

PC カメラを用いた実時間遠隔変位計測システムについて

Experimental Study on Real Time Remote Displacement Measuring System by using PC camera

北海道大学大学院工学研究科	○学生員	安達一憲 (Kazunori Adachi)
北海道大学大学院工学研究科	学生員	宮森保紀 (Yasunori Miyamori)
北海道大学大学院工学研究科	正 員	小幡卓司 (Takashi Obata)
北海道大学大学院工学研究科	F 会員	林川俊郎 (Toshiro Hayashikawa)
北海道大学大学院工学研究科	F 会員	佐藤浩一 (Koichi Sato)

1. はじめに

我が国では第二次世界大戦後の国土の復興とその後の高度経済成長において、鉄道、道路、港湾、空港を始めとする社会基盤施設が非常に数多く整備された。中でも、橋梁構造物に関しては、1954 年の第一次道路整備五ヶ年計画により本格的な道路整備が始まったことを契機に、高度経済成長期から 1970 年後半にかけて非常に多くの道路橋が架設された¹⁾。2010 年前後より供用開始から 50 年を迎える橋梁は急激に増大し、2021 年にはこれらの橋梁は 5 万橋に上るものと予測されている。しかしながら、我が国における今後の経済状況あるいは地球環境に対する負荷低減を考慮すると、維持管理を効率的に実施し構造物の性能を維持し続けることが今後の重要な課題になるものと考えられる。

現在、橋梁の健全度診断あるいは維持管理のためのデータ収集方法としては目視に基づくものが主であるが、専門技術者の不足などにより点検を要する橋梁の急増には対応できないのが現状である。そのため、近年では構造物の振動をある程度正確に把握し、逆解析的に健全度診断、損傷同定を行うことが期待されているが、上記のような目的の振動計測は常時モニタリングを必要とし、実施に際しては計測機器の経費および人件費の削減が重要な問題となることが多い²⁾。まず計測機器に関しては、接触式と非接触式に大別され、接触式は比較的安価で取り扱いも容易であるが、特に変位測定の場合はセンサーの設置に際してその近傍に固定点を設ける必要があるなどの欠点を有する。一方、非接触式は計測可能な振動数範囲が広く高精度の測定を行うことができるが、取り扱いが難しく非常に高価であるため、供用中の構造物の振動計測には現時点および将来においても一般的手法になり得ないものと推定される。また、人件費の削減を実現する方法としては遠隔計測による無人化、自動化が必要であると思われる。大規模構造物においては専用通信ケーブルを用いた遠隔モニタリングが行われた例はあるものの、通信系の設備投資に膨大な経費がかかり、普及には一般電話回線を用いるなどのさらなる研究が必要であるものと考えられる。以上より、廉価で取り扱いが容易な非接触変位計測手法ならびにその手法を用いた遠隔計測システムの構築は、常時振動モニタリングにおける課題である計測機器の経費および人件費の削減を可能にするものであり、今後急増が予測される老朽化した橋梁の維持管理に威力を発揮するものと判断される。

その一方で、IT 技術の著しい進歩により CCD カメラの小型軽量化、低価格化、マイクロプロセッサの性能向上およびデータ通信の高速化が進んでいる。この点に着目し、著者らは以前より家庭用 CCD カメラを用いた非接触変位計測システムに関する研究を行ってきた^{3), 4)}。このシステムは、構造物に設置した追跡用ターゲットを市販の CCD カメラを用いて定点観測し、その後パーソナルコンピュータにデジタル動画像として取り込み、画像処理を施すことで応答変位を算出するものである。本研究では、この非接触変位計測システムに改良を加える

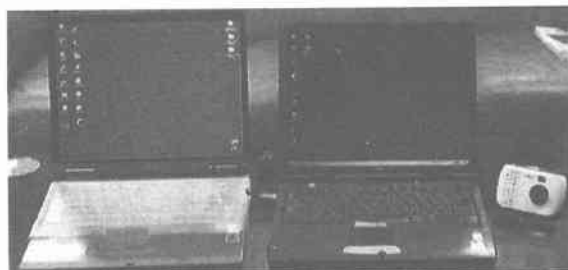


写真-1 計測装置一式

ことで、LAN 回線を利用したリアルタイムで振動変位を得ることの可能な実時間遠隔変位計測システムの構築を試みた。具体的には、従来は録画された画像に対して処理を施して振動波形を得ていたものを、フレームレート毎に画像の取り込みおよび画像処理を行うことで変位応答の実時間計測を可能にした。また、TCP/IP を用いたソケット通信プログラムを組み込むことにより、計測した変位データを他のパーソナルコンピュータで監視できる機能も有している。実時間遠隔変位計測システムの有効性および実用性を検討するために、追跡用ターゲットを設置した振動台を一定の周期で振動させ応答変位を計測する振動計測実験を行い、光学式変位計を用いて測定した変位波形との比較を行った。また、画像を取り込む際の時刻と変位データを出力した時の時刻を記録し、位相遅れを算出して検討を加えた。よって、本研究はこれらの結果について報告するものである。

2 実時間遠隔変位計測システムの構築

2. 1 システムの概要

本研究は、構造物に設置したターゲットを市販の CCD カメラにより観測し、観測結果を逐次パーソナルコンピュータに取り込み画像処理することで安価かつ簡便な実時間変位計測を試みるものである。また、得られた変位データを TCP/IP を用いたソケット通信により他のパーソナルコンピュータに送信することで、遠隔計測も同時に実施した。今回実験に使用したパソコンについては、携帯性を考慮してノート型 PC をデータ送信側（以下、サーバ称す）および受信側（以下、クライアントと称す）の 2 台用いている。両者の主なスペックは、サーバ：SONY PCG-XR7F/K（モバイル Pentium III 700MHz, SODIMM 192MB）、クライアント：DELL INSPIRON 3800（モバイル Pentium III 650MHz, SODIMM 256MB）であり、現在の高性能 PC に換装すれば、容易に性能向上も実現できる。また CCD カメラは、一般には PC カメラとして安価に販売されているものであり、本研究では Intel Pocket PC Camera (CCD 640×480 画素, レンズ f2.8)を使用した。計測装置の一式を写真-1 に示す。

2. 2 画像処理

ここでは、CCD カメラを用いた変位計測について述べる。非接触で変位計測を行う場合、対象物の一点に着目し変位を計測するのが一般的であるが⁵⁾、本システムに

おいても、まず、計測対象に1辺2cmの白色の追跡用ターゲットを設置し、CCDカメラを用いてターゲットを定点撮影してパーソナルコンピュータに取り込む。次に、得られたデジタル画像からターゲットの重心を計算する。これらの操作を繰り返すことにより、重心の移動距離を構造物の変位としてリアルタイムに算出するものである。デジタル画像からターゲットの重心座標を求めるには、画像の2値化、ラベリングによるターゲット領域の抽出、ターゲット領域の重心計算という過程を経ている⁶⁾。

画像の2値化とは、トゥルーカラー画像をRGBに分解して得られる0(黒)~255(最大輝度)で量子化された画像について、予め設定した閾値より大きい場合には1(白)、小さい場合は0(黒)の2値のみで表される画像に変換することである。例として、本研究で使したターゲットを撮影した画像を図-1に、これを2値化した画像を図-2に示す。

閾値はターゲットを抽出できるように設定するが、パーソナルコンピュータに取り込んだデジタル画像内にターゲット部分以上の輝度を持つ画素があった場合、2値化画像にも当然のことながらこの画素が残ってしまう。これを取り除くために、2値化画像の白色領域に番号を割り当てるラベリング処理を施し、ターゲット以外の白色領域の輝度を1から0に変換した。また、ラベリング処理により白色領域内の画素数および位置座標を把握することができるようになるため、分布領域が $m \times n$ ピクセルで表される範囲 $f(m,n)$ であるときの重心座標 (x, y) をそれぞれ、

$$x = \frac{\sum_m \sum_n mf(m,n)}{\sum_m \sum_n f(m,n)} \cdots \cdots (1)$$

$$y = \frac{\sum_m \sum_n nf(m,n)}{\sum_m \sum_n f(m,n)} \cdots \cdots (2)$$

として計算した⁷⁾。図-3に図-2の白色領域の重心をプロットした画像を示す。重心計算後、初期の重心座標との相対変位を計算し、1画素あたり長さを乗じることにより応答変位として算出した。

2. 2 TCP/IPによるソケット通信

本研究では、画像処理により得られた応答変位データをTCP/IPによるソケット通信により他のパーソナルコンピュータに送信することで、本システムの遠隔モニタリングへの応用についても同時に検討を試みた。

TCP/IPはインターネットなどで標準的に使用されるプロトコルであり、TCPが表-1のOSI参照モデルにおけるトランスポート層に、IPがネットワーク層に属する⁸⁾。これらの具体的な役割について説明すると、TCPはデータを適度なサイズに分割し、それに誤り検出用データやパケット番号などを付けてTCPパケットを作る規約であり、IPはTCPパケットに送信先および発信元のIPアドレスを付けたIPパケットを作り、ネットワークに送り出す規約である⁹⁾。IPはネットワークから自分宛のIPパケットを受け取るとTCPに渡し、TCPがパケットの紛失や到達順などを調べ、元のデータに組み立てるといった作業を行う。また、TCPは受信側に応じてパケットを送り出すスピードを制御したり、パケットの紛失があった

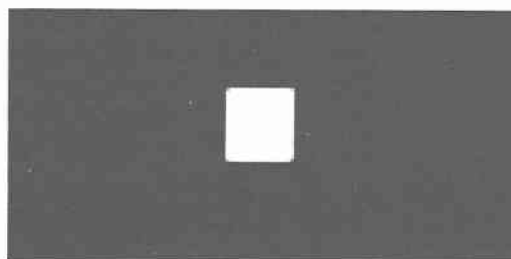


図-1 トゥルーカラー画像

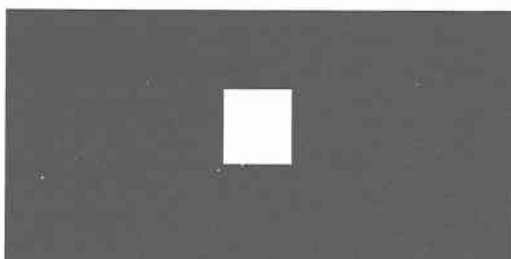


図-2 2値化後の画像

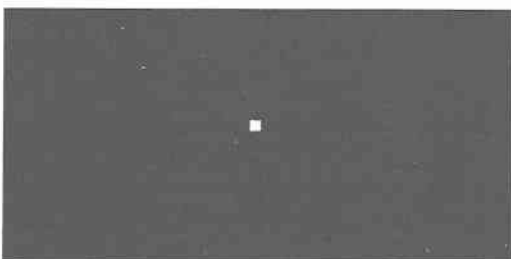


図-3 ターゲットの重心

表-1 OSI 参照モデル

	機能
アプリケーション層	データ通信サービスの提供
プレゼンテーション層	文字コードなどの規定
セッション層	仮想的経路の確立、解放
トランスポート層	データ整序、再送制御など
ネットワーク層	通信経路選択、アドレス管理
データリンク層	通信回線上のエラー検出
物理層	ケーブル上の信号の制御

場合に再送したりするため、信頼性の高いデータ通信手法であると言える。

OSI参照モデルのアプリケーション層からTCPを利用するためには、ソケットと呼ばれるIPアドレスとそのサブアドレスであるポート番号を組み合わせたネットワークアドレスを設定する必要がある¹⁰⁾。電子メールの送受信やWWWブラウザによるホームページアクセスもソケットを利用したネットワーク通信である。本システムでも、LANケーブルで接続した2台のパーソナルコンピュータ間でソケット通信を行うことで変位データの送受信を可能にした。

3 実時間遠隔計測実験

3. 1 実験方法

以上の方法を用いて実際に振動計測実験を行い、測定された変位波形およびデータ伝送による位相遅れの点から本システムの有効性ならびに実用性について検討を行った。

具体的には、ターゲットを設置した振動台に正弦波を入力し、ターゲットの移動距離を本システムにより計測した。同時に、光学変位計により振動台の移動距離を計

測し、本システムで計測された変位波形と比較することで精度などについて検討した。なお、光学式変位計のサンプリング周波数は 200Hz であり、データ点数は 8192 点である。また、サーバが画像を取り込んだ時刻およびクライアントが変位データを受信した時刻を記録し、本システムの位相遅れの算定も実施した。

実験パターンについては、振動台が安定して作動する最低の振動数が 0.3Hz 付近であることと、ソケット通信を行わない場合のサンプリング周波数が約 12Hz 前後であることが予備実験より判明していたため、ナイキスト周波数の 1/2 が 3.0Hz であることを考慮して 0.3Hz から 3.0Hz まで範囲で行うものとし、約 0.1Hz 刻みで全 25 パターンの実験を行った。

3. 2 解析手法

本研究の有効性を検討する方法として、まず、光学変位計から得られた応答変位と本システムで計測された変位波形を比較することで、変位計測の精度について検討する。次に、画像を取り込む際に記録した時刻とクライアントが変位データを受け取った時の時刻から位相遅れを算出し、考察を加える。

変位の精度についての検討は、光学式変位計による応答変位の実効値と本システムで計測された変位波形の実効値を計算し、次式に代入することで行った。

$$G = RMS_{pc} / RMS_{op} \cdots \cdots (3)$$

ここで、 RMS_{pc} は本システムで計測した変位応答の実効値であり、 RMS_{op} は光学式変位計を用いて測定した変位波形の実効値である。よって、この値が 1 に近いほど本システムで計測した変位の精度が高いことを表している。ただし、数値計算で実効値を求める場合にはデータ点数が大きく異なると、比較するパラメータとしては有意なものにならないため、本システムで計測した変位データについては光学変位計と同数のデータ点数になるよう線形補間し実効値を求めている。

位相遅れの計算方法については、サンプリング時間にばらつきがあるため(図-4(f)参照)、平均サンプリング時間を求め、次式を計算することにより算出した。

$$\phi = T_{pc} / T_{table} \times 360 \cdots \cdots (4)$$

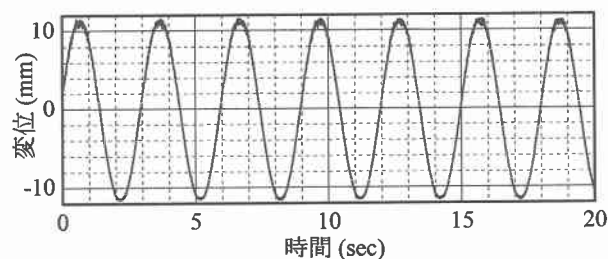
$$T_{table} = 1 / f_{table} \cdots \cdots (5)$$

ただし、 ϕ は位相遅れ(deg)、 T_{pc} は本システムの平均サンプリング時間(sec)、 f_{table} は振動台の加振振動数(Hz)である。

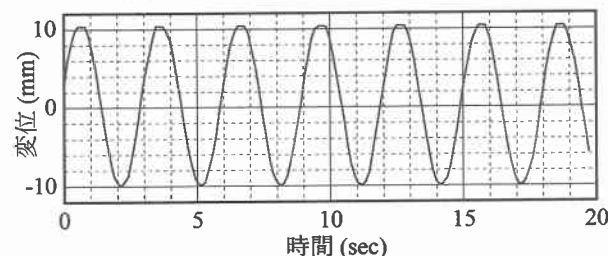
4 結果と考察

実験結果の一例として、図-4 に 0.35Hz 加振時に得られた結果を示す。また、図-5 は今回の実験における振動数毎の平均サンプリング時間であり、図-6 に(3)式により計算した実効値比を、図-7 に式(4)および式(5)から求めた位相遅れを示す。

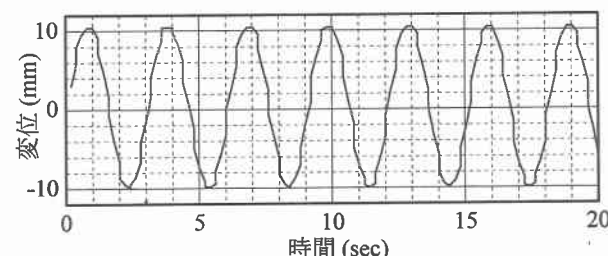
まず、図-5 の平均サンプリング時間に着目すると、約 0.24(sec)を中心として 0.02(sec)程度のばらつきがあることが確認できる。計測対象の振動数との関連性がないことと、図-4(e)からもわかるようにデータ送信に要する時間が一定でないことを考慮すると、サーバとクライアント間でのデータの送信ミスによる再送処理が比較的頻繁に生じているものと考えられる。データ転送に要した時間についてはその最小値はほぼ 0(sec)に近い数値であり、



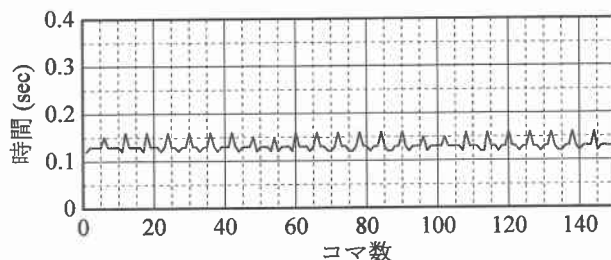
(a) 光学変位計で計測した応答変位



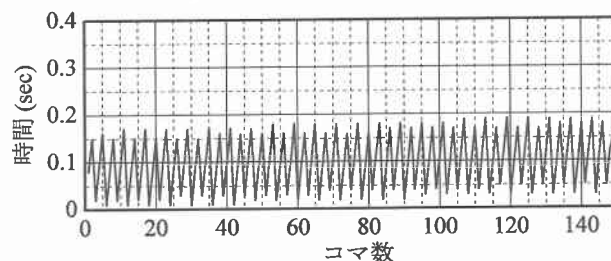
(b) サーバで計測した応答変位



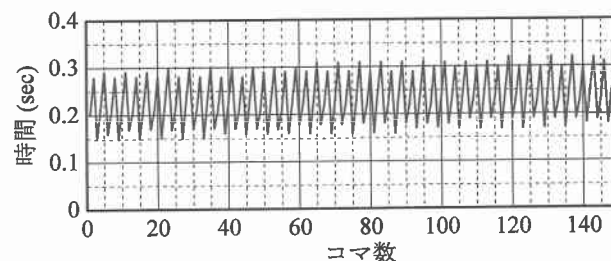
(c) クライアントが受信した応答変位



(d) 画像処理に要した時間



(e) データ送信に要した時間



(f) 1コマ処理するのに要した時間

図-4 振動計測実験 (0.35Hz 加振時)
送信ミスの原因究明を進め、改良を加えることで、サーバ〜クライアント間のタイムラグが非常に小さい遠隔計

測システムを構築することが可能であるものと思われる。

次に、図-6の実効値比について考察を加える。図-6では1.0Hz付近までは実効値比が0.9程度であるが、1.0Hz以上においては振動数が高くなるにつれ実効値比が低下していることが判明した。よって、本システムは計測対象の振動数が1.0Hz程度以下であれば、ある程度の精度で応答変位を計測することが可能であると推定される。一般に、計測された応答変位の精度が良いのはナイキスト周波数の1/2程度の振動数までである¹¹⁾。図-5の平均サンプリング時間の平均値0.24(sec)を振動数に変換した4.17(Hz)の1/4が1.04(Hz)であることを踏まえると、本システムを適用して測定した構造物の応答変位の精度が1.0Hz以上で低下したのは、計測対象の振動数がサンプリング周波数の1/4以上であったことが原因であるものと思われる。ゆえに、先に述べたソケット通信部の改良を行うことにより、より高いサンプリング周波数での計測が可能となるため、今回用いた比較的安価な機器でもより高振動数を対象とした振動測定が可能になるものと推定される。

また、比較的高精度で計測が可能であると考えられる1.0Hz未満の変位応答についても、実効値比が1に近い値になっていない。これは、画像処理でターゲットを抽出する際の閾値設定に問題があるものと思われる。閾値は測定を開始する直前にRGBのうちターゲットの抽出が容易と思われる成分を選択し、試行錯誤的に設定したものだが、ターゲットの外郭近傍においてはターゲット中央部に比べ輝度が低く、閾値の微妙な違いが抽出される白色領域の画素数に多大な影響を及ぼしたためであると思われる。今回の実験では画像処理に要する時間を可能な限り短時間にするため、解像度を160×120(pixel)と最小フォーマットにしたことがターゲット外郭近傍の輝度を低下させた直接の原因であると考えられ、用途に応じて解像度を設定することにより、今回の実験で使用したパーソナルコンピュータでも実用性が十分に高い実時間遠隔計測システムの構築が可能であるものと思われる。

加えて、図-7の位相遅れについては振動数が高くなるにつれ比例的に大きくなる、直線位相性を有することが確認された。直線位相性の場合、位相遅れの影響を容易に予測することが可能であり、ソケット通信部の改良により遅れ時間そのものも小さくできることから、遠隔モニタリング手法としての新たな手法になり得ると判断される。

5 おわりに

以上のように、本研究は市販のCCDカメラを用いた構造物の実時間遠隔変位計測システムの有効性および実用性について、実験によって測定した応答変位の精度ならびに位相遅れの面から検討を加えたものである。

実験結果から、計測対象の振動数が1.0Hz以下であればある程度の精度で応答変位を測定することが可能であり、位相遅れの特性としては直線位相性を有することが判明した。通信機能に改良を加えれば、より高い振動数の計測を高精度で行うことができると考えられるとともに、パソコンそのものの性能にも依存するため、今後のCPUの高速化に応じた性能向上も期待される。したがって、本システムは土木構造物に対する十分な有効性、実用性を有するものと考えられる。

また、本システムと構造制御装置あるいは構造同定アルゴリズムなどを組み合わせることにより、合理的な橋梁管理システムの構築や橋梁構造物のインテリジェント化にも十分に寄与できる可能性を有するものと思われる。

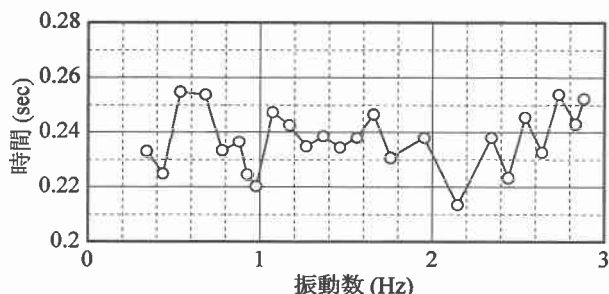


図-5 振動数と平均サンプリング時間の関係

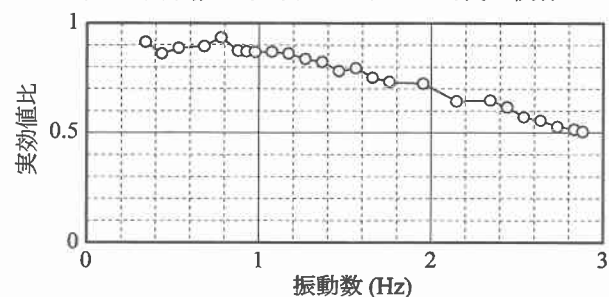


図-6 振動数と実効値比の関係

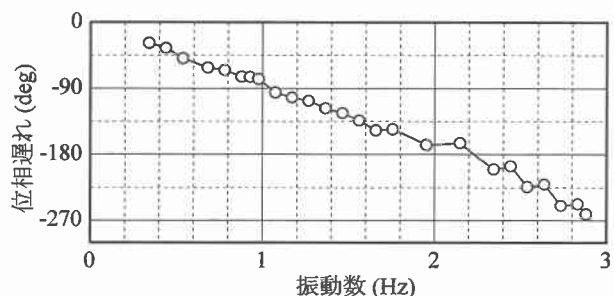


図-7 振動数と時間遅れの関係

【参考文献】

- 1) 西川和廣：道路橋の寿命と維持管理、土木学会論文集、No.501/I-29, pp.1-10, 1994.
- 2) 大島俊之編：橋梁振動モニタリングのガイドライン、土木学会、2000.
- 3) 安達一憲、宮森保紀、小幡卓司、林川俊郎、佐藤浩一：非接触変位計測システムへの家庭用DVカメラの応用について、土木学会北海道支部論文報告集、第58号、pp.200-203, 2002.
- 4) 安達一憲、宮森保紀、小幡卓司、林川俊郎、佐藤浩一：非接触変位計測システムへの家庭用CCDカメラの適用に関する一考察、土木学会第57回年次学術講演会、pp.1143-1144, 2002.
- 5) 井舎英生、北田俊行、山口隆司、宮脇潔、乙黒幸年、時譲太：道路橋の標識柱・照明柱における損傷の早期発見に関する基礎的研究、橋梁振動コロキウム'01、pp.239-244, 2001.
- 6) 岡崎彰夫：はじめての画像処理技術、工業調査会、2000.
- 7) 高井信勝：「信号処理」「画像処理」のためのMATLAB入門、工学社、2000.
- 8) 芳野昌明：初めて学ぶパソコンLAN入門早わかり、オーム社、1997.
- 9) 岡本茂、大島邦夫、堀本勝久：'99-2000年版最新パソコン用語事典、技術評論社、1999.
- 10) 小高知宏：基礎からわかるTCP/IP Javaネットワークプログラミング、オーム社、2002.
- 11) 橋梁振動研究会編：橋梁振動の計測と解析、技報堂出版、1993.