

NAIST-IS-MT1451014

修士論文

果実内部の品質計測に向けた 分光法と表面散乱モデルによる食味分布推定

岩口 堯史

2016 年 3 月 14 日

奈良先端科学技術大学院大学
情報科学研究科 情報科学専攻

本論文は奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科に
修士（工学）授与の要件として提出した修士論文である.

岩口 堯史

審査委員：

向川 康博 教授	（主指導教員）
横矢 直和 教授	（副指導教員）
舩富 卓哉 准教授	（副指導教員）
久保 尋之 助教	（副指導教員）

果実内部の品質計測に向けた 分光法と表面散乱モデルによる食味分布推定*

岩口 堯史

内容梗概

近年、青果商品の差別化のために、果実の内部品質を計測し品質保証することで、果実を高付加価値化する試みが行われている。従来の品質計測では、果実の代表点の糖度を計測することによって、果実の品質が評価されてきた。しかし、果実の糖度には偏りがあるため、代表点のみの評価では不十分である。また、糖度は果実が含む糖の量を評価しているのに過ぎない。

そこで本研究では、食味そのものにより果実の品質を評価し、果実内部の食味の分布を推定することを目的とする。本研究では、分光法による食味の計測手法を提案する。従来の官能検査による食味の評価では、個人による評価基準のばらつきが問題であったが、提案手法では物理量である分光分布の計測から客観的に食味を推定することを試みる。実験では、実際の果実に対し食味を品質量として定量化し、品質量の可視化を行う。また、果物のような散乱体における品質量の分布を推定する手法として、表面散乱モデルに基づく CT 手法を提案する。X 線 CT などで行われてきた内部推定手法は、物体内で光線が平行であることを仮定しているため、散乱が起こる半透明物体には利用できない。提案手法では散乱による光路の広がりを考慮した計測を行うことで、内部推定が可能になる。ここでは、シミュレーション実験により表面散乱が起こる物体の内部分布について、提案手法による推定精度を評価する。最後に、分光法を用いた食味の内部分布推定手法を提案する。食味の分布推定には 2 つの計算経路があることを示し、経路の優位性について考察する。また、実物体を対象にした計測実験により提案手法の有効性を検証する。

*奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 情報科学専攻 修士論文, NAIST-IS-MT1451014, 2016 年 3 月 14 日.

キーワード

分光法，表面散乱モデル，品質計測，内部分布推定，果実

Estimating Internal Distribution of Eating Quality of Fruit using Spectroscopy and Scattering Surface Model for Quality Evaluation*

Takafumi Iwaguchi

Abstract

Some of farmers are trying to add value to their products by measuring the internal quality. The quality is evaluated by measuring sugar content. This evaluation is still insufficient because the content is measured only at a single point although the distribution of sugar content in fruit is not uniform. Another problem is that the sugar content is no more than an aspect of evaluation of eating quality.

In this study, I adopt eating quality itself as a measure, and I aim to estimate the distribution of eating quality in the fruit. I propose a method of measuring a eating quality via spectroscopy. When the eating quality is evaluated by human, measures of evaluation are different among individuals. In contrast, evaluation of the proposed method is objective because eating quality is evaluated via physical quantity. In the experiment, the eating quality of a fruit is measured and distribution of the eating quality is visualized.

I also propose a scattering surface model to estimate three-dimensional internal distribution for translucent object. The conventional estimation methods rely on the assumption that light paths are parallel in the object. They cannot be used for measurement of a translucent object where light is scattered. In the proposed method, the scattering light path is taken into account in order

*Master's Thesis, Department of Information Science, Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology, NAIST-IS-MT1451014, March 14, 2016.

to measure the inside of the translucent object. The accuracy of this method is evaluated using synthetic data.

Finally, I propose an estimation method of internal distribution of eating quality in fruits using two proposed methods described above. I show that estimation can be performed in two ways. In the experiment, the real object is measured, and the method is validated from the result.

Keywords:

Spectroscopy, Scattering surface model, Quality measurement, Estimation of internal distribution, Fruit

目次

図目次	vii
第 1 章 はじめに	1
第 2 章 果実の糖度計測	3
2.1 屈折糖度計による計測	3
2.1.1 屈折糖度計	3
2.1.2 糖度の内部分布	3
2.2 分光法による糖度計測	3
2.2.1 分光法による化学物質分析	3
2.2.2 分光器による糖度の 1 点計測	5
2.2.3 ハイパースペクトルによる糖度の面計測	6
第 3 章 分光法による食味の定量化	9
3.1 化学物質量と食味を表す品質量	9
3.1.1 化学物質量と分光分布の関係	9
3.1.2 食味と分光分布の関係	9
3.1.3 品質量の推定	10
3.2 果実の品質量計測実験	11
3.2.1 ハイパースペクトルカメラによる果実の計測	11
3.2.2 果実の透過スペクトルに関する考察	11
3.2.3 甘味をあらわす品質量の推定	12
第 4 章 散乱体の内部計測	16
4.1 関連研究	16
4.1.1 非光学的手法	16
4.1.2 光学的手法	16
4.2 光路のモデル化	17
4.3 吸光係数の内部分布推定手法	19
4.3.1 CT 計測とサイノグラム	19

4.3.2	光線の平行化	20
4.3.3	光源位置が計測範囲へ与える影響の検証	22
4.3.4	吸収係数分布の推定	23
4.4	シミュレーションによる推定精度の検証	24
第 5 章	品質量分布の推定	36
5.1	品質量分布の推定手法	36
5.2	ファントムの計測実験	37
5.2.1	計測対象	37
5.2.2	品質量の決定	38
5.2.3	内部計測の実験環境	39
5.2.4	物体内部の品質量分布推定	40
第 6 章	まとめ	46
	謝辞	47
	参考文献	48
	発表リスト	50

図目次

2.1	計測に用いたサンプル	4
2.2	屈折糖度計により計測されたトマトの糖度分布	4
2.3	化学物質の吸収によるスペクトル変化	5
2.4	回折格子型分光器の構造	8
2.5	ライン型ハイパースペクトルカメラの構造	8
3.1	イチゴのスペクトルの固有ベクトル	12
3.2	イチゴの透過スペクトルの各主成分の可視化	13
3.3	イチゴの各部位の対数透過スペクトル	14
3.4	イチゴの甘味を表す品質量の回帰係数ベクトル	15
3.5	イチゴの甘味を表す品質量の可視化	15
4.1	光路モデル	19
4.2	平行透過計測の模式図	26
4.3	表面散乱計測の模式図	26
4.4	サイノグラムの例	27
4.5	平行透過計測における幾何学的関係	28
4.6	表面散乱計測における幾何学的関係	28
4.7	光源位置と計測範囲	29
4.8	充填されるサイノグラム領域	30
4.9	光源位置とサイノグラムの充填率の関係	30
4.10	物体の離散化	31
4.11	シミュレーション実験における吸光係数分布の設定	31
4.12	平行透過計測のときのサイノグラム	31
4.13	FBP による推定結果 (平行透過計測)	32
4.14	SART による推定結果 (平行透過計測)	32
4.15	NNLS による推定結果 (平行透過計測)	33
4.16	$\theta_l = 0^\circ$ のときのサイノグラム	33

4.17	FBP による推定結果 ($\theta_l = 0^\circ$)	34
4.18	SART による推定結果 ($\theta_l = 0^\circ$)	34
4.19	NNLS による推定結果 ($\theta_l = 0^\circ$)	35
5.1	品質量の内部推定の計算経路	37
5.2	計測対象	38
5.3	ファントムの各部位の対数透過スペクトル	39
5.4	ファントムの品質量の回帰係数ベクトル	40
5.5	ファントムの品質量の可視化	41
5.6	計測装置	41
5.7	表面散乱計測で得られるサイノグラム	42
5.8	平行化したサイノグラム	43
5.9	単波長の吸収係数分布	44
5.10	品質量サイノグラム	45
5.11	推定された品質量分布	45

第 1 章 はじめに

今日では、農作物の流通の国際化により、日本国内においても世界各地で生産された青果が店頭に並ぶようになっており、厳しい価格競争が行われている。生産者たちは、自らの青果商品が消費者に選ばれるように、様々な方法で商品の差別化を試みている。特に国内の果物生産者にとっては、安価な輸入品に対抗するため、果実の計測により品質を保証し、高付加価値化することが重要になっている。

小売店では、商品果実とともに糖度が示されているのを見かけることが多くなった。ブランド品として売り出される果実の中には、分光器による非破壊糖度計測により、糖度が全数検査されているものもある。一般的な分光計測は、1つのプローブを用いて果実の代表点の糖度を計測し、1つの果実につき1つの糖度値を評価するものである。また、果実の品質評価としては、一般に糖度が広く認知されているのみである。

ここで、私たちが口にする果実について考える。例えばスイカでは中央部ほど甘いことを我々が経験的に知っているように、果実の糖度は1つの果実でも部位ごとに異なり均一ではない。しかし、現在の全数検査では代表点の糖度を果実全体の糖度として扱っており、中までおいしい果実であることは保証されない。また、イチゴのような果実では、甘さだけではなく、酸味や苦味もその味を特徴付けている重要な要素であるが、糖度のみによる品質評価では、自分の嗜好に合った味の果実を選ぶことはできない。さらに、糖度は果実の化学物質の含有量の評価であり、人が感じる食味を評価しているわけではない。果実の中の甘味や苦味の内部分布が提示されれば、消費者が果実を選択する際の手がかりになり、高付加価値化に有効であると考えられる。

そこで、本研究では、糖度のような従来の化学物質の含有量による品質評価に加え、食味による品質評価を導入し、品質量として定量化する。そして、内部計測により果実内の品質量分布を推定することを目的とする。

本研究は2つの主要な要素からなる。1つめは、果実の内部計測である。内部計測は非破壊な手法により物体の内部を計測する技術であり、既存の内部計測手法としては Computed Tomography (CT) が挙げられる。特に可視・近赤外光を用いて行う光 CT は、分光を用いた化学物質解析ができるという特長を持つため、果実

の内部品質計測に適している。しかし、果実のような散乱体では、光線が物体内で反射を繰り返し複雑な光路を進む散乱という現象が起こるため、X 線 CT で用いられる光線の直進性を仮定した内部計測手法は利用できない。そこで、本研究では散乱を考慮した CT 手法を提案する。2 つめの主要の要素は、分光による食味の定量評価である。従来、食味の評価は人が食べて評価する官能検査により定量化されてきた。しかし、味覚の敏感さは人により異なるため、異なる果実の食味を比較したい場合、同じ人により官能検査を行わなければならない。客観的な食味の評価を行うためにセンサを利用する研究が行われており、化学反応を用いて食味を評価する味覚センサ [1] がすでに実用化されている。本研究では、分光計測から食味を推定する手法を提案する。

本論文では、2 章で従来の糖度計測について述べる。3 章で分光法による食味の定量化、4 章では散乱体の内部計測、5 章では品質量分布の推定手法について述べ、それぞれ各章で実験による手法の検証を行う。最後の 6 章では提案手法およびその実験結果をまとめ、今後の課題について述べる。

第 2 章 果実の糖度計測

2.1 屈折糖度計による計測

2.1.1 屈折糖度計

果物の品質評価として BRIX 糖度が広く利用されている。果汁などの糖を含む水溶液は、糖の含有量により屈折率が変化する。この性質を利用し、果汁の屈折率を計測から糖度を求める計測器が屈折糖度計であり、屈折糖度計により求められる糖度は BRIX 糖度と呼ばれる。BRIX 糖度は、ショ糖の屈折率を元に定められており、ショ糖水溶液では体積濃度と BRIX 糖度は一致する。ショ糖以外が含まれる場合にも BRIX 糖度は利用されるが、ショ糖以外の化学物質も水溶液の屈折率に影響を与えるため、化学物質の構成が異なる果実の品質の比較には利用できない。

2.1.2 糖度の内部分布

従来の果実商品の検査では、果実が均一な物として扱われていることが多い。ここでは、実験により実際の糖度分布を確かめる。図 2.1 のように市販のトマトをさいの目に切り、各小片の果汁の糖度を計測した。果実は 24 個に分割され、それぞれの小片は約 1cm 角であった。屈折糖度計には ATAGO 社の PAL-1 BLT/A+W を用いた。断面の糖度分布を図 2.2 に示す。結果から糖度の分布は均一ではなく、皮に近い周辺部に比べ、中央部の糖度が高いことがわかる。また、特に糖度が高い小片は果肉が少ない、ゼリー状の部分であった。

この実験により、実際の果実では糖度に偏りがあることが確認された。

2.2 分光法による糖度計測

2.2.1 分光法による化学物質分析

分光法は、非破壊に物体に含まれる化学物質を分析する光学的手法である。この節では、糖のような化学物質の光の吸収によるスペクトルの変化について述べ、そ

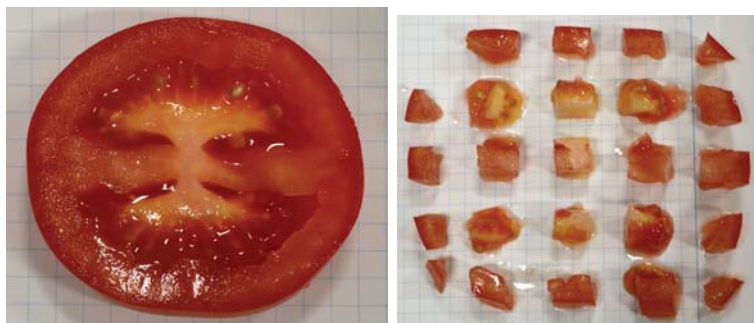


図 2.1: 計測に用いたサンプル

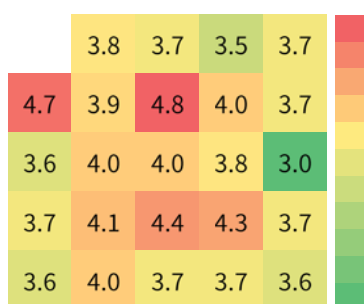


図 2.2: 屈折糖度計により計測されたトマトの糖度分布

の後、スペクトルの計測により化学物質濃度を推定する分光法の手法について説明する。

糖のような化学物質は、光のスペクトルを変化させることが知られている。図 2.3 は、化学物質によるスペクトルの変化を模式的に示したものである。光源から出射された光は、光源に固有のスペクトルを持っている。光が物体内部に入射すると、物体に含まれる化学物質の分子と衝突するが、このときに光のエネルギーが吸収される。吸収は、光が化学物質の分子に衝突する度に起こるため、吸収されるエネルギー量は化学物質の濃度に比例する。また、この吸収の大きさは波長ごとに異なり、吸収されるエネルギーの波長分布は吸収スペクトルで表される。物体から出射される光のスペクトルである透過スペクトルは、化学物質による吸収により、光源のスペクトルから変化している。この光の吸収を表す法則は、次の Lambert-Beer の法則として知られている：

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \exp(-M\varepsilon(\lambda)L). \quad (2.1)$$

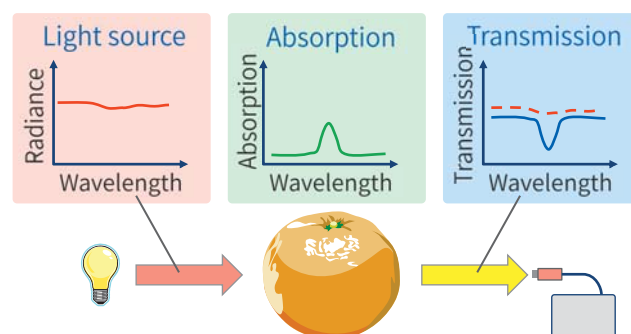


図 2.3: 化学物質の吸収によるスペクトル変化

λ は波長, I は透過光の強度, I_0 は入射光の強度, M はモル濃度, ε は単位長さ・モル濃度あたりの吸収の強さを表すモル吸収係数, および L は物体中を光が進む距離である.

次に, スペクトルの計測により化学物質濃度を推定する手法について説明する. 前述のように, 化学物質は吸収スペクトルを変化させる. 物体内に複数の化学物質が含まれる場合, 計測される透過スペクトルは, それぞれの化学物質の吸収の影響を受ける. しかし, 可視・近赤外領域の光では, 化学物質固有の吸収波長は明確ではないことが知られている [2]. このため, Lambert-Beer の法則から直接, 複数成分の含有量を求めることは困難である. また, 果実を計測する場合, 形状や表面の状態も透過スペクトルに影響を与える. これらの問題に対処するため, 可視・近赤外分光法を用いた化学物質分析では, 重回帰分析を行うことが多い [3]. 重回帰分析とは, 複数の説明変数 X と 1 つの目的変数 Y の定量的な関係を求めることである. 糖度の推定の場合は, 説明変数を透過スペクトル, 目的変数を糖度として, 重回帰分析により計測スペクトルから糖度を推定する. 糖度と透過スペクトルの関係は検量線と呼ばれ, 果実の種類や品種により異なる.

2.2.2 分光器による糖度の 1 点計測

従来, 果実の非破壊糖度計測には, 分光器による 1 点計測が行われてきた [4]. 図 2.4 に, 一般的な多波長分光器である回折格子型分光器の構造を示す. プローブにより集光された光は光ファイバにより, 分光器に入力される. 分光器内では, 光は

回折格子によって波長ごとに異なった方向に分散され、それぞれの強度をフォトディテクタによって計測される。計測できる波長域や感度はフォトディテクタの性能に依存し、波長分解能は回折格子の格子幅に依存する。

選果のための糖度計測の手法には、反射法、透過法があり、果実の種類によって使い分けられている [5]。反射法は果実に対して光を照射したときの反射光を計測する手法であり、モモ、リンゴやナシなどの皮の薄い果物に対して用いられる。一方、透過法は果実に対して光を照射したときの透過光を計測する手法であるが、皮の薄い果物だけではなく、強い光源を使用することでメロンやスイカなどの皮の厚い果実の計測も可能である。また、透過法では果実を通過した光のスペクトルを計測しているため、反射法に比べて果実の平均糖度に近い値が計測されることが考えられている。

1 点計測の問題点は、果実全体の糖度を 1 点の計測から推定された 1 つの糖度値で表しているため、果実内の糖度の偏りが無視されていることである。

2.2.3 ハイパースペクトルによる糖度の面計測

ハイパースペクトルカメラは、分光分布の面撮影を行うためのカメラである。図 2.4 に、ライン分光式のハイパースペクトルカメラの構造を示す。ハイパースペクトルカメラでは、レンズの後ろにスリットを設置し、視野中の 1 ラインの光のみを入力させる。この光を回折格子によりラインと垂直な方向に分散したものを、フォトディテクタ・アレイで計測することで 1 ライン上の分光分布が得られる。さらに、機械的な駆動などによりラインを移動し、異なるラインの分光分布を計測することで、2 次元空間の分光分布を計測することができる。

ハイパースペクトルカメラなどによる分光分布の面計測を、果実の計測に応用する研究が行われている。分光面計測を果実の糖度計測に応用した例として、杉山ら [6] のメロンの糖度分布の 3 次元可視化が挙げられる。杉山らは、メロンをスライスした切断面における反射スペクトルを計測し、反射スペクトルと糖度の相関から、糖度の 2 次元分布を推定した。さらに、果実全体を等間隔にスライスしながら同じ計測を繰り返すことで、糖度の 3 次元分布の可視化を実現している。

1 点計測を用いた場合、空間分布を計測するためにはプローブの移動が必要にな

り計測コストが高くなるが，面撮影では，1 度の計測で複数点の計測が可能になり計測コストが低くなる．一方で，面計測を用いた場合でも，撮影面と垂直方向の空間分布を直接計測することはできない．

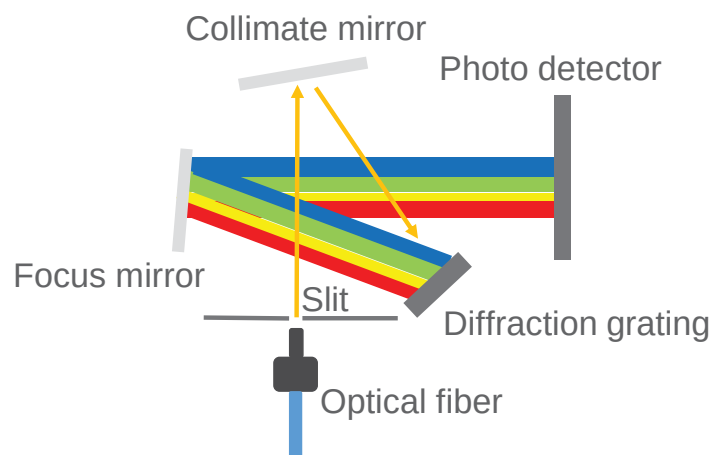


図 2.4: 回折格子型分光器の構造

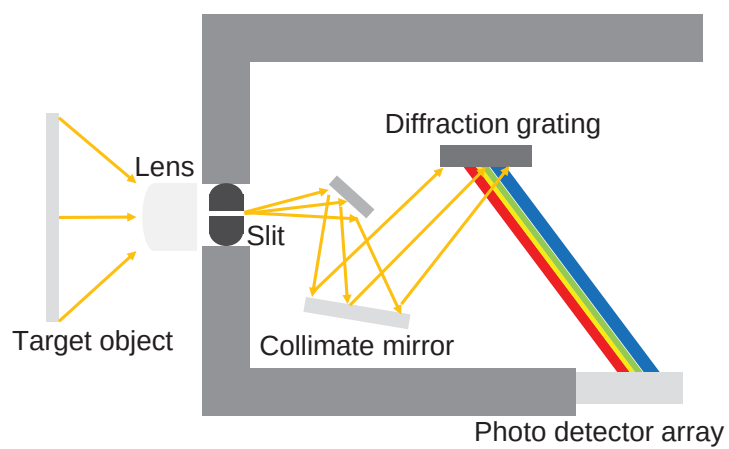


図 2.5: ライン型ハイパースペクトルカメラの構造

第 3 章 分光法による食味の定量化

3.1 化学物質量と食味を表す品質量

3.1.1 化学物質量と分光分布の関係

2.2.1 節で述べたように、化学物質による光の吸収は Lambert-Beer の式で表され、物質の各波長の吸収係数と化学物質量は線形の関係であった。計測される波長が n 個であり、波長ごとの吸収係数を

$$\boldsymbol{x} = \left[\frac{I(\lambda_0)}{I_0(\lambda_0)} \frac{I(\lambda_1)}{I_0(\lambda_1)} \cdots \frac{I(\lambda_n)}{I_0(\lambda_n)} \right]^T \quad (3.1)$$

とすると、ある化学物質量 u_i は $\boldsymbol{x}$ を用いて

$$u_i = F_i(\boldsymbol{x}) \quad (3.2)$$

と表される。ここで、 F_i は吸収係数と化学物質量の関係を表す線形関数である。

3.1.2 食味と分光分布の関係

分光により食味を計測するため、味覚をモデル化する。味覚とは、人が食品を食べたときに食味を知覚するプロセスを指し、味覚で知覚される食味には甘味、苦味、酸味、塩味やうま味があるとされる [7]。

まず、食品に含まれる化学物質と食味の関係について考える。味覚は、味蕾とよばれる器官上にある受容体が食品中の化学物質と結合することで生じる。人間の舌には多数の味蕾が分布するが、味覚の種類に対して反応する閾値がそれぞれ異なる。この味蕾の反応が脳に伝えられることで、人は食味を判断することができる。また、食品に含まれる化学物質の量が多いほど、味蕾が伝える刺激が強くなるため、味覚も強くなる。味覚の強さと化学物質の量は線形の関係であると仮定すると、ある食味を v と、その味覚に影響する化学物質量を u_i としたとき、その関係は、

$$v = G(u_1, u_2, \cdots u_m) \quad (3.3)$$

と表すことができる。ここで、 m は影響を与える化学物質の数であり、 G は食味と化学物質の量の関係を表す線形関数である。

次に、吸収係数と食味の関係を考える．化学物質量と吸収係数の関係式 3.2 と、食味と化学物質量の関係式 3.3 から、

$$v = G(F_1(\mathbf{x}), F_2(\mathbf{x}), \dots, F_m(\mathbf{x})) \quad (3.4)$$

が導かれる．ここで、波長の観測は離散的であることから、式 3.4 を波長に関して離散化する．線形関数である F と G はそれぞれベクトル $\mathbf{f}$, $\mathbf{g}$ と内積を用いて書き直せるため、式 3.4 は

$$v = \mathbf{g}^\top ((\mathbf{f}_1 \quad \mathbf{f}_2 \quad \dots \quad \mathbf{f}_m)^\top \mathbf{x}) \quad (3.5)$$

となり、結局 1 つのベクトル $\mathbf{h} = \mathbf{g}^\top (\mathbf{f}_1 \quad \mathbf{f}_2 \quad \dots \quad \mathbf{f}_m)^\top$ を用いて、

$$v = \mathbf{h}^\top \mathbf{x} \quad (3.6)$$

で表すことができる．

3.1.3 品質量の推定

3.1.1 節、3.1.2 節より、品質量である化学物質量と味覚は、吸収係数と線形関係である．本研究では、この線形性を利用し品質量を推定するために線形重回帰を用いる．品質量 z を目的変数、吸収係数スペクトル $\mathbf{x}$ を説明変数とすると、回帰式は

$$z = \mathbf{c}^\top \mathbf{x} \quad (3.7)$$

で表される．ここで、 $\mathbf{c}$ は回帰係数ベクトルである．回帰係数ベクトルは、品質量の真値とスペクトルの組を学習データとして、回帰分析を行うことにより求められる．品質量の真値としては、化学物質量の場合は屈折糖度計などの装置による計測値を用い、味覚の場合は官能検査による評価値を用いる．品質量の推定値 $\hat{z}$ は、計測された吸収係数スペクトルを用いて、

$$\hat{z} = \hat{\mathbf{c}}^\top \mathbf{x} \quad (3.8)$$

により推定される．

3.2 果実の品質量計測実験

3.2.1 ハイパースペクトルカメラによる果実の計測

実際の果実の品質量の計測実験により，本手法の有効性を検証する．この実験では，市販されているイチゴを計測対象とし，イチゴに光線を均一に照射したときの透過像を，光源の対面からハイパースペクトルカメラによって計測した．光源には Ocean Optics 社の HL-2000，ハイパースペクトルカメラとして Surface Optics 社の SOC710 を用いた．

3.2.2 果実の透過スペクトルに関する考察

イチゴの品質を表す品質量を決定する．最初に，品質との関係について考察するため，計測で得られた全画素のスペクトルに対し主成分分析を行った．主成分分析の前処理として，計測された各画素の透過スペクトルの対数をとった．そして，各画素の対数を取った透過スペクトルにおいて，波長軸方向に中心化と分散の正規化を行うことで，各画素の明るさの違いによる影響を取り除いた．さらに，各画素を主成分分析における 1 つのサンプルとみなし，全画素に関する中心化と分散の正規化を行った．図 3.1 に，透過スペクトルを主成分分析したときの固有ベクトルを第 4 主成分まで示す．第 1 主成分は，630 nm の波長を境に長い波長では正，短い波長では負となっていることから，第 1 主成分はイチゴ表面の赤色の強さを表していると考えられる．第 2 主成分以降は，固有ベクトルのスペクトルから解釈を行うことは困難であるため，各種成分の空間分布を可視化する．第 1 主成分から第 4 主成分の大きさを値が大きいほど明るくなるように可視化した画像を図 3.2 に示す．第 2 主成分はイチゴの肩の部分で高く，第 3 主成分は先端部で高いことから，2 つの主成分はそれぞれ，イチゴの肩らしさと先端らしさを表していると考えられる．また，第 4 主成分は表面における光源の鏡面反射が現れている．最後に，表 3.1 に各主成分の寄与率を示す．第 4 主成分までの累積寄与率は 0.885 であるため，これらの主成分にスペクトルの持つ情報の大部分が含まれていると考えられる．

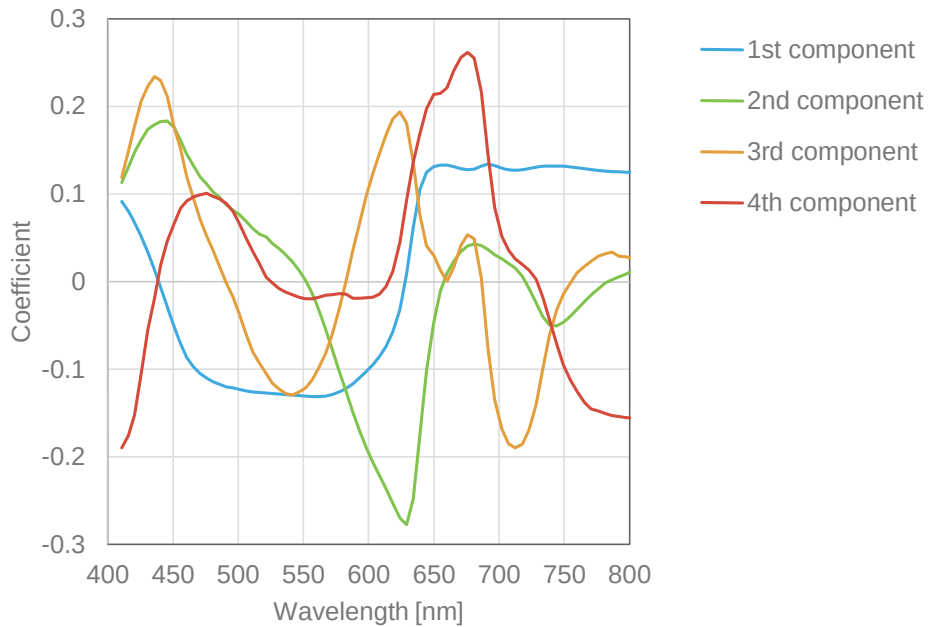


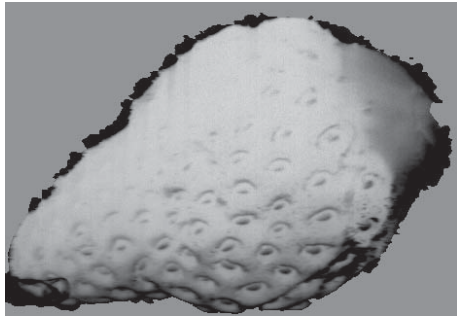
図 3.1: イチゴのスペクトルの固有ベクトル

表 3.1: イチゴの透過スペクトルの各主成分の寄与率

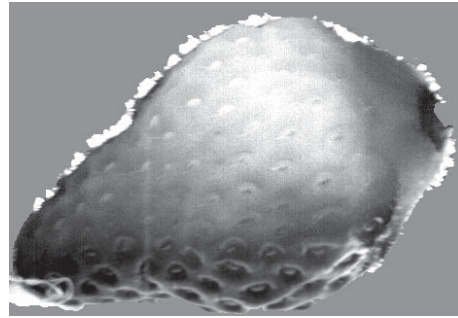
component	1st	2nd	3rd	4th	total
contribution	0.885	0.140	0.045	0.020	0.885

3.2.3 甘味をあらわす品質量の推定

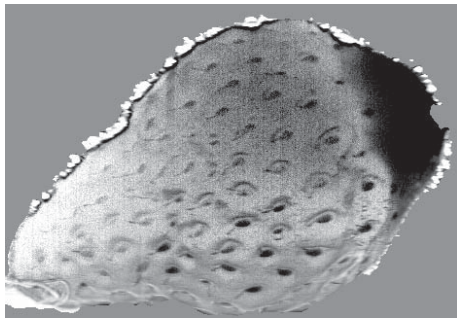
まず、イチゴの甘味を表す品質量を決定する。前節の主成分分析の結果より、イチゴの透過スペクトルには、主に表面色、肩・先端らしさや鏡面反射の情報が含まれていることがわかった。この中で品質と関連られるものとして、肩らしさを表す第2主成分と、先端らしさを表す第3主成分に注目する。イチゴは個体内では先端で糖度が高く、反対に肩では糖度が低いことが知られている [8]。そこで、イチゴの先端らしさは甘さに対応付けられるものとして、イチゴの先端らしさから甘味の品質量として定義する。まず、図 3.3 に先端部と肩部の対数透過スペクトルを示す。



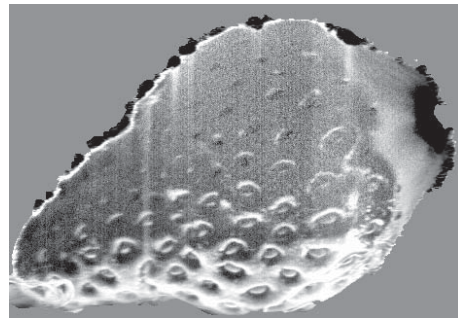
(a) 第 1 主成分



(b) 第 2 主成分



(c) 第 3 主成分



(d) 第 4 主成分

図 3.2: イチゴの透過スペクトルの各主成分の可視化

それぞれの肩部のほうが先端と比較し、どの波長でも透過が強いことがわかる。また、対数透過率の差は、650 nm から 700 nm で特に大きいことがわかる。

ここからは、実際に品質量を計算するため、式 3.8 の回帰係数ベクトル $\hat{c}$ を求める。目的変数 z はサンプル点が先端・非先端を表すラベルであり、それぞれに対し 1, -1 を与えた。説明変数 x は各サンプル点のスペクトルであり、前節の主成分分析のときと同様の前処理を行った。サンプル点として、先端を表すサンプルを 2125 点、非先端を表すサンプルを 2596 点で与え、主成分回帰 [9] により重回帰を行った。

推定された回帰係数ベクトル $\hat{c}$ を図 3.4 に示す。回帰係数より、630nm 付近と 750nm 付近の波長で透過率が高く、450nm 付近と 670nm 付近の透過率が低いとき、甘味が強いと推定されることがわかる。

回帰係数ベクトル $\hat{c}$ が求められたため、式 3.8 を用いて未知のスペクトルに対して品質量を推定することが可能になった。イチゴの甘味の品質量を推定し、面計測

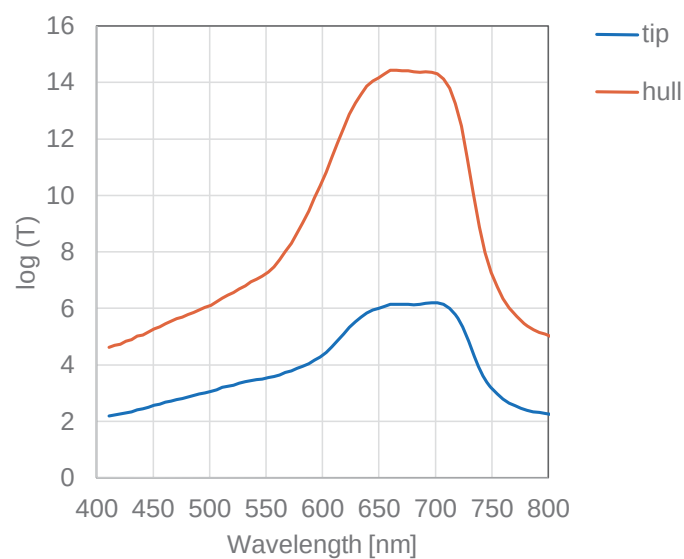


図 3.3: イチゴの各部位の対数透過スペクトル

画像上で品質量が高いほど明るくなるように可視化した結果を図 3.5 に示す．先端では品質量が高く，肩では品質量が低くなっているが，回帰するとき与えたラベルの分布と一致するため品質量の推定は正しく行われていることがわかる．一方，イチゴの下部においても品質量が高く推定されている．考えられる原因として鏡面反射の影響が挙げられる．鏡面反射が起きた場所のスペクトルは，光源のスペクトルに強く影響される．光源のスペクトルの影響を受けた先端部のスペクトルを用いて回帰を行ったため，先端と同様に鏡面反射が起きていたイチゴの下部においても，品質量が高く推定されたと考えられる．

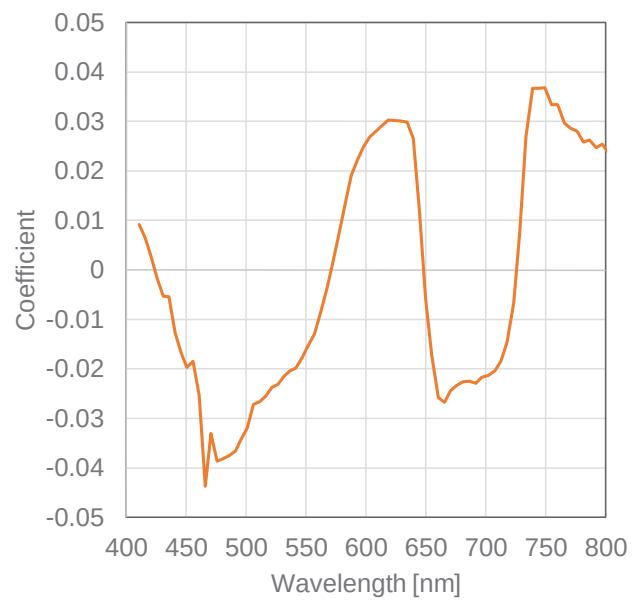


図 3.4: イチゴの甘味を表す品質量の回帰係数ベクトル

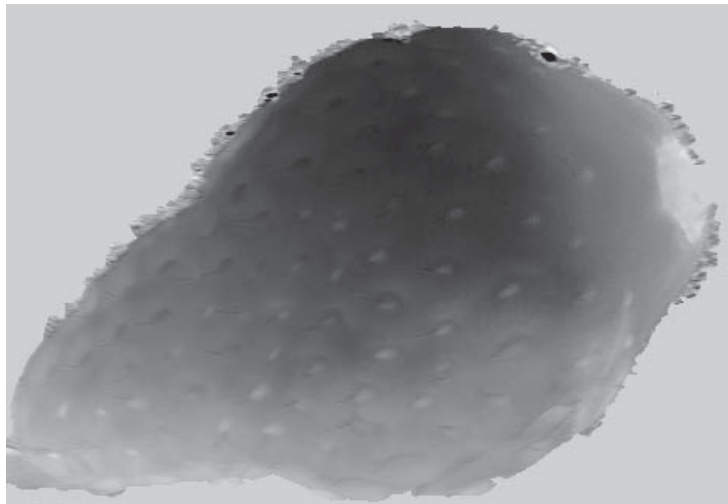


図 3.5: イチゴの甘味を表す品質量の可視化

第 4 章 散乱体の内部計測

4.1 関連研究

4.1.1 非光学的手法

物体の内部計測は，病院における人体の診断，工業生産における欠陥の発見や空港における持ち込み品検査など，さまざまな分野で必要とされている技術である．特に，核磁気共鳴画像法 (MRI) や CT は物体の 3 次元的な形状を計測できるため，医療現場などで活用されている．MRI は，静電場中の物体に対して高周波磁場を印加することにより特定の原子を共鳴させ，さらに一様勾配の磁場を加えることによって原子の空間分布を推定する [10]．MRI は，磁場を用いるため計測対象に与える影響が小さい手法だが，容易に計測できる原子が水素などに限られるため，多くの場合，水などの水素原子を含む分子の分布しか計測されない．このため，果実中の化学物質分布を計測するのには不向きである．

CT は，様々な方向から X 線や光などの電磁波や音波などを物体に対して照射したときの物体による吸収を計測し，計算機を用いて断面の吸収係数分布を推定する手法である [11]．医療分野で最も一般的な CT は，電磁波として X 線を用いる X 線 CT であり，水素原子を検出する MRI では撮影できない骨なども撮影が可能になる．しかし，従来の X 線 CT では化学物質の違いを判別できないため，化学物質分布は計測できない．透過する X 線のエネルギー分布を計測することで化学物質を識別するフォトンカウンティング CT が研究されているが，発展途上の技術である．また，X 線は放射線であるため，被曝のリスクがあり，安全に計測するための設備投資が必要となる．

4.1.2 光学的手法

光 CT は，電磁波として可視・近赤外光を用いる CT であり，X 線のように被曝リスクがない安全な計測手法として近年注目されている．また，分光を用いることで，特定の化学物質に注目した内部計測を行うことができる．しかし，X 線はほとんどの物体内で直進するのに対し，光は半透明物体内では反射を繰り返し複雑な経

路を通る散乱という現象が起こる。この散乱のために、X 線 CT の手法を用いることはできないことから、光 CT 独自の計測・内部推定が研究されている。

拡散光トモグラフィは、主に生体の計測を目的に研究が行われている光 CT 技術である [12]。拡散光トモグラフィでは、光が等方的に散乱する拡散伝播であるとして光伝播をモデル化し、生体内での光伝播をシミュレーションする。そして、実際に 1 点から光が入射したときに生体表面で計測される出射光強度と、シミュレーションによる結果が一致するような物体の内部分布を求める。また、特定の波長に注目しヘモグロビンを計測することで、血流や筋機能の可視化が可能となる。時間分解計測法は、短いパルス光を入力したときの時間応答を計測することで空間解像度を高めた手法であり、人の上腕の筋肉の活動 [13] や新生児の頭部 [14] などの計測例がある。拡散光トモグラフィでは、生体内では散乱が強いので光が等方的に散乱すると仮定しているため、計測対象の散乱に方向性がある場合は考慮されていない。

一方、対象物体の散乱の性質を考慮した光 CT の手法として、散乱光トモグラフィが研究されている。Tamaki ら [15] は、物体を光の進行方向と垂直な複数層からなるものとして、光線が現在の層から次の層へ進むときに散乱が起こるとモデル化した内部推定手法を提案した。このモデルでは、層構造を仮定することで散乱を方程式として表現できるという利点がある。Ishii ら [16] は、異物の位置を検出する手法として Monte Carlo Voting を提案した。この手法では、Monte Carlo レイトレーシングによって生成された光路について、異物がないときの出射光強度と計測された出射光強度の比により、光路上に異物が存在する割合を計算し、空間分布上に投票を行うことで異物の位置を推定する。この手法では、実物体を用いた実験により、散乱光を考慮しない手法に比較して正確に異物の位置を推定できることが示されている。さらに、散乱光トモグラフィを行うための計測手法の研究も行われている。Akashi ら [17] は、楕円鏡を用いた計測手法を提案している。この手法では、機械的な駆動なしで散乱光の全周計測が可能である。

4.2 光路のモデル化

内部分布は、光線が物体を通過するときの光路上の吸光度を元に計算される。このため、計測される光線の物体内における光路をモデル化する必要がある。果実の

ような内部の微粒子の密度が高い散乱体では、多重散乱という複数回の散乱が起こり、光路が複数に分かれることが知られている。この節では、多重散乱による経路を近似する光路モデルを提案する。

一般的な X 線 CT で採用されている光路モデルは、図 4.1(a) に示すような、平行透過光モデルである。物体に入射した光線は、内部においても直進し、そのまま方向を変えずに出射する。このため、光源と検出器の位置関係から物体内における光路が容易に特定できるという利点がある。放射線である X 線は、直進性が強く、人体のような計測対象内では散乱がほとんど起こらないため、このモデルは有効である。一方、本研究では、果実内において可視・近赤外光が散乱を起こすため、このモデルは適さない。

多重散乱を考慮したモデルとして、図 4.1(b) に示すような光路モデルを考えることができる。このモデルは散乱光の経路を忠実に再現しており、実際に 4.1.2 節で紹介した散乱光トモグラフィに関する研究で取り入れられている。しかし、このモデルを用いた内部推定では散乱特性が既知である必要がある。また、光路が複雑であるため内部推定手法が平行透過光モデルに比較して複雑で、計算コストが高いものとなる。

そこで、本研究では、これらの 2 つのモデルの中間的なモデルである、最短経路の散乱光のみを考慮した光路モデルを提案する。ある 1 本の光線が入射すると、光線は多重散乱を起こし複数の経路に分かれ、表面のあらゆる点から出射される。光線は、入射点と出射点を結ぶあらゆる光路を進み得るが、図 4.1(c) のように、その 2 点を結んだ直線は散乱光の経路の 1 つの近似と考えることができる。このモデルは、物体表面でのみ散乱が起こり、内部は透明物体である場合の光路を表現しているとも捉えられるため、今後、**表面散乱モデル**と呼ぶ。

表面散乱モデルを用いると、物体内では光の直進を仮定しているため、平行透過光モデルの内部推定手法を応用できる。一方で、散乱が強い物体では、多重散乱により多くの光線が長い経路を通ると考えられる。このような光線を最短の光路で近似することにより、内部推定の精度が低下すると予想される。

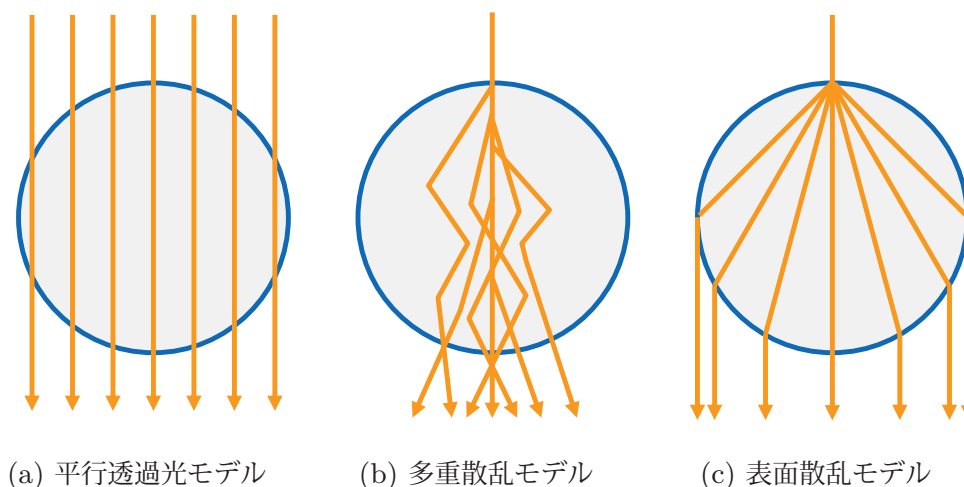


図 4.1: 光路モデル

4.3 吸光係数の内部分布推定手法

4.3.1 CT 計測とサイノグラム

この節では、CT の計測手法と計測データについて述べる。ここでは、平行透過光モデルを用いたときの計測を**平行透過計測**，表面散乱モデルを用いたときの計測を**表面散乱計測**と呼ぶ。平行透過計測の模式図を図 4.2 に示す。光源とカメラは対面に置かれ、その間に置かれた物体を回転させながら透過像を計測する。カメラの投影中心は物体の回転軸と一致している。光源から出射される光線は平行光であるため、光線は交わることなく、その正面の検出器で検出される。CT 計測では、計測される透過像をサイノグラムで表現する。サイノグラムは、計測された透過像から断面を再構成したい高さの部分を取り出し、物体の角度順に縦に並べたものである。例として、図 4.4(a) に示す吸収係数分布を CT 計測したときのサイノグラムを図 4.4(b) に示す。

次に、表面散乱計測の模式図を図 4.3 に示す。光源とカメラは物体の中心を向くように配置され、物体を回転させながら計測を行う。光源からは細い光線が照射される。表面散乱モデルでは、光線は表面の入射点で散乱により方向を変えた後、内部を直進し、再び表面に到達する。検出器では、光線が到達する表面を計測することになる。表面散乱計測においても、計測された透過像から断面を再構成したい高

さの部分を取り出し、物体の角度順に縦に並べたサイノグラムを作成する。

4.3.2 光線の平行化

平行透過計測と表面散乱計測では光線の角度が異なるため、異なるサイノグラムが得られる。しかし、平行透過光モデルと表面散乱モデルは、いずれも物体内部で光路が直線であることを仮定しているため、光線の方法の関係を考慮することにより、平行透過計測と表面散乱計測のサイノグラムは相互に変換可能である。表面散乱計測で得られたサイノグラムを平行透過計測のサイノグラムに変換できれば、従来の再構成手法を用いることができる。この節では、表面散乱計測で得られたサイノグラムを平行透過計測のサイノグラムに変換する、平行化の手法を説明する。以下の議論では、簡単のためカメラは平行投影モデルに従い、計測物体は円形であると仮定する。

サイノグラムは、物体を通過する光線を格納していると捉えることができる。まず、平行透過計測で得られるサイノグラム $g_p(X, \theta)$ について、サイノグラム上の座標と光線の経路の関係を考える。図 4.5 に、平行透過計測における幾何学的関係を示す。ここでは、カメラの投影中心が物体の回転中心に正対しているものとし、投影平面を X 軸、物体の回転角を θ_p で表す。オレンジ色で表される投影平面の X_p において計測される光線は、サイノグラムにおいて $g_p(X_p, \theta_p)$ に格納される。ここで、物体からみた光線の位置、方向を表現するために、図中に示すような y 軸が光線に平行で、 x 、 y 軸がともに物体の回転中心を通る xy 平面を定義する。 x 軸と光線との交点の座標を x_r とすると、 x_r は物体中心からの光線の変位を意味する。また、図中の緑色の実線は物体の向きを表す。緑色の実線と x 軸がなす角 θ_r を物体に対する光線の方法として定義する。これらの変数を使うと、物体から見た光線の位置・方向は (x_r, θ_r) と表現できる。平行透過計測では、 x 軸が $\theta = 0$ のときの物体の向きに一致するため

$$\theta_r = \theta_p \quad (4.1)$$

であり、 x 軸と X 軸が平行であるため

$$x_r = X_p \quad (4.2)$$

の関係が成り立つ.

次に、表面散乱計測で得られるサイノグラム $g_d(X, \theta)$ について、サイノグラム上の座標と光線の経路の関係を考える. 図 4.6 に、表面散乱計測における幾何学的関係を示す. カメラの位置は固定され、光源はカメラの正面から θ_l ずれた位置に配置されるものとし、物体の回転角は θ_d であるとする. オレンジ色の矢印は、サイノグラムの $g_d(X_d, \theta_d)$ に格納される光線の経路を示している. 入射した光線は、散乱により表面の入射点で方向が ϕ ずれ、内部を直進した後、再び表面上に到達し、カメラにより計測される. 平行透過計測のときと同じ xy 平面を定義し、物体内の光線の位置・方向を (x_r, θ_r) により表現すると、幾何学的関係より、

$$\theta_r = \theta_d + \theta_l - \phi \quad (4.3)$$

である. また、円の半径を r とすると、

$$X_d = r \cos(\theta_l - 2\phi + \pi) \quad (4.4)$$

$$x_r = r \sin \phi \quad (4.5)$$

より、

$$x_r = -\frac{X_d \sin \phi}{\cos(\theta_l - 2\phi)} \quad (4.6)$$

が得られる.

以上より、平行透過計測と表面散乱計測について、それぞれサイノグラム上の座標と、物体内部の光線の位置・方向との関係が明らかになった. これらから、平行透過計測と表面散乱計測のサイノグラム上の座標を直接の関係を導く. 式 4.1-4.6 から x_r , θ_r を消去すると、

$$\theta_p = \theta_d + \theta_l - \phi \quad (4.7)$$

$$X_p = -\frac{X_d \sin \phi}{\cos(\theta_l - 2\phi)} \quad (4.8)$$

となることから、平行透過計測のサイノグラム $g_p(X, \theta)$ と表面散乱計測のサイノグラム $g_d(X, \theta)$ は次式で変換できる:

$$g_p(X, \theta) = g_d\left(-\frac{X \sin \phi}{\cos(\theta_l - 2\phi)}, \theta + \theta_l - \phi\right). \quad (4.9)$$

4.3.3 光源位置が計測範囲へ与える影響の検証

表面散乱モデルでは，入射点における散乱が全方向に均一であると仮定しているため，光線は物体の全表面に到達する．しかし，カメラからは物体に隠れる表面は撮影できないため，隠れた表面に到達した光線は計測されない．表面散乱計測のサイノグラムを平行化して得られたサイノグラムでは，対応する光線が計測されていない部分については充填されないことになる．光線が到達する表面上の点は光源位置に依存する．そこで，この節では光源位置と平行化されたサイノグラムの充填率の関係について考察する．

まず，議論を単純にするため平行化されたサイノグラムの対称性について考える．物体を通過するある 1 本の光線の減衰は，同じ経路を逆向きに通過する光線の減衰と等しい．このため，サイノグラムの中心線を $X = 0$ とすると，

$$g_p(X, \theta) = g_p(-X, \theta + \pi) \quad (4.10)$$

が成り立つため，サイノグラムの左半分は，サイノグラム右半分の位相が半周期ずれたものと左右対称となる．

次に，物体が半径 1 の円形であると仮定し，光源がカメラの正対方向から θ_l ずれた位置にあるときに，計測される光線について考える．カメラが平行投影であると仮定すると，カメラからは物体のカメラ側半分しか撮影できないことになる．図 4.7(a) は， $0^\circ \leq \theta_l \leq 90^\circ$ の場合の計測範囲を模式的に示している．物体表面の緑色の部分はカメラで撮影される範囲であり，それ以外の表面に到達した光線は計測されない．この結果，緑色で示す物体中心を含む内側領域を通過する光線は計測されるが，それ以外の外側領域の光線は計測されないことがわかる．前節における議論から，平行透過計測のサイノグラムの横軸は，物体中心から見たときの光線の変位を意味している．また，サイノグラムの左右の対称性を考えると，サイノグラムの横軸に対する充填される範囲は，物体中心と計測される光線の変位の絶対値，すなわち距離から求められることがわかる．計測可能な最も外側の光線と物体中心の距離 $p_{\max}$ は

$$p_{\max} = \cos\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\theta_l}{2}\right) \quad (4.11)$$

で与えられる．また，計測可能な最も内側の光線と物体中心の距離 $p_{\min}$ は，物体

中心を通過する光線が存在するため 0 である．図 4.7(b) に， $90^\circ \leq \theta_l \leq 180^\circ$ のときの計測範囲を模式的に示す． $0^\circ \leq \theta_l \leq 90^\circ$ の場合とは逆に，緑色で示す外側領域を通過する光線は計測されるが，それ以外の物体中心を含む内側領域の光線は計測されないことがわかる．計測可能な最も内側の光線と物体中心の距離 $p_{\min}$ は

$$p_{\min} = \sin\left(\frac{\theta_l}{2} - \frac{\pi}{4}\right) \quad (4.12)$$

で与えられる．また，計測可能な最も外側の光線と物体中心の距離 $p_{\max}$ は 1 である．これらより，光線と物体中心の距離を p とすると，計測可能な光線は，

$$p_{\min} \leq p \leq p_{\max} \quad (4.13)$$

で表すことができる．

ここで，平行透過計測のサイノグラムにおいて計測可能な光線の割合を充填率と定義する．充填率とサイノグラム上で充填される領域の関係を図 4.8 に示す．サイノグラムの対称性を用いて，サイノグラムの $X < 0$ の領域だけ考えると，サイノグラムの幅は物体の半径と同じ 1 であり，充填される幅は， $p_{\max} - p_{\min}$ である．このため，充填率は $p_{\max} - p_{\min}$ で計算される．図 4.9 に光源位置と充填率、 $p_{\max}$ および $p_{\min}$ の関係を示す．グラフからは，充填率は $0^\circ \leq \theta_l \leq 90^\circ$ のとき $p_{\max}$ に影響を受け， $90^\circ \leq \theta_l \leq 180^\circ$ のとき $p_{\min}$ に影響を受けることが読み取れる．充填率は，光源がカメラの正対位置にある $\theta_l = 0^\circ$ では 0.71 であり， θ が増加すると 1 まで増加するが， $\theta_l = 90^\circ$ を超えると減少に転じ， $\theta_l = 180^\circ$ では 0.29 となる．以上の考察より，最適な光源位置は充填率が最高となる $\theta_l = 90^\circ$ であることがわかった．

4.3.4 吸収係数分布の推定

この節では，吸収係数分布を推定する内部推定手法について説明する．まず，物体の断面を図 4.10 のように格子状に区切り離散化する．それぞれのセルを表す添え字を j ，各セルの吸収係数を x_j とする．また，計測値を，光路ごとに 1 つの観測として扱う． i 番目の観測における出射光の強度を I_i ，入射光の強度を I_0 ，および

光線の各セル内での経路長を d_{ij} とすると, Lambert-beer の法則の式 2.1 から,

$$I_i = I_0 \prod_j \exp(-x_j d_{ij}) \quad (4.14)$$

が成り立つ. 両辺の対数を取り, 吸光度の定義 $a_i = \frac{I_i}{I_0}$ を用いて書き直すと,

$$a_i = \sum_j x_j d_{ij} \quad (4.15)$$

$$(4.16)$$

が得られる. この式をすべての観測について連立すると, 次式が得られる:

$$\mathbf{a} = \mathbf{D}\mathbf{x}. \quad (4.17)$$

ただし,

$$\mathbf{a} = \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_m \end{pmatrix}, \mathbf{D} = \begin{pmatrix} d_{00} & d_{01} & \dots & d_{0n} \\ d_{10} & d_{11} & \dots & d_{1n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{m0} & d_{m1} & \dots & d_{mn} \end{pmatrix}, \mathbf{x} = \begin{pmatrix} x_0 \\ x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix}. \quad (4.18)$$

$\mathbf{D}$ は既知であるため, 式 4.17 を解くことにより物体の吸収係数分布 $\mathbf{x}$ を推定することができる.

4.4 シミュレーションによる推定精度の検証

前節で述べたように, 本手法では一部の光線が計測できないため, 平行透過計測と比較し充填率の低いサイノグラムを用いて内部推定を行わなければならない. このときの推定精度について, Filtered Back Projection(FBP)[18], Simultaneous Algebraic Reconstruction Technique(SART)[19] および非負制約下における最小二乗法 (NNLS) の 3 つの再構成アルゴリズムについて比較を行う. 本実験では, 図 4.11 に示すような吸光係数分布を設定し, 左右の楕円部の吸収係数はそれぞれ 10, 20 とする.

まず, サイノグラムに欠落がない場合の内部推定精度の比較を行う. 図 4.12 は平行透過計測で得られる欠落のないサイノグラムである.

まず、FBP による内部推定結果および誤差を図 4.13 に示す。輪郭部の推定に少しの誤差がある他は、どの領域においても正確に吸収係数分布が推定されていることがわかる。次に、SART による内部推定結果および誤差を図 4.14 に示す。輪郭部の推定に少しの誤差があり、楕円の輪郭に接するような線状のアーティファクトが見られるものの、楕円内では正確に吸収係数分布が推定されている。最後に、NNLS による内部推定結果および誤差を図 4.15 に示す。数値的誤差を除き完全な吸収係数分布が推定された。以上から、サイノグラムに欠落がない場合はいずれの手法でも、正確に内部推定が行えることがわかった。

続いて、サイノグラムに欠落がある場合の内部推定精度の比較を行う。ここでは、図 4.16 に示す $\theta_l = 0^\circ$ のサイノグラムを用いる。

まず、FBP による内部推定結果および誤差を図 4.17 に示す。欠落の影響により円形のアーティファクトが現れており、円の外側では吸収係数が実際より小さく推定されていることがわかる。円の内側の誤差は外側に比べ小さいが、左側の楕円領域では、円形のアーティファクト周辺で吸収係数が実際より高く推定されている。次に、SART による内部推定結果および誤差を図 4.18 に示す。FBP のときと同様に円形のアーティファクトが現れている。円の外側では輪郭がぼやけ、不鮮明になっているが誤差は FBP より小さくなっている。円の内側の誤差は外側に比べ小さいが、円形のアーティファクト周辺で吸収係数が実際より少し高く推定されている。最後に、NNLS による内部推定結果および誤差を図 4.19 に示す。他の手法と同様に円形のアーティファクトが現れている。円の外側では、吸収係数の推定誤差が大きい領域が多いが、他の手法に比べ輪郭の形状が鮮明である。円の内側では誤差は外側に比べ小さいが、左側の楕円領域では、円形のアーティファクト周辺で吸収係数が実際より高く推定されており、FBP と同じ傾向が見られるが、誤差では FBP に劣る。

以上から、サイノグラムに欠落がない場合はいずれの手法でも、完全な吸収係数の推定は困難であることがわかった。いずれの場合も、欠落の影響により円形のアーティファクト現れるが、この内側の推定が最も正確なのは FBP であった。円形の外側の推定では、SART が最も誤差が小さく、NNLS が最も輪郭が鮮明であるという結果が得られた。

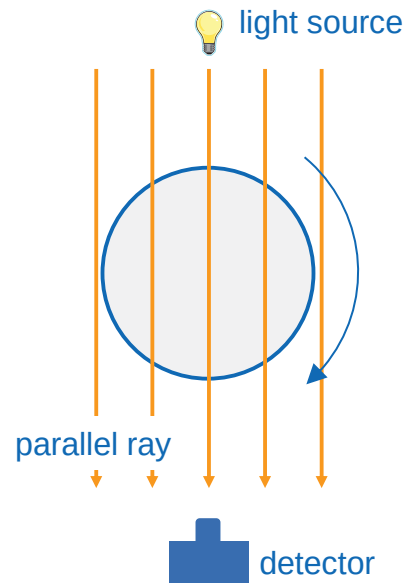


図 4.2: 平行透過計測の模式図

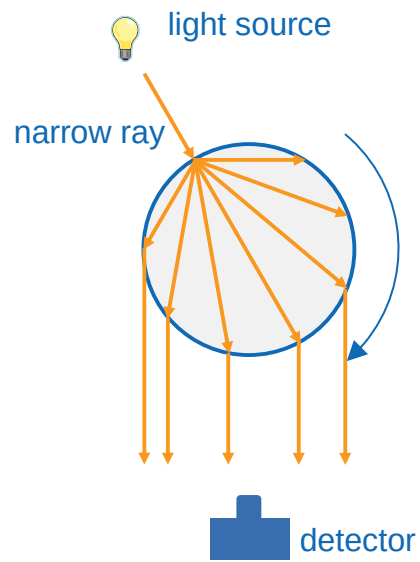
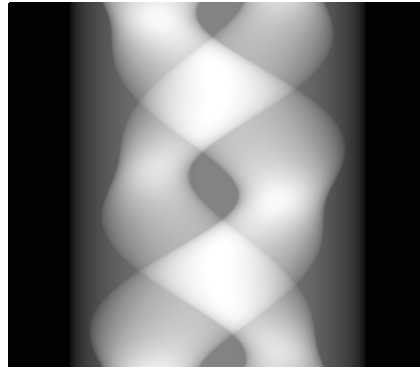


図 4.3: 表面散乱計測の模式図



(a) 吸収係数分布



(b) サイノグラム

図 4.4: サイノグラムの例

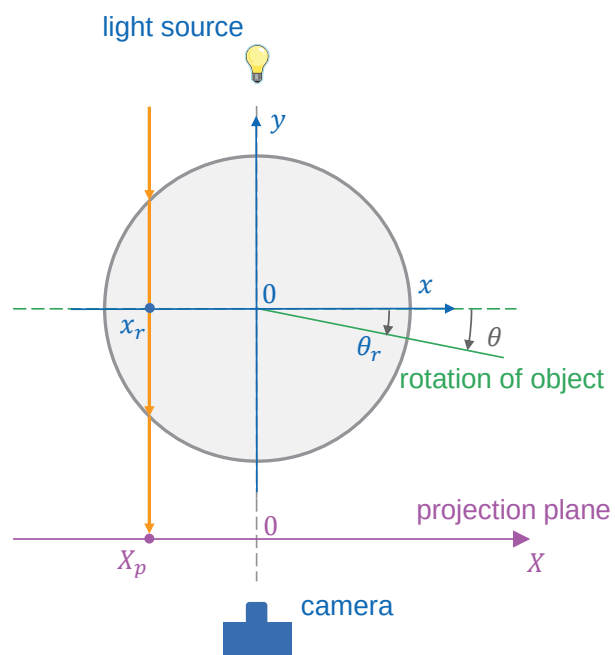


図 4.5: 平行透過計測における幾何学的関係

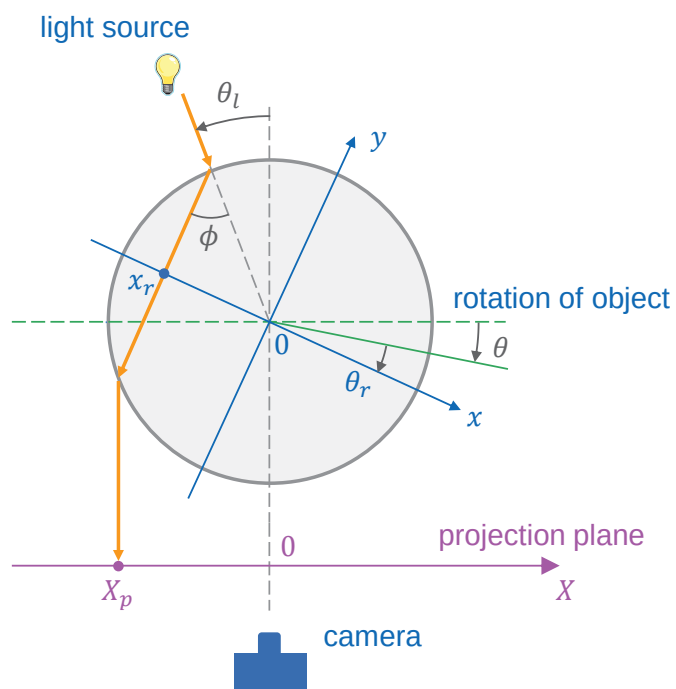
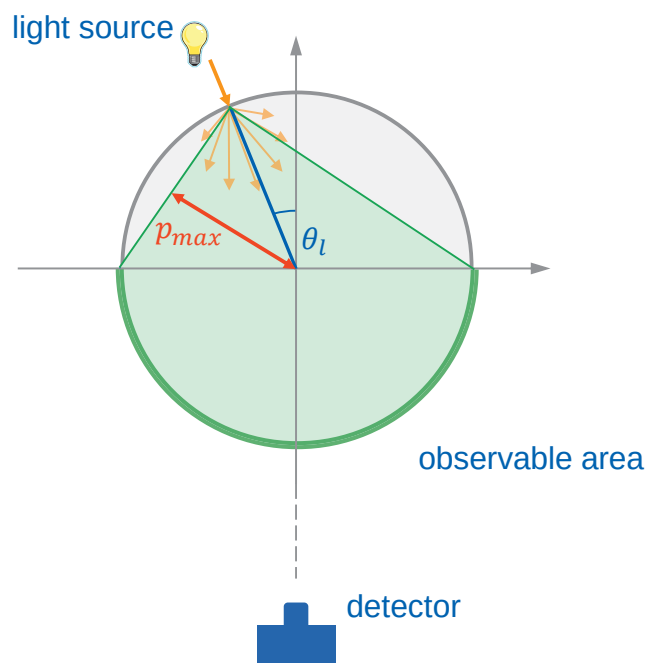
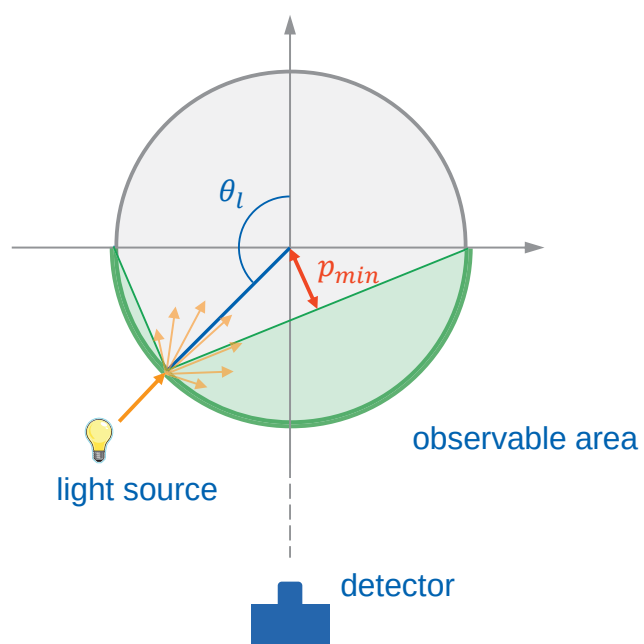


図 4.6: 表面散乱計測における幾何学的関係



(a) $0^\circ \leq \theta_l \leq 90^\circ$ の場合



(b) $90^\circ \leq \theta_l \leq 180^\circ$ の場合

図 4.7: 光源位置と計測範囲

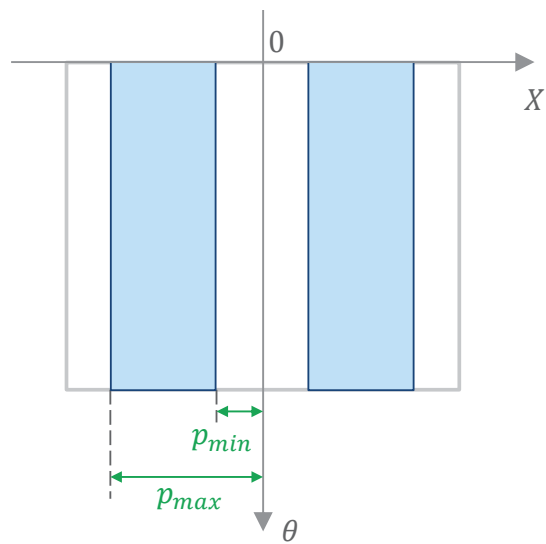


図 4.8: 充填されるサイノグラム領域

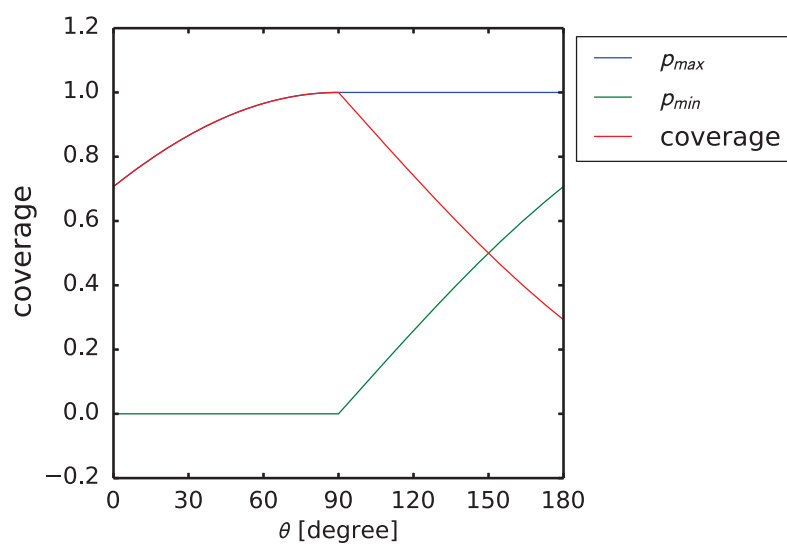


図 4.9: 光源位置とサイノグラムの充填率の関係

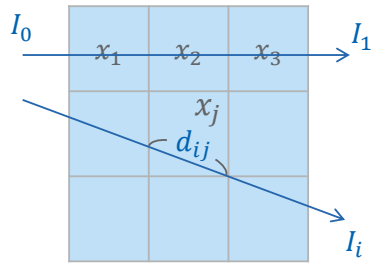


図 4.10: 物体の離散化

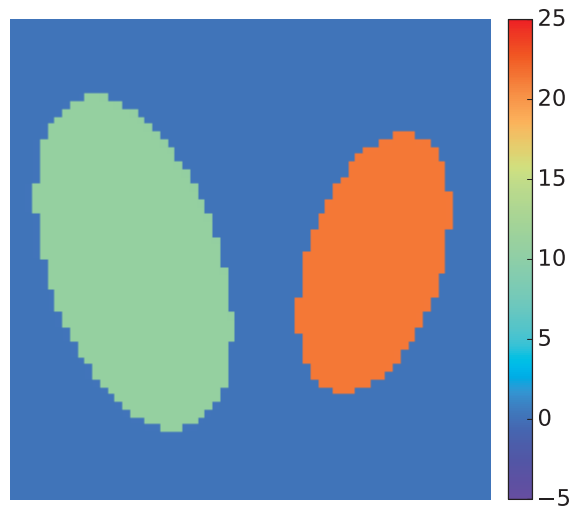


図 4.11: シミュレーション実験における吸光係数分布の設定

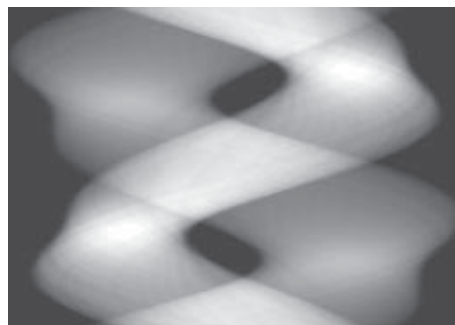
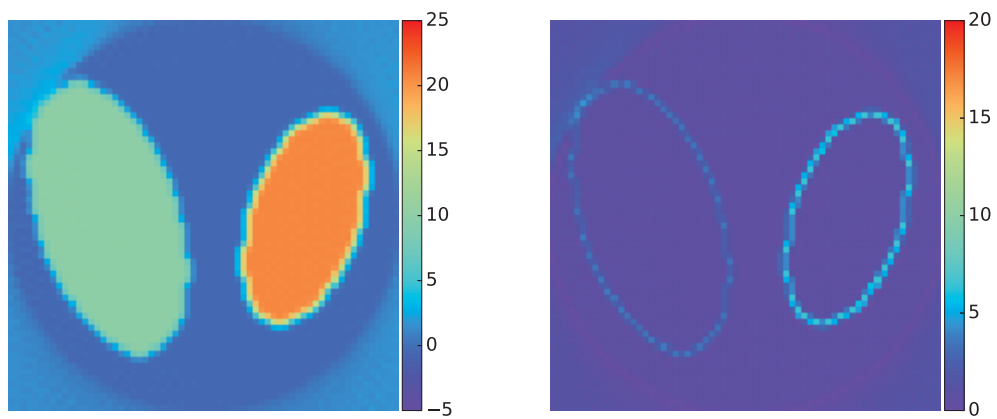


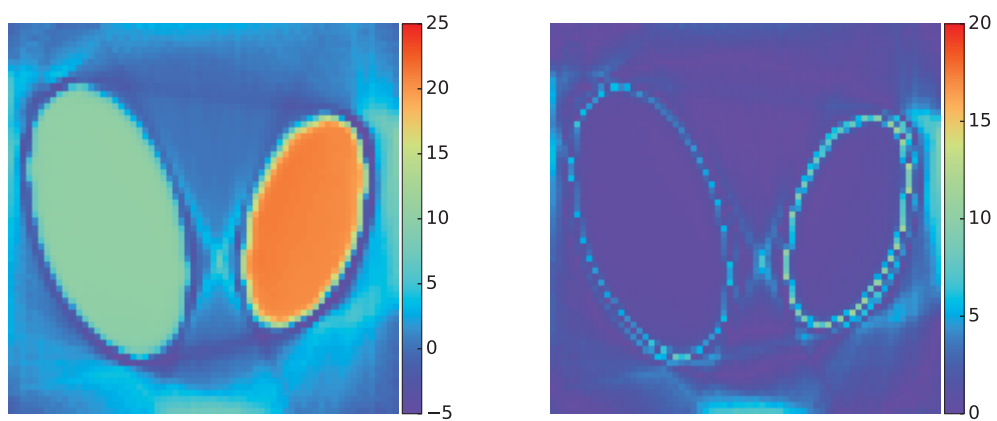
図 4.12: 平行透過計測のときのサイノグラム



(a) 推定された吸収係数分布

(b) 誤差

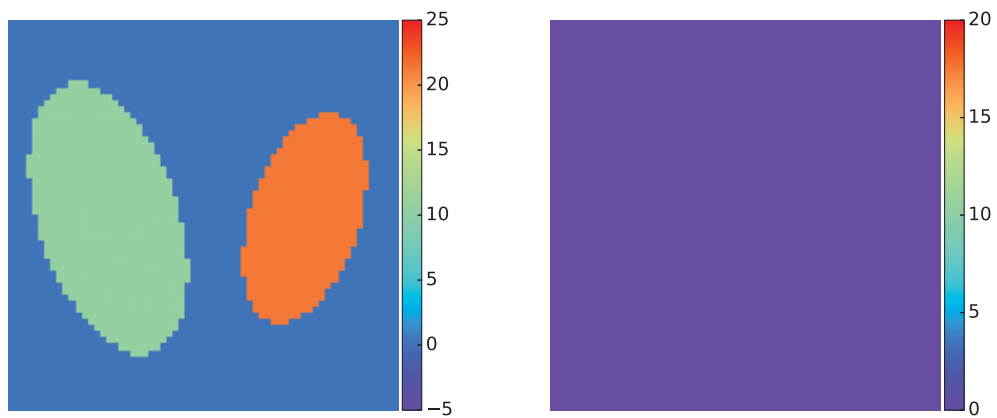
図 4.13: FBP による推定結果 (平行透過計測)



(a) 推定された吸収係数分布

(b) 誤差

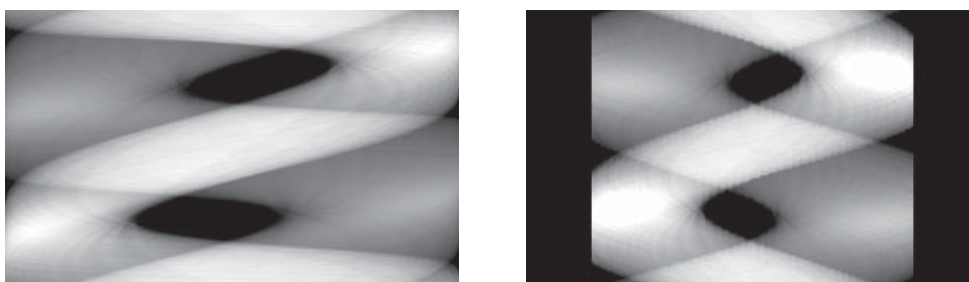
図 4.14: SART による推定結果 (平行透過計測)



(a) 推定された吸収係数分布

(b) 誤差

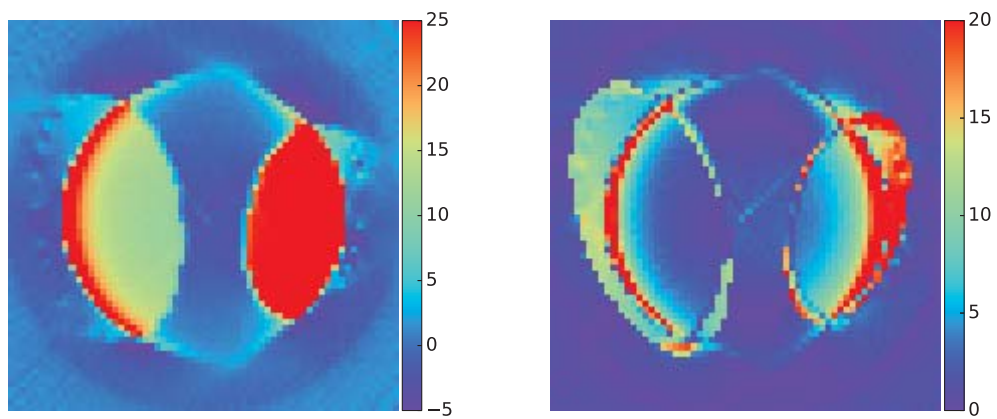
図 4.15: NNLS による推定結果 (平行透過計測)



(a) 計測で得られるサイノグラム

(b) 平行化したサイノグラム

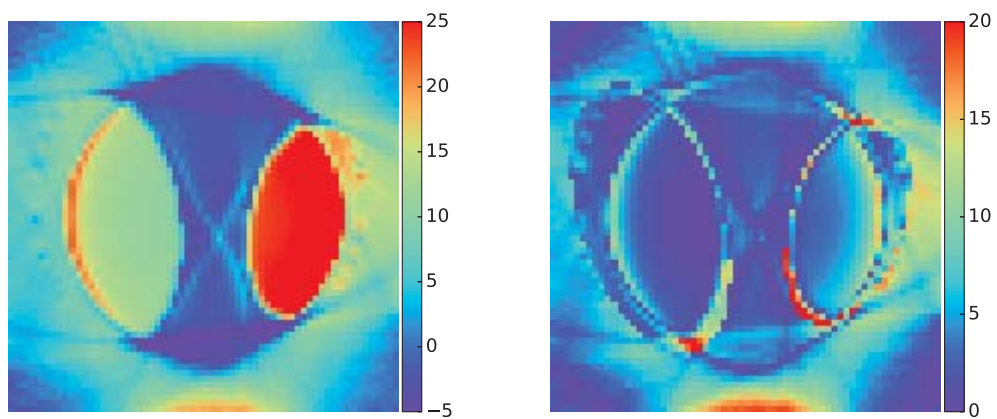
図 4.16: $\theta_l = 0^\circ$ のときのサイノグラム



(a) 推定された吸収係数分布

(b) 誤差

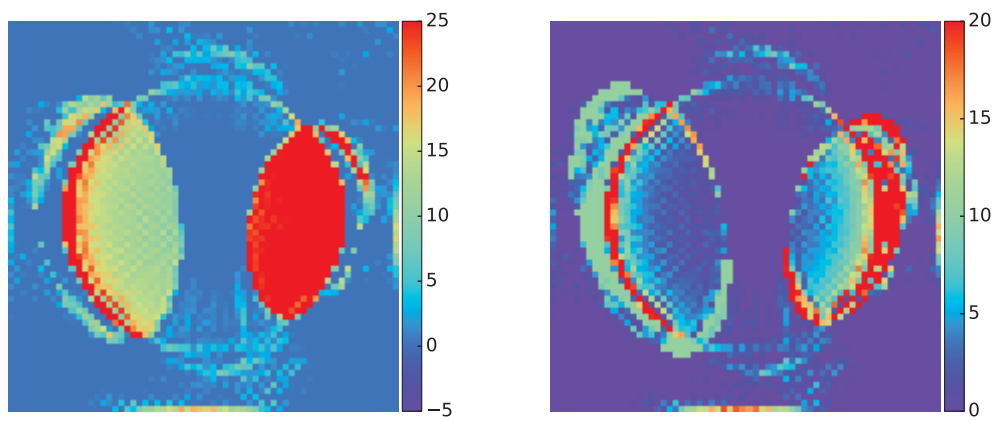
図 4.17: FBP による推定結果 ($\theta_l = 0^\circ$)



(a) 推定された吸収係数分布

(b) 誤差

図 4.18: SART による推定結果 ($\theta_l = 0^\circ$)



(a) 推定された吸収係数分布

(b) 誤差

図 4.19: NNLS による推定結果 ($\theta_l = 0^\circ$)

第 5 章 品質量分布の推定

5.1 品質量分布の推定手法

3 章で導入した品質量について、物体内部の品質量分布を推定する手法について説明する.

式 4.17 について分光を考えると、波長 λ では、

$$a_i(\lambda) = \sum_j x_j(\lambda) d_{ij} \quad (5.1)$$

が成り立つ. 品質量の係数 $c(\lambda)$ を用いると、波長に関する線形和は、

$$\sum_{\lambda} c(\lambda) a(\lambda) = \sum_{\lambda} c(\lambda) \sum_j x_j(\lambda) d_{ij} \quad (5.2)$$

となり、この式を変形すると、

$$\sum_{\lambda} c(\lambda) a(\lambda) = \sum_j \left(\sum_{\lambda} c(\lambda) x_j(\lambda) \right) d_{ij} \quad (5.3)$$

が得られる. この式の右辺の括弧の中身は、式 3.7 で定義された品質量そのものである. また、左辺は計測された光線の吸光度を c について線形和を取ったものである. そこで、吸光度の c に関する線形和を

$$b_j = \sum_{\lambda} c(\lambda) a(\lambda) \quad (5.4)$$

と定義する. 吸収係数分布の推定と同様に、各観測について連立すると次式が得られる:

$$\mathbf{b} = \mathbf{D}\mathbf{z}. \quad (5.5)$$

ただし、

$$\mathbf{b} = \begin{pmatrix} b_0 \\ b_1 \\ \vdots \\ b_m \end{pmatrix}, \mathbf{z} = \begin{pmatrix} z_0 \\ z_1 \\ \vdots \\ z_n \end{pmatrix}. \quad (5.6)$$

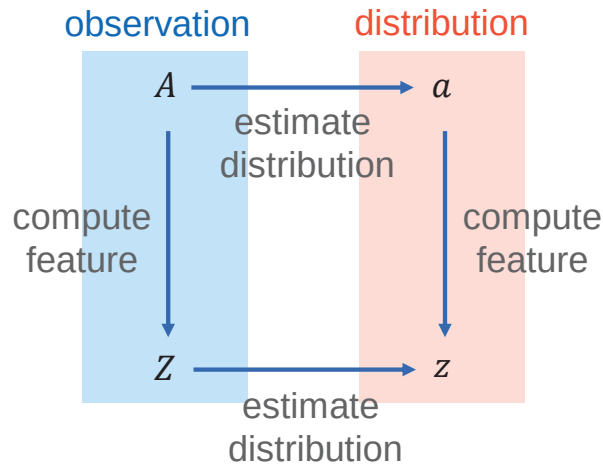


図 5.1: 品質量の内部推定の計算経路

式 5.5 を解くことにより，物体内部の品質量分布 z を推定することができる．

ここで，式 5.5 と式 4.17 を比較すると，品質量分布 z は，吸収係数分布と線形の関係であることがわかる．このため，品質量の内部分布推定には図 5.1 に示すように，各観測について品質量を計算した後に，再構成を行い品質量分布を求める経路と各波長ごとに再構成を行った後に，各波長の吸収係数分布から品質量計算を行い品質量分布を求める経路の 2 つの計算経路が考えられる．計算量の点で 2 つの操作を比較すると，前者の方法では，各方向からの観測について複数回の品質量計算を行い，その後，1 回の分布の再構成を行う．一方で，後者の方法では，各波長の観測について複数回の再構成を行い，その後，1 回の品質量計算を行う．一般に，再構成は計算量が高いことを考えると，前者の方が品質量計算を求める計算コストは低いという点で優れている．

5.2 ファントムの計測実験

5.2.1 計測対象

提案手法の有効性を確認するため，ファントムを用いた実物体の計測実験を行った．図 5.2 に計測対象のファントムを示す．計測対象は，果実の構造を模したファ

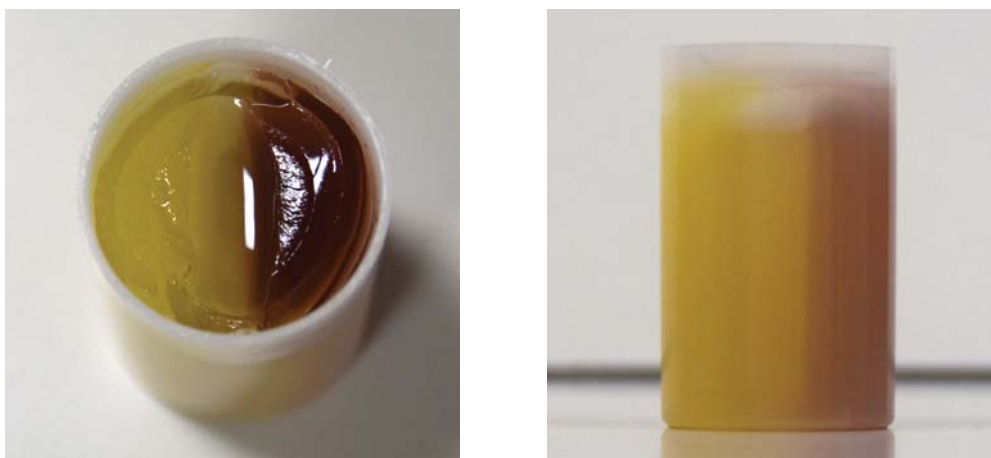


図 5.2: 計測対象

ントムであり，プラスチック製の円筒容器の中にゼラチンが満たされている．ゼラチンは 2 つの化学物質の組成が異なる領域からなり，左側の領域にはオレンジ果汁が含まれ，右側の領域にはブドウ果汁が含まれる．このファントムを用いた実験では，左半分を高品質部，右半分を低品質部として扱う．

5.2.2 品質量の決定

この節では，ファントムの透過像を面計測し，画像内のサンプル点において，画素のスペクトルと，手与えた品質量の真値を回帰させることで，品質量の係数ベクトルを決定する．

計測では，ファントムの下側から光線を均一に照射し，物体の上部からハイパースペクトルカメラにより透過像を撮影する．図 5.3 にそれぞれの領域の対数透過スペクトルを示す．550nm では高品質部のほうが対数透過率が高いが，それ以外の波長では，低品質部のほうが対数透過率が高いことがわかる．高品質，低品質領域の品質量の真値として，それぞれ 1，-1 の品質量を与える．画像内から 400 点が無作為に抽出し，画素のスペクトルと品質量の真値と回帰させることで，品質量の係数ベクトルを求める．ここでは，回帰の手法として主成分回帰を用いた．図 5.4 に求められた品質量の係数ベクトルを示す．630nm 付近の波長が品質の高さに，500nm 付近の波長が品質の低さに影響していることがわかった．

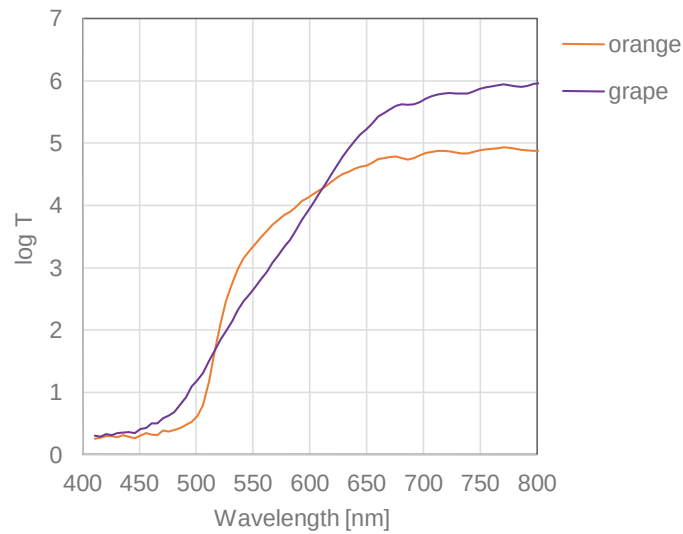


図 5.3: ファントムの各部位の対数透過スペクトル

係数ベクトルが正しく求められていることを確認するため、画像内における 2 次元品質分布を求めた。それぞれの画素の品質量は、品質量の推定式 3.8 に各画素のスペクトルを代入して計算した。推定された 2 次元品質分布を図 5.5 に示す。推定結果は、当てたラベルの分布とほぼ一致しているため、係数ベクトルは正しく求められていることが確認できた。

5.2.3 内部計測の実験環境

次に、計測対象内部の品質量分布の計測実験を行った。図 5.6 に実験に用いた計測装置を示す。計測装置は、光源、アパーチャ、回転ステージおよびハイパースペクトルカメラからなる。光源の光は、コリメートレンズにより平行化された後、アパーチャにより通過する光線の面積を制限されるため、物体の表面には細い平行光が照射される。計測対象を回転ステージ上に置き、回転させながらハイパースペクトルカメラで撮影することで全周計測を行った。ここでは、光源の配置位置を $\theta_l = 90^\circ$ とした。

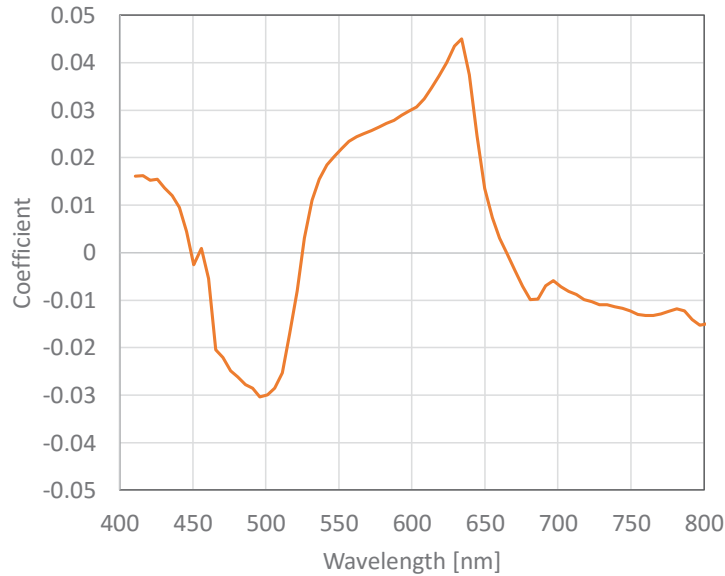


図 5.4: ファントムの品質量の回帰係数ベクトル

5.2.4 物体内部の品質量分布推定

まず，表面散乱計測により得られたサイノグラムを図 5.7 に示す．異なる波長のサイノグラムを比較すると，それぞれ異なった透過像が得られていることがわかる．次に，平行化によって得られた平行投影のサイノグラムを図 5.8 に示す．サイノグラム上にはサイン波型の曲線が現れている．回転する物体を平行投影した場合，その軌跡はサイン波になるため，平行化によって表面拡散計測のサイノグラムが平行投影のサイノグラムに正しく変換されていることがわかる．また，サイノグラムの中心で非連続になっていることがわかる．この原因は，今回の計測では光源位置を $\theta_l = 90^\circ$ としたため，物体中心を通り，光源の対面から出射する光線が計測できず，本来この光線が格納されるはずだったサイノグラムの中心の透過率が欠落したものだと考えられる．次に，単波長のサイノグラムを用いて内部分布推定を行った結果を図 5.9 に示す．ここでは再構成手法として，FBP を用いた．推定された内部分布では，サイノグラムの中心部の欠落の影響により，いずれの波長においても吸

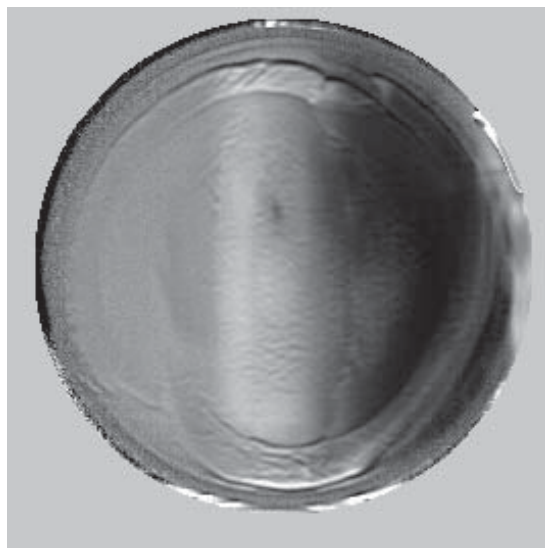


図 5.5: ファントムの品質量の可視化

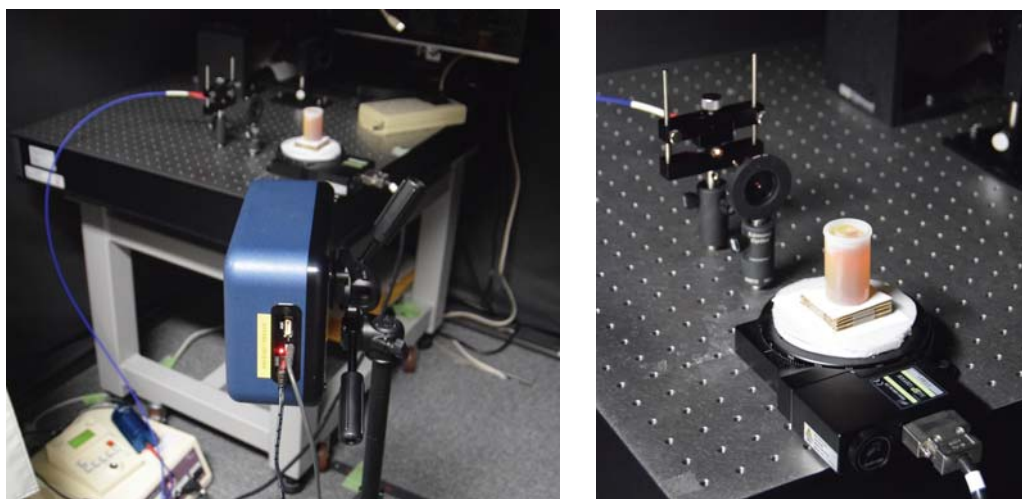


図 5.6: 計測装置

光率が低く推定されている領域が存在する。

さらに、各波長のサイノグラムについて品質量計算を行うことで作成した、品質量のサイノグラムを図 5.10 に示す。このサイノグラムを用いて推定された品質量を図 5.11 に示す。

分布された品質量分布では、左半分が右半分と比較し高い値となっており、これ

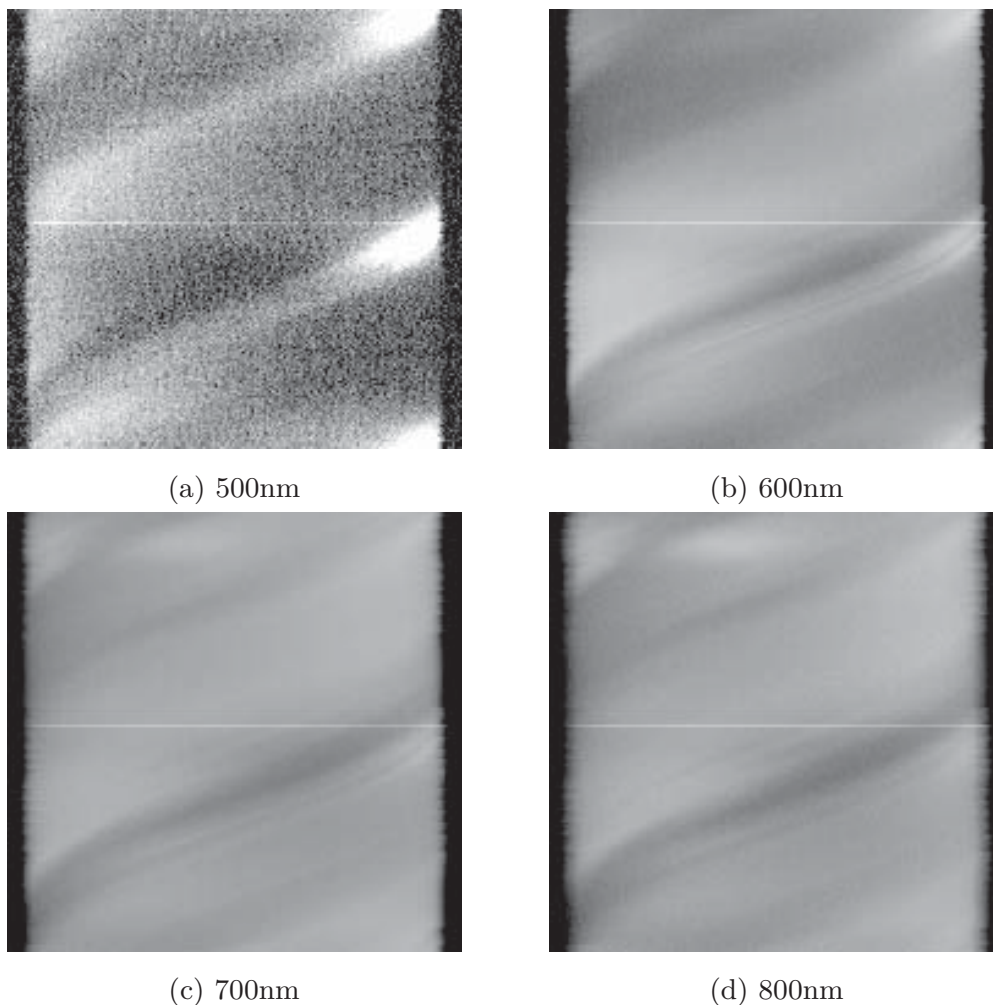
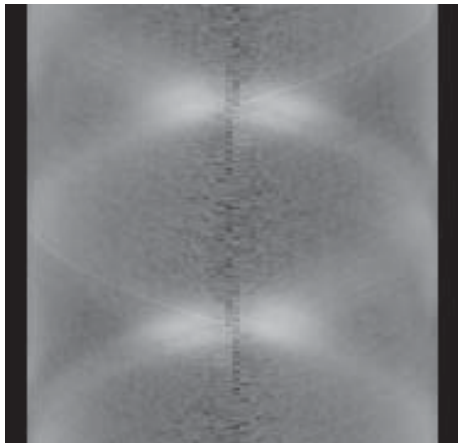


図 5.7: 表面散乱計測で得られるサイノグラム

は品質量分布と一致する．この結果より，本手法では不鮮明ではあるが，品質量の分布を計測できたといえる．推定結果が不鮮明な理由としては，物体表面における散乱を等方散乱としていることが原因としてあげられる．本実験のファントムの表面では散乱は起こるが，実際には比較的直進性の高い光路を通っており，モデル上の光路と実際の光路の違いから，内部推定が正しく行われなかったと考えられる．



(a) 500nm



(b) 600nm

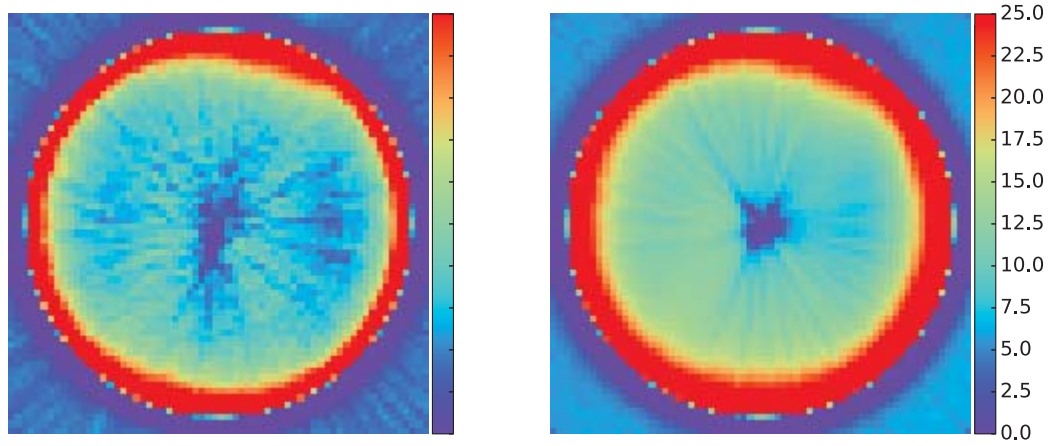


(c) 700nm



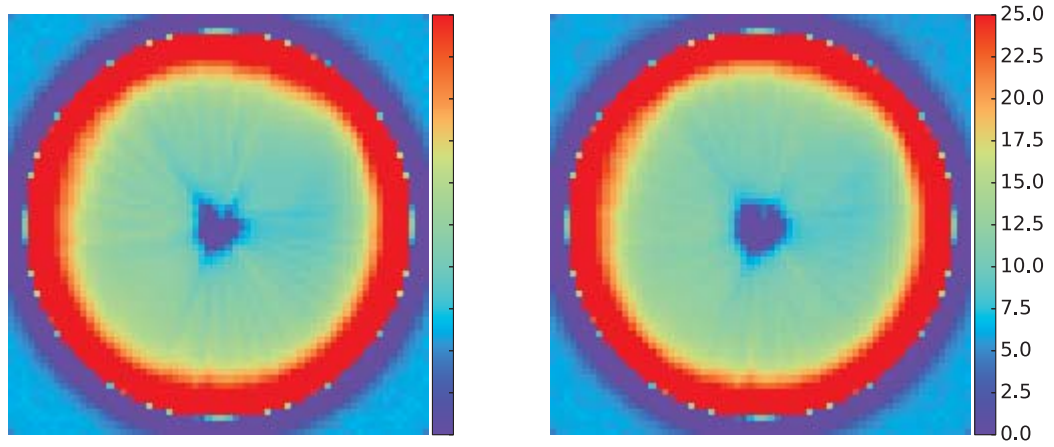
(d) 800nm

図 5.8: 平行化したサイノグラム



(a) 500nm

(b) 600nm



(c) 700nm

(d) 800nm

図 5.9: 単波長の吸収係数分布

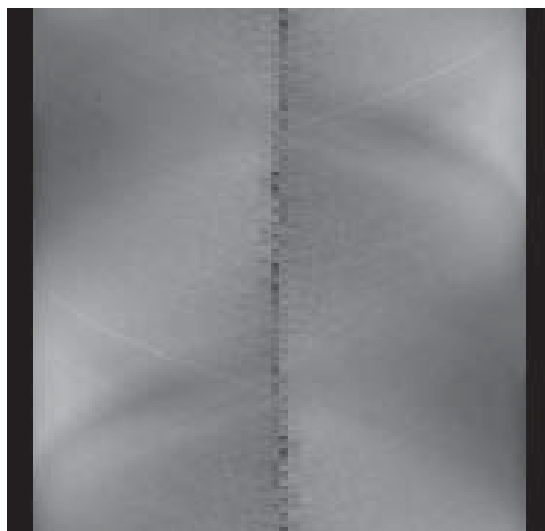


図 5.10: 品質量サイノグラム

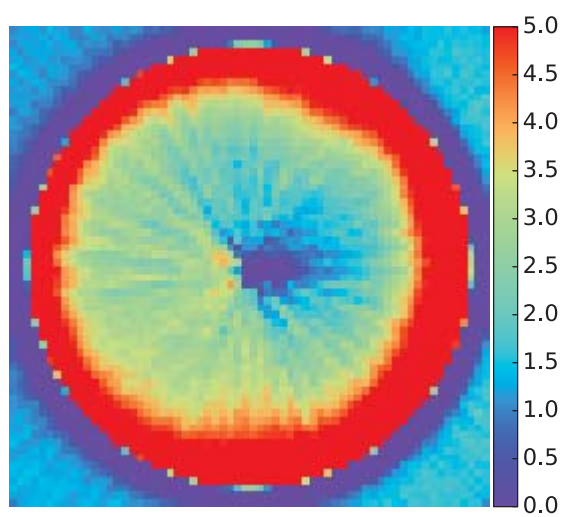


図 5.11: 推定された品質量分布

第6章 まとめ

本研究では、食味そのものにより果実の品質を評価し、果実内部の食味の分布を推定すること目的とした。その手法として、分光に基づく食味を表す品質量の推定する手法を提案した。この品質量は物理量である分光分布から推定されるため、主観的な食味の評価が可能となった。実験では、イチゴの先端のスペクトルを用いて甘味を表す品質量を定義し、画像内における品質量の分布を可視化した。また、果実の内部推定手法として、表面散乱モデルによる手法を提案した。この手法では、散乱による光路の広がりを考慮することで、散乱体の内部推定を可能にした。シミュレーション実験では、理想的な環境では内部分布推定が高精度に行われることを示した。さらに、分光法を用いた食味の内部分布推定手法を提案し、提案手法による実物体の計測を行い、品質量分布計測が可能であることを示した。

最後に、提案手法により実際に果実を計測するときに想定される課題を述べる。1つめは、散乱の強い半透明物体の計測である。実験で用いたファントムでは内部をゼラチンにより作成したため、散乱の程度は比較的弱かったといえる。このため、表面散乱モデルは光路を十分近似でき、内部推定が可能だったと考えられる。しかし、リンゴのような果実では強い散乱が起こり、実際の光路と表面散乱モデルで考えられる光路の差が大きくなると考えられる。強い散乱が起こる果実を計測するためには、多重散乱の光路を考慮したモデル化が必要である。

2つめは、人間の食味を表す品質量の設計である。本研究では、イチゴの先端は甘いという経験的な知識を利用して、イチゴの甘味を表す品質量を先端らしさから定義した。しかし、実際に食味を表す品質量を推定するためには、官能検査などの評価を利用して回帰を行う必要があると考えられる。

3つめの課題は、屈折や散乱などの光学特性の波長依存性の考慮である。本手法のように複数波長で計測を行うとき、波長によって屈折率や散乱が変化する。光学特性の変化により推定精度が変化することが予想されるため、波長依存性の分析が必要である。

謝辞

本研究を行うにあたって、たくさんの方々からの丁寧なご指導、ご助言およびお力添えを頂きました。

光メディアインタフェース研究室 向川康博教授には、研究全般に丁寧にご指導、ご助言を頂きました。また、研究者としての視点や考え方など大変貴重なお話をし頂きました。心より感謝を申し上げます。

視覚情報メディア研究室 横矢直和教授には、副指導教員を引き受けていただき、貴重なご助言、ご質問を頂きました。学内発表におけるご指摘は、研究に不足している点に気づくきっかけとなりました。心より感謝を申し上げます。

光メディアインタフェース研究室 船富卓哉准教授には、日頃から研究の方針、理論構成や解析方法など、多くのご指導をしていただきました。ディスカッションを行う毎に自分の考えが整理され、理解が深まりました。心より感謝を申し上げます。

光メディアインタフェース研究室 久保尋之助教には、研究の進め方、論文執筆や発表準備に関して多くのご指導をいただきました。また、学生生活に関しても多くのご助言をいただきました。心より感謝を申し上げます。

光メディアインタフェース研究室 秘書 登 淑恵さん、入江 由美さんには、出張手続きや研究室の活動において、多くのご支援をいただきました。心より感謝を申し上げます。

光メディアインタフェース研究室 特別研究学生 田中 賢一郎さんには、実験方法や解析方法についてご指導を頂きました。心より感謝を申し上げます。

光メディアインタフェース研究室 研究員 青砥 隆仁さんには、研究のアイデアや私生活について多くのご助言を頂きました。心より感謝を申し上げます。

研究室の学生の皆様には、研究に関する議論を行うだけでなく、共に研究室で生活するなかで多大な支援をいただきました。心より感謝を申し上げます。

最後に、2年間私を支えてくれた家族に感謝の意を表します。

参考文献

- [1] Kiyoshi Toko. Taste sensor. *Sensors and Actuators B: Chemical*, Vol. 64, No. 1, pp. 205–215, 2000.
- [2] 日本分光学会. 赤外・ラマン分光法. 分光測定入門シリーズ. 講談社, 2009.
- [3] 藤原孝之. 近赤外分光法による果実類の糖および酸の測定とその問題点. 日本食品工学会誌, Vol. 5, No. 2, pp. 51–62, 2004.
- [4] 河野澄夫. 近赤外分光法による果実糖度の測定. 食糧, No. 43, pp. 69–86, 2005.
- [5] S Gunasekaran, MR Paulsen, and GC Shove. Optical methods for nondestructive quality evaluation of agricultural and biological materials. *Journal of Agricultural Engineering Research*, Vol. 32, No. 3, pp. 209–241, 1985.
- [6] 杉山純一, 小川幸春. メロンの糖度分布の3次元可視化. 日本食品科学工学会誌, Vol. 48, No. 4, pp. 263–267, 2001.
- [7] David A Yarmolinsky, Charles S Zuker, and Nicholas JP Ryba. Common sense about taste: from mammals to insects. *Cell*, Vol. 139, No. 2, pp. 234–244, 2009.
- [8] ライン型非破壊測定機によるイチゴ糖度の測定. <http://www.agri-exp.pref.shizuoka.jp/report/file/h24/quality/01.pdf>.
- [9] Ian T Jolliffe. A note on the use of principal components in regression. *Applied Statistics*, pp. 300–303, 1982.
- [10] 生体情報の可視化技術編集委員会編. 生体情報の可視化技術. コロナ社, 1997.
- [11] 日本放射線技術学会. CT撮影技術学. 放射線技術学シリーズ. オーム社, 2011.
- [12] T Durduran, R Choe, W B Baker, and A G Yodh. Diffuse optics for tissue monitoring and tomography. *Reports on Progress in Physics*, Vol. 73, No. 7, p. 076701, 2010.
- [13] 山田幸生. 時間分解計測法による拡散光トモグラフィ. 日本レーザー医学会誌, Vol. 26, No. 3, pp. 214–221, 2005.
- [14] Jeremy C Hebden, Adam Gibson, Topun Austin, Rozarina Md Yusof, Nick Everdell, David T Delpy, Simon R Arridge, Judith H Meek, and John S

- Wyatt. Imaging changes in blood volume and oxygenation in the newborn infant brain using three-dimensional optical tomography. *Physics in medicine and biology*, Vol. 49, No. 7, p. 1117, 2004.
- [15] Toru Tamaki, Bo Yuan, Bisser Raytchev, Kazufumi Kaneda, and Yasuhiro Mukaigawa. Multiple-scattering optical tomography with layered material. In *The 9th International Conference on Signal-Image Technology & Internet-Based Systems (SITIS)*, pp. 93–99, 2013.
- [16] Yasunori Ishii, Toshiya Arai, Yasuhiro Mukaigawa, Jun’ichi Tagawa, Yasushi Yagi. Scattering tomography by monte carlo voting. In *IAPR International Conference on Machine Vision Applications*, No. 1, pp. 1–5, 2013.
- [17] Ryuichi Akashi, Hajime Nagahara, Yasuhiro Mukaigawa, and Rin-ichiro Taniguchi. Scattering tomography using ellipsoidal mirror. In *2015 21st Korea-Japan Joint Workshop on Frontiers of Computer Vision (FCV)*, pp. 1–5, 2015.
- [18] L.A. Shepp and B.F. Logan. The fourier reconstruction of a head section. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, Vol. 21, No. 3, pp. 21–43, 1974.
- [19] AH Andersen and Avinash C Kak. Simultaneous algebraic reconstruction technique (sart): a superior implementation of the art algorithm. *Ultrasonic imaging*, Vol. 6, No. 1, pp. 81–94, 1984.

発表リスト

- [1] T. Iwaguchi, “Measureing Sugar Content Distribution in Fruits by Spectral Analysis”, China-Japan Student Workshop 2015, Sep. 2015.
- [2] 岩口堯史, 久保尋之, 船富卓哉, 向川康博, “CT と 2 波長特徴を用いた果実内の糖度分布推定”, 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2015) July, 2015.
- [3] 岩口堯史, 久保尋之, 向川康博, “2 波長から計算される特徴量の逆投影による果実内糖度分布推定”, 情処研報 CVIM 197-28, May 2015.