

リンゴ収穫の機械化に必要なステレオ視システムの 開発に関する研究

高橋 照夫

地域環境計画学講座

(2001年10月5日受付)

目 次

第1章 緒論	42	5. 要約	77
1. 研究の背景	42	第5章 試作ステレオ視システムにおける画像 入力条件の影響	77
2. 既往研究の概要	44	1. 緒言	77
3. 本研究の目的と構成	45	2. 本手法による距離測定の影響要因	78
第2章 ステレオ視システムの試作	45	3. リンゴ園果実画像におけるRGB濃度 分散の特徴	78
1. 緒言	45	4. 距離精度に及ぼす画像入力条件の影響	83
2. 構成と機能	46	5. 要約	86
3. 試作システムのカメラ制御	49	第6章 立体形状計測と位置制御へのステレオ視 法の応用	86
4. キャリブレーション	50	1. 緒言	86
5. 要約	57	2. 果実形状のステレオ視計測に関する実験	87
第3章 左右画像合成によるステレオ視計測法 の開発	57	3. 線要素パターン方式による輪郭形状 の取得	90
1. 緒言	57	4. 収穫マニピュレータの位置制御への応用	93
2. 左右画像合成による距離測定法	58	5. 要約	97
3. 本手法の基礎的性質に関する実験	61	第7章 総括	98
4. リンゴ園果実画像に対する適用	65	謝辞	100
5. 要約	67	参考文献	101
第4章 ステレオ対応問題画像の分析と対策	68	Summary	104
1. 緒言	68		
2. 偽像の発生とその抑制対策	68		
3. 対応問題画像の処理例	72		
4. リンゴ園果実画像への適用	76		

第1章 緒 論

1. 研究の背景

果実は、わが国で古来より嗜好品としてのほか健康食品としての価値が認識され、食生活の中に確固たる地位を築いてきた。近年の国内消費量は生食用と加工用合せて年間800～900万トンで推移し、主食の米に迫る量となっている。このうち、国内生産量は約400万トンであり、種目別にみるとりんご約120万トンとリンゴ約100万トンの占める割合が高く、以下ナシ、ブドウ、カキがそれぞれ約40, 25, 25万トンである(48)。

一方、現在わが国の果樹農業は、栽培従事者の高齢化、後継者不足、生産農家の減少等により労働力の確保

が困難となりつつあるのに加え、輸入自由化や消費動向の変化等による販売競争などで、極めて厳しい環境におかれている。果樹生産費調査(47)によると、果樹栽培の10a当たり労働時間は250～280時間で、生産費合計に占める労働費の割合はミカンが約65%、リンゴが68%となっていて、水稲作などに比べ非常に高く、労働時間及び労働費を削減することが、経営改善のみならず地域の生産基盤を強化する上で重要な課題になっている。

国内のリンゴ生産量の約半分を占める青森県ではこうした状況を踏まえ、高品質を維持しながら省力、低コスト生産と軽労化を図るための方策として、園地整備やわい化樹栽培の普及とともに、剪定や摘果、防除、着色管

表 1.1 果実収穫の機械化の段階（予想）
Table 1.1 Some stages of mechanization for fruit harvesting (prediction)

方 式	形 態	オペレータの作業・操作
1. ハシゴ	ハシゴ	昇り降り, 手収穫
2. 高所作業台車	作業台	台上移動, 手収穫
3. アームボックス作業車	作業用アームボックス + 台車	アームボックスの接近操作, 手収穫, 台車運転
4. 視覚センサー・アーム作業車	視覚センサー + 収穫アーム + 台車	アームの接近・収穫時の補助操作, 台車運転
5. 視覚センサー・アーム自律作業車	視覚センサー + 収穫アーム + 自律走行車	アーム自動接近・収穫・台車移動の遠隔管理・指示

表 1.2 リンゴ収穫用視覚センサシステムの使用条件と所要性能の例
Table 1.2 An example of use conditions and required performance on visual sensing system for apple harvesting.

(1) 使用条件	内 容
ほ場環境	屋外リンゴ園, 緑色葉繁茂, 地面: 草地, 裸地
栽植様式	普通栽培, わい化栽培
樹冠寸法	普通樹 (幅 × 奥行き × 高さ): 8m × 8m × 4m わい化樹 (同上): 4m × 4m × 3m
果実条件	果実色: 赤色系, 黄緑色系 寸法 (径 × 高さ): 約 70 × 70mm ~ 90 × 90mm
作業期間	収穫期: 9月 ~ 11月
日光条件	天候: 快晴 ~ 雲, 時間: 午前 8時 ~ 日没前
(2) 所要性能	内 容
測定範囲	距離 5m, 高さ 0.5 ~ 4m
距離精度	収穫範囲 (2m 以内) 2%, 探索範囲 (2 ~ 5m) 5%
距離分解能	収穫範囲 (同上) 1%, 探索範囲 (同上) 2%
識別能力	果実, 枝葉, 支柱, 背景, 人工物
画面表示	三次元画像 (または, カラー画像と距離画像)
処理速度	実時間処理

理, 収穫などの作業について, 多目的管理機, 無人スピードスプレーヤ, 高所作業台の導入が奨励され, 機械化による生産性の向上が推進されている(1)。しかし, 労働時間の 40%前後を占める収穫作業では, 機械化がほとんど進んでいないため, 大幅な労働時間の削減は困難な状況にある。

収穫作業の機械化が進展しない主な理由は, 一般に軟質で傷つきやすい果実を, 生食用としての外観や品質を確保しつつ, 枝葉等の障害物を避けて収穫するための柔軟かつ高度な構造と機能を備えたシステムの開発が極めて難しいことにある。また栽培農家の経営的制約を考慮した経済性も要求される。それらの条件を満たす機械の開発はこれまで全く不可能であった。しかし, 近年電子・コンピュータ技術の発達を基礎とした各方面での機械化やロボット化技術の発展・普及に伴い, 種々の果実について収穫作業の自動化・ロボット化を試みる研究が急速に増加している(22, 51)。

リンゴ果実収穫における機械化の発展段階は, 表 1.1 に示すように, 作業者の操作をかなりの部分で必要とする半自動化から自律的な収穫が可能な全自動化まで種々

予想される(21, 52, 74)。自動化を前提とした開発に当たっては, そうした段階のいずれにおいても, 前述の条件に加え, a) 自然光環境下で広い果樹園の中から多数の果実を識別し, それらの位置を特定する能力, b) 作業者と機械との協調及び役割分担の明確化, c) 収穫作業に付随又は関連する作業との連携, 及び d) 収穫作業以外にも利用可能な多用途性, などに留意することが必要になる。

例えば, やや将来的な機械化の段階として, 視覚センサーと関節アーム型の収穫装置を備え, リンゴ園内をガイド等を検出しながら移動し, 自動的に果実の収穫を行う状況を想定すると, 収穫機械には, 樹冠内の果実を探索・識別し, それらの三次元位置を計測する能力と, 収穫アームを果実に接近させて把持・収穫を行い収納する能力が要求される(30, 65)。作業者は 1 台又は複数台の収穫機械について作業状況を監視し, 動作不安定時や緊急時に適宜指令を出すなど, 全体の統括的な役割を担うことが考えられる(25)。その場合, 視覚センサーによる識別・計測機能が生育期全般の果実等にも適用できれば, エンドエフェクタの交換で, 収穫だけでなく摘果や

防除の管理作業にも利用することが可能になるであろう。

本研究は、そのような機械化において重要な役割を担う視覚センサシステムの開発と利用法の確立を主眼にしている。果実の機械収穫で視覚センサシステムが満たすべき要件は表 1-2 のようになると思われる。すなわち、自然環境下での果実の識別・認識と位置・距離の計測とともに、果実周囲の枝葉等の状況把握、及び各部の動作制御のための視覚情報を作業者と共有可能なことが求められる。そこで本研究の目標を、人間の視覚系と同様、視覚センサによる画像入力がカラーでなされ、かつ三次元情報の取得が可能なことを要件として、ステレオ視法(14, 72, 95, 99, 100)に基づく計測システムの開発においた。その基本的な考え方については、これまで果実収穫用機械の開発等で研究された識別と位置計測に関する種々の手法を概観しながら以下に述べる。

2. 既往研究の概要

(1) 果実の識別と認識に関する研究

TV カメラを視覚センサとして用いた入力画像において、果実と枝葉や背景等を識別する画像処理は、一般に明度や色特徴を指標に選定し、そのしきい値を決めて全画素の 2 値化を行うことにより、対象物のみを抽出する手順で行われる(90, 91)。さらに、その特徴把握のため、領域分割によってラベル付けを行い、面積や重心位置などの形状と色の各特徴量を算出する。また、対象物を類似物と区別して認識するため、種々の特徴量をカテゴリ別に分類し比較判定する処理が行われる(43, 60)。

このような 2 値化による識別の処理では、その指標としきい値が識別の精度を左右するため、それらの決定をどのように行うかが重要になる。これまでの果実や野菜などを対象にした研究によると、モノクロ画像では輝度や明度(28, 29, 34, 46, 57, 67, 92, 93, 94)、カラー画像では三原色 RGB の中で優勢な成分、それらの差または比(28, 68, 75)、あるいは HSI 表色系の成分(45, 69, 70, 71, 87)などが指標として用いられ、それぞれヒストグラムからしきい値を決定する方法(90)が広く採用されている。

しかし、リンゴ園で収穫作業時、果実の周囲には通常枝葉や支柱など作業の障害になるものが多く存在するので、識別処理ではそれら周囲の物体や背景も個別に識別する必要があり、果実だけを対象にする上述の方法は十分でない。

そのような識別は、輝度や明度を指標に用いるモノクロ画像では一般に難しいが、果実と周囲物体の色調が異なるカラー画像については、それぞれの色特徴に関する 2 値化を多段階に行う手法(76)や、それらの色特徴をニューラルネットワークで学習させて利用する手法(77)などが研究されている。しかし、識別すべき物体が多数存在する場合には操作が複雑で処理時間が長くな

るなど、カラー画像処理の手法としてはまだ十分確立されていない。

また、色特徴によらず、近赤外線に対する果実と枝葉等のスペクトル吸収特性の相違や形状特徴の違いを利用して識別する手法も研究され、有効性が報告されている(3, 8, 9)。ただし、作業者が目視で赤外線画像から果実とその周囲の状況を認識することは難しく、作業者と機械との視覚情報の共有という点で問題があるため、利用範囲が限定される。

カラー画像では、一般に物体の輪郭や境界において RGB 濃度が急激に変化するので、その性質を利用して領域に分割し、HSI 表色系の色特徴や形状特徴によってカテゴリに分類する識別手法も考えられる。その方法では、2 値化処理のしきい値の代わりに、輪郭や境界を検出する値の決定が必要になるが、計算処理としては 2 値化のしきい値を用いて多段に行うよりも簡単になる場合が多い。

以上より、本研究では、カラー画像内の対象物の識別に際して、2 値化処理手法の代わりに、色相と RGB 濃度の変化を検出して領域に分割する方法を主に採用する。

(2) 果実の位置・距離の計測に関する研究

リンゴ園で果実を収穫するためには、対象とする果実を周囲の物体から識別するとともに、その位置に関する情報を得ることが必要である。その内容としては、収穫機を基点とする三次元座標のほか、その周囲の物体(他の果実や枝葉など)との相対的な位置関係が挙げられる。すなわち、収穫機から対象果実までを範囲とする三次元空間内の物体の状況を把握しなければならない。

物体の三次元位置を求める計測法には、光、レーザ、超音波などを対象物に投射し、それらの反射状態を測定して距離や位置を知る能動的方法と、そのような特別な措置を講じないで、カメラ等で撮影された画像から距離や位置を測定する受動的方法がある(26, 96)。

工業関係の三次元計測では、精密な測定が可能なレーザを用いた能動的方法が利用されている(2, 5, 17, 18, 24, 49, 66, 80, 105, 104, 106)。果実収穫の分野では湯川ら(107)やスプラタラ(73)によるミニマトを対象にした研究などがある。しかし、屋外の自然光環境の条件下で光やレーザ光を投射する方式は一般に外乱の影響を受けやすく、広い空間にランダムに存在する多数の果実と周囲物体との識別を自動処理で確実に行うことは困難である。

一方、TV カメラなどの視覚センサを用いる受動的方法は、近年のカメラ技術の向上で盛んに研究されるようになった。果実の位置計測への利用では、単眼カメラを用いた近藤ら(27)の研究などがあるが、対象物の三次元情報を得る方法としては、2 台のカメラを用いる両眼ステレオ視(立体視)法があり、工業分野をはじめ種々の分野でその利用が試みられている(95, 100)。果実収穫の分野では、川村ら(22, 23)、藤浦ら(13)、張

ら(10)がステレオ視による距離計測の研究を行い、1m前後の撮影距離で1%内外の精度であることを報告している。しかし、それ以上の距離では精度が急激に低下することや、果実の個数が多くなると左右画像で同一果実の対応づけが難しくなることが指摘されている。

両眼ステレオ視における左右画像の対応づけの問題(33)は、ステレオ対応問題と呼ばれ、工学分野(54, 97)をはじめ、情報科学(4, 36, 37, 79)、視覚神経生理学(16)、心理学(35)などの分野で数多く研究されてきたものの、未だ一般的な解決法が見出されていない困難な問題である。それが、両眼ステレオ視法を利用した自動化技術が待望されているにも関わらず、開発の妨げになっている大きな理由である。

その解決策として研究されている代表的な画像処理手法には、局所相関法(20, 32, 39, 101)、弛緩法(15, 63)、伸縮法(50)、動的プログラムマッチング法(58)、線構造法(6)、領域法(53)などがある。さらに最近では、幾何学的拘束に基づく数学的手法(12, 19, 108)や、遺伝的アルゴリズムを利用したパターンマッチング法(78)などが試みられている。

これらの研究のほとんどは、左右画像内の物体の対応関係を個別に調べ、三角測量の原理によって三次元座標を取得して立体構造を求める考え方に立脚している。直線や平面で構成される人工的な世界シーンへの適用において有効な場合が多い。収穫時の果実画像についても、対象果実の特定が容易な画像に対しては有効なもの(51)、類似した果実が水平方向に多数並んでいる場合や重なり合った場合などには対応づけが困難になる。さらに、周囲の物体の位置計測に適用するに際しても、それらの色や形状が多種多様で予測できないため、従来の手法では不可能か又は処理時間が膨大になるなどの欠点を抱えている。

ステレオ視法の利用には、このような未解決の課題があるものの、前述した視覚センサの所要条件、すなわち、収穫時の果実とその周囲環境に関する三次元情報の把握、作業者と情報の共有、収穫以外の作業にも利用できる多用途性等の条件、を満たすために必要になる三次元空間内のカラー情報と位置・距離情報の取得が、人間の視覚系と類似した構造によって、同時に一つの観測視点から行えるという特徴があるので、今後最も有望な手法と考えられる。

ところで、人間の視覚系に関する研究(56, 61, 62, 64)によると、両眼視によって三次元情報を知覚する過程には、「注視」などの能動的な意識活動が密接に機能していることが知られており(35)、それらが対応問題の軽減にも寄与していることが予想される。そこで、両眼ステレオ視法を利用する場合には、従来のような受動的な面からだけでなく、能動的な面を考慮した検討が必要と思われる。しかし、そうした研究はこれまで大森(55)や滝沢ら(89)などの数例にとどまっている。本

研究ではその点に着目して、両眼ステレオ視に関する新たな測定原理と対応問題の対策について検討を行った。

3. 本研究の目的と構成

本研究の目的は、果実の自動収穫を前提にした機械化を図るため、果実とその周囲の環境に関する三次元視覚情報を入力する手段として、両眼ステレオ視による計測手法を開発し、その計測システムを確立することにある。そのため、次の4課題に的を絞って検討を行うことにした。すなわち、(a)ステレオ視システムの機械的距離特性の究明、(b)両眼ステレオ視に関する新たな測定原理と手法の考案、(c)ステレオ対応問題の分析と解決策の立案、(d)諸因子の因果関係と距離精度に及ぼす影響の究明、である。さらに、本研究の手法を果実の立体形状計測と収穫マニピュレータの位置制御に適用する場合について、その可能性と問題点を考察した。

本研究の意義と効果に関しては、(a)距離画像とカラー画像を同時に取得することにより、果実とその周囲の環境に関する情報を人間の視覚と同様に収集でき、(b)位置計測が三次元で行われるので、果実を採取するためのハンドの接近動作や収納動作などの収穫機の制御を視覚情報と連動させて行うことが可能になり、(c)収穫機の走行用視覚システムとして走行経路に関する三次元情報の取得と自律的な操向制御にも利用し得る、等が挙げられる。

本論文の内容と構成は次の通りである。第2章で、本研究に供試したステレオ視システムのハードウェア面を中心に、構成と機能及びカメラ制御の方法を述べ、キャリブレーションにより距離精度を検討した。第3章で、左右画像合成によるステレオ視計測法の開発にあたり新たに考案した測定原理について述べ、その手法の基礎的性質に関する実験とリンゴ園果実画像への適用実験によって、その有用性を検討した。第4章で、ステレオ対応問題画像について、偽像の発生状況を分析して抑制策を立て、その効果を典型的な対応問題画像の処理とリンゴ園果実画像への適用によって検証した。第5章で、画像入力条件が計測精度に及ぼす影響について実験的に調べ、測定誤差の要因別に実験結果を分析して、試作システムの実用的な利用条件を考察した。第6章では、本研究のステレオ視法の応用として、果実等に関する形状計測の実験と、収穫マニピュレータの位置制御への利用に関する数値シミュレーションを行い、それらへの適用について検討した。

第2章 ステレオ視システムの試作

1. 緒言

両眼ステレオ視法は、図2.1に示すように、2台のカメラで撮影された一対の画像をもとに、三角測量の原理に基づいて三次元位置を計測する方法である。その測定精度は、各カメラレンズ系の撮像特性及び距離特性と、

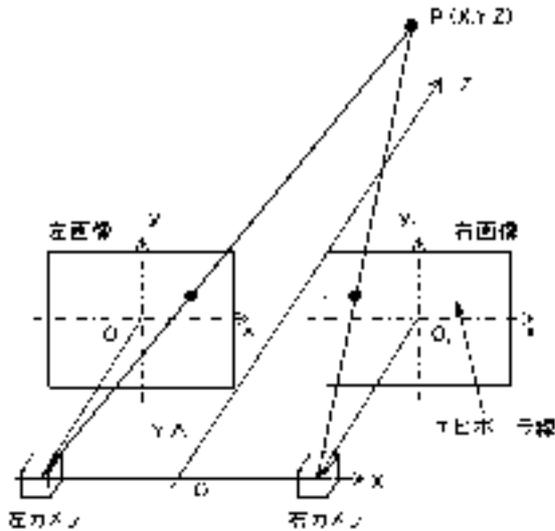


図2.1 両眼ステレオ視法による計測

Fig. 2.1 Measurement method by binocular stereo vision.

ステレオ光学系の構成状態により大きな影響を受ける。特に、リンゴ園での測定では、対象にする果実が広い樹冠の内外に存在するため、ステレオ光学系のわずかな誤差で測定精度が急激に低下し、遠距離にあるものほどその影響が著しく現れる。

また、リンゴ園で機械によって自動収穫を行うためには、撮影した画像の処理によって果実を探索し、的確に識別する必要がある。そこで、計測システムには、対象果実が左右カメラの共通視野内に入り、所定範囲の大きさで同時に同一の撮影条件で収録できるように、望遠用のズーム機構とフォーカス・露出などの自動調節機構を備えたカメラ、及びカメラ部を上下左右に回転させるパン・チルト機構が要求される。両眼ステレオ視システム

を用いる場合には、それらの使用条件を考慮して、予め精密なキャリブレーションを行い、そのシステムの計測特性を明らかにしておかなければならない(42)。

本章では、上述の点に留意して試作したステレオ視システムについて、ハードウェア面を中心に、その構成内容とキャリブレーション実験で得られた機械的距離特性を述べる(84)。

2. 構成と機能

(1) 試作方針

収穫期のリンゴ園で使用する試作システムの条件別目標範囲を表2.1のように設定し、システムの要件として次の点に留意した。すなわち、左右2台のカメラが同一の規格と性能を持ち、かつ両者が適切な配置状態であること、撮影像の色特徴や形状特徴の再現性が良好で、対象物の遠近や光環境の影響を軽減できるように、フォーカス、露出、ホワイトバランス等の自動調節機能を備え、かつズーム機構のコンピュータ制御が可能なること、一連の作業を自動化するため、撮影・画像入力・保存・処理の各操作がコンピュータプログラムで制御できること、等である。

距離の測定精度については、マニピレータ等による収穫作業範囲を収穫機本体から約2mと想定し、その位置で40mm程度(果実径の半分程度)の誤差であれば果実とハンドとの相対的位置関係をもとに動作の修正が可能と予想されるので、2%に設定した。また、2m以上では果実の探索が主になるので5%とした。なお、処理時間については、実時間処理が必須条件であるが、本研究では新たな測定原理とアルゴリズムの検証及び諸条件の影響を明らかにすることを主眼に、1分以内を制限範囲とした。

表2.1 試作システムの使用条件別目標範囲

Table 2.1 Each target performance of use conditions for the trial vision system.

条 件	区 分	内 容
対象物条件	識別対象	果実とその周囲物体
	果実色 寸法	赤色系と黄緑色系の2品種 80×80mm 前後(指定可能)
環境条件	日光条件	天候: 晴~曇, 時間: 午前9時から日没まで
	照射状態	直射・乱反射・陰影等樹冠内外の状態
撮影条件	撮影距離	約1m~5m
	距離精度	2m以内2%, 2m以上5%
	撮影方向	順光・逆光とも撮影可能
	カメラ機能	パン・チルト機能装備 ズーム調節可能, パソコンで制御 ホワイトバランス, 露出, フォーカスは自動調節
画像処理条件	画像入力と処理	カラー, RGB濃度24ビット
	識別指標	色特徴(形状, テクスチャも考慮)
	解像度	320×240画素, 左右カメラ同質画像
	画面表示 処理速度	カラー画像と距離画像 1分以内

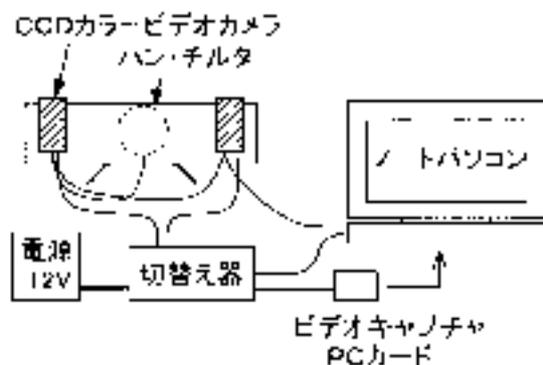


図2.2 試作システムの構成

Fig. 2.2 Components of a trial stereo vision system.

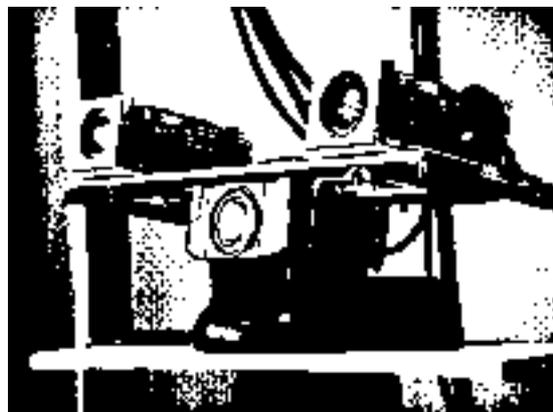


図2.3 試作システムのカメラヘッド部

Fig. 2.3 Camera head of the trial vision system.

(2) 主な構成と機能

試作システムの主な構成は、図2.2のように、CCDカラービデオカメラ2台、ノートパソコン、キャプチャPCカード、パン・チルト式カメラ台、及び画像入力切替器である。カメラヘッド部の外観を図2.3に示す。各構成要素の内容は以下の通りであり、仕様を表2.2に示す。

ビデオカメラは、38万画素のCCD素子撮像面をもち、NTSC信号を出力するアナログタイプである。撮影時のフォーカス、露出、ホワイトバランス等は本体の自動調節機構でなされるとともに、RS232Cインターフェースを介してパソコンでそれらの制御やズーム調節を行うことが可能である。

キャプチャPCカードは、ビデオカメラから出力されるNTSCカラー信号をパソコン入力用のデジタル信号に変換する機能をもつ。解像度は最大640×480画素、三原色RGBの濃度分解能は各々最大8bitである。本研究では解像度を320×240画素、RGBの分解能を各原色とも8bitとして使用した。

ノートパソコンは、CPUクロック周波数が133MHzのPentium搭載機で、2台のカメラのスチル撮影と画像入力の制御、及びハードデスクへの保存を行う。本体が軽量で、放電時間は約3時間である。

パン・チルトは、水平旋回（パン）と上下回転（チルト）の2方向の首振り機構をもつ市販カメラの筐体部分で代用し、カメラ台を上部に取り付けたものである。同機構の操作はRS232Cを介した通信によりパソコン側から行うことができる。首振り範囲は、水平旋回角が±96°、上下回転角が±23°である。

画像入力切替器は、2台のカメラの画像出力信号を交互に切替えるもので、手動切替えとTTL信号による切替えが可能である。本システムではパソコンのプリンタポートを利用してプログラム上で切替えができるようにした。電源には、2台のカメラとパン・チルトの駆動源として自動車用12Vバッテリーを用いた。

距離測定値の校正は、レーザ距離計を用いて行った。

その主な仕様を表2.3に示す。同距離計は、光源に670nmの可視光レーザダイオードを用いた携帯型で、測距範囲が0.2～100m、測距精度が±3mmである。手動計測とRS232Cを介したパソコン制御による自動計測が可能である。

試作システムの主な特徴は、左右一対のカメラでほぼ同時に撮影できること、パソコンによるカメラ制御とそのデータの取得が可能なこと、及びカラー入力画像（RGB 24bit）をデジタル画像として保存できること、全体として軽量であり、可搬性に優れていることなどである。撮影可能時間は、バッテリー放電時間に制限され、パソコン、カメラ、レーザ距離計とも約3時間であった。

(3) 処理プログラムと操作手順

1) 処理プログラム 処理プログラムは、カメラ制御用、画像入力・保存用、モニタ画面表示用及び距離計算用の各プログラムで構成される。図2.4にその概要を、図2.5に処理の流れを示す。カメラ制御用プログラムは、パン・チルトとカメラのズーム機構を制御する。画像入力・保存用プログラムは、ビデオキャプチャ用PCカードのドライバを介して画像入力やハードデスクへの保存実行を命令する。モニタ画面表示用プログラムは、原画像、処理結果画像及び関連データをモニタ画面に表示する。これらの使用言語は、ビデオキャプチャカードのドライバと連携させるためVisual Basicで統一した。距離計算用プログラムは、第3章で述べる両眼ステレオ視の測定原理に基づいて距離を算出する。計算速度を上げるためC言語で作成した。計算処理は、実行ファイルを上述の画面表示用プログラムの中から呼び出して行われる。

モニタ画面表示用と距離計算用のプログラムは、それぞれ測定距離が既知のもとで校正に使用するキャリブレーションモードと、未知の場合に使用する測定モードの2種を用意した。操作は、前者では手動、後者では手動または自動で行われる。ただし、自動操作は試用段階

表 2.2 試作システムの主要構成要素に関する諸元
Table 2.2 Specifications on main components of the trial vision system.

(1) CCD カラービデオカメラ		内 容
型 式		蝶理 ML-310 (ソニー EVI-310)
撮像素子		1/3" インターライン方式 CCD 個体撮像素子
有効面積		768(H) × 494(V), 約 38 万画素
信号方式		NTSC 方式, YC 分離ビデオ出力 (S ビデオ) あり
レ ン ズ		8 倍ズーム f = 5.9 ~ 47.2 mm, F = 1.4, オートフォーカス付き (インナーフォーカス)
画角 (水平)		約 44.3° (ワイド端) ~ 5.8° (テレ端)
レンズ構成		6 群 9 枚 (非球面レンズ 2 枚含む)
最短撮影距離		10 mm (ワイド端), 900 mm (テレ端)
映像出力		VBS 1.0 Vpp 同期負, 75 不均衡, コンポジット
解像度 (中心)		水平 460 TV 本以上, 垂直 350 TV 本以上
最低被写体照度		6 lx F1.4 (50 IRE 以上)
ホワイトバランス		TTL 自動追尾 (手動, 固定も可), 固定屋内, 固定屋外
S/N 比		46 dB 以上, 電子シャッタ 28 段階 (1/60 ~ 1/10,000 秒)
電源, 外形寸法, 質量		DC 6 ~ 9 V (2.8 W), 49 × 51 × 100 mm, 210 g
リモートコントロール		VISCA / RS232C ネットワーク経由, カメラ制御
(2) ビデオキャプチャ PC カード		内 容
型 式		NEC PC-9821-CS02
タ イ プ		PC カード標準 Type II, ZV Port
表示サイズ		640 × 480, 320 × 240, 160 × 120
キャプチャ画像フォーマット		RGB 24 bit (YUV 4:2:2 可)
(3) サブノートパソコン		内 容
型 式		NEC-9821La13
CPU, RAM		Intel Pentium 133 Mhz, 48 MB
OS		Windows 95 (キャプチャ画像表示・保存 VB5CCE) MS-DOS モード (VISCA プログラム Turbo C 用)
内臓ハードデスク		IDE 1.3 GB
(4) パン・ティルタ		内 容
カメラ間隔		300, 250, 200, 150 mm (設定可能)
角度範囲		上下 -23 ~ 23°, 左右 -96 ~ 96°
コントロール		VISCA Network によるパソコン制御可
(5) 画像入力切替器		内 容
切替え方式		手動: トグルボタン, 自動: ON/OFF リリースイッチ
電 源		カメラ供給用 12 V

表 2.3 レーザ距離計の仕様
Table 2.3 Specification of the laser range meter.

項 目	内 容
型 式	ライカ DATA DISTO RS232C
発光レーザダイオード	620 670 nm, 赤, クラス II
測定範囲	0.2 m ~ 30 m (ターゲットありの場合 100 m まで可)
測定精度	± 3 mm
測定時間	2.5 ~ 10 秒
操作制御	RS232C を介してリモートコントロール可

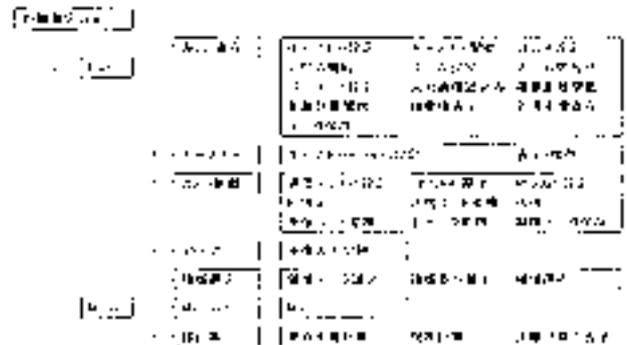


図 2.4 処理プログラムの概要 (距離測定モード)
Fig. 2.4 Outline of processing programs (mode of measuring distance).

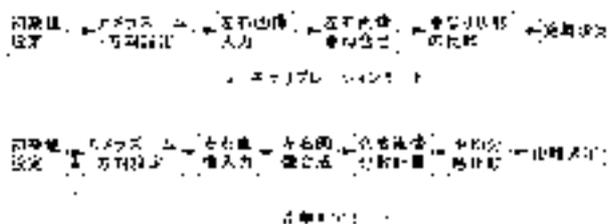


図 2.5 処理の流れ

Fig. 2.5 Flow chart of the image processing:
 (a) calibration mode,
 (b) mode of measuring distance.

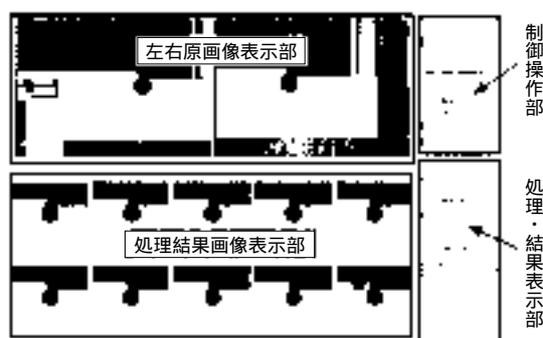


図 2.6 モニタ画面表示の例 (キャリブレーションモード)

Fig. 2.6 An example of the display showing on a monitor
 (calibration mode).

である。

モニタ画面の表示例を、キャリブレーションモードの場合について図 2.6 に示す。同図のように、原画像表示部、制御操作部、処理操作・結果表示部、処理画像表示部から成る。同モードの距離計算では、操作者が目視で左右両原画像の対応箇所をモニタ画面上で探して指定し、三角測量の原理で算出する目視方式を併用できるようにした。測定モード用のモニタ画面では、処理画像表示部が合成カラー画像部と距離画像部で構成される点がキャリブレーションモード用と異なる。

2) 操作手順 測定モードでの手動操作手順は、まず操作者が対象物にシステムの向きを合せ、左右カメラのズーム調節を行い、フォーカス、露出、及びホワイトバランスの自動調節後、左右カメラを順次切替えて対象物を静止画として撮影し、両画像をハードディスクに保存する。距離の算出は、距離計算プログラムにより一対の左右画像を読み込んだ後、左画像内の対象物を手動(または自動)で特定して行われ、結果がモニタ画面に表示されるとともにハードディスクに保存される。

キャリブレーションモードでの操作手順は、画像の入力・保存までは上述と同じであるが、距離計算は、操作者が目視方式で求めた距離の前後に測定範囲を絞って行われる。

3. 試作システムのカメラ制御

カメラ制御の目的は、収穫する果実の正確な三次元位

置を得るため、その果実が試作システムのカメラヘッド正面に所要範囲の大きさの像で撮影されるように、カメラヘッドの向きと左右両カメラのズームを調節することである。ここでは、向きの調節をパン・チルト制御、ズームの調節をズーム制御と呼ぶ。制御方法は、入力画像の処理結果に基づく自動方式と、操作者がパソコンで指示する手動方式の2方式とし、収穫作業時には自動方式で行うことを目標にする。以下では、上述の制御を行うための構成・機能及び方法とそれらの制御時の動作特性を検討した。

(1) カメラ制御機構と制御方法

1) 制御機構の構成と機能 a) ズーム機構: 供試 CCD カメラは 6 群 9 枚のレンズで構成されており、ズームとフォーカスの制御でそれらのレンズ群が移動する。オートフォーカスモードでは、ズーム位置の設定に伴いフォーカスレンズ群が自動的に合焦位置に駆動される。カメラ内蔵のズーム機構は、レンズ群を高速ステッピングモータで前後に駆動する。最望遠から最広角までの位置分解能が 1,023 段階 (16 進数で 0 ~ 3FF), 最大速度が 1.5 秒のズーミング能力である。

b) パン・チルト機構: 水平方向の旋回と上下方向の回転は、それぞれ個別のステッピングモータで駆動される。水平旋回範囲は $\pm 96^\circ$ (最大速度 $80^\circ/\text{秒}$), 上下回転範囲は $\pm 23^\circ$ (同 $50^\circ/\text{秒}$) である。

2) 制御方法 両機構の制御は、自動、手動の両方式とも、パソコンから RS232C を介して VISCA (Video System Control Architecture) プロトコルのネットワーク上で制御コマンドの送出と応答メッセージの受信によってなされ、指定量の動作を実行させるようになっている。

VISCA プロトコルの制御コードは、装置番号、データ部、及びターミネータで構成され、データサイズは 3 ~ 14 バイトである。装置番号を指定し、データ部にコマンドを書き込んでパソコンから送信すると、該当の装置側が命令を解釈して実行すると同時に、応答データを同様のコードで返送する。その判別から命令遂行の可否が分かる。装置側の状態を問い合わせる場合も同様の処理で行う。本研究で使用した制御コマンドは、ズーム値設定、水平旋回角と上下回転角の設定、及びそれらの問合せである。

3) 操作手順 カメラ制御の操作手順は、図 2.6 のキャリブレーションモードを例に説明すると次のようになる。まず、ビデオキャプチャと VISCA のプログラムを起動させると、カメラ光軸間隔、同交差角などの初期値設定ファイルが読み込まれ、左右カメラの撮影画像が画面にスルー状態で表示される。ズームとパン・チルト両機構の設定値を入力し、問合せボタンで応答結果を確認する。次に、表示をスチル状態にし、左右原画像の対応点を操作者が左右の順にマウスクリックで指定すると、目視方式による三次元座標計算が行われ、結果

が表示部に示される。左右原画像を計算用ファイルとして保存し、距離測定処理を開始させると、保存ファイル名、初期設定値などが読み込まれ、画像処理によって対象物像の三次元座標が算出される。同時に、対象物像を処理結果画面の中央に所定範囲の大きさで表示するためのズームとパン・チルト各機構の制御量が算出される。その制御量を操作者が入力し、各機構の動作後、2回目の撮影・画像処理を行って対象物の三次元座標を得る。対象物像が所定範囲の大きさで画面中央に表示されない場合は、に返って操作を繰り返す。

自動測定モードで複数の果実を対象に距離測定を行う場合には、の操作者による対応点指定の代わりに、予め初期値ファイルに設定した距離測定範囲で各果実の三次元座標が算出される。その中で試作システムから最短距離の果実についてズームとパン・チルト両機構の所要制御量が計算される。次いで両機構が駆動されたのち、2回目の撮影・画像処理に入る。なお、2回目以降の測定範囲は計算結果で得られた距離を中心に自動的に設定される。

(2) 制御機構の動作特性

パン・チルト機構の動作特性は以下の通りであった。なお、ズーム機構の動作特性については次節のキャリブレーションの項で述べる。

1) 実験方法 実験条件は、筐体単体だけの場合とカメラ2台を搭載した場合に分けて、左右旋回角を $\pm 90^\circ$ の範囲で 10° 間隔、上下回転角を水平から $\pm 20^\circ$ の範囲で 2° 間隔とした。

実験は、始めに基準位置の検出のためのリセット後、左右旋回について、ホーム位置から所定間隔ずつ制御量を入力して駆動させ、各動作後に内蔵カメラで同心円状に置いたスケールを撮影して移動周長を求め、旋回角度を算出した。上下回転についても同様に行った。

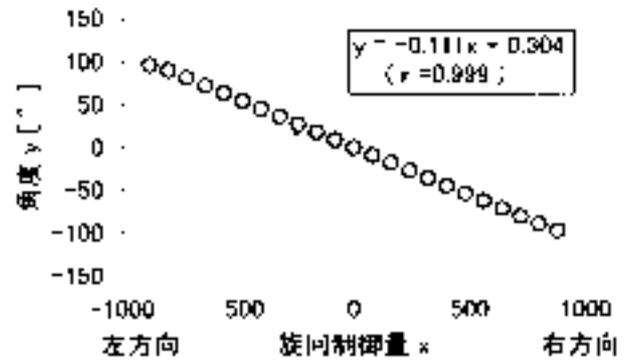
2) 結果と考察 筐体単体の場合について、図2.7(a)に左右旋回、(b)に上下回転の動作特性をそれぞれ示す。左右旋回の制御量は、左側最大 - 880 (16進数でFC90H)から右側最大 880 (同370H)であり、旋回角度との関係は直線で表された。上下回転の制御量は、下側最大 - 272 (同FEF0H)から上側最大 272 (同110H)であり、上記と同様比例関係にあった。それぞれの制御量 x と角度 $y [^\circ]$ の回帰式を式(2.1)に示す (r は相関係数)。

$$\text{左右旋回: } y = -0.111 \cdot x + 0.304 \quad (r = 0.999)$$

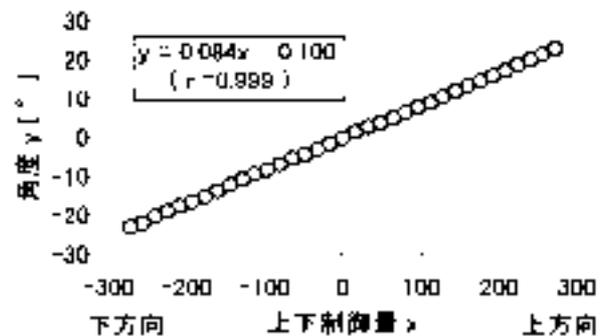
$$\text{上下回転: } y = 0.084 \cdot x - 0.100 \quad (r = 0.999)$$

(2.1)

次に、2台のカメラを搭載した場合は、図2.8に示すように、水平旋回、上下回転とも設定角度に対する動作角度は比例関係にあるものの、復路(戻り)でホームポジションに復帰しないヒステリシス現象が見られた。これはカメラケーブルの重量や張力の影響でパン・チルト機構の動作が規制されたためである。このため、本研究



(a) パン(水平旋回)制御量と回転角度の関係



(b) チルト(上下)制御量と回転角度の関係

図2.7 パン・チルト動作特性(筐体単体)

Fig. 2.7 Performance characteristics of a pan-tilter (the body only) (a) relationship between pan-values and rotation angles, (b) relationship between tilt-values and rotation angles.

でパン・チルト機構を用いる実験は予備段階に止めた。

4. キャリブレーション

両眼ステレオ視システムに関するキャリブレーションの目的は、2台のカメラで撮影した画像から直ちに三次元位置を算出できるように、空間座標系とカメラ座標系の関係式における諸係数を決定することである。その方法には、予め測定された三次元構造物をステレオ撮影し画像解析を行って諸係数を得る方法や立体形状モデルを利用する方式などがある(17)。それらの方式は、物体の三次元形状の測定のように測定距離範囲が比較的に狭い場合に適用できるものの、本研究のように距離範囲が広く、かつ条件に応じてズームを変化させて使用する場合には十分でない。

そこで本章では、左右各カメラに関する距離関係式を個別に実験で求め、それらの結果をもとに試作システムの距離式を決定した。

(1) ステレオ視システムのキャリブレーション

1) ステレオ視システムの距離関係式 図2.9に示すように、2台のカメラが平行なステレオ視法による距離 L [mm] は、モニタ画面上の視差 s [画素] を用いて三角測量の原理より次式で算出される。

$$L = d \cdot f \cdot a / s \quad (2.2)$$

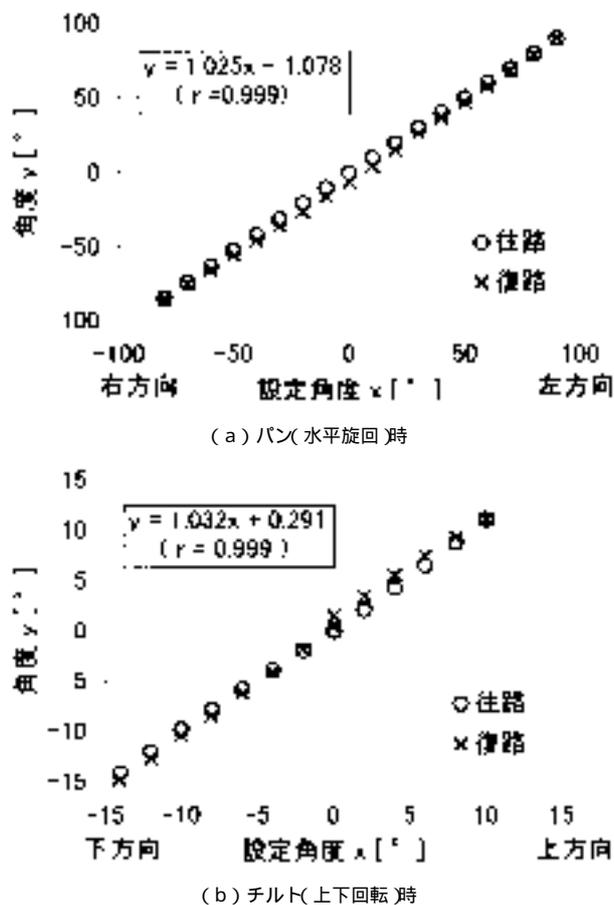


図2.8 パン・チルト動作特性(カメラ搭載時)

Fig. 2.8 Performance characteristics of the pan-tilter (loaded with cameras): (a) relationship between pan-values and rotation angles, (b) relationship between tilt-values and rotation angles.

$$s = x_l - x_r \quad (2.3)$$

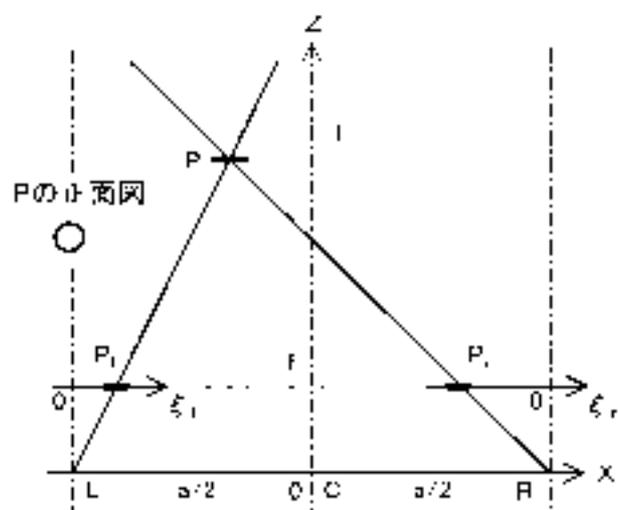
ここで、 d はモニタ画面のスケール係数[画素/mm]、 f は焦点距離[mm]で、それぞれ左右各カメラの値より、 $d = (d_l + d_r)/2$ 、 $f = (f_l + f_r)/2$ で求められる。 a は左右カメラの光軸間隔[mm]、 x_l と x_r はモニタ画面上における左右各原画像の対応点の x 座標[画素]である。

式(2.2)の L はレンズ中心から対象物までの距離であるが、市販カメラではレンズ中心位置が不明のため、実用上はカメラ前端からの距離 L_1 が用いられる。カメラ前端からレンズ中心までの距離を L_v とすると、

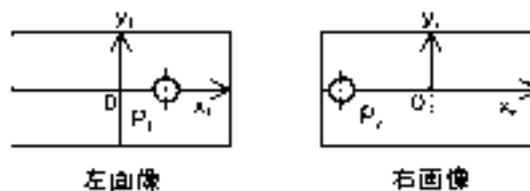
$$L_1 = L - L_v = d \cdot f \cdot a / s - L_v \quad (2.4)$$

ここで、 $L_v = (L_{v1} + L_{v2})/2$ 、 L_{v1} 、 L_{v2} は左右各カメラの値。

前節で述べたように、供試カメラではズーム制御によって合焦位置が変化するため、レンズ中心に相当する位置も変化する。供試カメラの焦点距離については、最広角と最望遠における値のみが仕様に記載され、任意のズーム位置における値は不明なので、上式を用いる場合にはズームと焦点距離の関係を求めておく必要がある。



(a) 平行ステレオ視の平面図



(b) 左右カメラ画像の例

図2.9 三角測量の原理による距離測定

Fig. 2.9 Distance measurement by principle of triangulation: (a) top view of a parallel stereo vision, (b) an example of a pair of left and right images.

一般に、ズームレンズ機構をもつカメラにおいても、単一レンズの公式が成立することが知られている(31, 88, 103)。本研究では、ズーム制御値と焦点距離の関係、仮想レンズ中心の位置など、供試カメラに関する距離特性は、レンズ公式を用いて実験的に求めることにした。

2) レンズ公式と関係式 レンズの公式は、図 2.10 より次のように表される。

$$1/L + 1/b = 1/f \quad (2.5)$$

ここで、 L はレンズ中心から対象物までの距離[mm]、 b はレンズ中心から撮像面までの距離[mm]、対象物の実長を X [mm]、撮像面の投影像長さを x [mm]とすると、撮像倍率 m は、

$$m = x/X = b/L \quad (2.6)$$

式(2.5)と(2.6)より b を消去すると、

$$L = f \cdot (1 + m)/m = f \cdot (1 + X/x) \quad (2.7)$$

$$f = m \cdot L / (m + 1) = L / (1 + X/x) \quad (2.8)$$

なお、 f の大きさは実際には測定できないので、モニタ画面上の長さ x [画素]を用いると、 $x = d \cdot x'$ 。これより式(2.7)は、次式で表される。

$$L = f \cdot (1 + m)/m = f \cdot (1 + d \cdot X/x) \quad (2.9)$$

式(2.9)によれば、 f と合焦距離 L の関係が明らかになるとき、焦点合せの操作から距離 L を、 x 値から X 値

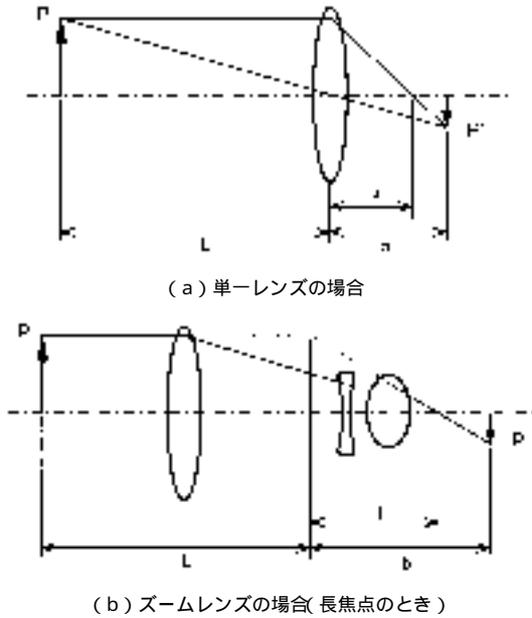


図 2.10 レンズの焦点位置

Fig. 2.10 Focal point of lens: (a) a single lens, (b) zoom lens.

(実長または空間座標値)を知ることができる。その関係を利用した距離測定法はレンズ焦点法と呼ばれ、顕微鏡測定などで利用されている。ただし、単眼カメラでは撮影距離が遠くなると焦点深度(被写界深度)が増大して合焦範囲が広くなり、距離分解能が著しく低下するので、一般の距離計測には適さない。

式(2.9)は、ビデオカメラのズームレンズにも適用可能である。なお、仮想のレンズ中心位置はズーム値を変えることによって変化する。カメラ用の球面レンズでは、一般に f が小さいほど収差が強くなり、レンズ周辺を通過して画面の端近くに投影される像ほど形状が歪む(88)。そのため、ステレオ視法では、対象物が画面の周辺に近いほど左右画像の対応点の座標値が不正確になり、誤差が増加する傾向にある。

3) 左右カメラの光軸が交差している場合 左右両カメラの光軸が平行ではなく、交差(輻輳)しているときには、式(2.2)が成立しないため同式による距離計算の結果は不適切な値になる。その場合には、平行化処理(19)によって平行ステレオ視と等価な画像に変換する必要がある。本研究では、左右各画像の x 座標 x_l, x_r をそれぞれ光軸が平行な状態の x 座標 x_l', x_r' に次式(2.10)で置換して用いた。すなわち、 Z 軸に対する左右各カメラの光軸角度がそれぞれ θ_l, θ_r のとき、 x_l', x_r' は、

$$\begin{aligned} x_l' &= -f \cdot (f \cdot \sin \theta_l - x_l \cdot \cos \theta_l) / (f \cdot \cos \theta_l + x_l \cdot \sin \theta_l) \\ x_r' &= f \cdot (f \cdot \sin \theta_r + x_r \cdot \cos \theta_r) / (f \cdot \cos \theta_r - x_r \cdot \sin \theta_r) \end{aligned} \quad (2.10)$$

このとき、視差 s は、

$$s' = x_l' - x_r' \quad (2.11)$$

したがって、カメラ前端からの距離式 L_1 は、

$$L_1 = d \cdot f \cdot a / s' - L_v \quad (2.12)$$

となる。なお、 f_l と f_r が一致しないとき、 f には両者の平均値を用いた。

4) キャリブレーションの内容 本節では、次の事項について実験を行い、回帰分析によりそれぞれの関係式と諸係数を求めた。

- a) レンズ焦点距離と合焦距離の関係、
- b) ズーム値と焦点距離の関係、
- c) 仮想レンズ中心の位置、
- d) レンズ収差の補正、
- e) カメラ撮像面に対するモニタ画面のスケール係数、
- f) 左右カメラが交差する場合の補正、
- g) 試作システムの距離特性

(2) 供試ビデオカメラのキャリブレーション

試作システムのビデオカメラに関するキャリブレーションは、左右のカメラについて個別に次の要領で行った。

1) 実験方法 撮影対象は、図 2.11 に示す 20mm 方眼の精度試験紙(横×縦 = 1.2m × 0.8m)とし、室内壁面に張って用いた。撮影条件は、リンゴ園での使用条件をもとに、距離を 1 ~ 4.5m 間で 500mm 間隔に、ズーム値を 0H ~ 3FFH 間で 5 段階に設定した。露出、合焦、及びホワイトバランスを自動調節とし、試作システムのパソコンでズームと撮影の制御を行い、各条件で撮影した画像をパソコンのハードディスクに保存した。全条件の撮影が終了後、市販の画像処理ソフトウェアで精度試験紙線の実長 X [mm] に対応するモニタ画面の長さ x [画素] を読み取った。

2) 実験結果と考察 a) レンズ収差の補正に関する結果 撮影画像の中から、撮影距離 2m、ズーム 0H ~ 3FFH の各画像について、精度試験紙の縦線と横線の直線状態を調べた結果、ズーム値が 3FFH では、収差による歪(曲がり)は全くみられなかったが、ズーム値が小

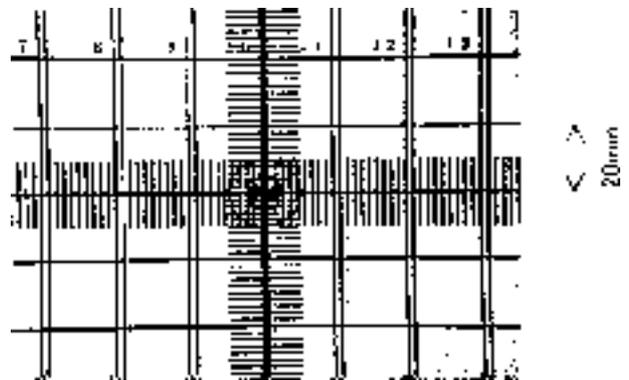


図 2.11 精度試験紙(一部)

Fig. 2.11 A test paper for accuracy measurement (a part)

さいくなるに従い、画面周辺部ほど外側に凸状の曲線になる傾向が強くなった。

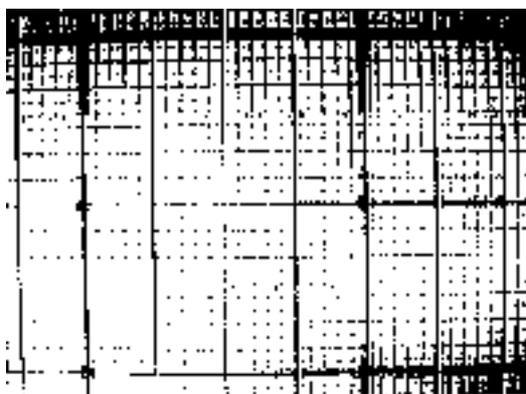
このようなレンズ収差を補正する方式は種々ある(98)が、本研究では以下のような補正を行った。モニタ画面の中央から座標 (x_i, y_j) までの半径を r_k [画素]、最大画面幅を B_0 (半径 $r_b = B_0/2$) [画素]、収差係数 a_c [無次元] とし、画面両端の補正率 b を

$$b = 2 \cdot (a_c - 1) / B_0 = (a_c - 1) / r_b \quad (2.13)$$

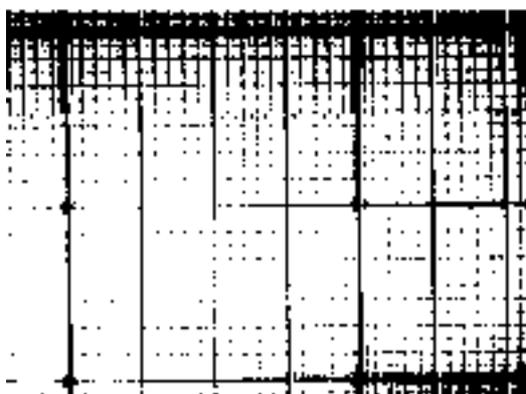
表2.4 ズーム値とレンズ収差係数の関係

Table 2.4 Relationship between zoom values and coefficients of lens aberration.

ズーム値 (16進数)	ズーム値 (10進数)	収差係数
0H	0	1.048
100H	256	1.017
200H	512	1.012
300H	768	1.005
3FFH	1,023	1.000



(a) 補正前



(b) 補正後

図2.12 レンズ収差の補正例(左カメラ, 焦点距離 5.9mm, 撮影距離 1,000mm)

Fig. 2.12 An example of a correction on a lens aberration (left camera, focal length of 5.9mm, at a photographic distance of 1,000mm). (a) previous correction, (b) after correction.

で表すと、半径 r_k の画素の補正率 k は、

$$k = 1 + b \cdot r_k \quad (2.14)$$

となる。したがって、補正後の半径 r_k は、

$$r_k = k \cdot r_k \quad (2.15)$$

で求められる。 a_c の値の決定は、 a_c が 1.0 ~ 1.1 間にあると仮定して種々の値を与えたときの画像歪の改善状態を目視で調べ、歪が最少になる値をそのズーム値 z における最適値として選定する方式で行った。その結果、 z と a_c の関係は表2.4のようになり、回帰式は

$$a_c = 10^p, \quad p = a_0 + a_1 \cdot q + a_2 \cdot q^2, \quad (2.16)$$

$$q = \log(1 + z)$$

で表された。補正前後の画像例を図 2.12 に示す。画面周辺部の歪みとともに目盛間隔が改善されており、補正の効果が見られた。

b) 供試カメラの距離特性に関する結果 射) 撮影距離と撮影倍率の関係：前項の収差係数により撮影画像の補正を行った後、各ズーム時の X/x と距離の関係を調べた結果、図 2.13 のようにいずれも直線で表され、単回帰式(2.17)を適用できることが分かった。

$$L_1 = a_0 + a_1(X/x) \quad (2.17)$$

ただし、 L_1 はカメラケース前端から精度試験紙までの距離 [mm]、 a_0 と a_1 は定数で、各ズーム時の値を表2.5に示す。

また、仮想レンズ中心から精度試験紙までの距離 L は、式(2.4)より

$$L = L_1 + L_v \quad (2.18)$$

なので、これに式(2.9)を代入して展開すると、 L_1 の実験式は次のように f の一次式として表すことができる。

$$L_1 = b_0 + b_1 \cdot f + b_2 \cdot f \cdot (X/x) \quad (2.19)$$

また、仮想レンズ中心からカメラケース前端までの距離 L_v は、

$$L_v = -b_0 + (1 - b_1) \cdot f \quad (2.20)$$

一方、式(2.9)で、 f の違いによる影響を係数 c [無次元] で表し、

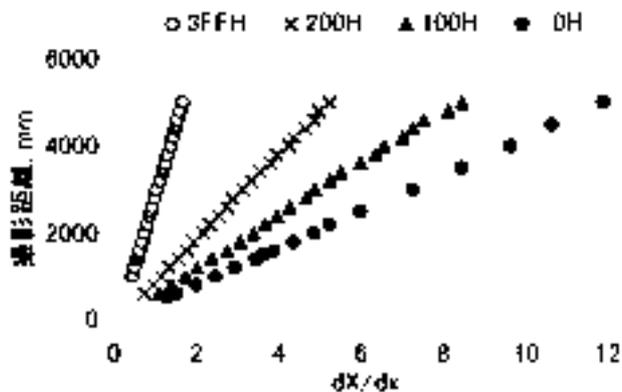
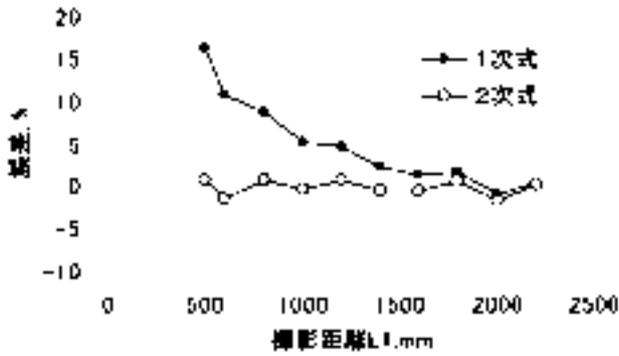
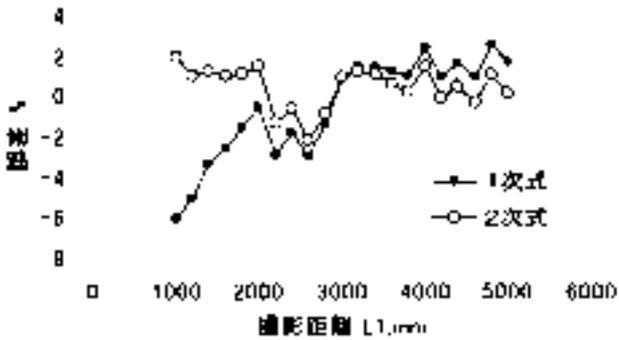


図2.13 撮影距離と撮影倍率の関係例

Fig. 2.13 The relationship between photographic distance and magnification.



(a) 焦点距離 5.9m



(b) 焦点距離 47.2m

図 2.14 回帰式による誤差の違い

Fig. 2.14 Differences of errors between two regression equations: (a) focal length of 5.9mm, (b) focal length of 47.2.

$$c = c_0 + c_1 \cdot f \quad (2.21)$$

と仮定すると、式(2.9)は

$$L = f \cdot \{1 + d \cdot c \cdot (X/x)\} \quad (2.22)$$

となるので、実験回帰式は次のように f の二次式として表される。

$$L_1 = b_0 + b_1 \cdot f + b_2 \cdot f \cdot (X/x) + b_3 \cdot f^2 \cdot (X/x) \quad (2.23)$$

ズーム値が 000H と 3FFH については、焦点距離がそれぞれ $f = 5.9$, $f = 47.2$ と既知なので、まず、それらの結果について式(2.19)と(2.23)の回帰分析を行い、撮影距離 L_0 と誤差 $e = 100 \cdot (L_1/L_0 - 1)$ の関係を比較検討した。その結果、両者の関係は、図 2.14 に示すように、1 次回帰式(2.19)では距離が近いほど誤差が増大するのに対し、2 次回帰式(2.23)では全域にわたり誤差が小さいことが分かった。そこで、供試カメラの距離特性式には、誤差の少ない 2 次回帰式を用いることにした。

次に、式(2.21)において $f = 47.2$ の c 値を 1 に仮定し、 $f = 5.9$ 時の c 値と連立させて解くと、係数 c_0 と c_1 が求められる。その係数を用いると、式(2.17)と式(2.22)の連立において、 $d = \text{一定}$ より、

$$a_1 = f \cdot d \cdot (c_0 + c_1 \cdot f) \quad (2.24)$$

となり、次の関係式が得られる。

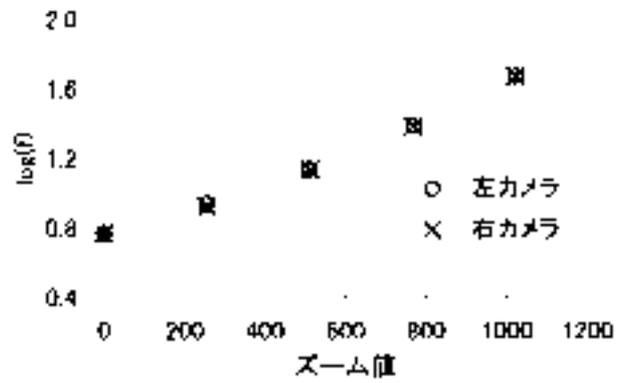


図 2.15 ズーム値と焦点距離の関係

Fig. 2.15 The relationship of focal length to zoom values.

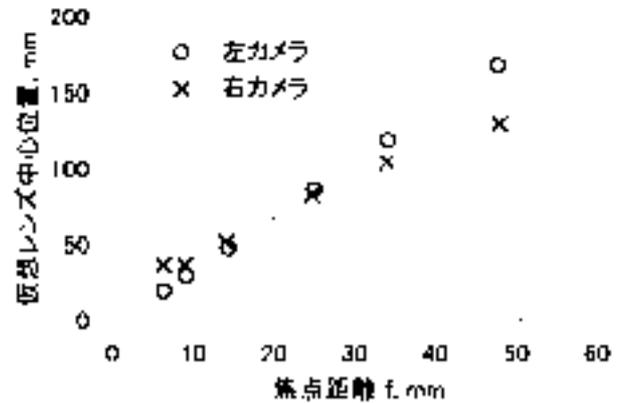


図 2.16 焦点距離と仮想レンズ中心位置

Fig. 2.16 The relationship of focal length to virtual lens position.

$$c_1 \cdot f^2 + c_0 \cdot f + b_0 = 0, b_0 = -a_1 / d \quad (2.25)$$

ゆえに、 f の算出式は次のようになる。

$$f = \{ -c_0 + (c_0^2 - 4 \cdot c_1 \cdot b_0) \} / (2 \cdot c_1) \quad (2.26)$$

f の不明なズーム値 100H, 200H 及び 300H の場合についても同様に c の式(2.21)が成立すると仮定して、式(2.17)の回帰分析より a_0' , a_1 を算出し、式(2.25)にそれぞれの a_1 を代入して各ズーム値に対する f を求めた。さらに、各ズーム時の撮影距離と f 及び X/x の関係を求めるため、全データについて 2 次式(2.23)による回帰分析を行った。

捨) ズーム値と焦点距離の関係 上述の回帰分析の結果、ズーム値 z と焦点距離 f の関係は、図 2.15 に示すように、 f の常用対数 $\log(f)$ が z の 2 乗に比例し、次の回帰式で表された。

$$f = 10^p, p = a_0 + a_1 \cdot z + a_2 \cdot z^2 \text{ [mm]} \quad (2.27)$$

赦) カメラのレンズ焦点距離と合焦距離の関係 式(2.23)の回帰係数は表 2.5 のようになり、実測値 L_0 に対する回帰式の距離値 L_1 の誤差はほぼ 2% の範囲にあった。左カメラについては、撮影距離が 2m 以内では

表 2.5 カメラ単体の距離関係式における諸回帰係数
Table 2.5 Coefficients of regressive equations on distance.

カメラ	a_0	a_1	a_2	a_3
(1) 測定距離 L_1 と撮影倍率 X/x				
左用	1.42	- 2.59	72.3	- 0.0612
右用	- 23.81	- 1.26	73.7	- 0.1293
(2) ズーム値 z と焦点距離 f				
左用	0.772	0.000569	3.05E - 07	
右用	0.771	0.000547	3.29E - 07	
(3) 仮想レンズ中心距離 L_v				
左用	- 1.42	3.59		
右用	26.83	2.22		
(4) レンズ収差係数 a_c				
左右	0.0205	0.5e - 3	- 2.4e - 3	
(5) 焦点距離係数 c				
左用	1.049	- 0.00104		
右用	1.099	- 0.00209		

備考：各項目の回帰式

$$(1) L_1 = a_0 + a_1 \cdot f + a_2 \cdot f \cdot (X/x) + a_3 \cdot f^2 \cdot (X/x)$$

$$(2) f = 10^t, t = a_0 + a_1 \cdot z + a_2 \cdot z^2 \text{ [mm]}$$

$$(3) L_v = a_0 + a_1 \cdot f \text{ [mm]}$$

$$(4) a_c = 10^y, y(t) = a_0 + a_1 \cdot t + a_2 \cdot t^2, t(z) = \log(1+z)$$

$$(5) a_c = a_0 + a_1 \cdot f, \text{ 収差補正後 } c = 1$$

全ての f で、それ以上の距離でも f が 5.9mm の場合を除けば、ほぼ $\pm 2\%$ 以内であった。距離が 2m 以上では f が 5.9mm のとき 2% 以上に増加する傾向がみられた。これはレンズ収差の補正が 2m 以上で十分でなかったことによると推定される。右カメラもほぼ同様の結果であった。

斜) 仮想レンズ中心の位置 左右各カメラの仮想レンズ中心の位置 L_v と f の関係は図 2.16 のようになり、次式で表された。

$$L_v = a_0 + a_1 \cdot f \text{ [mm]} \quad (2.28)$$

式 (2.28) の各係数は表 2.5 の通りである。すなわち、 L_v は焦点距離とともに増加し、カメラケース前端から後方に 20 ~ 160mm の範囲にあった。

煮) 画面スケール係数と焦点距離の影響係数 以上をまとめると、画面スケール係数 d と焦点距離の影響係数 c は次のような範囲になる。

$$d = 67.2 \sim 71.5 \text{ [画素/mm]}$$

$$c = 1.0 \sim 1.08 \text{ [無次元]}$$

以上の結果より、両カメラとも各回帰式の諸係数が適切に決定されると、距離は、モニタ画面の画素数を用いた回帰式により、ほぼ $\pm 2\%$ の精度で得られることが分かった。左右のカメラの諸係数は近似しており、 f 、 L_v 、 d 、及び c の値は、それぞれ両カメラの平均値を用いて表すことができた。

(3) 試作システムのキャリブレーション

試作システムの距離精度は、左右各カメラ個別の距離

特性及び両者の配置構成によって決まるハードウェア要因と、画像処理の方法によって左右されるソフトウェア要因の両方で総合的に規定される。本項では、ハードウェア要因のうち、両カメラの交差角と、左右画像の対応点の一致に関する要因を取り上げ、それらが試作システムの機械的距離精度に及ぼす影響を実験的に検討した。なお、ソフトウェア要因に関係する特性は次章以降で詳しく述べる。

1) 実験方法 a) 左右カメラの交差角の影響に関する実験 試作システムの中央視軸に対する両カメラの交差角度がそれぞれ約 4 度になるようにカメラを配置し、20mm 方眼精度試験紙を対象に、撮影距離 1,667mm、ズーム値 0H ~ 3FFH、左右カメラの光軸間隔 250mm のもとで撮影した。試作システム、左右両カメラ及び対象物の位置関係は、カメラ台上の中央にレーザ距離計を配置して精度試験紙中央へ投光し、その点が左右各カメラの画面中心になるように角度を調節して決定した。各カメラの交差角はそれらの幾何学的関係から計算で求めた。

b) 試作システムの距離誤差に関する実験 上述の方眼精度試験紙を対象に、撮影距離を 1 ~ 4.5m で 500mm 間隔、ズーム値を 0H ~ 3FFH、左右のカメラ (光軸間隔 300mm) を平行としてそれぞれ設定し、前節のキャリブレーションモードの手順で撮影した。撮影に際しては左右画像の水平状態の確保に注意し、両画像の上下位置の差異は画像処理で調整した。校正値は、カメラ台中

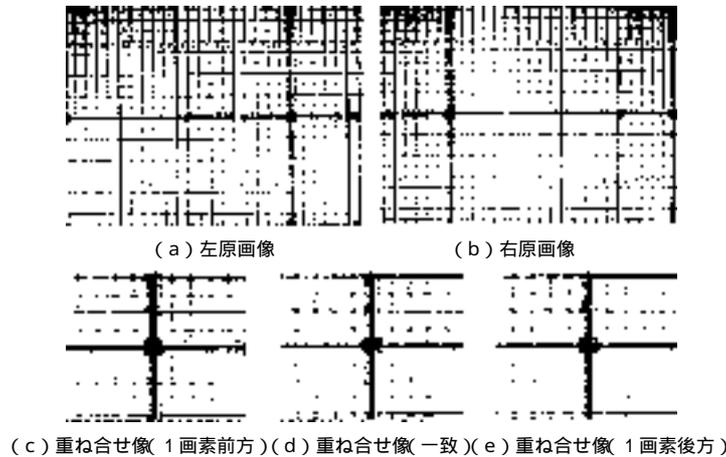


図2.17 左右両画像の重なり状態(左カメラ, 焦点距離 8.7mm, 撮影距離 1,000mm)

Fig. 2.17 Overlapping between a left and right image (left camera, focal length of 8.7mm, photographic distance of 1,000mm).

央に配置したレーザ距離計の測定値を用いた。なお、左右各カメラの中央視軸に対する交差角 θ_l と θ_r は、実験期間中両者とも 0.1° で一定であった。

画像処理による距離の算出は、レンズ収差補正後の左右画像を重ね合わせ、精度試験紙中央の縦目盛線(幅5mm)が一致したときの視差を用いて、式(2.12)で求める方法で行った。重ね合せの操作は、左画像を固定したまま、右画像を1画素ずつ左方向へ移動させて行い、重なり状態は目視で判定した。縦線の投影像幅は撮影距離とズーム値で異なり、約1~3画素の範囲にあった。

2) 実験結果及び考察 a) カメラ交差角の影響 幾何学的に算出した左右各カメラの交差角は、それぞれ 4.2° と 4.3° であった。それらを式(2.10)に代入して得られた x_l, x_r で左右画像の平行化を行って重なりを調べ、一致したときの視差を式(2.12)に代入して測定距離 L_1 を算出した。 L_1 と撮影距離 L_0 より距離誤差を百分率で表した。

その結果、ズーム値が200Hの場合、誤差は1%以下であった。両交差角の値をわずかに減少させ 4.0° に仮定すると、誤差は約6%に増大した。ズーム値が3FFHの場合には、約-6%であった誤差が、 4.0° に仮定すると1%以下に減少した。このように、同一の交差角でもズーム値によって誤差が異なった。結局、左右それぞれの交差角を 4.25° に設定した場合、いずれのズーム値でも誤差が最小で、2%以下になった。

以上のように、距離計算値は交差角が 0.1° 異なるだけで大きく変化する場合があり、その決定にあたっては注意が必要である。なお、左右カメラが平行でない場合の光軸間隔 a_v の値は、カメラ前端から L_v 分だけ後方の位置(仮想レンズ位置)の値になるように、次式で算出すると適切なことが分かった。

$$a_v = a_{v0} + 2 \cdot L_v \cdot \tan \{ (\theta_l + \theta_r) / 2 \} \quad (2.29)$$

ただし、 a_{v0} は左右のカメラ前端の光軸間隔 [mm]

b) 試作システムの機械的距離誤差 撮影は精度試験紙の中央縦目盛線に試作システムの視軸(Z軸)を合わせて行ったので、同線の投影像は、図2.17(a),(b)のように、左原画像で画面の右側、右原画像で左側に位置した。重ね合わせ画像では同図(d)のように、画面の中央原点に一致した。重ね合わせの状態と対象物の位置関係は、重ね合わせの距離が対象物の実距離より手前するとき、左画像の縦線像は左側、右画像の縦線像は右側に位置した。右画像を1画素ずつ左へ移動させるに従い、重ね合せの距離は後方に移動し、対象物位置より後方するとき左右画像の縦線像の位置は上述と逆転した。

左右画像の重ね合せ操作は、左画像の偶数行と右画像の奇数行を交互に配列する方法で行った。この方法によると、左右の中央縦線像が正確に一致しない状態では1行おきに背景色が入るため、同図(c)と(e)のように、縦目盛線の輪郭部分に横縞状の凹凸が発生した。重なり部分が増えるに従い輪郭の横縞が小さくなり、重なりが一致したとき、同図(d)のように横縞が消えて縦線の輪郭が鮮明になった。ただし、画像の左右周辺部分では1画素分程度の差が発生する傾向が見られた。これは、レンズ収差の補正が周辺部で不十分だったためと思われる。

撮影距離と測定値の関係は正比例で表され、誤差は図2.18に示すようになった。すなわち、 f が5.9mmのとき、誤差は撮影距離1,000~3,500mmの範囲で-1~3%間にあり、距離とともに負から正へ変化する傾向が見られた。画面周囲部のレンズ収差による影響と推測される。 f が8.6mm, 13.7mm及び24.3mmの場合には1,000~4,000mmの範囲で $\pm 2\%$ 以内であった。 f が8.6mmと24.3mmでは4,000mm以上で負側へ増加する傾向が見られた。 f が47.2mmの場合、3,000~4,500mmの範囲で $\pm 2\%$ 以内であり、3,000mm以下では左右画像内に

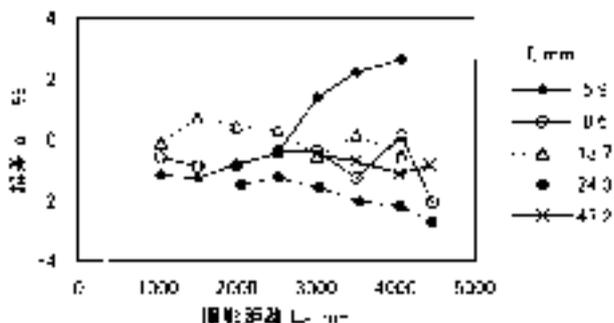


図2.18 試作システムの距離誤差

Fig. 2.18 Accuracy of measured distance in the trial vision system.

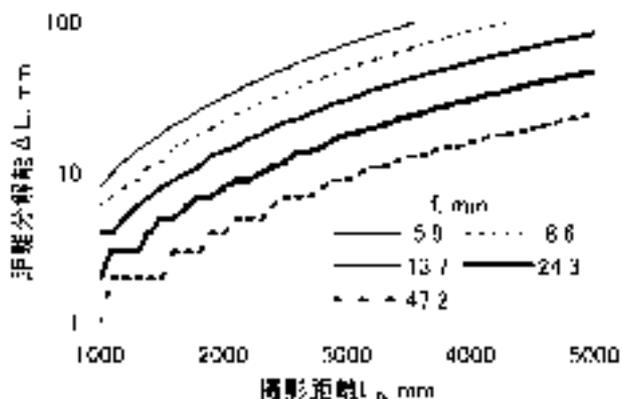


図2.19 試作システムの距離分解能

Fig. 2.19 Distance resolution of the trial vision system.

共通視野部分が存在せず測定不能であった。なお、供試システムの距離式の係数のうち、 a_0 は回帰分析結果より 71.0、 L_v 式の係数 a_0 は左右カメラとも -10 に設定した。距離 L_1 における分解能 ΔL [mm] は、上述のように左右画像の重なり状態が 1 画素単位で判定可能なとき、 L_1 に対し 1 画素分異なる距離と L_1 との差として求められるので、次式で表される。

$$\Delta L = f \cdot a \left\{ \frac{1}{s} - \frac{1}{(s+1)} \right\} = L_1 \cdot \left\{ 1 - \frac{1}{(f \cdot a + L_1)} \right\} \quad (2.30)$$

試作システムのカメラ光軸間隔 a が 300mm の場合について試算した結果を図 2.19 に示す。 ΔL は、 f が 8.6mm のとき L_1 が 2m 以下で約 1%、2m 以上で約 2% であり、 f が増すと ΔL はさらに向上する。

以上の結果より、供試システムの距離精度は、各ズームとも 1,000 ~ 4,000mm の範囲で $\pm 2\%$ 以内とみなされた。ただし、 $f = 5.9$ mm では約 2,500mm までがその範囲となる。したがって、試作システムは、果実収穫時の距離計測用として掲げた表 1.2 の所要精度を機械的にほぼ満たしていることが分かった。

5. 要 約

試作システムは、2 台の CCD ビデオカメラ、ノートパソコン、キャプチャ PC カード、パン・チルト式カメラ

台、及びカメラ画像入力切替器で構成した。ビデオカメラは、38 万画素の CCD 素子撮像面をもつ NTSC 信号出力タイプである。対象物が試作システムの正面位置に所定範囲の大きさで撮影されるように、パン・チルトとズームの操作を行うカメラ制御機構を装備し、試作システムの向きとズームを調節した。カメラ制御は、パソコンから RS232C インターフェースを介して VISCA ネットワークで行った。

2 台の供試ビデオカメラを個別に、撮影距離とズーム値を条件にして距離特性実験を行い、回帰分析の結果をもとに試作システムの距離式を校正した。調査項目は、カメラの焦点距離と合焦距離の関係、ズーム値と焦点距離の関係、仮想レンズ中心の位置、レンズ収差の補正、カメラ撮像面サイズに対するモニタ画面サイズのスケール係数である。それらの諸関係と、左右カメラ光軸の交差角の補正、及び左右画像の画素単位の対応づけに留意して試作システムの距離回帰式を分析した。その結果、距離誤差は、1 ~ 4.5m 間でおおむね $\pm 2\%$ の範囲に入り、果実収穫時の距離計測用としてほぼ十分な機械的精度であることを確認した。

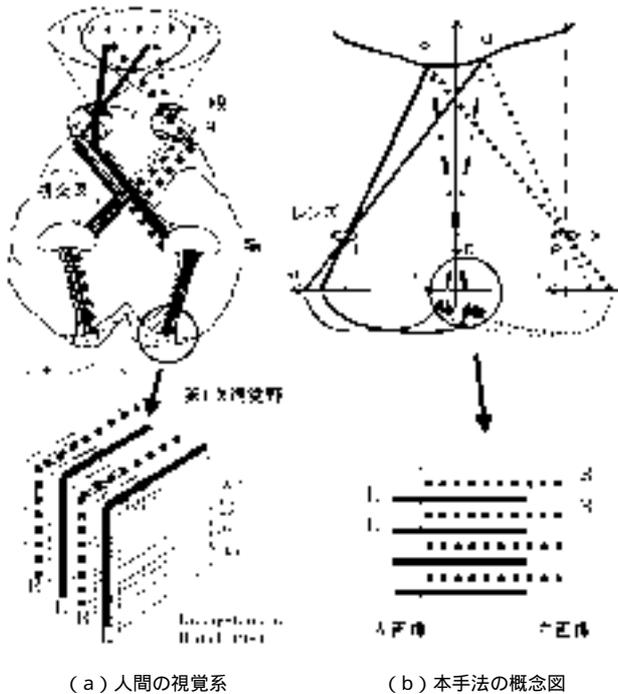
第 3 章 左右画像合成によるステレオ視計測法の開発

1. 緒 言

両眼ステレオ視法に関する従来の測定原理は、前述のように左右各カメラの撮影画像について同一物体像の対応づけを行い、三角測量の原理で距離を算出するものである。そのため、はじめに左右両画像の対応づけが解決できなければ距離計算に進むことができない。対応づけ解決のための制約条件として通常、Marr の 3 制約（適合性、一意性、連続性）(33) とエピソード拘束が利用されるが(11)、対応問題に対しては十分でない。

一方、人間の両眼視覚系では、対応問題に煩わされることなく容易に立体感のある奥行き知覚が得られるので、それが対応づけの解決策を考える上で参考になると思われる。人間の視覚神経系は、図 3.1(a) のように、左右眼各網膜の視神経が左右半分ずつに分かれ、それぞれ同じ側の視神経が視交差によって同一経路を辿り、後頭部の第 1 次視覚野で交互に配列される構造になっている(16)。視覚神経生理学の分野では、第 1 次視覚野から視覚前野に至る過程の視覚形成について数多くの研究成果が得られている。しかし、対応づけと奥行き知覚に関わる立体視の機構についてはまだ十分究明されていない(4, 38)。また心理学分野の立体視に関する研究では、両眼を対象物に向ける注視活動と、合焦による鮮明像や不鮮明さの検出が奥行き知覚に重要な手掛かりを与えたとの説が有力であるが、その成立過程は解明されていない(35)。

本章では、ステレオ視のレンズ光学系に関する物理学と、人間視覚系に関する神経生理学や心理学の研究成果



(a) 人間の視覚系 (b) 本手法の概念図

図3.1 人間の視覚系と本手法の概念図

Fig. 3.1 Illustrations of human visual system and the conceptual method used in this study: (a) human visual system, (b) conceptual method used in this study.

を考慮し、同図 (b) に示す概念 (83) に基づいて、両眼ステレオ視に関する新たな計測原理を検討した。その原理の基礎的性質を明らかにするため円板によるモデル実験と、実用化の可能性を探るためリンゴ園の果実を対象にした実験を行った (84)。

2. 左右画像合成による距離測定法

(1) 測定原理

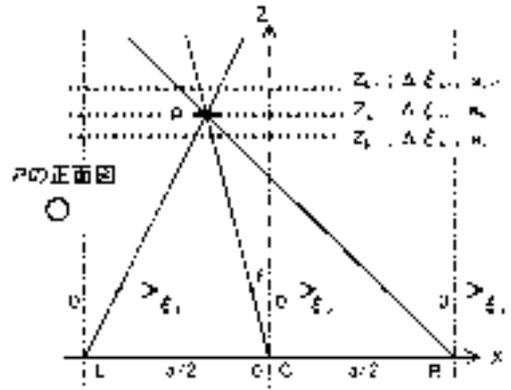
ステレオ視計測において、2台のカメラ (L, R) が図 3.2 (a) のように、直交座標 XYZ 軸上の原点 O を挟んで平行に置かれた場合 (平行ステレオ視) を考える。X 軸は両カメラのレンズ中心を通り、Y 軸は垂直方向 (紙面に垂直)、Z 軸はカメラ光軸方向とする。カメラの撮像面上の位置はその中心を原点とする座標 (,) で表し、左右のカメラをそれぞれ添字 l, r で示す。なお、撮像面は本来レンズ後方にあるが、同図では便宜的にレンズ前方に描いてある。

上述の場合、左右各カメラの共通視野空間内にある物体 P の座標 (X, Y, Z) は次式で求められる (単位は mm)。

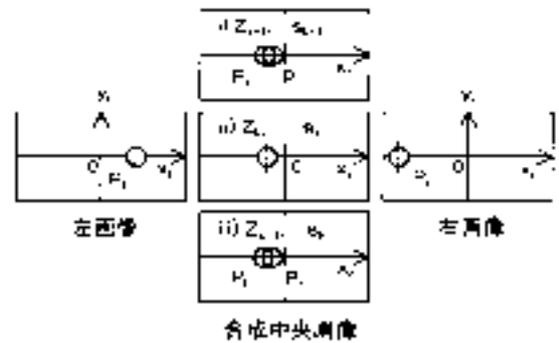
$$\left. \begin{aligned} X &= (a/2) \cdot (x_l + x_r) / f \\ Y &= a \cdot y_l / f = a \cdot y_r / f \\ Z &= f \cdot a / (x_l - x_r) \end{aligned} \right\} \text{ (3.1)}$$

$$\left. \begin{aligned} X &= (a/2) \cdot (x_l + x_r) / f \\ Y &= a \cdot y_l / f = a \cdot y_r / f \\ Z &= f \cdot a / (x_l - x_r) \end{aligned} \right\} \text{ (3.2)}$$

ここで、f は焦点距離 [mm]、a は左右両カメラの光軸間隔 [mm]、 x_l, x_r は各撮像面における P の投影点、



(a) 平行ステレオ視の平面図



(b) 左右カメラ画像及び合成像

図3.2 左右画像合成による距離測定の原理

Fig. 3.2 Rationale on distance measurement determined by composing each left and right image: (a) top view of a parallel stereo vision, (b) a pair of left and right images and composite images.

は撮像面上の視差 [mm]、上式より、X, Y, Z はと反比例の関係にある。

空間座標の原点 O から P までの距離 L [mm] は、式 (3.1) の結果を用いて次式で算出される。

$$L = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} \quad \text{(3.3)}$$

次に、実際に画像処理の対象になる左右のモニタ画面の座標 (x, y) と視差 s は、いずれも単位が画素で、整数により以下の式で表される。

$$\left. \begin{aligned} x_l &= d \cdot x_l, x_r = d \cdot x_r \\ y_l &= d \cdot y_l, y_r = d \cdot y_r \\ s &= x_l - x_r = d \cdot s \end{aligned} \right\} \text{ (3.4)}$$

ただし、 d は撮像面に対するモニタ画面の比例定数 [画素/mm]。

以上のように、ステレオ視計測法によって空間座標を算出する際に、式 (3.1) で視差 s (撮像面では) を用いるため、左画像の x_l (同 x_l) に対応する x_r (同 x_r) を右画像の中から探し出すことが必要になる。しかし、その対応づけに関する実用的な画像処理手法はまだ確立されていない。

ところで、左右のカメラによって撮影される共通の視野空間においては、両カメラの光学的位置関係で一意的に

定まり、同空間内で両カメラに対し同時に存在する断面は一つだけである、という拘束条件が成立する。そこで、その視野空間が両カメラに共通な断面群の配列で構成されていると考えると、P はそれらのいずれかの断面上に存在することになる。断面群の配列をXY平面に平行にとると、Pの三次元座標は、その共通断面群の中からPが存在する断面を探し出し、断面上の位置を特定する方法によって求めることができる。この方法は、式(3.1)を用いるものの、Pに関する左右画像の対応づけが上述の拘束条件のもとで行われる点で、従来の直接的な対応づけの方法と異なっている。

本研究では、物体Pが存在する共通断面を探すため次のような方法を採用する。いま、左右カメラにおける共通断面を、中央視点CからXYZ座標の原点Oを通して見る場合を考える。そのときの画像を中央画像と呼び、左右両画像をもとに合成して作成する。その合成中央画像の座標 (x_c, y_c) は次式で表される(7)。

$$\left. \begin{aligned} x_c &= (x_l + x_r) / 2 \\ y_c &= y_l = y_r \end{aligned} \right\} 3.5$$

逆に、中央画像の座標を用いると、左右各画像のx座標は、式(3.4)と(3.5)より次のように表される。

$$\left. \begin{aligned} x_l &= x_c + s / 2 \\ x_r &= x_c - s / 2 \end{aligned} \right\} 3.6$$

同様に、空間内のPの座標は、上式と式(3.1),(3.2),及び(3.4)より次式で求められる。

$$\left. \begin{aligned} X &= a \cdot x_c / s \\ Y &= a \cdot y_c / s \\ Z &= d \cdot f \cdot a / s \end{aligned} \right\} 3.7$$

式(3.7)より、 $s (> 0)$ を一定として中央画像上を走査すれば、Zが一定のため、図3.2(a)の横点線で示すように、XY平面に平行なZ断面を探索したことになる。その断面がPと交差すれば、交差部分のX,Y座標はそれぞれ中央画像上の座標 x_c, y_c に比例する。換言すれば、共通視野内の物体は中央画像で中央視点Cから見える方向に存在する(56)。両眼で見ているにも拘わらず、単眼で見た場合と同様の見え方になる。

一方、s一定のZ断面(視差距離断面と呼称)が物体Pと交差すれば、中央画像上では図3.2(b)の捨)のように、左右画像内の物体像 P_l と P_r が重なり合う。その断面がPの前後にある場合には、同図射)と赦)のように両者の物体像がずれる。

すなわち、左右画像を同一の視差距離ごとに重ねさせた合成中央画像で、左画像内の物体像と右画像内物体像の重なり状態を調べることによって、その視差距離断面における物体の有無と、その位置座標(X,Y,Z)を同時に知ることができる。これが本研究の測定原理である。

この手法では、重なり状態の判別の適否が物体の探索性能を左右する。本研究ではその判別のため、次項で述べる鮮明さの概念を用いることにした。各視差距離にお

ける中央画像を作成した際に、左右画像の物体像が適切に重なり合ったとき鮮明な像となり、その他の状態では不鮮明になるような画像処理が可能になれば、左右カメラで同時に同一断面上で撮影された物体が、中央視点Cから鮮明な(三次元)像として見るとともに、その位置と距離が直ちに判明する。

合成中央画像の各画素の内容は、式(3.6)の座標関係で決まるため、既往研究のように x_l に対応する x_r を探し出すまで x_r が不明ということはない。ただし、合成画像における重なり状態が、いわゆる誤対応に相当する場合がありますので、その判定の適否によって測定精度が影響される。

(2) 合成画像の作成と鮮明さの判定方法

本手法を利用する場合には、中央画像の合成と鮮明さの判定が適切に行われなければならない。合成の際に考慮すべき条件は、左右画像の合成範囲が共通視野空間の同一視差距離断面上で同時に撮影され、かつ合成画像での物体像の重なり状態が容易に判別できることである。鮮明さの判定指標に必要な条件は、重なりに対して敏感に反応し、重なりが同一物体の対応部分かどうかを判別できることである。

本研究では、それらの点と、自然光条件下における物体の識別や認識では色特徴の利用が有効なことを踏まえ、左右画像の合成並びに物体像の重なり状態の判定処理は、三原色RGB(各濃度8bit)による色特徴表現を基本として以下のように行った。

1) 左右画像の合成方法 本手法の合成は、前述のように共通視野の視差距離断面について行われるが、これは人間の視覚系に例えれば、中央画像を通してその断面を注視することに相当する。そこで合成に当たっては、まず注視する距離を決め、その距離に最も近い視差距離を中心とする前後区間を探索範囲に設定し、次にその区間内にある視差距離断面群について順次合成を行う、という手順にした。

注視距離を Z_g 、視差の間隔(視差刻みと呼称)を[画素]として、 Z_g の前後合計n個の視差距離断面について合成中央画像を作成する場合を考える。そのとき、前からk番目($k = 0 \sim n - 1$)の視差 s_k と視差距離 Z_k は、 Z_g に関する視差を s_g とすると次のように求められる。

$$s_g = d \cdot f \cdot a / Z_g \quad (3.8)$$

$$s_k = s_g + \cdot \{(n + 1) / 2 - k\} \quad (3.9)$$

$$Z_k = d \cdot f \cdot a / s_k \quad (3.10)$$

Z_k の断面の中央画像における座標 (x_{ck}, y_{ck}) の画素の色特徴は、式(3.6)で規定される左右各画像の座標の画素内容で決まる。ここで、物体像の重なり(ずれ)を色特徴のずれ(色ずれ)として容易に判別できるようにするため、図3.3に示すように、合成画像の偶数行 y_{ck} を左画像の偶数行 y_{lk} から、奇数行を右画像の奇数行 y_{rk} から、それぞれ交互に選んで順に配列す

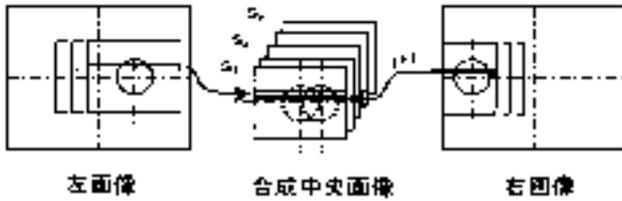


図3.3 合成画像の作成方法
Fig. 3.3 Making a composite image.

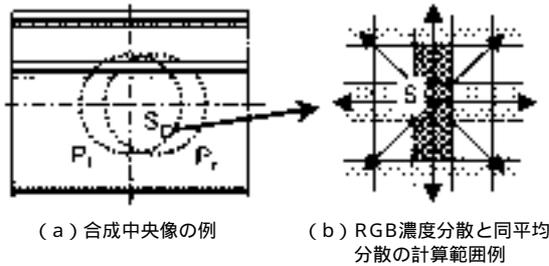


図3.4 合成画像の鮮明さの比較方法

Fig. 3.4 Comparing clearness of a composite image: (a) an example of a central composite image, (b) calculations of a variance of RGB, σ_c , and the average variance.

る方式にした。すなわち、

$$\left. \begin{aligned} y_{ck} \text{ が偶数のとき, } x_{lk} &= x_{ck} + s_k/2, \\ y_{ck} \text{ が奇数のとき, } x_{rk} &= x_{ck} - s_k/2 \end{aligned} \right\} 3.11$$

2) 中央画像の鮮明さの判定 上述の合成方法によると、左右画像の物体像が適切に重なったとき、偶数行と奇数行の画素の色特徴が最も近似するため水平間の色ずれが最小になり、鮮明なカラー画像になる。重なり位置ずれが増加するに従い、水平間の色ずれが増して横縞状の領域が拡大し、画像の鮮明さが低下する。

このように、各画素の鮮明さは、偶数行と奇数行の色特徴の差異で変化するので、鮮明さの指標には上下方向の画素に関する RGB 濃度の分散 σ_c を用いることにし、次式で算出した。

$$\sigma_c = \{ (r_k - r_a)^2 + (g_k - g_a)^2 + (b_k - b_a)^2 \} \quad (k = 0 \sim m - 1) \quad (3.12)$$

ここで、 r, g, b はそれぞれ R, G, B の濃度、 m は上下方向の画素数、添字 a は m 個の平均を示す。式 (3.12) より、上下方向の色ずれの大小が σ_c の大小で表され、重なり状態が数値化される。通常、色ずれが最も少ないとき σ_c が最小になる。ただし、重なりに広がりがある場合や形状が局部的に類似する場合などには、その部分の重なりが適切な対応でないときにも σ_c が小さくなる。そのため、上下方向の σ_c だけによる判断では不十分であり、大域的に調べることが必要になる。

そこで本研究では、図3.4のように8方向の画素の σ_c を平均して各画素に関する平均分散 σ_{cave} を求め、それを比較と判断に用いた。これにより当該画素を中心とする一定領域が比較対象に加味されることになり、中央画

企画計算プログラム				
企画入力	入力画像	カメラ制御	カメラ制御	カメラ制御
	カメラ制御	カメラ制御	カメラ制御	カメラ制御
	カメラ制御	カメラ制御	カメラ制御	カメラ制御
	カメラ制御	カメラ制御	カメラ制御	カメラ制御
画像処理	画像処理	画像処理	画像処理	画像処理
	画像処理	画像処理	画像処理	画像処理
	画像処理	画像処理	画像処理	画像処理
	画像処理	画像処理	画像処理	画像処理
画像合成	画像合成	画像合成	画像合成	画像合成
	画像合成	画像合成	画像合成	画像合成
	画像合成	画像合成	画像合成	画像合成
	画像合成	画像合成	画像合成	画像合成
画像出力	画像出力	画像出力	画像出力	画像出力
	画像出力	画像出力	画像出力	画像出力
	画像出力	画像出力	画像出力	画像出力
	画像出力	画像出力	画像出力	画像出力

図3.5 距離計算プログラムの概要
Fig. 3.5 Outline of programs for distance calculation.

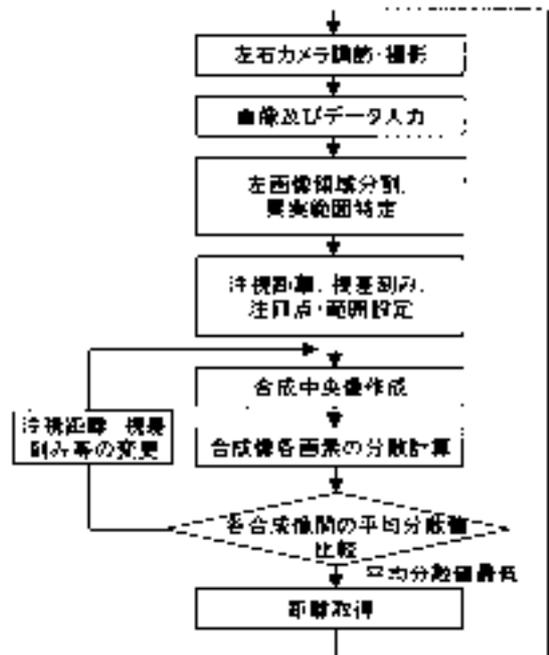


図3.6 処理手順の概要
Fig. 3.6 Outline of processing procedure.

像において左右画像の重なりが領域単位(形状)で一致したときに各画素の σ_{cave} が最小になる。

(3) 処理手順

本手法による距離計算プログラムの概要を図3.5に、その処理手順を図3.6に示す。はじめに、ステレオ視システム的位置と方向を決め、ズーム値を設定して撮影し、左右画像とカメラ制御データをコンピュータに入力する。次に、前処理として RGB 各信号のフィルタ処理とレンズ収差の補正のあと、左画像について色特徴(ここでは色相)による領域分割を行い、およその果実領域を抽出する。その中で左右画像の共通視野となる果実領域を中心に注目点(画像上で注目する座標)と走査範囲

を決め、注視距離と視差刻みを設定する。注視距離を中心にその前後の区間で視差距離断面ごとに左右画像を合成して中央画像を作成する。

次に、各中央画像の走査を行い、画素ごとに上下方向の RGB 濃度分散を求めた後、水平・垂直・斜め方向の平均分散を算出する。各中央画像間で同一座標の画素ごとに平均分散を比較し、それが最低になるときの視差距離断面を選定する。それにより中央画像における各画素の色特徴と XYZ 座標及び距離が決定され、中央視点 C から見たときのカラー画像と距離画像が同時に得られる。

なお、上記の結果により、a) 探索の距離範囲、b) 注目点や走査範囲、c) 距離分解能、d) c_{cave} の比較範囲、をそれぞれ変更する場合には、注視距離、視差刻み等を適宜変えて途中の段階に戻り再計算を行う。

3. 本手法の基礎的性質に関する実験

試作システムの距離特性は、ハードウェア面とソフトウェア面の両方の影響による結果として示される。そのうち、ハードウェアに関する距離精度は、前章のように $\pm 2\%$ 以内であった。ソフトウェア面の影響については、前述の手法が最適に実行されれば上記と同等の精度が期待できるが、鮮明さの判定指標の c_c には、果実やその周囲の物体の色特徴、光環境、カメラ条件などの影響が予想されるので、それらの因子と距離特性との関係を明らかにする必要がある。本節では、 c_c と c_{cave} の基礎的性質を調べるため、主要因子として焦点距離、撮影距離、平均分散の比較範囲、視差刻み、対象物幅を取り上げ実験的に検討する。なお、対象物条件、環境条件、カメラ条件、画像処理条件等の影響については次章以降で述べる。

(1) 方法

実験は、安定した撮影条件が得られる室内でリンゴ果実の形状を模した円板を対象に行った。合成像の作成における水平の交互配列の有効性、鮮明さの指標として用いた色指標とその分散の状況、分散の比較範囲の影響、視差距離と分散の推移の関係等について検討する。

1) 実験条件 円板は赤色紙製（厚さ約 2mm）で、直径はリンゴ果実径に類似の 60 ~ 90mm とした。撮影距離は 1.5 ~ 2m 間に設定した。背景には青色紙を壁面に張って円板との区別を容易にした。

2) 実験手順と方法 実験では、試作システムの配置とズーム調節を手で行って対象円板を撮影後パソコンに保存した。フォーカス、露出、ホワイトバランスはいずれも供試カメラの自動調節機能によった。レンズ焦点距離は主に 8.6mm ~ 24.3mm を使用し、左右両カメラの光軸間距離は 300mm とした。カメラの交差角は左右各カメラとも 0.1 度であった。

画像処理は、前節の処理手順に従って行い、注目点、走査範囲、注視距離及び視差刻みは操作者が左画像を観察して入力した。処理条件は、分散の計算範囲を上下方

向で対象物高さまで 5 種、平均分散の計算範囲を水平・垂直・斜めの各方向とも対象物幅の 2 倍までの 7 種、視差刻みを 1 ~ 20 画素の 4 種に設定した。

(2) 結果と考察

1) 左右画像の重なりと合成状態 図 3.7 は、直径 60mm の赤色円板（撮影距離 1,523mm、焦点距離 13.7mm）の処理例（投影像径 40 画素）である。処理条件を注視距離 1,510mm、視差刻み 1 ~ 10 画素、視差距離断面の個数 5 ~ 11 とし算出した中から、合成過程の画像の一部を示した。なお、視差距離の範囲は 1,257 ~ 1,858mm であった。

a) 左右画像のずれと合成状態 左右画像の各円板像は、視差距離 Z_s が 1,509mm のとき同図 (a) のように重なりがほぼ一致し、合成像全体が最も鮮明な状態になった。同図 (b) は、(a) から 1 画素分ずれた合成像であり、左右の輪郭部分にわずかに凹凸が現れるものの全体的には (a) と同様に鮮明である。両円板像のずれが 2 画素以上大きくなると同図 (c) ~ (f) のように、左右果実像の重なり部分が減少して鮮明な領域が狭くなる一方、非重なり部分では周囲の色調が円板像の行間に入り込むため、横縞模様の範囲が次第に拡大した。

合成像の状態を Z_s との関係で見ると、 Z_s が 1,370mm（ずれ 20 画素）では左画像の円板像右側部分と右画像の円板像左側部分が重なって鮮明な偽像が発生し、その反対側部分では縞模様になった。1,479mm（同 5 画素）では広い範囲で鮮明となり、縞模様部分は左右の輪郭で多く、上下の輪郭では少ない。円板の実距離 Z_0 よりやや遠方の 1,603mm（同 10 画素）では両円板像の左右部分が同じ側同士で重なっているが、鮮明な範囲は減少して縞模様範囲が拡大している。合成像の上下輪郭部分では水平の構成数が少ないため、ずれの明確な変化は現われない。 Z_s が Z_0 よりかなり遠方の 1,700mm（同 20 画素）では、左画像の円板像左側と右画像の円板像右側が重なって再び鮮明な偽像が発生している。

b) 視差刻みと合成状態 視差刻み d が小さいときに

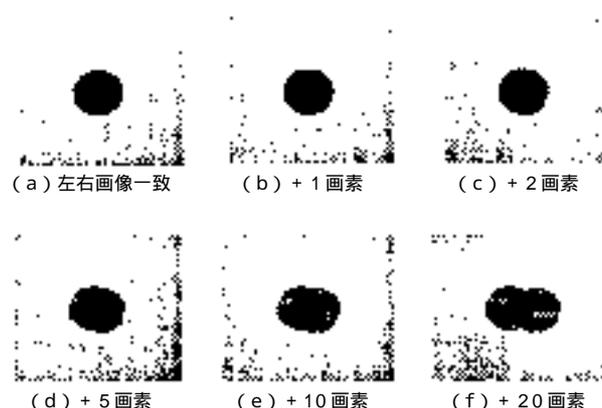


図 3.7 左右画像の重なりと合成状態

Fig. 3.7 Overlapping images composed from a left and right image.

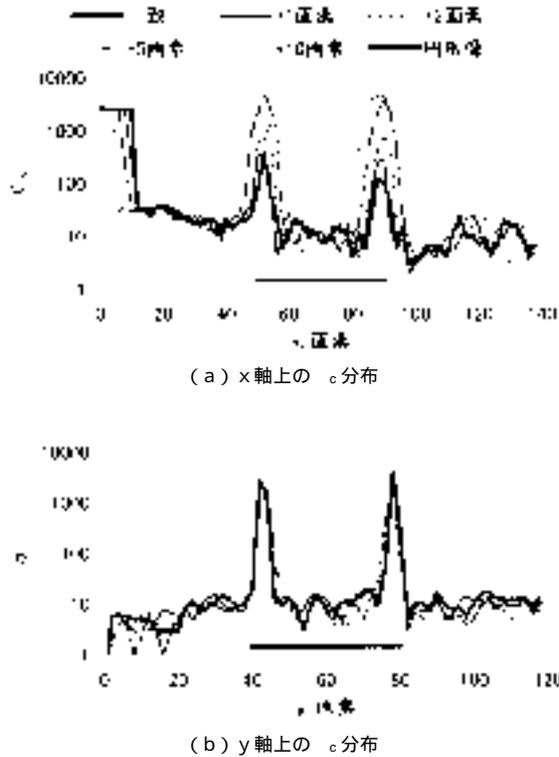


図3.8 合成像における重なりはずれとx, y軸上の σ_c の分布
 Fig. 3.8 Distributions of σ_c on the x axis and the y axis of a composite image: (a) on the x axis, (b) on the y axis.

は右画像の一回の移動量が少いため、合成過程における鮮明領域と横縞模様領域の変化はともに少ないが、 σ_c が大きくなるに従い、右画像の一回の移動によって重なり状態が大きく変化するため、横縞模様領域の変化も大きくなる。 σ_c が1画素の場合、合成作業は画像を1画素ずつ移動させて行われるので、注視距離 Z_g が Z_0 から多少離れていても Z_g が探索範囲内にあれば、合成過程の途中で重なりが一致する。 Z_g と Z_0 が近似しているときには、 σ_c の大きさに関わらず、 Z_g 付近での重なり状態は類似する。 Z_g が同じ場合でも、 σ_c が対象物像の幅よりも大きくなると、左右の円板像が重ならないことがある。

c) 注視距離と合成状態 注視距離 Z_g に最も近い視差距離 Z_{sg} と Z_0 が一致するときには、左右の円板像は画面中央で重なりが一致し、合成像の中央部分、輪郭部分の両方とも鮮明になる。 Z_{sg} と Z_0 の差が大きくなると、右円板像が中央から遠ざかるため重なり部分は少なくなる。しかし、 σ_c の与え方によっては、探索範囲内の視差距離断面が Z_0 付近に設定されて、左右円板像の重なりが一致する場合がある。 Z_0 が探索範囲外であれば、左右の円板像の重なりは生じない。

2) 合成像における RGB 濃度分散の分布 a) x, y 方向の分布 図3.8は、図3.7の各合成像の中央を通る x, y 軸上で RGB 濃度分散 σ_c の分布状況を見たものであ

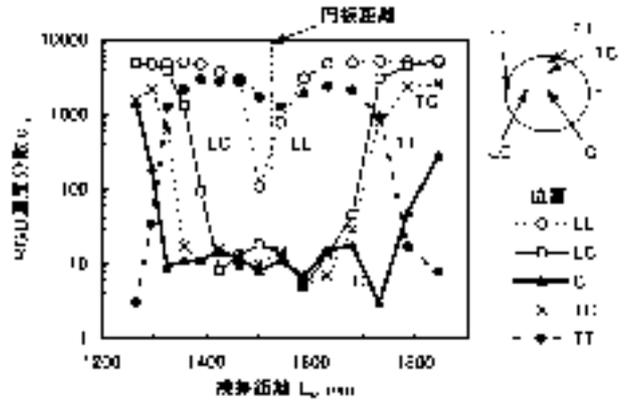


図3.9 視差距離と合成像内の σ_c との関係
 Fig. 3.9 The relationship between distance by disparity and σ_c in a composite image.

る。 σ_c の計算は各画素とも上下方向計4画素で行った。円板像の外側では背景色がほぼ均一のため σ_c は30以下と小さい。合成像では、輪郭部分が大きく、その内側では10前後の小さい値になっている。x軸上の σ_c の分布は同図(a)のように、重なりはずれが大きくなるに従い、合成像左右の輪郭部分で σ_c が増大し、その範囲もx方向に広がる。輪郭の内側では σ_c はほとんど変化せず、その範囲が狭くなる。ただし、重なりはずれが10画素以上の場合には、偽像のため σ_c が小さくなっている。一方、y軸上の σ_c の分布は、同図(b)のように、ずれの大小(視差距離の遠近)に関係なく、両円板像が重なり合う輪郭の上下部分で突出し、ピーク値はほぼ一定になる。

以上のように、合成像の σ_c は、輪郭部分で急増し、その内部では小さくなる。合成過程において、合成像内で σ_c の小さい範囲は合成像の右側部分から次第に広がり、最大になった後で減少する。 σ_c の小さい範囲が最も広くなったとき、輪郭付近で σ_c の大きい区間は最も狭くなり、左右円板像の各部分が正対応になる。このときの Z_g が Z_0 に近似する。ただし、その前後の時点では合成像内で局部的に上下の画素の色特徴が近似するため、誤対応にもかかわらず σ_c の小さい部分が存在することになる。このため、合成像内部における重なりが正対応かどうかを、 σ_c の大小だけで判断することはできない。

b) 視差距離と合成像内各位置の σ_c との関係 図3.9は、図3.7(a)の合成像内の代表的な5箇所について、 Z_g と σ_c の関係を調べた結果である。各個所の位置は、左輪郭付近 LL、左側中央 LC、中央 C、上側中央 TC、及び上輪郭付近 TT であり、 σ_c はいずれも上下方向4画素に関する分散値である。

合成像の中央(C)では、 Z_0 を挟んで前後約200mmの区間で20以下となったが、 Z_0 付近が最小になるとは限らなかった。左右の輪郭に近い個所(LC)ほど Z_0 に

対する σ の小さい範囲が狭まり、左右の輪郭 (LL) では Z_0 付近で最小値になった。合成像の輪郭上下部分 (TT) の σ は、円板内外の色特徴の差が影響して大きな値になっており、位置ずれによって生じる変化は少なかった。

本手法による合成過程では、左右両画像の重なりは合成像の右側から始まるので、右側部分ほど Z_s の小さい時点で σ が減少し始める。ただし、その減少は類似色の誤対応によるものである。 Z_0 付近では合成像全体が正対応になり σ の小さい範囲が続くが、その後再び増加する。このように合成像各位置の σ は、左右の輪郭付近を除くと、 Z_0 で最小になるとは限らない。

なお、 σ 計算に用いる画素数を変化させた場合、上下方向に範囲を広げるほど合成像内部で σ の小さい領域が狭くなるものの、全体的にはあまり大きな影響はみられなかった。また、 Z_s を変えた場合、 σ の値や Z_s の間隔が変わるが、上述と類似の傾向であった。

一般に、対象物の幅が広いほど、及び視差刻みが小さく、分散計算の画素数が少ないほど、 σ の小さい範囲が広がる傾向が見られた。その σ の比較だけでは誤対応かどうかの判定は困難なので、 σ 最小の位置が Z_0 に一致すると即断はできない。このため測定距離の誤差は、対象物像の幅分に相当する視差距離の範囲で生じる可能性がある。

合成像内部の位置に関係なく、対象物の Z_0 で鮮明さ指標が最小になるようにするためには、 σ を平均した

平均分散を用いて、より広い領域について比較することが考えられる。そこで次に、各画素に関する平均分散の計算範囲を円板像幅の大きさに取り、 Z_s と各画素の平均分散との関係について調べた。

3) 重なり のずれと RGB 濃度平均分散の分布 a)

x, y 軸上における平均分散と各成分の分布 図 3.10 は、RGB 濃度の平均分散 σ_{cave} を構成する水平、垂直及び斜めの各方向成分について、合成円板像中心を通る x, y 軸上の分布を、左右円板像のずれとの関係で見た結果である。 x 軸上の水平成分 σ_{cx} は、合成円板像の幅よりやや広い区間でほぼ一定で、その外側で急増する分布形状となり、ずれが大きくなるほど円板像内部の値が増大した。垂直成分 σ_{cy} は、円板像幅とほぼ同じ区間で増加し、その外側で低い値となった。ずれが増大すると、中央ではほとんど変化がないが、上下の輪郭に近い部分が急増する傾向になった。斜め成分 σ_{cs} は、円板像の輪郭よりやや広い区間で凹型分布となり、その外側で一旦減少するが、さらに外側では急増する形状になった。ずれが大きくなると円板像内部で凹型形状のまま増加した。

次に、 y 軸上では、 σ_{cx} は輪郭付近で急増し中央で小さくなる凹型の分布であるが、ずれが大きくなると中央の値が次第に増加した。 σ_{cy} はずれの大小に関係なく、円板像の幅よりやや広い区間でほぼ一定となり、 σ_{cs} は x 軸上の分布と同様であった。

以上のように、平均分散のどの成分も左右円板像の重

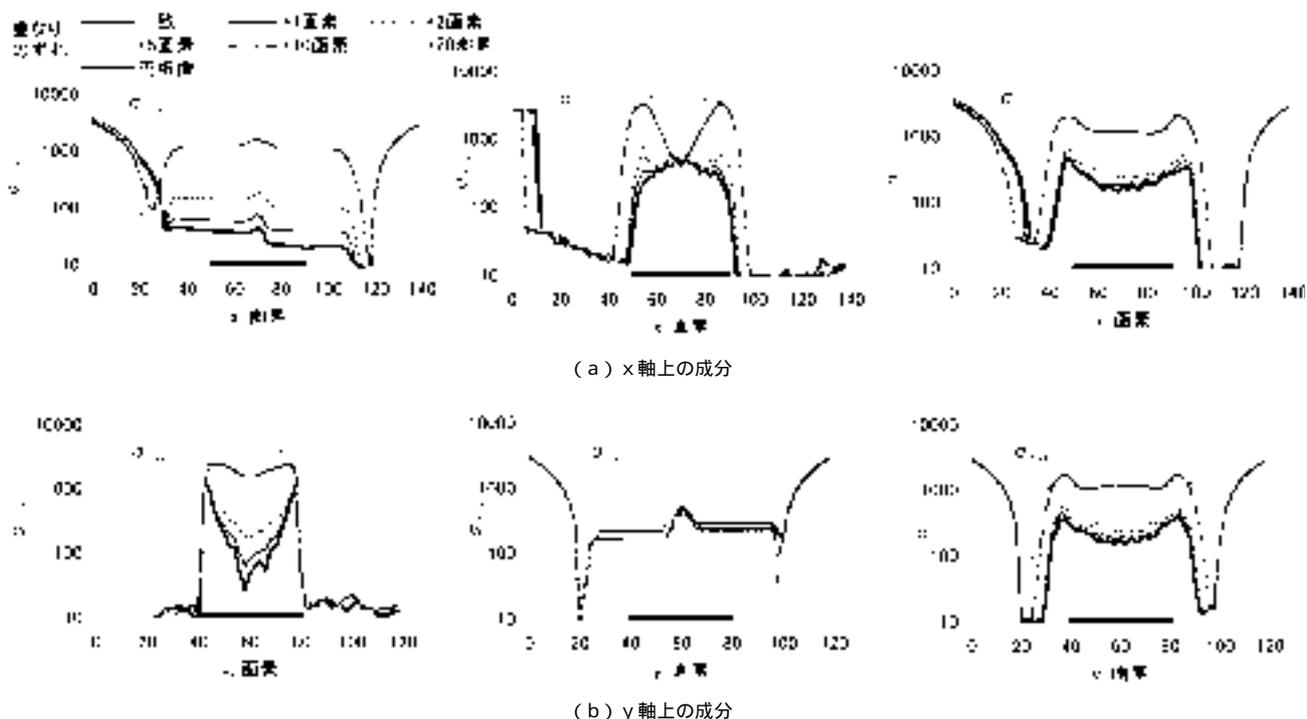
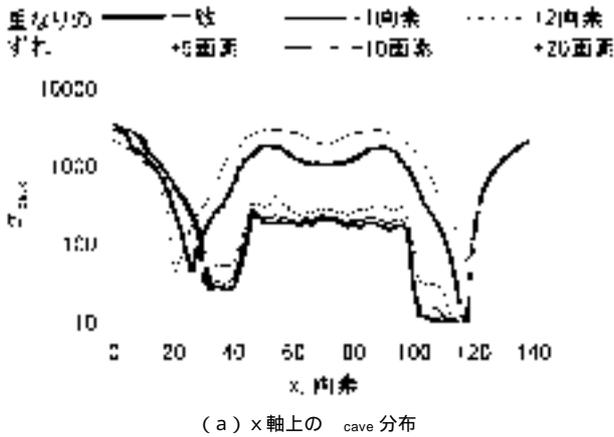
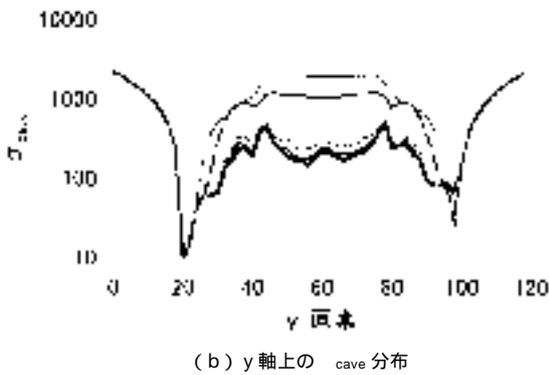


図 3.10 合成像における重なり のずれと x, y 軸上の σ_{cave} 各成分の分布

Fig. 3.10 Distributions of components of average variance, σ_{cave} , on the x axis and the y axis of a composite image: (a) on the x axis, (b) on the y axis.



(a) x軸上の σ_{cave} 分布



(b) y軸上の σ_{cave} 分布

図3.11 合成像における重なりが一致するときとx,y軸上の σ_{cave} 分布
Fig. 3.11 Distributions of σ_{cave} on the x axis and the y axis of a composite image: (a) on the x axis, (b) on the y axis.

なりが一致した場合に合成像内の値が最小になり、ずれが増えるに従って増加した。

b) x, y軸上における σ_{cave} の分布 図3.11は、合成円板像内の σ_{cave} をx, y軸上について調べた結果である。x軸上の分布は同図(a)のように、ほぼ円板像幅と同じ区間で台形状となった。ずれが大きくなるに従い、その形状を保ったまま全体的に増大した。y軸上では、x軸と同様台形状であるが、ずれが小さいときに中央で凹型になる傾向が強まった。

以上のように、合成像内の σ_{cave} は、重なりが一致時、及びずれが±1画素以内のとき、ほぼ最小になることが分かった。

4) 視差距離に対する σ_{cave} と各成分の関係 図3.12は、横軸に Z_s を、縦軸に各 Z_s における合成像中央の σ_{cave} とその成分を取って、両者の関係を見たものである。その結果、 σ_{cvy} を除いた各成分と σ_{cave} は、 Z_0 付近で最小になった。特に σ_{cvx} の収束度合いが強く、急激な減少が見られた。なお、 σ_{cvy} はほぼ一定であるが、これは各画素の σ_{cave} の計算範囲を円板像幅分として合成像中央で調べたためであり、図3.10(a)から明らかのように、中央以外では重なりがずれとともに増加した。

5) σ_{cave} の計算範囲が距離推定に及ぼす影響 図

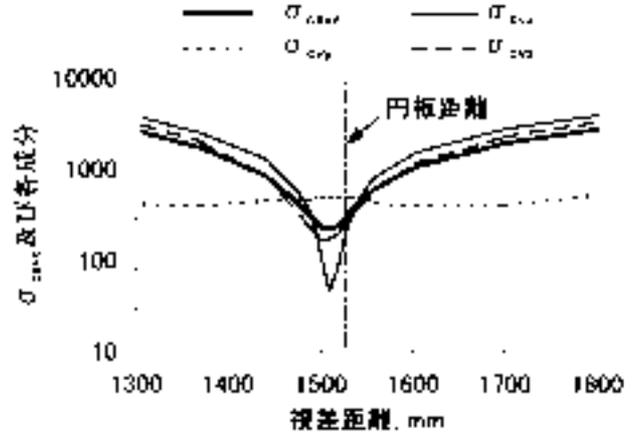
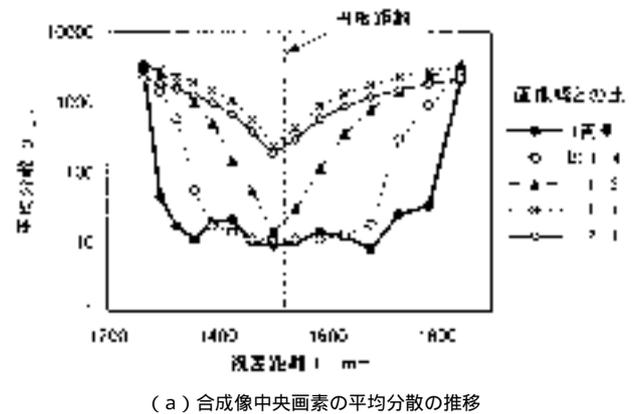
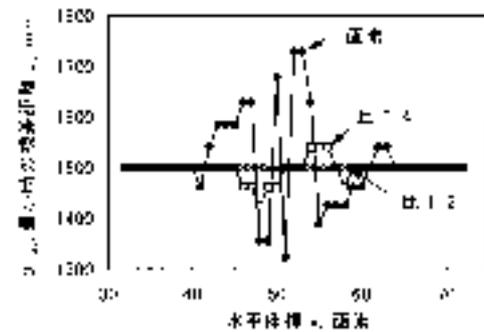


図3.12 視差距離に対する合成像中央の σ_{cave} と各成分の関係
Fig. 3.12 Relationship between distance by disparity and components of σ_{cave} on the center position of a composite image.



(a) 合成像中央画素の平均分散の推移



(b) 平均分散最小の視差距離分布(x軸上)

図3.13 平均分散の比較範囲と視差距離の関係

Fig. 3.13 The relationship between a range of comparison on average variance and the distance by disparity: (a) change of average variance at the center of a composite image. (b) Distributions of distances by disparity when the average variance was at its minimum.

3.13は、図3.7(a)を対象に、 σ_{cave} の各成分の計算範囲を、1画素及び円板像の幅 w_a に対する比 (N_x / w_a) で $1/4 \sim 2/1$ に設定した場合について調べたものである。同図(a)は、横軸に Z_s 、縦軸に合成像中央部分

の c_{cave} を対数目盛でとり、 N_x / w_a をパラメータとして両者の関係を示す。計算範囲が1画素の場合、 Z_s が1,450 ~ 1,650 mm の区間で c_{cave} が小さいが、 N_x / w_a が増加するに従い c_{cave} 小の区間が狭くなった。 N_x / w_a が3/4になると c_{cave} 小の区間がさらに狭まり Z_0 付近で急減して最小となった後、急増した。 N_x / w_a が1/1でも同様の傾向であるが、 c_{cave} の最小値は $N_x / w_a = 3/4$ よりも大きくなった。すなわち、 c_{cave} は、その計算範囲が w_a の1/2以上になると Z_0 付近で最小になり、その最小値は計算範囲が大きくなるに従い増加した。

同図(b)は、各 Z_s に関する合成像の x 軸上で、同一の x 座標の c_{cave} を比較したとき最小になった画素の Z_s の分布を示したものである。それによると、 c_{cave} の計算範囲が w_a の1/2より小さいとき中央付近では Z_s の変動が激しいが、輪郭に近い位置ではその計算範囲が1画素でも収束がよいことが分かる。合成像内部全体では、計算範囲を w_a の約3/4以上にしたとき、おおむね良好な結果が得られた。

以上より、対象物像の幅 w_a に対する c_{cave} の計算範囲が小さいほど c_{cave} の収束性が悪く、 N_x / w_a が3/4以上のとき実距離付近での収束性が高くなるので、実距離付近の視差距離を見出すためには、 N_x / w_a を3/4以上にする必要がある。

4. リンゴ園果実画像に対する適用

本節では、前節の円板実験で明らかになった本手法の性質が、実際にリンゴ園の果実画像に適用できるかどうかを調べることを目的とする。すなわち、合成像のずれと鮮明さの指標である RGB 濃度分散の関係、平均分散の比較計算範囲の影響、視差距離と同分散の関係、偽像発生状況などについて検討する。

(1) 実験方法

弘前市近郊の普通栽培リンゴ園で晴天時に、赤色系品種ふじ(直径81 ~ 90 mm)を対象に約2.2 mの距離から試作システムを使って順光状態で撮影(焦点距離13.8 mm)した。撮影の手順は前節と同様である。撮影は、果実が左右各画像中央の水平線上にあって共通視野

に入るように、試作システムの配置を調整して行い、撮影画像をパソコンに取り込みハードディスクに保存した。ズームはパソコンから手で制御して設定し、フォーカス、露出、ホワイトバランスはいずれも自動調節機能を利用した。カメラ前端から対象物表面までの距離をレーザー距離計で測定し校正値とした。

左右画像の合成処理は、左画像を観察しながら、注視距離、視差刻み、注目点及び範囲、分散計算範囲の各設定値を指定して、図3.6の手順に準じて行った。

(2) 実験結果と考察

1) 左右画像の重なりと合成状態 図3.14に、撮影した果実群の左右各原画像を示す。対象果実は表示枠内のA, B, C, 及びDの4個とした。試作システムから各果実までの直線距離は、それぞれ2,254, 2,123, 2,310及び2,196 mmで、奥行き約30 cmの範囲にあった。果実Dは前方の葉によって下側の一部が遮られ、その遮蔽状態は左右各画像でやや異なった。

果実Aについて、左右画像の重なりが一致する状態から、ずれが-4 ~ +6画素となる範囲で合成した結果を図3.15に示す。同図によると、一致から±2画素のずれの範囲では左右の輪郭の内側にわずかに横縞が現れる程度で、ほとんど変化が見られなかった。ずれが±3画素以上になると、左右の輪郭付近における横縞模様が明確になり、色ずれが確認できるようになった。

a) 視差刻みと合成状態の関係 視差 s は視差刻みの間隔で飛び飛びに変化する。 s_0 が1のとき、 s は1画素ずつ変化するので左右両像の重なりが一致する視差 s_0 を取り得るが、 s_0 が2以上では s_0 を取るとは限らず、重なりが厳密な一致状態を見落とすことがある。そのため、 s_0 の上限をどのように設定するかが問題になる。果実像Aに関する s_0 は131画素、 Z_s は2,214 mm(距離誤差1.8%)であるが、 s_0 を種々変化させて調べた結果、その値が4以下であれば、色ずれの少ない鮮明な合成像が得られた。他の果実像についてもほぼ同様であった。したがって、供試果実像のような場合、 s_0 が s_0 から2画素の範囲に入る条件で処理されれば、重なりが一致

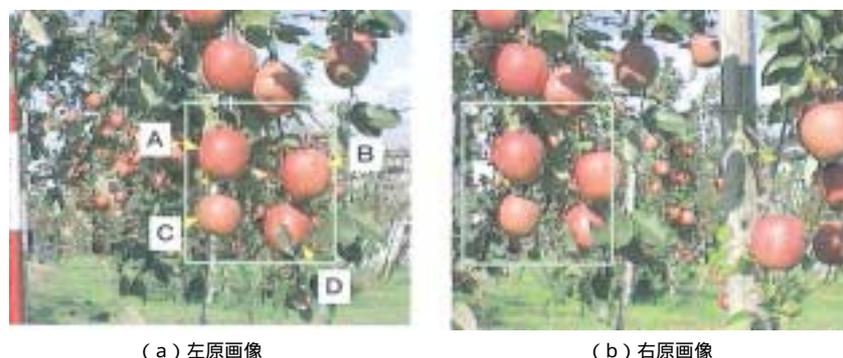


図3.14 リンゴ園果実の左右原画像(品種ふじ)

Fig. 3.14 An original pair of images taken of the 'Fuji' variety of apple, in an apple orchard.

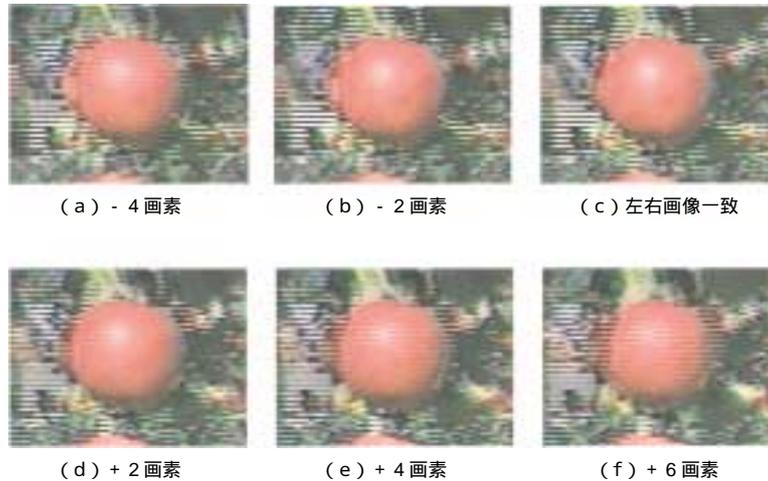


図3.15 果実像Aの重なりのおずれと合成状態

Fig. 3.15 Overlapping situations composed from a pair of images of the apple, A.

に近い状態の合成像が得られ、 s_0 の推定が可能なが分かった。

b) 注視距離と合成状態の関係 Z_g が Z_0 付近に設定されたとき、探索範囲内の合成像における色ずれは、 Z_0 付近で最も小さく、その位置から前後に離れるに従い増加した。たとえば、 Z_g が Z_0 より前方に設定された場合、後方に行くほど Z_0 に近づくので、合成像の色ずれは減少した。逆に、 Z_g が Z_0 より遠方に設定された場合には後方ほど色ずれが増加した。そのため、合成像の色ずれの増減傾向を調べることにより、 Z_0 に対する Z_g の前後関係を判定することが可能であった。

c) 合成状態と輝度分布の関係 図3.16は、左右各画像のx軸上の輝度分布と合成像の重なりのおずれとの関係を見たものである。ずれが-2画素では左右両画像の左側部分で輝度線が一致しているが、右側部分では右画像の輝度線が低くなっている。ずれが+2画素では逆に右側部分で左画像の輝度線が低くなっている。結局、重なりが一致したとき全体的に左右両画像の輝度線が最も接近した。このように、果実像の重なり状態は、左右両画像の輝度線の上下関係を調べることによって知ることも可能である。ただし、その差が明確に現れない場合も多い。

2) 合成像のx,y軸上における ρ 分布 果実像Aに関する合成像のうち、ずれが-4~+4画素のものについて、中央を通るx軸上の ρ 分布を調べた結果、図3.17(a)のようになった。x軸に平行な太実線は果実像の幅区間を示す。図のように、各 ρ 線とも変動が激しいが、果実像範囲では一致(ずれが零)の場合が最も小さく、次いで-2画素,+2画素のずれとなった。ただし、部分的にはずれがそれ以上の場合でも ρ が最小になる状況が見られた。なお、右側の $x=90$ 付近では各 ρ 線とも小さな値になっているが、これは近くに幅の広い濃緑色領域があったためである。

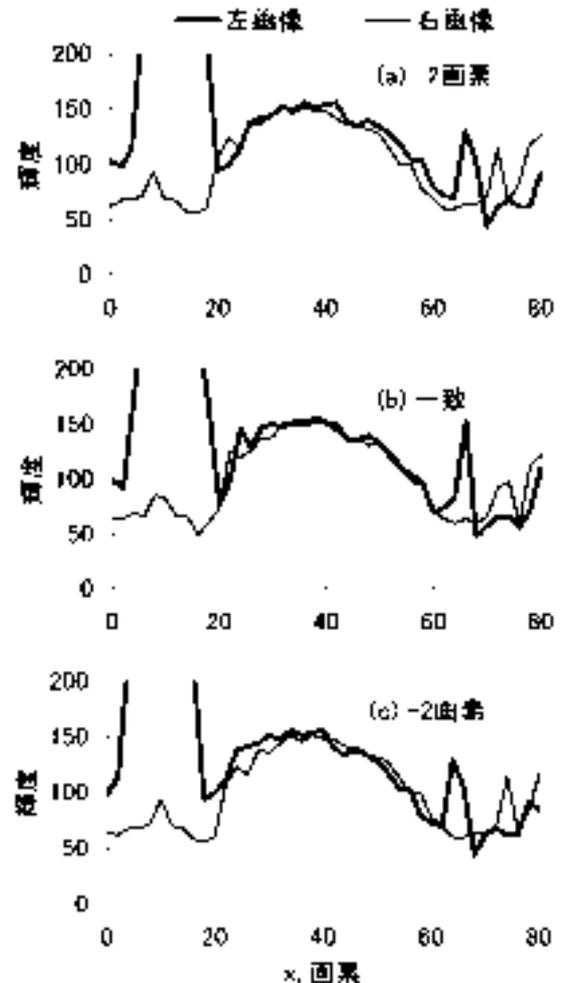


図3.16 重なりのおずれと輝度分布の関係(果実Aのx軸上)
Fig. 3.16 Relationship between overlapping situations and distributions of brightness on the x axis of the apple image, A.

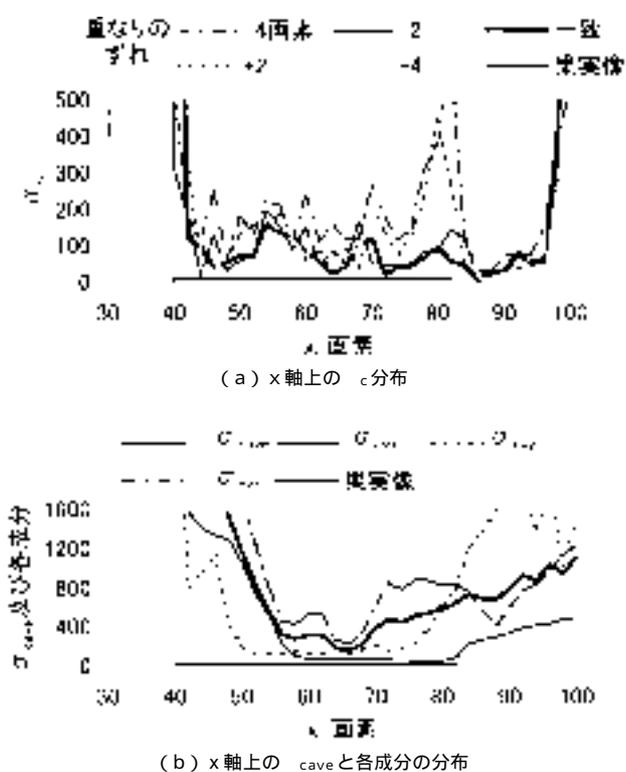


図3.17 果実Aの合成像における σ_c と σ_{cave} の分布

Fig. 3.17 Distributions of σ_c and σ_{cave} on the composite image of the apple, A: (a) distributions of σ_c , (b) distributions of σ_{cave} and the components.

3) 合成像における RGB 濃度平均分散の分布 重なりが一致した合成像の x 軸上における平均分散 σ_{cave} と各成分の分布は、同図 (b) のようになった。 σ_{cave} の計算範囲は果実像 A の幅に等しい 40 画素とした。各成分とも果実像中央から右側でおおむね小さく、果実像左側と果実像右の外側で急増する傾向が見られた。このうち、果実像左側の急増は、画面左辺付近の色調の変化が大きい影響を受けて、 σ_c が急増したためである。各成分の中では、 σ_{cvx} が最も小さくなった。各成分を総平均した σ_{cave} は、同図太実線のように、 σ_{cvx} の影響によって果実像の中央からやや右よりの位置で最低となり、果実像周辺に行くほど増加する傾向になった。

4) 視差距離に対する σ_{cave} 及び各成分の関係 図 3.18 は、果実像 A の中央画素の σ_{cave} 及び各成分と、 Z_s との関係調べた結果である。図のように、 σ_{cay} は Z_s に関係なくほぼ一定である。 σ_{cvx} は Z_0 の少し前方で、 σ_{cvz} はやや後方で最小になった。両者とも重なりがずれの増大とともに増加した。 σ_{cave} は両者の中間付近で最小になり、その位置は Z_0 に近似した。

以上の結果より、本手法における σ_c 及び σ_{cave} の特性は、果実を対象にした場合にも前節の円板結果と同様であることが分かった。

5) 果実群の合成過程並びに合成カラー画像と距離画像 図 3.19 (a) ~ (c) は、 $Z_0 = 2,200\text{mm}$ 、視差刻

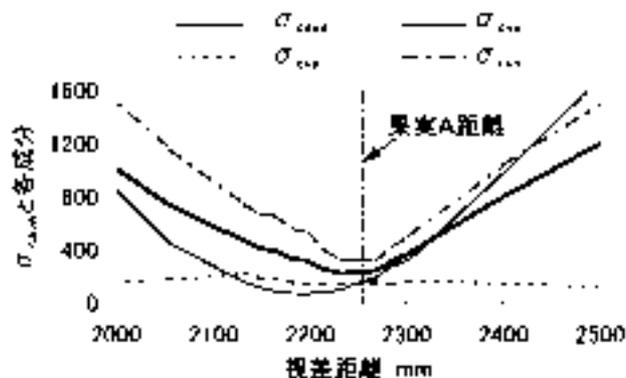


図3.18 果実Aの視差距離に対する σ_{cave} と各成分の関係

Fig. 3.18 Relationship between distance by disparity and σ_{cave} of the apple, A.

み $= 1$ 画素で処理した合成過程の一部を示したものである。同図 (a) では果実像 B が、(b) では A、D が、(c) では C がそれぞれ最も鮮明になった。各果実像とも、他の合成過程では合成像の左右の輪郭付近でずれが拡大し不鮮明な状態になっている。

各合成過程の果実像間で同一座標の画素の σ_{cave} を比較して最小の画素を選定し、その画素の RGB 濃度を用いて描画したのが同図 (d) の合成カラー画像、その画素の属する Z_s で示したのが同図 (e) の合成距離画像である。合成カラー画像では各果実像とも鮮明であり、左右両画像の重なりが一致したことが分かる。同時に、各画素は (e) に示される距離情報を持つので、対象物が色と形状で距離別に識別されたことになる。なお、同図 (e) の下辺の色区分は、左側ほど近距離を、中央の区が Z_0 付近の Z_s を表す。

図 3.20 は、各果実像の中央の画素に関する σ_{cave} と Z_s の関係を調べた結果である。各果実像の σ_{cave} とも、それぞれの Z_0 に近い Z_s で最小になる V 型の変化傾向を示し、その距離誤差は 4% の範囲内であった。これは、2 章に掲げた所要精度をほぼ満たしており、本手法が果実の距離測定に利用可能なことを確認した。

5. 要約

本章では、レンズ光学系と人間の視覚系に関する研究を参考に、両眼ステレオ視法に関する新たな計測原理を検討した。その原理は、一対の左右画像を視差距離断面毎に合成して中央画像を作成し、その鮮明さを比較・判定することにより、共通視野空間内の物体の色特徴と位置・距離を同時に得る、というものである。合成像の鮮明さを比較・判定する指標には、上下方向の RGB 濃度分散とその 8 方向の平均分散を用いた。その測定原理の基礎的性質を明らかにするため、赤色円板を対象に実験的に検討した結果、対象像全体を比較範囲とすれば、ほぼ適切なカラー画像と距離画像の得られることが分かった。さらに、収穫期のリンゴ園で実際に赤色果実を対象に本手法の適用実験を行い、基礎的性質を検討した。

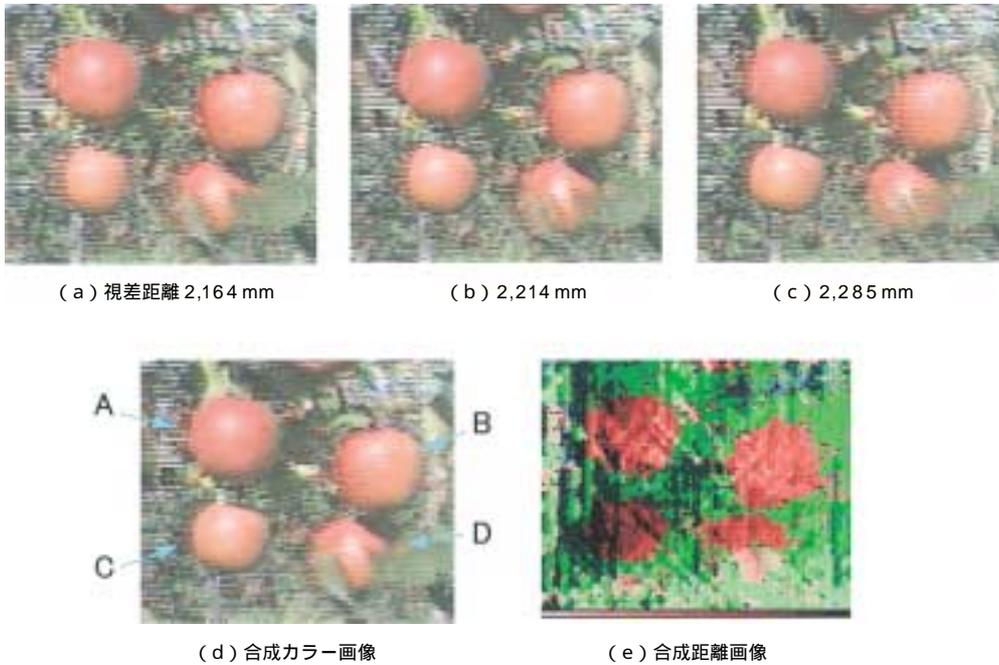


図 3.19 果実群の合成過程と処理結果

Fig. 3.19 Composite process and the results obtained on the 'Fuji' variety of apples.

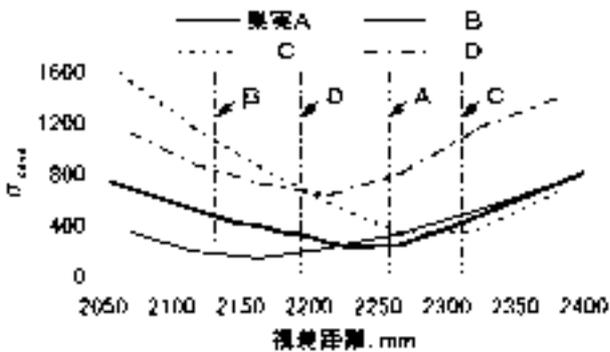


図 3.20 視差距離と各果実像の D_{cave} の関係

Fig. 3.20 Relationship between distance by disparity and D_{cave} of each apple.

撮影距離が約 2.2m の場合、その距離誤差が 4 % の範囲内にあり、本手法が果実の距離計測に適用可能であることを確認した。

第 4 章 ステレオ対応問題画像の分析と対策

1. 緒 言

リンゴ園で撮影した果実画像では、類似果実の並びや重なり、枝葉の陰になって生じる隠れや果実像の変形など、いわゆる対応問題画像ないしそれに類似した画像が頻繁に見られる。ステレオ視の利用にあたっては、そうした対応問題への解決策または対処法が必要になるが、実用的な対策はまだ確立されていない。

本研究のステレオ視の測定原理は、前章で述べたよう

に、視差距離断面ごとに左右両画像を合成して中央画像を作成し、その中から鮮明な物体のみを検出するというものである。被写界深度のごく浅い単眼カメラで、合焦距離を連続的に変えて撮影した画像をもとに、物体を検出することに例えられる。この原理に基づいて画像入力と処理がなされると誤対応の機会が減少するので、対応問題の発生自体がかなり抑制されると予想される。

しかし、現行の TV カメラを用いてステレオ視画像の撮影する場合、その撮像方式がラスタスキャン方式のため、左右の画像はそれぞれ被写空間全体が一括して撮影されたものになり、上述の原理とは異なった画像が入力される。このため、現行カメラによる画像に本研究の手法を用いる場合には、左右両画像で対応する視差距離断面を改めて順次探し出さなければならない。対応問題画像では、その過程で誤対応による鮮明な偽像が発生しやすい。したがって、その対策として、視差距離断面の適切な対応づけと偽像の発生を抑制する方法が必要になる。

本章では、対応問題画像での偽像の発生とその性質について調べるとともに、視差距離断面の対応づけと偽像の抑制対策として、図 3.1 (a) の人間視覚系の視交叉を参考に、左右画像内の注目範囲をそれぞれ中央で左右半分ずつに分け、同じ側の視野同士で合成する方法を検討した (85)。

2. 偽像の発生とその抑制対策

(1) 偽像の発生とその性質

1) 偽像の発生位置 前章では、リンゴ園の果実画像に本研究の手法を適用する際に、注視距離と視差刻みを

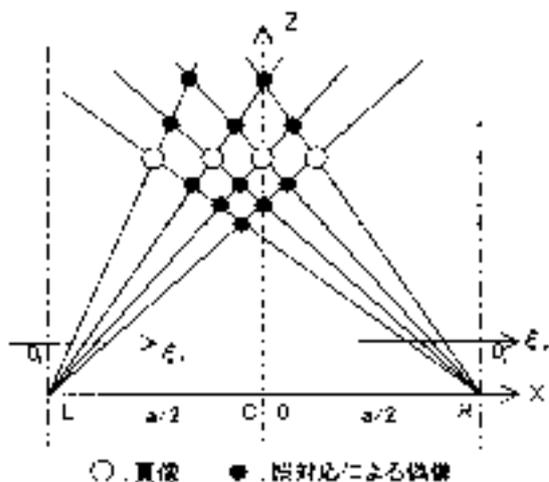


図4.1 ステレオ対応問題の例

Fig. 4.1 An example of the correspondence problem of the stereo vision.

与えて探索距離範囲を設定し、その中で同じ視差距離断面ごとに左右の画像を順次合成したのち、それらの画素の鮮明さを比較して距離を求める、という手順で行った。しかしステレオ対応問題画像では、左右両画像の視差距離断面が異なる場合にも、図4.1の例で印で示すように、類似の果実像との間で鮮明な合成中央像(この場合偽像)が作成されるため、距離測定を誤ることになる。

偽像は、対象物内部での色特徴の近似、対象物と類似物の局所的な色特徴の近似、及び対象物と類似物の全体的な色特徴の近似、のいずれかに該当すれば発生するが、これらのうちとについては、対象物の全幅分を範囲とするRGB濃度の平均分散 σ_{cave} を比較・判定に用いれば、おおむね適切な距離が得られることを前章で述べた。

本章では、類似の色特徴をもつ果実が複数存在する画像を想定し、について検討する。そのような画像では、各果実像の色と形状が近似し、それらの中心位置が接近するほど偽像が発生しやすい。もし、色と形状の全く同じ果実像が図4.1のように同一の水平(すなわちエピポーラ線)上に複数個並んでいる場合には、真の合成像と偽像の鮮明さに差異は現われない。

対応問題画像の果実像の並び方には、同図のように左右両画像で各果実像の順序が同一の場合(同順並びと呼称、以下同様)のほか、順序が逆転する場合(逆転並び)、類似果実が重なり合って投影される場合(重なり)、果実の一部又は全部が枝葉などに隠れている場合(隠れ)がある。これらのうち、逆転並び以外は共通の性質を持つので、はじめにそれらについて考察する。

偽像の発生位置は類似果実との相対的な位置関係で幾何学的に決まるので、その点に着目し、典型例として図4.2のように、一對の円板が同じエピポーラ線にあり、それらの投影像の色と形状が全く同じ場合を取り上

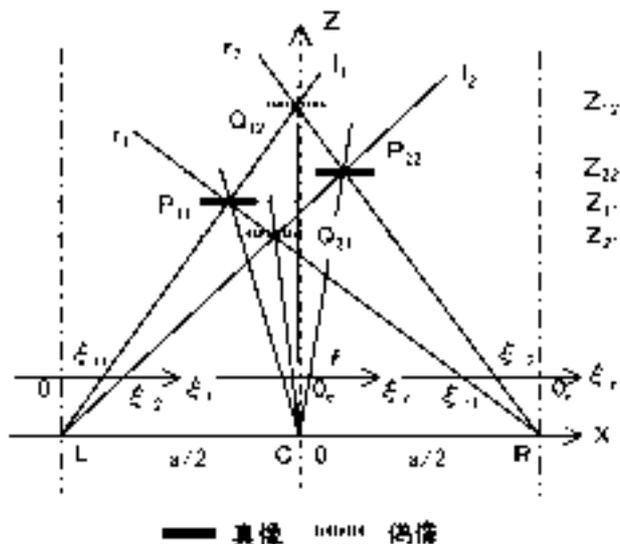


図4.2 偽像の発生位置

Fig. 4.2 Causative positions of false images.

げる。同図で、一對の円板 P_{11} と P_{22} の中心は同一のエピポーラ平面上にある。左右のカメラ(L,R)からの視線 l_i 及び r_j ($i, j = 1, 2$) が、それぞれのレンズ中心と撮像面の投影像中心を通して各円板上で交差するとき、偽像は Q_{12} と Q_{21} の位置に発生する。なお、各視線の交点における記号の添字は、1番目が左視線、2番目が右視線の番号を表す。その他の記号とXYZ座標の取り方は前章と同様である。

偽像 Q_{ij} (添字 ij は 12 または 21) の XYZ 座標は、撮像面の座標 (,) と次の関係にある。

$$\left. \begin{aligned} X_{ij} &= (a/2) \cdot (r_{ij} + l_{ij}) / s_{ij} \\ Y_{ij} &= a \cdot l_{ij} / s_{ij} = a \cdot r_{ij} / s_{ij} \\ Z_{ij} &= a \cdot f / s_{ij} \end{aligned} \right\} 4.1$$

ここで、 s_{ij} は撮像面上の視差 ($= r_{ij} - l_{ij}$) [mm]、 f は焦点距離 [mm]、 a は左右カメラの光軸間距離 [mm]

一方、合成中央画面上の座標 (x_{cij}, y_{cij}) [画素] と視差 s_{ij} [画素] を用いれば、次式ようになる。なお、画面上の数値は画素数であり、整数として表されるので、XYZ座標値は近似値になる。

$$\left. \begin{aligned} X_{ij} &= a \cdot x_{cij} / s_{ij} \\ Y_{ij} &= a \cdot y_{cij} / s_{ij} \\ Z_{ij} &= a \cdot a \cdot f / s_{ij} \end{aligned} \right\} 4.2$$

ここで、 d は撮像面に対するモニタ画面の比例定数 [画素/mm]

円板 P_{ii} (添字 ii は 11 または 22) に関する合成中央画面上の x 座標を x_{cii} [画素]、視差を s_{ii} [画素] すると、

$$\left. \begin{aligned} x_{cij} &= (s_{ii} - s_{jj}) / 4 + (x_{cii} + x_{cjj}) / 2 \\ s_{ij} &= (s_{ii} + s_{jj}) / 2 + (x_{cii} - x_{cjj}) \end{aligned} \right\} 4.3$$

式(4.3)より、偽像は一對の真の合成像に挟まれた区間に発生し、次の関係が成立する。

$$\left. \begin{aligned} X_{c12} + X_{c21} &= X_{c11} + X_{c22} \\ S_{12} + S_{21} &= S_{11} + S_{22} \\ 1/Z_{12} + 1/Z_{21} &= 1/Z_{11} + 1/Z_{22} \end{aligned} \right\} 4.4)$$

2) 偽像の性質 注視距離 Z_g が一対の円板の距離 Z_{22} が Z_{11} の付近にあり、その探索範囲が偽像の距離 Z_{21} または Z_{12} まで及ばなければ、前章の手法でも偽像位置での合成は行われないので、偽像は発生しない。この関係を利用すれば偽像を抑制することは可能である。ただし、測定開始当初は、円板、偽像の両視差距離とも不明であるから、上述の関係式は使えない。

次に、対象物の注目点が Z_g において合成画面の中央に来るように合成位置を調整した場合、注目点と偽像の発生位置の関係は次のようになる。図 4.2 において、左画像で注目点を円板 P_{22} に設定すると、 Z_g が Z_{22} 付近であれば、合成画面では点 C からの中央視線が図示のように l_2 と Z_{22} の交点を通るので、中央に P_{22} の真像、その左側に偽像 Q_{12} と Q_{21} が検出される。一方、 Z_g が Z_{21} 付近のときには、中央視線が l_2 と Z_{21} の交点を通るので、偽像 Q_{21} が合成画面の中央に現れる。すなわち、合成画面中央の注目像が真像となり偽像と区別できるのは、 Z_g が対象物付近に設定された場合のみである。

なお、同図は一対の円板像が左右画像で同じ順序になる同順並びの例であるが、もし円板が Q_{12} と Q_{21} の位置にあれば、左右画像の投影像は順序が逆転する逆転並びとなり、偽像の発生位置は一対の真像の外側 (P_{11} と P_{22} の位置) になる。

また、左右画像の同一水平線上に類似の円板像が N 個ずつある場合、偽像の発生個数は最大で $N \cdot (N - 1)$ 個になる。

(2) 左右眼の同側視野合成と偽像の関係

1) 同側視野の特徴色量の比較 視差距離断面の注目範囲が左右両画像で完全に対応していれば、それに相当する部分に含まれる特徴色の総量は左右各画像で当然等しくなると予想される。例えば、図 4.2 で Z_{22} 断面に関する円板特徴色の総量は、左右画像とも P_{22} の分だけであり等しい。ただし、注目範囲が P_{11} を含む大きさであれば、 Z_{11} 断面でも Z_{22} 断面と同じ量になり、これだけでは左右画像の対応の適否を判別することはできない。

ところで、人間の視覚系では、図 3.1 (a) のように左右眼各網膜の同一側で半分ずつに分かれた視神経が視交叉によって同じ経路を辿り、後頭部の第 1 次視覚野で整然と配列されてハイパーコラムを形成する。その部分には二つの眼で見た物体を一つに融合して認識するための機能があると解釈されている。本節では、その構造に類似させて図 4.3 のように、左右各カメラからの視線が交差する点を中心に左右の領域に分け、同じ側 (同側視野と呼称、例えば左視線左側と右視線左側) に含まれる特徴色量の比較を考える。なお、同図の共通領域については本節後半で述べる。

いま、左視線 l_2 で P_{22} を注目する場合で、視差距離 Z_s

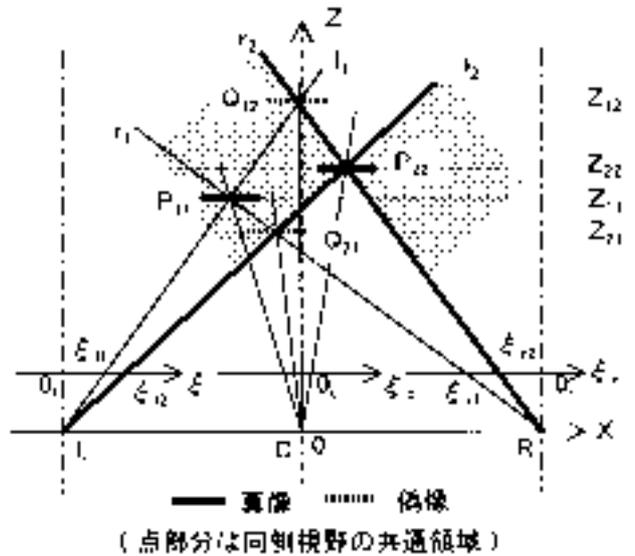


図 4.3 左右視線による同側視野
Fig. 4.3 The same half-side of the visual area, which is divided by left and right eye-lines.

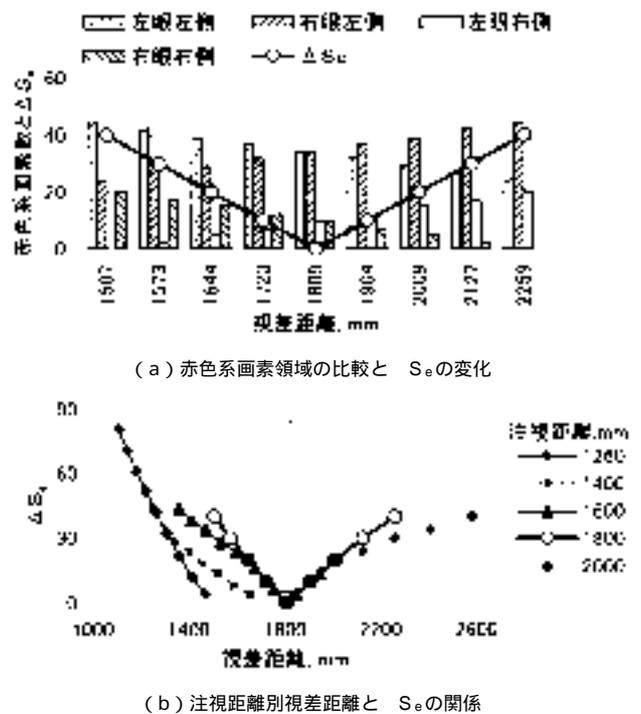


図 4.4 同側視野の赤色系画素領域の比較例
Fig. 4.4 An example of comparison in red pixel area conducted at the same half-side of the visual area: (a) comparison of red pixel area and change of S_e , (b) relationships between distances by disparity and S_e .

が P_{22} の距離 Z_{22} に等しいとき、同図のように右視線 r_2 が P_{22} を通るので、 P_{11} を含めて左同側視野の特徴色量は、左画像と右画像がともに円板 1.5 個分、右の同側視野ではそれぞれ 0.5 個分となり、左右両画像のそれぞれの同側視野分が一致する。それに対し、 Z_s が P_{22} より前

方の Z_{11} にあるときは、 r_2 が l_2 と Z_{11} の交点を通るので、左同側視野について左画像が 1.5 個分と右画像が 1 個分、右同側視野についてそれぞれ 0.5 個分と 1 個分となり、両方の同側視野分がともに一致しない。

上述の内容を円板実験で検証した結果は、次の通りであった。図 4.4 (a) は、赤色円板(紙製、直径と距離は左円板が 60mm と 1,627mm、右円板が 70mm と 1,838mm) を図 4.3 と同様に配置し、左右各画像の x 軸上の赤色系画素数が左右の同側視野でどのような状態かを Z_g を変化させて調べた例である。撮影は試作ステレオ視システムで行い、右円板 P_{22} (画像径 24 画素) の中心を注目点とし、走査範囲を 160 × 120 画素とした。その結果、左右各画像の赤色系画素数は縦棒で示すようになり、左右それぞれの同側視野で両画像分の差は P_{22} の Z_g で最小となった。その前後の Z_g では増加する傾向となっており、前述の予想と一致した。

ここで、左右それぞれの同側視野に関する赤色系画素数の差 (S_l , S_r) を絶対値で表し、 Z_g ごとの合計を S_g で表す。すなわち、

$$S_g = |S_l| + |S_r| \quad (4.5)$$

S_g の値は、左右同側視野の一方または両方における特徴色量の増減で変化するため、同図の折れ線のように P_{22} の Z_g を中心に凹型に変化した。

図 4.4 (b) は、上記と同じ注目点について、 Z_g をパラメータとし、その前後における Z_g と S_g の関係を調べた結果である。各 Z_g の視差刻みを 5 画素、視差距離断面数を 9 個とした。 S_g は、 Z_g が P_{22} の手前側であれば減少傾向に、 P_{22} の位置では凹型に、後方側であれば増加傾向になった。すなわち、 S_g の増減傾向を調べれば、 Z_g と対象物との前後関係が把握でき、左右両画像の視差距離断面の対応を取ることが可能であった。

なお、特徴色量の比較と S_g によって視差距離断面の対応の判別が可能なのは、一対の物体が互いに同側視野の共通領域にあり、その領域の特徴色量が左右画像で同じ場合である。同順並びがそれに該当し、逆転並びには適用できない。また、同順並びでも重なりや隠れがあるときには、特徴色量が左右両画像で等しくないのが有効とは限らない。

2) 同側視野の合成とその性質 上述の方法によって左右両画像の対応する視差距離断面が判明すれば、前章の手法でも探索距離範囲を狭くすることにより、偽像の抑制は可能である。しかし、その許容範囲は明確でない。そこで、左右眼の同側視野の共通領域で合成を行うことを考え、それを同側視野合成と呼ぶことにする。それに対し、前章の合成方式を単純合成と呼称する。

具体例を図 4.3 で説明すると次のようになる。 P_{22} の中心を注目点として同側視野合成を行う場合、 P_{22} ではその像の左半分が左同側視野内で、右半分が右同側視野内でそれぞれ合成される。 P_{11} では像の全体が左同側視野内で合成される。一方、同側視野共通領域の境界上に

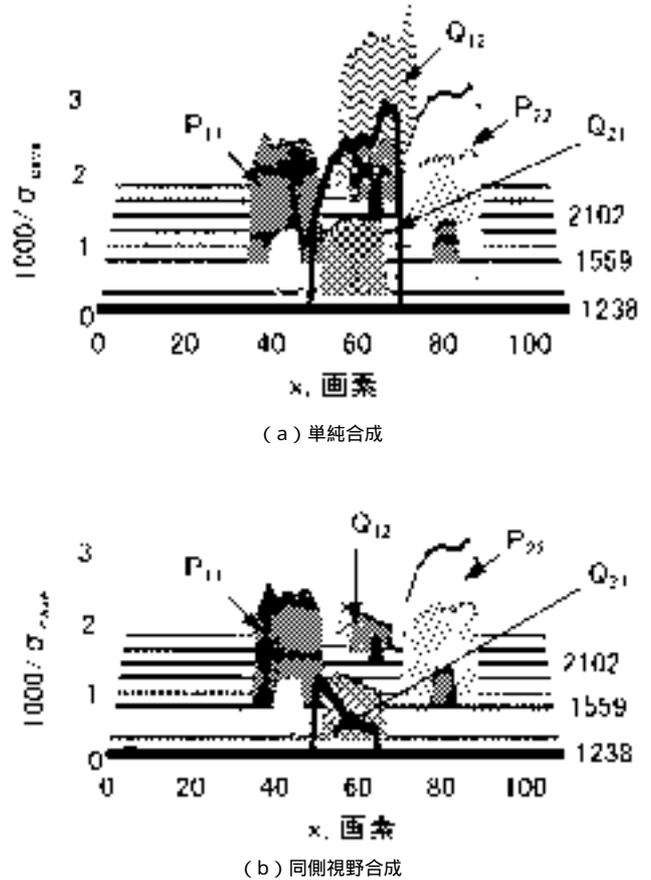


図 4.5 合成像領域における RGB 濃度の平均分散逆数値の分布例

Fig. 4.5 An example of distribution of inverse values on cave of RGB degrees in a composite image area: (a) a simple composition, (b) a composition at the same half-side of a visual area.

ある偽像 Q_{21} では、その左半分が右画像における P_{11} 像の左同側視野分と左画像における P_{22} 像の左同側視野分で合成されるが、右半分は同側視野共通領域の外なので右画像における P_{11} 像の右同側視野分だけとなり、類似像との合成は起こらない。偽像 Q_{12} も同様である。それらの非合成部分では色調が異なり横縞状態になるので鮮明さは大幅に低下する。

ここで、円板全幅分を計算範囲として、各合成像の RGB 濃度平均分散 σ_{cave} を比較すると、偽像の非合成部分が極大となるため、偽像全体としては真像よりかなり大きな値となる。

図 4.5 は、図 4.4 の円板実験画像について Z_g を両円板の中間付近とした場合の単純合成と同側視野合成の比較例である。縦軸には σ_{cave} の逆数を 1,000 倍した値を、奥行き方向には Z_g をとって三次元で示した。単純合成では、同図 (a) のように偽像の σ_{cave} が真像と同様になるため、ピークもほぼ同じ高さになった。しかし、同側視野合成では、偽像の σ_{cave} は真像よりかなり大きくなるため、偽像のピークは同図 (b) のように抑制されており、上述の内容が確認された。

ここで、もし注目点を P_{22} 上で横方向に移動させれば、同側視野の共通領域に対する偽像の位置が変わるため、偽像のピークが変化する。また、 Z_0 が偽像の発生位置付近に設定された場合には、注目対象物が同側視野共通領域の境界部分となるため、合成画面には真像が現れない。すなわち、同側視野合成の偽像抑制に対する効果は、注目点及び Z_0 の設定状態に影響される。

(3) 偽像の抑制対策

1) 抑制対策の考え方 偽像発生が距離測定に影響を及ぼす主な状況には、注目した対象物の合成像が偽像の場合と、周囲の偽像によって真像の視差距離が変化する可能性がある。現行のTVカメラの撮影方式による限り、前項の手法でもそうした偽像の発生を全て抑制することは困難である。しかし、注目対象物とその周囲に限定して、それらの三次元情報が偽像によって影響されないことを基本方針とすれば、前項の手法は、現行のTVカメラ画像に対しても利用できる。

なお、偽像抑制対策に関連して、探索距離範囲に偽像発生位置が含まれないようにするためには、 $(n-1)$ 値と視差 s の間に次の条件が成立しなければならない。

a) 合成像の場合：偽像までの視差区間の半分を許容限界として、

$$\left. \begin{aligned} \cdot (n-1) < s_{21} - \max(s_{11}, s_{22}), \\ \cdot (n-1) < \min(s_{11}, s_{22}) - s_{12} \end{aligned} \right\} 4.6)$$

より、

$$\cdot (n-1) < (x_{c22} - x_{c11}) - |s_{11} - s_{22}| / 2 \quad (4.7)$$

b) 原画像の場合：

左画像： $\cdot (n-1)$

$$< (x_{l2} - x_{l1}) - \{(s_{22} - s_{11}) + |s_{11} - s_{22}|\} / 2$$

右画像： $\cdot (n-1)$

$$< (x_{r2} - x_{r1}) + \{(s_{22} - s_{11}) - |s_{11} - s_{22}|\} / 2 \quad (4.8)$$

ただし、注視距離が実距離から大きく離れる場合は、上記条件でも偽像が発生する場合があるので、同側視野に関する色特徴量条件が満足されるかどうかを調べる必要がある。

同側視野の色特徴量条件が満たされるとき、同側視野合成で得られる合成の中央像は真像とみなすことができる。その場合に色特徴分布及び距離分布に関する画素情報は適切なものになる。すなわち、三次元のカラー画像と距離画像が合成によって復元されることになる。

2) 画像処理手順の例 前章で述べた処理手順と合わせて、対応問題画像も含めた本研究の画像処理手順は図4.6に示すようになる。まず、ステレオ視システムを調節して画像入力を行い、前処理後実領域を特定する。次に左画像で注目点と走査範囲を決め、注視距離・視差刻みを与えて探索範囲を指定し、同範囲内の視差距離と S_0 の関係を調べる。さらに S_0 が最小のときの視差距離で同側視野合成を行って視差距離断面

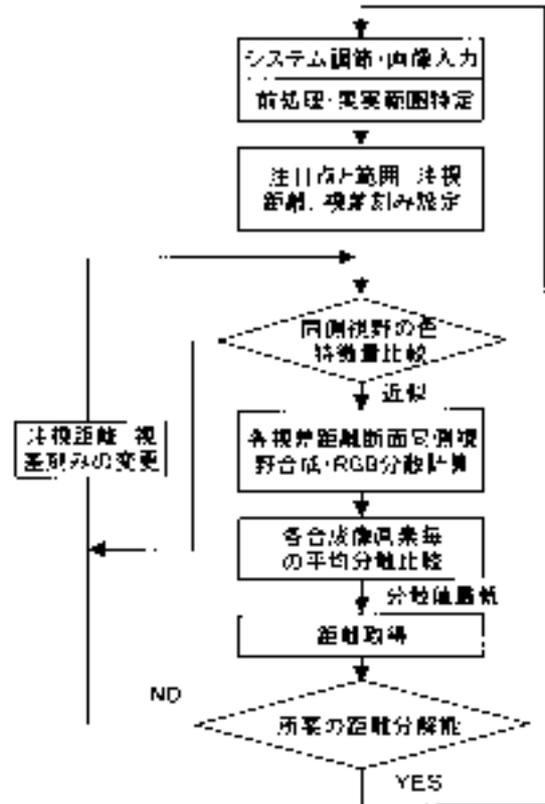


図4.6 偽像の抑制を考慮した処理手順

Fig. 4.6 Procedure of image processing for considering restraints of false images.

内の $cave$ を算出したのち、各断面の画素ごとに $cave$ を比較し、各画素の視差距離を決定する。

3. 対応問題画像の処理例

(1) 左右画像における同順並び

同順並びの個数が多い例として、4個の並びに対し前節の手法を適用した結果を以下に示す。図4.7(a)は、左右画像への投影像がほぼ同じ形状になるように選定した4個の赤色円板（紙製、直径70～80mm、厚さ2mm）の原画像（円板像径30～39画素）である。ステレオ視システムは2章と同じものである。カメラ前端から各円板までの距離は、左側から順に1,465mm、1,587mm、1,436mm、及び1,550mmであり、背景は青色紙とした。

1) 偽像の発生位置 偽像の発生位置は、図4.7(b)の模式図のように左右両視線の交点上となり、最大個数は12(=4×3)個である。左視線上で見たとき各円板の前方と後方に位置する偽像個数は、 P_1 ではそれぞれ0個、3個、 P_2 では1個、2個、 P_3 では2個、1個、 P_4 では3個、0個となり、 P_3 の手前側に集中した。

ここで、左右両視線が交差する注目点を P_3 の中心に取ると、同側視野の共通領域は、太実線で示される視線の左右両側となり、同図(b)の点領域で表される。そのとき、偽像のうち P_3 の手前側の2個が共通領域外、3個が境界線上となった。結局、同側視野合成では、偽

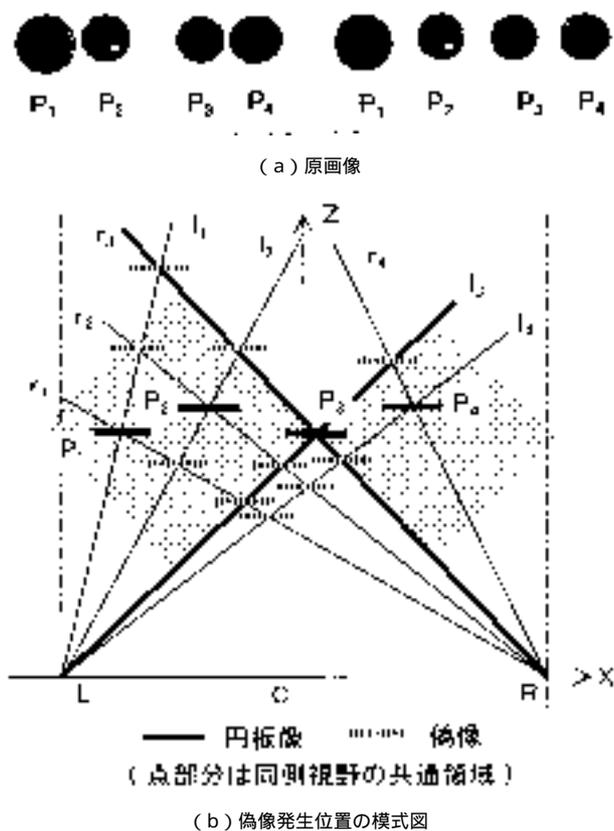


図4.7 同順並び画像の例

Fig. 4.7 Symmetric images in the same order at the left and right images: (a) a pair of original images, (b) a schematic figure on causative positions of false images.

像全数 12 個のうち P_1 の後方 1 個と P_2 の前方 1 個を除く 10 個が共通領域外か境界線上に位置することになるので非合成状態となり、それらの発生が抑制されると予想される。

また、注目点が P_1 の場合、同側視野の共通領域内に存在する偽像個数は 6 個、 P_2 では 2 個、 P_4 では 6 個となり、同側視野合成の抑制効果は、4 個の円板のうち外側の 2 個では内側の 2 個より少ないが、偽像の多くは注目対象から離れた位置にあった。

2) 注視距離と S_e の関係 注目点を左画像の P_2 ($Z_0 = 1,587\text{mm}$) の中心に取り、走査範囲を 160×120 画素、視差刻みを 5 ~ 8 画素、視差距離断面数 N を 9 個、 Z_g を 1,200 mm, 1,600 mm, 及び 2,000 mm に設定して、同側視野合成を行った結果例を図 4.8 に示す。同図 (a) は、各 Z_g における合成状態である。計算結果では、合成が Z_g の前方から後方進むに従い、左画像は左から右へ、右画像は右から左へと移動し、 Z_g に最短の Z_s で左画像の注目点が合成像の中央に来る。したがって右画像の P_2 像は、 Z_g が Z_0 に近ければ、同図

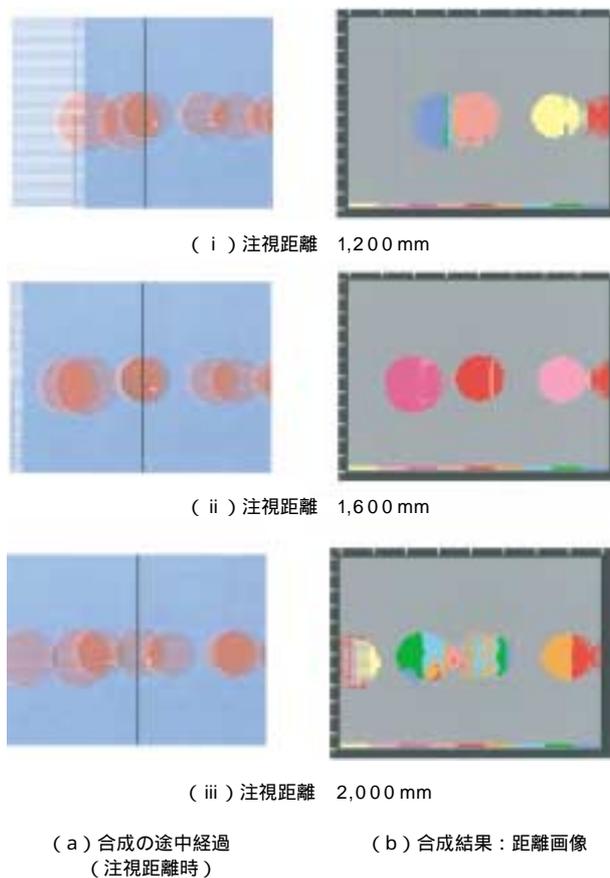
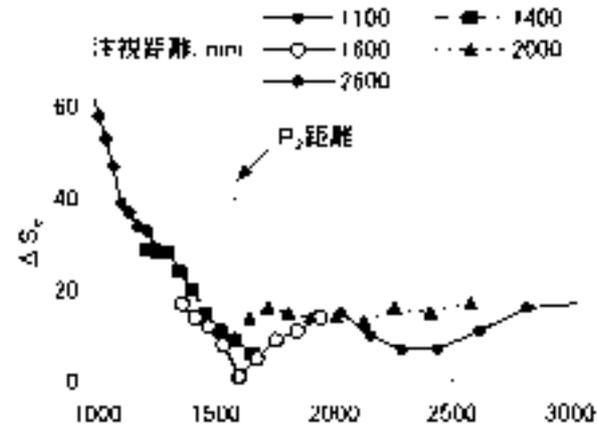


図 4.8 同側視野合成による距離画像例

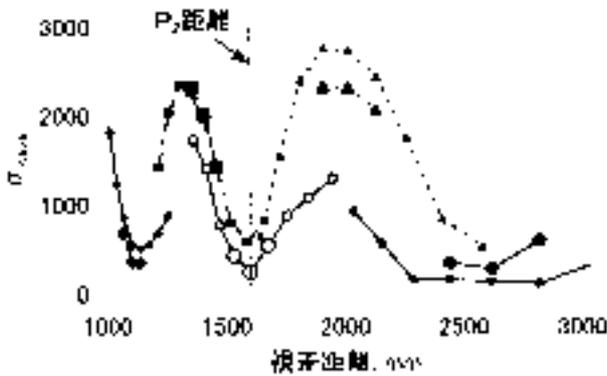
Fig. 4.8 An example of the results of image processing of the pair used in Fig. 4.7: (a) relationships between distances by disparity and S_e , (b) an example of composite images on depth.

(捨) のように合成像の中央で左画像の P_2 像と重なり、手前側であれば中央より右側、後方であれば左側に位置する。なお、同側視野合成では Z_g から前後に離れるに従い、合成画像中央に非合成部分が現われ、その幅が次第に増加する。同図 (b) は、合成像内の画素ごとに $_{cave}$ 最小の基準で決定した距離画像である。図中の色区分は各画像の下辺の色段階に対応している。左側ほど手前側の Z_s を表し、中央の赤色区が Z_g に対応する。同図より、 Z_g が 1,600 mm のとき P_2 とその両側の円板の色区分は、実際値に近い距離で表示された。しかし、他の Z_g では偽像が発生したため、実際とは異なるの色区分で表された。

P_2 に関する Z_s と S_e 及び $_{cave}$ の関係は図 4.9 のようであった。 Z_g の範囲は 1,100 mm ~ 2,600 mm に拡張してある。 S_e は、同図のように Z_0 付近を探索範囲とした場合 (印) に V 字型になり、それ以外ではおおむね増加または減少の傾向となって現われた。ただし、 Z_g が 2,600 mm では P_2 が他の円板とほぼ重なるため減少している。一方、 $_{cave}$ は Z_0 付近で極小になったが、それ以外の Z_s でも偽像発生のため極小値が発生した。



(a) 視差距離と S_e の関係



(b) 視差距離と $cave$ の関係 (図中マーク大は同側視野合成, マーク小は単純合成の結果)

図 4.9 視差距離に対する S_e と $cave$ の関係

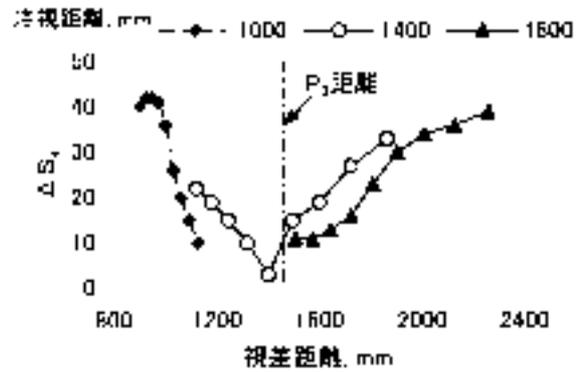
Fig. 4.9 Relationship of S_e and $cave$ to distance by disparity: (a) relationship of S_e to distance by disparity, (b) relationship of $cave$ to distance by disparity.

次に、 P_3 ($Z_0 = 1,436$ mm) について上述と同様の処理を行った結果を図 4.10 に示す。 Z_s に対する S_e の変化は、同図 (a) のように、 Z_g が P_3 のかなり前の 1,000 mm では減少、1,400 mm では V 字型、1,800 mm では増加の傾向になり、 S_e 最小時の距離が P_3 に近似した。 Z_s と $cave$ の関係は、同図 (b) のように、 Z_0 付近のほか 1,050 mm と 2,100 mm 付近で極小になった。

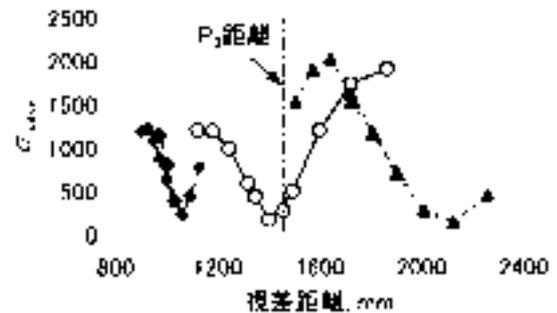
以上のように、同順並び画像の場合、 $cave$ 最小基準だけでは判断を誤り偽像の距離を採用する懸念があるが、 S_e の増減傾向も合わせて調べることにより適切な判定が可能になる。ただし、 S_e の値は、類似の色特徴像の配列や背景の状態及び注目範囲の選定状況によっても影響を受けるので注意が必要である。

3) 同側視野合成と単純合成の結果 Z_0 付近での P_3 の合成像は、同図 (c) に示すようになり、単純合成では P_3 の右側と P_2 の左側に黄色区分 (最短距離区) の偽像が発生したが、同側視野合成ではそうした影響は見られず、前述の模式図で予想した結果の通りであった。

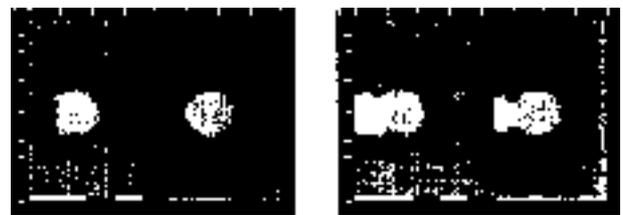
他の円板を注目対象にした場合もほぼ同様の結果であり、距離の測定誤差はいずれも $\pm 2\%$ 以内であった。



(a) 視差距離と S_e の関係



(b) 視差距離と $cave$ の関係



同側視野合成

単純合成

(c) 距離画像 (視差距離 1,400 mm)

図 4.10 視差距離と S_e 及び $cave$ の関係並びに距離画像 (円板 P_3 を対象)

Fig. 4.10 Relationship of S_e and $cave$ to distance by disparity, and a depth image on an image of the circle plate of P_3 : (a) relationship of S_e to distance by disparity, (b) relationship of $cave$ to distance by disparity, (c) depth images of a simple composition and a composition at the same half-side of a visual area.

(3) 重なりと隠れ

同順並び画像の中でも、果実の重なりや隠れがある場合には、一般に同側視野の特徴色量が左右画像で異なるので、 S_e や同側視野合成が有効かどうかは一概に言えない。

一例として、図 4.11 (a) のように、カメラからの距離が異なる 3 個の赤色円板 (直径 60 ~ 80 mm) がほぼ同一のエピポーラ平面上に並び、左画像では円板 P_3 の一部が、右画像では円板 P_2 の一部がそれぞれ手前の緑色葉状物 S の陰になっている場合について検討する。 Z_0 は、 P_1 、 P_2 、及び P_3 がそれぞれ 1,628 mm、2,390 mm、及び 1,936 mm、 S が 1,630 mm であった。各円板と葉状

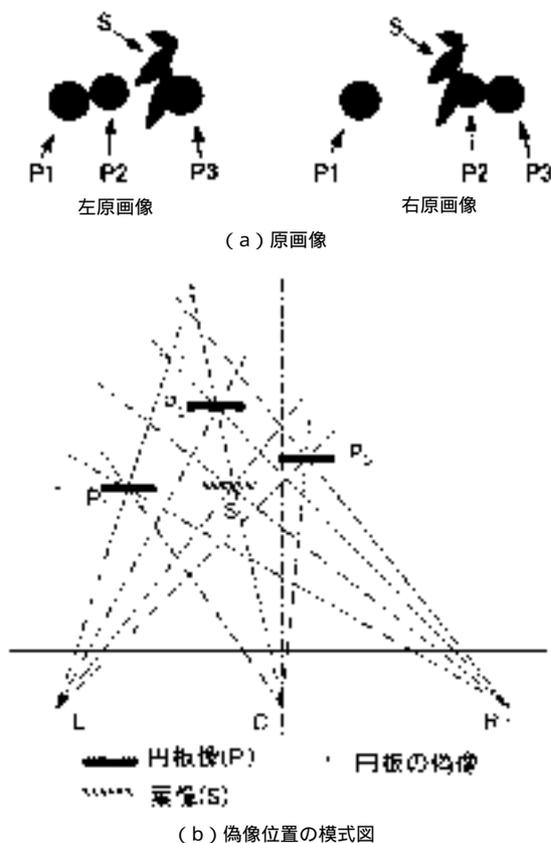


図 4.11 隠れ画像の処理例

Fig. 4.11 An example of the image processing for a pair of images under the condition of occlusion: (a) a pair of original images, (b) a schematic figure on causative positions of false images.

物の配置は、平面図で見ると同図 (b) の通りであり、偽像は左右両視線の交点に合計 6 個発生する。

中央の円板 P_2 に関する Z_s と S_e の関係を図 4.12 (a) に示す。 Z_g は Z_0 付近の 2,400mm を挟んで、2,000mm, 2,800mm の 3 種とした。 S_e の増減傾向は、同図のように、 P_2 の Z_0 付近で V 字型に変化して最小になり、それより前方では減少、後方では増加となった。なお、 S_e の最小値は、葉状物 S の影響で片方の同側視野の赤色領域が削減されるため、零にはなっていない。

P_2 に関する Z_s と $cave$ の関係は、同図 (b) のようになり、 Z_g が Z_0 付近と 2,800mm 付近のとき $cave$ が極小であった。 $Z_g = 2,800mm$ の合成像は、同図 (c) のように左画像の P_1 と P_2 の像に右画像の P_2 と P_3 の像がそれぞれ重り合って生じた偽像のため、 $cave$ が小さくなったものである。この結果のみではそれが偽像かどうかの判断は困難であるが、 S_e は Z_s に対して増加傾向にあることから、偽像の判定が可能である。他の 2 枚の円板に関する S_e も、図 4.13 (a) のようにそれぞれの Z_0 付近で最小になった。

各円板の同側視野合成の結果は、 P_2 について図 4.12 (c) に、 P_1 と P_3 について図 4.13 (b) にそれぞれ示

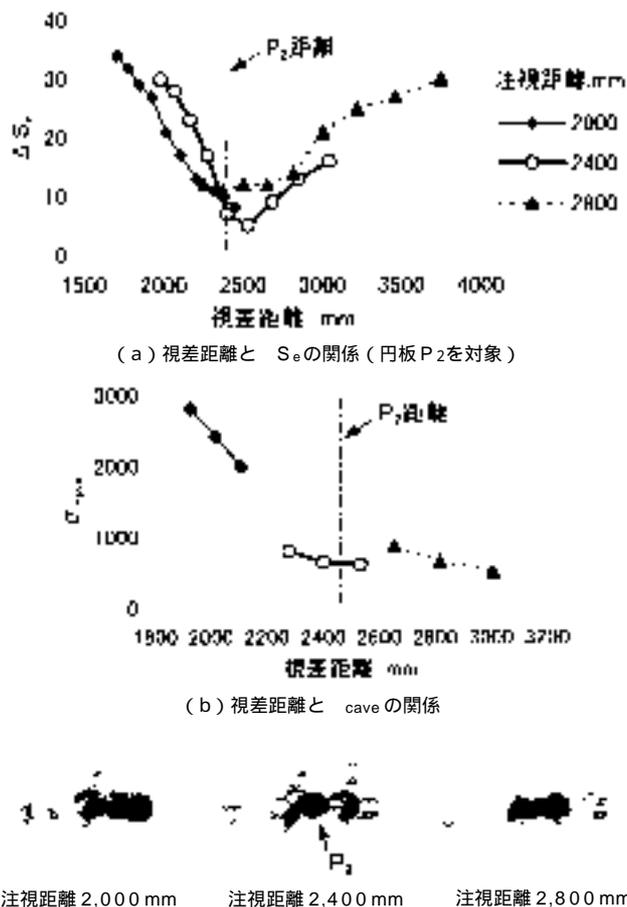


図 4.12 隠れ画像の処理結果例 (円板 P_2 を対象)

Fig. 4.12 An example of processing results on occluded pairs of images in objecting a circle plate of P_2 : (a) relationship of S_e to distance by disparity, (b) relationship of $cave$ to distance by disparity, (c) Three examples of composite color images at the same half-side of the visual area.

したように、それぞれの Z_0 付近で鮮明な像が得られた。また、葉状物 S についても図 4.13 (b) のようにその Z_0 付近で鮮明になった。各円板の距離誤差は 3% 以下であった。

以上のように、果実の重なりや隠れがあるステレオ視画像でも、隠れ状態があまり大きくない場合には上述のように有効であることが分かった。なお、重なりや隠れの程度と S_e の有効性との関係はさらに検討する必要がある。

(3) 左右画像における逆転並び

前節で触れたように、逆転並びの画像では同側視野に関する特徴色量の比較は有効ではないので、 S_e を利用した対応づけはできない。その対策として、例えば左右各カメラの合焦が注視距離の前後の狭い距離範囲だけでなされるように調節できれば、片方の果実に焦点を合わせたとき、他方の果実は焦点範囲外となるので、偽像の発生が抑制されると予想される。もっとも、実際のリ

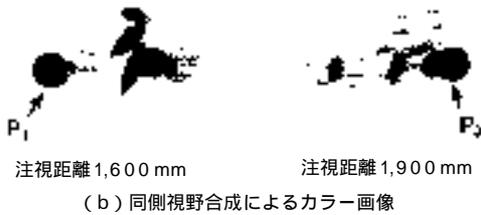
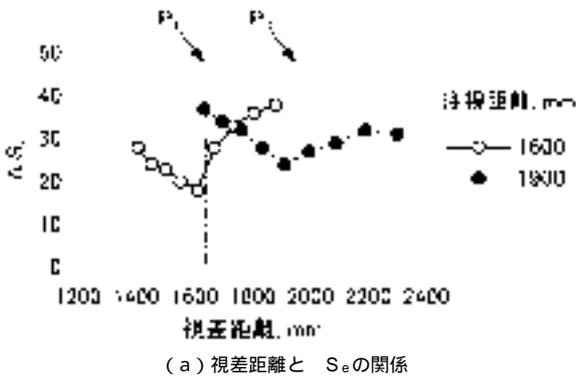


図 4.13 隠れ画像の処理結果例 (円板 P_1 と P_3 を対象)

Fig. 4.13 Examples of processing results on occluded pairs of images in objecting a circle plate of P_1 and P_3 : (a) relationship of S_e to distance by disparity, (b) Two examples of composite color images at the same half-side of the visual area.

ンゴ園では逆転並びが主になる果実画像はまれであり、またそのような場合でも、一対の果実像のうち後方の果実像の寸法が一般に前方の果実像より小さくなるので、距離計測上の実質的な影響はそれほど大きくない。

4. リンゴ園果実画像への適用

(1) 実験方法

リンゴ園果実画像に対する本章の手法の適用性を検討するため、弘前市内にある普通栽培リンゴ園の赤色系品種ふじを実験対象にした。1998年10月24日から10月30日まで、収穫期の果実が樹冠内に密集している状態を選んで、前章のステレオ視システムで撮影し、パソコンのハードディスクに保存した後、研究室に持ち帰って画像処理を行った。

撮影距離は約1.2~4.2mの範囲にとり、カメラ焦点距離は主に8.6~13.7mmを使用し、合焦、絞り、ホワイトバランス等は自動調節によった。画像処理は第3章の手順に従い、走査範囲を180×120画素、視差刻みを5~3画素、視差距離断面数を9個、RGB濃度分散の計算範囲を上下4画素、平均分散 c_{cave} の比較計算範囲を21~41画素として行った。

(2) 適用結果と考察

1) 処理結果例 晴天の順光下で撮影した画像の中から果実の並びや重なり・隠れの見られるもの14組を選び、それらの画像内から同順並び部分16組(同一水平上に2~4個)、果実の重なり部分12組(重なり度合い10~80%)を処理対象にした。



図 4.14 リンゴ果実の重なり画像例

Fig. 4.14 A pair of overlapping original images of the 'Fuji' variety of apples.

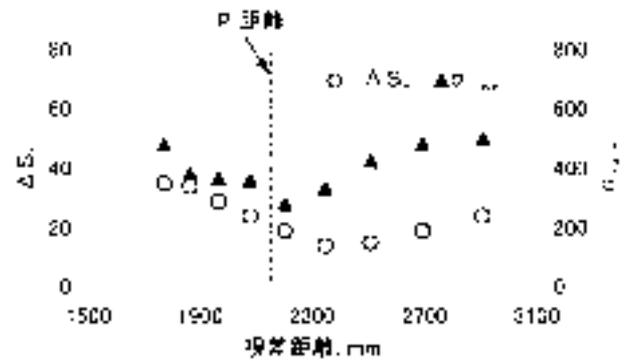


図 4.15 視差距離に対する S_e と c_{cave} の関係

Fig. 4.15 Relationships among distances by disparity, S_e , and c_{cave} .

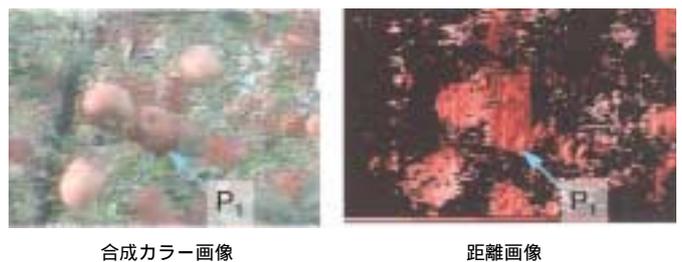


図 4.16 同側視野合成の処理結果例

Fig. 4.16 An example of composite image processing at the same half-side of the visual area.

それらの中から、重なり画像の処理結果例を図4.14~4.16に示す。図4.14で、左右各画像中央付近の果実は、左上手前から右下後方へ重なり状態(約50%)にあり、高さ位置がやや異なる。その中の果実 P_1 (直径87mm、距離2,136mm)を注目対象にして測定処理を行った。

同果実に関する視差距離と S_e 及び c_{cave} の関係は図4.15のようになり、 S_e が実際の距離及び c_{cave} が最小時の距離より1視差刻み分後方の距離で最小になった。これは対象果実の背景にある果実群の色調による影響のためである。画像状態にもよるが、 c_{cave} 最小時の距離との差が2視差刻み分以内であれば、 S_e の結果を利用

した注視距離と探索範囲の設定により、 p_1 付近の偽像を抑制して距離を推定することが可能であった。

図 4.14 の両画像に対して同側視野合成（視差刻み 3 画素）を行った結果を図 4.16 に示す。合成カラー画像では、探索範囲内にある p_1 とその周囲がほぼ鮮明な像で表された。距離画像では、 p_1 及びその周囲の果実が概ね実距離に近い値で表示された。なお、果実の表面が縞状になって輪郭が不明確であるが、これは果実像と周辺との RGB 濃度差が類似し、誤対応が生じたことによる。

実験に供試した前述の処理対象画像全てについて、 s_{cave} が最小になる距離と s_0 が最小になる距離を比較した結果、同順並び画像では、両距離の一致が 40 %、 ± 1 視差刻み分の差が 25 %、 ± 2 視差刻み分が 25 %、 ± 3 視差刻み分以上が 10 %となり、 ± 2 視差刻み以下の割合は 90 %であった。重なり画像では、それぞれ 0 %、50 %、30 %、20 %で、 ± 2 視差刻み以下の割合は 80 %となったものの、一致は見られなかった。

上記の差が生じた理由としては、いずれの画像も背景の果実による影響で誤対応の発生が挙げられる。比較的大きな他の果実像領域が注目果実像付近にあるか、走査範囲の境界付近にあるような場合に、その影響を受けやすかった。また、注目果実と同一水平上にある他の果実が、片方の画像で枝葉によって隠された場合もあった。なお、撮影距離の影響は、注目果実像の幅が 20 画素以上であれば、ほとんど見られなかった。

同側視野合成の結果は、合成カラー画像、距離画像とも概ね図 4.16 と同様の傾向であり、注目した果実の距離測定精度は約 5 %であった。重なり画像では、重なり度合いが約 50 %以下のとき、果実同士を分離できる場合が多かった。

2) 本手法の適用性に関する考察 リンゴ園果実画像が同順並びの場合には、 s_0 を利用して視差距離断面のおよその対応づけが可能であった。重なりや隠れ画像の場合にも一応利用できるが、 s_0 の最小値が背景や周囲の果実像の影響を受けやすいので、諸要因との関係をさらに検討する必要がある。

同側視野合成は、左右画像の視差距離断面についておよその対応を取ることができれば、リンゴ園果実画像の偽像抑制にも有効なことが分かった。ただし、図 4.16 の距離画像で最白色部分に見られるように、同側視野合成であっても偽像の発生を抑制できない場合がある。

本手法によるリンゴ園での距離精度は、前述のように約 5 %であったが、この値の評価は当然作業の種類・内容によって異なる。例えば、1.5m の距離にある果実を収穫する場合にはやや過大であるが、3m 離れた果実を視認し収穫範囲にあるかどうかを判断するための精度としては十分である。

したがって実際の利用に当たっては、さらに果実の識別条件、環境条件、順光や逆光を含めた撮影条件及び画

像処理条件と距離測定性能との関係を調べ、作業内容に対応した精度を確保できるように対策を講じる必要がある。それらについては次章以降で述べる。

なお、現行 TV 方式による撮影の際には、本研究の測定原理の効果を得るためには、注視距離に対応したフォーカスを設定し、探索距離範囲だけを鮮明な画像として入力するなどの方法が考えられる。それでもなお、逆転又は偽像の可能性がある場合には、ステレオ視システムの操作者の指示・管理が必要になる。

5. 要約

両眼ステレオ視に関する本研究の測定原理を対応問題画像に適用するため、左右両カメラの同側視野に関する特徴色の比較と、同側視野合成による偽像抑制の画像処理手法を検討した。

その結果、同側視野の特徴色の増減傾向を調べることにより、注視距離と対象物との前後関係がおよそ把握でき、左右両画像に関する視差距離断面の対応づけが可能となることが分かった。同側視野合成の検討では、偽像の発生位置が同側視野共通領域の外側か境界部分になるため、その RGB 濃度の平均分散が真像よりかなり大きくなり、合成画像での偽像判別とその出現の抑制が可能と予想された。上記の手法を 4 個の円板の同順並び画像と葉状物による隠れ画像に適用したところ、視差距離断面の対応づけと合成像における偽像の抑制が可能であることを確認した。

リンゴ園で晴天の順光下で撮影した種々の画像の中から選んだ果実の同順並び画像 16 組と重なり画像 12 組に本手法を適用した結果、視差距離断面の対応づけは、同順並び画像で ± 2 視差刻み分以内が 90 %、重なり画像で 80 %となり、同側視野合成によって約 5 %の精度で距離の推定が可能であった。

第 5 章 試作ステレオ視システムにおける画像入力条件の影響

1. 緒言

本研究におけるステレオ視計測手法の特色は、対象物の合成カラー画像と距離画像を同時に取得できるところにあり、果実とその周囲物体に関する三次元情報の適切な収集が可能になると期待される。

しかし、屋外でテレビカメラを使用する場合には、自然光の照射条件やカメラの撮影条件などによって果実や枝葉等の色調・明度が影響を受けることが指摘されている(22, 40, 65, 75, 92)。本計測システムを備えた果実収穫機による作業が、作業者の監視・補助を受けながら日中に行われることを前提にすると、上述の諸条件が本手法の距離精度にどのような影響を及ぼすかを明らかにしておく必要がある。

本章では、本研究の手法における計測誤差の発生要因を検討し、収穫期のリンゴ園で種々の画像入力条件のモ

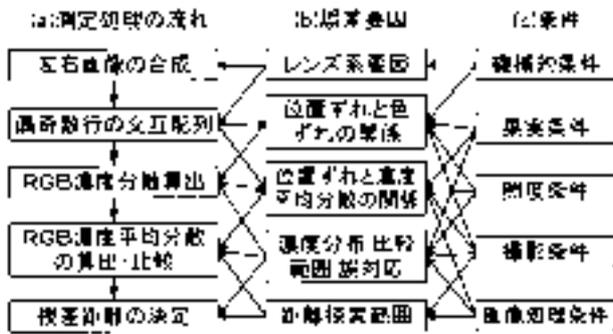


図 5.1 本手法における距離測定の誤差要因

Fig. 5.1 Error factors of distance measurement in this method.

とで試作システムによる撮影を行い、照度、果実及び撮影の各条件因子と測定誤差の要因との関係、並びにそれらの距離精度への影響について調べた(86)。

2. 本手法による距離測定の誤差要因

(1) 諸条件と誤差要因の関係

本手法の測定処理は、図 5.1 (a) の流れに沿って行われる。測定誤差は、その流れの中で、左右画像の合成時、RGB 濃度分散による合成像の鮮明さ(水平間の色ずれ)の検出時、及び平均分散 σ_{cave} による左右画像の重なり状態(位置ずれ)の検出と比較・判定時にそれぞれ発生する可能性がある。その場合の主な要因としては同図(b)のような項目が挙げられ、各処理との関係は矢印で示ようになる。誤差要因に対する諸条件の影響は同図(c)の関係で表される。

上述のうち、の左右画像の合成時に関する誤差要因は、視差距離断面ごとの合成範囲が左右両画像の左右、上下、斜め方向で適切かどうかに関係し、カメラの配置状態、レンズ系の光軸方向、光学倍率、撮影と表示の範囲など機械的な因子によって影響される。合成画面上では左右両画像の水平(エピポーラ平面)による交互配列に影響が現れ、左右方向や上下方向の配列状態が不適切なものになる。これらの要因と影響については第 2 章のキャリブレーションの項で述べた。

の合成像における鮮明さの検出は、 σ_c の大きさを比較することによって行われるが、位置ずれと色ずれの関係、及び位置ずれと σ_{cave} の関係の各相関が低い場合にも誤差要因として影響する。対象画像領域の濃度分散の分布状態や σ_{cave} の比較計算範囲も影響を及ぼす要因となる。これらに關与する条件には、果実では果実色と RGB 濃度分布、果実同士の重なり、果実への枝葉の重なりなど、照度条件では色温度、直射光、樹冠内散乱光、陰影など、また撮影条件では順光・逆光における露出、ホワイトバランス、撮影距離、ズーム及び焦点距離などがある。

の左右画像の重なり状態の検出は、色ずれだけでなく、対象物の位置ずれを検出するものであり、と同様

位置ずれと色ずれ及び σ_{cave} との関係がそれぞれ相関が高くない場合に誤差の発生要因になり得る。同時に RGB 濃度分布や σ_{cave} 計算時の比較範囲によっても影響される。また前章で述べたように、距離探索範囲の設定が過大なとき、偽像の発生につながるため誤差要因として影響を及ぼす場合がある。これらに關与する条件には、果実条件、照度条件、撮影条件、及び画像処理条件がある。

(2) 距離測定値と σ_{cave} の収束性

本手法において、距離測定値が一義的に決定されるためには、合成像の位置ずれに伴う色ずれが σ_c で確実に検出されるとともに、位置ずれと σ_{cave} の間に強い比例関係があり、視差距離の変化に従い σ_{cave} が最小値へ急速に収束することが必要である。さらに、測定精度が確保されるためには、 σ_{cave} が最小になる視差距離が実距離付近になければならない。

そこで実験では、画像入力因子の距離精度への影響を、 σ_{cave} の収束性との関係で捉えるため、視差距離に対する σ_{cave} の変化傾向、最小値レベル、及び視差単位でみた実距離との関係を中心に検討した。

3. リンゴ園果実画像における RGB 濃度分散の特徴

(1) 実験方法

1) 供試対象とステレオ視システム 1997, 1998 の両年、収穫期の 10 月下旬から 11 月上旬にかけて、弘前市近郊の普通栽培リンゴ園(5 箇所、樹冠形状: 径約 8m × 高さ 4m)とわい化栽培リンゴ園(2 箇所、同 4m × 3m)における収穫前の赤色系品種ふじと黄緑色系品種王林を供試対象にした。ふじの外観性状は、大きさ(胴直径 × 高さ)が 86mm × 76mm(50 個平均)で、着色は薄ピンク系赤色から濃赤色まで見られたが、概ね熟したふじ本来の赤色系が多かった。王林では、大きさが 82mm × 76mm(30 個平均)で、着色は淡緑色から黄色味の強い黄緑色系まであり、周囲の葉色とは肉眼で容易に識別できるものがほとんどであった。なお、リンゴ葉は収穫期間中ほぼ濃緑色で経過し、11 月中旬以降枯れ始め褐色系が増加した。

ステレオ視システムは、第 2 章で試作したものであり、2 台のビデオカメラの光軸間隔を 300mm(各交差角 0.1°)、ビデオキャプチャ PC カードの解像度を 320 × 240 画素(RGB 濃度 24bit/画素)として供用した。距離校正には前章までと同様レーザ距離計の値を用いた。

2) 実験条件と方法 (射) 条件 照度条件は、快晴から曇りの天候で、午前 9 時頃から夕方 4 時 30 分頃までの間、果実面の照射状態を太陽光直射、散乱光(曇天、樹冠内及び陰影状態)に分けて種々選定した。果実条件は、果実の密集した範囲を多く選び、個々の果実のほか、果実相互や果実と枝葉との重なり状態によって選定した。撮影条件は、カメラの方向が太陽光に対して順光または逆光になる状況のもとで、撮影距離を約 1 ~ 4.5m、ズームを広角から望遠まで(焦点距離 5.9 ~

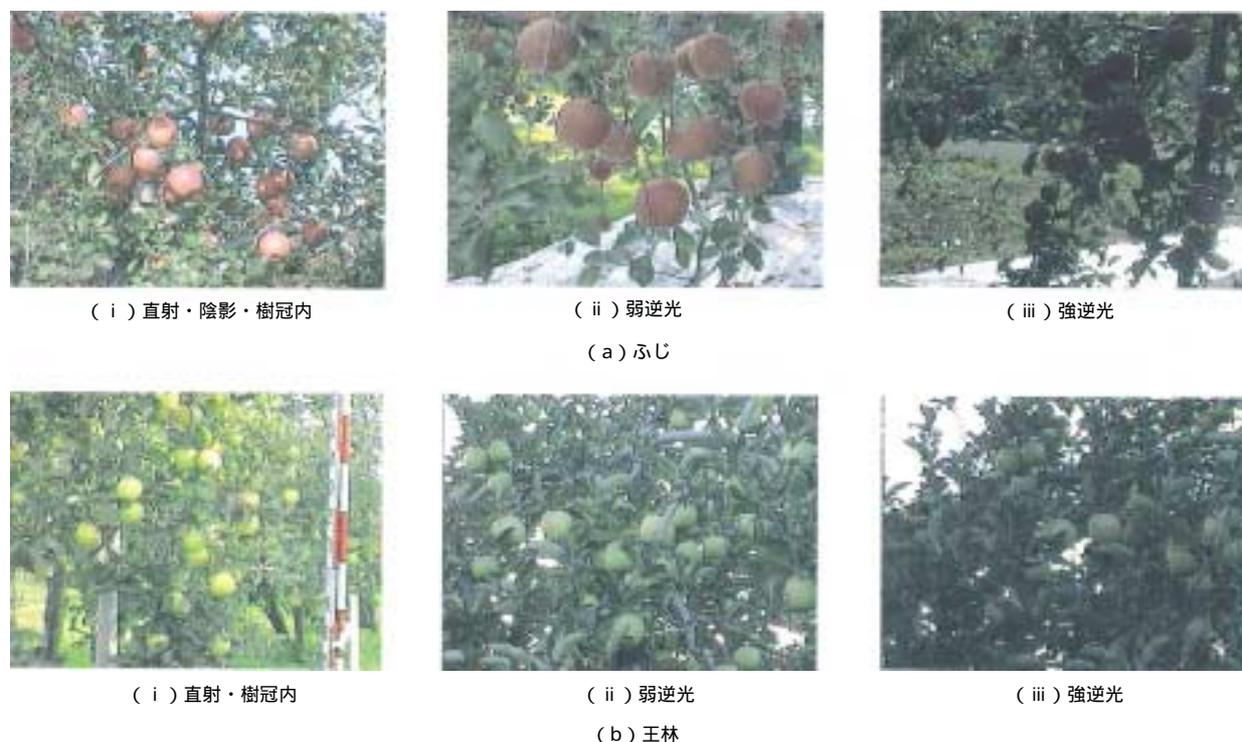


図 5.2 リンゴ園果実の画像例

Fig. 5.2 Examples of fruit images in an apple orchard.

47.2mm) の範囲で適宜設定し、露出、ホワイトバランス、合焦を自動調節として撮影した。

(捨) 撮影と画像処理の方法 供試システムの配置と方向付け及びズーム調節は、上述の画像入力条件を考慮して人手で行い、左右各カメラで順次撮影してパソコンのハードデスクに保存した。距離測定の画像処理は研究室に持ち帰って行った。

画像処理手順は、レーザ距離計の値をもとに、偽像の発生が抑制される探索範囲内で注視距離を設定することにし、3章の単純合成の要領に従った。処理条件は、レーザ距離計の測定値を注視距離に、その前後3~4視差刻み分の距離を探索範囲に、対象果実の周囲240×160画素を注目範囲にそれぞれ設定し、視差刻みを2画素、RGB濃度分散の計算画素数を上下4画素とした。平均分散の比較計算範囲は、果実像幅分の画素数に近似させるため、果実径 W_a を85mmと想定し(固定)、第2章の式(2.17)をもとにモニタ投影像幅 w_a [画素]を次式で算出した。

$$\begin{aligned} w_a &= d \cdot f \cdot W_a / (Z_g + Z_v) \\ &= d \cdot f \cdot W_a / (Z_g + a_0 + a_1 \cdot f) \end{aligned} \quad (5.1)$$

ここで、 d はスケール定数[画素/mm]、 f は焦点距離[mm]、 Z_g は注視距離[mm]、 Z_v はカメラ前端からレンズ中心までの距離[mm]、 a_0 、 a_1 は定数。なお、画像処理時間の削減を図るため、左右各画像に対する2値化、エッジ検出、領域分割等の前処理は実施しなかった。

収録・処理した左右の組画像総数は、ふじが144組、王林が42組で、計186組であった。

(2) 実験結果と考察

1) 合成画像におけるRGB濃度分散の性質 (射) 収穫期画像の果実と葉のRGB濃度 10月下旬のふじと王林の両果実及び葉の撮影画像例を図5.2に、両果実像及び葉像の明度とRGB濃度(分解能各8ビット)との関係例を図5.3(a)~(c)に示す。順光や弱逆光では明度が約90以上の場合が多く、RGB濃度は、両果実像、葉像とも明度に比例して変化し、果実像と葉像の間に較差がみられた。同じ明度で比較すると、ふじでは葉像及びRとG両濃度が異なり、B濃度が近似した。王林ではR、G濃度が葉像と近似し、B濃度が異なる傾向にあった。なお、果実と葉が隣接している状態では、一般に葉像より果実像の方が明度と彩度が高くなる場合が多く、同色系の王林像と葉像の間でもRGBの各濃度差が拡大した。一方、強逆光の場合のように明度が約70以下になると、王林はもとよりふじでも果実像と葉像のRGB濃度は近似し、それらの濃度差は僅少になった。

色相(HSI表色系(26)、赤色を 0° とし $-180 \sim 180^\circ$ で表示)は、図5.3(d)に示すように、ふじが $-30 \sim +35^\circ$ 、王林が $45 \sim 80^\circ$ 、葉が $60 \sim 130^\circ$ の範囲にあった。ただし、明度が70~90以下では両果実像、葉像とも変動が大きくなった。熟した王林果実は葉より黄色味が強い傾向にあったが、明度が約70以下に低下すると暗い色調のため肉眼でも両者の区別が困難であった。

(捨) c_c と c_{cave} の分布 ふじ果実画像の処理過程における c_c と c_{cave} の分布例を図5.4に示す。対象果実は太陽光が直射時のもので、撮影距離は2,586mmであった。

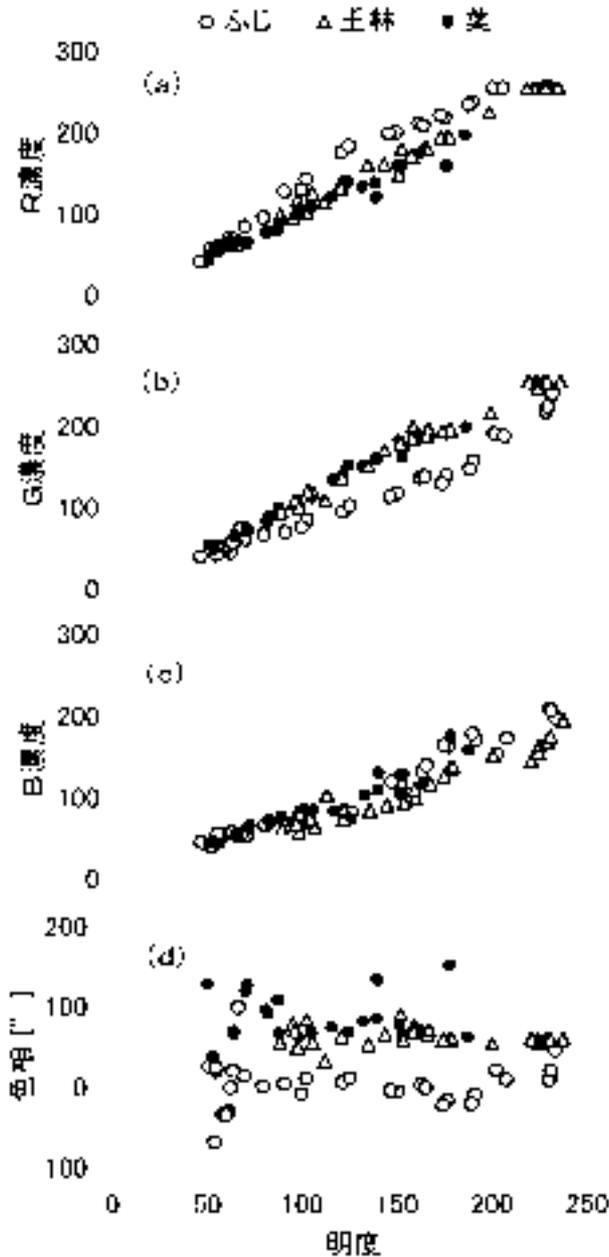


図5.3 リンゴ園における果実像と葉像のRGB濃度及び色相の比較例

Fig. 5.3 Comparison on values of RGB and Hue of fruit and leaf images in apple orchards: (a) R value, (b) G value, (c) B value, (d) Hue.

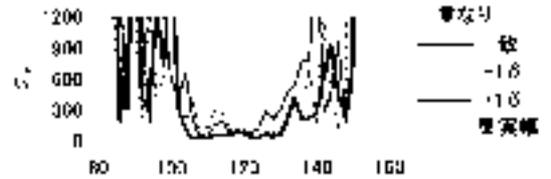
同図 (a) の最左側が左カメラによる原画像，右側 2 個が合成カラー画像と距離画像である。距離画像の果実像中央部分はハイライトの影響で緑色に表示されているが，距離値は正常である。

図 (b) の太実線は左右両果実像の重なりが一致した時の x 軸上の c 分布である。 c は，果実像内部では 100 以下の凹型となり，輪郭付近では内部と外部の色較差のため 300 ~ 500 に急増している。果実像の周囲では水平間の色ずれのため横縞模様が見られ，上下方向の画素に関する RGB の各濃度差が 30 ~ 60 のため， c は



左原画像 合成カラー画像 合成距離画像

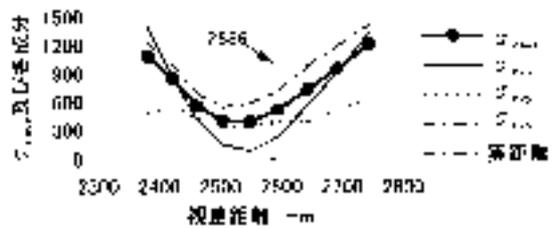
(a) 左原画像，合成カラー画像及び合成距離画像



(b) x 軸上の c 分布



(c) x 軸上の c_{ave} と各成分の分布



(d) 視差距離に対する c_{ave} と各成分の関係

図5.4 ふじ果実像の c と c_{ave} の例

Fig. 5.4 An example of c and c_{ave} on an image of a 'Fuji' apple: (a) an original left image, a composite color image, and a depth image, (b) distribution of c in the direction of x, (c) distribution of c_{ave} and the components in the direction of x, (d) relationships among distance by disparity, c_{ave} and the components.

300 ~ 1,500 程度変化し，変動が顕著である。次に，1 視差刻み分だけ前後の視差距離における分布を見ると，点線（前方側）と細実線（後方側）で示すように，両線とも果実像中央では太実線に近似しており距離の違いの影響があまり現れないが，合成像の輪郭付近では左右両画像の位置ずれによる水平間の色ずれが増加するため，左右側各輪郭とも急増している。

同図 (c) は，左右両画像の重なりが一致した時の c_{ave} とその成分について x 軸上の分布状況を見たものである。 c_{ave} の成分は，合成像の画素ごとに各方向とも果実像幅分で計算したものである。水平成分 c_{vx} は，果実像中央で最小の U 字状になり，輪郭の外側になると急増した。垂直成分 c_{vy} は，果実像中央では c_{vx} と同様であるが，輪郭付近では増加割合が c_{vx} より大きくなった。これは c_{vy} の計算範囲に占める輪郭外側の画素の増

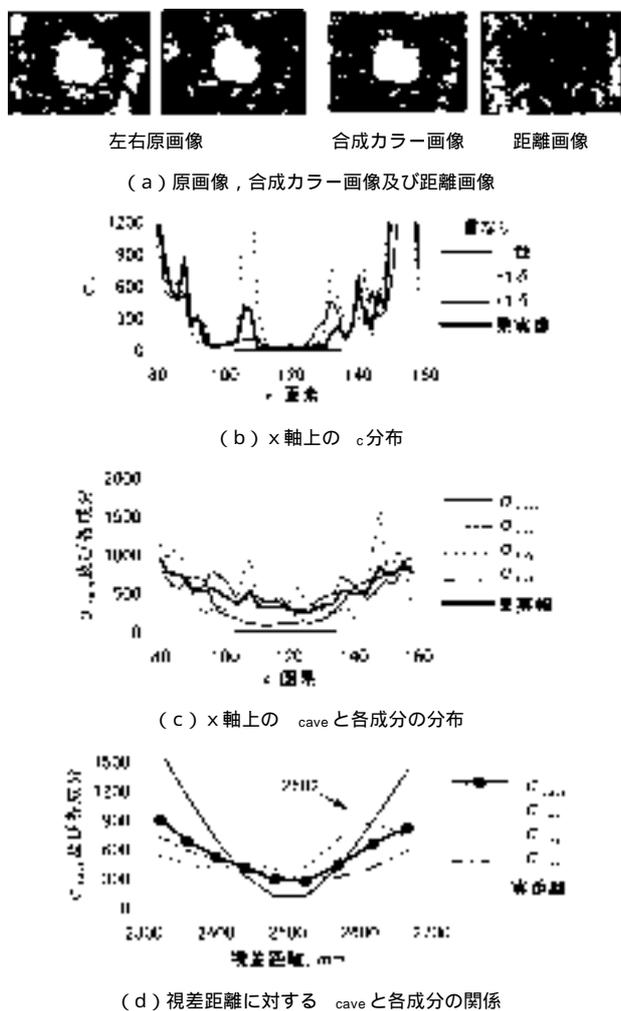


図 5.5 王林果実像の c と c_{cave} の例

Fig. 5.5 An example of c and c_{cave} on an image of an 'Orin' apple. (a) an original left image, a composite color image, and a depth image, (b) distribution of c in the direction of x , (c) distribution of c_{cave} and the components in the direction of x , (d) relationships among distance by disparity, c_{cave} and the components.

加割合が、輪郭に近い部分ほど急に大きくなったためである。斜め成分 c_{vs} は、 c_{vx} と c_{vy} との中間的な傾向になった。 c_{cave} は各成分の総平均なので、果実像中央付近で最小のU字型になった。

一方、王林の果実像の場合は、図 5.5 に示す例のようであった。撮影条件は、太陽光が直射状態で撮影距離が 2,582mm である。同図 (a)~(c) の処理内容は前図と同様である。距離画像ではGの明度で距離を区分したため周囲の葉像との区別が不明確であるが、 c の分布を見ると、同図 (b) のように果実像内部で 50 以下の凹型になり、輪郭付近では内部と外部の色調が急変しているため 200 ~ 400 に増加した。果実像の左側では同系色の葉像が同じ距離付近にあり、誤対応によって低下した。果実の右側にも葉があるが距離が異なるため、 c は変動している。ただし、両像の色調が類似のため、 c

の値はふじの場合ほど増大しなかった。

また、1 視差刻み分だけ前後の視差距離における c の分布を見ると、前方側 (点線) と後方側 (細実線) とでも果実像中央で当該線 (太実線) に近似している。しかし輪郭付近では、ふじと同様合成像の両側とも色ずれが増加するため c は急増しており、重なり の適否の判別が可能である。

RGB 濃度平均分散の水平成分 c_{vx} は、同図 (c) のように、果実像の内部でU字状になり輪郭の外側で増加した。ただし、その増加割合はふじの場合ほど急激ではなかった。垂直成分 c_{vy} 及び斜め成分 c_{vs} は、輪郭付近で増加しているものの、果実像内部の 2 倍程度で比較的小さかった。このため、 c_{cave} は果実像内部で最小のU字型になったものの、果実周囲との較差はふじほど顕著ではなかった。これは周囲の葉像の明度が低く、かつその値が類似していたためである。

以上のように、程度の差はあるものの、ふじ、王林の果実像内部、あるいは王林と葉像間などのように同色系画素で色相の差が小さい場合でも、明度や彩度に濃度差があれば、 c は色ずれのため増加し、左右画像の重なり状態の判別が可能であった。

また、合成像各画素の c_{cave} とその成分は、計算範囲の中に占める輪郭部分と輪郭の内外の画素割合、及び c の分布状態に変化し、各成分の値は一般に輪郭部分の画素割合が多くなるほど増大した。

(赦) 視差距離と果実像の c_{cave} との関係 図 5.4 と図 5.5 の各図 (d) は、横軸に視差距離 Z_s 、縦軸に果実像中央の画素の c_{cave} と各成分を取ってそれぞれの傾向を見たものである。図中の縦線は果実の実距離 Z_0 を示す。

ふじの c_{vx} と c_{vs} は、 Z_0 に近いほど合成像全体に占める輪郭部分の横縞状領域の割合が減少するため、図 5.4 (d) に示すように Z_s とともにV字型に変化した。

c_{vy} は、果実像内部に占める上下方向の画素割合がこの Z_s 区間においてあまり変わらないため、変化が小さかった。それらの結果より c_{cave} は、黒丸太実線のように Z_0 の 1 ~ 2 視差刻み分前で最小になり、V字型の変化になった。このように、 c_{cave} が Z_s に対してVかU字型の傾向で変化し、その最小値の小さいほど、 c_{cave} と位置ずれとの間に強い比例的関係が現れることになる。

王林の場合も、図 5.5 (d) のようにふじと同様の傾向であった。ただし、 Z_s が遠くなるほど、合成時に果実とその周囲の葉像との重なり部分が増えたので c_{vy} が増加した。その結果 c_{cave} は、 Z_0 の 1 ~ 2 視差刻み分前で最小のV字型となる変化を示し、位置ずれと比例的関係にあった。

(斜) c_{cave} 及び各成分の特徴分類と頻度 Z_s に対する c_{cave} と各成分の関係の特徴は、変化傾向のタイプ、最小値レベル、及び Z_0 と c_{cave} 最小値の距離との差を相当分の視差で表すと次のようになった。

ふじの合成像全てについて、上述の特徴別に分類して

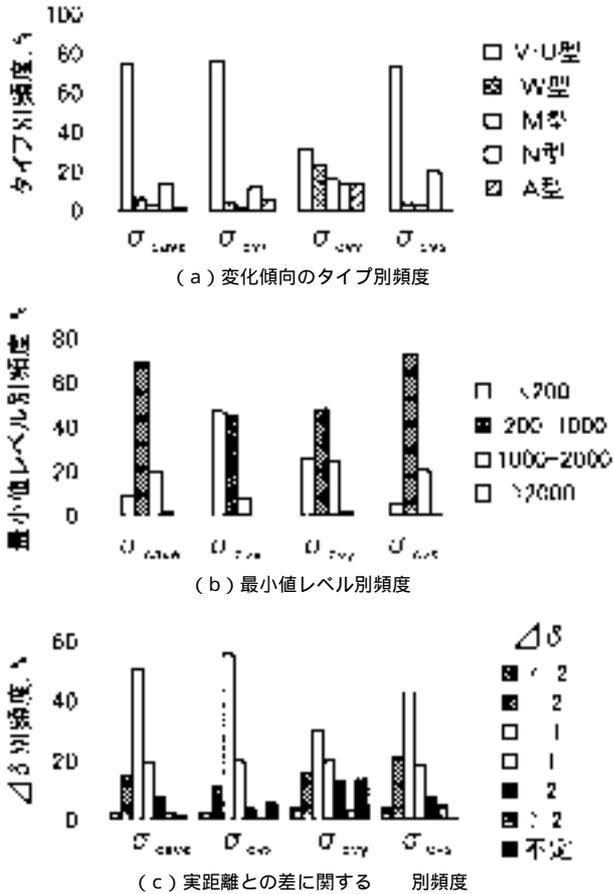


図5.6 ふじの c_{cave} 及び各成分の特徴別分類

Fig. 5.6 Classification of characteristics on c_{cave} and the components on a Fuji apple: (a) frequency on types of changeable tendencies, (b) frequency on levels of minimum-value, (c) frequency on types of ΔD between a real distance and a measured value

比較した結果を図5.6に示す。 c_{cave} とその成分の変化傾向のタイプは、図4(d), 図5(d)に一部見られるように、およそV・U型, W型, M型, N型(NとNの裏文字型の2種)及びA型(-, /, \ の3種)に分けられた。それぞれの頻度割合は、図5.6(a)のようになり、 c_{cvx} , c_{cvs} , 及び c_{cave} ではV・U型が約75%を占め、次いでN型が15~20%であった。これに対し c_{cvy} ではV・U型が約30%, W, M, N, A型が20~15%の範囲にあった。

最小値レベルは、 c_{cave} を200未満, 200~1,000, 1,000~2,000, 及び2,000以上の4段階に分けると、同図(b)のように、 c_{cvx} では200未満が約50%と多く、次いで200~1,000が約40%であった。 c_{cvy} と c_{cvs} では200未満が減り、200~1,000と1,000~2,000の割合が増加した。それに伴い c_{cave} も200~1,000の割合が70%弱, 1,000~2,000が20%になった。

同図(c)は、 c_{cave} 最小の Z_s と Z_0 との差を、視差刻み単位 ΔD の相当分として、 c_{cave} と各成分についてその

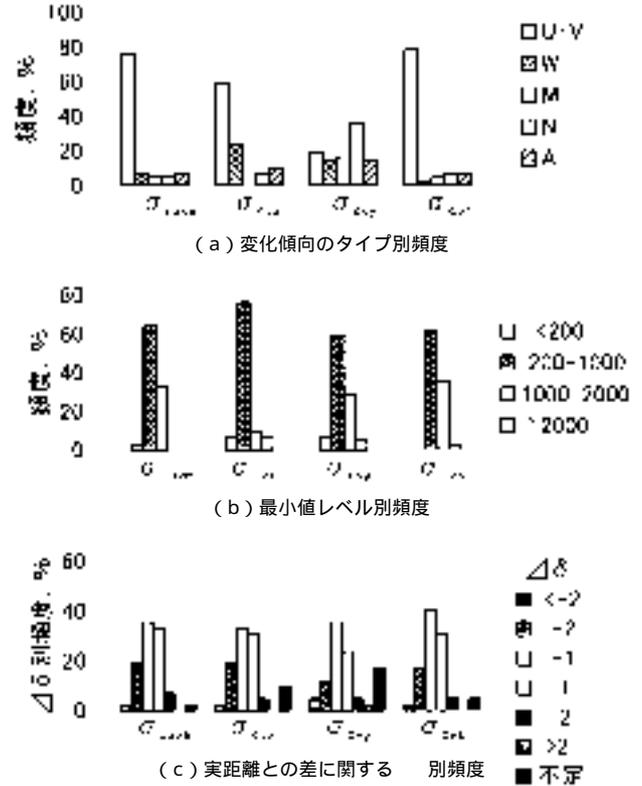


図5.7 王林の c_{cave} 及び各成分の特徴別分類

Fig. 5.7 Classification of characteristics on c_{cave} and the components on an Orin apple: (a) frequency on types of changeable tendencies, (b) frequency on levels of minimum-value, (c) frequency on types of ΔD between a real distance and a measured value.

発生頻度を調べたものである。図のように、各成分、 c_{cave} のいずれも-1が最も多かった。-2から+1までの分が占める割合は、 c_{cvy} を除いてほぼ90%以上となった。

一方、王林の場合は、 c_{cave} とその成分の変化傾向タイプの頻度割合が、図5.7(a)のようになり、 c_{cvs} と c_{cave} ではV・U型が約80%を占めたが、 c_{cvx} は60%に止まり、N型はそれぞれ10%以下であった。 c_{cvy} ではV・U型が約20%, W, M, N, A型が15~20%の範囲にあった。最小値レベルは、同図(b)のように c_{cvx} では200~1,000が約90%と最も多く、200未満は10%以下であった。 c_{cvy} と c_{cvs} では200未満が10%以下で、200~1,000が60%強, 1,000~2,000が30%前後であった。このため、 c_{cave} は200~1,000の割合が70%弱, 1,000~2,000が30%になった。 c_{cave} 最小の Z_s と Z_0 との差は、同図(c)のように ΔD を単位として、各成分、 c_{cave} のいずれも-1が最も多く、30~40%であったが、+1もほぼそれに近い割合になった。-2から+1までの分が占める割合は、ふじと同様ほぼ90%以上となった。

4. 距離精度に及ぼす画像入力条件の影響

(1) 照度条件の影響

前節の実験結果より、収穫期のリンゴ園における天空照度（照度計受光部を真上にした値）は、午前9時頃から午後1時頃までが60～70klxで、その後徐々に減少して日没前後には0.5～1.5klxになった。果実面の照度は、天空照度が60klx以上である午後1時頃までは、太陽光直射時で90klx前後、曇りや樹冠内の散乱光下で6～12klxであった。

果実像の明度は、図5.8に示すように、逆光時を除けばカメラの自動露出機能によって果実照度とほぼ比例関係にあり、果実照度が1klx以下でも90（最大値の約35%）以上の場合が多かった。逆光時では、背景が空などのように明るいと急激に低下し、果実照度が6～10klxであっても90以下になる場合（強逆光と呼称）が見られた。

果実像の明度と供試システムによる距離誤差の関係について、自然光の照射状態を直射光（順光時、ふじ23組、王林7組）と散乱光（逆光時で明度90以上 弱逆光と呼称）の分を含む、同30組と12組に分けて図5.9に示す。各明度のプロット点は3～10個の合成像の

平均である。いずれの照射状態でも、明度の変化に対する誤差の変化は小さく、各明度での平均誤差は概ね-3～0%の範囲に入った。

各照射状態における c_{cave} の特徴を分類別に見ると、直射光ではV・U型が約95%を占め、最小値への収束傾向が強かった。散乱光では、V・U型が約66%と直射光に比べ少なかったが、最小値レベルaの割合が約60%と高かった。 c_{cave} 最小に関する c_{cvx} は、-1と-2の占める割合が直射光で76%、散乱光で79%であった。

以上のように、ふじ、王林とも果実像明度が90以上の照度条件では、弱逆光時も含めて果実像と周囲との色特徴が明確に異なり、RGB各濃度の較差が大きかったため、 c_{cave} の収束性が安定した。それゆえ、距離誤差への影響はあまり見られなかった。

なお、果実像面にハイライト部分や枝葉の陰影がある場合でも、その濃淡の分布形状が左右両画像において明瞭でかつ近似していれば、合成果実像面の位置ずれが最小になった時に c_{cave} が最小になり、距離誤差への影響は小さかった。ただし、果実面の陰影等が斑模様の場合には、その明暗の分布形状が必ずしも左右両画像で近似せず、 c_{cave} の最小値が1,000以上で、V・U型以外のタイプになることが多かった。

(2) 果実条件の影響

1) 果実像の重なりによる影響 複数個の果実像が重なり合う状態には、水平、上下、及び斜めの各方向の場合がある。誤対応が最も発生しやすい水平方向の重なりについて、ふじの処理例を図5.10に示す。同図(a)の左側2枚は左右の各原画像で、果実像a ($Z_0 = 2,360\text{mm}$) とb (同 $2,581\text{mm}$) の重なり度合は右画像の方が左画像より大きい。右側2枚はそれぞれの果実像の c_{cave} が最小になった Z_s における合成カラー画像である。

同図(b)は、上述の各視差距離画像におけるx軸上の c_{cvx} 分布である。 $Z_s = 2,317\text{mm}$ の c_{cvx} 線(太実線)は、果実aの領域内で低下し、その輪郭部分で増加した。果実b領域でも誤対応のため急減した箇所があるが、その部分を除けば、果実b領域では $Z_s = 2,474\text{mm}$ の c_{cvx} 線より大きな値になった。果実bの Z_0 に近い Z_s の c_{cvx} 線(点線)も同様の傾向で変化した。ただし、果実像bのほぼ中央から右側では、果実像aの位置ずれによる横縞状の色調がb領域まで及んだ影響で、両 c_{cvx} 線の上下位置が逆転している。このような位置ずれの影響は、重なり合う二つの果実が前後に離れるほど大きくなった。

同図(c)は、果実像a, bそれぞれの中央付近に関する c_{cave} 及び各成分と Z_s の関係である。果実像aの c_{cvx} と c_{cvs} は、a領域の c_{cvx} が小さいため最小値レベルが低く、V・U型の傾向で収束した。果実bの各成分値は、b領域での c_{cvx} の変動が大きいため、 c_{cvy} と c_{cvs} の最小値が c_{cvx} より前方になり、 c_{cave} の変化傾向は弱いV型になった。王林についてもほぼ同様の傾向であっ

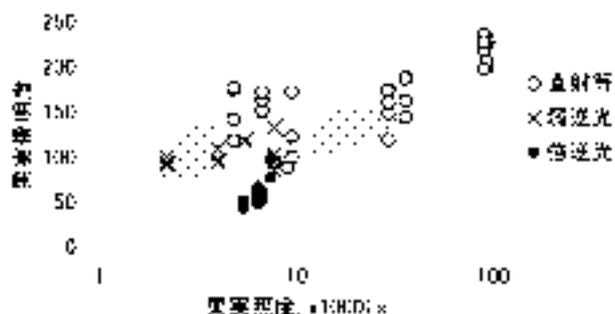


図5.8 果実照度と果実像明度の関係（ふじと王林）

Fig. 5.8 Relationship between an illumination of apples and the intensity of the images (of both 'Fuji' and 'Orin' apples).

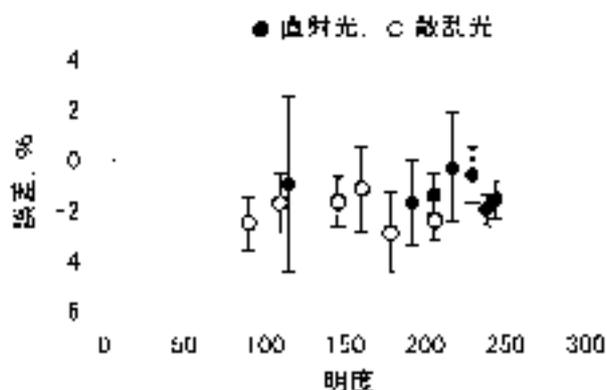
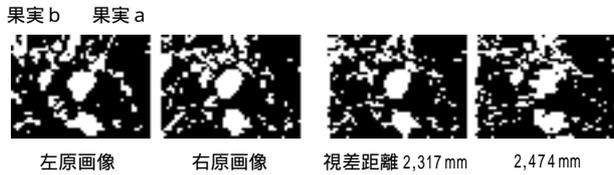
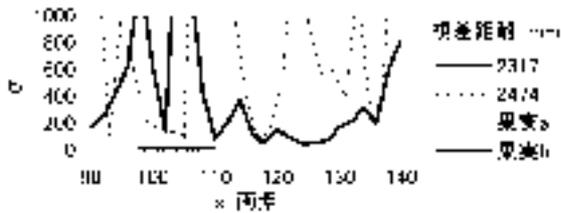


図5.9 果実像の明度と距離誤差の関係

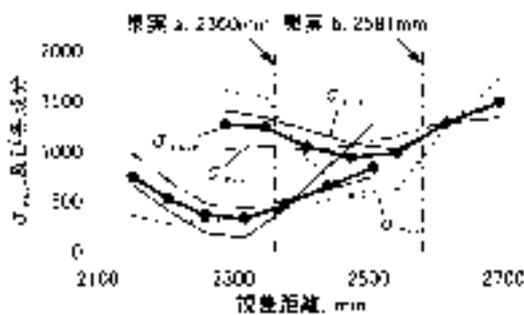
Fig. 5.9 Relationship between the intensity of apple images and the error of distance.



(a) 原画像と合成像の例



(b) 視差距離断面 x 方向の c 分布



(c) 視差距離と cave 及び各成分の関係

図 5.10 ふじの果実同士の重なり画像における c と c_{cave} の例
 Fig. 5.10 An example of c and c_{cave} on the images of overlapped Fuji apples: (a) examples of original image and composite image, (b) distribution of c_{cave} and the components in the direction of x , (c) relationships among distance by disparity, c_{cave} and the components.

た。

2 個の果実像の重なり度合と距離誤差の関係(ふじ 17 組, 王林 6 組)は, 図 5.11 に示すようになった。 Z_0 は 1.7 ~ 4.3m の範囲であった。横軸は, 対象果実の手前に果実がある場合を正にとり, 対象果実像の全体面積に対する重なり部分の割合を表す。同図より, 重なり度合が ± 0.5 以下であれば, 距離誤差は概ね -3 ~ 2% の範囲に入り, 重なり度合が大きいほど, 後方果実の距離が短く測定される傾向が見られた。

2) 果実と枝葉の重なり 王林の果実と枝葉の重なり例を図 5.12 (a) の左側の左右原画像に示す。中央果実の右半分を枝と葉が遮る状態にあった。同図右側 2 枚はそれぞれ枝葉と果実の距離に最も近い Z_s で合成した画像である。同図 (b) はそれらの Z_s に関する c の分布を見たもので, 参考までにさらに一つ手前の Z_s の分も示してある。 $Z_s = 1,573$ mm の c 線 (太実線) は果実領域で, 1,601 mm の c 線 (点線) は枝葉領域で, それぞれ低下し, 各輪郭部分で増加している。ただし, 1,573 mm の c 線は, 果実中央から左半分までは 1,601 mm の c 線とほとんど重なっており, 色ずれの検

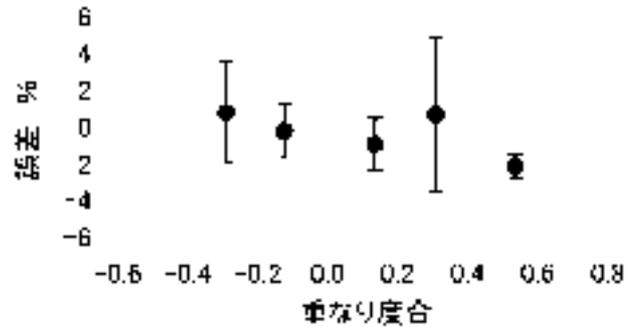
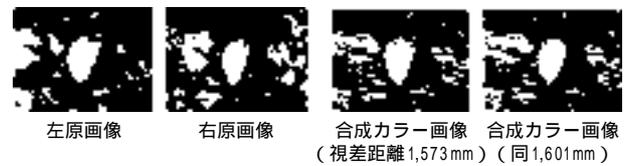
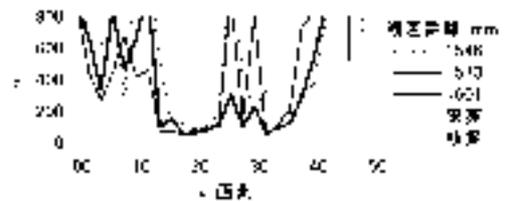


図 5.11 果実同士の重なり度合と距離誤差の関係

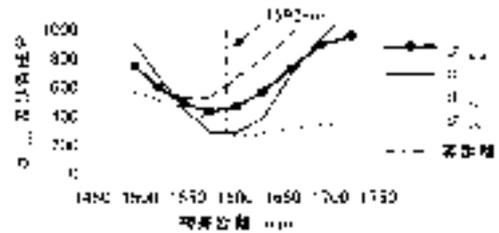
Fig. 5.11 Relation between the ratio of area of overlapped apples and error distance.



(a) 原画像と合成像の例



(b) 各視差距離における c の分布



(c) 視差距離と cave 及び各成分の関係

図 5.12 王林果実と枝葉の重なり画像における c と c_{cave} の例
 Fig. 5.12 An example of c and c_{cave} on overlapped images of a Orin apple and a leaf from the Orin apple tree: (a) examples of original image and composite image, (b) distribution of c_{cave} and the components in the direction of x , (c) relationships among distance by disparity, c_{cave} and the components.

出が十分ではない。これは三原色のうち G の濃度が接近していることに影響されたためと推測される。

果実像に関する c_{cave} 及び各成分と Z_s の関係は, 同図 (c) のようであった。 c_{vx} は果実の実距離付近で最小になるが, c_{vs} はやや手前で最小になり, c_{vy} は変化が小さい。その結果, c_{cave} には c_{vx} の V 型変化の影響が強く現れ, Z_0 に近い 1,570 mm で最小になった。枝葉の重なりにも関わらず, 距離推定がおおむね良好になされたことが分かる。

(3) 撮影条件の影響

撮影時における露出、ホワイトバランス、及び合焦の自動調節は、強逆光時の露出不足以外は概ね適切に行われた。

1) 逆光時の影響 前述のように果実像明度が90以上の弱逆光では、RGB濃度分布の較差が明確になるため、 z_{cave} の変化がV字型傾向となって収束性が強く、距離精度への影響は小さかった。果実像明度がそれ以下で、周囲の明度も低い強逆光では、果実像と周囲とのRGB濃度の較差が小さいため z_{cave} の変化が小さく、距離測定値の信頼性が低下した。ただし、同じ逆光の果実像明度でも、周囲が明るい場合には、周囲とのRGB濃度差が大きくなり、 z_{cave} の変化がV字型となって距離誤差が小さくなる場合があった。

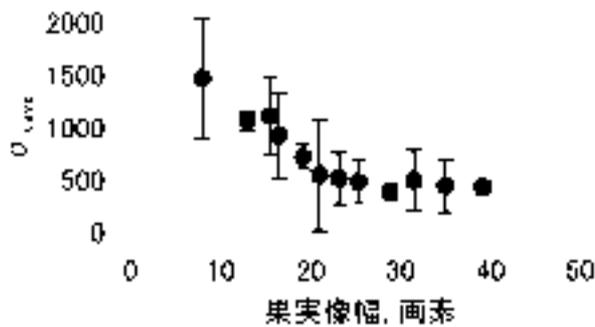
2) 果実像の大きさによる影響 式(5.1)で算出した果実像幅と z_{cave} 最小値の関係(ふじ48組)は、図5.13の通りであった。果実像幅の計算値と実際値はほぼ正比例の関係(相関係数0.955)にあった。 z_{cave} は、同図(a)のように果実像幅に反比例して変化し、16画素以下で1,000以上になっている。ここで、16画素未満と16画素以上のグループに分け、 z_s に対する z_{cave} の変化傾向をタイプ別に見ると、前者では、同図(b)のように各成分の最小値レベルが高く、かつ最小となる z_s が一致しない場合が多くなるため、V・U型が減少しM、N型が増加する。 z_{cave} 最小の z_s は、同図(c)に示すように、-2から+1の間がそれぞれ30%前後となり、 z_{cave} の収束性が低下した。そこで、 z_{cave} が1,000以上になるときの果実像幅画素数を限界画素数と呼称し、一指標として用いた。

王林(26組)では図5.14に示すように、約26画素以下で z_{cave} が1,000以上になり、限界画素数はふじと異なるものの、 z_{cave} の変化は同様の傾向であった。限界画素数がふじより多くなった理由は、果実が周囲の葉と同系色なので、果実像内部の領域が葉像よりかなり広がらないと、両者のRGB各濃度の較差が明確にならないためである。

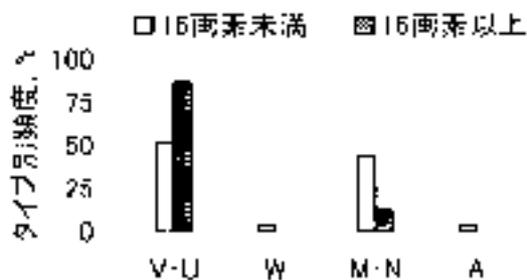
これらの結果より、合成像内の果実像幅は、ふじで16画素以上、王林で26画素以上になるように、撮影距離とズーム値の組合せを選択する必要があることが分かった。

(4) 本手法の適用に関する考察

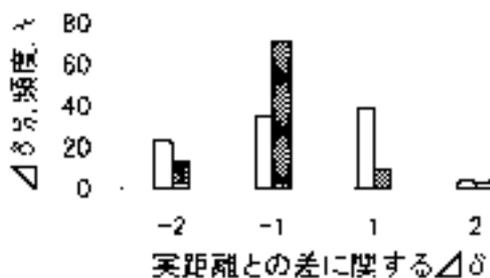
1) 供試システムの距離精度特性 以上の結果より、供試システムの距離測定における適用条件の範囲をまとめると、(射)照度条件については、カメラの自動調節機能を利用するものとし、照度が1~90klxの範囲で、果実像明度が逆光時を含めて90以上、(捨)果実条件については、上記の明度であれば赤色系、黄緑色系両果実ともに計測処理が可能であり、果実同士の重なりがある場合は、その重なり度合が0.5以内であること、(救)撮影条件については、モニタ上の果実像幅がふじで16画素



(a) 果実像幅と z_{cave} 最小値の関係



(b) z_{cave} のタイプ別頻度



(c) 実距離との差に関する z_{cave} のタイプ別頻度

図5.13 ふじの果実像幅と z_{cave} の関係

Fig. 5.13 Relationship between the width of a Fuji apple image and z_{cave} : (a) relationship between the width of an apple image and the minimum value of z_{cave} , (b) frequency on types of changeable tendencies of z_{cave} , (c) frequency on types of between a real distance and a measured value.

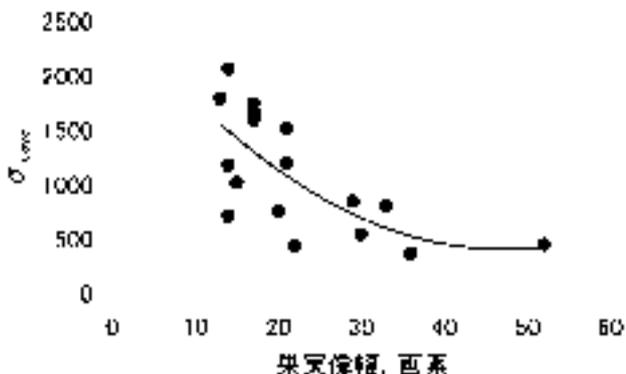


図5.14 王林果実像幅と z_{cave} の関係

Fig. 5.14 Relationship between the width of an 'Orin' apple image and z_{cave} .

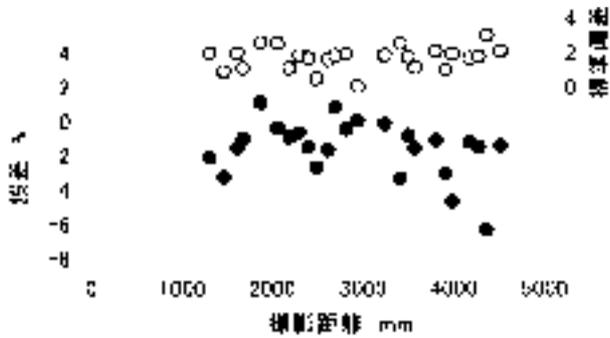


図 5.15 供試システムの撮影距離と誤差の関係

Fig. 5.15 Relationship between photographic distance and error on the experimental system.

以上、王林で 26 画素以上になるように、撮影距離とズーム設定値を組合せること、などが挙げられる。さらに、画像処理過程で c_{ave} の最小値が 1,000 以上になる状況では収束性の低下に留意する必要がある。

上記の条件の範囲内で、供試システムの撮影距離と距離誤差との関係を整理（ふじ 99 組、王林 27 組）すると、図 5.15 のようになった。誤差は、撮影距離 1.2 ~ 3.5m までは - 4 ~ 2% にあり、3.5m 以上では - 7 ~ 0% の範囲に拡大した。果実の機械収穫においてマニピュレータ・ハンド方式で収穫・把持や収納する作業を想定すると、カメラから約 2m の範囲では誤差 2% 以内が望ましいので、さらに改良が必要である。その範囲外の 2 ~ 4m にある果実を移動探索しながら距離・位置の測定を行う場合には、上記の誤差範囲でも問題はないと思われる。

2) 問題点と今後の課題 画像入力における逆光時の露出不足が問題点の一つとして挙げられる。その画像処理上の対策としては、RGB の補正 (76) などがあるが必ずしも十分でない。撮影時点で逆光状態を感知して補正 (88) や撮影位置等の修正を行う方式が実用的と思われる。また、測定距離 2m までの距離精度を改善するためには、 c_{ave} の収束性が満たされる撮影条件と画像処理条件を明確にする必要がある。さらに、注視距離と視差刻みの組み合わせ方式や前章で述べた対応問題対策を適用した場合の検討も必要である。なお、本研究の測定原理に基づく画像入力方式への改良や測定処理の高速化など、ハードウェア面の検討も今後の課題である。

5. 要 約

供試ステレオ視システムについて、照度、果実及び撮影の各条件と距離測定の誤差要因との関係、及びそれらが測定精度に及ぼす影響を明らかにするため、収穫期のリンゴ園画像を対象にして実験分析した。

RGB 濃度平均分散 c_{ave} の変化タイプは、頻度割合で V・U 型が約 75% を占め、次いで N 型が 15 ~ 20% であった。その最小値レベルでは 200 ~ 1,000 の割合が 70% で最も多かった。 c_{ave} が最小になる視差距離と実

距離の差は、視差刻み分で - 2 から 1 までの占める割合がほぼ 90% 以上となった。

各条件の結果より、赤色系と黄緑色系の両果実に対する本システムの適用条件の範囲は、照度が 1 ~ 90 klx のもとで、逆光時を含めて果実像明度が 90 (35%) 以上、果実像の重なり度合いが 0.5 以内、モニタ上の果実像幅がふじで 16 画素以上、王林で 26 画素以上であった。

上記の条件の範囲で供試システムの撮影距離と距離誤差との関係を整理した結果、誤差は撮影距離 1.2 ~ 3.5m で - 4 ~ 2%、3.5m 以上では - 7 ~ 0% の範囲にあった。マニピュレータ・ハンド方式で収穫・把持や収納する作業を想定すると、カメラから約 2m の範囲で誤差 2% 以内が望ましいので、さらなる改良を必要とする。

第 6 章 立体形状計測と位置制御へのステレオ視法の応用

1. 緒 言

ステレオ視計測法の応用として、機械収穫の際に果実を収穫部（ハンド）で把持するために必要な果実の形状計測と認識、及び収穫マニピュレータ先端のハンドを果実に接近させるための制御に三次元視覚情報を利用する方法について検討した。

果実の形状計測に関する研究では、これまでトマト、ミカン、イチゴなどを対象に、単眼カメラ、PSD、超音波などの利用が試みられているが、識別、位置計測、及び形状計測が別個の装置で行われるなど、一連の作業の連携や経済性はあまり考慮されていないものが多い。また、形状の計測に両眼ステレオ視法を適用した研究例は見当たらない。ここでは、試作システムで果実の位置計測を行ったのち、引き続きその形状計測に利用することを前提に、本研究の手法の適用性を実験的に調べた。

一方、上述の手法で得られた果実や枝の形状に関する測定値からそれらの姿勢や形態を判別・認識するためには、輪郭の形状を判定することが必要になるが、リンゴ園のような自然シーンの画像には多様な形状が含まれるため処理時間が長くなるのが一般的である。そこで、その処理を高速化するため、デジタル画像における線の微小部分に関する描画形式をパターン化して利用する画像処理方式を検討した。

また、収穫機械用のマニピュレータは、自由度が高く柔軟な動作が可能で多関節型が有効であると予想される。ただし、その制御に際し、マニピュレータ各関節の所要回転角を逆計算で求めることが必要になるが、移動距離が長いときや接近経路上の障害物を避けなければならないとき、計算時間が増大したり、解が得られない場合がある。そうした場合、リアルタイムの制御が困難になる事態が懸念される。そこで、ステレオ視計測で得られた三次元視覚情報を用いてフィードフォワード的な動作制御を行うアルゴリズムを考え、数式モデルのシミュ

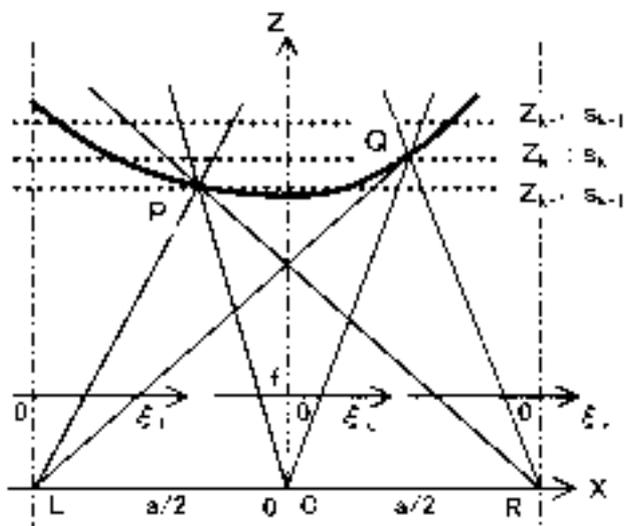


図6.1 三次元形状の計測原理

Fig. 6.1 Measurement principle of three dimensional shapes on an object.

レーションによってその利用可能性を考察した。

2. 果実形状のステレオ視計測に関する実験

従来、受動的な方法である両眼ステレオ視による形状計測は、平面や球面で構成された立体物のように、対応づけのために必要な輪郭や境界などの特徴が顕著でない対象物に対しては、不向きとされてきた。しかし、本研究のステレオ視計測の原理は、左右両画像による合成像の鮮明さを RGB 濃度分散で比較・判定し物体を検出する方式なので、対象物表面の色特徴に濃度分布があれば、表面各部の位置の検出にも利用できるという特色がある。果実を対象にした場合でも、その表面の RGB 濃度に高低差があれば、表面各部の三次元位置座標を求めることにより立体形状の計測に利用できる可能性がある。

本節では、立方体形状のルービックキューブと丸いリンゴ果実を供試して本手法による計測実験を行い、その適用性について検討した。

(1) 左右画像合成による立体形状の計測

測定原理は第3章と同じである。すなわち、図6.1に示すように、平行な左右のカメラ(L, R)で対象物を撮影したとき、一組の左右画像を視差距離断面ごとに点Cから見た中央画面上で合成する。各視差距離の中央像は、それぞれの視差距離に焦点を合わせて対象物を見ることと等価なので、その断面と物体表面との間に交差部分があれば、鮮明な像として検出される。そこで、各中央像間で同一座標の画素のRGB濃度平均分散 σ_{cave} を比較し最も鮮明な画素を選定すれば、その画素に投影された像の三次元位置が判明する。これを対象物の表面全体で繰り返すことにより、対象物のカラー情報と距離情報が画素ごとに得られるので、その立体形状が分かる。例えば同図で、対象物表面の点PとQは、それぞれ視差距

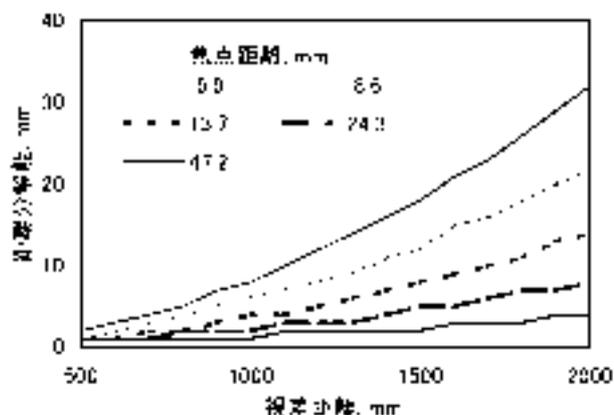


図6.2 視差距離と分解能の関係

Fig. 6.2 Relationship between distance by disparity and distance resolution.

離 Z_{i-1} と Z_i で鮮明になるので距離が分かり、投影像から三次元座標とRGB濃度を得ることができる。

なお、形状測定では、Z方向の測定範囲を対象物の奥行き分とするだけでよいので、前章までの距離計測よりも探索距離範囲を狭くできる。ただし、表面形状を詳しく知るためには、視差刻みを小さく、かつ視差距離断面数を多く設定して距離分解能を上げる必要がある。

(2) 実験方法

1) 対象物とステレオ視装置 供試対象物には、本手法による形状計測の原理を検証し、かつ距離分解能が試算通りに得られるかどうかを調べるため、対照区として立方体形状のルービックキューブ(一辺55mm)を、測定対象として赤色系リンゴ品種ふじを、それぞれ選んだ。供試システムは、前章と同様2台のCCDカラービデオカメラ(光軸間隔300mm)、ビデオキャプチャPCカード、サブノートパソコン、画像入力切替器、及びバッテリーで構成した。

カメラの焦点距離と撮影距離は、図6.2に示す試作システムの距離分解能をもとに決め、左右のカメラは、対象物が共通視野の合成範囲に入るように、それぞれ12.8°の光軸角度で配置した。なお、画像処理に際しては、第2章の方法により平行ステレオ視の状態に換算した。

2) 実験条件と方法 室内で供試対象物から約1m離れた斜め上方から、ズーム値を200H~300Hとして撮影を行い、左右各画像をパソコンのハードデスクに保存し、実験終了後一括して測定処理を行った。左右各画像の解像度は320×240画素(RGB 24bit/画素)に設定した。画像処理で、 σ_{cave} の比較計算範囲は、対象物像幅の1/4~1/1までとした。距離の校正にはレーザー距離計による測定値を用いた。

(3) 実験結果と考察

1) ルービックキューブに関する結果 原画像(焦点距離24.4mm)の例を図6.3に示す。注視距離990mm,

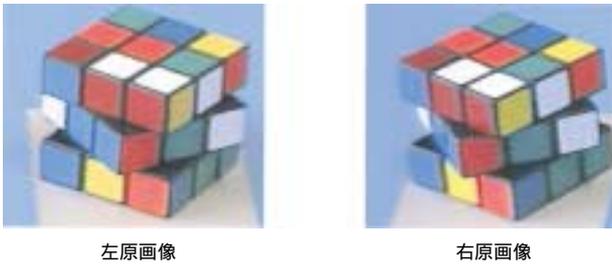


図 6.3 供試ルービックキューブの撮影画像例

Fig. 6.3 An example of pairs of images on a Rubic-Cube specimen.

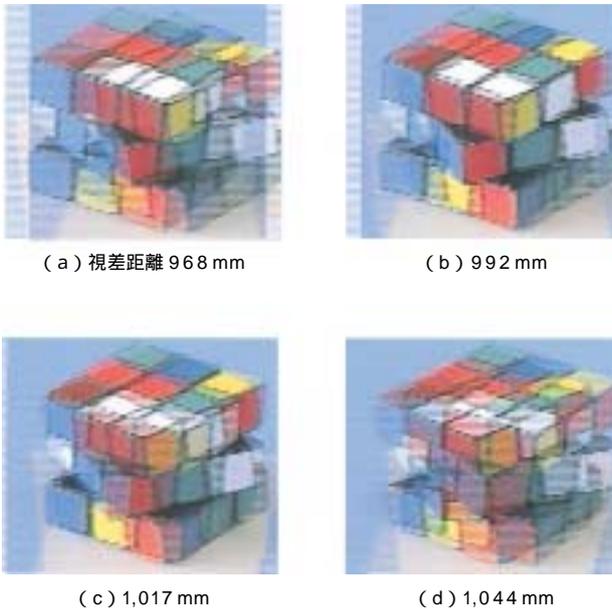


図 6.4 合成過程のカラー画像例

Fig. 6.4 An example of color composite images in process.

視差刻み 5 画素 (距離分解能約 10mm), 視差距離断面の個数 11 個 (距離範囲 941 ~ 1,044mm), RGB 濃度分散の計算範囲 4 画素, 平均分散の比較範囲 30 ~ 60 画素で処理した結果は以下のものであった。

(射) 左右画像の重なり状態と色濃度分布 処理途中の合成状態を図 6.4 に示す。各図において輪郭が鮮明になっている部分は、左右画像の重なりが一致した視差距離断面上にある。ルービックキューブを構成する小ブロックの輪郭同士が重なりあう部分は、線の鮮明さ (横縞状態の有無) を比較することによって重なり状態の判別が容易であるが、小ブロック内の平面部分では横縞模様が現われ難いので必ずしも明確ではない。そのため、 σ_{cave} の比較計算範囲は、輪郭が含まれるように小ブロック幅の区間長より大きく設定する必要がある。

(捨) 視差距離と σ_{cave} 及び各成分の推移 注目点をルービックキューブの最前端からやや左寄りの側面部分 ($Z_0 = 976\text{mm}$) に取り、その点の Z_s と σ_{cave} 及び各成分との関係を求めた結果が図 6.5 である。 σ_{cave} の比較計算

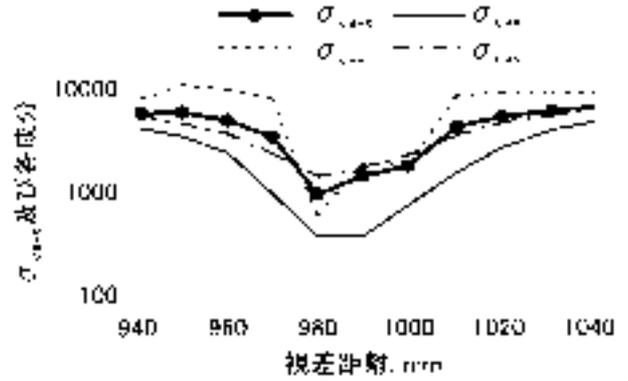


図 6.5 視差距離と σ_{cave} 及び各成分の関係

Fig. 6.5 Relationships among distance by disparity, σ_{cave} , and the components.

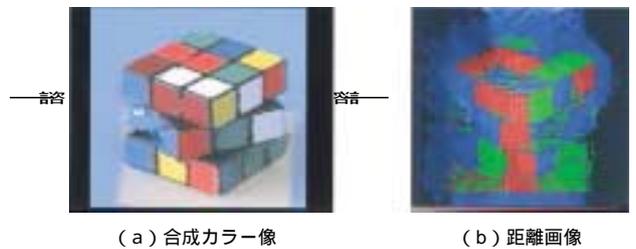


図 6.6 合成結果

Fig. 6.6 Results of composite image processing: (a) color composite image, (b) depth image.

範囲は 50 画素 (画像上で小ブロック約 1.5 個分) とした。結果は、図のように σ_{cave} の各成分とも 980 mm 付近で最小となり、 Z_0 に近似した。ただし、各値については、 σ_{cvx} が 400 程度だったのに対し、他の成分では垂直方向の色特徴の変化が大きいため、1,000 前後と高くなった。その結果 σ_{cave} の値も約 950 と高くなったが、前後の Z_s に関する値よりも小さく、明確な落ち込みの傾向が見られた。 σ_{cave} の比較範囲を 40 ~ 60 画素にした場合もほぼ同様であったが、その範囲以外では各線の変動が大きくなった。

(赦) 合成処理結果 図 6.6 は、前述の条件で処理した後の合成カラー画像と距離画像である。同図 (a) の合成カラー画像は、キューブの白色部分と左右側方及び後方部分を除き、おおむね適切に元の立体像を再現した。白色部分は RGB 濃度差が小さいため合成が不良状態になった。また、左右側方と後方は走査範囲及び距離探索範囲の限界に近いので、 σ_{cave} の比較が適切に行われず、鮮明な画像にはならなかった。

同図 (b) の距離画像は、合成像の各画素に含まれる三原色の中で最も濃度が高い原色について、距離に近い場合ほど明度が高く表示されるように描画したものである。図によると、前端に近い部分ほど明るい傾向が見られたが必ずしも明確ではなかった。そこで、同図の x 軸上における視差距離の分布を図 6.7 に示した。同図の

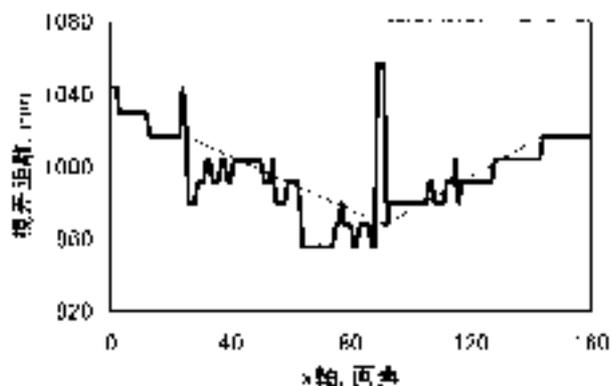


図 6.7 x軸上の距離分布例 (矢印部分を通る水平線上)
Fig. 6.7 Distribution of distance on x axis (indicated by an arrow).

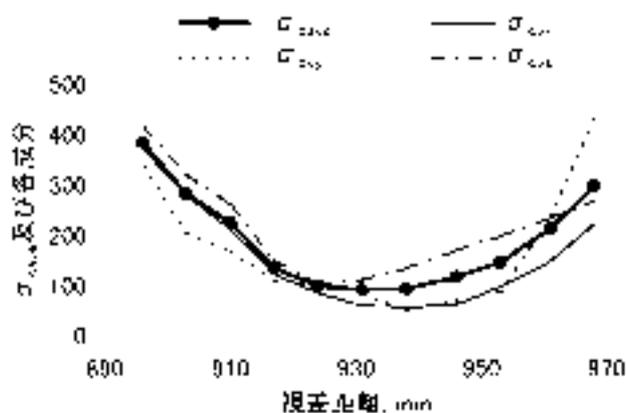


図 6.9 視差距離に対する σ_{cave} と各成分の関係
Fig. 6.9 Relationship of σ_{cave} and the components to distance by disparity.



図 6.8 果実ふじの左右両原画像と左画像の R 濃度画像
Fig. 6.8 A pair of original images and R-intensity image of the left image on a 'Fuji' apple.

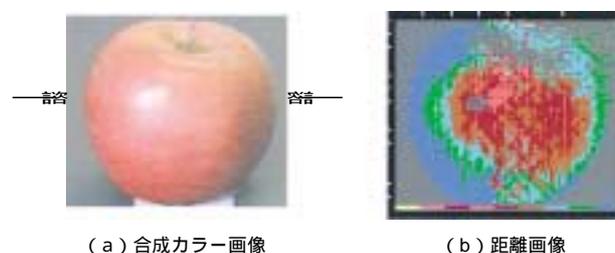


図 6.10 合成処理結果
Fig. 6.10 Results of composite image processing.

ように、中央部分の左側では前方に、右側では後方に、それぞれ偽像の発生のため大きな誤差が生じているが、他の部分ではおおむね対象物の前辺に沿って計測されていることが分かった。

以上より、視差距離断面ごとに左右両画像から中央画像を合成すると、輪郭部分では、対応する左右の線の傾斜状態が異なるような場合でも、視差距離断面との交差状態が明確になるため、 σ_{cave} の比較による鮮明さの判定が容易であり、左右両画像の対応づけが適切になされた。輪郭に囲まれた平面の場合には、画素ごとの対応づけは難しいが、輪郭を含むように σ_{cave} の比較範囲を設定すれば、その変化傾向が明瞭になり、距離の推定が概ね可能なことが分かった。

2) リンゴ果実に関する結果 (射) 色濃度分布 図 6.8 は、供試システムの左斜め上方約 30° から人工光を照射して撮影 ($f = 24.2\text{mm}$) した、ふじ (直径 $81\text{mm} \times$ 高さ 80mm , 最短距離 929mm) の左右各原画像 (a b) の例と左原画像の R 濃度分布像である。果実表面の明度分布は、前面の一部が照射光で飽和しているが、周囲に向かうに従い同心円状に徐々に減少する傾向にあった。

(捨) 視差距離と σ_{cave} 及び各成分の関係 果実像のほぼ中央を注目点にとり、注視距離 980mm , 視差刻み 5 画素, 視差距離断面数 9 枚として処理した結果、視差距離と σ_{cave} 及び各成分との関係は、図 6.9 に示すようになった。 σ_{cave} の比較計算範囲は 40 画素である。各成分

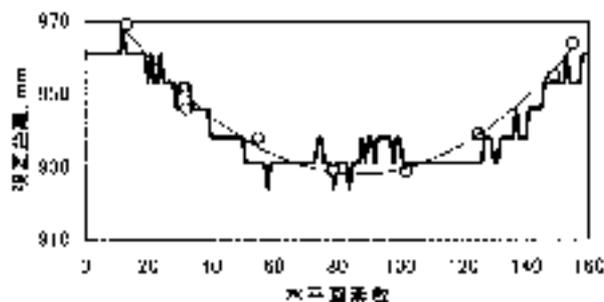


図 6.11 前図 (a) の矢印部分の推定距離
Fig. 6.11 Estimated distance of the part indicated by an arrow at the previous figures.

とも視差距離が 930mm 前後で最小になっており、実測値に近い結果が得られた。ただし、いずれの成分も最小値への落ち込み傾向が緩やかな U 字型形状のため、距離の推定に誤差が入りやすい状況であった。

(赦) 合成処理結果 合成処理結果を図 6.10 に示す。同図 (a) は合成カラー画像であり、原画像に近い色調に合成された。同図 (b) は距離画像で、視差距離断面ごとに彩色を変えて表示した。視差刻みが 4 画素なので距離分解能は約 7mm となり、果実の表面形状が 9 段階の奥行き区分で表示されている。右下方部分の視差距離区分が実距離より手前になっている点を除けば、おおむ

ね実距離に近い距離分布であった。なお、中央水平線（矢印）上の距離測定線は、図 6.11 に太実線で示すように視差距離ごとに階段状になっているが、その傾向はレーザ距離値による外形線に概ね近似していたことが分かる。

3) 考察 撮影時の照明条件の影響は、カラー画像ではあまり見られないものの、距離画像では濃度勾配が小さくなる照明状態ほど誤対応による誤差が増加する傾向となって現われた。結局、本手法による立体形状の計測は、果実表面の輝度や色調の濃度勾配がおよそ 20 以上であるときに利用可能なことが分かった。

誤対応対策としては、 c_{ave} の比較計算範囲を対象物の主な輪郭の幅と同等かそれ以上に取った場合に有効なことが多かったが、その範囲を広くするほど表面の凹凸形状が平均化されることになるので、その適切な決定基準についてはさらに検討する必要がある。

3. 線要素パターン方式による輪郭形状の取得

ステレオ視で計測した果実や立体形状物の傾き及び姿勢を把握するための手法として、直線や円弧の線要素パターンとその特徴値を予めテーブルデータにしておき、物体の輪郭各部の検出と照合にそれらを用いる方式について、その原理と線要素の検出精度について検討した(82)。

(1) 原理

物体の形状を輪郭によって判定する方法には、微分オペレータ等で輪郭の各点を検出し、それらに順次回帰式を当てはめる方式(41)やテンプレートとの一致度をみるパターン認識方式(43)がある。最近ではさらに改良ハフ変換による直線や円の検出(102)、ニューラルネットワークや遺伝アルゴリズムを用いたパターン検出(44)などの方式も試みられている。物体の輪郭に対するこのような操作は、画像の点の連結に対する直線・曲線の区別、傾きの把握など線の形状を判別する処理にほかならない。

コンピュータ内部で取り扱われるデジタル画像では、画素が図 6.12 のように正方向格子状に配置されるので、線は縦と横方向の画素の組み合わせで表され、線が滑らかな

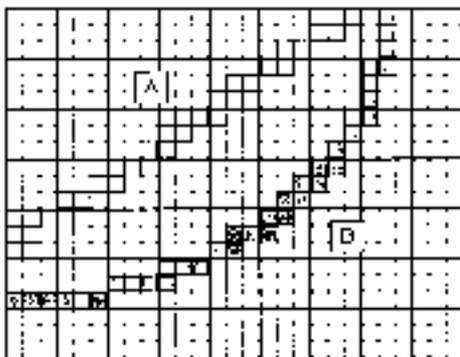


図 6.12 デジタル画像における線の描画例

Fig. 6.12 Examples of drawing lines at a digital image.

であればその描画様式は線の太さや傾きによってほぼ定まるという特徴がある。例えば、太さが一様な直線は、同図中に示した A のように、傾きに応じた画素パターンの繰り返しで、曲線は、同図中 B のように接線角度の変化に伴い画素の連結方向が徐々に変化する形式で描かれる。また、ほとんどの滑らかな線は、種々の直線や円弧の画素パターンの組み合わせで表される。

そこで、線の形状を判別する方法として、上述のような描画上の制約条件を前提に、予め線の形状とそれを構成する微小部分の画素パターンとの関係を求めておき、画素の連結状態が検出されたときにそれらと照合する方式が考えられる。

こうした考え方に類するものとして、角度検出用の Kirsch のオペレータ(90)や平面形状検出用の大津らのオペレータ(59)などがあり、いずれも 3×3 画素(以下セルと呼称)をパターン範囲とし、パターン数をそれぞれ 8 及び 25 個に設定している。ただし、これらのオペレータでは常にセル中心の画素に関するパターンを検出しなければならないため、画素を一つずつ走査する必要がある。

本節の方式では、画像走査処理の高速化を図るため、走査がセル単位で済むように、滑らかな線がセル内で取り得る要素パターンを 3×3 画素単位で予め全て調べておくことにする。その場合図 6.12 の太線枠で示すようにパターン数が多くなるものの、処理対象の面積は 9 分の 1 に減少する。なお、要素パターンの画素範囲は、2 値画像で $n \times n$ 画素としたとき、パターン総数が 2 の $n \times n$ 乗となり n とともに急増するので、実用上 n 値は 3 が適当と思われる。

一方、線の形状判別に関し、線の形状と画素の連結パターンの関係を角度の面からみたとき、直線の場合には連結パターンの平均角度が一定なのに対し、円弧の場合にはその変化割合が一定となる。そこで本方式では、線要素パターンの傾きの状態を検出し、それらが上述のどちらの性質に属するかによって直線部分か円弧部分かを判定することにした。

画素の連結状態をセルで区切ると、各セル内の画素状態が明確になる反面、隣接セルとの関係が分かりにくくなる。その関係を把握するために必要なパターン因子は、線の太さや領域内の位置に関する画素数、パターンの方向性を表す角度、画素の集合状態を表す画素の重心、及び隣接セルとの連結状態を表す辺パターンなどである。本節ではこのうちとを用いて隣接セルとの関係を調べた。

線要素パターンの形状と角度の関係は、角度が特定されるもの、方向性に広がりのあるもの、及び方向性の不定なものに分けられる。このうちのパターンについては、種々の傾きの直線をセル単位で走査したときの出現頻度分布から代表的な角度が求められるので、本節ではとのセル(角度セルと呼称)について、予め

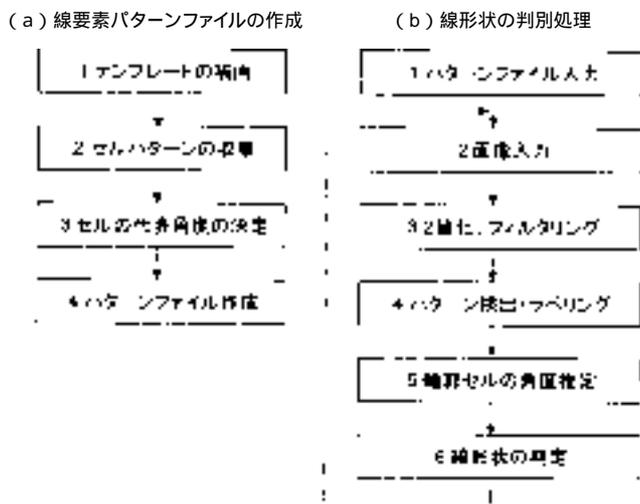


図6.13 画像処理手順

Fig. 6.13 Procedure of image processing.

対応する代表角度を決めておき、線の傾き角度の検出用として用いた。

(2) 画像処理手順

本方式の画像処理は、図 6.13 のフローチャートに示すように、(a) 事前に線要素パターンと線の形状を関係付けるためのパターンテーブルファイルの作成と、(b) 作業時に用いる形状判別処理の二つに大別される。(a) では、モニタ画面内における種々の形状の直線と円弧のテンプレートの描画、セルの走査による画素パターンの収集と番号付け、角度セルの検出と代表角度の決定、及び線要素パターンファイルの作成の各処理を行う。

(b) では、まず上述の線要素パターンファイルを入力して初期条件を設定する。次にカメラから画像を入力し、2値化とフィルタリングによって目標物を抽出する。得られた2値画像について、セル走査により線要素パターンを検出するとともにラベリングを行う。それらの結果をもとに、輪郭各部の角度セルから平均角度を求め、輪郭全体の角度分布の特徴から線の形状を判定する。この後に物体の全体形状に関する判別処理が必要になる。農作業時の画像処理では ~ を繰り返す。

(3) 適用例

1) 線要素パターンテーブルの作成例 横×縦が 640 × 400 画素の15インチモニタ画面内では1セルが約 1mm 四方で表されるので、テンプレートの作画条件は、寸法が約 20 画素以上で輪郭が滑らかな物体を対象に表 6.1 のように設定した。作画にあたっては、各傾きの直線は長ささと幅をとともに 1 / 10 画素刻みとして式 (6.1) で、また各半径の円弧は中心角を 1 / 10 度刻みとして式 (6.2) で、それぞれ浮動小数点計算のあと整数化して x, y の座標値を算出した。一本の直線または円弧を描画するたびにセル単位の走査を実施し、パターン形状を

表 6.1 線要素パターンテーブルの作画条件

Table 6.1 Drawing conditions for a pattern table of line elements.

形状	項目	条件	備考
直線	長さ	80 画素	角度パターン
	太さ	1 ~ 5 画素	
	傾き	0 ~ 360° (1 ~ 60° 間隔)	
円弧	半径	10 ~ 180 画素 (10 画素間隔)	
	太さ	1 ~ 5 画素	
	中心角	360°	

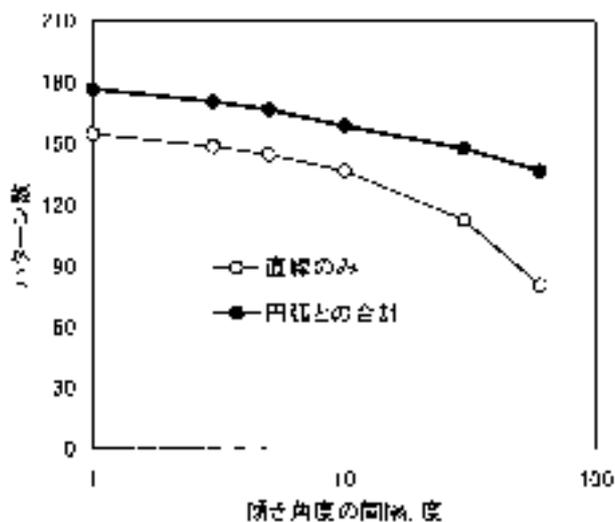


図6.14 直線の傾き角度間隔とパターン数の関係

Fig. 6.14 Relationship between angle intervals of line slopes and number of patterns.

9次元の配列データとして検出し番号付けを行った。その際1セル当たりの線の構成画素数が3~6のセルは角度セルとみなして代表角度を調べた。なお、画面上x軸を右向き、y軸を下向きにとり、直線の傾きは水平から反時計回りの角度で表した。

直線:

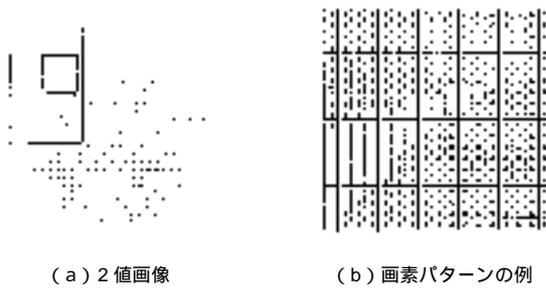
$$\begin{aligned} x &= x_0 - L \cdot \cos \theta - t \cdot \sin \theta + 0.5 \\ y &= y_0 + L \cdot \sin \theta + t \cdot \cos \theta + 0.5 \end{aligned} \quad (6.1)$$

円弧:

$$\begin{aligned} x &= x_0 - r \cdot \cos \theta + 0.5 \\ y &= y_0 + r \cdot \sin \theta + 0.5 \end{aligned} \quad (6.2)$$

ここで、 x_0, y_0 は中心座標、 L は長さ、 t は幅、 r は半径、 θ は傾き角度、 ϕ は中心角。なお、単位は、長さが画素、角度がラジアンである。

その結果パターン数は、図 6.14 に示すように直線の傾き角度の間隔を狭く設定するほど多くなり、その間隔が 5° 以下ではほぼ飽和状態になった。そのときのパターン数は円弧テンプレートとの合計で 162 個、角度セル数は 110 個であった。角度セルの代表角度は約 23° の倍数



(a) 2値画像

(b) 画素パターン例



(c) パターン番号

(d) セルの角度

(e) 3×3セルの平均角度

図 6.15 2値画像の処理例

Fig. 6.15 An example of image processing on binary images.

で表されるものが多く、円周を 16 等分した角度 (22.5°) に近似した。なお、パターン数には各直線の末端パターンも含まれている。これらの結果より、線要素パターンテーブルは、直線の角度間隔を 5° にした場合について、各セルのパターンに番号と代表角度を対応させて作成した。

2) 作画画像の処理例 図 6.15 に作画画像の処理過程を示す。同図 (a) の長方形は式 (6.1) で長さ 160 画素、幅 15 画素、傾き 20° として、円形は式 (6.2) で半径を 50 画素として、それぞれコンピュータ内部で描画したものである。

同図 (b) は (a) の小枠内のパターン状況であり、図中の数字は当該画素が画像領域の構成要素であることを示す。輪郭付近では、パターンテーブルに規定された角度セルよりも、角度の不明確なセルの方が多くなった。輪郭の傾きはこれらのセルが連結した状態で表される。

同図 (c) ~ (e) は各領域の輪郭セルである。それらの抽出は、セル当たりの線構成画素数が 1 ~ 8 個のセルと隣接するセル、及びセル内の全画素が線構成要素の場合は少なくともセルの一边が非画像領域に接するものという基準で行った。

同図 (c) の数値は輪郭セルのパターン番号であり、番号 7 はセル内の画素が全て線構成要素である。長方形と円弧の交差部分あるいは長方形の辺同士との交差部分では、該当するパターン番号がないため図には表示されず空白になっている。

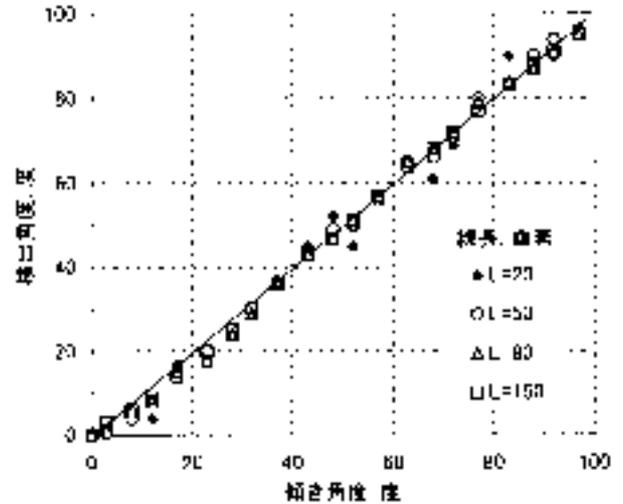


図 6.16 直線の傾き角度の検出結果

Fig. 6.16 Results of detection on line slope.

同図 (d) は輪郭付近の各セルの角度を表す (単位は $[\]^\circ$, 180 は 0° を意味する)。各値は、上述のような輪郭セルのパターン状況を考慮し、同図 (c) の小枠で示すように各セルの近傍 3×3 セルで作られるパターンを角度セルのパターンにあてはめて求めた。長方形の斜辺部分を見ると、各セルの検出角度は $0 \sim 28^\circ$ で実際の傾きとの差が大きい。しかし、さらに各セルの近傍 3×3 セルの値を平均する (小枠で例示) と同図 (e) のようにほぼ 5° 以内の誤差に収まった。円弧についても同様であった。

以上のような操作を輪郭全体に実施して角度変化を調べた結果、長方形の斜辺部分は直線、円の輪郭は円弧と適正に判別された。

(4) 考察

1) 線の形状要素の検出精度 線の主な形状要素である直線の傾き角度、円弧の接線角度及びその曲率半径に関する検出精度は次のようであった。

(射) 直線の場合 その傾き角度の検出精度は、式 (6.1) で長さ 20 ~ 150 画素、幅 2 画素の直線を 3° から 98° までほぼ 5° おきに描画し、 3×3 セルのパターンから代表角度を求め、各長さに対する平均角度を算出した。結果を図 6.16 に示す。誤差は、長さ 20 画素のとき全体的にほぼ 5° の範囲に収まったが、傾きが 50° 及び 70° 付近で $7 \sim 8^\circ$ になった。これは線の末端がセル内で中途となって角度計算に影響を及ぼしたためである。そのため傾き角度の検出では最低 6×6 セル程度の範囲が必要である。長さが 50 画素以上では誤差がさらに小さくなる傾向にあり、全体的にみると直線の傾きの検出精度は長さ 20 画素以上について約 5° である。

(捨) 円弧の場合 接線角度の検出精度は、半径 30 ~ 120 画素の場合について、接線角度 $15 \sim 165^\circ$ の範囲で周長約 6 セル分の円弧を 15° 間隔で順次描画し、図 6.15

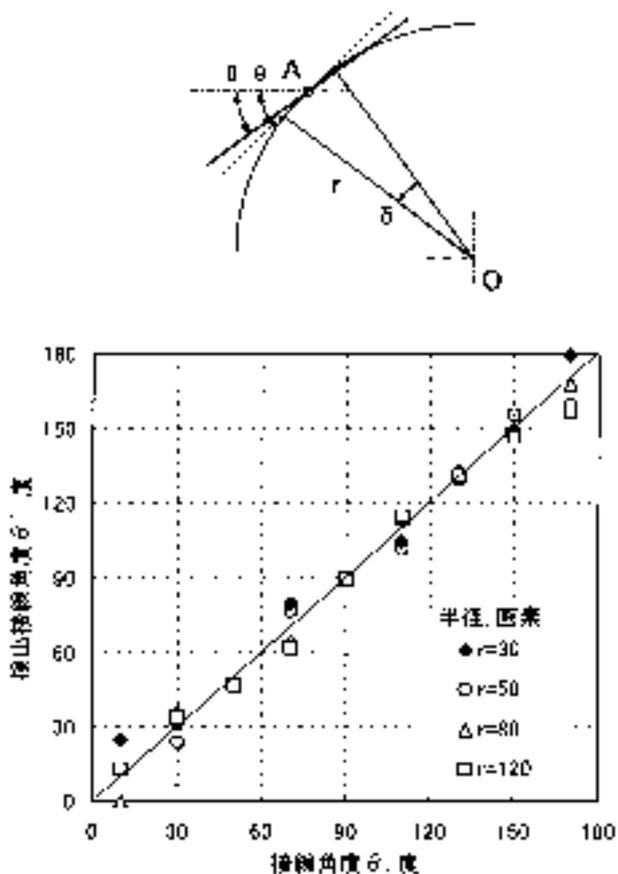


図6.17 円弧の接線角度の検出結果

Fig. 6.17 Results of detection on tangent angles of arc.

(e)と同様に 3 × 3 セルの平均角度を求める方法で調べた。その結果は、図 6.17 に示すように、半径が小さいほど誤差が大きくなる傾向がみられたが、いずれの半径でもおおむね 5° 以内の誤差範囲にあった。

次に、曲率半径は、半径 30 ~ 160 画素、中心角約 5 ~ 110° の範囲で、円弧の両端で検出された接線角度と両座標間の弦長 s から式 (6.3) で算出した。曲率半径を r', 中心角を θ とすると、

$$r' = s / \{2 \cdot (1 - \cos \theta)\} \quad (6.3)$$

ここで、 θ_1, θ_2 は円弧両端の接線角度。

その結果を図 6.18 に示す。 θ を横軸に、計算による曲率半径と円弧の原半径との比 (半径比) を縦軸にとって原半径別に表した。半径比は、 θ が約 60° 以下では 1 の上下に散らばりが大きい。中心角が比較的小さい円弧では接線角度の誤差が小さくても曲率半径の算出に対する影響は大きくなった。 θ が 80° 以上ではいずれの半径でもほぼ 0.9 ~ 1.1 の範囲に収まった。計算精度は約 10% であった。

2) 果実画像の処理例 実際のビデオカメラ画像に対する本手法の適用性を見るため、収穫期のリンゴ園で撮影した逆光状態の果実画像の処理例を図 6.19 に示す。処理方法は、カラーの原画像 (同図 (a)) に対し RGB

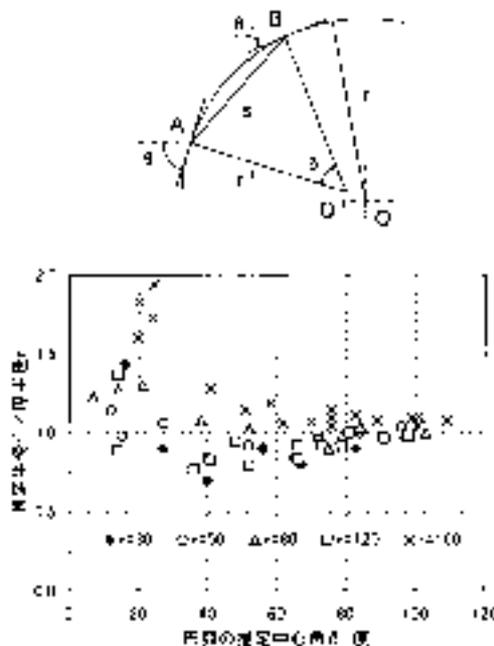


図6.18 円弧の曲率半径及び中心角の推定

Fig. 6.18 Estimation of radius curvature and central angle.

の各信号を移動平均後、輝度 (256 階調) のしきい値 100 以下をアクティブ (黒色で表示) とする 2 値化を行い、以後前述の処理手順にしたがって輪郭セルの角度を検出した。

同図 (b) は抽出された輪郭の一部であり、輝度の高い葉の部分が消失したが、果実と枝の輪郭は原状に近い。各部の角度は同図 (c) のように、おおむね妥当な結果が得られた。ただし、ノイズ等の影響で不良の箇所もあり、線の形状判別のためにはさらに検討が必要である。

なお、処理手順 から までの所要時間は、パソコン (CPU: インテル 486ODP, 50MHz, C 言語) で約 8 秒、各処理の時間割合は、 のファイル入力 (640 × 400 × 3 Byte, EMS メモリから) が 25%, が 34%, のパターン検出が 12%, ラベリングが 22%, が 7% となり、ファイル入力時以外では 2 値化とラベリング処理の割合が高かった。

以上のように、モニタ上の作画像に対する基礎的な検出精度はほぼ十分であり、また実際のビデオ画像にも適用可能なことが分かった。線の交差部分の処理対策、ノイズ対策、2 値化・ラベリング処理の高速化が今後の課題である。

4. 収穫マニピュレータの位置制御への応用

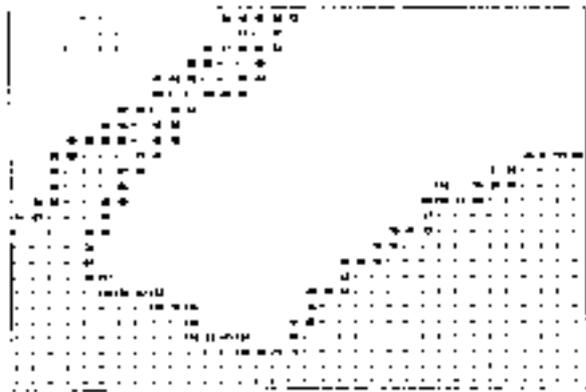
本節では、本研究のステレオ視法を用いて三次元空間内のいくつかの視点座標値を取得し、それらの視点座標と基本動作パターンを利用して収穫マニピュレータの接近動作を行う制御方式について考察するとともに、その接近精度を数値シミュレーションによって検討した (81)。



(a) 果実原画像



(b) 輪郭の検出結果 (一部)



(c) 輪郭セルの平均角度の例 (単位: 度)

図 6.19 リンゴ果実画像の処理例

Fig. 6.19 An example of image processing on apple images: (a) original image of apples, (b) result of detection on the contour (a part), (c) examples of average angle on cells of contour.

(1) 視点座標と基本動作パターンを利用した制御則

収穫機本体が静止しているとき、マニピュレータの動作空間は、その自由度によって決まる一定の範囲内に限定される。そこで、その範囲内に予めいくつかの位置を定め(所定点と呼称)、基点からそれぞれの点に到達するために必要なマニピュレータ各部の動作データ(各関

節の回転角度、速度、トルクなどのデータ)をまとめて基本動作パターンとして記憶させておき、目標点への動作制御量を計算で求める際には、その近傍にある所定点への基本パターンを利用する、という制御方法が考えられる。このようなフィードフォワード的制御とフィードバック制御の組合せが採用されると、マニピュレータの運動に関する方程式を逆計算によって解く場面が少なくなるので、制御計算を容易かつ高速に行うことが可能になると予想される。

1) 視点座標と所定点の設定 ステレオ視システムが収穫機本体に装着され、カメラヘッドが上下、左右に回転できる状態のとき、所定点の位置座標は、カメラヘッドからの距離 r 、視線の上下角度 θ 及び左右角度 ϕ の視点座標で表される。基本動作パターンを予め与える所定点は、数が多いほど目標点との相対的距離が短くなり利用上有利であるが、一方メモリ量が多数必要になる。ここでは所定点を、視点座標の各変数がそれぞれ一定間隔となる平面(曲面)の交点上に定め、所定点と目標点の位置関係がカメラヘッドからの距離と角度で比例的に表すことができるように設定する。

2) 目標点の動作パターンの計算方法 目標点の動作パターンを簡単に求めるには、図 6.20 のように目標点 P を囲む 8 個の所定点(1 ~ 8)を一組とし、各点のデータと位置関係をもとに比例計算で補間を行えばよい。すなわち、まず $P(r, \theta, \phi)$ を通る r 面と、所定点 1 及び 4 を通る r_1 及び r_4 面との交線上に投影した点 P' 、 P' の動作パターンを求め、次にそれらと P の方向の比例関係より P の動作パターンを算出する。点 P の動作パターンは、 r_1 面上で r_1 と動作パターン因子(例えばある関節の回転角度 α)の関係が図 6.21 のように三次元上で平面構造で表されれば、所定点 1, 2, 5 及び 6 の値より比例計算で求められる。点 P' についても同様である。したがって、目標点 P に関する動作パターンの 1 因子 α の計算式は次のようになる。

$$\begin{aligned} \alpha &= B_1(r - r_1)(\theta - \theta_1)(\phi - \phi_1) \\ &+ B_2(r - r_1)(\theta - \theta_1) \\ &+ B_3(\theta - \theta_1)(\phi - \phi_1) + B_4(r - r_1)(\theta - \theta_1) \\ &+ B_5(r - r_1) + B_6(\theta - \theta_1) + B_7(\phi - \phi_1) \\ &+ \alpha_1 \end{aligned} \tag{6.4}$$

ここで、 r, θ, ϕ 及び α の添字は所定点番号を示す。また係数 $B_1 \sim B_7$ は次式で表される。

$$\begin{aligned} B_1 &= (r_7 - r_8 - r_6 + r_5 - r_3 + r_4 + r_2 - r_1) \\ &\quad (r_2 - r_1)(\theta_5 - \theta_1)(\phi_4 - \phi_1) \\ B_2 &= (r_6 - r_5 - r_2 + r_1)(r_2 - r_1)(\theta_5 - \theta_1) \\ B_3 &= (r_8 - r_4 - r_5 + r_1)(\theta_5 - \theta_1)(\phi_4 - \phi_1) \\ B_4 &= (r_3 - r_4 - r_2 + r_1)(r_2 - r_1)(\phi_4 - \phi_1) \\ B_5 &= (r_2 - r_1)(r_2 - r_1) \\ B_6 &= (r_5 - r_1)(\theta_5 - \theta_1) \\ B_7 &= (r_4 - r_1)(\phi_4 - \phi_1) \end{aligned} \tag{6.5}$$

式(6.4)及び(6.5)は他の動作パターン因子につい

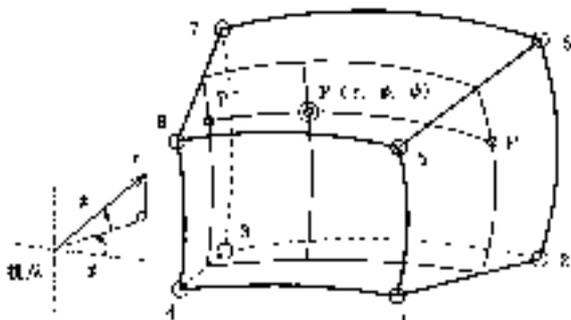


図6.20 目標点と所定点の位置関係

Fig. 6.20 An illustration of an objective point and fixed points.

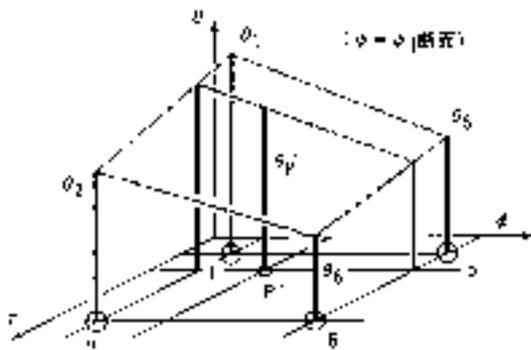


図6.21 動作パターン構造の模式図

Fig. 6.21 An illustration of a pattern structure of action.

ても同様に成り立つ。

ところで、式(6.4)の各係数は所定点1~8の視点座標と動作パターンで決まる定数なので、これらの係数を所定点(例えば点1)に関する特性値とみなし予め算出してメモリに格納しておけば、目標点の動作パターンは、その視点座標に最も近い所定点(点1)を見つけ出すことにより容易に計算できるようになる。

3) 制御アルゴリズム マニピレータ先端の接近動作に関する本方式の制御アルゴリズムをまとめると次のようになる。まず、先端の動作空間内に視点座標に基づく所定点を定め、各点について基本動作パターンを決定し、式(6.4)の係数を算出してメモリに格納する。次に、目標点の視点座標を入力し、その付近の所定点を探して式(6.4)で動作パターンを計算する。さらに、先端の現時点の視点座標を入力し、よりその動作パターンを求める。それぞれの動作量の差から先端を目標点まで移動させるための所要動作量を求め、ハンドの各関節の駆動命令を出力する。なお、移動経路(軌道)上に障害物などがある場合には中継点を設定し、その点までの動作パターンを算出して使用する。

(2) 数値シミュレーションによる接近精度の検討

本方式による制御計算では、所定点8個で1ブロックを構成して利用するので、各所定点間の距離、目標点と

表6.2 供試マニピレータの仕様

Table 6.2 Specification of an experimental manipulator.

構造	関節型
動作自由度	3
胴体旋回範囲	115°
上腕回転範囲	241°
制御方式	ON - OFF制御

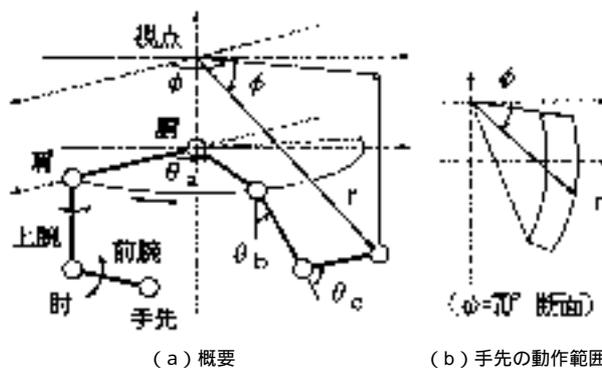


図6.22 供試マニピレータの動作概要

Fig. 6.22 Outline of action on an experimental manipulator: (a) outline of action, (b) action range of a fingertip.

の位置関係、動作パターンの様式などによって式(6.4)の結果が影響を受けることになる。そこで、所定点の設定状態と接近精度に関する特性を、簡易マニピレータを対象にした数値シミュレーションによって検討した。

1) 簡易マニピレータの動作概要 マニピレータの主な仕様を表6.2に示す。先端の移動の自由度は、肘関節部分を駆動可能にしたため、胴、肩及び肘の3である。各関節は直流モータのON - OFF制御で独立かつ同時に駆動できる。動作概要を図6.22(a)に示す。カメラヘッドは胴軸上肩面から20cmの位置への装着を想定した。マニピレータ先端の動作範囲は、視点座標で $r = 13 \sim 42 \text{ cm}$, $\phi = -70 \sim 0^\circ$, $\psi = 50 \sim 130^\circ$ である。一例として $\psi = 70^\circ$ 断面での動作範囲は同図(b)のようになる。

2) 数値シミュレーションの方法と計算条件 目標点に対する先端の接近精度は、基点から目標点に到達するために必要な各関節の回転角度を本方式で得ることにより先端位置を算出し、その位置と目標点との直線距離を接近誤差として表す方法で求めた。なお、供試マニピレータ先端のr方向の動作範囲が、同図(b)のように他の方向に比べて狭く、所定点を等間隔に設定するのが難しいため、不等間隔でも取り扱えるように式(6.4)を以下のように修正して使用した。

$$= \{B_{11}(r - r_8) + B_{12}(r - r_5) + B_{13}(r - r_4) + B_{14}(r - r_1)\} \{ \dots \} + \{B_{21}(r - r_5) + B_{22}(r - r_1)\} \{ \dots \} + B_{23}(r - r_1) \{ \dots \}$$

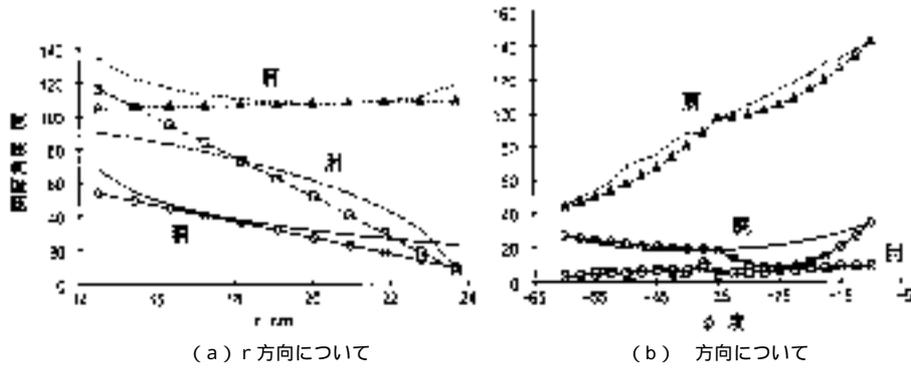


図6.23 各関節角度の変化状態の例

Fig. 6.23 An example of change conditions of each joint angle: (a) in the direction of r, (b) in the direction of ϕ .

$$\begin{aligned}
 & +\{B_4(r-r_4)+B_4(r-r_1)\}(\phi - \phi_1) \\
 & + B_6(r-r_1)+B_6(\phi - \phi_1)+B_7(\phi - \phi_1)+ \phi_1
 \end{aligned}
 \tag{6.6}$$

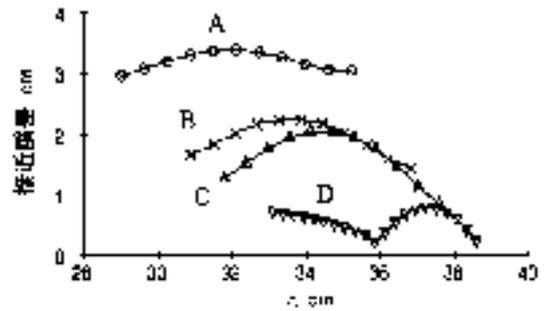
ここで,

$$\begin{aligned}
 B_0 &= (r_7 - r_8)(\phi_5 - \phi_1)(\phi_4 - \phi_1) \\
 B_{11} &= (r_7 - r_8)/B_0, & B_{12} &= -(r_6 - r_5)/B_0 \\
 B_{13} &= -(r_3 - r_4)/B_0, & B_{14} &= (r_2 - r_1)/B_0 \\
 B_{21} &= (r_6 - r_5)(r_6 - r_5)(\phi_5 - \phi_1) \\
 B_{22} &= -(r_2 - r_1)(r_2 - r_1)(\phi_5 - \phi_1) \\
 B_3 &= (r_8 - r_4 - r_5 + \phi_1)(\phi_5 - \phi_1)(\phi_4 - \phi_1) \\
 B_{41} &= (r_3 - r_4)(r_3 - r_4)(\phi_4 - \phi_1) \\
 B_{42} &= -(r_2 - r_1)(r_2 - r_1)(\phi_4 - \phi_1) \\
 B_5 &= (r_2 - r_1)(r_2 - r_1) \\
 B_6 &= (r_5 - \phi_1)(\phi_5 - \phi_1) \\
 B_7 &= (\phi_4 - \phi_1)(\phi_4 - \phi_1)
 \end{aligned}
 \tag{6.7}$$

計算条件は、所定点ができるだけ少ない状態での接近精度をみるため、r方向の動作範囲を1~2分割、及びφ方向を2~8分割した場合(所定点数で18~243個、1分割区のrの長さ7~3.5cm、及びφの角度30~7.5°)について、各分割区の境界点に所定点を設定し、所定点間を10等分した目標点について接近誤差を求めた。

3) 数値計算結果及び考察 本方式では動作パターンの様式が所定点間で図6.21のような構造にあることを前提にしている。そこで実際の構造状況を見るため、視点座標から関節角度を直接逆計算で求めた。その例を図6.23に示す。同図(a)はφ = -22.5°, φ = 75°でr方向にみた場合で、実線が胸、短破線が肩、長破線が肘の各関節角度を表している。同図(b)は同じ断面について、rの最大限界部分(同図(a)の右端に相当)をφ方向にみた場合である。なお、○, ×, □印を付した線は本方式による場合で、分割数が[r方向, φ方向]=[1, 2, 2]のときの結果である。

両図から、この面ではr, φに関する胸関節の動作パターン構造はやや凹面形でr方向に下降傾向、肩関節もやや凹面形でφ方向に上昇傾向、肘関節では凸面形で



A:分割数[1.2.2], B:同[1.3.3], C:同[1.4.4], □はB,8

図6.24 r方向の接近誤差の分布例

Fig. 6.24 Distribution of approach errors in the direction of r.

r方向に下降の状態にあることが分かる。このように実際の動作パターンが平面構造とはやや異なるため、本方式による関節角度の値は所定点の設定数が少ないほど適正值から離れる部分が多くなる。例えば分割数が[1, 2, 2]の場合、胸及び肩関節では上方ブロックの外縁付近ほど逆計算値との差が大きくなり、また肘ではブロック中央付近にも差の大きい部分がみられた。

マニピレータ先端の接近誤差は、上述のような適正值との差が各関節角度の累積された結果として現れる。図6.24は4通りの分割条件について、それぞれ最右下側のブロック中央を通るr方向の線上に目標点をとった場合の接近誤差の分布例である。なお、各分割条件によってブロックの大きさが異なり、r方向の動作限界が変化するため、同図のようにrの始点と終点の値は異なっている。同図で接近誤差は、分割数[1, 2, 2]の場合が3~3.5cmで最も大きく、分割数が[2, 8, 8]の場合には、最大が0.8cmとなった。接近誤差は、r方向だけでなく、φ方向の分割数が増すことによっても小さくなった。

また同図では、ほぼ所定点間の中間付近で接近誤差が最大になる傾向がみられたが、これは、図6.24のように肘関節の誤差が凸形になっている影響のためである。

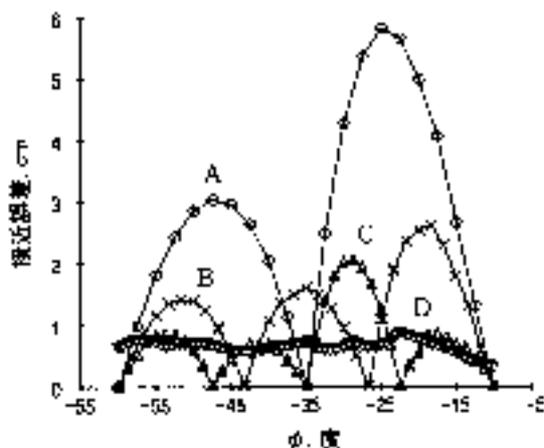


図6.25 方向の接近誤差の分布例

Fig. 6.25 Distribution of approach errors in the direction of .

分割条件によっては、 r 方向に関する接近誤差分布の傾向が ϕ の値で異なり、 ϕ が 0 に近いほど中央付近の誤差が減少し、両端部分の誤差が増大する傾向の場合もみられた。

図 6.25 は 方向の接近誤差の分布例で、対象部分は各分割条件とも動作範囲中央よりやや右側で最外側のブロックである。接近誤差は、条件 A の分割数 $[1, 2, 2]$ の場合、上下ブロックとも中央部分で最大になっているが、特に上方側のブロックでは約 6cm と極めて大きな値となった。その理由は、 ϕ が 0 に近いほど、胴関節の角度が r の増加とともに二次曲線的に変化して凹面形の傾向が強くなるため、 r 方向の分割数を 1 とした本方式の結果ではその計算構造上の差がとくに増大したためである。方向の分割数が増えると接近誤差は減少するが、 ϕ が 0 に近い領域では上述の理由からその減少割合が小さい傾向にあった。

図 6.26 は、最下部外方のブロック中央部分を通る方向の線上で接近誤差を調べたものである。方向に関する所定点間の変化は各関節とも直線になるため、同図のように接近誤差が一定になっている。誤差の大きさは、分割数 $[1, 2, 2]$ の場合同図で約 3cm であるが、同じ分割数でも上方側のブロックでは最大約 6cm で一定となった。なお、分割数が $[1, 4, 4]$ と $[2, 8, 8]$ の場合、誤差は約 0.8cm とほぼ同じ値になり、分割数 $[1, 2, 2]$ の約 $1/4$ であった。なお、いずれの場合も 3 関節の中では胴関節の角度誤差が先端の接近精度に大きな影響を及ぼす状況が多かった。

以上のように、本方式による制御計算では、動作パターンの様式が曲面形的な傾向の強い部分で作成されたものほど、分割数の多少が接近誤差に大きく影響することが分かった。対象にした簡易マニピュレータの場合、分割数が $[2, 8, 8]$ の場合にはほぼ動作範囲全域にわたり誤差が 0.8cm 以下であった。

実際の収穫マニピュレータでは r の動作範囲を 0.5m

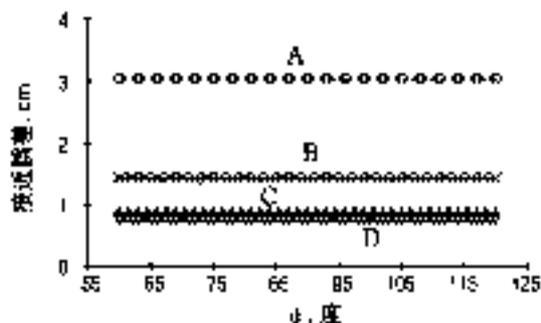


図 6.26 方向の接近誤差の分布例

Fig. 6.26 Distribution of approach errors in the direction of .

$\sim 1.5\text{m}$ 程度に設定する必要がある、接近誤差はさらに大きくなると予想されるので、分割数を増し所定点数を多くするなどの対策が必要になる。ただし、 1 個の所定点に必要なメモリ量は動作パターン因子の個数に式 (6.6) の係数の個数を掛けた分になるので、全体の所要メモリ量が急激に増加する。

したがって、本方式の利用にあたっては、所定点数を減らしつつ接近精度を確保するため、予め動作パターンの様式を調べ曲面的傾向の強い部分については分割数を増し、平面的傾向の部分では減らすなどの対策が必要になる。

本方式の実用化に関する課題としては、上述の所要メモリ量のほか、動作パターン計算のための所定点の探索、動作因子の相互の影響、マニピュレータの姿勢や軌道生成の決定方法などが挙げられる。

5. 要約

本研究のステレオ視法による立体形状の計測について、ルービックキューブとリンゴ果実を供試して実験を行った結果、照明条件の影響は、合成カラー画像ではあまり見られないものの、距離画像では濃度勾配が小さい条件ほど誤対応による誤差の増加傾向になって現われた。果実表面の輝度や色調に 20 以上の濃度勾配があるときにはその影響が少なく利用可能なことが分かった。誤対応対策としては、RGB 濃度分散の平均計算範囲を主要な輪郭幅分以上に取れば有効な場合が多かった。しかし、その範囲を広くするほど立体物表面の凹凸形状が平均化されることになるので、その設定方法についてはさらに検討する必要がある。

果実などの物体形状や姿勢を輪郭の形状から判定するため、デジタル画像における線の描画形式を 3×3 画素の線要素パターンで表して利用する画像処理方式について検討した。線要素パターン数 162 個、角度セル数 110 個とした場合、線の形状要素の検出精度は、長さ 20 画素以上の直線の傾きについて約 5° 、半径 30 画素以上の円弧の接線角度について 5° 、中心角 80° 以上の曲率半径について約 10% であった。果実画像の処理結果例より、輪郭各部の角度はおおむね妥当な値の得られることが分

かった。実用化のためにはノイズ対策や2値化処理等の高速化が必要である。

収穫マニピュレータ各部の関節における所要動作量を、三次元視点座標と基本動作パターンを利用して算出する制御アルゴリズムと、それによる接近精度を検討した。その結果、3自由度の簡易マニピュレータを対象にした数値シミュレーションでは、マニピュレータ先端の動作範囲を視点座標の r , θ , ϕ 方向にそれぞれ 2, 8, 8 個に分割し、所定点数が 243 個の場合、接近精度は約 0.8 cm となった。実際のマニピュレータでは動作範囲がより広範なため誤差がさらに拡大すると予想されるが、その接近精度を許容範囲に収めるためには、所定点間の動作パターン特性に応じて、所定点の位置、間隔、及び個数を決める必要があることを示した。

第7章 総 括

リンゴ園の果実を機械で自動的に収穫するためには、対象とする果実を周囲の物体から識別し、それらの相対的な位置関係、及び収穫機を基点とする三次元位置座標を把握しなければならない。両眼ステレオ視は、そのような屋外での三次元情報獲得に有効な計測法である。しかし、ステレオ対応問題の実用的な解決策がまだ見出されていないため、収穫機械に搭載して自動化の実現のために利用することは依然困難な状況にある。

本研究の目的は、果実の自動収穫を前提にした機械化を図るため、果実とその周囲の環境に関する三次元視覚情報を入力する手段として両眼ステレオ視による計測手法を開発し、その計測システムを確立することである。そのため、主要な4課題 (a)ステレオ視システムの機械的距離特性、(b)両眼ステレオ視に関する新たな測定原理の考案、(c)ステレオ対応問題の分析と対策、(d)主な画像入力因子が計測精度に及ぼす影響に的を絞って検討を行った。さらに、本研究の手法を果実の形状計測と収穫マニピュレータの位置制御に応用する場合について考察を行った。

(1)ステレオ視システムの試作

両眼ステレオ視法は、2台のカメラで撮影された一対の画像をもとに三次元位置を計測する方法である。本研究の実験に供試するため試作したステレオ視システムは、2台のCCDカラービデオカメラ、ノートパソコン、キャプチャPCカード、パン・チルト式カメラ台、及びカメラ画像入力切替器で構成した。ビデオカメラは、38万画素のCCD素子撮像面を持ち、画像信号出力がNTSC方式で、撮影操作をパソコンで制御できる構造のものとした。

リンゴ園で果実の自動収穫を行う際に、撮影画像の処理によって果実を探索し識別できるようにする必要がある。そこで、対象果実を試作システムの正面位置に所定範囲の大きさで撮影できるように、カメラ部を上下左右

に回転するためのパン・チルトと望遠用ズームの両機構、及びそれらを制御するカメラ制御機構を装備した。カメラ制御機構の操作は、パソコンから手動またはプログラムによる自動でRS232Cインターフェースを介してVISAネットワークで行えるようにした。

試作システムの距離測定精度は、各カメラレンズ系の撮像特性及び距離特性と、ステレオ光学系の構成状態に大きく影響される。リンゴ園では果実が広い樹冠の内外に存在するため、その測定精度はステレオ光学系のわずかな誤差によって急激に低下し、遠距離にあるものほどその影響が著しく現れる。そのため、ハードウェア面に関するキャリブレーションを次の方法で綿密に行った。

まず、試作システムの左右のビデオカメラを個別に、撮影距離とズーム値を条件にして距離特性実験を行い、回帰分析により、レンズ収差の補正式、カメラの焦点距離と合焦距離の関係、ズーム値と焦点距離の関係、仮想レンズ中心の位置式、カメラ撮像面サイズに対するモニタ画面サイズのスケール係数を求めた。次に、それらの諸関係と、左右各カメラ光軸の交差角の補正、及び左右両画像の画素単位の対応づけに留意して試作システムの距離式を校正した。その結果距離誤差は、1 ~ 4.5 m 間でおおむね $\pm 2\%$ の範囲に入り、機械的に十分な精度を持つことを確認した。

(2)左右画像合成によるステレオ視計測法の開発

両眼ステレオ視に関する従来の測定原理は、左右のカメラの撮影画像について同一物体像の対応づけを行い、三角測量の原理で距離を算出するものである。そのため、はじめに左右両画像の対応づけが解決できなければ距離計算に進むことができない。対応づけ解決のための制約条件として通常、Marrの3制約とエピソード拘束が利用されるが、ステレオ対応問題に対しては十分でない。

本研究では、そうした問題を打開するため、ステレオ光学系の物理学と、人間視覚系に関する視神経生理学や心理学の研究成果を考慮して、両眼ステレオ視の計測に関する新たな原理を考案した。

その測定原理は、左右一対の画像を奥行き方向の空間断面ごとに重ね合わせたとき、その断面と交差する物体像が鮮明になることに基づいている。すなわち、まず注視操作によって探索空間内の距離断面を決め、その断面に関する左右画像の合成像を作成する。次にその合成像の鮮明さを検出して比較することにより、断面上での物体の有無が判明する。それによって物体の位置と距離に関する情報を直ちに得ることが可能になる。

合成像の作成は、物体像の重なり位置ずれを色ずれとして容易に判別できるようにするため、合成画像における偶数行と奇数行を、それぞれ左画像の偶数行と右画像の奇数行から交互に選んで配列する方式にした。これにより、左右画像の物体像が適切に重なったとき水平間の色ずれが最小で鮮明なカラー画像となり、位置ずれ

が増加するに従って水平間の色ずれが増して画像の鮮明さが低下する。

各画素の鮮明さの指標には、上下方向の RGB 濃度分散を用いた。上下方向の色ずれの大小が濃度分散の大小で表され、色ずれが最小のときその値が最小になる。ただし、重なりに広がりがある場合や形状が局部的に類似する場合などには、重なりが不適切なときにもその値が小さくなるので、各画素について 8 方向の画素で平均分散を算出し、大域的な比較・判別ができるようにした。

本手法の基礎的性質を調べるため、主要因子として焦点距離、撮影距離、平均分散の比較範囲、視差刻み、対象物幅などを取り上げ、赤色円板を対象に実験的に検討した。その結果、円板像全幅分を平均分散の計算範囲に設定すれば、種々の条件下でほぼ適切な合成カラー画像と距離画像の得られることが分かった。さらに、収穫期のリンゴ園で赤色系果実を対象に本手法の検証実験を行った結果、撮影距離約 2.2m で誤差が 4 % の範囲内にあり、本手法が果実の距離計測に適用可能であることを確認した。

(3) ステレオ対応問題画像の分析と対策

リンゴ園で撮影した果実画像では、類似果実の並びや重なり、枝葉の陰になって生じる隠れや果実像の変形など、いわゆる対応問題画像ないしそれに類似した画像が頻繁に見られる。ステレオ視の利用にあたっては、そうした対応問題への解決策または対処法が必要になる。

本研究における測定原理は、視差距離断面ごとに左右画像を合成して中央画像を作成し、その中から鮮明な物体のみを検出するので、合成像における誤対応の機会が減少し、対応問題の発生自体がかなり抑制されると予想される。しかし、現行の TV カメラの撮影方式では、上述の原理とは異なり、被写空間全体が一括して入力されるので、対応問題画像では誤対応によって鮮明な偽像が発生しやすい。そのため、視差距離断面の適切な対応づけと偽像の発生を抑制する対策が講じられなければならない。

本研究では、対応問題画像の典型例として一対の円板が同じエピポーラ線上にあり、それらの投影像の色と形状が全く同じ場合を取り上げ、偽像の発生とその性質を調べた。それとともに人間の視覚系の視交叉を参考に、視差距離断面の対応づけと偽像の抑制対策のため、左右画像内の注目範囲をそれぞれ中央で左右半分ずつに分け、同じ側の視野同士で合成する同側視野合成の手法を考案して検討した。

その結果、左右の同側視野における特徴色の増減傾向を調べることで、注視距離と対象物との前後関係を把握することができ、左右画像に関する視差距離断面の対応づけを適切に行えることが分かった。また、同側視野合成では、偽像の発生位置が同側視野共通領域の外側が境界部分になるため、その RGB 濃度平均分散が真像よりかなり大きくなって判別が可能となり、合成画像で

の偽像の出現が抑制された。

上記の手法を 4 個の円板の同順並び画像と、葉状物による隠れ画像に適用する実験を行い、視差距離断面の対応づけと偽像の抑制が可能であることを確認した。さらに、リンゴ園で撮影した種々の画像の中から果実の同順並び画像 16 組、重なり画像 12 組を選び本手法を適用した結果、視差距離断面の対応づけは、同順並び画像で ± 2 視差刻み分以内が 90 %、重なり画像で 80 % となり、同側視野合成によって約 5 % の精度で距離の推定が可能であった。

(4) 画像入力条件がステレオ視計測精度に及ぼす影響

本研究のステレオ視計測手法の特色は、対象物の合成カラー画像と距離画像を同時に取得できるところにあり、果実とその周囲物体に関する三次元情報の収集を適切に行うことが可能になると予想される。しかし、屋外でビデオカメラによって撮影された画像は、自然光の照射条件や撮影条件などの影響が大きいので、それらが本手法の画像処理で得られる距離精度にどのような影響を及ぼすかを明らかにしておく必要がある。

そこで、試作システムについて、本手法による計測誤差の発生要因を検討し、収穫期のリンゴ園で種々の画像入力条件のもとで撮影した画像を対象に、照度、果実及び撮影の各条件と距離測定の誤差要因との関係、及びそれらが測定精度に及ぼす影響を分析した。

その結果、果実像の明度は、逆光時を除けばカメラの自動露出機能によって果実照度とほぼ比例関係にあり、果実照度が 1 klx 以下と低い場合でも 90 (35 %) 以上になることが多かった。逆光時では背景が空などのように明るい場合ほど急激に低下し、果実照度が 6 ~ 10 klx とそれほど低くない場合でも 90 以下の強逆光状態になる事例が見られた。果実像の明度と距離誤差の関係を、自然光の照射状態が直射光と散乱光 (明度 90 以上の弱逆光を含む) の場合について調べた結果、いずれの照射状態の明度においても平均誤差は概ね -3 ~ 0 % の範囲に入った。

合成画像における果実像の RGB 濃度平均分散の状況の特徴別に分類した結果、変化タイプは、頻度割合で V・U 型が約 75 % を占め、次いで N 型が 15 ~ 20 % であった。最小値レベルは 200 ~ 1,000 の割合が 70 % で最も多かった。平均分散が最小になる視差距離と実距離の差は、視差刻み分で -2 から 1 までの占める割合がほぼ 90 % 以上となった。

対象にした全画像 (ふじ 144 組、王林 42 組の計 186 組) の分析結果より、赤色系と黄緑色系の両果実に対する試作システムの適用範囲は、照度 1 ~ 90 klx のもとで逆光時を含めて果実像明度が 90 以上、果実像の重なり度合いが 0.5 以内、モニタ上の果実像幅がふじで 16 画素以上、王林で 26 画素以上であった。上記の条件範囲で供試システムの撮影距離と距離誤差との関係を整理した結果、誤差は撮影距離 1.2 ~ 3.5 m で -4 ~ 2 %、3.5 m 以上

では - 7 ~ 0 % の範囲であった。

(5) 立体形状計測と位置制御へのステレオ視法の応用
本研究のステレオ視計測法の応用として、収穫部（ハンド）で果実を把持するために必要な立体形状の計測と認識の方法、及び収穫マニピュレータを制御する場合へのステレオ視覚情報の利用について検討した。

立体形状の計測について、立方体のルービックキューブと赤色系リンゴ果実を対象に実験を行った結果、対象物表面の RGB 濃度分布が明瞭で濃度勾配が大きい場合に、合成カラー画像、距離画像ともおおむね良好で、距離誤差は 5 % 以内が多かった。ただし、対象物の領域内左右両方で類似した濃度の区域があると誤対応によって距離誤差が発生する場合が見られた。これらの結果より、本手法は果実表面の輝度や色調が一定以上の濃度勾配を持つときに利用可能であることが分かった。誤対応対策のためには、RGB 濃度平均分散の計算範囲の設定基準や鮮明さの判定指標について検討が必要である。

果実や枝の形状を判別し認識する方法は、一般に輪郭形状をもとに判定する方式が用いられるが、その処理の高速化を図るため、デジタル画像における線の描画形式を微小部分でパターン化して利用する画像処理方式を検討した。線の描画形式を 3 × 3 画素のパターンで表し、線要素パターン数を 162 個、角度セル数を 110 個として検討した結果、線の形状要素の検出精度は、長さ 20 画素以上の直線の傾きについて約 5 度、半径が 30 画素以上の円弧の接線角度について 5 度、中心角が 80 度以上の曲率半径について約 10 % であった。果実画像に適用した結果、輪郭各部の角度はおおむね妥当な値が得られた。実用化のためにはノイズ対策や 2 値化処理等を効率的に行うことが重要である。

収穫マニピュレータ先端のハンドを果実に接近させる動作制御では、一般にマニピュレータの各関節の所要回転角を逆計算で求めなければならない。そのためリアルタイム制御が困難になる事態が懸念される。そこで、逆計算によらずに、ステレオ視計測で得られた視点座標と所定点に関する基本動作パターンを利用する方式について、そのアルゴリズムを数値シミュレーションで検討した。それらの結果より、本アルゴリズムを実用規模のマニピュレータに適用する場合、その接近精度を許容範囲に収めるためには、所定点間の動作パターン特性に応じて、所定点の位置、間隔、及び個数を決める必要があることを示した。

(6) 結 論

両眼ステレオ視による計測は、ハードウェア面で本研究の使用目的に十分な距離精度能力を有することが分かった。なお、性能発揮のためには、左右各カメラ個別の距離精度要因及び諸関係の把握、各カメラ光軸の交差角の検出と補正、左右画像の画素単位の対応づけに留意することが重要である。

本研究の測定原理が従来と異なる点は、エピソード拘

束に加えて左右カメラの共通視野に関する空間拘束を考慮し、対応づけの探索範囲を注視による視差距離断面の付近に限定したことである。注視機能を備えた準能動的ステレオ視とも言える。そのため、対応づけが終了しなければ距離計算が始まらないというような事態は避けられる。ただし、現行の TV カメラ撮像方式では、左右カメラで同時に同一の視差距離断面ごとに撮像・記録することができないので、画像処理の際に左右画像の視差距離断面の不一致による誤対応で偽像が発生し誤差を生じる場合がある。また、注視距離と視差刻みの設定状態によって処理時間や偽像発生に影響が現れることがある。

ステレオ対応問題画像は、本研究の観点からすれば、左右画像の視差距離断面の不一致が発生しやすい画像であり、上述の理由から現行カメラでは根本的な解決は困難と思われる。しかし、片方の画像で特定した対象物の特徴色量を左右の同側視野で比較することにより、左右画像の視差距離断面が一致するかどうかの判定が可能であった。さらに、その付近の断面で同側視野合成を行うことにより、偽像の発生を抑制して距離測定を行うことができた。したがって、この手法を対応問題画像に関する一対策として利用することが考えられる。ただし、特徴色の分布状況によって同側視野の特徴色量が影響を受けるので、それらと注目範囲との関係をさらに検討する必要がある。

リンゴ園でのステレオ視計測による距離精度は、画像入力条件が前述した適用範囲内であれば、本研究の手法を用いることにより、ソフトウェア的にも頭書の使用目的に十分なことが分かった。その適用条件は、実用的な両眼ステレオ視システムの開発における基礎資料として利用可能である。なお、強逆光の画像に対しては本手法による処理が困難な場合が多いので、撮影時に逆光状態を検出して補正する機能が必要である。

以上のように、本研究では、リンゴ園の果実収穫における距離計測に両眼ステレオ視法を活用するため、新たな原理と手法を考案し、計測システムの開発に必要な指針と基礎的な資料の提示を行った。実用化に向けて今後検討すべき課題は、ソフトウェア面では鮮明さ指標の改良、注視距離と視差刻みの決定基準など、ハードウェア面では本研究の測定原理に対応したカメラ撮像方式の採用、高速処理のためのマルチプロセッサ化、距離分解能向上のための解像度の改善、カメラ制御機構の簡素化などである。

謝 辞

本研究の実施に当たり、終始懇篤なるご指導と本論文のご校閲の労を賜った弘前大学農学生命科学部戸次英二教授に衷心より感謝の意を表します。学位審査委員として本論文のご精査を賜った岩手大学農学部太田義信教授、山形大学農学部赤瀬 章教授、帯広畜産大学畜産学

部西崎邦夫教授に深甚なる謝意を奉げます。本研究の実験の遂行と取りまとめに当たり、貴重なご助言をいただいた弘前大学農学生命科学部張 樹槐助手に深謝いたします。また、本研究を開始して以来機会あるごとに適切なご助言をいただいた同福地 博講師に謝意を表します。本研究の開始初期の段階から種々の実験にご協力いただいた中国人留学生孫 明博士、陳 浩修士、並びに本学部生産機械学講座の卒業生各位に感謝いたします。

参考文献

- 青森県農林部りんご課：平成 10 年りんご生産指導要領，青森県農林部りんご課，1998。
- 荒木和男・田中伸宜・藤野智浩・佐藤幸男：高速三次元形状計測装置の試作．信学論 J71-D(10)：2059 2068，1988。
- 有馬誠一・藤浦建史・近藤 直・芝野保徳・山下敦：キュウリ収穫ロボットの研究（第 3 報）．農機誌 57(1)：51 58，1995。
- ATR 国際電気通信基礎技術研究所編：視聴覚情報科学．2 章，オーム社，東京，1994。
- 馬場 充・小西忠孝：3 次元形状測定高速化のための「領域分割マルチスリット光符号化法」の提案．計測自動制御学会論文集 34(8)：898 906，1998。
- BARNARD, S. T and W. B. THOMPSON : Disparity analysis of images. IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence PAMI-2 : 333 340, 1980.
- BELHUMEUR, P. N. : A bayesian approach to binocular stereopsis. Int J. Comput. Vision 19(3) : 237 260, 1996.
- 張 樹槐・高橋照夫・福地 博・寺尾日出男：果樹園作業の自動化に関する研究（第 1 報） パターン認識によるリンゴの検出．農機誌 58(1)：9 16，1996。
- 張 樹槐・高橋照夫・福地 博・寺尾日出男：赤外線熱画像によるリンゴの検出に関する研究（第 1 報）．農機誌 59(6)：57 64，1997。
- 張 樹槐・高橋照夫・福地 博・孫 明・寺尾日出男：赤外線熱画像によるリンゴの検出に関する研究（第 4 報） 左右ステレオ画像によるリンゴ果実までの距離の計測．農機誌 61(6)：125 130，1999。
- COCHRAN, S. D. and G. MEDIONI : 3-D Surface Description from Binocular Stereo. IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence 14(10) : 981, 1992.
- FAUGERAS, O : Stratification of Three-Dimensional Vision-Projective, Affine and Metric Representations. J. Optical Society of America 12(3) : 465 484, 1995.
- 藤浦建史・浦 元信・川村 登・並河 清：果樹園用収穫ロボットの研究．農機誌 52(2)：35 42，1990。
- 福永邦雄・笠井 保：ステレオ画像法とその応用．システムと制御 30(4)：220 227，1986。
- GRIMSON, W. E. L. : Computational experiments with a feature based stereo algorithm. IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence PAMI-7 (1) : 17 34, 1985.
- HUBEL, D. H. : Eye, Brain, and Vision. Chap. 5, Scientific American Library, New York, 1995.
- 井口征士・佐藤宏介：三次元画像計測．1 章，昭晃堂，東京，1995。
- 伊藤正弥・砂川義隆：距離計測システムにおける，大深度測定化と高分解能化の両立．計測自動制御学会論文集 34(8)：884 889，1998。
- 徐 剛・辻三郎：3 次元ビジョン．7 章，共立出版，東京，1998。
- KANADE, T : Development of a video-rate stereo machine. Proc. 94 ARPA Image Understanding Workshop 549 558, 1994.
- 唐橋 需：農業用ロボットへの期待．農機誌 57(6)：145 150，1995。
- 川村 登・並河 清・藤浦建史・浦 元信：農業用ロボットの研究（第 1 報） マイコン制御による果実収穫用マニピュレータ．農機誌 46(3)：353 358，1984。
- 川村 登・藤浦建史・浦 元信・近藤 直：果実収穫用ロボット．農機誌 47(2)：237 242，1985。
- 木下源一郎：ロボット開発の歴史と今後の展望．農機誌 57(6)：150 156，1995。
- 木下源一郎・出沢正徳：ロボット用光学的距離センサの開発 リングパターン照射による方法．計測自動制御学会論文集 22(11)：1204 1209，1986。
- KLETTE, R., K. SCHLUNS, A. KOSCHAN : Computer Vision-Three-Dimensional Data from Images. Chap. 4, Springer, Singapore, 1998.
- 近藤 直・川村 登：マニピュレータ装着用カメラによる果実の位置検出法．農機誌 47(1)：60 65，1985。
- 近藤 直・遠藤俊三：果実認識用視覚センサの研究（第 1 報）．農機誌 49(5)：476 482，1987。
- 近藤 直・小川雄一・門田充司：キクの挿し木作業の自動化に関する基礎的研究（第 1 報）．農機誌 60(2)：67 74，1998。
- KONDO, N., K. C. TING : Robotics for Bioproduction System. Chap. 9, ASAE, St. Joseph, 1998.
- 金野剛志：カメラメカニズム教室（上）．4 章，朝日ソノラマ，東京，1996。
- MARR, D., T. POGGIO, I. PALM : Analysis of a Cooperative Stereo Algorithm. Biol. Cybern. 28 : 223 239, 1978.
- MARR, D. : Vision. Chap. 3, W. H. Freeman and Company, New York, 1982.
- 松田郁生・森嶋 博・瀬尾康久・芋生憲司：キュウリの画像処理選別に関する研究．農機誌 54(3)：93 96，1992。
- 松田隆夫：視知覚．4 章，培風館，東京，1999。
- 松本 元・大津展之：ニューロコンピューティング．2 章，培風館，東京，1992。
- 松本 元・大津展之：脳・神経系が行う情報処理とそのモデル．3 章，培風館，東京，1994。
- 三上章充：脳はどこまでわかったか．2 章，講談社，東京，1991。
- 三浦 純・白井良明：ステレオ視におけるあいまいな対応づけのモデリングとあいまいさ解消のための視点選択．日本ロボット学会誌 12(8)：1222 1230，1994。
- 森 英雄：画像処理と自律移動ロボット．農機誌 54(1)：97 100，1992。
- 森 俊二・板倉梅子：画像認識の基礎（I）前処理と形の特徴抽出．10 章，オーム社，東京，1993。
- MOUROULIS, PANTAZIS : Visual instrumentation-Optical design and engineering. Chap. 6, McGraw-Hill, New York, 1999.
- 長尾 真：画像認識論．10 章，コロナ社，東京，

- 1995 .
44. 長尾智晴・安居院猛・長橋 宏：遺伝的手法を用いた2値図形のパターンマッチング. 信学論 J76-DII (3): 557 565, 1993 .
 45. 永田雅輝・木下 統・浅野克典・曹 其新・日吉健二：イチゴの自動選別システムに関する研究(第1報). 農機誌 58(5): 57 63, 1996 .
 46. 西 卓郎・近藤 直・毛利建太郎：キュウリの画像認識に関する研究(第1報). 農機誌 59(5): 45 53, 1997 .
 47. 農林水産省：果実生産費調査. 農林水産省, 1997 .
 48. 農林統計協会：図説農業白書. 平成9年度版, 農林統計協会, 1998 .
 49. 小笠原良平・吉沢 徹：縞走査法を導入した格子パターン投影法, 精密工学会誌 55(10): 1817 1822, 1989 .
 50. OKAMOTO, A., Y. SHIRAI, and M. ASADA : Integration of color and range data for three-dimensional scene, description. Trans. Inst. Electron Inf. Commun. Eng. Jpn. E76-D : 501 506, 1993.
 51. 岡本嗣男・白井良明・藤浦建史・近藤 直：生物にやさしい知能ロボット工学. 4章, 実教出版, 東京, 1992 .
 52. 岡本嗣男：農業ロボット研究の現状と課題. 農機誌 58(1): 128 132, 1996 .
 53. OLSEN, S. I. : Stereo correspondence by surface reconstruction. IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence 12 : 309 315, 1983.
 54. 大森隆司：立体視. 計測と制御 26(7): 74 78, 1987 .
 55. 大森隆司：視覚系をモデルとした両眼立体視システムの試作. 計測自動制御学会論文誌 23(5): 525 531, 1987 .
 56. 大野 晋：サイクロプスの眼と視方向. 日経サイエンス 4: 88 101, 1975 .
 57. 大角雅晴・中村喜彰：画像処理による水稻の葉色測定に関する研究(第1報). 農機誌 55(5): 75 81, 1993 .
 58. 大田友一・正井康之・池田克夫：動的計画法によるステレオ画像の区間対応法. 電子通信学会論文誌 J68-D(4): 554 561, 1985 .
 59. 大津展之・栗田多喜夫・関田巖：パターン認識 理論と応用. 11章, 朝倉書店, 東京, 1996 .
 60. 尾崎 弘・谷口慶治：画像処理 第2版. 8章, 共立出版, 東京, 1993 .
 61. ペティグルー, J. D. : 立体視のメカニズム. 日経サイエンス 10: 80 92, 1972 .
 62. ポッジオ, T. : 人間の視覚と機械の視覚. 日経サイエンス 6: 36 48, 1984 .
 63. PRICE, K. E. : Relaxation Matching Techniques A comparison. IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence 7(5): 617 623, 1985.
 64. ロス, J. : 両眼はものをどうみる. 日経サイエンス 5: 90 98, 1976 .
 65. SARIG, Y. : Robotics of fruit harvesting ; A state-of-the-art Review. J. agric. Engng Res. 54 : 265 280, 1993.
 66. 佐藤宏介・井口征士：空間コード化による距離画像入力. 電子情報通信学会論文誌 J68-D(3): 369 375, 1985 .
 67. 柴田洋一・西崎邦夫・大谷隆二：無農薬除草のための基礎的研究(第1報). 農機誌 56(6): 95 102, 1994 .
 68. SIMONTON, W., J. PEASE : Orientation independent machine vision classification. J. Agric. Engng Res. 54 : 231 243, 1993.
 69. SITES, P. W. and M. J. DELWICHE : Computer Vision to Locate Fruit on a Tree. Trans. ASAE, 31(1) : 257 263, 1988.
 70. SLAUGHTER, D. G. and R. C. HARELL : Discriminating Fruit for Robotic Harvest Using Color in Natural Outdoor Scenes. Trans. ASAE, 32(2) : 757 763, 1989.
 71. SLAUGHTER, D. G. and R. C. HARELL : Color Vision in Robotic Fruit Harvesting. Trans. ASAE, 30(4) : 1144 1148, 1987.
 72. SONKA, M., V. HLAVAC, R. BOYLE : Image Processing, Analysis, and Machine Vision. Chap. 9, Brooks /cole Publishing Co., Pacific Grove, 1999.
 73. スプラタ, I. D. M. : 藤浦建史・山田久也・檜田賢・湯川琢至・中尾清治：三次元視覚センサを用いたミニトマト収穫ロボット(第1報). 農機誌 58(4): 45 52, 1996 .
 74. 孫 明・高橋照夫・福地 博・張 樹槐：果実収穫機の開発の現状と課題. 農機学会東北支報 41: 23 28, 1994 .
 75. 孫 明・高橋照夫・戸次英二：画像処理による収穫時のリンゴ果実の識別(第1報). 農機誌 59(4): 53 60, 1997 .
 76. 孫 明・高橋照夫・張 樹槐・戸次英二：画像処理による収穫時のリンゴ果実の識別(第2報). 農機誌 60(5): 75 82, 1998 .
 77. 孫 明・高橋照夫・張 樹槐・戸次英二：画像処理による収穫時のリンゴ果実の識別(第3報). 農機誌 60(6): 79 87, 1998 .
 78. SUN, M., T. TAKAHASHI, S. ZHANG, E. BEKKI : Matching Binocular Stereo Images of Apples by Genetic Algorithm. Agric. Engng J. 8(2): 101 117, 1999.
 79. 館監修編：人工現実感の基礎 臨場感・現実感・存在感の本質を探る. 3章, 培風館, 東京, 2000 .
 80. 田島譲二・岩川正人：Rainbow Range Finderによる距離画像取得. 電子情報通信学会論文誌 J73-D-II (3): 374 382, 1990 .
 81. 高橋照夫・陳浩：農業用ロボットハンドのための接近動作制御則について(第2報) 視点座標と基本動作パターンを利用した制御則. 農機東北支報 40: 55 60, 1993 .
 82. 高橋照夫・張 樹槐・孫 明・福地 博：線要素パターン検出方式の画像処理による線の形状判別. 農機東北支報 43: 49 54, 1996 .
 83. TAKAHASHI, T., S. ZHANG, M. SUN, H. FUKUCHI : New method of image processing for distance measurement by a passive stereo vision. ASAE paper No.983031 : 1 7, 1998.
 84. 高橋照夫・張 樹槐・福地 博・戸次英二：両眼ステレオ視によるリンゴ果実の距離計測(第1報)左右画像合成による距離測定方式. 農機誌 62(1): 89 99, 2000 .
 85. 高橋照夫・張 樹槐・福地 博・戸次英二：両眼ステレオ視によるリンゴ果実の距離計測(第2報)対応問題画像の分析と対策. 農機誌 62(3): 94 102, 2000 .
 86. 高橋照夫・張 樹槐・福地 博・戸次英二：両眼ステレオ視によるリンゴ果実の距離計測(第3報)対応問題画像の分析と対策. 農機誌 62(3): 94 102, 2000 .

- レオ視によるリンゴ園果実の距離計測（第3報）画像入力条件が距離精度に及ぼす影響．農機誌 62(6): 108-115, 2000.
87. 竹田洋志・並河 清：スイカ果実識別のための画像処理による標識の検出．農機誌 60(1): 77-83, 1998.
88. 竹村裕夫：CCD カメラ技術入門．5章，コロナ社，東京，1997.
89. 滝沢穂高・白井良明・三浦 純：注視・ズームを用いた自律移動ロボットのための3Dシーン記述の選択的精密化．日本ロボット学会誌 13(7): 963-970, 1995.
90. 田村秀行監修：コンピュータ画像処理入門．3章，総研出版，東京，1994.
91. 田村秀行監修：コンピュータ画像処理 応用実践編 1. 1章他，総研出版，東京，1994.
92. 田中芳夫・小川洋司：パソコンベース色彩画像処理による果実検出 果実収穫ロボット用視覚センサ．農機誌 52(1): 61-67, 1990.
93. 徳田 勝・並河 清：画像処理によるスイカ果実の識別．農機誌 57(2): 13-20, 1996.
94. 徳田 勝・川村恒夫・山本博昭・堀尾尚志：スイカ収穫ロボットにおける視覚システムの開発（第1報）．農機誌 59(3): 29-36, 1997.
95. 富田文明：ビジョンと認識．日本ロボット学会誌 8(1): 98-100, 1990.
96. TRUCCO, E., A. VERRI: Introductory Techniques for 3-D Computer Vision. Chap. 7, Prentice Hall, Upper Saddle River, 1998.
97. 辻 三郎：知的ロボティクスの幾つかの問題．日本ロボット学会誌 9(19): 79-84, 1991.
98. WENG, J., P. COHEN, M. HERNIOU: Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation. IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence 14(10): 965-980, 1992.
99. 谷内田正彦：視覚を用いた3次元位置形状の計測とその応用．システムと制御 29(10): 631-638, 1985.
100. 谷内田正彦・石黒 浩：ロボットの視覚．人工知能学会誌 5(6): 720-730, 1990.
101. 山口 証・中山収文・白井良明・浅田 稔：信頼性の高い対応を優先した多段階ステレオ法．電子情報通信学会論文誌 J74-D-1K(7): 918-925, 1991.
102. 山川 烈・内野英治・平川克巳他：組合せファジィハフ変換とその医用画像処理への応用．BMSFA 95-01-09: 71-79, 1995.
103. 谷田貝豊彦：応用光学光計測入門．丸善，東京，1988.
104. 吉田和弘・広瀬茂男：直射日光下で使用できる三角測量レーザーレンジファインダ．計測自動制御学会論文集 24(5): 445-451, 1988.
105. 吉沢 徹：モアレ三次元計測．光技術コンタクト 29(7): 421-424, 1991.
106. 吉沢 徹・鈴木賢策：格子パターン投影による物体形状の自動測定．精密工学会誌 53(3): 422-426, 1987.
107. 湯川典昭・並河 清・藤浦建史：果実収穫用ロボットの視覚フィードバック制御（第1報）．農機誌 52(3): 53-59, 1990.
108. ZHANG, Z. et al.: A Robust Technique for Matching Two Uncalibrated Images Through the Recovery of the Unknown Epipolar Geometry. Artificial Intelligence 78: 87-119, 1995.

Studies on Development of Stereo Vision System Necessary for Mechanization of Apple Fruits Harvesting

Teruo TAKAHASHI

Laboratory of Regional and Environmental Planning

SUMMARY

An apple harvesting machine must have the ability to discriminate an apple from its surroundings, to know the apple's relative location, and to measure the coordinate values of three dimensions at the base point of the harvesting machine. Binocular stereo vision is an available measuring method to obtain such 3-D information at an outdoor field. However, it is very difficult to apply this system to an automated machine because practical solutions to the correspondence problem of stereopsis have not been found.

The purpose of this study is to establish a practical measurement method of binocular stereo vision for obtaining 3-D information regarding fruit and their surroundings, and to develop a stereo vision measurement system that can be applied to the mechanization of automatic fruit harvesting. Four main subjects are addressed in this study: (a) the mechanical characteristics of distance measurement using a binocular stereo vision system, (b) the establishment of a new principle for distance measurement in the developed vision system, (c) the analysis of and solution to the correspondence problem, and (d) how the main factors of input images influence accuracy of measurement. Moreover, the application of this study method was considered in regard to measuring fruit shape and in regard to controlling the location of a manipulator for harvesting.

(1) A trial system of binocular stereo vision

Measurement using binocular stereo vision is achieved by processing a set of images obtained by two cameras. The trial stereo vision system for this study consisted of two CCD color video cameras, a note-type personal computer, a PC card for video capture, a camera table that allows pan and tilt, and changeover switching box for input images. The cameras had a CCD surface of 380,000 pixels, and a NTSC-type signal output. Their operation was controlled by the computer.

When automatically harvesting fruit in an orchard, it is necessary to search and discriminate individual fruit by processing a set of images. Therefore, the cameras were equipped with a pan-tilt mechanism, a zoom mechanism, and a mechanism for their control in order to take photographs of an individual fruit with a desirable size at a central position through the trial system. Operation of the cameras' control mechanism was carried out using the computer manually or automatically by means of a program with a VISCA network through an RS-232C interface.

Accuracy of distance measurement on the trial system is influenced by characteristics of taking photographs and distance performance at each camera lens system, and the condition of an optical system of stereo vision. The whole system's accuracy will fall rapidly even if there is a small error on the optical stereo system, with the flaws appearing even more significantly at long distances. Therefore, calibration of the trial system's hardware was carefully carried out in the following ways :

First, the characteristic of left and right cameras were examined individually in regard to their distance and zoom values. By performing regression analysis on the results, these relations and factors were determined : a revision equation of lens aberration, a relationship between the cameras' focal lengths and focus distances, a relationship between zoom value and focal length, an equation for the center of a virtual lens, and a scale factor of monitor size in regard to the size of the camera images. Next, distance equations of the optical stereo system were calibrated using the results of both cameras. The results showed a

distance error in the range of 2% at a distance of 1 m to 4.5 m.

(2) Development of a measurement method by composing left and right images

A conventional principle involved in measuring distance using binocular stereo vision is to fix an single object from a left and right viewpoint, and to calculate distance based on triangulation principle. If the object cannot be made to correspond to both left and right images, the distance between it and the viewer cannot be calculated. In general, Marr's three restrictions and an epipolar constraint are used for solving the correspondence problem, but they insufficient.

In the present study, a new principle of measurement using binocular stereo vision was established in light of optical physics in regard to stereo vision and optic nerve physiology and psychology.

The principle is based on the fact that when a set of left and right images overlaps at each cross section of space in the direction of depth, an object's image becomes clear if the object intersects their sections. Namely, a cross section of a search space in the direction of depth is determined by gazing, and a composite image of left and right images is made on the section. If clarity was detected on the section, and an object exists on it, then information regarding its position and distance is obtained.

A composite image was made and arranged using a method that alternatively selected its even lines of the left image and odd lines of the right image, respectively. If the left and right images of an object overlapped well, then the color difference between the horizontal lines becomes minimum, and the clarity of a color composite image increases. As the difference between the position of the left image and that of the right image increases, color differences of the horizontal lines increase, and the clarity of the composite image decreases.

An index of clarity on each pixel of a composite image is described by variance of the three primary colors, RGB values. The variance is represented for the color difference in the vertical direction, and the value of the variance reaches a minimum where the color difference is smallest. But the value decreases if the overlapped area was large or the shape was similar with other small areas. Therefore, average variance of RGB values from pixels in the eight directions was used to compare large areas.

The basic characteristics of this new method was examined in terms of focal length, distance for taking photographs, a range of calculation on the average variance, disparity interval, and on object width, by using red circle plates. The results showed that when a calculation range of average variance was made regarding the total width of an object, a composite color image and a depth image were suitably obtained under a variety conditions. Moreover, an experiment to verify the method on objects resembling red apples was carried out in an orchard during harvesting season. The results showed that the distance error was in the range of 4% at a distance of 2.2m, and confirmed that the distance of ripe apples can be measured using this new method.

(3) Analysis of and solution to the correspondence problem

Images which create the correspondence problem or similar image features such as a row of similar fruits, overlapped fruits, and an occluded or transformed image hidden by leaves and branches are frequently found in fruit images taken in apple orchards. The solution to or a measure against the problem is to apply the method of binocular stereo vision to such images.

The principle of measurement in this case is to compose a central image of left and right images at each cross section by disparity, and to detect a clear image in it. Then, the occurrence of the correspondence problem will be restricted because correspondence error is reduced. However, the type of images produced by conventional TV cameras is different from the principle mentioned above, and takes a whole space as an image. Therefore, clear but false images appear frequently owing to error of correspondence in images affected by the correspondence problem, even if the principle of this study is applied. It is necessary to establish a suitable correspondence of cross sections by disparity, and to take corrective measures for restricting the appearance of false images.

As a typical image produced by the correspondence problem in this study, i.e., the appearance of false images and their characteristics, were examined in the case of two circular plates which were on the same epipolar line and had the same color and shape. In this case, a method of composing the same half side of visual fields was attempted as a measure to make the cross sections by disparity correspond and to restrict a false image. In this method, the left side of an image is constructed from a left half side of the left image and from the left half side of the right image. Another side of the image is constructed from the right half side of the left image and from the right half side of the right image. This form is analogous to the intersection of optic nerves, an optic chiasma, in the human visual system.

The results verified that the relative position between an object and a viewer and that the correspondence of cross sections of left and right images by disparity was also suitable. The composition of the same side of visual fields restricted the appearance of false images, because the average of variant of RGB values in false images was larger than that in true images. Namely, the false images appeared at the edge of common fields on the same side of visual fields or outside them.

Experiments on a row of four circle plates and an image of fruits hidden by leaves were performed. The results showed that the method mentioned above was effective in creating suitable correspondence of cross sections by disparity, and in restricting false images. Moreover, this method was applied to 16 pairs of images in a single row and 12 pairs of images of overlapping fruit which were taken in apple orchard. The results showed that suitable correspondence of cross sections of disparity were 90% in the images placed in a row and 80% in the images of overlapping fruits at a level within two disparity intervals, while the error of distance measurement was about 5% in relation to the composition on the same side of the visual fields.

(4) Influence of the conditions of input images on measurement accuracy

A special characteristic of the present measurement method of stereo vision lies in its ability to simultaneously obtain the image and depth of a color composite. Therefore, it is expected that accurate 3-D information regarding fruit and its surroundings is obtainable. However, images taken outdoors by a video camera are influenced by factors such as natural light and photograph. Thus, it is necessary to clarify the influence of these factors on the measurement accuracy of the method described in this study.

The factors contributing to measurement errors were considered. Thereafter, the relations between the illuminant, fruits, and the photograph were investigated, and their on measurement accuracy were analyzed on the images taken under various conditions in apple orchards.

From the results, the brightness of the fruit images was proportional to the illumination of the fruit surface depending on automatic function of exposure except in backlight conditions, and was more than 90 (35%), even if the illumination of the fruit was less than one klx. Under the backlight condition, when the sky was lighter and clearer, the brightness of fruit decreased more rapidly, and was less than 90, though the illumination of fruit was from 6 to 10 klx. The average errors of distance measurement ranged from -3 to 0% under conditions of direct and scattered sunlight.

In characterizing the average variation of RGB values, the type of change of V-U types accounted for 75%, while the N type accounted for 15 to 20%. The minimum level of most types was that from 200 to 1000, and was 70%. The type showing the greatest] difference between measured distance and practical distance was the one with a -2 to 1 on disparity interval, and its rate was more than 90%.

From the results of all images (a total of 186 pairs of images; 144 pairs of 'Fuji' and 42 pairs of 'Orin', a range of application of the trial system on red and yellow-green apples was that the brightness was more than 90, and the rate of overlap was within 0.5, and the width of fruit images was more than 16 pixels on 'Fuji' and 26 pixels on 'Orin.' In the above-mentioned range of application, the errors of distance measurement were -4 to 2% within a distance of 1.2 to 3.5 m, and -7 to 0% for a distance of over 3.5 m.

(5) Application of stereo vision to measurement of 3-D shape and position] control

It was also considered how the method used in this study can be applied for measurement of 3-D shape of an individual fruit grasped by a picking hand, and how to use 3-D visual information obtained by the stereo vision system for position control of a manipulator utilizing a picking hand.

In regard to the measurement of a 3-D shape, the results of experiments on a Rubic's-cube and a red apple showed that color composite images and depth images were satisfactory when the distribution of RGB values from low to high was wide, showing a depth error of within 5%. However, significant error occurred if there were similar RGB densities on the left and right sides of an image. These results showed that the method used in this study is applicable for measuring 3-D shapes when the gradation of brightness or color density is large. The criteria for calculating the range of the average RGB variant and clarity index should be improved for measurements of false correspondence.

In general, perception of the shape of an individual fruit or branch is obtained by examining the shape's contour, and the time required for image processing is relatively long. For high speed processing, a method that uses patterns on a small segment of line drawn digitally was considered. The drawn line form was represented by a pattern unit of 3 by 3 pixels. When 162 line element patterns and 110 angle cell patterns were defined, the precision involved in detecting a shape element was a line of about 5 degrees in inclination in over 20 pixels, and was 5 degrees in the tangent angle of an arc whose radius was more than 30 pixels, and was 10% in the radius of curvature with a central angle of over 80 degrees. The results on images of fruit showed approximate values regarding the angles of the contours. It is important to reduce noise in images and to perform efficient binary processing in order for this method to be used in a practical setting.

The control of a manipulator to allow a picking hand to approach an individual fruit requires the inverse calculation of the manipulator's joints at the action angles. Yet such a calculation might delay real time control. It was then considered by numerical simulation that an algorithm did not require an inverse calculation, but used both visual coordinates obtained by stereo vision and basic patterns of action at given points. In the practical use of the algorithm, it is necessary to decide given points, their interval, and the number based on the characteristics of action patterns among the given points in order to hold the approach a level of precision within the tolerance level.

(6) Conclusion

It was verified using hardware that a method of binocular stereo vision had sufficient ability to measure distance for the purpose of obtaining 3-D information for the mechanical harvesting of fruits. For specifying this method's performance, it is important to determine the factors and the relationships of distance error of both the left and right cameras, to detect and revise the cross angle of the optic lines between the left and right cameras, and to ensure that each pixel corresponds between left and right images.

The difference between the principle of binocular stereo vision utilized in this study and the conventional method is that the range of space searched for correspondence is restricted to cross sections of a distance by disparity depending upon a line of sight. Namely, constraint of space on a common visual field of the left and right cameras was considered in addition to epipolar constraint. Therefore, distance can be initially calculated even if the correspondence of the left and right images is not achieved completely. However, in the method of image acquisition using conventional TV cameras, it is impossible to take and record images of the same cross section by left and right cameras simultaneously. Thus, distance errors might occur because differences between cross sections showing disparity between the left and right images creates false images during processing. Moreover, the conditions of gaze distance and disparity interval have an influence on the processing time and appearance of false images.

From the standpoint of this study, the correspondence problem of binocular stereo vision is encountered

when the difference between cross sections showing disparity between the left and right images occurs frequently. Therefore, find a solution to the problem will be difficult using conventional TV cameras. However, it was possible to judge the correspondence of cross sections showing disparity between the left and right images by comparing the amount of specific color at the same side of left and right images. Moreover, composition using the same side of the images made it possible to measure distance without the appearance of false images. This method will be available as a next step in arriving at a solution to the correspondence problem. The relations between the distribution of the specific color of an object and the processing range should be considered, because the color distribution influences the amount of specific color on the same side of left and right images.

The accuracy of this method for measuring distance in an apple orchard was sufficient for the purpose of harvesting fruit, if the conditions of input images were within the application range mentioned above. A specific function is required for the camera to detect and revise the influence of backlight because this method cannot process images in strong backlight.

Lastly, this study introduced and applied a new principle using binocular stereo vision for use in automatic fruit harvesting in an apple orchard, and proposed guidelines and basic materials to develop a stereo vision system. The areas remaining to be addressed in regard to the system's practical application include the following : improvement of a clarity index of clearness and the criterion to determine line of sight distance and disparity interval on the software side, a multi-processor system for high speed processing, the improvement of image resolution, and simplification of the camera control mechanism on the hardware side.