

〈一般研究課題〉 量子CTに関する基礎研究

— 量子もつれを用いた極低被ばくX線計測 —

助成研究者 愛知県立大学 臼田 毅



量子CTに関する基礎研究
— 量子もつれを用いた極低被ばくX線計測 —
臼田 毅
(愛知県立大学)

Fundamental study on quantum CT
- Ultra-low exposure X-ray measurement using quantum entanglement -
Tsuyoshi Sasaki Usuda
(Aichi Prefectural University)

Abstract :

Good health constitutes a fundamental basis for leading a fulfilling life. X-ray-based body measurements, including CT scans, are essential in modern medicine for the early detection and accurate assessment of illnesses and injuries, enabling appropriate treatment. However, radiation exposure from such procedures remains a notable risk to health. To address this issue, technological innovations that reduce the number of measurements and improve sensitivity with lower radiation doses are needed. Although AI-based image recognition is widely used, a nearly unique effort is underway to utilize scattered radiation, a method largely overlooked even by experts. At the same time, individual photon detection has gained significant attention among specialists and is being explored by researchers with relevant expertise. In this study, we focus on quantum measurements using quantum entanglement, which are extremely robust to noise and capable of highly sensitive detection even under low-light conditions. Among these quantum measurement techniques, quantum ghost imaging stands out as a key method, often described as a way of “seeing the invisible,” such as clearly visualizing objects behind polished glass. Applying this method is expected to enable high-sensitivity measurements with weak X-rays by reducing the unavoidable effects of scattering inherent in X-ray measurement. In previous quantum ghost imaging studies, the technique was mainly assumed to measure object shapes in difficult outdoor

conditions, including the effects of fog. However, there have been few studies on applying quantum ghost imaging to X-ray measurement, and effects such as Compton scattering, which are essential in X-ray measurement, have not been considered. This study investigates the use of X-rays for quantum ghost imaging and clarifies the impact of scattering during X-ray irradiation of an object. This study also clarifies the difference in performance between quantum ghost imaging and conventional X-ray measurement, and highlights the conditions under which quantum ghost imaging is especially beneficial.

1. はじめに

人間が充実した生活を行うため、健康であることはもっとも基本的なことと言える。重篤な病気にならないためにその兆候を早期発見することや、病気やケガを適切に治療するための状態把握のため、現代医療ではCTを含むX線による各種人体計測が欠かせない。しかしながら、その計測には被ばくが伴い、計測することで人体への悪影響が生じてしまうというジレンマがある。これに対処するためには、計測回数を最低限にするとともに、少ない線量で実質的に高感度な計測を行うことを目指す技術革新が望まれる。そのような試みとして、AI等を用いた画像認識技術のほか、従来捨てられていた散乱線を用いること[1]や光子1個1個をカウントすることで高感度化を図る研究がある。

本研究では、量子もつれ[2]を用いた量子計測が雑音に極めて強く、微弱光でも高感度の計測が可能であることに着目する。キーとなる量子計測は量子ゴーストイメージング[3]であり、それは磨りガラスを通した物体を鮮明に見ることができるなど、「見えないものを見る」方式と説明される。これを応用することで、X線計測で不可避な散乱の影響を極限まで抑え、微弱なX線で高感度の計測を実現することが期待できる。これまでの量子ゴーストイメージングの研究では、主に野外における劣悪な環境下での物体の形状計測などが想定され、例えば、霧の影響などが考察されてきた。しかしながら、X線計測に応用する研究はほとんど無く、X線計測で本質的となるコンプトン散乱等の影響は考察されていなかった。

本研究では、量子ゴーストイメージングにX線を用いることを想定し、対象物へのX線照射の際の散乱の影響を明らかにすることを目的とする。究極の目標は、人体を3次元的に計測する量子CTを実現することであり、理論研究としてもCTの設定で考察が必要である。しかし、まず第一歩として人体を2次元的に計測するレントゲンのような設定で考察を行い、量子もつれの使用有無により、X線計測において違いが出るかどうかを見出す。もし違いが明確になれば、大きな前進となり、今後のロングスパンの研究開発へとつながると考えている。なお、本研究ではX線の利用を想定しているが、量子ゴーストイメージングのこれまでの研究では光が想定されてきた。X線と光（可視光等）の違いは波長あるいは周波数であり、またX線領域について話す際にも光子という用語は頻繁に用いられる。本稿においては、これらの背景からX線と光という言葉が両方とも登場し明確には使い分けてはいないが、あらかじめ注意しておけば混乱はないものとする。

2. 古典的イメージングと量子ゴーストイメージング

まず、準備として量子ゴーストイメージングの概要を説明しておく。しかしその前に、比較対象

となる古典的イメージングについても簡単に説明する。また、X線領域でのイメージングにおける散乱の影響についても触れておく。

2.1 古典的イメージング

本研究では、量子もつれを用いない通常のイメージングを古典的イメージングと呼ぶことにする。光源として光子1個1個を制御して発生させるようなものを用いた場合、それは量子イメージングと呼んでも良いが、本研究では古典的イメージングと呼ぶため、注意が必要である。

イメージングとは、もの(対象物)を「見る」技術である。光を当てて(照射し)、その反射光を検出する場合と透過光を検出する場合の2通りに大別される。本研究においては、X線計測を念頭に置いているため、対象物に光(X線)を照射して、その透過光を検出器により検出することで、対象物を「見る」設定となる。このとき、「光」として量子もつれ光などの特別なものを用いない場合を古典的イメージングと呼ぶ。

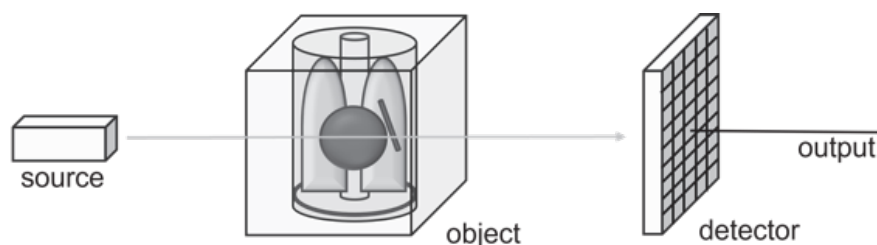


図1. 古典的なイメージングの構成

図1に古典的なイメージングの構成を表す。図中の左手に配置された光源(source)から発生した光を中央に配置された対象物(object)に照射し、右側に配置された検出器(detector)で検出する。検出器は正方形の平板のような形状で描かれ、中はメッシュ状になっているが、簡単にはメッシュで小分けにされた領域それぞれに検出器が平面的に分布しているようなモデルを考える。CCDカメラにおけるCCD素子を配置していると考えても良い。要するに通常のイメージングである。多くの検出器が平面的に分布している場合、それぞれの検出器もその全体としての検出器の集まりも、同様に検出器という言葉で表すことにする。全体を考える場合は、検出器(たち)のように、単数形ではなく複数形であると考えるとよい。

図1は、ある意味、イメージングの当たり前の構成であるが、量子ゴーストイメージングとの比較のために必要な特徴を抑えておこう。それは、対象物を透過してきた光を検出するのは「空間分解能のある」検出器であるという特徴である。例えば、検出器が $n \times n$ 画素のCCD素子である場合、どの位置の画素で光が検出されるかを知ることができる。

もう一点、本研究における設定では、これも量子ゴーストイメージングとの比較考察のためだが、古典的イメージングにおいて、光源からは光子が1個ずつ放出されるものとする。その際、どの位置にその一つの光子が照射されるかはランダムとする。対象物を光が透過してきた場合、検出器にはどこかの位置(座標)に1個の光子が検出されるが、検出器ではその座標を記録しておく。このような1個ずつの光子の放出を無数に繰り返すことで、2次元的に広がった空間の領域全体に光を当てることとなり、対象物の形状を「見る」ことができる。この様子は、「対象物のイメージを得る」などと形容される。

2.2 量子ゴーストイメージング

量子ゴーストイメージングは、量子もつれと呼ばれる量子相関を持つ光(本研究では X線)を光源に使う。イメージングに応用する場合、量子もつれにおける量子相関は空間的な相関である。古典的イメージングにおいて、光源からは光子が1個ずつ放出されるものとしたが、量子もつれ光源からは2個の空間的に相関のある光子が同時に放出される。2個の光子ということから光子対と呼ばれるが、双子の光子と呼ばれることもある。本研究で扱う量子ゴーストイメージングの基本的な構成を図2に示す。

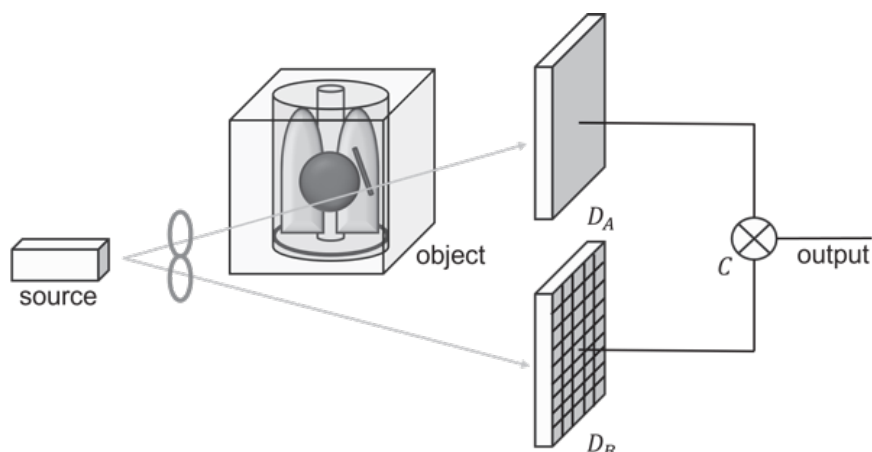


図2. 量子ゴーストイメージングの構成

光源(source)から照射する量子もつれ光子対のうち、対象物(object)に照射される方(図の上側の光)をA系、照射されない方(図の下側の光)をB系とする。また、図中の D_A は空間分解能がない検出器、 D_B は空間分解能がある検出器を表しCは相関器である。まず、量子ゴーストイメージングの全体的な流れを示しておく。

1. 空間的に相関のある量子もつれ光子対をA系、B系にそれぞれ照射する
2. D_A で対象物を通した光を検出し、対象物の有無を確認する
3. D_B で何も通していない光を検出し、その試行での対応座標を確認する
4. 2検出器で得た結果を相関器にかけ、光の強度と座標を記録する

この流れを繰り返すことで対象物のイメージを得る。

図2に示したように、対象物を透過した光を検出するのは空間分解能のない検出器であるというのが特徴的である。対象物を透過した光のみでは、対象物の形状を得ることはできない。量子ゴーストイメージングは、これまで可視光などの光領域で用いられてきた。図2では、対象物と検出器が近くに描かれているが、通常の設定では遥か遠方にあることを考え、対象物と検出器の間にある霧や大気の流れなどがすりガラスの役割を果たし、仮に空間分解能のある検出器で透過光を検出しても、ぼやけてしまって対象物の形状を得ることができないというのが、これまでの主な問題設定である。

2.3 X線計測における散乱の影響

X線による人体の計測では、X線を対象物である人体に通すことが基本である。人体に到達したX線のうち一部はそのまま透過するが、吸収される場合と散乱される場合がある。散乱は異なる物質の境界面などで顕著であるが、X線は散乱割合も多く、散乱はX線計測における精度を乱す根本要因となっている。例えば、人体の軟組織のようにX線は透過するが空気とは組成が違うものを対象に光を照射した場合や、軟組織と骨組織の境界付近などに光を照射した場合に散乱が起こり、本来照射した座標とは違う座標で光が検出されることがある。これによって光の照射数を減らした場合には境界線がぼやけてしまうなどの悪影響が顕著になる。それに対して量子ゴーストイメージングでは本来照射した座標の情報をもとに、対応座標が光を透過したかしていないかの情報を記録する。よって古典的なイメージングよりも散乱に強く、特に低照射量でのイメージングにおいては対象物の境界線が明瞭になると考えた。

3. 実験結果

本研究では、散乱の影響をシミュレーションにより評価する。シミュレーションでは、放射線の研究分野で標準的に使われるGeant4(GEometry ANd Tracking)[4]を利用する。Geant4は、モンテカルロ法を用いて「物質中における粒子の飛跡をシミュレーション」するためのプラットフォームであり、物理過程や実験データに基づいているとされる。なお、Geant4のみでは量子もつれを扱えないため、B系の光子と相関のあるA系の光子の飛跡をGeant4でシミュレーションしたうえで、相関効果を独自に導入したシミュレーションを実施した。入射する光子対は100.0keVのX線であり試行ごとにランダムな座標に、対象物に対して垂直に単照射されるものとした。

3.1 対象物のモデル

これまでの予備的な研究で、平板や円柱などの単純な形状の対象物の場合を考えてきた[5-8]が、本研究においては、より人体に近い形状、組成の対象物のモデルを扱った、図3が本研究で用いた対象物のモデルである。人体の胴体部分を想定している。まず、一番外側の空間を空気とし、胴体の全体部分に当たる軟組織の円柱、肋骨に当たるトーラス図形、背骨に当たる円柱、肺に当たる楕円体の一部、心臓に当たる球、血管に当たる円柱で構成している。

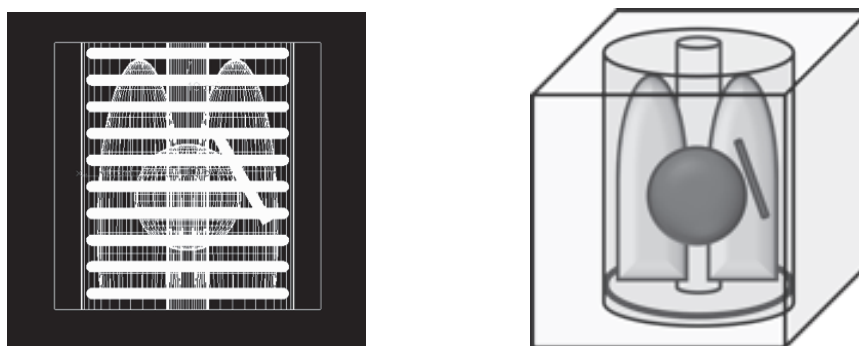


図3. 対象物の形状(右図は肋骨を一部省略)

3.2 画像化に用いる量

イメージングの結果、対象物の形状を反映した2次元的な画像を得ることになるが、3次元の対象物にX線を通すため、得られる2次元的な画像は、光源と(量子ゴーストイメージングではA系の)検出器面を結ぶ線上にある対象物の減弱係数の平均値に基づく。ここでは、その「画像化に用いる量」について説明しておく。対象物への入射光子数を I_0 とすると、対象物を透過する光子数はそれよりも小さい I となる。このように光子数が少なくなる様子は、対象物によるX線の減弱という言葉で表現される。どのくらい減弱するかは物質ごとに異なり、各物質で定まる減弱係数 μ がある。すなわち、線減弱係数が μ である長さ L の均質な物体を光子が透過するときの減弱の様子は、次式で表される。

$$I = I_0 e^{-\mu L} \quad (1)$$

ここから、線減弱係数 μ は、

$$\mu = \frac{-1}{L} \log_e \frac{I}{I_0} \quad (2)$$

となる。実験やシミュレーションの結果、与えられた I_0 に対して物質の組成で平均化された I が得られ、したがって、そのような意味での μ の平均値が得られる。通常、X線計測分野では、 μ をそのまま扱うのではなく、組成が水の場合を0(基準)とし、空気を-1000、骨を1000とする規格化が行われる。本研究でもそれを踏襲する。したがって、以下の規格化減弱係数(実際に扱うのは平均値)を扱う。

$$\mu^{(\text{norm})} = 1000 \times \frac{\mu - \mu_{\text{water}}}{\mu_{\text{water}}} \quad (3)$$

なお、CTのように3次元的に物体を捉える場合は、光源と検出器面を結ぶ線上で平均化された減弱係数ではなく、対象物内部の一点の減弱係数が得られる。その場合、上式に対応する量はCT値と呼ばれることがあることを注意しておく。

さて、規格化減弱係数は、対象物の線減弱係数が小さいほど小さく、線減弱係数が大きいほど大きな値をとる。よって結果を画像で表現すると、レントゲン写真のように、空気など光を通しやすい部分は黒、骨など光を通しづらい部分は白で表現される。

4. シミュレーション結果

4.1 データ処理の方法と結果

結果を示す前に、図4を使いウィンドウ処理について説明しておく。医療計測分野では、注目する特定の部分を強調するウィンドウ処理という画像処理が行われる。これは図4のようにグレースケールの幅を規格化減弱係数の一部分に限定するものである。例えば図4中の空気、軟組織に注目、と記された部分では、骨や高減弱係数の物体間でのコントラストがなくなる代わりに、空気と軟組織のコントラストが大きくなる。なお、図4でCT値と記載しているものは、本研究における

規格化減弱係数に対応する.

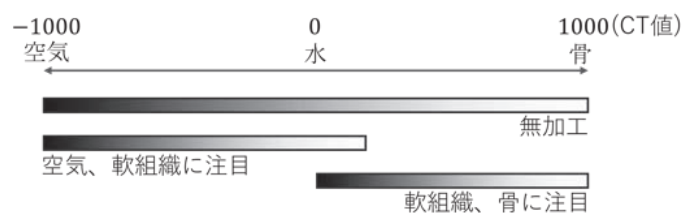


図4. ウィンドウ処理の概略

結果の画像を図5,6に示す. (a)は規格化減弱係数に対応する画像をそのまま出力したものである. 結果の(b)は心臓と肺の境界を強調するようにウィンドウ処理したもので, (c)は骨と軟組織の境界を強調するようにウィンドウ処理したものである. 胸部X線検査において注目される個所は心臓周辺や血管, 肺の像に異常がないか, 骨の形状などであるので, このようにウィンドウ処理を行った.

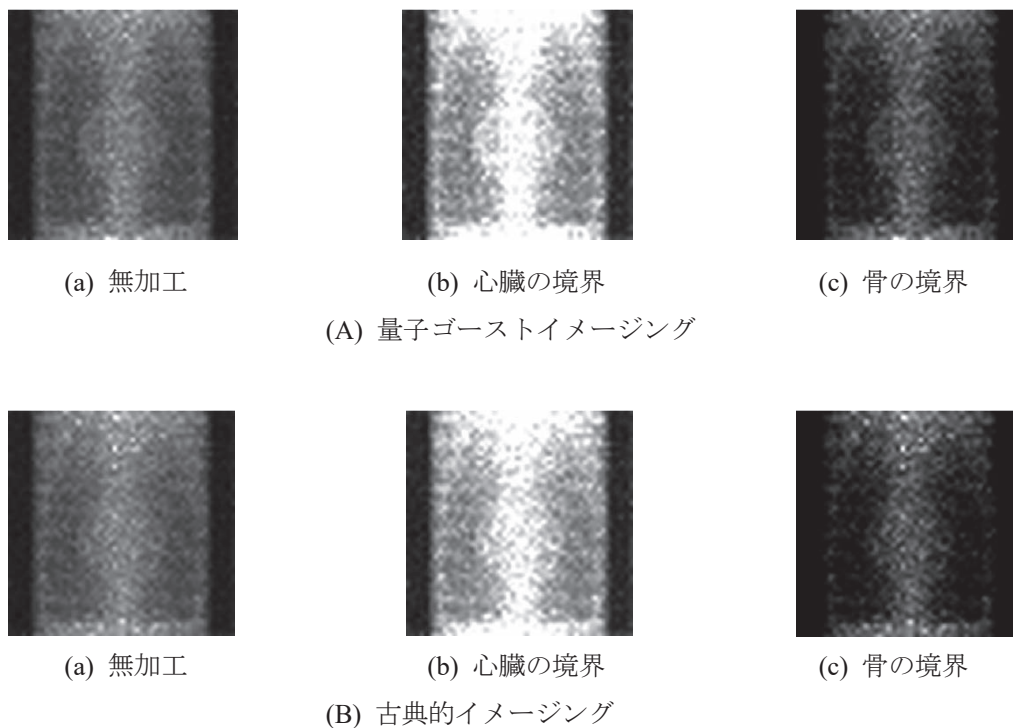


図5. 光子の平均照射回数100回/pixelの場合

4.2 考察

まず, 古典量子関係なくどの画像でも, 光の照射量を増やした図6の方が図5よりも鮮明になっている. ここからはそれぞれの画像処理ごとに詳しく古典と量子の差を見ていく.

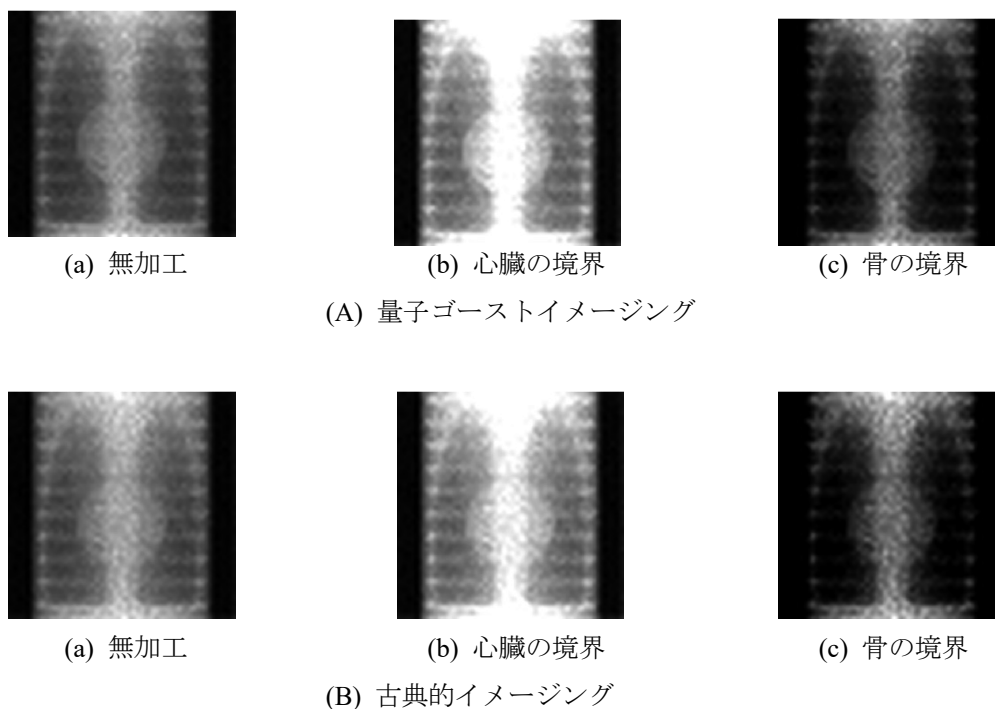


図6. 光子の平均照射回数1000回/pixelの場合

(a)無加工の場合、図5を見比べると特に肺の輪郭、心臓と背骨の間の境界に大きな差がみられる。古典イメージングでは量子と比べて輪郭がはっきりせず、肺にも白い像が映ってしまっている。また、この時点ではどちらも肋骨の像はあまり見られない。一方、図6では古典では全体的に白んでしまっている印象があり、量子では心臓の境界が特にはっきりとしている。また、古典量子ともに肋骨がはっきりと映っている。図5と図6の両者を(a)に関して見比べるとより低照射である図5の方が古典量子間ではより境界に差があるように見える。次に(b)について考える。(b)はある程度規格化減弱係数が低い部分に注目をしてグラデーションをかけたものである。図5では(a)同様、量子の方では心臓の境界がよりはっきりとして、肺と胴体の境界も明確であるように見える。古典の方では全体的なもやによって鮮明さが損なわれている。図6の方を見てみると肋骨と心臓の像がどちらも鮮明である点は同じであるが、その鮮明さ、特に境界部分の明暗差にはっきりとした違いがみられた。量子の方が輪郭が非常にクリアな印象を受ける。最後に(c)について考える。これは規格化減弱係数が高い部分に注目をしてグラデーションをかけたものである。図5と図6ともに一番外側の層である空気層と胴体の軟組織の境界、心臓の影は薄くなってしまいが、肺がより暗く映り、骨との境界がはっきりする。特に、図6の量子と古典を見比べると、量子の方では背骨の影がよりシャープであり、古典の方は散乱の影響でにじんでいるような印象を受ける。

総じて、いずれの方法、いずれの場合でも量子の方が古典よりも強く物体間のコントラストを表現することができた。また、照射量が少ない場合でも多い場合でも、量子の方が優れていたといえる。ただし、今回の照射数では古典、量子のいずれも血管レベルの細いものに対する分解能は達成できなかった。照射数を増やすことによって見るようになることができると考えられる。

5. まとめ

本研究では、量子ゴーストイメージングにX線を用いることを想定し、X線照射の際の散乱の影響を考察した。対象物のモデルは、準備段階の研究で用いた単純な円柱ではなく人体の形状を模したのを使い、古典的イメージングと量子ゴーストイメージングのシミュレーション結果を比較した。その結果、視覚的な主観評価ではあるが量子の方が優れていることが確認できた。今後、より照射数を増やすことで今回見られなかった血管の像があらわれるのか検証をする。対象物の形状は与えており理想の規格化減弱係数が算出できるため、PSNR (peak signal-to-noise ratio) などの客観評価をすること、ほかにも光の照射の設定を現実的にすることや物体に対して検出器の面積を大きくとったパターンの検証などが、直近の今後の課題である。

本研究は、量子ゴーストイメージングをそのままX線計測に応用した場合を考察したものである。それだけでも量子もつれの効果が見えたが、研究を進めている間に、量子ゴーストイメージングをそのまま適用するのではなく、想定している応用に適した新プロトコルを考えれば、もっと劇的に量子もつれの効果が得られるという考えに至った。本研究は、世界でほとんど取り組まれていないことをスタートしたことの意味があり、本研究を足がかりに真に人類を救う技術を開発できる可能性が見い出せたことは、ある意味、最大の成果であると考えている。

謝辞

本研究は、そもそも本学戸田尚宏名誉教授が永年取り組んでこられた“散乱線を利用したX線CTの研究”に触発され、10年以上の準備期間を経て開始したものです。本研究のきっかけを与え、要所で意見をくださった戸田教授には、これからも研究を積み重ねていき、いつか量子CTの検査を受けていただきたいと思います。

なお、本研究は、愛知県内大学量子情報研究グループの皆さんの協力により進めることができました。特に、2024年度博士前期課程修了の堀場靖司さんと神奈川大学助教の王天澄博士には全面的に協力いただき、本稿に記載した内容はこの2人を中心とした共著論文[9-12]に準拠しています。両者をはじめとするグループのメンバーに謝意を表します。

参考文献

- [1] S. Ito and N. Toda, “Improvement of CT reconstruction using scattered X-rays,” IEICE Trans. E104.D, 8, pp.1378-1385, (2021).
- [2] A. Einstein, B. Podolsky, and N. Rosen, “Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?,” Phys. Rev. 47, pp.777-780, (1935).
- [3] T. B. Pittman, Y. H. Shih, D. V. Strekalov, and A. V. Sergienko, “Optical imaging by means of two-photon quantum entanglement,” Phys. Rev. A52, pp.R3429-R3432, (1995).
- [4] CERN, “Geant4,” <https://geant4.web.cern.ch/>
- [5] 堀場靖司, 王天澄, 臼田毅, “散乱の影響下での量子ゴーストイメージングの優位性,” 第45回情報理論とその応用シンポジウム, pp.408-412, (2022).
- [6] Y. Horiba, T. Wang, and T. S. Usuda, “Effect of scattering on quantum ghost imaging and ordinary imaging,” Abstracts of AQIS2023 Poster III, p.261-264, (2023).

- [7] 加藤愛菜, 堀場靖司, 王天澄, 臼田毅, “マルチレベル量子ゴーストイメージングにおける散乱の影響,” 2023年電子情報通信学会ソサイエティ大会, A-2-3, (2023).
- [8] 堀場靖司, 王天澄, 臼田毅, “3次元物体の量子ゴーストイメージングに対する散乱の影響,” 第46回情報理論とその応用シンポジウム, pp.516-519, (2023).
- [9] Y. Horiba, T. Wang, and T. S. Usuda, “Simulation of quantum ghost imaging and ordinary imaging using CT number,” Abstracts of AQIS2024 Poster II, pp.529-531, (2024).
- [10] 眞田有登, 堀場靖司, 王天澄, 大橋あすか, 臼田毅, “量子ゴーストイメージングの対象物厚み依存性について,” 令和6年度電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会, E-5-7, (2024).
- [11] Y. Horiba, T. Wang, and T. S. Usuda, “Comparison of CT numbers using quantum ghost imaging and ordinary imaging,” Proceedings of ISITA2024, p.372, (2024).
- [12] 堀場靖司, 王天澄, 臼田毅, “X線量子ゴーストイメージングの対象物形状による優位性の違い,” 第47回情報理論とその応用シンポジウム, pp.70-73, (2024).