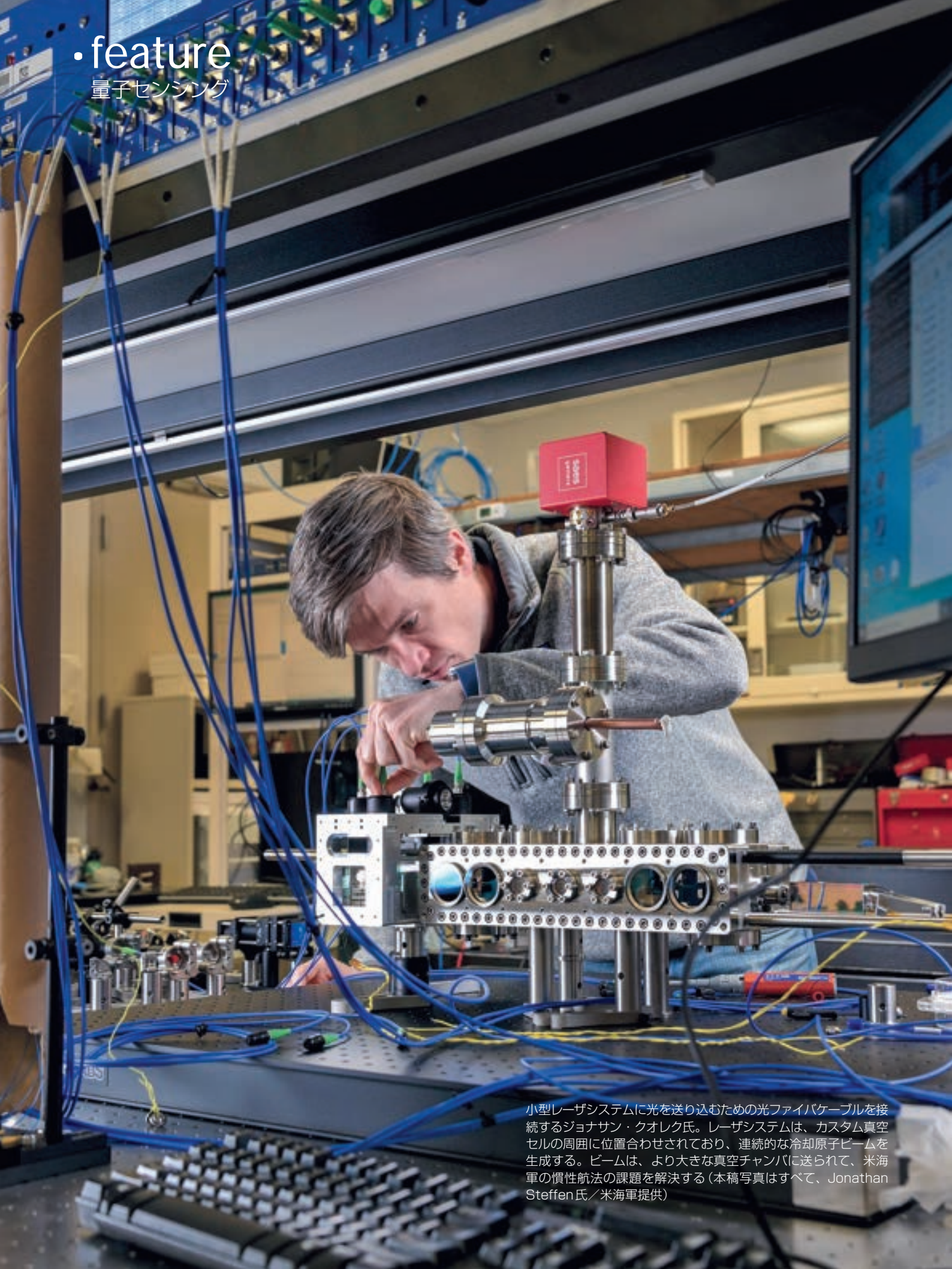


• feature

量子センシング



小型レーザーシステムに光を送り込むための光ファイバケーブルを接続するジョナサン・クオレク氏。レーザーシステムは、カスタム真空セルの周囲に位置合わせされており、連続的な冷却原子ビームを生成する。ビームは、より大きな真空チャンバに送られて、米海軍の慣性航法の課題を解決する（本稿写真はすべて、Jonathan Steffen氏／米海軍提供）

米国海軍研究所、航法用の冷却原子型量子慣性センサを研究

サリー・コール・ジョンソン

高性能な冷却原子型量子干渉計は、散乱光の問題を緩和し、軍用慣性航法装置を大幅に強化する可能性がある。

想像できるように、航法精度は軍事活動に不可欠である。全地球測位システム(Global Positioning System:GPS)に対する、電波妨害やスプーフィング(位置情報の改ざん)による攻撃が増加しているため、慣性計測装置(Inertial Measurement Unit:IMU)をGPSのバックアップとして組み合わせることが推進されている。IMUは、ジャイロスコープと加速度計を使用して、既知の開始点、向き、速度に基づいて、物体の位置と向きを追跡する。GPSとは異なり、電波妨害やスプーフィングは不可能で、地下や海中の他、衛星が利用できない場合も機能する。

量子慣性航法は、航法システムの精度を数ケタ高めると期待されており、米国海軍研究所(Naval Research Lab:NRL)の研究者らは、パターン化された連続的な冷却原子ビームに基づく3次元(3D)冷却原子ビーム干渉計を開発し、特許申請中である。航法装置のドリフトを低減するための原子干渉計をベースとした慣性計測システムを研究することを、目的としている。

「われわれの取り組みは、外部の位置基準なしで自らの位置を把握するために役立つ、より良い慣性航法装置が欲しいという米海軍のニーズに着想を得ている」と、NRLの量子光学部門(Quantum Optics Section)でこの干渉計に取り組む研究物理学者のジョナサン・クオレク氏(Jonathan Kwolek)は述べた。

複数の異なる既存技術が現在、慣性航法を行うために艦隊に実装されているが、NRLは常に、古い問題を解消するための新しい手段を模索している。「量子力学センサを慣性航法装置として使用することにより、航法のために重要な一部の主要性能指標について、従来技術に勝る効果が得られる」と、クオレク氏は述べた。

これまで、「高性能な冷却原子型量子慣性センサは主に、実験室での実証にとどまっていた」と、NRLの量子光学部門を率いるアダム・ブラック氏(Adam Black)は言う。「NRLの新しいセンサアーキテクチャが、この有望な技術の展開可能性において、真の違いをもたらす始めることに期待している」。

冷却原子型量子慣性センサ

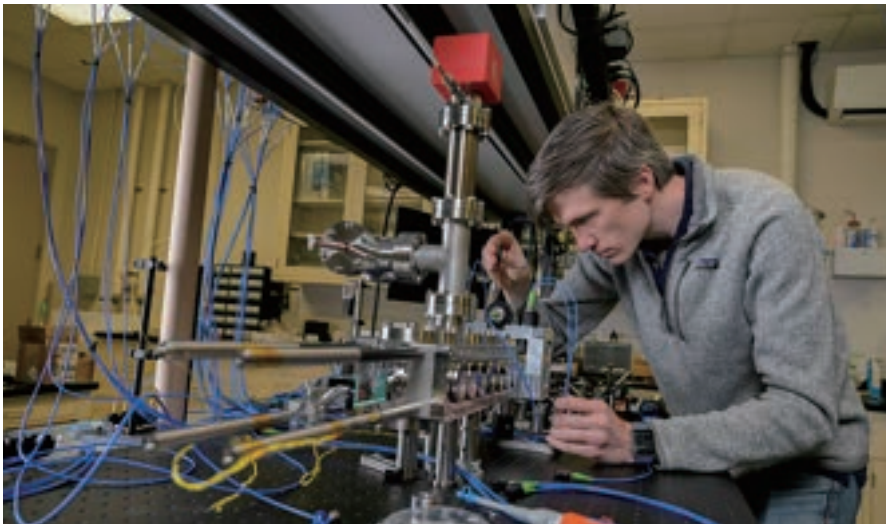
冷却原子を用いた量子慣性センサシステムは、物質の量子力学波動性を利用して量子干渉を引き起こし、加速度と回転を測定する。干渉計は、変位、屈折率の変化、表面トポロジを正確に測定し、そうしたシステムは、米海軍の航空機、戦術/戦略用ミサイル、宇宙探査機、潜水艦、船舶に理想的である。

原子による慣性計測と従来の計測とでは、「誤差に対する依存性が異なる」と、クオレク氏は述べた。長期的なノイズ挙動と精度が現行の主要技術よりも向上すると、同氏は予測している。つまり、位置がより長い時間正しく維持されるとともに、運用の柔軟性が高まる。

冷却原子型量子慣性センサの動作の



NRLの連続デュアルビーム干渉計プログラムで使用される連続冷却原子源には、原子ビームの冷却と照準合わせのために、安定していて適切に位置合わせされたビームが必要である。この写真では、ジョナサン・クオレク氏が、各レーザービームの生成と照準合わせを行うカスタム光学システムを組み立てている。これは、NRLの原子干渉法研究所における、コンパクトで安定したレーザー伝送のための、小型化を目的とした複数の取り組みのうちの最初のものである。



NRLの原子干渉法研究所 (Atom Interferometry Lab)にて、原子ビームを最適化するために、光伝送システムをカスタム真空チャンバの周囲に慎重に配置して、このカスタム光伝送システム内の光学系の位置合わせを行うジョナサン・クオレク氏

仕組みについて、クオレク氏は次のように説明した。「われわれの冷却原子型慣性センサは、冷却原子を用いた他の原子物理学実験と同じ技術の多くを利用している。原子共鳴付近にチューニングされた連続レーザーを使用して、原子を冷却し、真空チャンバ内の原子の動きを空間的に制御する」。

このレーザーシステムの大部分は、「音響光学変調器と電気光学変調器を使用した周波数のシフトと安定化」を行うと、クオレク氏は説明している。「その後、これらのレーザーを光ファイバによって、真空チャンバを取り囲むカスタム設計の光学マウントにルーティングする」。

NRLの研究者らの取り組みの最大の新規性は、冷却原子の生成方法にある。今日存在する多くのシステムとは異なり、冷却原子と連続原子の両方のビームが、散乱光などの問題を緩和する方法で生成される。「2つの異なる干渉計アーキテクチャのメリットを組み合わせることを目指している」と、クオレク氏は付け加えた。

この干渉計は、高い測定コントラストや低いノイズといった有望な特性を

示し、センサの環境内の変化に対応するための高い機能を備える。そのすべてが、GPSが利用できない環境内で動作し続ける能力を向上させる。

原子干渉計を動作させる際の1つのトレードオフは、感度を上げるとダイナミックレンジが低下することだと、クオレク氏は指摘した。しかし、同氏らは解決策に取り組んでおり、コセンサの実装や代替の冷却原子技術などを検討している。

ちなみに、位置推定の誤差は、位置に直接的な影響を与え、今日商用提供されているIMUは、360時間の動作中の誤差蓄積が約1海里(1852m)の状態で、航行可能である。NRLは、航行のドリフトがミッションの持続時間に影響を与えないようにするために、その時間の延長に取り組んでいる。

この取り組みの最も素晴らしい点は、「間違いなく原子だ」とクオレク氏は述べた。「原子の冷却にわれわれが用いる技術は、1970年代と1980年代に開発されたもので、かなりのインパクトを与えたとして、発明者らは1990年代終盤にノーベル賞を受賞してい

る。これらの技術に基づき、われわれの実験は15マイクロケルビンの原子温度を達成している。これは、宇宙で最も温度が低い場所よりも100万倍近く低い温度である」(クオレク氏)。

クオレク氏はこの分野に10年以上にわたって取り組んでいるが、これを実現することが可能だという事実は、同氏にとって今も目新しさを失っていない。

継続的な課題として残る、この実験の最も困難な部分の1つは、「原子干渉計に向けたレーザーのアライメントの設定と維持」だと、クオレク氏は述べた。「これらのレーザービームに対する角度アライメント、間隔、サイズの要件は非常に厳しい。また、動作中はそれらの値を安定化させる必要もある。この目標を達成するために、さまざまな方法論と技術の調査を続けている」。

目の前に広がる幅広い用途

NRLのこのプロジェクトの直接的な目的は、より良い慣性航法装置に対するニーズに応えることだが、その原子ビーム源生成方法にはそれ以外にも、磁界または電界センシングなどのさまざまなセンシングモダリティから、タイミング分野の用途に至るまでの無数の潜在的用途がある。クオレク氏らは、特許取得済みのこの冷却原子生成アーキテクチャによって実現されるさまざまな可能性を探究するつもりである。

「この研究を前に進めるとともに、この技術が実世界のシナリオでどのように機能するのかを確認したいと思う。大洋上の船舶の上で試験を行うことにより、動くプラットフォーム上でこの干渉計を試験する計画だ。それ以外にも、干渉計の動作を改良するために、より基礎的な研究の領域内で他の方向性を探っている」と、クオレク氏は述べた。