

制 御 工 学 実 験 報 告 書

実験テーマ：(5) 多自由度マニピレーターの運動学

実験日 : 令和 年 月 日
月 日

共同実験者 : 3 番 蘆田 修平
 1 1 番 岡本 陵平
 1 9 番 近藤 慧始
 3 6 番 宮武 駿

提出日	:	令和	年	月	日
再提出日	:	令和	年	月	日
再々提出日	:	令和	年	月	日

提出日	:	令和	年	月	日
再提出日	:	令和	年	月	日
再々提出日	:	令和	年	月	日

提出日	:	令和	年	月	日
再提出日	:	令和	年	月	日
再々提出日	:	令和	年	月	日

提出日	:	令和	年	月	日
再提出日	:	令和	年	月	日
再々提出日	:	令和	年	月	日

5 S 2 8 番
氏名 : 野口 史遠

5 S 2 8 番
氏名 : 野口 史遠

コメント

(5) 多自由度マニピレーターの運動学

1 実験目的

産業用ロボットの多くは、複数のリンクと回転関節から構成されるシリアルリンク型である。本実験では、6 自由度垂直多関節型のマニピレータを用いて、ティーチングと呼ばれる産業用ロボットのプログラムを作成する方法を学ぶ。また、マニピレータの制御で用いられる運動学の基礎知識を習得する。さらに、カメラを用いた物体検知と 3 次元位置計測を通じて、ロボットビジョンの基礎技術を学ぶ。

2 多自由度マニピレータ

2.1 ティーチング

マニピレータ（産業用ロボット）の制御は、運動学や軌道決定を計算し、モータを制御するなどのマニピレータの動きを含めた制御に分けて考える必要がある。前者については、4 年後期の講義「ロボティクス II」にて基礎知識を学ぶ。後者のマニピレータへの動作入力方法には、ティーチングとよばれる表示方法が用いられている。

ティーチングは、ダイレクトティーチング、オンラインティーチング、オフラインティーチングに分類される。ダイレクトティーチングはマニピレータ本体に直接（ダイレクト）に触れながらマニピレータの動作を記録し、記録した動作をプレイバック（再現）する。オンラインティーチングはティーチングペンダントと呼ばれるインターフェイスを使用して、マニピレータを手動操作し、動作を記録、プレイバックさせる。オフラインティーチングは、コンピュータ上でシミュレータを操作し、動作を記録する。そして、実際のマニピレータにデータを送信し、プレイバックさせる方法である。

2.2 システム構成

本実験で用いる多自由度マニピレータは、xArm 6 (UFACTORY 製) である。6 個の回転関節を有するため、自由度は 3 次元空間の位置姿勢を任意に決めることができる 6 自由度である。各関節はサーボモータによって駆動され、関節角度はアブソリュート型エンコーダによって取得される。

本実験システムは、マニピレータ、空圧駆動型ロボットグリッパおよび制御 PC、ノート PC から構成される。図 2.1 にマニピレータのシステム構成を示す。制御 PC は Linux と呼ばれる OS が搭載されており、制御周期 10ms でマニピレータを制御している。制御 PC 内では、マニピレータの運動学、姿勢、軌道の計算、モータの制御などが行われており、マニピレータの動きを統合的にコントロールしている。ノート PC は専用の制御ソフトウェアを用いることで、マニピレータの手動操作、状態の確認やティーチング、各種設定を行うことができる。つまり、ティーチングペンダントと同等の操作ができる。また、Python を用いることで、ロボットビジョンや AI を活用したマニピレータへの動作指示の送信や、マニピレータの状態を受信することも可能である。

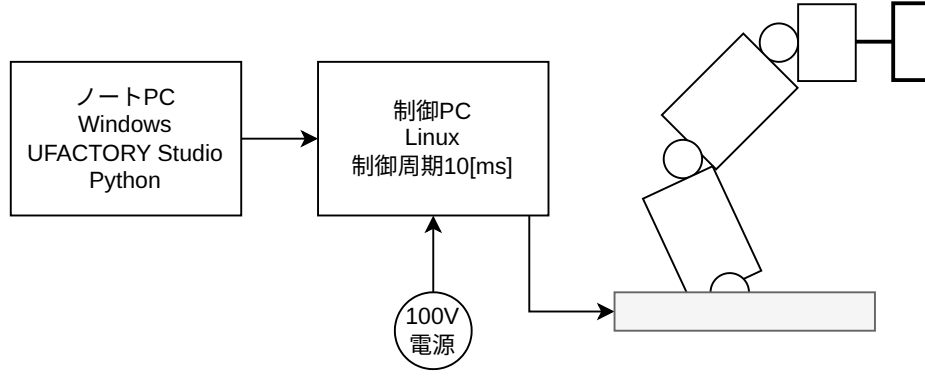


図 2.1 システム構成

2.3 マニピュレータの運動学

各関節角度を入力として、手先の位置姿勢を求める問題を順運動学という。一方で、手先の位置姿勢を入力として各関節角度を求める問題を逆運動学という。本実験では、マニピュレータの第 4～第 6 関節を固定し、3 自由度マニピュレータとして運動学を考える。これは、マニピュレータを簡単な構造として、運動学を幾何学計算するためである。

2.3.1 順運動学

グローバル座標系 Σ_0 の原点から z_0 軸方向に l_1 平行移動した座標系 Σ からみた手先位置を計算する。幾何学的に考える場合、まず $x'z'$ 平面で考える。三角関数を用いると、手先位置 $[x' \ z']^T$ は、

$$x' = l_2 \cos(\varphi_1 - \theta_2) - l_3 \cos\{(\varphi_1 - \theta_2) + (\varphi_2 - \theta_3)\} \quad (2.1)$$

$$z = l_2 \sin(\varphi_1 - \theta_2) - l_3 \sin\{(\varphi_1 - \theta_2) + (\varphi_2 - \theta_3)\} \quad (2.1)$$

となる。次に、座標系 Σ の原点から手先位置を xy 平面に射影すると、式 (2.1) より大きさ $|x'|$ を用いて、

$$x = |x'| \cos \theta_1 \quad (2.2)$$

$$y = |x'| \sin \theta_1 \quad (2.2)$$

と計算することができる。また、グローバル座標系 Σ_0 からみた手先位置は、式 (2.1)、式 (2.2) を用いて、

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z + l_1 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

となる。

2.3.2 逆運動学

逆運動学について説明する。グローバル座標系からみた手先位置 $\begin{bmatrix} x_0 & y_0 & z_0 \end{bmatrix}^T$ が既知の場合、

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 - l_1 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

と座標系 Σ からみた手先位置を求めることができる．つまり，手先位置 $[x \ y \ z]^T$ が既知となった．次に，座標系 Σ の xy 平面を考えると，関節角度 θ_1 は，

$$\theta_1 = \tan^{-1} \frac{y}{x} \quad (2.5)$$

と x, y を用いて計算できる．なお， $x^2 + y^2 = 0$ のときは， θ_1 は一意に決まらず，任意の値になる．ここで，アークタンジェントは，プログラミング言語において atan と atan2 の 2 種類存在する．今回は，戻り値の範囲が広い atan2 を使用する．

$$\theta_1 = \text{atan2}(y, x) \quad (2.6)$$

以下，アークタンジェントは atan2 で表記する．

次に関節角度 θ_3 を余弦定理から求める．先に計算に必要な x' について求める． xy 平面の原点から手先位置を射影した点までの長さは

$$|x'| = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (2.7)$$

と x, y を用いて計算できる．絶対値を外すと，

$$x' = \pm \sqrt{x^2 + y^2} \quad (2.8)$$

である．この値を用いて余弦定理を適用する．余弦定理は，三角形 ABC に対し，辺 AB, AC のなす角を θ とすると，

$$BC^2 = AB^2 + AC^2 - 2AB \cdot AC \cos \theta \quad (2.9)$$

という関係式が成立する定理である． $x'z'$ 平面の三角形に注目すると，余弦定理を適用して

$$\cos(\varphi_2 - \theta_3) = \frac{l_2^2 + l_3^2 - x'^2 - z^2}{2l_2l_3} \quad (2.10)$$

が成立する．

また， $\sin^2 \theta + \cos^2 \theta = 1$ の関係から，

$$\sin(\varphi_2 - \theta_3) = \pm \sqrt{1 - \cos^2(\varphi_2 - \theta_3)} \quad (2.11)$$

となるため，式 (2.6) と同様に atan2 を用いると，

$$\theta_3 = \varphi_2 - \text{atan2}\{\sin(\varphi_2 - \theta_3), \cos(\varphi_2 - \theta_3)\} \quad (2.12)$$

となる．

最後に，関節角度 θ_2 を求める．上記で求めた関節角度 θ_3 の値が既知になったと考えと，順運動学で求めた式 (2.1) を $\cos(\varphi_1 - \theta_2), \sin(\varphi_1 - \theta_2)$ の連立方程式として考えることができる．連立方程式を解くと，

$$\cos(\varphi_1 - \theta_2) = \frac{K_c x' + K_s z}{K_c^2 + K_s^2}, \quad \sin(\varphi_1 - \theta_2) = \frac{K_s x' + K_c z}{K_c^2 + K_s^2} \quad (2.13)$$

と解を導出できる．atan2 を用いると，

$$\theta_2 = \varphi_1 - \text{atan2}\{\sin(\varphi_1 - \theta_2), \cos(\varphi_1 - \theta_2)\} \quad (2.14)$$

となる．なお，本実験では逆運動学の式の中に正負が混在している場合はすべて正の場合で考えるものとする．

2.4 マニピュレータの姿勢表現

マニピュレータの手先姿勢は 2 つの座標系 Σ_0 と Σ_e を用いて表現することができる．グローバル座標系 Σ_0 はマニピュレータのベースに固定された静止座標系であり，手先座標系 Σ_e はロボットアームの手先に固定された座標系である．

手先の姿勢を表現する際は，座標系 Σ_0 からみた座標系 Σ_e の各軸 (e_x, e_y, e_z) の単位ベクトル ${}^0\mathbf{e}_x, {}^0\mathbf{e}_y, {}^0\mathbf{e}_z$ を用いる．単位ベクトルとは，大きさ（長さ）が 1 のベクトルである．つまり， ${}^0\mathbf{e}_x, {}^0\mathbf{e}_y, {}^0\mathbf{e}_z$ はそれぞれ座標系 Σ_e の軸 (e_x, e_y, e_z) 方向を向く大きさ 1 のベクトルを意味している．この 3 つのベクトルをまとめて， 3×3 の行列で表記されたものを回転行列と呼ぶ．

$${}^0\mathbf{x}_P = \begin{bmatrix} r_{11} \\ r_{21} \\ r_{31} \end{bmatrix}, \quad {}^0\mathbf{e}_y = \begin{bmatrix} r_{12} \\ r_{22} \\ r_{32} \end{bmatrix}, \quad {}^0\mathbf{e}_z = \begin{bmatrix} r_{13} \\ r_{23} \\ r_{33} \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

$${}^0\mathbf{R} = \begin{bmatrix} {}^0\mathbf{e}_x & {}^0\mathbf{e}_y & {}^0\mathbf{e}_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

回転行列よりもわかりやすく姿勢を表現する方法として，固定角やオイラー角と呼ばれる方法がある．本実験では xArm 6 に採用されている固定角を用いる．固定角は，座標系 Σ_0 を基準に次の 3 つの連続する回転で表現する．(1) の軸まわりの「roll」回転，(2) の軸まわりの「pitch」回転，(3) の軸まわりの「yaw」回転である．3 つの連続回転により，任意の姿勢を表現することができる．回転行列では 3 つの角のパラメータが必要であったが，固定角では ψ, θ, ϕ の 3 つのパラメータで姿勢を表現することができる．ここで，xArm 6 ではなくロボットアーム上の ψ, θ, ϕ をピッチ角 P, ϕ をヨー角 Y, R と呼称している．

また，固定角の ψ, θ, ϕ が既知のとき，回転行列 \mathbf{R} は，

$${}^0\mathbf{R} = R_z R_y R_x = \begin{bmatrix} \cos \psi \cos \theta & \cos \psi \sin \theta \sin \phi - \sin \psi \cos \phi & \cos \psi \sin \theta \cos \phi + \sin \psi \sin \phi \\ \sin \psi \cos \theta & \sin \psi \sin \theta \sin \phi + \cos \psi \cos \phi & \sin \psi \sin \theta \cos \phi - \cos \psi \sin \phi \\ -\sin \theta & \cos \theta \sin \phi & \cos \theta \cos \phi \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

となり， ψ, θ, ϕ を軸まわりにそれぞれ単位回転した際の回転行列 \mathbf{R} で計算することができる．また，回転行列の各要素が既知のときは，

$$\theta = \text{atan2} \left(-r_{31}, \pm \sqrt{r_{11}^2 + r_{21}^2} \right) \quad (2.18)$$

$$\psi = \begin{cases} \text{atan2}(r_{21}, r_{11}) & \text{if } \cos \theta > 0, \\ \text{atan2}(-r_{21}, -r_{11}) & \text{if } \cos \theta < 0 \end{cases} \quad (2.19)$$

$$\phi = \begin{cases} \text{atan2}(r_{32}, r_{33}) & \text{if } \cos \theta > 0, \\ \text{atan2}(-r_{32}, -r_{33}) & \text{if } \cos \theta < 0 \end{cases} \quad (2.20)$$

と計算できる．この計算は，式 (2.16) と式 (2.17) の各要素を比較し，方程式を立式することで求めることができる．式 (2.16) の値を反映して，それぞれの求め方は以下の通りである．

- ピッチ角 θ : (1.1) 要素を乗じて和を取る．また，(3.1) 要素を用いて， atan2 を用いる．
- ヨー角 ψ : (1.1) 要素および (2.1) 要素を比較して， atan2 を用いる．
- ロール角 ϕ : (3.2) 要素および (3.3) 要素を比較して， atan2 を用いる．

3 ロボットビジョン

3.1 概要

マニピュレータは，カメラによる画像処理を組み合わせることで，用途の幅を広げることができる．ステレオカメラ (RGB-D カメラ) を取り付けることで，対象物体の 3 次元位置情報を得ることができる．そして，その位置情報を利用することで，把持対象の検出や手先位置の微調整が可能となる．この一連の作業をリアルタイムで実行できるとすれば，カメラが介在したフィードバックシステム (ビジュアルフィードバックシステムと呼ばれる) が完成する．

本実験では画像処理による対象物体の 3 次元位置計測を行う．そして，位置情報からマニピュレータの手先位置を決定し，オンラインティーチングによる動作の入力を行う．

3.2 画像処理

本実験では，次の手順で画像処理を行い，3 次元位置を計測する．

- (1) 画像の取得：カメラから取得される画像は，カラー画像であり，赤色成分 (R)，緑色成分 (G)，青色成分 (B) から構成されている．それぞれの成分は，0 から 255 の 256 階調の値を持つため，1 画素 (pixel) は 3 バイトである．色は RGB 色空間と HSV 色空間と呼ばれる 2 つの色の表現方法がある．本実験では HSV 色空間で画像を処理する．
- (2) 空間フィルタリング：画像には外乱光などの影響により色の明るさやコントラストなどが変化する．その変化を低減するために，画像フィルタを通す．本実験では，空間フィルタリングと呼ばれる「平均化フィルタ」，「ガウシアンフィルタ」，「メディアンフィルタ」，「双方向フィルタ」をそれぞれ用いる．
- (3) 2 値化処理：HSV 色空間から特定の色を検出し，白黒画像を生成する．これは 2 値化と呼ばれる処理を行う．2 値化は任意の値 (しきい値) を定め，それを基準として，各ピクセルを白または黒に割り当てる．この操作によって，抽出したい物体をそれ以外と区別する．実際，しきい値の決定方法には，P タイル法，判別分析法，傾分といった手法など多岐にわたるが，ここではヒストグラムを参考に試行錯誤して決定するものとする．この 2 値化処理によって対象物体が特定できる画像が得られる．

- (4) 特徴パラメータの抽出：対象物体の特徴となる値は，面積，周囲長，重心位置，形状などが考えられる．本実験では，画像全体を 1 つの物体と仮定し，2 値化された白部分の面積と重心位置を求める．この重心位置を 3 次元位置計測に利用する．
- (5) ステレオ法による 3 次元位置の計測：2 台のカメラ画像それぞれにある (4) で取得した画像上の物体の重心位置から三角測量の原理を用いると，3 次元位置を計測できる．また，本実験で使用するステレオカメラ (Realsense D435f) にはプロジェクタによるパターンが照射されており，そのパターンを 2 台のカメラが検出することでカメラ画像同士のマッチングを行っている．

3.3 座標変換

カメラから取得された画像はマニピュレータのグローバル座標系とは異なる視点を持っている．そこで，カメラに固定された座標系からみた対象物体の位置を，グローバル座標系に変換して考える必要がある．本実験では，マニピュレータの手先にカメラが固定されているため，カメラに固定された座標系は手先座標系 Σ_e と等しいものとして考える．

座標を変換するには，グローバル座標系 Σ_0 の原点から手先座標系 Σ_e の原点までの位置ベクトル ${}^0\mathbf{p}_{0,e}$ と，手先の姿勢を表す回転行列 ${}^0\mathbf{R}$ を用いて，

$${}^0\mathbf{x}_P = {}^0\mathbf{p}_{0,e} + {}^0\mathbf{R}\mathbf{x}_P \quad (3.1)$$

と計算する．ここで， ${}^0\mathbf{x}_P$ はグローバル座標系からみた対象物体， \mathbf{x}_P は手先座標系からみた対象物体の 3 次元位置座標を示している．本実験では， ${}^0\mathbf{p}_{0,e}$ がマニピュレータの手先位置， \mathbf{x}_P が求めたい対象物体の 3 次元位置， ${}^0\mathbf{x}_P$ がカメラから取得した対象物体の 3 次元位置， ${}^0\mathbf{R}$ がマニピュレータの手先姿勢となる．ただし，マニピュレータの制御用ソフトウェアでは，XYZ オイラー角で姿勢が表現されるため， ${}^0\mathbf{R}$ に変換する必要がある．

4 実験 1-1：ティーチング実験

4.1 実験概要

本実験では，図 4.1 中に示された番号の位置で試験管を模したホワイトボードマーカを抜き差しするマニピュレータの動作をダイレクトティーチングおよびオンラインティーチングを用いて制御 PC に入力する．P1～P3 の位置には部品が配置されており，その部品をそれぞれ S1～S3 に運搬する．また，運搬の途中で試験管を 3 回振る動作も行う．

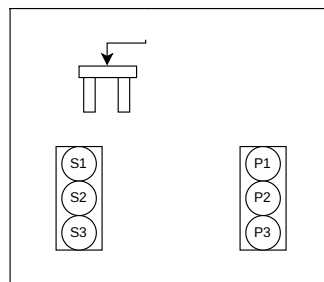


図 4.1 実験環境（実験 1）

4.2 ダイレクトティーチング実験

4.2.1 実験手順

実験は次の手順で行う。

- (1) 空圧駆動型ロボットグリッパの電磁弁を操作し、ホワイトボードマーカを把持させる。
- (2) マニピュレータを初期位置姿勢付近に移動させる。
- (3) マニピュレータ制御用ソフトウェアからダイレクトティーチングを実行する。
- (4) 初期姿勢から S1 上部に移動する。
- (5) S1 と P1 の中間地点で、ホワイトボードマーカを 3 回振る。
- (6) P1 の挿入口にホワイトボードマーカを指す。
- (7) マニピュレータを初期位置姿勢付近に戻し、ダイレクトティーチングを終了する。
- (8) 記録した動作をプレイバックする。プレイバックの様子は動画撮影する。
- (9) P2 と S2、P3 と S3 の組み合わせでもダイレクトティーチングを実行する。ただし、実行する人を交代させる（全員 1 度は実行すること（重複してもよい））。実行中の様子を適宜写真、動画撮影し、ティーチングに苦労している点および改善すべき点などを観察する。撮影した写真は考察などに利用する。利用する場合は図として載せること。

4.2.2 実験結果

ダイレクトティーチングの実行結果について説明する。図 4.3 にダイレクトティーチングのプレイバックの様子を示す。

4.2.3 考察

次に、実行結果について考察する。

4.3 オンラインティーチング実験

4.3.1 実験手順

マニピュレータ制御用ソフトウェアを用いて、オンラインティーチングを行う。オンラインティーチングはビジュアルプログラミングモードを用いて行う。実験は次の手順で行う。

- (1) マニピュレータを初期位置姿勢に移動させる。
- (2) マニピュレータ制御用ソフトウェアからオンラインティーチングを実行する。
- (3) 初期姿勢から S1 に移動し、ホワイトボードマーカを把持する動作を行う。その後、ホワイトボードマーカを S1 から抜く。
- (4) S1 と P1 の中間地点で、ホワイトボードマーカを 3 回振る。なお、マーカを振る動作のティーチングは最初の 1 名が行い、その後はティーチングのデータを複製して使用してよい。
- (5) P1 の挿入口にホワイトボードマーカを指す。
- (6) マニピュレータを初期位置姿勢に戻す。

- (7) P2 と S2, P3 と S3 の組み合わせでも同様にティーチングを行う。ただし、実行する人を交代すること。そして、全員 1 度は実行すること。人数が 4 人以上いる場合は、挿入口を P1, P2 のホワイトボードマーカーを S1, S2 にそれぞれ異なる動作にする。実行中の様子を適宜撮影し、ティーチングに苦労している点などを観察する。撮影した写真は考察などに利用する。利用する場合は図として載せること。
- (8) オンラインティーチングを終了する。
- (9) 記録した動作をプレイバックする。プレイバックの様子は動画撮影する。

4.3.2 実験結果および考察

オンラインティーチングの実行結果について説明する。図??にダイレクトティーチングのプレイバックの様子を示す。

4.3.3 考察

次に、実行結果を考察する。

5 実験 1-2：運動学（3 自由度）実験

5.1 実験概要

本実験では、制御 PC 内で実行されている運動学をエクセルを用いて計算する。そして、指定された手先位置にマニピュレータを移動させる実験を行う。マニピュレータは第 4～第 6 関節が $0[\text{deg}]$ に固定された 3 自由度マニピュレータとして扱う。マニピュレータへの動作入力に関節角度の数値指定によるオンラインティーチングを用いる。

また、図 5.1 に示すように本実験における逆運動学は目標位置においてのみ計算し、実験 1-2 とは異なり途中経路では計算を行わないものとする。

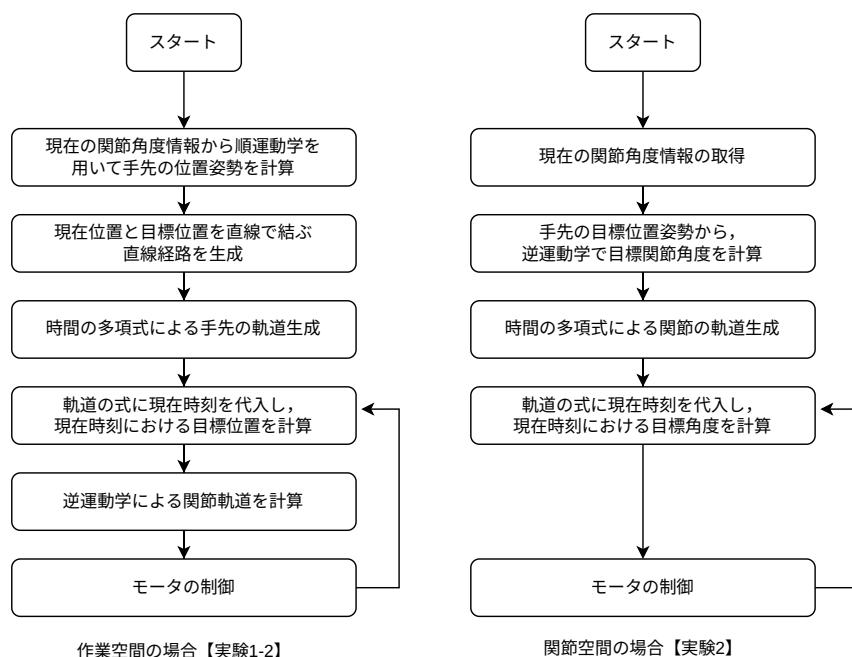


図 5.1 フローチャート

5.2 実験手順

実験は以下の手順で行う．

- (1) 逆運動学（式 (2.6)，式 (2.12)～式 (2.14)）を計算するエクセルファイルを作成し，表 5.2 に記された手先位置から関節角度を計算する．数値は小数点第 1 位まで表記するものとする．
- (2) 初期位置，No.1～3，初期位置の順に手先位置が到達するようにオンラインティーチングを実行する．
- (3) 記録した動作をプレイバックする．プレイバックの様子は撮影する．

表 5.1 手先位置

Position No.	x [mm]	y [mm]	z [mm]
1	168.1	168.1	368.8
2	210.6	210.6	196.1
3	541.3	0	182.8

5.3 実験結果

表 5.3 に逆運動学の計算結果を示す．また，図 5.2 に，手先位置が Position No.2 から No.3 に移動した際の経路の模式図を示す．

表 5.2 各関節角度の計算結果

Position No.	θ_1 [deg]	θ_2 [deg]	θ_3 [deg]
1			
2			
3			

5.4 考察

次に，実行結果の考察を述べる．

6 実験 2-1：画像処理実験

6.1 実験概要

本実験では，手先に装着した RGB-D カメラから取得した画像を処理し，対象物体の検出および 3 次元位置情報の取得を実験する．マニピュレータの卓上には，右角度の積み木（赤色，青色，黄色）および収納台が設置されており，実験では積み木および各収納位置を対象に実験を行う．

6.2 実験手順

実験手順は以下の手順で行う．

- (1) 卓上に積み木を 1 個設置し，卓上の目盛りから各物体の $0^\circ xy$ 座標を直接計測し，記録する．
- (2) Python の開発環境 Spyder を起動し，画像処理プログラムから空間フィルタリングを OFF にする．
- (3) 画像処理プログラムを実行後，マニピュレータの制御用ソフトウェアを用いてマニピュレータを手動操作し，画像に積み木が現れる位置まで手先を移動する．この際，手先の位置姿勢を記録する．
- (4) ヒストグラムを参考にしながら積み木の HSV 色空間のしきい値（最大値，最小値）を設定し，記録する．また，スクリーンショット等を用いて，画像処理結果を記録する．
- (5) 得られた 3 次元位置情報を記録する．
- (6) 「平均化フィルタ」，「ガウシアンフィルタ」，「メディアンフィルタ」，「双方向フィルタ」において，それぞれ (1)～(5) を繰り返す．
- (6) 残りの積み木および収納位置を適所について，(1)～(6) を繰り返す．
- (7) 式 (3.1) を用いて，座標変換を行い，物体の 3 次元位置をグローバル座標系で表現するエクセルファイルを作成し，計算する．

6.3 実験結果

表 6.1～表 6.3 に実験結果を示す．図 6.1 には，実位置と計測位置の誤差をまとめた図を示す．

表 6.1 積み木（赤）の結果

	フィルタ無	平均フィルタ	ガウシアン F	メディアン F	双方向フ
実位置 (x_0°, y_0°) [mm]	488.5 , -130.0	0	0	0	0
手先位置 (x_e°, y_e°, z) [mm]	401.1 , 0.0 , 418.2	0	0	0	0
手先姿勢 (R, P, Y) [deg]	180, 0 , 0	0	0	0	0
H(max, min)	(3,0)	(10,0)	(10,0)	(10,0)	(10,
S(max, min)	(255,60)	(232,61)	(255,60)	(255,60)	(255,
V(max, min)	(255,0)	(255,0)	(255,0)	(255,0)	(255,
計測位置 (x_e°, y_e°, z) [mm]	(85.1 , 120.1 , 371)	(84.5,130.3,379.9)	(85.0,128.6,377.9)	(84.3,124.3,375.9)	(85.0,126,
計測位置 (x_0°, y_0°, z) [mm]	(486.2,-120.1,47.2)	(485.6,-130.3,38.3)	(486.1,-128.6,40.3)	(485.4,-204.3,42.3)	(486.1,-12

表 6.2 積み木（青）の結果

	フィルタ無	平均フィルタ	ガウシアン F	メディアン F	双方向フ
実位置 (x_0^o, y_0^o) [mm]	588.5, -130.0	0	0	0	
手先位置 (x_e^o, y_e^o, z) [mm]	401.1, 0.0, 418.2	0	0	0	
手先姿勢 (R, P, Y) [deg]	180, 0, 0	0	0	0	
H(max, min)	(160,140)	(160,140)	(160,140)	(160,140)	(160,140)
S(max, min)	(255,60)	(255,60)	(255,60)	(255,60)	(255,60)
V(max, min)	(255,0)	(255,0)	(255,0)	(255,0)	(255,0)
計測位置 (x_e^o, y_e^o, z) [mm]	(181.6,128.1,374.9)	(182.7,131.5,377.9)	(182.1,129.7,375.9)	(182.4,129.0,375.9)	(180.7,129.0,375.9)
計測位置 (x_0^o, y_0^o, z) [mm]	(582.7,-128.1,43.3)	(583.1,-131.5,40.3)	(583.2,-129.7,42.3)	(583.5,-129.0,42.3)	(581.8,-129.0,42.3)

表 6.3 積み木（黄）の結果

	フィルタ無	平均フィルタ	ガウシアン F	メディアン F	双方向フ
実位置 (x_0^o, y_0^o) [mm]	388.5, -130.0	0	0	0	0
手先位置 (x_e^o, y_e^o, z) [mm]	401.1, 0.0, 418.2	0	0	0	0
手先姿勢 (R, P, Y) [deg]	180, 0, 0	0	0	0	0
H(max, min)	(50,30)	(50,30)	(50,30)	(50,30)	(50,30)
S(max, min)	(255,60)	(255,60)	(255,60)	(255,60)	(255,60)
V(max, min)	(255,0)	(255,0)	(255,0)	(255,0)	(255,0)
計測位置 (x_e^o, y_e^o, z) [mm]	(-12.3,119.9,365.9)	(-15.0,124.7,370.9)	(-13.0,121.9,366.9)	(-13.0,117.2,365.9)	(-13.0,121.9,366.9)
計測位置 (x_0^o, y_0^o, z) [mm]	(338.8,-119.9,52.3)	(386.1,-124.7,47.3)	(388.1,-121.9,51.3)	(388.1,-117.2,52.3)	(-13.0,121.9,366.9)

次に、図 6.2 に赤ブロックのフィルタ後の画像を示す。

6.4 考察

実位置と計測結果の誤差について、考察を行う。

7 実験 2-2：3 次元位置計測と物体の把持収納実験

7.1 実験概要

本実験では、手先に装着した RGB-D カメラから把持物体および収納位置の 3 次元位置情報を取得し、物体の把持および収納する実験を行う。図 7.1 に実験環境の模式図を示す。マニピュレータの卓上には、把持する五角形の積み木（赤色、青色、黄色）と収納位置用の積み木（黄、青、緑）が置かれている。マニピュレータは五角形の積み木を検出・把持して収納位置に配置する動作を行う。

7.2 実験手順

実験手順は以下の手順で行う。

- (1) 卓上に積み木を 3 個、収納台座をすべて無造作に配置する。

- (2) Python の開発環境 Spyder を起動し，実験 3 において最も優れた結果となった空間フィルタリングを選択する．
- (3) 画像処理プログラムを実行後，マニピュレータの制御用ソフトウェアを用いてマニピュレータを手動操作し，画像に各物体が現れる位置まで手先を移動する．この際，手先の位置姿勢を記録する．
- (4) 実験 3 で記録した HSV 色空間のしきい値を設定し，各物体の検出を行う．また，実験 3 で作成したエクセルを用いて，各物体の 3 次元位置をグローバル座標系で表現する．
- (5) マニピュレータの制御用ソフトウェアを用いて，手先位置の数値指定によるオンラインティーチングを行う．動作は，赤積み木の把持収納，青積み木の把持収納，黄積み木の把持収納をすべて連続で行う．ただし，手先の姿勢 $(R, P, Y) = (180, 0, 0)$ [deg] とし，手先の 0° 位置を 80[mm]（把持時），110[mm]（収納時）とすること．また，動作の様子を動画撮影する．

7.3 実験結果

表 7.1 に実験結果を示す．また，図 7.2 にマニピュレータが積み木を把持・収納する様子を示す．

表 7.1 物体の位置

	赤積み木	青積み木	黄積み木	赤収納	青収納	黄収納
手先位置 (x_0^o, y_0^o, z) [mm]	0	0	0	0	0	0
手先姿勢 (R, P, Y) [deg]	0	0	0	0	0	0
計測位置 (x_e^o, y_e^o, z) [mm]	0	0	0	(177.7, 126.6, 375.9)	(88.7, -129.5, 372.9)	(-5.7, -128.8, 365.9)
計測位置 (x_0^o, y_0^o, z) [mm]	0	0	0	(578.8, -126.6, 42.3)	(489.9, 129.545.3)	(395.4, 128.852.3)
成功	成功	成功	成功	成功	成功	失敗

7.4 考察

次に，考察を行う．

8 課題

8.1 逆運動学の導出

課題：式 (2.6)，式 (2.12)～式 (2.14) を導出せよ．手書き可．ただし，枠や枠内の文章は報告書に記載不要とする．参考文献は報告書最後の参考文献の欄に記載すること．

8.2 回転行列とオイラー角の変換式

課題：式 (2.17)～式 (2.20) を導出せよ．手書き可．ただし，枠や枠内の文章は報告書に記載不要とする．参考文献は報告書最後の参考文献の欄に記載すること．

8.3 空間フィルタリング

「平均化フィルタ」，「ガウシアンフィルタ」，「メディアンフィルタ」，「双方向フィルタ」の特徴についてそれぞれ 100～200 字程度で説明せよ．ただし，枠や枠内の文章は報告書に記載不要とする．参考文献は報告書最後の参考文献

の欄に記載すること。

8.4 色空間

RGB 色空間と HSV 色空間について、それぞれ 100～200 字程度で説明せよ。ただし、枠や枠内の文章は報告書に記載不要とする。参考文献は報告書最後の参考文献の欄に記載すること。

8.5 ロボットビジョンの実用例

ステレオカメラ（単眼カメラでもよい）とロボットマニピュレータを統合することで可能となる作業の実用例を 1 例以上調査し、それぞれ 200 字程度で説明せよ。ただし、枠や枠内の文章は報告書に記載不要とする。参考文献は報告書最後の参考文献の欄に記載すること。

参考文献

- 1) 細田耕：実践ロボット制御，オーム社，2019.
- 2) 株式会社アールティ：3 自由度ロボットの順運動学と逆運動学，< <https://rt-net.jp/humanoid/archives/2652>
>（2024 年 4 月 1 日閲覧）.
- 3) 酒井幸市：デジタル画像処理入門，コロナ社，2001.
- 4) 北山直洋：Python で始める OpenCV 4 プログラミング，株式会社カットシステム，2019.