論文　ノンターゲット画像測定によるレール・まくらぎ動的応答測定

松岡　弘大[1]・渡辺　勉[2]・箕浦　慎太郎[3]・上半　文昭[4]

[1]正会員　（公財）鉄道総合技術研究所 鉄道力学研究部（〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38）
E-mail: matsuoka.kodai.13@rtri.or.jp

[2]正会員　（公財）鉄道総合技術研究所 鉄道力学研究部（同上）

[3]正会員　（公財）鉄道総合技術研究所 鉄道力学研究部（同上）

[4]正会員　（公財）鉄道総合技術研究所 鉄道力学研究部（同上）

列車通過時におけるレールやまくらぎなどの動的応答は，乗り心地や走行安全性に影響し，道床や路盤の状態とも深く関連する．これまでも動的応答が大きい箇所では接触式による変位測定が実施されてきたが，線路内作業を伴い多大な労力を要していた．本研究では，近年普及しつつある高速度・高解像度ビデオカメラとデジタル画像相関法を応用し，柵外からの列車通過時の軌道部材のノンターゲットでの変位測定を試みた．二種類の軌道を対象として，画像処理手法，デジタルカメラの適用性について比較検討し，カメラ自体の振動と車両影の影響を抑制することでデジタルカメラによりノンターゲットで列車通過時のレールおよびまくらぎの動的変位を測定可能であることを明らかにした．

Key Words : *optical measurement, track dynamics, field test, non-target image processing*

1.　はじめに

これまで列車通過時のレールやまくらぎの変位が大きい箇所では，突き固めや各種対策工の導入が行われるとともに，対策前後のまくらぎの上下変位を比較することで導入効果の検証が行われてきた[1]．ただし，既存の代表的な測定方法は，道床に杭を打込んで固定点を確保するため，簡易とは言い難いうえ，走行車両に近接する軌道内への仮設物の留置には細心の注意が必要とされた[2]．

一方，近年では画像やレーザーを用いた光学式の非接触変位測定法が急速に普及しつつある[2, 3]．特に画像処理技術を活用した変位測定手法は，方法論だけでなく橋梁変位測定など，実務への適用も進められている[4]．画像測定として，測定対象に設置したターゲットの動きを追跡することで変位を測定するターゲット式画像測定[5]と，測定対象表面の光学模様の特徴を参照して変位を測定するノンターゲット画像測定[6]がある．ターゲット式では，ターゲットを単なる目印とする場合のほか，規則的な縞模様が移動した際に生じるモアレ現象を利用し，測定精度の向上を図るものがある[5]．一方ノンターゲット式では，対象物の表面模様を利用しデジタル画像相関法などにより変位を測定する．ノンターゲット式はターゲット設置が不要であり，測定に要する作業が少ない．橋梁などを対象とした精度検証は報告されているが[6]，軌道部材のノンターゲット画像測定はこれまで検討されいない．本研究では，二種類の実軌道においてノンターゲット画像測定によりまくらぎ上下変位を測定し，既存手法での測定変位との比較により測定精度の検証を行う．

またこれまでのノンターゲット画像測定では，産業用の高速度カメラと収録用PCの使用が一般的であったが，近年ではデジタルカメラでも60fps程度の高速動画撮影が可能となってきた[7]．現場作業のさらなる省力化を目指して，本研究では軌道部材のノンターゲット画像測定へのデジタルカメラの適用性についても検討した．

ノンターゲット画像測定における代表的な課題として，対象物の表面の照度のほか，影，降雨，降雪などがあげられる[8]．特に軌道部材の画像測定では走行する車両の影（車両影）が撮影画像内を横切ることが想定される．車両影は画像処理に対して多大に影響を及ぼすが，詳しく検討した事例は見られず，本研究において実軌道での測定画像をもとに軌道部材の撮影に特有の車両影の影響とその抑制策について検討した．また，上記の検討結果を踏まえたデジタルカメラによるノンターゲット画像測定の適用例としてレールの連続変位測定の事例を示す．

表-1　撮影機器の諸元

カメラ	画素数	サンプリング
CMOSモノクロカメラ（高速度カメラ）	220万（2048×1088）	170fps
DMC-FZH1デジタルカメラ（デジタルカメラ）	200万（1920×1080）	60fps

2.　検討方法

(1)　対象軌道と測定方法

ここでは画像処理方法および撮影カメラの違いが画像測定に及ぼす影響をそれぞれ検証する．前者については1台の高速度カメラで撮影した動画に対して後述するノンターゲットでの画像処理，およびモアレ法[10]による画像処理を適用した．後者については同一箇所を高速度カメラおよびデジタルカメラにより撮影し，同じ画像処理方法を適用し比較した．

表-1 に用いたカメラの諸元を示す．高速度カメラとして220万画素で最大170fpsでの撮影が可能な産業用カメラであるCMOSモノクロカメラを使用した．高速度カメラの制御はノートPCにより行い，撮影画像もノートPCに記録される．デジタルカメラとして200万画素で最大60fpsでの動画撮影が可能なDMC-FZH1を用いた．デジタルカメラでは撮影画像が内蔵のSDカードに記録されため，制御用のノートPCは不要である．

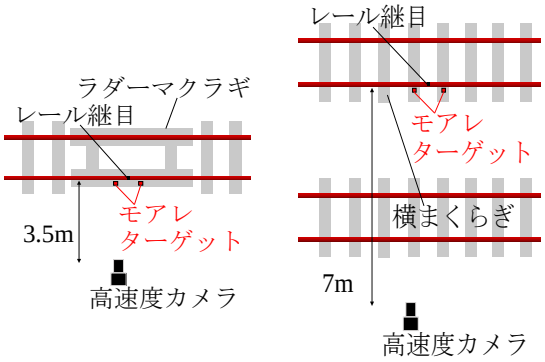
図-1 に高速度カメラのみを用いた現地測定の様子を示す．ここでは，列車通過時の上下変位が大きい傾向にあるレール継目部を対象とした．レール継目部は沈下量や対策効果の検証で鉛直変位の測定事例が多い箇所であり，主に実務への適用性の観点から選定した．また，ラダーマクラギ箇所[9]および横まくらぎ箇所の二種類の軌道で列車通過時のレールおよびまくらぎを撮影した．

図-2に撮影対象と高速度カメラの設置位置の関係を示す．ラダーマクラギ箇所ではカメラをレールから3.5mの位置に設置した．モアレ法を適用するためのターゲットは継目を挟むようにラダーマクラギ上に2点設置した．横まくらぎ箇所は撮影対象の継目部から手前の線路を挟んで約7m地点にカメラを設置した．継目部は掛け継であり，モアレ法を適用するため，継目に近い二本の横まくらぎにターゲットを設置した．

図-3に各測定箇所での撮影画像の例を示す．白の正方形に黒の四角が格子状並んだものがモアレ法に用いるターゲットである．

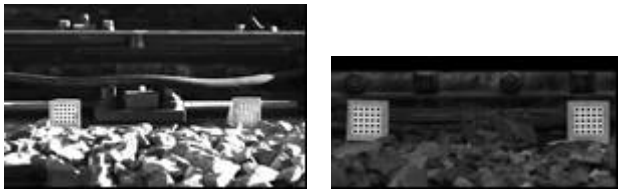
(a) ラダーマクラギ箇所　(b) 横まくらぎ箇所

図-1　高速度カメラでの撮影



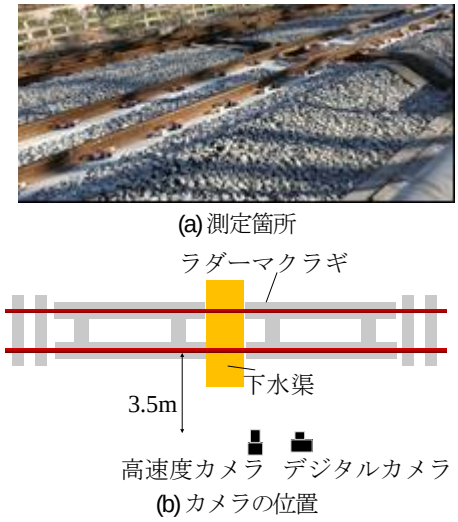
(a) ラダーマクラギ箇所　(b) 横まくらぎ箇所

図-2　撮影対象部分と高速度カメラの位置



(a) ラダーマクラギ箇所　(b) 横まくらぎ箇所

図-3　高速度カメラでの撮影画像の例



(a) 測定箇所

(b) カメラの位置

図-4　撮影カメラの影響に関する測定試験の様子

図-4 に撮影カメラの影響を検討するための測定試験の様子を示す．ここでは，**表-1** に示す高速度カメラとデジタルカメラにより，列車通過時のまくらぎおよびレールの変位測定を行った．**図-4** に示すように撮影対象箇所とカメラの距離は3.5m程度である．撮影画像から

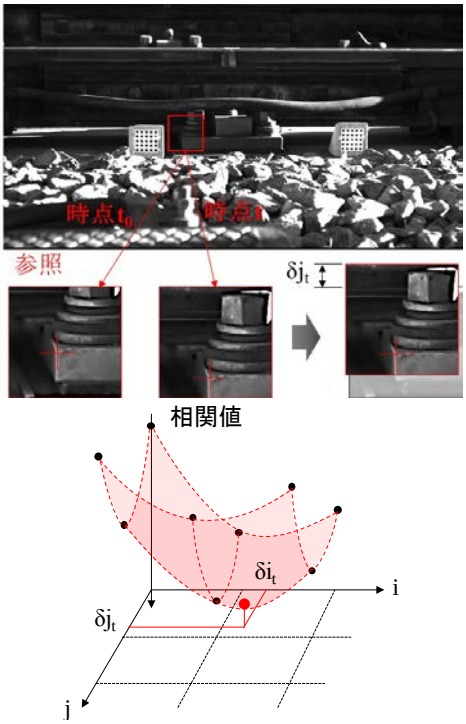


図-5　変位測定処理の例

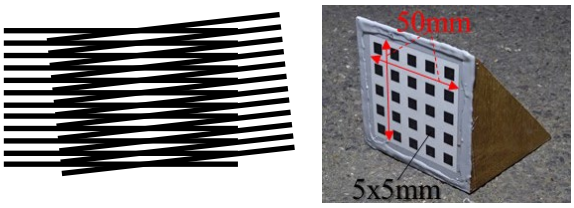


図-6　モアレ縞の例と本研究で用いたモアレ用ターゲット

後述するデジタル画像相関法により変位を推定し，比較することでデジタルカメラの適用性について検討した．

(2)　画像処理方法

a)　ノンターゲット画像測定

図-5に本研究で扱う撮影画像での変位測定処理の例を示す．本研究ではまず画像全体から変位を推定する点周辺の小さい画像（サブセット）を切り出し，時点が異なるサブセットに対してデジタル画像相関法[6]により位置ずれ量を推定する．なお，本研究ではサブセットの大きさについて5~20ピクセル程度まで試行し，縦横11ピクセルに設定した．なお，この値は経験的に設定したものであり，より詳細な検討は今後の課題としたい．例えば，図-5では時点t_0における図中四角枠の観測エリアG(i,j)をリファレンスとして設定し，任意時点tにおける観測エリアF(i,j,t)の画像上での移動量を計算し，変位量を測定する．画像移動量には各正規化相互相関（Normalized Cross Correlation：以下，NCC）を用いた．NCCは観測エリアの画像の輝度を正規化した後に，比較する2つの画像の相互相関値が最も高くなる移動画素数を算出する手法である．また，NCCを算定する前にサブセットのヒストグラム平坦化を行い，画像内の特徴の鮮明化を図っている．加えて，サブピクセル推定として，相関値が最も高くなる画素とその周辺8画素の相関値に対してパラボラ関数のフィッティングを行い，パラボラ関数に最大値を与えるiおよびjをサブピクセルでの位置的なずれ量δiおよびδjとして算出した[6]．また，フィッティング関数を利用したサブピクセル推定においては，移動量が整数値に偏るピクセルロッキングと呼ばれる現象が発生する場合がある[10]．そこで，ピクセルロッキングの影響を低減するためにEstimation Error Cancelation（以下，EEC）法と呼ばれる0.5画素だけ平行移動した画像も移動量推定に利用する手法[10]を採用し，サブピクセル推定誤差の低減を図っている．本手法の精度は橋梁の変位測定を対象とした試験により検証されており，概ね30分の1ピクセル程度であることが明らかにされている．さらなる詳細については文献[6),10)]を参照されたい．

b)　モアレ式画像測定

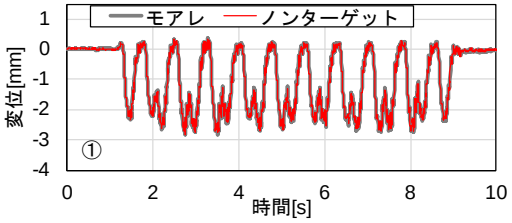
図-6に示すにように等間隔の基準格子にその格子が少し変形したものを重ね合わせたると，新しい周期的な模様が表れる．これをモアレ縞と呼び，モアレ縞を利用して微小変位を測定方法をモアレ法と呼ぶ[8]．ここではモアレ法の一種であるサンプリングモアレ法を用いてモアレ縞の位相解析を行うことで，ある時点を基準とした画像の移動量を測定する[9]．図-6には本研究で用いたモアレ用ターゲットを示す．ターゲットは50x50mmの正方形に5x5mmの黒の正方形が5mmピッチで配置されている．これをまくらぎに接着剤により設置し，図-3に示すようにカメラにより撮影する．画像に移ったターゲットの格子部分を切り出し，参照画像との比較によりモアレ縞を発生させ，その周期から変位を測定した．既往の研究からサンプリングモアレ法では格子ピッチの50分の1程度の変位を測定することができる[9]．したがって，本研究の測定精度は概ね0.1mm程度となる．モアレ式画像測定はすでに変位測定例やひび割れ検知手法なども提案されている．さらなる詳細は文献[8),9)]を参照されたい．

3.　検討結果

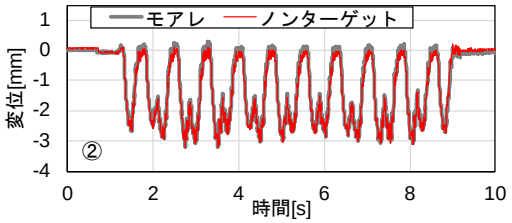
(1)　画像処理法の影響1：ラダーマクラギ箇所

図-7 にラダーマクラギ箇所での変位測定位置を示す．ここではモアレ法と比較するため，ノンターゲット画像測定法の測定位置をモアレ用ターゲットの位置（図-7中①および②）と同じに設定した．なお，二つの測定法を同じ位置で比較するため，ノンターゲット画像測定法でもモアレターゲット部を対象としたが，当該部分はモノクロ二値でコントラストが高く，一般部よりも測定精度が向上している可能性は否定できない．ノンターゲット画像測定法ではモアレ用ターゲットのない継目板部分

図-7　ラダーマクラギ箇所の変位測定位置



(a)　測定箇所①全体（継目手前）



(b)　測定箇所②全体（継目奥）

図-8　ラダーマクラギ箇所の変位測定結果の比較（全体）

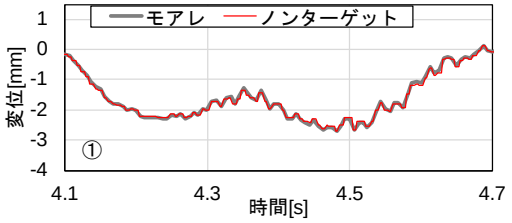
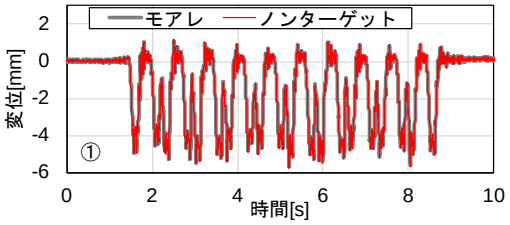


図-9　ラダーマクラギ箇所の変位測定結果の比較（拡大）

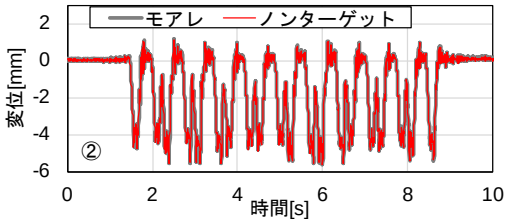
表-2　最大沈下量の比較

	最大沈下量[mm]	
測定位置	モアレ	ノンターゲット
箇所①	2.82	2.82
箇所②	3.19	3.18

図-10　横まくらぎ箇所の変位測定位置



(a)　測定箇所①全体（継目手前）



(b)　測定箇所②全体（継目奥）

図-11　ラダーマクラギ箇所の変位測定結果の比較（全体）

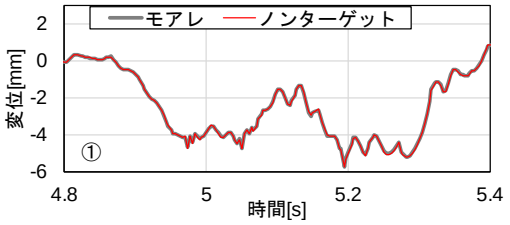


図-12　ラダーマクラギ箇所の変位測定結果の比較（拡大）

表-3　最大沈下量の比較

	最大沈下量[mm]	
測定位置	モアレ	ノンターゲット
箇所①	5.71	5.72
箇所②	5.56	5.63

での測定を試行し，変位が測定可能であることを確認しているが，振動台などを用いたより詳細な精度検証は今後の課題としたい．

図-8 にラダーマクラギ箇所の上下変位の比較を示す．ノンターゲット画像測定で得られた変位は測定点①②ともモアレ法により得られた変位と精度よく一致する．

図-9 は箇所①での 4.5 秒付近を拡大した測定変位を示す．ノンターゲット画像測定で得られた変位は車軸通過に伴う準静的な低周波の振動成分だけでなく，高周波の細かい応答成分までモアレ法と一致する．**表-2** に最大沈下量の比較を示すが，箇所①および②ともに測定手法間で有意な差異を確認することはできない．

(2)　画像処理法の影響2：横まくらぎ箇所

図-10 に横まくらぎ箇所での変位測定位置を示す．ノンターゲット画像測定法の測定位置をモアレ用ターゲットの位置（**図-10** 中①および②）と同じに設定した．

図-11 に横まくらぎ箇所の上下変位の比較を示す．ノンターゲット画像測定で得られた変位は，測定点①および②ともモアレ法により得られた変位と精度よく一致することが確認できる．

図-12 は箇所①での 5 秒付近を拡大した測定変位を示すが，ノンターゲット画像測定とモアレ法で差異は見られない．**表-3** に最大沈下量の比較を示すが，箇所①および②とも測定手法による差異は小さい．

以上からデジタル画像相関法に基づくノンターゲット画像測定精度は，既存のターゲット式画像測定手法と同程度であり，まくらぎの上下変位の測定に十分な精度を有することが確認された．

(a) デジタルカメラ画像　　(b) 高速度カメラ画像

図-13　デジタルカメラおよび高速度カメラの撮影画像の例

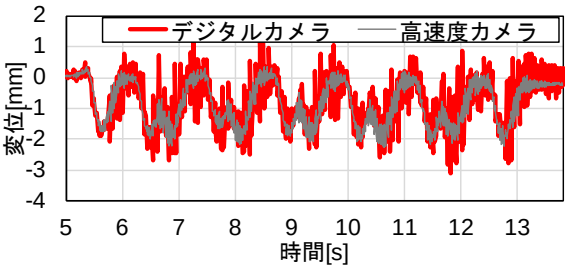


図-14　デジタルカメラおよび高速度カメラの測定変位の比較

(3)　デジタルカメラの適用性

図-13に撮影カメラの影響に関して検討した際のデジタルカメラおよび高速度カメラの撮影画像を示す．モアレ用ターゲットが設置されているが，ノンターゲット画像測定を適用している点に留意されたい．測定したラダーマクラギ地点の画素数は，高速度カメラ画像がデジタルカメラ画像の概ね倍程度，サンプリング周波数（フレームレート）はデジタルカメラが60fps，高速度カメラが150fpsである．

図-14にデジタルカメラおよび高速度カメラでそれぞれ撮影した画像からデジタル画像相関法により推定した列車通過時のまくらぎ上下変位の比較を示す．デジタルカメラで測定した変位でもまくらぎの上下変位を読み取ることができるが，デジタルカメラに基づく変位は高速度カメラに比べて高周波のノイズ成分が大きく，測定精度が低下していることがわかる．最大沈下量でみれば，デジタルカメラでの測定値は高速度カメラの1.5倍程度となっており，高速度カメラを正解値とすればデジタルカメラでの測定では最大沈下量の50%程度のノイズが生じている．ただし，画素数やサンプリングの相違がここまで大きなノイズの主要因とは考えにくいため[4]，以下にその原因の分析を行った．

撮影動画を見直したところカメラ自体の揺れと思われる画像全体の振動が確認された．カメラ自体の振動や動きはオプティカルフローと呼ばれ，画像からオプティカルフローを推定方法もすでに多く提案されている[11]．ここでは，オプティカルフローの影響を確認することを目的とし，最も簡易な方法として以下の処理を行った．不動点としてバラスト上面の変位（バラスト変位）をまくらぎ変位と同時に推定し，バラスト変位をオプティカルフローとしてまくらぎ変位からバラスト変位を差し引くことでカメラ自体の揺れを除去した．なお，本研究の対象箇所では列車通過時のバラスト上面の動きが小さいことから不動点として選定したが，測定箇所によってはバラスト自体が振動する場合もあるため，本手法の適用性については今後さらに検討する必要がある．

図-15　カメラ自体の振動推定のための測定点の設定

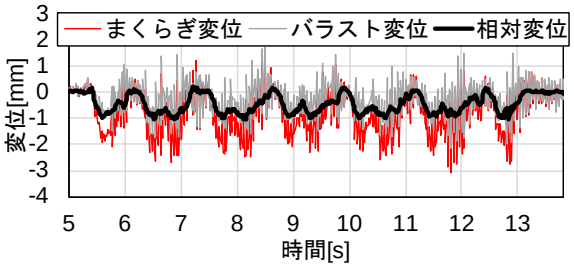


図-16　バラスト変位を用いたカメラ自体の振動除去

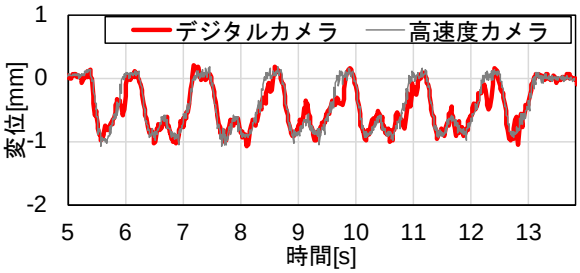


図-17　カメラ自体の振動を除去した場合のまくらぎ変位

図-15にまくらぎ変位の測定点およびオプティカルフロー推定用のバラスト変位の測定点を示す．なお，本研究で構築した変位推定システムでは同じ画像から任意個数の測定点を同時に設定し変位を推定できる．

図-16にデジタルカメラで撮影した画像から推定したまくらぎ変位，バラスト変位およびバラスト変位に対するまくらぎの相対変位を示す．バラスト上面で最大で2mm近い変位が生じており，列車通過時にカメラが振動していることがわかる．また，バラスト変位をまくらぎ変位から差し引くことで得られる相対変位は，元のまくらぎ変位から高周波のノイズ成分が除去され，列車通過に伴う変位の発生を明確に読み取ることが可能である．

図-17にデジタルカメラおよび高速度カメラでカメラ自身の揺れを除去したまくらぎ上下変位を示す．図-14と比較して高周波の振動成分が除去され，列車通過に伴うまくらぎの準静的な上下変位の測定精度が向上する．以上より，高速度カメラの結果と比較すると若干ノイズと思われる変動が残ることに留意する必要があるが，オプティカルフロー処理を行うことでデジタルカメラをまくらぎ上下変位の測定に利用できると考えらえる．図-17で見られる誤差に関しては走行する車両影の影響が疑われる．これについて次節で分析する．

図-19　車両影が混入する画像の例（図-18　A時点）

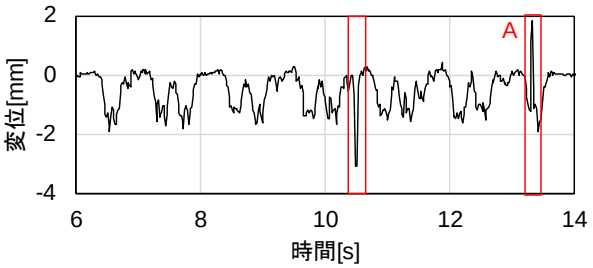


図-18　車両影による測定誤差の例

(4)　車両影の影響

軌道部材の画像測定では撮影位置と日照方向により，走行する車両の影（以下，車両影）が画像に映り込む．デジタル画像相関法では画像の特徴に合わせて変位量を推定しているため，車両影を追いかけてしまうことで見かけ上変位が大きくなる誤差が生じる．ここでは，車両影の影響について分析した．

図18に車両影の影響により見かけ上の変位が生じた測定波形の例を示す．なお，本画像は前節にて高速度カメラにより撮影し，デジタル画像相関法により推定したものである．図-18中に四角囲いで示す範囲にスパイク上のノイズが生じていることを確認できる．また，全体として列車通過時の高周波成分が大きく，測定精度が低下していることが疑われる波形となっている．

図-19には，図-18中の四角囲いAの時点における実際の撮影画像を示す．時点①において画像左から車両影である黒い領域が出現し，車両走行に伴い時点②，時点③で測定対象箇所が車両影の領域に入る．時点④から時点⑨は完全に車両影の中に入っている状態である．これら状態においてもサブセット画像をヒストグラム平坦化しているため，全体の明るさはある程度確保され，レールやまくらぎを判別することはできる．しかしながら，車両影により暗い画像を平坦化により明るくしているため，レール部に新たな模様が発生したり，若干光の当たる下フランジ部分が白飛びしていることがわかる．デジタル画像相関法ではこれらの画像の変化を見かけ上の変位量

図-20　車両影の影響低減のためのサブセット範囲の限定

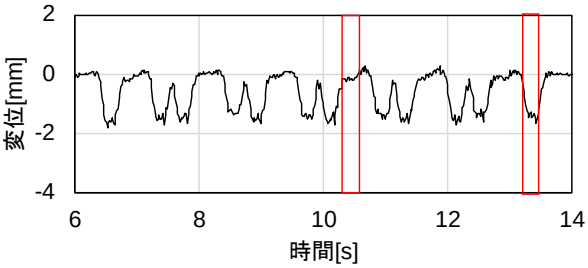


図-21　サブセット範囲の限定による車両影の影響低減効果

として評価してしまうことで，図-18に見られるスパイク上の測定誤差や全体的なノイズ量の増加が発生すると考えられる．簡易的にこの誤差を低減するため，変位推定で切り出すサブセット範囲を限定することを考える．

図-20に車両影の影響を低減するために限定したサブセット範囲を示す．サブセット範囲を限定することで，ある時点で突然影の中に入り，サブセット全体が暗くなる．したがって，車両影がサブセット内を徐々に移動していくことで生じる見かけ上の変位の発生は抑制される．サブセット全体の明暗の相違自体はデジタル画像相関で求めるNCCによりその影響が抑制される．

図-21に図-20に示す通りにサブセット範囲を限定した場合におけるノンターゲット画像測定法での測定変位を示す．なお，ここではサブセット範囲は変位探索範囲15ピクセルと最大移動量約4ピクセルを踏まえて，概ねその2倍程度となる40ピクセル程度に（上下方向の）サブセット範囲を限定している．図-21では図-18に見られた赤囲い部分でのスパイク上の誤差が消えるとともに，波形全体でも高周波のノイズ成分が低減され，測定精度が向上していることがわかる．したがって，画像の移動量

図-23　レールの連続変位測定箇所の撮影画像と連続的に配置した測定点（○箇所）

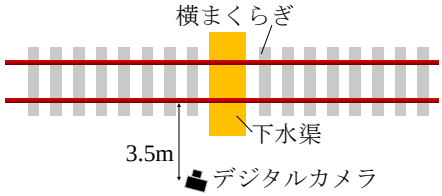


図-22　レールの連続変位測定箇所（ラダーマクラギ導入前）

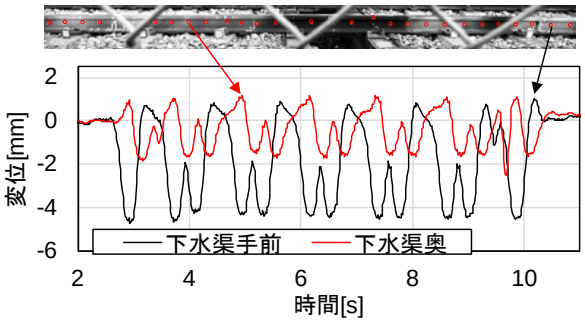


図-24　レールの連続変位測定箇所（ラダーマクラギ導入前）

と変位探索範囲を十分にカバーできる範囲（本研究では概ね変位探索範囲の2倍）にサブセットを限定することで，簡易に車両影の影響を抑制できる場合があることがわかる．3.(3)で示したオプティカルフロー除去処理と合わせることで，一定精度を確保したうえでデジタルカメラによる簡易な変位測定が可能であると考えられる．

(5)　レールの連続変位測定

検討してきたデジカメによるノンターゲット画像測定法の活用例としてレール変形形状の測定例を示す．

図-22に測定箇所とカメラの配置を示す．ここでは，図-4に示した下水渠箇所を対象とした．なお，ラダーマクラギ敷設前であり，横まくらぎが敷設されている．

図-23にデジタルカメラで撮影した画像の例を示す．また，測定点設定箇所を○印で示す．測定点はレール部に概ね150~200mm間隔で長手方向に連続的に設定した．なお，柵外から撮影したため金網と測定点が重複する箇所は測定点から削除した．

図-24に測定した列車通過時のレール上下変位の例として，下水渠手前（画像右）と下水渠奥（画像左）の結果を示す．列車が画像右から左に走行するため，車軸通過に伴って下水渠手前で沈下が生じた後，下水渠奥で沈下が生じる．また，下水渠手前の沈下が最大となるタイミングで下水渠奥のレールに上側変位が生じている．

図-25に先頭車両の前台車通過時（2.5~3.8秒程度）におけるレールの連続変位測定結果を示す．なお，変位測定結果は100倍に拡大して示す．車両の接近とともに下水渠手前（画像右）で下側変位が増加し，逆に下水渠奥

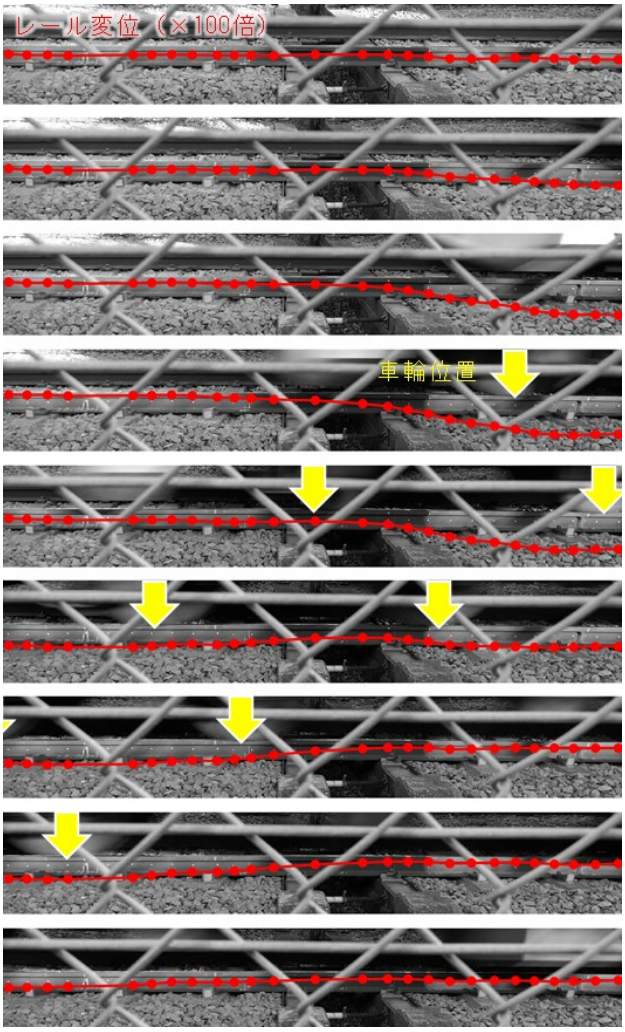


図-25　列車通過時のレールの連続変位測定結果

（画像左）のレールは上側変位が生じる．また，二つの車軸が下水渠を挟んで位置する場合は下水渠を支点として手前と奥の両側で下側変位が生じる．その後，下水渠奥に車軸が位置する場合は，下水渠奥のレールは下側，手前は上側の変位が生じる．実際は列車通過に伴うレールの変形挙動を動画として確認できるため，下水渠が横まくらぎ箇所に比べて支持剛性が高く，列車通過時に下水渠を支点としてレールがシーソーのような動きをすることを直観的に理解可能である．また，本測定の後に当該箇所ではラダーマクラギが導入されている．導入後の測定結果と比較することで，列車通過時の挙動がどう変化し，道床沈下にどのような効果があったのかを詳細に分析することが可能になる．なお，ラダーマクラギの導入後の動的挙動とその効果については別の機会に改めて発表することとしたい．

4. まとめ

本研究では，列車通過時の軌道部材の動的変位を簡易に測定するデジタルカメラを用いたノンターゲット画像測定手法について実軌道を対象に検討を行った．得られた知見を以下に示す.

(1) ノンターゲットでの変位測定に用いるデジタル画像相関法について，列車通過時のまくらぎ上下変位を対象にターゲット式画像測定法と比較し，十分な精度を有することが確認した.

(2) 産業用高速度カメラとの比較によりデジタルカメラの適用性を検討し，主なノイズ要因となるカメラ自体の振動および車両影の影響を低減することで，列車通過時のまくらぎ上下変位を評価可能な精度で測定できることを明らかにした.

(3) ノンターゲット画像測定の利点を活かし，レール長手方向に連続的に測定点を配置することで，車両通過に伴う変形形状の測定が可能であることを示した．また，下水渠など特殊な軌道構造を有する箇所における列車通過時の特徴的な挙動をレールの変形形状から把握できることを示した.

今後，より汎用的に利用を想定し，雨や雪，照度など気象条件が測定精度に及ぼす影響についても検討していく．また，提案手法の信頼性向上のため既存の代表的な変位測定手法である接触式変位計測との比較も重要であると考えられる．なお，今後は手法開発だけでなく，提案したノンターゲット画像測定法を用いて，ラダーマクラギなど道床沈下対策の導入効果の定量化，抑制メカニズムの解明などの応用研究を進めていく予定である.

謝辞：本研究の現地測定では，東日本旅客鉄道株式会社，および京王電鉄鉄道事業本部飯野様に多大なるご協力を頂いた．ここに記して感謝の意を表する.

本研究の一部は、国土交通省の鉄道技術開発費補助金を受けて実施した.

参考文献

1) 面高陽紀，熊倉孝雄，小西俊之：TC 型有道床弾性まくらぎの開発，JR EAST Technical Review, No. 55, pp. 25-26, 2016.
2) 上半文昭：構造物診断用非接触振動測定システム「Uドップラー」の開発，鉄道総研報告，Vol. 21，No. 12, pp. 17-22，2007.
3) 米山聡，北側彰一，岩田節雄，谷和彦，北村幸嗣，菊田久雄：デジタル画像相関法を用いた橋梁の非接触たわみ分布測定，非破壊検査，Vol. 55，No. 03，pp. 119-125，2006.
4) 今井道男ほか：高速撮影動画を用いたデジタル画像相関法によるコンクリート構造物の動的挙動把握，土木学会論文集 A1 (構造・地震工学)，Vol. 72，No. 1, pp/ 279-289，2016.
5) 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.
6) 松岡弘大，上半文昭，日下博也，今川太郎，野田晃浩：ノンターゲット光学式測定による桁たわみ形状測定の精度検証と適用性検討，土木学会論文集 A2（応用力学），Vol. 74，No. 2，pp. I_715-I_726，2018.
7) 高橋康将，坂本保彦，御崎哲一，内田修，近藤健一，小野徹：デジタルカメラを用いた非接触式たわみ測定手法の開発，鉄道工学シンポジウム論文集，Vol. 16，pp. 117-124，2012.
8) 白崎広和，栗林健一，齊藤岳季，李志遠，津田浩，王慶華，樋口哲也：サンプリングモアレ法による鉄道橋のたわみ測定と精度比較，鉄道工学シンポジウム論文集，Vol. 21，pp. 107-110，2016.
9) 箕浦慎太郎，渡辺勉：画像計測手法を用いたレール継目部におけるラダーマクラギの動的特性の検討，日本鉄道施設協会誌，Vol. 55，No. 8，pp. 591-594，2017.
10) 清水雅夫，奥富正敏：画像のマッチングにおける高精度なサブピクセル推定手法.，電子情報通信学会論文誌 D，Vol. 84，No. 7，pp. 1409-1418，2001.
11) 海老根巧，浜田望：観測系の運動を考慮したオプティカルフロー推定に基づく運動物体検出，電子情報通信学会論文誌 D，Vol. 83，No. 6，pp. 1498-1506，2000.

(2019. 4. 5 受付)

A NON-TARGET IMAGE MEASUREMENT FOR RAIL AND SLEEPER DYNAMIC RESPONSES

Kodai MATSUOKA, Tsutomu WATANABE, Shintaro MINOURA and Fumiaki UEHAN

The dynamic response of rails and sleepers under train passages affects the ride comfort and running safety, and is deeply related to the condition of ballast and ballastbed. In the past, displacement measurement by contact method has been conducted at locations with large dynamic responses, however a lot of labor is required due to work in the track. In this study, a simple non-target image measurement for track members is proposed using a high speed and high resolution digital video camera and digital image correlation, which are spreading in recent years. As a result of comparing with the Moire method which is also existing image measurement method with the target for two kinds of actural tracks, it was clarified tahat the proposed method has the similar accuracy as the exising method for the dynamic displacement measurements of the rails and sleepers during train passing.