

平成 18 年 9 月 7 日

高速測定する超高精度レーザー距離計の開発に成功

－ 10 km を測定しても誤差 10 ミクロン以内－

伊藤 弘昌

東北大学電気通信研究所 応用量子光学研究分野

〒980-8577 仙台市青葉区片平 2-1-1 Tel:022-217-5518, Fax:022-217-5520

<成果の概要>

東北大学電気通信研究所の伊藤弘昌所長らの研究成果である周波数シフト帰還型レーザー^{注1}を用いて目標物までの距離を測る光距離計で、10km先の誤差が10 μ m以内という高精度な装置を開発したと9月7日に(株)光電製作所が発表しました。

光距離計は、光波を目標物まで往復させ、その距離を時間や周波数、位相などの情報から求める装置で、測量機器をはじめとする多くの分野で活用されています。時間領域方式^{注2}や周波数領域方式^{注3}、位相領域方式^{注4}など幾つかの方法があり、より一層の計測可能距離の延長、高精度化、高速化が試行されてきました。しかし、距離計測の高精度化にはそれぞれ方式上の制限があり、高精度で使いやすい新しい光距離計が求められていました。

本方式は、周波数シフト帰還型レーザーの超高速に周波数変調する光周波数コム^{注5}を利用するもので、従来法では実現できなかった測定誤差が除去でき、高精度を達成するとともに、数100kmもの長距離の計測を可能とします。本開発を進める中で、長時間長距離の高精度計測を安定して行うために、偏光状態を制御する σ (シグマ)字型レーザー共振器^{注6}を応用し、レーザー出力光の乱れを解決しました。さらに、計測速度を向上させるために、FFT(高速フーリエ変換)^{注7}を主とした周波数計測信号処理アルゴリズムを高速処理するハードウェアを開発し、1000点/秒という高速計測を実現しました。

これにより、遠隔より高精度な距離計測が可能になり、接近が難しかった物体の計測や、大型構造物など計測対象の大きな物体のひずみや振動解析、光ファイバセンサの遠隔計測、光三次元座標計測機^{注8}などへの応用が期待されています。

<研究の背景>

光を使った距離の計測は、測量機器をはじめとして多様な分野で活用されています。

時間領域方式、周波数領域方式や位相領域方式など幾つかの方法があり、より一層の計測可能距離の延長、高精度化、高速化が求められ、各方面で技術開発が行われてきました。しかし、距離計測の高精度化にはそれぞれ方式上の制限があり、高精度で使いやすい新しい光距離計が要求されていました。

<従来技術>

古くから用いられてきた時間領域方式である光パルス方式は、光波が目標物までを往復する時間を計測する方法で、感度が高く、非常に遠距離の計測を得意としますが、計測精度は数mm程度と良くありません。また位相領域方式は、反射光波の位相遅れから距離を求める方法で、高速で非常に高精度な計測が可能ですが、目標物以外からの反射光が含まれたり複数反射点があったりする場合には計測が困難になるため、適用できる環境が限られていました。

<今回の技術ポイント>

本技術で採用した周波数領域方式は、時間領域方式と位相領域方式の中間的な性質を持ち、測定距離、測定精度、感度、測定速度、汎用性の各性能について、総合的にバランスが良いのが特徴です。しかし、他方式に比べて周波数解析の信号処理が複雑なため、これらの問題を解決する必要がありました。

周波数シフト帰還型レーザは、レーザ共振器の中に挿入した音響光学素子^{注9}の働きにより、光波が共振器を周回する度に一定の周波数シフトを繰り返し、その結果、光周波数コムが超高速で直線的に掃引しています(図1、図2)。従来、周波数領域方式の計測精度を制限していた周波数挿引の非直線歪みがなく、またビート(うなり)が高い周波数となるため、計測時間が短くなり周波数分解能が向上します。また、光周波数コムによる複数本のビート信号を順に切り替えることにより、高い精度を維持しながら数100kmもの長距離計測を可能とします。

周波数シフト帰還型レーザから出力した光周波数コムは、干渉計に入ると測定目標物と参照用に分けられます。目標物を往復した反射光と、参照光を干渉させて得られるビート信号を光検出器で検波されます。ビート信号の周波数に含まれる距離情報を信号処理により取り出し、目標物までの距離が求められます(図3)。

本開発では、光源部において、高精度計測のために重要なビート信号の安定化を目的として、 σ (シグマ)字型のレーザ共振器を応用し、単一偏光出力の安定性を向上しました(図3)。また、信号処理部では、計測速度向上のため、FFT(高速フーリエ変換)を主とした周波数計測信号処理アルゴリズムをハードウェア化することにより、顕著な高速化を実現しまし

た。これらの結果をもとにコンパクトな光距離計を完成させ、長さ50m～10kmの光ファイバの距離計測を行ったところ、10 μ m以下の高精度(計測誤差/計測光学長=10⁻⁹)を実証し、1000点/秒までの高速計測を達成しました(図4・図5)。

また、本装置を高精度レーザスキャナ(開発協力:(株)ハーモニックドライブシステムズ)と組み合わせた光三次元座標計測機を開発し、5mまでの距離における三次元座標点群を、距離方向50 μ mの高精度と、160点/秒の高速で取得できることも実証しました(図6)。

<今後の予定>

本新技術は、10kmの長さを10ミクロンの誤差の超高精度、最大1000点/秒の高速計測、反射信号強度比70dB(デシベル)以上を達成した高感度という特徴を有することから、高度な距離計測が実現できます。また、これまで接近することが難しく計測が困難だった目標の遠隔計測が可能となり、建造物や大型構造物のひずみや振動解析、光ファイバセンサの遠隔計測に適用されます。

さらに、最近製造業界を中心に活発化している非接触光三次元座標計測は、従来の単なる座標取得装置から、より信頼性の高い検査装置への移行が求められています。本新技術は、この分野においても、工業製品の診断やリバースエンジニアリング、文化財のデジタルアーカイブなど、広範囲における適用が期待されます。

<参考図>

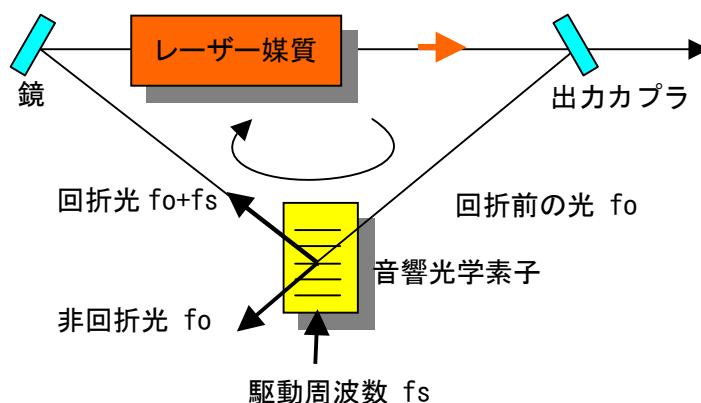
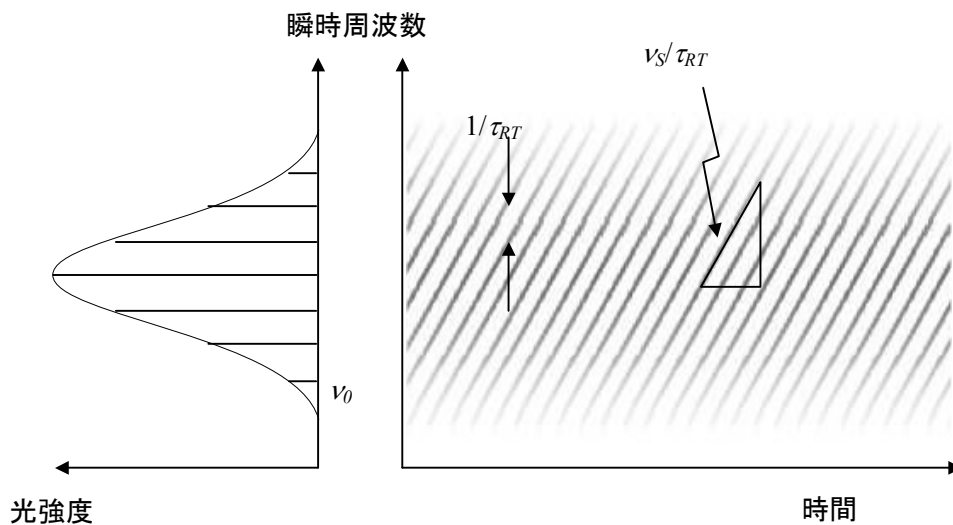


図1 周波数シフト帰還型レーザの構成と回折光の周波数

周波数シフト帰還型レーザは、音響光学素子により回折された光だけを共振器の利得媒質に帰還します。



τ_{RT} : 共振器周回時間: 光波が共振器(図1の三角形)を一周する時間
 v_s : 共振器一周回りに光波の受ける周波数シフト量

図2 周波数シフト帰還型レーザで発生する光周波数コム

周波数シフト帰還型レーザでは、共振器内の光波に周回ごとに周波数シフトを受けながら、共振器のゲイン曲線(周波数-振幅曲線)に従って増幅され、衰退して、やがて消滅します。この瞬時周波数成分が共振器周波数間隔ごとに櫛状に存在し、光周波数コムと呼ばれています。

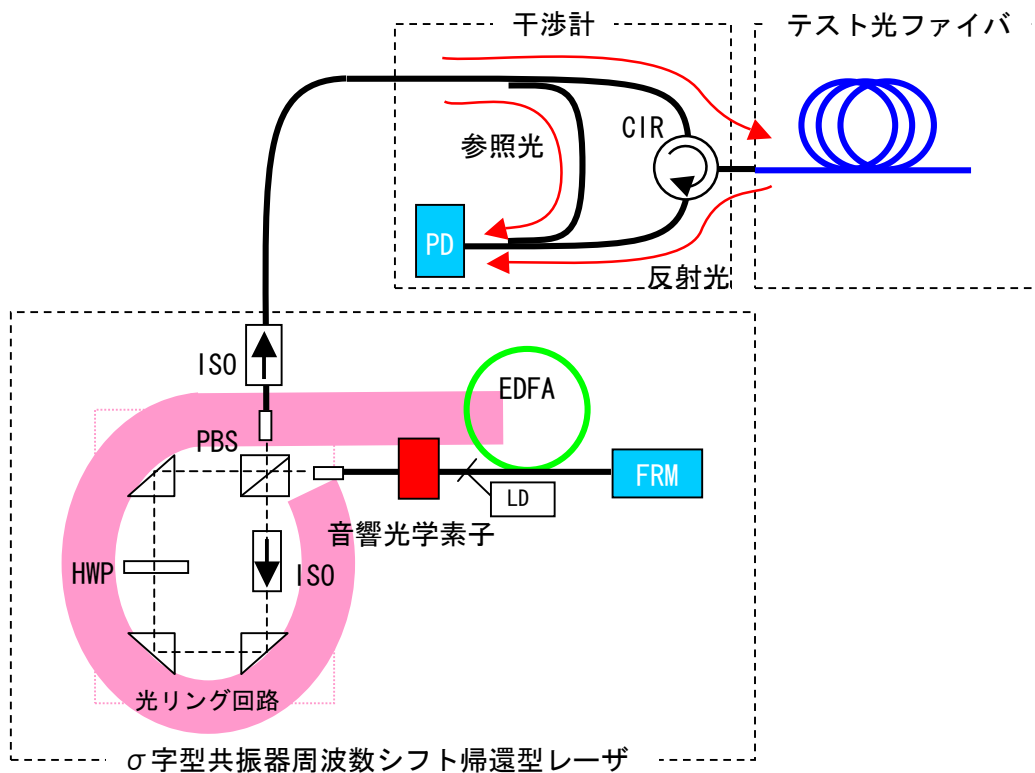


図3 σ字型周波数シフト帰還型レーザと干渉計

σ字型共振器は、偏波制御された光リング回路と、ファラデー回転鏡までを往復することで入射光と直交に偏光した光波が戻される直線部を結合した構成からなり、ギリシャ語のσ(シグマ)の字の形をしています。

- レーザ LD : レーザーダイオード、FRM : ファラデー回転鏡、
 EDFA : エルビウム添加ファイバ増幅器、ISO : アイソレータ、HWP : 半波長板、
 PBS : 偏波依存ビームスプリッタ
- 干渉計 PD : フォトダイオード、CIR : サーキュレータ

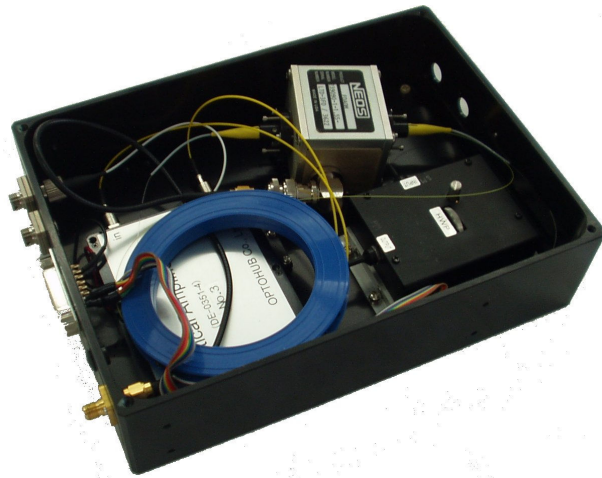


図4 σ 字型共振器周波数シフト帰還型レーザ
寸法：200×145×55mm

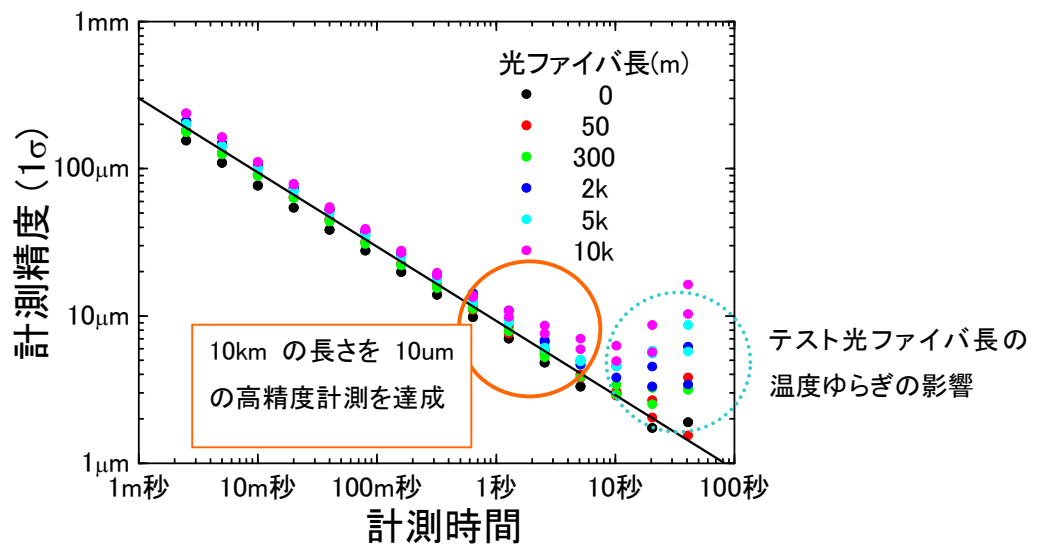


図5 計測結果（1）長距離計測精度評価結果

- ・ 光ファイバ：50m、300m、2km、5km、10km の5 ファイバ
 - ・ 計測時間：最短2ミリ秒～最長41秒の15通り
 - ・ 計測点：65000点
- ※グラフ縦軸の計測精度はアラン分散（周波数安定度の評価手法の一つ）から算出



220万点

左から 木彫り人形



30万点

携帯電話



80万点

産業機器の筐体及び電子部品

6 計測結果 (2) 光三次元座標計測結果

<用語解説>

注1) 周波数シフト帰還型レーザー:

共振器を周回する際に光波が音響光学素子などにより強制的に周波数シフトを受けてレーザー媒質に帰還するタイプのレーザー。

注2) 時間領域方式:

レーザーレーダや時間領域反射計測など、目標を往復した反射光の遅延時間から距離を求める方式。

注3) 周波数領域方式:

光の周波数を三角波状あるいはのこぎり波状に変化させ、反射光と参照光を干渉させて生じたビート信号(異なる周波数信号を今後して生じる“うなり信号”)の周波数から距離を求める方式。

注4) 位相領域方式:

反射光の強度信号と参照信号の位相差から距離を求める方式。

注5) 光周波数コム:

等しい周波数間隔で櫛状の強度分布を持つ光。周波数シフト帰還型レーザーにおいて発生します。

注6) σ (シグマ)字型共振器:

偏波状態が定まらない素子を内蔵しながらも単一偏波光が得られるレーザー共振器の一種。

注7) FFT(高速フーリエ変換):

DFT(離散フーリエ変換)を高速に計算するアルゴリズム。本開発ではデジタル信号の周波数解析に使われています。

注8) 光三次元座標計測機:光により非接触に物体の表面形状を三次元座標として高速に取得できる装置。

注9) 音響光学素子:超音波により光の変調や偏向を行う素子。本開発は素子通過時に回折された光波が周波数シフトを受けることを利用しています。