

2019年6月6日にMassachusetts Institute of Technology, Department of Nuclear Science and EngineeringにおいてPh. D in Quantum Engineering (量子工学博士)を取得しました2013年度船井情報科学振興財団奨学生の曾根 彬です。今回は博士号取得までの活動について紹介したいと思います。



図. 2019年6月6日に行われたMITでのPh.D. Hoodingの写真

まず始めに、今まで支えてくださった両親、そして船井情報科学振興財団に心から深く感謝を申し上げたいと思います。これからは自分が恩返しする立場にあり、この感謝の気持ちを行動にして、学术界と国際社会に貢献できるよう今まで以上に努力して行きたいと思います。

さて、MITでの博士課程では私は量子制御と量子計測の理論的研究に携わり、また原子核物理学と原子分子光物理学の授業におけるTeaching Assistantとして学部生および学院生の教育に励んできました。まず始めに、MITでの研究について紹介したいと思います。

1. MITでの研究活動

私の研究は量子情報処理技術の実現を目指したものであり、その実現のために必要とされる量子システム同定という分野に関するものでした。量子情報処理技術は、量子コンピュータ、量子通信、また量子計測などといった従来の情報処理技術をはるかに上回る計算速度、安全通信、そして精密測定を可能にし、現代の情報化社会に著しい発展をもたらすと期待されています。量子情報処理技術の実現にはロバスト制御、初期化、そして精密な測定が不可欠で、これらのプロトコルは制御対象となる核スピン多体系といった量子系の性質や時間発展に依存しており、それらに関する知識が不足していれば、情報処理に必要なとされる最適なプロトコルを施すことが困難となります。しかし、現実では、与えられた量子系について、特に多体系の場合、その系に関する情報が全て与えられたわけではなく、量子情報処理をする前に、これらの情報を抽出することが必要とされます。

具体的には、量子系の性質と時間発展に関する情報は系の全エネルギーを記述するハミルトニアンに含まれており、そのハミルトニアンを、測定を通じて同定することが必要となります。例えば、核スピンの構成された多体系において、ハミルトニアンには、核スピンの個数、それぞれの核スピ

ンの持つエネルギー、核スピン同士の相互作用の情報が含まれており、核スピンの個数は系の次元を与え、量子コンピュータを例にとると、それは計算速度に関係し、量子計測では感度に関係しており、つまりその系の量子情報処理機器としての特性を知ることができるのです。また、核スピンのエネルギーや核スピン同士の相互作用に関する情報を知ることによって、対象となる量子系の物理的性質が分かり、適当な制御や測定を施すことができます。このように、ハミルトニアンを測定して抽出することを量子システム同定と言います。

従来の研究の多くが、量子系を直接測定または制御することで、そのハミルトニアンを抽出するという考えに基づいていたが、対象系の情報が欠けている状態で直接測定し、制御するというのは実践的ではないという問題がありました。また、対象系の次元測定に関しても、上記と同様な方法で、今までは次元の下限のみ得られ、正確な値を得られないという問題点がありました。この問題をより実践的に解決するために、注目されたのは、近年発展した単一量子系におけるシステム同定技術であります。量子計測の発展により、ダイヤモンドにおける窒素空孔中心の電子スピンなどといった小さな単一量子系を特徴付ける少数のパラメータを同定する技術が理論的にも実験的にも成熟なものとなりました。そこで、こうした性質のよく分かっている単一量子系を量子センサーとして対象系と相互作用させ、量子センサーを測定することで、量子センサーと対象系の間で生成された量子相関を通して間接的に対象系のハミルトニアンを抽出する方がより実践的であると考えられます。以下、この様に複数の量子系が合わさった全体系の部分系を測定して全体系を同定するモデルを局所測定モデルと呼びましょう。しかし、その生成された量子相関がどのようにして可同定性に関係付けているのかという問題がまだ明らかにされてなく、さらに量子相関が局所測定モデルにおいてどのようにして、その推定精度とどのように関係しているかが明らかではありませんでした。

私はこのような局所測定モデルから出発し、有限次元の核スピン多体系においてスピンネットワークの構造と核スピン同士の相互作用の種類が前もって与えられているという前提条件のもと、対象系の次元同定とハミルトニアンのパラメータ同定に着目し、生成された量子相関のダイナミクスと可同定性に深い関係があることを見出し、定量的にそれを示しました。さらに、この考え方をより一般的に拡張するために、一つの部分系ではなく、全ての部分系を順次的に局所測定していった場合のパラメータ同定の精度と全体系を測定した場合の精度の差と量子相関を定量づける量との関係を探求し、熱平衡状態においてその関係式を導出しました。以下、これらの研究成果について簡潔に紹介したいと思います。

単一量子センサーを用いた核スピン多体系のハミルトニアンパラメータ可同定性

A. Sone and P. Cappellaro, *Phys. Rev. A* 95, 022335 (2017)

Y. Wang, D. Dong, A. Sone, I. R. Petersen, H. Yonezawa, P. Cappellaro, arXiv:1809.02965

この研究において、私は量子系ダイナミクスの線形性と局所測定を通じて得られた測定結果が古典的情報であることに着目し、線形システム制御理論における部分空間法という手法を用いました。ハミルトニアンのパラメータ同定に関しては、入力と出力のダイナミクスをラプラス空間記述する伝達関数に着目し、理論モデルからパラメータの関数としての伝達関数を導き出し、さらに実

験データから測定結果に基づいた伝達関数が導かれ、その二つの伝達関数が同じダイナミクスを表現していることから、互いに等しいとすることができます。その等式からパラメーターに関する複数の多項式によって構成される多項式連立方程式が作られ、その連立方程式の解がたった一つの組しかない時にハミルトニアンは同定可能であり、複数の解の組、または解がない時、ハミルトニアンは同定不可能となります。これをより数学的に記述するために、代数幾何学において多項式連立方程式の一般的な解法と知られ、また、その解の形の分類のために開発されたグレブナー基底を用いて、系統的にハミルトニアンのパラメーター可同定性という概念を定式化し、またその結果を用いて、与えられたハミルトニアンのパラメーター可同定性判断するためのアルゴリズムを提案しました。また、部分空間法を用いて、対象系を構成する核スピンの個数が前提条件として与えられているとした上で、パラメーター同定が可能であるハミルトニアンにおいて、その全てのパラメーターを同定するために必要とされる測定データのサンプリング個数の下限とその最小サンプリング個数で同定を行った場合に必要とされる実験時間の上限を導出しました。さらに、量子センサーと対象系の量子相関が全システムに伝達していくことが対象系のハミルトニアン可同定性の必要条件であることを示しました。この研究の独創的な点は、現代制御理論と代数幾何学を用いて、量子システム可同定性を定式化したという事であり、さらに可同定性をテストするためのアルゴリズムを理論的に提案したというものであります。また MIT で二人学部生を指導し、そのアルゴリズムを実際に実装し、アメリカ物理学会が主催する APS March Meeting でポスター発表をしました。また、オーストラリア国立大学とニューサウスウェルズ大学との共同研究で、Similarity Transformation Approach という手法を用いて、量子システム可同定性について再評価し、グレブナー基底を用いた方法と等価であることも確かめました。

単一量子センサーを用いた核スピン多体系の次元同定

A. Sone and P. Cappellaro, Phys. Rev. A 96, 062334 (2017)

この研究において、グラフ理論を用いてスピン多体系を表現する方法と部分空間法を用いて、次元を同定する方法を提案しました。先行研究では次元の下限しか得られないのに対し、私が提案した方法は次元の正確な値を与えるものでした。全ての核スピンの量子センサーと常に相関しているという前提条件のもと、部分空間法におけるモデル次数という量に着目しました。モデル次数とはシステムのダイナミクスを記述するのに必要とされる時間変化する変数の最小個数であり、これは測定データを要素にもつヘンケル行列を構成し、その階数から求められることがわかっています。そこで、量子系において、時間変化する変数の中に、量子センサーと対象系の一つ一つの核スピンの相関を表す演算子があり、核スピンの個数を増やしても常に量子センサーと量子相関があれば、その量子相関を表す演算子の数も増え、これはモデル次数の増加につながります。従って、核スピンの個数（次元）とモデル次数は単調増加関数の関係にあり、私はグラフ理論と部分空間法を用いて、その事実を数学的に証明し、さらに最隣接相互作用一次元スピン錯系におけるそのモデル次数と次元の明確な関係式を導出し、さらに、次元同定のためのアルゴリズムを提案しました。この研究の独創的な点は、現代制御理論とグラフ理論を用いて、下限ではなく正確な次元を同定する方法を提案したことであり、さらにそのアルゴリズムを理論的に提案したことでもあります。

熱平衡系における量子相関とパラメーター同定精度の関係

A. Sone, Q. Zhuang and P. Cappellaro, *Phys. Rev. A* 96, 012115 (2018)

A. Sone, Q. Zhuang, C. Li, Y-X Liu and P. Cappellaro, *Phys. Rev. A* 99, 052318 (2019)

この研究において、私は単一量子センサーにおける局所測定モデルをさらに拡張し、全システムを構成する部分系に対し、順次的に測定していった場合の同定精度と局所測定を通じて定量化する量子相関の関係について考え、熱平衡状態において、その関係性を明らかにしました。様々な測定の中で最も正確な同定をすることができる測定を最適測定といい、その最適測定によって得られた精度を量子フィッシャー情報量といますが、私はそれぞれの部分系に対し、順次的に最適局所測定を行って得られた量子フィッシャー情報量と全体系に対し最適測定を行なった場合の量子フィッシャー情報量の差に着目しました。局所測定では、量子back actionによって精度が悪くなることが分かっており、そのback actionは量子相関の存在に由来するものであり、私はその量子フィッシャー情報量の差と量子相関の関係について調べました。量子相関は量子discordと呼ばれる量でエントロピーを用いて定量化され、私は特に最適局所測定を取り入れた新しい量子discordを提案した。その導入された新しい量子discordと量子フィッシャー情報量の間を、熱平衡状態における温度推定の場合について考え、高温の場合におけるその関係式を導出し、さらに一般的なパラメーター同定の場合に拡張しました。この研究の独創的な点は、量子計測における量子相関の一般的な役割を理解するために、最適局所測定を導入した新しい量子discordを定義し、それを量子フィッシャー情報量という量子計測における推定精度を定量化する量と関係付けたことで、量子計測における量子相関の役割に対する理解を深めたということにあります。

このように私の博士研究では、数理工学で開発された様々な数学的理論を用いて、現在注目されている量子制御や量子情報理論に応用し、その長期的な目標として量子情報処理技術の実現のために必要とされる量子システム同定の手法を理論的に提案したということでありました。次に研究とは別に、MITにおける教育活動について紹介したいと思います。

2. MITでの教育活動

MITではTeaching Assistant (TA)として、原子核物理学（学部生、院生）と原子分子光物理学（院生）を担当していました。私にとって教育において必要な点は学生の好奇心と自信であると信じています。人類の歴史を見れば、私たちは多くの科学技術における革命を経験してきました。例えば、20世紀に入ってから、量子力学の誕生により、ニュートンらによって築き上げた古典物理学によって説明ができなかった原子や分子レベルの世界での物理的振る舞いが説明され、今ではその量子力学の恩恵により、私たちは原子や分子の制御を可能にしつつ、情報処理や精密測定に応用しようとしています。これらは知的革新に対する自信や自然界に対する好奇心なしでは達成されなかったでしょう。科学史を見れば、やはりこの自信と好奇心が科学者と技術者の支えとなっており、これらを基盤として多くの功績を挙げてきました。従って、教育において、私は教師の役目は学生の自信と好奇心を持たせることにあると信じています。

自信を持たせるためには、学生に徹底した基礎力の訓練が必要であると考えています。物理学や数学においてこの基礎力は極めて重要となり、物理的直感力、数学的直感力を養うためには計算練習や数値処理の練習を質的にも量的にも徹底しなければならないと考えています。どのような分野に携わろうとも、基礎力がなければ応用に結びつきません。また、人は誰でも知的好奇心があり、特に自身のついで学生はもっと知りたいと自ら積極的に学ぼうとします。そこで教師はそうした学生たちに様々な知識や新しい見解に巡り会える機会を作り、好奇心に基づいた学習を促すことが必要だと思えます。以上が私の教育に対する考え方ですが、実際にMITでの授業でこの思想を実践しようと考えました。

私の仕事としては、週一回の補習授業とOffice hour、そして宿題の出題と採点でした。特に私は週一回の補習授業に重点を置きました。補習授業では、授業の復習だけではなく、新しい問題を作り、出された問題を正確にそして早く解くという二本柱で基礎力の訓練をさせました。実際にこのような訓練で、学生たちの基礎力が上がっていき、宿題で複雑な問題に当たっても、自信を持って解けるようになったという学生が多くなっていきました。また、学生が主体となるような授業も設計し、学生同士がディスカッションをして問題を解き、また問題を発見するといった授業をしました。こうすることで、学生達の好奇心も形成されて行きました。

なかなか自信が持てない学生に関しては、特別Office hourを設け、学生の理解度を熟知した上で、一人一人に対応して行きました。学生によっては、もっといろいろなことを知りたいとあって、私と様々なトピックをディスカッションしに来る学生も多く、彼らから多くのことを学べたのも事実です。このような業績が認められ、2015年に学部からBest Teaching Assistant Awardを、また2018年にMITのSchool of EngineeringからThomas G. Stockham Jr. Fellowship (for Conspicuously Effective Teaching)を受賞しました。また、指導教員の教える量子論の授業で、量子制御に関する部分を任せられ、そこで確率制御理論、古典フィルター理論と量子フィルター理論を教え、さらにそれらを用いた応用について教えました。

このように博士課程を通じて、研究だけでなく、教育にも力を注ぎ、この経験を活かして、将来の科学技術の発展に研究面でも教育面でも大いに貢献して行きたいと思えます。博士取得後、アメリカのニューメキシコ州にありますロスアラモス国立研究所で二年間のポストドクターをすることになりました。そこでは、継続して量子理論の研究に励みます。世界と常に向き合って、知的好奇心を保ちながら、科学の最前線をさらに貫いて行きます。

奨学生 曾根 彬

2019年07月04日

マサチューセッツ州 ケンブリッジ