

論文審査の結果の要旨

氏名 新保 厚

本学位論文は、複数のユニタリ操作の同値性判定をどのように量子計算として構成するかについて書かれたものである。複数の量子状態を比較してそれらが同一の量子状態かどうかを判定するための量子計算については、従来から比較的多くの研究例があったが、本論文で扱っているのはそれを量子状態からユニタリ操作へと拡張したものになっている。とくに本論文においては、ユニタリ操作の同値性判定を実現する量子計算として様々な手続きを考察し、それぞれについてその最大成功確率を解析的・数値的に評価している。量子計算の手続きは、問題となっているユニタリ操作がその手続きの中で何度使用されているかや手続き内にどのように配置されているかなどのパラメータによって分類される。与えられたパラメータのもとでの最大成功確率は、線形計画法を一般化した半正値計画問題 (SDP) の形に定式化することができ、数値的にも多項式時間内に解を求めることが可能であるが、この論文では、いくつかの簡単な場合には解析的に最大成功確率を評価し、それが困難である場合には数値的に結果を導いている。

第1章から第3章は導入部であり、問題の背景や方法論の説明がなされている。本論文の中心的部分は第4, 5章で議論である。本論文全体を通じて想定されている問題設定は、二つのユニタリ操作（論文中では、 $R1$, $R2$ ）が与えられ、さらに、そのどちらかと等価であることは分かっているが、どちらであるかは分かっていない第3のユニタリ操作（論文中では、 T ）を1回だけ利用する量子計算によって、 T が $R1$, $R2$ のどちらと等価であるかを判定する、というものである。これに対応して、手続き中、 $R1$, $R2$, を使う回数を $N1$, $N2$ として、本論文では、任意の量子計算の手続きを $(N1, N2)$ によってインデックス付けして整理している。第6章は結論である。以下、第4, 5章の内容をより詳しく述べる。

第4章は、 $R1$, $R2$ を一回だけ使うクラスすなわち $(1, 1)$ 量子計算に関して論じている。まず、論文提出者は、このクラスの量子計算の最大成功確率が、 $R1$, $R2$ のどちらか一方だけを1回利用するだけで実現できることを解析的に示している。これにもとづいて、以下では、 $(1, 0)$ 量子計算について考察している。とくに、最大成功確率の配置依存性について調べ、 $R1$ と T の利用が並列であって、 T の利用に際して $R1$ を作用させた結果の情報を利用できない場合（並列配置）、および、より一般に、一方の作用結果の情報が他方の作用に際して利用可能な配置になっている場合（順序付き配置）を比較した結果、より制限が強い並列配置の場合でも順序付き配置とまったく同じ成功確率になることを示した。さらに、系の T が作用する部分と $R1$ が作用する部分の間に初期状態において量子エンタングルメントが存在しない場合には、最大成功確率の上限が下がることを見出している。

第5章では、(2,1)量子計算についての配置依存性を調べている。このとき R1,R2,T の配置としては、15通りの異なるものについて調べ、配置によって最大成功確率が確かに異なり、並列配置では、最大値には到達しないことを明らかにした。一方で、多くの異なる配置が同一の成功確率を与え、結果として、成功確率で分類すると、15通りの配置はわずか2つのクラスに分類されることが分かった。また、第5章では、(N,N)量子計算(N=2,3,4)について、SDPの数値解を求めることによって最大成功確率のN依存性や配置依存性を調べている。この論文中で想定されている条件設定においては、あるユニタリ操作を無限回利用可能であることと、そのユニタリ操作の古典表現の完全な情報を持っていることとは等価であるが、計算の結果は最大成功確率がNとともに増加し、N=4ですでに古典表現を利用した場合の成功確率と1パーセント以下の違いしかないことを示している。

以上のように、論文提出者は本論文において、これまで主な考察の対象だった量子状態の判別問題を拡張してユニタリ演算の識別問題を考察し、いくつかの興味深い知見を得た。とくに、比較対象となるユニタリ演算の利用可能回数が限定されている場合の考察を行い、量子計算のリソースが限られている場合と古典的に完全な情報が得られている場合の比較を行った。更に、同一のリソースが利用可能な場合にも、手続き中の配置に依存して識別成功確率が変わること、ただし、多くの異なる配置が同一の成功確率を与えること、などを見出した。これらの結果は、量子情報操作の理解に新しい方向性をもたらさうる成果である。また、共同研究の成果である部分についても新保氏の寄与は主要なものであると認められ、論文の内容と形式は東京大学大学院理学系研究科における博士論文に関する指針に則っている。

これらの理由により、博士（理学）の学位を授与できるものと認める。