量子コンピュータ

西野研究室 情報通信工学科
http://www.tnlab.ice.uec.ac.jp

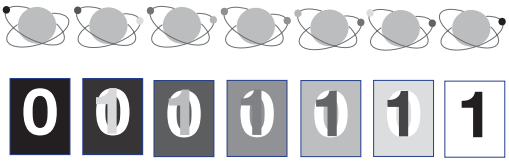
歴史

B.C.	そろばんの発明
A.D. 17	Pascal が歯車を用いた機械式計算機を発明した
1936	Church によって「計算」とは何か？が明らかにされた
1937	Turing によってチューリングマシンが考案された
1944	リレースイッチを使用した電子計算機 Mark- Ⅰが開発された
1946	真空管を使用した電子計算機 ENIAC が開発された
1985	Deutsch が量子チューリングマシンを考案した
1989	Deutsch が量子回路を定式化した
1993	Bernstein と Vazirani が効率的な万能量子チューリングマシンを構成した
1994	Shor のアルゴリズムが考案された
1996	Grover のアルゴリズムが考案された

原理

原子などのミクロな粒子は時に波として振る舞うことがあります。そのような波は、水面にたつ波のようにいくつも重ね合わせることができます。波が重なり合ったとき、その粒子の粒子としての位置は不確定になります。このような粒子の状態を重ね合わせ状態といいます。

さて、古典的なコンピュータのメモリの１ビットと呼ばれる一区画は、「0」か「1」のどちらかの値しか保持できません。それに対して、量子コンピュータのメモリの一区画は１量子ビットと呼ばれ、先に述べた量子力学的な性質を用いて、通常の「0」、「1」に加え、様々な「0と1の重ね合わせ状態」をとることができます。



電子の軌道の重ね合わせ状態と０と１の重ね合わせ状態

単純に、１量子ビットで「0」と「1」の両方の値を保持できると考えれば、たとえば２量子ビットの場合、メモリ全体で「００」,「１０」,「０１」,「１１」の４つの値に関する計算を同時に実行できます。

威力

もし、もっと量子ビットの数が大きい量子コンピュータ、たとえば１７量子ビットの量子コンピュータが実現できたなら、この量子コンピュータはメモリ全体で 2^{17} （約六万五千）通りの値それぞれについての計算を、同時に行うことができます。これは 2005 年現在で世界最速のスーパーコンピュータ BlueGene/L に匹敵します。１８量子ビットならさらにその２倍です。

量子コンピュータと古典的なコンピュータ

電子的なコンピュータが発明されて以来、一秒に一つのプロセッサが計算できる回数――周波数は年々向上してきました。これは基本的に回路の集積度（部品の詰まり具合）が技術の進歩により上がってきた為です。

しかし、ひとつひとつの部品を細かくするのにも限界があります。なぜなら、部品が原子数百個、数十個分と小さくなっていけば量子的な特性が無視できなくなるからです。

量子コンピュータは古典的なコンピュータの限界である粒子の量子的特性を逆手に取ることで、一度に計算できる計算の個数を爆発的に増やすことができます。

しかし、量子コンピュータは単純な並列計算機ではありません。
実際には様々な量子力学的な制約が課せられます。
そのため、どのような計算法（アルゴリズム）が量子コンピュータ上で威力を発揮するのか、
量子コンピュータはどのような可能性を持っているのか、
などを研究する必要があります。

現在知られている主要なアルゴリズム

Grover のアルゴリズム

整列されていないデータベースの中から、所望のデータを高い確率で高速に探し出します。
１００万個のデータからほしいデータを探す場合、現在のコンピュータで動く既存のアルゴリズムでは平均５０万回調べなければ探し当てられませんが、このアルゴリズムを量子コンピュータ上で動かせば、１０００回調べればほしいデータを発見することができます。

Shor のアルゴリズム

整数の因数分解を小さな誤り確率で高速に行うアルゴリズムです。一般に大きな整数の因数分解は現在のコンピュータでは非常に時間がかかります。
５００桁ほどの整数の因数分解は１０００万年程度かかります。

この因数分解の困難さによって RSA 公開鍵暗号など主要な暗号の安全性が保証されています。

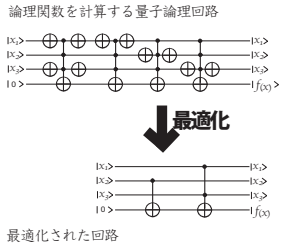
つまり、もしこのアルゴリズムを実行できる量子コンピュータが実現されたら、インターネット上での情報のやり取りの安全性が失われてしまいます。

量子計算の理論

西野研究室 情報通信工学科
http://www.tnlab.ice.uec.ac.jp

量子回路

現在あるコンピュータは基本的に論理回路で構成されています。量子コンピュータにおいても回路を考えることができ、それを量子回路と呼びます。特に論理関数を計算する回路を量子論理回路と呼びます。

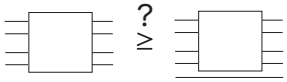


量子論理回路の最適化

論理関数の計算は、量子コンピュータにとっても重要です。しかし量子論理回路は(演算が可逆でなければならないという量子力学の制約があるので)古典コンピュータとは異なる方法で実現しなくてはなりません。

また、量子コンピュータの状態は量子力学的に非常にデリケートなので、量子回路のサイズはなるべく小さくする必要があります。

当研究室では量子論理回路の設計法、および最適化の方法を研究しています。



補助キュービットレジスタの追加で
サイズを小さくできるか？

量子回路における補助キュービットレジスタの効果の検証

量子コンピュータ上の計算において、使えるメモリの量を増やすことで量子回路のサイズを小さくすることができるのか、という問題を研究しています。

量子アルゴリズム

量子計算と暗号解読

量子コンピュータが実現すれば、既存の暗号の安全性が揺らぎます。
そこで当研究室では次のようなことを調べています。

どのような暗号の信頼性がなくなるのか？
どのような暗号なら量子計算に耐性があるのか？

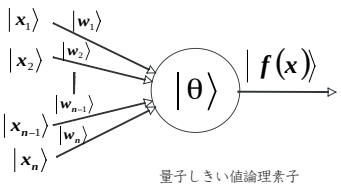
どの程度の速度で、どのように既存の暗号が破られるのか？

特に「衝突問題」と「最短ベクトル探索問題」に注目して研究を行っています。
(この研究は、太田・國廣研究室 との共同研究です)

さまざまな量子コンピュータ

現在、量子コンピュータの実現に向けて様々な方法が検討されています。
しかし、その実現方法によって計算の特徴が異なると考えられます。
そこで、それらの特徴を積極的に生かす方法を研究しています。

量子ニューラルネットワーク



量子しきい値論理素子

量子ニューラルネットワークは、ニューラルネットワークに量子計算の概念を導入したものです。基本の素子として「量子しきい値論理素子」を用います。これは既存のニューラルネットワークのしきい値論理素子の各入出力として0と1以外に、重ね合わせ状態を取ることができるような素子です。
これによってしきい値論理素子にはできない計算が行えます。たとえばNMR量子計算（後述）で実現すれば排他的論理和を一層で計算できます。

当研究室では、量子しきい値論理素子の計算能力、および量子ニューラルネットワークの構成方法に関して研究を行っています。

NMR量子コンピュータ

NMR（核磁気共鳴機）

NMR量子コンピュータは、「核磁気共鳴」を利用して動く量子コンピュータです。この方法は比較的近い未来に実現可能だと考えられています。

当研究室では、計算量理論の立場から
NMR量子コンピュータ上で動作するアルゴリズム
NMR量子コンピュータ上での Grover のアルゴリズムの計算量の評価
通常の量子計算よりも高速である可能性の検証
などについて研究を行っています。

電気通信大学
情報通信工学科　情報メディア工学講座
http://www.tnlab.ice.uec.ac.jp
西野研究室