

# 画像処理を用いた果実の自動収穫システム

2018SC059 内藤 菖

指導教員：大石 泰章

## 1 はじめに

少子高齢化により農業就業人口は年々減少し、農業現場での労働力不足が問題になっている。現在、環境管理や搬送の自動化は進んでいるが、果実は規格化された工業製品ではないため、多くの収穫作業が人手で行われており、自動化は不十分である。収穫作業の自動化は労働力不足を補うことができ、研究開発が必要である [1, 2]。

本研究では、果実の収穫作業の自動化を試みる。具体的には、カメラで収穫対象の果実の画像を撮影し、色や大きさ、果実までの距離情報を取得し、収穫可能であるかどうかの判定と果実位置の認識をする。果実位置がカメラ画像の中心にくるようにロボットアームを制御し、ロボットアームの姿勢に基づいて果実の絶対座標を求め、ロボットアームを適切に動かしてグリッパで果実を掴むことを目標とする。果実にはトマトを用いる。

## 2 システムの概略

図1のようなシステムを構築した。

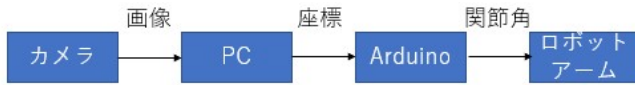


図1 構築したシステム

カメラ画像をPCが受け取り、Python上でOpenCVを使って画像処理を行い、収穫可能であるかの判定と画像中の果実位置の認識をする。また、果実位置が画像の中心にくるようにロボットアームを動かし、画像中の位置から絶対座標に変換する計算を行う。得られた座標をロボットアームに付属するマイコンボード Arduino にシリアル通信で送信し、各関節に与えるべき角度を計算する。得られた角度を各関節のサーボモータに送り、果実を掴める位置までロボットアームを制御する。グリッパは最も開いた状態から最も閉じた状態にすることで果実を掴む。

## 3 使用機材

本研究では、ロボットアーム Braccio を使用する (図2)。Braccio にはサーボモータが6つ付いており、図2のようにそれぞれ M1 から M6 とする。これらのサーボモータは、Arduino で設定した角度になるよう回転する。ただし本研究では、M5 はグリッパが水平になる角度に固定する。また、ロボットアームの M4 と M5 の間にカメラ Intel RealSense Depth Camera D415 を設置しており、画像中の果実の認識と位置情報の取得のほか、内蔵する深度センサを使って、カメラから果実までの距離情報を取得する。

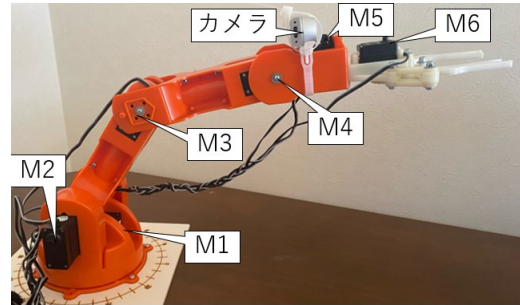


図2 ロボットアーム

## 4 自動収穫システムの動作

### 4.1 収穫対象の決定

まず、ロボットアームを初期姿勢にする。初期姿勢は、モータ M1 から M4 の角度を後に述べる Denavit-Hartenberg の記法で表すとき、 $\theta_1 = 90^\circ, \theta_2 = 135^\circ, \theta_3 = -90^\circ, \theta_4 = -45^\circ$  とする。

次に、カメラが撮影するカラー画像と、果実までの距離情報を用いて収穫対象を決定する。画像中には果実でないものも写っており、複数の果実が重なって写っていることもある。その中から収穫対象とする果実を1つ選ばなくてはならない。トマトの熟した果実は赤色であるため、画像中から赤色の領域を抽出し、境界からの距離が一定値以下の領域を削ることで、確実に果実であるという領域を得るとともに、重なった果実を分離する。さらに、分離した領域それぞれの重心までのカメラからの距離を求め、距離が最も小さい領域が収穫対象の果実に対応すると考える。

### 4.2 収穫対象の位置の測定

カメラで得られたカラー画像を図3に示す。横640画素、縦480画素の画像中の座標は、画像の左上隅を原点として、右方向に  $u$  軸を、下方向に  $v$  軸を取って表す。果実がカラー画像の中心にくるように、重心座標が  $310 \leq u \leq 330$  の範囲に収まるまでロボットアームの関節角  $\theta_1$  を、 $230 \leq v \leq 250$  の範囲に収まるまで同じく  $\theta_4$  を調整する。具体的には、 $10 < |u - 320| \leq 20$  のとき  $\theta_1$  を3度増減させて  $|u - 320|$  が小さくなるようにする。また、 $|u - 320| > 20$  のときは同様に5度増減させる。 $|v - 240|$  についてもこれが小さくなるよう同様に  $\theta_4$  を増減させる。

画像中における果実の重心座標  $(u, v)$  と、深度センサで得られた果実までの距離  $w$ (mm) から、カメラ座標系  $(x_c, y_c, z_c)$  に座標変換を行う。カメラ座標系は、原点をカメラの位置とし、 $x_c$  軸をカメラの正面方向に、 $y_c$  軸をカメラの上方向に、 $z_c$  軸を右手系をなすように取る (図4)。

カメラ座標系への変換は実験に基づき次のように行う：

$$\begin{bmatrix} z_c \\ y_c \end{bmatrix} = (0.14w + 8.57) \times 10^{-2} \times \begin{bmatrix} u - 320 \\ 240 - v \end{bmatrix},$$

$$x_c = w.$$

$x_c, y_c, z_c$  の単位はそれぞれ mm である。

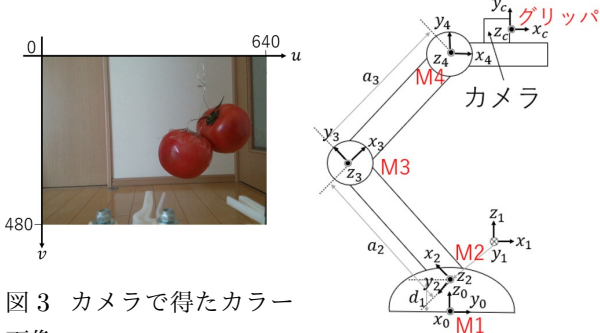


図3 カメラで得たカラー画像

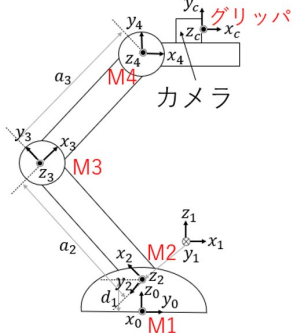


図4 リンク座標系

次にカメラ座標系から絶対座標系への変換を行う。ロボットアームのリンク座標系を Denavit-Hartenberg の記法によって定めると図4のようになり、リンクパラメータは表1によって与えられる [3]。ベース座標系  $(x_0, y_0, z_0)$  が絶対座標系であり、原点をロボットアームの位置とし、 $y_0$  軸をロボットアームの正面方向に、 $z_0$  軸は鉛直上向きに、 $x_0$  軸を右手系をなすように取る。 $d_1$ (mm) の値を 70,  $a_2$ (mm),  $a_3$ (mm) の値を 125 とすると、 $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$  の値に基づいてリンク 4 の座標系  $(x_4, y_4, z_4)$  を絶対座標系に關係づける同時変換  ${}^0T_4$  が得られる。さらにカメラ座標系とリンク 4 の座標系との關係を考えれば、カメラ座標系における果実の重心座標  $(x_c, y_c, z_c)$  を絶対座標系での座標  $(x_0, y_0, z_0)$  に移す変換は次のようになる：

$$\begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ 1 \end{bmatrix} = {}^0T_4 \begin{bmatrix} 40 + x_c \\ 35 + y_c \\ z_c \\ 1 \end{bmatrix}.$$

表1 リンクパラメータ

$i$	$a_{i-1}$	$\alpha_{i-1}$	$d_i$	$\theta_i$
1	0	$0^\circ$	$d_1$	$\theta_1$
2	0	$90^\circ$	0	$\theta_2$
3	$a_2$	$0^\circ$	0	$\theta_3$
4	$a_3$	$0^\circ$	0	$\theta_4$

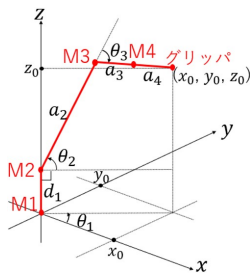


図5 ロボットアームのモデル

#### 4.3 ロボットアームの制御

4.2 節に示したように果実の絶対座標  $(x_0, y_0, z_0)$  を求めたら、そこにロボットアームの先端にあるグリッパを移

動させるため、ロボットアームの逆運動学を考える。ここでは M3 からグリッパまでが直線状になるよう  $\theta_4 = 0^\circ$  に固定する (図5)。また、M4 からグリッパまでの距離を  $a_4$ (mm) とする。使用するロボットアームに基づいて  $a_4$  の値を 125 とした。この条件での逆運動学 [3] により果実の位置にグリッパを動かすような関節角を求め、ロボットアームを制御する。

#### 5 動作結果

図6にグリッパ部分の動作結果を示す。

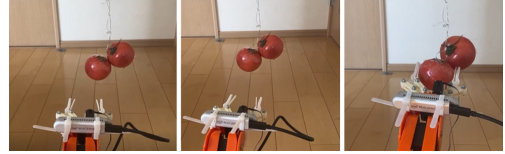


図6 動作結果 (左図：初期姿勢，中央図：果実の重心が画像の中心にくるよう動かしたところ，右図：果実を掴む)

収穫対象となる果実の重心がカラー画像の中心に来るようにロボットアームを移動させ、果実の位置を測定してそこへグリッパを移動させ、グリッパを最大まで開くことで果実を掴むことができた。果実の位置とグリッパの位置には 30mm 程のずれが見られることもあった。

#### 6 おわりに

本研究では、収穫可能であるかどうかの判定と果実位置の認識をした後、果実位置がカメラ画像の中心に来るようにロボットアームを適切に動かして、グリッパで果実を掴むことを行った。

今回用いたロボットアームでは、可動範囲やグリッパの強度などから実際に果実を収穫するのは困難であるため、より大きく強度のあるロボットアームを用いる必要がある。また、重なった果実の分離方法として 2 次元での処理には限界があり、重なりが大きいつき分離ができない。3次元で果実を把握したり複数のカメラを用いて多方向から処理したりするなど、果実の分離方法を改善すべきである。さらに、果実の傷つき等の収穫ミスのない動作を行うことも収穫ロボットの課題であり、圧力センサを用いるなど、果実を傷つけずに収穫する方法を考える必要がある。

#### 参考文献

- [1] 濱口和也・下田雄一郎・七條大樹・佐藤雅紀・横田諭：「トマトを題材とした農作物収穫ロボットのためのマニピュレータ及び画像処理システムの開発」。ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集，1A1-F02，2019。
- [2] 矢口裕明・長谷川貴巨・長濱虎太郎・稲葉幸幸：「収穫装置と視覚認識に着目したトマト自動収穫ロボットの構成法」。日本ロボット学会誌，第36巻10号(2018)，pp. 693-702。
- [3] 吉川恒夫：『ロボット制御基礎論』。コロナ社，1988。