

量子ネットワークにおける Double Auction を用いた EPR の最適割当

朴 柱仁[†] 上山 憲昭^{††}

[†] 立命館大学大学院 情報理工研究科 〒567-8570 大阪府茨木市岩倉町 2-150

^{††} 立命館大学 情報理工学部 〒567-8570 大阪府茨木市岩倉町 2-150

E-mail: †is0594sv@ed.ritsumei.ac.jp, ††kamiaki@fc.ritsumei.ac.jp

あらまし 量子ネットワークにおいて、エンタングルメント（EPR ペア）の効率的な割当は、通信の信頼性と効率性を左右する重要な要素である。EPR ペアは、量子ビットのエンタングルメントを利用して、遠隔地間での量子情報の共有を可能にする。しかし、EPR ペアの生成と維持にはコストがかかるため、限られたリソースをどのように最適に割り当てるかが課題となる。既存の研究は一つのシステム内での EPR 事業者が割当を行う場合に焦点を当てている。しかし現在の ISP のように、将来は複数の EPR 事業者が市場に参加することが予想されるため、複数の EPR 事業者が提供する EPR を効率的にユーザに割り当てる方式が求められる。本稿では、Double Auction（ダブルオークション）を用いた EPR ペアの最適割当手法を提案する。ダブルオークションは、買い手と売り手が同時に入札を行い、最適な価格と取引量を決定する市場メカニズムである。Double Auction を利用することで、EPR ペアの割当が公平に行われ、特定のノードに偏らない EPR ペアの分配が実現し、需要と供給に基づいた効率的な割当と動的な運用が可能になる。そこで本稿では、量子ネットワークにおける複数の EPR 事業者を想定した EPR ペアの割当問題に Double Auction を適用することを提案する。そして計算機シミュレーションにより、その有効性を確認する。

キーワード 量子ネットワーク, EPR 資源, ダブルオークション

Optimizing EPR Allocation Using Double Auction in Quantum Networks

Jooinh PARK[†] and Noriaki KAMIYAMA^{††}

[†] Graduate School of Information Science and Engineering, Ritsumeikan University

2-150, Iwakura, Ibaraki, Osaka 567-8570

^{††} College of Information Science and Engineering, Ritsumeikan University

2-150, Iwakura, Ibaraki, Osaka 567-8570

E-mail: †is0594sv@ed.ritsumei.ac.jp, ††kamiaki@fc.ritsumei.ac.jp

Abstract In quantum networks, the efficient allocation of entanglement (EPR pairs) is a crucial factor that affects the reliability and efficiency of communication. EPR pairs enable the sharing of quantum information between remote locations by utilizing the entanglement of qubits. However, generating and maintaining EPR pairs incurs costs, making it a challenge to optimally allocate limited resources. Existing research focuses on scenarios where a single EPR provider allocates resources within one system. However, in the near future, multiple EPR providers are expected to act as the current ISPs of quantum networks. This change in environment will cause existing methods of EPR allocation to become uneven or biased. This study proposes an optimal allocation method for EPR pairs using Double Auction. Double Auction is a market mechanism where buyers and sellers simultaneously place bids, determining the optimal price and transaction volume. By utilizing the market mechanism of Double Auction, the allocation of EPR pairs can be conducted fairly, achieving a distribution that does not bias towards specific nodes, and enabling efficient allocation and dynamic operation based on supply and demand. This paper applies and evaluates the Double Auction method to the problem of EPR pair allocation in quantum networks.

Key words Quantum network, EPR resource, Double auction

1. はじめに

近年、0-1 のビットはなく、0 と 1 の多数の状態を重ね合わせた量子ビットを用いて、特定の問題に対して、従来の計算機と比較して飛躍的に計算に要する時間を短縮する量子コンピュー

タが精力的に研究されている。しかし現在、実現可能な量子コンピュータが扱える量子ビットは少なく、大規模な演算を行うためには、複数の量子コンピュータを量子ネットワークを用いて繋ぎ、協調して動作させる必要がある。そのため、量子ビットを伝搬する量子ネットワークの研究が始まっている。

現在の量子ネットワークは主に都市間量子鍵配送（QKD）ネットワークや、限られたノード間でのエンタングルメント共有を実現するプロトタイプとして運用されている。既存の技術には、光ファイバを用いた QKD、人工衛星を活用した長距離量子通信、量子中継ノードを用いたエンタングルメントの拡張が含まれる。これらの技術の発展は、EPR ペアを効率的に生成・配分するネットワークの構築に不可欠である。

量子ネットワークにおいて、エンタングルメント（EPR ペア）の効率的な割当は、通信の信頼性と効率性を左右する重要な要素である。EPR ペアは、量子ビットのエンタングルメントを利用して、遠隔地間での量子情報の共有を可能にする。しかし、EPR ペアの生成と維持にはコストがかかるため、限られたリソースをどのように最適に割り当てるかが課題となる。既存の研究は一つのシステム内での EPR 事業者が割当を行う場合に焦点を当てている。しかし、現在の ISP のように複数の EPR 事業者が想定される状況では特定ノードへの偏りが生じる恐れがある。未来の量子インターネットでは、EPR ペアの供給を専門とする EPR 事業者（EPR Providers）が登場すると考えられる。これらの事業者は、エンタングルメントの生成・配分・保持を担い、量子ネットワーク利用者に対して量子リソースを提供する。この役割は、現在のインターネットにおける ISP と類似しており、それらを想定したシステムと量子ハードウェアの導入についての研究も盛んに行われている [1]。しかし、[2] から量子ネットワークの資源割当において既存のアルゴリズムでは割当数の最大化に集中し、割当の偏りが生じることがわかる。よって、今後の量子ネットワーク環境において大規模な EPR の割当を効率的かつ公正に分配するためのメカニズム提案する。

本稿では、Double Auction（ダブルオークション）を用いた EPR ペアの最適割当手法を提案する。ダブルオークションは、買い手と売り手が同時に入札を行い、最適な価格と取引量を決定する市場メカニズムである。Double Auction の市場メカニズムを利用することで、EPR ペアの割当が公平に行われ、特定のノードに偏らない分配が実現し、需要と供給に基づいた効率的な割当と動的な運用が可能になる。以下 2 節で量子ネットワークの要素技術について簡単に述べ、3 節でダブルオークションについて簡単に述べる。そして 4 節で提案方式について述べ、5 節で数値評価結果について述べ、最後に 6 節で全体をまとめる。

2. 量子ネットワーク

2.1 量子テレポーテーション

量子テレポーテーションは、量子情報のある場所から別の場所へ転送する技術である。これは、エンタングルメントと古典的通信を組み合わせることで実現される。量子テレポーテーションにより、量子ビットの状態を直接転送することなく、遠隔地にその情報を伝えることが可能となる。量子ネットワークではデータを量子の状態として送信することで通信を行う。

2.2 EPR ペア

EPR ペアとはエンタングルメント（量子もつれ）関係にある 2 つの粒子のことを示す。EPR ペアは量子テレポーテーショ

ンを行うごとに消費される資源であり、量子ネットワークの性能向上のためには EPR ペアの生成レートと割当効率を上げる研究が盛んに行われている。

2.3 EPR 事業者

量子ネットワークにおいてエンタングルメントリソース（EPR ペア）を提供する役割を担う主体はシステムごとに存在する。本稿では複数の異なるシステムに渡り EPR を配給する事業者を EPR 事業者と呼称する。これらの事業者は、EPR ペアの生成、維持、配布を行い、ネットワーク内のノード間での量子通信を支援する。EPR 事業者の効率的な運用は、量子ネットワーク全体の性能に大きな影響を与える。

2.4 Fidelity(忠実度)

Fidelity（忠実度）は、量子状態の再現性を評価する指標である。具体的には、転送された量子状態が元の状態とどれだけ一致しているかを示す。忠実度が高いほど、量子通信の信頼性が高いことを意味する。量子ネットワークにおいて、忠実度は通信品質の重要な指標となる。

3. Double Auction

効率的な売買を実現する手段としてオークションが広く用いられている。オークションを用いることで、購買対象を最も高く評価する購入希望者に、その財がわたることになるため、社会全体の効率性が向上する。そのため MEC（Mobile Edge Computing）[3] [7] やクラウドコンピューティング [6] でオークション法を用いることで資源の割当を行う研究も多い。

Double Auction は、買い手（Buyer）と売り手（Seller）がオークショニア（Auctioneer）を通じて取引を行う市場メカニズムである。以下にその仕組みを説明する。まず、Buyer と Seller はそれぞれの条件（入札価格や希望価格）を提示し、Auctioneer に登録する。Auctioneer はこれらの情報を収集し、認識された情報を Seller と Buyer に伝達する。次に、Auctioneer は入札情報を基にオークション工程を進め、最適な価格と取引量を決定する。この工程の終わりがそれぞれの参加者に通達され、取引を行う Buyer と Seller が選ばれる。

選ばれた Seller は、選ばれた Buyer に対して EPR ペアを提供する。最後に、仲介者である Auctioneer が Buyer から支払いを受け取り、その支払いを Seller に伝達する。このようにして、Double Auction は公平かつ効率的な取引を実現し、EPR ペアの最適な割当を可能にする。

3.1 VCG Pricing Mechanism

VCG（Vickrey-Clarke-Groves）メカニズムは、社会的厚生を最大化するためのオークションメカニズムであり、効率的な資源配分を達成するために用いられる。参加者は自身の真の評価額を申告するインセンティブを持つ（真実告知が支配戦略）。参加者が各自の評価額（valuation）を申告し、それに基づいて社会的厚生（総効用）が最大となるような配分を決定する。また、各参加者の支払い額は、他の参加者のみが存在すると仮定した場合の社会的厚生と、自身が存在する場合の社会的厚生との差として計算される。これは「外部性の内部化」に相当し、各参加者が他者に与えた影響に基づいて支払う形になる。VCG メカニズムはドミナント・ストラテジ（支配戦略）として真実

告知を誘導する特徴を持つため、戦略的な申告が不要となる。

表 1 に、VCG と各種オークションメカニズムを比較する。VCG メカニズムは「効率性」「真実告知のインセンティブ」「公平性」の観点で最も優れた特性を持つことが分かる。しかし、その計算コストの高さが課題となるため、実際の適用に際しては、計算リソースや実装の複雑さを考慮する必要がある。一方、第一価格オークションや GSP は計算コストは低い、効率性や公平性の面で VCG に劣るため、用途に応じた使い分けが求められる。本稿では最大限公正な分配と透明性を確保するため VCG を用いて価格を決定する。

4. 提案システム

本稿では図 1 のように複数のシステムに渡り、複数の EPR 事業者と、EPR を求める複数のユーザが複数存在する状況を想定し、TCDA (Truthful Combinatorial Double Auction) を使ったシステムを提案する。EPR 事業者とユーザは Auctioneer に当たるプラットフォームに情報を登録する。プラットフォームが Auction を開始してから全ての参加者がそれぞれ上限額か下限額を提示する。プラットフォームは Auction が終了を周知し、Winner Determination を通じて取引を行う EPR 事業者とユーザを決める。EPR 事業者は EPR ペアを提供し、ユーザはそれに合った支払いを行う。

4.1 Winner Determination

Winner Determination プロセスでは、まずオークションアが EPR 事業者とユーザノードの両方にオークションの終了状態を知らせるアラームを送信する。その後、入札と要求に基づいて「勝者」となるユーザノードと EPR 事業者が決定される。勝者が特定されると、EPR 事業者は対応するユーザノードにコンピューティングリソースを供給する。最後に、オークションアは勝者となったユーザノードから支払いを受け取り、対応する EPR 事業者に報酬を送る。この一連のプロセスにより、TCDA メカニズム内でのコンピューティングリソースの公平かつ効率的な割り当てが保証される。

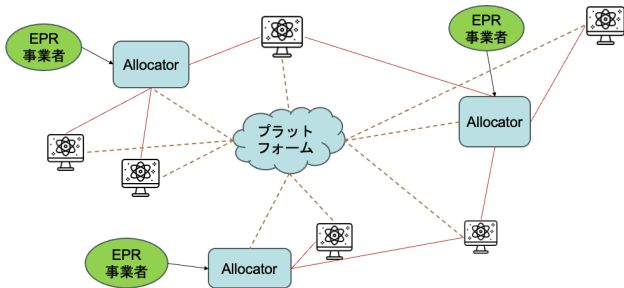


図 1 提案する Double auction を用いた EPR 資源割当のプレイヤー間の関係

4.2 提案オークションの処理フロー

図 2 に提案オークションシステムの処理フローを示す。実際の量子ネットワーク環境に近いシミュレーションを行うために、Netsquid [5] を用いて地理的距離に基づいた Fidelity を算出し、Fidelity を Auction においてのコストとし、TCDA で割当を行う。

EPR の価値は需要、供給、そして Fidelity によって決定する。Fidelity は様々な要因で決定されるが、EPR のノード間の距離によって減少していく傾向にあるため、ノード間の距離と反比例していくと想定する。

プラットフォームがユーザから支払いを受け、EPR 事業者から提供された EPR をユーザに渡す。Allocation アルゴリズムでは線形計画法に基づくパディング手法を用いて、透明性と均一性を確保しながら、資源配分プロセスの最適化を効率的に行う。この手法は、多項式時間で計算可能な準最適な資源配分を実現することを目的とする。供給・需要のマッチングでのパディングメカニズムは、パディングユーザが要求する計算資源の量が、そのユーザに供給可能な EPR 事業者の最大計算資源量以上となるように制約を設ける。このマッチングプロセスは、効率的な資源配分を達成する上で重要な役割を果たす。

予算均衡を保証するために、各成功したユーザの単位入札価格を、そのユーザと取引可能な EPR 事業者の最大要求価格以上に設定する。このアプローチにより、すべての取引が非負の剰余を形成することが保証される。多項式時間計算量で供給・需要のマッチング、価格計算、および資源配分を実行するため、計算効率が高い。標準的な線形計画ソルバや摂動手法の活用が、TCDA の計算効率の向上に寄与する。

5. 数値評価

5.1 評価方法

提案手法を評価するため一般的に使われる他のアルゴリズムと比較する。

FIFO (First Come First Out) は各 Buyer が全ての Seller に対して価格条件に合うか検索し、最初に該当するノード同士取引を行うシステムである。最も計算コストが低いが、取引数が他より多くなる特徴がある。

Random は Buyer に対し存在する条件の合う Sellerの中からランダムで選択し、ゲーム理論はその候補間でのそれまでの割当状況を考慮して取引候補を選択する。

割当の偏りと EPR の割当数の二つを評価対象とする。EPR の割当結果の効率性を評価するためには Buyer 全体の利得、Seller 全体の利得、そしてプラットフォーム全体の利得をそれぞれ計算して利得が最大になるか評価する。

真の評価額とは、オークションの参加者が入札または売却の過程で正確に報告する実際の価値やコストを指す。これにより、各参加者がオークションの結果を操作するために虚偽の情報を提供することなく、自分の本当の評価を開示することが保証される。本稿の文脈では、真の評価額は、ダブルオークションメカニズムにおける真実性、個別合理性、および予算均衡といった経済的特性を維持するために不可欠である。

ユーザ (Buyer) i の利得 U_i^b は、EPR の評価値 v_i から支払額 p_i^b を引いた値である。EPR 事業者 (Seller) j の利得 U_j^s は、ユーザから受け取った Reward r_j^s から EPR の提供コスト c_j を引いた値である。プラットフォーム (Auctioneer) の利得 U^p はユーザ全体の合計支払額と EPR 事業者全体の Reward の差になる。また x_i を、オークションによってユーザ i に EPR 資源が割り当てられた場合に 1 を、割り当てられなかった場合い

メカニズム	効率性	信頼性 (Truthfulness)	計算コスト	公平性 ■
VCG メカニズム	高	あり (支配戦略)	高	高い (真実告知が最適であり、公平な割当が可能)
第一価格オークション	低	なし (戦略的入札が必要)	低	低い (資金力のある参加者が有利)
第二価格オークション (Vickrey Auction)	高	あり	低	高い (入札者全員に同じルールが適用)
GSP (Generalized Second Price)	中	部分的にあり	中	中程度 (入札額による割当だが、厳密には VCG ほど公平ではない)
市場均衡ベースのメカニズム	高	ケースによる	高	高い (最適な市場均衡を達成できる場合)

表 1 VCG と他のオークション方式の比較

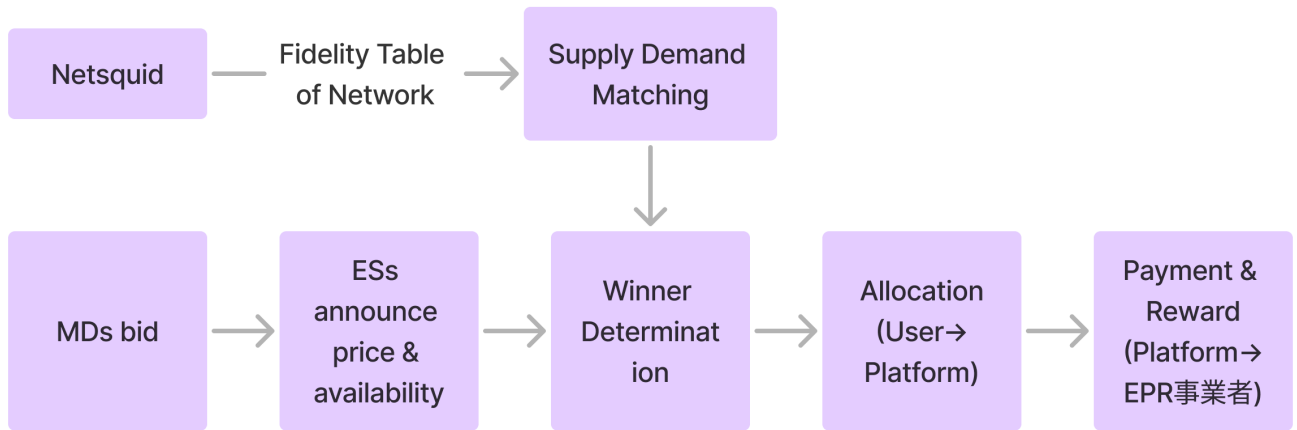


図 2 提案オークションシステムの処理フロー

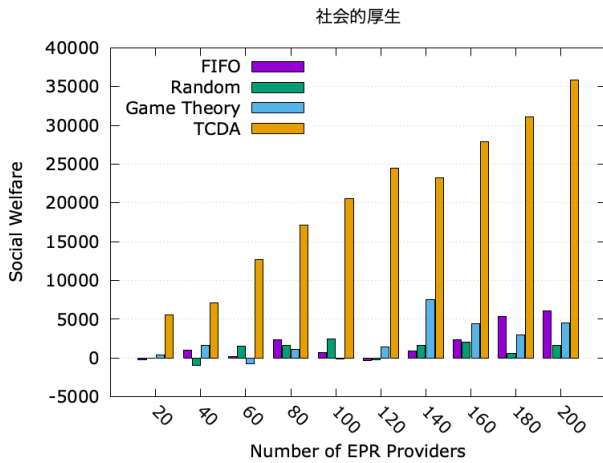


図 3 社会的厚生の比較

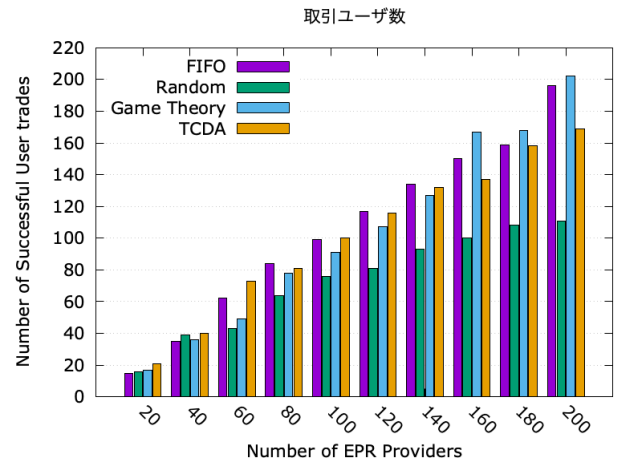


図 4 取引ユーザ数の比較

に 0 をとる 2 値変数とする。さらに y_j を、EPR 事業者 j の提供 EPR がユーザに割り当てられたときに 1 を、割り当てられなかったときに 0 をとる 2 値変数とする。このとき、 U_i^b , U_i^s , U^p は次式で得られる。

$$U_i^b = x_i v_i - p_i^b \quad (1)$$

$$U_i^s = r_j^s - y_j c_j \quad (2)$$

$$U^p = \sum_{i \in I} p_i^b - \sum_{j \in J} r_j^s \quad (3)$$

5.2 評価結果

図 3 に、各方式の社会的厚生を、図 4 に、各方式の EPR 割当ユーザ数を、各々、EPR 事業者数に対してプロットする。提案方式を用いることで、社会的厚生が大きく増加する。また提案手法を用いた場合の取引数は高いもののゲーム理論や FIFO 配分と比較して低いことがわかる。また、提案手法ではユーザと EPR 事業者の利得がマイナス値になることを防ぐことができる。それにより、それぞれのユーザと EPR 事業者の合理的な取引を促し、全体的公正さを担保することができる。これは特定の価格決定条件を満たす場合に予算均衡を保証するメ

カニズムと真実告知型の入札・売却戦略を通じて、個別合理性 (Individual Rationality) および予算均衡 (Budget Balance) が確保される性質による生じる差である。

6. ま と め

本稿では、量子ネットワークの普及による変わる環境での EPR 配分を効率化し、公正な取引を行うオークションシステムを提案し、評価した。オークション法を用いることで市場原理から合理的な配分を行うと同時に、既存の配分方式と比較して、プラットフォーム全体の利得を確保できることを確認した。

謝辞 本研究成果は JSPS 科研費 23K21664, 23K21665, 23K28078 の助成を受けたものである。ここに記して謝意を表す。

文 献

- [1] Z. Yang and C. Cui, "Reconfigurable Quantum Internet Service Provider," ICC 2023 - IEEE International Conference on Communications, Rome, Italy, 2023, pp. 3497-3503, doi: 10.1109/ICC45041.2023.10279003.
- [2] Li, C., Li, T., Liu, YX. et al. Effective routing design for remote entanglement generation on quantum networks. npj Quantum Inf 7, 10 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41534-020-00344-4>
- [3] L. Ma, X. Wang, X. Wang, L. Wang, Y. Shi and M. Huang, "TCDA: Truthful Combinatorial Double Auctions for Mobile Edge Computing in Industrial Internet of Things," in IEEE Transactions on Mobile Computing, vol. 21, no. 11, pp. 4125-4138, 1 Nov. 2022, doi: 10.1109/TMC.2021.3064314.
- [4] L. Chu, "Truthful bundle/multiunit double auctions," Manage. Sci., vol. 55, no. 7, pp. 1184-1198, Jul. 2009
- [5] Coopmans, T., Knegjens, R., Dahlberg, A. et al. NetSquid, a NETwork Simulator for QUantum Information using Discrete events. Commun Phys 4, 164 (2021). <https://doi.org/10.1038/s42005-021-00647-8>
- [6] Parnia Samimi, Youness Teimouri, Muriati Mukhtar, A combinatorial double auction resource allocation model in cloud computing, Information Sciences, Volume 357, 2016, Pages 201-216, ISSN 0020-0255, <https://doi.org/10.1016/j.ins.2014.02.008>.
- [7] T. Bahreini, H. Badri and D. Grosu, "An Envy-Free Auction Mechanism for Resource Allocation in Edge Computing Systems," 2018 IEEE/ACM Symposium on Edge Computing (SEC), Seattle, WA, USA, 2018, pp. 313-322, doi: 10.1109/SEC.2018.00030.