

画像処理を用いたクレーンアーム装置の製作

電子情報技術科 松下 剛

Production of Crane Arm device using Image Processing Tsuyoshi MATSUSHITA

概要 画像処理を用いて、矩形の移動範囲である自動運転するクレーンアーム装置を製作した。自動運転は以下の2段階で実現した。まず、画像データの機械学習で対象物を認識し、位置の直交座標を計算し、モータ駆動時間に換算してLANでPLCに通信する。次に、装置にある電気部品（DCモータ、センサ）、及び機械部品（ラックアンドピニオン機構、スクリュー機構、ウインチ機構）で所定の座標にある対象物まで移動し、ハンドで対象物を掴む。更に、装置の動作として、自動運転以外に、動作確認用の手動運転、展示向けのゲームもPLCで付加した。装置の操作を担う入出力装置はPLC用タッチパネルを用いた。以上の動作を製作した装置で確認できた。

1. はじめに

以前より、要素技術検討用クレーン装置として、クレーンアーム装置を製作してきた。そこで、更に実際の天井クレーンに類似した形状で装置を設計、製作した。製作した装置で、実動作を確認した。

2. 機体のシステム及び画像処理

本装置のシステムは、画像処理、通信、クレーンアーム装置の3要素で構成される。画像処理は対象物の座標を取得するため、通信は座標までのモータ駆動時間をラズパイ（Raspberry pi 4 Model B / 4GB）からPLC（Programmable Logic Controller）に送るため、クレーンアーム装置は対象物までの移動、対象物を掴むための要素である。全体の関係を図1に、製作した装置の概要を図2にそれぞれ示す。

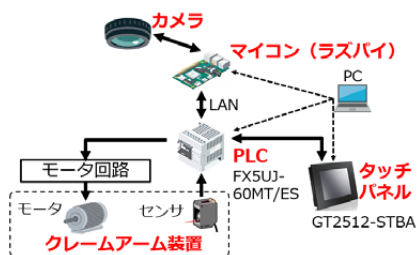


図1 システムの概要

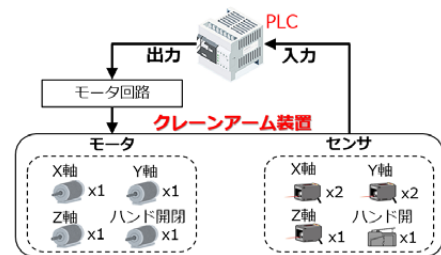


図2 クレーンアーム装置の概要

2.1 画像処理

本システムにおける画像処理では、対象物である球形のサンプルの画像データに、以下の5つの処理: ①教師用データの作成、②カメラによる画像取得及び加工、③対象物の認識、④異常検出、⑤モータ駆動時間の計算、を行っている。

2.1.1 教師用データの作成

カメラで取得する画像と比較するための教師画像をあらかじめ撮影する。A-KAZE (Accelerated-KAZE) 特徴量検出により、特徴点と特徴量ベクトルを取得し csv ファイルに出力する。

A-KAZE は特徴点検出と特徴量記述を行う手法で、回転、拡大縮小に対して強い性質がある。特徴量はバイナリコードで表され、特徴量間のハミング距離を計算してマッチングを行う¹⁾。

画像処理プログラム中では、教師画像に対しての処理は行わず、起動時に csv ファイルを読み込むことで処理の軽量化を図っている。

2.1.2 カメラによる画像取得及び加工

図3に示すテストデータの画像に A-KAZE を適用した場合、特徴点の数が膨大となるため加工を行う。取得した画像のコントラストを調整し、適応的閾値処理により二値化、各輪郭に楕円近似を行い、図3に示すマスク画像を生成し、図3の画像に図4のマスクを適用し、図5に示す画像を生成する。

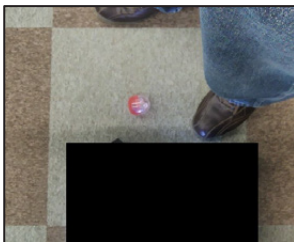


図3 カメラ画像

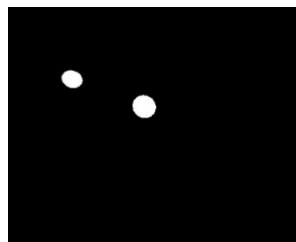


図4 マスク画像

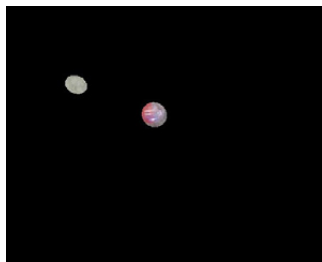


図5 マスク適用後の画像

2.1.3 対象物の認識：2近傍法

教師用データとテストデータの特徴量を k 近傍法（以後、k=2 としたので2近傍法）で比較・マッチングする。対応している特徴量を線で結んでいる様子を図6に示す。対象物を認識した場合、対象物の直交座標を取得する。

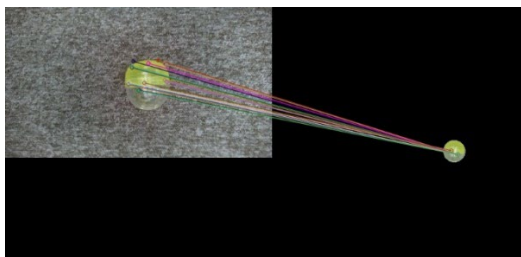


図6 2近傍法適用後の特徴点の対応

総当たりの2近傍法とは、未知の特徴点を分類する手法である。これは以下の手順で行われる。

- ①それぞれにデータラベルが付与されている分類済みの特徴点データ群を用意
- ②未知の特徴点について、①のデータ群に存在する全ての特徴点との距離を比較
- ③比較した結果から距離の近い2個の特徴点を抽出
- ④データラベルについてこの2個の点で多数決を行い、最も数の多いデータラベルを未知の特徴点に付与

1近傍法として最近傍点のみを抽出する方法でも問題はないが、本システムでは2近傍法を採用した。これは、式(1)に示す条件を満たさないマッチング結果は信頼性に欠けると言え、そのような結果を除外するためである²⁾。

$$\frac{1 \text{ 番目に近い距離}}{2 \text{ 番目に近い距離}} < \text{threshold} \quad (1)$$

2.1.4 異常検出：Isolation Forest アルゴリズム

正しく対象物を検出できている場合、特徴点の一つは他の特徴点と近い距離に存在すると考えられる。そのため他の特徴点から外れた特徴点をペアに持つ対応を外れ値として除外して、対象物を特定する。この方法として Isolation Forest アルゴリズムを使用している。Isolation Forest アルゴリズムは、決定木による異常検出アルゴリズムである。本システムでは以下の手順で実装している。

- ①2近傍法により抽出した特徴点から、ランダムに特徴点を選択
- ②選んだ特徴点の最大値と最小値の間のランダムな分割値で枝を二つに分離
- ③異常値かどうか判定したい特徴点が孤立するまで②を繰り返す。
- ④②③を繰り返し、決定木を複数作成。
- ⑤孤立するまでの深さの平均： $E(h(x))$ を計算。
- ⑥(2)式に従って異常値スコア： $s(x, n)$ を計算。

$$s(x, n) = 2^{-\frac{E(h(x))}{c(n)}} \quad (2)$$

$c(n)$: 二分探索する際の平均の深さ

このとき、 $s(x, n)$ が 1 に近いほど異常値である可能性が高く、0.5 よりはるかに小さい場合は通常値である可能性が高い。また、すべてのデータのスコアが約 0.5 の場合はサンプル全体に異常はない可能性が高いと言える³⁾。Isolation Forest アルゴリズムの適用例を図 7 と図 8 に示す。図 8 は図 7 の右側半分の画像における、正常値と異常値の特徴点の座標位置をそれぞれ青色と橙色の点で示している。

正常値の結果から、対象物を球と仮定して、中心座標を計算する。

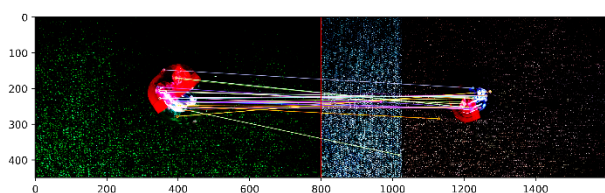


図 7 2 近傍法適用後の特徴点の対応

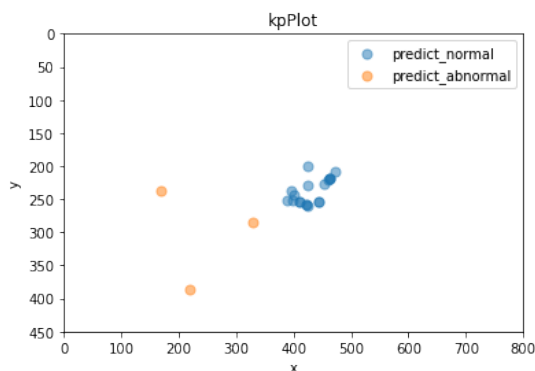


図 8 Isolation Forest アルゴリズムの適用結果

2.1.5 モータ駆動時間の計算

これまでの検証で得られた当該対象物の直交座標 (X, Y) から、クレーンアーム装置にある各モータの駆動時間 (T_x , T_y) を、式(4)、(5)で計算する。但し、式の各係数は評価して決定した。

$$T_x = X / (345 / 8.0) \quad (4)$$

$$T_y = Y / (345 / 38.5) \quad (5)$$

式(4)の 8.0[s] : X 軸モータの最大動作時間

式(5)の 38.5[s] : Y 軸モータの最大動作時間

式(4)、(5)の 345 : 座標の最大値

2.2 通信 : ラズパイと PLC 間

ラズパイと PLC 間の通信の仕様を表 2 に示す。算出した各モータの駆動時間をソケット通信⁴⁾のフォーマットに組込んで LAN ケーブルで、ラズパイから PLC に送る。更に、送信データの応答に選択したアルゴリズムに関するデータを重畳し、PLC からラズパイに送る。

表 2 通信の概要

項目	内容
通信規格	Ethernet
通信方式	ソケット通信 (IPv4, TCP)
フォーマット	ヘッダー+データ (12byte)
使用言語	Python

3. 装置の製作

図 9 に示す製作した装置について、以下の項目を説明する。

- ①装置の設計・製作⁵⁾
- ②PLC
- ③タッチパネル
- ④評価

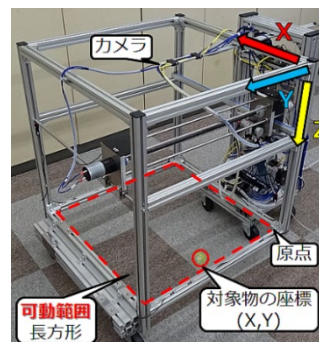


図 9 製作した装置

3.1 装置の設計・製作

設計・製作は以下の 5 工程で行っている。

- ① 筐体の製作
- ② トロリ 1 (X 軸) 設計・製作
- ③ トロリ 2 (Y 軸) 設計・製作
- ④ ホイスト (Z 軸) 設計・製作
- ⑤ ハンド設計・製作

上記①～④において、素材は全てアルミを使用し、フライス盤で精密加工した。

3.1.1 筐体の製作

筐体にはアルミ角柱 30×30 mm を使用し、700×700×700 mm の立方体状に製作した。製作した筐体を図 9 に示す。

3.1.2 トロリ 1 (X 軸) の設計・製作

トロリ 1 にはラックアンドピニオン機構を採用した。モータに取り付けたピニオンとレールに取り付けたラックの歯車が噛み合っており、モータが回転することでトロリ 1 が X 軸方向に動作する(図 10)。モータの回転速度が速く、アームが停止した際の反動が大きかったため速度が遅いものに変更した。

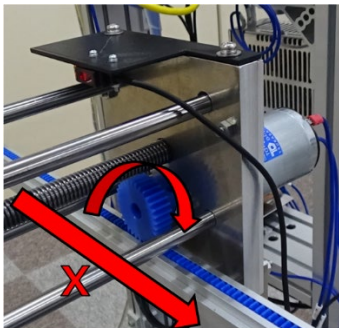
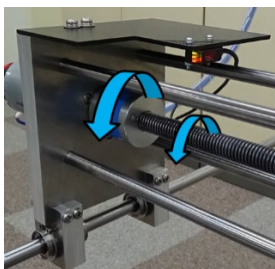


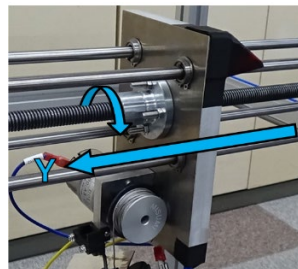
図 10 トロリ 1 (X 軸)

3.1.3 トロリ 2 (Y 軸) の設計・製作

トロリ 2 にはスクリー機構を採用した。モータに取り付けたスクリーネジにスクリーナットを通してあり、モータが回転することでスクリーナットを取り付けたアーム吊りし板が Y 軸方向に動作する(図 11)。モータの回転速度が遅かった(動作時間を要していた)ので、トルクがあることを確認して、回転速度が速いものに変更した。



(a) トロリ (Y 軸)

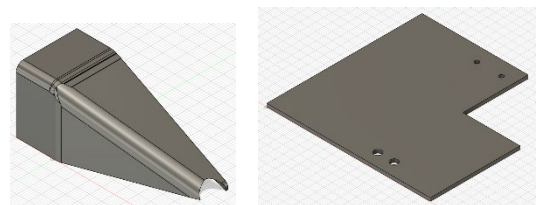


(b) アーム吊りし板

図 11 トロリ 2 (Y 軸)

Y 軸動作中に、配線がアーム吊りし板の角に引っかかる問題があったため、配線がアーム吊りし板(図 12 (a))を乗り越えるための部品を 3D プリンタで製作した。

また、Y 軸センサを取り付けている板(図 12 (b))にも配線が干渉してしまうことがあったため、こちらの部品も形状を変更し 3D プリンタで製作した。製作した部品を図 12 に示す。



(a) 吊りし板用部品 (b) Y 軸センサ用部品

図 12 配線対策部品

3.1.4 ホイスト (Z 軸) の設計・製作

ホイスト (Z 軸) には、図 13 に示すウインチ機構(図中にあるプーリーをモータで回転させてワイヤを同部品に巻き付ける機構)を採用した。下降動作は PLC のプログラム内におけるタイマで制御し、上昇動作は光学式センサで上端を感知している。

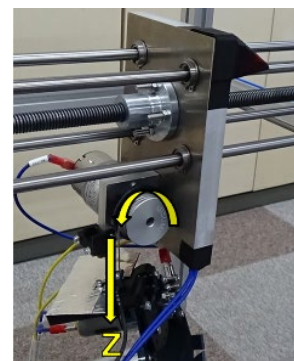
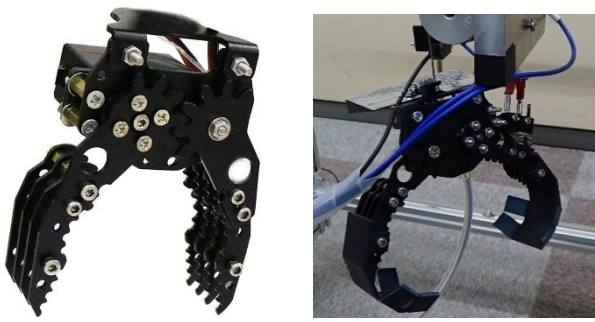


図 13 ホイスト (Z 軸)

3.1.5 ハンドの設計・製作

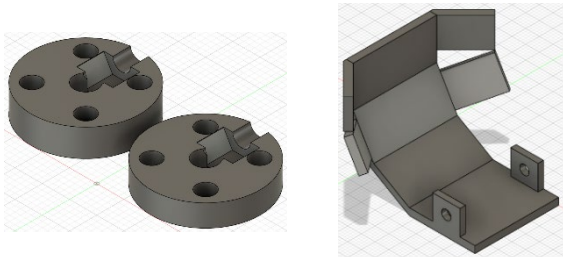
ハンドは、対象物を掴み易いように既製品(図 14 (a))を改造した(同図 (b))。ハンドの開く限界はリミットスイッチで検知し、ハンドの閉じる動作は PLC のプログラム内におけるタイマで制御している。



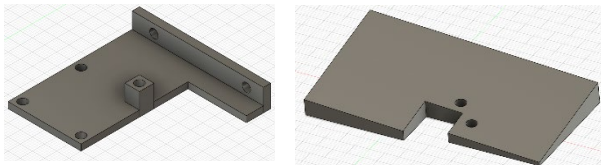
(a) 使用した既製品 (b) 改造後のハンド

図 14 ハンドの概要

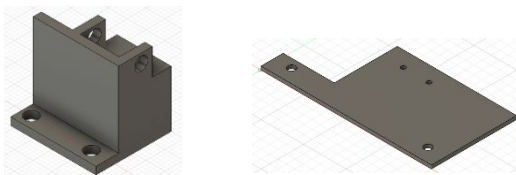
改造に必要な部品の製作には、3D プリンタを使用した。使用した既製品（図 14 (a)）に付加すべく製作した部品を図 15 に示す。



(a) モータ軸固定用部品 (b) アーム先端用部品



(c) モータ取付け用部品 (d) センサ光反射板



(e) Z 軸センサ固定板 (f) スイッチ固定用部品

図 15 設計したハンド用部品

3.2 PLC とタッチパネル

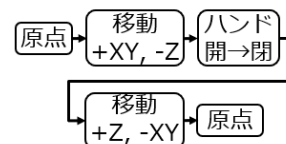
PLC のプログラムは、(a) 自動運転モード、(b) 管理者モード、(c) クレーンゲームモードで構成されている（図 16）。

自動運転モードは、一連の全動作を自動的に行うものである。本動作は、自己保持回路（1つの動作

を表現する回路）を順番に動作させる歩進制御で記述した。また、各モータ動作はタイマで設定した。更に、ハンドの開閉速度は PWM で制御した。

管理者モードは、トロリ、ホイスト、ハンドの各動作を個別に動作させるものである、各動作の調整、確認等に用いる。更に、座標取得設定の切換も行う。

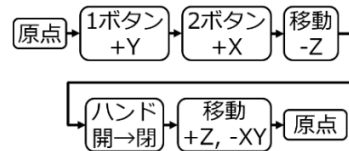
クレーンゲームモードは、アミューズメント施設にあるクレーンゲームを再現したモードで、1 のボタンを押している間 Y 軸が動作し、2 のボタンを押している間 X 軸が動作する。2 のボタンを離れた後は自動で対象物をつかむ動作をし、原点へ戻る。



(a) 自動運転モード



(b) 管理者モード



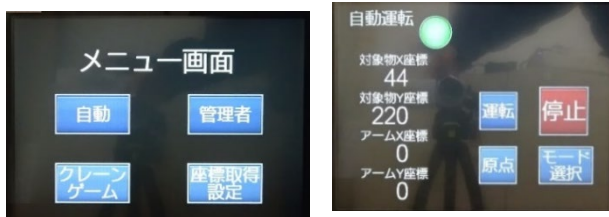
(c) クレーンゲームモード

図 16 PLC プログラム

PLC と連動しているタッチパネルの図面を図 17 に示す。同画面は、(a) メニュー画面、(b) 自動運転モード、(c、d) 管理者モード、(e) クレーンゲームモードで構成される。

自動運転モードには、各動作ボタン、対象物とアームの座標、状態表示（ランプ、数値）がある。

管理者モードには、① (c) 各動作モード（動作、停止、原点、モード選択の各ボタンを押すと、動作、即時停止、原点復帰、メニュー画面への切り替えをそれぞれ実行、状態表示のランプ）② (d) 座標取得設定モード（PLC からラズパイへ通信して対象物の認識方法：2 近傍法、SVM⁶⁾、k-mean⁷⁾の切り替え）がある。クレーンゲームモードには、状態表示のランプがある。



(a) メニュー画面

(b) 自動運転モード



(c) 管理者モード

(d) 座標取得設定



(e) クレーンゲームモード

図 17 タッチパネルの画面

3.3 評価

クレーンアーム装置としての機能：対象物の座標自動取得、当該座標までの各装置の移動、対象物を掴むこと、これらの連続動作を製作した機体で確認できた。また、対象物の認識のアルゴリズムの実装及び比較⁶⁾⁷⁾、連続動作を応用したクレーンゲームの動作も確認できた。

4. 課題と対策

製作した装置における画像処理（システム及びソフトウェア）と機体（ハードウェア（含 PLC））の課題として、①複数対象物の認識、②Y 方向移動に時間を要していること、③Z 軸、及びハンドの掴む動作に、調整（PLC、装置）を要すること、が挙げられる。

上記課題の主な対策としては、①画像処理でのアルゴリズムの検討、②トルリに関するモータと周辺機器の検討、③プーリーの構造、ハンド部の軽量化と姿勢改善、を考えている。

5. おわりに

以前の装置に比べて、動作が実際のクレーン装置に近い装置を製作した。具体的には、クレーン動作を実現するための画像処理（対象物の認識（物体検知）及び各モータの駆動時間）、ラズパイ-PLC 間の通信処理の実装できた。また、当該装置の基本動作（直交座標での 3 次元移動、ハンドの開閉、原点復帰）及び各動作の自動動作を確認できた。

文献

- 1) 小板弦ノ介, 椋木雅之, AKAZE 特徴点を学習した SuperPoint による特徴点マッチング, P.2, 情報処理学会研究報告, 2023
- 2) nekobean, OpenCV - 特徴点マッチングを行う方法について - pystyle、<https://pystyle.info/opencv-feature-matching>, (参照 2023-12-08)
- 3) tchih11, 異常検知手法 Isolation Forest の解説, スクラッチでの実装 #Python - Qiita, <https://qiita.com/tchih11/items/d76a106e742eb8d92fb4>, (参照 2023-12-08)
- 4) 小高知宏, Python による TCP/IP ソケットプログラミング, オーム社, 2019
- 5) 岡田昌樹, 入門 機械制御と製作実習 4 軸クレーンを作って学ぶ機械装置設計, pp.166-189, オーム社, 2013
- 6) 笛田薫, 江崎剛史, 李鍾賛, Python で始める異常検知入門—基礎から応用まで—, pp. 92-105, 科学情報出版, 2023
- 7) 森巧尚, Python 3 年生 機械学習のしくみ, pp.159-164, 株式会社シナノ, 2021

著者 E-mail Matsushita.Tsuyoshi@jeed.go.jp