

量子コンピュータ教育に関する考察

江見圭司[†]

近年、ビッグデータ、ディープラーニングという流れで AI が発展してきた。ところが、大量の多次元量を扱うので、高速なコンピュータに対する旺盛な要求なから量子コンピュータが注目されている。現状の量子コンピュータの原理は量子力学の知識が不可欠で情報学専攻の学生には敷居が高いが、どうすれば教育可能かを考察した。

Disuccsion about Education of Quantum Computer

KEIJI EMI[†]

In recent years, AI has developed in the flow of big data and deep learning. However, since that handles a large amount of multidimensional quantities, quantum computers are attracting attention because of the strong demand for high-speed computers. Knowledge of quantum mechanics is indispensable for the current principle of quantum computers, and the threshold is high for students majoring in informatics. I will discuss how to educate them.

1. はじめに

1.1. 物理学者から量子コンピュータが提案される

私は大学院時代は物理化学を専攻した。特に磁気共鳴を実験手法として用いてきたので、量子力学や統計力学の知見を用いて実験し、物質の性質を性質を説明してきたので、量子力学に関しては非常に親しみがあるといえる。その立場から量子コンピュータ教育について議論したい。量子コンピュータというものはファインマンが「自然をシミュレーションしたければ、量子力学の原理でコンピュータを作らなくてはならない」と述べたことに端を発する[1][2]。その後、1985年にオックスフォード大学の物理学者デイビット・ドイチュによって量子コンピュータが理論的に定式化された[3]。

現在、東京大学を中心に量子コンピュータに関する教育[4]が行われている。教材を見てみると、量子力学の話題が中心となり、情報学専攻の学生にとっては敷居が高いといえる。そこで本稿では、古典コンピュータとの違いに着目して、量子コンピュータ教育で何を教えるのかをキーワードベースでまとめた。

教科書といえる専門書[5],[6],[7][8],を中心に、解説書[9][10][11][12][13][14]やウェブサイト[4][15][16]も検討した。「みんなの量子コンピュータ」という文献[9]を元に2単位授業のシラバス案をつくってみることにし

た。

1.2. 量子ゲート方式か量子アニーリング方式か

量子ゲート方式は、量子状態にある素子の振る舞いや組み合わせで計算回路を作り、問題を解いていく。量子ビットの実現方法には、超電導回路(磁気共鳴を含む)、イオントラップあるいは冷却原子、半導体量子ドット、ダイヤモンド NV センター、光学的量子計算、トポロジカルなどがある。従来型のコンピュータの上位互換として期待が高く、グーグルや IBM などの大手 IT ベンダーがハードウェアの開発を進めている。

一方、量子アニーリング方式は、組み合わせ最適化問題を解くことに特化している。高温にした金属をゆっくり冷やすと構造が安定する「焼きなまし(アニーリング)」の手法を応用して問題の解を求めている。

以上の観点から私は従来型のコンピュータの上位互換になりやすい量子ゲート方式について議論することにする。

1.3. 古典コンピュータと量子コンピュータ

量子コンピュータと従来の古典コンピュータの最も異なる点は、その情報の表し方である。古典コンピュータの内部では、情報は 0 か 1、どちらか 1 つの状態を取ることのできる「古典ビット」で表現される。これに対し、量子コンピュータの内部では、情報は 0 と 1 の両方の状態を同時に取ることのできる「量子ビット」で表現され

† 府立京都高等技術専門校

Technical College of Kyoto Prefecture

ることにある(文献[10]の表紙絵参照)。

2. 何を教えるのか?

2.1. 「量子コンピュータ概論」シラバス案

量子ゲート方式を前提に「みんなの量子コンピュータ」という文献[9]を元に2単位授業「量子コンピュータ概論」のシラバス案をつくってみた。

- 第1週 スピン
- 第2週 線形代数
- 第3週 線形代数
- 第4週 スピンと量子ビット
- 第5週 量子もつれ
- 第6週 ベルの不等式
- 第7週 古典論理、ゲート、および回路
- 第8週 量子ゲートと回路
- 第9週 量子ゲートと回路
- 第10週 量子アルゴリズム
- 第11週 量子アルゴリズム
- 第12週 量子コンピューティングの与える影響
- 第13週 量子コンピューティングの与える影響
- 第14週 演習 量子ゲートと回路
- 第15週 演習 量子アルゴリズム

次にそれぞれについて述べていく。

2.2. スピンと量子ビット

第1週と第4週でスピンについて扱っている。スピンは量子ゲートの基本である。ただ、ハードウェア的にどのようにスピンを観測するのかの部分は深入りすると、物理学専攻の学部課程の量子力学のレベルすらこえてしまうので注意が必要である。

2.3. 線形代数

文献[9]で解説している線形代数は以下のような内容である。昨今、高等学校で線形代数分野(ベクトル, 行列)を扱う量が減ってきているので, 1年次の学生に量子コンピュータについて学習させることは困難をともなうであろう。量子ゲートの項で述べるように簡単な行列の計算に習熟しておくことは量子コンピュータに関する理解において, 重要である。波動関数をブラとケットで表す記法については学部レベルの量子力学では一般的ではないので注意が必要であろう。

複素数と実数

ベクトル

ベクトル図

ベクトルの長さ

スカラーの乗算

ベクトルの加算

直交ベクトル

ブラとケットの積

ブラケットと長さ

ブラケットと直交性

正規直交基底

基底ベクトルの線形結合としてのベクトル

順序付き基底

ベクトルの長さ

行列

行列計算

直交およびユニタリ行列

線形代数の解法テクニック

2.4. 量子もつれ, ベルの不等式

第5週, 第6週で扱う「量子もつれ」と「ベルの不等式」などは物理学専攻の学部課程の量子力学では扱わない内容であるので, とても注意が必要である。

2.5. 古典論理, ゲートおよび回路

第7週で扱う内容は通常のコンピュータの授業で行う論理回路である。NOT ゲート, AND ゲート, OR ゲートという3つであるが, これらはブール代数における「否定」「論理積」「論理和」に対応しており, あらゆる古典的な論理はこの3つのルールに分解して表せることが理解させることが重要である。つまり, XOR, NAND, NOR は前述の3つのゲートを組み合わせであることを確認することである。

2.6. 量子ゲートと回路

第8週, 第9週, 第14週で扱う内容はこの授業のもっとも重要な部分である。

「量子ゲート」というのは, 古典的コンピュータが「論理ゲート」と呼ばれる要素を組み合わせることによって実現されていることにイメージを重ねたものである。量子ゲートはユニタリ行列で記述で, 1量子ビットゲートでは2行2列の行列で表すことができるので以下に具体的に挙げてみる。

$$e^{i\psi} \begin{pmatrix} e^{i(-\alpha-\beta)} \cos \theta & -e^{i(-\alpha+\beta)} \sin \theta \\ e^{i(\alpha-\beta)} \sin \theta & e^{i(\alpha+\beta)} \cos \theta \end{pmatrix}$$

ここで1量子ビットゲートの場合をあげる。

・パウリゲート

$$X = NOT = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$$

$$Y = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix} Z = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$$

・アダマールゲート

$$H = \frac{1}{\sqrt{2}}(X + Z) = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} H_2 \quad 1$$

・I, S, T ゲート

$$I = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$S = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{\frac{i\pi}{2}} \end{bmatrix}, \quad S^\dagger = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{-\frac{i\pi}{2}} \end{bmatrix}$$

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{\frac{i\pi}{4}} \end{bmatrix}, \quad T^\dagger = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{-\frac{i\pi}{4}} \end{bmatrix}$$

・位相ゲート

$$V(\phi) = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\phi} \end{pmatrix}$$

・回転ゲート

$$R_\phi = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\phi} \end{bmatrix}$$

これを一般化したゲートがユニバーサルゲートである。

$$\begin{bmatrix} \cos(\theta/2) & -e^{i\lambda} \sin(\theta/2) \\ e^{i\phi} \sin(\theta/2) & e^{i\lambda+i\phi} \cos(\theta/2) \end{bmatrix}$$

2 量子ビットゲートの場合は, CNOT ゲート, 制御ユニタリゲート, SWAP ゲートがあり, 4 行 4 列の行列で表すことができる。

更に 3 量子ビットゲートの場合の代表的なものとしてトリフォゲートがあり, 8 行 8 列の行列で表すことができる。

以上のような行列の計算に習熟することができれば量子コンピュータの概要は理解できると考えられる。

2.7. 量子アルゴリズム

第 10 週, 第 11 週, 第 15 週で扱う内容は, 量子コンピュータ特有のアルゴリズムである。

2.8. 量子コンピューティングに与える影響

第 12 週, 第 13 週で扱う内容は, 量子コンピューティングの与える影響として応用事例などである。

ショアのアルゴリズムと暗号解読[17], グローバーのアルゴリズムとデータ検索, 化学とシミュレーション[18], ハードウェア, 量子アニーリングなどが多岐にわたる話題があるが, ひとつひとつが内容があるので, 講義担当者の専門に応じて話題をとりあげるのが適切であろう。

2.9. 量子コンピュータを理解するための量子力学

シラバスの前提になっているのが量子コンピュータをリカするために必要な量子力学の知識である。学部レベルの量子力学の教科書にはなじみがないものをまとめおく。

- ・量子もつれ
- ・ベルの不等式
- ・ブラとケットをつかった量子力学の記述
- ・ブロッホ球

学部レベルの量子力学の教科書として 2 つ[19][20]は

どあげておく。ブラとケットをつかった量子力学の記述に関しては文献[21]を参考にして欲しい。

ブロッホ球に関しては量子力学の教科書ではなく磁気共鳴の専門書[22]を参考しかない。これに関しては大学院生レベルの知識である。

3. 量子コンピュータを体験させる教育

いくつかの文献[23][24][25][26]を利用すれば, 量子コンピュータをシミュレータなどで体験することも可能である。

3.1. 量子力学の原理を深く体験する

文献[23][24]を利用すると, 量子力学の原理に基づいて量子コンピュータをシミュレートすることは可能である。量子力学や線形代数の知識に精通していれば, 集中講義で扱うことも可能であろうが, 通常の情報学のカリキュラムの学生であれば, 困難をとまうであろう。

3.2. 量子コンピュータのプログラミングを体験する

文献[25]を利用すると, 量子コンピュータのプログラミングを体験することは可能である。独自のシミュレータ QCEngine を使って JavaScript で書かれたサンプルプログラムをブラウザ上で動かし, 量子コンピュータでのプログラミングに必要な知識やスキルを学ぶことができるようになっている。通常の情報学のカリキュラムの学生でも理解可能であろう。

3.3. 量子ゲートを体験する

2.6. で述べた内容を発展させるには文献[26]を利用すると, 量子ゲートをまじめに体験することができる。IBM の量子コンピューター Q で量子プログラミングの基本を学ぶ解説書であるが, IBM のコンピュータに特化しているわけではない。文献[26]の巻末には量子ゲートを表現する行列の一覧があるので大いに参考になる。

4. まとめ

まず, 数学の知識として, 複素数と簡単な線形代数の知識が必要である。昨今の高等学校の学習指導要領では 1 年次にこれらの条件を満たすのは難しいであろう。

量子力学に振り回されないようにする必要がある[4]。既存の学部レベルの量子力学の教科書では完全には対応しきれないことは, 2.9. で述べたとおりである。量子コンピュータを理解するための量子力学の授業を設定するのが望ましいと考える。

2 単位授業「量子コンピュータ概論」では, 上記の知識を前提にして実施する必要があるだろう。

これに対応して, 「量子コンピュータのプログラミング」という演習の授業は必要であろう。

量子コンピュータの実現はまだまだ先の話というわけではなく, もう教育するべき段階に来ているのである。

参考文献

- [1] Feynman, "Simulating physics with computers", International Journal of Theoretical Physics 21, p.467 (1982)
- [2] (a) ファインマン, A. ヘイ編, R. アレン編, 原康夫(訳), 中山健(訳), 松田和典(訳), "ファインマン計算機科学", p.242, (岩波書店, 2020); (b) Richard P. Feynman, Tony Hey(編集), Robin W. Allen(編集), "Feynman Lectures On Computation", p.324, (CRC Press, 2019)
- [3] Deutsch, "Quantum theory, the Church-Turing principle and the universal quantum computer" Proceedings of the Royal Society of London A 400, 97 (1985)
- [4] 量子技術教育プログラム公式サイト
<https://www.sqei.c.u-tokyo.ac.jp/qed/> (2022年1月12日閲覧); 「基礎ノート」から講義のPDFをダウンロードすることができる。
- [5] 上坂 吉則, 「量子コンピュータの基礎数理」, p.230, (コロナ社, 2000)
- [6] 富田 章久, 「量子情報工学」, p.256, (森北出版, 2017)
- [7] 情報処理学会出版委員会(監修), 嶋田 義皓, "量子コンピューティング: 基本アルゴリズムから量子機械学習まで", p.289, (オーム社, 2020)
- [8] 渡邊 靖志, "入門講義 量子コンピュータ", p.256, (講談社, 2021)
- [9] (a) Chris Bernhardt, 湊 雄一郎, 中田 真秀(監修, 翻訳), "みんなの量子コンピュータ", pp.1-216; (b) Chris Bernhardt, "Quantum -Computing for Everyone", The MIT Press (2020)
- [10] 宇津木 健, 徳永 裕己(監修), "絵で見てわかる量子コンピュータの仕組み", 翔泳社 (2019)
- [11] 湊雄一郎, "いちばんやさしい量子コンピューターの教本 人気講師が教える世界が注目する最新テクノロジー", pp.1-286, インプレス (2019)
- [12] 長橋賢吾, "図解入門 よくわかる 最新 量子コンピュータの基本と仕組み", pp.1-224, 秀和システム (2018)
- [13] 竹内 繁樹, "量子コンピューター超並列計算のからくり(ブルーバックス)", pp.1-272, 講談社 (2005/2/18)
- [14] 山崎耕造, "今日からモノ知りシリーズ トコトンやさしい量子コンピュータの本", 日刊工業新聞社 (2021)
- [15] Quantum Native Dojo ドキュメント
https://dojo.qulacs.org/ja/latest/notebooks/0_prologue.html (2022年1月12日閲覧)
- [16] Qiskit を使った量子計算の学習
<https://qiskit.org/textbook/ja/preface.html> (2022年1月12日閲覧)
- [17] Shor, "Polynomial-Time Algorithms for Prime Factorization and Discrete Logarithms on a Quantum Computer", IAM J.Sci.Statist.Comput. 26, p.1484 (1997)
- [18] 杉崎 研司, "量子コンピュータによる量子化学計算入門", 講談社 (2020)
- [19] (a) 朝永 振一郎, "量子力学 I", p.312, (みすず書房, 1969); (b) 朝永 振一郎, "量子力学 II", p.312, (みすず書房第二版, 1997); (c) (b) 朝永 振一郎ほか, "角運動量とスピナー『量子力学』補巻", p.256, (みすず書房, 1989)
- [20] (a) ワルター・グライナー, 伊藤伸泰(訳), "量子力学概論 (SPRINGER UNIVERSITY TEXTBOOKS)", p.493 (丸善出版, 2016); (b) Walter Greiner, "Quantum Mechanics: An Introduction, English Edition", p.510, (Springer; 4th ed., 2009); (c) Walter Greiner, "Theoretische Physik 04. Quantenmechanik 1, German Edition", p.516, (Europa Lehrmittel Verlag, 2005)
- [21] (a) J.J. サクライ, J. ナポリターノ, 桜井 明夫(訳), "現代の量子力学(上) 第2版", P.355, (吉岡書店第2版, 2014); (b) J.J. サクライ, J. ナポリターノ, 桜井 明夫(訳), "現代の量子力学(下) 第2版", P.357, (吉岡書店第2版, 2015); (c) J. J. Sakurai, Jim Napolitano, "Modern Quantum Mechanics", P.566, (Cambridge University Press; 3rd edition, 2020)
- [22] ファラー ベッカー, 赤坂一之(訳), 井元敏明(訳), "パルスおよびフーリエ変換 NMR ー理論および方法への入門", P.215, (吉岡書店, 1979)
- [23] 遠藤 理平, "14日で作る量子コンピューター: シュレディンガー方程式で量子ビット・量子ゲート・量子もつれを数値シミュレーション VisualC++版", カットシステム (2020)
- [24] 遠藤 理平, "14日で作る量子コンピューター: シュレディンガー方程式で量子ビット・量子ゲート・量子もつれを数値シミュレーション Python 版", カットシステム (2020)
- [25] (a) Eric R. Johnston, Nic Harrigan, Mercedes Gimeno-Segovia, 丸山 耕司(監修), 北野 章(翻訳), "動かして学ぶ量子コンピュータプログラミング ーシミュレータとサンプルコードで理解する基本アルゴリズム", pp.1-332, オライリージャパン (2020); (b) Eric R. Johnston, Nic Harrigan, Mercedes Gimeno-Segovia, "Programming Quantum Computers: Essential Algorithms and Code Samples", Oreilly & Associates Inc (2019)
- [26] 湊雄一郎, 加藤拓己, 比嘉恵一朗, 永井隆太郎, "IBM Quantum で学ぶ量子コンピュータ", pp.1-254, 秀和システム (2021)