

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 16 日現在

機関番号：13601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420386

研究課題名(和文) 生物の成長過程観察を目的とした非侵襲可視光CTの開発

研究課題名(英文) Non-invasive optical projection tomography intended to observe growth processes of living things

研究代表者

小関 道彦 (KOSEKI, Michihiko)

信州大学・学術研究院繊維学系・准教授

研究者番号：50334503

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：X線CTは医療分野で幅広く利用されているが、X線被ばくにより染色体異常が生じる可能性があるため、植物や小動物を継時的に観察し、その成長過程を観察する用途には適していない。本研究では、X線の代わりに可視光を用いることによりこの問題を回避した断層画像撮影手法の構築を目的とする。提案手法では、被写体によって屈折した可視光を補正することによってX線の場合と同様に画像再構成することを目指す。実験および数値シミュレーションを実施し、円柱試験片に対するシミュレーション結果で提案手法の有用性を確認した。

研究成果の概要(英文)：X-ray computed tomography (X-ray CT) is quite useful in medical fields. However, it is not suitable for successive inspection of living plants or small creatures, because of critical damage in chromosome caused by x-ray exposure. This study aims to develop non-invasive optical projection tomography to enable observation of growth process of the living things. The concept of our study is to correct the optical path without any refraction using comparison between experimental observation data and numerical simulation data. The effectiveness of the proposed method was confirmed by numerical simulation of the cylindrical specimen.

研究分野：計測工学

キーワード：画像計測 プロジェクショントモグラフィ 可視光

1. 研究開始当初の背景

被写体内部を非破壊で観察する手段の一つとして、X線CTと呼ばれる断層撮影技術(Computed Tomography または Projection Tomography) が様々な分野で幅広く利用されている。X線CTでは、被写体の周囲方向からX線を照射してその透過量を計測し、再構成演算によって被写体の断層画像を出力している。しかし、生体はX線に長時間さらされると染色体に異常が生じる可能性があるため、頻繁な撮影を行うことは避けられている。そこで、X線の代用として可視光を用いた断層撮影技術を確立できれば、動植物の成長過程における生体内の変化を観察することが可能となり、有用であると考えられる。

これまでに、生体計測技術に近赤外光～可視光を用いたシステムとして、静脈認証システムや網膜撮像のような生体の形状計測、光トポグラフィのような機能計測や、参照光との位相差検出による経路推定を行って画像を生成する技術などが提案されている。しかしいずれの機器も、生体表面もしくは深度の浅い表層部からの反射光の観察にとどまっており、断層画像を取得するシステムにはいまだ開発の余地があった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、X線に比べて発生・検知が容易な可視光を用いることにより低コストで小規模な装置を設計開発し、X線被曝による影響が大きい植物や小動物を経時的に観察することである。

本研究で断層撮影に用いる可視光は、被写体内部で反射、屈折、回折、散乱することから、これらを適切に補正することが求められる。本研究ではこのうち屈折現象に注目し、これを定式化したうえで、数値シミュレーションおよび実験的にこれを補正する。

3. 研究の方法

本研究で提案する手法は、実験による観測データに対し数値シミュレーションを併用することによって可視光の透過経路を推定し、これを補正するものである。提案手法の概要を図1に示す。

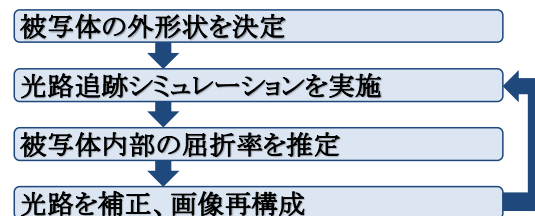


図1 本研究の流れ

まず、被写体の外形状を透過光および反射光に基づきおおまかに推定する。次に、その外形状に対して光路追跡シミュレーション(レイトレーシング)を実施することにより、被写体内部の屈折率などの可視光に関する光学パラメータを推定する。そして、その結果

に基づき、光路を補正することによってX線のように直進光による場合と等価な投影画像を生成することによって断層画像を再構成しようというものである。

生体組織のような被写体の場合、部位によって光学パラメータは異なると予想される。この場合、上述の手法を繰り返し適用し、外表面から徐々に内部のパラメータを推定することで、全体を再構成できると考えられる。

4. 研究成果

(1) 可視光の屈折現象の定式化

本研究では、観察する対象としてφ10mm程度におさまる生体組織(植物や小動物)が試験管状の円管内で成長する過程を観察することを想定し、外形状を円形として扱った。

このとき、可視光の透過経路は図2のように図示することができる。

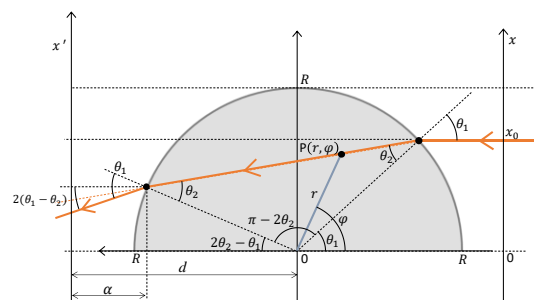


図2 円柱に対する可視光の透過経路

断面形状が半径Rの円形の被写体において、その内部の点P(r, φ)の投影について考えると、橙色で示される光路に関して以下の式が成り立つ。

$$R^2 \sin(\pi - \theta_2) = rR \sin(\varphi - \theta_1) + rR \sin\{(\pi - 2\theta_2) - (\varphi - \theta_1)\}$$

ここで、 θ_1 は被写体への入射角、 θ_2 は屈折角を示している。これより、点Pが被写体中心から距離d離れたスクリーンに投影される位置 x' は、次式で求めることができる。

$$x' = R \sin(2\theta_2 - \theta_1) - \alpha \tan(2\theta_2 - 2\theta_1)$$

ここで、 α は光線が被写体から出射する位置からスクリーンまでの距離であり、次式で与えられる。

$$\alpha = d - R \sin(2\theta_2 - \theta_1)$$

以上の式より、測定結果として得られる x' から入力位置である x を算出することで、X線の場合と同様に被写体内部で屈折しない平行光線で得られた透過像を求めることができる。

(2) 被写体の光学パラメータ推定

本研究で用いる被写体を図3に示す。本試験片は長さが異なる9本の金属棒からなり、下部の断面では9本、上部断面では2本の金属棒が観察されるようになっている。また、同一形状の試験片を透明樹脂で埋包したものも用意した。

可視光を用いた断層撮影では、被写体内部での屈折が画像再構成に影響することは容易に予想できる。そこで、被写体が透明樹脂に囲まれている場合に、可視光の屈折がプロジェクショントモグラフィ画像に与える影響について実験を行った。また、被写体を模擬した数値ファントムを作成し、数値シミュレーションを実施した。シミュレーションでは、実験に用いた試験片の断面 A および断面 B と同等な数値ファントムに対し、計算機内で白色光線を 360 度方向から仮想的に照射した。なお、樹脂の屈折率を 1.0~1.4 まで変化させて計算している。

実験および計算機シミュレーションで得られるサイノグラム、および、これらを再構成して得られたプロジェクショントモグラフィ画像を図 4 に示す。ここでサイノグラムとは、被写体の回転角度ごとのある断面における透過像を縦に並べたものである。

金属棒が樹脂に覆われていない場合（断面 A）では、実験結果と計算機シミュレーションいずれにおいても 2 本の金属棒は識別可能なプロジェクショントモグラフィ画像が得られている。また、金属棒が樹脂によって埋包されていても（断面 B）、屈折率が 1.0、すなわち屈折が生じない条件の場合には、適切なプロジェクショントモグラフィ画像が得られている。

次に、金属棒が樹脂に覆われ（断面 B）、屈折率が 1.0 よりも大きい場合には、屈折率が大きくなるに従いサイノグラム上のサインカーブの振幅が大きくなり、そのかたちにも歪みが生じている。そして、プロジェクショントモグラフィ画像に注目すると、金属棒を示す領域が樹脂の外側に向かって移動し、樹脂領域の外に羽根のような模様が現れてくる。このような現象が生じる原因として、樹脂の屈折により奥にある金属棒ほど太く写ることで、本来の位置よりも手前にあるかのように表現されてしまうためであると考えられる。

この現象は実験結果でも同様であることから、光線追跡法を用いた計算機シミュレーションは実際のプロジェクショントモグラフィをほぼ再現しており、被写体の屈折率を同定するために有用であると考えられる。そして、今回の実験に用いた試験片の場合、得られる画像の類似性から、樹脂部分の屈折率は 1.35 程度であると推測される。

(3) 断層撮影手法の確立

X 線は被写体内部でも直進性が高く、ほとんど反射しないことから、X 線 CT の撮影は図 5 (a) に示すように X 線源と X 線検出器が被写体を挟むように配置される。当初、本研究では可視光でも X 線 CT と同様の配置で撮影を行っていた。しかし、より適切な再構成画像を得るためには、図 5 (b) に示すように当初検出器を配置した位置にスクリーンを置き、これに投射された陰影を撮影する方法が適していることが判明した。実際に構築した撮影システムを図 6 に示す。スクリーンに十分な

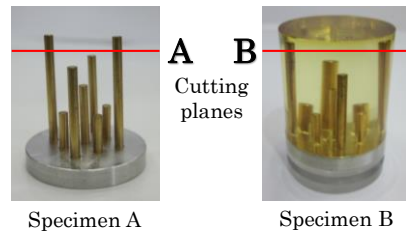
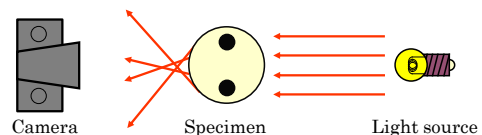


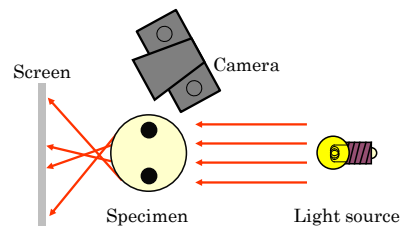
図 3 本研究で用いた簡易試験片

Cutting plane	Refractive Index	Target	Sinogram	Tomographic image
actual target -A (1.0)				
A	1.0			
B	1.0			
	1.2			
	1.3			
	1.4			
actual target -B (Unknown)				

図 4 屈折率推定シミュレーション



(a) Previous projection configuration.



(b) New projection configuration.

図 5 X 線 CT と可視光 CT の撮影方法の相違



図 6 撮影システム

陰影を得るために光源をレーザー光とし、これに光学系を介して十分な太さをもつ平行光線としている。

(4) 可視光 CT の画像再構成

本研究で提案する可視光の光路補正アルゴリズムを検証するため数値シミュレーションを実施した。図3で示した簡易試験片の断面Bについて光路追跡シミュレーションを実施した際の全体像を図7に示す。前述の定式化と同様に可視光が屈折してスクリーンに透過像が得られていることが分かる。

こうして得られる透過像に対し、図8に示すように補正を施し、得られたサイングラムおよび再構成した断層画像を図9に示す。補正前の透過像では不明瞭な断層画像しか得られていないのに対し、透過像を補正することにより鮮明な断層画像が得られている。これより、提案する光路補正アルゴリズムにより可視光の屈折現象が適切に補正され、この補正によりこれまで得られなかった可視光による断層画像取得が可能であると示唆された。

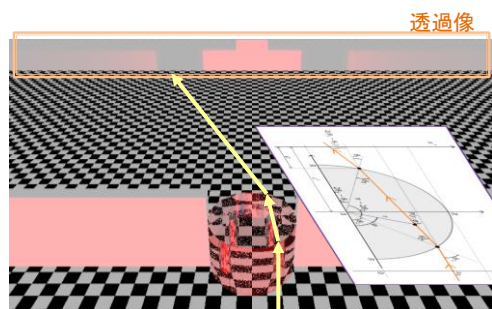


図7 数値シミュレーションでの透過像取得

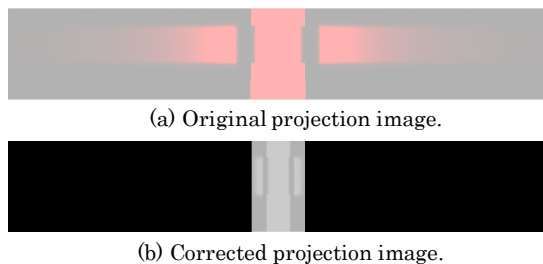


図8 可視光透過像の補正

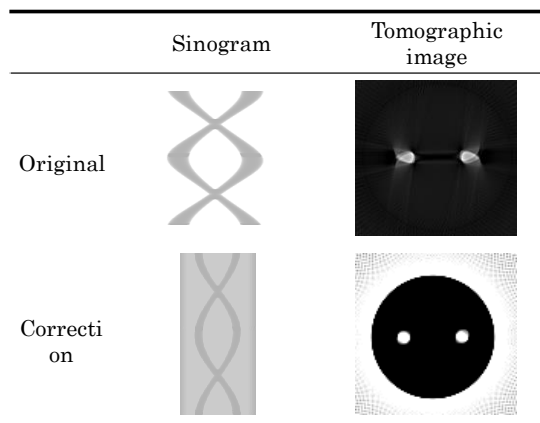


図9 補正データに基づく再構成画像

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計4件)

- ① 漆畑聡一郎, 加納徹, 小関道彦: 可視光プロジェクトモグラフィ実現のための屈折現象の補正; 日本機械学会 北陸信越支部第54期総会・講演会講演論文集, E034(USB), 2017年3月9日、金沢大学(石川県金沢市)
- ② 小関道彦, 漆畑聡一郎, 加野智也, 加納徹: レーザー光を用いた可視光CTシステムの構築; 計測自動制御学会 第33回センシングフォーラム資料, pp.180-183, 2016年9月1日、近畿大学(和歌山県紀の川市)
- ③ 小関道彦, 宮島文佳, 加納徹: 生体観察を目的とした非侵襲可視光プロジェクトモグラフィの開発; 日本機械学会 北陸信越支部第52期総会・講演会講演論文集, 818(USB), 2015年3月7日、新潟工科大学(新潟県柏崎市)
- ④ 小関道彦, 宮島文佳, 加納徹: 生体観察を目的とした非侵襲可視光プロジェクトモグラフィの開発; 計測自動制御学会 第31回センシングフォーラム資料 pp.193-196, 2014年9月26日、佐賀大学(佐賀県佐賀市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小関 道彦 (KOSEKI, Michihiko)
 信州大学・学術研究院繊維学系・准教授
 研究者番号: 50334503