Kobe University Repository : Kernel

PDF issue: 2025-07-15

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。

(別紙様式3)

論文内容の要旨

氏　名　内田　勇治

専　攻　工学研究科　機械工学専攻

論文題目（外国語の場合は，その和訳を併記すること。）

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

指導教員　阪上　隆英

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コンクリート・鋼製橋においては，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．

赤外線サーモグラフィを用いる点検手法は遠隔・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．遠隔計測においては有力な赤外線サーモグラフィであるが，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た．本論文では，可視ビデオカメラの援用による赤外線サーモグラフィ計測の高度化の研究を行い，これらのニーズに対応できる手法を提案する．

第２章では，可視画像と赤外線サーモグラフィの違いを検討し，可視画像で開発された技術を導入するにあたりどのような手法をとればよいかを検討した．測光学的な見地から画像生成のモデルを検討し，位置に係る高精度な画像特徴量の検出には向いていないことなどを考察した．以降の章では，これらの検討から各種手法の方針を得ている．

第３章では，実験室内に置ける金属試料の繰り返し引張試験においてノイズの原因となる試料の微細な変動・変形を補正するため，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ではサーモグラフィ値変動の主因が放射率の変動に依存しており，得られる赤外サーモグラフィに大きな空間周波数が見込めないこと，赤外線サーモグラフィカメラ自体があまり大きな分解能を持っていないことなどから，赤外サーモグラフィで DIC を実行することは困難であった．赤外サーモグラフィカメラと同期された可視カメラで捉えた金属試料の微細な変位・変形を DIC により検出し，これを平面射影変換で正確に赤外サーモグラフィに反映した．この動き補償により試料上の同一点の温度変動を正確にとらえることができるようになった．また，可視画像と赤外サーモグラフィの画素単位の対応が取れるようになり微小な温度変動を抽出できることから，従来研究では困難であったチタン合金の散逸エネルギ評価が可能となった．

第４章では，金属試料に対する繰り返し引張試験を撮影した赤外サーモグラフィの時系列変動から応力分布図を生成する新たな手法を提案している．従来応力分布図を生成するために，赤外サーモグラフィのみから得ることができる自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィ法が用いられてきた．この手法では対象物を一定時間捉えた連続赤外サーモグラフィ以外に，赤外サーモグラフィ上特定の位置での赤外線サーモグラフィ値の時系列変動を，参照信号として用いる必要があった．しかし，温度変動の少ない位置を参照信号取得位置として選択すると，正しい応力分布図を得られない問題があった．提案手法では参照

信号を用いず，SVD（singular value decomposition）を用い，赤外サーモグラフィ全体から応力の基となる負荷信号を復元し，従来手法より精度の高い応力分布図を安定して生成する手法を提案した．ここでは，すでに確立された可視画像処理を赤外線サーモグラフィ計測で援用するのではなく，可視画像処理で用いられた数理的手法を応用することで，既存の手法の欠点を克服する手法を提案した．

第５章では，アスファルト舗装下コンクリート橋床版内部欠陥を検出するため，走行車両から撮影された赤外線サーモグラフィの連続撮影画像を高精度に自動合成する手法を提案した．また，その赤外サーモグラフィの重複部分を積算平均化することで画質改善する手法も提案した．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でも射影幾何学的な画像処理の手法はそのまま使用できるため，斜めに取り付けられた赤外線サーモグラフィカメラの撮像画像を平面射影変換してオルソ画像を生成し，高精度速度計から得られた各フレーム画像のシフト量を用いて自動合成している．

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の基礎研究を行った．この反射光低減手法では赤外線サーモグラフィを正確に対象壁面上に逆射影して位置を合わせなければならない．そのためには，赤外サーモグラフィカメラの３次元的な移動軌跡，姿勢の時系列変動を捉えることが必要であった．近年可視画像の分野で発展してきた SfM(Structure from Motion)や V-SLAM(Visual-Simultaneous Localization and Mapping)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章で検討したように空間周波数が低い赤外線サーモグラフィに適用することは困難であった．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た撮影装置を製作し，第３章同様可視画像の情報を赤外線サーモグラフィに反映させる手法をとった．まず，SfM を用いて可視カメラの移動軌跡，姿勢の時系列変動と，対象物平面を取得する．予めキャリブレーションされた可視カメラと赤外線サーモグラフィカメラ間の位置・姿勢情報を用いて，赤外サーモグラフィカメラの移動軌跡，姿勢の時系列変動を計算した．その後，撮影角度の異なる同一壁面の赤外線サーモグラフィを壁面に逆射影することで正確に位置合わせをおこなった．反射赤外線は，撮影角度を変えることで壁面上を移動していくため，位置合わせされた赤外線サーモグラフィ上の同一箇所のサーモグラフィ値が一時的に大きくなることを利用して排除した．

以上の研究から、赤外線サーモグラフィと可視画像の特徴を考慮し、最適な手法で可視画像を援用することで従来困難であった赤外線サーモグラフィ計測の様々な高度化が行えることを示した．

（別紙１）

論文審査の結果の要旨

氏名	内田　勇治		
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		
審査委員	区　分	職　名	氏　　名
	主　査	教授	阪上　隆英
	副　査	教授	田中　克志
	副　査	准教授	塩澤　大輝
	副　査	カーネギーメロン大学 ワイタカー記念全学教授	金出　武雄
	副　査		

要　　旨

本論文には，近年道路構造物等の経年化インフラ構造物の維持保全において有用な非破壊検査法である赤外線サーモグラフィ試験法を，分解能，精度，効率，適用性などの様々な面において高度化させるため，可視画像情報処理を赤外線計測と同期・融合させることを基礎に，従来に例を見ない先進的な赤外線サーモグラフィ計測法を開発するための基礎研究の成果，ならびに開発した計測法を社会実装すなわち実用化するために行った研究成果が収められている．

緒論においては，本研究の背景となっている，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っている現状，特に高速道路のコンクリート・鋼製橋における維持保全の問題点，この解決のために期待されている赤外線サーモグラフィ計測法の特徴や現況について述べ，本研究の重要性および位置づけを説明している．

第２章では，可視画像と赤外線サーモグラフィの計測原理および特徴における違いについて検討し，可視画像で開発された様々な画像データ解析技術を赤外線計測に応用するにあたり，測光学的な見地からの問題点の抽出と，それらを解決するために必要な解析手法について検討している．特に，位置に係る高精度な画像特徴量の検出に関して，可視画像と赤外線画像の違いについて詳細に検討し，以下の各章における新しい計測法開発のための各種手法の方針を得ている．

第３章では，実験室内における金属試料の繰り返し引張試験において，ノイズの原因となる試料の微細な変動・変形を補正するため，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，可視画像のデジタル画像相関（DIC: Digital Image Correlation）の情報を，赤外線サーモグラフィ計測に反映する手法を開発している．赤外線サーモグラフィ画像においては，赤外線輝度値の変化の主因が放射率の変化にあるため，赤外サーモグラフィ画像に大きな空間周波数が見込めないこと，赤外線サーモグラフィのセンサ自体があまり大きな分解能を持っていないことなどから，赤外サーモグラフィで DIC を実行することは困難であった．そこで，赤外サーモグラフィカメラと同期された可視カメラで捉えた金属試料の微細な変位・変形を DIC により検出し，これを平面射影変換で正確に赤外サーモグラフィに反映した．この動き補償により，試料上の同一点の温度変動を正確にとらえることができるようになった．また，可視画像と赤外サーモグラフィの画素単位の対応が取れるようになり，塑性変形に起因する散逸エネルギーによるごく微小な温度変動の分布を，DIC から導かれた熱弾性温度変動情報と赤外サーモグラフィ計測値の差をもとに検出することを実現させている．

第４章では，金属試料に対する繰り返し引張試験を撮影した赤外サーモグラフィの時系列変動から応力分布図を生成する新たな手法を提案している．従来法では，応力分布図を生成するために，赤外サーモグラフィのみから得ることができる自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィ法が用いられてきた．この手法では対象物を一定時間捉えた連続赤外サーモグラフィ以外に，赤外サーモグラフィ上特定の位置での赤外線サーモグラフィ値の時系列変動を，参照信号として用いる必要があった．しかし，温度変動の少ない位置を参照信号取得位置として選択すると，正しい応力分布図を得られないという問題があった．本研究で提案する手法では，参照信号を用いずに SVD（singular value decomposition）を用いることで，赤外サーモグラフィ全体から応力の基となる負荷信号を復元し，従来手法より精度の高い応力分布図を安定して生成する手法を提案した．

氏名	内田　勇治

第５章では，アスファルト舗装下コンクリート橋床版内部欠陥を検出するため，走行車両から撮影された赤外線サーモグラフィの連続撮影画像を高精度に自動合成する手法を提案している．同時に連続した時系列赤外サーモグラフィ画像の重複部分を自動的に抽出し，これらを積算平均化することで，赤外線サーモグラフィ画像の画質を改善する手法も提案している．具体的には，赤外線サーモグラフィ計測においても，射影幾何学的な画像処理の手法はそのまま使用できるため，斜めに取り付けられた赤外線サーモグラフィカメラの撮像画像を平面射影変換してオルソ画像を生成し，高精度速度計から得られた各フレーム画像のシフト量を用いることで画像の自動合成ならびに積算平均化処理を実現させている．

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の基礎研究を行っている．この反射光低減手法では，赤外線サーモグラフィ画像を正確に対象壁面上に逆射影して位置を合わせなければならない．そのためには，赤外サーモグラフィカメラの３次元的な移動軌跡，姿勢の時系列変動を捉えることが必要である．近年可視画像の分野で発展してきた SfM(Structure from Motion) や V-SLAM(Visual- Simultaneous Localization and Mapping)を用いれば，移動するカメラの位置，姿勢を取得できるが，空間周波数が低い赤外線サーモグラフィ画像に適用することは困難であった．そこで，本研究では可視カメラを赤外線サーモグラフィと一体化した撮影装置を製作し，第３章同様可視画像の情報を赤外線サーモグラフィに反映させる手法をとった．まず，SfM を用いて可視カメラの移動軌跡，姿勢の時系列変動と，対象物平面を取得する．予めキャリブレーションされた可視カメラと赤外線サーモグラフィ間の位置・姿勢情報を用いて，赤外サーモグラフィの移動軌跡，姿勢の時系列変動を計算した．その後，撮影角度の異なる同一壁面の赤外線サーモグラフィを壁面に逆射影することで正確に位置合わせを行った．反射赤外線は，撮影角度を変えることで壁面上を移動していくため，位置合わせされた赤外線サーモグラフィ上の同一箇所のサーモグラフィ値が一時的に大きくなる現象を利用することで排除した．

本研究では，すでに確立された可視画像処理を赤外線サーモグラフィ計測にただ援用するのではなく，上記のように，可視画像処理で用いられた数理的手法を応用することで，既存の手法の欠点を克服するとともに，可視画像情報処理を赤外線サーモグラフィ計測に融合することにより，全く新しい赤外線サーモグラフィ計測法を提案し，従来法に比べて分解能，精度，効率，適用性などの様々な面において赤外線サーモグラフィ計測法の高度化を実現させている．

本論文に収められている研究成果は，いずれも新しい高度な赤外線サーモグラフィ計測法の提案・開発を通じて，道路構造物，建築物等の経年化インフラ構造物の維持保全に資する優れた研究であり，本研究成果は，機械工学分野における，非破壊評価工学，計測工学に関する学術的価値の高い重要な知見を得たものとして価値ある集積である．提出された論文は工学研究科学位論文評価基準を満たしており，学位申請者の内田勇治は，博士（工学）の学位を得る資格があると認める．