

令和 6 年 6 月 14 日現在

機関番号：32660

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2020～2023

課題番号：20H04204

研究課題名(和文) 無添加蓄光現象の高速撮像による動的蓄光マーカーの創生とその応用

研究課題名(英文) Creation and application of dynamic phosphorescent markers by high-speed imaging of additive-free phosphorescent phenomena

研究代表者

早川 智彦 (Hayakawa, Tomohiko)

東京理科大学・研究推進機構総合研究院・准教授

研究者番号：10747843

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,100,000円

研究成果の概要(和文)：従来のマーカーは特徴量や事前の色素塗布を前提としており、トラッキング対象や条件が制約されていた。本研究では、対象に特徴点が存在しない状況でも動的にマーカーを発現させる方法として、紫外線照射時に生じる蓄光現象を利用し、高精度かつ高速な動的蓄光マーカーを開発した。関連した光軸制御技術の開発をはじめ、雀の剥製へのトラッキングや粉体の軌跡の可視化にも成功し、マーカーの事前準備なしに、低侵襲で低コストなりアルタイムトラッキング手法を確立した。更に、レーザー加熱とサーモカメラによる動的熱マーカーを開発し、最大33個のマーカーを同時に生成できるほか、任意の形状や情報をコード化したマーカー生成を可能とした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本手法は対象に紫外線光を照射することで生じる蓄光現象を用い、高速ビジョン・高速トラッキングを用いてミリ秒単位のトラッキングを可能にした全く新しい技術であり、学術的独自性が高い。また、有機物に活用可能なことから、幅広い分野での利用が見込まれる。更に、本トラッキング手法が蓄光だけでなく、熱にも利用可能であることを確認したため、応用可能性が広がった。これまでのマーカー取付の事前準備や特徴点を必要とした課題を解決しただけでなく、高速イメージングを活用することで、ミリ秒単位のマーカーを任意に生成することが可能になり、様々な分野で応用される基盤的な光学トラッキング技術だと考えられる。

研究成果の概要(英文)：Conventional markers are based on the assumption of feature values and prior dye application, and the tracking target and conditions are restricted. In this study, we developed a high-precision and high-speed dynamic phosphorescent marker that utilizes the phosphorescence phenomenon that occurs when irradiated with ultraviolet light as a method to dynamically generate a marker even when there are no feature points on the object. In addition to the development of related optical-axis control technology, we also succeeded in tracking a stuffed sparrow and visualizing powder trajectories, establishing a minimally invasive and low-cost real-time tracking method without prior preparation for marker use. Furthermore, we developed a dynamic thermal marker using laser heating and a thermo-camera, which can generate up to 33 markers simultaneously and can also generate markers with arbitrary shapes and information coded on them.

Translated with DeepL.com (free version)

研究分野：計測工学

キーワード：トラッキング 蓄光 動的マーカー 高速撮像 サーモカメラ ガルバノミラー

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

貼り付け・埋め込み型マーカーによるトラッキングは精度が良いものの、貼り付け・埋め込みによるシステム構築速度やコストに問題がある。また、AI、IoT やビッグデータ解析といった学習・予測型のトラッキングでは実時間性を考慮していないため、高速性を要求されるアプリケーションでの使用が困難であった。このような背景のもと、研究代表者はマーカーの貼り付け等ができない高速道路において、構造物自体の特徴点をリアルタイムに時速 100km 移動時に高速イメージング・高速トラッキングすることで得られる車両の移動速度を、ガルバノミラーの往復回転動作で補償し、0.2mm のひび割れの検出を成功させてきた[Hayakawa et al. 2017]。一方、実用化を鑑みると、竣工してすぐのトンネル壁面は汚れを含まず、近年低公害車の一般化により壁面が汚れる状況が減っていることなどから、特徴量を前提としたトラッキングでは撮像時の速度検出精度が保証できない。また、研究代表者らは、予め壁面に塗布したフォトクロミック色素に紫外光を当てることにより、高速・高精度に動的なマーカーを生成する高速ドローイング技術を構築し[Mikawa et al. 2019]、トラッキングの自由度を著しく向上させたが、溶剤の塗布を前提としているため、用途が限定される点が問題であった。そこで、本研究課題ではいかに貼り付け・埋め込みをせずにマーカーを出現させるか、並びにそのマーカーを利用してどこまでトラッキングを高速・高精度にできるかについて探求する必要があると考えた。

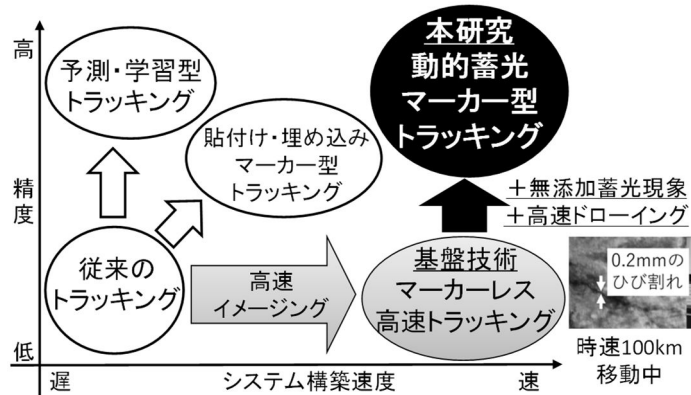


図1 本研究の狙い

移動速度を、ガルバノミラーの往復回転動作で補償し、0.2mm のひび割れの検出を成功させてきた[Hayakawa et al. 2017]。一方、実用化を鑑みると、竣工してすぐのトンネル壁面は汚れを含まず、近年低公害車の一般化により壁面が汚れる状況が減っていることなどから、特徴量を前提としたトラッキングでは撮像時の速度検出精度が保証できない。また、研究代表者らは、予め壁面に塗布したフォトクロミック色素に紫外光を当てることにより、高速・高精度に動的なマーカーを生成する高速ドローイング技術を構築し[Mikawa et al. 2019]、トラッキングの自由度を著しく向上させたが、溶剤の塗布を前提としているため、用途が限定される点が問題であった。そこで、本研究課題ではいかに貼り付け・埋め込みをせずにマーカーを出現させるか、並びにそのマーカーを利用してどこまでトラッキングを高速・高精度にできるかについて探求する必要があると考えた。

2. 研究の目的

前記の問題点を解決するために、本研究では研究代表者の基盤技術である高速イメージング・高速トラッキング・高速ドローイングの研究を基盤技術とし、無添加でも紙や布、コンクリート等への紫外線照射時にりん光が生じる蓄光現象を利用することを特徴とする。これにより、貼り付け・埋め込みをせずに白色無地の対象物であっても動的蓄光マーカーによるトラッキング技術を確立することを本研究の目的とする。従来、蓄光現象といえば市販されている蓄光材や蓄光シートといった人為的に蓄光物質を集積されたものが一般的であったが、本来蓄光材とされていない物質に紫外光を照射しても、照射停止後に数ミリから数十ミリ秒程度の間、継続的に照射位置でりん光が見える蓄光現象が生じることを利用し、マーカーとして利用することを考案した。例として、375nm のUVレーザーを普通紙に対して数百ミリ秒照射後、12ミリ秒経過後でも見られるりん光を図2に示す。この現象は市販の紫外線LEDハンドライトによる対象の照射時において、肉眼でも確認することができ、図2のように高感度カメラを用いることでより明瞭に確認することができる。また、従来の蓄光材と同様に、りん光の輝度およびりん光の継続時間は、物質の種類、照射する光の強さ、照射時間によって変化することが定性的にわかっており、紙に限らず様々な素材でも蓄光現象が起きることがわかっている(図3)。

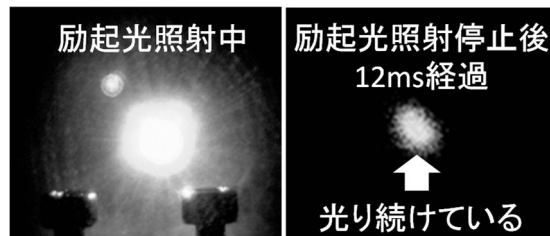


図2 普通紙における蓄光現象

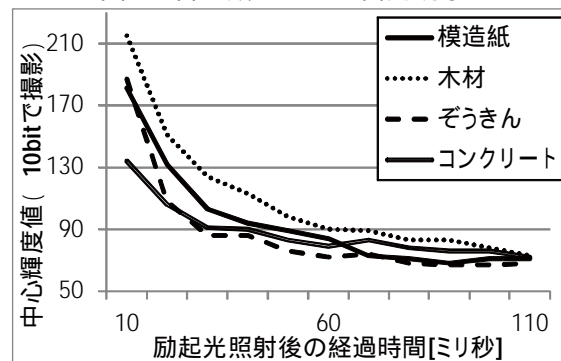


図3 各素材のりん光輝度が減衰する様子

この蓄光現象を利用することで、移動している撮像対象に紫外線を照射し、りん光が継続している時間において、高速ビジョンを用いたミリ秒単位の移動軌跡トラッキングが可能になると考えられる。このとき、減衰特性が事前把握できていれば、りん光の軌跡及び輝度の情報から、過去のどの時刻にどの位置に対象が存在していたのか、導出することが可能である。

一方、マーカーとしてトラッキングに用いるためには、一点だけの照射だけでは用途が限定さ

れてしまうため、多点や直線状・矩形状・円形状等の図形パターンの生成も重要な課題と考えられる。

これらの結果及び構想は、これまでの課題を解決し、全く新しい光特性を活かした機能創出が可能である。さらには、高速イメージングを活用することで、ミリ秒単位のマーカーを任意に生成することが可能になり、センシングにおいて学術的独自性の高い、世界トップレベルの成果が見込める。また、本研究の応用先として、特に、従来マーカーが必要とされてきた移動体のトラッキング全般に活用可能と考えられるため、技術の波及効果は高いと想定される。

3. 研究の方法

動的蓄光マーカーの特性と動的蓄光マーカーのトラッキングへの応用性を明らかにしていく。

(1)各素材のカメラによるりん光寿命測定と減衰曲線のモデリングを行う。りん光を動的蓄光マーカーとして用いるためには、高速ビジョンでイメージングを行い、特徴量として検出できる必要がある。また、高速ビジョンの感度に適したりん光の光量とするため、励起光の光源の光量についても検討が必要である。そこで、励起光照射時の画像を取得し、パラメータを検討した上でりん光を高感度な高速ビジョンで測定する。

(2)使いたいときに任意の形状で描画可能な動的マーカーの作成を行う。ここではマーカーの特性として励起光による照射時間を t 、照射後のマーカーの発光持続時間を t と m の変数で表すことができるマーカーについて基本設計と定式化を行う。特に、マーカーを高時間分解能で用いる際にはカメラの露光時間が限られるため、カメラで撮像可能な発光持続時間も制約を受けるものと考えられる。単一ドットマーカーだけでなく、研究代表者の基盤技術である高速ドローイングの知見を活かし、二次元パターンを対象に描くシステムを構築する。

(3)特徴を持たない個体移動のトラッキングとして、撮影対象に励起光を照射することで、リアルタイムに動的マーカーを発現させ、トラッキングを実施する。マーカーの位置を画像処理によってリアルタイムに読み取り、位置の変化に応じた処理機構を一軸のガルバノミラー等の光軸制御装置で実装することで、対象のトラッキングを連続的に可能とすることを旨とする。

(4)動的蓄光マーカーをバイオイメージングへ応用できるか検証するため、動物の剥製をリニアアクチュエータで動かしている状態で、対象のトラッキングを行う。この際、通常の貼り付け・埋め込みマーカーを付けにくく、かつ移動速度が速い対象として、鳥類の剥製を想定する。撮影フレーム毎にトラッキングを実施することで、移動速度をリアルタイムに計算する。

(5)流体・粉体の蓄光トラッキングとして、粉体に対し、励起光照射時に蓄光を観察することで、粉体の軌跡をトラッキング可能であることを確かめる。結果として、マーカー無しに流路を明らかにすることが見込まれる。

4. 研究成果

従来のマーカーは特徴量や事前の色素塗布を前提としており、トラッキング対象や条件が制約されていた。本研究では、対象に特徴点が多く存在しない状況でも動的にマーカーを発現させる方法として、無添加で紫外線照射時に生じ続ける発光現象を利用し、高精度かつ高速な動的蓄光マーカーを開発した。

まずカメラによる各素材のりん光寿命測定を測定するため、高速ビジョンで照明照射後の発光現象のイメージングを行い、画像としての特徴量を得ることに成功した。次に、得られた発光特性を活用し、任意のタイミングで描画可能な単一ドット動的蓄光マーカーの作成に関する定式化を行った。また、ガルバノミラーやデフォーダブルミラー、アクリル立方体を利用した光軸制御手法を新たに提案した。これらの成果から、対象に特徴点が多く存在しない状況でも、動的にマーカーを発現させる方法を明らかにした。開発したマーカーを実際のトラッキングやバイオイメージングに用いるため、雀の胸や翼から採取した羽毛に対し、りん光寿命およびりん光スペクトルを取得した結果、羽毛の部位によって寿命とスペクトルが変化することが確かめられた。併せて、開発したトラッキングシステムを用い、雀の剥製のトラッキングを行った(図4)。リニアアクチュエータ上のスズメの剥製を左右に移動させ、発現した蓄光マーカーの動きを左右それぞれでとらえた結果を図5に示す。これにより、特徴量を含む画像およびマーカー装着のための事前準備なしに、低侵襲で低コストなリアルタイム生体追跡法を確立した。また、図6のように、砂糖に対して励起光を照射することで、励起された砂糖の軌跡を明らかにした。

さらに、当初の研究計画にはない成果として、動的蓄光マーカーの基本設計を基に、動的蓄光マーカーの開発を行った。赤色半導体レーザーと高速サーモカメラを用い、特徴点のない黒い紙に赤色半導体レーザーを照射し加熱することで、動的マーカーを生成する。温度が下がった後、再びレーザー照射を行い、繰り返しマーカーを生成する。更に、2軸ガルバノミラーで照射点を制御することで、2次元平面上に任意の形状や情報をコード化したマーカーを生成できる。実験では、最大33個のマーカーを同時に生成することが確かめられた。また、連続描画により、線や円などの識別可能な文字や図形を描画できることがわかった(図7)。その他、本研究で得られた知見を用い、温度画像と可視光画像に対応可能なマーカーを開発したほか、シルクスクリーン印刷による作成手法を考案し、剥落の懸念がないマーカーの有用性を示し、光軸制御技術とあわせてインフラ点検において技術的に応用可能であることを示した。

これらの成果を継続して発展させ、国際論文誌に採択されたほか、解説論文、国際学会、国内学会での発表を行った。本手法は紫外線光を照射することで生じる蓄光現象を用い、高速ビジョ

ン・高速トラッキングを用いてミリ秒単位のトラッキングを可能にした全く新しい技術であり、学術的独自性が高い。また、紙や布、生体に活用可能なことから、幅広い分野での利用が見込まれる。更に、本トラッキング手法がりん光だけでなく、熱にも利用可能であることを確認したため、応用可能性が広がった。これまでのマーカー取付の事前準備や特徴点を必要とした課題を解決しただけでなく、高速イメージングを活用することで、ミリ秒単位のマーカーを任意に生成することが可能になり、様々な分野で応用される基盤的な光学トラッキング技術だと考えられる。

今後の展望としては、さらなる物性調査による多様な素材への応用や、実際のトラッキングへの応用を予定している。例えば、生物は3次元であるため、1次元トラッキングのみでは照射位置によって奥行き方向が変化し、蓄光マーカーにピン트가合わず、トラッキングが困難になる可能性がある。本研究期間では一次元的な動きのみを扱ったため、3次元の動きにも対応可能とすることで、生体トラッキング等に活用可能となることが期待される。

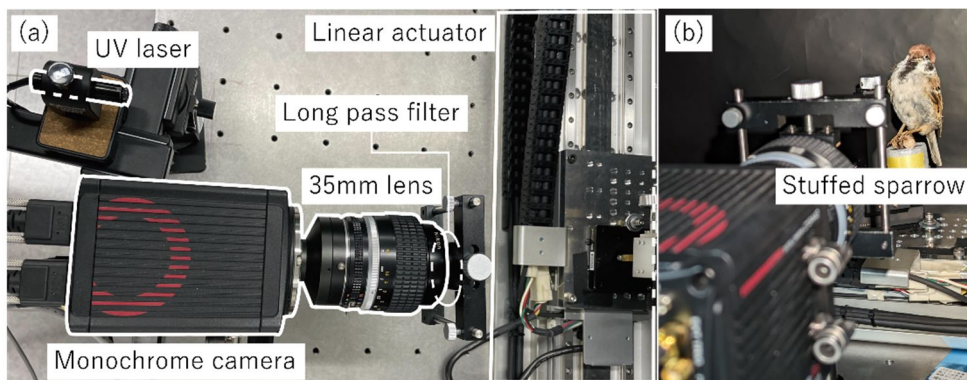


図4 (a)トラッキングシステム(b)トラッキング対象のスズメの剥製

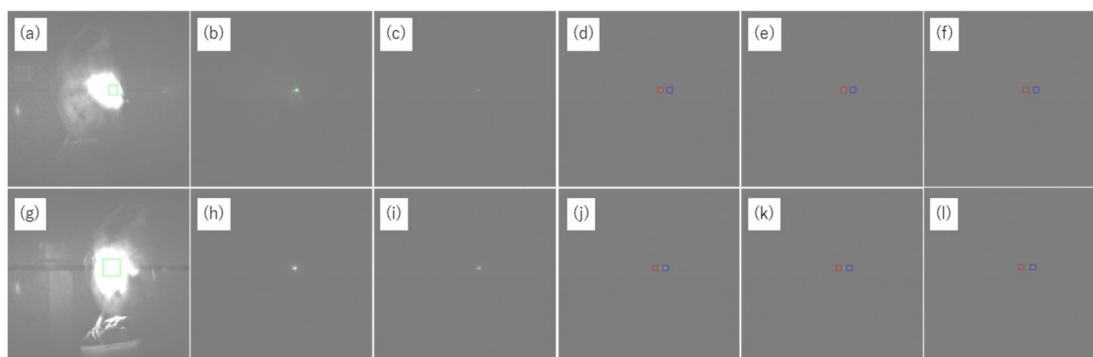


図5 (a)~(f)は翼の羽、(g)~(l)は胴体の羽における、スズメの剥製のトラッキング結果。

赤い四角は左の動きを、青い四角は右の動きを追跡している

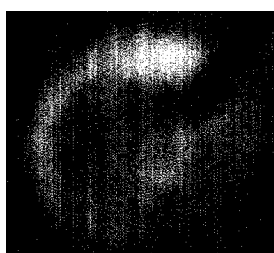


図6 回転するシャーレ内の砂糖に励起光を照射した後、蓄光することで軌跡が可視化されている様子

Rendering Pattern	Visible Light Image	Thermal Image		Binarization Image

図7 動的熱マーカー

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 早川智彦, 東晋一郎	4. 巻 Vol.58
2. 論文標題 時速100km走行での覆工コンクリート高解像度変状検出手法	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 建設機械	6. 最初と最後の頁 34-38
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Yuriko Ezaki, Yushi Moko, Tomohiko Hayakawa, and Masatoshi Ishikawa	4. 巻 Vol.34
2. 論文標題 Angle of View Switching Method at High-Speed Using Motion Blur Compensation for Infrastructure Inspection	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Robotics and Mechatronics	6. 最初と最後の頁 985-996
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Tomohiko Hayakawa, Yushi Moko, Kenta Morishita, Yuka Hiruma, and Masatoshi Ishikawa	4. 巻 Vol.34
2. 論文標題 Tunnel Lining Surface Monitoring System Deployable at Maximum Vehicle Speed of 100 km/h Using View Angle Compensation Based on Self-Localization Using White Line Recognition	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Robotics and Mechatronics	6. 最初と最後の頁 997-1010
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.20965/jrm.2022.p0997	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 早川智彦, 望戸雄史, 石川正俊, 大西偉允, 亀岡弘之	4. 巻 Vol.62
2. 論文標題 【大臣賞】時速100km走行での覆工コンクリート高解像度変状検出手法	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 土木施工	6. 最初と最後の頁 146
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 早川智彦, 石川正俊, 亀岡弘之	4. 巻 Vol.73
2. 論文標題 時速100km走行でのトンネル覆工コンクリート高解像度変状検出手法	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 建設機械施工	6. 最初と最後の頁 19-23
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yuki Kubota, Yushan Ke, Tomohiko Hayakawa, Yushi Moko, and Masatoshi Ishikawa	4. 巻 Vol.21
2. 論文標題 Optimal Material Search for Infrared Markers under Non-Heating and Heating Conditions	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 1-17
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/s21196527	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kenichi Murakami, Tomohiko Hayakawa, and Masatoshi Ishikawa	4. 巻 Vol.61
2. 論文標題 Hybrid surface measuring system for motion-blur compensation and focus adjustment using a deformable mirror	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Applied Optics	6. 最初と最後の頁 429-438
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/AO.442987	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計12件(うち招待講演 4件/うち国際学会 7件)

1. 発表者名 Tomohiko Hayakawa, Yuka Hiruma, Ke Yushan, Masatoshi Ishikawa
2. 発表標題 Label-free position tracking in stuffed sparrow using phosphorescence
3. 学会等名 SPIE Photonics West BiOS (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Tomohiko Hayakawa, Yuka Hiruma, Yushan Ke, Masatoshi Ishikawa
2. 発表標題 Active thermal marker using thermal images of heated areas with visible semiconductor laser
3. 学会等名 The 10th edition of the International Conference on Optical and Photonic Engineering (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Tomohiko Hayakawa
2. 発表標題 Optical axis control methods for infrastructure inspection
3. 学会等名 2nd Intl. Conference Advances in 3OM (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yushan Ke, Yushi Moko, Yuka Hiruma, Tomohiko Hayakawa, and Masatoshi Ishikawa
2. 発表標題 Silk-printed retroreflective markers for infrastructure-maintenance vehicles in tunnels
3. 学会等名 SPIE Smart Structures/Nondestructive Evaluation 2022 (NDE 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yushan Ke, Yushi Moko, Yuka Hiruma, Tomohiko Hayakawa, Elgueta Scarlet, Masatoshi Ishikawa
2. 発表標題 Silk-printed retroreflective markers for infrastructure-maintenance vehicles in curved tunnels
3. 学会等名 SPIE Smart Structures/Nondestructive Evaluation 2023 (NDE 2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 早川 智彦
2. 発表標題 モーションブラー補償による高速撮像技術のインフラ検査への応用
3. 学会等名 デジタルものづくり教育研究センター スマート検査・モニタリングプロジェクト セミナー講演（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 早川 智彦
2. 発表標題 インフラメンテナンスのグッドプラクティス
3. 学会等名 社会インフラテック2021カンファレンスプログラム（第4回インフラメンテナンス大賞の事例紹介）（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 早川智彦, 高原慧一, 柯毓珊, 石川正俊
2. 発表標題 半導体可視光レーザーによる加熱箇所の熱画像を利用した動的マーカー生成手法
3. 学会等名 一般社団法人レーザー学会学術講演会第41回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 早川智彦, 柯毓珊, 望戸雄史, 石川正俊
2. 発表標題 モーションブラー補償撮像手法を利用した走行型点検車両の照明要件 高速道路のトンネル覆工表面の撮影に向けて
3. 学会等名 2020年度 第42回照明学会東京支部大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 江崎ゆり子, 望戸雄志, 早川智彦, 石川正俊
2. 発表標題 ガルバノミラーを用いた撮影角度の高速スイッチング
3. 学会等名 2020年第45回光学シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yuriko Ezaki, Yushi Moko, Haruka Ikeda, Tomohiko Hayakawa and Masatoshi Ishikawa
2. 発表標題 Extension of the Capture Range Under High-Speed Motion Using Galvanometer Mirror
3. 学会等名 2020 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tomohiko Hayakawa, Haruka Nakane and Masatoshi Ishikawa
2. 発表標題 Motion-blur Compensation System Using a Rotated Acrylic Cube with Visual Feedback
3. 学会等名 1st Virtual IFAC World Congress (IFAC-V 2020) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 処理システム、マーキング方法、当該方法において検出されるマーカー、及びマーキングプログラム	発明者 早川智彦, 石川正俊, 池田遼	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、PCT/JP2020/027575	出願年 2020年	国内・外国の別 外国

〔取得〕 計0件

〔その他〕

-

6. 研究組織	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------