

レーザーセンシングによる橋梁モニタリングシステムの試作 A Bridge Monitoring System Using Laser Sensing

永井 甫¹⁾ 猪村 元²⁾ 渡邊 拓貴¹⁾ 橋爪 宏達³⁾ 杉本 雅則¹⁾
Hajime Nagai Hajime Imura Hiroki Watanabe Hiromichi Hashizume Masanori Sugimoto

1 はじめに

戦後から高度経済成長期にかけて、多くの橋梁やトンネルといったインフラが建造されたが、経年による老朽化が問題視されている。日本国内では、耐久年数の目安となる50年を超える橋梁は今後20年で約7割となる[1]。橋梁の整備は、従来は人の手による打音や目視による点検が主流であったが、対象の橋梁数が膨大な上、人口減に伴う技術者の不足、人件費の高騰や点検の見落としなどの問題がある。このような理由から緊急で修繕が必要な橋梁をリアルタイムで検知する自動モニタリングシステムが求められている。そのためには、どのような変化や異常を検知する必要があるのかの調査や、長期間の常時計測の実施が必要である。本稿では、レーザーセンシングを用いた橋梁モニタリングシステムの試作を行った。実際に橋梁にて計測実験し、先行研究である設置型センサの変位計との比較を行い、提案手法の有効性を考察した。

2 関連研究

ここでは、インフラの自動モニタリングの関連研究について述べる。本稿の実験を行った橋梁では、主に先行研究として加速度計や変位計を用いた研究が行われている[2]。また、橋梁に取り付けずバスの車体の下に加速度計を取り付け、橋梁の上を走行することにより、振動を取得し分析した研究もある[3]。本研究と加速度計や変位計などの接触型センサとの違いとして、対象に設置する必要がないため、設置が容易である点や、カメラを用いた場合、広範囲の測定への拡張が可能であるという利点がある。加速度計と比べては、変位が積分の必要なく取得できるため、解析が容易であり、低周波に対しての信頼度が高いことも利点である。レーザーセンシングやカメラを用いたインフラの研究は現在盛んに行われている[5][6]。

3 提案手法

3.1 測定原理

本稿では、光切断法と位相差測距方式という2種類のレーザーセンシングを用いたシステムを構築。光切断法の概要を図1に示す。

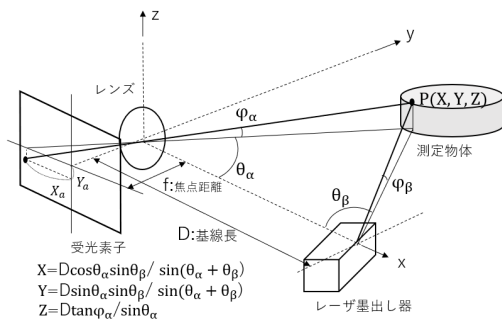


図1 光切断法

- 1) 北海道大学大学院情報科学研究科
- 2) 東京大学
- 3) 国立情報学研究所

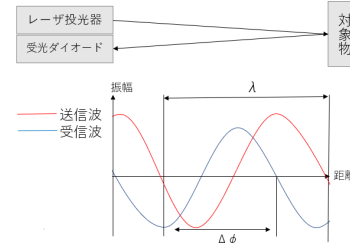


図2 位相差測距方式

光切断法は、ラインレーザを照射した対象をカメラで撮影することで、対象までの距離を三角測量の原理で導出できるカメラの内部パラメータをあらかじめ推定しておき、測定機器の位置関係を既知とする。座標 (X, Y, Z) を求める計算式は以下ようになる。

$$X = D \cos \theta_\alpha \sin \theta_\beta / \sin(\theta_\alpha + \theta_\beta) \quad (1)$$

$$Y = D \sin \theta_\alpha \sin \theta_\beta / \sin(\theta_\alpha + \theta_\beta) \quad (2)$$

$$Z = D \tan \phi_\alpha / \sin \theta_\alpha \quad (3)$$

ただし、 $\theta_\alpha = \tan^{-1}(f/X_a)$ 、 $\phi_\alpha = \tan^{-1}(Y_a \cos \theta_\alpha / X_a)$ 、 X_a, Y_a は、画像中心からのピクセル数、 f はカメラの焦点距離、 D は基線長、 $\phi_\alpha, \phi_\beta, \theta_\alpha, \theta_\beta$ は図1に示す角度である。

次に、位相差測距方式の概要を図2に示す。照射したレーザー光が物体で反射し、戻ってきた反射光との位相差を測定することから測定物までの距離 X を導出できる。計算式を以下で示す。

$$X = (n\lambda + \Delta\phi) / 2 \quad (4)$$

なお、 n は波長の数、 λ は波長の長さ、 $\Delta\phi$ は位相差である。

3.2 システム構築

実際に構築した光切断法のシステムを図3に、位相差測距方式のシステムを図4に示す。光切断法で使用するカメラは 4096×3000 の画素数のものを使用し、焦点距離250mmの望遠レンズを取り付けてピクセルを拡大する。一定時間撮影した複数枚の画像を図5で示すブロック図のようにノイズ除去などの処理を施した後に、変位の時間波形とする。位相差測距方式は、角度計から得られた角度により計測結果を Z 変位(鉛直方向)に変換する。

4 実験

構築したシステムを検証するために、東京都にある橋梁の形をなす自動車道の高架下で実地検証を行った。実験の様子を図6で示す。対象の橋梁は車両通行によって振動し、その振動を取得する実験となる。レーザー照射箇所は、変位計を設置している箇所と同じ場所を照射し、計測する。カメラの周波数は20~30fps、位相差測距方式のレーザーは約20Hzで距離を算出する。計測は日中に行い、対象のとの距離は約5mであった。



図3 光切断法システムの構成図 図4 位相差測距システムの構成図

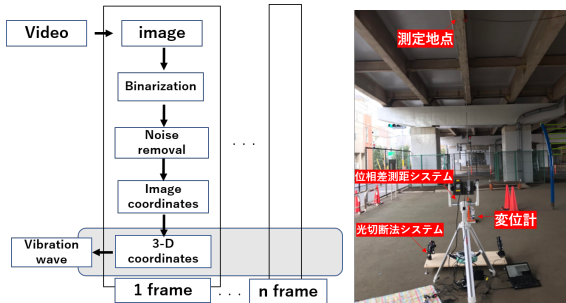


図5 画像処理ブロック図 図6 実験の様子

5 実験結果

光切断法による変位の測定結果を変位計のデータと比較した結果を図7に、位相差測距方式による測定結果を変位計のデータと比較した結果を図8に示す。なお、どちらもZ軸成分の変位を算出し、計測したデータの一部を10秒間で切り出している。また、図7の区間をフーリエ変換した結果を図9に、図8の区間をフーリエ変換した結果を図10に示す。

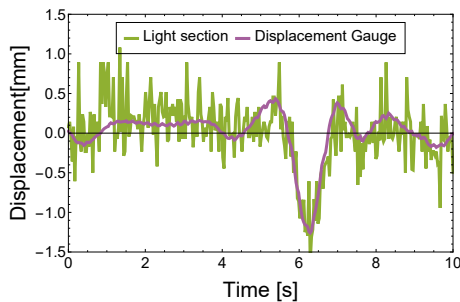


図7 光切断法と変位計の比較

今回比較対象にした変位計の測定の不確かさは、 $0.005 \pm 0.01\text{mm}$ と高性能のものである。変位計を真値として、RMSエラーをそれぞれ求めると、光切断法は、約 0.30mm 、位相差測距方式は、約 0.22mm であった。図7,8で確認できるように、両手法とも変位計と比較して、振動の概形をとらえている。また、周波数の特性として、 1Hz 付近に強い周波数が確認できる。しかし、 1Hz より高周波では、光学系ノイズと考えられる周波数が見られる。

6 まとめと今後の課題

本稿では、橋梁の変化や異常を検知するために非接触型で振動を取得できるレーザーセンシング測距システムの試作機を提案し作成した。また試作機を用いて、実際に橋梁での計測実験を行った。検証実験において、既存の設置型高性能変位計と比べて、 1mm 未満での測定精度がある

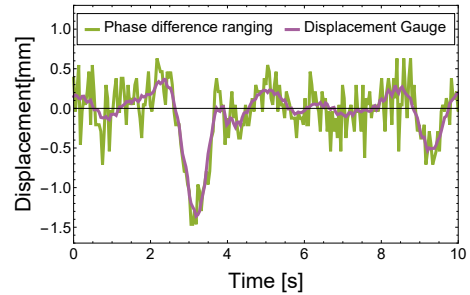


図8 位相差測距方式と変位計の比較

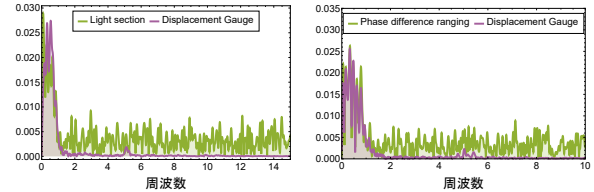


図9 図7の周波数分布 図10 図8の周波数分布

ということがわかった。しかし、光学系に由来するホワイトノイズなどによる影響が見られる、今回の計測は、日中に屋外で行ったため、環境光による影響も大きいと考えられる。光切断法と位相差測距方式を比較すると、光切断法のほうがRMSエラーが高く、環境光に弱いと考えられる。この結果を受けて今後は、レーザー光の出力を強いものに代えることや、レーザー光のライン幅を狭いものにするなど測定精度の向上を目指す。また、計測器自体が振動することによる計測誤差への対応や、モニタリングには長期的な振動の変化の計測が必要なため、長時間の安定した計測ができるシステムの作成も今後の課題である。

謝辞 本研究の一部は、内閣府総合科学技術・イノベーション会議の「SIPインフラ維持管理・更新・マネジメント技術」(管理法人:NEDO)によって実施されました。

参考文献

- [1] 国土交通省 北陸地方整備局 HP 資料「予防保全の取組み v3」 http://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/yobol_1.pdf, 2019年06月17日訪問
- [2] 平成26年度～平成27年度成果報告書 SIP (戦略的イノベーション創造プログラム)/インフラ維持管理・更新・マネジメント技術 インフラの多種多様なセンシングデータを処理・蓄積・解析する技術の開発 インフラセンシングデータの統合的データマネジメント基盤の研究開発 https://www.nedo.go.jp/library/seika/shosai_201610/20160000000795.html, 2019年06月17日訪問
- [3] 宮本文穂, 江本久雄, 矢部明人: 路線バスを利用した中小橋梁モニタリングシステムの実証実験, 山口大学工学部研究報告 66(2), 1-20, (2016)
- [4] 清水智弘, et al.: 3Dモデルを用いた橋梁維持管理システムの開発, 土木学会論文集F3(土木情報学) 69.2, L45-L53, (2013)
- [5] Abolhasannejad, Xiaoming, Namazi: Developing an Optical Image-Based Method for Bridge Deformation Measurement Considering Camera Motion, 18(9), 2754, Sensors 2018 (2018)
- [6] Artese, Serena, Vladimiro Achilli, and Raffaele Zinno: Monitoring of bridges by a laser pointer: Dynamic measurement of support rotations and elastic line displacements: Methodology and first test, 18.(2), 338, Sensors 2018 (2018)