

長期海外派遣報告書

MERIT 2 期生
物理工学専攻 小芦研究室
川上駿

派遣先：トロント大学、派遣期間：2014 3/25-6/22

・トロントについて

私が派遣先として選んだのはトロント大学の Hoi-Kwong Lo 教授の研究室でした。私の修士課程の研究がその先生の理論をベースにしたものであったことと、またその先生が現指導教官と知人であったことが動機となりました。トロント大学は学生数5万弱を抱える巨大な大学で、そのうち留学生が約20%[1]を占めます（東大は学生数3万で留学生約8%[2]）。私の周辺では特に中国からの留学生が多く、英語と同じくらい多く中国語を耳にしました。多文化な構造は大学だけではなく、都市全体に広がっています。街の中心には大きな中華街があり、他にも韓国人街、イタリア人街、ギリシャ人街等が連なっています。それぞれの民族が自国の文化を崩すことなく生活しており、トロントは「人種のるつぼ」ではなく「文化のモザイク」都市と呼ばれています。世界中から集まった様々な人が誇りをもって自国の文化を語り合える魅力的な都市です。



トロント大学構内

[1]University of Toronto ホームページ [2]東京大学ホームページ

・平日の研究生活

派遣先の研究室はスタッフを含め10人弱のメンバーで成り立っていました。二週に一回メンバー全員が集まる全体ミーティングがあり、他は個別に教授とアポイントメントをとる一般的な形式です。全体ミーティングでは私も発表する機会を与えられ、修士課程で行った研究内容を紹介しました。

私が到着したころ、派遣先の研究室ではちょうど新しいプロジェクトが始まったところで、そのプロジェクトに私も参加させていただけることになりました。ただ派遣前に紹介されていたプロジェクトとは全く異なるものだったので、背景の勉強等は一からということになりました。初めの一ヶ月程度でプロジェクトの主旨を理解し、その後は先輩の協力のもと、論文の第二著者としての役割を果たしました。研究期間が3ヶ月という限られた期間であり、またプロジェクトの都合上迅速に結果を



お世話になった先輩と

出すことが必要であったため、その先輩とは毎日議論を重ねて目標を見失わないようにしていました。二週に一回程度は教授と議論しフィードバックをいただきました。最終的には目標としていた結果を提示することができ、論文の中の重要な一角を担うことができたと考えています。

また、一日の中で一番楽しみにしていたのは昼食の時間でした。トロント大学は中華街のすぐそばにあり、中国人のグループに混じって昼食に出かけました。一緒に昼食に出かけるメンバーは研究室に依らず、箸さえ使えるのであれば「一緒に行かない？」と声をかける誘い方がとても気に入りました。



中華街

・休日

平日は大半の時間を研究に費やしていましたが、休みの日は外に出かけるようにしていました。カナダの大部分は北海道より緯度が高く、5月中旬までウィンタースポーツが楽しめます。一方で6月に入ると比較的暖かくなり、カヌーやカヤックといったカナダならではのアウトドアスポーツを楽しむこともできます。また、トロントの街や大学では留学生同士の交流や日加交流の機会が多く提供されており、私も頻繁に利用しました。トロントには日本人も数多くおり、日本では普段交流の無かった全く異なる分野の人たちと話せるのも魅力的です。



カヤック体験

・全体を通して

今回の派遣は私にとって初めての長期海外生活であったこともあり、多くの新鮮な経験をすることができました。中でも印象的だったのは、これまでになく自分の意見をはっきりと求められたということです。「日本の～の社会問題に関して教えてほしい」と聞かれ、私が状況を説明すると「ではあなたは思うんだ」と聞かれて詰まってしまったことがありました。知っていることと自分の意見を持つことの間にある溝を改めて認識させられることになりました。そしてこの溝を意識することは研究においても重要であると思っています。自国のことについて深く知り海外へ意見を発信できる人間であると同時に、自分の専門分野を深め他分野へビジョンを発信していける人材になりたいと考えています。

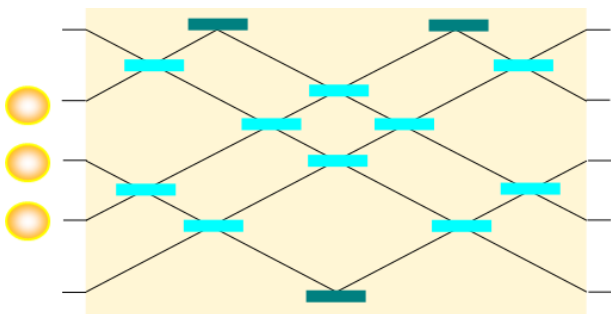
・謝辞

受け入れ先の Hoi-Kwong Lo 先生、Ph.D 学生の Feihu Xu さんには研究から生活面まで含め様々なサポートを頂きました。また、指導教官である小芦雅斗先生、助教の丹治はるか先生には留学の準備に関し多くの支援を頂きました。さらに、今回の海外派遣の機会を与えられ、かつ資金的な援助を受けた MERIT プログラムに感謝いたします。

研究テーマ：Decoy State を用いた単一光子 Boson Sampling

量子コンピュータは、従来の古典的なコンピュータで解くのが困難である特定の問題を極めて効率的に解くことができると期待されている。素因数分解はそのような問題のひとつとして認識されている代表例であるが、現在の技術で素因数分解を効率よく行う量子コンピュータを実装することは難しい。一方 2011 年、Aaronson と Arkhipov は Boson Sampling と呼ばれる問題が古典コンピュータで効率よく解けないクラスに入りうることを証明した[1]。この論文が注目を浴びた主な理由は、Boson Sampling が線形光学を用いて比較的容易に実装可能であることに加えて、この理論が実装上発生する小さなエラーを考慮しても成立することにあつた。この論文を皮切りに Boson Sampling の解を効率よく与える Boson Computer が小規模ながら実装され[2,3]、実装上発生する問題に焦点を当てた理論も提案された[4]。なかでも主要な問題点として挙げられるのが Boson Computer に入力する光子の数である。Boson Computer において各チャンネルの入力光子数が 2 つ以上になると、出力結果の確率分布が理想的なものからずれることが知られている（このずれをエラー ϵ とする）。現実的には全てのチャンネルの入力光子数が一個となる状況を作るのは困難であるため、 ϵ は 0 より大きな値をとる。そしてその値は実験で得られる確率分布から推定しなければならず、[1]によれば ϵ は Boson Computer に入力される単一光子の数 n の増加に対して減少しなければならないことが知られている。

この問題に対し Hoi-Kwong Lo のグループでは、元々量子暗号の分野で用いられてきた Decoy State Method と呼ばれる推定方法を適用することで、 ϵ 推定の精度を高めることができると考えた。Decoy State Method を実行するためには、入力する光の強度を様々に変化させる必要があり、一般にその強度の種類 x を多くするほど推定精度は高くなる。一方で実装上は x をなるべく少なくするのが理想的である。私の研究では Boson Computer 自体がエラーを引き起こさないという想定のもとで、入力光の最大強度 μ と x の値から ϵ の上限を定量的に評価した。さらに、 n を増加させたときに ϵ が減少するような μ と x の十分条件を与え、現実的に実装可能な結果になっていることを確認した。これらの結果は将来的に装置のより広い不完全性を考慮した理論と組み合わせられることが想定され、より大規模な Boson Computer 実装への新たな一步を踏んだと言える。



図： Boson Sampling の理想的な実装の例。左側から単一光子が入力され、光ファイバーやハーフミラーを経由し右側で検出される。

[1] Aaronson and Arkhipov, in Proceedings of the 43rd annual ACM symposium on Theory of computing, pp. 333–342, ACM, (2011)

[2] M. A. Broome *et al.*, Science, **339**, 794–798, (2013)

[3] B. Spring *et al.*, Science, **339**, 798–801 (2013)

[4] P. P. Rohde and T.C. Ralph, Phys. Rev. A, **85**, 022332 (2012)

Report of three-month dispatch

Shun Kawakami
Department of Applied Physics
Second generation student of MERIT program

Place : University of Toronto, Term : 2014 3/25-6/22

• About Toronto

I was dispatched to the Hoi-Kwong Lo's research group in University of Toronto. One reason is that my work in Master course was based on his theory and the other one is that my supervisor and he know each other. University of Toronto has about 50 thousands student, and 20% of them are international students[1] (University of Tokyo has about 30 thousands student, and 8% of them are international students [2]). Especially in my office, many of the members are Chinese, and I hear Chinese as much as English. Multi-culture structure is seen in the whole city of Toronto, too. There is a large China town as well as Korea town , Little Italy, Greek town, and so on. As each of them keeps the lifestyle of their own culture, Toronto is often called not the city of "melting pot", but the city of "cultural mosaic". Toronto is an attractive city where people come together from all over the world as well as anyone can be proud of their own cultures.



University of Toronto

[1]University of Toronto Web page [2]University of Tokyo Web page

• Research in weekdays

Prof. Lo's research group is composed of about ten members. They come all together once every two weeks and report their recent works. I also reported my work in master course there.

Just before I went to Toronto, a new project started in Prof. Lo's research group. Although it was a different project from ones which were suggested before visiting, I could fortunately join the project. In the first month, I studied the background and understood the point of the project. Afterwards I made a proof of the detailed theory



With a research member

with a help of a research member and wrote one part of a new paper as a second author. Since the visiting term is limited and they also need to get a result rapidly, I discussed with him every day to make the goal clear. We further discussed with the professor once every two weeks and got some advices from him. We finally got the result which was set as a goal of this three-month research.

What was a fan in a day was lunch time. I went to the China town which is near University of Toronto with Chinese members. The members of the lunch do not depend on research groups and they ask various kinds people to eat out together, which impressed me.



Chinatown in Toronto

• Holidays

Although most of time in weekdays was spent for research, I made it a rule to go out in holidays. Most part of Canada has high latitude and we can enjoy the winter sports until the middle of May. We can also enjoy canoeing and kayaking which are popular sports in Canada in June. Moreover, there are a lot of chances offered by the University or public organization to talk with international students in Toronto, and I often used them. There are also a lot of Japanese who have totally different background from mine, and I sometimes enjoyed talking with them.



Enjoy kayaking

• Summary

I had various kinds of new experiences in these three months. One of the most impressive experiences was that I knew the importance of having my own opinion. I once was asked about a social problem in Japan, and I explained it in detail. After that he said to me, “Then how do you think of that?”, and I was upset, which makes me realize the gap between knowing problems and having my own opinion. I think that it is applied to our research, which means that I should be the person who knows well about his own country and clearly transmit his opinion to foreign countries as well as knows well about his own research field and transmit his vision to another field.

• Acknowledgement

I thank Prof. Hoi-Kwong Lo and Feihu Xu, who supported me in terms of research and the life in Canada. I also thank Prof. Masato Koashi and assistant professor Haruka Tanji who helped me prepare for the visiting. Finally, I thank to MERIT program for financial support.

Project Title: Single-photon Boson Sampling with decoy states

Quantum computer is expected to efficiently solve specific problems which are classically intractable. Although factorization is widely believed to be one of such problems, it is hard to implement with the present techniques. In 2011, Aaronson and Arkhipov showed that the problem called Boson Sampling can be classically intractable[1]. This theory drew attentions because it holds even with the small error which is derived from practical imperfection as well as Boson Sampling itself can be implemented with linear optics. Afterwards some experimental works show that small-scale Boson Sampling is implemented with simple boson computers[2,3], and other theoretical works propose problems related to implementations[4]. One of the main problems is a multiple-photon input, which makes the probability distribution of outcomes different from an ideal one by error ϵ . Since it is hard to make all inputs single photons in practical situation, ϵ is non-zero value which is estimated from observed probability distribution. In [1], it is suggested that ϵ should decrease with n which represents the number of input-single photons.

In Hoi-Kwong Lo's research group, they consider that ϵ can be estimated better in Boson Sampling problem with Decoy State Method, which is an estimation method originally used in the field of quantum cryptography. In Decoy State Method, we change intensities of input light variously. It is known that the larger number of intensities gives the better estimation while the smaller number is preferable from the perspective of implementation. In my work, I estimated the upper bound of ϵ which is derived from the maximum intensity of input light μ and the number of intensities x under the condition that boson computer itself does not contribute to ϵ . As a result, I proved that a sufficient condition of μ and x which make ϵ decrease with n and found that they are practical values in terms of implementation. This result will be incorporated into the theory with another imperfection of Boson-Sampling implementation, which enables large-scale implementation in the future.

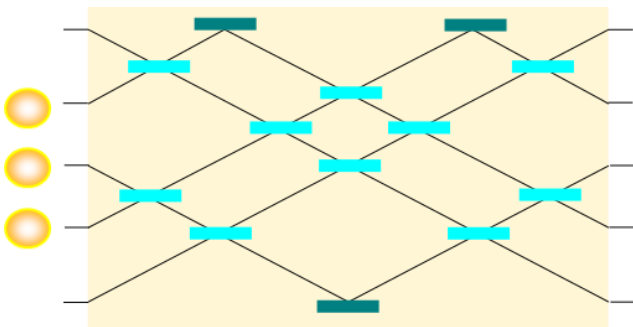


Figure : An example of ideal Boson Sampling implementation. Single photons are provided from the left side. After going through optical fiber and half mirror, they are detected at the right side.

[1] Aaronson and Arkhipov, in Proceedings of the 43rd annual ACM symposium on Theory of computing, pp. 333–342, ACM, (2011)

[2] M. A. Broome *et al.*, Science, **339**, 794–798, (2013)

[3] B. Spring *et al.*, Science, **339**, 798–801 (2013)

[4] P. P. Rohde and T.C. Ralph, Phys. Rev. A, **85**, 022332 (2012)