は隣り合うリンクが一直線上にあるときとして定義する。幾何学的パラメータとして、各リンクの長さは $L_i (i = 1, 2, 3)$ である。

次に、各リンクおよび手先座標系に関して、同次変換行列は式(1)~(4)で表すことができる。

以下、 $C_i = \cos q_i (i = 1, 2, 3), S_i = \sin q_i (i = 1, 2, 3), C_{12} = \cos(q_1 + q_2), S_{12} = \sin(q_1 + q_2), C_{123} = \cos(q_1 + q_2 + q_3), S_{123} = \sin(q_1 + q_2 + q_3), C_\phi = \cos \phi, S_\phi = \sin \phi, C_\alpha = \cos \alpha$ とする。

$${}^0T_1 = \begin{bmatrix} C_1 & -S_1 & 0 \\ S_1 & C_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$${}^1T_2 = \begin{bmatrix} C_2 & -S_2 & L_1 \\ S_2 & C_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$${}^2T_3 = \begin{bmatrix} C_3 & -S_3 & L_2 \\ S_3 & C_3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$${}^3T_4 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & L_3 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

根本座標系から手先座標系までの同次変換行列 0T_4 は、

$${}^0T_4 = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4 \quad (5)$$

となる。

よって、

$${}^0T_4 = \begin{bmatrix} C_{123} & -S_{123} & L_1 C_1 + L_2 C_{12} + L_3 C_{123} \\ S_{123} & C_{123} & L_1 S_1 + L_2 S_{12} + L_3 S_{123} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

また、図2のように、手先座標系の姿勢角を ϕ とするとき、

$${}^0T_4 = \begin{bmatrix} {}^0R_4 & {}^0p_4 \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_\phi & -S_\phi & {}^0p_{4x} \\ S_\phi & C_\phi & {}^0p_{4y} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

本稿における逆運動学とは、手先座標系の位置 ${}^0p_4 = [{}^0p_{4x} \ {}^0p_{4y}]^T$ と姿勢 ϕ が与えられている場合において、関節角 $q_i (i = 1, 2, 3)$ を求めることである。

図2に示すように、手先より一つ前の関節を特徴点 W として注目し、式(5)の両辺に $({}^3T_4)^{-1}$ をかけると、

$${}^0T_4({}^3T_4)^{-1} = {}^0T_3 \quad (8)$$

となり、これは W に至る二つの経路に対する同次変換行列をあらわす。

$${}^0T_3 = \begin{bmatrix} C_{123} & -S_{123} & L_1C_1 + L_2C_{12} \\ S_{123} & C_{123} & L_1S_1 + L_2S_{12} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

であり、式(7)から、

$${}^0T_4({}^3T_4)^{-1} = \begin{bmatrix} C_\phi & -S_\phi & {}^0p_{4x} - L_3C_\phi \\ S_\phi & C_\phi & {}^0p_{4y} - L_3S_\phi \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

を得る。

式(9)、(10)を見比べると、

$$\begin{cases} {}^0p_{4x} - L_3C_\phi = L_1C_1 + L_2C_{12} \\ {}^0p_{4y} - L_3S_\phi = L_1S_1 + L_2S_{12} \end{cases} \quad (11)$$

を得る。また、式(11)は Z_0 から W へ向かう位置ベクトル ${}^0p_W = [{}^0p_{4x} - L_3C_\phi \quad {}^0p_{4y} - L_3S_\phi]^T$ とした場合の2DOF マニピュレータの運動学方程式である。

よって、

$$\begin{cases} q_1 = \text{atan2}(p_x - L_3S_\phi, p_x - L_3C_\phi) \\ \quad - \text{atan2}(L_2S_2, L_1 + L_2C_2) \\ q_2 = \pi - \alpha \\ q_3 = \phi - (q_1 + q_2) \end{cases} \quad (12)$$

ただし、

$$\alpha = \pm \text{atan2}(\sqrt{1 - C_\alpha^2}, C_\alpha) \quad (0 \leq \alpha \leq \pi)$$

$$C_\alpha = \frac{-\{({}^0p_{4x} - L_3C_\phi)^2 + ({}^0p_{4y} - L_3S_\phi)^2\} + L_1^2 + L_2^2}{2L_1L_2}$$

である。

ここで、 α に対する解は複数存在する。実験で使用する CRANE-X7 は q_2 の取りうる値域が $-161^\circ \leq q_2 \leq 2^\circ$ であるため、図3から、 $\alpha = \text{atan2}(\sqrt{1 - C_\alpha^2}, C_\alpha)$ 、 $q_2 = -(\pi - \alpha)$ とする。

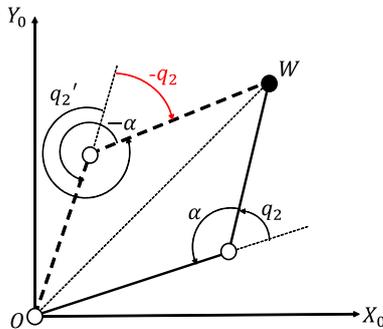


図3 逆運動学の複数解

3 実機との互換性

前節で導いた式を用いて、設定した目標座標からアームロボットの各関節角の値を出力し、その値が CRANE-X7 で実行可能かどうかを検査するプログラムを MATLAB において作成した。プログラム作成にあたって、前節の数式的前提と実機の条件をすり合わせる必要がある。前節では、図4のように第一関節の定義が異なっていた。そのため、 $\theta_1 = \pi/2 - q_1$ として結果を出力した。また、CRANE-X7 には第一関節を固定するための台座があり、台座の高さだけ始点の初期 Y 座標にズレが生じる事を考慮した。なお、CRANE-X7 が取りうる関節角の値域は以下の式(13)、実機に合わせたパラメータは表1である。

プログラム上のパラメータにおける目標角度 ϕ について、おぼんを運ぶ姿勢から、手先は常に鉛直上向きを向くよう 90° とした。ただし、図4の通り、CRANE-X7 における初期状態は、 θ_1 は第1リンクが Y_0 軸と一致しているときであり、 θ_2, θ_3 は隣り合うリンクが一直線上にあるときであるため、 ϕ の値が 0 である際に手先が鉛直上向きを向くことに注意する。

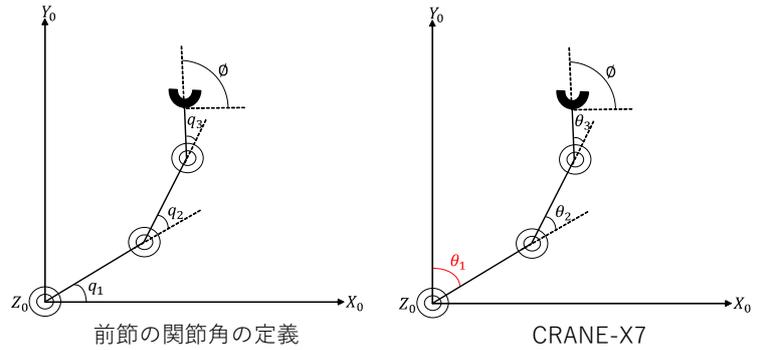


図4 実機と異なる点

$$\begin{cases} -90^\circ \leq \theta_1 \leq 90^\circ \\ -161^\circ \leq \theta_2 \leq 2^\circ \\ -90^\circ \leq \theta_3 \leq 90^\circ \end{cases} \quad (13)$$

表1 パラメータ

記号	説明	数値
L_1	リンクの長さ (m)	0.250
L_2	リンクの長さ (m)	0.250
L_3	リンクの長さ (m)	0.043
L_0	台座の高さ (m)	0.105
ϕ	目標角度 ($^\circ$)	90

4 プログラムの実行結果

プログラムによって決定した始点および終点をプロットした図が以下の図5である。各座標について、始点は $(X, Y) = (0.04, 0.4)$ 、終点は $(X, Y) = (0.4, 0.4)$ である。

ここで、Y 座標の値を一定に保つことで水平な搬送が可能である。次節では、これらの2点間を目標姿勢として細かく刻みながら逆運動学をループさせることで、物体を搬送するルートを指定し、安定した搬送を実現する。

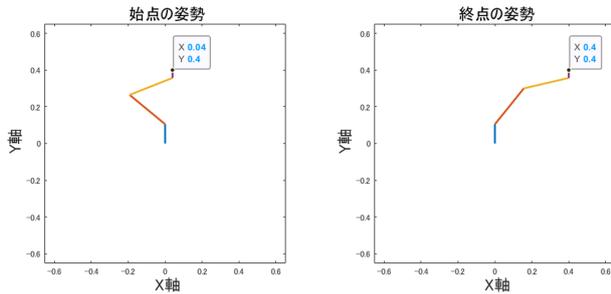


図5 決定した始点と終点

5 実機を動かすプログラムの作成

MATLAB プログラムで導出した値をもとに、ROS および MoveIt を使用して、指定した始点と終点を結ぶ直線上の経路を生成し、CRANE-X7 をその経路に沿って移動させるプログラムを作成した [2]。ROS はロボットシステムの開発や制御において広く使用されているフレームワークであり、MoveIt はその中でもロボットアームの動作計画や制御を担当するパッケージである。具体的な移動は、設定された経路点の数に基づいて段階的に行うため、指定した始点から終点まで、滑らかで確実な経路に沿って移動する。

本稿の実験では、経路点を 1000 個に設定しているため、始点から終点までの経路が 1000 分割され、各経路点で CRANE-X7 の位置が確定される。CRANE-X7 はこれらの経路点を順に経路しながら移動するため、安定した物体の搬送を実現する。

プログラムの模式図を図 6 に示す。

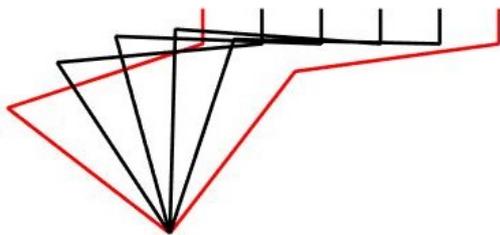


図6 プログラムの模式図

6 実験機器の説明

実験にあたり、手先に設置するおぼんとアームロボットを固定するためのアタッチメントを作成した。作成したアタッチメントの概要は以下の図 7 である。アームロボットのグリッパを覆い隠すような形で、グリッパと噛み合うようになっている。作成したアタッチメントをおぼんに取り付けることで、アームロボットとおぼんが固定される。

なお、CRANE-X7 の積載可能重量は約 500g ([3] p.8 可搬重量)、アタッチメントとおぼんの総重量は 208g であるため、本実験における CRANE-X7 の搬送可能重量は約 300g である。

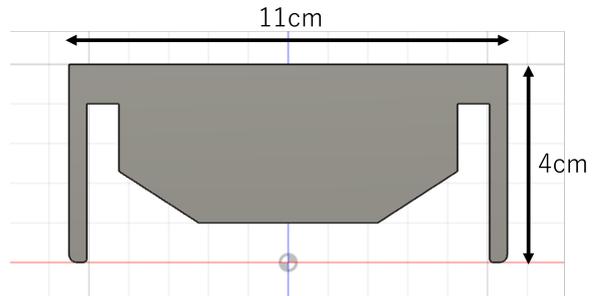


図7 アタッチメントの断面図

7 実験結果

本実験では搬送物として、ペットボトルに水の量を調整して注ぎ、全体で 50g としたものを使用した。

実際に、作成したプログラムを実行した。動作イメージを図 8 に示す。

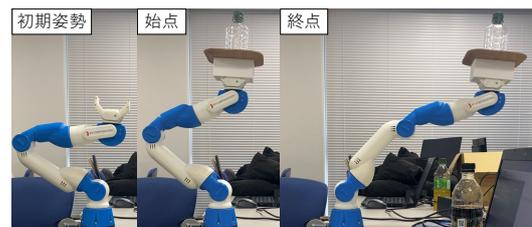


図8 動作イメージ

結果として、CRANE-X7 の動きにブレが生じ、搬送が不安定になり、搬送物は落下した。動作実行中の各関節角度の変化を図 9 に示す。ただし、各線において赤色が第 1 関節、水色が第 2 関節、青色が第 3 関節である。

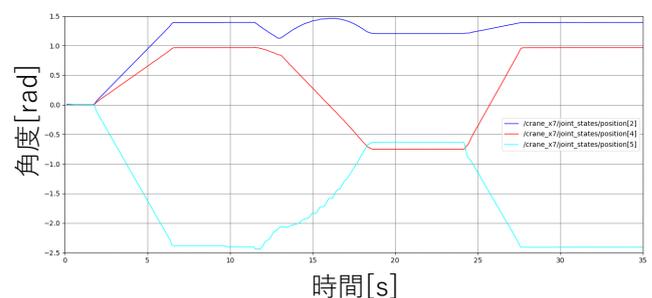


図9 P 制御のみの各関節角の応答

7 秒時点で初期姿勢となりここでおぼんを設置する。13 秒時点で設定した始点に移動する。その後、18 秒時点で終点に到達する。5 秒間停止した後、28 秒時点で初期姿勢に戻っている。なお、終点から初期姿勢に移動する動き出しの際に、おぼん上から搬送物が落下した。

図9の通り、第1関節、第3関節は振動が小さく安定して目標関節角に達しているのに対し、第2関節は12~18秒時点の初期姿勢から始点、終点までの移動の間で、特に振動が大きくなっている。これはCRANE-X7の構造上、第2関節が設定した姿勢において最も負荷が大きくなるためであると考えられる。

そこで、CRANE-X7の動きを改善し、安定した搬送を実現するために、搬送の動作時におけるPID制御のゲイン調整を行った。具体的には、前述の実験ではP制御のみが行われていたところ、I制御とD制御を追加し、各ゲインを調整した。調整前のPゲインは各関節が全て800、調整後の各ゲインは、Pゲインは第2関節が1040、他の関節が1000、Iゲインは全関節が150、Dゲインは第2関節が250、他の関節が200である。前述の実験結果を考慮し、第2関節のみ大きめにゲインを設定した。

また、前述のプログラムを加速度を考慮したプログラムに改善した。具体的には、1000分割する際に最初を細かく刻み、徐々に分割の間隔を大きくするように改善した。前節の経由点を決定する式は以下の式(14)である。式(14)を二次関数を用いて、最初を細かく刻み、徐々に分割の間隔を大きくするようにした。しかし、 1000^2 は値が大きすぎるため、MoveItにおいて計算することが不可能であった。よって、プログラムでは以下の式(15)を用いた。ただし、 a = 始点の座標、 b = 終点の座標、 i は0~1000までの値である。

$$a + (b - a) \left(\frac{i}{1000} \right) \quad (14)$$

$$a + (b - a) \left(\frac{i}{1000} \right)^{1.5} \quad (15)$$

調整後の各ゲインおよび式(15)を反映させたプログラムを実行した。結果として、CRANE-X7の動きのブレが抑えられ、物体の搬送に成功した。動作実行中の各関節角度の変化を図10に示す。

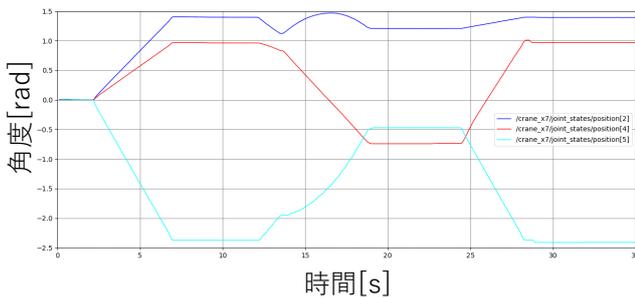


図10 調整後の各関節角の応答

7秒時点で初期姿勢となり、ここでおぼんを設置する。14秒時点で設定した始点に移動する。その後、19秒時点で終点に到達する。5秒間停止した後、29秒時点で初期姿勢に戻っている。

図10の通り、ゲイン調整前の図11と比較して、第2関節における13~19秒時点の初期姿勢から始点、終点までの移

動の間の振動が抑えられていることが分かる。また、始点における各関節の角度 [rad] は、第1関節は1.1183[rad]、第2関節は-1.9650[rad]、第3関節は0.8299[rad]であり、手先の角度 $\phi = -0.0168$ [rad] である。これはデグリー単位にして、約-0.96°である。終点における各関節の角度 [rad] は、第1関節は1.2057[rad]、第2関節は-0.4617[rad]、第3関節は-0.7440[rad]であり、手先の角度 $\phi = 0$ [rad] である。これはデグリー単位にして、0°であるため、鉛直上向きを向いている。このことから、搬送において手先を水平に保つことが出来ているといえる。

複数回におよび試行を重ねたが、結果に大きな差はなかった。このことから、この実験は再現性があるといえる。

しかし、懸念点として、終点到達後、約10秒ほど体勢を維持させると、第2関節の制御が行われなくなり、その後の動作が実行不可能になった。原因としては、第2関節に想定以上の負荷がかかり、緊急停止してしまうことが考えられる。それにより今回のプログラムでは、終点における停止時間を5秒間と固定しているが、実験機器をより大きな負荷に耐えられる機器に変更するなどによって、終点で搬送物を受け取る間、安全に搬送物を受け取ることができるまで操縦者の信号を待機することができるようにする方が望ましい。

8 おわりに

本稿では、初めにXY平面上の3DOFマニピュレータにおいて逆運動学の式を導出した。その後、目標座標を各関節角の取りうる値域から設定し、逆運動学を用いて実験の始点および終点の座標を決定。決定した2点間を目標姿勢として細かく刻みながら逆運動学をループさせるプログラムを作成した。さらに、PID制御のゲインの調整および、始点と終点を結ぶ経路の経由点の分割間隔を変更することで、不完全拘束状態の物体を安定して搬送する動作を実現した。

今後の課題点として、本研究で作成したプログラムは、外部からの情報を取り入れることができず、外的要因によって安定性を欠くことがある。カメラやマスター/スレーブ等を実装し、外的要因に対応する方法を与えることで、より安定した物体の搬送が可能であると考えられる。

参考文献

- [1] 永井清, 土橋宏規: 『ロボット機構学』. コロナ社, 東京, 2015.
- [2] 株式会社アールティ: 『GitHub/rt-net/crane_x7_ros』. https://github.com/rt-net/crane_x7_ros, (参照 2024-1-11).
- [3] 株式会社アールティ: 『CRANE-X7 入門ガイド』. <https://rt-net.jp/wp-content/uploads/2020/04/CRANE-X7-Getting-Started-Guide-2020-03-18.pdf>, (参照 2024-1-11).