

システム創成工学専攻
情報システムコース

Department of Systems Innovation
Advanced Information System Course

令和7年度 専攻科特別研究論文

桃栽培熟練者の暗黙知抽出を目的とした
予備摘果時の視線分析

Gaze Behavior Analysis in Preliminary Peach Thinning
for Identifying the Tacit Knowledge of Skilled Growers

指導教員名 上野 秀剛 准教授

論文提出者名 井原 実咲

独立行政法人 国立高等専門学校機構
奈良工業高等専門学校 専攻科
National Institute of Technology, Nara College
Faculty of Advanced Engineering

桃栽培熟練者の暗黙知抽出を目的とした 予備摘果時の視線分析

Gaze Behavior Analysis in Preliminary Peach Thinning for Identifying the Tacit Knowledge of Skilled Growers

井原 実咲
Ihara Misaki

独立行政法人 国立高等専門学校機構

奈良工業高等専門学校 専攻科 システム創成工学専攻 情報システムコース

大和郡山市矢田町 22 番地 (〒 639-1080)

National Institute of Technology, Nara College, Faculty of Advanced Engineering
22 Yata-cho, Yamatokoriyama, Nara 639-1080, Japan

Abstract: Much of the knowledge possessed by skilled peach growers for producing high-quality fruit is tacit, which makes it difficult to transfer to others. As a result, effective knowledge transfer to less experienced growers has become an important challenge. This study aims to verbalize and share the tacit knowledge of skilled growers related to preliminary fruit thinning - the process of reducing the number of fruits - which is a critical task in peach cultivation. Author conducted an experiment to record growers' gaze behavior during peach thinning and compared the characteristics between skilled and less experienced participants. The results indicate that skilled growers spend less time searching for fruits, enabling them to devote more time to observing individual fruits and branches. Furthermore, author analyzed the gaze movement direction and the spatial relationship between the growers and the branch at the start of thinning task. The findings reveal that skilled growers tend to perform the task from a position where they look upward at the branches, moving their gaze along horizontally or vertically extending branches within their field of view. This viewing strategy reduces leaf occlusion and facilitates the perception of distances between fruits, thereby contributing to shorter search times. These findings represent tacit knowledge that is not documented in books or manuals. The insights gained from this study have the potential to support more effective educational methods for less experienced growers.

Keywords: Eye Tracking, Peach, Thinning, Tacit Knowledge;

関連業績リスト

1. “桃栽培の摘蕾における熟練者と非熟練者の視線比較”, 井原実咲, 上野秀剛, 福田文夫, FIT2024 第 23 回情報科学技術フォーラム, Vol.23, No.3, pp.75–80, 2024.
2. “桃栽培作業者の摘蕾における関心領域への視線移動”, 井原実咲, 上野秀剛, 福田文夫, 第 3 ブロック専攻科研究フォーラム, 2025.
3. “桃栽培作業者の予備摘果における視線移動からの暗黙知抽出”, 井原実咲, 上野秀剛, 福田文夫, 電子情報通信学会 教育工学研究会, Vol.125, No.114, pp.5–10, 2025.

目次

1.	はじめに	1
2.	準備	3
2.1	摘果	3
2.2	視線計測	4
3.	実験	5
3.1	実験設定	5
3.2	視線計測	7
3.3	分析	9
4.	結果と考察	13
4.1	停留率	13
4.2	AOI	14
4.3	視線移動の向き	15
4.4	摘果開始時の被験者と枝の位置関係	16
5.	内的妥当性への脅威	18
6.	おわりに	20
	参考文献	22

目次

3.1	摘果対象に指定した枝の状態	6
3.2	EMR-10	7
3.3	EMR-10 計測映像	8
3.4	EMR-10 座標系 (nac 社資料を参考に著者が作成)	9
3.5	被験者に対する枝の高さ	12
4.1	タスク中の視線移動の例	14
4.2	枝の高さによる見え方の違い	17

表目次

4.1	分析対象データ	13
4.2	停留率と停留時間（秒）/回	14
4.3	AOI 数	15
4.4	視線移動の向き	16
4.5	摘果開始時の枝の位置	17
5.1	視線移動の向き（非熟練者を分割）	19

1. はじめに

果樹栽培に従事する生産者は、高品質な果実を効率的に育てるための知識を有している。特に熟練の生産者は、栽培の各工程に対して豊富な経験に基づく知識を持つと考えられる。しかし、熟練者の知識の多くは言語化が困難な暗黙知であり、果樹農業分野では生産者の高齢化に伴って、非熟練者への知識伝承が重要な課題となっている。

本研究では果樹の中でも桃を対象に、桃栽培工程の1つである摘果に着目する。摘果とは生育中の果樹から一部の果実を除去することで、残した果実に養分を集中させると同時に果実同士の接触による傷を防止し、商品となる果実の品質と収量を向上させるための作業である [1]。どの果実を除去するか適切に判断するためには、枝や果実の相互位置関係、葉の枚数、日照条件、枝の伸長方向など、多数の要素を総合的に考慮する必要がある。しかし、どの部分を観察し、どのような基準で判断すべきかについては、栽培マニュアルや書籍にも具体的な記述がなく、熟練者の経験に依存しているのが現状である。また、摘果を短期間で急速に実施すると品質低下を招くため、一般に4月の予備摘果、5月の本摘果、6月の修正摘果という三段階で行われる。それぞれの段階は目的が異なり、予備摘果は主に果実数の調整、修正摘果は品質の高い果実を選抜して残すことを重視する。そのため、摘果の段階によって必要とされる知識や判断基準も異なると考えられる。

本研究はこれらの摘果作業のうち、予備摘果における熟練者の暗黙知を言語化し、共有可能にすることを目的とする。そのために、熟練者と非熟練者の作業中の視線移動を比較して特徴を明らかにする。視線計測は熟練者の暗黙知を抽出する手段として様々な分野の研究で用いられており [2] [3]、判断過程における探索行動の可視化に有効であるとされている。また、熟練者と非熟練者の視線移動を比較することで、熟練者特有の判断基準や注視傾向を明らかにした研究も多い [4] [5] [6]。予備摘果においても、果実を除去するか判断する前に、周囲の枝や果実を観察する探索行動が必要である。そのため、熟練者と非熟練者の間で視線移動の特徴に差異が現れると考えられる。

本稿で報告する実験では桃栽培の熟練者3名と非熟練者6名を対象として、指定した枝

単位の範囲における予備摘果作業中の視線移動を計測する。被験者は葉や枝に隠れた果実を探索し、除去または保持の判断を行い、除去と判断した場合には実際に除去を行った上で次の果実の探索に移行する。熟練者は経験に基づいて獲得した暗黙知によって、対象範囲内にある果実をより短い時間で発見し、効率的に予備摘果を行えると予想される。本稿では熟練者の作業中における視線移動の特徴や、被験者と枝の位置関係を非熟練者と比較することで熟練者特有の位置把握、探索の仕方を明らかにする。

以下では、2章で摘果と視線計測について説明し、3章で実験方法について述べる。4章で結果と考察を示し、5章で内的妥当性への脅威、6章で結論を述べる。

2. 準備

2.1 摘果

摘果は花芽の開花後に形成された果実が肥大し始める段階で一部の果実を間引き、果実数を調整する作業である。果実数を減らすことで養分競合を緩和し、果実の肥大を促進する目的で行われる。

摘果を行う際には、摘果後の果実成長に伴う状況変化を想定する必要がある。果実の成長により重さが増加すると果実の付いた枝がしなり、他の果実や枝との位置関係が変化する。そのため、摘果で残した果実の位置が悪い場合、他の果実の陰になって日照が不足し、果実の成長が不十分になる可能性がある。また、枝や他の果実との接触により傷が生じ、不良果となるリスクも高まる。以上のことから、生産者は個々の果実の状態だけでなく、果実が枝に付いている方向や角度、周辺の枝との位置関係などを考慮しながら、除去する果実を判断していると考えられる。

本研究で対象とする桃の予備摘果に関して、宮田は最終着果量の約 20% 増（産地によって異なる）になるように果実を減らすことを推奨している [1]。また、枝の長さに応じて残す果実数の目安が定められており、30cm 以上の枝には 2 果、10~30cm の枝には 1 果、10cm 未満の枝では 5 本に対して 1 果が収穫時に着果していることを想定している。このような枝の長さを基準として残す果実数を判断することは初心者にとって有用な指針となる。一方で、具体的にどの果実を除去するか判断するためには、これらの数的基準だけでなく、前述のように多様な要素を総合的に捉え、成長後の状態を予測する必要がある。枝のどの部分を観察するか、果実同士の位置関係の良否をどう判断するか、どのように状況を把握するかといった具体的な知識は文献中に記載がなく、熟練者の経験に基づく暗黙知として存在している。このような暗黙知は熟練者自身が言語化して非熟練者に説明、教育することが難しい。

2.2 視線計測

暗黙知を分析する手法として、視線計測は医療 [4] [7]、建設業 [5] [8]、鉄道運転 [6] など、さまざまな分野で用いられている。Li らは模擬手術中の熟練医師と非熟練医師の視線データを比較し、停留時間やサッケード時間、視線分布、視線の移動経路を分析した [4]。その結果、熟練者は停留時間が長く、サッケード時間は短い傾向があり、タスク関連領域への注視が多いことが明らかとなった。また、タスクの複雑さが熟練者と非熟練者の視線移動の違いを緩和することを報告している。Dzeng らは建設現場における危険箇所の特定制業に着目し、危険箇所が含まれた建設現場の画像に対する熟練者と非熟練者の視線データを分析した [5]。その結果、熟練者は危険箇所をより早く特定し、注視回数が少ない一方で、視線経路には規則性が見られた。具体的には、高所で作業する作業員といった高リスクな領域を優先的に確認し、その後地上にいる作業員を確認するという視線移動のパターンが観察された。このような特徴的な視線経路は、初心者への教育に応用できる可能性を示唆している。これらの研究はいずれも探索を含むタスクにおける熟練者と非熟練者の視線移動の特徴を分析することで、熟練者特有の暗黙知を抽出している。

果樹農業分野においても視線分析を用いて熟練者の重要行動を抽出した研究が行われている。北沢らはユズの収穫および選果作業の速度や結果などに影響すると考えられる項目を、熟練者の動画、視線計測データおよび聞き取りを通じて抽出した [9]。岩崎らはカンキツ類の病害判定における熟練者の重要行動を視線分析から抽出した [10]。しかし、本研究が対象とする桃栽培の分野では、摘果作業を対象とした暗黙知の抽出は行われていない。本研究では桃栽培における予備摘果を対象に、各果実を除去するか判断する際の探索を含む視線移動を計測し、熟練者と非熟練者の特徴を分析することで熟練者の暗黙知を抽出する事を目的とする。

3. 実験

3.1 実験設定

被験者のうち熟練者は岡山県農業研究所果樹研究室に所属する研究者3名で、3年から17年の実務経験を有している。非熟練者は岡山県農業大学の学生6名で、摘果に関する基礎的な知識を習得しつつ、大学で実習経験を積んでいる段階である。分析に必要なデータ数を確保するために、非熟練者の計測は2024年5月に3名、2025年5月に1回目とは異なる3名の2回に分けて実施した。すべての被験者には事前に実験の目的と内容を説明し、口頭で同意を得た。

タスクとして被験者には対象とする桃の木に対して予備摘果を行ってもらう。1本の木に対してあらかじめ指定した範囲を予備摘果する作業を1タスクと定義し、タスク中の視線を計測する。対象木として、熟練者に対しては岡山県農業研究所で栽培されている、予備摘果が可能であるもののまだ実施されていない木を用いる。非熟練者に対しては岡山県農業大学で栽培されている、同様の条件を満たす木を用いる。対象とした木はいずれも樹高と横幅がおよそ4mであり、樹上部の果実を摘果する際には、被験者の判断で踏み台を用いることを許可した。

被験者にはタスク開始前に視線計測装置を装着してもらい、キャリブレーションを行う。その後、各タスクの開始時に予備摘果の対象とする枝を指定し、視線計測を開始する。1タスクで指定する枝の範囲は、被験者が概ね1分程度で作業を完了できる分量とする。作業時間の上限は指定せず、被験者が「指定された枝の予備摘果を完了した」と判断した時点でタスクを終了し、次のタスクへと移行する。

図3.1に摘果対象に指定した枝の状態の例を示す。タスクでは、指定した範囲を実際に予備摘果してもらうため、摘果対象を全く同じものに設定することはできない。そのため、摘果対象の枝の形状、枝についている果実の個数および摘果対象の個数、各果実の位置はタスクによって個体差がある。しかし、対象とした木の大きさがいずれも同程度であ



(a) 熟練者



(b) 非熟練者 (2024年5月)



(c) 非熟練者 (2025年5月)

図 3.1 摘果対象に指定した枝の状態

り、未予備摘果状態の木を採用していることから、木全体の枝の形状や長さ、果実の個数および摘果対象の個数、果実の状態に大きな差はない。また、熟練者と非熟練者の両者に対して様々な長さの枝を摘果対象に設定し、枝の形状や果実の個数および摘果対象の個数に熟練者と非熟練者の間で偏りが生じないように注意した。



図 3.2 EMR-10

3.2 視線計測

視線計測にはナックイメージテクノロジー社製 EMR-10 を用いる。EMR-10 は帽子型で非侵襲性のアイマークレコーダであり、被験者の頭部運動や移動を妨げない形状を有する（図 3.2）。EMR-10 には眼球カメラと視野カメラが搭載されている。眼球カメラは両眼を撮影し、付属の赤外線ライトにより角膜反射点と瞳孔位置を捉えることで、被験者の眼球の向き（視線）を推定する。視野カメラは被験者が見ている視野映像を取得する。被験者ごとに眼球の形状や瞳孔のコントラストが異なるほか、周辺の照明条件によって赤外線の反射特性が変化するため、計測前にはキャリブレーションを実施する必要がある。キャリブレーションでは、被験者から一定距離に仮想の平面（キャリブレーション面）を設定し、その面上の 9 点に相当する位置に注視用のターゲット（板等）を配置する。被験者に各ターゲットを順に注視させることで、計測装置が視線と空間座標の対応を校正する。各カメラの映像は有線で接続された EMR-10 コントローラによって記録、処理される。コントローラ本体はウエストバッグで被験者の腰部に固定し、無線接続されたタブレット端末を通じて操作する。以上の構成により、被験者は木の周囲を自由に移動しながら予備摘果を行うことができ、野外の育成環境における作業中の視線計測に適している。



図 3.3 EMR-10 計測映像

図 3.3 に EMR-10 で取得した視野映像と視線データの例を示す。EMR-10 は両眼の視点位置を視野映像とともに 60Hz で記録する。分解能（視線の動きを検出できる細かさ）は 0.1° であり、正確度（誤差が出る可能性のある最大角度）は $\pm 1.5^\circ$ である。各フレームにおいて右眼の視点位置は□、左眼は+、両眼による推定視点は○で表示される。また、右眼、左眼、両眼の各視点位置は 3 次元座標 (mm) として CSV ファイルに出力される。瞬目や計測上の欠損が発生した場合、そのフレームの視点座標は欠損として記録される。

図 3.4 に EMR-10 が出力する両眼注視点の座標系を示す。3 次元座標の X 軸、Y 軸は被験者の視野映像（図 3.3）の画面中心を原点とする画像平面上の位置として定義され、Z 軸は被験者の眼の位置を原点とした、被験者から見た奥行きを表す。被験者から見て右、上、奥方向を正、左、下、手前方向を負とする。キャリブレーション面から離れた位置を注視した場合、左右眼の注視点が大きく乖離する場合がある。そのため、本研究では補正済みの両眼注視点のみを分析対象とする。また、木の樹高と横幅に基づいて、各タスクで分析する視線データの範囲を X 軸と Y 軸で -4m から +4m、Z 軸で 0m から 4m とする。EMR-10 の分解能は、もっとも遠くを注視している場合（Z 軸が 4m）で 7mm に相当する。これは、本研究の分析で区別が必要な、果実間や枝間の距離よりも十分に小さく、枝や果実に対する注視とその移動の分析に適している。

3.1 節に示したように、摘果対象の枝の形状、枝についている果実の個数および摘果対

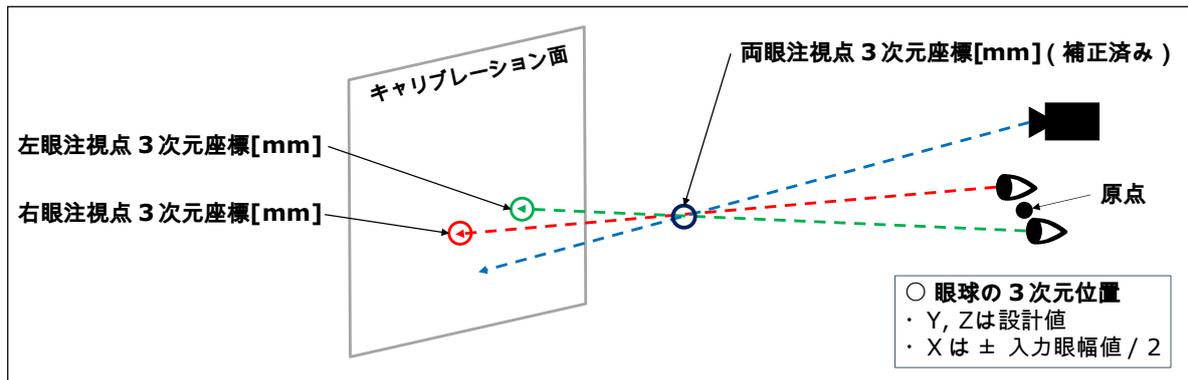


図 3.4 EMR-10 座標系 (nac 社資料を参考に著者が作成)

象の個数，各果実の位置はタスクによって個体差がある．しかし，熟練者と非熟練者の両者に対して，様々な長さの枝に対する視線計測を行い，枝の形状や果実の個数および摘果対象の個数に偏りが生じないように摘果対象を設定したため，視線データの範囲以外の補正は行わない．

3.3 分析

3.3.1 停留率

熟練者と非熟練者の間で予備摘果の判断対象である果実を探索する効率に差があるか比較するため，1タスク中の視線移動のうち，「停留 (Fixation)」に分類された視線移動の時間長の割合である停留率を求める．計測した視点データから，一定の時間長以上の間に一定の範囲内に視点が留まる状態である停留を求める．停留と次の停留の間の急速な視線移動はサッケードと呼ばれ，サッケード中の視覚情報はほとんど処理されず，知覚されない [11]．停留率が相対的に低い視線移動は，果実や枝を注視する時間に対して探索中の移動や次の対象への移動に費やす時間が長い事を意味する．その場合，単位時間あたりに判断，摘果できる果実数が少なくなると考えられる．

本研究では停留の抽出に移動重心点法を用いる．半径 10cm の球体内に視点が 100ms 以上連続して存在する場合，その視点群を 1つの停留とみなす．本研究で用いた EMR-10 の正確度は $\pm 1.5^\circ$ であり，Z 軸が 4m の位置を注視した場合，最大で約 10cm の誤差が生じる．このため，最大誤差が生じた場合でも同一点への注視として識別できるよう停留と判断する球体を半径 10cm に設定した．また，停留と判断する時間長は Manor らの研

究 [12] を参考に設定した。停留を構成する視点群の重心点を停留点とし、視線群に含まれる視点の時間長の合計を停留時間長（秒）と定義する。停留率は、タスク中に観測されたすべての停留時間長（秒）の合計をタスク時間（秒）で割った値とする。

3.3.2 AOI

熟練者と非熟練者の間で注視箇所の多少に差があるか比較するため、停留点を AOI (Area of Interest: 興味関心領域) に割り当てる。AOI はタスク中における注視箇所の多少や、同一の箇所への注視を判断するために、多くの視線分析研究で用いられている [13] [14]。AOI を用いた停留分析は熟練度の比較にもよく用いられている [6] [13]。

本研究では計測する停留が存在する 3 次元空間を縦 100 × 横 100 × 奥行き 100 の大きさが均等な直方体に分割し、計 1,000,000 領域を AOI として定義する。同一の AOI に含まれる連続した停留は、その AOI に対する 1 回の停留として数え、AOI 数とする。空間的に近い位置に対する連続した停留は、同一の対象物（たとえば特定の果実や枝）に対する注視と考えられるため、AOI 数はタスク中に注視した対象物の多さを示す指標となる。一方で、同じ対象物を繰り返し注視している場合には、AOI 数が多くても実際に新しく確認した対象物の数は少ない可能性がある。特に、非熟練者においては摘果の判断時に特定の 2 果を何度も見比べる、周辺の枝や果実を繰り返し確認するなどの行動が想定される。

そこで本研究では、タスク中に既に停留が生じた AOI を除外し、新たに注視された AOI のみを数える新規 AOI 数も定義する。さらに、タスク中における停留時間の合計長が長いほど AOI 数や新規 AOI 数が増える傾向があると考えられるため、停留時間長（秒）で正規化した AOI 数/秒および新規 AOI 数/秒を算出し、分析に用いる。

3.3.3 視線移動の向き

熟練者と非熟練者の間で果実や枝の位置関係をどのように把握しているか比較するため、視線移動の向きを評価する。摘果の対象となる果実は複数個が 1 本の枝に連なっており、枝の長さに応じて残す果実数の目安が決まっている。そのため、作業者は 1 本の枝全体を俯瞰しつつ、個々の果実に対する除去の可否を判断していると考えられる。このとき、観察対象となる枝は作業者の視界の左右方向 (X 軸)、上下方向 (Y 軸)、前後方向 (Z 軸) のいずれかに主として伸びているとみなせる。枝の伸びる方向によって果実間の距離の把握のしやすさや、葉に隠れた果実の発見のしやすさが異なると考えられる。

本研究では、視線移動の向きを連続する2つの停留点間における各軸方向の移動距離の比率から定量化する。停留 f_i の座標を x_i, y_i, z_i 、連続する2つの停留を f_i, f_{i+1} ($i = 1, \dots, F - 1$) とし、各軸方向の移動距離 d_x, d_y, d_z を以下で定義する。

$$\begin{aligned}d_x(f_i, f_{i+1}) &= |x_i - x_{i+1}| \\d_y(f_i, f_{i+1}) &= |y_i - y_{i+1}| \\d_z(f_i, f_{i+1}) &= |z_i - z_{i+1}|\end{aligned}$$

このとき、各軸方向の相対的な寄与を示す比率 r_x, r_y, r_z を次のように定義する。

$$\begin{aligned}r_x(f_i, f_{i+1}) &= \frac{d_x(f_i, f_{i+1})}{d_x(f_i, f_{i+1}) + d_y(f_i, f_{i+1}) + d_z(f_i, f_{i+1})} \\r_y(f_i, f_{i+1}) &= \frac{d_y(f_i, f_{i+1})}{d_x(f_i, f_{i+1}) + d_y(f_i, f_{i+1}) + d_z(f_i, f_{i+1})} \\r_z(f_i, f_{i+1}) &= \frac{d_z(f_i, f_{i+1})}{d_x(f_i, f_{i+1}) + d_y(f_i, f_{i+1}) + d_z(f_i, f_{i+1})}\end{aligned}$$

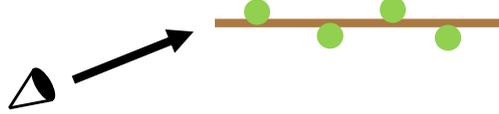
いずれかの軸について比率が0.5以上であった場合、その視線移動を当該軸方向（X軸、Y軸、Z軸）への移動として分類する。いずれの軸も0.5未満の視線移動は同じ枝にある果実間の移動以外と判断し、分析対象から除外する。

$$direction(f_i, f_{i+1}) = \begin{cases} \text{X軸} & \text{if } r_x(f_i, f_{i+1}) \geq 0.5 \\ \text{Y軸} & \text{if } r_y(f_i, f_{i+1}) \geq 0.5 \\ \text{Z軸} & \text{if } r_z(f_i, f_{i+1}) \geq 0.5 \\ \text{other} & \text{otherwise} \end{cases}$$

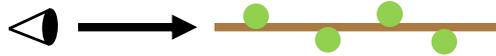
3.3.4 摘果開始時の被験者と枝の位置関係

視線移動の向きに加えて、被験者と摘果対象の枝の相対的な位置関係を分析する。1本の枝全体を確認する際、その枝は被験者の目線より「高い」「同じ」「低い」のいずれかに分類される（図3.5）。枝の高さは葉に隠れている果実の発見のしやすさや果実間の距離の把握のしやすさに影響すると考えられる。

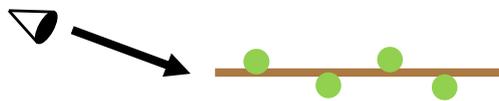
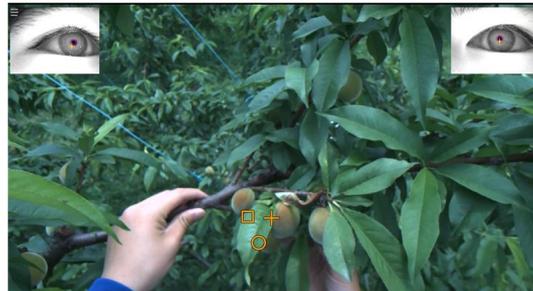
本研究では、摘果を開始する時点における被験者に対する枝の高さを、アイマークレコーダで記録された視界映像から「高い」「同じ」「低い」の3水準に目視で分類する。



(a) 高い



(b) 同じ



(c) 低い

図 3.5 被験者に対する枝の高さ

4. 結果と考察

実験で取得したデータの一覧を表 4.1 に示す。熟練者 3 名で計 74 タスク，非熟練者 6 名で計 62 タスクを実施し，タスク時間の平均はそれぞれ 48.6 秒，55.2 秒だった。

4.1 停留率

表 4.2 に停留率と 1 回あたりの平均停留時間を示す。停留率について，熟練者 (81.7%) は非熟練者 (51.6%) より 30.1 ポイント有意に高かった。熟練者の停留率は 72.1~87.9% と比較的狭い範囲に収まっているのに対して，非熟練者の停留率は 39.8~84.1% と被験者間のばらつきが大きかった。平均停留時間についても，熟練者 (0.77 秒) は非熟練者 (0.48 秒) より 0.29 秒有意に長かった。

熟練者と非熟練者の間で停留率に差が生じた理由として，停留点から次の停留点へ移動するサッケードに費やされる時間の違いが反映されたと考えられる。図 4.1 に実験で計測した熟練者と非熟練者の視線移動の一例を示す。図 4.1(a) 熟練者と図 4.1(b) 非熟練者はいずれも約 1 秒 (60 フレーム ± 3 フレーム以内) の視線移動を表しており，円は停留，矢印はサッケードを表す。円の大きさは停留時間に比例し，矢印の太さはサッケードに要した時間に比例する。茶色の線は視線付近に存在する枝の概形を示す。図 4.1(a) の熟練者では停留点から次の停留点への移動時間が短く，停留時間が長いことから，次に着目する

表 4.1 分析対象データ

	人数	タスク数			タスク長 (秒)	
		合計	平均	S.D.	平均	S.D.
熟練者	3	74	25.3	2.52	48.6	1.44
非熟練者	6	62	10.3	6.59	55.2	10.0

表 4.2 停留率と停留時間（秒）/回

	停留率		停留時間（秒）/回	
	平均	S.D.	平均	S.D.
熟練者	81.7%	14.8%	0.77	1.20
非熟練者	51.6%	24.2%	0.48	0.70
p 値 (T 検定)	p<0.001**		p<0.001**	

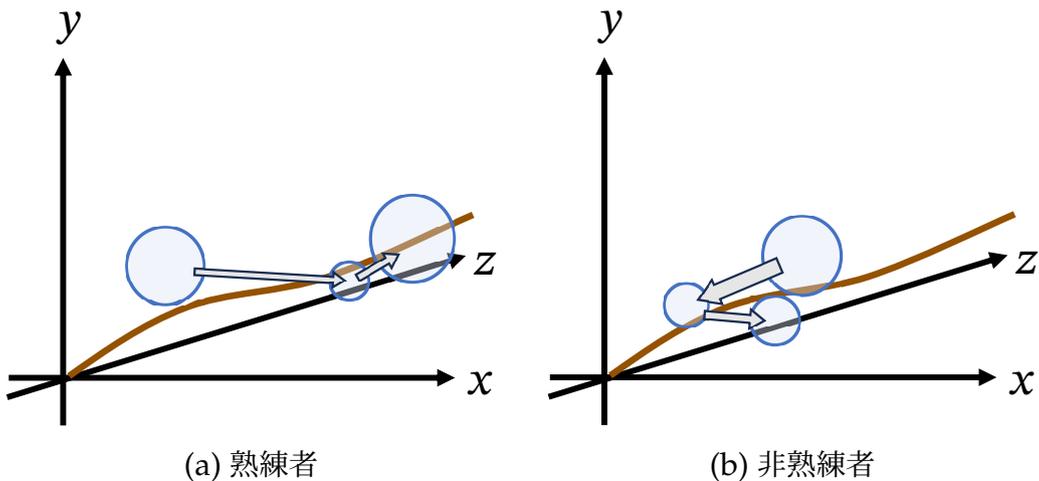


図 4.1 タスク中の視線移動の例

果実や枝を判断，識別するための探索時間がタスク全体の中で相対的に小さいと考えられる．一方，図 4.1(b) の非熟練者では停留点間のサッケードに長い時間を要しており，停留時間も短い．このことから，次に着目する箇所を判断，識別するための探索がタスク中の時間の多くを占めていると考えられる．

4.2 AOI

表 4.3 に AOI 数/秒および新規 AOI 数/秒を示す．AOI 数/秒について，熟練者 (1.36) は非熟練者 (2.31) より 0.95 有意に少なかった．新規 AOI 数/秒についても，熟練者 (1.04) は非熟練者 (1.77) より 0.74 有意に少なかった．これらの結果から，非熟練者は熟練者に比べて注視する AOI を高頻度で変更しているといえる．

表 4.3 AOI 数

	AOI 数/秒		新規 AOI 数/秒	
	平均	S.D.	平均	S.D.
熟練者	1.36	0.71	1.04	0.61
非熟練者	2.31	1.12	1.77	0.94
p 値 (T 検定)	p<0.001**		p<0.001**	

非熟練者がより高頻度で注視箇所を変更している結果に加えて停留率が低いという結果 (表 4.2) から、非熟練者は摘果の判断に必要な情報を持つ周辺の果実や枝を探索することにタスク時間の多くを費やしていると考えられる。タスク中の視野映像を確認すると、非熟練者は一度通り過ぎた果実に視線を戻して再度確認する動きや、果実を探すように枝の上を往復する視線移動が多く観察された。

4.3 視線移動の向き

表 4.4 に視線移動の向きの分布を示す。なお、3.3.3 節で記したように X 軸、Y 軸、Z 軸のいずれにも分類されなかった視線移動を分析から除外しているが、その割合は熟練者で 32%、非熟練者で 24% だった。熟練者、非熟練者ともに Z 軸方向の視線移動がもっとも多かったが、熟練者 (54.8%) は非熟練者 (68.1%) より 13.3 ポイント有意に少なかった。X 軸方向では、熟練者 (30.9%) が非熟練者 (23.8%) より 7.2 ポイント有意に多く、Y 軸方向でも、熟練者 (14.3%) が非熟練者 (8.2%) より 6.1 ポイント有意に多かった。

これらの結果から、熟練者は X 軸方向および Y 軸方向に伸びる枝に沿って視線を移動させることで果実を探索し、予備摘果を行っていると考えられる。一方で、非熟練者は Z 軸方向に伸びる枝に沿って視線を移動させる傾向が強いと考えられる。Z 軸方向に伸びる枝を見る場合、手前と奥の果実間の距離が把握しにくく、枝の長さあたりの果実数を基準とした予備摘果が難しくなる可能性がある。そのため、熟練者は意図して X 軸方向、Y 軸方向に視界中の枝が伸びるような位置から摘果を行っていると考えられる。

表 4.4 視線移動の向き

	X 軸		Y 軸		Z 軸	
	平均	S.D.	平均	S.D.	平均	S.D.
熟練者	30.9%	15.1%	14.3%	12.4%	54.8%	18.0%
非熟練者	23.8%	20.1%	8.2%	8.0%	68.1%	22.0%
p 値 (U 検定)	p=0.008**		p=0.010**		p<0.001**	

4.4 摘果開始時の被験者と枝の位置関係

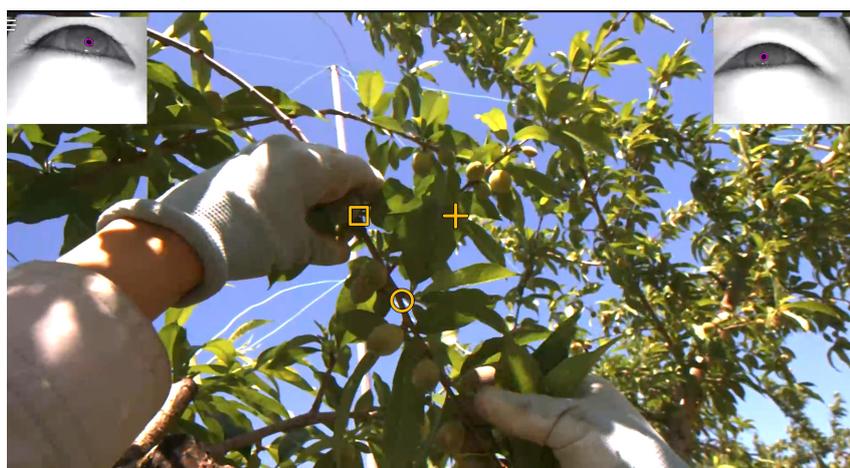
表 4.5 に摘果開始時の被験者と枝の位置関係を示す。3 種類の位置に対して分類されたタスク数を数え、熟練者と非熟練者それぞれのタスク総数に対する割合を示す。熟練者は被験者に対して高い枝を対象とする割合 (52.7%) がもっとも高い一方、非熟練者は被験者と同じ高さの枝を対象とする割合 (43.5%) がもっとも高かった。また、被験者に対して低い枝については、非熟練者 (27.4%) が熟練者 (9.5%) より 18.0 ポイント高かった。「高い」「同じ」「低い」の 3 区分における比率は熟練者と非熟練者の間で有意に異なった。

熟練者が枝を下から見上げる位置で摘果を行う理由として、果実が見えやすくなることが挙げられる。図 4.2 に、(a) 枝を下から見上げた場合と (b) 枝を上から見下ろした場合の視野画像を示す。(a) の方が視野内に複数の果実が確認できる一方で、(b) では視認できる果実の数が 2 個程度に限られている。このことから、枝を見上げる位置関係で摘果を行う方が果実の位置を把握しやすく、果実を発見しやすいと考えられる。

熟練者と非熟練者の視線移動の向きおよび枝との位置関係の違いは、停留率や AOI の分析から示唆された「非熟練者が果実や枝の探索に多くの時間を要している」ことの一因である可能性がある。一方で、摘果時に枝をどの位置から見るべきか、どのような立ち位置をとるべきかといった具体的な視界や姿勢に関する知識は、桃栽培に関する書籍に記載がなく、熟練者が経験的に獲得した暗黙知であると考えられる。この暗黙知を非熟練者に教育、共有することで、予備摘果の効率や効果を高められる可能性がある。

表 4.5 摘果開始時の枝の位置

	高い	同じ	低い
熟練者	52.7%	37.8%	9.5%
非熟練者	29.0%	43.5%	27.4%
p 値 (χ^2 検定)	p=0.004**		



(a) 被験者より高い枝



(b) 被験者より低い枝

図 4.2 枝の高さによる見え方の違い

5. 内的妥当性への脅威

本稿で述べた熟練者が持つ暗黙知としての「視線移動の向き」について、内的妥当性への脅威を検討する。非熟練者の計測は2回に分けて行っている。1回目の3名（非熟練者A）は熟練者と平均タスク長が近似するように、摘果対象とする枝数を少なく指定した結果、平均タスク長は47.9秒と熟練者（48.6秒）とほぼ同一となった。一方で、2回目の3名（非熟練者B）は摘果対象とする枝数を熟練者と同程度になるよう指定した結果、平均タスク長は57.6秒と長くなった。一度のタスクで対象とする枝の数が多いほど、観察対象を別の枝に変更するための視線移動が増え、視界中で枝の伸びる方向に沿った視線移動の割合が減少する。そのため、同じ非熟練者でも対象とした枝数が少ない群（非熟練者A）と枝数が多い群（非熟練者B）で傾向が異なり、熟練者と非熟練者間の差に影響を及ぼしている可能性がある。本章では非熟練者を2群に分類し、熟練者との差を検証する。

表5.1に非熟練者を2群に分けた場合の視線移動の向きの平均値を示す。熟練者はいずれの非熟練者群と比較してもZ軸方向の視線移動が有意に少なく、非熟練者を2群に分類しない場合と同じ傾向が確認された。一方で、X軸方向とY軸方向の視線移動については、群によって有意差が認められない場合もあった。これらの結果から、摘果を行う枝数が異なる場合でも非熟練者はZ軸方向に対する視線移動が多く、熟練者はX軸方向あるいはY軸方向に伸びる枝に沿って摘果していると考えられる。非熟練者の群によってX軸とY軸における有意差の有無が変化した要因としてタスク設定の差などが考えられる。今後、作業単位とする枝数の違いによる視線移動の変化を分析することで、新たな熟練者の暗黙知や、より良い教育方法の発見に繋がる可能性がある。

表 5.1 視線移動の向き（非熟練者を分割）

	X 軸		Y 軸		Z 軸	
	平均	S.D.	平均	S.D.	平均	S.D.
熟練者	30.9%	15.1%	14.3%	12.4%	54.8%	18.0%
非熟練者 A	29.6%	30.8%	1.0%	2.3%	69.4%	30.2%
非熟練者 B	21.9%	15.2%	10.5%	7.9%	67.6%	19.1%
U 検定: 熟-非熟 A	p=0.486		p<0.001**		p=0.003**	
U 検定: 熟-非熟 B	p=0.004**		p=0.0390		p<0.001**	

6. おわりに

本研究は桃栽培における熟練者の暗黙知を言語化することを目的として、栽培工程の1つである予備摘果に着目し、熟練者と非熟練者の視線移動を比較した。実験では、実際の桃の木を対象に予備摘果中の視線を計測し、タスク時間における停留率、AOI、視線移動の向き、および摘果開始時の被験者と枝の位置関係を分析した。実験の結果、熟練者は非熟練者より停留率が高く、AOI数/秒、新規AOI数/秒が少なかったことから、果実探索に要する時間が短いことが示唆された。また、視線移動の向きおよび摘果開始時の被験者と枝の位置関係の分析から、熟練者は枝を下から見上げる位置で作業を行い、視界中で左右および上下方向に伸びる枝に沿って視線を移動させていることがわかった。これにより、果実が葉に隠れず、果実間の距離を把握しやすい視点から作業を行うことで摘果の効率が向上している可能性が示された。これらの知見は摘果作業における熟練者の視覚的戦略の一端を明らかにするものであり、書籍やマニュアルに明記されていない暗黙知としての価値を有する。熟練者の立ち位置や視線の向きといった知見を教育プログラムに組み込むことで、非熟練者の作業効率、精度の向上につながる可能性がある。

本研究の今後の発展として、予備摘果と修正摘果の間で視線移動に違いがあるか調査することが挙げられる。摘果は段階ごとに目的が異なるため、それぞれの段階における視線移動を比較することで、新たな熟練者の暗黙知を抽出できると考える。また、柿や梨など他の果樹においても同様の手法を適用することで、果樹栽培における作業効率や教育支援に寄与する知見を得られる可能性がある。

謝辞

本研究における実験や分析，論文の執筆を進めるにあたり，多くの方々にご協力いただきました。この場を借りてお礼申し上げます。

岡山大学の先生をはじめ，岡山大学の学生，岡山県農業大学校の皆様，岡山県農業研究所の皆様には被験者実験へのご協力や桃栽培の知識，研究へのアドバイス等，多岐にわたって本研究へご協力いただきました。指導教員である上野秀剛准教授には，3年間の研究において多くの知識やアドバイス，論文執筆，資料作成など様々な面で手厚いご指導をいただきました。中間発表の副査教員である内田眞司教授，特別研究論文の査読教員である岡村真吾教授には，研究に対する大変貴重な意見をいただきました。研究活動に携わっていただいた皆様に深く御礼申し上げます。

参考文献

- [1] 宮田 晃, 基礎からわかる おいしいモモ栽培 農山漁村文化協会, 2018.
- [2] J. Nakamura, and S. Nagayoshi, "The pottery skills and tacit knowledge of a maser: An analysis using eye-tracking data," *Procedia Computer Science*, Vol. 159, pp. 1680–1687, 2019.
- [3] W. Yu, D. Jin, W. Cai, F. Zhao, and X. Zhang, "Towards tacit knowledge mining within context: Visual cognitive graph model and eye movement image interpretation," *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, Vol. 226, p. 107107, 2022.
- [4] S. Li, M. C. Duffy, S. P. Lajoie, J. Zheng, and K. Lachapelle, "Using eye tracking to examine expert-novice differences during simulated surgical training: A case study," *Computers in Human Behavior*, Vol. 144, p. 107720, 2023.
- [5] R.-J. Dzung, C.-T. Lin, and Y.-C. Fang, "Using eye-tracker to compare search patterns between experienced and novice workers for site hazard identification," *Safety Science*, Vol. 82, pp. 56–67, 2016.
- [6] A. Warchol-Jakubowska, "Using eye tracking to enhance the efficiency and safety of tram drivers - designing visual attention training," *ETRA '24*, No. 29, pp. 1–3, 2024.
- [7] M. Sugimoto, N. Kaneko, M. Oyamada, A. Tomita, and M. Sato, "Eye-tracking analysis for situation awareness of incontinence pad changing during older adult nursing training: An observational study," *Nurse Education in Practice*, Vol. 76, p. 103935, 2024.
- [8] H. Fu, Y. Tan, Z. Xia, K. Feng, and X. Guo, "Effects of construction workers' safety knowledge on hazard-identification performance via eye-movement

- modeling examples training," *Safety Science*, Vol. 180, p. 106653, 2024.
- [9] 北沢 知明, 谷本 佑, 廣瀬 拓也, 西森 空, 小原 敬弘, 中野 和彦, "ユズの収穫・選果作業における学習支援要点の可視化と学習コンテンツの学習効果", *農業情報研究*, Vol. 33, No. 2, pp. 65–72, 2024.
- [10] 岩崎 崇朗, 林 武文, 白岩 史, 井上 晴彦, "視線追跡によるカンキツ類の病害判定における重要行動の抽出", *電気学会研究会*, Vol. 2022, No. 28–34, pp. 19–23, 2022.
- [11] Y. Zhang, M. Valsecchi, K. R. Gegenfurtner, and J. Chen, "The execution of saccadic eye movements suppresses visual processing of both color and luminance in the early visual cortex of humans," *Journal of Neurophysiology*, Vol. 131, No. 6, pp. 1156–1167, 2024.
- [12] B. R. Manor, and E. Gordon, "Defining the temporal threshold for ocular fixation in free-viewing visuocognitive tasks," *Journal of Neuroscience Methods*, Vol. 128, No. 1–2, pp. 85–93, 2003.
- [13] G. Cheng, D. Zou, H. Xie, and F. L. Wang, "Exploring differences in self-regulated learning strategy use between high- and low-performing students in introductory programming: An analysis of eye-tracking and retrospective think-aloud data from program comprehension," *Computers Education*, Vol. 208, p. 104984, 2024.
- [14] Y. Wang, L. Wang, S. Lin, W. Cong, J. Xue, and W. Ochieng, "Effect of working experience on air traffic controller eye movement," *Engineering*, Vol. 7, No. 4, pp. 488–494, 2021.