

オンサイト非破壊検査に向けた表示機能付きシート状カーボンナノ

チューブカメラ

村上 幸平¹, 小田原 遼河¹, 高井 伶於¹, 山本 みな美¹, 河野 行雄¹⁻³, 李 恒¹

¹中央大学 理工学部 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)

²国立情報学研究所 (〒101-8430 東京都千代田区一ツ橋 2-1-2)

³神奈川県立産業技術総合研究所 (〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1)

Carbon nanotubes-based broadband camera sheets with self-integratable displays toward on-site non-destructive inspection applications via longer-wavelength projection mapping

Kohei Murakami¹, Ryoga Odawara¹, Reo Takai¹, Minami Yamamoto¹, Yukio Kawano¹⁻³, and Kou Li¹

¹Faculty of Science and Engineering, Chuo Univ., 1-13-27 Kasuga, Bunkyo-ku, Tokyo 112-8551

²NII, 2-1-2 Hitotsubashi, Chiyoda-ku, Tokyo 102-8430

³KISEC, 3-2-1 Sakado, Takatsu-ku, Kawasaki-shi, Kanagawa 213-0012

Abstract: This work develops broadband camera sheets with self-integratable displays toward on-site non-destructive inspection applications via longer-wavelength projection mapping. While thin-film sheet-type broadband camera devices potentially facilitate functional non-destructive inspections, technical difficulties in integrating display modules within them hinder opportunities testing system operations at high-usability. This is mainly because that typical display module design strategies fundamentally require fine-processing of inorganic semiconductor materials. The above situation then crucially complicates the fabrication process of camera devices and degrades the inherent mechanical softness of testing systems. Such lacks of the mechanical softness and thin-film configurations from camera sheets subsequently face undesired blind spots in handling curvilinear three-dimensional target objects. To this end, this work synergizes thin-film camera sheets and advantageous simple display views via projection mapping techniques at high-visibility regardless of screen configurations. The presenting camera sheet collectively satisfies permeable photo-monitoring functions (for testing) and reflective screen units (for PM-based display) by its own.

Key Words: Broadband, Camera sheet, Projection mapping

1. 序論

非金属材料に対する透視性が豊かな長波長光レーザセンシング技術は、非破壊検査技術としての高い潜在能力を有する。特にミリ波・テラヘルツ・赤外帯での広帯域かつ多波長なセンシング計測は、非金属材料同士の材質同定に特化し、日用品・工業製品の扱いが期待される。これは日用品・工業製品の多くが複数種類の非金属材料から成り、また欠陥・異物においても起因する材質の特定が非常に重要な役割を担うためである。これら背景の下、検査システム展開に向けた要素技術:画像計測素子として、カーボンナノチューブ(CNT)膜型のカメラシートが優位な位置付けを占めている。CNT膜はミリ波-赤外、更に可視光までの超広帯域・超高効率な吸光特性を示し、カメラとしてリアルタイムに大面積な光学情報を集約し、広範な材質同定を促進する。更に食品ラップほどの薄さと湿布の様な柔軟伸縮性から、シート素子としての任意箇所への安定な貼り付けや死角の無い全方位視野の提供が特徴に挙げられる。上記の点からレーザセンシングを活かしたオンサイト検査素子への展開が期待される中、従来のCNT膜カメラシートは致命的に表示機能を欠く(例:ディスプレイ)。カメラ素子として撮影機能・表示機能の両立は稼働場所を問わずユーザがオンサイトに操作を完結する意味でも、非破壊検査応用に向けて不可欠な役割を担う。一方で一般的な表示機能の発現には微細半導体加工を要し、技術的な煩雑さに加え、リジッドな無機材料工程によりCNT膜カメラ本来の柔軟なシート構成を損なう。これを受け本研究では、視認性に優れるプロジェクションマッピング(PM)技術により、CNT膜カメラシートの本来の構造を維持する形において表示機能を実証する。

従来は映像技術・美術手法としての利用が主流なPMは、投影対象物・材質の広範性や微細加工を経ない視認性の高さから、表示機能のアプローチとして有用である。更に、本研究は映像・美術手法としてのPM

を、高い透過性によりモノの内部理解を志向する長波長光計測へ組み込むことで、検査技術への分野横断な拡張を図る。これらの学際的研究としてのコンセプト実証に向け、本研究では具体的に可視光での反射特性に優れる薄膜基板シート上へとCNT膜カメラをパターンニングする。これにより、片面での長波長光カメラ撮影機能、および裏面での可視光ディスプレイ（投影式の表示）機能との相乗効果を、同一シートデバイスにて同時に実現する。実際に本研究は、カメラ面側の長波長光検出応答が裏面側への可視光投影から優位に独立する点を実験的に再現し、撮影・表示機能の両立に資する基礎データを得た。また、本素子の薄膜柔軟性は対象物形状に沿う自由度の高い変形を促進し、これらの特徴は、平面のみでなく湾曲立体面をも含むPM本来の高い視認性が活かされる。表示機能型シートカメラの創出は長波長光科学分野の裾野を広げる位置付けであり、先述のPMの観点での特徴と合わせ、本研究はセンシング技術の発展に貢献する。

2. 材料・手法

Fig. 1a について、上側の図が本実験で用いるCNT膜カメラの撮影面である。ピッチは0.8 mm、線幅は2.4 mm、印刷範囲は24.8 mmである。このカメラは濾紙上に印刷しており、広帯域の光照射に対する応答を測るものである。この画素では、光熱起電力効果を用いており、画素材料と配線の境界面の温度差により発生した電圧を観測する。下側の図はCNTカメラの投影面である。この面では撮影面で観測した応答をPMする面である。撮影面・投影面は一つの濾紙で構成されており、湾曲させることが可能である。

Fig. 1b について、可視光-ミリ波帯のCNT膜の吸光率分布を示す。上側の図は、紫外・可視・近赤外分光光度計で、下側の図は、テラヘルツ時間領域分光装置でCNTの吸光率を計測したものである。二つの図から、カメラ材料であるCNT膜の一貫して高効率な吸光特性が確認できる。

Fig. 1c について、上側の図が Fig. 1a のカメラを印刷する空圧式ディスペンサ印刷装置である。この印刷機によって微細加工が可能となる。下側の図は、Fig. 1a のカメラに波長が1,310 nmのレーザを照射したときの各画素に対する応答分布である。中央部に向かって高強度な照射出力分布を示す円形の大口徑ビームスポットに対して、照射出力分布に沿った画素応答が適切に得られている。

3. 結果

Fig. 2 に、実際にPMを行った時の結果を示す。まず、手順Iでは、①から照射されたレーザが②、③を通過し、通過したレーザの応答を④で測定する。次に、手順IIでは、手順Iの①と②を正面から撮影したものである。①から照射されたレーザは、金属テープを切り抜いて作成した被写体「10」のみを通過する。次に、手順IIIは、カメラの裏面⑥にプロジェクタ⑦で投影を行う様子である。最後に、手順IVでは、実際に①からレーザを④に照射したときの応答を⑥にPMしたものである。これより、得たい情報を非破壊で観測することが確認できたことに加えて、薄膜シート内に、カメラ機能とディスプレイ機能の両立の実現に成功している。

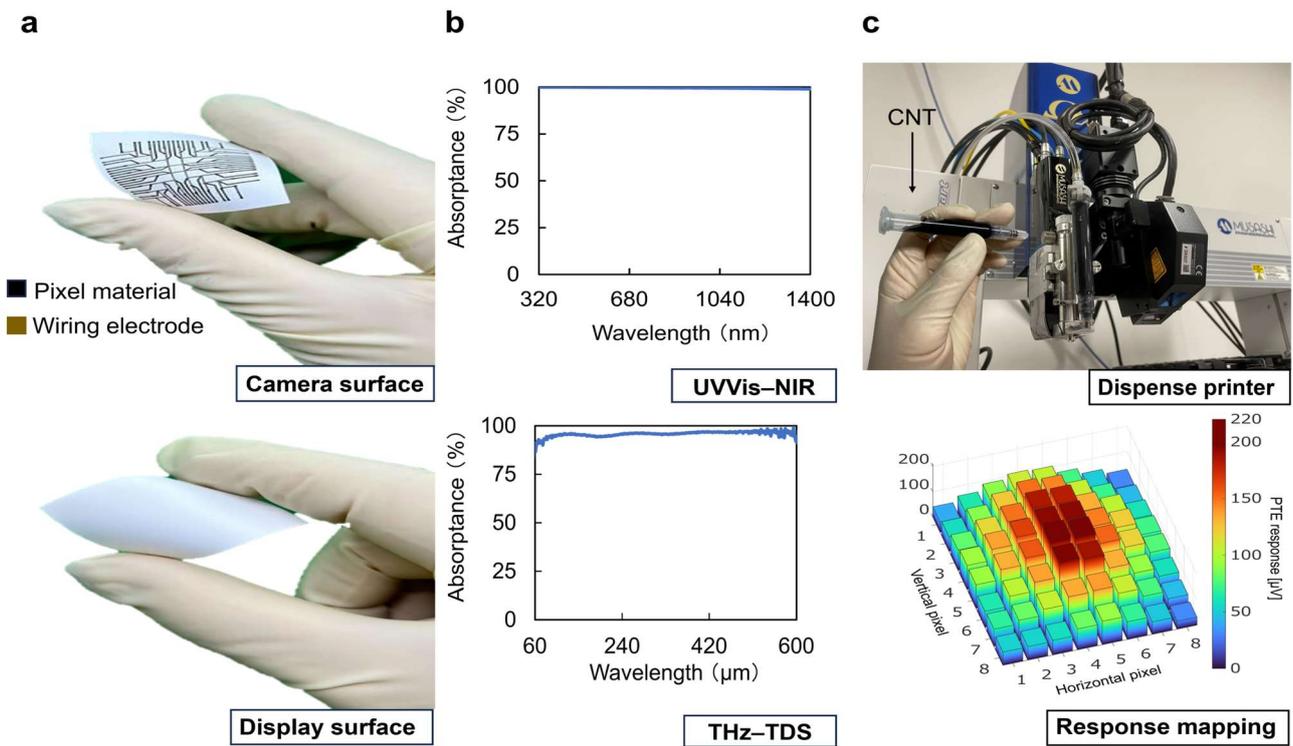


Fig. 1. a, Camera structure. b, Optical properties of CNT films. c, Device fabrication.

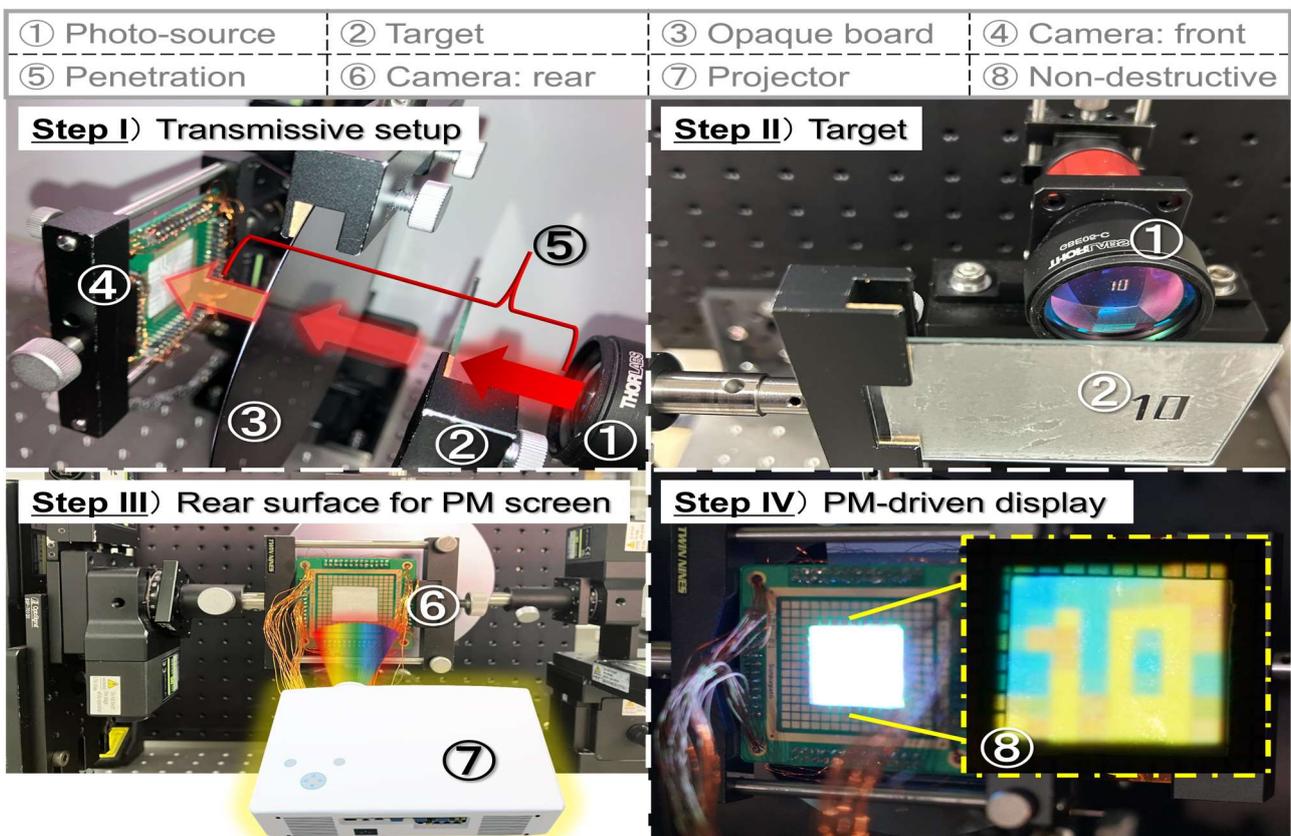


Fig. 2. Non-destructive imaging by projection mapping with the same camera sheet.

4. 考察

光熱起電力効果によって各画素での応答を測り、それにより被写体「10」を観測することができた。しかし、Fig. 2 の手順 IV から、「10」以外の画素でも反応が出ていることがわかる。将来的に、この非破壊な PM による検査技術は、ガラス破片やごみといった異物の有無を判別するための検査への応用が期待されている。そのため、検査する対象のサイズがより小さくなった時、不確かな応答は、検査精度に大きな影響を与えると考えられるため、不要な情報の除去が課題の一つとして挙げられる。本来、本研究で使用する CNT 膜カメラシートはミリ波-赤外、更には可視光までの広い帯域での自由度の高い光学計測に高感度で利用可能である。本予稿では赤外帯での動作原理を中心に扱うが、将来的には多波長光学系の構築により波長毎の材質同定への拡張も見込まれる。先述の通りこれらの位置付けは、従来は撮像・検査素子自身での表示機能が致命的に欠けていた「ミリ波-赤外帯での広帯域・多波長な材質同定・構造復元型の非破壊光学計測手法」の裾野を拡げる存在である。またこれらの原理実証を通じて、透視情報に基づく高視認性 PM の非破壊検査技術への拡張が期待できる。また、CNT 膜画素の動作原理やカメラシートの作製手法、および PM 測定系などについては、学会にて発表予定である。

謝 辞

本研究は、以下の支援の下に遂行された：JST ACT-X (JPMJAX23KL), JST 未来社会創造事業 (JPMJMI23G1), 科研費・研究活動スタート支援 (23K19125), 科研費・若手研究 (24K17325), 村田学術振興財団・第 39 回 研究助成, 松尾学術振興財団・第 36 回 研究助成, 住友電工グループ社会貢献基金・2023 年度 助成, 鷹野学術振興財団・2023 年度 研究助成, 熱-電気エネルギー技術財団・第 31 回 研究助成, 精密測定技術振興財団・2023 年度 調査-研究事業, 岩谷直治記念財団・第 50 回 岩谷科学技術研究助成, コニカミノルタ科学技術振興財団・令和 5 年度 画像科学奨励賞 (優秀賞), 電気通信普及財団・2023 年度 研究調査助成, 東電記念財団・2023 年度 研究助成 (一般研究), フジシール財団・2024 年度 パッケージ若手研究助成, パロマ環境技術開発財団・2024 年 研究助成, 双葉電子記念財団・2024 年度 自然科学研究助成, タカノ農芸化学研究助成財団・2024 年度 研究助成 (若手部門), イオン工学振興財団・2024 年度 研究助成, 神奈川県立産業技術総合研究所。

参考文献

- 1) K. Li, *et al.* Series Photothermoelectric Coupling Between Two Composite Materials for a Freely Attachable Broadband Imaging Sheet, *Advanced Photonics Research* **2**, 3, 2000095 (2021).
- 2) K. Li, *et al.* Recent Progress in Development of Carbon-Nanotube-Based Photo-Thermoelectric Sensors and Their Applications in Ubiquitous Non-Destructive Inspections, *Micromachines* **14**, 1, 61 (2023).
- 3) R. Kawabata, *et al.* Wireless Imager Integrated with Organic Circuits for Broadband Infrared Thermal Analysis, *Advanced Materials* **36**, 15, 2309864 (2024).
- 4) K. Li, *et al.* Stretchable broadband photo-sensor sheets for nonsampling, source-free, and label-free chemical monitoring by simple deformable wrapping, *Science Advances* **8**, 19, eabm4349 (2022).
- 5) M. Yasui, *et al.* Projection Mapping with a Brightly Lit Surrounding Using a Mixed Light Field Approach, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* **30**, 5, 2217–2227 (2024).