

筑波大学大学院博士課程

システム情報工学研究科修士論文

4K カメラによる橋梁撮動データを用いた
WIM 技術の開発

阿部智成

修士（工学）

（構造エネルギー工学専攻）

指導教員 松島亘志

2020年 3月

概要

老朽化が進む我が国の橋梁において、過積載車両によるダメージは甚大である。交通荷重の測定手法として、橋梁の応答によって車両重量を推定する BWIM 技術があるが、従来の計測機器は設置工事を要し、時間と費用がかかるため、より簡便な BWIM システムの開発が必要とされている。

本研究では、画像分析による計測たわみと、橋梁と車両を両端支持梁-2点集中荷重と仮定したときのたわみから、最小二乗法により橋梁曲げ剛性と車両重量を推定することに着目した。実験は撮影が容易かつ外乱の少ない鋼製橋梁模型を用いて行い、推定した車両重量を設計重量と比較することで、本手法の実用性を示した。

目次

第1章	はじめに	1
1.1	過積載車両による橋梁への影響とその対応策	1
1.2	既往の研究	1
1.3	画像分析による変位計測の妥当性	2
1.3.1	撮影機材と実験材料	3
1.3.2	実験方法	3
1.3.3	分析手法	3
1.3.4	結果と考察	4
第2章	画像分析手法	6
2.1	テンプレートマッチング	6
2.2	一致度評価値	6
2.3	サブピクセル補間	7
第3章	たわみ応答による WIM (Weigh-in-Motion)	9
3.1	たわみの理論式	9
3.2	最小二乗法による橋梁曲げ剛性推定及び車両重量推定	10
第4章	鋼製橋梁計測実験	12
4.1	実験概要	12
4.2	対象橋梁, 対象車両, 撮影機材	12
4.3	計測概要	13
4.4	分析手法	14
4.5	結果と考察	15
第5章	結論	19
謝辞		20
参考文献		21

図目次

図 1-1	中央載荷試験の様子.....	2
図 1-2	サブセットおよびひずみ計測区間の名称.....	4
図 1-3	計測時間 37 秒–38 秒の 左端サブセットにおけるマッピング変位.....	4
図 1-4	計測時間 105 秒–106 秒の 左端サブセットにおけるマッピング変位.....	4
図 1-5	荷重と変位の関係.....	5
図 1-6	変位の誤差率.....	5
図 2-1	折れ線近似.....	8
図 2-2	放物線近似.....	8
図 2-3	正規分布近似.....	8
図 3-1	両端支持梁 2 点集中荷重.....	10
図 3-2	$xp1 < 0 < xp2 < xc$	10
図 3-3	$0 < xp1 < xp2 < xc$	10
図 3-4	$0 < xp1 < xc < xp2$	10
図 3-5	$xc < xp1 < xp2 < L$	10
図 3-6	$xc < xp1 < L < xp2$	10
図 4-1	鋼製橋梁外観.....	12
図 4-2	車両外観.....	13
図 4-3	近接撮影外観.....	14
図 4-4	近接撮影画像.....	14
図 4-5	遠望撮影外観.....	14
図 4-6	遠望撮影画像.....	14
図 4-7	橋梁進入時(後軸 in).....	15
図 4-8	橋梁退出時(前軸 out).....	15
図 4-9	サブセット.....	15
図 4-10	各ケースのたわみ変位量.....	16
図 4-11	後軸橋梁進入時.....	17
図 4-12	前軸橋梁退出時.....	17
図 4-13	前軸橋梁中央時.....	18
図 4-14	後軸橋梁中央時.....	18

第1章 はじめに

1.1 過積載車両による橋梁への影響とその対応策

我が国には長さ 2m 以上の橋梁が約 70 万橋存在する^[1]。その多くは高度経済成長期に建設され、近年、老朽化に対する維持管理需要が増大している。一方で、全交通の 0.3%に当たる過積載の大型車両が、橋梁の劣化に与える影響の約 9 割を引き起こしている^[2]。国土交通省は、過積載の悪質な違反者に対して厳罰化する等の取組を行っているが、車両の諸元が一定の値を超える特殊車両の約 3 割が過積載であり、その台数は近年横ばいで推移している^[3]。今後増大が見込まれる老朽化橋梁に対して、過積載車両によるダメージは甚大であることから、その対策が求められている。

他方中国では、2019 年 10 月上旬、過積載の大型車両 2 台が高架橋を通行したところ、約 80m にわたって崩落し、高架下を走行していた乗用車を巻き込む事件が発生した。車両 2 台の積載制限はいずれも 30t 前後であったのに対し、実際に積載していた総重量は約 160t で、積載制限の約 5 倍に達していた。当国では 2007 年から 2015 年の 9 年間で、走行車両の過積載によって 28 か所の高架橋が崩落するなど、過積載車両への対策が必要不可欠である。

以上から、過積載車両が橋梁へ与える影響は世界中で問題視されており、その対策需要は高いといえる。そこで本研究では、現状、技術的解決法で効果的であるとされる、交通荷重の測定による対策について着目した。

近年、交通荷重を測定する手法として、車両が橋梁上を走行した際に生じる橋梁部材の応答値から、逆解析によって車両重量を推定する Bridge Weigh-in-motion (以下、BWIM) が注目されている。本手法は 1970 年代初頭に Fred Moses ら^[4]によって提案され、路面上での作業がなく、従来の手法と比べて導入コストが安いという利点がある。また、交通荷重のモニタリングとして継続性が高いだけでなく、交通量調査や橋梁本体の健全度評価などの一時的なモニタリングも可能である。したがって、老朽化橋梁の増加と過積載車両の存在が問題視されている我が国において、BWIM は有効であるといえる。

1.2 既往の研究

先述のように、BWIM は 1970 年代初頭に Fred Moses ら^[4]によって提案された。Moses らは橋梁の下フランジの曲げ応力に着目し、影響線を仮定した上で、荷重既知車両によるひずみ応答値から影響線の縦距を決定し、それに基づいて荷重未知車両のひずみ応答値から車重を算出した。また、車軸通過時刻は路面上にスイッチを設置することで検出した。小塩ら^[5]は、影響線長が短い鋼床版の縦リブに着目し、軸重の通過ごとに生じる曲げ応力のピークを検出することで車軸を検出し、Moses らの手法と同様に軸重を逆解析する手法を行った。松井ら^[6]は、RC 床板の主筋方向のひびわれの開閉量に着目し、車軸通過に伴うひびわれの開閉量を高感度ひずみセンサで測定することで、車軸通過時刻を検出すると共に、板曲げによる応答値から車軸重量を算出した。Znidaric^[7]らは車軸通過時刻と軸重を未知数とし、最適化手法を用いてそれらを求める手法を提案し、米田ら^[8]は、遺伝的アルゴリズム (GA) を用いた最適化手法によって車軸通過時刻と軸重を推定した。しかし、これらの計測機器は設置工事を要し、時間と費用がかかるため、より簡便な BWIM システムの開発が必要とされている。そこで、関屋ら^[9]は、MEMS 加速度センサによって車両検知および車両走行車線を特定し、全自

動で変位応答を測定した後、変位応答から車軸重荷を推定する Portable-Weigh-in-Motion の手法を提案した。

その一方で、橋梁の健全度評価手法として、画像分析によって主桁や床板におけるたわみを計測する手法がある。川合ら^[10]は、橋梁上に設置した複数のカメラで撮影した画像から、たわみ角及びたわみを計測し、スプライン関数と区分多項式を用いた平滑化により計測誤差の低減を可能にした。藤垣ら^{[11],[12]}は、一枚の二次元格子画像から、二方向の位相分布を同時に求めるサンプリングモアレ法により、列車走行時の動的たわみ及びたわみ角の計測を行った。また、浅川ら^[13]は高解像度での撮影が可能な 4K カメラに着目し、既知のターゲットを設置せずにテンプレートマッチングを適用することで、実橋梁のたわみを計測した。毛利ら^[14]は、外乱の少ない屋内環境での中央載荷試験において、テンプレートマッチングを適用し、少ない誤差でたわみを計測した後に、橋梁曲げ剛性の推定を行った。しかし、実橋梁実験においては、橋梁とカメラ間の撮影距離が長く、斜め下から撮影していることから、橋梁上を走行する車両の車軸位置が不明瞭である等の問題がある。正確なたわみの測定には、橋梁に対して近接撮影する必要があるが、その場合、車軸位置の計測が難しい。

そこで、本研究では、2 台の 4K カメラを用いて、片方は橋梁を近接撮影してたわみを計測し、他方は遠望撮影して車軸位置を計測する手法を提案する。そして、橋梁を両端支持梁としてたわみの影響線を仮定した上で、計測されたたわみと車軸位置を用いて車軸重量の算出を行う。

1.3 画像分析による変位計測の妥当性

画像分析による変位計測の妥当性について、毛利ら^[14]によって行われた鋼材中央載荷試験を基に確認する。毛利らは、屋外実橋梁計測の予備実験として、屋内での鋼材中央載荷試験を実施した。図 1-1 中央載荷試験の様子に示した長方形断面を有する鋼板に対して中央載荷を行い、1.3.1 撮影機材と実験材料で述べる、本研究で用いるカメラと同機種 of 4K カメラを用いて鋼板の変形を撮影した。撮影画像にテンプレートマッチングを適用し、サブセットの移動量から変位（以後、マッチング変位と呼ぶ）を求めた。このとき同時に、高感度変位計によって変位（以後、計測変位と呼ぶ）を計測し、マッチング変位との比較を行った。

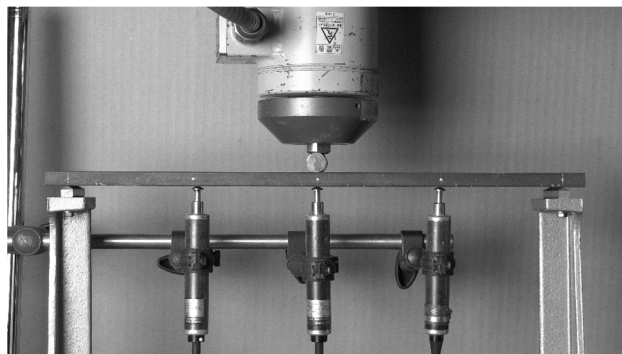


図 1-1 中央載荷試験の様子

1.3.1 撮影機材と実験材料

本実験で使用された撮影機材とその設定を表 1-1 に示す。また、実験に用いた鋼板のパラメータを表 1-2 に示す。

表 1-1 機材設定

撮影機材	AG-DVX200
動画画素数[pixel]	3840×2160
動画フレームレート[fps]	59.94
撮影距離[m]	0.95

表 1-2 鋼板パラメータ

厚さ[mm]	11.76
奥行[mm]	49.84
スパン[mm]	400
断面 2 次モーメント[mm ⁴]	6755
ヤング率[N/mm ²]	2.06×10^5

1.3.2 実験方法

アムスラー式万能試験機にスパン 400mm の支承を乗せ、その上に鋼板を設置した。そして、鋼板側面の 4 分割点にマーカーで白点をつけ、その下部に変位計を取り付けた。載荷がピン支点で行われるよう、鋼板の上に鋼棒を乗せ、その上部を固定した。カメラは 0.95m 離れた位置に設置し、撮影を行った。試験機台を上昇させることで荷重を加え、鋼板の変形をおよそ 10 分間、撮影および計測を行った。中央部の変位計での計測値がおよそ 0.05mm ごとに、荷重と変位の記録を行った。

1.3.3 分析手法

分析を行うにあたり、まず、動画データの画像化を行った。全ての動画データを画像化するとデータ容量が増大するので、処理効率化のために一定時間おきに 1 秒間の動画を画像化した。本実験では、計 20 区間の画像を作成した。次に、画像から輝度行列の抽出を行った。ここでもデータ容量軽量化のため、鋼板領域とその周囲のみを抽出した。そして、未載荷状態の鋼板白点位置に計 5 つのサブセットを設定し、テンプレートマッチングおよびサブピクセル補間を行うことで、縦・横それぞれのマッチング変位を算出した。サブセットの名称および、サブセット間の区間名は図 1-2 中に示したものに従った。

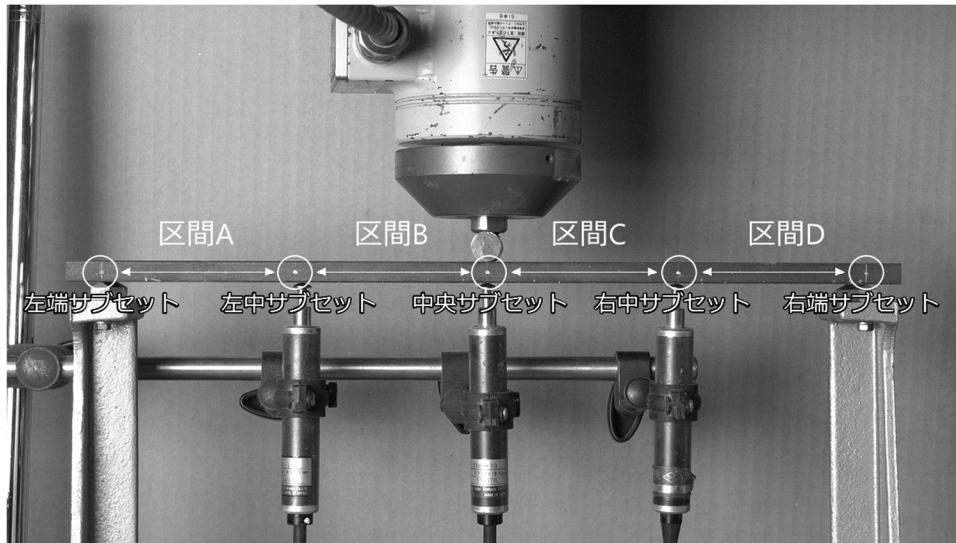


図 1-2 サブセットおよびひずみ計測区間の名称

次に、マッチング変位からヤング率の推定およびひずみ量の算出を行った。本実験の構造を、長方形断面の単純梁に集中荷重が中央部に加えられているものとしてモデル化した。

1.3.4 結果と考察

ここで示す変位は、画像内の左端点最上部を基準に、右方向及び、下方向を正とした。一例として、図 1-3 に計測時間 37 秒–38 秒、図 1-4 に計測時間 105 秒–106 秒の左端サブセットの縦方向マッチング変位と、その近似直線を示す。図から右上がりの傾向が確認できた。これは、鋼板中央部が固定され、徐々に端点が押し上げられている実験の様子と一致した。また、上下に振動が見られるが、サブピクセルオーダーでの推定を原因とする誤差だと考えられる。

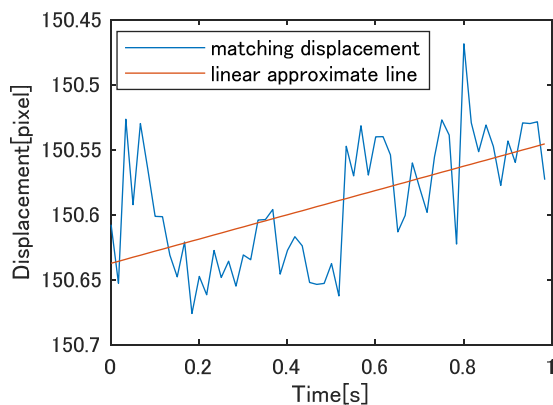


図 1-3 計測時間 37 秒–38 秒の左端サブセットにおけるマッチング変位

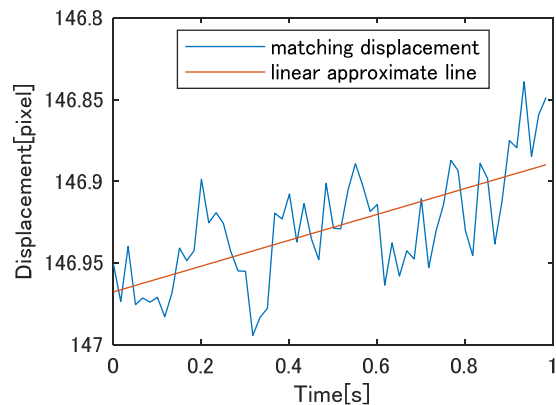


図 1-4 計測時間 105 秒–106 秒の左端サブセットにおけるマッチング変位

各計測区間における近似直線の初めの値をその計測時間のマッチング変位とし、マッチング変位、計測変位を図 1-5 に示す。グラフが概ね一致していることが確認できる。ここで、

縦軸は実長さを示しており、実際の鋼板の厚さを、画像から判断できる鋼板厚み部分のピクセル数で除すことで、1ピクセル当りの実長さを算出し、変換を行った。ただし、画像からサブピクセルオーダーで厚さを判断することは出来ず、実長さへの変換手法に関しては改善の余地が残された。図 1-6 にマッチング変位と計測値の誤差率を示す。一点目のみが大きな誤差率を示しているのは、このときの変位量が 0.025mm と小さく、計測誤差が相対的に大きく影響したためであった。一方で、この点を除いておよそ±5%以内での誤差に収まっており、この精度での推定が可能であると言える。

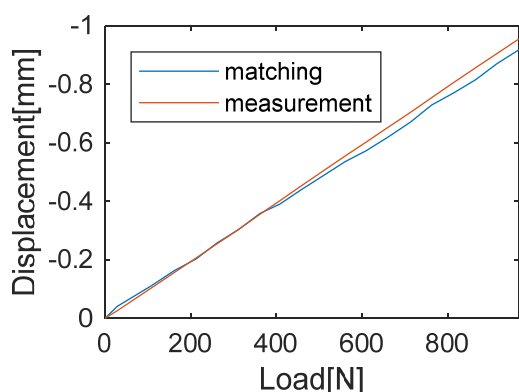


図 1-5 荷重と変位の関係

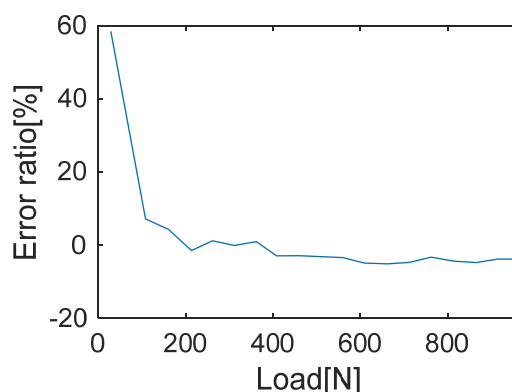


図 1-6 変位の誤差率

第2章 画像分析手法

2.1 テンプレートマッチング

本研究では画像分析の手法の内，テンプレートマッチングを用いた．テンプレートマッチングとは，サブセットと呼ばれる小領域（部分画像）と入力画像領域（全体画像）の一致度を評価し，最も一致度の高い箇所を探索する手法である．

テンプレートマッチングにはいくつかの種類が存在し，そのひとつがチャンファーマッチングである．これは画像から取得されたエッジ情報を基に，サブセットと入力画像領域間の一致度を評価する手法である．特徴として，画像全体のゆがみやノイズに強く，変形を良く観察することが出来る一方で，特徴点以外で変形を認識することは出来ない．橋梁は桁部などの荷重変形領域では形状の変化が小さく，適用性は低いと言える．画素値をそのままサブセットとして使用する手法は，一般的に，入力画像の全領域で評価するため，一致度評価の計算コストが大きいという欠点がある．しかし，本研究では橋梁の弾性変形域における変形を観察対象としているため，一致度評価する比較画像領域を，狭い範囲に限定することができる．したがって，本研究では画素値の小領域をサブセットとしたテンプレートマッチングを採用する．

2.2 一致度評価値

サブセットと入力画像の一致度は，画像のピクセル単位の輝度を用いて，各領域の相関係数から評価を行う．一致度評価値の種類として，SAD（差分絶対値和：Sum of Absolute Differences），SSD（差分2乗和：Sum of Squared Difference）やZNCC（ゼロ平均正規化相互相関：Zero-means Normalized Cross-Correlation）等が挙げられる．SADは，

$$R_{SAD} = \sum_{j=0}^{N-1} \sum_{i=0}^{M-1} |I(i,j) - T(i,j)| \quad (1)$$

と表される． $T(i,j)$ はサブセットの輝度であり， $I(i,j)$ は入力画像領域の輝度である． N は画像の水平方向サイズ， M は垂直方向サイズを表す．SADは座標が一致するピクセルごとに差分を計算し，全てのピクセルごとに足し合わせている．

SSDは，

$$R_{SSD} = \sum_{j=0}^{N-1} \sum_{i=0}^{M-1} (I(i,j) - T(i,j))^2 \quad (2)$$

と表される．SSDもSAD同様にピクセルごとに2乗差を計算し，全てのピクセルごとに足し合わせている．SSD，SAD共に，評価値が0に近づくほど，サブセットと入力画像領域が類似していることを意味する．

一方，ZNCCは，

$$R_{ZNCC} = \frac{\sum_{j=0}^{N-1} \sum_{i=0}^{M-1} (I(i,j) - \mu_I)(T(i,j) - \mu_T)}{\sqrt{\sum_{j=0}^{N-1} \sum_{i=0}^{M-1} (I(i,j) - \mu_I)^2 \sum_{j=0}^{N-1} \sum_{i=0}^{M-1} (T(i,j) - \mu_T)^2}} \quad (3)$$

と表される． μ_I ， μ_T はそれぞれ，入力画像領域とサブセットの輝度平均である．ZNCCはSAD

や SSD と異なり，画像のピクセルを統計量として扱い，評価値が 1 に近いほど，類似性を示す．また，各ピクセルの輝度を各領域の輝度平均で引いているため，他の評価値に比べ，画像間の全体的な照明変化に強い．ZNCC のデメリットとしては他の評価値より計算コストが大きいものの，本研究では橋梁の変位を対象とするため，評価対象領域を狭い範囲に限定出来る．したがって，計算コストの抑制が可能である．ゆえに，性能の良い ZNCC を採用する．

2.3 サブピクセル補間

一致度評価値を用いると，最小 1 ピクセルの変位量を求めることが出来るが，橋梁の変位量が 1 ピクセル未満の場合，評価することが出来ない．1 ピクセル未満の変位量を推定するために，サブピクセル補間^{[15],[16]}を導入する．サブピクセル補間は，一致度評価によって得られた最良一致点の評価値 $R_{\max}(0)$ と，その隣接 2 点の評価値 $R_{\max}(-1)$ ， $R_{\max}(1)$ を相関関数に当てはめることで，ピクセル間の一致度を連続的に表現するものである．相関関数として，**図 2-1** に示す折れ線近似，**図 2-2** に示す放物線近似，**図 2-3** に示す正規分布近似等がある．最大点は最良一致点からの相対変位なので，最良一致点と最大点の値を足し合わせた値が，補間された変位量である．

直線近似の場合，サブピクセル補間により推定された変位量 d_s は， $R_{\max}(-1) > R_{\max}(1)$ のとき，

$$d_s = \frac{R_{\max}(-1) - R_{\max}(1)}{2(R_{\max}(-1) - R_{\max}(0))} \quad (4a)$$

$R_{\max}(1) > R_{\max}(-1)$ のとき，

$$d_s = \frac{R_{\max}(1) - R_{\max}(-1)}{2(R_{\max}(1) - R_{\max}(0))} \quad (4b)$$

である．放物線近似の場合は，

$$d_s = \frac{R_{\max}(1) - R_{\max}(-1)}{2(R_{\max}(-1) - 2R_{\max}(0) + R_{\max}(1))} \quad (5)$$

である．正規分布の場合は， $R_{\max}(-1) > R_{\max}(1)$ のとき，

$$d_s = \frac{\ln(R_{\max}(-1)/R_{\max}(1))}{2 \ln\left(\frac{R_{\max}(-1)R_{\max}(1)}{R_{\max}(0)^2}\right)} \quad (6a)$$

$R_{\max}(1) > R_{\max}(-1)$ のとき，

$$d_s = \frac{\ln(R_{\max}(1)/R_{\max}(-1))}{2 \ln\left(\frac{R_{\max}(-1)R_{\max}(1)}{R_{\max}(0)^2}\right)} \quad (6b)$$

である．ここで，これらの関数は対応点からの水平方向のシフト量に対する相関関数のため，いずれの仮定の下においても， $-0.5 \leq R_{\max} \leq 0.5$ の範囲に限定される．

一致度評価値として SSD や ZNCC を採用する場合，放物線近似を相関関数として用いると精度が良いとされる^[17]．したがって，本研究ではサブピクセル補間に放物線近似を用いる．

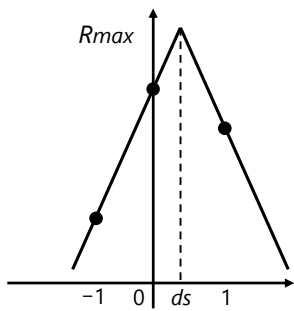


図 2-1 折れ線近似

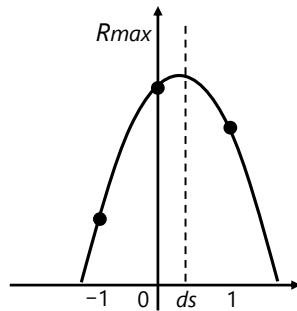


図 2-2 放物線近似

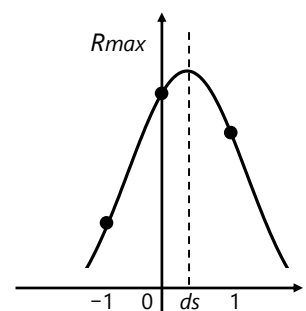


図 2-3 正規分布近似

第3章 たわみ応答による WIM (Weigh-in-Motion)

本研究では、まず、車重既知の試験車両による計測した橋梁たわみと 3.1 のたわみの理論値から、最小二乗法によって推定橋梁曲げ剛性を算出する。そして、算出した推定橋梁曲げ剛性を基に、車重未知の対象車両による橋梁たわみとたわみの理論値から、最小二乗法によって車軸重量を推定する。

3.1 たわみの理論式

本研究では、図 3-1 のように橋梁を両端支持梁、車両を前軸及び後軸の 2 点集中荷重と仮定する。このとき、C 点でのたわみ δ_c は以下のように計算できる。

$x_{p1} < 0 < x_{p2} < x_c$ のとき、(図 3-2 参照)

$$\delta_c = \frac{P_2(L - x_{p2})}{6LEI} \left[\frac{L}{L - x_{p2}} (x_c - x_{p2})^3 + \{L^2 - (L - x_{p2})^2 x_c - x_c^3\} \right] \quad (7a)$$

$0 < x_{p1} < x_{p2} < x_c$ のとき、(図 3-3 参照)

$$\delta_c = \frac{P_1(L - x_{p1})}{6LEI} \left[\frac{L}{L - x_{p1}} (x_c - x_p)^3 + \{L^2 - (L - x_{p1})^2 x_c - x_c^3\} \right] \\ + \frac{P_2(L - x_{p2})}{6LEI} \left[\frac{L}{L - x_{p2}} (x_c - x_{p2})^3 + \{L^2 - (L - x_{p2})^2 x_c - x_c^3\} \right] \quad (7b)$$

$0 < x_{p1} < x_c < x_{p2}$ のとき、(図 3-4 参照)

$$\delta_c = \frac{P_1(L - x_{p1})}{6LEI} \left[\frac{L}{L - x_{p1}} (x_c - x_{p1})^3 + \{L^2 - (L - x_{p1})^2 x_c - x_c^3\} \right] \\ + \frac{P_2(L - x_{p2})x_c}{6LEI} \{L^2 - (L - x_{p2})^2 - x_c^2\} \quad (7c)$$

$x_c < x_{p1} < x_{p2} < L$ のとき、(図 3-5 参照)

$$\delta_c = \frac{P_1(L - x_{p1})x_c}{6LEI} \{L^2 - (L - x_{p1})^2 - x_c^2\} + \frac{P_2(L - x_{p2})x_c}{6LEI} \{L^2 - (L - x_{p2})^2 - x_c^2\} \quad (7d)$$

$x_c < x_{p1} < L < x_{p2}$ のとき、(図 3-6 参照)

$$\delta_c = \frac{P_1(L - x_{p1})x_c}{6LEI} \{L^2 - (L - x_{p1})^2 - x_c^2\} \quad (7e)$$

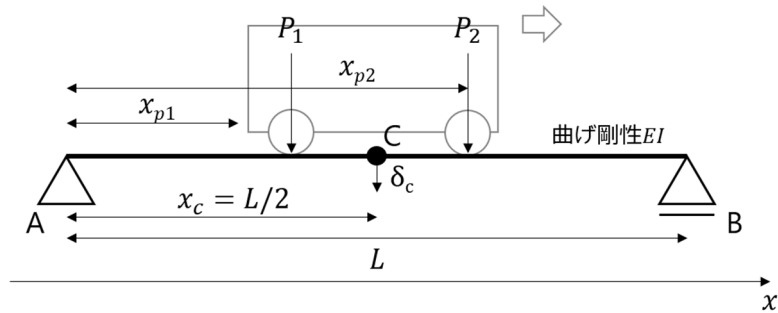


図 3-1 両端支持梁 2 点集中荷重

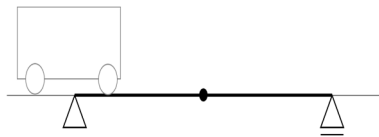


図 3-2 $x_{p1} < 0 < x_{p2} < x_c$

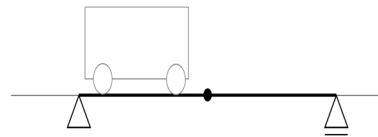


図 3-3 $0 < x_{p1} < x_{p2} < x_c$

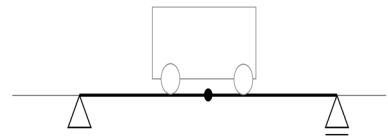


図 3-4 $0 < x_{p1} < x_c < x_{p2}$

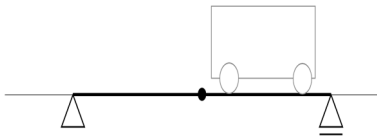


図 3-5 $x_c < x_{p1} < x_{p2} < L$

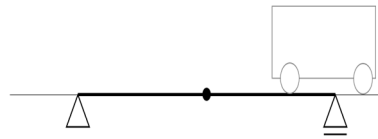


図 3-6 $x_c < x_{p1} < L < x_{p2}$

3.2 最小二乗法による橋梁曲げ剛性推定及び車両重量推定

3.1 のたわみの理論値 $\delta_c(t)$ は、設計軸重 P_1', P_2' 及び設計橋梁曲げ剛性 EI' と、軸重位置による関数 $\varphi(x_{p1}(t)), \varphi(x_{p2}(t))$ を用いて、以下のように記述できる。

$$\delta_c(t) = \frac{P_1' \varphi(x_{p1}(t))}{EI'} + \frac{P_2' \varphi(x_{p2}(t))}{EI'} \quad (8)$$

また、計測した橋梁たわみを $v_c(t)$ とすると、理論値 $\delta_c(t)$ との誤差の分散の推定値は、残差の平方和

$$J = \sum_t^T (v_c(t) - \delta_c(t))^2 \quad (9)$$

となる。これを用いて、最小二乗法により、 J が最小となるような推定軸重 P_1, P_2 及び推定橋梁曲げ剛性 EI を求める。すなわち、 J を各係数で偏微分した式を $= 0$ とした式を立てて解く。まず、推定橋梁曲げ剛性 EI について、

$$\frac{\partial J}{\partial EI} = 0 \quad (10)$$

として、これを解くと、

$$\sum_t^T EI = \frac{\sum_t^T \left(P_1 \varphi(x_{p1}(t)) + P_2 \varphi(x_{p2}(t)) \right)^2}{\sum_t^T v_c(t) \left(P_1 \varphi(x_{p1}(t)) + P_2 \varphi(x_{p2}(t)) \right)} \quad (11)$$

となる。したがって、

$$EI = \frac{\sum_t^T EI}{T} \quad (12)$$

となり、試験車両では車両重量が既知であることから EI を求めることができる。

次に、式(12)で求めた推定橋梁曲げ剛性 EI を用いて、車両重量未知の対象車両の推定軸重 P_1, P_2 を求める。

すなわち、式(10)と同様に、

$$\frac{\partial J}{\partial P_1} = 0, \quad \frac{\partial J}{\partial P_2} = 0 \quad (13),(14)$$

とし、(13),(14)を連立方程式として解く。式(13),(14)をそれぞれ解くと、

$$\sum_t^T \left\{ \left(P_1 \varphi(x_{p1}(t)) \right)^2 + \left(P_2 \varphi(x_{p1}(t)) \varphi(x_{p2}(t)) \right) \right\} = EI \sum_t^T v_c(t) \varphi(x_{p1}(t)) \quad (15),$$

$$\sum_t^T \left\{ \left(P_1 \varphi(x_{p1}(t)) \varphi(x_{p2}(t)) \right) + \left(P_2 \varphi(x_{p2}(t)) \right)^2 \right\} = EI \sum_t^T v_c(t) \varphi(x_{p2}(t)) \quad (16)$$

となるので、式(15),(16)を行列方程式にすると、

$$\begin{bmatrix} \sum_t^T \varphi(x_{p1}(t))^2 & \sum_t^T \varphi(x_{p1}(t)) \varphi(x_{p2}(t)) \\ \sum_t^T \varphi(x_{p1}(t)) \varphi(x_{p2}(t)) & \sum_t^T \varphi(x_{p2}(t))^2 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} P_1 \\ P_2 \end{pmatrix} = EI \begin{pmatrix} \sum_t^T v_c(t) \varphi(x_{p1}(t)) \\ \sum_t^T v_c(t) \varphi(x_{p2}(t)) \end{pmatrix} \quad (17)$$

と記述することができる。したがって、式(17)の行列方程式を解くことで、未知である対象車両の軸重 P_1, P_2 を求めることができる。

第4章 鋼製橋梁計測実験

4.1 実験概要

毛利ら^[14]による実橋梁計測実験では、撮影環境上、橋梁から遠く離れた位置かつ斜めの角度からでしかたわみ計測の撮影ができなかった。その結果、たわみは最大 0.5pixel ほどしか計測できなかった。よって、本研究では、より橋梁に近接して撮影可能である、筑波大学構内に建設した鋼製橋梁模型を用いて計測実験を行う。本実験では、近接撮影によるたわみ計測と遠望撮影による車軸位置計測を実施する。近接撮影では、車両通行によって励起される縦方向の変位を 4K カメラで撮影し、動画データから橋梁のたわみ量を算出する。遠望撮影では、鋼製橋梁全体を撮影し、車両の前軸及び後軸位置を計測する。また本実験では、ドライバーのみ乗車する試験車両を車重既知とし、ドライバーと後部座席に二人乗車する対象車両を車重未知として 2 パターンの撮影を行う。

4.2 対象橋梁，対象車両，撮影機材

対象橋梁の外観と概要をそれぞれ図 4-1 及び表 4-1 に示す。対象橋梁は H 型鋼材を使用した 4 主桁の鋼製橋梁であり、その内 3 主桁に車両走行用の床板が設置されている。更に、荷重を分配する分配横桁が、各 2 主桁間に 7 つ設置されている。橋梁の入退出口には、車両が乗降できるようアプローチが設置されている。また、撮影する車両の外観と概要をそれぞれ図 4-2 及び表 4-2 に示す。本実験では、車重既知とする試験車両はドライバーのみ乗車し、このときの車軸重両を車軸重①とする。車重未知とする対象車両は、ドライバーに加えて後部座席に二人乗車し、このときの車軸重両を車軸重②とする。ここで、車両本体の軸重はカタログスペックを参照して、ドライバー重量を前軸重に加算し、後部座席重量及びガソリン重量を後軸重に加算した。

また本実験では、たわみ計測をする近接撮影と車両の前軸および後軸位置を計測する遠望撮影の二種類の撮影を同時に実施する。使用する撮影機材のスペックを表 4-3 に示す。



図 4-1 鋼製橋梁外観

表 4-1 鋼製橋梁概要

構造形式	桁橋
主構造材料	H 型鋼材
桁数	4 主桁
橋梁[m]	8.35
1 主桁分の 設計曲げ剛性[N・mm ²] (副部材の考慮無し)	9.912 × 10 ¹³
下フランジ厚[mm]	12



図 4-2 車両外観

表 4-2 車両概要

種類	軽自動車	
車軸重①[kg]	前軸 610	後軸 367
車軸重②[kg]	前軸 610	後軸 537

表 4-3 機材設定

撮影機材	AG-DVX200
動画画素数[pixel]	4096×2160
動画フレームレート[fps]	29.97

4.3 計測概要

近接撮影の外観を図 4-3 に、撮影画像を図 4-4 に示す。本研究では橋梁中央部のたわみを計測するため、床板が設置されている外側の主桁中央部の下フランジ側面からレンズまで 8cm の距離で撮影を行った。また、下フランジ側面はマッチングを行う上での特徴が不足しているため、テープによるテンプレートを導入した。撮影時のカメラ設定は、マクロ撮影モードでズームなしのマニュアルフォーカスとした。屋外での撮影かつ主桁部分が影になりやすい位置であったため、アイリスの設定はマニュアルで行い、主桁部が鮮明になるよう調整した。また、カメラ内部での処理が行われていないデータを得るため、自動補正機能を切って撮影した。

次に、遠望撮影の外観を図 4-5 に、撮影画像を図 4-6 に示す。橋梁の主桁全体が画像内に収まるようカメラを設置し、カメラから直近の主桁までおよそ 5.2m の距離で撮影を行った。ただし、橋梁周辺に建物があるため、アプローチを含めて撮影することはできなかった。撮影時のカメラ設定は、ズームなしのオートフォーカスとし、アイリスはマニュアルでの調整、自動補正機能を切った状態で撮影を行った。

また、近接撮影と遠望撮影のカメラ間での時刻同期が必要となるため、同軸ケーブルを BNC コネクタで接続し、タイムコードを共有することで時刻同期を行った。

本実験では、再現性を評価するため、ドライバーのみ乗車を 3 回（ケース 1-1～1-3）、ドライバーと後部座席に二人乗車を 3 回（ケース 2-1～2-3）の、計 6 回車両走行変位を計測した。



図 4-3 近接撮影外観



図 4-4 近接撮影画像



図 4-5 遠望撮影外観



図 4-6 遠望撮影画像

4.4 分析手法

分析において、まず、ピクセル毎に輝度値化するため、走行ケース毎に近接撮影と遠望撮影それぞれの動画について、グレースケールでの画像化を行う。更に遠望撮影における画像から、車軸の橋梁への入退出タイミングを計測する。車両入退出時の画像を図 4-7 及び図 4-8 に示す。

次に、近接撮影におけるサブセットの設定を行う。たわみ計測では、中心に位置するテープに縦横 520×310 [pixel] の暫定的なサブセットを設定した。サブセット画像を図 4-9 に示す。このサブセットを用いて、一度車両未走行時のテンプレートマッチングを行った後、平滑化処理および、その平均値をとることで、最適なサブセットの選定を行う。そして、最適サブセットを用いて、車両走行時のテンプレートマッチングを行う。更に、テンプレートマッチングによって算出された、サブセットの変位量から、橋梁中央部のたわみ量を算出する。この時、下フランジ側面のピクセル数から、1ピクセル辺りの距離を算出する。

次に、得られた軸車重①における橋梁中央部のたわみ量から、3.2 最小二乗法による橋梁曲げ剛性推定及び車両重量推定の橋梁曲げ剛性推定理論より、対象橋梁の推定曲げ剛性 EI を推定する。この時、たわみの理論値における設計橋梁曲げ剛性 EI' は、走行車線直下の 2 主桁分を設計曲げ剛性とした。最後に、車軸重①における推定橋梁曲げ剛性 EI から、車軸重②における推定軸重 P_1, P_2 を算出する。



図 4-7 橋梁進入時(後軸 in)



図 4-8 橋梁退出時(前軸 out)

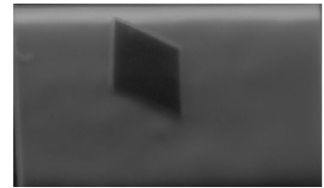


図 4-9 サブセット

4.5 結果と考察

車軸重①のケース 1-1~1-3, 及び車軸重②のケース 2-1~2-3 の各たわみ変位量を, 図 4-10 各ケースのたわみ変位量に示す. 縦軸を変位量[mm], 横軸を時間[t]とする. 図中の黒点線は前軸 in/out, 赤点線は後軸 in/out を示す. 図 4-10 各ケースのたわみ変位量より, 橋梁のたわみが明瞭に鉛直下向きに計測できていることがわかる. また, グラフが上下に振動している原因としては, 車両のサスペンションやエンジンの振動による影響であることが考えられる. 次に, 表 4-4 に各ケースの最大たわみ量と車軸重毎の平均・分散を示す. 平均より, 車軸重②は車軸重①に比べて, 約 0.634mm たわみ量が大きくなっていることがわかる. また, 分散より, 車軸重①内のケース及び車軸重②内のケースはそれぞれ近い値を示していることがわかる.

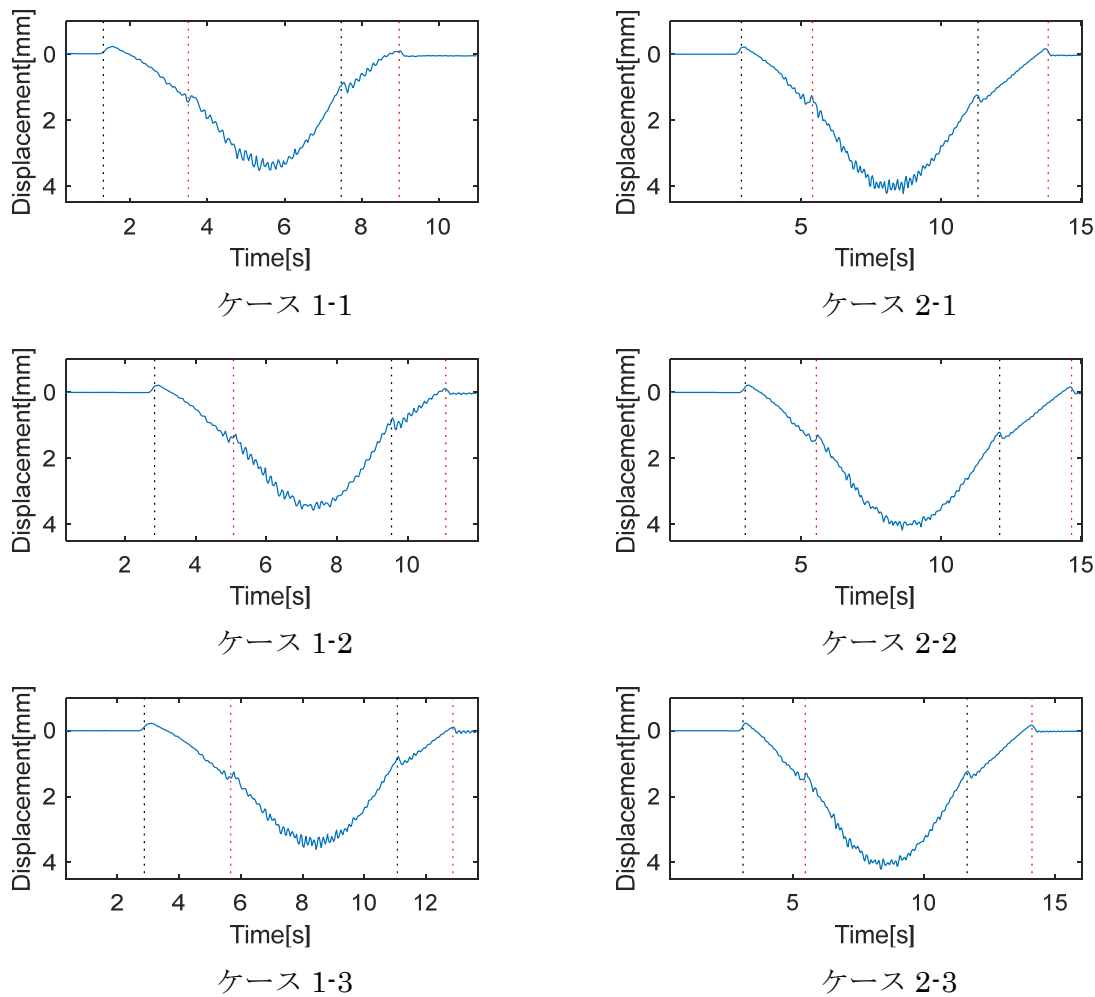


図 4-10 各ケースのたわみ変位量

表 4-4 各ケースの最大たわみ量及び車軸重毎の平均・分散

車軸重	車軸重①			車軸重②		
	1-1	1-2	1-3	2-1	2-2	2-3
最大たわみ量[mm]	3.5282	3.5749	3.6031	4.2275	4.1763	4.2058
平均[mm]	3.5687			4.2032		
分散[mm ²]	1.4310×10^{-3}			0.6604×10^{-3}		

次に、図 4-11 及び図 4-12 に示す、車軸重①の各ケースの後軸橋梁進入時から前軸橋梁退出時までのたわみ量から、推定橋梁曲げ剛性を算出し、車軸重②の各ケースの車軸重を推定した結果を、表 4-5 に示す。表 4-5 より、車軸重①のケースにおける推定橋梁曲げ剛性 EI は、約 $3.05 \times 10^{13} \text{ N} \cdot \text{mm}^2$ となった。ここで、設計橋梁曲げ剛性は、先述のように主桁 2 本分の曲げ剛性を仮定しており、表 4-1 から $1.9824 \times 10^{13} \text{ N} \cdot \text{mm}^2$ となる。設計橋梁曲げ剛性より、推定橋梁曲げ剛性の値が大きくなっているのは、対象橋梁に設置されている床板や荷重を他の主桁に分配する分配横桁等が考慮されていないからであると考えられる。また、設計重量と推定重量の誤差は、2.59%~6.97%の範囲となった。ゆえに、本実験での設計重量が 1147kg

であることから、約 30kg～80kg の誤差が生じることになる。本実験において、80kg の誤差は、後部座席一人分の重量を検知できていないことになるため、推定精度が不十分であると考えられる。この原因としては、入退出時の後軸及び前軸が、橋梁の支承上にあることから、たわみが十分に発生せず、たわみの理論値と実測値で大きな差が生じてしまうことが考えられる。



図 4-11 後軸橋梁進入時



図 4-12 前軸橋梁退出時

表 4-5 車両重量推定結果（後軸 in から前軸 out 区間）

車軸重①ケース	1-1			1-2			1-3		
推定EI [N・mm ²]	3.1011×10 ¹³			3.0094×10 ¹³			3.0584×10 ¹³		
車軸重②ケース	2-1	2-2	2-3	2-1	2-2	2-3	2-1	2-2	2-3
推定前軸重[kg]	608.0	560.9	573.3	590.0	544.4	556.4	599.6	553.2	565.4
推定後軸重[kg]	507.2	538.7	544.0	492.2	522.7	527.9	500.3	531.2	536.5
推定重量[kg]	1115.2	1099.6	1117.3	1082.2	1067.1	1084.3	1099.9	1084.4	1101.9
誤差*[%]	-2.77	-4.13	-2.59	-5.65	-6.97	-5.47	-4.11	-5.46	-3.93

※推定重量と設計重量の誤差とし、設計重量は 1147kg とする。（表 4-2 参照）

そこで、分析対象区間を、前軸及び後軸が完全に橋梁の主桁部分に載荷している区間に設定する。具体的には、図 4-13 及び図 4-14 に示す、前軸が橋梁中央部を走行してから、後軸が橋梁中央部に到達するまでの区間に設定する。この区間において同様に分析を行った結果を、表 4-6 に示す。表 4-6 より、車軸重①のケースにおける推定橋梁曲げ剛性EIは、約 2.97×10¹³ N・mm²となった。後軸 in から前軸 out の区間に比べて、僅かに値が小さくなり、設計値に近づいたことがわかる。また、設計重量と推定重量の誤差が、0.97%～3.76%の範囲となったことから、約 11kg～43kg の範囲に収まった。更に、全体的な誤差の数値も小さくなったことがわかる。この結果から、分析対象区間を橋梁中央部に限定することで、推定精度を上げることができ、車重計測に十分適用できることがわかる。

以上より、画像分析による過積載車両検知への実用性を示した。しかし、本実験においては、車両速度が時速約 4km/h であり、橋梁に対する動的影響が少ない。したがって、実橋梁で考慮する場合、本研究ではたわみの理論式において車軸重を 2 点集中荷重と仮定したが、移動荷重として扱う必要があると考えられる。また、本実験における橋梁は路面凹凸がほとんどないため、実橋梁における路面凹凸がたわみに及ぼす影響を考慮する必要があると考えられる。



図 4-13 前軸橋梁中央時



図 4-14 後軸橋梁中央時

表 4-6 車両重量推定結果（橋梁中央区間）

車軸重①ケース	1-1			1-2			1-3		
推定 EI[N/mm ²]	2.9651×10 ¹³			2.9609×10 ¹³			2.9843×10 ¹³		
車軸重②ケース	2-1	2-2	2-3	2-1	2-2	2-3	2-1	2-2	2-3
推定前軸重[kg]	610.8	554.9	563.5	610.0	554.1	562.7	614.8	558.5	567.1
推定後軸重[kg]	517.8	550.6	555.5	517.1	549.8	554.7	521.1	554.2	559.1
推定重量[kg]	1128.6	1105.5	1119.0	1127.1	1103.9	1117.4	1135.9	1112.7	1126.2
誤差*[%]	-1.60	-3.62	-2.44	-1.73	-3.76	-2.58	-0.97	-2.99	-1.81

※推定重量と設計重量の誤差とし、設計重量は 1147kg とする。（表 4-2 参照）

第5章 結論

本研究では、車両が走行する鋼製橋梁模型に対して、橋梁中央部を映す近接撮影と橋梁全体を映す遠望撮影から、車軸位置を計測しながら橋梁中央部のたわみを計測した。車両にドライバーのみ乗車した場合とドライバーと後部座席に二人乗車した場合の2パターン計測し、ドライバーのみ乗車時のたわみから橋梁の曲げ剛性を推定した。その推定値を基にドライバーと後部座席に二人乗車時の車両重量を推定した。推定重量と設計重量を比較することで、本提案手法の実用性を示した。一連の研究において得られた知見を以下にまとめる。

1. 橋梁に対して十分近接に撮影を行うことで、たわみを計測することが出来る。また、橋梁上を走行する車両の重量が変化しても、その変化の大小に応じてたわみを検知することができる。
2. 車両後軸が橋梁に進入してから車両前軸が橋梁を退出するまでの区間では、車両重量の推定誤差が最大一人分になってしまう。しかし、分析区間を小さくすることで、推定精度を上げることができ、誤差0.97%~3.76%の範囲で車両重量を検知することができる。
3. 実橋梁に本提案手法を適用する場合、荷重の動的影響や路面凹凸を考慮する必要があると考えられる。

謝辞

本研究に際して、丁寧なご指導を頂きました山本亨輔先生と松島亘志先生に深謝いたします。両先生には、ゼミで貴重なご助言を頂くなど、本研究を進めていく上で大変お世話になりました。また、撮影機材をご提供くださいましたパナソニック株式会社の今川太郎様、日下博也様に深く御礼申しあげます。また、実験機材の準備から測定までご協力いただきました大学技術職員の小島篤志様に心より感謝申し上げます。最後に、実験協力をしてくださった村上君を始め、日々の生活から研究までお世話になったフロンティア工学研究グループの皆様、そしていつも支えてくれた家族に心より感謝いたします。

参考文献

- [1] 国土交通省, 道路メンテナンス年報データ集 (集計表), 2017
- [2] 国土交通省, 大型車両の通行適正化の取組について
- [3] 国土交通省, 過積載車両の荷主対策
- [4] Moses F., Weigh-in-Motion System Using Instrumented Bridges, Proc.Of ASCE, Vol.105, No.TE3, pp.233~249, January, 1979
- [5] 小塩達也, 新しい Bridge Weigh-in-Motion の開発と道路構造物の維持管理支援に関する研究, 名古屋大学大学院環境学研究科博士論文, 2006
- [6] 松井繁之, Ahmed EL-HAKIN, RC 床板のひびわれの開閉量による輪荷重の測定に関する研究, 構造工学論文集, Vol.35A, pp.407-418, 1985
- [7] Ales Znidaric, Anthony Dempsey, Igor Lavric, W.Baumgartner, Bridge WIM Systems without Axle Detectors, Proceeding of the Final Symposium of the project Wave, LCPC, pp.101-110, 1998
- [8] 米田昌弘, 枝元勝哉, GA を適用した橋梁交通荷重の推定法に関する研究, 構造高額論文集, Vol.49A, pp.755-765, 2003
- [9] 関屋英彦, 小西拓洋, 木ノ元剛, 三木千壽, MEMS 加速度センサを用いた変位計測に基づく Portable-Weigh-In-Motion システムの提案, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.72, No.3, pp.364-379, 2016
- [10] 川合忠雄, 水本裕之, 画像計測を用いた橋梁の損傷検知手法に関する研究, Dynamics & Design Conference, No.12-12, 2012
- [11] 藤垣元治, 原卓也, 生駒昇, 村田頼信, 列車通過時における鉄道橋の動的な変位計測へのサンプリングモアレカメラの適用, 実験力学, Vol.12, No.3, pp.179-184, 2012
- [12] 藤垣元治, 富田大樹, 村田頼信, サンプリングモアレ法による動的たわみ角分布計測, 実験力学 Vol.15, No.4, pp.315-319, 2015
- [13] 浅川一樹, 画像認識を用いた橋梁耐荷性能の同定に関する基礎的検討, 筑波大学大学院システム情報工学研究科修士論文 pp.1-22, 2017
- [14] 毛利宏輔, テンプレートマッチングを用いた実橋梁変位計測, 筑波大学大学院システム情報工学研究科修士論文 pp.1-31, 2018
- [15] Masao Shimizu, Masatoshi Okutomi, Sub-Pixel Estimation Error Cancellation on Area-Based Matching, International Journal of Computer Vision, Vol.63(3), pp.207-224, 2005
- [16] 清水雅夫, 奥富正敏, 画像のマッチングにおけるサブピクセル推定の意味と性質, 電子情報通信学会論文誌 D, Vol.J85-D2, No.12, pp.1791-1800