

氏 名 Maksimenko Anton

学位（専攻分野） 博士（学術）

学位記番号 総研大甲第 822 号

学位授与の日付 平成 16 年 9 月 30 日

学位授与の要件 先導科学研究科 光科学専攻
学位規則第 6 条第 1 項該当

学位論文題目 CT Reconstruction on the Base of the Refraction Contrast
Theory, Experiment and Results

論文審査委員 主 査 教授 石黒 真木夫
助教授 佐藤 國憲
教授 田邊 國士

Computed tomography (CT) is the general process of creating cross-sectional or tomographic image from projections (line integrals) of the object at multiple angles and using a computer for image reconstruction. If unmodified, the term CT generally implies images made from projections measured by transmission of X rays (X-ray computed tomography).

The mathematical foundation of computed tomography was initially derived by Radon and published in 1917. However, it was not until the development of modern computers that the technique was at all viable. The first commercial CT scanner based on the prototype developed by Godfrey Hounsfield consisted of an X-ray source and two detectors, with a third, reference, detector near the X-ray source.

In the last years alternative x-ray imaging techniques, other than the conventional absorption contrast, were rapidly developing by various group of scientists in many working laboratories all over the world. Growing availability of the synchrotron light sources for wide range of users accelerated the development of the x-ray imaging techniques abruptly. Besides attenuation, x-ray refraction and shift of the electromagnetic wave phase occurs in an x-ray beam passing through an object. The widely used imaging techniques is based on the angular resolved (or refraction) contrast on which we concentrate in this work. As it follows from the definition it arises when an x-ray penetrated through an object deflects certain angle. In other words this contrast is proportional to the deviation angle which x-ray beam accumulates when it penetrates through an object and refracts on its boundaries.

The emerging x-rays present characteristic angular deflections, which are on the microradian scale. Different refraction directions can be resolved by using an angular analyzer, for instance a perfect crystal, which can then be revealed by a detector placed behind it. By varying the alignment of the analyzer with regard to the incoming x-ray beam, the unrefracted x-rays can either be recorded on a detector or rejected, thus, either contributing or not contributing to the image contrast. The x-ray refraction contrast can greatly exceed the absorption contrast, for instance in imaging low Z materials, where the potentialities of the technique have been exploited from the beginning. An analyzer-based imaging technique has been presented in various versions also assuming different names. An important variation, based on an algorithm that differentiates the separation of the refraction contrast from the absorption contrast in an image, has been introduced with the name 'diffraction enhanced imaging' (DEI). The interest in the potential medical application of the diffraction imaging technique has given origin to many projects utilizing

analyzer-based refraction imaging. Initiated with conventional x-ray generators, it has been rapidly developed in synchrotron radiation sites thanks to the highly intense collimated beams available that permit fast projection and tomographic imaging.

Thus this work is the attempt to accumulate the information on the different implementations of the refraction contrast and prepare the CT-reconstruction of the refraction index field inside an object. Due to the success in this field I can state that it is the first known presentation of the complete solution of the problem. The CT-reconstruction performed from the refraction contrast promises the same advantages over the one based on the absorption contrast that the refraction contrast provides in comparison to other contrasts. The main of these advantages are i) possibility to observe the materials with low Z in higher energies, for example the soft tissue of the human body and ii) visualization of a tiny inclusions which are unobservable in the conventional absorption or phase-shift contracts, for example the cracks and defects in materials. The advantages automatically suggest to the ranges of applicability of this new method varying from medical applications of the synchrotron radiation up to material structure science.

Once this work trying to cover all aspects of the problem of the 3D reconstruction of the object inner structure from the refraction contrast it consists of three main parts: the theoretical consideration of the question, experimental implementation and finally the discussion of the results acquired in the experiment and processed in accordance with the theory. All three parts are structured trough and logically connected to each other in order to make the understanding easier and smoother to the reader.

We can state that the goal was achieved. The model of penetration of the x-ray was assumed and the theory for the computed tomography reconstruction was built on the base of the model. The algorithm for the reconstruction was implemented in the accordance with the theoretical model. The software which utilizes the algorithm was written and debugged. The problem of the information about the deflection angle distribution from the distribution of the intensity at the detector was considered from different points of view. Several types of the analyzing devices that can provide the intensity distribution were considered. The devices were tested in experiment in order to judge about their applicability for the particular problem. After the test the judgment was done and the chosen device was studied in deep details which resulted into development of new method of extraction the information about the deflection of the x-ray. Actually, the method is modernization and generalization of the previously used one. However it allows to overcome the limits of the present method and makes the limitations on the sensitivity approximately 4 times wider. This great advantage allows us to state that the method developed is principally new. The theoretical base

for the new method was built. It was tested in the experiment and proved its usability. Then the experiment on the data acquisition for the CT-reconstruction which utilized the newly developed method of the refraction angle extraction was performed. The results of the experiment were processed by the software prepared for the CT-reconstruction from the refraction contrast. The results of the reconstruction are presented and discussed. The result allows us to conclude that the physical model chosen for the theoretical calculation is applicable and fits the problem. The great advantage of the CT-reconstruction from the refraction contrast over the other types of contrasts developed by the current moment were provided and presented.

物体を通過する X 線によって得られるコントラストは 3 種類あると考えられる。(1)1895 年のレントゲン博士によって見出された、光電効果による X 線光子の吸収過程によるコントラスト、通常 X 線写真に見られるコントラストの全てであるといっても過言ではなく、極めて有用な手法である。医学、鉱物、蛋白質構造解析等、応用は枚挙に暇がない。(2)物体を通過する X 線が受ける位相変化に基づくコントラストである。これは 1965 年の英独の 2 学者の発明になるマッハツェンダー型干渉計の X 線版によって得られる。(3)物体内部及び外部の屈折率すなわち電子密度境界における X 線の屈折に基づくコントラストである。これは 1953 年の 2 名の英国の学者による提案以来のコントラストである。

(1)はゴールドスタンダードである。(2)は吸収率が低く普通画像化することが難しい場合、例えば体の軟部組織を診断する上で威力を発揮する。残念ながら、原子オーダーの X 線の波長の 1/10 のオーダーを検波するために、システム全体が敏感になってしまう問題がある。そのために無機材料には応用可能であると考えられるが、臨床応用には実用不可能と考えられる。(3)は屈折原理に基づくため(1)及び(2)において見えにくかった物体を視覚化できる可能性がある。原理としては原子の間隔があれば屈折が起きる可能性がある。そのために(1)及び(2)の原理に基づく画像と補完する画像を提供できることになる。

一方、Computed Tomography(CT)による 3 次元像の合成の観点から見ると(1)の吸収コントラストを用いる CT 技術は 1970 年代初頭に英米の技術者によって生み出されている。後にノーベル物理学賞の対象となった。このアルゴリズムは X 線の進行方向に変更はないことを前提としたものである。(2)の CT による 3 次元像の合成も(1)とほぼ同じアルゴリズムを使うことができる。なぜなら、X 線の進行方向が不変であり位相変化という 1 次元量を観測に基づくものだからである。(3)は(1)及び(2)と異なり、物体を透過する X 線の進行方向の屈折作用による方向変化という 2 次元量の観測に基づくところから(1)及び(2)と同じアルゴリズムを用いることはできない。このために(3)の原理に基づく 3 次元画像を合成するためには新たにアルゴリズムを創出する必要がある。

このような状況のもとに、医用画像の現場を眺めると 100%、(1)の原理を用いている。(2)の原理は医療の現場に入っていない。位相コントラストを生み出すためのシステムがやや複雑すぎて、その本来の高い検出能力にもかかわらず実用に耐えないとからだと考えられる。変わって最近登場したのが(3)の屈折コントラストを用いる方法である。臨床応用と、(1)の医療の現場において吸収コントラストで見える部位は限られているというのが現状である。骨の一部、癌の一部、体の中に外部から入り込んだ異物等の検査には威力を発揮しているが、軟骨等の軟部組織の大部分、癌の大部分、循環器系統のうち、毛細血管等は通常の X 線による吸収コントラストでは全く見えない。

そこで、屈折原理を用いて臨床現場に持っていくことができるシステム作りが世界的競争で開発中である。豪州の研究者によって提唱された PCI(Phase-Contrast Imaging)、米国の研究者によって提唱された DEI(Diffraction Enhanced Imaging)等がそれである。これらはいずれも明視野像である。すなわち照明光が物体からの信号に重なっている。この照明光を抑えて物体からの信号のみで構成することによって物体からの微弱信号を用いて画像を生み出そうと提案したのが申請者も入って JJAP Letters に発表された X 線暗視

野法である。この発表により、屈折原理による X 線画像の世界で俄然注目を浴びることになった。

申請者は KEK および Spring-8 のそれぞれの施設の放射光の特色を生かして研究を行った。基礎開発は 30mm 角視野の大きさが得られる KEK で徹底的に行い、臨床に近い実験は 80mm 角視野 m の大きさが得られる Spring-8 で行った。申請者は①Trinity の設計、製作、セッティング、実験、データ解析の全てを行うこと、②Owl の設計、製作、セッティング、実験、データ解析の全てを行うこと、③屈折原理を用いた新しい X 線光学系を創案すること、かつ製作、セッティング、実験、データ解析の全てを行うこと、④屈折原理に基づく CT 用のアルゴリズムを創出することを課題として実行した。申請者は研究課題として屈折コントラストに基づく医用画像の実験研究と臨床応用を目指した X 線光学系の確立と 3 次元画像の合成を行うためのアルゴリズムの開発を行い、驚く短期間に成功した。

申請者はまず①の開発を行った。これは(a)1 枚の吸収像、(b)2 枚の位相像、(c)1 枚の苦節像の合計 4 枚の画像が得られることがポイントであった。従来は(a)、(b)、(c)の画像は別々に撮影する必要があった。この Trinity により、3 種類の画像を 1 度に撮影できる利点を示すことができた。試料により、どの種類の画像が良いかは必ずしもあらかじめ分からないので、Trinity を用いて画像の種類を決定することができることは大いなる利点と考えられる。この仕事は JJAP Letters に出版された。さらに申請者は①Trinity では(c)が暗視野像または明視野像であって同時には 2 つの像を得ることができないことに着目し、Trinity の 3 枚目すなわち、角度分析板の長さを 2 倍にすること、および厚さを制御することにより、暗視野像および明視野像が同時に得られることに着目し、実験研究を行い、像の種類が 1 種類あがって、合計 4 種類の画像が同時に得られる利点を見いだすことのできた。この仕事は JJAP Letters に出版された。申請者は②の Owl の角度分析板としてラウエケースを適用し、実験を行い成果が得られた。これにより JJAP Letters に出版された。申請者はこれらの実験研究で培った新しい X 線光学系を世に提案できた後に、屈折原理に基づくアルゴリズムの開発に着手した。その理論検証のための 2 度にわたる実験の機会を有効に利用し、今年 2 月の実験で首尾よくデータが採れた。従来、この方面の研究としては吸収原理に基づくアルゴリズムを屈折コントラストの CT 像に適用した 1 例が見られるのみである。1997 年に発表されたこの論文には吉の簡単な構造を持つファントムの像合成を試みているが、完全復元には遠く及ばない。申請者は屈折作用に基づいて X 線の行路にほんの僅かの角度の曲がりを導入し物体に X 線が入ってから出るまでの X 線行路の線積分を複素数表示することにより、X 線の振る舞いの近似度を高めたアルゴリズムを新たに構築することに成功した。計算機上でのシミュレーション実験によりその妥当性を確認後、実際のファントムを用いて実験し、さらに 3 次元合成に成功した。外見の復元に成功したのみならず、視覚では確認できないファントム中のサブミクロン程度の瑕を発見することができた。申請者はこれに基づき 2 篇の論文を Applied Physics Letters に投稿し査読の判定を待っている段階である。引き続き第 3, 第 4 の論文を執筆中である。

以上、申請者は物体を透過する X 線の屈折コントラスト CT 像合成のためのアルゴリズムとそのためのデータ採取法を開発・提唱し、またその原理の現実問題への適用可能性を示す実験研究も成功させた。

以上のことを踏まえ、X 線の屈折コントラストを用いる CT に関して、適切な道具を巧

に組み合わせて実用性のある方法を実現した論文であり、課題の重要性、新規性、論文の構成、記述形式、内容であるシミュレーションデータの準備と解析、物理的実験のサンプルの用意など全てが先導科学研究科の博士論文として合格基準に達していると判断した。

論文審査において申請者による口頭発表に続き、審査委員からの質疑に対する応答で進められた。研究者としての脂質に関わる研究の着想能力、遂行能力、発表能力、これらの基礎にある学力が確かめられた。口頭発表は、詳細に亘り、要点を押さえ、要領よくまとめられていた。審査委員からの質疑に対してもわかりやすい受け答えがなされた。本研究に関わる数学及び物理に対する理解が深いことを感じさせる発表であり、質疑応答であった。本論文の課題は臨床応用を念頭に置いた新しい屈折原理に基づく世界初の実用的 X 線屈折コントラスト CT 像合成法の確立のための実験研究であり、さらにこの方法に基づく 3次元像の合成の世界初となる試みであった。審査委員一同、申請者の研究能力に対しては十分にあるとの評価であった。また論文の骨格となる英語論文が筆頭著者として 2 篇が国際誌に、1 篇が国際会議録に掲載されており、英語能力も十分であると判断した。これらから審査委員全員一致で申請者は、博士(学術)の学位授与に足る学識と研究能力を持つものと判定した。