

FSF レーザによる距離センシングとその応用

原 武文

1. はじめに

非接触かつ大量の三次元情報を取得可能な光三次元計測機 (OCMM: optical coordinate measuring machine)は設計・生産現場の重要な計測装置として定着してきた。屋外では建造物の三次元記録装置としてコンサルタント系メーカを中心に普及が進んだ[1]。その一方で、測定原理の異なる装置が、3D スキャナやレーザスキャナと一括されて呼ばれることから若干の混乱も招いている。

1 m 以上離れたの物体の三次元計測は、主にレーダ法が活躍する範囲であり、大型製品の検査や近接することが困難な計測、屋外計測に優れた特徴を持っている。本稿では、レーダ法の中でも光周波数差法を利用した遠隔高精度計測について紹介し、さらに最近の橋梁などの土木計測や、高温発熱体の計測事例について紹介する。

2. 周波数シフト帰還型レーザと光周波数差法による距離計測

周波数シフト帰還型レーザ (Frequency-shifted Feedback Laser、以下 FSFL と呼ぶ) は、レーザ共振器内部に光周波数シフタを挿入した図 1 のような基本構成である[2]。レーザ利得媒質から発生した光波は、共振器周回ごとに一定の周波数シフトを与えられて再びレーザ利得媒質へ帰還される。ある瞬間のレーザ出力光のスペクトルは共振器周波数間隔で並ぶ櫛状の構造を持ち、またある瞬間周波数成分に着目すると、周波数シフトを繰り返しながら利得曲線に従い振幅を増減させながら消滅してゆく[2]。この発振の様子を周波数チャープコム (Frequency Chirped Comb) と呼び、図 2 に示す。直線的な光周波数掃引の傾きをチャープ率と呼び、共振器周回時間あたりの周波数シフト量で表す。一般的な FSFL のチャープ率は数 100 THz/sec～数 EHz/sec (T: tera = 10^{12} , E: exa = 10^{18})もの超高速な周波数掃引が得られる[3,4]。

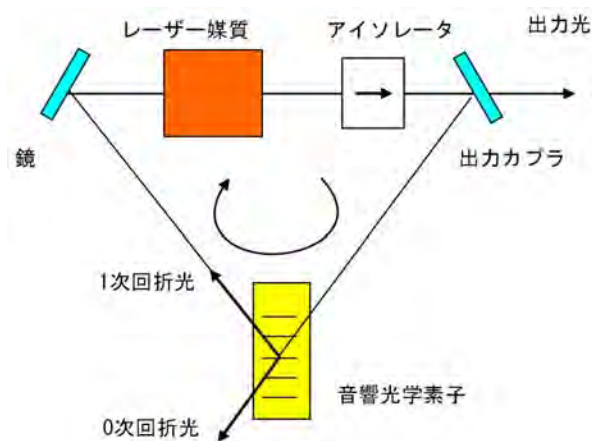


図 1 周波数シフト帰還型レーザ(FSFL)の基本構成

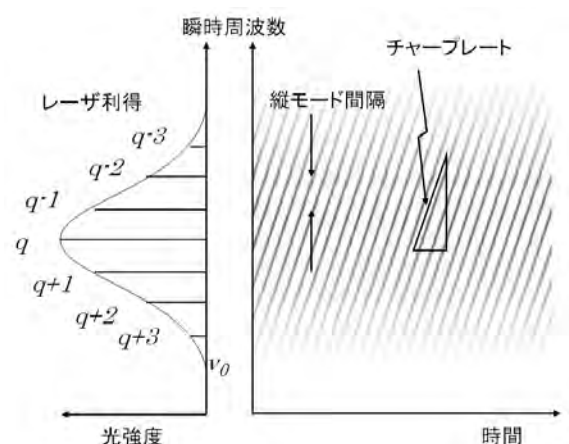


図 2 FSFL の発振、周波数チャープコムの様子

光周波数差法は FM-CW (Frequency Modulated-Continuous Wave)レーダの原理に基づき、送光信号と受光信号の周波数差から距離を計測する方式である。送光信号には、線形な周波数掃引と、広い周波数変化

幅あるいは高いチャープ率が必要であり[5]、FSFLの周波数チャープコムは理想的な光源といえる。図3は干渉計光路差を1,346~1,546 mmまで10 mmずつ変化させたときのビート信号スペクトルである。光路差の変化に対して比例する0次ビート、逆方向へ移動する1次および2次ビート、変動しない共振器モード周波数(13.32 MHz)の成分からなっている。ビートの次数 m とは、送受する周波数チャープコムの櫛が m 本ずれたものを表す。0次ビートから共振器周波数間隔で高次ビートが発生し、図3の1次および2次ビートは負の周波数領域から正の周波数領域へ折り返したものである。数10 kmもの長距離計測ではビート次数も数万となるが、驚くべきことに数万次のビート信号も0次ビートとほぼ同形状である。大気擾乱が無ければ計測精度は基準周波数源の精度まで引き出すことが可能である。

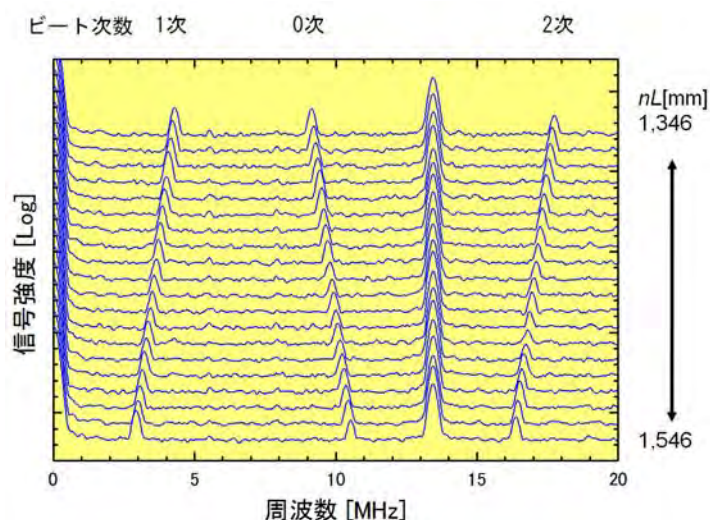


図3 干渉計光路差を1,346~1,546 mmまで10 mmずつ変化させた時のビート周波数の振る舞い

3. 遠隔三次元計測システム: FSFL-OCMM

図4に遠隔三次元計測システム(以下FSFL-OCMMと呼ぶ)の基本ブロック図を示す。ファイバレーザで構成したFSFLの出力をサーキュレータとフォーカシング光学系を介してプローブ光とし、対象物上に集光させている。反射光はサーキュレータから検出器側へ進み、参照光との光ヘテロダイン検波によりビート信号を生じる。ビート信号は信号処理ユニットにて高速フーリエ変換処理等の周波数解析を行い距離情報に換算される。同期検出した2軸の精密エンコーダの角度情報と合成し、三次元情報が得られる。パソコン(PC)では計測制御と表示・記録を行なっている。

FSFL-OCMMの外観を図5に、主要性能を表1に示す。レーザ出力はアイセーフなレーザ安全クラスClass 1である。計測可能距離は5 mである。光学的な計測であるために対象物の材質や表面状態等に依存している。最小検出能力は-75 dBより、標準的な散乱体表面だけでなく金属光沢面の計測も可能としている。プリズム反射体のような反射光強度が十分確保できるターゲットでは、見通し距離の計測が可能で実績値として1 kmを優に超えている。計測精度は現在 2σ 100 μ m以下を1,000点/秒の計測速度で達成している。計測結果の平均化により10 μ m程度の計測も可能である。

計測用ソフトウェアは、三次元形状計測や定点観測等を計測プロジェクトにまとめて、自動計測や巡回計測に対応している。市販の点群CADにリアルタイムに点群データを送り、計測結果は直ちに3次元画像で確認し、自動検査への対応も可能である。

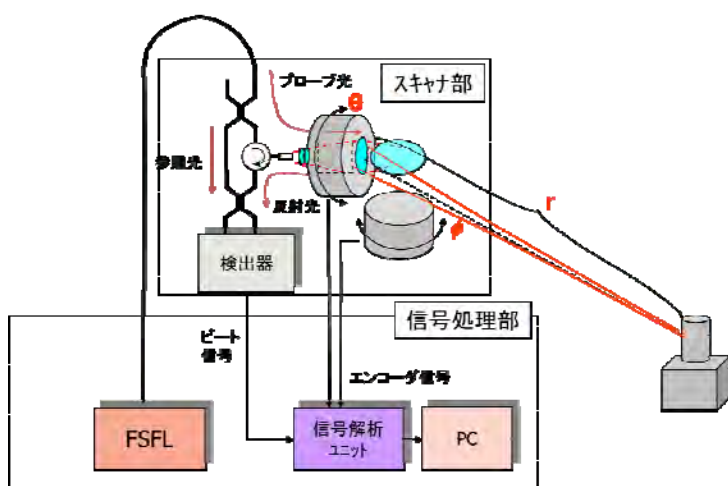


図4 計測システムの基本ブロック図



図5 FSFL-OCMM スキャナを含む計測部と制御部

表1 FSFL-OCMMの主要性能

項目	性能値
波長	1,550 nm
レーザ出力	<10 mW
スポットサイズ	440 μm@5m
計測距離範囲	~5 m(散乱体) >1 km(プリズム)
検出能力	-75 dB
距離計測精度(2s)	100 μm@1,000 点/秒 10 μm@10 点/秒
奥行き分解能(2面)	1.1 mm
サンプリング周期	~1,000 点/秒
スキャン範囲 方位角	360°
仰角	300°
角度分解能	0.15arc 秒

4. 橋梁挙動解析：遠隔ゆがみ・振動計測

一般にコンクリートの耐用年数は50~60年、鉄橋は50年と云われる。1950年代の第1次道路整備計画以降、毎年数千の橋梁が建築されてきた。老朽化した構造物は健全性診断によって、修繕の維持管理コストと架け替えコストを天秤に架けることで、より経済的な解決策を示すことができる。健全性診断には様々な計測方法が導入されているが、基本的な変位計や速度計、加速度計、ゆがみ計はよく利用されている。

鉄橋の耐荷性能、耐久性能、耐震性能等进行评估する上で、荷重車を用いた載荷試験や起振機を用いた振動試験、常時微動計測などがある。本事例では荷重車両走行試験について説明する。これは荷重車両が鉄橋を一定速度で走行したときに生じるゆがみをひずみセンサで、鉛直変位をピアノ線式変位計などの接触式で、計測する。鉛直変位については、より簡便に橋梁直下から光学的にサブ mm 精度で鉛直変位・振動計測を参考文献[3]で紹介した。今回は、橋梁直下に適当な観測地点が得られない場面を想定し、2台のFSFL-OCMMの距離情報から三次元的挙動を解析した。一般に三次元空間内の挙動を把握するには3つの情報が必要であるが、鉄橋のように橋軸方向成分は無視し得る場合は2つで十分である。図6に示すように観測点#1、#2

および側点 T からなる三角形は基線 r_{1-2} を回転中心として自由度 1 がある。側点 T の橋軸 u 方向の変位を 0 とすれば法面 S 内に束縛されるので、基線 r_{1-2} と橋軸が不平行であれば測点位置を算出できる。

観測点は鉄橋の上下流側の足場の良い地点を選び、水平距離約 20 m に FSFL-OCMM を計 2 台設置した。予め互いの FSFL-OCMM で観測点を計測し、基線長および互いの座標系のズレを確認した。測点は橋梁中心の下面部に全方向プリズムを取り付けた。

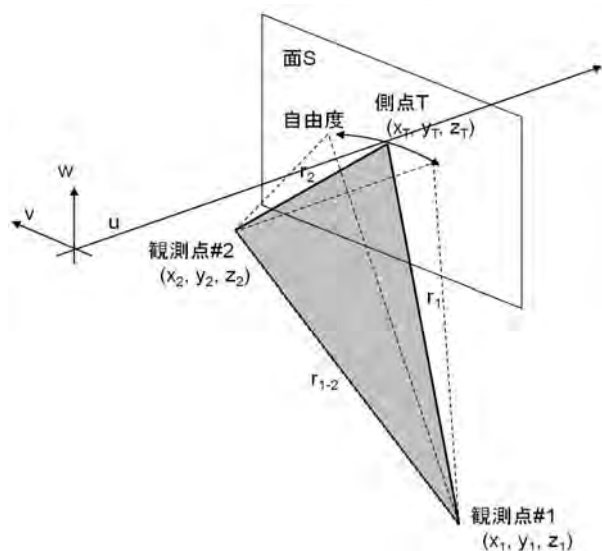


図 6 距離計 2 台による鉛直軸、橋直軸位置計測の配置関係図

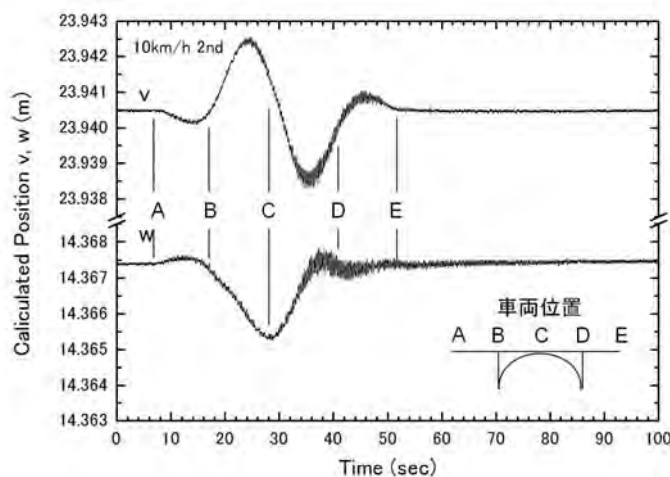


図 7 測点位置の計算結果
図内は鉄橋の模式図と荷重車両の位置

20 t 荷重車両が時速 10 km で走行したときの距離計測値から鉛直軸と橋直軸の挙動に分離した結果を図 7 に示す。鉛直軸 w の挙動からは、先ず、荷重車両が一般道路から橋に達した A 点から微細な振動が発生している。B 点の橋脚上に達するまでは橋中央部は 0.2 mm ほど隆起しており、B 点を過ぎると沈下に転じた。車両が C 点まで達したところで -2.2 mm の最大沈下が記録された。その後、車両通過により大きな振動が発生している。車両が E 点を過ぎると荷重車両によるゆがみは消え、減衰振動が続いている。横断軸 v 方向は荷重車両位置によって上・下流方向へうねるように最大 2 mm のゆがみが観測された。鉛直軸に比べると微小な振動は少ない。図 8 は FFT による振動周波数成分の解析結果である。鉛直方向の卓越周波数 3.04 Hz は橋梁の鉛直モードと一致した。

今回、FSFL-OCMM による遠隔計測では距離変位を基準とした情報が得られ、橋梁の静的な荷重ゆがみや熱ゆがみ、数 10 Hz の固有振動数解析が可能であった。ピアノ線式センサは時定数が大きく、1 Hz 以上の変位計測には適さない。また加速度計から算出した変位情報はセンサ自身のドリフトのためにゆるやかな歪みは計測できない。多種の計器を組み合わせた計測に比べ、FSFL-OCMM は周波数・位相特性の揃った忠実な波形を再現した。このため特に、複数の固有振動モードが合成された、三次元的な挙動の補足に有効と考えられる。

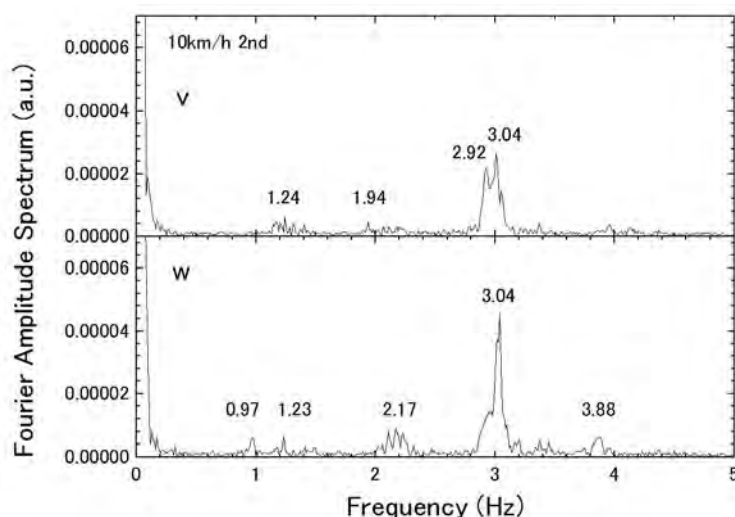


図8 振動周波数解析結果

5. 炉内高温環境下での三次元形状計測

圧延や熱間鍛造とは、材料を高温に熱して打撃や加圧することによって変形させる加工法である。現在は高温状態での寸法計測が困難であるため、検査工程前に冷却工程が必須である。検査後に寸法規格の不良が判明した場合には再加熱・再加工の工程からやり直す必要があり、作業性、生産性に問題が生じている。FSFL-OCMMによる高温体の計測は未だ研究試験段階であるが、良好な結果が得られているので報告する。

試験片となるステンレス合金製のパイプを図9(a)に示す。内径φ20 mmのパイプを縦に切断したもので、内面の黒皮部分が計測対象面である。FSFL-OCMMは電気炉前面より1.3 m離して設置した。加熱前の室温条件で、格子ピッチ0.1 mmで約20万点の点群を取得した。φ20 mmの基準面と比較して全体偏差を求めた結果を図10(a)に示す。ほぼ全面が±50 μmの緑色領域にあることが判る。

電気炉を加熱後、雰囲気温度が1,200℃に達したところで前面扉を開放し、直ちに高温雰囲気中で三次元計測を行った。図9(b)に示すように、炉内全体は眩くオレンジ色に発光しているため、緑色のガイドレーザ光も1,000℃以上では視認することが難しい。加熱中の全体偏差を図10(b)に示す。試験片は全体的に膨張する傾向にあり、上部が青色で表示されたのは、底面の酸化により試験片が後方に倒れ込んだためと思われる。0.8 mm以上の隆起を赤色で表すが、気泡状の盛り上がりが目立つ。

自然冷却後の試験片を図9(c)に示す。内面の黒皮は完全に失われ、全体が拡散性のある金属光沢面となっていた。角部は失われて丸みを帯び、酸化被膜が浮き上がり脆く崩れ易い。高温中の全体偏差で赤色に盛り上がった領域は、酸化被膜が気泡状に浮き上がった部位であった。気泡は冷却後はやや萎んでいる。内面から切断面に渡る赤色の隆起は、酸化被膜にクラックが生じて浮き上がった状態であった。

本計測は計測精度100 μm (1σ)、計測ワーク5 m以下の装置構成で実施された。1,200℃雰囲気中での計測では、ビート信号強度、ノイズフロアともに劣化する様子は見られなかった。計測精度は未検証であるものの、影響は少ないと考えられる。

遠隔高精度計測による高温発熱体の計測は運用中の高炉や焼却炉、電力プラント、ジェットエンジンなどの診断計測需要が見込まれる。

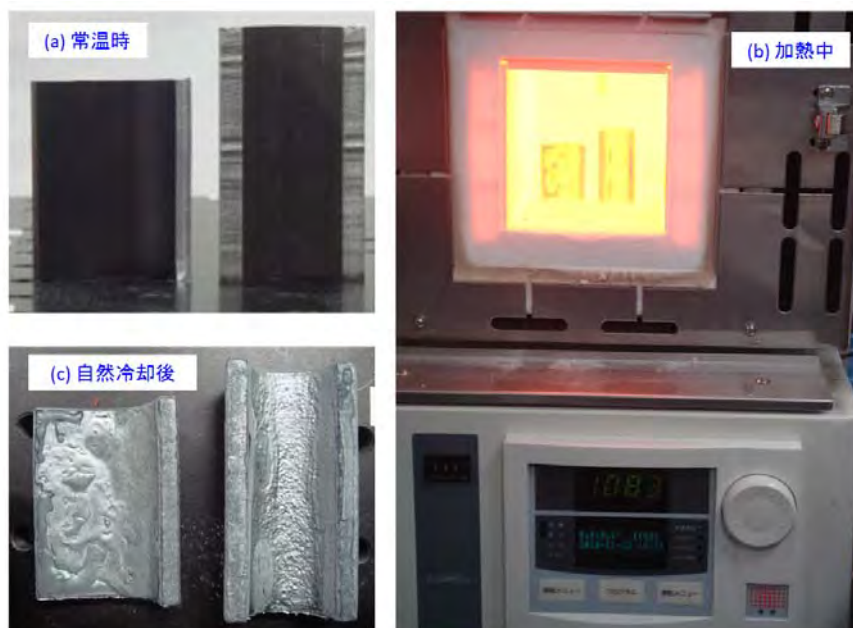


図9 電気炉内雰囲気 1,200 度下で赤熱する試験片と、加熱前後の試験片の様子

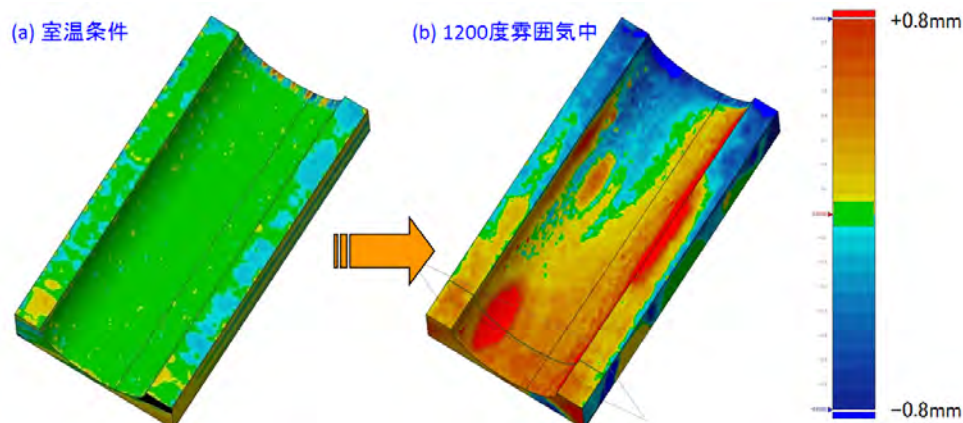


図10 高温化での試験片の形状変化の様子

6. おわりに

周波数シフト帰還型レーザ (FSFL)を用いる光周波数差法による距離測定は、1 m 以下の近接から数十 km の距離までを、大気の揺らぎなど測定環境の影響を別にすれば測定精度は基準周波数ソースの精度まで利用できる。この特性を生かして大型構造物の形状変化や三次元形状の計測が可能な光三次元計測機を開発し、その展開事例を紹介した。橋梁挙動解析では、次々と老朽化が進む橋梁の診断計測手法として 2 台の FSFL-OCMM による計測事例を紹介した。高温物体の計測では、眩しいほどに灼熱した金属片の計測を取り上げた。新たな材料開発や加工技術への貢献も期待され、計測温度限界を把握したいと考えている。

ところで、弊社には 10 m を越す大型製品の計測や、精度要求 (2 σ)10~50 μm という高精度計測という、方向性が全く異なるテーマが日々飛び込んでくる。従来不可能と考えられてきた計測も、多様化する計測機によって成し遂げられてきた。FSFL-OCMM も我々もその一翼を担えれば幸いである。

謝辞

東北大学大学院工学研究科 小川和洋准教授には高温物体の計測でご指導いただいた。この場を借りて御礼申し上げます。

【原 武文 (株式会社 3D イノベーション) /加工・計測分科会】

参考文献

- [1] 吉澤 編、「光三次元・産業への応用」、アドコムメディア、2008, ISBN 978-4-915851-33-9.
- [2] Nakamura et. al., "Optical Frequency Domain Ranging by a Frequency-Shifted Feedback Laser", IEEE J. QE, 36, 305, 2000.
- [3] 原、Ndiaye、伊藤、「周波数シフト帰還型レーザーによる超高精度光計測技術」、応用物理、74, 697 (2005).
- [4] 原、伊藤、「光プローブを用いた遠隔三次元形状計測・周波数シフト帰還型レーザーによる遠隔高精度光計測」、検査技術、16, 20 (2011).
- [5] 電気学会編、「光センシングとレーザー」、コロナ社、1997, p. 250-255, ISBN 4-339-00681-5.