



可視画像を援用した赤外線サーモグラフィ計測の高度化に関する研究

内田, 勇治

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2022-03-25

(Date of Publication)

2023-03-01

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲第8355号

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1008355>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



博士論文

(論文題目)

可視画像を援用した赤外線サーモグラフィ計測
の高度化に関する研究

2022年1月

神戸大学大学院工学研究科

(氏名) 内田 勇治

目次

第1章 緒論	1
1. 1. はじめに	1
1. 2. 赤外線サーモグラフィによる大型構造物の計測とその課題	1
1. 3. 可視ビデオカメラおよび射影幾何画像処理を援用した問題解決	3
1. 4. 本論文構成	4
参考文献	5
第2章 測定原理	7
2. 1. 緒言	7
2. 2. 可視画像生成原理	7
2. 3. 赤外線サーモグラフィ生成原理	11
2. 4. まとめ	15
参考文献	16
第3章 可視-赤外線同期計測システムによる熱弾性応力およびエネルギー散逸測定の高度化	17
3. 1. 緒言	17
3. 2. 可視-赤外線サーモグラフィ同期計測による位置補正システム	18
3. 3. 実験結果	27
3. 4. 結言	42
参考文献	43
第4章 特異値分解法を用いた赤外線サーモグラフィ計測結果からの応力分布図作成手法の提案	46
4. 1. 緒言	46
4. 2. 赤外線サーモグラフィ法による応力分布図作成	47
4. 3. 実験	55
4. 4. 結言	64
4. 5. 付録	65
参考文献	66
第5章 赤外線サーモグラフィ装置を用いたアスファルト舗装上からのRC床版内部欠陥検出システムの開発	67
5. 1. 緒言	67
5. 2. 赤外線サーモグラフィによる道路橋RC床版損傷検出の問題点	68
5. 3. 赤外線サーモグラフィによる路面撮影・画像合成システムの構築	68
5. 4. シフトスタッキングによる合成画像の画質向上	76
5. 5. 結言	80
参考文献	81

第6章 SLAMを援用した赤外線計測による背景反射除去	82
6.1. 緒言	82
6.2. 計測原理.....	83
6.3. 実験的検討	96
6.4. 結言	103
参考文献.....	103
第7章 結 論.....	105
7.1. まとめ.....	105
7.2. 本研究の今後の展開について.....	108
謝 辞.....	111

第1章 緒 論

1. 1. はじめに

過去に建造された大規模構造物の多くが設計寿命を超えて供用され、保守点検の負担増加が問題となりつつある。特に重量物である自動車が高速に移動し、大きな荷重が繰り返し負荷される高速道路のコンクリート・鋼製橋においては、疲労による損傷が深刻な問題となっている。高速道路においては、路線の総延長に対して橋梁部が占める割合から考えて、コンクリート・鋼製橋の損傷個所の率的な検出手法の開発は緊急の課題である[1-1]～[1-4]。

赤外線サーモグラフィを用いた温度分布計測に基づく点検手法は、遠隔・面計測が行える利点があり、近年赤外線サーモグラフィカメラ自体が普及による量産効果により比較的安価で購入できるようになったことから、各種計測現場での普及が進みつつある[1-5]～[1-7]。高画素化、高速化、温度分解能・精度の向上など、赤外線サーモグラフィカメラのハード面での性能向上が進んでいるが、赤外線計測データの解析方法もソフトウェア技術の進展とともに高度化してきている。これまでの種々の適用事例において、赤外線サーモグラフィによる遠隔計測の有用性が発揮されてきたが、計測対象が拡大していく中で、より大規模な構造物や高所の部材などの計測が望まれるようになってきている。可視画像においても、同様に大規模な構造物や微細な構造を広範囲かつ緻密に撮影する需要が従来からあり、各種手法の研究・開発が行われてきた。しかし赤外線サーモグラフィにこれらの手法をそのまま応用しようとしても赤外線サーモグラフィと可視画像の特性の違いから適用できないことがあった。本研究では、赤外線サーモグラフィと可視画像の特性の違いからそれぞれに適した画像処理を担当させ、協調させて処理を行うことで、大規模な構造物の合成や、試料の微細な変位・変形を捉えられるように赤外線サーモグラフィによる計測を高度化する研究を行った。

1. 2. 赤外線サーモグラフィによる大型構造物の計測とその課題

大型構造物の非接触、非破壊検査手法として赤外線サーモグラフィは様々な利点を持つが、特に高速道路のコンクリート部材、鋼部材の検査を効率よく行う上で、遠隔面計測を連続して行えることが大きな利点である。しかし、現状の赤外線サーモグラフィカメラの解像度には当然限界があり、高速道路の構造物の大きさを考えたときに1つの画角内で計測できる範囲は非常に限られたものである。検出すべき変状がどの部位に存在するか未知である場合、この撮像範囲の制限は、大きな問題となる。例えば赤外線サーモグラフィカメラの画像から直接、あるいは何らかの画像処理を行った結果に対し、自動的に変状を認識するようなアルゴリズムを考えると、処理する画像に変状の一部だけ撮像されている場合、変状を正しく検知できない可能性がある。また、自動検知に限らず赤外線画像を人間が視認する場合にも、部分的な画像から

変状を判定することは困難な場合が多い。

そこで、近年赤外線サーモグラフィカメラを車両に搭載して走行しながらの連続撮影や、ドローンに搭載して飛行しながらの連続撮影を行う例が増加している[1-8]～[1-10]。移動連続撮影することで、効率よく大型の構造物を撮影できるが、1枚のフレーム画像中には構造物の一部しか撮像されていない。このような場合、可視画像で使用されるモザイクング技術を使用し、1枚の大きな画像に合成することが考えられる。例えば、走行しながら舗装面を捉えた連続赤外線サーモグラフィに関しては、移動量が別途与えられれば、これを考慮し合成することで、1枚の長大な舗装面のサーモグラフィ画像を生成することができる。また、ドローンなどで視点が3次元的に移動・回転し、かつその移動ベクトル、姿勢情報が不明な場合には、射影幾何分野で研究されてきた SfM(Structure from Motion)や V-SLAM(Visual-Simultaneous Localization and Mapping)などの画像処理技術[1-11]～[1-12]を援用することにより、カメラの3次元移動軌跡および姿勢の変動と対象物の形状などを復元し、これらの情報を組み合わせることで連続的に撮像した赤外線サーモグラフィ画像を1枚の合成画像にすることができる。

しかし、モザイクング、SfM あるいは V-SLAM などの手法はこれまで主に可視画像を対象として研究・開発されており、赤外線サーモグラフィに適用される例は少なかった。従来赤外線サーモグラフィカメラが可視画像に比較して高価であり、そのため赤外線カメラが可視カメラほど普及していなかったことが理由の一つである。別の理由としては、モザイクング、SfM あるいは V-SLAM などの各種アルゴリズムは、可視画像では物体表面における拡散反射率の多様性や局所平面の方向による明るさの変動を得られやすいという特性を利用したものであり、これらの情報が得られない赤外線サーモグラフィに適さないことが挙げられる。最も顕著な問題としては、可視画像に比べ、赤外線サーモグラフィでは空間周波数が低いことが挙げられる。モザイクング、SfM、V-SLAM では、コーナーポイントやエッジなどを特徴量として用いるが、赤外線サーモグラフィではこれが得にくい。可視画像では、対象表面物体から得る光の大部分は照明光が拡散反射することにより得ている。拡散反射光は対象物表面物質により反射率が変動し、これが模様となって上記のコーナーポイントやエッジなどの特徴量を豊富に与える。また、拡散反射光は光源と対象物局所平面法線の関係により変動するため、対象物の3次元的な角や稜線などにおいて、受光強度の変動は大きな勾配を持つこととなる。これも、結果的に可視画像のエッジやコーナーポイントとなる。一方赤外線サーモグラフィでは、対象物が放出する赤外線光を見ており、温度の平衡状態では物質による放射率の変動しかないため、画像としての特徴量を多く持たないことが多い。

一方、ロックイン処理[1-13]のように、対象物表面の同一地点での時系列の赤外線サーモグラフィ値の変動情報が必要な処理の場合、対象物の運動や変形およびカメラの運動は悪影響を及ぼす。このような例に、対象物にかかる荷重の負荷により発生する、対象物の変位や変形が計測を妨げる場合があげられる。このような、連続赤外線サーモグラフィの各フレームにおいて、計測視野内での対象物の計測ポイントがずれることにより生じる誤差は、一般にエッジ効果と呼ばれている。実験室内での疲労試験機による実験でも試料片は小さく変位・変形しているし、

実際の橋梁を対象とした計測では走行する車両により、橋梁部材にたわみが発生し、赤外線サーモグラフィカメラの撮影領域内で小さな変位が発生している。上述のカメラが移動する問題とは逆に、ここでは対象物表面の同一位置が撮像素子の同一画素に撮像させる補正技術が必要となる。この場合にも、上述の赤外線サーモグラフィの空間周波数の低さが同様の理由で問題となる。従来手法でも、可視ビデオカメラを援用し、赤外線サーモグラフィには映らない塗料で細かな模様を塗布し、デジタル画像相関法(DIC: Digital Image Correlation)を用いて微細な動きを捉え、補正が行われていた。しかしながら、赤外線サーモグラフィと可視画像を同時に計測できない、あるいは可視カメラと赤外線カメラの光軸を正確に平行にする必要があるなどの問題があった。

本研究では、これらの問題を解決するため、可視ビデオカメラを援用し、射影幾何の手法を導入することで計測の精度および自由度を向上させることを一つの目的としている。

1. 3. 可視ビデオカメラおよび射影幾何画像処理を援用した問題解決

1. 2節で述べた可視画像に対する各種手法を赤外線サーモグラフィに適用する際の問題を考えた場合、既存手法を赤外線サーモグラフィの特性に合ったように改変することが考えられるが、射影幾何の処理を正確に行うためには、赤外線サーモグラフィで得られるコーナーポイントやエッジなどの特徴量の数や、解像度からくる位置精度が足りず、困難が予想される。

一方解像度が高い機種や高フレームレートの機種の可視ビデオカメラの低価格化およびその結果の普及などを考慮すると、赤外線サーモグラフィカメラと可視ビデオカメラの両方で同一対象物を同時に撮影する装置は簡易・安価に製作できる。よって可視ビデオカメラ映像に対して従来の射影幾何処理等を行い、その情報を何らかの方法で赤外線サーモグラフィに適用することが現実的である。この幾何情報としては、可視画像の幾何情報だけでなく、レーザー距離計あるいは非接触速度計などの他センサから得られる幾何情報を使用することもできる。ただし、赤外線サーモグラフィカメラと可視ビデオカメラおよびその他のセンサの相対的な位置および姿勢は、事前に何らかの方法で計測されている必要がある。

可視画像に対する画像処理、その他距離センサや速度センサで取得した合成や変位・変形補償のために必要なカメラの2次元および3次元的な移動軌跡座標、姿勢の時系列変動情報などを、赤外線サーモグラフィに反映する場合、対象物の形状およびカメラ自体の運動の種類などにより適した手法が存在する。

対象物が平面ないしは平面に近似できるもので、カメラはその平面上を一次的に移動する場合には、事前にカメラと平面の位置および姿勢の相対値を較正しておけば、一次的な動きを別途速度センサなどにより計測することで、連続画像の合成が可能である。これは、車両に取り付けた赤外線サーモグラフィカメラで路面などを走行しながら撮影し、路面赤外線サーモグラフィの合成画像を作成する場合に適用できる。

また、カメラは移動せず、対象物が平面ないしは平面に近似できるが対象物、赤外線サーモ

グラフィカメラおよび可視ビデオカメラの相対的な位置関係が未知な場合には、平面射影変換と呼ばれる幾何変換を利用することで、可視画像の画像処理で得られた幾何的情報を赤外線サーモグラフィに簡易に反映することが可能である。これは、疲労試験機で金属試料に負荷を加えた場合の微小な変位、変形を修正する場合などに適用できる。

さらに、赤外線サーモグラフィカメラと可視カメラが固定された状態で3次元的に移動・回転し、対象物が平面ないしは平面に近似できる場合には、可視画像を用いた SfM, V-SLAM などを用いて対象物平面の位置、姿勢とカメラの3次元軌跡を復元することで、赤外線サーモグラフィを平面に逆射影した状態での合成が可能となる。この際には、赤外線サーモグラフィカメラと可視ビデオカメラの取り付け位置・姿勢情報を事前に取得しておく必要がある。これは、ドローンに装着された赤外線サーモグラフィカメラと可視ビデオカメラで大型建造物を撮影し合成画像を生成する場合に適用できる。

これらの処理を行うためには、赤外線サーモグラフィカメラおよび可視ビデオカメラは垂直同期信号でフレーム画像の撮像タイミングが同期されている必要がある。近年、赤外線サーモグラフィカメラと可視ビデオカメラの映像を両方撮影できる製品が市販され始めているが、完全な同期撮影ができない機種が多い。本研究では、同期性の確保と制御の自由度の確保の観点からこれらの市販品を用いず、赤外線サーモグラフィカメラと可視ビデオカメラの簡易な同期装置を製作した。

また、一部可視画像を援用し、従来の画像の処理方法を赤外線サーモグラフィに反映する以外に、可視カメラで使われてきた数理的な方法を導入して赤外線サーモグラフィの新しい解析手法を提案した。負荷による熱弾性温度変動を捉えた連続赤外線サーモグラフィは、同一の関係に従い時系列方向に変動する多数の計測点の情報であると考えられ、そういった意味で可視カメラが運動して、対象物を撮像した動画像と似ており、数学的には同じ枠組みでの数理計算ができると予想された。上述した可視画像での SfM には、SVD (Singular Value Decomposition) を用いて、動画像からカメラの運動軌跡と対象物の3次元形状を分離復元する手法がある [1-14]。そこで、熱弾性温度変動を捉えた連続赤外線サーモグラフィを用いて、SVD により負荷信号と応力分布を分離する手法を新たに提案した。

1. 4. 本論文構成

本論文の構成を以下に述べる。まず第2章では、可視画像と赤外線サーモグラフィの画像生成原理を考察し、その特性の違いから画像処理に関する方針を検討する。

第3章では、金属試料の応力分布図作成などにおけるエッジ効果の解消と、塑性変形におけるエネルギー散逸による温度変動の評価を目的として開発した計測手法について述べる。この手法では、可視・赤外同期撮影システムを構築し、疲労試験機による金属試料片の繰り返し引張り試験における微細な変位および変形を可視ビデオカメラで、試料の温度変動を赤外線サーモグラフィカメラで同期撮影できるようにした。さらに、可視画像に対する DIC の結果をホモ

グラフィ変換により赤外線サーモグラフィに反映することで、自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィ法による試料片温度計測において、従来の方式では行えなかった変位・変形が応力分布図作成やエネルギー散逸による温度変動の評価に及ぼす影響を低減する手法を提案する。これは1. 3節で述べた、対象物が平面ないしは平面に近似できるが、対象物、赤外線サーモグラフィカメラおよび可視ビデオカメラの相対的な位置関係が未知な場合に適用できる手法である。

第4章では、自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィ法により得られる応力分布図を、SfMの一手法である因子分解法で用いられているSVDによる時系列データの復元手法で得る手法を提案する。提案する手法では、従来の自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィ法で必要とされた参照信号を使用せず、計測の自由度と信頼性を向上させている。

第5章では、舗装下のコンクリート床版上面における損傷検知を目的として開発した計測手法について述べる。走行する車両に設置した赤外線カメラで道路の舗装面を連続的に撮影し、1枚の長大な合成画像の作成手法およびその画像改善手法の開発を行う。これは1. 3節で述べた、測定対象が平面ないしは平面に近似でき、カメラがその平面上を一次元的に移動する場合に適用できる手法であり、合成を行うための情報としては、舗装面の赤外線サーモグラフィ画像と、事前の較正で得られた赤外線サーモグラフィカメラの路面に対する姿勢および高精度な速度計の情報をを用いる。

最後に第6章では、建造物外壁検査を目的としたドローンによる撮影などを想定し、これらの撮影データから背景反射光を除去する手法を提案する。対象物の同一箇所の輝度を観測するため、可視カメラの3次元軌跡と対象物をSfMにより復元し、これらの情報を用いて赤外線サーモグラフィを逆射影する手法を用いる。これは、1. 3節の3次的に移動、回転するカメラの軌跡と対象物平面をSfMなどで復元し、これを用いて赤外線サーモグラフィを逆射影する場合に適用できる手法である。

本論文では以上の構成を通じて、第2章で考察した方針に従い可視画像処理技術を従来の赤外線サーモグラフィ計測に援用することでさまざまな高度化が可能であることを報告する。

参考文献

- [1-1] 国土交通省，“国土交通白書”，平成28年度
- [1-2] 日本道路協会，“道路橋示方書・同解説”，平成24年3月
- [1-3] 阪神高速道路，“阪神高速道路における鋼橋の疲労対策”，平成24年3月
- [1-4] 日本鋼構造協会，“鋼構造物の疲労設計指針・同解説”，2021年改訂版
- [1-5] 天野勲，山川和夫，伊藤秀和，“特殊建築物の外壁診断における赤外線調査ガイドライン”，日本建設機械化協会，建築の施工企画，2009.2.
- [1-6] 川上幸一，小西真治，篠原英明 他，“赤外線計測による地下鉄覆工コンクリートの浮き検出方法の検討とその応用”，土木学会論文集 1F（トンネル工学），Vol.74, No.1,

pp. 25-39, 2018.

- [1-7] 野波邦洋, 大宅茂夫, “赤外線カメラによる配電設備点検工法の開発研究”, 電気学会研究資料. PE, 電力技術研究会 1995(65), pp. 71-80, 1995.
- [1-8] 大藤時英, 溝上善昭, 泉遊以, 阪上隆英, “温度ギャップ検出赤外線サーモグラフィ法による亀裂検出実用化システム”, 第 71 回土木学会年次学術講演会, 2017.
- [1-9] M. Janku, J. Stryk, “Application of infrared camera to bituminous concrete pavements: measuring vehicle”, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering , pp.-236, 2017.
- [1-10] Zhigang. Shen, Ece. Erdogmus, George. Morcou, Chngsheng. Cheng, Zhexiong. Shang, ” Early Detection of Near-Surface Void Defects in Concrete Pavement Using Dr ement Using Drone Based Thermogr one Based Thermography and GPR Methods” , University of Nebraska-Lincoln, Nebraska LTAP, 1-31-2020.
- [1-11] Takafumi. Taketomi, Hideaki. Uchiyama, Seki. Ikeda, ” Visual SLAM algorithms: a survey from 2010 to 2016” , IPSJ Tarnsactions on Computer Vision and Applications 9, Article number 16, 2017.
- [1-12] Abdou. Shalaby, Mohammed. Elmogy, Ahmed. El-Fetouh, ” Algorithms and Applications of Structure from Motion (SFM): A Survey” , International Journal of Computer and Information Technology Volume 06 - Issue 06, 2017.
- [1-13] Pierre. Bremond, Pierre. Potet, ” Lock-in thermography: a tool to analyze and locate thermomechanical mechanisms in materials and structures” , Proceedings of the SPIE, Volume 4360, pp. 560-566, 2001.
- [1-14] Carlo. Tomasi, Takeo. Kanade, ” Shape and motion from image streams under orthography: a factorization method” , International Journal of Computer Vision. 9(2), pp. 137-154, 1992.

第2章 測定原理

2. 1. 緒言

本章では、本研究で取り扱う可視画像と赤外線サーモグラフィ画像の生成原理について述べるとともに、これら2つの画像データの特徴の比較を行う。

可視画像カメラにおいて撮像される画像は、常温物体を対象とする場合には、照明光源からの光が対象物体の表面で反射されたもののうち、カメラ方向に向かう成分を受光することで得られる反射像である。反射が起こった時点での、対象物平面に対する光源と可視カメラの位置関係や方向、対象物体表層部の原子の種類や配列、および3次元的形状からくる各々の位置での面の向きすなわち局所平面の法線方向などに起因して、測定対象の場所による反射率の違いが生じる。これにより、可視画像カメラの光学レンズ系により撮像素子平面に入射・結像する反射光の強度は、前述した測定対象表面の局所的な反射率の違いにより多くの変化を生じ、画像に豊富なテクスチャが生成される。可視画像カメラに用いられる可視領域の撮像素子は近年スマートフォンやリモートワークに用いられるPCカメラの普及により大きな進化を遂げており、画素数も3千万個を超えるものが普及価格帯で利用できるようになっている。これらの撮像素子を用いれば、従来よりも高精細な画像による画像処理が可能となっている。

一方、赤外線サーモグラフィカメラによる温度測定においては、物体表面から放射される赤外線エネルギーをセンサによりパッシブ測定し、これを温度分布に換算・画像化して表示している。近年、赤外線センサおよびセンサからの出力信号処理技術の進歩により、従来機種より温度計測の分解能及び空間分解能に優れ、しかも温度変動の過渡的現象をリアルタイムに計測できるフレームレートを持つサーモグラフィカメラが開発されてきた。このような計測技術の進歩を背景に、物体に作用している応力の変動に起因する微小な温度変動や、放熱時の対象物内部の不整合による微小な温度変動を面計測できるようになってきた。

本研究では、可視画像カメラを援用することで赤外線サーモグラフィカメラによる画像計測の高度化を行うことを目的としている。そのためには、両カメラによる画像の生成原理を理解し、得られる画像データの特徴から最適な解析手法を検討する必要がある。

2. 2. 可視画像生成原理

可視光は、400~800nm程度の波長をもつ電磁波である。可視画像を撮像するカメラは、これらの波長を有する光を結像するレンズ系と撮像素子から構成されている。可視光源からの光が対象物表面で反射されカメラに入射するとき、前述のように物体表面での様々な反射率の分布が生成され、これがレンズ系を通して撮像センサ平面に射影されることで可視画像が得られている。Fig. 2-1は簡略化された可視画像生成モデルを示している。1つ以上の光源から照射さ

れた光は、物体表面で反射し、その一部がカメラに到達する。実際には、これらの反射光には、対象物体表面で一度だけ反射する成分だけではなく、環境に存在する他の物体表面で多重反射する成分が含まれるが、光強度成分としては小さいため、ここでは議論を単純化するため無視することとする。

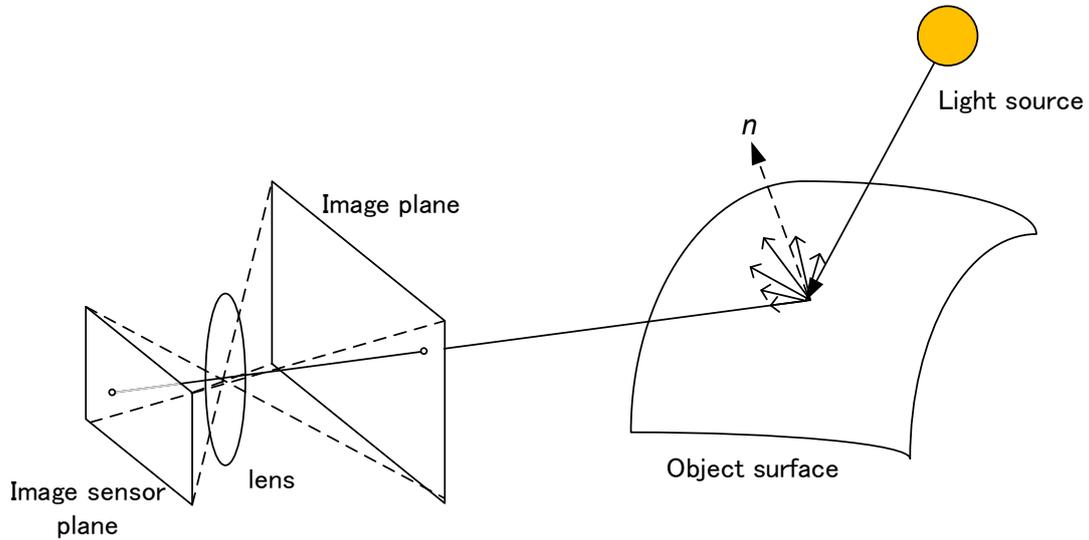


Fig.2-1 optical camera imaging model

光が物体の表面に到達すると、散乱反射および正反射が発生する。Fig.2-1 の物体表面では様々な方向に光が反射しているが、これは散乱反射及び正反射が合成されたものである。最も一般的な光の反射モデルは双方向反射率分布関数 (bidirectional reflectance distribution function; BRDF) と呼ばれるものである [2-1].

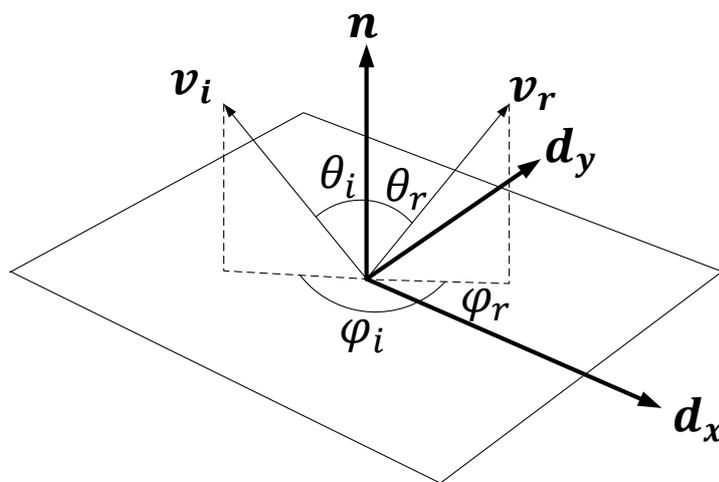


Fig.2-2 Parameters of BRDF

BRDF は Fig. 2-2 で示すような物体表面の局所座標系 (d_x, d_y, \mathbf{n}) で表された入射方向 \mathbf{v}_i から届く光が反射方向 \mathbf{v}_r にどの程度の量で放たれるかを表す (2-1) 式の 4 次元関数で表される。

$$f_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) \quad (2-1)$$

ほとんどの物体表面は光源やカメラに対する向きに反射光が依存しない等方性を持っているため (2-1) 式を以下のように簡略化できる。

$$f_r(\mathbf{v}_i, \mathbf{v}_r, \mathbf{n}) \quad (2-2)$$

物体表面上から \mathbf{v}_r の方向へ放出される光量 $L_r(\mathbf{v}_r)$ の計算は、 \mathbf{v}_i 方向からやってくる入射光 $L_i(\mathbf{v}_i)$ と (2-2) 式の BRDF および \mathbf{n} と \mathbf{v}_i のなす角 θ_i の余弦の積として得られる。離散的な複数の光源が n 個ある場合はこれらを積算し、

$$L_r(\mathbf{v}_r) = \sum_i^n L_i(\mathbf{v}_i) f_r(\mathbf{v}_i, \mathbf{v}_r, \mathbf{n}) \cos^+ \theta_i \quad (2-3)$$

と表される。ここで、物体表面の局所的な法線と \mathbf{v}_i のなす角が 90° を超えると光が届かないことを表すため、

$$\cos^+ \theta_i = \max(0, \cos \theta_i) \quad (2-4)$$

としている。

(2-2) 式で表される BRDF を得る手法は複数提案されているが、典型的な手法として散乱反射成分と正反射成分に分離して考えるものがある。ほとんどの物体表面の反射光は、散乱反射成分とともに正反射成分も持っており、我々はそれらの合成された光を観察している。

散乱光は、物体の材質内部での光の選択的な吸収と再放出によって生じている。原因は、入射光がこれに共振する物質表面原子を励起し、基底状態に戻るときに発する光や、物質表層内部で様々な方向に散乱される光であると考えられている。このため、可視光の散乱反射成分は、入射した光を物体表面で全方向に均等に散乱させる。これは、我々が光沢のない 3 次元的な凹凸をもつ物体を観察したときに感知する陰影 (シェーディング) や色に相当する。よって (2-3) 式に示した反射光の散乱反射成分は、

$$L_d(\mathbf{v}_r) = \sum_i^n L_i(\mathbf{v}_i) c_d \cos^+ \theta_i = c_d \sum_i^n L_i(\mathbf{v}_i) [\mathbf{v}_i \cdot \mathbf{n}]^+ \quad (2-5)$$

で表され、(2-4) 式同様

$$[\mathbf{v}_i \cdot \mathbf{n}]^+ = \max(0, \mathbf{v}_i \cdot \mathbf{n}) \quad (2-6)$$

で表される。ここで、 c_a は対象物表面固有の散乱反射率である。

一方正反射成分は、その強度が方向に大きく依存しており、(2-7)式で表される正反射方向 \mathbf{s}_i にほとんどの反射光が放出される。

$$\mathbf{s}_i = (2\mathbf{n}\mathbf{n}^T - \mathbf{I})\mathbf{v}_i \quad (2-7)$$

視線方向へ反射する光強度はこの正反射方向 \mathbf{s}_i と視線方向ベクトル \mathbf{v}_r のなす角 θ_s に依存する。計算モデルとしてよく用いられるフォンのモデルでは

$$f_s(\theta_s) = c_s \cos^{c_e} \theta_s = c_s (\mathbf{v}_r \cdot \mathbf{s}_i)^{c_e} \quad (2-8)$$

として余弦角のべき乗を用いて表現される。ここで、 c_s は対象物体表面固有の正反射率であり、 c_e はハイライトの鋭さを決めるパラメータである。よって BRDF の正反射成分は(2-5)式同様複数の光源からの光強度 $L_i(\mathbf{v}_i)$ と(2-8)の積の積算となる。

$$L_s(\mathbf{v}_r) = c_s \sum_i^n L_i(\mathbf{v}_i) (\mathbf{v}_r \cdot \mathbf{s}_i)^{c_e} \quad (2-9)$$

実際の環境では以上の散乱反射成分と正反射成分以外に、照明が部屋の壁などに反射した光のように物体表面の向きに依存せず、物体表面の反射率のみに依存する環境光が存在する。これを

$$L_a = c_a L_{an} \quad (2-10)$$

とする。 L_{an} は入力環境光の強さ、 c_a は対象物平面の環境光に対する反射率である。

以上の散乱反射成分、正反射成分、環境光反射成分をまとめると(2-5)、(2-9)、(2-10)式からフォンのシェーディングモデル(2-11)式を得る[2-2]。

$$L_r(\mathbf{v}_r) = c_a L_{an} + c_d \sum_i^n L_i(\mathbf{v}_i) [\mathbf{v}_i \cdot \mathbf{n}]^+ + c_s \sum_i^n L_i(\mathbf{v}_i) (\mathbf{v}_r \cdot \mathbf{s}_i)^{c_e} \quad (2-11)$$

ここで、 c_a 、 c_d 、 c_s 、 \mathbf{n} は物体表面上での分布を持っている。これらが、光学レンズ系を通して、撮像センサ平面に射影された2次元画像上の模様を生成する。撮像センサで受光する光強度は、対象物からカメラまでの距離の二乗に反比例し、入射光とカメラの主視線軸との角度の余弦に比例する。(2-11)式を詳しくみると、右辺第一項は、 \mathbf{v}_i 、 \mathbf{v}_r 、 \mathbf{n} が存在しない

め光源、カメラ、対象物ともに動いても変化しないことが分かる。同じように、第二項は \mathbf{v}_r が存在しないため、照明、対象物が動かなければ、カメラを動かしても変化しないことがわかる。一方、第三項は \mathbf{s}_i に \mathbf{v}_i および \mathbf{n} が含まれているため、 \mathbf{v}_i 、 \mathbf{v}_r 、 \mathbf{n} すべてが存在しており、照明、対象物、カメラのいずれが動いても変化してしまうことが分かる。

可視カメラでは、このようにして得られた各視線軸方向の光の強さを Fig. 2-1 右側のように結像レンズ系で撮像素子平面上に結像することで画像を得る。カラー画像では、ダイクロイックミラーで赤、青、緑の3原色の波長域ごとに分離し3つの撮像素子でそれぞれ受光する、あるいは3原色のフィルタを被せた素子を交互に配置した撮像素子で受光するなどして画像を得ている。

一般的に射影幾何を利用した可視画像の画像処理においては、複雑になるため第三項の反射光は用いない場合が多い。すなわち、物体表面の色の変化と3次元形状による陰影を用いて処理される。しかし近年は金属など正反射成分を持つ対象物から正反射成分を取り除き、散乱反射成分を抽出する研究なども進んでいる [2-3]。

可視カメラの撮像素子は長年開発が進んでおり、現在では低価格でも高解像度なものが市販されている。そのため、(2-11)式に示した対象物の表面の状況で変化する反射光を高分解能で捉えることができるようになっている。

2. 3. 赤外線サーモグラフィ生成原理 [2-4]~[2-6]

絶対零度以上の温度を持つ物体はその表面から電磁波が放射されている。この電磁波のうち、おおよそ $0.72\mu\text{m}$ から $1,000\mu\text{m}$ までの波長帯の光を赤外線光と呼ぶ。波長、温度と赤外線光の呼称の対応を Fig. 2-3 に示す。

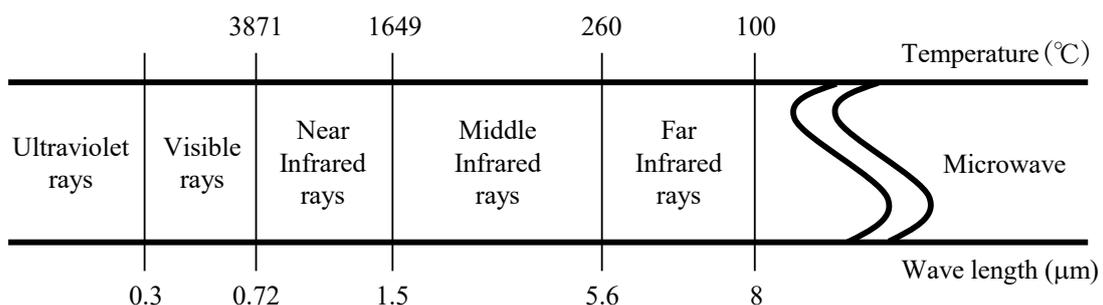


Fig. 2-3 Electromagnetic spectrum band of infrared light.

絶対温度 $T(K)$ における波長 $\lambda(\mu\text{m})$ の理想的な赤外線放射量はプランクの法則とステファン・ボルツマンの式により以下のように表される。単位面積 (1cm^2)、単位波長 ($1\mu\text{m}$) あたりの理想的な放射強度 $W_\lambda(W/\text{cm}^2 \cdot \mu\text{m})$ は次式のようなになる。

$$W_{\lambda} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 \left\{ \exp\left(\frac{ch}{\lambda kT}\right) - 1 \right\}} = \frac{c_1}{\lambda^5 \left\{ \exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1 \right\}} \quad (2-12)$$

ここで、 h はプランクの定数であり、その値は $h = 6.6261 \times 10^{-34} (W^2 \cdot s)$ である。 k はボルツマン定数であり、その値は $k = 1.3807 \times 10^{-23} (W \cdot s/K)$ である。さらに c_1 は第一放射定数、 c_2 は第二放射定数で、その値は $c_1 = 3.718 \times 10^4 (W/cm^2 \cdot \mu m^4)$ 、 $c_2 = 1.4388 \times 10^4 (\mu m \cdot K)$ である。黒体の全放射量を算出するためには、 W_{λ} を波長 λ に関して 0 から無限大まで積分すれば良い。その結果は(2-13)式に示すステファン・ボルツマンの式となる。

$$W = \left(\frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} \right) T^4 = \sigma T^4 \quad (2-13)$$

ここで、 σ はステファン・ボルツマン定数であり、その値は $\sigma = 5.6705 \times 10^{-12} (W/cm^2 \cdot K^4)$ である。式(2-13)より、理想的な放射赤外線強度 W は放射体の絶対温度 T の 4 乗に比例することが分かる。

理想的な放射は、物体表面から最大の赤外線エネルギーを放射する理想的な黒体表面で発生する。現実的にはこのような物体は存在せず、式(2-13)に放射率 $\varepsilon (0 \sim 1.0)$ をかけることにより、物体における赤外線放射エネルギー量を計算することができる。

温度測定を目的とした赤外線サーモグラフィカメラは、放射率 ε がほぼ 1 であると見なされる黒体炉に対して正しい温度を指示するように較正されている。したがって、放射率 ε の測定対象物に対する温度指示値は、正しい値 T からずれた値 T' を示すことになる。Fig. 2-4 に示すように、装置の検出器には測定対象物からの赤外線放射に、測定対象物表面で反射した周囲物体からの反射赤外線光が加算されて入射されることになり、装置に実際に入射する赤外線エネルギーは次式で表される。

$$R(T') = \varepsilon R(T) + \varepsilon_a (1 - \varepsilon) R(T_a) \quad (2-14)$$

ここで、 $R(T)$ は絶対温度 T での赤外線エネルギーを(2-13)で計算したものを表す。 T' は見かけの温度指示値、 T は測定対象物の真の温度、 T_a は環境反射源の温度、 ε_a は環境反射源の放射率である。なお、エネルギー保存則から $(1 - \varepsilon)$ は物体表面の反射率となる。

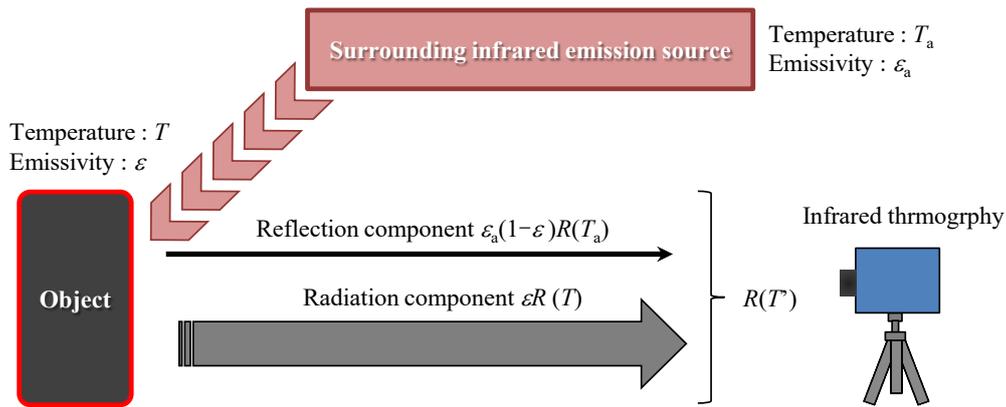


Fig. 2-4 Infrared rays measured by infrared thermography.

式(2-14)から、真の温度 T を知るためには、計測値である見かけの温度指示値 T' に加え、測定対象物の放射率 ε 、環境反射源温度 T_a 、環境反射源の放射率 ε_a が必要である。実際には環境反射源の温度や放射率を知ることは困難であり、測定対象物の真の温度を計測することは容易ではない。したがって黒体ではない一般的な物体では、真の温度を正確に知ることが難しく相対的な評価にならざるを得ない。

以上のようにして放射される赤外線を、赤外線サーモグラフィカメラの光学レンズ系で撮像素子平面に結像することで赤外線サーモグラフィが得られる。2. 1. 節では可視画像がどのように生成されるかを、(2-11) 式としてもモデル化した。これを参考に作成した赤外線サーモグラフィに関する同様のシェーディングモデルを(2-15)式に示す。散乱光の強さは、入射光の波長の4乗に反比例していることがレイリー散乱 (Rayleigh scattering) として知られており、遠赤外線においては小さくなるために(2-11)式右辺第二項を割愛し、代わりに対象物体表面自体の赤外線放射 $R(T)$ の項を追加する。

$$R(\mathbf{v}_r) = \sum_i^n \varepsilon_{a_i} (1 - \varepsilon) R(T_{a_i}) (\mathbf{v}_r \cdot \mathbf{s}_i)^{c_e} + \rho(T, \text{acos}(\mathbf{v}_r \cdot \mathbf{n})) \varepsilon R(T) \quad (2-15)$$

ここで、右辺第一項は、外部赤外線光源からの正反射成分を、第二項は対象物自体の赤外線放射を表す。 $\rho(T, \text{acos}(\mathbf{v}_r \cdot \mathbf{n}))$ は放射率の温度と角度依存性を示す関数で、これは物質ごとに異なる。Fig. 2-5 にある塗料の放射率の変動を示す[2-7]。対象物局所法線と視線軸間の角度が 40° 程度まではほとんど変化がなく、温度変動に対してもあまり変化がないことが分かる。

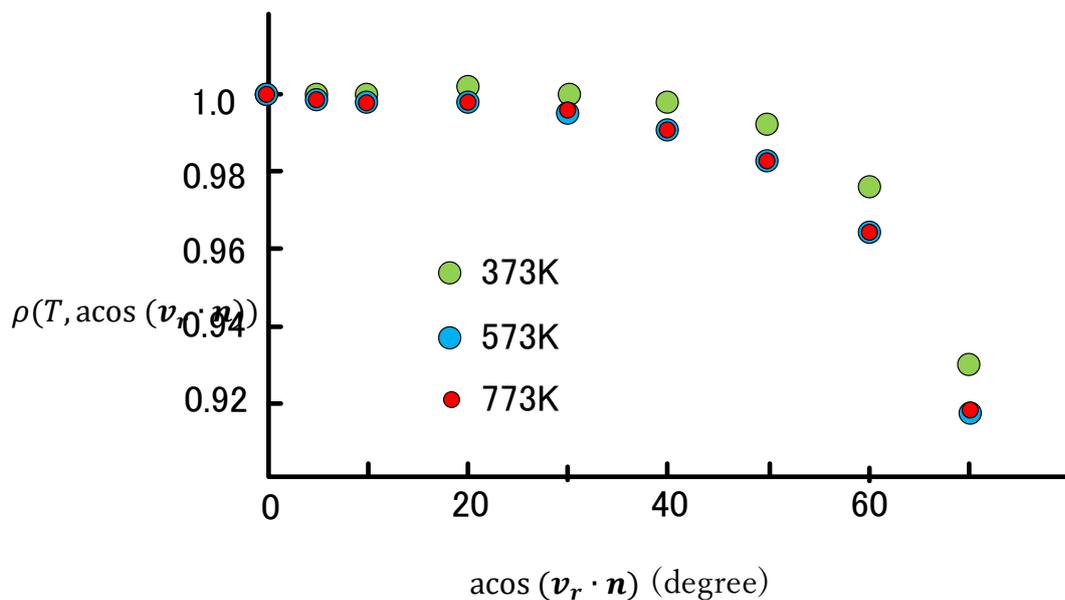


Fig.2-5 Emissivity angle variation

以上のようにして物体表面から放出される赤外線光を可視画像カメラ同様結像レンズ系で差センサ平面に結像することで赤外線サーモグラフィが得られる。

よって、屋外の太陽や空のような外部に強力な赤外線光源が存在しない場合、(2-11) 式の可視画像に比較すると、赤外線サーモグラフィ上の変動は放射率 ε のみに依存することとなる。同一物質でできた対象物などにおいては ε の変動は小さく、また可視画像の散乱反射成分である色や濃さが異なる場合でも ε は大きく変わらないことがあり、可視画像に比べて赤外線サーモグラフィには画像処理に必要な模様が少ない、ないしはその空間周波数が低いことにつながっている。

赤外線サーモグラフィ撮像素子には、赤外線の電磁波エネルギーによる物性の熱的变化を利用する熱型素子と、赤外線を光子としてとらえ、光電効果を利用する量子型素子の 2 種類がある。熱型撮像素子は冷却器が必要ないため、低価格・小型であるが温度分解能が低く、応答速度が遅い。一方、量子型素子は温度分解能が高く応答速度が速いが、冷却器が必要のため高価格で大型である。いずれの方式でも赤外線サーモグラフィは可視カメラで撮像された画像に比較すると現在でもその画像解像度は非常に低く、画素数は可視カメラ撮像素子の 1/100 程度である。また、熱型素子においては応答速度が遅いため速い動きの対象物を撮像する場合や、カメラ自体が速く動く場合に大きなブレが発生する。このように、現在の赤外線サーモグラフィカメラ自体の特性も、空間周波数の高い赤外線サーモグラフィの生成を困難にしている。

2. 4. まとめ

以上の考察から、可視画像と赤外線サーモグラフィの特性についてまとめる。まず、可視画像の特性を以下にまとめる。

- (1) (2-11)式から対象物表面からカメラに向かう光の強度分布が生成されており、その成分は環境光、散乱反射光、正反射光である。光の強度分布は、環境光反射率、散乱反射率、正反射率に加え、光入力方向、対象物局所平面法線および視線方向と主に6のパラメータによる。
- (2) 対象物表面からの環境光反射、散乱反射は、対象物および照明源の位置や姿勢が変動しなければ、カメラ側の移動・姿勢の変動があっても変化しない。
- (3) 散乱反射は、物質表面構成物による散乱反射率の変動と、表面の凹凸による対象物表面局所法線の変動の両方に影響を受ける。このため、可視画像では輝度あるいはカラー値の変動の空間周波数が高く、その振幅も大きな画像を得やすい。

次に赤外線サーモグラフィの特性をまとめる。

- (1) (2-15)式から対象物表面からカメラに向かう赤外線光の強度分布が生成されており、その成分は正反射光と物体自体の熱による放射赤外線光である。
- (2) 温度平衡状態では、物体の輪郭以外に放射赤外線強度の変動勾配が大きいところは少なく、放射率の角度依存性も低いために、対象物の3次元形状情報の反映もほとんどない。よって得られる赤外線サーモグラフィでは可視画像に比べカメラに向かう赤外線光の強度分布は空間周波数が低く、振幅の変動も少ない。
- (3) 撮像画像分解能も赤外線サーモグラフィは可視画像カメラに比較して少ない。

以上のことから、赤外線サーモグラフィは可視画像に比べ空間周波数が高く、値の変動振幅の大きな画像が得にくいことが分かる。よって、画像上の位置情報を抽出するような画像処理では、精度の高い情報を抽出できない。

一方、可視画像も赤外線サーモグラフィも3次元の対象物を結像レンズ系で撮像素子平面に射影することで得られる原理は同じである。よって、2次元画像上の特徴量の抽出、その追尾処理などは可視画像上でを行い、ここから得られた情報を赤外線サーモグラフィに反映して射影幾何変換などを行う手法が望ましい。その際、可視画像の情報を赤外線サーモグラフィに変換するにあたっては、両カメラのカメラ外部、内部パラメータおよび対象物の形状情報を用いて射影幾何変換を行う手法を使用すればよい。本論文の第3章、第4章および第5章では、以上の方針に基づき赤外線サーモグラフィ計測の高度化を進めた。

参考文献

- [2-1] R. Szeliski, 玉木徹, ” コンピュータービジョン:アルゴリズムと応用” , 共立出版, pp. 54-57, 2011.
- [2-2] Phong. B. T, “Illumination for computer generated pictures” , Communications of the ACM, 18(6), pp. 311-317, 1975.
- [2-3] Atsuhiko. Banno, Katsushi. Ikeuchi, ” Removing Specular Components of Image Sequences based on EPI Analysis” , MIRU, 2004 2, pp. 459-464, 2004.
- [2-4] William. Herschel, “Investigation of the powers of the prismatic colours to heat and illuminate objects.” , Philosophical Transactions of the Royal Society of London, pp. 255-326, 1800.
- [2-5] 久野治義, 赤外線工学, コロナ社, 1994.
- [2-6] 赤外線技術協会編, 赤外線工学—基礎と応用—, オーム社, 1991.
- [2-7] Toshiharu. Nakajima, Kazutaka. Isoda, “Angle dependance evaluation of infrared spectral emissivity for high-emissivity materials” , Bulletin of study No. 10(2015) note no. 6, TIRI, 2015.

第3章 可視-赤外線同期計測システムによる熱弾性応力および

エネルギー散逸測定の高度化

3. 1. 緒言

赤外線サーモグラフィは鋼構造物のき裂検出やき裂の破壊力学的評価など非破壊評価に広く適用されている[3-1]。近年、赤外線サーモグラフィを用いたエネルギー散逸計測に基づいた疲労限度推定[3-2]～[3-5]が注目を集めている。本手法は、繰返し負荷下における金属材料の不可逆なエネルギー散逸に起因する温度変動を計測して、応力振幅の変化に対するエネルギー散逸の大きさの変化から疲労強度を評価する手法である[3-6]～[3-7]。エネルギー散逸に起因した温度変動は非常に小さいため、負荷を受ける測定対象が視野内で剛体移動または変形することにより現れるみかけの温度上昇がエネルギー散逸計測に影響を与える。エネルギー散逸の高精度な評価には、見かけの温度変動などのノイズ成分を除去する必要がある。筆者ら[3-8]はエネルギー散逸による温度変動において、熱弾性温度変動に対する位相差を基準に用いて、塑性変形に起因したエネルギー散逸以外の温度変動成分を除去する手法を提案している。また測定対象の変形に起因したみかけの温度変動を除去する手法として、測定対象の剛体移動や変形を修正する位置補正画像処理が各種提案されている。阪上ら[3-10]は赤外線サーモグラフィのパターンを用いてデジタル相関法（DIC）により測定対象の移動を算出して、赤外線画像を補正する手法を提案した。Silva[3-11]らも同様に赤外線サーモグラフィのパターンを用いた補正手法を適用している。この手法では、赤外線計測に影響を与えない程度の少量のパターンを試験対象に付与している。DICにおいて変位のみならず変形も補正したい場合、試料上に密な画像特徴が必要である。第2章で説明したように赤外線サーモグラフィの変動はほとんど放射率の変動に依存しており空間周波数の高い画像を得ることが難しい。赤外線サーモグラフィの画像解像度もそれほど大きくない。そこで可視カメラと赤外線サーモグラフィで測定対象を測定し、可視画像から測定対象の移動を算出して、赤外線画像に移動量を反映させる位置補正手法が提案されている[3-12]～[3-14]。可視カメラは、測定対象を挟んで赤外線サーモグラフィとは反対側から測定対象を撮影する手法が提案されている。この手法では、測定対象の両面で同じ変形が生じているという仮定のもとで適用される。Wang [3-15]らの研究では、試料の同じ面を可視カメラと赤外線サーモグラフィカメラで個別のタイミングで撮影している。これらの手法では、可視画像と赤外線画像が同じ測定面を同時に測定していないため、局所的な変形や分布、短時間の変形挙動を取得して補正していない可能性がある。ビームスプリッターを用いて、測定対象の同じ面を同時に可視カメラと赤外線サーモグラフィで測定する手法が提案されている[3-16]～[3-18]。しかしながら、この手法は繰返し変形が生じる測定対象には適用されていない。そこで本研究では、空間的および時間的に完全に同期した可視-赤外線計測システムおよび画像処理スキームを

提案する。提案計測システムでは同一のシャッターパルスで可視カメラおよび赤外線サーモグラフィカメラに入力し、同一測定対象面を同時に撮影する。このようにして撮影された可視画像で得られた測定対象の変位・変形情報を、射影幾何変換処理により同一時点の赤外線計測結果に正確に反映させる。本章では赤外線計測で従来問題となっていた対象物の微細な変位・変形の正確な補正手法の開発と、さらに可視と赤外線計測を組み合わせた新しい散逸エネルギー評価手法を提案する。これまでの散逸エネルギー評価では、周波数解析を用いて負荷周期の二倍周波数高調波成分を抽出して、この成分を散逸エネルギーと定義してきた。周波数解析では、負荷 1 サイクルの中でのエネルギー散逸の発生挙動を詳細に調べることができない。本論文で新しく提案する散逸エネルギー評価手法では、可視画像に対する DIC 処理で求められたひずみ計測結果に基づき熱弾性温度変動成分を計算により求め、この結果を実際に計測された温度変動と比較することで、エネルギー散逸による不可逆な温度変動を評価する。本章では、可視-赤外線同期計測およびその応用として、エネルギー散逸成分を抽出した結果について述べる。

3. 2. 可視-赤外線サーモグラフィ同期計測による位置補正システム

3. 2. 1. 熱弾性応力測定および散逸エネルギー測定

断熱状態の材料に負荷が与えられる場合、Fig. 3-1 に示すような負荷と逆位相の温度変動が現れる。この温度変動は熱弾性効果と呼ばれており、主応力 $\Delta\sigma$ と温度変化 ΔT の関係は (3-1) 式のように表される。

$$\Delta T = -\frac{\alpha}{(\rho C_p)} T \Delta\sigma = -k T \Delta\sigma \quad (3-1)$$

ここで α は線膨張係数、 ρ は密度、 C_p は定圧比熱、 T は材料の絶対温度、 k は熱弾性係数である。(3-1) 式より、周波数 f の正弦波変動負荷を材料に与えた場合、赤外線サーモグラフィを用いて得られる温度変動に関するの時系列データに対して FFT 解析を適用すると、負荷周波数と同じ周波数成分は、主応力と変動に対応した温度振幅となる。金属材料表面では、Fig. 3-1 に示したように、最大引張および最大圧縮時に達する付近において塑性変形に起因した微小な発熱が生じると考えられる。このため塑性変形に由来する温度変動は、負荷の 2 倍周波数をもつと考えられる。これまでに、温度変動の FFT 解析によって得られる負荷の 2 倍周波数成分を、散逸エネルギーとして評価する手法が用いられてきた[3-7]。散逸エネルギーは非常に小さな温度変動であるため、散逸エネルギーの評価には正確な温度変動の測定が必要とされる。周波数解析により、負荷信号に対する熱弾性温度変動 T_E の位相 θ_E および散逸エネルギーによる温度変動 T_D の位相 θ_D が算出され、熱弾性温度変動に対する散逸エネルギーによる温度変動の位相差 $\Delta\theta$ が得られる。エネルギー散逸による温度変動は特定の位相差を示すことが報告されており、オーステ

ナイト系ステンレス鋼 SUS316L に対する応力比 $R=-1$ の正弦波変動負荷の場合では、約 60deg を示すとされている [3-8].

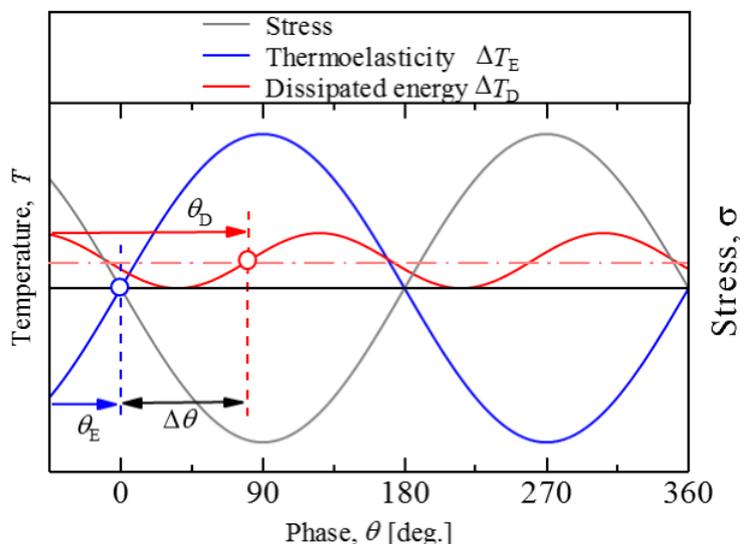


Fig.3-1 Schematic illustration of temperature change and phase difference.

3. 2. 2. 同期計測による位置・変形補正手法

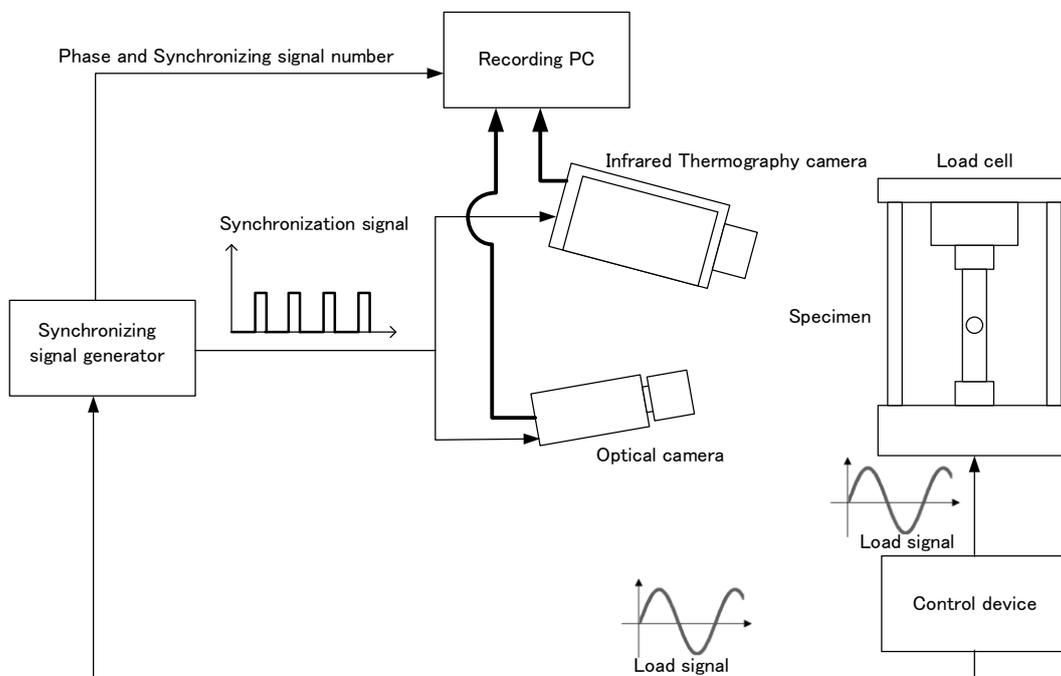
3. 1. 節で述べたように、散逸エネルギーによる温度変動は微小であるため、試験片に加える変動負荷による視野内での変位、変形を極力排除する必要がある。そこで、本研究では変位・変形を捉えるための高解像度可視カメラと赤外線サーモグラフィカメラの完全な同期計測を行うことができるシステムを製作し、また可視画像で捉えた変位・変形を解像度や視点位置・主視線軸方向の異なる赤外線サーモグラフィに正確に反映する画像処理ソフトウェアを開発した。これらを使用し試料の変位・変形を補償する。

(1) 同期計測システム

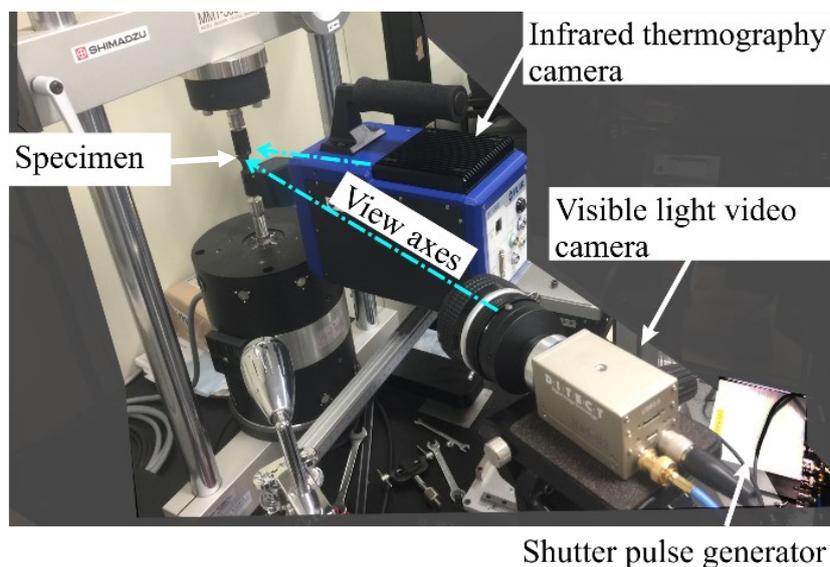
本研究で開発した同期計測システムの概念図および金属試料を可視ビデオカメラおよび赤外線サーモグラフィカメラで金属試験片を撮影している様子を Fig. 3-2 に示す。可視ビデオカメラと赤外線サーモグラフィカメラには同期信号発生装置から同一のシャッターパルスが提供されることで、可視画像と赤外線サーモグラフィの同期撮影が実現されている。各画像は、このシャッターパルスの番号が付加され、対応関係が分かるようになっている。一方、疲労試験機で試料に正弦波状の負荷を加える場合には、疲労試験機の制御装置が出力する負荷信号から正弦波の位相を求め、同時に撮影されている画像のシャッターパルス番号とペアにして、録画用 PC に情報ファイルとして記録される。

2つのカメラの位置および姿勢の情報は、撮影された画像を用いて計算されるため Fig. 3-

2(b)に示したように、金属試料に対し同一面が撮像できるのであれば詳細な調整を行う必要がない。実験に使用した可視ビデオカメラと赤外線サーモグラフィカメラの仕様を Table. 3-1 に示す。



(a) System diagram



(b) Layout of cameras and specimen

Fig. 3-2 Synchronous recording system

Table.3-1 Specifications of employed infrared thermography and visible-light camera.

	Infrared thermography camera	Visible-light camera
Manufacturer and model number	FLIR SC7500	DITECT HAS U2
Image sensor	InSb	CMOS
Number of pixels	320x256	2,592x2,048 (max) 640x480
Maximum frame rate	350 Hz	1000 Hz (640x480)
Minimum exposure time	10 μ s	10 μ s
Temperature resolution	0.02 K	
Lens focal distance	100mm	50mm

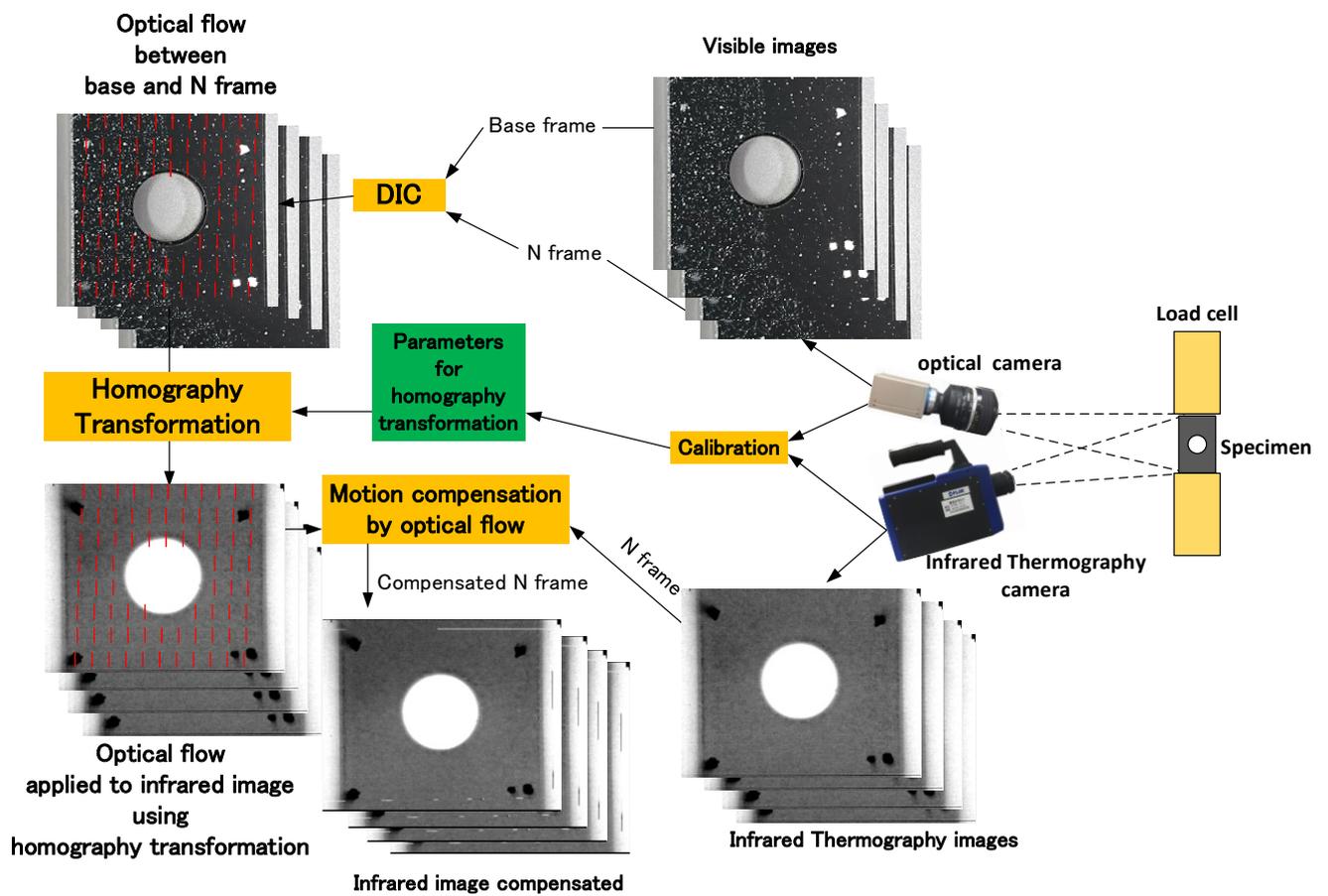


Fig. 3-3 Motion compensation process

(2) 画像処理による位置補正

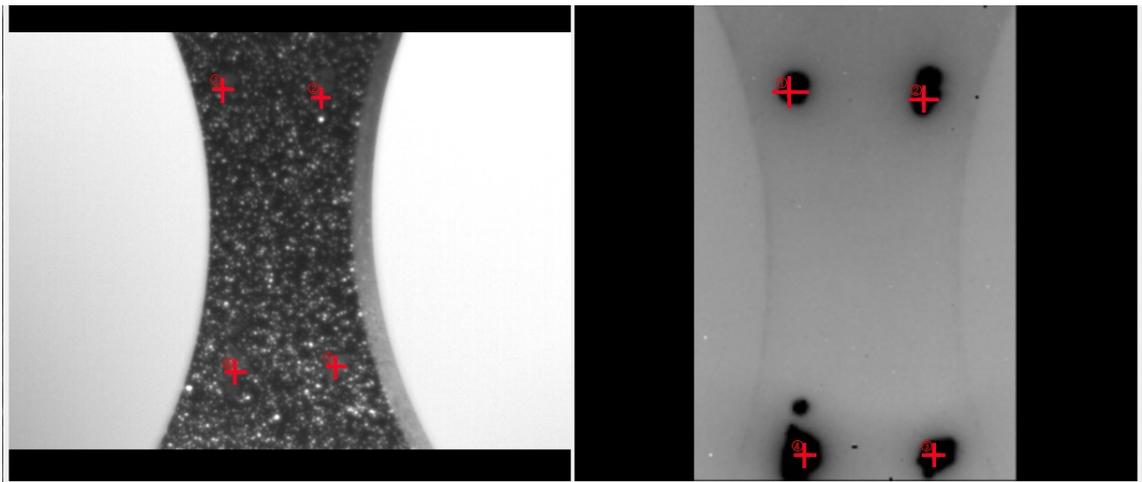
先行研究において提案された、可視画像に対するデジタル画像相関処理(DIC: Digital Image Correlation) 結果を赤外線サーモグラフィ計測結果に反映する手法としては、試験片に生じる変形が裏表面で同じであるという仮定に基づき試験片の表面を可視ビデオカメラで、裏面を赤外線サーモグラフィカメラで撮影する方式や、同一表面に対して別のタイミングで可視および赤外線サーモグラフィカメラでの撮影を行うといった、二つのカメラの主視線軸が平行な状態での撮影手法がとられていた。本研究においては、Fig. 3-2(b)に示したように2つのカメラは、試験片の同一面を同時に撮影しているものの、可視ビデオカメラと赤外線サーモグラフィカメラの主視線軸は平行ではない設定での計測を行っている。このため、従来法のような表裏面の同一変形を仮定する、あるいは同じ表面を異なるタイミングで計測するといった制約のない計測を実現できる。その反面、この状態で撮像された可視画像のDIC処理により生成されたオプティカルフローベクトルを赤外線画像に直接反映することはできないという問題が生じる。

本研究では射影幾何学画像処理の手法である平面射影変換(ホモグラフィ変換)を利用することでこの問題を解決した。同一対象物を、ある位置・姿勢・焦点距離のカメラで撮影した画像を、別の位置・姿勢・焦点距離のカメラで撮影した画像に変換することを考える。一般的にこの変換を行うには、カメラの位置・姿勢情報(これらをまとめてカメラ外部パラメータと呼ぶ)およびカメラレンズ距離(これらを含むカメラ個体に付随したパラメータをカメラ内部パラメータと呼ぶ)に加え、対象物の3次元的な位置および形状の情報が必要となる。現実にはこれらを事前に計測することは困難である。しかし、対象物が平面である場合対象物上の4つ以上の変換前後の画像上位置の対応が分かれば、画像全画素を変換できることが知られている[3-9]。これを平面射影変換(ホモグラフィ変換)と呼び、(3-2)式で表される。

$$\mathbf{H} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} sX \\ sY \\ s \end{bmatrix} \quad (3-2)$$

ここで (x, y) は変換前の画像座標を、 (X, Y) は変換後の画像座標を示す。3x3 行列 \mathbf{H} はホモグラフィ変換行列と呼ばれる。s は不定なスケールファクタである。変換後の座標を得るには、入力座標に左からホモグラフィ変換行列をかけ、得られた 3x1 ベクトルの3行目成分で1, 2行目成分を割ればよい。変換前の画像座標は通常整数であるが、得られる変換後の画像座標は一般的に整数とならないため、実際のプログラムでは変換後の画素位置から返還前の画像位置を求める。当然この位置も整数ではないため、周囲の画素の画素値を補間することで変換後位置の画素値を得る。

(3-2)式のホモグラフィ変換行列 \mathbf{H} は同一金属試料片を撮影したの赤外線サーモグラフィおよび可視画像上の同一位置を表す4つの対応点を指定することで得られる。Fig. 3-4 に4つの対応点を指定した様子を示す(赤十字が対応点)。



(a) Visible image

(b) Infrared thermography

Fig. 3-4 Selecting 4 pairs of correspondence points

(3-2)式からは3つの連立方程式が得られるが、これらから不定な s を消去して得られる2つの連立方程式を行列の式とすると、

$$\begin{bmatrix} x & y & 1 & 0 & 0 & 0 & -xX & -yX \\ 0 & 0 & 0 & x & y & 1 & -xY & -yY \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_{11} \\ h_{12} \\ h_{13} \\ h_{21} \\ h_{22} \\ h_{23} \\ h_{31} \\ h_{32} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} \quad (3-3)$$

となる。(3-3)式において、 $h_{11} \sim h_{32}$ はホモグラフィ変換行列の要素を示す。赤外線サーモグラフィ (Fig. 3-4(b)) 上の指定点 (赤十字位置) $[X \ Y \ 1]^T$ と対応する可視画像 (Fig. 3-4(a)) 上の対応点 (赤十字位置) $[x \ y \ 1]^T$ が4対あるため、(3-3)式から8個の連立方程式が得られる。求めたいホモグラフィ変換行列の要素も8個であるため、この連立方程式は解くことができる。4対以上対応点を得られる場合、(3-4)式のように表すことができる。

$$\begin{bmatrix}
x_1 & y_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & -x_1X_1 & -y_1Y_1 \\
0 & 0 & 0 & x_1 & y_1 & 1 & -x_1Y_1 & -y_1X_1 \\
x_2 & y_2 & 1 & 0 & 0 & 0 & -x_2X_2 & -y_2Y_2 \\
0 & 0 & 0 & x_2 & y_2 & 1 & -x_2Y_2 & -y_2X_2 \\
x_3 & y_3 & 1 & 0 & 0 & 0 & -x_3X_3 & -y_3Y_3 \\
0 & 0 & 0 & x_3 & y_3 & 1 & -x_3Y_3 & -y_3X_3 \\
x_4 & y_4 & 1 & 0 & 0 & 0 & -x_4X_4 & -y_4Y_4 \\
0 & 0 & 0 & x_4 & y_4 & 1 & -x_4Y_4 & -y_4X_4 \\
& & & & & \vdots & & \\
x_N & y_N & 1 & 0 & 0 & 0 & -x_NX_N & -y_NY_N \\
0 & 0 & 0 & x_N & y_N & 1 & -x_NY_N & -y_NX_N
\end{bmatrix}
\begin{bmatrix}
h_{11} \\
h_{12} \\
h_{13} \\
h_{21} \\
h_{22} \\
h_{23} \\
h_{31} \\
h_{32}
\end{bmatrix}
=
\begin{bmatrix}
X_1 \\
Y_1 \\
X_2 \\
Y_2 \\
X_3 \\
Y_3 \\
X_4 \\
Y_4 \\
\vdots \\
X_N \\
Y_N
\end{bmatrix}
\quad (3-4)$$

(3-5)式の N は対応点の個数である。これが4個の場合、すなわち Fig. 3-4 のように対応点が4対得られる場合では、左辺左側行列は 8×8 の正方行列となり逆行列が求められる。これを両辺に左からかけてホモグラフィ変換行列の要素が求められる。一方、 $N > 4$ では左辺左端の行列は非正方行列であるため、SVD などを用いて疑似逆行列を求めることで同様にホモグラフィ変換行列の要素を求める。

以上のように平面射影ではカメラや対象物の詳細な情報を用いることなく、4対応点の情報のみで簡易に可視画像上の位置を赤外線サーモグラフィ上の位置に変換することができる。

Fig. 3-3 に本研究で提案する手法による位置補正の手順を示す。

撮像された可視ビデオ映像の各フレーム画像から負荷がかかっていない時点の画像を基準フレーム画像として選択する。この基準フレーム画像と、負荷が変動しているほかのフレーム画像間で DIC を実行し、2フレーム間の局所変位ベクトル（オプティカルフロー）を得る。予め Fig. 3-4 に示した4対応点から(3-4)式により求められている、ホモグラフィ変換行列を用いて得られた可視画像上でのオプティカルフローを、赤外線サーモグラフィ上の位置に正確に変換する。その後、赤外線サーモグラフィ上のオプティカルフローの局所変位ベクトルの逆方向に赤外線サーモグラフィを变形することで、基準フレームに対応する赤外線サーモグラフィの位置・形状に補正が行われる。

Fig. 3-5 に可視画像上のオプティカルフローを赤外線サーモグラフィ適用する手法の概念図を示す。

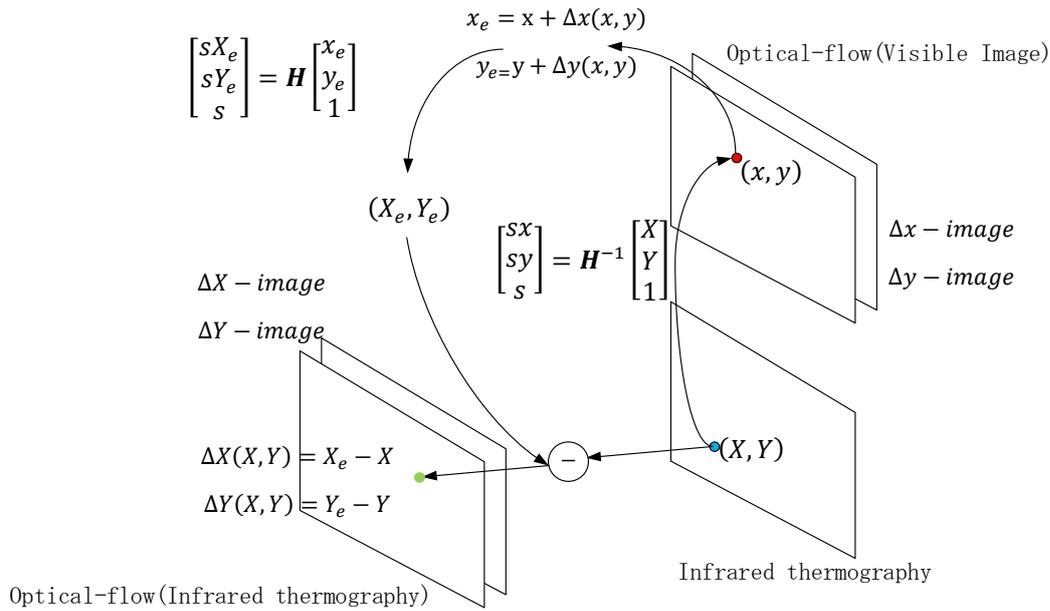


Fig. 3-5 Method of applying optical-flow on infrared thermography

可視画像の2フレーム間のオプティカルフローは、Fig. 3-5 右上に示したように、変位ベクトル各値が変位ベクトルの始点位置の画素に格納された2枚の画像 Δx 画像および Δy 画像として保存されている。赤外線サーモグラフィ上の注目する位置 (X, Y) の変位ベクトル $\Delta X(X, Y)$ および $\Delta Y(X, Y)$ を得るために、まず位置 (X, Y) を求められているホモグラフィ行列の逆行列 H^{-1} で可視画像上の位置 (x, y) に変換する。この位置の可視画像の変位ベクトル2次元成分 $\Delta x(x, y)$, $\Delta y(x, y)$ を Δx 画像および Δy 画像から取得する。実際には、計算される画素位置 (x, y) は整数ではないため、周辺に保管されている変位ベクトルを用いて補間計算により $\Delta x(x, y)$, $\Delta y(x, y)$ を得る。この可視画像の注目画素位置と変位ベクトルを加算し、変位後の可視画像上の画素位置 (x_e, y_e) を得る。 (x_e, y_e) を再度ホモグラフィ変換行列 H で赤外線サーモグラフィ上の画素位置に戻し、初めの赤外線サーモグラフィ上の注目位置 (X, Y) との差分から赤外線サーモグラフィ上での変位ベクトルを求める。

3. 2. 3. 可視ひずみ計測に基づいた熱弾性温度変動評価およびエネルギー散逸挙動の評価

3. 2. 1. 節で述べたように可視画像に対する DIC によって、試験片の移動および変形を計測し、さらにこれからひずみを算出する。疲労は弾性変形の繰返しによって生じるため、光学計測によって算出されるひずみは弾性成分が支配的であるものと考えられる。そこで可視光学計測結果の DIC 処理で得られたひずみ分布から熱弾性温度成分を算出し、実際の温度計測値と比較すれば、エネルギー散逸に起因する不可逆な温度変動成分のみを抽出できる。

可視画像において基準画像から得られるオプティカルフローの x 方向成分を $u(x, y)$, y 方向成分を $v(x, y)$ とすると、 x 方向ひずみ $\epsilon_x(x, y)$ および y 方向ひずみ $\epsilon_y(x, y)$, ϵ

ん断ひずみ $\boldsymbol{\gamma}_{xy}(x, y)$ は(3-5)式, (3-6)式, (3-4)式でそれぞれ表される.

$$\boldsymbol{\varepsilon}_x(x, y) = \frac{\partial}{\partial x} \boldsymbol{u}(x, y) \quad (3-5)$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}_y(x, y) = \frac{\partial}{\partial y} \boldsymbol{v}(x, y) \quad (3-6)$$

$$\boldsymbol{\gamma}_{xy}(x, y) = \frac{\partial}{\partial x} \boldsymbol{v}(x, y) + \frac{\partial}{\partial y} \boldsymbol{u}(x, y) \quad (3-7)$$

変位 \boldsymbol{u} および \boldsymbol{v} の導関数の導出にはモリフィケーション法を適用した. モリフィケーションとはデータ関数 ϕ とモリフィケーション関数 ρ_δ を畳込積分することで, データ関数 ϕ を平滑化する手法である. 2次元の場合のモリフィケーション関数およびモリフィケーション関数によって平滑化されたデータ関数はそれぞれ(3-8)式および(3-9)式のように表される.

$$\rho_\delta(x, y) = \frac{1}{\delta^2 \pi} \exp\left(\frac{-x^2 - y^2}{\delta^2}\right) \quad (3-8)$$

$$\rho_\delta \cdot \phi(x, y) = \int_{x-3\delta}^{x+3\delta} \int_{y-3\delta}^{y+3\delta} \rho_\delta(x-s, y-t) \phi(s, t) ds dt \quad (3-9)$$

ここで, δ はぼかし半径である. 平滑化されたデータ関数の導関数は(3-10)式のようになる.

$$\frac{\partial}{\partial x} \rho_\delta \cdot \phi(x, y) = \int_{x-3\delta}^{x+3\delta} \int_{y-3\delta}^{y+3\delta} \frac{\partial}{\partial x} \rho_\delta(x-s, y-t) \phi(s, t) ds dt \quad (3-10)$$

可視画像から得られる変位をデータ関数として(3-5)~(3-7)式によりひずみを算出する. ひずみからフックの法則に基づいて応力に変換し, さらに主応力とを算出して熱弾性温度変動 $T_{visible}(t)$ を(3-11)式で算出する.

$$T_{visible}(t) = k' \sigma(t) + T_{mean} \quad (3-11)$$

ここで T_{mean} は赤外線サーモグラフィによる温度変動の平均値である. この可視計測から得られた温度変動は熱弾性温度変動のみを表しており, 赤外線サーモグラフィによる温度変動 $T_{IR}(t)$ にはさらに塑性変形による温度変動成分が存在するからその差分温度の時系列データ $T_{dif}(t)$ を(3-12)式で計算することにより塑性変形による熱変動を取り出すことができる.

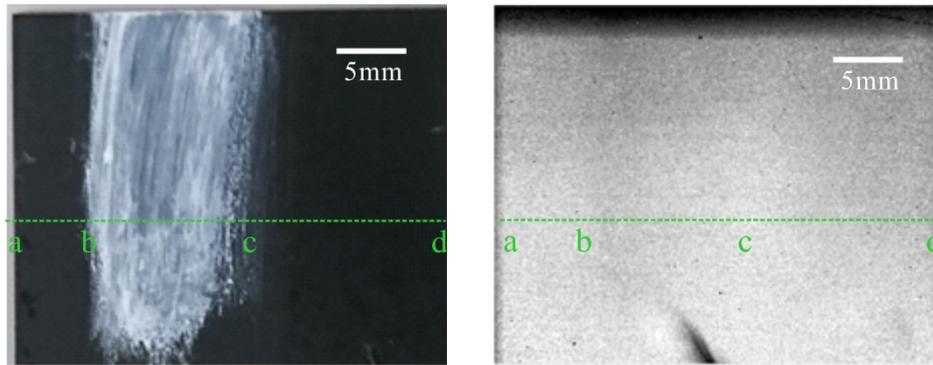
$$T_{dif}(t) = T_{IR}(t) - T_{visible}(t) \quad (3-12)$$

3. 3. 実験結果

3. 3. 1. 白色ランダムパターンの赤外線計測への影響

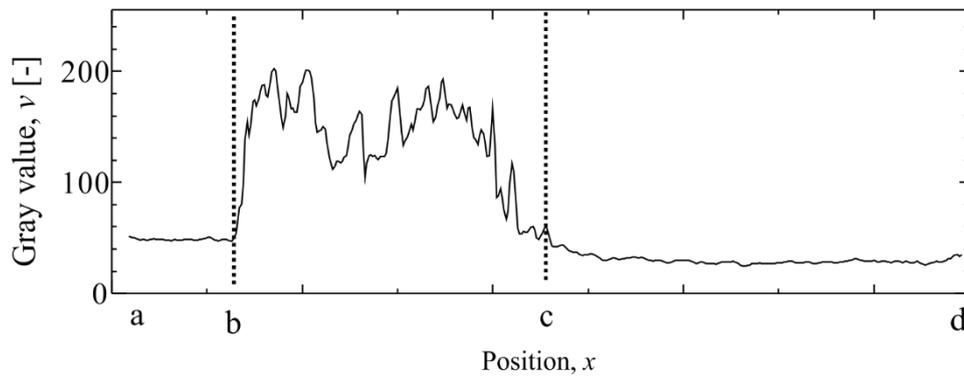
ひずみ量をもとめるため行う可視画像の DIC 画像処理に必要なランダムパターンを試験片上に塗布した。本研究で今回提案する可視計測および赤外線の数値計測は、試験片の同一面に対して同時に行うため、試験片表面に塗布する塗料としては、可視域の画像で明瞭なコントラストでランダムパターンが認識でき、かつ赤外線領域では黒色塗料とランダムパターンの間で放射率にほとんど違いがなく、塗料の塗付が赤外線温度計測に影響を与えないようなものが望ましい。本研究では赤外線域での反射が少ないと予想される水彩絵の具をランダムパターンの塗料に用いた。

つや消し黒色塗料を塗布したアルミニウム板の表面に水彩絵の具を広範囲に塗布して赤外線計測を行った。試験体の外観とその赤外線計測結果をそれぞれ Fig. 3-6(a) と (b) にそれぞれ示す。また、Fig. 3-6(c) は (a) 状の垂直方向中央の水平線で得られた可視画像輝度値のラインプロファイルを示す。Fig. 3-6(d) は (b) 上の垂直方向中央の水平線で得られた、赤外線輝度値のラインプロファイルを示す。Fig. 3-6(c) 左側の水彩絵の具で白くなった部分と右側つや消し黒色塗料を塗布した領域で輝度に大きな差があるのに対し、Fig. 3-6(d) では、熱画像の温度値分布において、両者の違いが現れていないことがわかる。水彩絵の具を用いたランダムパターンは (a) の可視カメラでは良好なコントラストで視認できるのに対して、(b) の赤外線サーモグラフィ画像では認識されておらず、本塗料は可視・赤外同期撮影に用いるランダムパターンの付与に適していることが分かった。

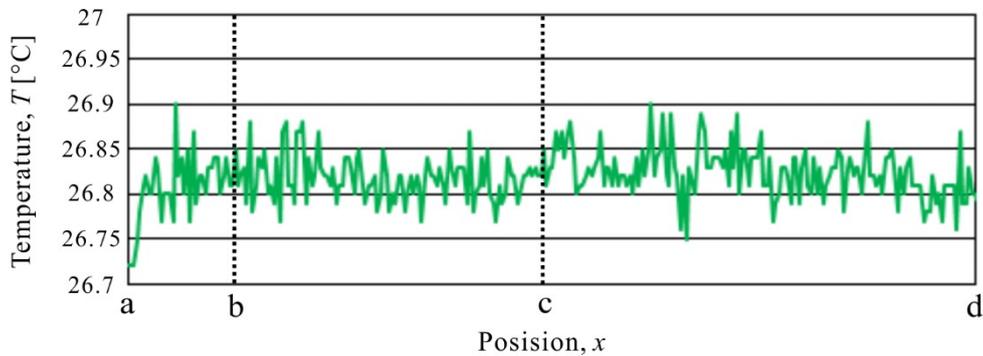


(a) Visible image

(b) Infrared image



(c) Line profile of visible image on Line a-d



(d) Line profile of infrared image on Line a-d

Fig.3-6 Effect of white pigment for random pattern on infrared thermography

3. 3. 2. 位置補正の効果

円孔付きの試験片に対して熱弾性応力測定および散逸エネルギー測定をそれぞれ行った。試験片の材質は A5052 アルミニウム合金である。本材料の 0.2%耐力は約 140MPa である。試験片形状および表面の状態を Fig. 3-7 に示す。試験片表面には、まず赤外域での反射防止のための黒色塗料を塗布し、その後、可視画像に対する DIC 処理を行うための白色ランダムパターンを塗布した。本試験片に対し、疲労試験機を用いて応力比 $R = -1$ 、負荷周波数 $f = 5\text{Hz}$ 、応力振幅

$\sigma_a=50\text{MPa}$ の正弦波状変動負荷を与えた。Fig. 3-2 に示した可視-赤外線同期システムを用いて、試験片表面の可視ビデオカメラと赤外線サーモグラフィカメラでの同期撮影を行った。撮影サンプリングレートは 100Hz とした。

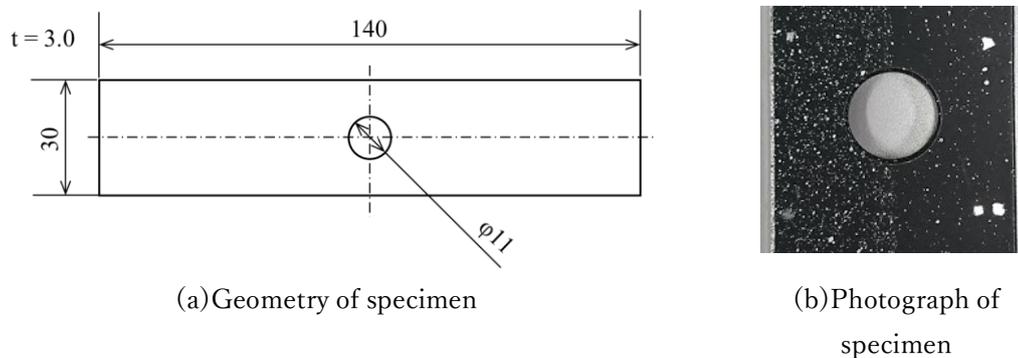
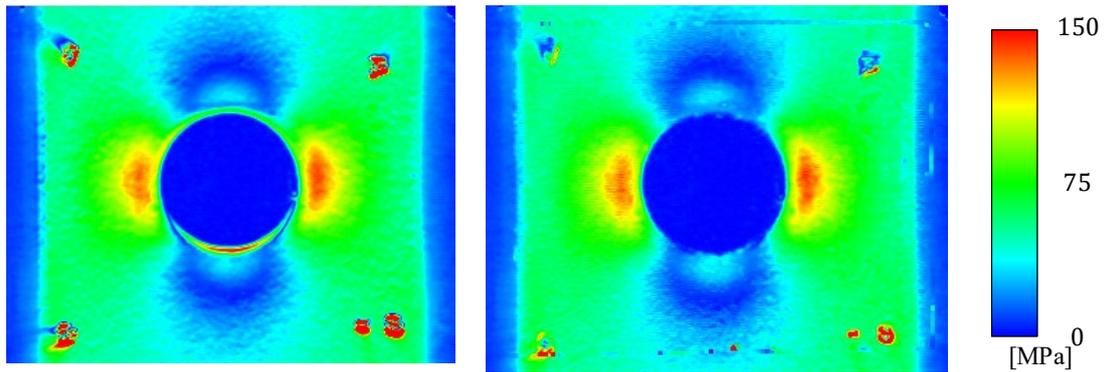


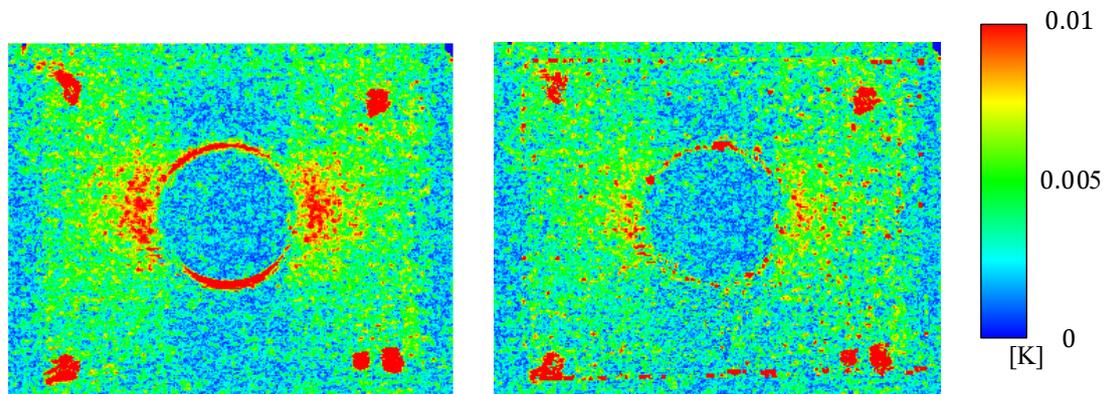
Fig. 3-7 Geometry and photograph of specimen

3. 2. 2. 節で説明した位置補正を施した場合および施していない場合で算出された応力分布図をそれぞれ Fig. 3-8 の(a)および(b)に示す。Fig. 3-8(a)を見ると、位置補正処理を適用しない場合には、円孔縁に高い応力振幅が現れていることが分かる。これはエッジ効果と呼ばれており [3-13]、正弦波状の繰返し負荷を受けた試験片の剛体移動および変形によって、試験片と空孔を通して見える背景が交互に映り込むことによる見かけの温度変動が観察されたためである。一方 Fig. 3-8(b)は位置補正処理を施すことにより、エッジ効果が消えていることが確認できる。熱弾性応力測定においては、試料面上の同一箇所の赤外線サーモグラフィ値は同一画素で計測することが前提となった算出法を採用しているため、位置補正処理により偽の温度変動を排除し、正しい計測結果を得ることができるようになった。

次に、3. 2. 3節で説明した散逸エネルギーの計算結果を Fig. 3-9 に示す。Fig. 3-9(a)は位置補正を行わなかった場合である。円孔近傍の高い応力が計測された領域に、高い散逸エネルギーが現れている。一方で Fig. 3-9(b)は位置補正処理を適用した場合であり、高い散逸エネルギーが現れていない。試験片の円孔周辺の応力集中係数 α を FEM 解析より求めたところ、 $\alpha = 2.42$ であった。ここから、負荷 50MPa に対するこの付近の応力は 120MPa 程度であると考えられる。A5052 の降伏応力は約 140MPa であることから本実験では、円孔付近で塑性変形が少数発生している可能性はあるが、それほど大きくないものと推定される。よって Fig. 3-9(a)において円孔端に現れた高い値は、位置ずれによる時系列方向の円孔周りのノイズが誤って評価されたものと考えられる。以上の結果から、本研究で提案した可視画像に対する DIC 処理による変位分布計測を援用した、位置補正による温度計測の高精度化は、散逸エネルギー評価においても有効であることが分かった。



(a) without position correction (b) with position correction
 Fig. 3-8 Distributions of measured stress amplitude ($\sigma = 50\text{MPa}$)



(a) without position correction (b) with position correction
 Fig. 3-9 Distributions of dissipated energy ($\sigma = 50\text{MPa}$)

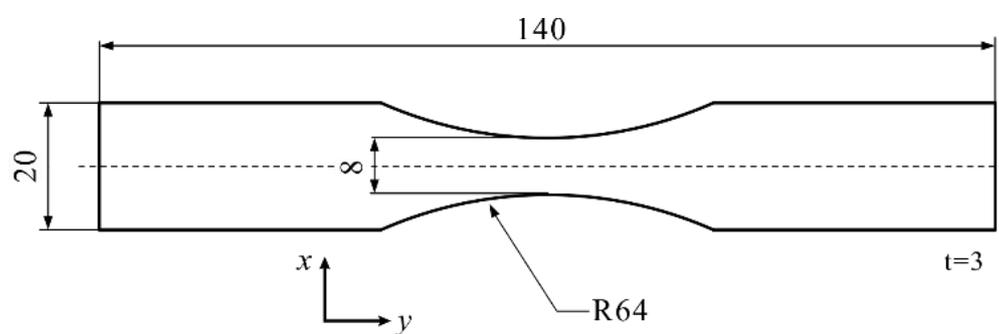
3. 3. 3. 可視によるひずみ計測 (オプティカルフロー)

本項では、可視画像に対する DIC 処理結果をもとにひずみ変動の算出を行った結果について述べる。本実験で使用した試験片形状を Fig. 3-10 に示す。試験片の材質は SUS316L ステンレス鋼である。本試験片に対し疲労試験機を用いて、応力比 $R = -1$ 、負荷周波数 $f = 5\text{Hz}$ の正弦波状変動負荷を試験片長手方向である y 軸方向に与えた。 $N = 1700\text{cycles}$ の繰返し数ごとに応力振幅を 150MPa から 240MPa まで 10MPa ごとに、階段状に増加させる試験を行った。各応力振幅において可視-赤外線同期計測を行った。撮影サンプリングレートは 211Hz とした。

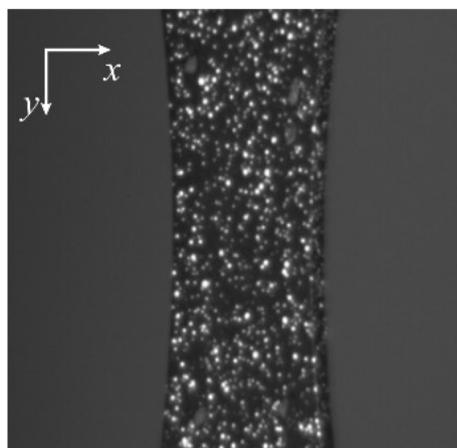
$\sigma_a = 240\text{MPa}$ で負荷した場合の可視計測より得られたオプティカルフローの各方向成分の分布を Fig. 3-11 に、オプティカルフローから各ひずみ成分を算出した結果を Fig. 3-12 にそれぞれ示す。また試験片中央部での y 方向ひずみ ϵ_y の時系列変化を Fig. 3-13 に示す。ここでは、試験片の最小断面部を中心とした $20\text{pixels} \times 20\text{pixels}$ 範囲のひずみ ϵ_y の平均値を示している。Fig. 3-12 より、最小断面部で y 方向のひずみが最も大きく、切欠きに対する長手方向のひずみ分布が得られていることがわかる。また、Fig. 3-13 からは、 ϵ_y は負荷変動と同様の

正弦波形状を示していることがわかる。

Fig. 3-13 に示した可視計測で得られたひずみの時系列データおよび赤外線計測で得られた温度の時系列データに対して周波数解析を行い、両者の時系列データにおける、5Hz 周波数成分の振幅の大きさをそれぞれ調べた。赤外線計測における温度時系列データの 5Hz 成分 $T_{amp,f}$ とひずみの時系列データの 5Hz 成分 $\epsilon_{amp,f}$ の比較を行った結果を Fig. 3-14 に示す。同図では赤外線計測および可視計測ともに評価領域内の各ピクセルの温度およびひずみの平均値を算出してプロットした。Fig. 3-14 より、負荷周波数である 5Hz の温度およびひずみの信号成分は、ほぼ線形な関係を示していることが分かる。これにより赤外線計測における熱弾性温度変動の計測結果に対応した変形挙動を計測できることが分かった。



(a) Geometry of specimen



(b) Surface condition of measurement side

Fig. 3-10 Geometry and surface condition of SUS316L specimen

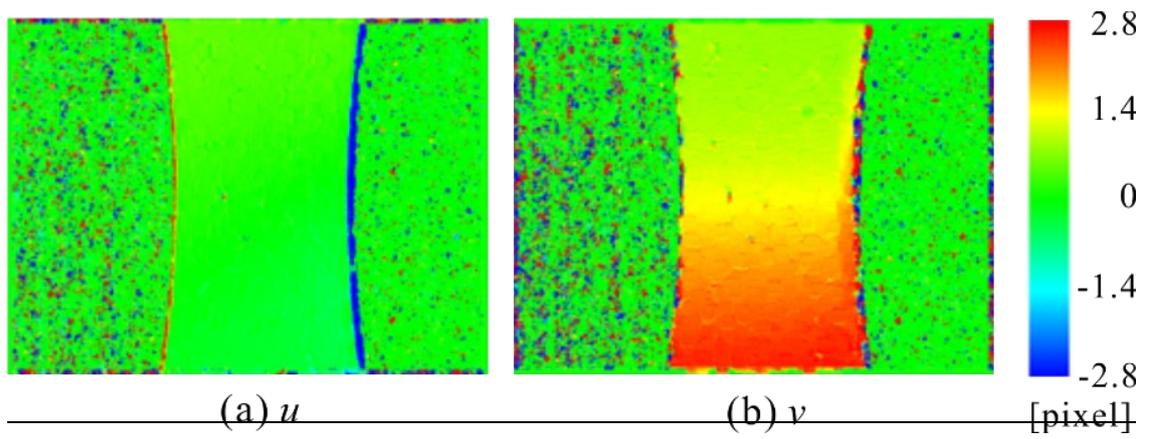


Fig. 3-11 optical flow distribution ($\sigma_a = 240\text{MPa}$)

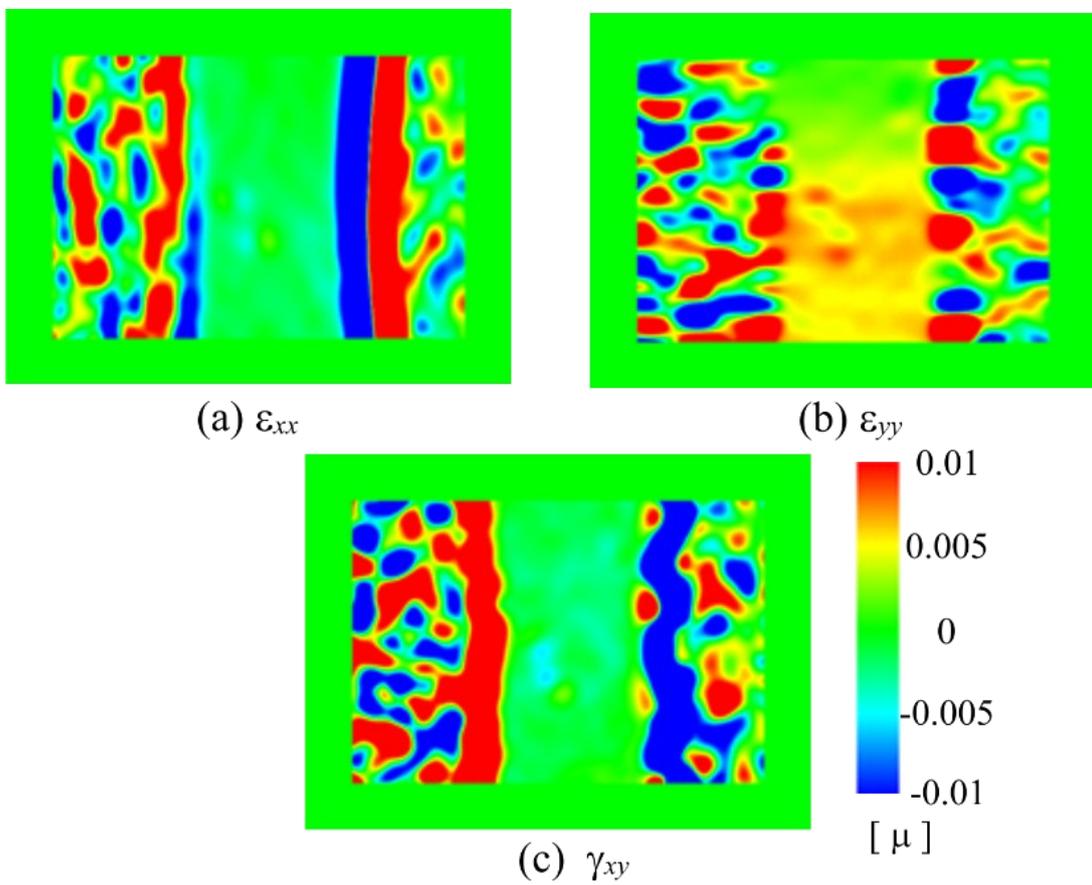


Fig. 3-12 Strain distribution measured by visible image ($\sigma_a = 240\text{MPa}$)

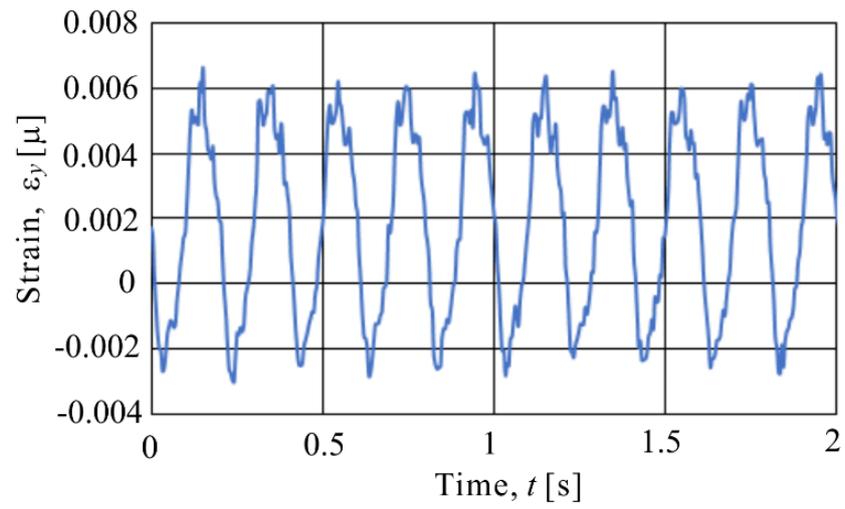


Fig. 3-13 y-direction strain

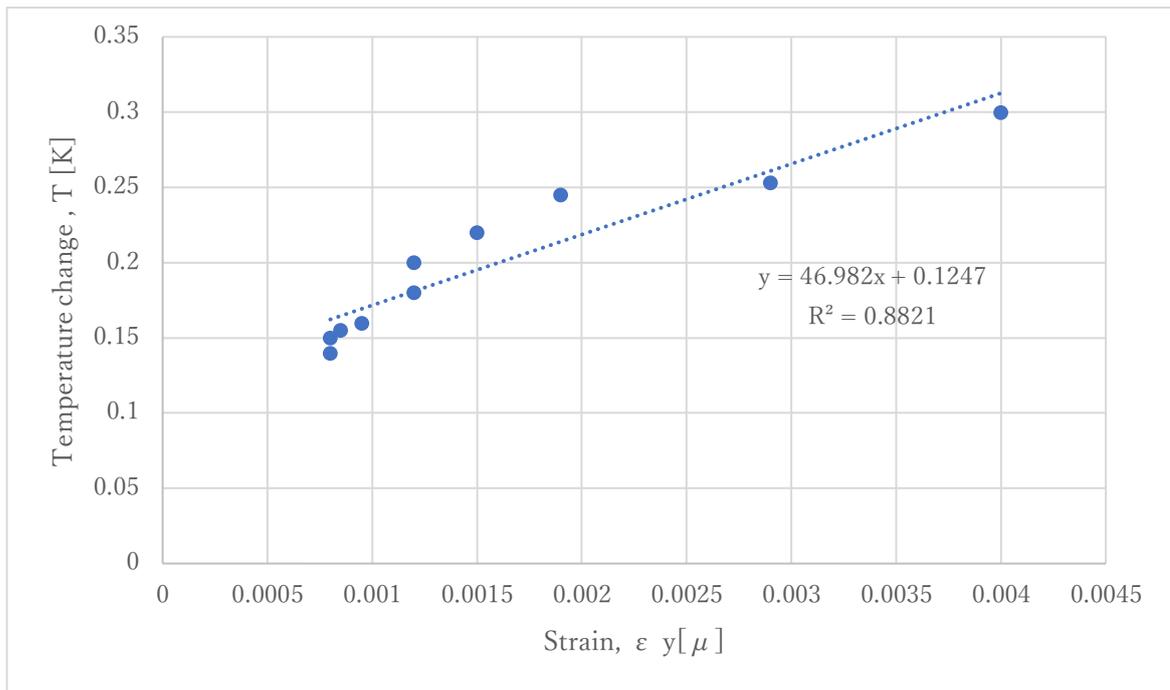


Fig. 3-14 Relationship between thermoelastic temperature and strain

3. 3. 4. 可視-赤外同期計測による散逸エネルギーの評価

赤外線計測で得られた時系列温度変動データを基に、負荷周波数 5Hz の 2 倍である 10Hz の変動成分 ΔT_D および可視画像に対する DIC 処理で得られたひずみ変動に関する時系列データの 10Hz 成分 $\varepsilon_{y,2f}$ をそれぞれ算出した。 ΔT_D および $\varepsilon_{y,2f}$ の応力振幅に対する変化を Fig. 3-15 に示す。 Fig. 3-15 において青色の丸印は赤外線サーモグラフィから得られた 10Hz の温度変動成分である ΔT_D を、橙色の丸印は可視画像の DIC 処理で得られた 10Hz のひずみ振幅成分 $\varepsilon_{y,2f}$ を示している。 10Hz の温度変動成分としては、試験片の最小断面部を中心とした 20pixels×20pixels の評価領域において、領域内の各ピクセルの温度変動から算出された二倍周波数成分の平均値をプロットした。 Fig. 3-15 から、赤外線計測で得られる温度変動の 10Hz の成分は、 $\sigma_a=210\text{MPa}$ から急増していることがわかる。散逸エネルギーが増加を示す応力振幅は疲労限度に近い値であることが報告されている。これに対して、ひずみの 10Hz 成分は応力振幅の増加に対して一定の傾向を示していない。よって可視画像では塑性変形挙動を捉えていないことが考えられる。

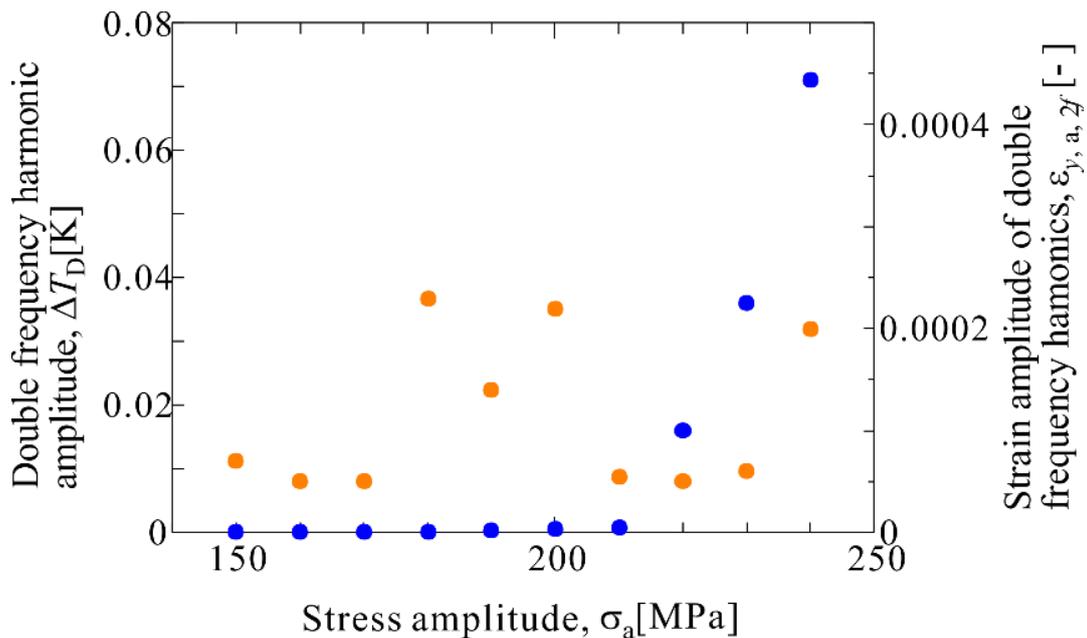


Fig. 3-15 Relationship between amplitude and load at double frequency of load

次に可視-赤外線同期計測に基づいた散逸エネルギー評価を行った結果について述べる。 3. 2. 2. 節に示した手法を用いて、可視画像の DIC 処理により求めたひずみの時系列変化から温度の時系列変化に変換した。試験片表面の放射率が理想的な黒体とは異なることや熱拡散による影響のため、赤外線サーモグラフィの計測では、実際の温度変動よりも小さく計測される場合がある。そこで、ひずみから算出した温度変動の 5Hz 周波数成分の大きさと赤外線計測による温度変動の 5Hz 周波数成分の評価結果が同じになるように、以下に示す方法でデータの基準化

を行った。ひずみから算出した主応力変動の 5Hz 成分の大きさと赤外線サーモグラフィより求めた温度変動の 5Hz 成分の比を、熱弾性温度係数比 k' とした。この k' を用いて可視画像のひずみから算出した温度変動 $T_{visible}(t)$ と赤外線サーモグラフィにより得られる温度変動 $T_{IR}(t)$ の差分温度時系列変化を $T_{dif}(t)$ 得た。可視計測および赤外線計測ともに、Fig. 3-15 と同様の評価領域内の各ピクセルにおける温度およびひずみの平均値の時系列変化を得た。エネルギー散逸が生じているピクセルでは、Fig. 3-1 中の $\Delta\theta$ が約 60deg を示すため、本実験では $\Delta\theta$ が 45~70deg の位相を示したピクセルに対してひずみの算出を行った。

各応力振幅における差分温度時系列変化を Fig. 3-16 に示す。オレンジ点が赤 $T_{IR}(t)$ を、青点が $T_{dif}(t)$ を示す。これらの図では、負荷の 1 周期ごとにデータを区切り、10cycles 分を重ね合わせた。赤外線計測で得られた温度変動も同図に合わせて示した。Fig. 3-16 より、 $\sigma_a = 220MPa$ の場合では、 $T_{IR}(t)$ の 1 周期内に、 $T_{dif}(t)$ には 2 回の温度上昇が現れていることがわかる。 $\sigma_a = 190MPa$ の場合では、 $T_{dif}(t)$ はほぼ一定値を示している。Fig. 3-15 に示したように $\sigma_a = 190MPa$ ではエネルギー散逸が生じておらず、熱弾性温度変動のみが計測されていたのに対して、 $\sigma_a = 220MPa$ ではエネルギー散逸が生じていたため、 $T_{dif}(t)$ には熱弾性温度変動以外の温度変動が観察されたものと考えられる。以上のことから Fig. 3-16 における 0~180deg と 180~360deg の負荷過程にわけて、エネルギー散逸による温度変動をそれぞれ観察することができた。

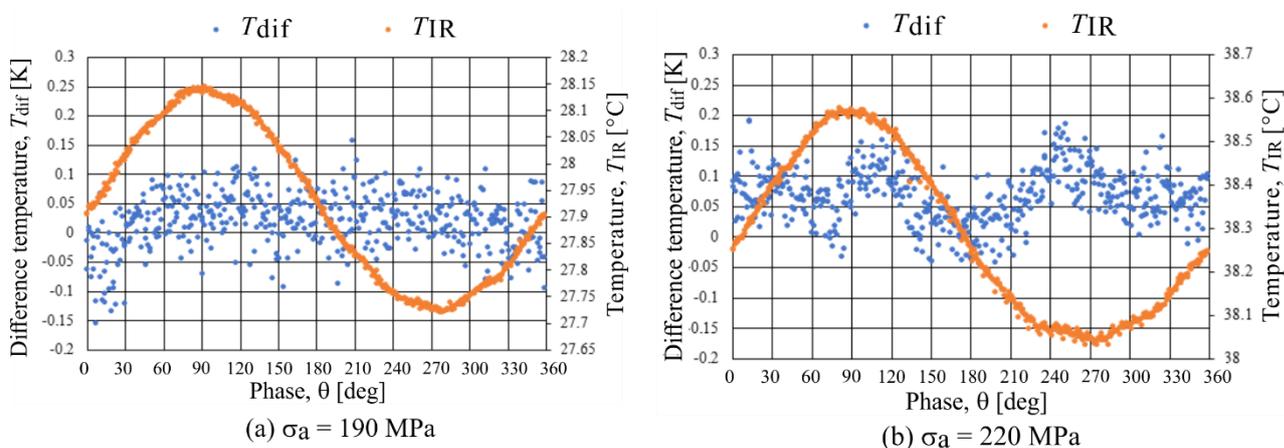


Fig. 3-16 Relationship between differential temperature and temperature phase

3. 3. 5. チタン合金散逸エネルギー評価

次に、3. 2. 節で説明した可視-赤外線同期計測手法を用いて、チタン合金の散逸エネルギー評価に関する試験を行った。チタン合金は軽金属材料の中でも高強度で耐食性に優れることから様々な環境下で広く利用されている。チタン合金に対する疲労限度推定法の適用性を検討することは産業界にとって有益である。梅田らによる先行研究では位置補正を適用せずに、チ

タン合金における疲労限度推定法の適用性を検討した[3-22]。本研究では可視—赤外線同期計測を行った位置補正を施した散逸エネルギー計測をチタン合金に適用し、散逸エネルギー計測に基づく疲労限度推定を行った。

供試材は Ti-6Al-4V である。ミルシート記載の化学組成および引張特性、物性値を Table. 3-2 から Table. 3-4 にそれぞれ示す。それぞれ試験体の画像および実験に用いた試験片形状を Fig. 3-17 に示す。

Table. 3-2 Chemical composition (mass %)

Al	V	Fe	0
6.5	4.1	0.17	0.18

Table. 3-3 Tensile properties

Young's modulus (GPa)	Tensile 0.2% proof strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Reduction of Area (%)
113	874	954	19	41

Table. 3-4 Mechanical properties

Density (kg/m ³)	Specific heat (J/kg · K)	Thermal conductivity (W/m · K)	linear expansion coefficient (/°C)
4410	580	6.6	10 × 10 ⁻⁶

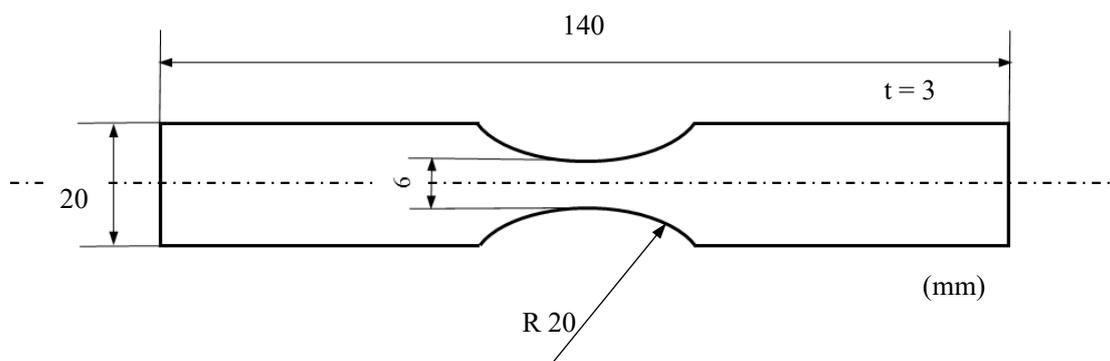


Fig. 3.17 Configuration of specimen.

軸力疲労試験には、電気油圧サーボ疲労試験機（鷲宮製作所製，FT-5）を用いた。赤外線温度計測には、温度分解能 25mK，計測波長領域 7.7-9.3mm の MCT センサを搭載した赤外線サーモグラフィ（FLIR Inc. SC7300L）を用いた。取得した赤外線サーモグラフィ動画像に対して、同期計測された負荷信号を用いたロックイン処理および周波数解析を施し、散逸エネルギーを評価

した。試験片の計測面の可視画像を Fig. 3-18 に示す。試験片の計測表面につや消し黒色塗料（アサヒペン耐熱塗料）を塗布したのち、白色塗料を用いて可視カメラによる変位算出のためのランダムパターンを塗布した。

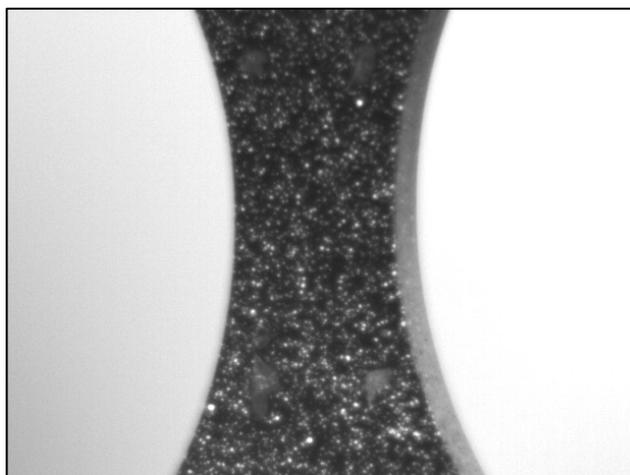


Fig. 3.28 Visible image of specimen

以上のような試料片に対し、階段状応力振幅増加試験を行った。各応力振幅における繰返し負荷回数が規定回数に達する毎に、試験機を止め、負荷振幅を上げた。繰返し数が規定の繰返し数に達した際に、赤外線サーモグラフィカメラで温度変動を、可視カメラを用いて計測対象の時系列変位データを同期計測した。応力比 $R = -1$ とし各応力振幅での繰返し数は 1700 cycles とした。赤外線サーモグラフィ撮影は、各応力振幅の負荷開始後の 500, 1000, 1500 cycles でそれぞれ行った。各応力比での負荷条件を Table. 3-5 に示す。試験片切欠き中央部の、位置補正用のマーカーに影響を受けない範囲に評価領域を設けた。

Table.3-5 Test conditions of stair-caselike stress level test

Stress amplitude range [MPa]	200~650
Stress amplitude step [MPa]	10
Extension ring [mm]	30
Load frequency [Hz]	5
Evaluation range [pixels]	46 × 46

以上の条件により得られた実験結果を示す。位補正処理を施した。 $\sigma_a = 400\text{MPa}$ および 600MPa の場合での位置補正処理前後での散逸エネルギー分布を Fig. 3-19 および Fig. 3-20 にそれぞれ示す。 $\sigma_a = 400\text{MPa}$ では現れていない散逸エネルギーが $\sigma_a = 600\text{MPa}$ では試験片の最小断面部において高い散逸エネルギーが現れている。Fig. 3-19 左図赤矩形で示した評価領域での散逸エネルギーの平均値の変化を Fig. 3-21 に示す。Fig. 3-21 では、位置補正の有無による散逸エネルギーの変化は現れていない。また Fig. 3-15 に示した散逸エネルギーの折れ曲がりも明確に現れていない。

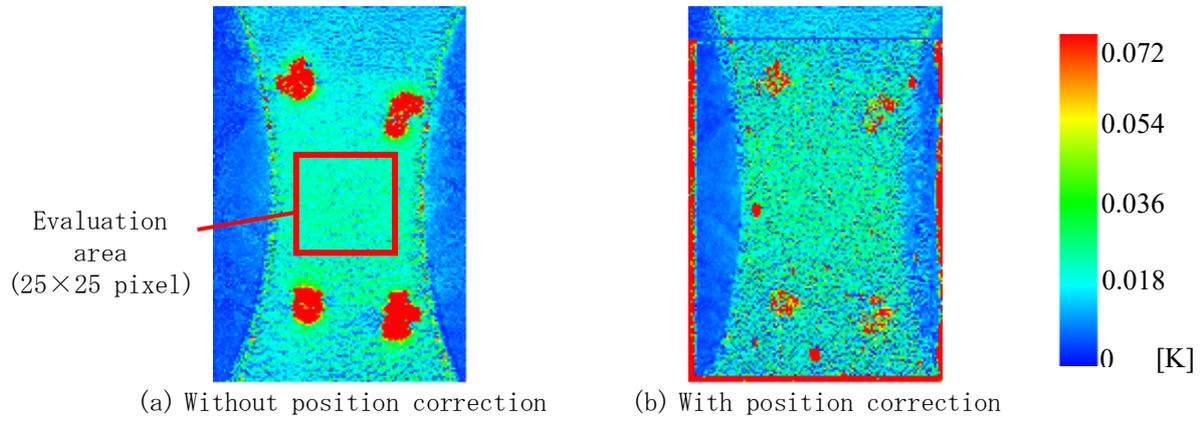


Fig. 3-19 Distribution of dissipated energy ($\sigma_a=400\text{MPa}$, $N=1500$ cycles).

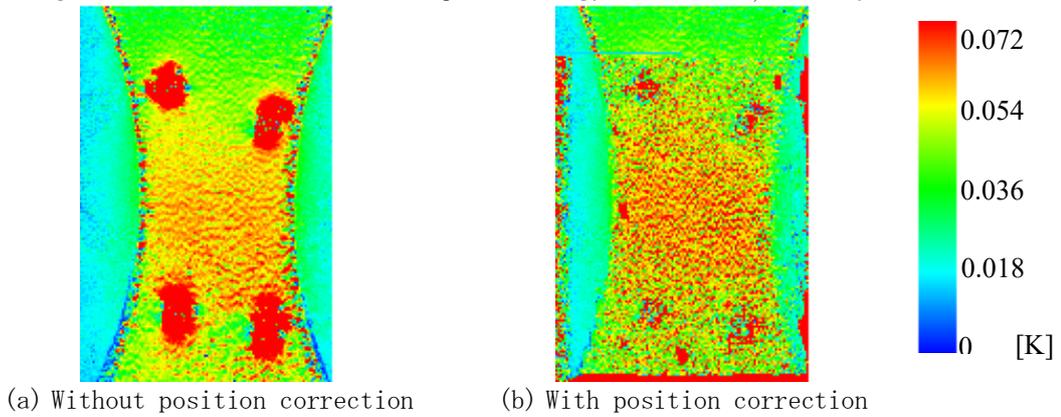


Fig. 3-20 Distribution of dissipated energy ($\sigma_a=650\text{MPa}$, $N=1500$ cycles).

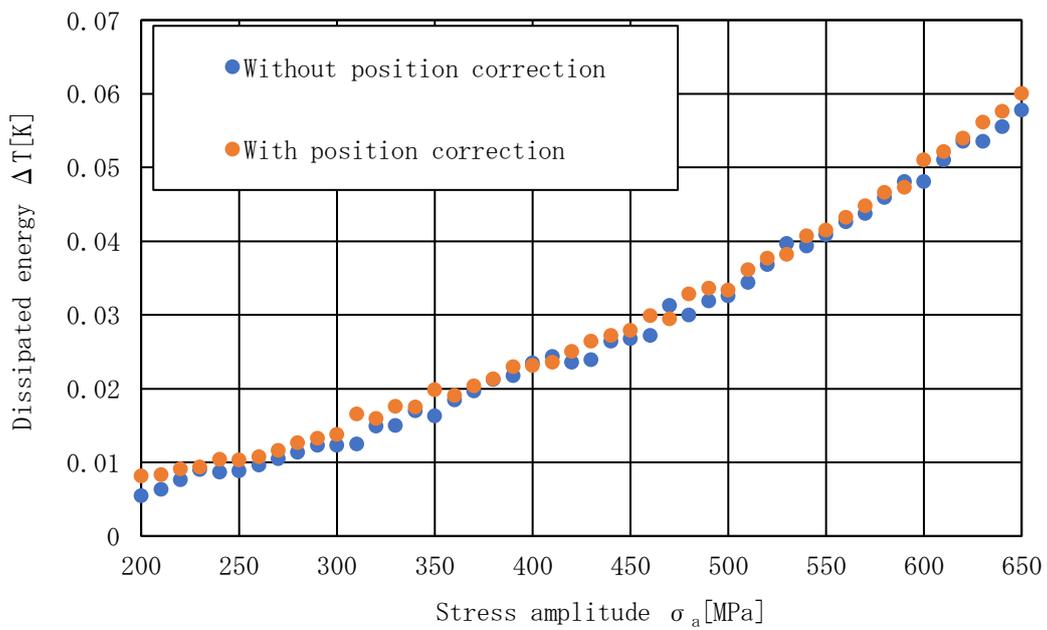
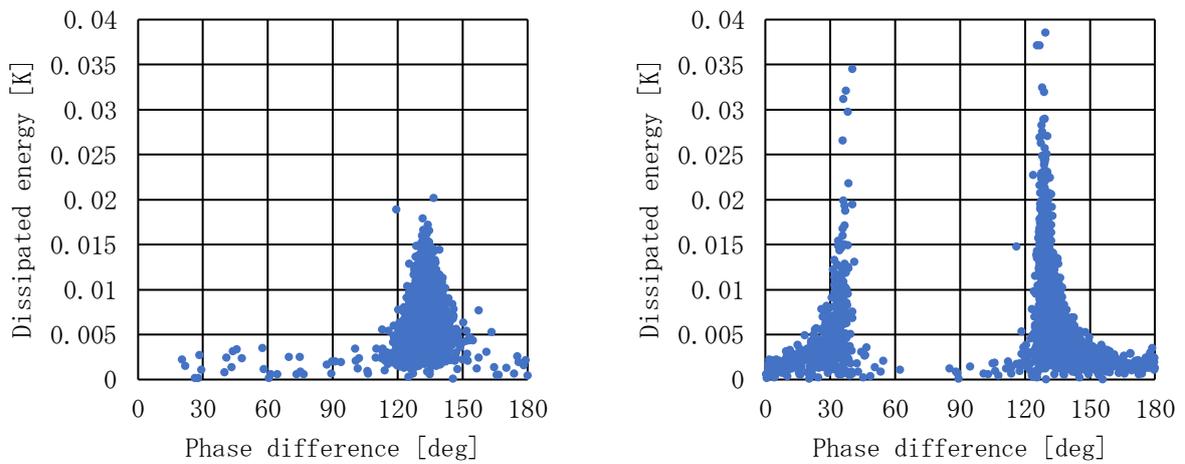
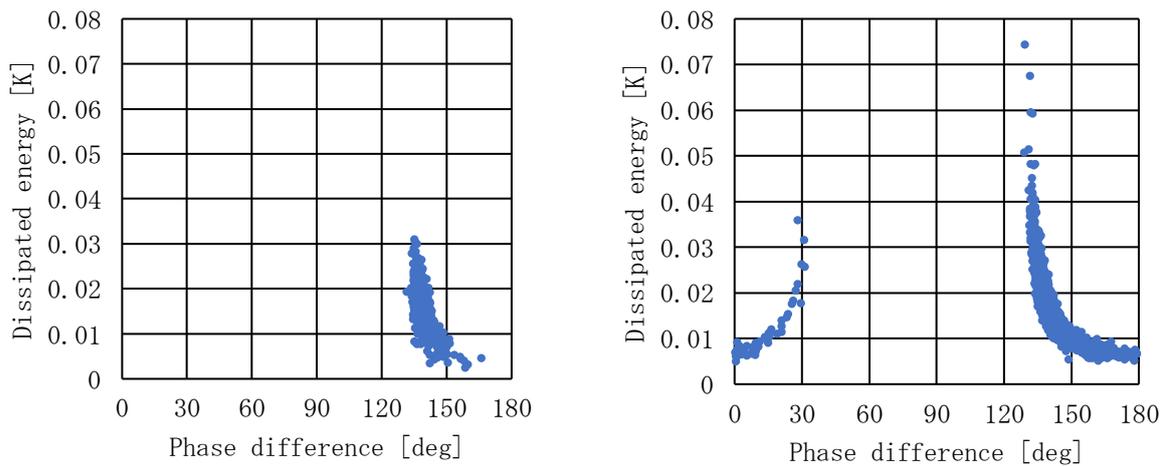


Fig. 3-21 Change in dissipated energy during stair-caselike stress level test

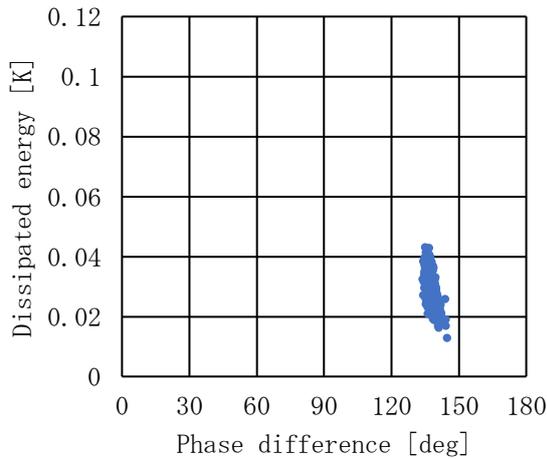
散逸エネルギーに起因した温度変動は特定の位相差を示すことが報告されている。そこで周波数解析から位相差ごとの散逸エネルギーを調べた。 $\sigma_a=200\text{MPa}$, 350MPa , 500MPa および 650MPa における, Fig. 3-19 左図赤矩形で示した評価領域内の各画素の散逸エネルギーと位相差の関係を Fig. 3-22~Fig. 3-25 にそれぞれ示す。これらの図を見ると位置補正前の散逸エネルギーは、ほとんどの画素で120度から150度の位相差を示している。一方位置補正後では、0~50度の低位相差および130~180度の高位相差に2つのピークが現れた。140度付近を示す温度変動成分は試験機の振動に起因するノイズであることが先行研究で報告されており[3-8], このことから位置補正を行うことで低位相差に散逸エネルギーが検出されているものと考えられる。



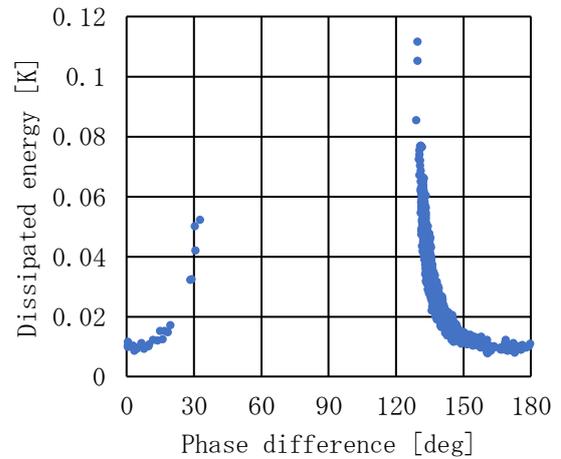
(a) Without position correction (b) With position correction
 Fig. 3-22 Relationship between the phase difference and the dissipated energy
 ($\sigma_a=200\text{MPa}$, $N=1500\text{cycles}$).



(a) Without position correction (b) With position correction
 Fig. 3-23 Relationship between the phase difference and the dissipated energy
 ($\sigma_a=350\text{MPa}$, $N=1500\text{cycles}$).

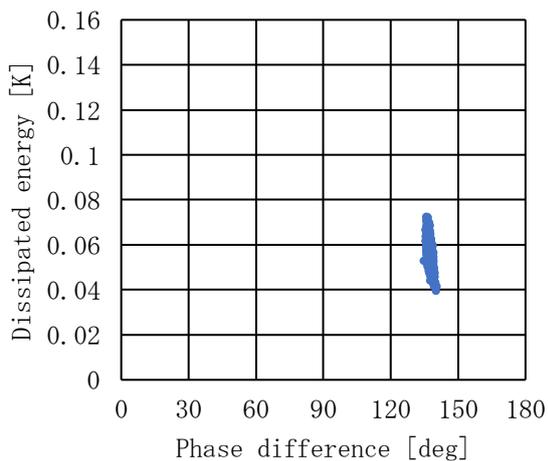


(a) Without position correction

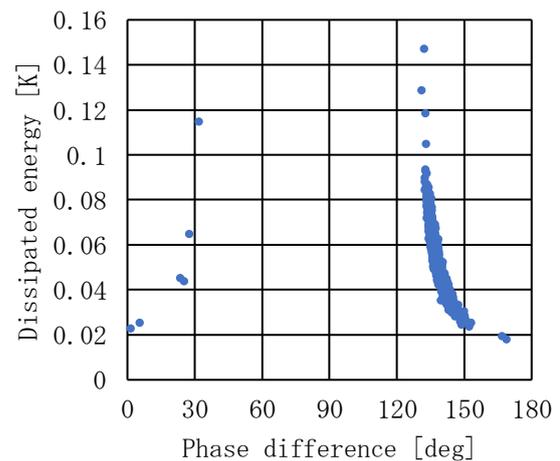


(b) With position correction

Fig. 3-24 Relationship between the phase difference and the dissipated energy ($s_a=500\text{MPa}$, $N=1000\text{cycles}$).



(a) Without position correction



(b) With position correction

Fig. 3-25 Relationship between the phase difference and the dissipated energy ($s_a=650\text{MPa}$, $N=1500\text{cycles}$).

この結果をもとに、Fig. 3-21 に示した負荷に対する散逸エネルギーの関係を表すデータのうち、位置補正を行ったデータ (Fig. 3-21 オレンジ点グラフ) に関し、位相ロックイン処理を行うことで、散逸エネルギーの変動をより精密に抽出することとした。すなわち、各負荷応力において参照位相差を 0 度から 90 度まで 10 度刻みで処理を行い、最も散逸エネルギーの値が大きくなる角度での散逸エネルギーを代表値とし、Fig. 3-21 同様 Fig. 3-19 左図赤矩形内でこの代表値の平均を計算した。その結果を Fig. 3-26 に示す。これを見ると、低応力振幅では散逸エネルギーの増加が現れず、 $\sigma_a=500\text{MPa}$ から散逸エネルギーが増加していることがわかる。これを利用し、疲労限度推定を行った結果を Fig. 3-27 に、同様の計算を位置補正無しで行った場合の結果を Fig. 3-28 に示す。

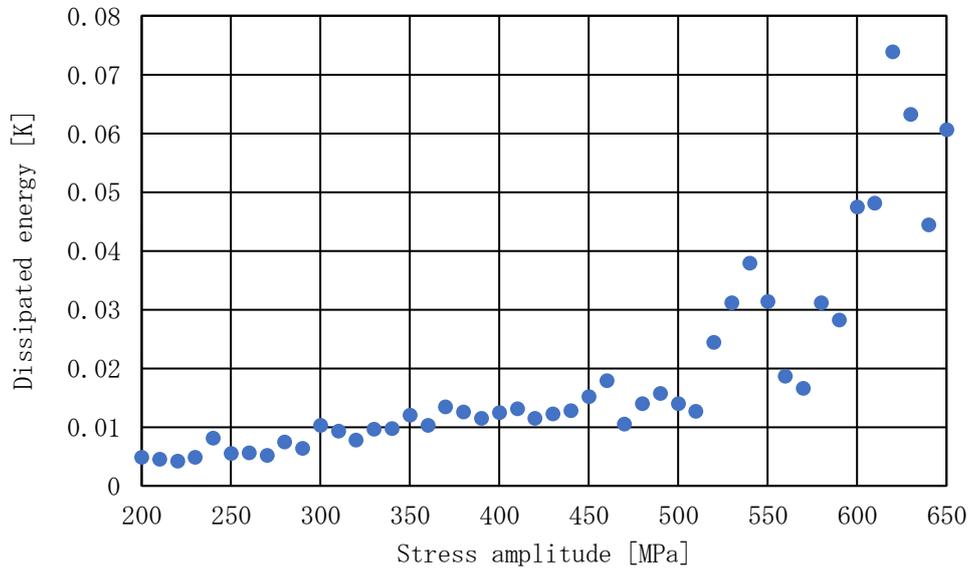


Fig. 3-26 Change in dissipated energy during stair-caselike stress level test. (with phase lockin)

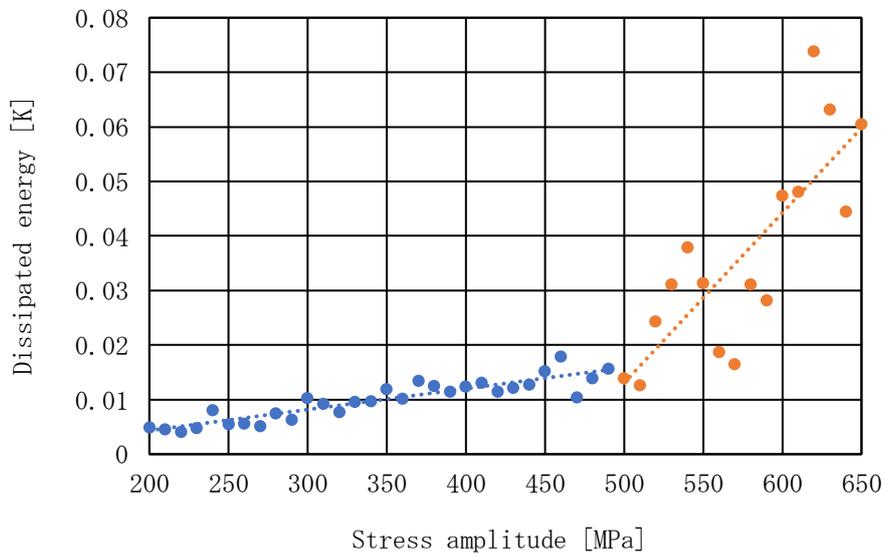


Fig. 3-27 Approximation of dissipated energy of Specimen (with position correction).

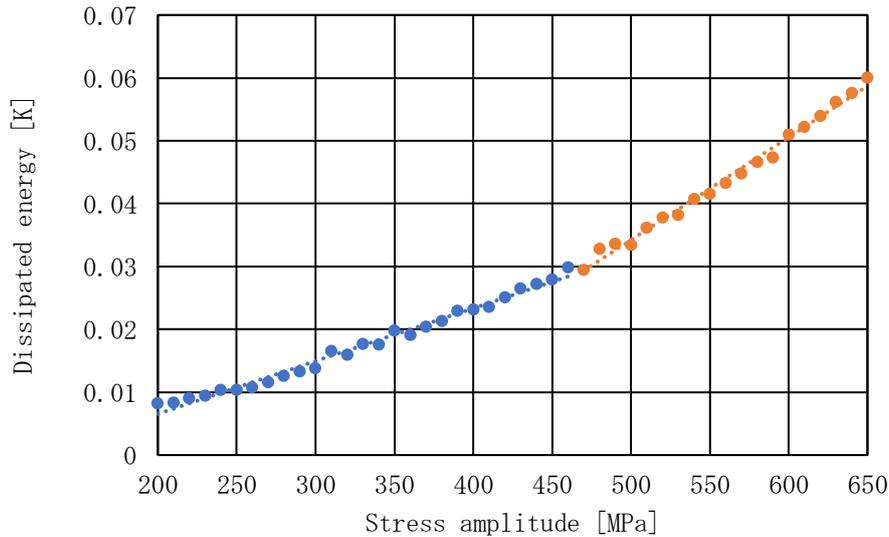


Fig. 3-28 Approximation of dissipated energy of (without position correction).

Fig. 3-27 および Fig. 3-28 において、データ 2 グループに分け、それぞれ直線近似を行った。位置補正を行った Fig. 3-27 においては、2 グループの直線の折れ曲がり位置が 500MPa 付近であることが明瞭であり、この値が疲労限界値であることが推定できる。一方、Fig. 3-28 において折れ曲がりには明瞭でなく、疲労限界値が推定できない。

以上のことから 3. 2. 節で説明した同期計測手法を用い位置補正および位相ロックイン処理を行うことで、従来明瞭に検出できなかったチタン合金での疲労限界を示す負荷-散逸エネルギーグラフによる折れ曲がりが見事に検出できるようになった。

3. 4. 結 言

本研究では、可視-赤外線同期計測システムを開発した。2 章で指摘したように、赤外線サーモグラフィでは密な画像特徴量を持つ画像が得にくく DIC 処理に適さないため、可視画像に対する DIC 処理結果を赤外線サーモグラフィの位置補正に反映した。従来も可視画像が採用されることがあったが、本研究ではさらに射影幾何画像処理を用い、可視画像の変位・変形の情報を画素単位で赤外線サーモグラフィに反映することができるようになった。

また、本同期計測システムを用いて実際に撮影試験を行い、熱弾性応力測定および散逸エネルギー測定の高精度化に本計測システムが有用であることを確認した。さらに可視画像と赤外線計測を組み合わせた、新しい散逸エネルギー評価法を提案した。本散逸エネルギー評価法では、可視時系列画像から DIC 処理によりひずみ変動を算出し、ひずみ変動から主応力和変動および熱弾性温度変動を算出する。さらに、可視画像から算出された熱弾性温度変動と実際に計測される温度変動を比較することによって、不可逆なエネルギー散逸により発生した温度変動のみを抽出する。オーステナイト系ステンレス鋼 (SUS316L) の試験片に対して、本散逸エネルギー評価法

を適用した結果、試験片表面で計測された温度変動に関する時系列データから、負荷の一サイクル中のエネルギー散逸による時系列温度変化を抽出して計測できることが分かった。

さらに、これまで明瞭に推定できなかったチタン合金の疲労限界に関し、位置補正および位相ロックイン処理を行うことで、負荷・散逸エネルギーグラフの折れ曲がりを検出することができるようになった。

参考文献

- [3-1] T. Sakagami, “Remote nondestructive evaluation technique using infrared thermography for fatigue cracks in steel bridges” , *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.* 38, pp.755-79, 2015.
- [3-2] M. P. Luong, “Infrared thermographic scanning of fatigue in metals” , *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 158, pp.363-376, 1995.
- [3-3] G. La Rosa, A. Risitano, “Thermographic methodology for rapid determination of the fatigue limit of materials and mechanical components” , *International Journal of Fatigue*, Vol. 22, No.1, pp.65-73, 2000.
- [3-4] J. C. Krapez, D. Pacou, “Thermography detection of damage initiation during fatigue tests” , *Proceedings of SPIE, Thermosense XXIV*, Vol. 4710, pp.435-449, 2002.
- [3-5] K. Hayabusa, K. Inaba, H. Ikeda, K. Kishimoto, “Estimation of fatigue limits from temperature data measured by IR thermography” , *Experimental Mechanics*, Vol. 57, No. 2, pp.185-194, 2017.
- [3-6] T. Sakagami, S. Kubo, E. Tamura, T. Nishimura, “Identification of plastic-zone based on double frequency lock-in thermographic temperature measurement” , *Proc. of ICF11*, 2005
- [3-7] P. Bremond, P. Potet, Lock-in thermography: a tool to analyze and locate thermomechanical mechanism in materials and structure, *Proc. Of SPIE*, Vol. 4360, pp.560-566, 2001.
- [3-8] D. Shiozawa, T. Inagawa, T. Washio, T. Sakagami, “Accuracy improvement in dissipated energy measurement by using phase information” , *Measurement science and technology*, Vol. 28, No. 4, 2017 .
- [3-9] R. Szeliski, 玉木徹, “コンピュータービジョン:アルゴリズムと応用” , 共立出版, pp.32, 2011.
- [3-10] T. Sakagami, N. Yamaguchi, S. Kubo, T. Ninimura, “A new full-field motion compensation technique for infrared stress measurement using digital image correlation” , *Journal of strain analysis for engineering design*, 2008.

- [3-11] M. L. Silva, G. Lavichandran, “Combined thermoelastic stress analysis and digital image correlation with single infrared camera” , *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 46: pp.783-793, 2011.
- [3-12] J. R. Samaca. Martinez, E. Toussaint, X. Balandraud, J. -B. Le Cam, D. Berghezan, “Heat and strain measurements at the crack tip of filled rubber under cyclic loadings using full field techniques” , *Mechanics of Materials*, 81: pp.62-71, 2015.
- [3-13] E. Toussaint, X. Balandraud, J. -B. Le Cam, M. Grediac, “Combining displacement, strain, temperature and heat source fields to investigate the thermomechanical response of an elastomeric specimen subjected to large deformations” , *Polymer Testing*, 31: pp.916-925, 2012.
- [3-14] J. R. Samaca. Martinez, X. Balandraud, E. Toussaint, J. -B. Le Cam, D. Berghezan, “Thermomechanical analysis of the crack tip zone in stretched and crystallisable natural rubber by using infrared thermography and digital image correlation” , *Polymer*, 55: pp.6345-6353, 2014.
- [3-15] W. Wang, R. K. Fruehmann, J. M. Dulieu-Barton, “Application of Digital Image Correlation to Address Complex Motions in Thermoelastic Stress Analysis” , *Strain*, 51: pp.405-418, 2015.
- [3-16] L. Bodelot, E. Charkaluk, L. Sabatier, P. Dufrenoy, “Experimental study of heterogeneities in strain and temperature fields at the microstructural level of polycrystalline metals through fully-coupled full-field measurements by digital image correlation and infrared thermography” , *Mechanics of Materials*, 43: pp.654-670, 2011.
- [3-17] R. Seghi, L. Bodelot, E. Charkaluk, P. Dufrenoy, “Numerical and experimental estimation of thermomechanical fields heterogeneity at the grain scale of 316 L stainless steel” , *Computational Materials Science*, 53: 464-473, 2012.
- [3-18] R. Seghi, J. -. F. Witz, L. Bodelot, E. Charkaluk, P. Dufrenoy “An improved lagrangian thermography procedure for the quantification of the temperature fields within polycrystals” , *Quantitative Infrared Thermography Journal*, 10: pp.74-95, 2013.
- [3-19] D. Murio, “The mollification method and the numerical solution of ill-posed problems” , John Wiley & Sons, 1993.
- [3-20] S. Kubo, K. Fukumoto, K. Ohji, “An Application of the Mollification Method to Estimation of Governing Equation of Field Problem from Noisy Observations” , *Inverse Problems in Engineering: Theory and Practice*, Amer. Soc. Mech. Engrs: pp.245-252, 1993.

- [3-21] Jon. Lesniak, Braian. Bartel, "An Elevated-Temperature TSA Furnace Design" , SEM: Experimental Techniques 20, 10-13, 1996.
- [3-22] Akai A. Akai, D. Shiozawa, T. Sakagami, "Fatigue limit estimation of titanium alloy Ti-6Al-4V with infrared thermography" , Proceedings volume10214, thermosense: thermal Infrared Applications XXXIX; 102141J, 2017

第4章 特異値分解法を用いた赤外線サーモグラフィ計測結果からの応力分布図作成手法の提案

4. 1. 緒言

過去に建造された大規模構造物の多くが設計寿命を超えて供用され、保守点検の負担増加が問題となりつつある。特に重量物である自動車が高速に移動し、大きな荷重が発生する高速道路の鋼製橋においては、鋼部材に発生した亀裂やその前兆となる異常応力集中部を放置すると、重大な損傷や事故を招く恐れがある。高速道路総延長の規模から考えて、その効率的な検出手法の開発は緊急の課題である。

鋼部材の亀裂や応力集中部などを遠隔から検出する方法として、赤外線サーモグラフィを用いる手法が注目されている[4-1]～[4-3]。ひずみゲージなどの接触式センサを対象物に多数設置する手間が必要ない、超音波法などの点計測と異なり面計測ができる点などで、赤外線サーモグラフィに法は他の手法に無い優れた特長を有している。特にロックイン赤外線サーモグラフィを用いて測定した熱弾性温度変動分布から部材に作用している主応力変動の分布図を作成する手法は、亀裂先端や異常応力集中部を検出しやすい。これまでに行われてきた赤外線サーモグラフィを用いた応力測定では負荷変動を示す参照信号が計測データをロックイン処理するために必要であった。疲労試験機などを用いた実験室内での計測では、ロードセルからの負荷信号を、実環境ではひずみゲージなど負荷に関する信号を計測していた。

そこで実環境でも簡便に計測ができるように、撮影された赤外線サーモグラフィの一部を参照信号とする自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィ法が開発された[4-4]。本手法では、赤外線サーモグラフィ上のある一点の温度変化を負荷信号の代わりに参照信号として、温度変動モデル式を、時系列データをもとに最小二乗法で解くことで、参照信号取得点に対する各画素での相対値を求め、参照点に対する相対応力分布図を得ていた。自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィ法は、赤外線サーモグラフィ以外のデータを用いる必要がないため、実環境での遠隔面計測法として有力な手法になりうる。しかしながら、参照信号に用いる基準位置の選び方次第で応力分布図の精度が左右される問題があり、特に応力が小さい位置で参照信号を取得すると正しい応力分布図を得られないため、橋梁等の構造物の力学的構造を理解している操作者を必要とする。

本章においては、この問題を解決するため、特定の画素位置の参照信号を用いることなく、収録された赤外線サーモグラフィ全体の情報からSVD (Singular Value Decomposition: 特異値分解法) を用いることで、負荷変動そのものと応力分布図を同時に精度よく安定的に復元・作成する方法を提案する。画像の時系列変動に関する情報を、SVD を用いることにより、変動の原因である2つ以上の物理情報に分解復元するという手法は、従来の可視画像におけるSfM (Structure from Motion) などでも使われてきてきた数理的手法である[1-14]。

また、実験室内の金属試料片の熱弾性温度変化を捉えた赤外線サーモグラフィに、今回提案する特異値分解法を用いた手法を適用し、従来の自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィ法と比較して精度と安定性に優れることを示す。

4. 2. 赤外線サーモグラフィ法による応力分布図作成

まず、赤外線サーモグラフィを用いた応力測定法である、熱弾性応力解析の原理と熱弾性温度変動の負荷に対する線形モデル化について述べる。次に、従来の自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィ法について説明した後に、本章で新たに提案する特異値分解法を用いた手法について述べる。

4. 2. 1 赤外線サーモグラフィ変動のモデル式化

一般に構造部材に荷重が負荷されると、部材には形状や位置により異なる応力の分布が形成され、作用応力に応じた熱弾性温度変動が発生する。この温度変動は熱弾性効果と呼ばれ、温度変動 ΔT と主応力の変動 $\Delta\sigma$ の関係は、(3-1)式で示される。このような熱弾性変化が起きている対象物を赤外線サーモグラフィカメラで撮影すると、対象物の熱弾性温度変動が面的に観測できる。観測されたサーモグラフィ画像の値は、気温と同化した試験片のベース温度や背景温度と放射率で決まる赤外線放射強度など負荷の変動に関係のない熱成分と、(3-1)式に示した負荷に比例して発生する応力による熱成分の合成であり、サーモグラフィ画像上の画素位置 $p = (x, y)$ の時刻 t でのサーモグラフィ画像の値 $\psi(p, t)$ は次式のように表わされる。

$$\psi(p, t) = a(p) + b(p)f(t) \quad p = 1 \sim P \quad t = 1 \sim F \quad (4-1)$$

ここで P は赤外線サーモグラフィの総画素数を、 F は時系列赤外線サーモグラフィ画像の全フレーム数をそれぞれ表す。 $a(p)$ は画素 p で観測される赤外線輝度値のバイアス成分、 $b(p)$ は負荷の時間変化 $f(t)$ に対する温度変動係数である。 $a(p)$ を画素値とした画像は、負荷が働いていない場合 ($f(t) = 0$) での赤外線輝度値の分布であり、主に環境温度または物体表面の放射率の分布を反映しているものと考えられる。一方 $b(p)$ は画素 p に写っている試料片上の位置における応力変動に対応し、試験片上に発生した応力振幅分布図であると考えられる。ノイズ成分が含まれる観測赤外線輝度値 $\psi(p, t)$ から目的の $b(p)$ を求めることが以下の主題となる。

4. 2. 2 負荷信号そのものを用いた赤外線サーモグラフィ法

自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィ法を考察するにあたり，(4-1)式の負荷変動信号 $f(t)$ を別途計測値として取得し，未知数である $a(p)$ および $b(p)$ を求める方法を考える．(4-1)式は各画素 p での $a(p)$ と $b(p)$ についての全フレーム数 F 個の方程式となる．左右項の誤差の時間二乗総和

$$\Delta(a(p), b(p)) = \sum_{t=1}^F (\psi(p, t) - a(p) - b(p)f(t))^2 \quad (4-2)$$

を最小にする $a(p)$ と $b(p)$ は，(4-2)式を $a(p)$ あるいは $b(p)$ で微分し，それぞれを 0 とおいた連立方程式を解くことで簡単に得られ，

$$b_L(p) = \frac{F \sum_{t=1}^F \psi(p, t) f(t) - \sum_{t=1}^F \psi(p, t) \sum_{t=1}^F f(t)}{F \sum_{t=1}^F f(t)^2 - (\sum_{t=1}^F f(t))^2} \quad (4-3)$$

$$a_L(p) = \frac{\sum_{t=1}^F \psi(p, t) - b(p) \sum_{t=1}^F f(t)}{F} \quad (4-4)$$

となる．ここで， $b_L(p)$ および $a_L(p)$ における添え字 L は負荷信号 $f(t)$ を用いた赤外線サーモグラフィ法により得られた $a(p)$ と $b(p)$ であることを示す．

このように，負荷信号 $f(t)$ そのものを用いた赤外線サーモグラフィ法では，赤外線サーモグラフィカメラで捉えた赤外線サーモグラフィ画像と，別途ひずみゲージなどで計測した負荷変動に比例した $f(t)$ を用いることで，応力分布図を作成することができる．以上のように，別途センサなど計測する場合，ランダムな負荷でも応力分布を求めることができるため，本手法は Random lock-in thermography method[4-5]と呼ばれている．

4. 2. 3 自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィ法とその考察

実環境で遠隔計測を行う場合， $f(t)$ を取得することは一般的には難しい．そこで自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィ法では， $f(t)$ の代用としてサーモグラフィ画像中で応力が大きい位置が撮像されている画素 s の赤外線輝度値 $\psi(s, t)$ を参照信号として用いる．つまり(4-3)，(4-4)式の $f(t)$ の代わりに， $\psi(s, t)$ を代入することで得られる

$$b_S(p) = \frac{F \sum_{t=1}^F \psi(p, t) \psi(s, t) - \sum_{t=1}^F \psi(p, t) \sum_{t=1}^F \psi(s, t)}{F \sum_{t=1}^F \psi(s, t)^2 - (\sum_{t=1}^F \psi(s, t))^2} \quad (4-5)$$

$$a_s(p) = \frac{\sum_{t=1}^F \psi(p,t) - b(p) \sum_{t=1}^F \psi(s,t)}{F} \quad (4-6)$$

が自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィ法により求められる $a(p)$ と $b(p)$ である．
 こうして自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィ法では，赤外線サーモグラフィカメラの映像
 だけで，ランダムな負荷でも応力分布図を作成することができるようになった．

一方この手法においては，参照信号の取得位置が応力分布図の精度に影響することが知られ
 ている．(4-1)式から， $\psi(s,t)$ は次のように表される．

$$\psi(s,t) = a(s) + b(s)f(t) \quad (4-7)$$

(4-5)式に(4-7)式を代入すると

$$b_s(p) = \frac{F \sum_{t=1}^F \psi(p,t)f(t) - \sum_{t=1}^F \psi(p,t) \sum_{t=1}^F f(t)}{b(s)(F \sum_{t=1}^F f(t)^2 - (\sum_{t=1}^F f(t))^2)} \quad (4-8)$$

となり，(4-8)式を(4-3)式と比較すると自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィ法で得られ
 る $b_s(p)$ の値は，負荷信号 $f(t)$ そのものを用いる赤外線サーモグラフィ法で得られる値
 $b_L(p)$ を基準位置の $b(s)$ で正規化したものであることが分かる．ただし，その様になるた
 めには(4-6)式が成り立つ，つまり画素 s の赤外線輝度値 $\psi(s,t)$ が実際にモデル式(4-1)に
 従っていて入力負荷信号 $f(t)$ の代用としての情報を正しく持っている必要がある．また(4-
 8)式で $b(s)$ は分母にあるから0に近い，すなわち参照信号を取得した位置 s での応力が小
 さく温度変動が小さいと計算が不安定になり，正しい $b_s(p)$ が得られないことが分かる．

さらに(4-7)式では存在した参照信号の直流成分 $a(s)$ が，これを代入した(4-8)式では無く
 なっていることから， $b(p)$ の算出には $f(t)$ の時間平均は関係ないことが予想される．

$\overline{f(t)}|_t$ を $f(t)$ の時間平均とし，入力負荷信号 $f(t)$ の時間方向の変動を

$$f^*(t) := f(t) - \overline{f(t)}|_t \quad (4-9)$$

と表す．同様に， $\psi(p,t)$ の時間方向の平均値からの変動を

$$\psi^*(p,t) := \psi(p,t) - \overline{\psi(p,t)}|_t \quad (4-10)$$

として表す． $\overline{\psi(p,t)}|_t$ は $\psi(p,t)$ の時間平均である．(4-9)式の $f^*(t)$ ，(4-10)式の
 $\psi^*(p,t)$ を(4-5)式に代入すると，各時間平均値 $\overline{f(t)}|_t$ ， $\overline{\psi(p,t)}|_t$ は消えて

$$b_S(p) = \frac{\sum_{t=1}^F \psi^*(p,t) f^*(t)}{b(s) \sum_{t=1}^F f^*(t)^2} \quad (4-11)$$

が得られ、自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィ法では応力分布図の各画素値 $b(p)$ は入力負荷信号 $f(t)$ の時間平均からの変動 $f^*(t)$ および赤外線サーモグラフィの各画素値 $\psi(p,t)$ の時間平均からの変動 $\psi^*(p,t)$ のみが関係していることがわかる。同様に(4-9)式の $f^*(t)$, (4-10)式の $\psi^*(p,t)$ を(4-3)式に代入すると、

$$b_L(p) = \frac{\sum_{t=1}^F \psi^*(p,t) f^*(t)}{\sum_{t=1}^F f^*(t)^2} \quad (4-12)$$

と分母に $b(s)$ がない(4-11)式と同様な式が得られ、自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィ法だけではなく負荷信号 $f(t)$ そのものを用いる赤外線サーモグラフィ法でも $f^*(t)$ および $\psi^*(p,t)$ のみが関係していることがわかる。

4. 2. 4 特異値分解赤外線サーモグラフィ法の提案

4. 2. 3節の自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィ法の考察において、入力負荷信号 $f(t)$ の代用として $b(s)$ が大きい画素 s , 言い換えると入力負荷に正しく比例して温度変動の大きな画素 s の参照信号 $\psi(s,t)$ を用いれば正しい応力分布図が得られることを説明した。さらにサーモグラフィ観測値 $\psi(p,t)$ および負荷信号 $f(t)$ はその時間平均からの変動値のみが、得られる $b(p)$ に関係していることが分かった。一方、現実の計測においては、温度変動の大きな $\psi(s,t)$ が得られる位置が分かっている保証はない。本論文では参照信号 $\psi(s,t)$ を導入せず、 $f^*(t)$ も未知数として扱い、全時刻、全画素のサーモグラフィ観測値 $\psi(p,t)$ の時間方向の変動値のみからSVD (Singular Value Decomposition : 特異値分解法) を用いてこの問題を解く手法を提案する。

あらためて $\psi^*(p,t)$ は(4-1)式と(4-10)式を使うと

$$\begin{aligned} \psi^*(p,t) &= \psi(p,t) - \overline{\psi(p,t)}|_t = a(p) + b(p)f(t) - (a(p) + b(p)\overline{f(t)}|_t) \\ &= b(p)(f(t) - \overline{f(t)}|_t) \\ &= b(p)f^*(t) \end{aligned} \quad (4-13)$$

と表すことができる。

観測される赤外線サーモグラフィの画素位置を列、時刻を行とし赤外線輝度値の変動値 $\psi^*(p, t)$ を要素とする $P \times F$ 行列 Ψ^* を以下のように定義する.

$$\Psi^* := \begin{bmatrix} \psi^*(1,1) & \psi^*(1,2) & \dots & \psi^*(1,F) \\ \psi^*(2,1) & \psi^*(2,2) & \dots & \psi^*(2,F) \\ \vdots & \ddots & & \vdots \\ \psi^*(P,1) & \psi^*(P,2) & \dots & \psi^*(P,F) \end{bmatrix} \quad (4-14)$$

これを観測行列と呼ぶことにする. Ψ^* は (4-13) 式の左辺と最右辺の関係を用いると,

$$\Psi^* = \begin{bmatrix} b(1) \\ b(2) \\ \vdots \\ b(P) \end{bmatrix} [f^*(1) \ f^*(2) \ \dots \ f^*(F)] = \mathbf{b} \mathbf{f}^{*T} \quad (4-15)$$

$$\mathbf{b} = \begin{bmatrix} b(1) \\ b(2) \\ \vdots \\ b(P) \end{bmatrix} \quad (4-16)$$

$$\mathbf{f}^* = \begin{bmatrix} f^*(1) \\ f^*(2) \\ \vdots \\ f^*(F) \end{bmatrix} \quad (4-17)$$

と表すことができる. (4-15) 式右辺は, P 行 1 列の行列と 1 行 F 列の行列の積であるから, 観測行列 Ψ^* の階数は 1 でなければならないことが分かる. 一般に $P \times F$ の行列 Ψ^* を SVD すると

$$\Psi^* = \mathbf{U} \mathbf{\Sigma} \mathbf{V}^T = [\mathbf{u}_1 \ \mathbf{u}_2 \ \dots \ \mathbf{u}_P] \begin{bmatrix} \sigma_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \sigma_F \\ & & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{v}_1^T \\ \mathbf{v}_2^T \\ \vdots \\ \mathbf{v}_F^T \end{bmatrix} \quad (4-18)$$

と分解される. ここで, \mathbf{U} は $P \times P$ の縦固有ベクトル行列で \mathbf{u}_p は P 次元単位ベクトル, \mathbf{V}^T は $F \times F$ の横固有ベクトル行列で \mathbf{v}_t は F 次元単位ベクトルである. $\mathbf{\Sigma}$ は $P \times F$ の固有値行列で, $\sigma_1 \geq \dots \geq \sigma_F \geq 0$ である.

Ψ^* の階数は1であるから、SVD で得られる固有値は σ_1 以外は0のはずである。 Ψ^* にノイズが多少混入している場合でも他の固有値は σ_1 に対し十分小さい値となるはずである。そこで(4-18)式で σ_2 以下を0とすると、

$$\Psi^* \cong \sigma_1 \mathbf{u}_1 \mathbf{v}_1^T \quad (4-19)$$

が得られる。(4-19)式と(4-15)式の右辺を比較すると SVD では \mathbf{U} , \mathbf{V} 行列の絶対値は定まらず、その要素の比として得られるためスケールを除いて、 \mathbf{u}_1 ベクトルは \mathbf{b} ベクトルに、 \mathbf{v}_1 ベクトルは \mathbf{f}^* ベクトルに対応することがわかる。スケールに関しては任意であるから \mathbf{b} ベクトルの長さを1として、

$$\begin{aligned} \mathbf{b} &= \mathbf{u}_1 \\ \mathbf{f}^* &= \alpha \mathbf{v}_1 \end{aligned} \quad (4-20)$$

と求めることにする。よって自己相関ロックイン法と同様な \mathbf{b} を求めたければ基準位置の \mathbf{b} の要素で、全ての要素を割ればよい。(4-6)式から \mathbf{b} は各画素での応力に比例した係数を表すベクトル、すなわち応力分布図をベクトルとして表したものであり、(4-17)式から \mathbf{f}^* は負荷の平均値からの時間変動に比例した値を表すベクトル、すなわち負荷信号関数を表していることがわかる。このSVDを用いた提案手法で得られる応力分布図の画素位置 p における画素値を負荷信号 $f(t)$ そのものを用いる赤外線サーモグラフィ法の $b_L(p)$ および自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィ法の $b_S(p)$ と区別するため $b_V(p)$ と表すこととする。 $b_V(p)$ は、(4-20)式の \mathbf{u}_1 ベクトルの p 行目の要素を $u_1(p)$ として

$$b_V(p) = u_1(p) \quad (4-21)$$

として得られる。負荷信号 $f(t)$ そのものを用いる赤外線サーモグラフィ法では入力値として使用していた $f(t)$ の平均値からの変動も本手法では同時に復元され、これを $f_V^*(t)$ とすると(4-20)式の \mathbf{v}_1 ベクトルの t 行目の要素を $v_1(t)$ として

$$f_V^*(t) = v_1(t) \quad (4-22)$$

として得られる。こうして、観測行列 Ψ^* はSVDを用いて応力分布図を表す $b_V(p)$ と、加えられた負荷の平均値からの変動に比例した値を表す $f_V^*(t)$ にそれぞれ分離・復元できた。以上の手法を特異値分解赤外線サーモグラフィ法と呼ぶこととする。

特異値分解赤外線サーモグラフィ法は、負荷信号 $f(t)$ そのものを用いる赤外線サーモグラフィ法および自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィ法と異なり、全時刻のサーモグラフィ

全画素値の情報を用いて応力分布図を求めるだけでなく更に負荷信号自体も分離・復元している。

実は、この提案手法はもともとのモデル式である(4-1)式に戻ると何ら不思議ではない。赤外線サーモグラフィ一枚の画素数は P 、赤外線サーモグラフィのフレーム数は F であったから、 $P \times F$ 個の(4-1)式が得られる。一方、未知数は $\{a(p)\}_{p=1 \sim P}$ $\{b(p)\}_{p=1 \sim P}$ $\{f(t)\}_{t=1 \sim F}$ の $2P + F$ 個であるから、 $F > 2P/(P - 1)$ であれば、本来的にこの連立方程式は解き得たはずであり、提案手法はSVDを使って安定的にそれを実行したに過ぎない。

4. 2. 5 負荷信号平均値および $a(p)$ の復元に関する考察

(4-22)式で得られた $f_V^*(t)$ は負荷信号平均値からの変動を表しており、負荷信号 $f(t)$ そのものを求めるためにはその時間平均値 $\overline{f(t)}|_t$ を求める必要がある。(4-1)式から画素 l の赤外線赤外線輝度値の時間平均は

$$\overline{\psi(l, t)}|_t = a(l) + b(l)\overline{f(t)}|_t \quad (4-23)$$

と表せる。 $\overline{f(t)}|_t$ は P 個の画素に対する(4-23)式すべてに共通であるから、右辺と左辺の差のすべての画素に対する二乗総和をとる。

$$\Delta(\overline{f(t)}|_t) = \sum_{l=1}^P (\overline{\psi(l, t)}|_t - a(l) - b(l)\overline{f(t)}|_t)^2 \quad (4-24)$$

これが最小になるような $\overline{f(t)}|_t$ を求める。(4-24)式を $\overline{f(t)}|_t$ で微分し、これを0と置いて、 $\overline{f(t)}|_t$ を求めた。ここで $b(l)$ の全画素での総和は1としたから、 $\overline{f(t)}|_t$ は次のように求まる。

$$\begin{aligned} \overline{f(t)}|_t &= \frac{\sum_{l=1}^P b(l)\overline{\psi(l, t)}|_t - \sum_{l=1}^P b(l)a(l)}{\sum_{l=1}^P b(l)^2} \\ &= \sum_{l=1}^P b(l)\overline{\psi(l, t)}|_t - \sum_{l=1}^P b(l)a(l) \end{aligned} \quad (4-25)$$

これを(4-23)式に代入すると、以下の式が得られる。

$$a(p) + b(p)(\sum_{l=1}^P b(l)\overline{\psi(l, t)}|_t - \sum_{l=1}^P b(l)a(l)) = \overline{\psi(p, t)}|_t \quad (4-26)$$

これを変形すると,

$$a(p) + b(p) \sum_{l=1}^P b(l) \overline{\psi(l, t)}|_t = \overline{\psi(p, t)}|_t + b(p) \sum_{l=1}^P b(l) a(l) \quad (4-27)$$

となり, (4-27)式の左辺と右辺を比較すると

$$a(p) = \overline{\psi(p, t)}|_t \quad (4-28)$$

であることがわかる. これを(4-25)式に代入すると,

$$\overline{f(t)}|_t = 0 \quad (4-29)$$

となる. つまり, 負荷信号平均値 $\overline{f(t)}|_t$ は0で $a(p)$ はサーモグラフィの時間平均画像となる答えが得られる.

一方, 実際には本当の負荷信号平均値は0以外の場合も当然あり得るはずであり, これを f_0 とすると上述の方法に従えば, その場合でもやはり

$$\overline{f(t)}|_t \rightarrow 0 \quad (4-30)$$

$$a(p) \rightarrow \overline{\psi(p, t)}|_t + b(p) f_0 \quad (4-31)$$

となって「平均値0の解釈」を与えることがわかる. つまり, f_0 による画像値の増加分は $a(p)$ の増加として解釈され, f_0 の値そのものは求まらない.

負荷信号の平均値を求められないということは, 実は数理的には, $P + 1$ 個の未知数に対して, (4-23)式は P 個の方程式しかないことから明らかである. さらに, その物理的意味合いはもとのモデルである(4-1)式からもわかる. (4-1)式の意味するところは, 画素ごとに異なる係数 $b(p)$ によって変調されてはいるが, 共通の $f(t)$ の変化に起因しておこる多くの画像値の変化を使ってその係数の値を求めようとするモデルである. したがって, 画像値の時系列変動成分にしか $f(t)$ の情報は現れず, $f(t)$ の直流分すなわち平均値 f_0 を復元することはできないのである.

現実的には何らかの方法によって負荷のかかっている時刻 t_0 を知る事ができれば,

$$a(p) = \psi(p, f(t_0)) \quad (4-32)$$

として $a(p)$ の値を求められ, そこから $f_0 = \overline{f(t)}|_t$ も求められることは指摘しておく.

4. 3. 実験

実験室内で金属試料片に繰り返し負荷を加え、これを撮影した赤外線サーモグラフィから、特異値分解赤外線サーモグラフィ法を用いて応力分布図を作成した。また従来手法による応力分布図作成も行い、提案手法との比較検討を行った。

4. 3. 1 引張試験機により引張・圧縮された金属試料片の赤外線サーモグラフィ撮影

撮影には、入力負荷信号と赤外サーモグラフィとの対応がわかるように4. 2. 2. 節で説明した疲労試験機、赤外サーモグラフィカメラおよび可視ビデオカメラが同期して計測するシステムを用いた。

本実験では金属試料片は長さ 140mm、幅 30mm、厚さ 3mm のアルミ材 (A5052) を用い、応力分布が顕著に現れるように、中央に円孔 (直径 $D=11\text{mm}$) が空いている。試料片の外観および寸法を Fig. 4-1 に示す。この試料片に疲労試験機で繰り返し負荷を与え、赤外線サーモグラフィカメラで Fig. 4-1 中央赤矩形で示した約 $30\times 30\text{mm}$ の領域を撮影した。

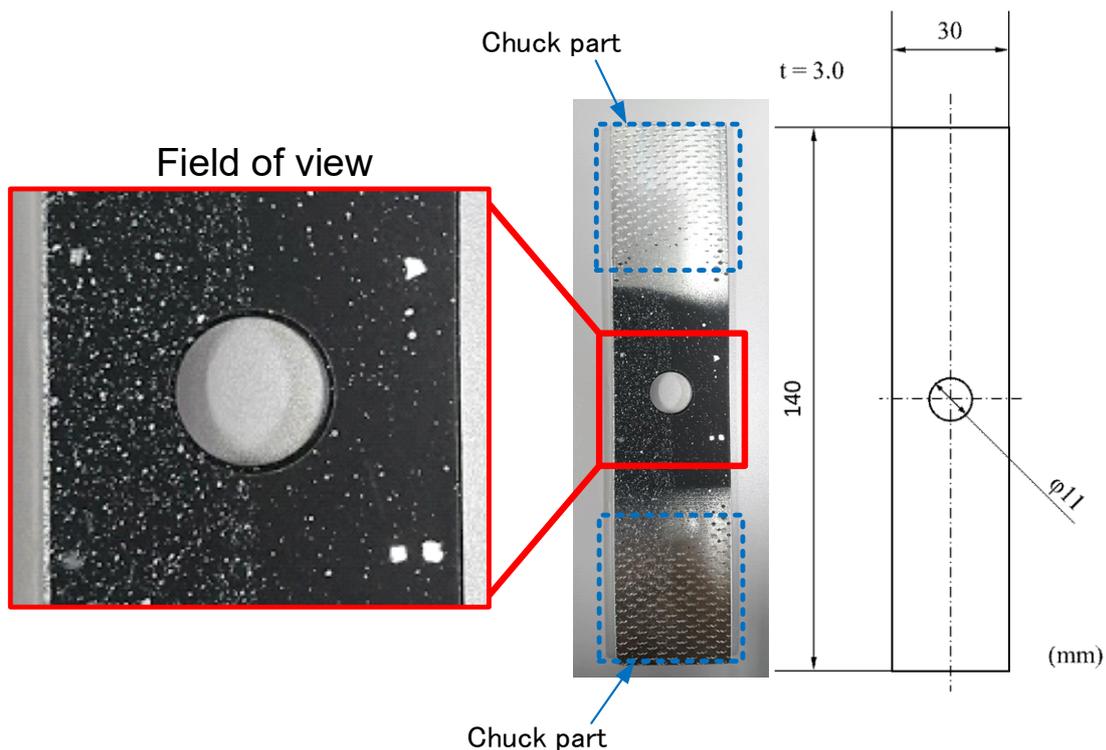


Fig. 4-1 Specimen and field of view

実験では Fig. 4-2 に示すような、応力振幅 50MPa、応力比 $R=-1$ 、負荷周期 $f=5\text{Hz}$ の正弦波状変動負荷を試料片に与えた。赤外線サーモグラフィのフレームレートは 100fps であるため、加えられる負荷の 1 周期で 20 フレームの赤外線画像が得られる。Fig. 4-2 の横軸は赤外線サーモ

グラフィのフレーム番号，縦軸は負荷試験機によって試験片に加えられている力を示している． Table. 4-1 はこれら本実験の各種条件をまとめて示す．

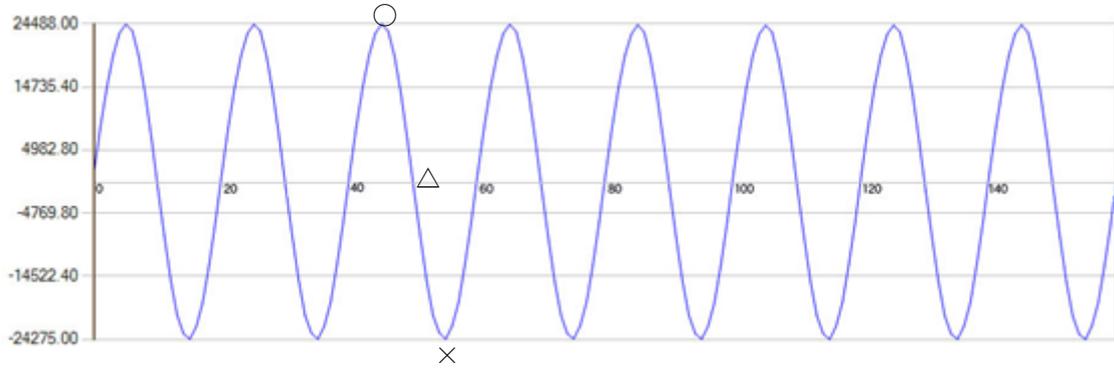


Fig.4-2 Load signal $f(t)$

Table.4-1 Experimental conditions

Specifications of specimen (A5052)	Density ρ	2,680 Kg/m ³
	Specific heat c	963 J/kg·K
	Linear expansion coefficient α	23.6 K ⁻¹ ×10 ⁻⁶
	Young's module E	70.6 GPa
Condition of cyclic load test	Maximum load	50Mpa
	Load frequency	5Hz
Specifications of employed infrared thermography camera	Sensor type	TnSb
	Noise equivalent temperature difference	< 0.02°C
	Pixel resolution	640x512
	Frame rate	100fps

Fig. 4-3 に撮像された赤外線画像の例を示す． Fig. 4-3(a), (b), (c)はそれぞれ Fig.6-2 に示した負荷信号グラフ上の○，△，×の時点で撮影された赤外線画像である．

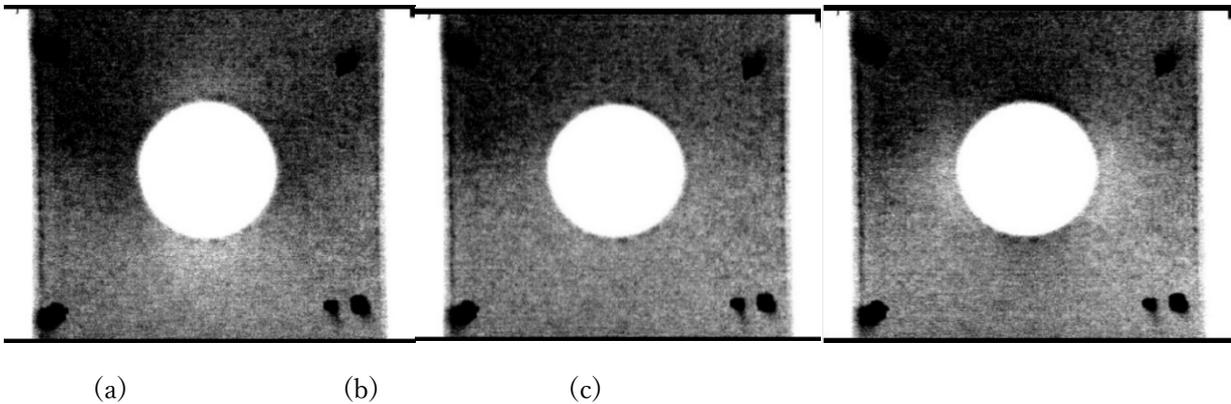


Fig.4-3 Infrared thermography images of specimen in different frames

次節では,以上のようにして取得された赤外線画像を入力とし, 負荷信号 $f(t)$ を用いる赤外線サーモグラフィ法, 自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィ法, および提案手法である特異値分解赤外線サーモグラフィ法をそれぞれ適用した. 算出された応力分布図を比較・検討する.

4. 3. 2 応力分布図作成結果

前項で取得された赤外線画像から提案手法の(4-14)式~(4-22)式を用いて復元された負荷信号の平均値からの変動 $f_V^*(t)$ のグラフを Fig. 4-4 に示す.

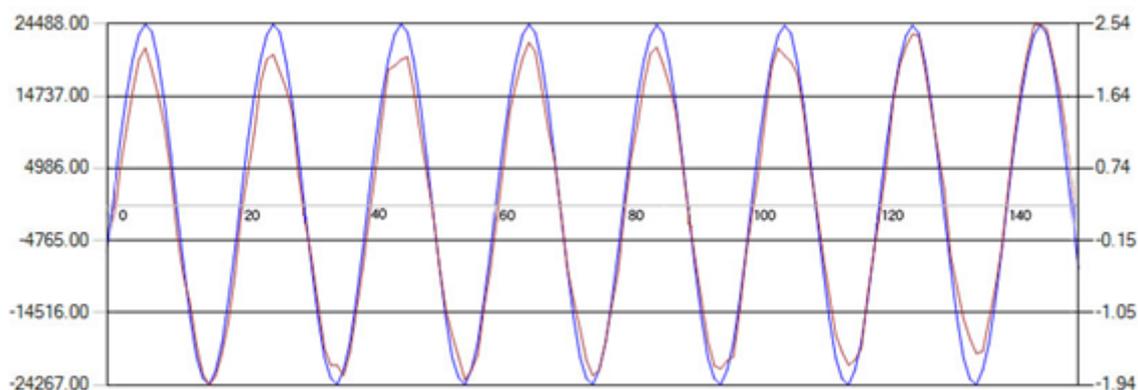


Fig. 4-4 Restored load signal $f_V^*(t)$

茶色線が復元された $f_V^*(t)$, 青線は引張試験機に入力された負荷信号である. 赤外線サーモグラフィの情報だけで生成された観測行列 Ψ^* をSVDすることで波形, 周期ともによく復元できている. Fig. 4-5にSVDで算出された固有値の分布グラフを示す. 第二固有値以降は, 第一固有値よりも十分小さくなっていることが分かる.

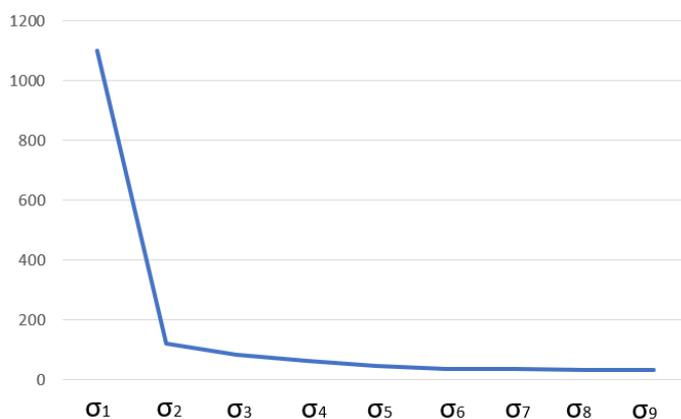


Fig. 4-5 Eigenvalue distribution chart

更に、提案手法の(6-22)式で得られる $b_V(p)$ を、応力分布図として Fig. 4-6 に示す。
 Fig. 4-6 の左図は応力の強さを示すため $b_V(p)$ の絶対値を明るさで表示したもの、右図は左
 図を正規化して応力の強さに応じた連続カラーとして表示したものである。

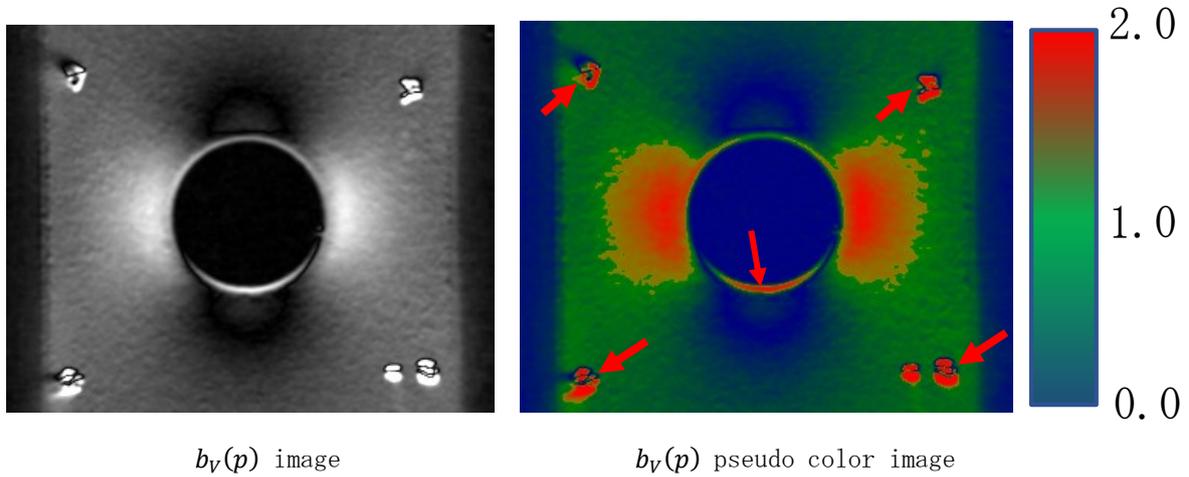


Fig. 4-6 Result of proposed method

この結果を評価するための基準として同一のデータに対し、Fig. 6-2 に示した真の負荷信号
 $f(t)$ を用いる赤外線サーモグラフィ法で $b_L(p)$ を計算した。その結果画像を Fig. 4-7 に示す。

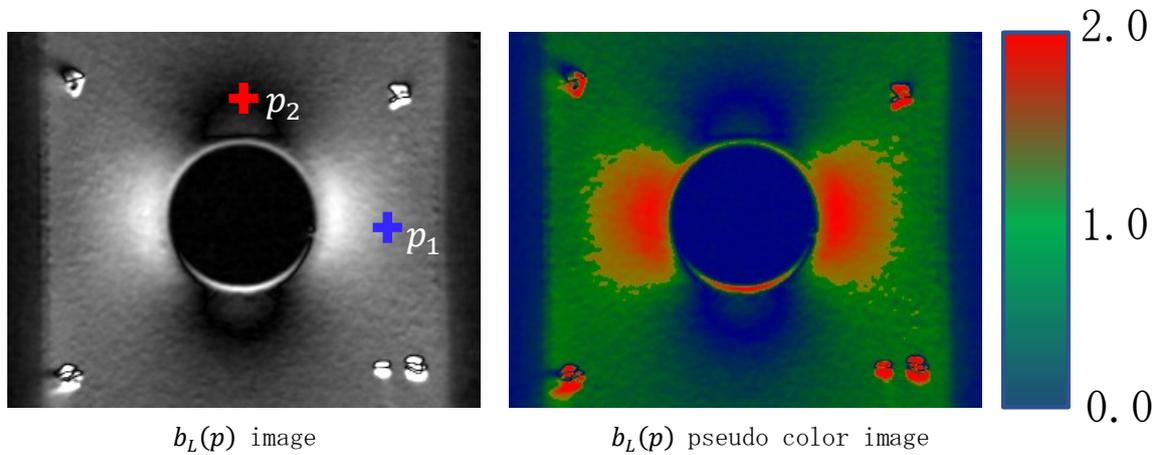


Fig. 4-7 Result of lock-in thermography method

Fig. 4-7 の左図は応力の強さを示すため $b_L(p)$ の絶対値を明るさで表示したものであり、図
 上の青十字の位置 p_1 の値 $b_L(p_1)$ が 8bit 画像における 128 になるように倍率を調整してい
 る。右図は Fig. 4-6 と同様に左図を連続カラーで表現したものである。

評価基準とした負荷信号を用いる赤外線サーモグラフィ法の結果 Fig. 4-7 と提案手法の結果
 Fig. 6-6 を比較すると応力分布図としては同等の結果が得られており、赤外線サーモグラフィ
 の情報だけの観測行列 Ψ^* を SVD することで参照信号を使わなくても応力分布図が作成できる

ことがわかる。

比較のため従来の自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィ法の(4-7)式で $b_S(p)$ を計算した。参照信号は Fig. 4-7 の青十字位置 p_1 から取得した $\psi(p_1, t)$ を用いており、これを Fig. 4-8 に示す。Fig. 4-8 において青線は入力負荷信号 $f(t)$ を、緑線は参照信号 $\psi(p_1, t)$ を示す。用いた参照信号 $\psi(p_1, t)$ は、Fig. 4-2 の入力負荷信号 $f(t)$ に対し周期と波形が似ており、(4-8)式に関する説明で述べた参照信号としての条件をある程度満たしているものと考えられる。この参照信号を用いて従来の自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィ法により作成された $b_S(p)$ を画像として Fig. 4-9 に示す。

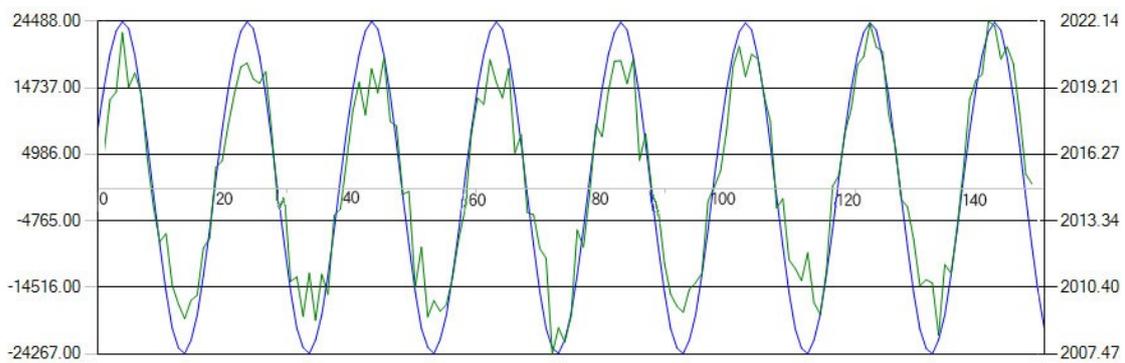


Fig. 4-8 Reference signal $\psi(p_1, t)$

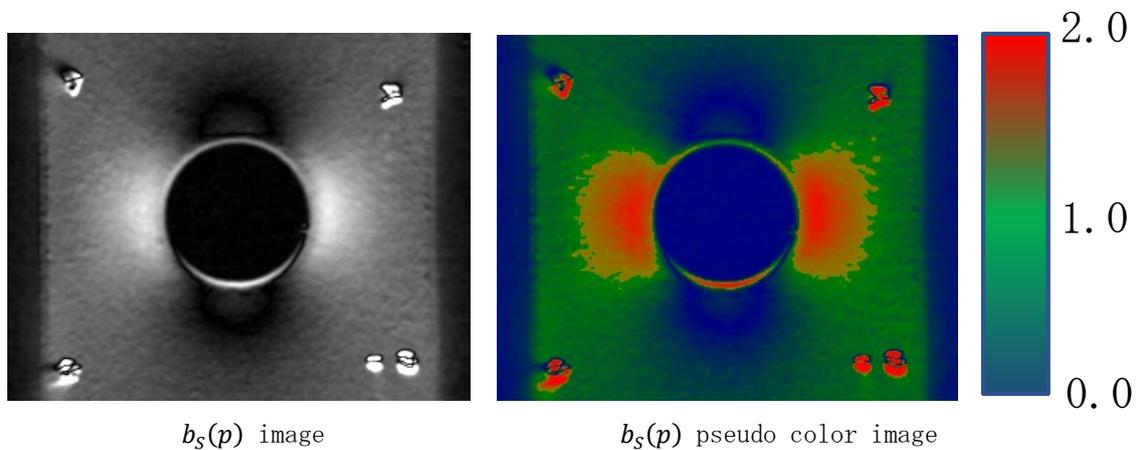


Fig. 4-9 Result of self-reference lock-in Thermography (using $\psi(p_1, t)$ as reference)

Fig. 4-9 と負荷信号を用いる赤外線サーモグラフィ法の結果 Fig. 4-7 を比較すると、両者によって同等の結果が得られており、正しい応力分布が得られていることが確認できた。

4. 3. 3 位置補正を加えたサーモグラフィの応力分布図作成結果

Fig. 4-6 の結果を詳細に観察すると、赤矢印で示した部分に値の大きな $b_V(p)$ が確認できる。

同様の現象は、Fig. 4-7およびFig. 4-9でも起きている。これは、応力の強い領域を捉えているのではなく第3章でも述べたエッジ効果によるものである。一般に引張試験機が負荷をかけることで、試料片には微小ではあるが変形および剛体移動が生じる。よって同一の画素位置 p は試料片上の完全に同じ位置を観測していない。一般に応力分布はほとんどの場所で連続関数であり近傍の位置は近い応力値をもっているため、このことはそれほど大きな問題ではない。しかし、試料片や取付金具の輪郭付近では同一画素が試料片の内外を行き来して観測している可能性があるため、輪郭付近の画素では見かけ上大きな温度変動が観測される。この伸長・圧縮・移動による見かけ上の温度変動は負荷変動と相関があるために、大きな $b(p)$ の値として解釈されているのである。そこで、この現象を解消するために、3. 2. 2. 節で説明した可視画像を援用した位置補正処理を用いた。これにより、試料片の動きや変形が補正され、同一画素は実際の試料片上の同一位置の温度変動を記録できるようになる。

処理の都合上、画像の上下端と試料片を引張試験機に固定する金具部分に対しては、位置補正処理が行われなため、これらの領域は観測行列から排除した。位置補正処理を行った赤外線サーモグラフィから特異値分解赤外線サーモグラフィ法によって復元された $f_V^*(t)$ のグラフおよび $b_V(p)$ を画像としたものをFig. 4-10 およびFig. 4-11にそれぞれ示す。

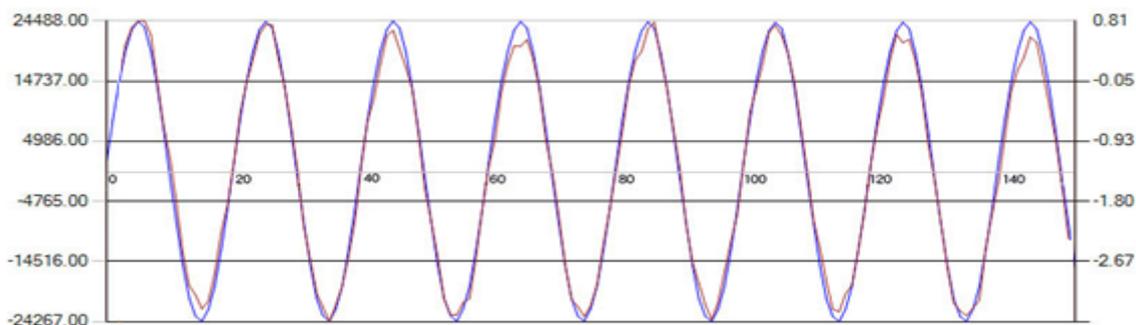
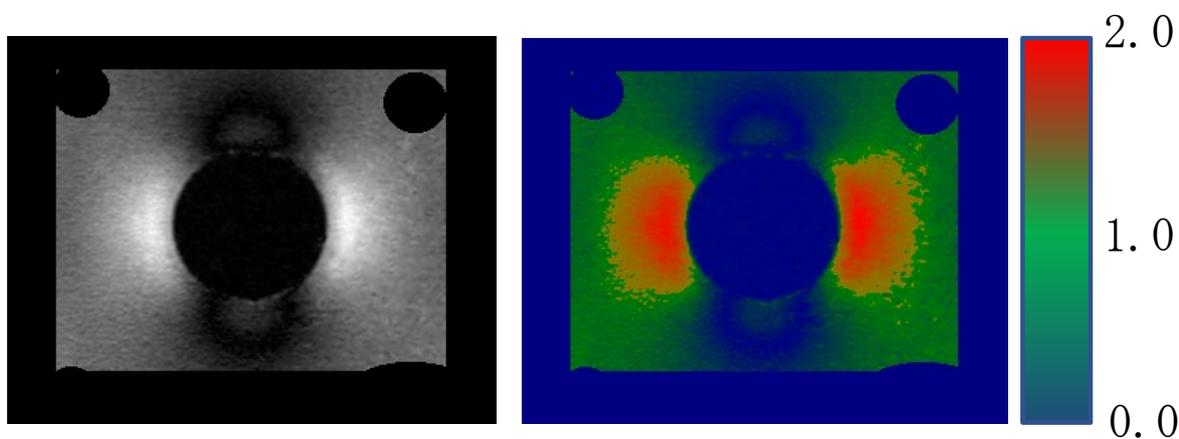


Fig. 4-10 Restored load signal $f_V^*(t)$ (motion compensation)



$b_V(p)$ image

$b_V(p)$ pseudo color image

Fig. 4-11 Result of proposed method (motion compensation)

Fig. 4-10 では, Fig. 4-4 と同じく, 青線が入力負荷信号, 茶色線が SVD により復元された $f_V^*(t)$ を示している. Fig. 4-10 より, 位置補正処理を適用した場合の復元負荷信号は, Fig. 4-4 および Fig. 4-8 のいずれよりも入力負荷信号をより再現できていることが分かる. Fig. 4-11 は観測行列から排除された領域以外は負荷信号を用いる赤外線サーモグラフィ法の結果である Fig. 4-7 と同等であり, 輪郭部分にエッジ効果が現れていないことが確認できる.

以上から, 第 3 章で説明した同期計測による位置・変形補正手法を用いることで提案手法である特異値分解赤外線サーモグラフィ法においてもよい結果が得られることが確認できた.

4. 3. 4 各手法の結果比較

前節においては, 本研究で提案した特異値分解赤外線サーモグラフィ法, 負荷信号を用いる赤外線サーモグラフィ法および自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィ法による応力分布図の作成結果を示し, 相互の比較を行った. Fig. 4-7 に示した負荷信号を用いる赤外線サーモグラフィ法による応力分布図を基準とし, Fig. 4-6 に示した特異値分解赤外線サーモグラフィ法と Fig. 6-9 に示した自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィ法による応力分布図を目視で観察・比較しても, その優劣を客観的に判断することは困難である. そこで負荷信号を用いる赤外線サーモグラフィ法の $b_L(p)$ の値に対する自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィ法での $b_S(p)$ および特異値分解赤外線サーモグラフィ法での $b_V(p)$ の関係を調べた. 横軸に $b_L(p)$ を, 縦軸に $b_S(p)$ および $b_V(p)$ をとった散布図を, Fig. 4-12 (a) および (b) にそれぞれ示す. 同図では, 比較する 2 つの応力分布図の同一位置の画素値を, 散布図上にプロットし, 散布図上の同一位置にプロットされた頻度を輝度に変換している. 比較する 2 つの応力分布図が近いほど, 原点を通る傾き 1 の直線状にプロットされ, 2 つの応力分布図間に微小な差がある場合はこの直線から外れて, 幅を持った分布となり, $b_L(p)$ 値に対する誤差が観察できる.

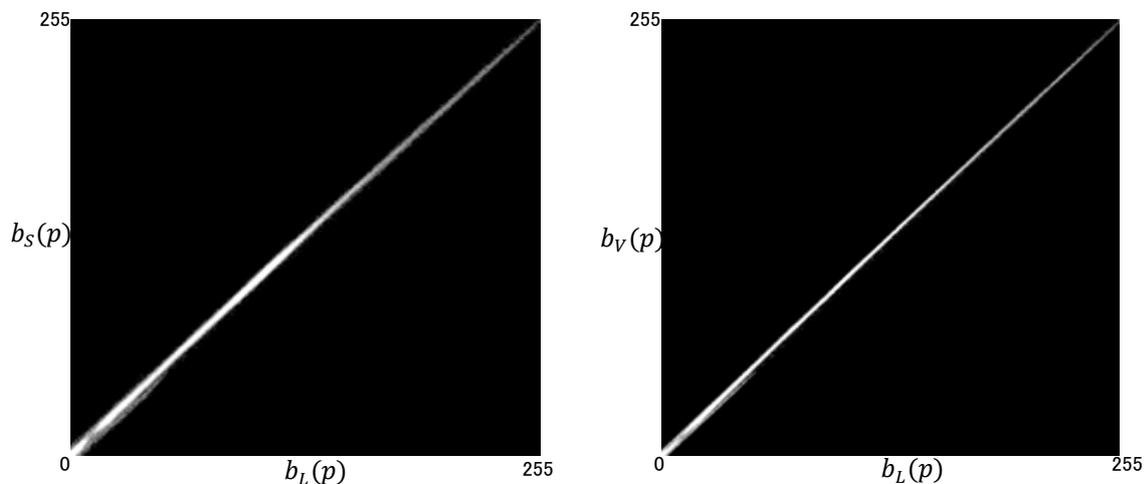


Fig. 4-12 Scatter plot of $b_L(p)$ and $b_S(p)$, $b_V(p)$

Fig. 4-12 左図は、負荷信号を用いる赤外線サーモグラフィ法の $b_L(p)$ と自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィ法の $b_S(p)$ の散布図である。一方右図は負荷信号を用いる赤外線サーモグラフィ法の $b_L(p)$ と特異値分解赤外線サーモグラフィ法の $b_V(p)$ の散布図である。左図に比べ右図では傾き 45° の直線が細くなっていることが確認でき、本研究で提案した特異値分解赤外線サーモグラフィ法の方が、負荷信号を用いる赤外線サーモグラフィ法の結果に近いことが確認できる。また、負荷信号を用いる赤外線サーモグラフィ法の $b_L(p)$ と自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィ法の $b_S(p)$ の各画素値の差の二乗和の平均 d を以下の式で求めた。

$$d = \frac{\sqrt{\sum_{p=1}^P (b_L(p) - b_S(p))^2}}{P} \quad (4-33)$$

負荷信号を用いる赤外線サーモグラフィ法の $b_L(p)$ と特異値分解赤外線サーモグラフィ法の $b_V(p)$ に関しても同様の計算を行った。自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィ法では差の二乗和の平均値 d は 0.018、特異値分解赤外線サーモグラフィ法では d は 0.011 となり、この数値でも提案手法のほうが負荷信号を用いる赤外線サーモグラフィ法の結果に近いことを示している。

自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィ法および特異値分解赤外線サーモグラフィ法は、応力分布図作成に参照信号および復元負荷信号をそれぞれ用いている。参照信号あるいは復元負荷信号が、入力負荷信号にどれだけ類似しているかも各手法の応力測定精度の評価基準とすることができる。2つの時系列一次元信号 $f_1(t)$ と $f_2(t)$ は(6-34)式の正規化相互相関値を計算することで、類似度を評価することができる。

$$ZNCC = \frac{\sum_{t=1}^F (f_1(t) - \overline{f_1(t)|_t})(f_2(t) - \overline{f_2(t)|_t})}{\sqrt{\sum_{t=1}^F (f_1(t) - \overline{f_1(t)|_t})^2 \sum_{t=1}^F (f_2(t) - \overline{f_2(t)|_t})^2}}$$

$$\overline{f_n(t)|_t} = \frac{\sum_{t=1}^F f_n(t)}{F} \quad (4-34)$$

Fig. 4-8 で示した自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィ法の参照信号 $f(p_1, t)$ と Fig. 4-2 で示した疲労試験機への入力負荷信号 $f(t)$ との間の正規化相互相関値は 0.966 であった。一方、Fig. 4-4 および Fig. 4-10 に示した、位置補正処理無しおよび位置補正処理有りのデータに対する特異値分解赤外線サーモグラフィ法で復元した負荷信号 $f_V^*(t)$ と $f(t)$ との正規化相互相関値はそれぞれ 0.993 および 0.997 であり、自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィ法の場合よりも高い値となっていた。

次に、自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィ法での参照信号取得位置の影響を見るため、応力が小さいと思われる Fig. 4-7 の左図上赤十字の位置 p_2 で取得した参照信号 $\psi(p_2, t)$ を用いて自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィ法により応力分布図を作成した。参照信号 $\psi(p_2, t)$ を Fig. 4-13 に、この参照信号により計算された $b_s(p)$ 分布を Fig. 4-14 にそれぞれ示す。Fig. 4-13 の参照信号 $\psi(p_2, t)$ は、Fig. 4-2 の入力負荷信号と大きく異なっており、(4-7)式に関する説明で述べた参照信号としての条件から外れている。

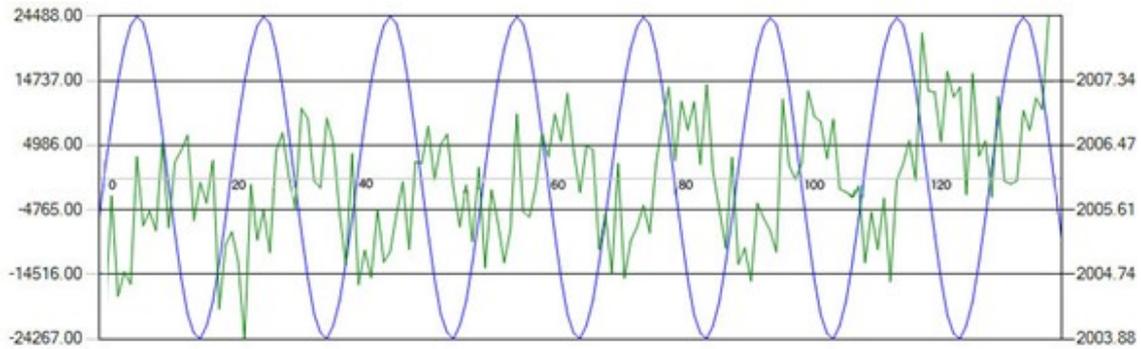


Fig. 4-13 Reference $\psi(p_2, t)$

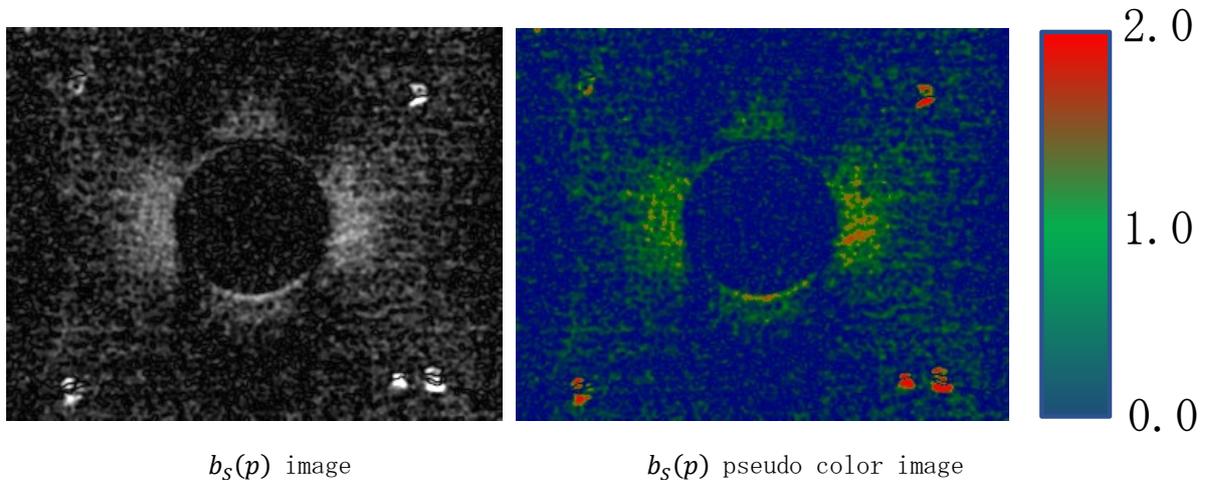


Fig. 4-14 Result of self-reference lock-in Thermography (using $\psi(p_2, t)$ as reference)

Fig. 4-14 は、同じ自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィ法を用いて同じ赤外線サーモグラフィを処理したにもかかわらず、Fig. 4-9 とは大きく様相が異なっていることが分かる。このことから、従来の自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィ法は入力負荷信号に比例しない参照信号を使用した場合、正しい応力分布図を作成できないことが確認できる。一方、提案手法である特異値分解赤外線サーモグラフィ法においては参照信号を用いないため、このような現象は発生しない。

ここまでの評価数値をまとめた結果を Table. 4-2 に示す。

Table.4-2 d and ZNCC between $f(t)$ and $f_V^*(t)$, $f(s,t)$

Pair of comparison	d	ZNCC
$f(t) : f_V^*(t)$ (motion compensation)	0.010	0.997
$f(t) : f_V^*(t)$	0.011	0.993
$f(t) : f(p_1, t)$	0.018	0.966
$f(t) : f(p_2, t)$	0.214	0.279

Table. 4-2 を見ると、位置補正処理を行ったデータに対する特異値分解赤外線サーモグラフィ法が最も精度が良いことが分かる。位置補正処理を行わなかった場合では提案手法の結果の方が、良い参照信号 $\psi(p_1, t)$ を用いた従来の自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィ法の結果より正規化相互相関値が高い。これは良い参照信号 $\psi(p_1, t)$ においてもノイズが混入しているからであるが、一方、提案手法では観測行列すべての情報を用いて $f_V^*(t)$ および $b_V(p)$ を復元しており、ノイズ成分など(4-1)式の関係に従わない情報は、(4-18)式においてSVDの結果のうち最も大きな固有値 σ^1 に対応する u_1 ベクトル、 v_1 ベクトル以外を用いないことで排除されている。このことがさらに安定して応力分布図を作成することに寄与している。

以上の比較評価から、提案手法である特異値分解赤外線サーモグラフィ法のほうがより正確な応力分布図を復元できていることが分かる。また従来の自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィ法で用いる参照信号取得位置選定のための力学的構造情報を必要とせず、客観的に正しい応力分布図を得やすい手法であると言える。

4. 4. 結 言

本研究では、サーモグラフィ上の特定位置の温度変動を参照信号として用いる従来の自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィ法に対し、参照信号を必要としない新たな赤外線サーモグラフィによって応力分布を求める手法を提案した。本手法では画像内、時系列すべての赤外線赤外線輝度値から、SVD (Singular Value Decomposition : 特異値分解法) を用いて応力分布図を生成する。

実験室内繰返し負荷試験のデータに対して、負荷信号を用いる赤外線サーモグラフィ法、自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィ法および提案手法である特異値分解赤外線サーモグラフィ法でそれぞれ応力分布図を作成し、比較検討を行った。その結果、提案手法は従来の自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィ法よりも評価の基準とする負荷信号を用いる赤外線サーモグラフィ法により近い結果を生成でき、また参照信号の取得位置の違いによる影響も受けない長所を持つことが確認できた。

今回の研究では実験室内での周期のある負荷下での現象を扱ったが、自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィ法も今回の提案手法もランダムな負荷にも対応できるはずであり、今後は実際に供用されている橋梁部材の赤外線サーモグラフィに対して提案手法を使って応力分布図

の作成を行い、その実効性を確認していきたい。実際の橋梁では、車両走行の負荷により発生する熱変動は塗膜などにより赤外線サーモグラフィに現れにくく、また4.3.3節で見たような部材の変位の影響も多様な様相であることが予想される。これらの状況でも提案手法を用いて正しく応力分布図が得られるようにする必要がある。

赤外線サーモグラフィ法は、機械構造物、鉄鋼橋等の建築・土木構造物に至るまで、あらゆる鋼構造物の疲労亀裂の遠隔非接触モニタリングが可能である。今回の提案手法で従来の自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィ法で必要であった参照信号の選択条件から解放されることにより、さらなる普及が見込まれる。

4.5. 付録

応力分布図となる \mathbf{b} ベクトルおよび負荷の平均からの変動値 \mathbf{f}^* ベクトルを求めるには、(4-13)式の観測行列 Ψ^* ($P \times T$ 行列)を構成し SVD すればよいが、一般的な VGA 解像度 (640x512 画素) の赤外線サーモグラフィでは観測行列が極めて大きくなり SVD の計算コストでは実用的な処理時間で応力分布図を得ることが難しい。ここでは、観測行列 Ψ^* の行数を削減するため、Fig. 4-15 に示すように、赤外線サーモグラフィの全画素を用いず、疎なサンプリング位置を設定して計算コストを低減する。

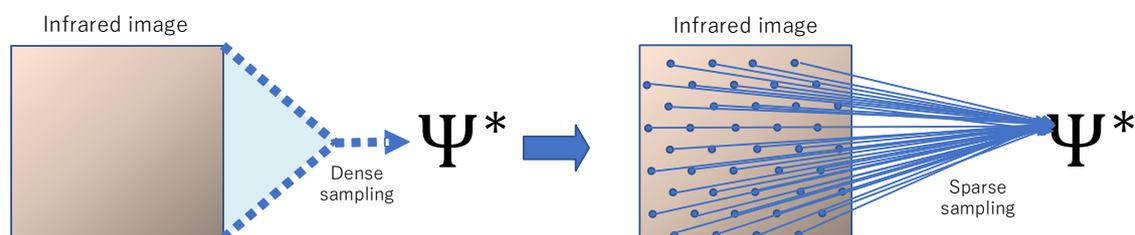


Fig. 4-15 Subsampling for observation matrix

一般的に SVD の計算時間は行、列数の二乗に比例する。全画素数 P に対しその $\alpha\%$ の疎なサンプリングを行うと Ψ^* は $\alpha/100 \times P \times T$ の大きさになり、処理時間は $\alpha^2/10000$ 倍に減少する。観測点が赤外線サーモグラフィ上に満遍なく十分な数分布しておれば確からしい \mathbf{f}^* ベクトルが(4-17)式の \mathbf{v}_1 ベクトルとして得られる。しかし、こうして得られた \mathbf{u}_1 ベクトルは疎にサンプリングされた位置の \mathbf{b} ベクトルの値だけで画像全体の値を復元できていない。画像全体について $b_V(\mathbf{p})$ を求めるには復元された \mathbf{f}^* ベクトルを用いて以下のように復元する。

(4-12)式で $\{\psi^*(\mathbf{p}, t)\}$ と $\{f^*(t)\}$ は既知、 $\{b(\mathbf{p})\}$ は未知と考えると左辺と最右辺の誤差 Δ の二乗時間総和は、

$$\Delta(b(\mathbf{p})) = \sum_{t=1}^T (\psi^*(\mathbf{p}, t) - b(\mathbf{p})f^*(t))^2 \quad (4-35)$$

となるが、これが最小になるように $b(p)$ を求める。 (4-35)式を $b(p)$ に関し微分して0と置くと以下のように $b(p)$ を求めることができる。

$$b(p) = \frac{\sum_{t=1}^T \psi^*(p,t) f^*(t)}{\sum_{t=1}^T (f^*(t))^2} \quad (4-36)$$

以上により、現実的な処理時間で応力分布画像を得ることができるようになる。

参考文献

- [4-1] X. Maldaque, “Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing”, Wiley, pp.453, 2001.
- [4-2] P. Shull et al., “Nondestructive Evaluation Theory”, Techniques and Applications, Marcel Dekker, pp.597, 2002.
- [4-3] H. Terada and T. Sakagami, “Handbook of Nondestructive Evaluation and Diagnoses by Infrared Thermography”, The Japanese Society for Non-destructive Inspection, pp.45, 2004.
- [4-4] T. Sakagami and T. Nishimura et al., “Development a self-reference Lock-in Thermography for Remote Nondestructive Testing of Fatigue Crack”, Transactions of the japan society of mechanical engineers series A, Vol.72, No.724(2006), pp.1860-1867, 2006.
- [4-5] J. Lensiak, et al., “Thermoelastic Measurement Under Random Loading”, Proc. of the SEM Spring Conf. on Experimental and Applied Mechanics and Experimental /Numerical Mechanics in Electronic Packaging III, Soc. for Exp, pp.504-507, 1998.

第5章 赤外線サーモグラフィ装置を用いたアスファルト舗装上からのRC床版内部欠陥検出システムの開発

5. 1. 緒 言

近年、高架道路橋等に使用されているコンクリート床版については、交通量の増加や車両の大型化に起因する早期劣化、凍結防止剤散布の塩害等の影響による変状が多く報告されている。一般にコンクリート床版に見られる変状としては、コンクリート床版内部の剥離、コンクリート骨材の砂利化などがあり、時には床版内に空洞が生じたりコンクリートが抜け落ちたりといった最悪の損傷となっていることもある。これらの変状の進行は、ポットホール等の損傷を誘発し、道路橋の使用性能に影響を与えるとともに、高速道路の場合には橋上を走行する車両の安全性にも大きく影響する。そのため、損傷発生前に変状を発見し、予防保全的にコンクリート床版の維持管理を行うことが必要となる。

コンクリート床版の変状を検出する手法としては、打音法や超音波法、電磁誘導法、赤外線サーモグラフィ法などが適用されている[5-1]～[5-2]。赤外線サーモグラフィ法は、地中レーダーと比べて探査深度が浅く、舗装面下コンクリート数10mm程度の深さの変状しか検出できないという短所がある。一方で検査対象橋の上を走行する検査車両から非接触で広範囲な領域を短時間で調査でき、さらに鉄筋が混在して電磁波が多重散乱し地中レーダー画像が複雑になるような橋梁でも変状を判別しやすいという利点を有している[5-3]～[5-5]。これまでの赤外線法の適用事例では、夜間に交通規制を行い橋上の交通を完全に遮断した状態で、点検作業員が赤外線サーモグラフィで点検対象の路面温度を順次測定していく方式をとっていた。この方式では、広範囲の面的な計測を可能とする赤外線サーモグラフィといえども点検効率は良いとは言えず、交通規制が必要であることや、検査作業者のすぐ横を大型車が高速で通過するため安全性にも問題があった。この問題を解決するため、赤外線サーモグラフィを点検用車両に搭載し、走行する車両から路面温度を計測するシステムが開発され、路面温度計測が試行された。しかしながら、他車の走行を妨げない制限速度(80～100km/h)で走行しながらの赤外線サーモグラフィ測定では、インテグレーションタイムが不足し画質の低下を招き、また大量の路面赤外線サーモグラフィが取得されるため、合成画像生成に大きな手間がかかることが問題であった。

本研究では、アスファルト舗装直下のコンクリート床版の変状を検出しやすくするため、路面赤外線サーモグラフィ合成画像の自動生成手法と、インテグレーションタイムの不足によるノイズの抑制を行う画像改善手法を開発した。

5. 2. 赤外線サーモグラフィによる道路橋 RC 床版損傷検出の問題点

赤外線サーモグラフィによる道路橋床版の損傷検出の原理は、昼間太陽光で温められたアスファルト舗装および橋梁の鉄筋コンクリート（RC）床版が日没後に放熱する際、RC床版内部に生じた空隙、ひび割れなどにより熱伝導が阻害されるためアスファルト表面の温度分布に局所的変化が生じることによる[5-6]。

これらの温度変化領域の寸法は、数10mm以上と比較的大きい。車線幅員方向約3.5mを640画素程度で撮像しても、解像度は約5.5mm/画素となり、これらの温度変化領域の検出は可能である。しかしながら、橋軸方向にはその長さが長大であるために、赤外線サーモグラフィによる移動撮像が必要となる。このようにして撮像された赤外線画像を観察する場合、走行方向に広範囲な変状がどのように分布しているのかを局所的な画像から判断することは難しい。そのため、走行方向について赤外線画像を合成して、一覧表示できることが望まれる。しかしながら、画像枚数が膨大なことや、走行速度によって画像の重複量が異なるため、手作業による合成を行うことは現実的ではない。また高速道路の場合、時速100km程度の高速走行撮影を行うことから、撮像時の露光時間（インテグレーションタイム）が制限されるため、赤外線画像の質が低下することも問題となる。さらに、赤外線画像だけでは、床版内部の変状による温度変化なのか、表面の状態（凹凸や汚れ）による温度変化なのかを判断しきれない場合がある。そのため、可視画像を同時撮影することが必要である。長大な道路を個別に撮像した赤外線サーモグラフィおよび可視画像を対応させて閲覧することは不可能ではないが、実運用としてはかなりの困難を伴う。

5. 3. 赤外線サーモグラフィによる路面撮影・画像合成システムの構築

上記のような走行する車両に搭載した赤外線サーモグラフィ装置による路面温度分布計測に基づく、舗装面上からのRC床版内部欠陥検出の実運用上の問題点を解決するため、路面を撮像した赤外線サーモグラフィの各フレームを自動的に画像合成するシステムを開発した。移動するカメラで撮像された連続画像の合成は隣接するフレーム画像間でそのシフト量を計算し、これに従い画像をシフトして合成する。シフト量を計算するには、フレーム画像間のシフト量を少しずつ変動させながら重複部分の類似度計算を行い、最大の類似度となるシフト量を採用すればよい。しかしながら、2章で述べたように赤外線サーモグラフィでは詳細な位置情報を抽出できるような空間周波数の高い値の変動が少ないため、このような処理に向いていない。特に路面表面は平坦なアスファルト面が連続しており放射率の変動が少なく、変動がある場合でもなだらかであるため類似度計算が安定しない。一方、赤外線サーモグラフィの動きは、高速道路を走行する車両から路面を撮像する場合においては、ほぼ1次元的であると近似できる。赤外線サーモグラフィを搭載する車輛には、可視ラインセンサカメラのシャッターパルスを生成する目的で、正確に車両速度を計測できる非接触速度計を搭載している。この速度情報

から、赤外線サーモグラフィの撮像位置の進行量を計測可能であるため、本研究では可視画像を援用せずに、速度計で得られる情報から計算できる一次元の画像シフト量を用いることとした。

赤外線サーモグラフィの取り付け位置及び姿勢は走行中に変動がないと近似できる。2章で述べたように射影幾何変換は、赤外線サーモグラフィ画像に対しても適用が可能であるため、予めキャリブレーションで幾何変換情報を得ておき、路面オルソ画像の生成を行った。同時に路面を可視ラインセンサカメラによって撮像し、赤外線サーモグラフィと可視画像の位置を自動対応させて撮影し、これらを同時に閲覧できるシステムも合わせて開発した。

5.3.1. システム概要

路面赤外線サーモグラフィと路面可視画像を同期して取得するために、Fig.5-1に示すような路面撮影システムを開発した。車両下部に非接触速度計を設置し、車両の走行速度を計測することで10mmごとに同期パルス信号を生成させる。このパルス信号から分周・逡倍回路を用いて、赤外線サーモグラフィ用に1パルス/500mmを、可視ラインセンサカメラ用に1パルス/1mmの信号をそれぞれ供給する。これらをシャッタトリガとし、赤外線サーモグラフィおよび可視ラインセンサカメラをそれぞれ駆動させる。各カメラは、シャッタトリガの1パルスが入力されると、1画像および1ラインを撮像するように設定した。

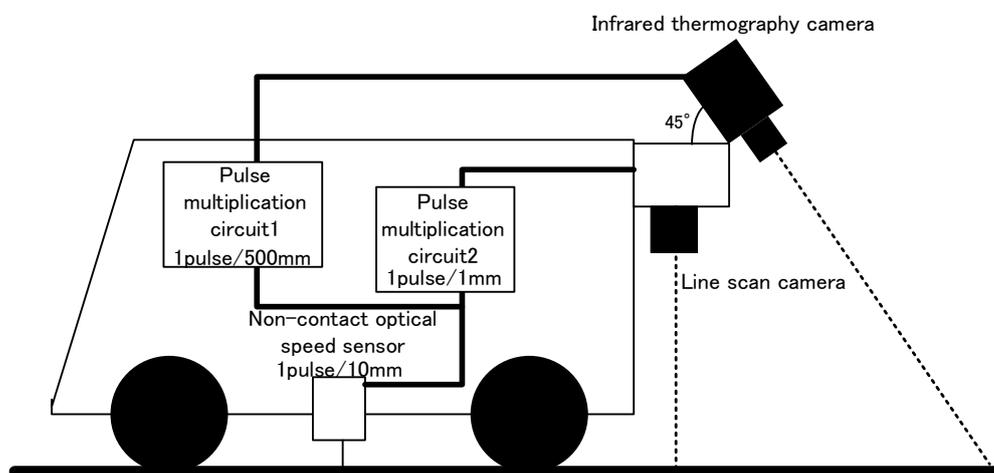


Fig.5-1 Schematic illustration of developed

可視ラインセンサカメラは車両が1mm進むごとに1ラインを撮像し、赤外線サーモグラフィは500mm進むごとに1フレームを撮像する。2つのカメラに入力されるシャッターパルスは同一の信号から逡倍されているため、どの位置の路面赤外線サーモグラフィ画像であっても、撮影後に赤外線サーモグラフィ画像と路面可視画像とを対応させることが可能となっている。赤

外線サーモグラフィとしては、FLIR 社 SC5600 を用いた。Table. 5-1 に SC5600 の基本仕様を示す。

Table. 5-1 Specifications of employed

Sensor type	InSb
Noise Equivalent Temperature Difference	< 0. 02 °C
Pixel resolution	640 x 512
Maximum frame rate (Maximum frame rate in subwindow mode)	100 Hz (3, 425 Hz)
Trigger input	Optional
Digital Video Interface	GigE or Camlink

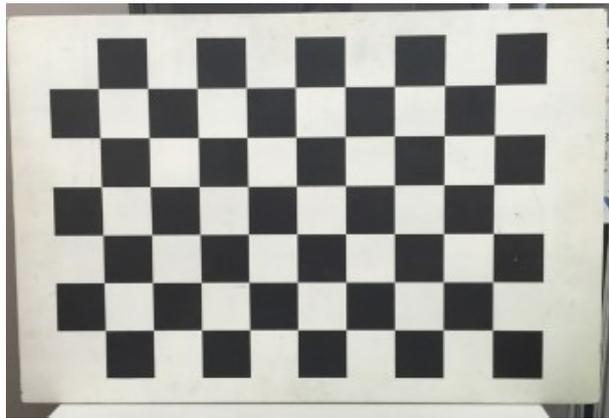
本路面撮影システムは、高速道路走行での適用を想定しており、撮影時の走行速度は時速 80km~100km 程度を考えている。最大走行速度を時速 100km と設定すると、500mm ごとの撮像に必要な赤外線サーモグラフィに入力されるシャッターパルスの周波数は、約 55. 5Hz となる。

赤外線サーモグラフィは、撮影領域とする路面に車体の熱の影響が及ばないようにするため、路面に対し 45° 傾いた状態を取り付けた。また、車線幅 3m 以上を撮像するために、レンズ画角を考慮してカメラの高さを 2. 93m とした。

上記の路面撮影システムを用い路面の赤外線サーモグラフィを撮影後、以下に述べる赤外線サーモグラフィ画像のオルソ画像化および自動画像合成を行った。

5. 3. 2. 路面赤外線サーモグラフィレンズ歪補正

路面赤外線サーモグラフィ画像のオルソ画像化および自動画像合成を正確に行うため、レンズ歪を補正するパラメータを事前に求めた。本システムにおいては、Zhang[5-7]のアルゴリズムを用いて、歪補正パラメータ k_1 , k_2 を求め、オルソ画像化の前に赤外線サーモグラフィからレンズ歪を除去している。一般的に可視光カメラレンズにおいては、Fig. 5-2(a)に示すような白黒のチェッカーボード模様の平板を撮像し、レンズ歪補正パラメータを含むカメラ内部パラメータを較正する。較正アルゴリズムにおいては、チェッカーボード模様のコーナーの画像上位置を自動認識し、レンズ歪補正パラメータを算出する。



(a) Visible image



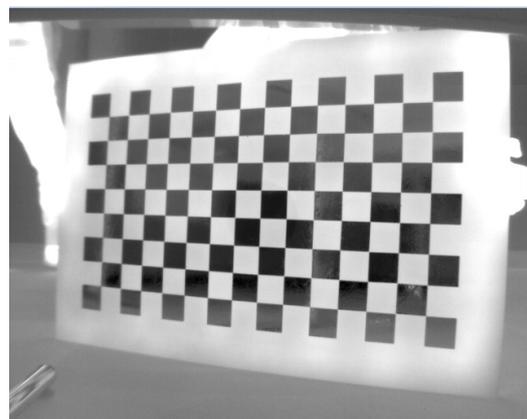
(b) Infrared image

Fig. 5-2 Calibration board for visible and

この可視画像用のチェッカーボードを赤外線サーモグラフィで撮像すると Fig. 5-2(b)に示すように、チェッカーボード模様のコントラストが低く白領域と黒領域のエッジ境界でのサーモグラフィ値の勾配が緩く、コーナー位置を自動認識することが困難であった。可視画像用チェッカーボードは合板上に、塗料で模様が描かれており、(2-11)式の拡散反射率 c_d が大きく、模様の部分で Cd が鋭く変動するため、明確な模様を可視画像として生成できる。一方で本チェッカーボードでは、可視域における白色と黒色のあいだでの (2-15) 式の赤外線放射率 ε の変動が小さいため、コントラストが低い赤外線画像となっているものと考えられる。第2章では、このような画像上の位置を用いる処理に赤外線サーモグラフィは適していないと考察したが、レンズ歪補正に関しては可視画像を援用することが難しい。そこで、Fig. 5-3(a)に示すような、 ε の差が大きな物質を用いて赤外線サーモグラフィ用の較正用チェッカーボード模様平板を製作し、赤外線サーモグラフィにおいても空間周波数の高い画像を得ることができるようにした。



(a) Visible image



(b) Infrared image

Fig. 5-3 Calibration board employed for infrared

Fig. 5-3(a)に示した平板は、表面全域を放射率の大きな黒い断熱塗料で塗装している。その上に、放射率の小さい多数の矩形アルミホイルを塗布してチェッカーボード模様を構成している。製作した平板赤外線サーモグラフィで撮影したものをFig. 5-3(b)に示す。Fig. 5-2(b)に示した画像と比べるとFig. 3-3(b)画像のコントラストが大きく向上していることが分かる。また、エッジ部分の赤外線サーモグラフィ値の勾配も大きくなっており、良好に自動認識ができるようになった。このようにして得られたレンズ歪パラメータ k_1 , k_2 を用い、(5-1)式によりレンズ歪を補正した。

$$\begin{aligned} x' &= x + x[k_1(x^2 + y^2) + k_2(x^2 + y^2)^2] \\ y' &= y + y[k_1(x^2 + y^2) + k_2(x^2 + y^2)^2] \end{aligned} \quad (5-1)$$

ここで (x, y) は撮影画像上の位置を示し、 (x', y') は歪補正後の位置を示す。各画素位置の歪補正後の位置をあらかじめ計算して、各座標の移動先マップ画像をあらかじめ計算しておく。撮影された画像はすべてこの移動先マップを用いて合成処理の前に歪補正を行っておくことで、正確な合成画像が得られるようになる。Fig. 5-4(a)には、Fig. 5-3(b)に示した赤外線サーモグラフィ画像の歪を補正した結果を示す。Fig. 5-4(b)の左側はFig. 5-3(b)の右端の拡大図である。赤い直線と、チェッカーボード模様の右端を比較すると、上下中央部分の黒い矩形が赤線よりも右に飛び出していることが分かる。一方Fig. 5-4(b)の右側ではすべての黒い矩形の右端が赤線と一致しており、レンズの歪が正しく補正されていることが確認できる。

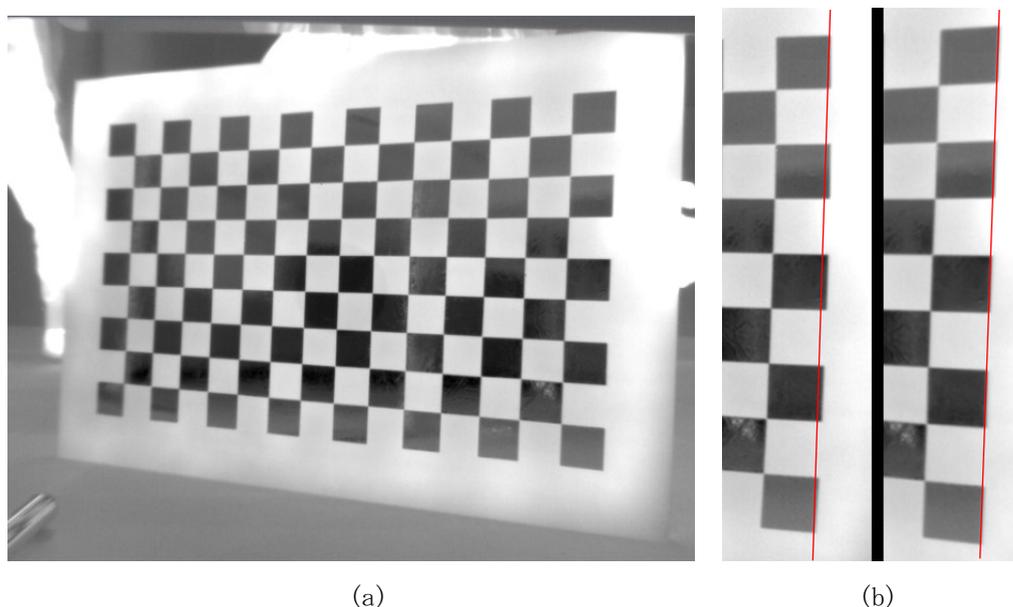


Fig. 5-4 Result of distortion correction

5. 3. 3. 路面赤外線サーモグラフィ画像の自動画像合成

赤外線サーモグラフィは路面の法線に対して約 45° 傾いており，自動画像合成のためにはオルソ画像化が必要である．オルソ画像化するために，第3章で導入した平面射影変換（ホモグラフィ変換）を用いた．平面射影変換（ホモグラフィ変換）は，入力画像を，それが撮影されたものとは異なる位置・姿勢から撮影された画像に正確に変換する．ただし，被写体が平面であることが条件となる[3-9]．本システムでは平面射影変換を行うため，事前にホモグラフィ変換行列を求めた．

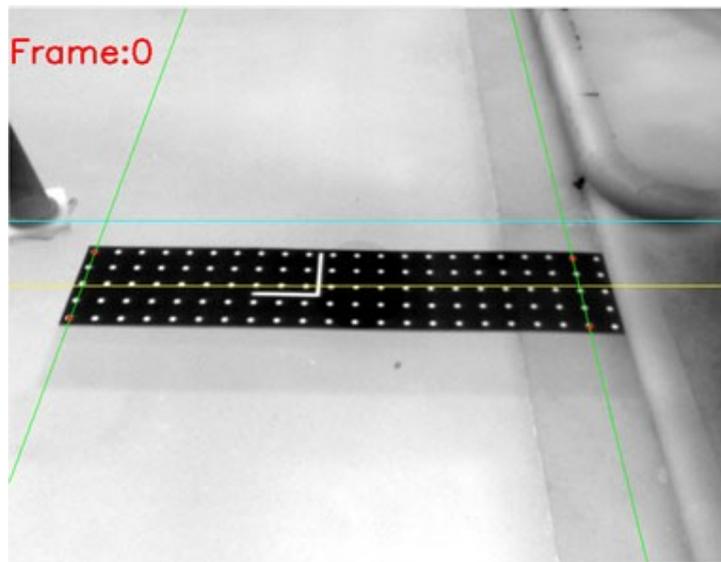


Fig. 5-4 Calibration pattern set on road

Fig. 5-4 に示すようなチャートを路面に敷設することで，変換前後の対応点を得ている．この路面に敷設したチャートでは5. 3. 2. 節において示したチェッカー模様の板と同様に，放射率が大きく異なる素材を用いて円模様を描き，赤外線サーモグラフィにおいて，この円模様が明確に撮像できるようにした．ホモグラフィ変換行列はチャート上の円模様中心の赤外線サーモグラフィ上座標を (x, y) とし，同一の円中心の路面上の座標を (X, Y) とし，3. 2. 2. 節の(3-4)式から得た．

求められたホモグラフィ変換行列を用い，路面に対して 45° の傾きで撮影された赤外線サーモグラフィの各画素の座標を式(3-2)式で幾何変換することで，路面赤外線サーモグラフィ画像のオルソ画像化する．Fig. 5-5 は，Fig. 5-4 に対し本手法を用いてオルソ画像化した結果画像である．

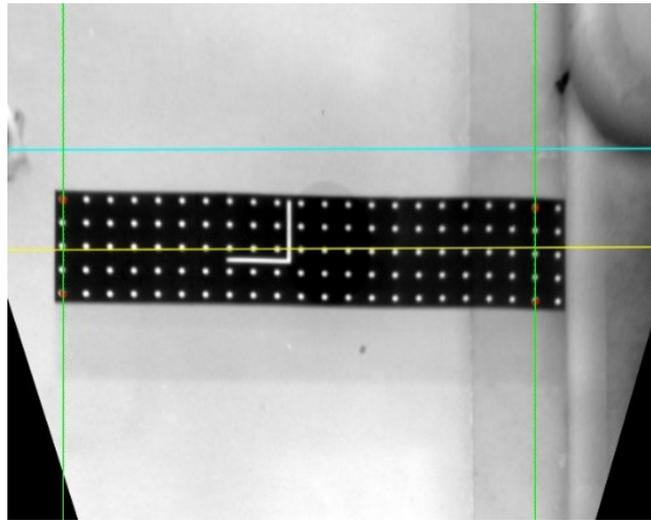
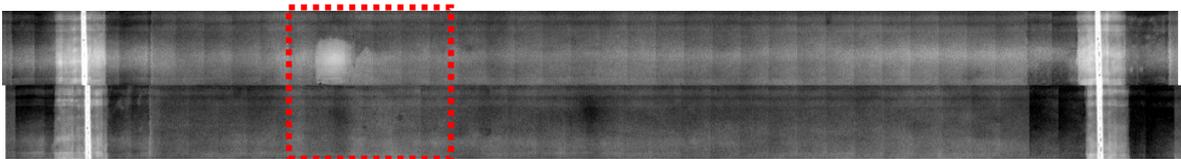
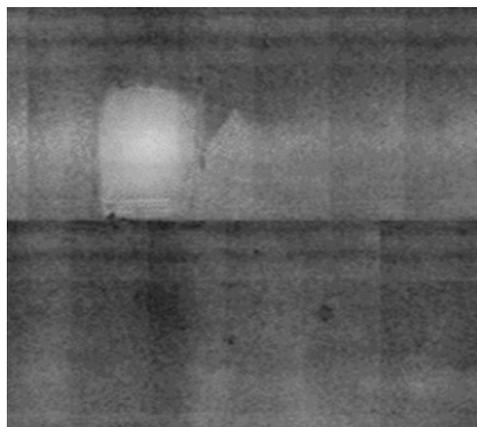


Fig.5-5 Result of homography transformation

ホモグラフィ変換された赤外線サーモグラフィ画像は、単にオルソ画像化されているだけではなく、路面に対し正確にスケールリングもされている。本システムでは1画素が5.4mmになるようにスケールリングされている。よって撮影された赤外線サーモグラフィの各フレームのオルソ画像は、 $500\text{mm}/5.4\text{mm} = 92.6$ 画素だけ進行方向に平行移動させて画像合成することで、1枚の路面赤外線サーモグラフィ画像になる。

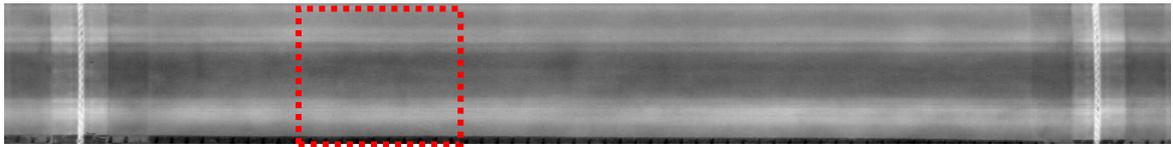


(a)

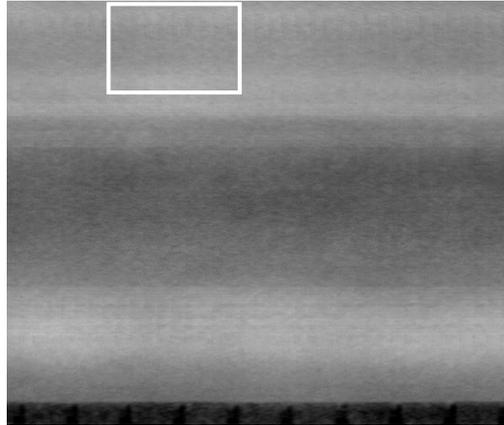


(b)

Fig.5-6 Road surface image (manually composed)



(a)



(b)

Fig.5-7 Road surface infrared thermography (automatically composed)

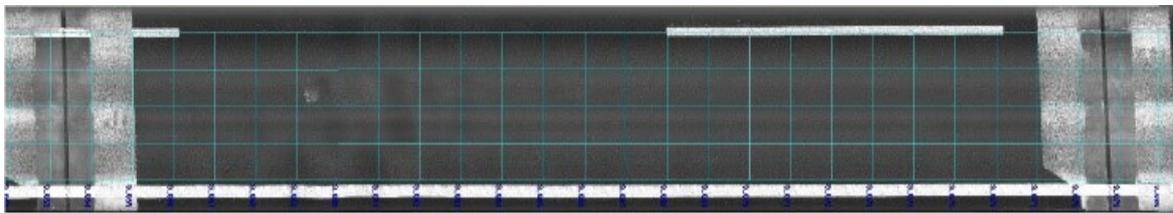


Fig.5-8 Road surface visible image (line-sensor camera)

Fig. 5-1 に示した路面撮影システムを使い、ある高速道路において赤外線サーモグラフィを搭載した検査車両を時速80kmで走行させながら路面温度を赤外線サーモグラフィで連続的に撮影することで得られたデータを合成した。Fig. 5-6はフォトタッチソフトを用い、手動で赤外線サーモグラフィの各フレーム画像に対し台形補正を行い、その後手動画像合成を行ったものである。一方 Fig. 5-7 は、本手法により自動画像合成を行った結果である。Fig. 5-6とFig. 5-7は異なる日時に撮影されたデータであり、Fig. 5-6の赤鎖線矩形内左上に温度の高い領域があるのにFig. 5-7では見えないなどの違いがある。Fig. 5-6では、画像の接続部に不整合が確認でき、手動であるため作業時間も50m程度の距離を処理するのに15-30分程度要した。これに対して、Fig. 5-7に示した自動合成画像では、接続部の不整合は小さく、処理時間も数十秒程度に短縮された。Fig. 5-6(a)およびFig. 5-7(a)それぞれの幅が50m程度を表示しており、赤鎖線画像上の矩形部分をFig. 5-6(b)およびFig. 5-7(b)に拡大表示している。

また参考のためFig. 5-8に、Fig. 5-7と同期撮影されたラインセンサカメラにより得られた同

一区間の路面可視画像を示す。同期撮影されていることで撮影・合成後に赤外線サーモグラフィとの対応作業が不要で、2つの画像を比較することで高度な判定が可能となる。

5. 4. シフトスタッキングによる合成画像の画質向上

本研究で開発した、路面の連続撮影および画像合成システムを用いることで効率的な撮影、画像合成が可能となったが、画質において以下のような問題があることが判明した。撮影時に路面法線に対しカメラ視線軸が大きく傾いているために、画像を進行方向に見たときの1画素分に相当する実際の大きさが異なっていることがわかった。画像を合成する際には、合成される2つの画像の上端と下端が合成画像の境界部となるため、この部分で解像度の不整合が発生していた。一例として、Fig. 5-7の一部(白矩形部約 1500mm x 1000mm)を拡大してコントラスト強調したものを Fig. 5-8 に示す。

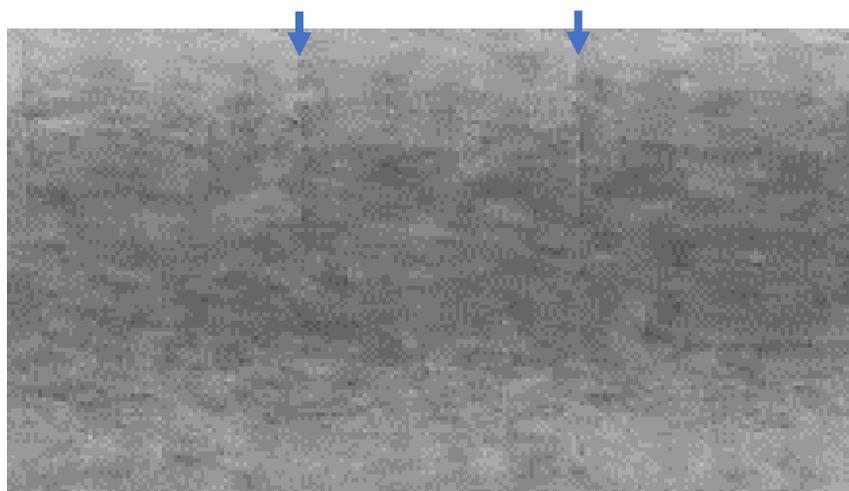


Fig. 5-9 Inconsistencies in composed image (detail)

Fig. 5-9の矢印で示した位置において、500mmごとの合成境界部の解像度の違いによる縦線が確認できる。この縦線は、視認性を阻害するだけでなく、その出現サイズがひび割れ、浮き、空孔などの検出対象のスケールに近いために、将来開発を計画している舗装下のコンクリート床版上部の変状の自動認識処理を考慮すると好ましくない。

また、高速走行による撮像の露光時間（赤外線計測では赤外線をセンサに受光する際のインテグレーションタイムと呼ばれる）の減少による画質劣化も問題である。本路面撮影システムでは、インテグレーションタイム内の車両の進行量は5. 3. 3節で述べた1画素に相当する5.4mm以下でなければならない。この条件を満たすインテグレーションタイムは、時速100kmの撮影走行において約200 μ sと非常に短くなる。一般的に光電効果により光電流を生じる撮像素子においては、受光を全くしない状態でも微小な電流が暗電流ノイズとして流れているが、

この大きさは一定である。インテグレーションタイムが短くなると、本来の信号である赤外線
の受光による電流が小さくなり、相対的に暗電流ノイズが大きくなって赤外線サーモグラフィ
の画質が劣化する。

5. 4. 1. シフトスタッキング手法

上記の問題を解決するため、フレーム時間間隔での車両の進行量を小さくし、シフトして配
列した赤外線サーモグラフィの重複部を加算平均することで、合成境界部の解像度の不整合お
よび露光時間不足による画質劣化を抑制する手法を開発した。手法の概念図を Fig. 5-10 に示す。

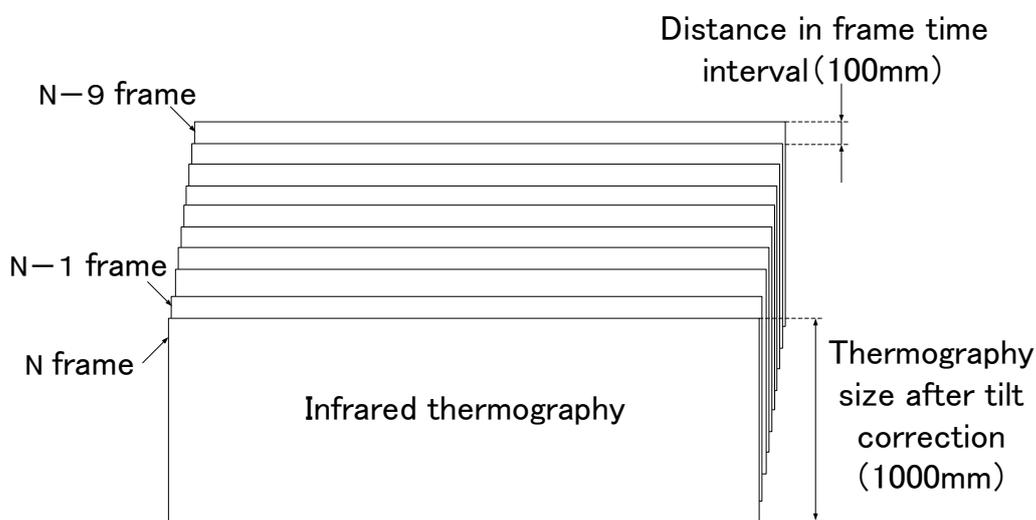


Fig. 5-10 Shift stacking method

フレーム間の車両の進行量を、5. 3. 3節のデータ撮影時に比べて、1/5の100mmとし、
アオリ補正後の赤外線サーモグラフィの画像視野の縦寸法（進行方向）が1000mmとなるように
した。この状態では、赤外線サーモグラフィの視野を100mmずつ車両進行方向にシフトさせな
がら同一地点を10回撮像することになる。合成画像の各画素値は、この10枚の赤外線サー
モグラフィのオルソ画像をシフトして加算平均したものとした。合成された画像のどの個所
も、等しく10枚の画像を積算平均しており、条件が同一であることから画像が滑らかに合成
される。

さらに、同一地点データを10回積算しているため、インテグレーションタイムが短いこと
から発生しているランダムな暗電流ノイズが相殺されて画質が改善されることが期待できる。

5. 4. 2. 効果確認試験

5. 4. 1節で説明したシフトスタッキング手法の効果を確認した。まず、インテグレーシ
ョンタイムの不足により画質が劣化している赤外線サーモグラフィの画質が改善されることを

確認した。検証のため Fig. 5-11 に示した中央内部に空隙のあるコンクリートサンプルを作製し、カメラを静止した状態で撮影を行い、サーモグラフィの加算平均により画質が改善することを確認した。熱電対による計測で温度制御が可能なシートヒータをコンクリートサンプルの下に設置し、加熱温度を 45°C に設定した。計測温度が 45°C に達してから 30 分後に加熱を止め、放熱状態にして赤外線サーモグラフィで上方 45° 方向から撮影した。

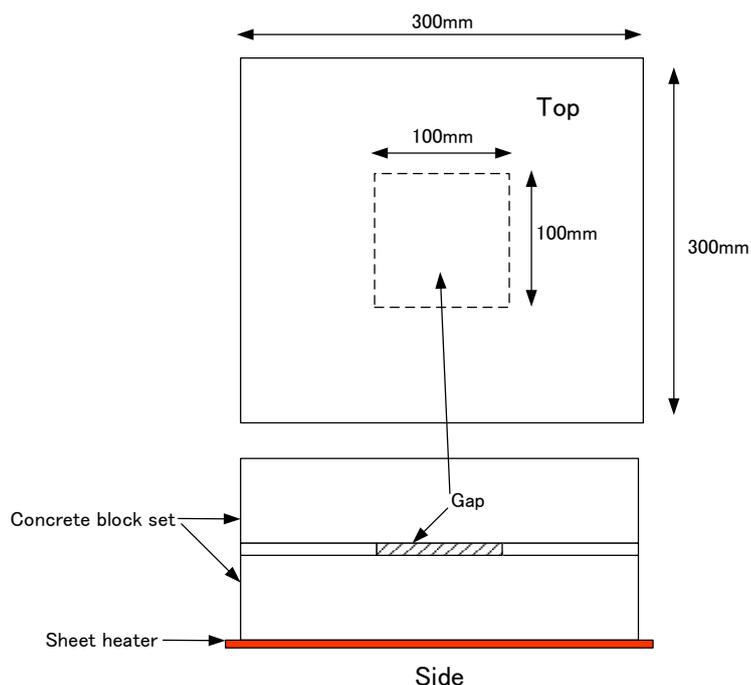


Fig. 5-11 Concrete block set on sheet heater

まず、露光時間の影響を確認するため 2000 μ s, 200 μ s の露光時間で撮像を行った。撮像されたコンクリートサンプルの赤外線サーモグラフィと、その中央部水平プロファイルを Fig. 5-12 に示す。Fig. 5-11 に示したような状況では、空隙によるサンプル表面の温度勾配は滑らかなものになるため、空間周波数の高い変動はノイズであると思われる。Fig. 5-12 左の露光時間 2000 μ s のサーモグラフィの水平プロファイルはノイズ振幅が小さく、中央空隙部の温度が低下していることが明確に確認できるが、Fig. 5-12 右の露光時間 200 μ s のサーモグラフィの水平プロファイルではノイズ振幅が大きく温度低下部の確認が困難であることがわかる。

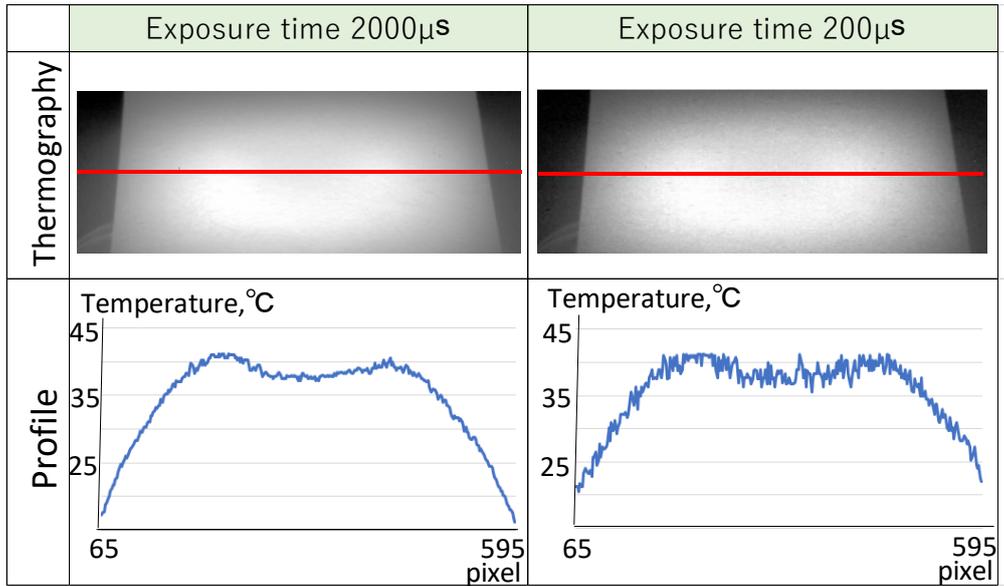


Fig. 5-12 Horizontal line profiles of infrared light intensity on concrete block

Fig. 5-12 右の露光時間 200 μ s のサーモグラフィを時間方向前後 10 フレームに関し、積算平均したものを Fig. 5-13 に示す。

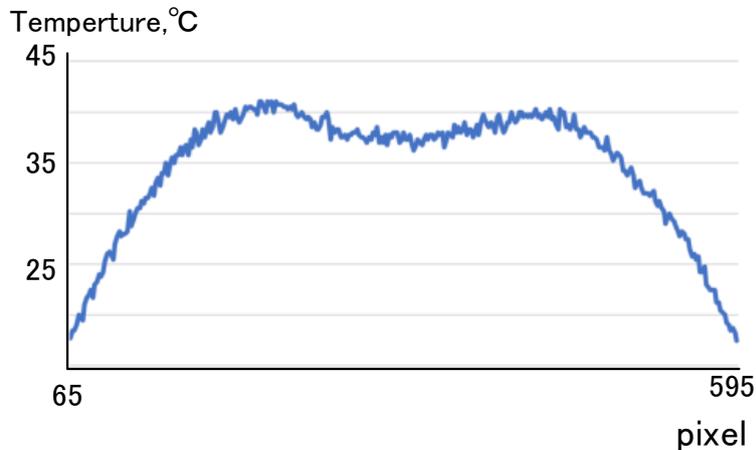


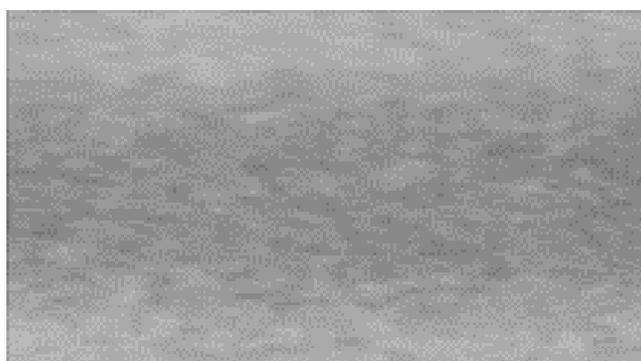
Fig. 5-13 Horizontal line profiles of infrared light intensity indicating the result of the stacking procedure

Fig. 5-13 に示した水平プロフィールは、Fig. 5-12 左の露光時間 2000 μ s の水平プロフィールに近づき、ノイズ振幅が抑制され中央部の温度低下が明確に確認できる。Fig. 5-12 右の水平プロフィールに対する 50pixel ごとの分散の平均は 0. 86°C であるのに対し、Fig. 5-13 の水平プロフィールでは 0. 47°C と半減していた。このことから、露光時間の短い赤外線サーモグラフィでもスタッキングを行うことで、露光時間の長い赤外線サーモグラフィに近い画質が得られることが分かる。

次に本手法を，Fig. 5-7 に示したシフトスタッキング法を反映していない路面赤外線サーモグラフィの合成画像と同一の路面に対しシフトスタッキング法を適用した結果を Fig. 5-14 に示す．



(a) Entire composed image



(b) Detailed image

Fig. 5-14 Result of shift the stacking method (road surface image)

Fig. 5-9 に示したデータと同一地点を拡大した Fig. 5-13 (b) では解像度の違いによる縦縞が解消されていることが確認できる．

5. 5. 結 言

赤外線サーモグラフィで路面を高速走行撮影し，自動画像合成するシステムを開発した．本システムでは，赤外線サーモグラフィに対応する路面可視画像も撮影でき，舗装下のコンクリート床版の変状を判定する場合に舗装面の状況も加味でき，より信頼性の高い判定が可能となった．

路面赤外線サーモグラフィ画像の合成では，平面射影変換を用いたオルソ画像化と速度計によるシフト量を用いて自動合成が可能とし，効率化を行った．撮影フレームレートを大きくし，路面同一箇所の重複撮影を行い接続領域の分解能の違いによる不整合を改善する手法を提案した．またこの手法は，フレームレートの増大によって短くなったインテグレーションタイムによる画質劣化も防ぐことを確認した．この結果，視認性がよく，将来開発を予定している舗装下コンクリート床版上部の変状自動解析にも適した画像が得られるようになっている．

本論文の手法はすでに高速道路保守業務用の路面撮影車において試験使用され，道路橋梁床版損傷点検の高度化・効率化に寄与している [5-9]．

一方、得られた合成赤外線サーモグラフィから舗装下コンクリート床版変状の位置、面積などを得るためには、別途変状部の抽出処理が必要となる。現時点では赤外線サーモグラフィ値の簡易な二値化による変状抽出結果を目視で再確認するなどしているが作業効率が悪く、大量の橋梁を処理することが難しい。また、個人差による判定精度のばらつきも問題である。

将来は、これら人間による判定を画像処理による自動判定とする必要がある。路面にはジョイント、標示工、水溜りなど様々な外乱が存在し、また照明環境の変動など多様な外乱があっても人間に近い判定が行われるアルゴリズムが求められる。この問題に関しては、最近は構造物の損傷画像の認識などにも適用され始めている機械学習（深層学習）を利用することが考えられる。また、本システムは可視画像も同時取得できるため、同一箇所を捉えた2種類の画像を学習させることで、より信頼度の高い自動判定を得ることが期待できる。

参考文献

- [5-1] 坪谷剛. 市口恒雄, “インフラ長寿命化における道路橋の新たな点検技術の開発, 科学技術動向”, 143, pp. 36-43, 2014.
- [5-2] 鎌田敏郎. 阪上隆英. 玉越隆史. “各種道路橋床版における疲労損傷の非破壊検査システムの開発”, 土木技術資料, 53(3), pp. 26-29, 2011.
- [5-3] M. Janku, J. Stryk, “Application of infrared camera to bituminous concrete pavements”, measuring vehicle, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, pp. 236, 2017.
- [5-4] 早野公敏. 前川亮太. 鈴木哲雄. 橋爪秀夫, “連続式赤外線撮影による空港アスファルト舗装の層間剥離探査の試み”, 地盤工学ジャーナル, 3(1), pp. 13-23, 2008.
- [5-5] 坪川将丈. 水上純一, “熱赤外線画像による空港舗装の層間剥離検出法に関する研究”, 土木学会舗装工学論文集, 12, pp. 17-24, 2007.
- [5-6] 金光寿一. 柳内睦人. 三星智典, “舗装熱を利用したサーモグラフィ法によるRC床版内部の欠陥検出に関する研究”, 土木学会論文集, (727/V-59), pp. 95-108, 2003.
- [5-7] Z. Zhang, “A Flexible New Techique for Camera Calibration”, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 22(11), pp. 1330-1334, 2000.
- [5-8] 松井俊吾, 内田勇治, 阪上隆英, 柳井喜浩, ”車載式赤外線サーモグラフィによる橋梁床版調査技術の開発”, 土木学会第73回年次学術講演会, 2018. 8. 29-31(29), 北海道大学土木学会第73回年次学術講演会講演概要集, pp. 11-12, 2018-8.

第6章 SLAM を援用した赤外線計測による背景反射除去

6. 1. 緒言

建築構造物には躯体保護や美観を目的として、タイル張りやモルタル施工などの外装仕上げが施されている。施行された外壁は、初期欠陥または経年劣化によって、下地のモルタル部分、あるいはタイル張付部分が剥がれ、コンクリート片やタイルが落下する可能性がある。そこで外観目視や打音法[6-1]による検査が行われている。打音法は、タイル外壁の診断において最も一般的に使用されている。構造物全体の診断を行う場合には高所作業車を設置することが必要であり、検査者の熟練度によって診断の精度が異なることが課題である。そこで遠隔から広範囲の検査が可能な手法として、赤外線法の適用が注目されている。建築構造物に対する赤外線法による非破壊試験では、被測定物に熱負荷が与えられたときの欠陥部の断熱効果によって生じる局所的な温度変化領域を計測することで損傷の検出を行う[6-2]～[6-4]。谷川らは[6-5]、連続して赤外線画像を計測し、気温上昇時にコンクリートの表面温度を計測することで、健全部と欠陥部の温度差が大きくなり、欠陥部の検出に有効であることを示している。また、Ljungberg は[6-6]、赤外線計測を用いて、建築年数が 100 年を超えるような古い建物の外壁に存在する、空気漏洩の定量化について研究している。巨大な土木・建築構造物を対象とした赤外線サーモグラフィ法では、被測定物に対する熱源として、昼間の日照による加熱、および日中に構造物内部に蓄積された熱が夜間に放熱されるとき冷却を利用する。この方法は、構造物に生じる自然発生的な熱移動を用いるため、パッシブ赤外線サーモグラフィ法と呼ばれる。

タイル等の外装仕上げが施された外壁を診断する場合、天空放射や太陽光線、あるいは周囲に存在する物体から放射される赤外線が外装仕上げタイルの表面で反射し、測定対象物の赤外線画像に写り込むことによって、赤外線の反射成分が外乱として測定対象物表面の温度分布に混入することがある。そのため、赤外線サーモグラフィを用いた建築構造物の外壁診断では、太陽光線や周辺構造物の反射が剥離の検出精度を低下させる要因となっている。

周囲環境からの写りこみの対策として、検査対象面の反射率を低減させる手法がある。反射率を低減させる塗料やフィルムを貼り付けることで写りこみを防ぐ。一方建築構造物などでは、大面積に反射防止処置を施す必要があるため、本手法は建築構造物への適用には不向きである。水蒸気の吸収帯に相当する 5-8 μm 波長帯の赤外線を利用する特殊な赤外線サーモグラフィを用いる手法が提案されている[6-7][6-8]。梅干野は[6-9]、HgCdTe センサを搭載した赤外線サーモグラフィを使用して 5-8 μm に感度を有する赤外線サーモグラフィを試作し、5-8 μm の赤外線を計測に用いることによって、モルタル仕上げが行われた壁面での背景物体から放射される赤外線の反射の影響を低減できることを示している。

検査対象内の欠陥による温度変化と画像内への外乱の映り込みとを識別するため、検査面に

対する撮影方向を変えることが一般に行われている。熱源反射は、入射角と等しい反射角の位置に現れるため、撮影方向を変えると欠陥部は対象面内で位置を動かないのに対して、熱源反射は入射角の変化に対応して移動する。赤外線サーモグラフィを用いた外壁診断を行う検査技術者に対しては、検査の際にこの方法を用いて画像に現れた温度変化部位が内在する欠陥によるものかどうかを識別することが要求されているが、判断の適切さは検査者の習熟度に依存する。

本研究では、近年開発され利用が普及している V-SLAM, SfM 技術を用いて計測対象に対する計測カメラの位置および姿勢を把握することにより熱源反射を除去する方法を提案する。SLAM(Simultaneous Localization and Mapping) [1-11]とは、自己位置推定と周辺環境の位置情報の推定を同時に行う技術の総称であり、本研究では V-SLAM(Visual SLAM)と呼ばれる主に画像を用いた SLAM 技術を用いる。SfM(Structure from Motion) [1-12]も V-SLAM と同様対象物をカメラが移動しながら撮影された映像から、3次元形状を復元する。第2章で考察したように赤外線サーモグラフィそのものを用いて V-SLAM や SfM を行っても、高精度で安定した結果を得ることは困難である。本研究では、第4章のように可視画像と赤外線サーモグラフィを同期撮影し、可視画像で V-SLAM または SfM を行い、その結果を赤外線サーモグラフィに反映する手法をとる。

本章では、まず可視画像に対して行った V-SLAM または SfM の結果を用いて赤外線サーモグラフィ画像の検査平面への逆射影処理を行う手法を説明し、次にその結果を用いて赤外線反射成分を除去する手法について説明する。最後に本手法の効果を確かめるため、意図的に赤外線反射が起こる実験室内環境を作り赤外線サーモグラフィから反射成分のみを除去できることを実験的に確認する。

6. 2. 計測原理

赤外線法による外壁調査は当然ながら屋外で行われるため、(2-15)式の第一項鏡面反射の成分が無視できなくなる。屋外計測の場合、Fig. 6-1 に示すように対象物表面から放射される赤外線だけではなく、太陽や空の反射赤外線が赤外線カメラに入射することで、欠陥による温度変化部位の検出を阻害してしまう。この熱源反射は(2-15)式の \mathbf{s}_i 方向すなわち鏡面反射方向に最も強く、この方向以外では急激に減少する。(2-15)式の第一項では、 \mathbf{v}_r と \mathbf{s}_i の内積をとるため、鏡面反射方向にカメラ視線軸がほぼ一致するときに反射強度が大きくなることを意味する。測定対象物に対して赤外線サーモグラフィカメラが移動するとき、この条件を満たす対象物体上の位置も移動することになるから、赤外線サーモグラフィでは対象表面上の赤外線反射成分の強い位置も移動移動する。

一方で、欠陥による温度変化の対象表面上の位置は、カメラの移動によって変化しない。よって赤外線サーモグラフィを移動させながら撮影した結果を用いると、対象表面上の赤外線サーモグラフィ値の分布は対象表面に対して変動しない成分と移動していく成分に分けられる。

赤外線サーモグラフィカメラでは対象表面の同一箇所を重複撮影できているから、移動する成分のないフレーム画像などを選択することで反射成分の排除ができるもの期待できる。

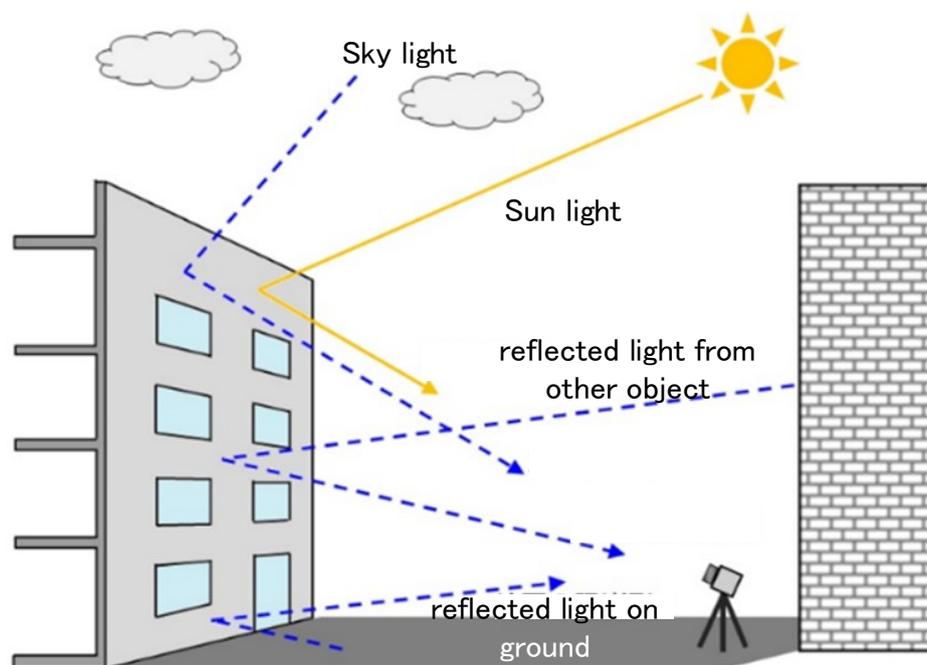


Fig.6-1 Noise sources of infrared thermography

本研究で提案する手法では背景反射除を、以下の手順で行う。

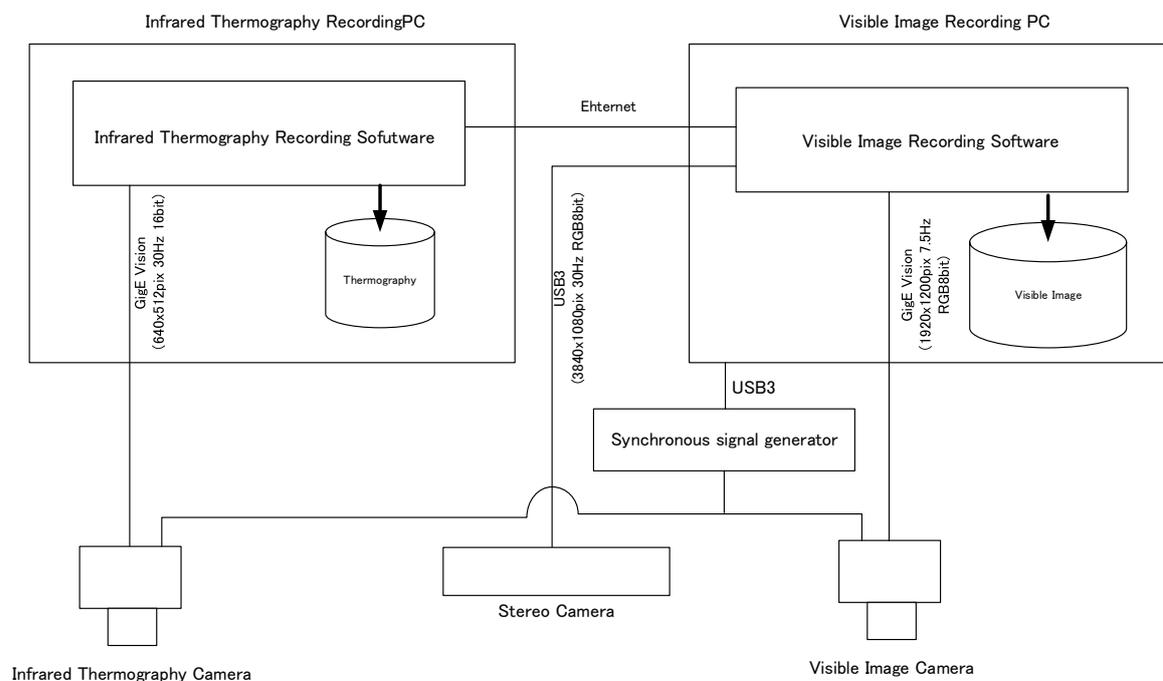
- ・対象物をドローンなどに搭載した赤外線サーモグラフィカメラで移動撮影する。このとき、可視ビデオカメラあるいはステレオカメラも同期撮影を行う。
- ・可視ビデオカメラあるいはステレオカメラの映像を用いてV-SLAMあるいはSfM計算を行い赤外線サーモグラフィカメラ位置および対象物平面の位置および姿勢を推定する。
- ・撮像された赤外線サーモグラフィを赤外線サーモグラフィカメラ位置および対象平面位置、姿勢情報を用いて逆射影する。これにより同一箇所の撮影角度を変えた赤外線サーモグラフィの正確な位置合わせを行う。
- ・重複部分に多重に保持したサーモグラフィ値を解析し、移動する反射成分を排除する

次節から各手順に関し説明を行う。

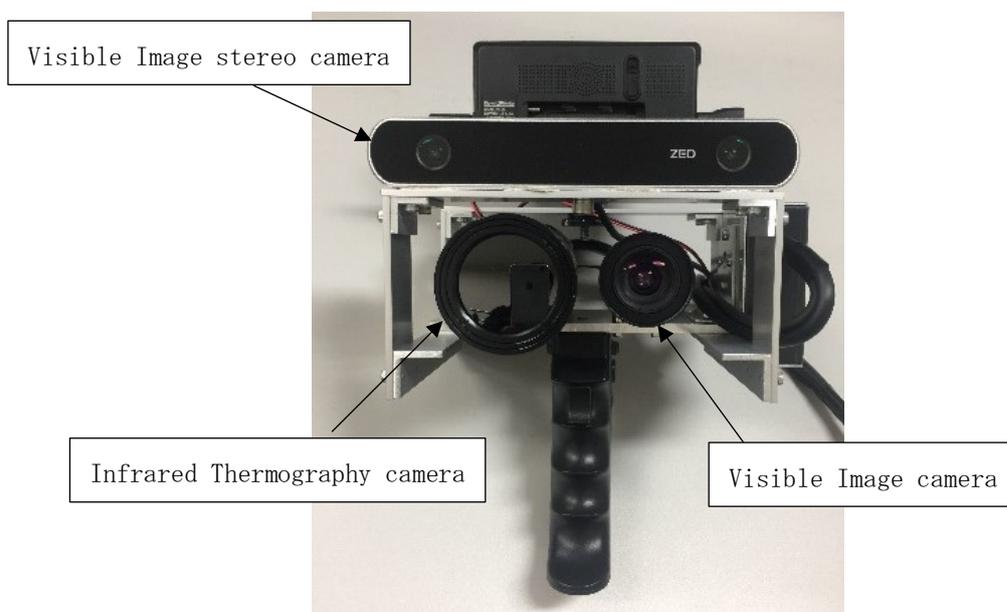
6. 2. 1. 同期撮影装置

4章と同様に赤外線サーモグラフィカメラと他カメラの同期撮影装置を製作した。本研究で

は市販されている市販ステレオカメラも合わせて同期撮影できるようにし、単眼 SfM とステレオ V-SLAM の両方を使用できるようにしている。Fig. 6-2 に同期撮影装置の構成図とカメラ部分の写真を示す。



(a) System equipment configuration



(b) Camera head

Fig. 6-2 Synchronous recording system

Fig. 6-2(a)に示すように3台のカメラのうち、赤外線サーモグラフィカメラに対し1台の録画用PCを、ステレオカメラと可視ビデオカメラに対し録画用PCをそれぞれ用意した。これは、入力画像のデータ量が多いため、画像データのコマ落ちが発生しないようにするためである。3台のカメラは Fig. 6-2(b)のように1つのカメラヘッドに固定され一体で移動できるようにした。赤外線サーモグラフィカメラと可視ビデオカメラには小型マイコンによる同期信号発生装置から同一のシャッターパルスが入力され、撮像タイミングが同期される。

赤外線サーモグラフィカメラ、可視ビデオカメラおよびステレオカメラの仕様を Table. 6-1, Table. 6-2, および Table. 6-3 にそれぞれ示す。

Table. 6-1 Specifications of Infrared Thermography camera (FLIR A65)

Sensor Type	microbolometer
Image resolution	640x512 pixel
Frame rate	30Hz
Field of view	12.4° (H) x 9.92° (V)
Temperature resolution (NETD)	<0.05°C @30°C/50mK

Table. 6-2 Specifications of visible image camera (Basler acA1920-48gc)

Sensor Type	CMOS (2/3") Color
Image resolution	1920x1200 pixel
Frame rate	7Hz (Max 50Hz)
Field of view	15° (H) x 9.4° (V)

Table. 6-3 Specifications of stereo camera (Stereo Labs ZED)

Number of cameras	2
Sensor Type	CMOS (1/3") Color
Image resolution	4416×1242 pixel (15fps) 3840×1080 pixel (30fps) 2560×720 pixel (60fps) 1344×376 pixel (100fps)
Field of view	90° (H) x 60° (V)
Base line	120mm

第3章で示した装置と同様に、赤外線サーモグラフィカメラおよび可視ビデオカメラは外部同期信号により同期されるが、ステレオカメラは外部同期機能がないために外部同期信号による同期ができない。本研究では、可視ビデオカメラとステレオカメラを制御・データ収録するソフトウェアで同期をとる手法を用いた。すなわち、ソフトウェアで可視画像とステレオ画像の取り込み時刻を認識し、最も時刻的に近いものを対応させる方法である。用いているPCのOSがリアルタイム性を保証できないこと、また実際に撮像した時点とソフトウェアが撮像画像を取り込んだ時点とは差があるため、本手法では最大数 10~100 数十ミリ秒の誤差があると考えられ、カメラに素早い動きがあった場合には大きな誤差を生む。将来は、外部同期機能のあ

るステレオカメラを選択するか、PTP (Precision Time Protocol) などの高精度な時刻同期の仕組みを取り入れる必要がある。本研究では、ステレオカメラを比較的動きの遅い実験で使用することを想定し、本手法を採用している。

以上の同期撮影装置で、可視画像と赤外線サーモグラフィの動画を同期撮影できるようにした。

6. 2. 2. V-SLAMによる赤外線サーモグラフィカメラ位置・姿勢の推定

6. 1. 節で述べたように本章では赤外線サーモグラフィカメラの位置・姿勢を求めることで赤外線反射成分を除去する。本節では、これらカメラの位置・姿勢を求めるために用いる V-SLAM 技術に関し説明する。

Visual SLAM 技術は、1990 年代に開発された Structure from Motion (SfM) 技術を基盤とし、発展してきたものである。例えば金出ら [1-14] による因子分解法と呼ばれる SfM の手法は、画像中の特徴点（物体のコーナ一点など）を追跡し、この特徴点の 2 次元動的な動きから、SVD を基礎とした計算手法で、カメラの 3 次元軌跡と特徴点の 3 次元位置を分離復元する手法である。しかし、これら SfM においてはトラッキングの失敗と累積誤差が問題であった。Visual SLAM はこの SfM 技術を基にしながら、上記の問題を解決するため以下の 4 つの処理を行うことで、大規模なビデオ映像をより安定、高速に処理できるようにしている。

- ①トラッキング
- ②マッピング
- ③再ローライゼーション
- ④グローバルマップ最適化

トラッキングは、ビデオ映像内の特徴点（物体のコーナ位置など）を追跡し、2 次元画像上での特徴点の移動経路を抽出する。Visual SLAM において追跡を行う特徴点検出には、ORB (Oriented FAST and Rotated BRIEF) [6-10] と呼ばれるアルゴリズムがしばしば使われる。

マッピングでは、トラッキング結果から SfM を用いて局所的な特徴点の 3 次元座標を求める処理で様々な方式が存在する。例えば得られた特徴点の 3 次元座標を元のビデオ映像に逆射影して検証・修正することで、さらに精度を高める方法などが提案されている。

トラッキングが特徴点を検出できないシーンの出現などにより失敗し途中で途切れると、その後トラッキングが復帰しても、トラッキング失敗前の座標系とは異なる座標系表現で、カメラ 3 次元軌跡と特徴点の 3 次元座標が記述される。これによりカメラ 3 次元軌跡は統合することができなくなるが、トラッキング失敗前の特徴点 3 次元座標と、失敗後の特徴点 3 次元座標を元画像に逆射影し、この画像から同一対象物の特徴点を認識すると、この情報を基に軌跡およびモデルともに再度当初の座標系表現に併合する。これを再ローライゼーションと呼

ぶ。

ここまでの処理は、ビデオデータの隣接するフレーム間を用いた処理であるため、推定されるカメラの3次元軌跡や特徴点の3次元座標には誤差が累積する。この累積誤差に関しては、ループクロージングと呼ばれる処理が用いられる。カメラが搭載された車両などが、環境を撮影して同一地点に戻ってきた場合、画像上の同一特徴点は同じ3次元座標になるように、カメラ3次元軌跡と特徴点3次元座標全体を再最適化する。新たに入ってきた画像は、その時点までの画像と照合され、同じ地点の画像と判断されたときに、この処理が発動される。

累積誤差を押さえるために、ポーズグラフと呼ばれるグラフ構造も導入されている。ポーズグラフでは、ノードに各フレームのグローバルカメラ姿勢および位置を保持するデータ構造である。ノード間を繋ぐエッジの重みは、どれだけ共通のもの（特徴点など）が見えているのか、トラッキング情報から得られた値などを基に計算される。新たな画像が撮像され、トラッキング及びマッピングされた後、ポーズグラフにノードやエッジが新たに追加される。適宜結びつきの強い（エッジ重みの大きい＝共通のものが多く見えている）複数のノードを用いて局所的な最適化が行われ累積誤差が解消される。

ここで、最適化にはバンドルアジャストメントが用いられる。バンドルアジャストメントとは、復元されているカメラ3次元軌跡とあらかじめキャリブレーションされたカメラ内部パラメータを用いて、画像上の特徴点から復元された3次元点をカメラ画像に射影し、元の特徴点2次元座標との差が最小になるようにする最適化方法である。この場合、カメラ3次元軌跡と特徴点の3次元座標が完全に復元されておれば（また、カメラ内部パラメータキャリブレーションが完璧であれば）、特徴点3次元座標の射影と元の特徴点は完全に一致する。これらの処理を総称し、グローバルマップ最適化と呼ぶ。

V-SLAMには、上記4つの処理の各々に様々なバリエーションが存在し、またカメラ側のバリエーションも、単眼カメラ以外にステレオカメラ、LiDARが併設されたデバイスなどがあり、これに対応した専用のV-SLAMアルゴリズムが存在する。単眼カメラを用いたV-SLAMでは計算されるカメラ移動量は絶対値が決定できないが、ステレオカメラを用いた場合には、そのベースラインの値から絶対値を求めることができる。

本研究では、赤外線反射成分を除去、抑制することを目的としているが、これを達成するために必要なカメラの位置および姿勢の時系列変化と対象物の3次元形状を、ここで説明したV-SLAMおよびSfMを用いて取得する。

6. 2. 3. V-SLAMおよびSfMを用いた赤外線サーモグラフィ画像の壁面への逆射影

対象平面の赤外線反射成分を除去、抑制する目的から赤外線サーモグラフィカメラを移動させることで、対象平面上での反射成分が現れる位置を移動させる。一方損傷による温度分布は放射される赤外線光であるため、その位置は対象平面上で移動しない。赤外線反射成分を除去、抑制するためには、赤外線サーモグラフィ動画内で移動する損傷による温度分布は静止させ、赤

外線反射のみを移動させたい。これを実現するためには、赤外線サーモグラフィを被写体である壁面上に逆射影すればよい。

一般的に、カメラの画像を被写体に逆射影するためには、カメラの位置および姿勢以外に被写体の3次元形状が必要となる。V-SLAMやSfMで復元される被写体の3次元点群からポリゴンモデルを生成し、ここに画像を逆射影することは理論的に可能である。しかし、パッシブステレオ視のみの3次元形状復元処理では、ジャンプエッジ部分にノイズが発生したり、テクスチャが不足する部分では3次元データが欠落したりするなど、逆射影には不適なデータしか得られない場合がある。本研究では、まず対象物を検査対象の建物に多い平面に限定することでこの問題を回避する。

対象を平面に限定した場合、復元された対象物の3次元点群から対象物平面の平面方程式を同定し、この方程式とカメラ内部パラメータおよび外部パラメータを用いてカメラ映像を対象物平面に逆射影する。ここでは赤外線サーモグラフィ画像の4端点で表される矩形とこれを壁面上に逆射影した矩形の対応から平面射影行列を行うためのホモグラフィ変換行列を求め、逆射影を実現する簡易な方法を用いた。手順を以下に示す。

(1) 対象平面の同定と赤外線サーモグラフィ画像4端点の逆射影

対象物を撮影した赤外線サーモグラフィ画像を対象物平面上に逆射影するホモグラフィ変換行列は、赤外線サーモグラフィ画像上の4点の座標と、それに対応する壁面上の4点の座標を得ることによって取得することができる。精度を確保するために、赤外線サーモグラフィ画像上のできるだけ離れた4点を選択することが望ましい。そのため赤外線サーモグラフィ画像の4端点で表される矩形4隅の位置が、対象平面上のどの位置に対応するかを推定すればよい。

可視カメラ画像に対するV-SLAMにより、Fig.6-3に示すように可視ビデオカメラのカメラモーショント、対象平面の3次元点群が復元される。

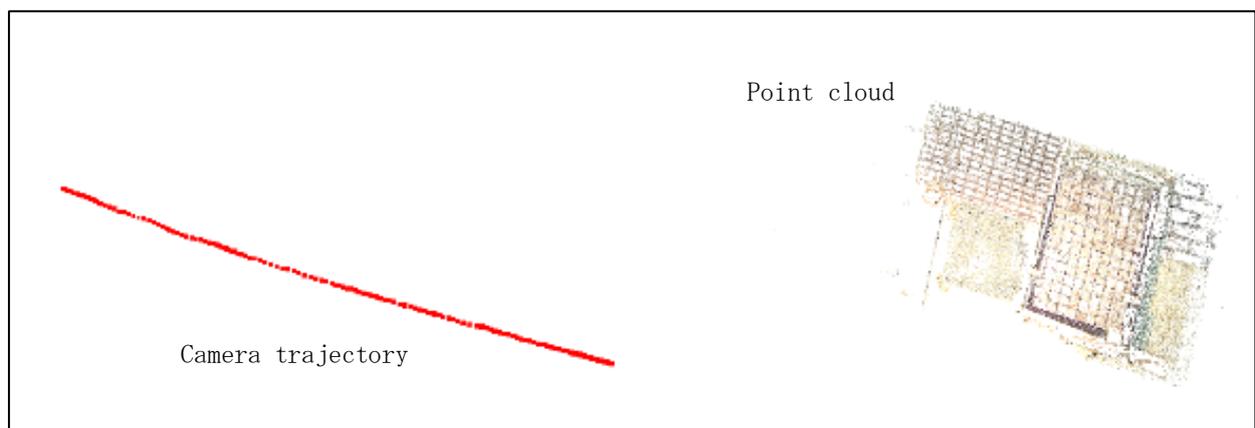


Fig.6-3 Result of V-SLAM (camera trajectory and point cloud of wall)

Fig. 6-3 に示した検査対象面の 3 次元点群から平面方程式を算出する。いま V-SLAM の結果として、グローバル座標系表現で対象物平面の 3 次元点群 $\mathbf{p}_i = [x_i \ y_i \ z_i]^T$ ($i = 1 \sim N$) と時刻 t での赤外線サーモグラフィカメラの姿勢・位置を表す 4 行 4 列のカメラ外部パラメータ行列 \mathbf{E}_t ($t = 1 \sim F$) が得られているとする。 N は点の数、 F は使用する可視ビデオ映像のフレーム数である。 \mathbf{E}_t の右上 3 行 3 列の部分行列は姿勢を表す回転行列 \mathbf{R}_t であり第 4 列の 1~3 行は位置を表すベクトル $\mathbf{m}_t = [x_t \ y_t \ z_t]^T$ である。

\mathbf{R}_t および \mathbf{m}_t は可視ビデオカメラの姿勢と位置を表すため、赤外線サーモグラフィカメラの姿勢と位置に変換する必要がある。キャリブレーションにより、可視ビデオカメラ座標系表現における赤外線サーモグラフィカメラのカメラ外部パラメータ行列 \mathbf{C}_{ex} を別途求め、グローバル座標系表現の赤外線サーモグラフィカメラ外部パラメータ \mathbf{E}_t^* を以下のように求める。

$$\mathbf{E}_t^* = \mathbf{E}_t \mathbf{C}_{ex} \quad (6-1)$$

\mathbf{E}_t^* から得られる赤外線サーモグラフィカメラの回転行列を \mathbf{R}_t^* , 位置を \mathbf{m}_t^* とそれぞれ表すこととする。一般的に点 (x_0, y_0, z_0) を通る平面方程式は、

$$a(x - x_0) + b(y - y_0) + c(z - z_0) = 0 \quad (6-2)$$

で表される。ここで、 $d = -(ax_0 + by_0 + cz_0)$ とすると、(6-2)式は

$$ax + by + cz + d = 0 \quad (6-3)$$

で表される。両辺を c で割って z を右辺に移項すると

$$\frac{a}{c}x + \frac{b}{c}y + \frac{d}{c} = -z \quad (6-4)$$

が得られる。ここで、 $\frac{a}{c} = \alpha$, $\frac{b}{c} = \beta$, $\frac{d}{c} = \gamma$ とすると、(6-4)式が点群に属する 3 次元点 \mathbf{p}_i すべてに対し成り立つから、以下の行列の方程式が成り立つ。

$$\begin{bmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_N & y_N & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ z_N \end{bmatrix} \quad (6-5)$$

(6-5)式を

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_N & y_N & 1 \end{bmatrix} \quad \mathbf{x} = \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{bmatrix} \quad \mathbf{b} = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ z_N \end{bmatrix} \quad (6-6)$$

と置くと、(6-5)式は

$$\mathbf{Ax} = \mathbf{b} \quad (6-7)$$

と表される。 \mathbf{A} は非正方行列であるため、SVD などを用いて疑似逆行列 \mathbf{A}^+ を求め、(6-7)式の両辺にこの疑似逆行列をかけることで未知数ベクトル \mathbf{x} を求める。求められた要素 α, β, γ から a, b, d は

$$\begin{aligned} a &= c\alpha \\ b &= c\beta \\ d &= c\gamma \end{aligned} \quad (6-8)$$

と表せ、(6-3)式に代入して、両辺を c で割ると

$$\alpha x + \beta y + z + \gamma = 0 \quad (6-9)$$

となる。 $x_0 = 0, y_0 = 0$ とし、(6-2)に代入して(6-9)と比較すると

$$\begin{aligned}
a &= \alpha \\
b &= \beta \\
c &= 1 \\
z_0 &= -\gamma \quad (6-10)
\end{aligned}$$

であることが分かる。以上から平面の法線 \mathbf{n}_p および平面上の点 \mathbf{q} は、

$$\mathbf{n}_p = \left[\frac{\alpha}{l_1} \quad \frac{\beta}{l_1} \quad \frac{1}{l_1} \right] \quad l_1 = \sqrt{\alpha^2 + \beta^2 + 1}$$

$$\mathbf{q} = [0, 0, -\gamma] \quad (6-11)$$

とすることができる。

次に、赤外線サーモグラフィカメラ射影中心から赤外線サーモグラフィ画像 4 端点に向かう視線の直線方程式を求める。Fig. 6-4 に示す射影中心から映像上 4 隅点に向かう方向ベクトル $\mathbf{c}_1 \sim \mathbf{c}_4$ は、

$$\mathbf{c}_1 = \left[\frac{-w}{2l_2} \quad \frac{-h}{2l_2} \quad \frac{f}{l_2} \right] \quad \mathbf{c}_2 = \left[\frac{w}{2l_2} \quad \frac{-h}{2l_2} \quad \frac{f}{l_2} \right] \quad \mathbf{c}_3 = \left[\frac{w}{2l_2} \quad \frac{h}{2l_2} \quad \frac{f}{l_2} \right] \quad \mathbf{c}_4 = \left[\frac{-w}{2l_2} \quad \frac{h}{2l_2} \quad \frac{f}{l_2} \right]$$

$$l_2 = \sqrt{w^2 + h^2 + f^2} \quad (6-12)$$

と表される。 w , h および f はそれぞれ画素単位の画像の縦横サイズおよび焦点距離である。以上は赤外線サーモグラフィカメラ座標系表現であるから、これらの方向ベクトルを赤外線サーモグラフィカメラの姿勢を表す回転行列を用いて以下のようにグローバル座標系表現に変換する。

$$\mathbf{c}_1^* = \mathbf{R}_t^* \mathbf{c}_1 \quad \mathbf{c}_2^* = \mathbf{R}_t^* \mathbf{c}_2 \quad \mathbf{c}_3^* = \mathbf{R}_t^* \mathbf{c}_3 \quad \mathbf{c}_4^* = \mathbf{R}_t^* \mathbf{c}_4 \quad (6-13)$$

これら赤外線サーモグラフィ画像 4 隅を通る視線軸と求められた対象平面との交点 \mathbf{p}_{c_m} ($m = 1 \sim 4$) は、平面の法線 \mathbf{n}_p , 平面上の点 \mathbf{q} , 視線軸方向ベクトル \mathbf{c}_m^* およびカメラの位置 \mathbf{m}_t^* から

$$\mathbf{p}_{c_m} = \mathbf{m}_t^* - \frac{\mathbf{n}_p \cdot (\mathbf{m}_t^* - \mathbf{q})}{\mathbf{n}_p \cdot \mathbf{c}_m^*} \mathbf{c}_m^* \quad (6-14)$$

として得られる。この交点は、Fig. 6-4に示すように、赤外線サーモグラフィ画像の画像矩形4隅点を検査対象平面上に逆射影した点である。

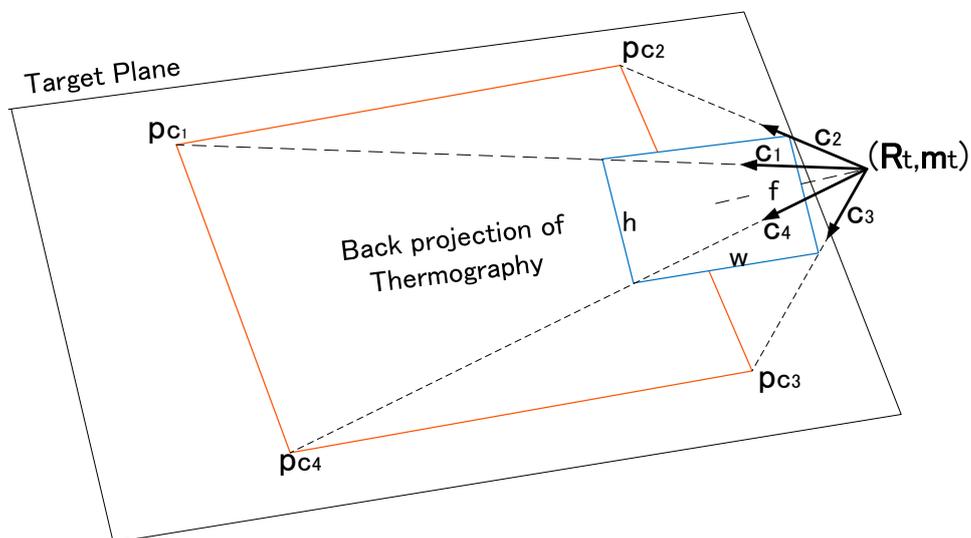


Fig. 6-4 Back projection of 4 points at the corners of infrared thermography

得られた p_{c_m} は3次元点であるから、平面上の2次元座標に変換する必要がある。そのために、平面上に2次元座標軸を生成する必要がある。今回は、カメラがほぼ直線状に移動すると仮定し次のように設定した。

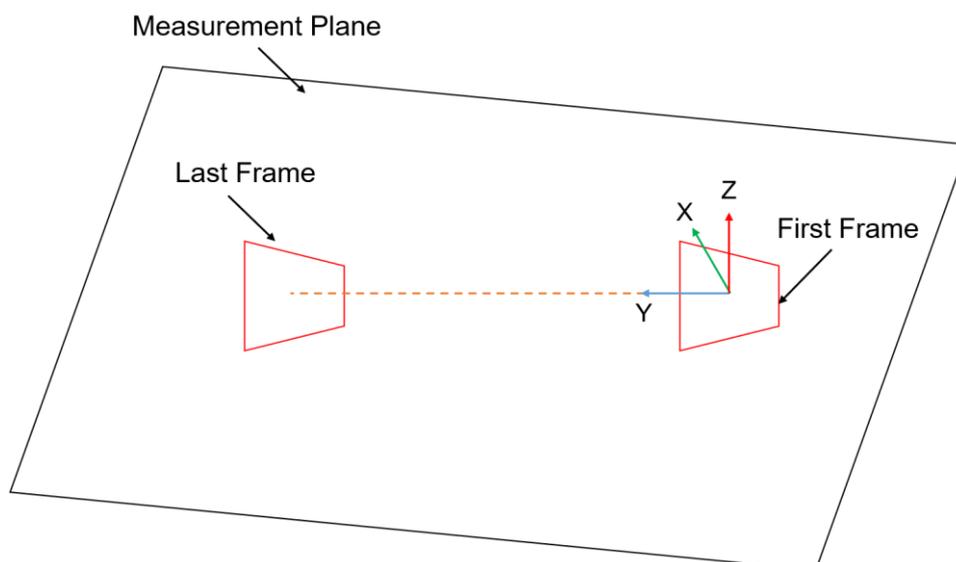


Fig. 6-5 Definition of Plane Coordinate System

Fig. 6-5で示したオレンジの台形は、Fig. 6-4で示した赤外線サーモグラフィ画像矩形を対象平面上に逆射影した四辺形であり、赤外線サーモグラフィカメラの移動に従い多数の逆射影四辺

形が生成されることになる。この四辺形中央の移動した方向を Y 軸とし、平面の法線とこの Y 軸に直行する方向を X 軸と定義する。将来複雑なカメラモーションとなった場合には、赤外線サーモグラフィ画像の逆射影した多数の四辺形の 3 次元点群から主軸を求めるなどして座標軸を設定すればよい。設定された Y 軸、X 軸の方向ベクトル \mathbf{A}_x , \mathbf{A}_y を用いて \mathbf{p}_{c_m} は

$$\mathbf{p}_{c_m} = X\mathbf{A}_x + Y\mathbf{A}_y \quad (6-15)$$

と表され、X, Y が平面座標値となる。ただし、最終的な合成画像の解像度に応じてこの値にスケール係数をかける必要がある。(6-15)式から 2 つの未知数 x_2 , y_2 に対して 3 次元座標に関する 3 つの方程式が得られるため、最小二乗的に解くことができ、平面上の 2 次元座標 X, Y を得ることができる。

(2) 逆射影ホモグラフィ変換行列の取得

(1) で得られた 4 点 \mathbf{p}_{c_m} とこれに対応する赤外線サーモグラフィの 4 端点座標 \mathbf{p}_m

$$\mathbf{p}_1 = (0,0) \quad \mathbf{p}_2 = (w,0) \quad \mathbf{p}_3 = (w,h) \quad \mathbf{p}_4 = (0,h) \quad (6-16)$$

を用いて、3. 2. 2. 節で説明した手法を用いて、平面射影変換を行うホモグラフィ変換行列を求める。(3-2)式で、赤外線サーモグラフィを平面射影変換すると、対象平面上で赤外線サーモグラフィカメラが捉えていた位置に逆射影される。これを連続赤外線サーモグラフィすべてに行うことで、画像合成が実行される。

6. 2. 4. 反射成分の抑制

本節では、実際の建物外壁検査において、大きな問題となる太陽光の鏡面反射成分を 6.

2. 3. で説明した処理を用いて除去・抑制する方法を提案する。

赤外線サーモグラフィカメラをゆっくりと移動させながら常にカメラの視野に対象領域を捉えるように撮影を行うと、同一領域に関する視線角度を変化させた画像が複数枚得られる。

Fig. 6-6 に、赤外線サーモグラフィカメラが $T=t_1$ から $T=t_3$ の位置に移動しながら、平面上の同一領域を捉えるように姿勢を変えて撮影している様子を示す。上方に大きな赤外線光源である太陽が存在するため、壁面で大きな赤外線反射を起こしている。このようにして得られた赤外線サーモグラフィを 6. 2. 3. 節で説明した手法で壁面に逆射影して、Fig. 6-6 赤矢印線上の赤外線強度プロファイルをとると Fig. 6-7 のようなものになると考えられる。Fig. 6-7 では水色線が $T=t_1$ 時点の、黄色線が $T=t_2$ 時点の、灰色線が $T=t_3$ 時点のプロファイルを示す。第

2章に示したように、赤外線サーモグラフィの光の強度は対象物体の温度による放射と鏡面反射成分であるため、Fig. 6-6のようにカメラを動かした場合、対象物の放射赤外線光は変動せず太陽の赤外線鏡面反射成分が赤矢印方向に移動する。Fig. 6-7ではこの反射成分の移動を反映して赤外線光強度のピークが、 $T=t1 \sim T=t3$ で右に移動している。

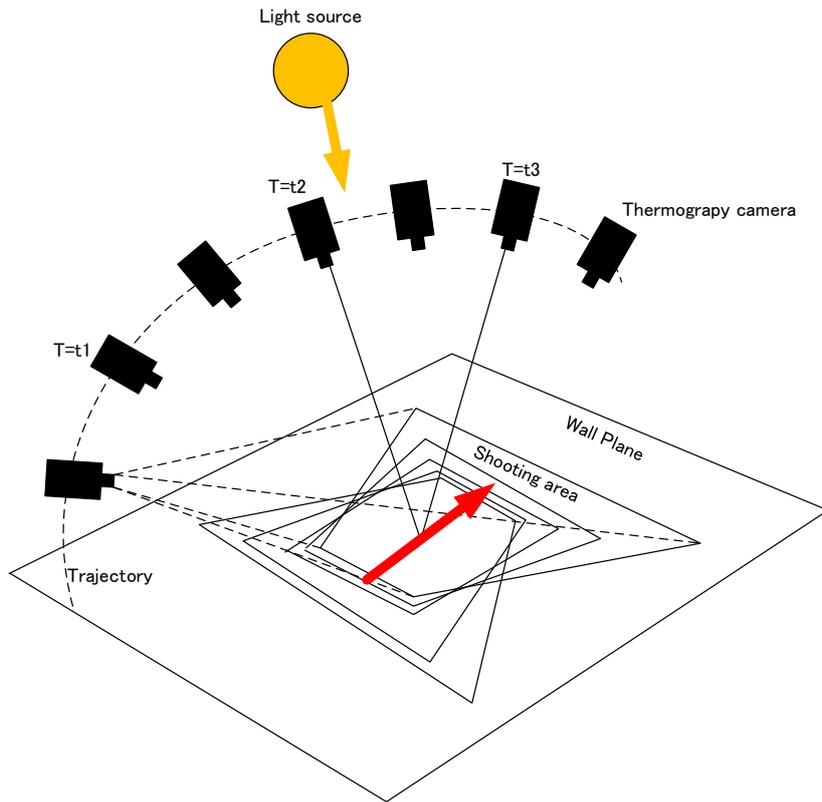


Fig. 6-6 Overlap shooting of wall plane

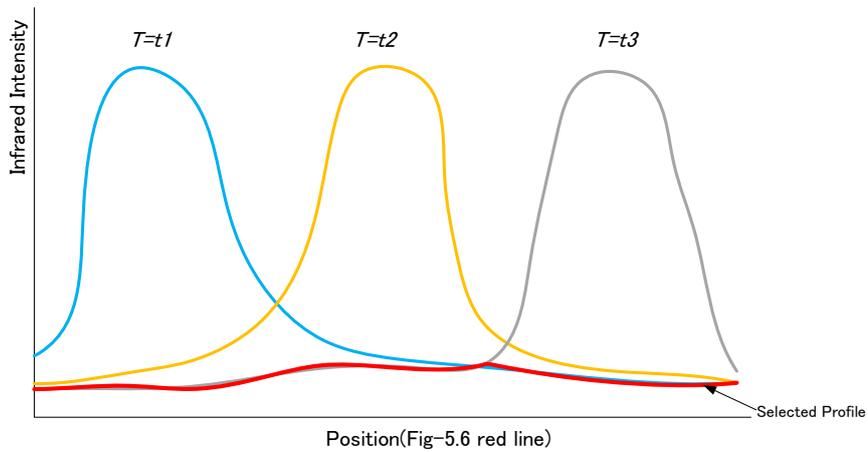


Fig. 6-7 Infrared Intensity profile

Fig. 6-7 の各プロファイルは対象平面が放出する赤外線強度に、赤外線反射成分が加算されているため、横軸それぞれの位置で3つのプロファイルが示す値のうち最も低い値を繋いだ赤線で示すプロファイルが赤外線反射光を排除した、放射赤外線プロファイルであると考えられる。

6. 3. 実験的検討

6. 2節で説明した原理を用いて、赤外線サーモグラフィを、可視ビデオ画像を用いた V-SLAM の結果を用いて対象平面に逆射影し、角度を変えて撮像された同一位置の複数の撮像データから反射赤外線光の影響を抑制する実験を行った。

まず、ステレオカメラによる V-SLAM を用いた実験を行い、6. 2. 4節で提案した検査壁面上の赤外線反射成分の除去、抑制手法が実験環境において有効であることを確認した。さらに、機器構成を少なくした単眼カメラでの SfM を用い、同様の処理が可能であることを確認した。

6. 3. 1. ステレオカメラを用いた V-SLAM を用いた赤外線反射成分の抑制実験

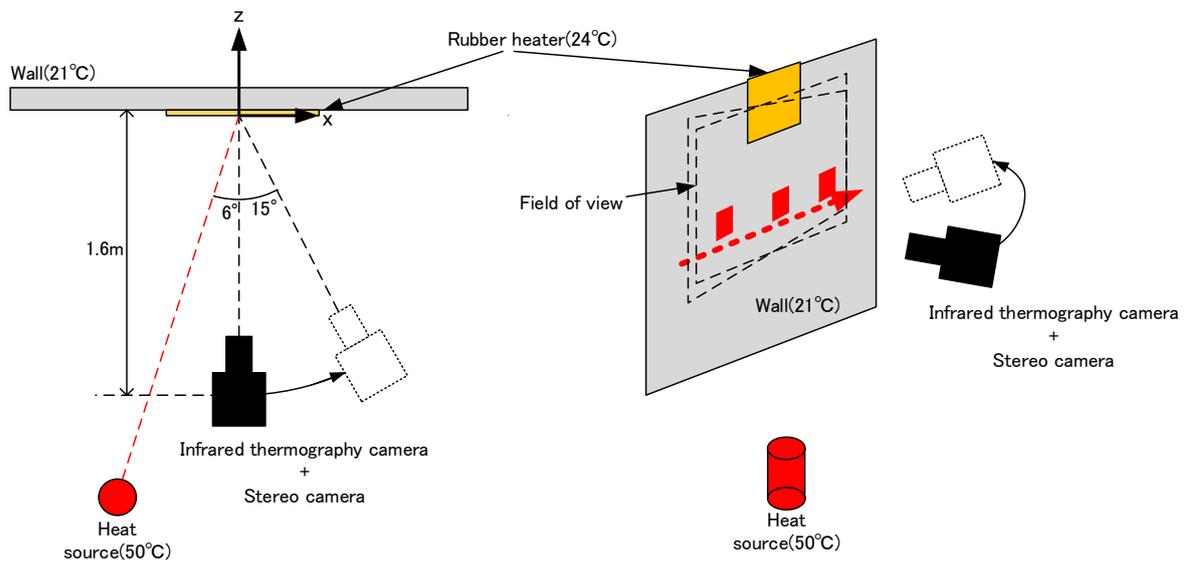
ステレオカメラによる V-SLAM を用いた赤外線計測に用いた実験装置を Fig. 6-8 に示す。赤外線サーモグラフィ (R300S, 日本アビオニクス製) に、ステレオカメラ (ZED, Stereolabs 製) を取り付けた。実験の概要図を Fig. 6-9 に示す。タイル壁に内在するはく離部が、赤外線サーモグラフィ画像において高温領域として検出されることを想定し、壁面にラバーヒータを貼りつけ局所的な高温領域を作ること、タイル壁のはく離欠陥による温度分布を模擬した。計測した壁面は Fig. 6-9 (b) に示す光沢のある素材であり、鏡面反射が起きやすくしている。座標系は壁面上を原点とし、地平面と平行で壁面平面上の右方向を x 軸正方向に、これに垂直な壁面内部に向かう方向を z 軸正方向とした。

周囲環境からの熱源の映り込みを再現するために、熱源反射が検査壁面に映り込む位置に円筒型ヒータを設置した。赤外線サーモグラフィカメラは初期状態で壁面正面に設置し、主視線軸が壁面原点に垂直に交差するように設定した。壁面からの離隔距離は 1.6m とした。ここから、離隔距離を保ったまま、原点を中心に円弧状に赤外線サーモグラフィカメラを移動させ、主視線軸が原点を向くように姿勢を変えながら撮影を行った。最終位置では、初期位置に対して主視線軸が 15° 傾いている。この間を 0.6° ごとに赤外線サーモグラフィカメラの撮影を行い、計 25 枚の赤外線サーモグラフィ画像を得た。この撮影中、ステレオカメラによる V-SLAM 計算はリアルタイムで行われており、一体化された赤外線サーモグラフィカメラの移動軌跡を記録している。

Fig. 6-10 に別途メジャーで計測された赤外線サーモグラフィカメラの位置と、V-SLAM による位置を比較するグラフを示す。誤差があるものの V-SLAM による計算で正しい位置が得られていることが確認できる。



Fig.6-8 Photograph of measurement system.



(a) Schematic illustration of experimental set up



(b) Photograph of measured wall and simulated defect.

Fig.6-9 Schematic illustration of experiment

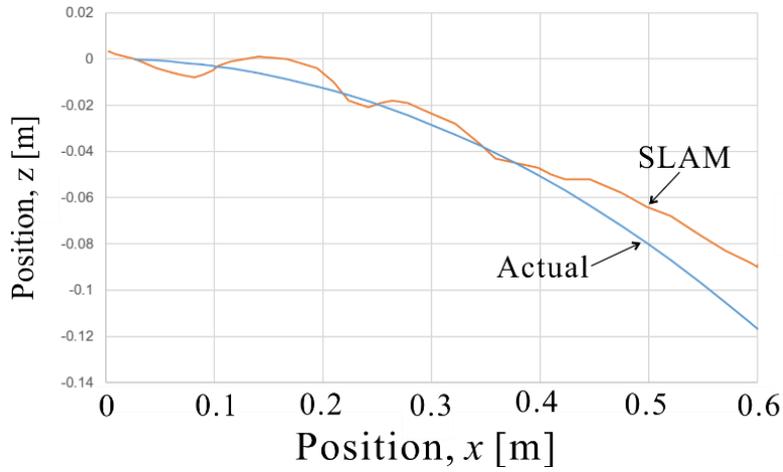


Fig. 6-10 Comparison of actual trajectory and estimated trajectory by V-SLAM

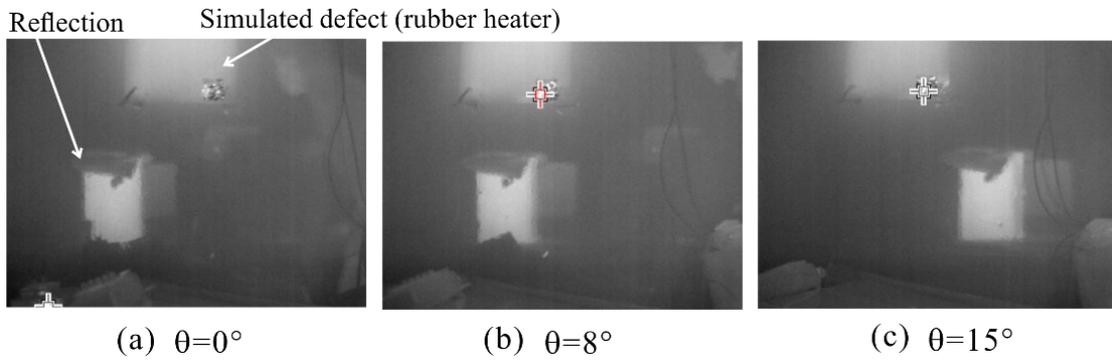


Fig. 6-11 Original infrared Thermography

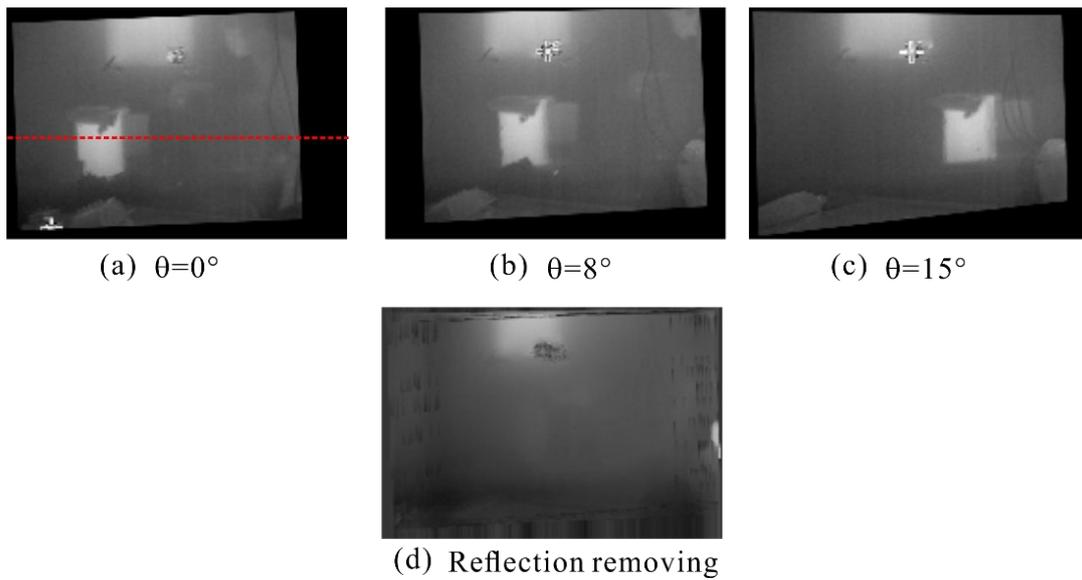


Fig. 6-12 Back-projection of infrared thermography on wall and result of reflection removal

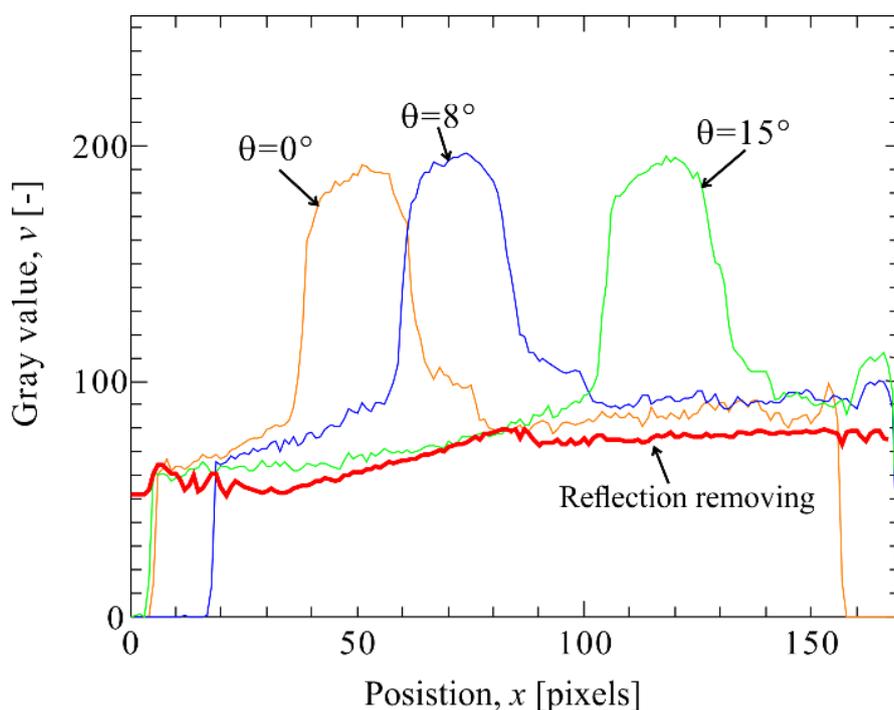


Fig. 6-13 Effect of reflection removal process

Fig. 6-9 で説明した実験装置を用いて行った撮影で得られた赤外線サーモグラフィ画像を、撮影角度ごとに Fig. 6-11 (a)～(c)に示す。Fig. 6-11 の上部に存在する明るい部分が壁面に設置されたシートヒータで、中央部の明るい部分は円筒状ヒータの鏡面反射像である。撮影角度の変動に伴い、中央部の円筒状ヒータ反射像が移動している様子が確認できる。反射像の強度が大きく実際の検査でこのような現象が起こった場合、剥離欠陥の存在に起因する局所的高温領域を正しく検出できないことが分かる。Fig. 6-11 (a)～(c)を、6. 2. 3節で説明した方法で、検査壁面に逆射影した画像をそれぞれ Fig. 6-12 (a)～(b)に示す。Fig. 6-11 (a)～(c)では、上部シートヒータの位置が左右に微妙に移動しているが、Fig. 6-12 図 (a)～(c)では同一位置に写っており、赤外線サーモグラフィカメラが位置、姿勢を変えても正しく逆射影ができていることが確認できる。一方、Fig. 6-12 (a)～(b)上で、円筒状ヒータの鏡面反射像が左から右に移動していることがわかる。

Fig. 6-12 (d)は (a)～(c)の画像を重ね合わせることで、6. 2. 4. 節で提案した鏡面反射成分除去を行った結果である。上部シートヒータの明るい領域はそのまま残り、円筒状ヒータの鏡面反射が除去されていることが確認できる。Fig. 6-13 は、Fig. 6-12 (a)上の赤鎖線水平線位置での赤外線サーモグラフィ値のプロファイルを撮影角度ごとにグラフとしたものである。赤線が鏡面反射成分除去後の値である。以上のことから、6. 2. 4. 節で提案した手法が有効であることが確認できる。

6. 3. 2. 単眼カメラによる SfM を用いた赤外線反射成分の抑制実験

本項では、単眼の可視カメラを用いた SfM からカメラの位置，姿勢を求め，6. 2. 4. 節で提案した方法で反射成分抑制実験を行った結果について述べる。

Fig. 6-13, Fig. 6-14 に，実験の概要図および撮影対象の壁鬼面の写真を示す．熱源を反射するアルミホイルとパネルヒータを並べ，左側にハロゲンランプを設置し，アルミホイル上で反射が起こるように角度を調節した．このような配置で Fig. 6-13 のようにカメラを円弧状に移動させながらアルミホイルとパネルヒータを撮影した．この試験では，Fig. 6-2 (b) のステレオカメラの画像は用いずに，赤外線サーモグラフィカメラと可視カメラで同期撮影されたデータを用いた．6. 3. 2. のように等角度での撮影は行わず，等時間間隔での撮影が行われている．Fig. 6-2 (b) のカメラヘッドを台車上の三脚に固定し，Fig. 6-14 のように円弧状に移動し，対象物が中央に捉えられるようにカメラヘッドの角度を連続的に変えながら撮影を行っている．Fig. 6-16 および Fig. 6-17 に撮影された赤外線サーモグラフィと可視画像の例を示す．

Fig. 6-16(a) は，ハロゲンランプの赤外線の反射が起こっていない時点の赤外線サーモグラフィ画像である．一方，Fig. 6-16(b) は，左下赤矢印アルミホイル部分で反射が発生している．Fig. 6-17(a)，(b) は Fig. 6-16(a)，(b) に対応する同期撮影された可視画像である．この可視画像を用いて単眼 SfM 計算を行った．本実験においては SfM として精度が高く，頑健であることが知られている Schonberger らの開発した COLMAP アルゴリズム[6-11]を用いた．Fig. 6-18 に，COLMAP アルゴリズムによるカメラの復元 3 次元軌跡と対象面の復元 3 次元点群を示す．

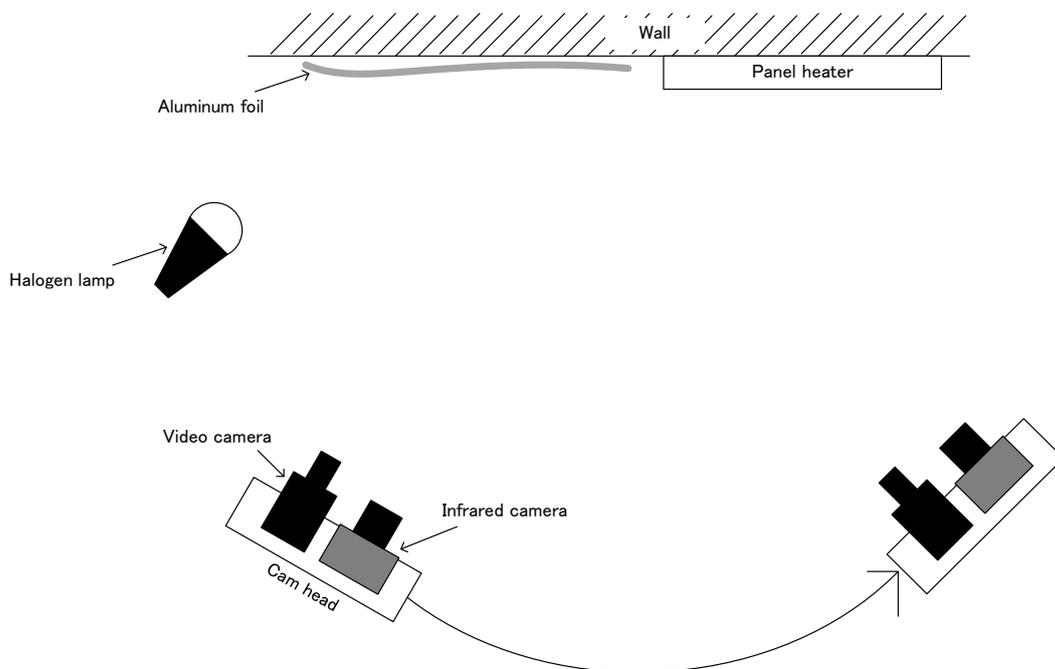


Fig. 6-14 Illustration of experimental set up (monocular SfM)

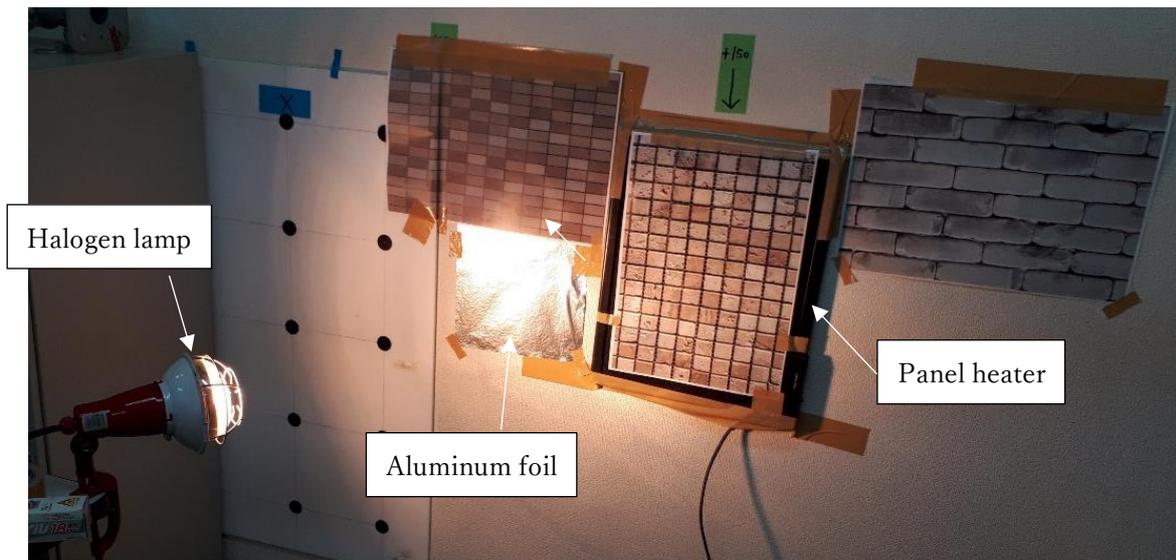


Fig.6-15 Photograph of experimental set up

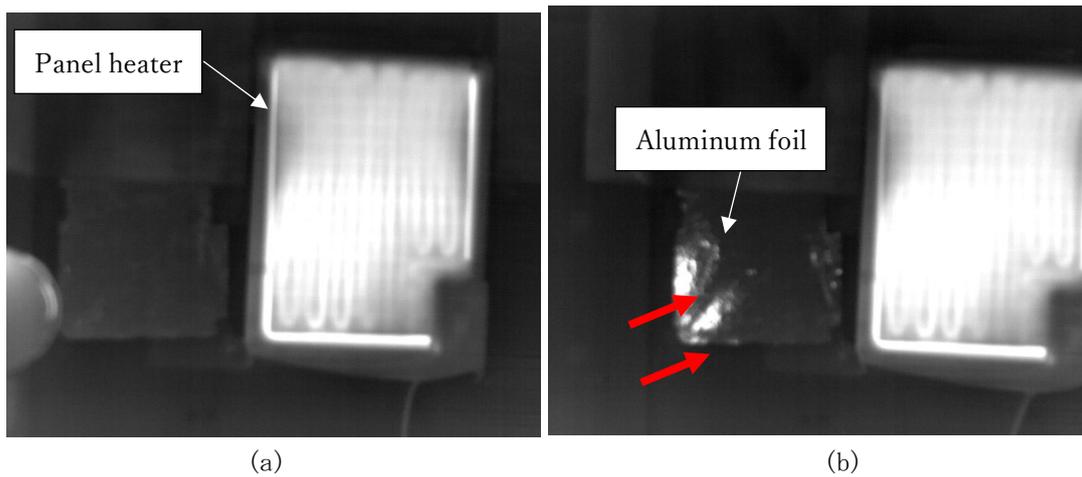


Fig.6-16 Infrared thermography image of aluminum foil and panel heater



Fig.6-17 Visible image of aluminum foil and panel heater

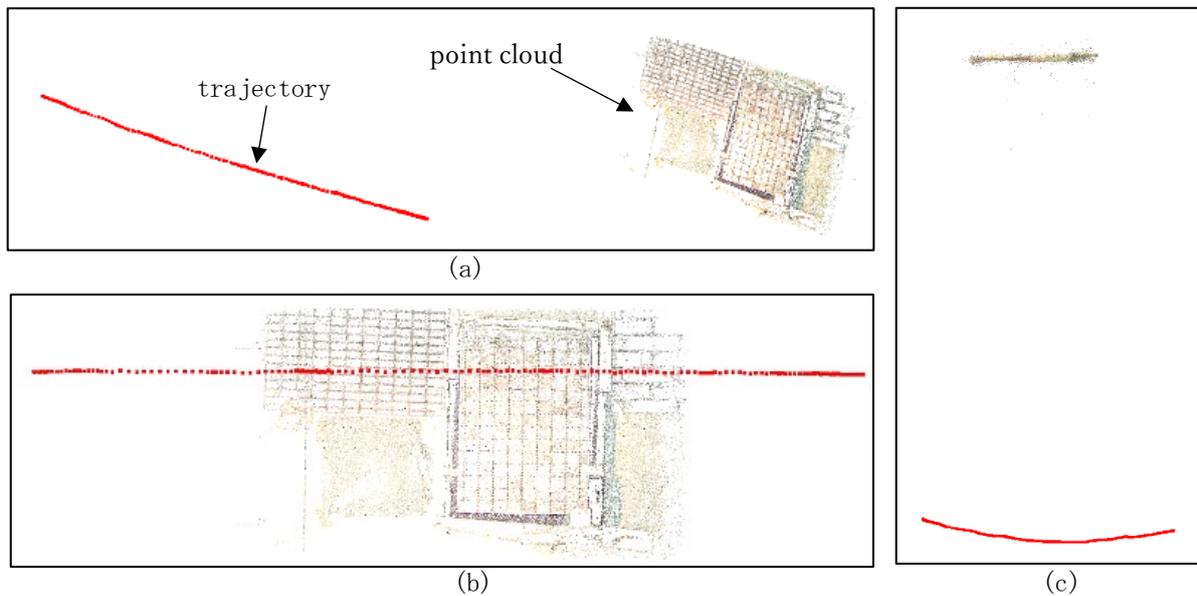


Fig.6-18 Result of SfM(COLMAP) (camera 3D-trajectory and 3D-point cloud)

Fig. 6-19 は、撮影された複数の赤外線サーモグラフィ画像に対して、Fig. 6-18 に示した単眼 SfM の結果を用い、6. 2. 節で説明した処理を用いて、合成および反射赤外光成分の抑制を行った結果を示す画像である。



Fig.6-19 Result of reflection removal using monocular SfM

Fig. 6-19 の赤矢印部分を Fig. 6-16 (b) と比較すると、反射成分がかなり低減していることが確認できる。

6. 4. 結 言

本章では、まず赤外線サーモグラフィカメラの移動軌跡と対象物平面を、V-SLAM および SfM を用いることで推定し、対象平面に赤外線サーモグラフィ逆射影することで同一位置を異なる角度から多重撮影できるようにする手法を示した。直接赤外線サーモグラフィ画像を V-SLAM などに用いると、第2章で考察したように、赤外線サーモグラフィでは高精度な位置情報を取得するための空間周波数の高い画像が得られないため、赤外線サーモグラフィカメラと可視ビデオカメラを同期撮影できるシステムを製作し、可視ビデオカメラで行った V-SLAM および SfM で算出された3次元幾何情報を赤外線サーモグラフィに反映させ、対象平面に逆射影が行えることを確認した。また、この機能を利用して、対象壁面上を移動する赤外線反射成分の除去・抑制を行う手法を提案し、室内実験においてその基本的な性能を確認した。さらに、ステレオカメラによる V-SLAM だけではなく、単眼 SfM においても同様の効果が実現できることを確認した。ステレオカメラは、装着された2つ以上のカメラのベースライン距離が固定されているため、対象物までの距離が大きく変わると、ステレオ視を有効に行えないことがある。単眼においても同様の機能が果たせることは、将来的な実運用において自由度を向上させるものと考えられる。

本研究で行った、可視画像による V-SLAM および SfM を援用する手法は、提案した反射成分除去以外でも、ドローンによる建物外壁やプラント構造物外面に対する赤外線サーモグラフィ計測で広く応用できる有効な手段である。例えば、赤外線サーモグラフィにおいては、同一対象物でも赤外線サーモグラフィの距離および角度が変われば値が変わってしまうが、対象物の距離、形状情報があればカメラと対象物の3次元的な距離、方向などが捉えられることで正確に補正することができるものと考えられる。

参考文献

- [6-1] 徳臣佐衣子, ” 打音法を用いたコンクリート壁面の非破壊検査装置の開発”, 日本機械学会九州支部講演論文集, pp. 143-14, 2011.
- [6-2] 鴨井新生, ” 赤外線サーモグラフィ検査技術の動向”, 検査技術, pp. 41-45, 2004.
- [6-3] 谷川恭雄ほか, ” サーモグラフィによる RC 構造物の内部欠陥探査”, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 10, No. 2, pp. 349-354, 1988.
- [6-4] Sven-Ake. Ljungberg, ” Infrared survey of 50 buildings constructed during 100 years : thermal performances and damage conditions”, Thermosense XV II, SPIE Vol. 2473.
- [6-5] 国土交通省住宅局建築技術審査委員会, “はく落による災害防止のためのタイル外壁, モルタル塗り外壁診断指針”, 1990.
- [6-6] BELCA, ” タイル外壁及びモルタル塗り外壁定期的診断マニュアル(改訂第2版)”, 2002.

- [6-7] 佐藤大輔, ” 赤外線サーモグラフィによるコンクリート構造物検査技術の高精度化に関する研究” , 大阪大学博士論文, 2008.
- [6-8] 阪上 隆英, 阿瀬 弘紀, 佐藤 大輔, 鄭 子揚, “5-8 μm 波長帯に感度を有する赤外線カメラの実用化に関する研究 実構造物における反射低減効果および剥離検出性の確認” , 日本建築学会, 材料施工, pp. 609-610, 2018.
- [6-9] 梅干野晁, ” 新たに試作した波長域に感度を有する熱画像と熱収支計算による外壁剥離検知手法に関する基礎的研究” , 日本建築学会計画系論文報告集, 第 450 号, 1993.
- [6-10] Ethan. Rublee, Vincent. Rabaud, “ORB: An efficient alternative to SIFT or SURF” , Proceedings of the 2011 International Conference on Computer Vision, pp. 2564-2571, 2011.
- [6-11] Johannes. L. Schonberger, Jan-Michael. Frahm, “Structure-from-Motion Revisited” , Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition(CVPR), pp. 4104-4113, 2016.

第7章 結 論

7. 1. まとめ

本論文ではこれまで可視画像で用いられてきた平面射影変換，デジタル画像相関(DIC: Digital Image Correlation)，SfM(Structure from Motion)あるいはV-SLAM(Visual-Simultaneous Localization and Mapping)などの画像処理・解析手法を赤外線画像に応用することにより，赤外線サーモグラフィ計測の精度，分解能，安定性の高度化を行うための新しい可視・赤外ハイブリッド計測法の開発に関する基礎研究ならびに応用研究を行った．以下に本論文の各章の内容について総括するとともに，得られた結論をまとめて示す．

第2章では，可視画像と赤外線サーモグラフィの画像生成原理の違いに起因する両画像計測法の特徴の違いについて考察・検討し，可視画像で開発された技術を赤外線計測あるいは可視・赤外ハイブリッド計測に応用するにあたり，いかなる手法を応用するのが適当かについて，計測対象に応じた検討を行った．以下に第2章の検討結果をまとめる．

- (1) 可視画像では，物質表面の拡散反射率の変化の分布や対象物表面の3次元構造に起因する局所法線方向の変化などにより，拡散反射強度が変化するため，生成される画像にはコーナーやエッジなど対象物の位置や形状に関する特徴量を多く含む．
- (2) 赤外線サーモグラフィでは，拡散反射成分が少なく，変化のほとんどは温度変動および放射率に依る．温度平衡状態では温度変動は少なく，実験においては正確な温度が計測できるように，一般に放射率を極力1に近づけるような疑似黒体化処理が対象物に施される．一方，フィールドでの計測においては，ある程度の放射率の変動は存在するが，放射率の角度依存性が大きくないために，対象物平面の3次元構造の情報が赤外線画像のコントラスト変化に反映されにくく，生成される画像は対象物の位置や形状に関する特徴量が少ないものとなる．
- (3) 可視画像も赤外サーモグラフィ画像も，3次元物体を結像レンズ系で撮像素子平面に射影する原理は同じであるため，射影幾何変換に関しては同様の処理が可能である．
- (4) 以上のことから，位置情報を正確に捉えるような処理に可視画像を援用し，これを赤外サーモグラフィに反映する手法が有効であると考えられる．

以降の各章では，(4)の方針に沿い，赤外線サーモグラフィ計測の高度化を図る研究を行った．

第3章では，金属試料片の繰り返し引張試験において，赤外線サーモグラフィカメラと可視ビデオカメラの同期撮影装置を製作し，可視画像のDIC(Digital Image Correlation)の情報を赤外線サーモグラフィに反映する手法を開発した．第2章の検討において述べているように，

赤外線サーモグラフィ画像のみを用いた場合には正確な位置情報を抽出することが難しく、赤外線サーモグラフィ画像に直接 DIC を実行することが困難であるため、赤外線サーモグラフィ画像と時間的・空間的に完全に同期させた可視画像を援用する手法をとった。以下に結果をまとめる。

- (1) 時間的・空間的に完全に同期させた赤外線サーモグラフィカメラおよび可視ビデオカメラによる撮像システムを疲労試験のための負荷信号発生装置と連動させることにより、疲労試験における熱弾性応力計測、散逸エネルギー計測および DIC 変位分布計測を同時に行うことができる計測システムを開発した。
- (2) 平面射影変換を利用し、可視画像の DIC の結果を正確に赤外線サーモグラフィに反映し、赤外線サーモグラフィから負荷に伴う変位・変形による見せかけの温度変動（エッジ効果）を取り除く手法を開発した。この手法は、事前にカメラの設置位置・姿勢を機械的に計測する必要がないために、実験効率を高めることができる。
- (3) 可視画像の DIC の結果を正確に赤外線サーモグラフィに反映できることから、可視画像 DIC から求めた熱弾性温度値と赤外線サーモグラフィから得た温度の差分を算出することで、塑性変形による散逸エネルギー発生挙動を評価できるようになった。

第4章では、金属試料片に対する繰り返し引張試験において、撮影した赤外線サーモグラフィによる時系列温度分布変化に関する計測データから、作用応力分布図を生成する新たな手法を提案した。可視画像の処理結果や他センサの情報を赤外線サーモグラフィに反映するのではなく、可視画像処理で用いられる数的手法を応用することで、既存の手法の欠点を克服するアルゴリズムを開発した。以下に結果をまとめる。

- (1) 応力分布図を求める既存手法の自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィ法ではサーモグラフィ上の特定画素位置での時系列変化が参照信号として用いられ、この取得位置がその精度に影響を与える問題があった。これに対し、参照信号を用いず特異値分解(SVD: Singular Value Decomposition)を用いることで赤外線サーモグラフィ画像全画素の時系列変化情報から応力分布と負荷信号の時系列変化を分離復元する新たな手法を提案した。
- (2) 疲労試験機による金属試料片の繰り返し引張試験の赤外線サーモグラフィを用い、提案手法と従来の自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィ法の比較を行い、提案手法の結果がより精度が高く、参照信号の取得位置に影響されない安定した手法であることを確認した。

第5章では、コンクリート橋梁においてアスファルト舗装下に存在する、コンクリート床版に内在する欠陥を、アスファルト舗装面の温度分布から検出する赤外線サーモグラフィ非破壊検査法を高度化するため、赤外線サーモグラフィの連続撮影画像の自動合成手法と、画像精度

改善の手法を提案した。赤外線サーモグラフィでも射影幾何変換の手法は使用できるため、斜めに取り付けられた赤外線サーモグラフィの平面射影変換を用いたオルソ画像生成などを行った。以下に結果をまとめる。

- (1) 高速で走行する車両に搭載した赤外線サーモグラフィカメラで、アスファルト舗装面を可視カメラおよび非接触速度計と連動して撮影する装置を開発した。
- (2) 平面射影変換により、撮影赤外線サーモグラフィのオルソ画像を作成し、速度計情報を用いて1枚の連続した路面赤外線サーモグラフィ画像に自動合成する手法を開発した。
- (3) 赤外線サーモグラフィのオルソ画像の合成に伴う画像解像度の不整合領域の解消および露光時間の不足に伴うノイズを抑制する手法を提案した。

この路面赤外線サーモグラフィ撮影装置および合成プログラムは、実際の高速道路のコンクリート床版の維持管理に試験運用されており、アスファルト舗装下のコンクリート床版上面の変状をスクリーニングするシステムとして利用され、舗装下のコンクリート床版上部の変状検知の精度が向上していることを確認している。

第6章では、建物外壁検査を想定し、屋外計測で問題となる太陽光などの赤外線反射成分の低減手法に関する基礎研究を行った。この反射光低減手法では、赤外線サーモグラフィの正確な位置合わせが重要である。近年可視画像の分野で発展してきたSfMやV-SLAMを用いれば、移動するカメラの位置、姿勢を取得できるが、第2章で述べたように位置情報に係る特徴量を多く持たない赤外線サーモグラフィ単独では困難であった。この研究では可視カメラを赤外線サーモグラフィカメラと一体化し、第4章同様可視画像のSfMやV-SLAMの情報を赤外線サーモグラフィに反映させる手法を適用した。以下に結果をまとめる。

- (1) 赤外線サーモグラフィカメラ、可視ビデオカメラ、ステレオカメラを一体化したカメラヘッドと、これらの同期撮影装置を製作した。
- (2) 上記同期撮影の画像データを用いてステレオカメラのV-SLAM結果あるいは単眼カメラによるSfM結果を用いて、撮影角度の異なる同一箇所の赤外線サーモグラフィを対象物平面に逆射影し、赤外線反射成分を低減する手法を提案した。
- (3) 実験室内において壁面で赤外線反射が発生する環境を作り、上記同期撮影装置で移動撮影をおこなった。このデータを用い、提案手法により赤外線反射成分が消去・抑制されることを確認した。

以上の研究結果から、赤外線サーモグラフィ画像と可視画像の特性を検討し、それぞれに最適な画像処理を施し、正しく組み合わせることで、赤外線サーモグラフィ計測を高度化できることを確認し、新たな赤外線サーモグラフィ計測および可視・赤外ハイブリッド計測手法として提案した。

7. 2. 本研究の今後の展開について

第3章～第6章で報告した各研究の今後の展開に関し、筆者が所属する企業の主業務である高速道路構造物に関する各種計測の観点から述べる。

第3章と第4章で報告している手法は実験室内データに対して行われているが、高速道路に多数存在する鋼製橋部材の異常応力集中部や疲労き裂の検出およびその進展の遠隔計測に応用されることが期待される。このような実運用に向けての課題には以下のようなものがある。

- (1) 熱弾性温度変化を捉えているため、車両の走行による大きな負荷が発生しないと、応力解析ができない。
- (2) 対象鋼部材は管理路や鋼製橋下の用地から撮影できないものもあり、ドローンなどでの撮影データからの検出が望まれる。

(1) に関しては、橋上の車両走行時に鋼製橋がたわむことを利用し、第3章で製作した同期撮影装置の可視カメラによる対象部材の微細な変位を検知しその前後の赤外線サーモグラフィを自動選択する手法が考えられる。

(2) に関しては、ドローン撮影において、カメラの位置が揺れることが問題である。カメラ姿勢は、近年性能を向上させてきた姿勢安定装置により安定させることが可能だが、3次元的位置を安定させることは大変困難である。このような場合、第6章で提案している手法で、赤外線サーモグラフィの3次元的位置合わせを正確に行い、従来の自己相関ロックイン赤外線法や、第4章で提案した手法を用いて異常応力集中部やき裂の検知、その進展などが計測できるようになれば、鋼製橋の保全業務に係るコストを下げ、また現場作業時の危険も大きく削減できるものと期待される。

第5章で報告した赤外線サーモグラフィを用いたアスファルト舗装下のコンクリート床版変状検知システムに関する今後の課題を以下に列挙する。

- (1) 自転車タイヤ痕を避けるためにカメラを45°傾けているが、ノイズ抑制などで画質が向上し微小な温度変動が明確になることで、目立つようになっており、二値化処理による変状自動検知に影響を与える。
- (2) 道路横断方向に赤外線サーモグラフィ値が異なり、とくに路側帯近くでは急激に値が低くなることで、二値化処理による変状自動検知に影響を与える。
- (3) 二値化処理による変状自動検知では精度が低く、目視による確認・修正作業が必要であるが、実運用ではデータが大量になっており作業費用が膨大になる。

(1) の問題に関しては、筆者が所属する企業において新たな計測車両の製作を現在計画中

で、新車両では赤外線サーモグラフィカメラを車両前頭に設置して、前方車両との距離を開けることで克服する予定である。

(2) に関しては、現在原因の解析がおこなわれている。第2章の検討によれば、放射率は角度に大きく依存しないが、ある角度を超えると急激に減衰する。一方、本システムに採用している赤外線サーモグラフィカメラでは、事前に黒体をレンズ前に設置して、カメラへの赤外線入射角による感度の変化は補正できるようになっている。よって、(2)の現象はアスファルト舗装面の放射率の角度依存性に起因している可能性があり、後処理で補正を加えるなどが検討されている。一方、新たな計測車両では赤外線サーモグラフィカメラを2台とすることで、入力画像の時点でこの影響を低減することも検討されている。

(3)の問題はより頑健で検知精度の高い自動処理を開発する必要がある。第3章で報告しているように、アスファルト舗装の可視画像も同期撮影撮影されており、赤外線サーモグラフィと同一位置の可視画像をペアとして機械学習による変状検知の手法を研究することが考えられる。また、本計測手法は対象物に温度勾配が必要なため、外気温などの環境条件に大きく影響される。自動処理が正しく運用されるためにも計測環境に関する情報の収集と整理が重要である。

第6章に関しては、報告した手法を用いて、今後赤外線サーモグラフィカメラの手持ち撮影やドローン搭載での撮影を行い、実際の建物の外壁診断ができるようなシステムの開発を目指している。ここでは赤外線反射成分削除・抑制の原理確認を行ったが、実システムに向けて以下の課題が存在する。

- (1) 本論文では対象を1平面に限定したが、実運用を考慮して将来には視野内に多数の平面が存在する場合や、また平面でない場合に対処する必要がある。
- (2) 可視画像によるV-SLAMやSfMの情報を赤外線サーモグラフィカメラに反映するため、2カメラ間の位置・姿勢の較正が必要である。赤外線サーモグラフィカメラと可視カメラでは良好に撮像できる較正板の性質が異なっていること、解像度と画角が大きく異なることなどの条件下で精度の高い較正ができる手法を確立する必要がある。
- (3) 本論文では逆射影で位置合わせの行われた赤外線サーモグラフィの同一画素位置の情報を用いて赤外線反射成分を低減する手法は簡易な方法が採用されているが、実験室内の環境で一定の条件で効果が確認されただけであり、さらに検討する必要がある。

(1)に関しては、V-SLAMおよびSfMで算出された対象物表面形状の3次元点群から複数の平面抽出処理や、3次元ポリゴンモデルへの逆射影処理を行う必要がある。

(2)の問題は、本研究において較正時に可視ビデオカメラのレンズを一旦交換して、赤外線サーモグラフィカメラとほぼ同じ画角とすることで回避している。この状態でカメラ間の位置・姿勢の較正を行った後、レンズを戻し可視ビデオカメラの焦点距離などのカメラ内部パラ

メータの較正を行っている。しかしこの方法ではレンズを交換した時点で光軸方向が変わってしまう恐れがある。較正に用いるキャリブレーション板と較正ソフトウェアを改造することで、レンズを交換せずに2カメラのカメラ外部・内部パラメータを同時に求める手法を開発する必要がある。

(3) に関しては、現在撮影した画像上の同一位置の画素値のうち最も小さい値を採用する手法がとられているが、この手法ではノイズにより極端に低い値が入力された場合、間違った値が選択される。このような問題を解決するために、撮像された同一位置の画素値群から物体の放射光による値と、反射光が加算された場合の値をクラスタリングして放射光クラスの平均を採用する方法などが考えられる。

謝 辞

本研究を進め、まとめるにあたり神戸大学大学院工学研究科 阪上隆英教授ならびに塩澤大輝准教授には研究内容や進め方、論文作成・投稿にあたり多岐に渡ってご指導頂き、心より感謝申し上げます。

第4章のSVDを用いた応力分布図作成手法に関しては、米国カーネギーメロン大学 金出武雄教授より数学的な原理から論文の組み立て、表現の仕方までご指導いただき深く感謝申し上げます。

本研究を遂行するにあたり、阪上研究室のみなさん、筆者が所属するNEXCO 西日本イノベーションズ IT 技術部の同僚達の多大な協力を得ました。ここに、敬意を表するとともにお礼申し上げます。

また図作成や校閲などに協力し、日々の心を支えてくれた妻 舞に感謝を表します。

最後に、このような機会を与えてくれたNEXCO 西日本イノベーションズ株式会社にも感謝を申し上げます。

2021年 7月

内田 勇治

神戸大学博士論文「可視画像を援用した赤外線サーモグラフィ計測の高度化に関する研究」全
111頁

提出日 2022年1月21日

本博士論文が神戸大学機関リポジトリKernel にて掲載される場合、掲載登録日（公開日）はリ
ポジトリの該当ページ上に掲載されます。

© 内田 勇治

本論文の内容の一部あるいは全部を無断で複製・転載・翻訳することを禁じます。