

NMR 量子コンピュータのエラーキャンセリング高速初期化方法

電気電子システム学科 河村実生

Keywords : 量子コンピュータ、擬純粋状態、初期化、NMR

1. 研究概要

核スピンを量子ビット（キュビット）として用いる NMR 量子コンピュータでは、核スピンのエネルギーが極めて小さいため純粋状態を用意するのが困難である。そのため、通常は初期状態として擬純粋状態と呼ばれる状態が利用される。しかし、これまでの初期化方法では、キュビット数が増すにつれ必要となるゲート数が増大するためデコヒーレンスやゲートの不完全性によるエラーが増大し、高キュビット数のシステム上では擬純粋状態を準備することが困難である。本研究では、高速でしかもエラー訂正機能を持たせた初期化法を考案し、5 キュビットの NMR 量子コンピュータ上でその実証実験を行ったので報告する。

2. エラーキャンセリング高速初期化方法

本初期化法は、(1) 式で定義される密度行列の対角行列成分を変換する量子ゲート、CT (controlled-transfer) ゲートを用いて、漸近的に目的の擬純粋状態を実現する方法である。

$$\text{diag}(a, b, c, d) \Rightarrow \text{diag}\left(a, b, \frac{c+d+(c-d)\cos\theta}{2}, \frac{c+d-(c-d)\cos\theta}{2}\right) \quad (1)$$

デコヒーレンスなどによるエラーを無視した場合、コンピュータシミュレーションにより n キュビットシステムの初期化に必要な CT ゲート数が $O(n)$ で収束することを確認している。また、エラーキャンセリング機能は角度の異なる CT ゲートの組み合わせを、エラーをフィードバックさせながら最適化するとこにより実装される。下図に 2,3,4,6-tetrafluoroaniline 分子を用いた 5 キュビットの NMR 量子コンピュータ上での初期化実験結果を示す。量子状態トモグラフィーにより得られた熱平衡状態の密度行列の対角成分を図 1 に、また、初期化後の状態を図 2 に示す。図から理論的に予測された結果とよく一致していることが分かる。このときの CT ゲート数は 13 でシミュレーションによる許容誤差は 1.6% である。

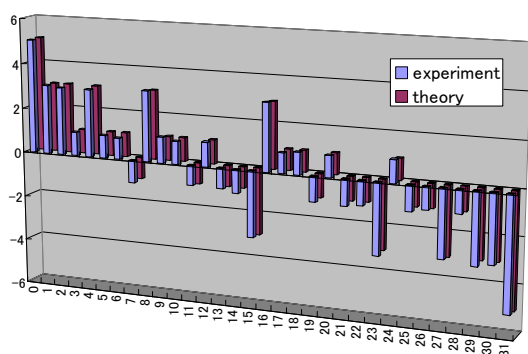


図 1 初期化前（熱平衡状態）

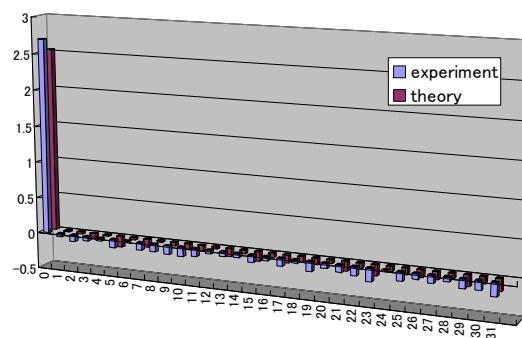


図 2 初期化後（擬純粋状態）

3. 応用の可能性

本手法を用いることにより数十キュビットを越える NMR 量子コンピュータの初期化が可能と考えられ、近年開発された電子スピンを媒介とした間接的な核スピンの信号検出技法を併用することにより巨大キュビット NMR 量子コンピュータの実現が可能と考えられる。