

令和 6 年度
修士学位論文

ステレオ画像処理を用いた ユズ果実収量予測方法の検討

A Study on Yuzu Fruit Yield Prediction
Using Stereo Image Processing

1275112 松本 正弘

指導教員 栗原 徹

2025 年 2 月 28 日

高知工科大学大学院 工学研究科 基盤工学専攻
情報学コース

要 旨

ステレオ画像処理を用いた ユズ果実収量予測方法の検討

松本 正弘

全国で一位の生産量を占める高知県のユズを有利に取引するために、ユズ果実の収量予測を行う必要がある。しかし圃場では収量や果実サイズの調査は目視で行われており、労力と時間のコストが大きい。近年の少子高齢化による農業従事者の高齢化や減少の問題もあるため、自動かつ高精度に果実サイズや収量を予測できる手法の開発が求められている。

本研究では、ユズ一樹の果実の収穫重量を推定するシステムの開発のために、ステレオ画像処理を用いてユズ果実のサイズ及び重量を推定する手法を提案した。ユズ樹木をステレオカメラで撮影し果実とカメラの距離を計算して果実サイズや重量を推定し、撮影画像に描画される果実の総重量を推定した。また複数方向から撮影し推定した各方向の果実重量の平均値と実収穫重量の単回帰分析を行い、一樹の収穫重量の推定を目指した。

結果として、まず果実サイズ重量推定精度は検出したうちの 8 割程度の果実が誤差 10% 以下でサイズを推定でき、推定果実重も重量推定式と推定果実サイズの誤差に準じた。しかし実収穫重量の単回帰分析の結果は全圃場データの決定係数が 0.49 と低い値をとり、全圃場データと各圃場データの回帰式にも明確な違いが見られた。これらは果実のオクルージョンにより推定果実サイズ重量の誤差増大や推定できない果実が多くなったことが原因であると考えられる。追加検証として一定の補正を加え再度単回帰分析を行った結果、全圃場データの決定係数が 0.61 まで上昇し、回帰式もより近似した。このことから、本手法により高精度に果実重量を推定できれば、一定の係数を用いてユズ一樹の収穫重量を推定できる可能性が示された。そのため、誤差減少のためにオクルージョン果実への対策が重要となる。

キーワード ステレオ画像処理, 果実検出, 果実サイズ推定, 単回帰分析, 収量予測

Abstract

A Study on Yuzu Fruit Yield Prediction Using Stereo Image Processing

MATSUMOTO, Masahiro

To facilitate advantageous trading of yuzu fruit from Kochi Prefecture, which boasts the highest production volume in Japan, it is necessary to predict yuzu yield. However, yield and fruit size assessments in the field are currently conducted through visual inspection, which incurs significant labor and time costs. Furthermore, the aging and decline of agricultural workers due to Japan's decreasing birthrate and aging population necessitate the development of an automated and highly accurate method for predicting fruit size and yield.

In this study, we proposed a method for estimating the size and weight of yuzu fruits using stereo image processing to develop a system for predicting the total harvest weight of a single yuzu tree. By capturing images of the yuzu tree with a stereo camera, we calculated the distance between the fruits and the camera to estimate the fruit size and weight, and we predicted the total weight of the fruits displayed in the captured images. Furthermore, we conducted a simple regression analysis between the average estimated fruit weight from multiple viewing directions and the actual harvested weight to estimate the total harvest weight of a single tree.

As a result, approximately 80% of the detected fruits had their sizes estimated with an error of 10% or less, demonstrating the accuracy of the fruit size and weight estimation. The estimated fruit weight also followed the error trend of the weight

estimation formula and the estimated fruit size. However, the simple regression analysis of the actual harvested weight showed a low coefficient of determination (R^2) of 0.49 for the entire dataset, and there were significant differences between the regression equations for the overall dataset and individual field datasets. This is likely due to increased errors in fruit size and weight estimation, as well as a higher number of undetectable fruits caused by occlusions.

As an additional validation, we applied a certain correction and conducted the regression analysis again, resulting in an improved coefficient of determination (R^2) of 0.61 for the entire dataset, with a regression equation that showed better approximation. These results suggest that if fruit weight can be estimated with high accuracy using this method, the total harvest weight of a single yuzu tree can potentially be estimated using a fixed coefficient. Therefore, addressing the issue of occluded fruits is crucial for reducing estimation errors.

key words Stereo image processing, Fruit detection, Fruit size estimation, Simple regression analysis, Yield prediction

目次

第 1 章	はじめに	1
1.1	研究背景	1
1.2	関連研究	3
1.3	研究目的	5
1.4	本論文の構成	5
第 2 章	関連技術	6
2.1	ステレオビジョン	6
2.2	ステレオカメラキャリブレーション	7
2.3	YOLOv8	7
2.4	ピンホールカメラモデル	8
2.5	エピソード拘束式	9
2.6	回帰分析	10
第 3 章	提案手法	12
3.1	ステレオカメラキャリブレーションと撮影	13
3.2	深層学習による果実検出	13
3.3	検出果実の左右画像の自動対応	13
3.4	果実サイズ・果実重量の推定	15
3.5	各方向の推定果実重量の平均と収穫樹木の収穫重量推定	16
第 4 章	検証	18
4.1	撮影機材	18
4.2	手法検証用環境	18
4.3	ステレオカメラキャリブレーション用画像	19

目次

4.4	果実検出モデルのデータセットと学習結果	19
4.4.1	果実検出モデルの概要とデータセットなど	19
4.5	モデルの評価指標と学習結果	19
4.6	収量予測用検証データ	20
4.6.1	圃場 1: 高知大学物部キャンパス	21
4.6.2	圃場 2: 高知県北川村久府付	22
4.7	果実サイズと果実重の回帰式	24
4.8	収穫重量の単回帰分析の評価指標	24
第 5 章	結果・考察	25
5.1	ステレオ画像処理による果実サイズ・重量推定精度の検証	25
5.2	4 方向の推定重量平均値と樹木収穫重量の単回帰分析	28
5.3	ステレオ法によるサイズ重量推定誤差と収穫重量の回帰分析に対する考察	29
5.4	追加検証: ステレオ法による各方向推定重量を補正した後の回帰分析の再検証	30
5.5	追加検証: 各方向推定重量値を補正した後の回帰分析結果	31
第 6 章	結論	33
	謝辞	34
	参考文献	35

目次

1.1	本手法による圃場単位でのユズ果実推定重量分布	3
2.1	2 眼平行ステレオにおける距離計測の原理	6
2.2	ステレオカメラキャリブレーション用チェッカーボード	7
2.3	ピンホールカメラモデルの例	8
2.4	ピンホールカメラモデルの関係図	8
2.5	エピポーラ幾何	9
3.1	提案手法の流れ	12
3.2	ステレオ左側画像の歪み補正 (左: 補正前, 右: 補正後)	13
3.3	エピポーラ拘束式による左右の検出果実の対応付け	14
3.4	ピンホールカメラモデルによる比例式	15
3.5	本手法による各果実の重量推定結果例	16
3.6	複数撮影による推定平均値と収穫重量の単回帰分析の模式図	17
4.1	高知大学: 樹木の簡易位置関係	22
4.2	高知県北川村久府付: 樹木の簡易位置関係	23
5.1	高知大物部 CP: 各果実サイズ推定結果	26
5.2	各果実重量推定結果	27
5.3	ステレオ推定重量の 4 方向平均と収穫重量の単回帰分析グラフ	28
5.4	推定値の誤差が増大した果実例	29
5.5	サイズ重量が推定できなかった果実例	29
5.6	補正後: ステレオ推定重量の 4 方向平均と収穫重量の単回帰分析グラフ	32

表目次

4.1	YOLOv8 のユズ果実検出モデルの学習結果	20
4.2	高知大学物部キャンパス: 撮影及び収穫情報	21
4.3	高知県北川村久府付: 撮影及び収穫情報	23
4.4	果実サイズと果実重量の回帰式パラメータ	24
5.1	ステレオ推定重量の 4 方向平均と収穫重量の単回帰分析の結果	28
5.2	補正後: ステレオ推定重量の 4 方向平均と収穫重量の単回帰分析の結果 . . .	32

第 1 章

はじめに

1.1 研究背景

高知県のユズは日本国内で一位の生産量を占める高知県の有名な農作物の一つであり、令和 3 年においては高知県が総生産量のうち約 51%を占めている [1]。この生産力を活かすためにユズ樹木に関する様々な管理が必要となるのだが、農作物がどの程度収穫できるか予測する収量予測がユズに限らず農業全体に重要な要素として挙げられる。収穫量は売上額を大きく左右し、その収穫による安定した収益を得るために収穫量の予測が必要となるが、現場では圃場の収量予測やそれに直結する果実サイズの調査は基本目視で行われている。一樹毎の果実のサイズや着果数は完全に一定でなく、また樹木数が多くなるほど調査に膨大な労働力と時間を必要とする。近年では少子高齢化による農業従事者の減少や高齢化も問題視されていること [2] から、自動で高精度に果実サイズの調査や収量予測を行う手法・システムの開発が求められている [3]。

高知県ではユズの収量予測に加え、年毎に豊作と不作を繰り返す「隔年収穫」の防止に必要な葉果比の維持のため、果実数と葉数を自動で計測する手法の研究が行われている。葉数計測において、近年ではレーザー光から周囲の 3 次元環境を点群として計測できる歩行型の LiDAR を用いてユズ樹木の葉数を推定する手法が提案された [4]。果実数の計測には深層学習による物体検出の精度が近年向上していることから果実検出に応用する研究も近年増加している。既存の YOLOv4 を改良しリアルタイムでの検出精度向上を目指した研究 [16] や、地上で撮影した画像から検出した果実数を UAV 画像から得られるスペクトル情報等と組み合わせ一樹の果実数を予測するモデルの入力とした手法も提案されている [5]。また、ユ

1.1 研究背景

ズ果実の検出においては昼間のカラー画像と夜間の赤外モノクロ画像の果実検出精度を比較した研究も行われている [6].

しかし収穫個数ではなく重量単位で収量予測を行う場合において、単純な果実数のみではなく農作物のサイズ及び重量にも着目する必要があると思われる。ユズをはじめ農作物は気候や肥料、また生育方法などの違いにより同品種であっても作物の成長度合いに差が生じることが多い。図 1.1 は本手法を用いて推定したユズ果実の個々の重量を圃場単位でまとめた箱ひげ図だが、同じ高知県内での栽培であるにもかかわらず果実重量の分布が圃場ごとで差が生じている。つまり画像内の果実数から重量単位で収量を予測する場合、果実数が同じでも圃場ごとで果実重量に差があるため高精度に収量を推定できない可能性があると思われる。そのため果実数のみではなく、個々の果実サイズ及び重量も考慮に入れる必要があると考えられる。

そこで我々はステレオ画像処理に注目した。ステレオ画像処理とは2つ以上のカメラを並列して同時撮影した画像群を用いて画像内の物体の3次元位置等を計測する手法である。農業分野においてもステレオカメラや距離計測が行えるカメラを利用した研究が行われており、草刈り機の安全運転のための距離計測 [14] やコンバインの自動運転における安全対策 [8] など、主に農業用機械との融合による動作制御の研究が多く行われている。また、農作物のサイズ推定もこれまでにあったが [9], 果樹とりわけ柑橘類において、ステレオカメラを用いて重量単位での収量予測を行った研究は今までに少ない。

そのため、本研究ではユズ収量予測のために必要な樹上のユズ果実サイズ及び重量をステレオ画像処理をはじめとする複数の技術を用いてこれらを推定する手法を提案する。加えて本手法により推定したステレオ画像の推定収量と実際の収穫重量を回帰分析を用いて調査し、ステレオ画像から得られる情報からユズ一樹の収穫重量を推定する方法も提案する。

1.2 関連研究

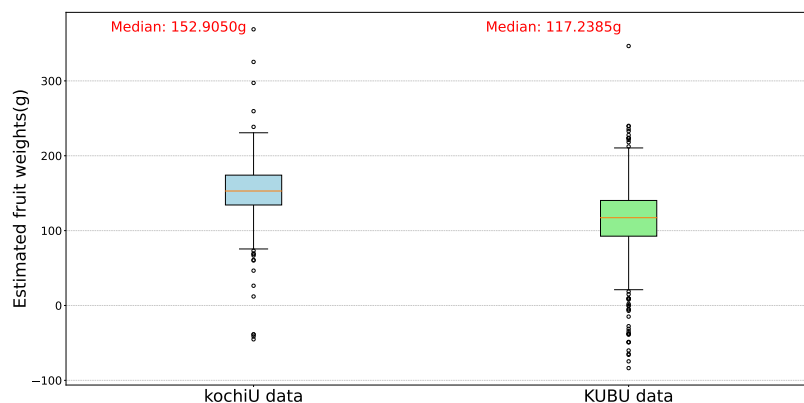


図 1.1 本手法による圃場単位でのユズ果実推定重量分布

1.2 関連研究

これまで果実の収穫量の予測やその調査方法に関する研究はいくつか行われており，深層学習による物体検出の技術が台頭したことにより，農業においても果実を深層学習によって検出する手法が検討されている．

ユズ以外の農作物においても，深層学習による物体検出を用いた農作物検出が多く研究されている．単純な検出の試みだけでなく，YOLOv4 に 2 つのアルゴリズムを用いてモデルを改良し果樹園における柑橘類の検出精度を向上させたり [11]，既存の YOLO に ViT を組み込んで柑橘類の検出精度及び検出速度の向上を検討した研究もある [12]．熱画像と組み合わせることにより未成熟柑橘類の検出精度が 86.6% から 95.5% に上昇したり [13]，学習データセット内に不整合なラベル付けがされたデータを自動で検出するためにアノテーション画像内の不正ラベルを検出する深層学習 [9] など，様々な応用を加えたうえでの研究がなされている．先行研究 [6] においては，太陽の向きや天候によりユズ果実の検出精度が大きく変化する昼間のカラー画像と明るさを固定しやすく葉と果実の見分けが付きやすい夜間に赤外ライトを照らしたモノクロ画像の検出精度の比較が行われている．結果としては，F1 スコアにおいてカラーが 0.82，赤外モノクロが 0.90 を示し赤外モノクロ画像の方が検出精度が良いことが示された．そのため本研究でも赤外モノクロ画像に対して果実検出を行って

1.2 関連研究

いる.

ステレオビジョンを農業に応用した例も多く、主な研究先としては収穫ロボットや草刈り機などの動作精度向上を目的としたものが多い。収穫機械では、トマトの自動収穫ロボットがトマトの収穫時に果柄と呼ばれる部分の距離を、3次元カメラで認識して3次元位置の復元を行い、切断部位の認識精度を向上させた [7] 例がある。また梨を自動で収穫するためにピッキングマシンに搭載されるステレオ画像内の梨の検出精度を検証を行い、mAP が 80% 以上をとった研究 [18] など、深層学習とも併用した研究が台頭しつつある。加えてレーザ光により画像内の距離が計測できる Kinect を用いてパブリカの草高を計測したり [15]、同様に深層学習で検出したリンゴのサイズを計測した [17] 研究例もある。これら 2 つの研究はサイズ計測だけでなく、計測サイズから草高やリンゴの成長率予測やリンゴの落果率の推定も行われていることから単純なサイズ計測以外にも応用がなされている。

画像による収量予測も撮影機材やコンピュータの性能向上により近年研究が多くなされるようになった。YOLO を用いて検出したトマトから点群データを作成しサイズを、色相から熟度を推定し収量を予測した研究 [20] があり、深層学習による果実検出から熟度も踏まえて収量を予測している。また地上から稲を撮影したカラー画像から直接 CNN を用いて収量の比較を行い、収量に対する決定係数が 0.68 を示す研究も行われている [21]。果実数の推定ではクラスタリングアルゴリズムを用いて画像からリンゴの果実検出及び果実数の推定が行われており、複数の品種及び照明条件においても F1 スコアが 0.95 から 0.97 と非常に高い検出精度となり、列ごとによる収量推定でも 94% 程度の精度を達成している [22]。ただ、柑橘類においては画像から重量単位での収穫重量の推定を目指した研究は少なく、果実サイズ把握と一樹の収穫重量推定に焦点を当てるためにステレオビジョンと深層学習に着目し研究を行った。

1.3 研究目的

1.3 研究目的

1.1 節及び 1.2 節より本研究では，ユズ果実の一樹の収穫重量を高精度かつ低コストに自動で予測するシステムの開発のために，ステレオ画像処理を利用してユズ果実のサイズと重量を推定する手法を提案し，個々の果実重量の推定精度や一樹の収穫重量との関係性を調査して手法の精度検証を行った．

1.4 本論文の構成

本論文では，2 章で本研究の関連技術について述べる．その後に 3 章で提案手法の流れと各手順について述べる．4 章で本研究で提案した手法の検証に用いる機材やデータの詳細を述べ，その検証結果や考察を 5 章で述べる．最後に 6 章で本研究の結論を述べる．

第 2 章

関連技術

2.1 ステレオビジョン

三角測量に基づいた距離計測の一つで、2 つ以上の視点が異なるカメラの画像から、物体との距離や 3 次元位置を復元する手法である。一つのカメラ中心から画像上の物体座標を通り物体の位置を線で結び (視線)、他のカメラでも同様に視線をつなぐと複数の視線同士が交差して 3 次元的な位置関係が成り立つため、3 次元位置を推定できる。実際に 2 つに平行に並べた 2 眼ステレオカメラで三角測量を行う場合には、物体の各左右画像における位置のズレである**視差**を用いて距離ないし 3 次元位置を計測することが多い (図 2.1)。

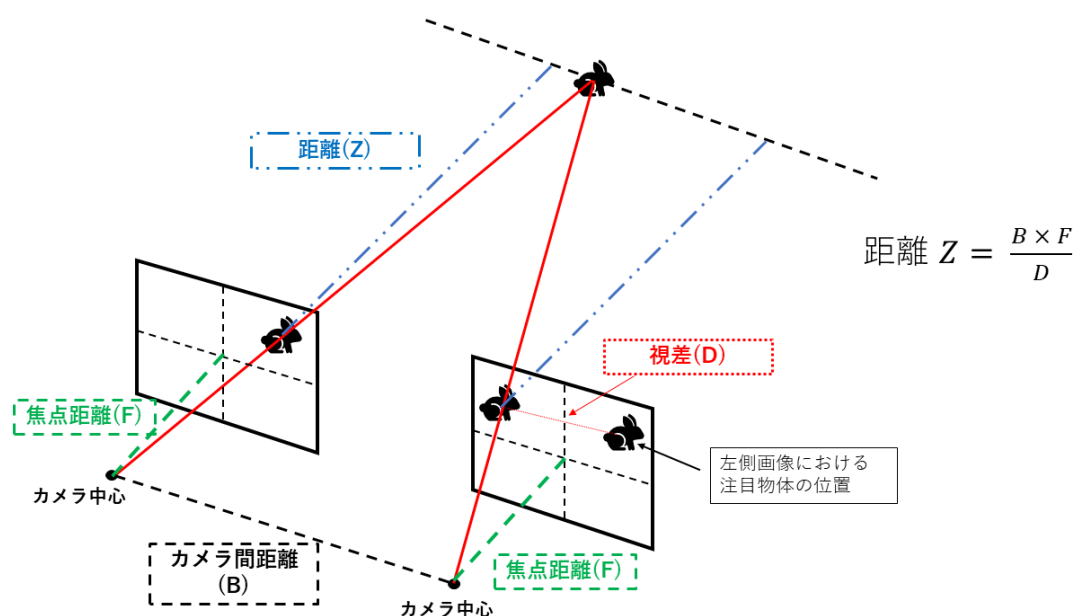


図 2.1 2 眼平行ステレオにおける距離計測の原理

2.2 ステレオカメラキャリブレーション

ステレオカメラキャリブレーションは、各カメラの内部及び外部パラメータを推定する方法のことである。基本撮影したカメラ画像はレンズによる歪みが残っており、また焦点距離を用いた画像処理を用いる場合カメラのパラメータが必須になるため、カメラキャリブレーションが必要となる。特にステレオ画像処理を行う場合各カメラの焦点距離や歪み係数などを推定した**内部パラメータ**だけでなく、複数カメラ同士の向きや位置関係を推定した**外部パラメータ**も必須となるため、ステレオ撮影による処理を行う場合必要となる。

ステレオカメラキャリブレーションを行う場合図 2.2 のようなチェッカーボード等のキャリブレーションターゲットが必要となる。

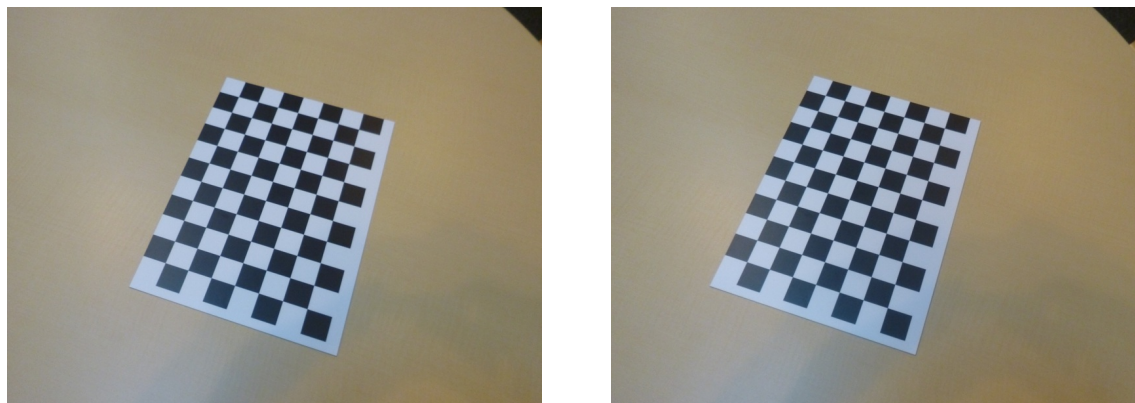


図 2.2 ステレオカメラキャリブレーション用チェッカーボード

2.3 YOLOv8

YOLOv8 とは Ultralytics 社が提供する深層学習ベースの物体検出フレームワークである。YOLO の名称は You Only Look Once の略称であり、最初のバージョンが制作されて以降様々な人物または団体によってバージョンアップを行ってきた。従来のバージョンより精度及び速度に優れ、物体検出のみならずインスタンスセグメンテーションやクラス分類など様々なタスクを提供している [28]。

2.4 ピンホールカメラモデル

ピンホールカメラは、カメラを一つの箱として見立てた場合中心部に一か所穴 (ピンホール) を空け、その穴に入射する光を投影する初期のカメラ (ピンホールカメラ) を幾何学的なモデルにした、画像生成における最初のカメラモデルである。ピンホールを通った光は投影面上で反転していることが特徴であり、このピンホールを光学中心と呼び、光学中心を通り投影面に垂直に接する直線を光軸と呼ぶ。このカメラモデルにおいて、光学中心と投影面の距離を焦点距離 f 、物体の実際の大きさを Y 、物体と光学中心までの距離を Z 、投影面上の物体の大きさを y とすると次の比例式が成立する [23]。

$$\frac{Y}{Z} = \frac{y}{f}$$

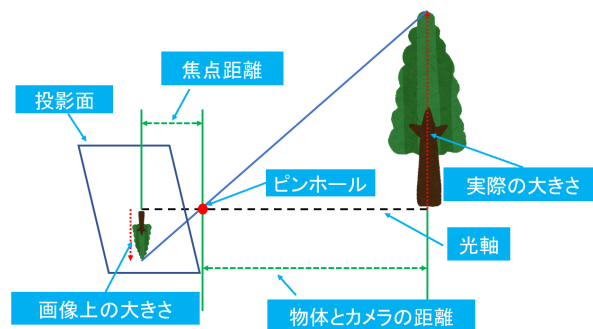


図 2.3 ピンホールカメラモデルの例

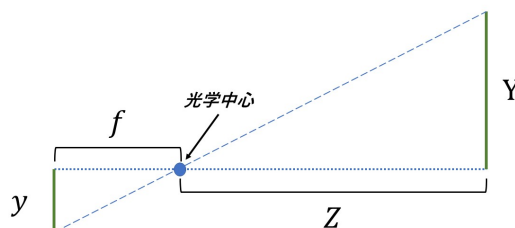


図 2.4 ピンホールカメラモデルの関係図

2.5 エピポーラ拘束式

エピポーラ拘束式は、2つのカメラで物体を撮影したときに、画像間と物体の幾何学的な位置関係を表すエピポーラ幾何の関係が生じた際に成り立つ方程式である。まず、ある画像と光学中心と物体の位置を線で結び、もう片方の画像でも同様に結ぶ。次に二つの画像のカメラ光学中心を線で結ぶ。カメラの光学中心どうしを結んだ際に画像上を通る点を**エピポール**と呼び、エピポールと画像上の物体座標を通る画像上の線を**エピポーラ線**と呼ぶ。また、エピポーラ線を除く3つの線によりできたカメラの光学中心と物体の平面を**エピポーラ平面**と呼ぶ。物体がこの関係にあるとき、画像上の投影点のうちカメラ1側の同次座標を含めた画像座標を m_1 、もう片方の画像座標を m_2 、ステレオカメラキャリブレーションによって推定される 3×3 の行列 (**基礎行列**) を F とすると、次の式が成り立つ。

$$m_2^T F m_1 = 0$$

つまり二つの画像上で同一の物体が描画されていた場合、その画像座標と基礎行列を用いた計算結果は必ず0となることが成り立つ [23]。

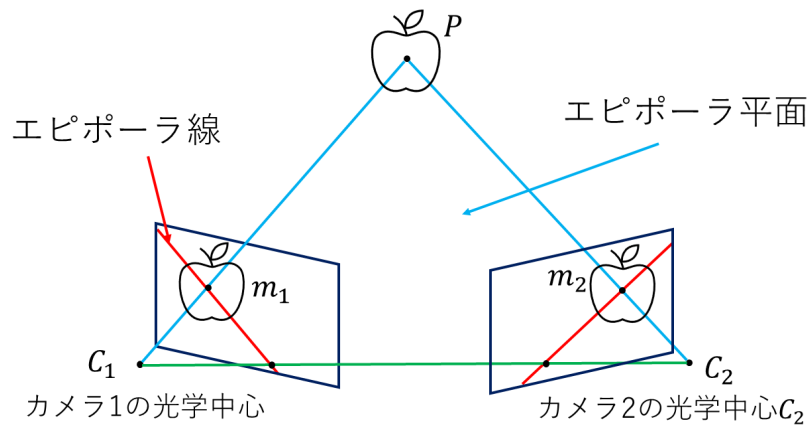


図 2.5 エピポーラ幾何

画像座標 m_1 と m_2 は各カメラの座標に同次座標 1 を加えた 3 行 1 列の行列であり、基礎行列 F はカメラ 1 の 3×3 の内部パラメータ行列を A_1 、カメラ 2 の 3×3 の内部パラ

2.6 回帰分析

メータ行列を A_2 , カメラ 1 に対するカメラ 2 の回転量を示す 3×3 の回転ベクトル行列を R , カメラ 1 に対するカメラ 2 の移動量を示す平行移動ベクトル t をもとにした以下の行列 (2.1) を用いて以下の式 (2.2) を求めることで計算する.

$$[t]_{\times} = \begin{bmatrix} 0 & -t_3 & t_2 \\ t_3 & 0 & -t_1 \\ -t_2 & t_1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

$$F = (A_2^{-1})^T [t]_{\times} R A_1^{-1} \quad (2.2)$$

2.6 回帰分析

ある複数の値が存在するデータにおいて、特定の値を予測したい場合に用いる解析が回帰分析である。これは、入力となる値である**説明変数**から一定の式により推測したい値**目的変数**を説明するモデルを作成することが出来る。説明変数が一つるとき**単回帰分析**と呼ばれ、二つ以上説明変数が存在する場合**重回帰分析**と呼ばれる。

単回帰分析では説明変数が一つであるため、直線的な回帰方程式の場合において説明変数を x , 目的変数を y とした場合に以下の式

$$y = ax + b$$

が成り立つ、**回帰係数**と呼ばれる a と b の最適値を、データ群に対する最小二乗法などにより計算する。最小二乗法を用いて回帰方程式の係数 a と b を求める場合、回帰式による目的変数の予測値と実測値の差を表す**残差**を各データで二乗して足し合わせた**残差平方和**を最小化することで求めることが出来る。残差 ϵ は以下の式 2.3 で示され、残差平方和 Q は残差の式を代入して以下の式 2.4 で表すことが出来る。なお実測値は y , 予測値は $Y = ax + b$ とする。

$$\epsilon_i = \sum_{i=1}^n (y_i - Y_i) = \sum_{i=1}^n (y_i - (ax_i + b)) \quad (2.3)$$

2.6 回帰分析

$$Q = \sum_{i=1}^n \epsilon_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - (ax_i + b))^2 \quad (2.4)$$

中略するが、 a について式 2.4 を解くと共分散を説明変数 x の分散で割った式で表すことが出来る。そのため回帰係数 a と b は共分散や各データの平均値などを用いてそれぞれ以下の式 2.5, 2.6 で示される [29].

$$a = \frac{S_{xy}}{S_x^2} = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})(x_i - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2.5)$$

$$b = \bar{y} - a\bar{x} \quad (2.6)$$

第 3 章

提案手法

本研究における提案手法の流れを図 3.1 に示す。提案した手法はステレオ画像内のユズ果実の総重量を推定する方法であり、さらに同一樹木を複数方向から撮影した各ステレオ画像により推定した果実重量の平均値を用いて一樹の収穫重量の推定を目指した。本章では提案手法の各手順について記述する。

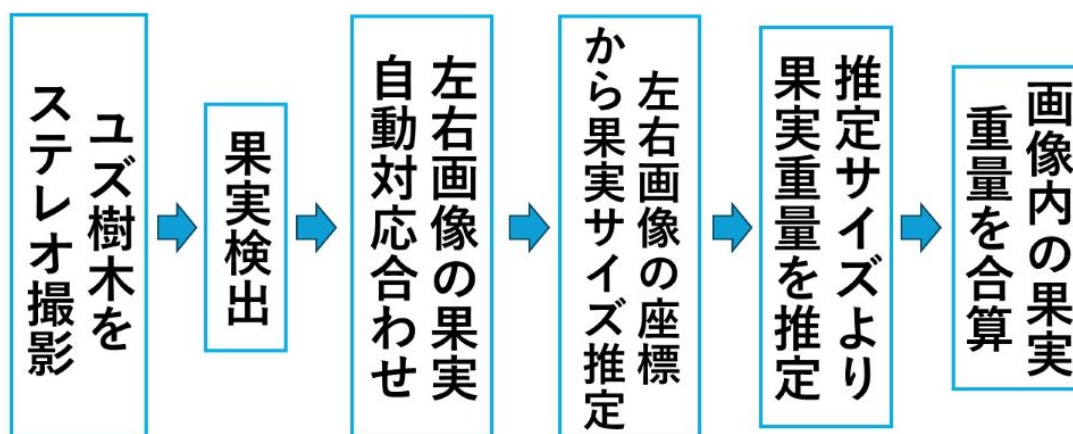


図 3.1 提案手法の流れ

3.1 ステレオカメラキャリブレーションと撮影

3.1 ステレオカメラキャリブレーションと撮影

まずチェッカーボード等を撮影しそれを用いてステレオカメラのキャリブレーションを済ませ、内部パラメータや外部パラメータ等を取得する。ステレオカメラキャリブレーションを完了させたステレオカメラを用いてユズ樹木の撮影を行う。撮影した画像にはレンズによる歪みが発生し、距離計算を行うには歪みが無い場合の画像座標を用いる必要があるため、深層学習による果実検出の前に画像の歪み補正を行う。

3.2 深層学習による果実検出

歪み補正を行った左右の画像に対して深層学習による物体検出を用いて果実を検出する。図 3.2 は歪み補正を行う前後の画像である。



図 3.2 ステレオ左側画像の歪み補正 (左: 補正前, 右: 補正後)

3.3 検出果実の左右画像の自動対応

ユズ樹木画像は基本的に果実が数十個単位で描画されるため、左右画像で検出した果実を手作業で対応させるとなると作業コストが大幅に増加する。そこで果実の同一判定方法にエピポーラ拘束式を利用した。節 2.5 に示すように、左右の画像で同一の物体が描画されている場合エピポーラ幾何の関係が成り立ち、エピポーラ拘束式の値が 0 となる。そのため左右の画像で同一果実が描画されているならば、その中点座標によるエピポーラ幾何が成り立ち

3.3 検出果実の左右画像の自動対応

拘束式の値が 0 に近似すると考え、左右果実の同一物体を判定する方法として採用した。本研究では左側画像で検出された果実領域の中心座標 (以後果実座標) を基準に右側画像で検出した果実座標とのエピポーラ拘束式を計算し、0 に最も近似する拘束式の値となった右側果実を同一の果実とした。その例を図 3.3 に示す。

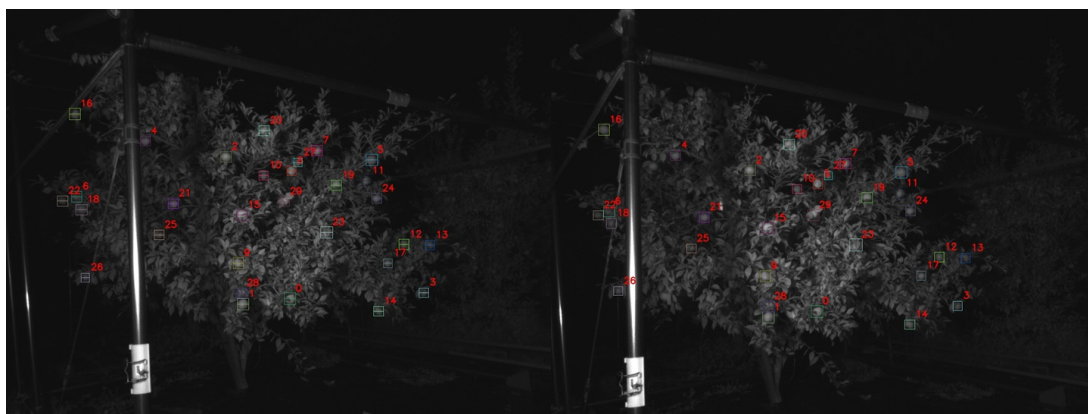


図 3.3 エピポーラ拘束式による左右の検出果実の対応付け

エピポーラ拘束式により左右画像の各果実の同一対応を合わせた後は、対応した左右の果実座標を用いた三角測量により果実とカメラの距離を求める。

3.4 果実サイズ・果実重量の推定

果実とカメラの距離を求め、ピンホールカメラにおける幾何学的原理を用いた比例式により果実サイズを推定する。ピンホールカメラモデルの関係図は図 3.4 で示され、また方程式は以下の数式 3.1 で表現される。

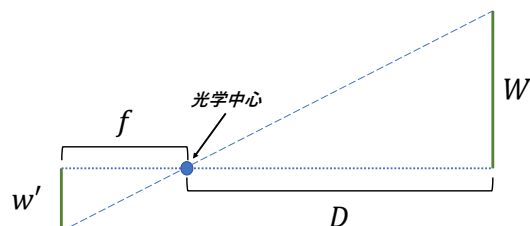


図 3.4 ピンホールカメラモデルによる比例式

$$\frac{W}{D} = \frac{w'}{f} \quad (3.1)$$

- W : 物体の実寸サイズ
- D : カメラ光学中心と物体の距離
- w' : 投影面上の物体のピクセルサイズ
- f : カメラの焦点距離

ここで、カメラ光学中心と物体の距離 D は先ほど求めたカメラと果実の距離を用いて、果実サイズを W 、画像上果実のピクセル幅を w' としたとき式 $W = \frac{w'}{f} \times D$ とすると、画像上で検出した果実サイズを推定できる。ただし画像上の果実幅は単位が pixel であるため、カメラのセンササイズと解像度の比を計算して 1pixel 単位の実寸サイズを計測して単位を変換した。

最後に検出果実の推定サイズを用いて果実重量を推定する。果実サイズと果実重量にはある程度の相関があるため果実サイズから重量を推定できると仮定し、事前に分析した果実サイズと果実重量による単回帰式を用いた。最後に個々の推定果実重量を足し合わせるこ

3.5 各方向の推定果実重量の平均と収穫樹木の収穫重量推定

で、そのステレオ画像に描画される全果実の収穫重量を推定する。出力例を図 3.5 に示す。



図 3.5 本手法による各果実の重量推定結果例

3.5 各方向の推定果実重量の平均と収穫樹木の収穫重量推定

ここまではある方向から撮影したステレオ画像に描画された個々の果実の推定重量合計値を求める方法であるが、この推定重量を一樹の収穫重量に対するサンプル重量とみなし、回帰係数など一定の係数をかけることによって一樹の収穫重量の推定を目指した。本手法ではステレオ撮影によるサンプル推定重量と一樹の実収穫重量の単回帰分析を行っている。また、撮影方向が違うと描画される果実数等の違いによりサンプルする推定重量が変化するため、複数方向から撮影を行い各方向の推定重量値の平均をとり代表サンプル値とした。模式図を図 3.6 に示す。

3.5 各方向の推定果実重量の平均と収穫樹木の収穫重量推定

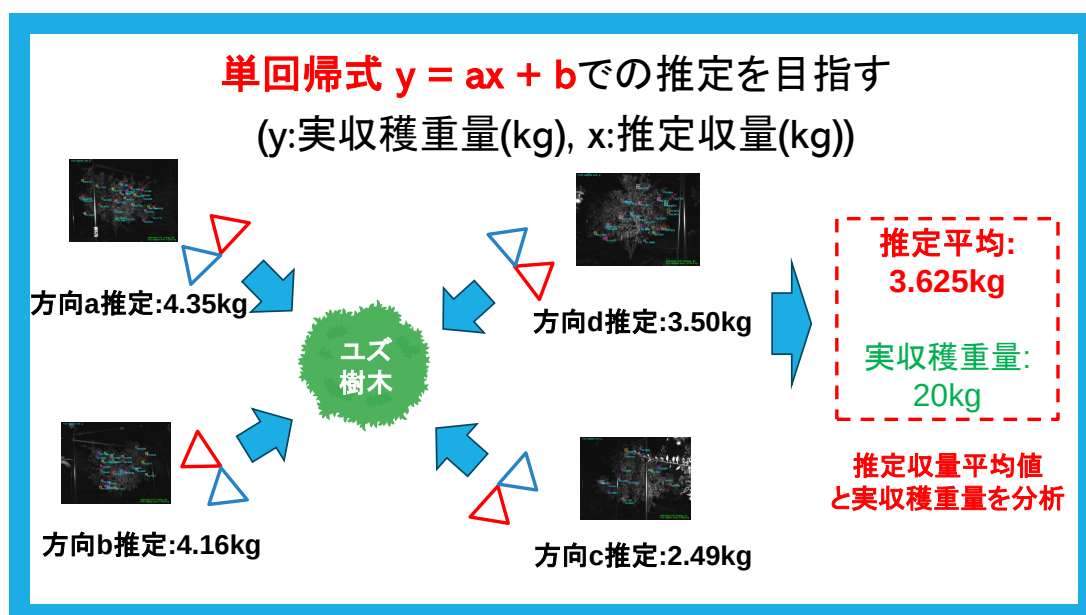


図 3.6 複数撮影による推定平均値と収穫重量の単回帰分析の模式図

第 4 章

検証

4.1 撮影機材

本研究でステレオ画像の撮影に使用した機材について示す。カメラは The Imaging Source 社のモノクロ撮影用カメラ”DMK33UX273”を使用した [25]。このカメラは解像度が横 1440px × 縦 1080px であり、センササイズは幅 4.97mm × 縦 3.7mm の 1/2.9 インチ型である。このカメラを 2 つ準備し、同社が提供する専用のステレオ撮影用カメラ固定器具に平行に取り付けた。レンズは株式会社タムロンの赤外光対応レンズ”13FM04IR”を使用した [26]。このステレオカメラを Windows10 が搭載されているラップトップ PC に USB3.0 で接続し撮影を行った。撮影はアルゴ社が提供する SDK をインストールした上で、同社が提供する撮影用 Python コードを本研究用に改造したものを使用した。

4.2 手法検証用環境

本研究におけるステレオカメラキャリブレーション、果実検出及び果実重量推定の環境を示す。いずれも同一の Windows11 及び GeForce RTX3090 を搭載しているデスクトップ PC で行った。

ステレオカメラキャリブレーションは Matlab 2022b のステレオカメラキャリブレーション用アプリを利用してそれぞれのカメラの内部パラメータや外部パラメータ、基礎行列などを算出した [24]。

4.3 ステレオカメラキャリブレーション用画像

三角測量によるステレオ画像内物体の距離を求めるためにステレオカメラキャリブレーションを行った。4.1 節で述べたステレオカメラでチェッカーボードを撮影し、Matlab 上のステレオカメラキャリブレーション用アプリを起動してキャリブレーション画像を読み込む。その後ステレオカメラキャリブレーションを行い内部パラメータ等を取得した。本研究ではキャリブレーション画像ペアを 97 組使用した。

4.4 果実検出モデルのデータセットと学習結果

4.4.1 果実検出モデルの概要とデータセットなど

本研究では 2.3 節で概説した YOLOv8 による物体検出を使用した。学習時のハイパーパラメータやデータ拡張方法などは先行研究 [6] を踏襲している。また学習に利用した画像は 4.1 節のステレオカメラを用いて 2022 年と 2023 年に高知県三原村と北川村 (後述の久府付除く) のユズ圃場で撮影したユズ樹木画像を使用している。ステレオ画像の左側のみの計 202 枚を学習データ 162 枚、検証データ 20 枚、テストデータ 20 枚に分けて事前学習済みモデルの yolov8x を用いて学習を行った。

4.5 モデルの評価指標と学習結果

本研究における果実検出は先行研究 [6] を踏襲しているため、ここでモデルの学習結果を示す。本研究においてユズ果実を正しく検出できた数を真陽性 TP 、検出したが間違っていた数を偽陽性 FP 、検出こそしなかったが実際には存在した (見逃した) 数を偽陰性 FN とした場合に使用する評価指標を適合率 $P(Precision)$ 、再現率 $R(Recall)$ 、F1 スコアの 3 つで示す。適合率は陽性と識別したうちの真陽性がどの程度あるかを示し、再現率は全ての陽性に対してどの程度陽性と識別できたかを示し、F1 スコアは適合率と再現率の調和平均を示しており、F1 スコアが高いほど適合率と再現率がバランスよく高い評価となる。計算式

4.6 収量予測用検証データ

はそれぞれ以下の式 4.1, 4.2, 4.3 で示す [30].

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP} \quad (4.1)$$

$$Recall = \frac{TP}{FN + TP} \quad (4.2)$$

$$F1 - score = 2 \times \frac{PR}{P + R} \quad (4.3)$$

本研究で使用する果実検出モデルの学習結果を以下の表 4.1 に示す. 先行研究における赤外モノクロ画像のユズ検出精度は F1 スコアが 0.90 を示していることから, 同程度の精度でユズ果実を検出することが示された. よって本研究ではユズ果実検出にこのモデルを使用している.

表 4.1 YOLOv8 のユズ果実検出モデルの学習結果

	検証データ	テストデータ
<i>Precision</i>	0.91	0.91
<i>Recall</i>	0.91	0.84
<i>F1 - Score</i>	0.91	0.87

4.6 収量予測用検証データ

本研究による樹木毎の収穫重量の推定精度を検証するために, 2 つのユズ圃場で撮影を行った. どちらの圃場も撮影時間は 18 時から 21 時の間で, 対象樹木を波長 850nm の赤外光ライト [27] で照らし撮影した. 本研究では対象樹木を複数の方向から撮影し, 各方向の推定果実重量を平均した値と実収穫重量の回帰分析を行っており, 今回の検証は基本的に 90 度ずつを基準に 4 方向から撮影した. しかし一部は 4 方向以外での撮影を行っている樹木もあるため, 都度注釈を入れる.

4.6 収量予測用検証データ

4.6.1 圃場 1: 高知大学物部キャンパス

高知大学の物部キャンパス内にあるユズ圃場の収穫情報を表 4.2 に、簡易的な位置関係図を図 4.1 に示す。この圃場はユズを始め様々な農作物等が高知大学によって管理されており、本研究で使用了圃場は複数あるユズ樹木のうちの一角である。撮影日は **2024 年 10 月 31 日** に行い、**同年 11 月 12 日** に高知大学が対象樹木の全果実を収穫した。

撮影方向数は D-3 のみ 6 方向となっているが、そのうち 4 方向の画像を収穫重量推定に使用した。また本圃場は樹木毎の間隔が非常に狭く生育用の鉄棒等が張り巡らされていたため、撮影画角の確保に十分な距離が取れなかったり画像に遮蔽物が写り一部の果実が見えない状況が発生していた。その影響もあり、樹木 D-2 は 2 方向しか撮影できなかったため収穫重量の推定データからは省いている。

本圃場は高知大学により摘果をはじめとする適切な管理が行われており、また各果実に番号が割り当てられ収穫時にサイズと重量が計測されている。そのため撮影後日に左側画像に描画される果実番号を確認し、本手法により推定した果実重量と計測されたサイズ及び果実重量の比較も行った。

表 4.2 高知大学物部キャンパス: 撮影及び収穫情報

樹木名	撮影方向数	収穫個数	実収穫重量 (kg)
C-1	4	161	23.85
C-2	4	218	32.7
C-3	4	100	15.17
D-1	4	148	25.2
D-2	2	136	19.88
D-3	6	147	25.42

4.6 収量予測用検証データ

2024年10月31日

高知大学物部CP

- 撮影方向数
 - D-2: 2方向
 - D-3: 6方向
 - それ以外4方向
- 収穫データ
 - 収穫日時: 11月12日
 - C-1: 23.85kg
 - C-2: 32.7kg
 - C-3: 15.17kg
 - D-1: 25.2kg
 - D-2: 19.88kg
 - D-3: 25.42kg



図 4.1 高知大学: 樹木の簡易位置関係

4.6.2 圃場 2: 高知県北川村久府付

高知県北川村の久府付にあるユズ圃場の収穫情報を表 4.3 に、簡易的な位置関係図を図 4.2 に示す。この圃場は一般農家の方が所有している圃場の一角で樹木毎に名称を割り振られていないため、高知大学との協議で仮の名称をつけた。撮影日は **2024 年の 12 月 19 日** に行い、収穫は翌日に我々の研究室生により対象樹木の全果実を収穫した。

この圃場は農家の方の事情により夏以降に摘果をはじめとする適切な管理が出来ていない状態であった。そのため原因は特定できていないがほかの圃場よりも樹木毎の果実数が多いがサイズが小さい傾向が見られた。また個々に番号が割り振られていないため収穫した果実毎のサイズや重量は時間の関係上ほぼ計測できていない。

この圃場で撮影した樹木のうち 4 本程度は 45 度ずつを基準に 8 方向で撮影している。そのため収穫重量を予測する際には、まず 90 度ずつ 4 方向のデータを選択して一つの平均値とし、選択されなかった残りの 4 方向のデータの平均をとりもう一つのデータとして扱った。つまり 8 方向撮影した樹木は 2 個の平均値を持つ扱いとなる。

4.6 収量予測用検証データ

表 4.3 高知県北川村久府付: 撮影及び収穫情報

樹木名	撮影方向数	収穫個数	実収穫重量 (kg)
A-1	8	203	24.64
A-2	8	186	21.36
B-1	8	186	18.16
B-2	4	334	32.48
B-3	4	322	31.46
C-1	4	297	26.94
C-2	8	186	20.78

2024年12月19日

北川村久府付

- 撮影方向数
 - A-1, A-2, B-1, C-2: 8方向
 - B-2, B-3, C-1: 4方向
- 収穫データ
 - 収穫日時: 12月20日
 - A-1: 24.64kg
 - A-2: 21.36kg
 - B-1: 18.16kg
 - B-2: 32.48kg
 - B-3: 31.46kg
 - C-1: 26.94kg
 - C-2: 20.78kg

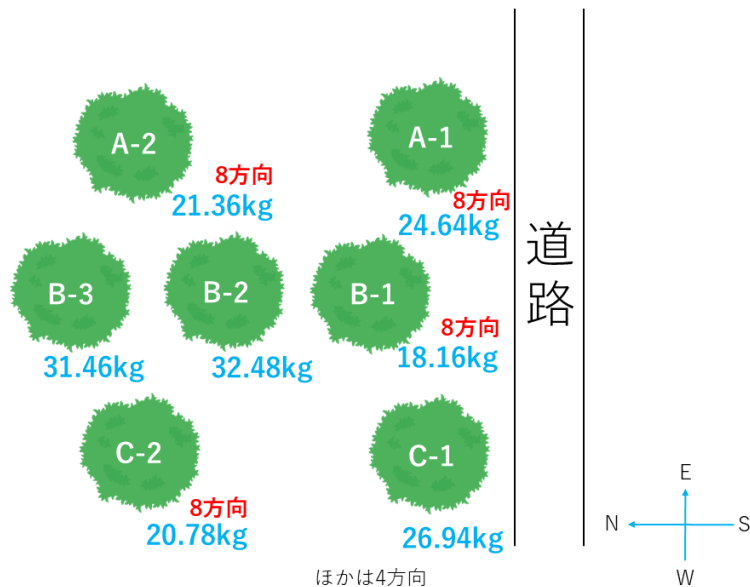


図 4.2 高知県北川村久府付: 樹木の簡易位置関係

4.7 果実サイズと果実重の回帰式

4.7 果実サイズと果実重の回帰式

本研究における個々の果実重量推定に利用する，果実サイズと果実重の回帰式は高知大学より提供されたパラメータを利用した． $y = ax + b$ の単回帰式において y : 果実重量 (g)， x : 果実サイズ (mm) としたときの回帰式の情報を以下の表 4.4 に示す．

表 4.4 果実サイズと果実重量の回帰式パラメータ

a	4.53712681
b	-175.8222987
相関係数 r	0.936
MAE	6.7

4.8 収穫重量の単回帰分析の評価指標

各ステレオ画像方向における推定重量の 4 方向平均値と実際の収穫重量に対する単回帰分析について，結果の評価指標に決定係数 R^2 を用いる．決定係数とは回帰式の当てはまりの良さを示す指標であり，目的変数を回帰式で予測した値の分散を実際の目的変数値の分散で割ることで計算できる．回帰式の予測精度が最良ならば予測値の分散と実測値の分散は同値になるため，決定係数の値が 1 を示すことから決定係数が 1 に近いほど回帰モデルの精度が良いことを示す．

回帰分析は物部 CP・久府付を合わせたデータ (以下全データ) 及び各データによる回帰分析も行い，決定係数及び各回帰式の比較も行った．

第 5 章

結果・考察

この章では、本手法による個々の果実サイズと果実重量の推定結果を 5.1 節に、各方向の推定重量の 4 方向平均値と一樹の収穫重量に対する回帰分析の結果を 5.2 節に示す。その結果に対する考察を 5.3 節で示した後に追加の検証内容を 5.4 節に示した後その結果を 5.5 節に示している。

5.1 ステレオ画像処理による果実サイズ・重量推定精度の検証

物部 CP で撮影したデータにおいて、各ステレオ画像内に描画される個々の果実で推定出来たサイズの精度を以下の図 5.1 に示す。図 5.1 は各果実サイズの実測値と推定値を散布図として示したものであり、横軸と縦軸にはそれぞれ実測サイズと推定サイズをとっている。実測値と同値の推定値の直線をグラフ内の青点線として描画しているため、サイズの推定誤差が大きい果実ほどグラフに対して垂直に青点線から離れる形となる。サイズが推定できた果実のうち 8 割の果実が実測サイズに対して 10%未満の誤差率でサイズ推定できる結果となった。

また、同様に個々の果実重量推定結果を図 5.2 に示す。図 5.2 も先述の図 5.1 と同様に各果実重量の実測値と推定値を散布図として示している。重量推定結果の誤差率が 20%以下になる果実は全体のうち 7 割程度であった。

本研究では果実重量の推定において単回帰式を利用しているため、果実サイズが真値に近くても推定重量の誤差が大きく生じたり、異なる果実サイズ間で同程度のサイズ推定誤差率であっても推定重量の誤差率が大きく変化する可能性がある事が考えられる。提供された回

5.1 ステレオ画像処理による果実サイズ・重量推定精度の検証

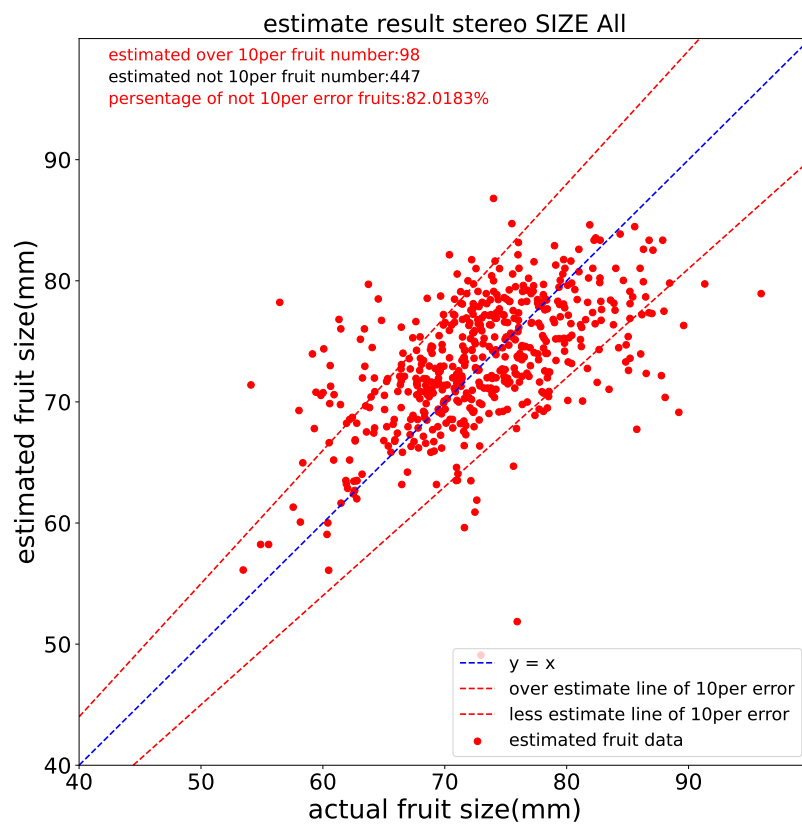


図 5.1 高知大物部 CP: 各果実サイズ推定結果

帰式と各果実サイズの実測値を用いて重量推定を行うと、計測した果実のうち 9 割弱程度が誤差率 20%以内に分布していた。そのため、回帰式の精度を踏まえると重量についても比較的高精度に推定できていると考えられる。

5.1 ステレオ画像処理による果実サイズ・重量推定精度の検証

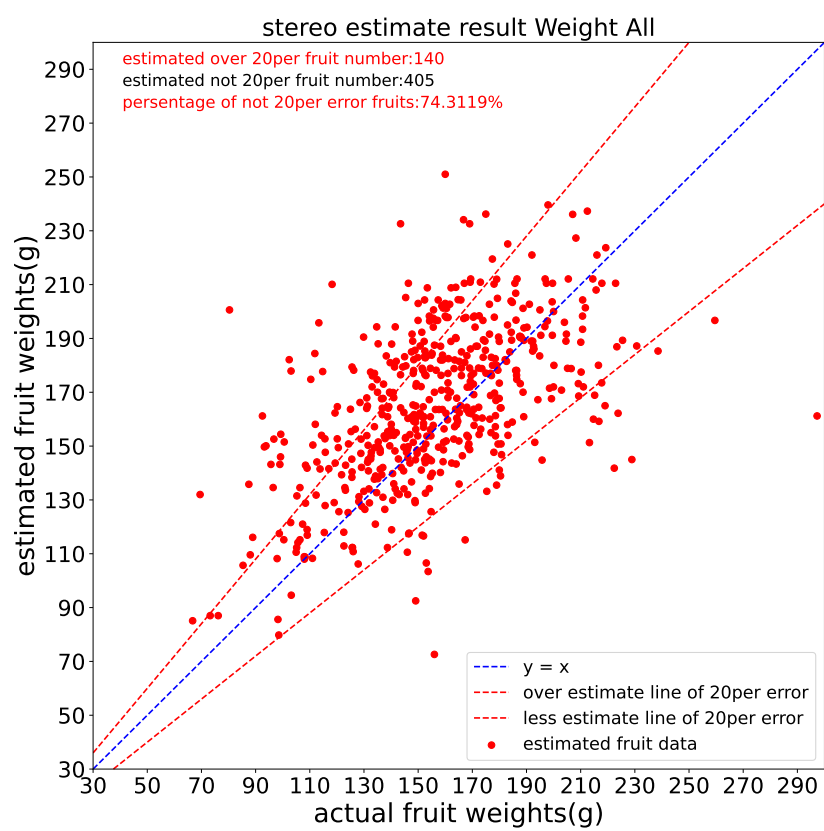


図 5.2 各果実重量推定結果

5.2 4方向の推定重量平均値と樹木収穫重量の単回帰分析

物部 CP と久府付でそれぞれ撮影したステレオ画像から推定した果実重量の4方向分を平均した代表値と収穫重量の単回帰分析を行った結果を表 5.1 に、グラフを図 5.3 に示す。圃場全てのデータによる単回帰分析の結果は決定係数が 0.49 となり、各圃場のデータのみで単回帰分析を行った場合物部 CP は 0.92 で久府付は 0.66 となり、回帰式にも明確な違いが見られた。

表 5.1 ステレオ推定重量の4方向平均と収穫重量の単回帰分析の結果

	全圃場データ	物部 CP	北川村久府付
R^2	0.49	0.92	0.66
a	3.0128	5.0606	3.9426
b	9.8574	5.3175	3.6744
$RMSE$	3.5563	1.6207	2.7333
MAE	2.9932	1.3023	1.9969

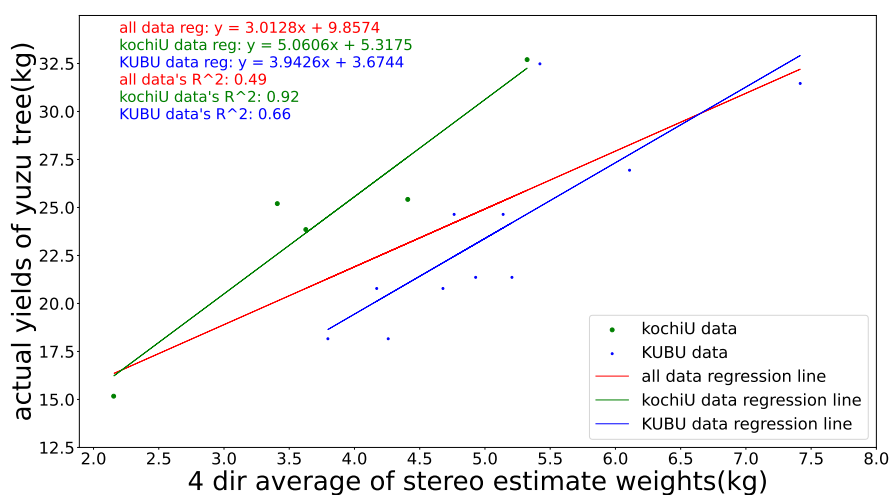


図 5.3 ステレオ推定重量の4方向平均と収穫重量の単回帰分析グラフ

5.3 ステレオ法によるサイズ重量推定誤差と収穫重量の回帰分析に対する考察

5.1 節では、推定した果実のうち一部が推定誤差 10%を超えてサイズが推定される現象が発生したり、また果実が描画されているにも関わらずサイズ重量推定が出来ていない果実があることも確認された。特に一部方向のステレオ画像では推定不可果実が多く、5.2 節において明確に合計推定値が低下していると思われる結果も見られた。果実のサイズ重量が推定出来なかったり推定誤差が増大する原因は対象物体が他物体により遮蔽されるオクルージョンにあると思われる。図 5.4 は、オクルージョンが原因で YOLO による果実領域の推論が理想よりも過小な範囲で推論されたため推定サイズ及び重量が過小評価となった果実の例である。この果実ではサイズ実測値が 70.8mm であるが推定サイズは 59.43mm となり、推定サイズに大きな誤差が生じた。また、図 5.5 は同様に YOLO がステレオ画像の片側または両側で果実が検出できずサイズ重量推定が出来なかった果実の例である。画像からは直接確認できるが遮蔽割合が多いことで物体検出モデルが見逃すことがあるため、サイズ重量も同時に推定出来なくなる。



図 5.4 推定値の誤差が増大した果実例



図 5.5 サイズ重量が推定できなかった果実例

サイズ重量の推定誤差が増加したり推定できない果実が増加する主原因は果実のオクルージョンにある。そのため、個々のサイズ重量推定及び一樹の収穫重量予測の精度を改善する

5.4 追加検証: ステレオ法による各方向推定重量を補正した後の回帰分析の再検証

ために、果実の遮蔽部分を補完したりオクルージョンのある果実に対する検出精度を向上させることが重要である。

5.4 追加検証: ステレオ法による各方向推定重量を補正した後の回帰分析の再検証

5.2 節における推定重量の 4 方向平均と実収穫重量の回帰分析の結果は良好ではなく、かつ各圃場データによる回帰式にも明確な差が生じていた。これは 5.3 節で示した通りオクルージョンが原因でサイズ重量が推定できなかった果実が多くなり、ステレオ画像の各方向で推定重量値が低下する現象が見られている。特に物部 CP での撮影は支柱や網が多く樹木同士の間隔が一般的な圃場より密接な状態で生育されていることもあり、撮影対象樹木の葉や枝以外によるオクルージョン果実が多くなってしまった。物部 CP の各ステレオ画像内の平均 3 割程度の果実がサイズ重量を推定できず、最多だと半分程度の個数しか推定できていない場合も見受けられた。

しかし本研究に使用しているデータは各画像に描画される個々の果実重量の実測値があり、また果実重量の分布が一定の精度で類推できている。そのため、各ステレオ画像での推定重量に補正を行ったうえで収穫重量との回帰分析を再度行った。物部 CP のデータは、ステレオ画像の左側に描画される個々の果実番号を記録し重量を計測しているため、各ステレオ画像の実測果実重量の合計値を使用した。久府付のデータは個々の果実重量は計測できなかったが果実重量の分布が類推できている。そのため各画像での推定合計重量値に対して、推定できなかった果実数に推定重量分布の中央値をかけた値を足し合わせることで補正を行った。

5.5 追加検証: 各方向推定重量値を補正した後の回帰分析結果

各ステレオ画像における推定重量値を補正した後、5.2 節と同様に推定重量の 4 方向平均と収穫重量の単回帰分析を行った結果を表 5.2 に、グラフを図 5.6 に示す。物部 CP のみデータによる単回帰分析の決定係数は 0.73 と低下したが、全圃場データによる単回帰分析の決定係数が 0.61 にまで上昇したことに加え各単回帰分析における回帰式もより近似する結果となった。このことから、本手法による推定果実重量値と全圃場で共通する一定の係数を用いることで一樹の収穫重量を予測できる可能性があることが示された。ステレオ画像による推定重量値の精度を向上させるには各果実サイズ重量の推定精度が直結するため、5.3 節で示したようにオクルージョン果実への対処が収穫重量の推定精度を向上させるためにも重要となる。

5.5 追加検証: 各方向推定重量値を補正した後の回帰分析結果

表 5.2 補正後: ステレオ推定重量の 4 方向平均と収穫重量の単回帰分析の結果

	全圃場データ	物部 CP	北川村久府付
R^2	0.61	0.73	0.67
a	3.5623	4.5758	3.5403
b	4.1931	0.8495	3.4608
$RMSE$	3.0918	2.8873	2.6922
MAE	2.5795	2.5980	2.0238

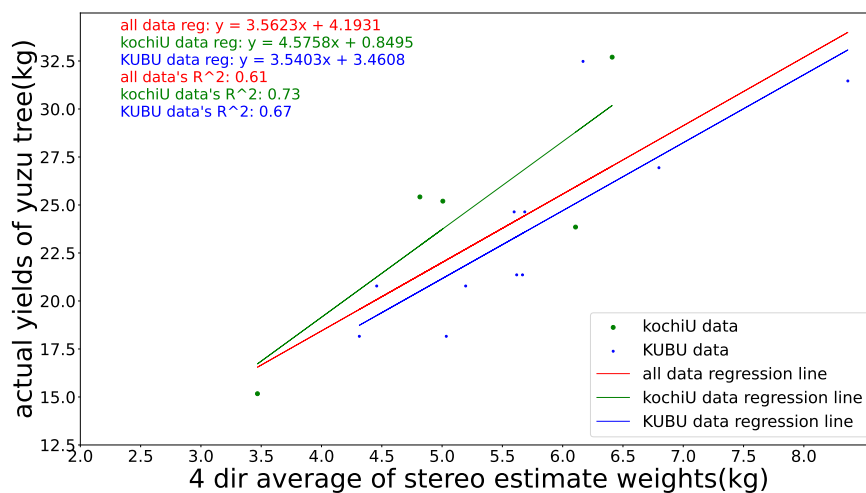


図 5.6 補正後: ステレオ推定重量の 4 方向平均と収穫重量の単回帰分析グラフ

第 6 章

結論

本研究では、ユズ果実の収量予測を自動で推定する手法の提案を目的として、ステレオ画像処理によるユズ果実のサイズ及び重量を推定する手法を提案した。そして個々の果実の推定精度や 4 方向の推定重量平均値と実際の収穫重量について単回帰分析を行い精度の調査を行った。ステレオ果実重量の推定精度の検証は高知大学物部キャンパスの圃場で個々の果実番号に対応した推定値を検証し、推定重量と実収穫重量の単回帰分析は 2 つの圃場の取得データを用いて検証した。ステレオ画像処理による果実重量の推定結果は画像ごとの検出した果実の 8 割がサイズ推定誤差値 10%を下回り果実重量も重量の回帰式とサイズ推定誤差に準ずる結果となった。しかし推定重量と実収穫重量の単回帰分析結果は全圃場データの決定係数が 0.49 となり、また全圃場データと各圃場データの回帰式にも差が見られた。これらの原因は果実のオクルージョンによってサイズ重量の推定誤差が増大したり推定できない果実が多く存在したことにより発生したと考えられる。そのため、画像内の果実重量実測値や果実重量分布の中央値などを用いて値を補正して単回帰分析を再度行った結果、全圃場データの決定係数が 0.61 まで上昇したうえに各データにおける回帰式もより近似した。この追加検証より画像内の全ての果実重量を高精度に推定できれば、全圃場で共通する一定の係数を用いてユズ一樹の果実収穫重量を推定できる可能性を示した。そのためサイズ重量推定や各方向の重量推定値の精度向上のために、オクルージョン果実への対処が重要であることが考えられる。

謝辞

本研究は、内閣府地方大学・地域産業創生交付金「IoP(Internet of Plants) が導く、「Society 5.0 型農業」への進化」及び「IoP(Internet of Plants) が導く、「Society 5.0 型農業」への進化」の助成を受けたものです。

また、本研究を進めるにあたり、手厚いご指導及び機材の準備をしていただきました栗原徹教授に心より感謝申し上げます。並びに本研究の副査を引き受けてくださった福本昌弘教授、吉田真一教授にお礼申し上げます。

最後に、ユズ圃場の撮影や果実データの計測など、調査に関するご協力をしていただきました高知大学 浜田和俊准教授に感謝申し上げます。

参考文献

- [1] 農林水産省, 特産果樹生産出荷実態調査-種類別栽培状況 (全国)-かんきつ類の果樹,
<https://www.e-stat.go.jp/stat-search>
- [2] 農林水産省, 高知県北川村の地方創生に向けた挑戦, <https://www.maff.go.jp/j/seisan/ryutu/fruits/attach/pdf/240311-3.pdf>
- [3] グリーンフォーカス 令和6年12月号: 高知農業ネット, “ユズにおける出荷量予測方法の開発”, https://www.nogyo.tosa.pref.kochi.lg.jp/info/green_dtl.php?ID=10072
- [4] 末廣いのり, 栗原徹, 浜田和俊, ”歩行型 LiDAR による園地点群データからの樹木分離法の検討と葉数推定”, センシングフォーラム資料 39 89-94, 2022-09 東京: 計測自動制御学会計測部門
- [5] Vinay Vijayakumar, Yiannis Ampatzidis, Lucas Costa, ”Tree-level citrus yield prediction utilizing ground and aerial machine vision and machine learning”, Smart Agricultural Technology Volume3, February 2023, 100077
- [6] Yang Yijiu, Jun Yu, Toru Kurihara, Kazutoshi Hamada, ”Immature Yuzu Citrus Detection in Infrared Images using YOLOv4-large”, Proc. of SICE Annual Conference, pp.604–607, 2022
- [7] 矢口裕明, 長谷川貴巨, 長濱虎太郎, 稲葉雅幸, “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 36 巻 10 号 p693-702, 2018 年
- [8] 朝田 諒, 飯田訓久, 村主勝彦, 増田良平, “ ロボットコンバインのためのステレオカメラを用いた物体検出および衝突回避 ”, 農業食料工学会誌 81 巻 6 号 p392-402, 2019 年
- [9] Bowen Zheng, Guiling Sun, Zhaonan Meng, Ruili Nan, ”Vegetable Size Measurement Based on Stereo Camera and Keypoints Detection”, Sensors 22(4) 1617, 2022
- [10] 源野広和, 小林一樹, ”深層学習を用いたデータクレンジングとリンゴ果実画像への応

参考文献

- 用”, 農業情報研究 29 卷 3 号 p47-61, 2020 年
- [11] Wenkang Chen, Shenglian Lu, Binghao Liu, Ming Chen, Guo Li, Tingting Qian, ”CitrusYOLO: A Algorithm for Citrus Detection under Orchard Environment Based on YOLOv4”, Multimedia Tools and Applications, September 81(6), 2022
- [12] Yishen Lin, Zifan Huang, Yun Liang, Yunfan Liu, Weipeng Jiang, ”AG-YOLO: A Rapid Citrus Fruit Detection Algorithm with Global Context Fusion”, Agriculture 14(1) 114, 2024
- [13] H.Gan, W.S.Lee, V.Alchanatis, R.Ehsani, J.K.Schueller, ”Immature green citrus fruit detection using color and thermal images”, Computers and Electronics in Agriculture Volume 152 p117-125, September 2018
- [14] 井上航輔, 海津裕, 芋生憲司, ”, 画像認識を用いた草刈機の距離センサシステムの開発”, 農業食料工学会誌 82 卷 2 号 p162-168, 2020 年
- [15] 黒崎秀仁, 梅田大樹, 岩崎泰永, ”Kinect を用いたパブリカの草高計測と成長解析への適用”, 植物環境工学 29 卷 4 号 p130-138, 2017 年
- [16] 佐藤禎稔, 宮本啓二, 松田清明, ”三次元視覚センサによるキャベツ結球の形状計測と収穫適期判定”, 農業機械学会誌, 63 卷 1 号 p87-92, 2001 年
- [17] Harry Freeman, Mohanmad Qadri, Abhisesh Silwal, Paul O'Connor, Zachary Rubinstein, Daniel Cooley, George Kantor, ”Autonomous Apple Fruitlet Sizing and Growth Rate”, arXiv:2212 01506
- [18] Siyu Pan, Tofael Ahamed, ”Pear Recognition in an Orchard from 3D Stereo Camera Datasets to Develop a Fruit Picking Mechanism Using Mask R-CNN”, Sensors 22(11), 4187, 2022
- [19] Xiaojuan Liu, Xudong Jing, Shoaib Younas, Ruiyang Wei, Haojie Dang, Zhenchao Wu, Longsheng Fu, ”Performance evaluation of newly released cameras for fruit detection and localization in complex kiwifruit orchard environments”, Journal of Field Robotics Volume 43 Issue 4 p881-p894, 2024

参考文献

- [20] Yasuhiro Okabe, Takefumi Hiraguri, Keita Endo, Tomotaka Kimura, Daisuke Hayashi, "Classification of Tomato Harvest Timing Using an AI Camera and Analysis Based on Experimental Results", AgriEngineering 7(2) 48, 2025
- [21] Yu Tanaka et al., "Deep Learning Enables Instant and Versatile Estimation of Rice Yield Using Ground-Based RGB Images", Plant Phenomics Volume 5 0073, 2023
- [22] Pravakar Roy, Abhijeet Kislay, Patrick A.Plonski, James Luby, Volkan Isler, "Vision-based preharvest yield mapping for apple orchards", Computers and Electronics in Agriculture Volume 164 104897, September 2019
- [23] 松阪喜幸 発行, " デジタル画像処理 改定第二版 ", 公式財団法人 画像情報教育振興協会 (CG-ARTS), 2015 年 3 月 9 日 第一版一刷発行
- [24] Mathwork, "ステレオカメラキャリブレーションの使用", <https://jp.mathworks.com/help/vision/ug/using-the-stereo-camera-calibrator-app.html>
- [25] 株式会社アルゴ, " DFK33UX273/DMK33UX273 産業用 USB3.0 カメラ DFK シリーズ TheImagingSource ", <https://www.argocorp.com/cam/usb3/tis/DxK33UX273.html#photo>
- [26] TAMRON BIZ, "Model : 13FM04IR ", https://www.tamron.biz/data/ipcctv/cctv_ir/13fm04ir.html
- [27] WORLD ENERGY TRADING LIMITED, "EnergyPower エナジーパワー — 赤外線投光器 S20D-IR", <https://energypower.tokyo/products/detail/3>
- [28] Ultralytics, "Ultralytics YOLOv8", <https://docs.ultralytics.com/ja/models/yolov8/>
- [29] 涌井良幸, 涌井貞美著, "図解でわかる 多変量解析", 日本実業出版社発行, 2001 年 1 月 25 日 初版発行
- [30] 高柳慎一, 長田怜士著, "評価指標入門 データサイエンスとビジネスをつなぐ架け橋", 株式会社技術評論社発行, 2023 年 3 月 3 日 初版第 1 刷発行