

共同研究

目視検査のエビデンス取得に関する研究

松本 健司* 八木澤 秀人* 中村 喜英**

Evidence Acquisition in Visual Inspection
MATSUMOTO Kenji, YAGISAWA Hideto and NAKAMURA Yoshihide

製品の外観検査において、供給された検査対象に対し検査員が一つずつ目視検査を実施してチェックリスト等に記録する作業を対象に、目視検査の信頼性向上を目的としたデジタル化に取り組んだ。本研究ではベルトコンベア上を流れる検査対象から検査用データを取得し、ソフトウェア上で目視検査を実施できるシステムを開発した。検査対象の撮影及び検査員の視線推定にはディープラーニング技術を用いた。推定された検査員の視線時系列データは検査結果のエビデンスとして活用できるよう各種データと紐づけてデータベースに保存される。

Key words: 目視検査, DX, ソフトウェア開発, ディープラーニング

1 はじめに

検査工程における目視検査（外観検査）は品質を担保する重要な工程である。製品に不具合が発生した際の原因追及のため、トレーサビリティが求められ、検査及び記録が正しく機能していなければならない。現状、多くの目視検査工程記録は検査員の人的報告のみで成り立っており、結果の信頼性及び検査品質について各検査員に依存している点が問題である。

画像処理や通信などのデジタル技術は、近年、目覚ましい発展を遂げており、対象認識（オブジェクトディテクション）などの高度な処理が可能となる AI 技術利用も容易となった。そのため、目視検査は自動化にシフトしつつあるが、現状、完全自動化は技術的にまだ難しい状況である。

本研究では、目視検査の信頼性や作業性の向上を実現するデジタル技術活用手法を立案し、システムを試作する。

2 研究の方法

2.1 開発方針

2.1.1 想定作業と課題

検査員が供給された検査対象に対し、一つずつ目視検査を実施し、チェックリスト等に記録する作業を想定する。

検査結果の信頼性は記録によってのみ保証され、その記録が検査員の主観によるものとなっていることが問

題である。

また、目視検査は長時間の繰り返し作業であることが多く、検査対象によっては拡大鏡を使用するなど作業性も悪いことから、検査員への身体的負担が大きい。更に作業の性質上、就労場所が限定されており、突発的な欠員時などの柔軟な対応が難しい。

2.1.2 システム概要

目指すシステム概要を以下に示す。

- (1) 供給された検査対象を撮影し、検査データを保存できること
 - (2) パソコン上で検査データを表示し、検査データ（画像）に対して拡大・移動及び不良箇所のマーキング操作ができること
 - (3) 検査員が検査作業を実施している間、検査員の視線データ（座標、滞留時間）を記録できること
 - (4) 検査データ、作業結果及び検査員の視線データは紐づけされレポートとして閲覧が可能であること
- 検査結果について、不良の場合は不良箇所のマーキングデータが残ることで、良好の場合は視線データにより作業状況の詳細が確認できることで信頼性が向上する。

パソコン上の作業となることで身体的負担は軽減する。将来的に本システムをグローバルネットワークに接続することで柔軟に就労環境（場所・時間）の制限に依存しないシステム化が可能である。

* 栃木県産業技術センター 機械電子技術部

** 株式会社アール・ティー・シー

2. 1. 3 開発項目

本研究で開発に取り組む項目を以下に示す。

- (1) 検査データ撮影処理の開発
- (2) サーバ（データベース、閲覧機能など）構築
- (3) 目視検査用ソフトウェア開発
- (4) 視線推定及び記録処理の開発

ネットワークを活用した分散平行処理や扱うデータのセキュリティ及びバックアップ等の非機能要件に関する内容は本研究では取り扱わない。

2. 2 システム構成

開発項目ごとに Windows 上でそれぞれ独立したシステムで構成し、サーバを介して機能の連携を実現する。

2. 3 本研究における検査対象

本研究では弁当（食品）を対象とする。システム試作が目的であることから、検査データ解像度が肉眼程度で十分であり、データ取得が容易である対象物として選定した（図1）。



図1 研究で用いたサンプル例

3 結果及び考察

3. 1 開発システム全体概要

試作したシステム全体概要を図2に示す。

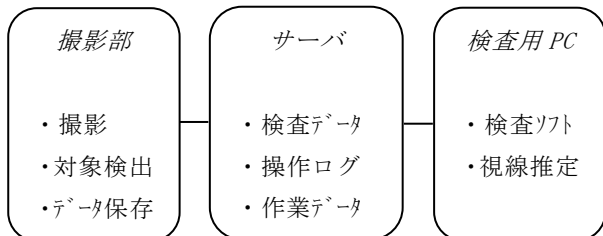


図2 システム概要

システムは、3つの要素からなる。

初めに検査対象品を撮影する。撮影データを基にした検査データはサーバ上のデータベースに登録される。

検査員は、パソコン上から検査用ソフトウェアを利用し目視検査を実施する。検査結果について、判定結果（良好・不良）、不良がある場合は不良情報、検査時の視線情報などがデータベースに保存される。

3. 2 検査データ撮影処理の開発

撮影部の自動化を見据え、ベルトコンベア上を流れる検査対象から検査データを取得することとした（図3）。



図3 検査対象の撮影

流れる検査対象から検査データを取得するために考えられる要件を以下に示す。

- (1) 検査対象がカメラ画角中央付近に到達したことを認識し撮影
- (2) 撮影されたデータから検査対象を抽出
- (3) 抽出データの傾きを補正
- (4) 補正されたデータを保存

検査対象の認識には、YOLOv8¹⁾を利用した。対象位置認識に応用できるAI処理はオブジェクトディテクションとセグメンテーションの2種類ある。

オブジェクトディテクション手法を用いた対象抽出を試みたが、その後の処理において対象の傾きや位置を補正するのが困難であった。

セグメンテーション手法を用いた対象抽出では、比較的精度良く対象データを抽出できた（図4）。また、処理結果から傾きの補正が可能であったことから、本研究ではセグメンテーション手法による処理を採用した。



図4 検査データ撮影処理例

左：対象認識時の撮影データ 右：処理後の検査データ

3. 3 データベース構築

検査に係るデータを想定し、データベースを設計構築した。データベース概要を表1に示す。

表1 データベース概要

項目	内容
日時	データ取得日時
検査データ	処理後の検査データ
不良情報	不良があった場合の詳細
操作ログ	検査作業中操作ログ
視線データ	作業中の視線推測結果

3. 4 目視検査用ソフトウェア開発

ソフトウェアの要件を以下に示す。

- (1) 検査データをデータベースから取得できること
- (2) 検査データの閲覧操作ができること
- (3) 検査データ上で発見された不良情報を記録できること
- (4) 不良情報は不良の分類、位置、範囲を含むこと
- (5) 検査結果を含めた作業に関する情報をデータベース上に保存できること
- (6) 視線推定機能と連動できること

試作したソフトウェア動作の概要について記述する。

ソフトウェアは初めに検査データのリストをデータベースから取得する(図5)。検査員は検査対象を選択し、検査作業を開始する。

No.	画像番号	日時	元画像	検査画像	検査担当	検査
41	57	2024/01...			未検査	検査
42	58	2024/01...			未検査	検査
43	59	2024/01...			未検査	検査
44	60	2024/01...			未検査	検査
45	61	2024/01...			未検査	検査
46	62	2024/01...			未検査	検査
47	63	2024/01...			未検査	検査
48	64	2024/01...			未検査	検査

図5 検査データのリスト表示

検査を開始すると、検査用UIがフルスクリーンで呼び出される。不良箇所が発見された場合、簡易なマウス操作で個所を指定後、分類を選択し不良情報を登録する。検査終了時には検査員へ確認を促し、一連の作業が終了となる(図6)。

検査作業中は、検査開始や作業中断を通知することで、後述する視線推定機能と連動した動作を行う。



図6 検査画面例

- 上段左：検査開始画面 上段右：不良箇所指定
 下段左：不良分類選択 下段右：結果確認画面

3. 5 視線推定及び記録処理の開発

3. 5. 1 処理の概要

視線推定機能を有する機器は一般に高額であることから、可視光カメラを用いて検査員の視線を推定することとした。しかし、可視光カメラから得られる画像を基に視線を推定する手法は現在も研究開発が進められている状況であり、安価な構成で実現することは困難であった。また、本研究においてはディスプレイ上の注視点を記録するため、視線データを基にしたカメラとディスプレイの位置関係を用いた処理も必要であった。これらのことから顔画像を基に注視点を直接推定する手法を開発することとした。

視線推定処理の概要を以下に示す。

- (1) カメラから検査員の顔画像取得
- (2) 顔画像から特徴量を取得
- (3) 特徴量を基にディープラーニングモデル(以下、推定モデル)を用いて注視点を推定
- (4) 推定結果の保存

なお、本研究においては、顔画像の取得にはカメラ付ノートパソコンのインカメラを使用した。

3. 5. 2 視線推定機能開発

Nachiappan Valliappanらは、追加のハードウェアを必要としないスマートフォンにおける高精度なアイトラッキング手法を実証している²⁾。スマートフォンにおける推定手法はパソコンのディスプレイにも応用可能と考え開発に取り組んだ。

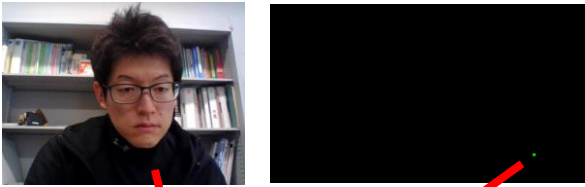
推定機能開発の概要を以下に示す。このうち、(3)、(4)、(5)において、Nachiappan Valliappanらの取組を参考にしている。

- (1) 開発用データの収集
- (2) 特徴量エンジニアリング
- (3) 推定モデル構造の設計
- (4) 推定モデル構築(モデルトレーニング)
- (5) 精度検証及び後処理の検討

3. 5. 2. 1 開発用データ収集

データ収集のためディスプレイ上にランダムターゲットを繰り返し表示するプログラムを作成した。データ収集参加者(以下、協力者)は画面上に表示されたターゲットをマウス操作でクリックする。クリック時にはターゲットを注視していると考えられるため、クリック時のターゲット座標と協力者の顔画像を紐づけて保存し、開発用データとした(図7)。

開発用データは協力者25名から11,364サンプルを収集した。



Filename	X	Y
100650_389229.jpg	117	214
100652_100859.jpg	492	782
100654_829721.jpg	1649	465
100656_542807.jpg	1498	754
100658_168905.jpg	1512	619
100659_694457.jpg	1543	176

図7 データ収集概要

3. 5. 2. 2 特徴量エンジニアリング

推定精度を向上させるために、顔画像から特徴量を抽出する必要がある。抽出の前処理には MediaPipe³⁾ を使用した。MediaPipe は Google が開発したフレームワークであり、顔の部位（ランドマーク）座標を推定できる（図8）。



図8 ランドマーク推定

左：元画像 右：推定結果の描画

本研究では、ランドマーク座標を基に切り出した左右の目元画像と、得られたランドマーク座標から算出する数値パラメータを併せたマルチモーダルな特徴量を使用することとした（表2）。

表2 使用する特徴量

項目	内容
顔の角度	ピッチ・ロール・ヨーの3軸
距離	カメラと両目中央の距離推定値
左目座標	目画像の切り出し中心座標 (x, y)
右目座標	
左目画像	解像度 128×128
右目画像	

角度の推定には、OpenCV⁴⁾ を使用した。OpenCV はインテルが開発したコンピュータビジョン向けライブラリである。ランドマークのうち15点（両眉頭、両眉尻、両目頭、両目尻、鼻先、両鼻翼、両口角、下唇中央、顎先）の座標を用いて PnP 問題を解くことで角度を推定している（図9）。その際、参照する3D顔モデルは推定結果が妥当な値となるよう自作した。

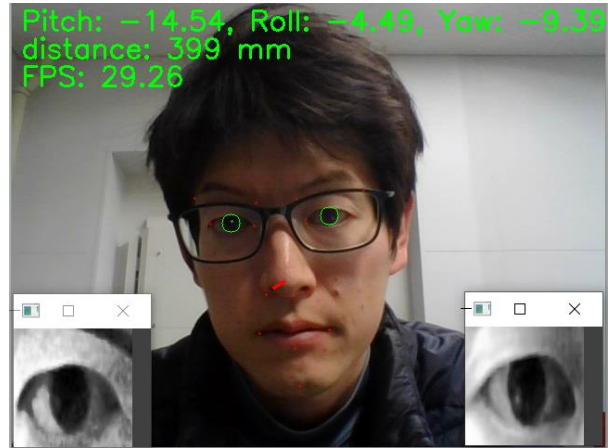


図9 特徴量抽出処理の可視化

推定した角度情報を基に鼻先にベクトルを描画

3. 5. 2. 3 推定モデル構築（モデルトレーニング）

収集した開発用データのうち 9994 サンプルを学習用データセット、1370 サンプルを検証用データセットとして 10000 エポックの学習を実施した。

学習用データセットについて、目元画像に対して輝度のランダム変更 (max_delta=0.15)、位置のランダムシフト (x, y 共に最大 16 ピクセル) のデータ拡張処理を行った。学習用データセットは学習エポックのたびに全数シャッフルし、バッチサイズは 64 に設定した。

学習時の最適化について、損失関数には推測座標とターゲット座標のユークリッド距離を使用し、最適化アルゴリズムには Adam を使用した。学習率は 0.01 から始まり、8000 ステップ毎に 0.64 の減衰率で離散的に減衰するようスケジューリング設定した。

3. 5. 2. 4 精度検証及び後処理の検討

検証データ 1370 サンプルに対する構築したモデルの推論誤差を図10に示す。ディスプレイの解像度及びサイズを用いて、ピクセル単位から cm 単位へ変換すると誤差平均は約 2.82cm であった。

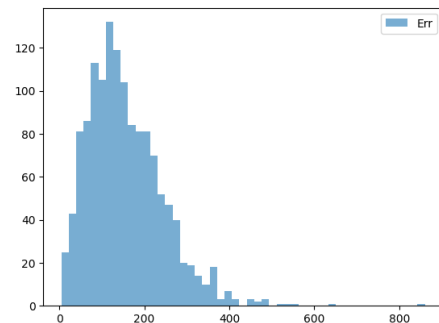


図10 検証データ推論誤差【単位：ピクセル】

平均：156.78 標準偏差：89.83

学習時と実際の推論時では、画像内人物、周辺環境、表示用ディスプレイ、撮影用カメラなど多くの要素変更が考えられる。これらの変更に対応するため、推論モデルに変更を加えずに推定値を補正する機能を設けた。

視線推定の精度を検証するため、ディスプレイ上の4点間を移動するマーカーを目で追いかけて続けたときのデータで推論を行った。結果を図11及び図12に示す。なお、データ取得は研究担当者松本が実施した。

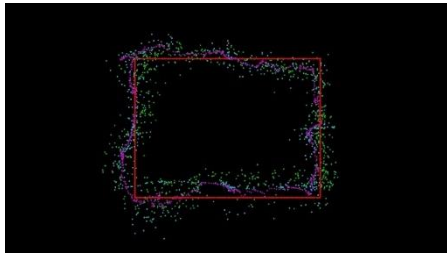


図11 推論結果比較イメージ

赤：移動マーカー軌跡 緑：推論モデル出力
青：補正後 紫：最終出力

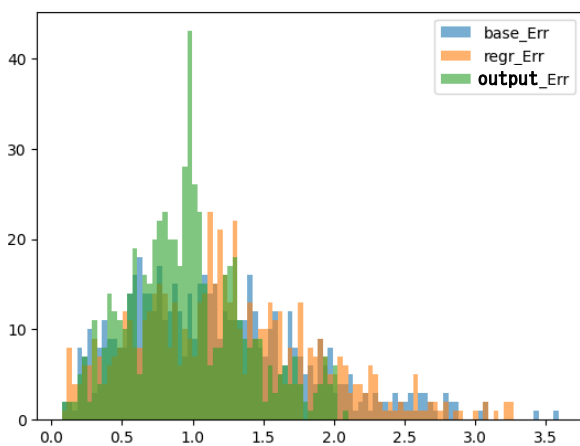


図12 推論結果比較【単位：cm】

最終出力における誤差 平均：0.97cm 標準偏差：0.41cm

3.5.3 推定機能のシステム連携

視線推定機能による推論は、本研究においては目視検査ソフトウェアが実行されているパソコンで実行することとした(図13)。視線推定結果と目視検査ソフトウェアの操作ログは時刻合わせを実施している。

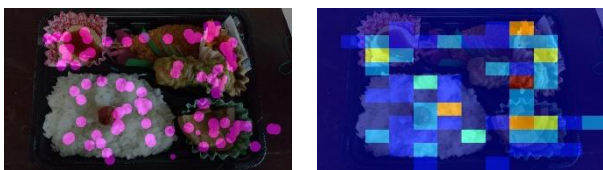


図13 視線推定結果の描画例

左：視線軌跡 右：視線滞留ヒートマップ

3.6 検査結果閲覧

検査結果はWEBサーバを介し、閲覧できるシステムを構築した。

サーバにて出力する品質レポート(エビデンス)は、検査対象の情報、検査作業に関する統計情報、検査結果に関する情報(良好・不良判定等)、検査員の視線情報等の必要な情報を基に生成される。レポート例を図14に示す。

検査レポート 検査工程：RTC TEST

検査データ	検査工程	RTC TEST	
	ワーク番号	1	
	検査担当	テストユーザ	
	作業期間	2024/02/02 11:38:01 ~ 2024/02/02 11:39:49	
検査作業期間	作業時間計	00:01:48	
	作業レポート		
作業レポート	項目	時間	回数
	作業	00:01:48	1
	検査中断	00:00:00	0
	実検査	00:00:59	1
	無効検査	00:00:00	0
	稼働率	54.63%	
ワーク判定	結果判定	NG	
	不良判定件数	2件	
不良判定内容	判定	判定内容	備考
	軽微欠陥	汚れ	
	軽微欠陥	位置異常	

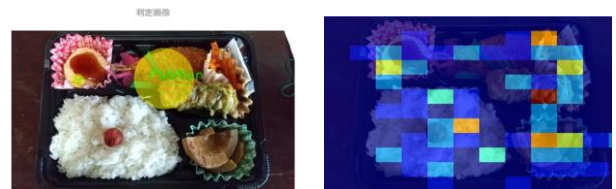


図14 検査レポート例

4 おわりに

目視検査の信頼性及び作業性向上を目的とし、システム開発に取り組んだ。

- (1) システムは、検査対象撮影部、サーバ(WEBサーバ・データベース)部、目視検査用パソコンからなる。
- (2) 検査対象撮影部では検査品撮影及び検査用データ生成を行う。本研究においては、ベルトコンベア上を流れる検査対象から検査データを取得した。
- (3) サーバ部は、検査に関する情報をすべて紐づけし管理できるよう構築した。
- (4) 目視検査ソフトウェア及び視線推定機能を開発し、目視検査用パソコンに実装した。目視検査ソフトウェアは、検査データの閲覧及び検査機能を有する。視線推定機能は、検査作業中の検査員の視線情報を記録する。
- (5) システムによる目視検査結果はWEBサーバ経由でレポート出力され閲覧が可能となる。

本システムを利用することで、検査結果が不良と判断された製品について、不良の分類・箇所が保存されることにより、不良原因への対応が容易になる。また、流出不良が発生した際には、検査員視線データが記録されていることでトレースバックと原因特定が容易になる。

参考文献

- 1) YOLOv8 :
"https://github.com/ultralytics/ultralytics"
- 2) Valliappan N., Dai N., Steinberg E. et al. :
Accelerating eye movement research via accurate
and affordable smartphone eye tracking,
"Nat Commun", vol.11, 4553, (2020)
- 3) MediaPipe:
"https://github.com/google/mediapipe"
- 4) OpenCV:
" https://github.com/opencv/opencv-python "