

実構造物の非接触スキャンニング 振動計測システムの開発

貝戸清之¹・阿部雅人²・藤野陽三³・本村均⁴

¹正会員 博士(工学) コロンビア大学客員研究員 土木工学専攻 (500 West 120th Street, New York, NY 10027)
(研究当時 東京大学大学院博士課程)

²正会員 Ph.D 東京大学助教授 大学院工学系研究科社会基盤工学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

³フェロー会員 Ph.D 東京大学教授 大学院工学系研究科社会基盤工学専攻 (同上)

⁴正会員 日本道路公団試験研究所保全研究室室長 (〒194-8508 東京都町田市忠生 1-4-1)

著者らはこれまで、構造物の振動モニタリングの合理化を視野に入れ、レーザードップラ速度計を用いた非接触スキャンニング振動計測システムを室内実験において構築してきた。しかし、実構造物の振動計測では計測対象がレーザー反射率の低いコンクリートや汚れの付着した鋼材となることが多く、レーザードップラ速度計の適用には克服すべき課題がある。そこで本研究では、レーザー戻り光量が計測対象の表面状態に依存するという問題を計測点ごとに戻り光量が最大となる点を自動探索することで解決し、システムの改良を行った。これにより実構造物を対象とした際の計測精度の大幅な改善を図った。一例として、実橋の鋼桁および RC 床版の振動計測を行い、計測精度を実証するとともに部材固有の部分振動モード形の同定を可能とした。

Key Words: laser doppler vibrometer, non-contact & scanning vibration measurement, identification, mode shape, steel girder, reinforced concrete deck

1. はじめに

構造物のモニタリングは、理論モデルと実計測データとをつなぐ媒体としての役割を期待されている。実際に、構造物の性能評価、損傷同定、精緻な構造モデルの構築および維持管理を目的として、振動という手段を用いたモニタリングが盛んに行われるようになってきた^{1),2)}。これは、近年のセンサー計測精度やコンピュータ技術の飛躍的な発展に加え、振動特性に対する様々な同定手法が体系化されつつあることが背景にある³⁾。

このような状況のなかで、より詳細な振動情報、例えば高振動数成分の振動特性や、さらに固有振動数や減衰比といった情報に加えて空間情報である振動モード形を把握したいという要望が高まっている。実際に、損傷同定では、高次の振動モード形が初期の局所的な損傷検出に有効であると報告されている⁴⁾。しかし、現状の振動モニタリングで用いられるセンサーは、接触型の加速度計が主流であり、高次の振動モード形を得ることは極めて難しい。その理由としては、センサーの高振動数領域に

おける精度不足のみならず、センサー数が増加することによる設置作業の負担が増すことがあげられる。これは、構造物が大型になるほど、無視できなくなる問題であり、センサーとしては非接触かつ多点計測が可能なものを使用することが望ましいところである。

さらに、振動計測における作業の効率を考えると、入力としては供用状態における常時微動を用いることが望ましい。しかし、常時微動は、その要因が多岐にわたるためにそれ自身の計測が難しく、非定常であるのに加え、振動振幅が微小である。そのため、用いるセンサーは、微小振動を高振動数成分まで高精度に計測することが可能なものでなければならない。

これまでに著者らは、これらの問題点を解決し得るセンサーとしてレーザードップラ速度計に着目し、非接触スキャンニング振動計測システムを構築してきた。さらに、常時微動計測に対する実用性と信頼性の向上を図りつつ、その計測結果に基づいた振動モード形の同定手法についても提案した^{5),6)}。レーザードップラ速度計は従来機械振動の分野^{7),8)}での適用が主流で、計測対象の加振が容

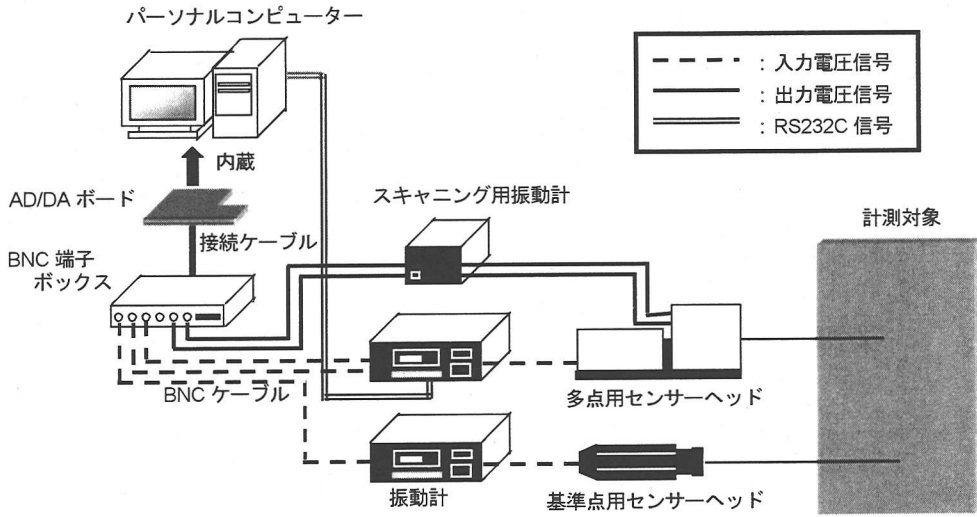


図-1 レーザードップラ速度計を用いた非接触スキャニング振動計測システム

易かつ加振力の計測が可能であったために、確立されたモード解析を用いることができた。これに対し、著者らの研究は、未知の常時微動入力作用下において振動モード形の同定を実現しており、実構造物への適用という見地からすると一歩進んだものであると考えている。しかし、実験はノイズレベルが低い室内で、レーザー反射率の高い鋼板を対象として実施されたものであったので、実用化に際しては未知の面が多分にあった。なかでも、実構造物では、振動計測の対象は汚れが付着したコンクリート部材や塗装された鋼材であり、レーザー反射率の低下によって計測精度が大幅に低下することが問題となると予想された。通常レーザー反射率が低い場合には計測対象に対して反射テープ等による表面処理を行うが、実構造物ではそれらによる解決は非接触計測の利点を損なうことになる。

以上を踏まえ、本研究では実構造物の振動計測に対して適用可能な非接触スキャニング振動計測システムを開発することを目的とする。

そのために、システムのハードウェア面に関して、レーザー戻り光量が不足して計測精度が低下する計測点に対しては、その計測点周辺でレーザー戻り光量の計測を行い、戻り光量が最大となる点を自動的に探索する機能を追加することで計測精度の改善を図る。一方、ソフトウェア面に関しては、戻り光量不足に起因する光学ノイズの判定基準を新たに設けることとする。

実構造物の振動計測の実例として、鋼桁およびRC床版の走行荷重作用下においてスキャニング振動計測を実施した。計測精度を実証した後、非定常かつランダムな振動データから部材固有の部分振動モード形を同定することを可能とした。

表-1 レーザードップラ速度計性能諸元

レーザータイプ	He-Ne レーザー
波長	633nm
レーザー出力/クラス	2.3mW/IIIa
計測可能距離	~100m
分解能	0.5μm/s
計測可能周波数帯域	0Hz~35kHz
レーザー照射角	-15~15度

2. レーザー反射率の低い部材を対象とした非接触スキャニング振動計測システムの構築

(1) レーザードップラ速度計と非接触スキャニングシステムの概要

レーザードップラ速度計は、レーザー光を移動物体に照射し、その照射光と反射光との位相差 $\Delta\theta$ から下式を用いて速度を検出する光学式干渉計である。

$$\Delta\theta = \frac{4\pi t}{\lambda} V \quad (1)$$

式中、 t は時間、 V は移動物体の速度、 λ はレーザー光の波長をそれぞれ表す。

非接触スキャニング振動計測は、レーザードップラ速度計のセンサー内部に取りつけた2枚の反射鏡を自動制御することにより行う⁵⁾。構築したシステムの概要を図-1に示す。パーソナルコンピュータでは、計測時間や計測点数等の条件の入力から、反射鏡の制御、データの取りこみおよび計測結果のリアルタイム表示までを一括して管理・実施する。なお、本研究で用いたレーザードップラ速度計の性能諸元を表-1に示す。

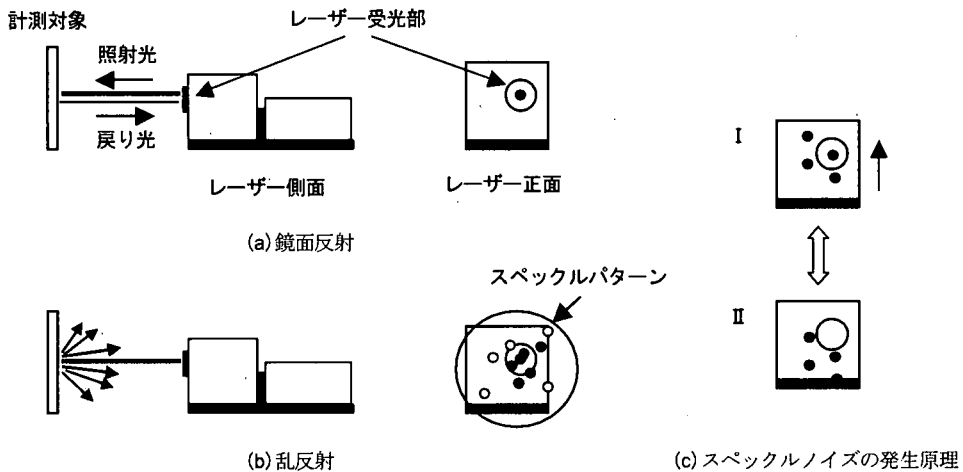


図-2 受光漏れに起因する光学ノイズの発生原理

実橋における振動計測を想定すると、①コンクリートや汚れた鋼部材が計測対象で、かつ計測距離が長く、レーザー照射角が大きくなるのでレーザー戻り光量が低下する、②周辺環境のノイズレベルが高くなる、③走行荷重が作用するために振動計測結果は非正常性が強く、振動モード形の同定が困難となるといった問題が生じてくる。

周辺環境のノイズに関する主たる問題は、レーザードップラ速度計自身が振動することである。これについてはセンサーの防振対策、さらにはセンサーの振動を別のセンサーによって計測してレーザードップラ速度計により計測された時系列からこれを減算することで対処することができる。

また、文献 6) では、強い非正常性を有する振動計測結果に基づく振動モード形の同定に関しては、基準点計測用のレーザードップラ速度計を追加することで対処し、実際に衝撃加振入力時の振動計測結果から振動モード形の同定を実現している。

レーザー戻り光量の低下に関しては、それによって生ずる光学ノイズの混入が少なければ、フィルタ等による信号処理で除去することができる。しかし、計測が不可能となるレベルの光学ノイズが混入する場合にはハードウェアやソフトウェアに新たな改良が必要となる。これらについては、次節以降で詳細に述べる。

(2) レーザー戻り光量最大点の自動探索

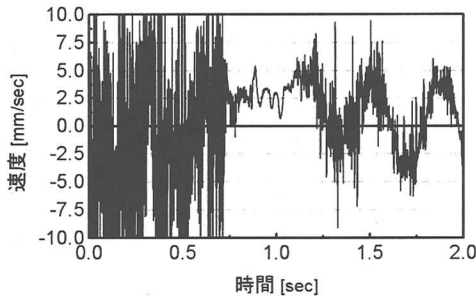
振動計測が不可能となる不良計測点では、レーザー戻り光量不足により、光学ノイズが数多く生じている。この戻り光量不足の要因としては、以下の 5 つがあげられる。レーザードップラ速度計自身に関しては、①

レーザー出力の安定性があげられる。計測対象に関しては、レーザーに対する②低反射特性、または③乱反射特性があげられる。計測条件に関しては、④計測距離、⑤レーザー照射角度があげられる。

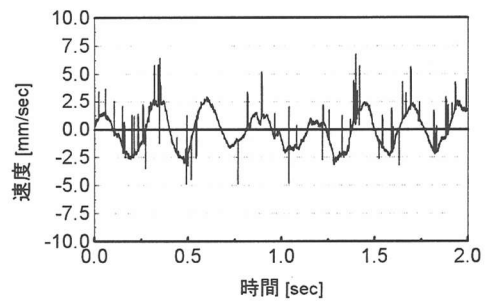
①と②では、図-2(a)に示すようにたとえ鏡面反射するものを対象とした場合であっても受光部で検出される戻り光量が直接低下することになるために、光学ノイズが発生する。③では、図-2(b)に示すように乱反射することで戻り光量が分散されるために、受光部で検出される戻り光量が少なくなる。このときの戻り光量の分散の様子はスペックルパターンと呼ばれている。これに④、⑤の条件が加わると、さらに受光部において受光できる戻り光量が減少する。これらは受光漏れに起因する光学ノイズである。その計測例を図-3(a)に示す。

一方、図-3(b)に見られるようなスパイク状のスペックルノイズが発生することもある。このノイズも受光漏れに起因する光学ノイズの一種であり、発生原理は以下のとおりである。図-2(c)の I の状態にあったスペックルパターンがセンサー自体の振動、または計測対象のレーザー照射方向以外への振動により、例えば同図中の矢印の方向に一瞬移動する。そうすると、II のように受光部で検出できる戻り光がない状態となってしまう、受光漏れが生ずる。しかし、先のノイズとは異なり、この状態は瞬間的に起こるためにノイズはスパイク状となって現れる。

実構造物へのレーザードップラ速度計の適用は、この光学ノイズを如何に低減し、さらに取り除くかが重要となる。①については、計測を開始するまでに十分なウォーミングアップの時間を取ることである程度の



(a) 受光漏れによるノイズ



(b) スペックルノイズ

図-3 受光漏れによるノイズの計測例

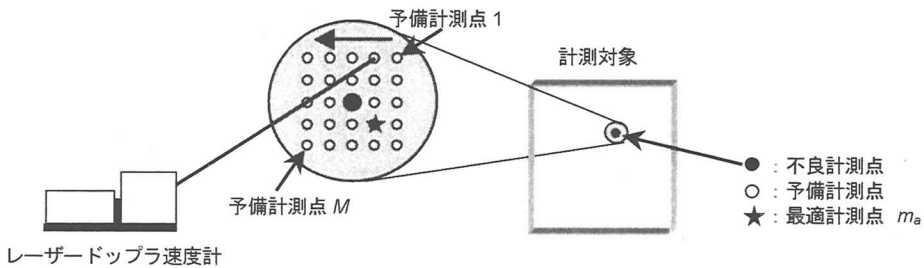


図-4 レーザー戻り光量最大点の自動探索

改善が可能である。また、本器はレーザー出力を通常の1[mW]から2[mW]に改良しており、出力が低下する場合に対しても対処している。ただし、これ以上出力を高めると、レーザー使用時に保護メガネの着用や使用届の提出といった法的制限がかかるために、屋外での計測が困難となる。④、⑤については、変更を施すと実構造物の非接触スキャン計測の利点を損なうことになってしまう。したがって、②、③について改善を図ることが計測精度の向上につながる。

著者らは、これまでに計測対象の反射特性や乱反射特性がその表面状態に大きく依存し、レーザー照射点を微妙に変化するだけでも戻り光量が全く異なることを経験している。そこで、不良計測点に対しては、この特性を逆に利用し、その計測点周辺で相対的にレーザー戻り光量が最大となる計測点を探索して新たな計測点として置き換え、計測精度の向上を図ることとした¹⁰⁾。

具体的には、不良計測点に対しては、その計測点近傍の数点（これを予備計測点と呼ぶ）について、それぞれレーザー戻り光量の時系列を計測する。その概念を図-4に示す。戻り光量は、振動計内部で電圧値に変換し、その電圧値を図-1のように入力2chからADコンバータを通してパーソナルコンピュータに時系列として保存する。予備計測点ごとに計測される戻り光量

の時系列からその平均値を算定する。例えば、 i 番目の予備計測点における平均値 \bar{x}_i は、次式で与えられる。

$$\bar{x}_i = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_i(k) \quad (i=1,2,\dots,M) \quad (2)$$

式中、 N は総データ数、 M は総予備計測点数を表す。次に、全ての計測点の中から最大平均値 \bar{x}_a を与える点を最適計測点 m_a として選定し、新たな計測点と設定する。

$$\bar{x}_a = \max(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_M) \quad (1 \leq a \leq M) \quad (3)$$

これより、実構造物に対しても反射テープ等の表面処理をすることなしに、レーザードップラ速度計による非接触計測が可能となる。ただし、レーザー出力の安定性などを考えると、選定された最適計測点 m_a が常に計測に十分な戻り光量を与え得るとは限らない。そこで、光学ノイズに対する判定基準を定め、規準を満たす振動計測結果が得られるまで m_a での計測を繰り返すこととした。ノイズの判定基準については次に述べる。

(3) 受光漏れによる光学ノイズの判定基準

ソフトウェア部においては、不良計測点の決定、すなわち受光漏れによる光学ノイズの判定が計測精度の

向上のために重要となる。参考文献 11)では、このノイズの判定は、設定した基準値を超える値が振動計測結果中に存在するかどうかによって行っている。しかし、走行荷重のような非正常入力が発生する場合には、振動計測ごとに振幅が異なるために基準値を設けることはできない。そこで、以下のような2段階のデータ処理を行うこととする。

第一段階は、図-3(a)に見られるようなノイズを含む振動計測結果の除去を目的とする。本器は、速度信号を±10[V]の範囲で電気信号に変換し、収録している。具体的には図-3(a)の場合、用いた速度レンジは1[mm/sec/V]であるので、このときの最大速度は10[mm/sec]となる。実際に、受光漏れによるノイズはこの最大値を超えていることから、最大値をしきい値にしてノイズを判定することができると考え、その振動計測結果を収録しないものと定める。そのために、新たにパーソナルコンピュータのシリアルポートからRS232 ケーブルを通して最大速度を超えるデータの有無を計測時に確認する。振動計測システムは、図-1に示したとおりである。シリアルポートからコマンドOIRを送信する。OIRは最大電圧値を超える入力を検出するコマンドで、この場合には速度時系列 $v(t)$ が最大速度 R を超える場合には1、超えない場合には0を返すとした。

$$v(t) \leq R \rightarrow OIR = 0 \quad (4)$$

$$v(t) > R \rightarrow OIR = 1 \quad (5)$$

最終的に、振動計測結果中にOIR=1を有するものについては収録しないこととする。

第二段階では、最大速度を超えないスペックルノイズに対する処理を行う。スペックルノイズは図-3(b)に示すように最大速度を超えないことも多く、第一段階の判定によって除去しようとする、健全なデータも除去されることになり、不必要に計測時間を費やしてしまう。そこで、この種のノイズに対しては、同一点での振動計測を繰り返し、振動数領域で速度振幅スペクトル $V(\omega)$ を平均することにより低減を図る。これは、

$$\bar{V}(\omega_j) = \frac{1}{N_A} \sum_{k=1}^{N_A} V_k(\omega_j) \quad (6)$$

として表すことができる。式中、 $\bar{V}(\omega)$ は速度振幅スペクトルの平均値、 N_A は繰り返し計測回数である。 N_A については4.(4)節で統計的判断による決定手法を述べる。著者らは、参考文献6)で振動数領域における固有振動数と振動モード形の同定手法を提案しており、式(6)の速度振幅スペクトルの平均値をそこに適用することで、スペックルノイズの影響を除去した状態で同定を行うことが可能となる。

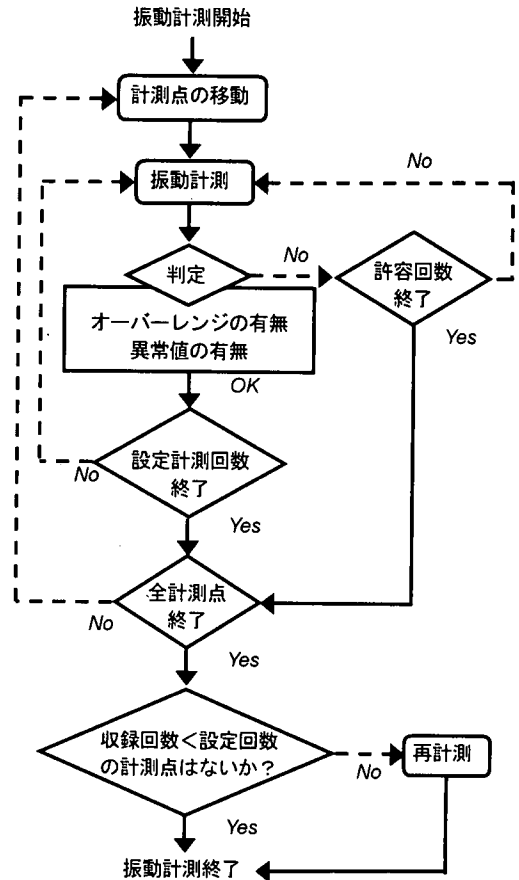


図-5 振動計測アルゴリズム

(4) 振動計測の流れおよび振動モード形の同定手法

以上の手法を組み込んだ振動計測の流れを図-5に示す。設定した数の計測点に対して、先述したスペックルノイズレベルの低下を目的とする平均に必要な計測回数 N_A だけ計測点ごとの振動計測を実施する。これらの時系列に対して、提案したノイズ判定手法に基づいて振動計測結果の良し悪しを判断する。

このとき、繰り返し計測回数とは別に計測許容回数 N_R を設定し、これを超える計測点については、その時点で一時計測を打ち切り、再計測を行う。再計測では不良計測点ごとにレーザー戻り光量の最大となる最適計測点を自動探索し、繰り返し計測回数に達するまで振動計測を行う。

振動モード形の同定では、常時微動のような非正常入力を対象とすること、レーザードップラ速度計は多点同時計測が不可能であることから、基準点計測用のレーザードップラ速度計を1基追加した。多点計測用および基準点用レーザードップラ速度計のそれぞれの速度振幅スペクトルの平均値からクロススペクトルの

表-2 加速度計性能諸元

分解能	0.00001m/sec ²
最大計測可能加速度	0.1m/sec ²
応答周波数	0.1~100Hz
最大サンプリング周波数	1000Hz
入力電圧	±10V

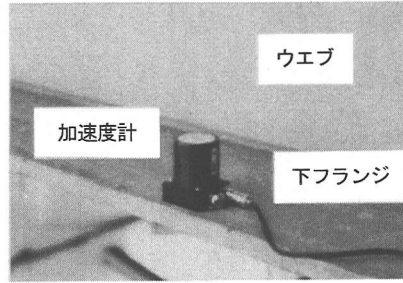
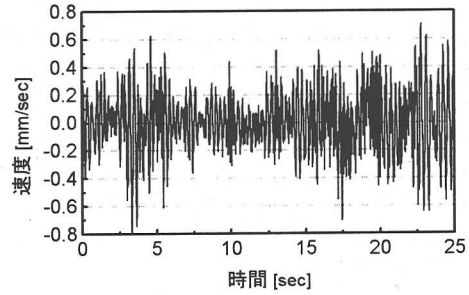
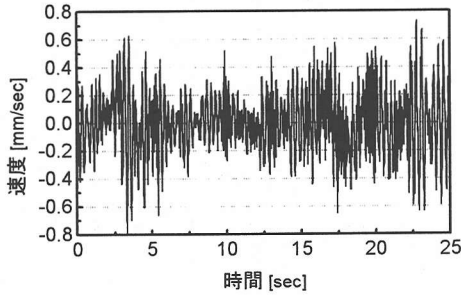
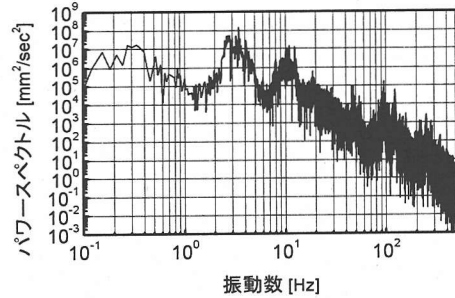
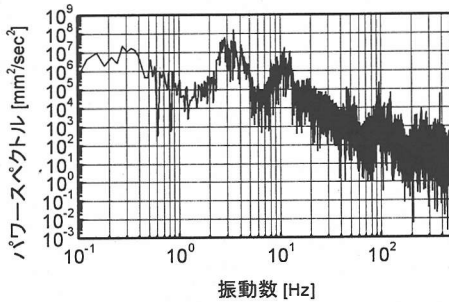


図-6 加速度計設置状況



(a) 時系列比較 (左：レーザードップラ速度計，右：サーボ型加速度計)



(b) パワースペクトル比較 (左：レーザードップラ速度計，右：サーボ型加速度計)

図-7 レーザードップラ速度計の計測精度検証

平均値 $X_{kref}(\omega)$ を求め、そのピーク振動数から固有振動数を同定する。さらに、このクロススペクトルの平均値を出力、基準点でのパワースペクトル $|X_{kref}(\omega)|^2$ を入力として計測点ごとに次式で表される伝達関数 $T_k(\omega)$ を算出する。

$$T_k(\omega) = \frac{X_{kref}(\omega)}{|X_{kref}(\omega)|^2} \quad (7)$$

このとき、固有振動数に対応する伝達関数の振幅から振動モード振幅を、位相からモードの位相を決定する。なお、同定理論の詳細については、参考文献6)を参照されたい。

3. 鋼桁振動計測

(1) 橋梁および実験の概要

対象としたA橋梁は5主桁、RC床版を有する高架橋である。レーザ振動計測は鋼桁を対象として実施し、その部材固有の振動モード形を同定することを目的とした。レーザードップラ速度計は、鋼桁から約11.5[m]離れた地上に設置した。橋は供用状態であったので入力を実交通荷重となる。

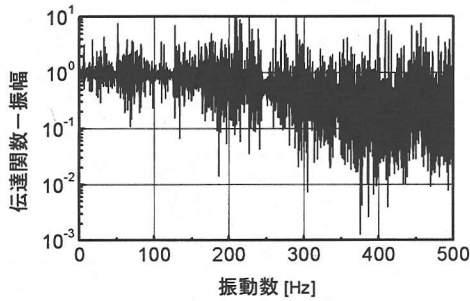


図-8 伝達関数による計測精度検証

(2) 計測精度の検証

レーザードップラ速度計の計測精度を検証するために、鋼桁下フランジ上にサーボ型加速度計（性能諸元は表-2に記載）を設置し、常時微動を入力とした時の応答を比較した。サーボ型の加速度計の設置状況は図-6に示すとおりである。一方、レーザー光は加速度計設置点と同一点に桁下から照射した。レーザードップラ速度計は多点計測用を用いた。計測条件はともにサンプリング周波数 500 [Hz]、サンプリング個数 12500 個で、計測時間は 25 [sec] とした。また、地盤振動によってレーザードップラ速度計自身が振動することを防止するために、防振ゴム上にセンサーを配置した。ちなみに、レーザードップラ速度計の設置箇所での地盤振動を計測したが、桁の振動と比較すると、標準偏差で約 0.05 倍程度と小さいことを確認した。したがって、地盤振動の影響は小さいと考え、センサーに対しては防振ゴムによる処理以外は行っていない。

常時微動入力に対するそれぞれの振動計測結果を図-7(a)、パワースペクトルを図-7(b)に示す。ただし、加速度計により計測した加速度応答は、速度応答を数値積分した。応答は時間領域、振動数領域のいずれにおいても高い整合性を確認できる。その傾向は図-8のように、レーザードップラ速度計による速度応答を入力、加速度計による加速度応答を先と同様に積分して得た速度応答を出力として、式(7)から求めた伝達関数を図示することによっても確認できる¹²⁾。なお、同図において 200 [Hz] から整合性は低下しているが、これは用いた加速度計の応答特性が 100 [Hz] から徐々に低下していることによる。以上により、レーザードップラ速度計を用いた非接触振動計測は実橋においても可能であると判断した。

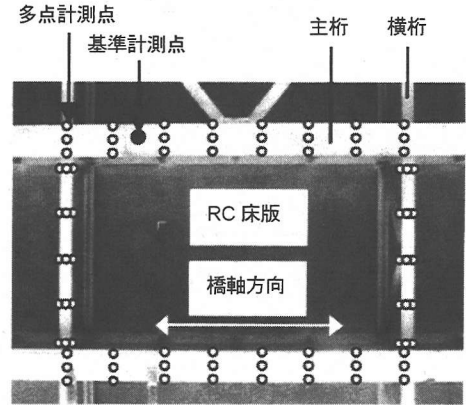


図-9 鋼桁計測点

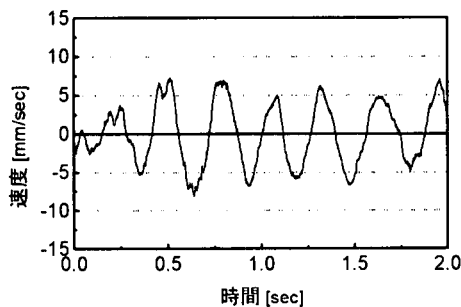
(3) 鋼桁の振動モード形の同定

鋼桁の振動モード形を同定することを目的として非接触スキヤニング振動計測を実施した。計測点は図-9に示すように、主桁に対しては橋軸方向に 8 点、橋軸直角方向に 3 点の計 24 点設け、横桁に対しては橋軸方向に 3 点、橋軸直角方向に 5 点の計 15 点設けた。総計測点数は、78 点であった。また、基準点に関しては数回の試行錯誤の後に、同図の●で示した位置に決定した。各計測点に対する計測条件は、サンプリング周波数を 1000 [Hz]、サンプリング個数を 2048 個、計測時間を 2.048 [sec] とした。また、平均値の計算に要する計測回数を 20 回、再計測までの許容回数を 30 回とした。

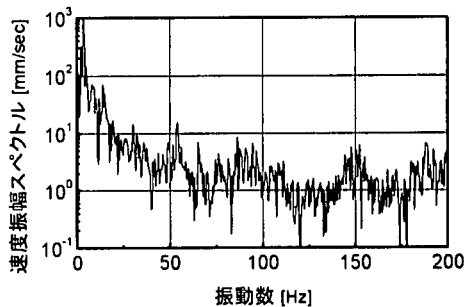
多点計測用レーザードップラ速度計による振動計測結果の一例を図-10に示す。この計測点におけるレーザー照射角は、橋軸方向に 0 度、橋軸直角方向 3 度であった。振動計測結果は、受光漏れによる光学ノイズが混入していない良好なものであった。実際に、鋼桁の汚れの付着はそれほどなく、再計測を要する不良計測点はなかった。

図-11は、基準点における振動計測結果を入力、計測点 1 における振動計測結果を出力としてクロススペクトルを算出し、それらを 20 回重ね合わせたクロススペクトルの平均値である。通常の振動計測結果から算出した場合には、最大信号成分とノイズ成分の振幅比で定義される S/N 比⁹⁾は 60 [dB] 程度であったが、平均化を行うことで S/N 比が 70 [dB] に向上した。

2. (4) 節の手順に従って同定された鋼桁の振動モード形は図-12に示すように 6 モードを同定することを可能にした。このうち、1 次は桁全体が一体となって振動する上部構造全体の振動モード形である。図中の丸囲み部分の振動が卓越しているが、これはこの付近に照明灯が設置されており、その支持部材の影響であっ



(a) 時系列



(b) 速度振幅スペクトル

図-10 鋼桁の振動計測結果の一例

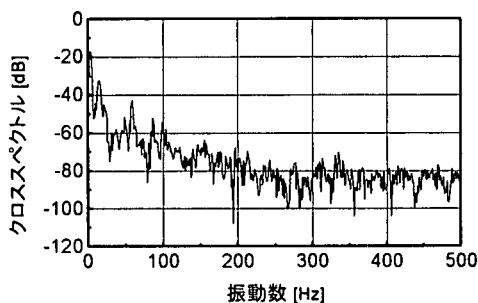


図-11 クロススペクトルの平均値

たとえられる。実際に2次モードでは、その部分のみが卓越して振動している様子が確認でき、その支持部材の固有振動数が13[Hz]付近にあるものと推察できる。3, 4, 6次モードは、図より判断して、いずれも鋼桁の固有のたわみ振動モードであることがわかった。以下、これらのように一部に関する振動モード形を部分振動モード形と呼び、上部構造全体のそれと区別することとする。5次モードも部分振動モード形であるが、とくに横桁のみが単独で振動している局所的な振動モード形である。以上より、レーザー常時微動計測を行うことで、部材固有の高次振動モード形までも精度よく同定することが可能である。

なお、ここでは、同定結果に対して解析結果との比較を行っていない。これは、計測対象が局所的なために、材料特性の不均一性や境界条件等を精緻にモデル化する必要があるが、そのような構造モデルを構築することが困難であることによる。ただし、計測精度については3.(2)節において加速度計との比較から100Hzまでの検証を行っている。100Hz以上の精度に関しては今回直接的には精度検証が行えなかったが、光学ノイズが混入していない良好な計測結果であれば、600Hzまで振動モード形の同定が可能であることを参考文献

6)で示しており、今回の振動計測結果および同定結果も妥当なものであったと考えている。

4. RC床版振動計測

(1) 対象橋梁および実験概要¹³⁾

対象としたB橋梁は図-13に示すように、4主桁、RC床版を有する高架橋である。振動計測は、RC床版半パネル(図-13中の黒塗り)を対象とした。RC床版は、コンクリート厚17[cm]で、7.5[cm]のアスファルト舗装がなされている。また、RC床版の表面状態は良好で、健全なものと判断された。

レーザードップラ速度計は、14[m]離れた地上に設置し、計測点数は橋軸方向9点、橋軸直角方向5点の計45点とした。RC床版に対する多点計測点および基準計測点を図-14に示す。1点あたりの1回の計測条件は、サンプリング周波数2048[Hz]、サンプリング個数4096で計測時間を2[sec]と設定した。先と同様、橋は供用状態にあるので、入力は走行荷重となる。

(2) RC床版の振動計測結果

レーザー照射角が、橋軸方向に2度、橋軸直角方向7度で、ともに今回計測中の最大照射角度であった計測点1における振動計測結果を図-15(a)に示す。これは、受光漏れによる光学ノイズが数多く混入した振動計測結果であり、通常コンクリートを対象としてレーザー振動計測を行った場合の例である。これに対して、図15(b)はレーザー戻り光量最大点の自動探索後の振動計測結果である。最適計測点を決定するに際しては、初回の振動計測点周りに121点の予備計測点を設け、それぞれについて戻り光量を0.5[sec]計測し、その時系列の平均値を算出した。これより、実際に自動探索を行うことで、コンクリートに対しても光学ノイズが混入しない振動計測結果を得ることができる。

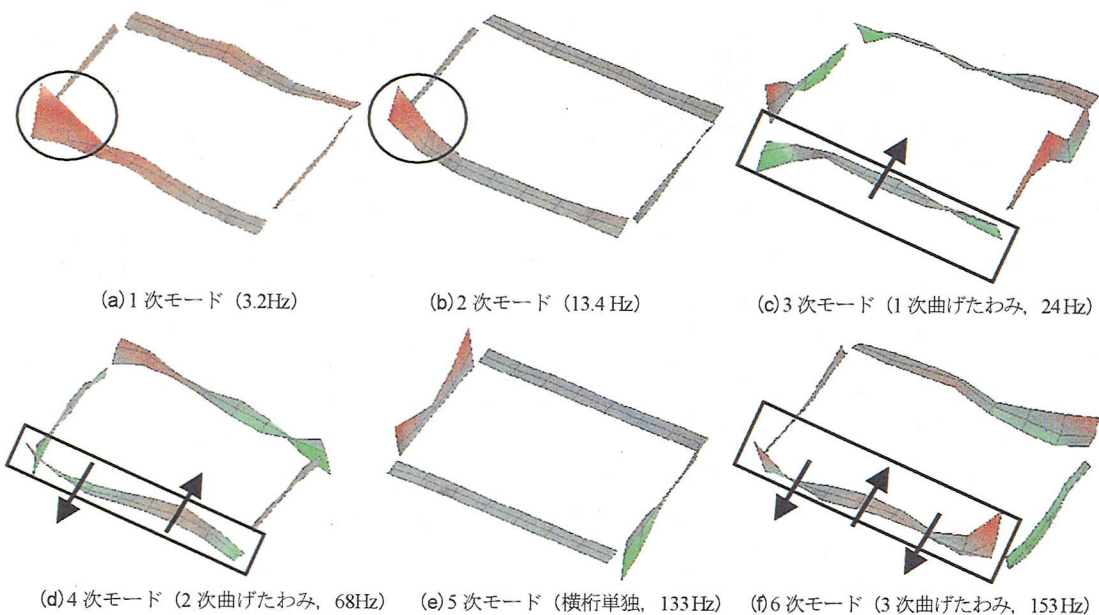


図-12 鋼桁の振動モード形

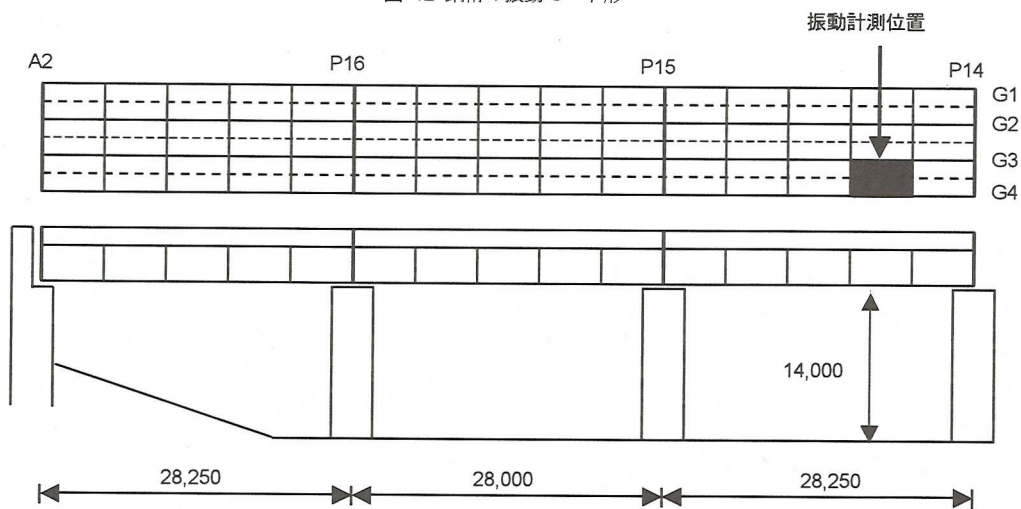


図-13 B 橋梁上面よび側面 (単位 mm)

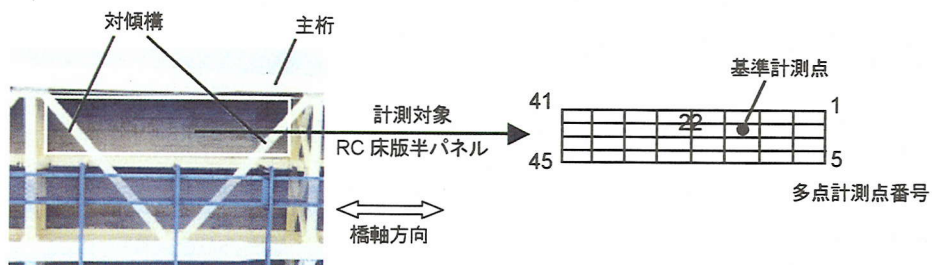
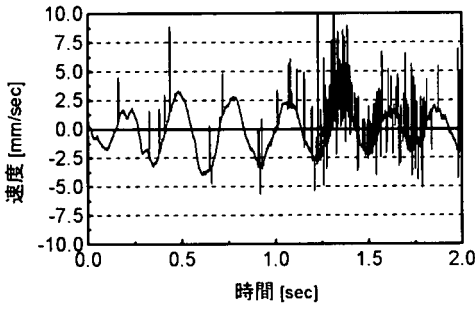
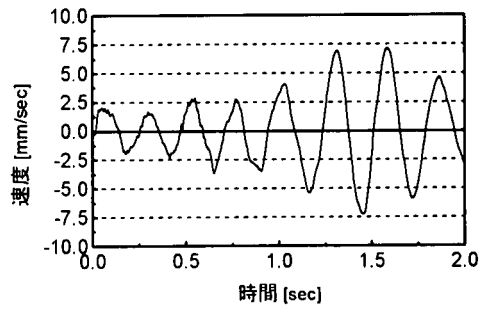


図-14 RC床版および計測点

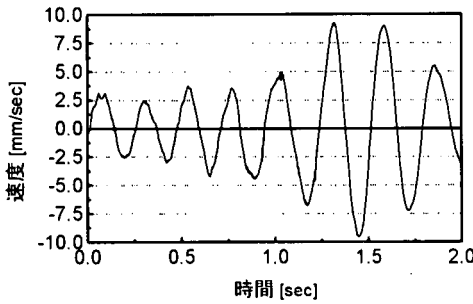


(a) 自動探索前

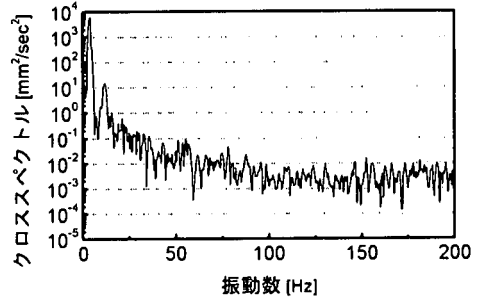


(b) 自動探索後

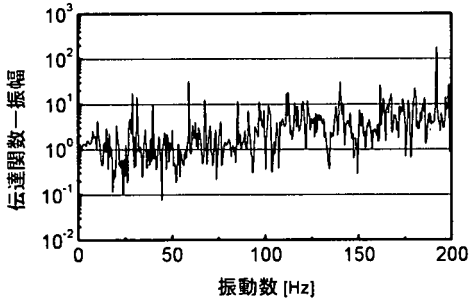
図-15 RC床版の振動計測結果の一例 (計測点: 1)



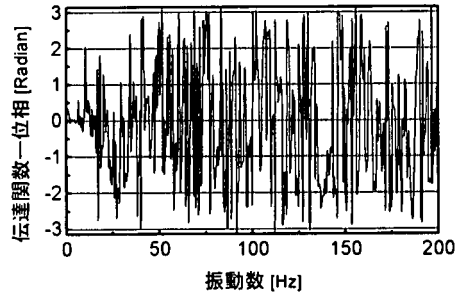
(a) 時系列 (基準点)



(b) クロススペクトル



(c) 伝達関数—振幅—



(d) 伝達関数—位相—

図-16 RC床版の振動計測結果, クロススペクトルおよび伝達関数

自動探索の結果, 図-15(b)では, 走行荷重による応答の非定常性も確認することができる。また, この図-15(b)と図-16(a)に示す基準点計測用の振動計測結果を比較すると, 両計測点が離れているにもかかわらず, 振幅等の特性はほぼ一致している。これより, RC床版の振動成分は, 床版全体が一体に動く, 上部構造全体の振動成分が卓越していると考えられる。

今回の振動計測では, 全ての計測点で再計測を行った。図-17には, 各計測点において行った再計測回数を示す。図は, 計測点ごとに, 平均に必要な20回の繰

り返し計測のうちの自動探索を行わない通常計測とそれを行う再計測の割合を示したものである。ただし, 計測点2, 9, 38, 45においては, 対傾向と計測点が重なったために, 振動計測を行うことができなかった。レーザー照射角が計測点22を中心として大きくなっているが, レーザー照射角と再計測回数, すなわち光学ノイズの混入量との間には相関が見られない。したがって, コンクリート部材では, レーザー照射角が計測精度に及ぼす影響は小さく, むしろその表面状態に大きく依存することが確認できる。

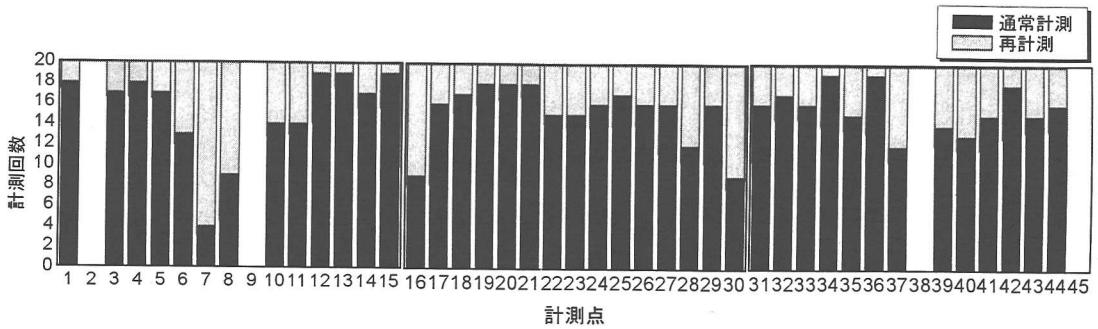


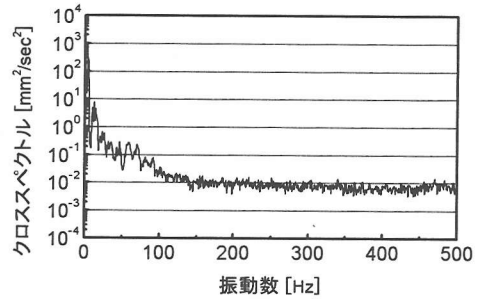
図-17 各計測点の再計測回数（計測回数：20）

(3) RC床版の振動モード形の同定

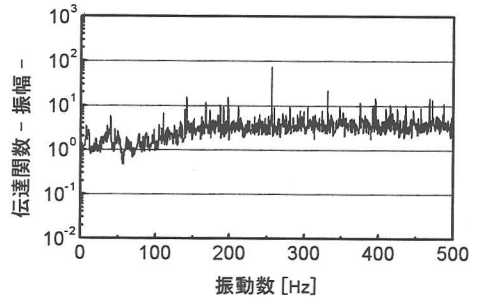
図-16(b)(c)(d)は、計測点1でのクロススペクトル、伝達関数の振幅と位相である。図-18に同一点において20回の平均を行ったクロススペクトルと伝達関数の平均値を示す。平均の回数に関しては、次節で提案する統計的手法に基づいて決定した。なお、位相は絶対値を取った。これらと図-16を比較すると、式(6)と同様の平均値を計算することでノイズレベルが低下している。

図-19は、レーザー常時微動計測結果を用いて同定したRC床版の部分振動モード形である。この際、計測が不可能であった2,9,38,45については、各々周りの3もしくは4計測点におけるモード振幅の平均値で補間した。今回の振動計測では、3次までのたわみ振動モード形について同定することができた。これは、走行荷重による衝撃的入力作用して、低い振動数の大振幅の振動が励起された、つまり低次の振動モード形が高次より励起されやすくなったためである。さらに高次の振動モード形を同定するには、ハードウェア面に関しては、手で調節しているレーザースポット径の照準を計測点ごとに自動調節し、精度を向上させること、また、ソフトウェア面に関しては、光学ノイズ判定基準を強化してS/N比の改善を図り、高次の微小ピークを検出する必要がある。

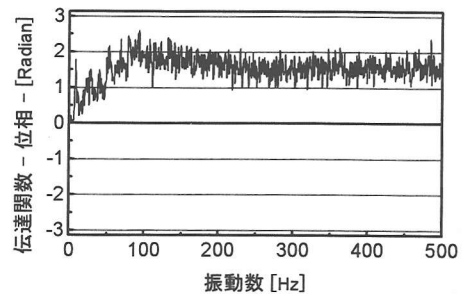
この点に関して一例を上げると、現在のノイズ判定基準では図-20のようなオーバーレンジに満たない光学ノイズを含む振動計測結果は収録されることになる。振動計測結果の振幅は小さいが、図-20(b)のようにパワースペクトルのS/N比は悪く、同定精度を低下させる要因となっている。したがって、振幅の変動する非定常振動に対しては、時間領域のみでノイズ判定を行うことには限界があり、S/N比やスペクトル形状に対しても判定基準を置くことが必要となると考えられる。その場合にも、当然ながら振動計測ごとにS/N比の許容範囲が異なるために、今後、学習機能を備えた人工知能アルゴリズム等を組み込み、精度を向上させることが重要であると考えている。



(a) クロススペクトルの平均値



(b) 伝達関数（振幅）の平均値



(c) 伝達関数（位相）の平均値

図-18 クロススペクトルと伝達関数の平均値（計測回数：20回）

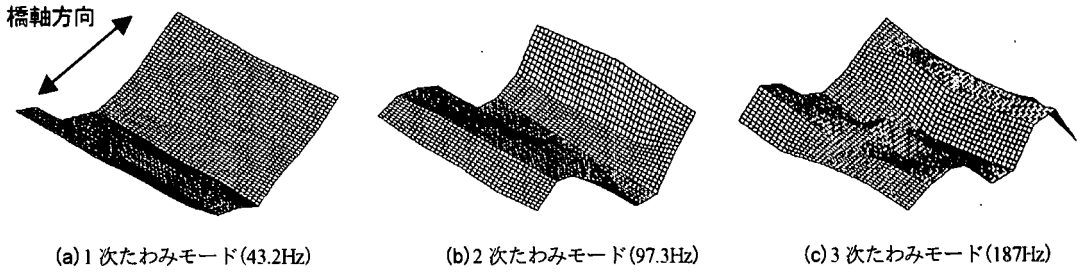


図-19 同定された RC 床版の部分振動モード形

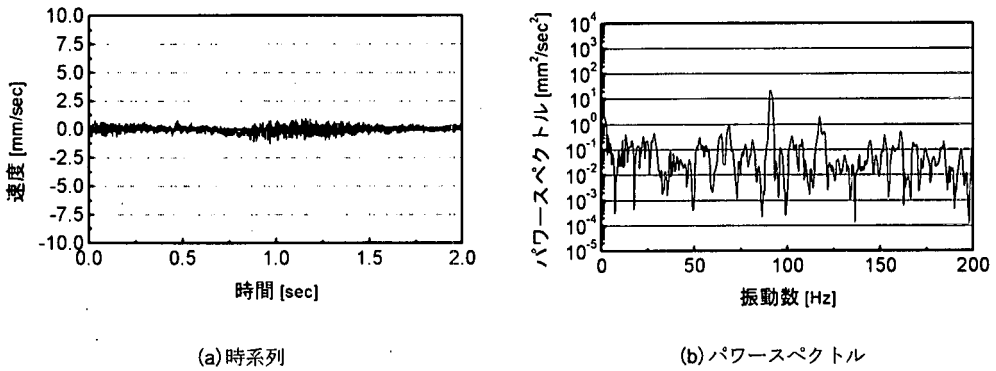


図-20 除去することが困難な光学ノイズ

(4) Bootstrap 法による計測精度の評価

式(6)の平均値の算出に必要な繰り返し計測回数 N_A や計測精度の質を定量的に評価するために、同定結果の不確実性に起因する変動を指標とし、その算出方法を提案する。これは、同定結果は不確実性に起因して変動するので、その影響が小さいものは計測精度の質が高いと判断するものである。変動の定量化に際しては、振動特性の同定結果は確率変動するとして捉え、確率分布の信頼区間を算出することと等価であると考え。算出の具体的な方法としては、数値計算を用いたリサンプリング法の一つである Bootstrap 法¹⁴⁾を適用する。Bootstrap 法の詳細および同定問題への適用に関する詳細は参考文献 15) を参照されたい。

前節のクロススペクトルおよび伝達関数の平均には、20 回の繰り返し計測を要した。この平均に要する繰り返し計測回数の妥当性とともに入測精度の質について検証する。繰り返し計測回数 N_A をパラメータとして、1 次モードの最大振幅を与える計測点 22 の 99% 信頼区間を算出する。図-21 は、計測回数を 50 まで変化した時の 99% 信頼区間の収束性を示すものである。このとき、Bootstrap 標本数と呼ばれるリサンプリング回数は、それぞれ 2000 回とした。また、通常と同定によ

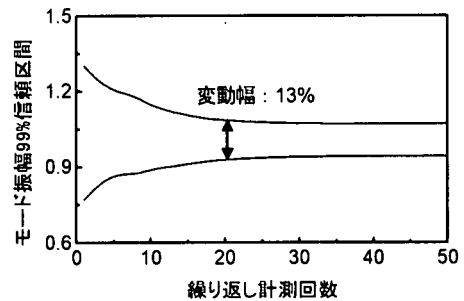


図-21 Bootstrap 法による 99% 信頼区間評価

て得られたモード振幅が 1 となるように正規化を行っている。図より計測回数 20 回付近で信頼区間は収束していることが確認できる。したがって、信頼区間の収束性が必要な繰り返し回数を決定し得る指標のひとつとなるということが言えよう。さらに、信頼区間の変動幅を次式の

$$FR = \frac{TR_u - TR_l}{TR_m} \times 100 \quad (8)$$

で定義すると、その信頼区間の変動幅は 13% であるこ

とがわかる。式中、 TR_m 、 TR_l および TR_m は信頼区間の上限値、下限値、平均値である。参考文献6)における室内での鋼板の振動モード形に対する同結果では、変動幅は5%であった。したがって、変動幅を指標とすることで、先述したような改良による計測結果の質を定量的に評価することが可能となる。

5. まとめと今後の課題

本研究では、レーザードップラ速度計を用いた非接触スキャニング振動計測システムに改良を加え、実構造物に適用し、振動計測結果から部分振動モード形を同定した。得られた主な成果を以下に述べる。

- (1) レーザー戻り光量の最大点を自動探索する機能を追加することで、実構造物へのレーザー振動計測の適用における戻り光量不足という問題を解決した。
- (2) 鋼部材を対象とした計測精度検証において、レーザードップラ速度計と加速度計の振動計測結果は、時間・振動数領域ともに高精度で一致した。
- (3) 構築したレーザー振動計測システムにより、供用中の鋼桁およびRC床版の振動計測を行い、それをもとに部材固有の振動モード形を同定することが可能となった。また、計測の質については、Bootstrap法により定量的に評価した。

今後は、より高次の振動モード形を同定するために、さらに計測精度を向上させる必要がある。そのための主な改良すべき点としては、以下があげられる。

- (1) レーザー照射角が大きくなるにつれ、レーザースポット径が広がるために、戻り光量が低下する。そこで、現在、手動で調節しているレーザースポット径の照準設定を計測点ごとに自動化を図る。
- (2) 人工知能アルゴリズム等を導入し、スペクトル形状をもとにした光学ノイズの判定手法を構築する。
- (3) レーザー戻り光量の自動探索においては、計測点ごとにノイズレベルの最大点を選定している。今後、計測時間の短縮も考慮して、最低限のノイズレベルを確保するためのしきい値を設定する方法を検討する。

謝辞：本研究は、一部文部省科学研究費および(財)東電記念科学技術研究所の助成を受けたものである。また、振動計測に際しては、首都高速道路公団工務部調査役、宮内博良氏、ならびに株式会社東関東、技術第二部長赤井公昭氏をはじめ、多くの方々に御協力を頂きました。

参考文献

- 1) Abe, M.: Structural Monitoring of Civil Structures using Vibration Measurement - Current Practice and Future -, *LNAI 1454 Artificial Intelligence in Structural Engineering*, pp.1-18, 1998.7.
- 2) Abe, M., Fujino, Y., Kajimura, T., Yanagihara, M. and Saito, M.: Monitoring of a Long Span Suspension Bridge by Ambient Vibration Measurement, *Proceedings of The Second International Workshop on Structural Health Monitoring*, pp.400-407, Stanford University, California, 1999.9.
- 3) 岩本政巳, 阿部雅人: 損傷・構造同定, 橋梁振動コロキウム'97 論文集, pp.45-54, 1997.10.
- 4) Doebling, S.W., Farrar, C.R., Prime, M.B. and Shevitz, D.W.: Damage Identification and Health Monitoring of Structural and Mechanical Systems from Changes in Their Vibration Characteristics : A Literature Review, *Los Alamos National Laboratory Report LA-13070-AIS*, 1996.5.
- 5) 貝戸清之, 阿部雅人, 藤野陽三, 依田秀則: レーザードップラ速度計を用いた振動モード形の計測と損傷検出への応用, 第2回構造物の診断に関するシンポジウム論文集, pp.157-162, 土木学会, 1999.8.
- 6) 貝戸清之, 阿部雅人, 藤野陽三, 依田秀則: レーザー常時微動計測手法の構築と構造物の損傷検出への応用, 土木学会論文集, No.689/I-57, pp.183-199, 2001.10.
- 7) 金原勲, 影山和郎, 鈴木敏夫, 大沢勇, 伊出浩司: レーザー振動画像法と有限要素法によるはく離を有する積層板の振動モード解析, 材料, Vol.43, No.487, pp.476-481, 1994.4.
- 8) Meza, R., Carrasco, C.J., Osegueda, R.A., James, G and Robinson, N.: Damage Detection in a DC-9 Fuselage using Laser Doppler Velocimetry, *Proceedings of the 15th International Modal Analysis Conference*, pp.1779-1785, Orlando, 1997.2.
- 9) 長松昭男: モード解析入門, コロナ社, 1993.7.
- 10) 貝戸清之: 不確定性を考慮したレーザー振動計測に基づく構造物の性能評価, 東京大学博士論文, 2000.3.
- 11) Kaito, K., Abe, M., Fujino, Y. and Yoda, H.: Detection of Structural Damage by Ambient Vibration Measurement using Laser Doppler Vibrometer, *Proceedings of The 5th International Symposium on Non-Destructive Testing in Civil Engineering 2000*, pp.137-143, Tokyo, 2000.4.
- 12) Kaito, K., Abe, M. and Fujino, Y.: Identification of Vibration Mode Shapes for a Bridge Deck under Ambient Vibration, *Proceedings of 6th International Workshop on Material Properties and Design, Proceedings of The Present and Future in Health Monitoring*, pp.347-358, Bauhaus-University, Weimar, Germany, 2000.9.
- 13) 貝戸清之, 阿部雅人, 藤野陽三, 本村均, 金子謙一郎:

- レーザー常時微動計測に基づくRC床版の振動モード形の
同定, 土木学会第 55 回年次学術講演会講演概要集, 共通
セッション, CS-75, 2000.9.
- 14) Efron, B. and Tibshirani, R.: *An Introduction to the Bootstrap*,
Chapman and Hall, 1993. (2001.1.15 受付)
- 15) 貝戸清之, 阿部雅人, 藤野陽三: 不確実性に起因する振
動特性変化の定量化とその有意性検定手法の提案, 土木
学会論文集, No.682/I-56, pp.399-414, 2001.7.

DEVELOPMENT OF NON-CONTACT SCANNING VIBRATION MEASUREMENT SYSTEM WITH LASER DOPPLER VIBROMETER FOR EXISTING STRUCTURES

Kiyoyuki KAITO, Masato ABE, Yozo FUJINO and Hitoshi MOTOMURA

In order to rationalize structural maintenance, a non-contact vibration measurement system with Laser Doppler Vibrometer (LDV) has been constructed in laboratory testing. However, in the case of measuring vibration of existing real structures, the objectives would possess low laser reflection characteristics. Therefore, it is difficult to apply an LDV to these. In this study, the measurement system is improved with an automatic searching function of the optical point that could give the maximum laser reflection around the objective points. This improvement produces a tremendous advance in measurement accuracy for real structures. As a case study, vibration measurement is conducted at a steel girder and a reinforced concrete of existing viaduct. The mode shapes are identified and quality of measurement is also evaluated quantitatively.