

車載ラインセンサによる屋外長尺画像撮影時の振動成分推定

新井 啓之[†] 片岡 香織[‡] 梅田 崇之[‡] 安藤 慎吾[‡]

[†] 日本工業大学 先進工学部 〒345-8501 埼玉県南埼玉郡宮代町学園台 4-1

[‡] NTT メディアインテリジェンス研究所 〒239-0847 神奈川県横須賀市光の丘 1-1

E-mail: [†] arai.hiroyuki@nit.ac.jp

あらまし

ラインセンサを縦向きに車載し移動させながら撮影することにより道路周辺を高い解像度で捉えた長尺画像を得る。撮影された長尺画像は、目視や画像処理による道路付近の各種構造物の状態把握に役立てることができる。しかし実際の撮影時には、走行に伴う様々な力がラインセンサに加わるため、カメラの固定状態によっては振動が発生することがあり、これにより長尺画像の品質が劣化する。本稿では特にライン方向つまり上下方向の振動成分に注目し、撮影された長尺画像のみからこの振動成分を推定する方法を提案する。本方法では、近接する縦ライン間に一定の連続性があること、および振動成分が正弦波状であることを仮定し、位相限定相関法を用いたライン間のシフト量の推定、およびフーリエ解析を利用したモデルパラメータの推定により振動成分を定量的に推定する。シミュレーションおよび屋外を撮影したラインセンサ画像を用いた実験の結果、提案手法の有効性を確認した。

キーワード ラインセンサ, 画像補正, フーリエ解析, 位相限定相関

Estimation of vibration component in outdoor image captured by in-vehicle line sensor

Hiroyuki ARAI[†] Kaori KATAOKA[‡] Takayuki UMEDA[‡] and Shingo ANDO[‡]

[†] Faculty of Advanced Engineering, Nippon Institute of Technology

4-1 Gakuendai, Miyashiro-machi, Minamisaitama-gun, Saitama, 345-8501 Japan

[‡] NTT Media Intelligence Laboratories, 1-1 Hikarino-oka, Yokosuka-shi, Kanagawa, 239-0847 Japan

E-mail: [†] arai.hiroyuki@nit.ac.jp

Abstract A method for estimating and correcting the vibration component in outdoor image captured by vertically installed in-vehicle line sensor is proposed. When outdoor image is captured with a line sensor while moving, vibration of a vehicle or equipment during moving causes periodical shifts in the image. Vertical shifts between every adjacent line are estimated using phase-only correlation technique which can estimate the parallel shift between two images in sub-pixel precision. Then, using the estimated shift-values, vibration component in the image is estimated using 1-dimensional discrete Fourier transformation and linear regression technique. The effectiveness of the proposed method was confirmed by experiments with images taken by vertically installed in-vehicle line sensor.

Keyword Line sensor, Image Correction, Fourier analysis, Phase-only correlation,

1. はじめに

高度経済成長期以降に建設された道路、トンネル、通信設備等の各種インフラ設備は老朽化が進みつつある。インフラ設備の破壊に伴う事故を防止することは極めて重要であるとは言うまでもないが、限られた予算の中で優先順位を付けて計画的に補修することもまた重要になってきている。そのためにはまずインフラ設備の現況を正しく把握することが欠かせない。この目標に対し、これまで、高解像度のラインセンサを活用した屋外インフラ設備管理について検討を進めてきた¹⁾。

ラインセンサは1次元のライン状の画像を高速かつ高い解像度で撮影できるという特長を持ち、被写体が移動する場合、もしくはラインセンサが移動する場合には、一般的なエリアセンサよりも高い解像度の画像（長尺画像）を得ることができる。この長尺画像を定期的に撮影し、目視確認や画像処理による分析を行うことで電柱、電線等の屋外構造物の状態を継続的に監視、管理することができるようになる。図1は、ラインセンサカメラを自動車等の移動体に搭載し、側面方向にカメラを向けて撮影した場合の例を示している。ところが、車載ラインセンサカメラでの撮影において

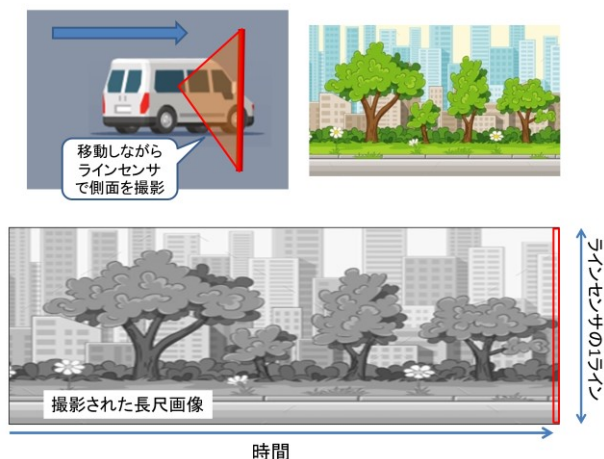


図 1. ラインセンサカメラを用いた長尺画像の撮影

は、移動体に設置されたラインセンサカメラに様々な力（加速度）が加わるため、カメラの固定状態によって振動が発生することがある。その原因は大きく、車両自体の振動と、移動時の加速度に誘発されるカメラ自体の振動に分けることができる。

図 2 はラインセンサが移動に伴い上下に振動した場合の画像の様子を示している。移動に伴いカメラが上下方向に規則的に振動することで、画像上の被写体は横方向（ x 方向）に対して規則的に上下変動（ y 方向）することとなり、正弦波またはそれに類する規則的な振動が観測されることになる。このような振動のうち、高い周波数の振動が存在する画像では、画像上の微細なテクスチャが変化し、被写体の表面の状態、例えば電柱のひび割れなどを正しく評価できなくなる恐れがある。本研究はこのような高い周波数を持つ振動成分を画像から推定し補正することを目的とする。

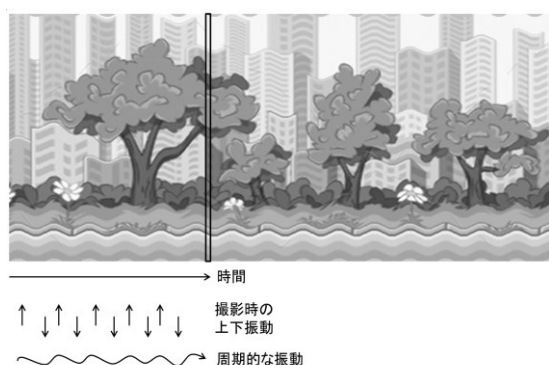


図 2. 上下ライン方向の振動の影響

このような振動を補正する方法として、カメラに加速度センサ等のセンサを設置することで、このセンサの計測データをもとに画像を補正する方法が考えられるが、画像との時刻同期や、センサ値と画像内の振動量の正確な対応付けが難しいといった課題が存在して

おりその解決は容易でない。一方、例えば、幾何学的な性質が既知である被写体、例えば道路の白線やガードレールなどの直線状の被写体がある場合には、これらの被写体の輪郭等を分析することで画像内の振動量を推定することができる。しかしながら、このような特殊な被写体がない場合には振動量を推定することはできない。

これに対し本手法では、一般的な被写体であっても近接する縦ライン間に一定の連続性があることに注目し、振動成分を推定する。

2. 予備検討（縦ライン画像間の相関）

画像内には様々な被写体が存在しているが、その多くは一定の大きさを持っているため、ある位置の画素値とその近隣の画素値は近い画素値を持つ可能性が高くなる。図 2 のような縦ライン画像とその近隣の縦ライン画像とが一定の類似性を持っているのであれば、これらを上下にずらしながら照合することで、ライン間のシフト量（上下のシフト量）を推定することができ、これに基づき画像中の振動成分を定量的に推定することが可能となると期待される。

図 3 は通常のカメラで撮影した画像であり、(A)は森林、(B)は住宅地を撮影したものである。これらの画像内の全ての縦ライン画像間でずらしマッチングを行い、最もよく一致したときの相関値を求め、これをライン間の距離ごとに平均化した結果を図 4 に示す。ここでは相関の評価値として規格化された誤差二乗和 (SSD: Sum of squared difference) を用いており、この値が小さいほど高い相関を持つ。図 4 を見ると、個々の被写体が小さく乱雑性が高い画像 A（森林）と人工物が比較的大きく写っている画像 B（住宅地）とで定量的な違いはあるものの、いずれの場合もライン間の距離が大きくなるとともに急激に相関は小さくなっている。ライン間のマッチングを安定的に行うためにはライン間の距離が小さいほど良いということになるが、一方で距離が近すぎると上下の移動量が非常に小さくなり、振動成分の推定を行うためには不利になる可能性がある。このことを踏まえつつ、振動成分を推定するアルゴリズムを具体化していく必要がある。



画像 A(森林)

画像 B(住宅地)

図 3 基礎検討に用いた画像

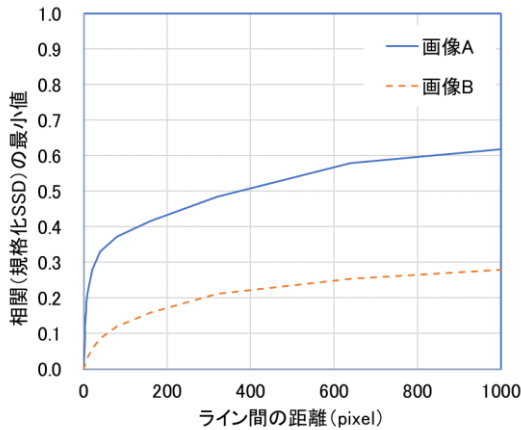


図 4 ライン間の距離と相関値との関係

3. 振動成分の推定方法

3.1. 振動成分のモデル

上下方向の振動成分を正弦波（sin 関数）と仮定する．長尺画像の横方向の座標を x ，上下方向の座標を y とし，ラインセンサが上下方向に一定の振幅，一定の時間周波数で単振動することを仮定すると，座標 x における振動成分 $Y(x)$ は，

$$Y(x) = Y_0 \sin \omega(x - \alpha) \quad (1)$$

と表すことができる．ここで， Y_0 は振動成分の振幅， ω および α はそれぞれ振動成分の周波数（長尺画像の x 方向に対する空間周波数）および位相を表すパラメータである．この 3 つのモデルパラメータを決定すれば良いことになる．

3.2. ライン間のシフト量のモデル

図 5 のように，注目する横方向の位置 x に対して，その左右， $(x-s)$ および $(x+s)$ の位置の縦方向のライン画像に注目する．この 2 つのライン画像は振動により上下方向にシフトしていることになる．この 2 つのライン間の上下方向のシフト量を $D(x)$ とすると，

$$D(x) = Y(x+s) - Y(x-s) \quad (2)$$

と表せる．式(2)に式(1)を代入し，三角関数の和積の公式を用いて整理すると，

$$D(x) = 2Y_0 \sin \omega s \cos \omega(x - \alpha) \quad (3)$$

となる．

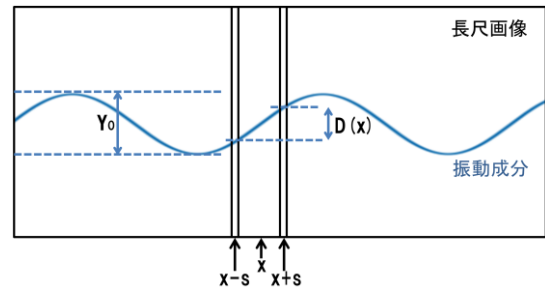


図 5 振動成分とライン間のシフト量のモデル

3.3. 画像からのライン間シフト量の計測

ここでライン間のシフト量を画像から計測することを考える． s の値が非常に小さい場合，または被写体が移動方向に対して一定の連続性を持っている場合には，2 つのライン画像は類似性の高い画像となり，それが振動成分にしたがって上下方向にシフトしたものとなっていると考えることができる．この仮定は被写体の状況によっては成り立たないこともあるが，一般的な被写体であれば横方向に一定の連続性がある場合が多いので画像の多くの場所において成り立つと期待することができる．類似性の高い 2 つのライン間の上下方向のシフト量を算出する一つの方法としては，ライン画像同士を縦方向にずらしながら重ね，重なった領域同士の相関（ライン画像同士の類似度に相当）を計算し，その相関が最大となる時の上下方向のシフト量とする方法が考えられる．このようなずらしマッチングによる方法では，算出されるシフト量の分解能（精度）は基本的に 1 画素となる．前述したようにライン間の距離 s が小さい場合にはライン画像間に高い類似性があることが期待されるが，一方でライン間のシフト量が小さくなり，1 画素単位での計測ではシフト量を正しく求めることができなくなる可能性が高くなる．このような問題を踏まえ，本手法では，一般的な相関によるずらしマッチングではなく，サブピクセル（1 画素以下）の精度でシフト量を求めることのできる位相限定相関法²⁾を利用するものとする．ライン間の距離 s を固定し（例： $s=1$ ），画像中の全ての位置 x に対してシフト量を求めた結果（計測値）を，シフト量のモデル $D(x)$ と区別するために小文字で $d(x)$ と表記する．そして画像処理の結果得られた $d(x)$ を，次式，

$$d(x) \Rightarrow d_0 \cos \omega' (x - \alpha') \quad (4)$$

でフィッティングすることで，フィッティングパラメータ d_0 ， ω' ， α' を求める．

3.4. 計測値とモデルパラメータの対応づけ

前述したシフト量のモデル $D(x)$ と画像処理からの計測値 $d(x)$ が一致すると考え、(3)式と(4)式を連立することで、

$$\begin{aligned} Y_0 &= \frac{d_0}{2 \sin \omega s} \\ \omega &= \omega' \\ \alpha &= \alpha' \end{aligned} \quad (5)$$

となる．これにより、画像処理で画像から計測したシフト量（フィッティングパラメータ）から振動成分を決定するモデルパラメータ (Y_0, ω, α) を求めることができる．

3.5. フーリエ解析による正弦波フィッティング

3.3 で概要を説明した $d(x)$ のフィッティング方法について補足する．所定の関数形に従うと期待される点列データに合った曲線を決めることは回帰問題（カーブフィッティング）として知られており、最小二乗法による直線近似や多項式近似をはじめとして様々な方法が存在している．しかしながら正弦波の場合は非線形回帰と呼ばれる問題となり、特に周波数が未知の場合には、局所最適解に陥りやすく、正しい結果を得ることが難しくなる．

そこで周波数についてはフィッティングの前に別の手段を用いて推定しておくものとする．具体的には x に対するシフト量 $d(x)$ を1次元の数値列として離散フーリエ変換を行い、得られたパワースペクトルにおいて低周波成分（例：周波数 0~1 等）を除いた後、最大値を与える周波数を求める．この周波数は離散値となるが、実際の周波数に対して ± 0.5 の範囲にあると期待できる．これを初期値とすることで一般的な回帰アルゴリズムによるフィッティングが可能となる．

なおフィッティングは計測値 $d(x)$ そのものではなく、前述したように周波数空間での低周波カット、最大値検出の後、最大値を中心とするバンドパスフィルタを施し、それを逆変換したのに対してフィッティングを行うものとする．この周波数フィルタリングに関する詳細な説明は本稿では割愛する（5.の考察を参照）．

3.6. 周波数の画像内変動への適応方法

以上の説明では、振動の周波数が画像内で一定との仮定で計算したが、実際の撮影においては画像内の空間周波数（＝時間周波数）が一定であるとは限らない．一方で、瞬間的に周波数が大きく変化することもある．そこで、振動成分の周波数が画像内で緩やかに

に変化することを想定し、長尺画像を横方向に所定の幅の小領域に分割して、その中で前述の振動成分の推定を行い、その結果を統合するものとする．具体的には、横方向の処理範囲の幅を決め、その範囲を少しずつスライドさせながらそれぞれの小領域内で算出した振動成分を、同じ位置 x に対して平均化することで統合する（図 6 参照）．

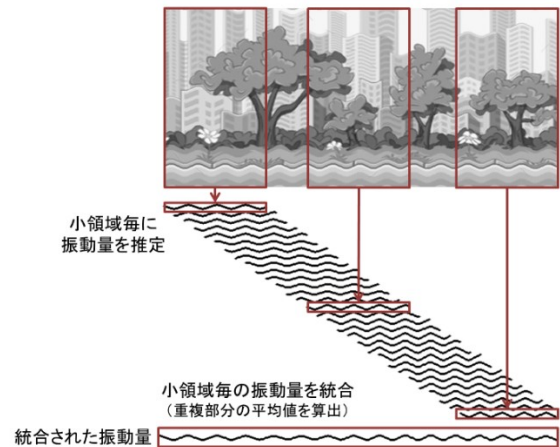


図 6 周波数が緩やかに変化する場合への適応方法

4. 実験結果

本手法の有効性を確認するために、車載のラインセンサを用いて撮影した屋外画像を用いて実験を行った．図 7 は上下方向の振動のある画像の例である．右側の拡大画像を見ると、それぞれ画像内の横向きのエッジが波打っている様子を確認することができる．

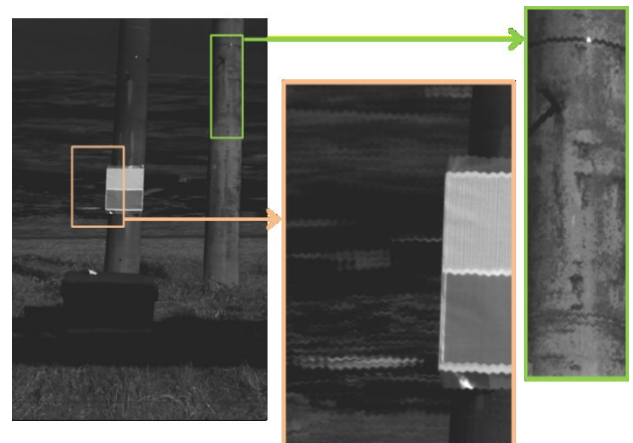


図 7 振動のあるラインセンサ画像の例

図 8 および図 9(a)は、図 7 の右側の電柱の領域に対して提案手法を実行した例である．図 8 中の星印はライン間の相関から求めたシフト量である．これを見ると振幅約 2 画素の範囲で振動していることが確認できる．ここでシフト量を求める際の縦ラインは隣接ライ

ン同士としており、この場合、式(2)の s は 0.5 となる。図 8 の点列データに対して 1 次元の離散フーリエ変換を行い、低周波成分をカットした後、パワースペクトルの極大値を求めることで推定した周波数は 14 となった。これを初期値としてカーブフィッティングを行った結果で(図 8 の実線)を見ると、概ね適切に振幅、周波数、位相を推定できていることがわかる。そして算出されたフィッティングパラメータを式(5)に代入することで、元の振動成分のモデルパラメータ(Y_0 , ω , α)を求め、これを式(1)に代入することで x に対する振動成分の大きさ $Y(x)$ を算出する。この推定された $Y(x)$ を用いて振動成分の補正を行った結果が図 9(a)である(スペースの都合で処理範囲の上部 1/3 を切り出して表示している)。また図 9(b)は、同様の処理を草むら部分のみを対象に実施した結果を示している。いずれの場合も元画像(左側の図)において存在していた上下方向の振動成分を概ね除去することができている。

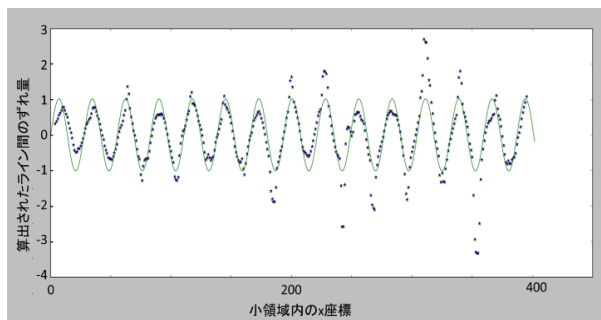


図 8 算出されたシフト量とフィッティング結果の例



(a) 電柱部で推定し補正 (b) 草むら部分で推定し補正
左:元画像(白線は推定された振動成分)
右:補正結果

図 9 振動成分の補正結果

図 10 は 3.6 で説明した方法を実際の長尺画像に適用した例である。この画像の例では、画像の右端付近の空間周波数が他の場所より高く(振動が密)になっているが、処理する小領域を少しずつずらしながら算

出した振動成分の平均値を求めることで図 10 のように緩やかに周波数に変化する場合に適応できていることがわかる。

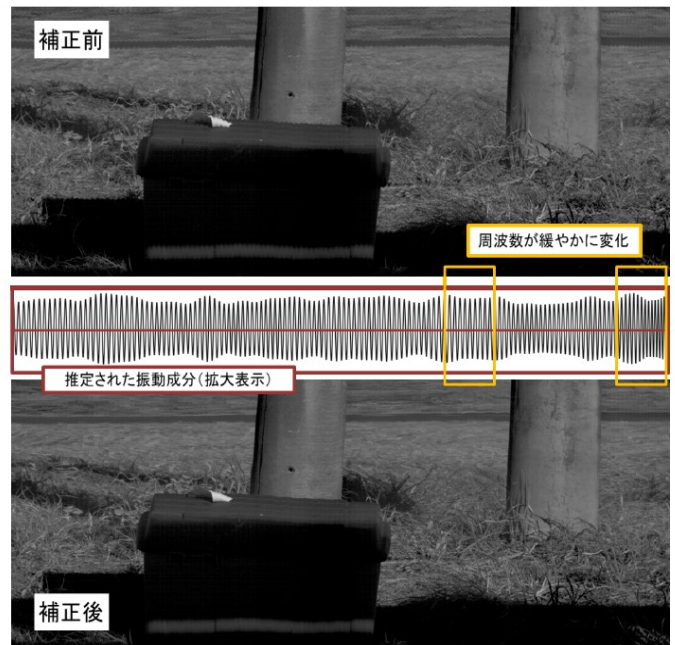


図 10 周波数が緩やかに変化する場合の例

5. 本手法の限界に関する考察

今回実験を行ったラインセンサ画像は十分なバリエーションがなかったため、その中では概ね良好な結果が得られていた。本手法の限界を確認するために、通常のカメラ(エリアセンサ)で撮影した画像に振動成分を人為的に加えたものを用いて補正実験を行った。

図 11 は提案手法の適用が原理的に難しいと思われる画像の一例である。中心付近のビルは、複雑な幾何パターンを有しており、特に画像上での傾きが異なる多数の直線、境界を有している。この画像を用いた実験結果を図 12, 13 に示す。



図 11 本手法の適用が困難であると想定される例

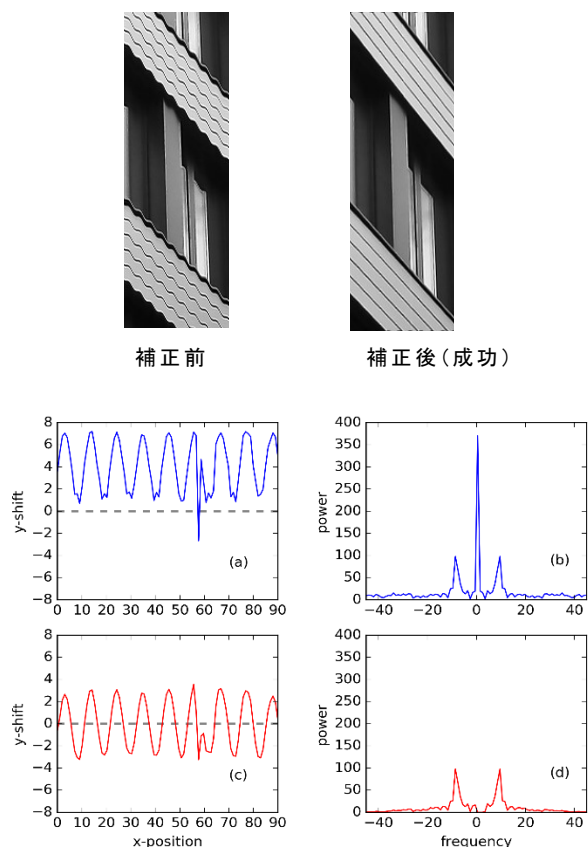


図 12 ビルの窓の例 (成功例)

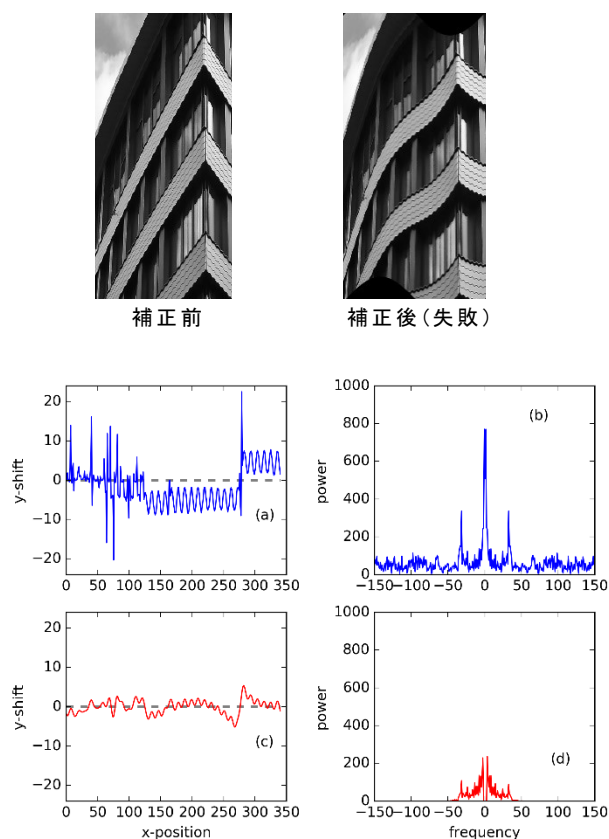


図 13 ビルの窓の例 (失敗例)

図 12 は、振動成分が付加されたビルの画像の一部を切り出し、提案手法を適用した例である。グラフ (a) はライン間のシフト量の算出結果、これを離散フーリエ変換したパワー（振幅）が (b)、(b) から周波数 0~1 の振幅を 0 にした後、最大のパワーを持つ周波数付近に対するバンドパスフィルタをかけた結果が (d)、これを逆変換したものが (c) である。(b) でピークを与える周波数（低周波を除き）を求め、(c) の点列に対して正弦波フィッティングを行い、式 (4)(5) から振動成分を推定、式 (1) により補正した結果が図 12 の右上である。この例ではシフト量の推定が正しく行われている。

一方、図 13 の例では、画像左側の領域を中心にシフト量の推定に失敗しているケースが多くなっている。原因としては、構造物が画像上で平行になっていないこと、窓周囲の柱が斜めに傾いて写っていること等が考えられる。これに加え、構造物の傾斜方向が画像右付近で逆転していることにより低周波成分（周波数 2~4 付近）の振幅が大きくなっている。このため周波数の推定に失敗していると考えられる。

現時点では、このように本手法の適用が困難なケースが存在している。画像を小領域に分割し、さらに推定の信頼性を評価しつつ、振動成分を総合的に判定するような方法が必要になると考えられる。

6. まとめ

本稿では、車載ラインセンサによる屋外撮影における振動成分を、画像のみから推定し補正する方法を提案した。屋外インフラの効率的な管理は今後一層重要となってくると考えられる。今後、本稿のような個別のセンシング手段に関する技術開発に加え、レンジセンサや GPS 等の様々情報と統合するセンサフュージョン技術の開発を進め、実用技術として整備していく必要がある。

謝辞

本研究の推進に際しましては、NTT アクセスサービスシステム研究所 五藤幸弘氏、ならびに NTT メディアインテリジェンス研究所 島村潤氏から多大なるご支援、ご指導をいただきました。ここに厚く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 新井啓之, 片岡香織, 梅田崇之, 安藤慎吾: ラインセンサによる屋外撮影時のノイズ補正方法, 画像関連学会連合会第 6 回秋季大会, ISJ-2B11, 2019.
- 2) 佐々木慶文, 瀧田健児, 青木孝文, 他: 位相限定相関法に基づく高精度レジストレーション, 信学技報, DS P-102(13), pp.49-54, 2002.