

# 非破壊な多層構造復元に向けた光熱起電力型スキャナによる反射系 赤外計測

小坂 充輝<sup>1</sup>, 敷地 大樹<sup>1</sup>, 出水 のあ<sup>1</sup>, 久保田 実樹<sup>1</sup>, 山本 みな美<sup>1</sup>, 河野 行雄<sup>1-3</sup>, 李 恒<sup>1</sup>

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

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

<sup>3</sup>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)

## Reflective infrared monitoring with photo-thermoelectric scanners for non-destructive multi-layered structural reconstructions

Mitsuki KOSAKA<sup>1</sup>, Daiki SHIKICHI<sup>1</sup>, Noa IZUMI<sup>1</sup>, Miki KUBOTA<sup>1</sup>, Minami YAMAMOTO<sup>1</sup>, Yukio Kawano<sup>1-3</sup> and Kou Li<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>NII, 2-1-2 Hitotsubashi, Chiyoda-ku, Tokyo 102-8430

<sup>3</sup>KISEC, 3-2-1 Sakado, Takatsu-ku, Kawasaki-shi, Kanagawa 213-0012

**Abstract:** This work develops three-dimensional structural reconstruction methods of curvilinear objects via non-destructive and permeable longer-wavelength irradiation with ultrabroadband photo-scanner sheets. While longer-wavelength photo-monitoring techniques advantageously facilitate functional non-destructive inspections (e.g., collectively satisfying material identifications and structural reconstructions) of composite multi-layered objects by ultrabroadband measurements, their typical transmissive optical systems crucially regulate target configurations. In short, the conventional use of the representative transmissive ultrabroadband longer-wavelength monitoring techniques is still insufficient to non-destructively handle and distinguish photo-absorbent and -reflective objects. This situation hinders opportunities for the practical use of ultrabroadband longer-wavelength photo-monitoring techniques in social non-destructive inspection sectors. To this end, this work demonstrates non-destructive cross-sectional structure reconstructions of metallic columns (target objects) concealed by an opaque coating via reflective infrared scanning. The above demonstration corresponds the prototype to prove the concept of the aforementioned reflective monitoring scheme, and the employed ultrabroadband photo-scanner potentially synergizes this work with further non-destructive material identifications.

**Key Words:** Reflective scanning, Infrared, Carbon nanotubes

## 1. 序論

目視では不透明な対象物の内部から非破壊に詳細な情報(材質同定・構造復元)を抽出する手法として、長波長光帯でのコンピュータビジョン(CV)が注目を集める。計測波長域としては具体的にミリ波・テラヘルツ・赤外帯が挙げられ、プラスチックやガラス、半導体、セラミック等、工業製品の核となる非金属材料を同定する。また、従来は映像技法として可視光での外形推定が主流である CV をこれらのミリ波-赤外帯へ拡張することで、検査応用を志向する要素技術へと展開され始めている。具体的には、光照射に対する対象物の影から材質毎に3D配置を簡易的に推定する視体積交差法<sup>1)</sup>や、影の濃淡から材質毎の断層を抽出するトモグラフィ<sup>2)</sup>等が例である。これらのミリ波-赤外帯での CV 計測により、透視タイプの材質同定と構造復元の両立として、高信頼な非破壊検査システムへの展開に向けた要素技術が確立された。

しかしながら、従来の広帯域・多波長な長波長光 CV 計測は透過型の測定系が中心であり、依然として観察対象物の材質に関しては制約が設けられた状況である。上記の致命的な課題に関して、具体的には透過系の長波長光 CV 計測では照射に対する観察物の吸収・反射の識別が困難である(例:赤外照射に対する木材・金属)。このような状況は、広範な材質を観察対象とする長波長光 CV センシング技術の非破壊検査デバイス・システムへの出口戦略を考慮すると、喫緊の課題と言える。

この様な状況を受けて本研究では、初期検討として赤外帯の計測領域を中心に、反射型の光学系での非破壊な材質同定・構造復元プロトタイプシステムを確立した。発表者らは上記のコンセプト実証に向けてまず初めに、カーボンナノチューブ(CNT)薄膜スキャナシート<sup>3)</sup>を中心に反射型の長波長光センシング測定系を構築する。本素子を成す CNT 膜は、代表的な光学センサデバイス材料の中でも優位な位置付けとなる超広帯域・高効率な吸光特性(ミリ波-赤外、更に可視光域まで)を有する<sup>4)</sup>。これにより CNT 膜スキャナシートは、既存の多波長デバイスを凌駕する超広帯域光センシング動作を、各領域での狭帯域型素子にも比肩する検出感度にて実現する<sup>5)</sup>。上記の光学特性により、検査性能に優れたミリ波-赤外帯での測定において、CNT 膜スキャナは観察対象の材質に応じた自由度の高い計測波長の組み合わせを

促進する。また CNT 膜スキャナシートは食品ラップ程度の薄さと湿布の様な柔軟伸縮性を示し、検体のサイズや設置環境に応じて機械的にも自由度の高い測定系構築を促進する<sup>6)</sup>。これらのデバイス側からのアプローチに続き、本研究は観察対象物へ赤外光を照射し、反射信号を検出するスキャナの画素座標から、反射面の角度情報を抽出する。更に本システムは得られた単一区間での反射角度情報を複数区間にまたがって連続的に集約することで、観察対象物全体の反射角度分布、つまり全体形状を復元する。上記のシステムは先述の通り従来の透過系計測では困難な吸収物・反射物の識別に特化し、更に長波長光の透視性から眼では不透明な内部構造を非破壊に可視化する。これらの優位性は CNT 膜スキャナシートの素子性能により超広帯域・多波長な計測へと拡張することができ、レーザセンシング技術の裾野を広げる位置付けを占める。

## 2. 材料・手法

本実験では、受信素子として CNT 膜を採用している。Fig. 1a は CNT 膜の吸光率分布を示している。得られた結果からも、CNT 膜の広帯域・高効率な吸光特性が確認できる。

Fig. 1b (上) はデバイスとレーザの位置関係を示している。基板の背面からレーザ照射され、基板中央部の穴を通っていることがわかる。また、Fig. 1b (下) にはデバイスの表側の構造を示している。金属パターンに対応したピッチ幅で、印刷した CNT 膜を基板に貼り付け導電性ペーストによって接続している。

Fig. 1c は測定系全体を示している。レーザ側から見て、デバイスの奥には遮蔽物を設置しており、デバイス側からは、被写体が視認できない構造になっている。この遮蔽物において、本研究で使用する近赤外光照射 (NIR: 976 nm) の大部分は透過する。

本研究では、遮蔽物透過後、被写体表面での反射により、戻ってくる NIR を検知している。計測方法を説明する。被写体にあたり反射した NIR を CNT 膜で読み取る。NIR に対して水平左右方向に被写体をスキャンし、素子ごとにその信号がピーク値となるときのスキャン距離を記録する。各素子に対応した推定角度を、上記で記録したスキャン距離を用いてつなぎ合わせることで、デバイス側の被写体表面の形状が復元できる。これを、適切な角度で被写体を回転させて再度スキャン、復元を繰り返し、つなぎ合わせることで円柱表面の 360°復元を行っている。

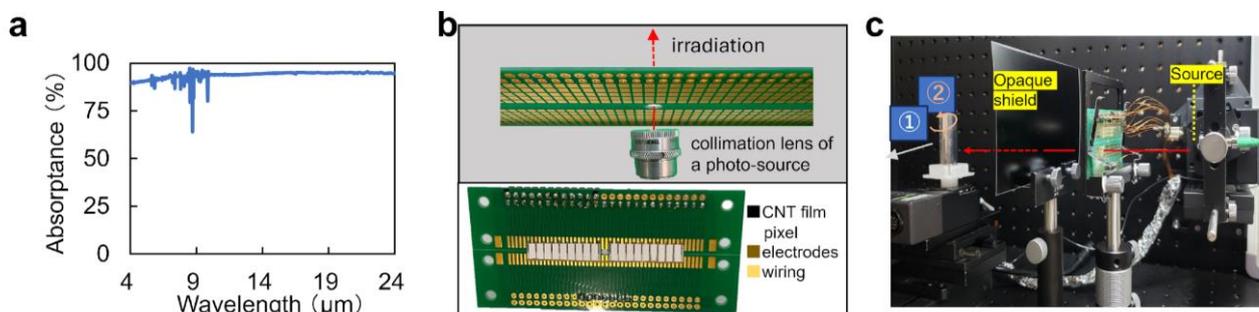


Fig. 1. a, Optical characteristic of the CNT film. b, Device configuration. c, Experimental setup.

## 3. 結果

被写体からの反射を計測する基礎実験の結果として、Fig. 2a に示すようにスキャンの距離に応じて反射角が変化し、応答がみられる素子がスライドしていることがわかる。スキャン一回当たりの復元画像は Fig. 2b のようになり、推定できる角度範囲での復元ができていることがわかる。各回転角度での復元画像をそのときの回転角度に応じて回転平行移動を施し、同一グラフにプロットした図が Fig. 2c である。被写体である円柱の外周形状の復元に成功した。

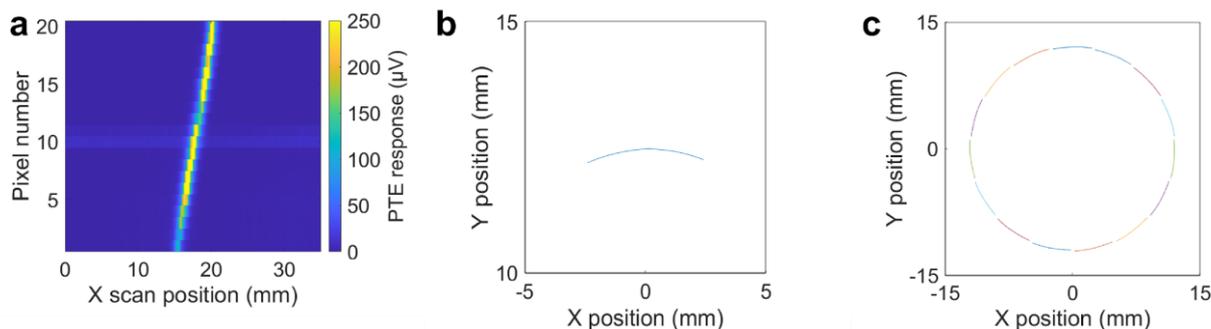


Fig. 2. a, Reflective response distribution of the PTE imager for scanning a metal column. b, Partial structural reconstruction via single reflective liner scanning. c, Reflective structure reconstruction of the metal column.

#### 4. 考察

Fig. 2a は横軸をスキャン距離、縦軸を素子の番号として応答の大きさを 2 次元マッピングした図である。被写体の形状が円柱であるため、その外周の角度分布が連続的に変化しており、徐々に反射レーザ光が照射される素子がずれていっている。

本来、本研究で使用する CNT 膜スキャナシートはミリ波-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、透過系が従来を中心であった「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」の裾野を広げる存在である。これらの原理実証を通じて、材質・構造面での制約の無い非破壊検査基盤の構築が期待できる。また、CNT 膜光スキャナシートの詳細な動作原理や反射系構造復元の数値处理的なメカニズムに関しては、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.* Simple Non-Destructive and 3D Multi-Layer Visual Hull Reconstruction with an Ultrabroadband Carbon Nanotubes Photo-Imager, *Advanced Optical Materials* **12**, 14, 2302847 (2024).
- 2) D. Shikichi, *et al.* Millimeter-wave-Infrared multi-wavelength computed tomography, *IEEE Proceedings of the 48<sup>th</sup> International conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 1-2 (2023).
- 3) K. Li, *et al.* All-Screen-Coatable Photo-Thermoelectric Imagers for Physical and Thermal Durability Enhancement, *Advanced Materials Interfaces* **10**, 35, 2300528 (2023).
- 4) T. Araki, *et al.* Broadband Photodetectors and Imagers in Stretchable Electronics Packaging, *Advanced Materials* **36**, 20, 2304048 (2024).
- 5) K. Li, *et al.* Robot-assisted, source-camera-coupled multi-view broadband imagers for ubiquitous sensing platform, *Nature Communications* **12**, 3009 (2021).
- 6) 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).