

令和元年6月3日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K13714

研究課題名（和文）音波を利用した量子アルゴリズム計算機の実現

研究課題名（英文）Implementing quantum algorithms with sound waves

研究代表者

深津 晋（Fukatsu, Susumu）

東京大学・大学院総合文化研究科・教授

研究者番号：60199164

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,900,000円

研究成果の概要（和文）：量子計算専用のアルゴリズムには3種類が知られている。ところがこれらの実装に実は「量子性」が必要ないことは意外に知られていない。必要なのは「古典的な波」の性質である。本研究はこの点に注目し、波の代表である音波を用いて量子計算や高速検索のための基盤形成を目指した。テレビやラジオで馴染みのある周波数の縦割り方式を利用することで前例のない「音で量子コンピューティング」の実現を試み、情報処理や物理計測などへの応用展開を模索した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

量子計算には2種類の論理素子があればよい。本研究では音で働く論理素子を目指した。周波数の上下機能、音波の分割・統合・遅延、周波数を選んで透過・阻止する機能をもつ部品を設計・製作し、特性を評価した。複雑な造形は3次元プリンタを駆使した。計算単位のビットは周波数で意味づけられた波の重ね合わせと音のうなりを使って生成・操作した。その結果、より難度の高いゲートの動作を実装レベルで検証できた。しかし、計算に耐える性能には改善の余地が残った。この向上を前提とすれば検索アルゴリズム実装と「音で量子コンピューティング」は手の届く範囲にある。一方で秘匿性の情報伝送、光関連の応用展開に関する成果が得られた。

研究成果の概要（英文）：There are only three “quantum” algorithms known to date. Ironically, they are not “quantum” even as only “classical wave nature” is needed at most when to implement them, which has been overlooked so far. With this in mind, the project aims at establishing the basis for would-be quantum computing and massive data search by using sound, i.e., representative of classical waves. Frequency division, we know of as TV and radio channels, allows us to attempt the first ever “Sound meets quantum computing.” Ghost imaging with sound and photon heterodyning are some of those which have evolved from this study in search of a viable sound protocol for diverse applications.

研究分野：応用量子物理学

キーワード：音波 量子コンピューティング 量子アルゴリズム実装 周波数自由度 音響量子論理ゲート ビッグデータ高速検索 音響ゴーストイメージング 単一光子ヘテロダイン

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

量子計算にはいくつかの異なるモードが存在するが、万量子論ゲートの組み合わせからなるいわゆるゲート型コンピューティングがその最有力候補とされてきた。実際、光、電子スピン、核スピンなど様々な物理系をプラットフォームとする量子論ゲートの開発や実用に耐える量子ビット数の確保に向けて熾烈な研究開発競争が現在、世界中で繰り広げられている。これとは原理をやや異なるものの量子計算機を冠した製品が市場に登場してきたことは記憶に新しい。

そもそも量子計算機とは、ブール代数にもとづく古典コンピュータをあらゆる点で凌駕する万能計算機ではないことには注意が必要である。実際、因数分解、二者択一問題、データ探索などごく限られた種類の問題に対してのみ量子計算の優位性が証明されている。

これらの問題を解くために必要なプロトコルすなわち量子アルゴリズムを実装する上では、等しく状態ベクトルの重ね合わせが量子計算の優位性の指標である高速化への鍵を握っている。古典的波動を例にとれば、コヒーレンスだけが問題であって非古典性が常に必要とは限らない。つまり一部のアルゴリズム実装においては、量子エンタングルメントはオーバースペックであって本来、必要ではない。ところがこうした事実は意外にもほとんど認識が進まなかった。

逆に考えるとベクトル和さえ成立すれば、どのような物理系であっても量子アルゴリズムが実装できることが示唆される。したがってアルゴリズムを限定した上で、これが実装可能な量子計算機つまり物理系そのものを眺めてなおしてみることは、あながち無意味ではなからう。なぜならごくありふれた物理系の古典的波動を利用して量子アルゴリズム実装が行えることは、従来の研究の方向性に一石を投じる効果にも増して高い発展可能性を秘めているからである。

2. 研究の目的

現在、有用性が確認できている量子アルゴリズムは3種類ある。ところがこれらの実装には波のコヒーレンスのみが重要であって量子性あるいは非古典性が不要な事実は意外と知られていない。本研究はこの点に注目することで光よりも圧倒的にコヒーレンスが良くとされる音波を用いて量子計算・ビッグデータ高速検索のためのプラットフォームを構築し、ビット型量子計算（「音で量子コンピューティング」）への適用可能性を検討するものである。とくに無限次元ヒルベルト空間を形成する音の周波数基底を利用して音響量子論ゲートの具現化を試みる点に特徴がある。固体弾性波を利用した微細化・集積化や量子通信などへの道筋も明確なことから未完の音響エレクトロニクスを押し上げる効果とともに情報処理や物理計測分野への積極的な応用展開を模索した。

3. 研究の方法

大気中を伝播する弾性波としての音波を対象に以下の項目にしたがって研究を進めた。

(1) 音響キーコンポーネント

市販部品と可塑材の3次元プリンタ造形を利用して音響量子ゲートのキーコンポーネント（周波数シフタ、分波・合波器、位相シフタ、バンドパスフィルタ、コムフィルタ）を設計・製作し、動作特性を評価

(2) 周波数重ね合わせ状態

周波数重ね合わせ状態の発生、ヘテロダイン検波

(3) 音響量子ゲートの構築と検索アルゴリズム実装

量子ゲート動作のシミュレーションによる予備検証

音響周波数量子ゲート（回転ゲートと制御NOTゲート）の設計・製作

検索アルゴリズム実装と「音で量子コンピューティング」の検討

(4) 派生技術、応用展開

4. 研究成果

(1) 量子ゲート構築のための音響キーコンポーネント

40kHz帯超音波をキャリアとして3Dプリンティングを積極的に利用することにより主に受動部品だけでキーコンポーネントを作製することに務め、これらの周波数特性を系統的に調べた。

【周波数変調器】周波数変調の機構として振幅変調、ドップラー偏移、位相変調を検討した。再現性の観点から強度チョッピングおよび流体自身のもつ非線形性を用いたパラメトリック変換素子のふたつを検討し、とくに先鋭スペクトル確保の観点から後者に対して検討を進めた。進行超音波と直交する進行密度波(0.8kHz)を層流的に供給することでキャリア(40kHz)が上方・下方変換され、20dBを超える抑圧比をもつベデスタルフリーな多重側波帯が発生することをスペクトラムアナライザのリアルタイム解析結果に基づき確認した。これは音響光学素子による光の周波数変調と類似の効果である。さらに2つの異なる周波数の進行密度波によってカスケード的にキャリアの周波数変調が可能なることもわかった。ただし、この方法による変調率は研究全体を通じて最大1%オーダーにとどまった。

【分波・合波器】3Dプリンティングを駆使してY型の分波・合波器を製作し、分岐比、反射損失、伝播損失を評価することで音響周波数多重（あるいは波長多重：WDM）フィルタ構築への足がかりを得た。繰越し年度にはフォノンニック結晶導波路の適合性を調べるべく音響ダイクロイ

ックミラー他の音響素子の開発を開始したが、動作検証を通じて大気中伝播音よりも固体内を伝播する弾性波の方が有利であることを示唆する結果を得た。

【位相シフタ】単純な導波路遅延が有効に機能することを確認した。ダイアフラムフィルタによるメタマテリアル遅延路による周波数非依存な位相シフタについても検討を加えた。

【バンドパスフィルタ】穿孔ダイヤフラム型の狭帯域バンドパスフィルタを設計・製作し、特性を評価した。40kHz 帯でほぼ 1kHz 間隔で Q 値がほぼ 100 のオーダーのバンドパスフィルタが達成できた。ただし透過特性は最大 26%、側波バンド抑圧比はこの方式では 3 未満であった。

【コムフィルタ】準備段階として穿孔ダイヤフラム型の狭帯域バンドパスフィルタをカスケード接続して特性評価を行った。コムフィルタ構築のためには、周波数多重特性ほか透過・反射性能の著しい向上が必須であることが明らかになった。

(2) 周波数重ね合わせ状態発生

任意波形発生器で駆動されたスピーカー出力に上記の周波数シフタを作用させることで多重側波帯の発生を確認。音波センサを用いて周波数重ね合わせ状態のヘテロダイン検波が可能であることを検証した。

(3) 音響量子ゲート構築と検索アルゴリズム実装

まず周波数自由度にもとづく量子ゲートの動作をシミュレーションによって予備検証した。その上で非線形音響効果を利用した周波数上方・下方変換によるアダマールゲート、制御 NOT ゲートの構成を検討した。1 ビットゲートである前者は受動部品だけで構成でき、周波数シフタとコムフィルタの組み合わせ、あるいは 2 周波数に限定すれば、他の自由度を弁別できる振幅分割器を用いた干渉計との組み合わせによっても原理的には実現可能である。

それに比して後者は 2 ビット動作のゲートで実現への困難が予想される反面、量子位相ゲートで置換可能でなことから周波数基底ならば実装が可能であることが見込まれた。そこで本研究では量子位相ゲートの実装に注力した。

バイナリ型の周波数コムを量子ビットとするとビットのキャリア自体が第 2 ビットを内包(自己制御ビット) するから制御ビットラインが不要となる。これは実装の上で有利に働く。例えば 4 周波の場合、一次元導波路を 2 つのコムフィルタで分割し、2 周波を迂回、2 周波をスワップゲートで周波数交換した後、全波を再び合波すれば直ちに量子位相ゲートが構築できる。実施、進行超音波と直交する進行密度波による周波数変調を利用して 2 周波のスワップゲートが構築できることを実証した。ただし、効率は 10ppm どまりで大きな改善の余地を残した。

ここで前述の 2 段階カスケード変調を用いると上記のゲートの変調率向上にとどまらず 2 ビット操作の CNOT ゲートがそのまま構成できることもあわせて指摘した。1 段階目の周波数変調で周波数重ね合わせ状態を発生し、2 段階目で 2 倍周波数の変調を行えばよいからである。

他方、過去の音響計算の例と違わず、予想通りに機械的振動の結合、回折損失、背景の迷音による受音素子のクロストークが発生する一方で音波の減衰・散逸を完全に抑制することはおよそ困難であることが判明した。実際は、これにゲート構成部品間の結合損失、挿入損失、伝送損失が加わる。したがって量子ゲートのユニタリ性の維持は困難であり、双方向性も担保すべき課題として残された。なお、損失は音響トランジスタ増幅で補填できる可能性があり、熱音響効果について検討を加えたほか水中伝播モードや連続体内の孤立波の適用を模索した。

実装すべき量子アルゴリズムとしてビッグデータ高速検索などへの活用が期待されるグローバルの検索アルゴリズムをとりあげた。万能量子ゲートが透過率の低さから達成できていない現状に鑑みてシミュレーションレベルで実装の可能性を検討した。透過率さえ向上すれば、エレクトロニクス回路をプラットフォームとするグローバルの検索アルゴリズム実装と同様に音波プロトコルでも 1 回で検索を終了可能な系の実現が期待できると判断される。同様に個別素子の性能向上を前提として「音で量子コンピューティング」は予測可能な範囲にあると言える。

(4) 派生技術と応用展開

4-1) 音波ゴーストイメージング

当初計画の範囲を超える関連研究項目として音波にもとづく秘匿性プロトコルを検討した。音響量子通信に寄与する秘匿性プロトコルとしてとくにここでは音響ゴーストイメージングを選定し、その実装実験を試みた。ゴーストイメージングとは、一定の相関をもつ 2 光子を用意し、これらを別々の経路に伝送する時、ひとつのアーム上におかれた観測目標物のイメージをもう一方の経路上で目標物と光子を相互作用させることなく再生可能な技術体系である。なお、前者の経路の末端には空間分解能をもたない全光子検出器が配置され、もう一方の経路に置かれた検出器は高い空間分解能をもっている。いきおい各々の経路の光子の検出事象を見る限り、目標物のイメージを得ることはできない。ところが同時検出事象だけを事後選択することで初めてイメージングが可能となる。これが秘匿性たる所以である。ここでは物理系を簡素化するため空間ドメインから時間ドメインへの転換を図り、あらかじめ実装の容易な光シミュレータを利用して 1 次元伝播との類似性にもとづく差動ゴーストイメージングの系を構築した。実際、通信帯波長のハードウェアを用いて所望の動作が確認できた。次いで 1 次元音響導波路を形成し、音波をリソースとするゴーストイメージングに成功した。これが初めての実証例であるばかりでなくスタート時点において差動モード動作という付加価値をもつ点に意義がある。実際、

今回用いた差動プロトコルでは自己相関と相互相関の比で決まる信号雑音比が擬似乱数波源のデューティー比を変えても劣化せず、これが実験的に実証できたことは背景音の影響で明瞭度が顕著に劣化してしまう音波のコヒーレンス維持の観点で重要な意味をもっているからである。

4-2) 単一光子ヘテロダイン

光と力学系の結合にもとづくフォン計算機を視野に入れ、時間ドメインにおける微弱信号計測および通信プロトコルのための要素技術の位置づけで音響・光結合系の構築を試みた。具体的には、本研究のベースとなる音響物理系の概念を今度は光の系に逆輸入することで周波数プロトコルにもとづいた単一光子によるヘテロダイン干渉縞の捕捉を試み、これに成功した。この結果は、フォノンと結合によって単一光子性が失われない事実に加えてフォノン1個を吸収することで付与されるべき干渉計の行路識別情報が事実上、失われることを意味している。この現象はフォノンがコヒーレント状態にあることを意味するが、逆にコヒーレント光では行路識別されないフォノンの干渉計が構築可能であることに鑑み、音響光学素子による単一光子制御を通じた音響量子実験系の実装に道筋をつけた。一連の成果が評価され、最終年度には大規模国際会議から招請を受けた。一方、上記の過程で見出された周波数プロトコルによる単一光子ヘテロダイン干渉縞を利用することで、長年誤解されてきた空間ドメインのゴースト回折現象（イメージではなく干渉縞が2光子の相関を事後選択することで初めて発現）が、光源・検出器配置が逆転した逆線二重スリットの文脈によって初めて総合的に理解されることを見出した。

4-3) 応用展開

古典波動を利用した周波数自由度による音響コンピューティングの発展可能性を模索した。大規模計算に向けて微細化・集積化ならびに擾乱・散逸の少ない好適な音響物理系を検討した。伝搬シミュレータを用いることで背景の「迷音」低減の観点からも凝縮系内部を伝播する弾性波の利用がより有効であることを最終的に確認できた。さらに狭帯域のバルク・表面弾性波素子を集積することで多ビット演算にも対応可能との感触を得た。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計2件)

- ① Youhei Okawa, Fuminori Omura, Yuhsuke Yasutake, and Susumu Fukatsu, “Photon heterodyning”, *Opt. Express* 25, 20156-20161 (2017). [査読あり]
DOI: 10.1364/OE.25.020156
- ② Yoshiki O-oka and Susumu Fukatsu, “Differential ghost imaging in time domain”, *Appl. Phys. Lett.* 111, 61106 (2017). [査読あり]
DOI: 10.1063/1.4997925

[学会発表] (計9件)

- ① 大岡佳生, 深津 晋 “音響ゴーストイメージング”
第66回応用物理学会春季学術講演会 (2019).
- ② Youhei Okawa, Fuminori Omura, Yuhsuke Yasutake, and Susumu Fukatsu, “Photon heterodyning and its applications”, *SPIE Commercial + Scientific Sensing* (招待講演) (2018).
- ③ 大岡佳生, 深津 晋 “ゴーストイメージングによる回折干渉フリッジの再生”
第79回応用物理学会秋季学術講演会 (2018).
- ④ 大岡佳生, 深津 晋 “時間ドメイン圧縮センシングによるヘテロダインビートのゴーストイメージング” 第79回応用物理学会秋季学術講演会 (2018).
- ⑤ 大川洋平, 藤澤俊祐, 深津 晋 “隠れたエンタングルメントの検出”,
電子通信情報学会研究会 QIT-36 (2018).
- ⑥ 大岡 佳生, 大村 史倫, 安武 裕輔, 深津 晋 “時間ドメインにおける差動ゴーストイメージング” 第64回応用物理学会春季学術講演会 (2017).

[その他]

ホームページ等

<http://park.itc.u-tokyo.ac.jp/fkatz/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究分担者 なし

(2) 研究協力者

研究協力者(1)氏名：大岡佳生

ローマ字氏名：(O-OKA, yoshiki)

研究協力者(2)氏名：大川洋平
ローマ字氏名：(OKAWA, youhei)

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。