

論文審査の要旨及び担当者

No.1

報告番号	甲 乙 第	号	氏 名	Naphan Benchasattabuse
論文審査担当者	主 査	政策・メディア研究科委員	環境情報学部教授	Rodney Van Meter
	副 査	政策・メディア研究科委員	環境情報学部教授	楠本 博之
		政策・メディア研究科委員	環境情報学部教授	川島 英之
		政策・メディア研究科	特任准教授	Michal Hajdušek
		メディアデザイン研究科	准教授	永山 翔太
学力確認担当者：				
Mr. Naphan Benchasattabuse's doctoral dissertation, titled “Resource Management in Heterogeneous Quantum Repeater Networks,” addresses a central and significant challenge in the advancement of quantum information science: the development of a scalable, unified architecture for a future Quantum Internet. The work addresses the issue of hardware heterogeneity, where the rapid but varied development of quantum technologies has led to different approaches that are not easily compatible. The primary objective of the dissertation is to investigate whether a cohesive network architecture can be designed to support these diverse technologies, particularly memory-based and all-photon quantum repeaters, and to establish the principles for managing resources within such a complex system. This research is important, as it aims to provide the foundational design necessary to move from isolated laboratory experiments to an interoperable, global-scale quantum network. Throughout his doctoral research, Mr. Benchasattabuse has demonstrated the qualities of a capable and mature researcher. His extensive list of first-author and co-author publications in respected journals and conferences showcases a strong grasp of the subject matter and an ability to lead research projects. He has consistently taken the initiative in conceiving projects, developing novel theoretical frameworks, and leading the writing of manuscripts. His work reflects a notable ability to connect abstract architectural principles with concrete protocol design, validated through simulation and analysis. His collaborations with prominent research groups further underscore his standing in the quantum networking community. The dissertation is structured logically to build a comprehensive argument for a unified quantum network architecture. Chapter 1 introduces the dissertation by outlining the primary motivations for the research. It establishes the context by discussing the engineering challenges in building a practical Quantum Internet, particularly the need for a unified architecture that can accommodate diverse and evolving hardware technologies. The chapter formally presents the three central research questions that the dissertation addresses and provides a clear overview of the subsequent chapters, serving as a roadmap for the reader. Chapters 2 and 3 establish the foundational knowledge required for the work. Chapter 2 provides a review of essential mathematical and quantum information concepts, including key tools used to describe quantum states and operations (the stabilizer and graph state formalisms). Chapter 3 presents a thorough overview of quantum networks, detailing their core tasks, the challenge of information loss over distance, and the various types of “quantum repeaters” designed to overcome it. These chapters provide the necessary background by defining the state of the art and the key problems the dissertation aims to solve.				

Chapter 4 details a comprehensive architecture for memory-based quantum repeater networks. This work builds upon the existing Quantum Recursive Network Architecture (QRNA), a method for organizing networks in layers to manage complexity. It formalizes these principles through a programmable, event-driven protocol based on “RuleSets,” which is also an existing concept. The chapter presents the Quantum Routing Software Architecture (QRSAs) as a modular software framework for this design. Another contribution presented here is the cross-validation of the architecture's implementation in the QuISP simulator against another leading simulator, which substantiates the credibility of the architectural model.

Chapter 5 presents this dissertation's primary novel contributions by extending the architecture to integrate memoryless, all-photonic repeaters. It introduces a new modular building block, the “half-Repeater Graph State” (half-RGS), which resolves engineering challenges related to timing synchronization and hardware requirements. It addresses a long-standing open problem by demonstrating how entanglement quality can be improved (a process known as purification) within all-photonic repeater schemes. This work provides a method for abstracting an all-photonic segment as a “virtual link,” enabling its integration into the broader network architecture.

Chapter 6 connects the proposed network architecture to the practical demands of its future applications by focusing on quantum optimization algorithms. The chapter first introduces a novel optimization algorithm that extends the principles of Grover's search by using a “subdivided phase oracle.” It is then shown that this algorithm can be understood as a specific instance of the more general Quantum Approximate Optimization Algorithm (QAOA). Motivated by this connection, the chapter's main contribution is a detailed analysis of the runtime requirements for QAOA. The work establishes theoretical limits on the minimum runtime (measured in “rounds”) for this class of algorithms to achieve a reliable solution. These findings provide crucial data for developing realistic network traffic models and informing resource management strategies.

Chapter 7 concludes the dissertation by summarizing the primary contributions of the work, revisiting the main research questions based on the presented results, and discussing the broader implications for the development of the Quantum Internet. It also outlines promising directions for future research and addresses remaining open challenges, providing a thoughtful perspective on the path forward for the field.

The development of a global Quantum Internet is recognized as a critical step for realizing the full potential of quantum information science, enabling applications from secure communication to distributed quantum computing and enhanced sensing. However, this vision cannot be achieved without a robust and scalable architecture capable of uniting diverse and rapidly evolving hardware technologies. Mr. Benchasattabuse’s dissertation makes a foundational contribution to this effort. By providing a practical and extensible framework for heterogeneous networks, this work helps pave the way for the transition from small-scale experiments to a truly global and interoperable quantum infrastructure.

In conclusion, the committee has thoroughly examined the arguments in this dissertation, and we affirm that Mr. Benchasattabuse has sufficient ability as an independent researcher to discover difficult-to-solve problems and to pursue them from multiple perspectives. Therefore, the committee recognizes that this doctoral dissertation meets our standards and agrees to issue the degree of Doctor of Philosophy to Naphan Benchasattabuse for this dissertation.

ベンジャサッタブット ナパン君の博士学位論文” Resource Management in Heterogeneous Quantum Repeater Networks” (異種混合量子中継ネットワークにおけるリソース管理) は、量子情報科学の進展における中心的かつ重要な課題、すなわち将来の量子インターネットのためのスケーラブルで統一されたアーキテクチャの開発に取り組むものである。本研究は、量子技術の急速かつ多様な発展により、互換性のない異なるアプローチが生じているハードウェアの異種性という問題に正面から向き合っている。本論文の主目的は、これらの多様な技術、特にメモリベースの量子中継器と全光型量子中継器をサポートできる統一的なネットワークアーキテクチャを設計することが可能か否かを調査し、そのような複雑なシステム内でリソースを管理するための原則を確立することにある。この研究は、孤立した実験室レベルの実験から、相互運用可能な地球規模の量子ネットワークへと移行するために必要な基礎設計を提供することを目指すものであり、重要である。

博士課程の研究を通じて、ベンジャサッタブット君は有能かつ成熟した研究者としての資質を示した。著名な学術雑誌や国際会議での筆頭著者および共著の論文リストは、主題に対する深い理解と研究プロジェクトを主導する能力を明確に示している。彼は一貫してプロジェクトの発案、新規の理論的フレームワークの開発、そして論文執筆を主導してきた。その研究は、抽象的なアーキテクチャの原則と具体的なプロトコルの設計を結びつける顕著な能力を反映しており、シミュレーションと分析によって検証されている。著名な研究グループとの共同研究は、量子ネットワーク分野における彼の評価をさらに高めている。

本論文は、統一された量子ネットワークアーキテクチャのための包括的な論証を構築するために、論理的に構成されている。

第1章では、本研究の主な動機を概説し、論文の導入部をなす。実用的な量子インターネットを構築する上での工学的課題、特に多様で進化するハードウェア技術に対応できる統一アーキテクチャの必要性について論じ、文脈を確立している。本章では、論文が取り組む3つの中心的な研究課題を正式に提示し、続く各章の明確な概要を示し、読者のためのロードマップとして機能する。

第2章および第3章では、本研究に必要な基礎知識を確立する。第2章では、量子状態と操作を記述するための主要なツール（スタビライザー形式およびグラフ状態形式）を含む、数学と量子情報の基本的な概念を概観する。第3章では、量子ネットワークの全体像を詳細に説明し、その主要なタスク、距離に伴う情報損失の課題、そしてそれを克服するために設計された様々な種類の「量子中継器」について詳述する。これらの章は、当該分野の現状と本論文が解決を目指す主要な問題を定義することにより、必要な背景を提供する。

第4章では、メモリベースの量子中継器ネットワークのための包括的なアーキテクチャを詳述する。この研究は、既存の量子再帰型ネットワークアーキテクチャ（QRNA）という、複雑性を管理するためにネットワークを階層的に構成する手法に基づいている。また、既存の概念である「ルールセット」に基づくプログラマブルなイベント駆動型プ

ロトコルを通じて、これらの原則を形式化している。本章では、この設計のためのモジュール式ソフトウェアフレームワークとして、量子ルーティングソフトウェアアーキテクチャ (QRSa) を提示する。ここで示された重要な貢献は、QuISP シミュレータにおけるアーキテクチャ実装の、別の主要なシミュレータに対する相互検証であり、アーキテクチャモデルの信頼性を裏付けている。

第 5 章では、本論文の主要な新規の貢献として、アーキテクチャを拡張し、メモリレスの全光型中継器を統合する。本章では、タイミング同期とハードウェア要件に関する工学的課題を解決する新しいモジュール式構成要素「half-Repeater Graph State」 (half-RGS) を導入する。さらに、全光型中継器方式内でエンタングルメントの品質を向上させる (純化として知られるプロセス) 方法を実証することにより、長年の未解決問題に取り組んでいる。この研究は、全光型セグメントを「仮想リンク」として抽象化する手法を提供し、より広範なネットワークアーキテクチャへの統合を可能にする。

第 6 章では、提案されたネットワークアーキテクチャを、量子最適化アルゴリズムに焦点を当てることで、将来のアプリケーションからの実際的な要求と結びつける。本章ではまず、グローバールの探索の原理を「分割位相オラクル」を用いて拡張した新しい最適化アルゴリズムを紹介する。次に、このアルゴリズムがより一般的な量子近似最適化アルゴリズム (QAOA) の特定の一例として理解できることを示す。この関連性に動機付けられ、本章の主な貢献は QAOA の実行時間要件に関する詳細な分析である。この研究は、この種のアルゴリズムが信頼性の高い解を達成するために必要な最小実行時間 (「ラウンド」数で測定) に関する理論的限界を確立する。これらの知見は、現実的なネットワークトラフィックモデルを開発し、リソース管理戦略を策定するための重要なデータを提供する。

第 7 章では、本研究の主要な貢献を要約し、提示された結果に基づいて主要な研究課題を再検討し、量子インターネットの発展に対する広範な意義を議論することで、論文を締めくくる。また、将来の研究に向けた有望な方向性を示し、残された未解決の課題に取り組むことで、この分野の今後の進路について思慮深い展望を提供する。

グローバルな量子インターネットの発展は、安全な通信から分散量子コンピューティング、高度なセンシングに至るまで、量子情報科学の潜在能力を最大限に引き出すための重要な一歩として認識されている。しかし、このビジョンは、多様で急速に進化するハードウェア技術を統合できる、堅牢でスケーラブルなアーキテクチャなしには達成できない。ベンジャサッタブット君の博士論文は、この取り組みに対して基礎的な貢献をなすものである。異種ネットワークのための実用的で拡張可能なフレームワークを提供することにより、本研究は小規模な実験から真にグローバルで相互運用可能な量子インフラへの移行の道を開くのに役立つ。

以上のことから、請求者は今後、独立した研究者として、解決困難な問題を発見し、これを多角的に遂行する能力が十分にあると言える。したがって、本学位請求論文は、博士 (学術) の学位水準を満たすものと認められる。