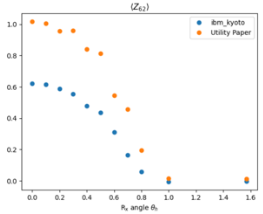
IBM Quantum Learning
「Utility-scale quantum computing」の日本語解説

元のコース：https://quantum.cloud.ibm.com/learning/en/courses/utility-scale-quantum-computing

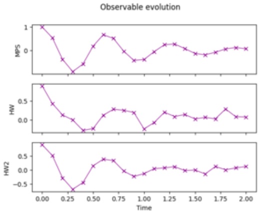
1. はじめに (飛ばします)
2. 量子ビット・量子ゲート・量子回路 (7/7(月))
3. 量子テレポーテーション (7/16(水))
4. グローバーのアルゴリズム (7/16(水))
5. 量子位相推定 (7/28(月))
6. 量子変分アルゴリズム (7/28(月))
7. 量子系のシミュレーション
8. 古典計算によるシミュレーション
9. 量子ハードウェア
10. 量子回路の最適化
11. 量子エラー緩和
12. 量子ユーティリティーの実験 I
13. 量子ユーティリティーの実験 II
14. 量子ユーティリティーの実験 III

Jupyter notebookの和訳：
https://quantum-tokyo.github.io/introduction/courses/utility-scale-quantum-computing/overview-ja.html

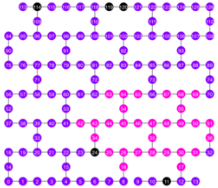
I. Nature paper (127 qubits x 60 entangling gates)



II. 1D Transverse Ising model (70 qubits x 80 entangling gates)



III. The largest GHZ state challenge



2. 量子ビット・量子ゲート・量子回路

Utility-scale quantum computing / Quantum bits, gates, and circuits

2025/07/07

Daiki Kimura

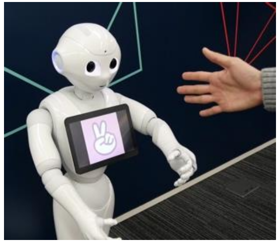
木村 大毅 (http://ibm.biz/daiki-kimura)

2015年 東京工業大学 博士課程修了、中学・高校教員免許取得（数学）

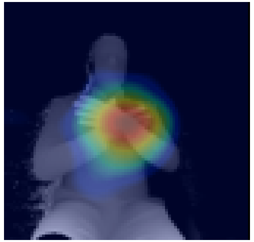
日本学術振興会 特別研究員 等を兼任，Microsoft Research Asia，スイスの大学で研究インターン

2015年 楽天技術研究所に入所　画像処理の研究に従事

2016年~2025年 IBM東京基礎研究所に入所（一時期、所長技術秘書に就任）

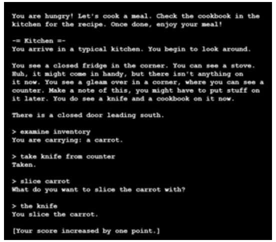


ゲームAI

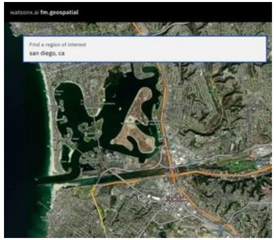


病気の判定補助AI

ボトル検出AI



説明性の高いAI



衛星画像AI

2025年~現在 政府機関/病院担当 Senior Account Technical Leader

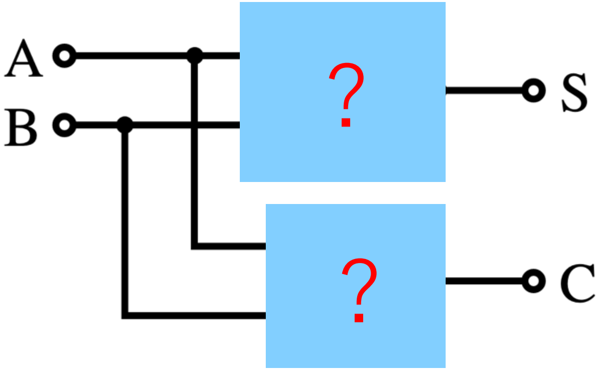
2025年~現在 IBM Quantum Ambassador（兼務）

2025年~現在 電気通信大学 連携准教授 庄野研究室（兼務）

2023年~現在 人工知能学会 理事 広報担当（兼務）

古典コンピューターにおける足し算回路

左側(A,B)が入力、右側(S,C)が出力



論理表

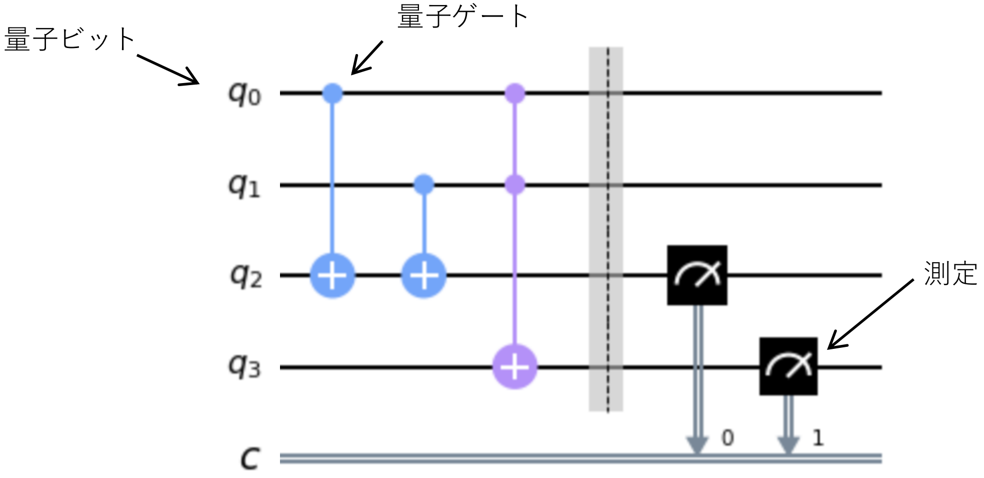
A (input)	B (input)	S (sum)	C (carry out)
0	0	0	0
0	1	1	0
1	0	1	0
1	1	0	1

半加算器：
下の桁からの繰り上がりを考慮せず、単純に二数の和のみを求める回路

量子コンピューターにおける足し算回路

表記方法としては、基本的には同じようなアイディアを使用しますが、
入力、出力、および演算に用いられる記号の表現方法が異なります

- 量子ビットに対して、基本的な量子ゲートの一連の操作が適用されます



量子回路による半加算器

典型的な単一量子ビットのゲート

NOT（ノット）ゲート

$$|0\rangle \Rightarrow \boxed{X} \Rightarrow |1\rangle$$

Hadamard（アダマール） ゲート

$$|0\rangle \Rightarrow \boxed{H} \Rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}}\left(|0\rangle + |1\rangle\right)$$

重ね合わせ

単一量子ビットの状態

$|0\rangle$ と $|1\rangle$ は、複素2次元ベクトル空間 $\mathbb{C}^2$ の値である

$$|0\rangle = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad , \quad |1\rangle = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

そして、NOTゲート　$X = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$　と表現され

$$|0\rangle \Rightarrow \boxed{X} \Rightarrow |1\rangle$$

$$X\,|0\rangle = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} = |1\rangle$$

任意の量子ビットと ユニタリー発展

任意の量子状態は、$|0\rangle$と$|1\rangle$の線形結合として表すことができます

$$|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$$

この時、 αとβは、 $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$を満たす複素数である

量子状態はユニタリー演算子Uによって状態を移ることが可能です

$$U|\psi\rangle = |\psi'\rangle$$

ユニタリー演算子は、必ず逆行列を持つ（可逆性がある）

$$U^{-1}U = UU^{-1} = I$$

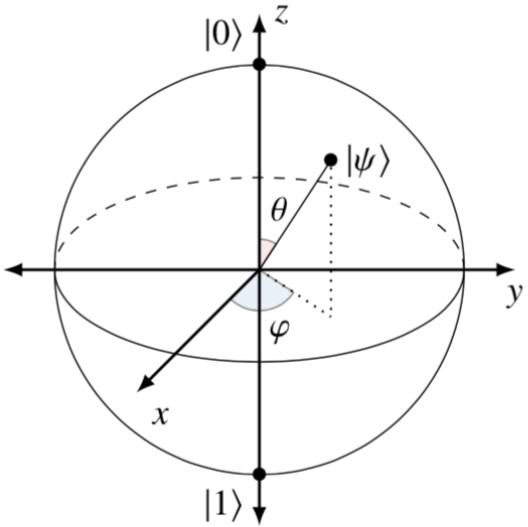
ブロッホ球

- 再掲：任意の量子状態

$$|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle \quad s.t. |\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$$

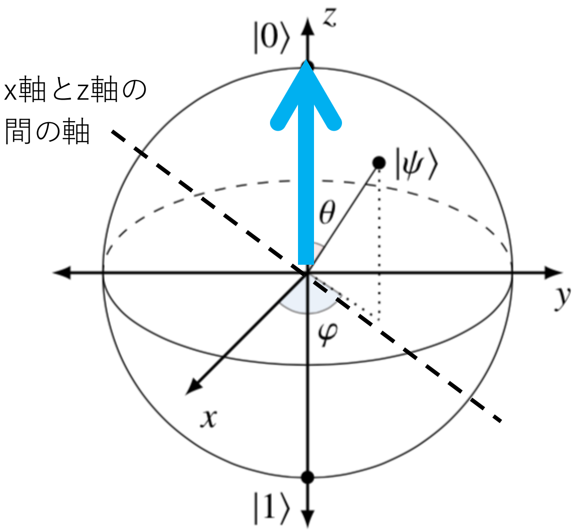
- 以下のように書き換えることも可能

$$|\psi\rangle = cos\left(\frac{\theta}{2}\right)|0\rangle + e^{i\varphi} sin\left(\frac{\theta}{2}\right)|1\rangle = \begin{pmatrix} cos\frac{\theta}{2} \\ e^{i\varphi} sin\frac{\theta}{2} \end{pmatrix}$$



- 量子状態は必ずブロッホ球の表面上

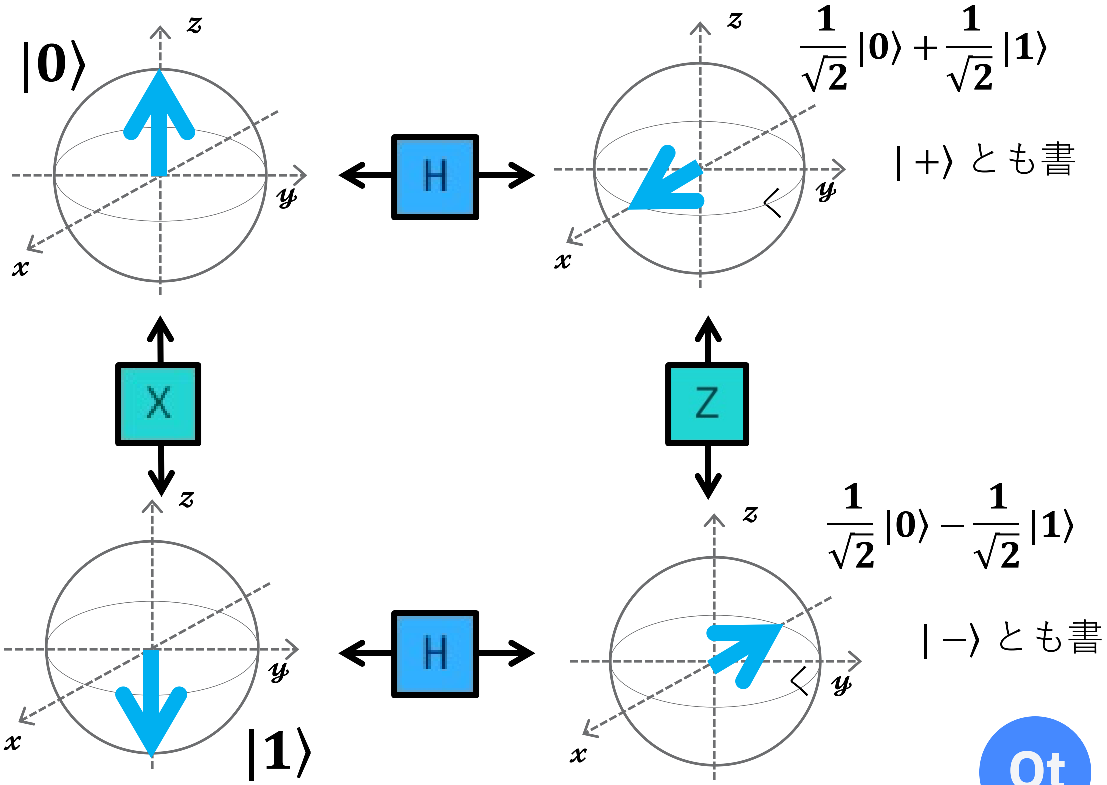
ブロッホ球（演算）



量子状態とは、
中心からブロッホ球面上の点への
ベクトル

北極: |0⟩が100%

赤道: 重ね合わせ(|0⟩と|1⟩が50%ずつ)



南極: |1⟩が100%

典型的な単一量子ゲート

$$X \equiv \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}; \quad Y \equiv \begin{bmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{bmatrix}; \quad Z \equiv \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}.$$

X軸に180度回転　　Y軸に180度回転　　Z軸に180度回転

$$H = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}; \quad S = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & i \end{bmatrix}; \quad T = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \exp(i\pi/4) \end{bmatrix}.$$

X軸とZ軸との間の軸で180度回転　Z軸で90度回転　　Z軸で45度回転

$$R_x(\theta) \equiv e^{-i\theta X/2} = \cos\frac{\theta}{2} I - i \sin\frac{\theta}{2} X = \begin{bmatrix} \cos\frac{\theta}{2} & -i\sin\frac{\theta}{2} \\ -i\sin\frac{\theta}{2} & \cos\frac{\theta}{2} \end{bmatrix}$$

$$R_y(\theta) \equiv e^{-i\theta Y/2} = \cos\frac{\theta}{2} I - i \sin\frac{\theta}{2} Y = \begin{bmatrix} \cos\frac{\theta}{2} & -\sin\frac{\theta}{2} \\ \sin\frac{\theta}{2} & \cos\frac{\theta}{2} \end{bmatrix}$$

$$R_z(\theta) \equiv e^{-i\theta Z/2} = \cos\frac{\theta}{2} I - i \sin\frac{\theta}{2} Z = \begin{bmatrix} e^{-i\theta/2} & 0 \\ 0 & e^{i\theta/2} \end{bmatrix}.$$

回転のデモ: https://javafxpert.github.io/grok-bloch/

重ね合わせ

重ね合わせとは、$|0\rangle$ と $|1\rangle$ の両方を持つ量子状態を作り出す操作

$$|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle = \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix} \qquad s.t. |\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$$

もしも、α と β がゼロでない場合、量子状態は $|0\rangle$ と $|1\rangle$ を両方を持つ状態となります
これが "量子ビットは0と1を同時に持っている" と呼ばれる所以です

測定

測定とは、量子ビットを $|0\rangle$ か $|1\rangle$ に決定させることである

$$\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle \qquad s.t. |\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$$

この時

$|\alpha|^2$ は $|0\rangle$ として測定される確率を意味する

$|\beta|^2$ は $|1\rangle$ として測定される確率を意味する

（**ボルンの法則**とも呼ばれる）

そのため、α と β は確率振幅とも呼ばれます

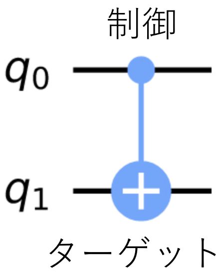
例えば、

$\frac{\sqrt{2}}{2}|0\rangle + \frac{\sqrt{2}}{2}|1\rangle$ を測定すると $|0\rangle$ と $|1\rangle$ が同じ確率で測定される

$\frac{\sqrt{3}}{2}|0\rangle - \frac{1}{2}i|1\rangle$ を測定すると $|0\rangle$ が 75%、$|1\rangle$ が 25% の確率で測定される

典型的な2量子ビットゲート

制御NOT（CNOT）ゲートは、制御量子ビットの状態が $|1\rangle$ の場合、
ターゲット量子ビットに対してNOTゲートを実行する条件付きゲートです



Input (t,c)	Output (t,c)
00	00
01	11
10	10
11	01

注意: Qiskitでは リトルエンディアン 形式で記載されます（ $|q_1 q_0\rangle$ ）

複数ビットにおける重ね合わせ

- 1量子ビットでは、2つの量子状態の重ね合わせである:

$$|0\rangle, |1\rangle$$

- 2量子ビットでは、 2^2=4つの量子状態の重ね合わせである:

$$|0\rangle\otimes|0\rangle, |1\rangle\otimes|0\rangle, |0\rangle\otimes|1\rangle, |1\rangle\otimes|1\rangle$$

- n量子ビットでは、 2^nつの量子状態の重ね合わせである:

$$|0\rangle_{n-1}\otimes\cdots\otimes|0\rangle_0, |0\rangle_{n-1}\otimes\cdots\otimes|0\rangle_1\otimes|1\rangle_0, \cdots, |1\rangle_{n-1}\otimes\cdots\otimes|1\rangle_0$$

量子計算における表記法

- テンソル積

$$|0\rangle \otimes |0\rangle = |0\rangle |0\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = |00\rangle$$

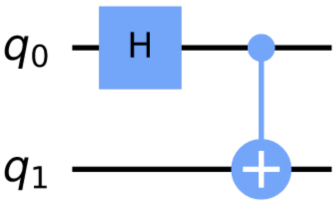
<u>一般形式では</u>

$$\begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \dots \\ \alpha_m \end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix} \beta_1 \\ \dots \\ \beta_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha_1\beta_1 \\ \dots \\ \alpha_1\beta_n \\ \dots \\ \alpha_m\beta_n \end{pmatrix}$$

量子もつれ状態

量子もつれ状態とは、量子状態 $|\psi\rangle_A$ と $|\psi\rangle_{\mathrm{B}}$ からなる状態 $|\psi\rangle_{AB}$ で、個々の量子状態のテンソル積で表すことができない状態です

ベル状態



$$|0\rangle \otimes |0\rangle \rightarrow I \otimes H \rightarrow |0\rangle \otimes \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle)$$
$$= \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |01\rangle)$$
$$\rightarrow CNOT \rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |11\rangle)$$

- テンソル積で表すことができないとは、
  $\frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |11\rangle) \neq (a_0|0\rangle + a_1|1\rangle) \otimes (b_0|0\rangle + b_1|1\rangle)$

この方程式を満たす係数は存在しない

最後に：もっと勉強したい方へ

Quantum Tokyo へようこそ

学習コンテンツ

Qiskit の始め方

IBM Quantum Plaform 教材 日本語訳

IBM Research Blog 日本語版

(旧) Qiskitテキストブック 日本語版

(旧)Qiskitテキストブック(Qiskitコース) 日本語版

(旧) Qiskitドキュメント・チュートリアル 日本語版リンク集

IBM Quantum Challenge

Qiskit Global Summer School（Qiskit夏の学校） 資料 日本語版

Quantum Tokyo 過去イベント資料

Qiskitコミュニティー関連イベント案内

その他： IBM Quantum の便利なツール

量子ビット、量子ゲート、量子回路

沼田 祈史(19 Apr 2024)
Translated by Kifumi Numata

講義ノートのPDFは近日公開予定です。一部のコード スニペットは静的イメージであるため、非推奨になる可能性があることに注意してください。

この実験を実行するための QPU 時間は 約5秒です。

1.紹介

ビット、ゲート、および回路は、量子コンピューティングの基本的な構成要素です。量子ビットと量子ゲートを用いた回路モデルによる量子計算を学び、重ね合わせ、測定、エンタングルメントの復習も行います。

このレッスンでは、次のことを学びます。

- 単一量子ビットゲート
- ブロッホ球
- 重ね合わせ
- 測定
- 2量子ビットゲートとエンタングルメント状態

この講義の最後には、ユーティリティスケールの量子コンピューティングに不可欠な回路の深さについて学びます。

2. Computation as a diagram

量子ビットを使用する場合もビットを使用する場合も、入力を必要な出力に変換するためにそれらを操作する必要があります。少数のビット用の非常に単純なプログラムでは、このプロセスを **回路図** と呼ばれる図で表すと便利です。
左下の図が古典回路の例、右下の図が量子回路の例です。 どちらの場合も、左側に入力があり、出力が右側で、その間に演算が記号によって表されます。演算に用いられる記号は、主に歴史的な背景から「ゲート」と呼ばれます。

3. 単一量子ビットゲート

3.1 量子状態とブロッホ球

量子ビットの状態は、$|0\rangle$と$|1\rangle$ の重ね合わせの状態で表します。任意の量子ビットは以下のように表します。

$$\psi = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$$

ここで α と β は、$|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$ を満たす複素数で、確率振幅と呼ばれます。

Contents

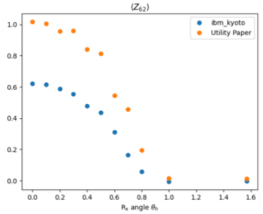
IBM Quantum Learning
「Utility-scale quantum computing」の日本語解説

元のコース：https://quantum.cloud.ibm.com/learning/en/courses/utility-scale-quantum-computing

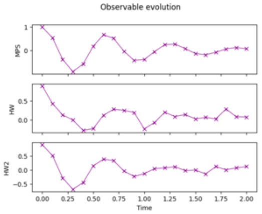
1. はじめに (飛ばします)
2. 量子ビット・量子ゲート・量子回路 (7/7(月))
3. 量子テレポーテーション (7/16(水))
4. グローバーのアルゴリズム (7/16(水))
5. 量子位相推定 (7/28(月))
6. 量子変分アルゴリズム (7/28(月))
7. 量子系のシミュレーション
8. 古典計算によるシミュレーション
9. 量子ハードウェア
10. 量子回路の最適化
11. 量子エラー緩和
12. 量子ユーティリティーの実験 I
13. 量子ユーティリティーの実験 II
14. 量子ユーティリティーの実験 III

Jupyter notebookの和訳：
https://quantum-tokyo.github.io/introduction/courses/utility-scale-quantum-computing/overview-ja.html

I. Nature paper (127 qubits x 60 entangling gates)



II. 1D Transverse Ising model (70 qubits x 80 entangling gates)



III. The largest GHZ state challenge