

EntanglePlan：量子ネットワーク向け戦略的エンタングルメント 精製ツール開発

—量子もつれ品質制御基盤—

1. 背景

量子ネットワークは、離れた場所にある量子コンピュータや量子センサを光ファイバーなどで接続し、量子もつれを共有することで計算や通信を可能にする技術である。将来的には、安全な通信基盤や分散量子計算を実現する基盤として期待されている。

量子ネットワークにおいて、量子ノード間で量子もつれを共有することが不可欠である。しかし、実際の物理環境では、光ファイバーの損失や環境ノイズ、量子メモリの劣化などの影響により、生成されるもつれの品質は時間とともに変動する。

品質の低いもつれを計算などにそのまま利用すると、計算や通信の信頼性が低下してしまう問題がある。そのため、複数の低品質なもつれからより高品質なもつれを作り出す蒸留（Distillation）という操作が用いられる。

しかし蒸留は確率的に成功する操作であり、繰り返すほど量子もつれのリソースを消費する。また、ノイズが時間変動する環境では、固定された蒸留設計では、最適な資源配分そして高品質なもつれの安定的な供給が困難である。

そして、古典ネットワークでは回線品質をリアルタイム監視する仕組みが存在するが、量子ネットワークにおいて同様な監視層は確立されていない。そのため、各時間における量子もつれの状態より、その状態に適応した蒸留戦略を決定し、安定的に高品質な量子もつれを量子ネットワーク内で運用することができない。

このように、量子ネットワークでは、今ネットワーク内にある量子もつれの品質を推定、それに応じて蒸留戦略を決定する仕組みが必要であるが、そのような量子もつれの運用制御を担うソフトウェア基盤は十分に整備されていなかった。

2. 目的

本プロジェクトの目的は、量子ネットワークにおいて時間的に変動する量子もつれの品質をリアルタイムで推定し、その推定結果に基づいて、蒸留戦略を動的に決定できるソフトウェア基盤を構築することである。

本基盤により、時間変化する量子もつれの品質を継続的に監視しながら、高品質な量子もつれを安定的に供給する運用をシミュレーション環境上で再現できるようになる。これにより、最適なもつれ状態推定方式及び蒸留戦略の探索が可能になる。

将来的には、本成果は量子ネットワークにおける量子もつれの品質管理を担うソフトウェア層として活用されることを目指している。

3. ソフトウェア開発内容

本プロジェクトでは、量子ネットワークでの蒸留による量子もつれの運用を再現する基盤である EntanglePlan を開発した。

本ソフトウェアは、量子回路シミュレータ Stim を用いて蒸留回路を実行する。Stim は大規模な量子回路の高速シミュレーションが可能なツールであり、ベル対生成、ノイズ付与、蒸留回路実行、測定結果抽出を Stim 上で実装した。得られた測定結果は、Distimation 層へ入力され、量子もつれの状態推定に用いられる。

本システムは三層構造で構成されている。Runner 層で量子もつれ生成と蒸留を実行し、Distimation 層で状態推定を行い、その結果を Planner 層が受け取り次の蒸留戦略を決定する。これらをループとして統合することで、時間変動ノイズ環境下での動的運用シミュレーションを可能にした(図1)。

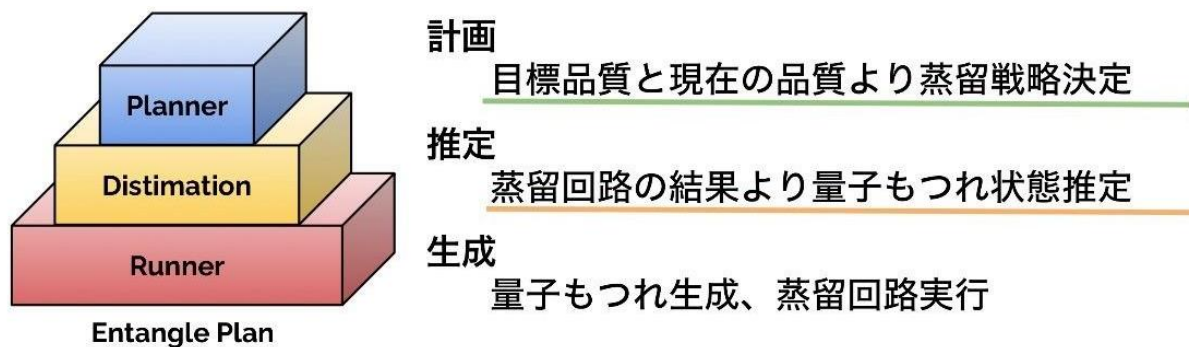


図1：EntanglePlan の三層ループ構造。精製・推定・計画を統合し、時間変動ノイズ下での動的運用を実現する。

本ソフトウェアでは、ユーザーは以下のパラメータを入力できる。

基本設定として、

- ノイズモデル
- 各時間ステップでのベル対生成レート
- 目標フィデリティ

を指定可能である。

さらに、量子もつれ品質推定方式及び蒸留戦略は差し替え可能な設計とした。これより、新しい推定手法や蒸留方式を追加し、条件ごとの性能比較が可能になる拡張性の高い基盤を構築した。

出力としては、

- 各時間における最終フィデリティ
- 使用可能なベル対数

- 消費ベル対数
- フィデリティの時間推移

などが得られる。

出力結果の一例として、固定回数蒸留方式と本システムによるアダプティブ蒸留方式を比較した結果を図2に示す。

時間変化ノイズ環境下において、固定回数方式ではもつれの品質が目標値を下回る区間や、過剰蒸留によるもつれ消費の増大が観察された。一方、アダプティブ方式では、推定されたフィデリティに基づき蒸留回数を動的に調整することで、目標フィデリティを安定的に維持することが確認された。

この結果は、リアルタイム状態推定と戦略更新を統合した本基盤の有効性を示している。

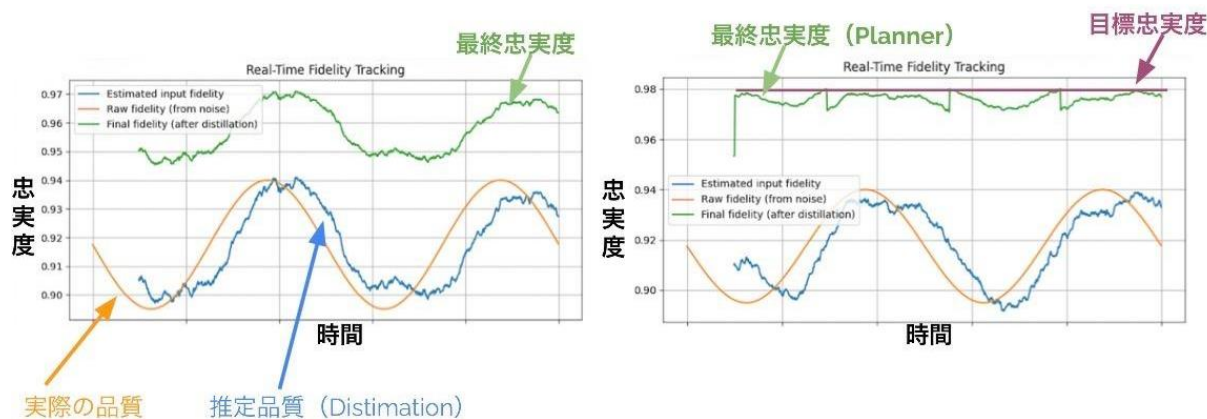


図2：各時間に変動する品質のもつれ対（オレンジ線）を作成し、蒸留回路より品質が上昇したもつれ対（緑線）際の時間推移グラフ。左側のグラフが固定戦略の際、右側のグラフが Distimation と Runner を組み合わせた際の結果を表示している。

4. 新規性・優位性

本プロジェクトの新規性は、蒸留プロトコルそのものの改良ではなく、蒸留を運用制御対象と定義し、推定・計画を統合したソフトウェア基盤を構築した点にある。

従来の蒸留研究は、特定のノイズモデルを仮定した理論解析や、固定回数蒸留の性能評価が中心であった。また、量子状態推定に関しては量子トモグラフィなどの手法が知られているが、それらは主に実験評価や事後解析を目的とするものであり、ネットワーク運用中に蒸留戦略を更新する制御層統合されるようなものではなかった。

本ソフトウェアは以下の点で新規性を有する。

- 蒸留と状態推定の時間変動ノイズ環境への対応

蒸留回路の測定結果を用いてベル対角状態を推定するプロトコルは、理論的な提案であり、同一品質の量子もつれを用いた方法の提案が行われていた。本ソフトウェアでは、スライディングウィンドウなどといった工夫を行うことによって、ノイズが時間とともに変化する環境においても、もつれの最新状態に追従可能なリアルタイム監視を実現した。

- 蒸留方式の比較基盤

Pumping 方式および Tree 方式を同一フレームワーク内で扱い、成功確率や消費ペア数を含む指標で比較可能にした。これにより、特定の方法に依存しない拡張可能な設計基盤を構築した。

- 制御層としての抽象化

本成果は、物理プロトコル実装そのものではなく、量子ネットワークの下位レイヤに位置する、もつれ品質制御を構築した点に意義がある。古典ネットワークにおいて回線品質監視や動的ルーティングが存在するように、量子ネットワークにおけるもつれ品質制御層の原型を提示した。

5. 期待されるユーザー価値と社会へのインパクト

本ソフトウェアの主な利用者として、以下を想定している。

- 量子ネットワーク実験者

量子中継実験やテストベッドの環境では、生成されるもつれの品質は時間的に変動する。本基盤を用いることで、測定データに基づくリアルタイム品質推定、目標フィデリティを満たすための蒸留回路数自動決定、蒸留成功とリソース消費量の可視化が可能になる。

- 量子ネットワーク設計者・アーキテクト

将来の量子インターネットでは、複数リンク・複数ノードを含む大規模ネットワークが想定できる。量子ネットワーク上で走るアプリケーションにより、必要となる量子もつれの条件は変化する。そのため、本基盤を用いて、蒸留方式の比較、ノイズ条件ごとの性能評価、目標品質から逆算した戦略設計を行うことによって、もつれの品質と消費リソース量の鑑定を定量的に比較することが可能になる。これより、将来の量子ネットワーク設計における重要な判断材料になる。

量子ネットワークは、量子鍵配送、分散量子計算、量子センシングなどの基盤技術として期待されている。本成果は、蒸留を物理プロトコルの設計問題から、リアルタイム品質管理問題へ拡張した。これより、将来的には、量子ネットワーク運用

2025年度未踏ターゲット事業(量子コンピューティング技術を活用したソフトウェア開発分野)

ソフトウェア層の標準化、ネットワーク品質監視技術の確立、実験系とシミュレーションの橋渡しといった技術分野の発展に寄与すると考える。

本プロジェクトは、量子ネットワークにおけるもつれ品質制御層の原型を提示し、将来実機ネットワークへ組み込み可能な基盤を構築したものである。

6. 氏名（所属）

横森 光（慶応義塾大学政策メディア研究科）

小山 真里衣（慶応義塾大学環境情報学部）