

ナノカーボン型ミリ波-赤外イメージャーによる視体積交差タイプ の非破壊検査実証

李 恒¹, 敷地 大樹¹, 久保田 実樹¹, 河野 行雄¹⁻³

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)

Visual hull-driven non-destructive inspection techniques via ultrabroad MMW-IR band sensing with nanocarbon-type imagers

Kou LI¹, Daiki SHIKICHI¹, Miki KUBOTA¹, and Yukio Kawano¹⁻³

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

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

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

Abstract: While millimeter-wave (MMW)-infrared (IR) photo-imaging exhibits significant potential as inspection techniques, photo-thermoelectric (PTE) detector operations employing carbon nanotubes (CNTs) are highly suitable for their efficient optical characteristics. Such sensitive device design and the associated material coordination allow the aggregation of multiple wavelength-specific information for non-destructive constituent identifications. Meanwhile, computer vision (CV) techniques facilitate 3D structure reconstructions as inspection methodologies, with the aforementioned imaging device design. Although non-destructive inspections require collectively satisfying constituent identifications and structural reconstructions, investigations combining MMW-IR photo-imaging and CV monitoring are still insufficient. This work demonstrates CV-driven simple 3D composite multilayer reconstructions via non-destructive broadband multiple-wavelength monitoring with the CNTs PTE imager. Visual hull evaluation, one of the representative CV techniques, converts 2D transmissive PTE images with different viewpoints into 3D reconstruction models. The subsequential graphical superposition of these wavelength-specific models results in non-destructive entire reconstructions of 3D composite multi-layered targets.

Key Words: Computer vision, Structural reconstruction, Broadband

1. 序論

本研究は、材質同定と構造復元を両立する非破壊検査技術を実証する。ミリ波（MMW）から赤外（IR）帯の光・電磁波照射は、非金属材料への非侵襲な透視性と波長・組成毎の豊富な指紋スペクトルから材質同定を通じ、萌芽的な非破壊検査技術としての位置付けを確立している。一方、日用品・工業製品・インフラ等を対象とする非破壊検査では、材質同定に加えて構造復元の実現が望まれている。これは、観察対象物の眼には見えない内部での材質・構造の詳細な可視化が欠陥発生源の追及に繋がるためである。

上記の観点において、従来の MMW-IR 計測技術の活用は依然として不十分な状況である。代表的計測手法には分光計測等が挙げられ、それらは学術的な基礎科学での用途に加え、日用品・工業製品・インフラ等の構成部位を局所的な薄膜試料へ切り出したうえで、早期段階での材質同定として用いられている^{1,2)}。しかしながらそれらの装置は光学系を中心に複雑かつ閉所的な装置仕様となっており、また外部環境（気温、湿度、室内照明等）に敏感な状況からも、対象試料の適応形状は限定的である。一方で構造復元の観点では、光・電磁波計測時の数値データ（強度・時間・位相・座標等）から 3D モデルを再構成するコンピュータビジョン（CV）手法が注目を集める³⁾。映像表現・デジタルアート手法として CV 技術の認知度が高まるものの、検査応用の観点では、上記の MMW-IR 帯域での装置的制約からも、依然として透視性・材質同定性に乏しい可視光領域での利用に留まっている。

これを受け本研究では、観察対象物のサイズや設置環境に制約されないシート状の MMW-IR 撮像シートを基に、代表的 CV 技術の一つである視体積交差法による非破壊な材質同定・構造復元型の検査を実証する。

2. 材料・手法

本研究では、撮像シートの素子材料として一桁 μm 厚のカーボンナノチューブ (CNT) 薄膜を採用する。代表的な光学材料の中でも、CNT 膜は食品ラップの様な高い操作性 (薄さ・柔らかさ)⁴⁾を示すと同時に、MMW-IR、更に可視光にかけての超広帯域・高効率な吸光特性を優位に示す⁵⁾。また CNT 膜は自身の pn 接合部を受光界面とし、吸光発熱、およびその後の熱電変換を組み合わせた光熱起電力効果へ適応することで、光センサ・撮像素子として動作する (Fig. 1a)。微視的には、繊維状の高強度構造 (Fig. 1b) から観察物・設置環境に応じた自由度の高い変形が可能である。上記の操作性は、高感度光検出に資する $100 \text{ pWHz}^{-1/2}$ 以下の雑音等価電力 (NEP) を超広帯域に示す光学性能 (Fig. 1c) と共に、CNT 膜素子の多様な利用を促進する。

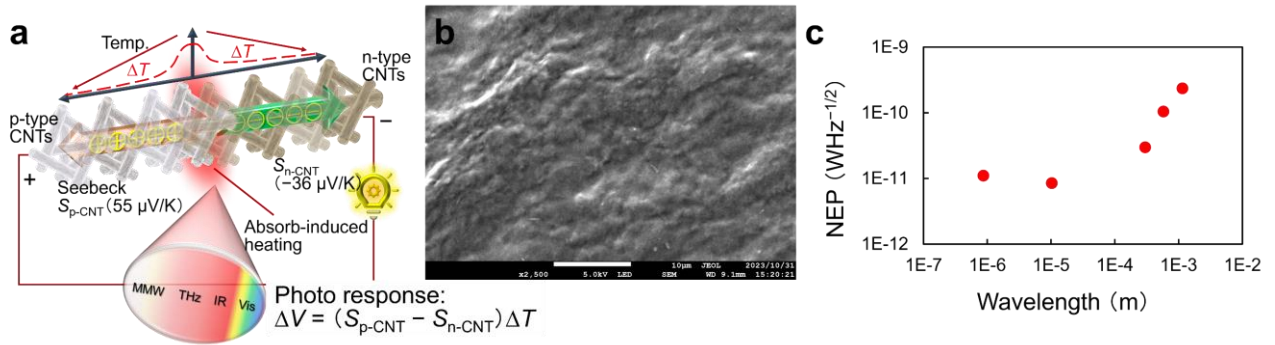


Fig. 1. a, Operation mechanism of the CNT film PTE imager. b, SEM image of the CNT film. c, Ultrabroadband sensitivity distribution of the CNT film PTE imager for photo-detection operations.

上記の素子準備に続き、Figs. 2a-c は視体積交差センシングにおける測定系の概要を示す。視体積交差計測では、観察対象の立体物に対して、異なる視点からの平面シルエット画像を要する。観察空間を包含する 3D 座標系の基準立方体から、撮像角度毎に得られたシルエット部分を相互にくり抜き、交差部分が推定モデルとして抽出される。既存の視体積交差計測は可視光照射により観察物の外形復元を対象とするが⁶⁾、本研究では、CNT 膜素子を用いてこれらを透視性の MMW-IR 帯へ拡張し、材質毎に段階的に内部階層を抽出する。

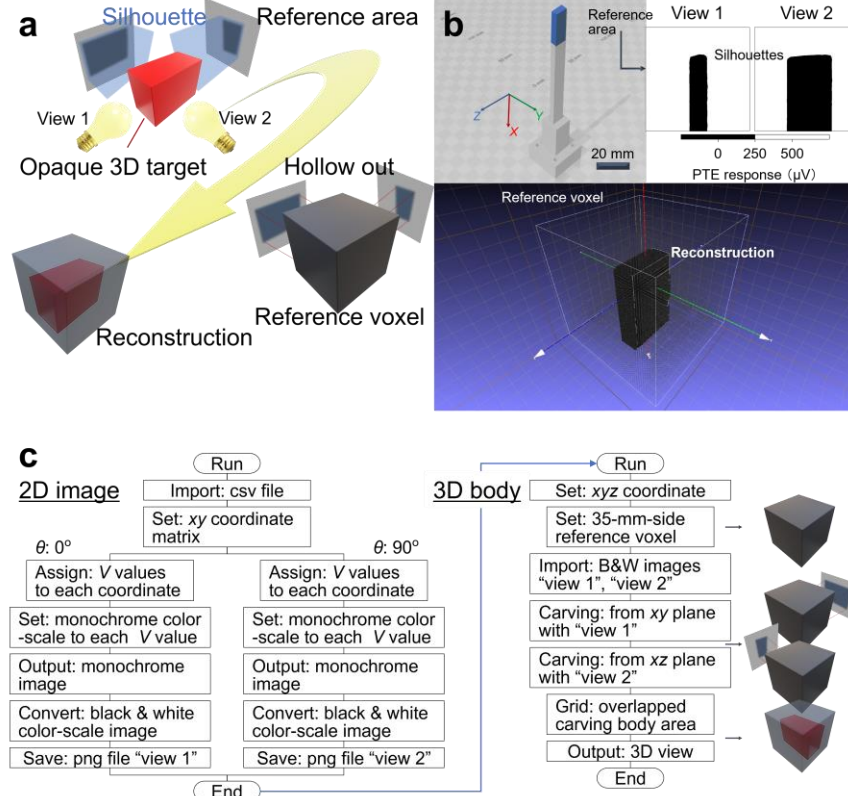


Fig. 2. a, Schematic of the visual hull sensing. b, Reconstructed 3D model. c, Flowchart for the experimental setup.

3. 結果

Fig. 3a に、本研究にて扱う多層複合 3D 構造物の概要を示す。計 4 種類の板材が 3 層の筒状構造を形成し、最外層には可視光で不透明なカルコゲナイドガラスが 20 mm 幅の遮蔽体として設けられている。また半導体製・ガラス製の 15 mm 幅の板材が中間筒層を形成し、10 mm 幅のポリ乳酸から成る内壁がそれらに続き設置されている。最深部には、直径 2.4 mm の金属柱が挿入されている。先述の通りに、これらの構造はブラックボックス化されている。これらの被写体に対して、本研究では可視光 (Vis), IR, テラヘルツ (THz), ミリ波 (MMW) の計 4 波長にまたがる広帯域な視体積交差計測を CNT 膜撮像シートを用いることで実施した (Figs. 3b–e)。前項での記述の通り、CNT 膜撮像シートは非破壊検査にとって有用な長波長 MMW-IR 帯のみでなく、既存の光センサと同様に Vis 帯における計測も可能である。よって、本研究での被写体が見た目には不透明であるという状況を、Vis 計測により外壁部分の 3D 復元モデルとしてデータ化することに繋がる (Fig. 3b)。また、カルコゲナイド外壁に透過性を持つ THz・IR 照射を組み合わせることで、Fig. 3c の通りに中間筒層の 3D 復元モデルが非破壊かつ選択的に抽出される。なお、本研究では視体積交差計測にあたり 2 つの異なる視野 (90°ずれ) から、各帯域において平面シルエット画像を取得している。上記の THz・IR 照射に関しても、それぞれが中間筒層材料に異なる透過性を持ち (半導体: THz ○・IR △, ガラス: THz △・IR ○), Fig. 3c では用いられなかった視野からの平面シルエット画像を組み合わせることで、本研究は内壁の 3D 復元モデルを非破壊・選択的に抽出する (Fig. 3d)。最後に、THz・IR 帯域と比較して非金属材料への透過性がより高い MMW 照射を用いた視体積交差計測により、最深部の金属円柱の 3D 復元モデルが非破壊・選択的に抽出され (Fig. 3e), これらの重ね合わせにより材質同定型の構造復元というコンセプトが実現する。

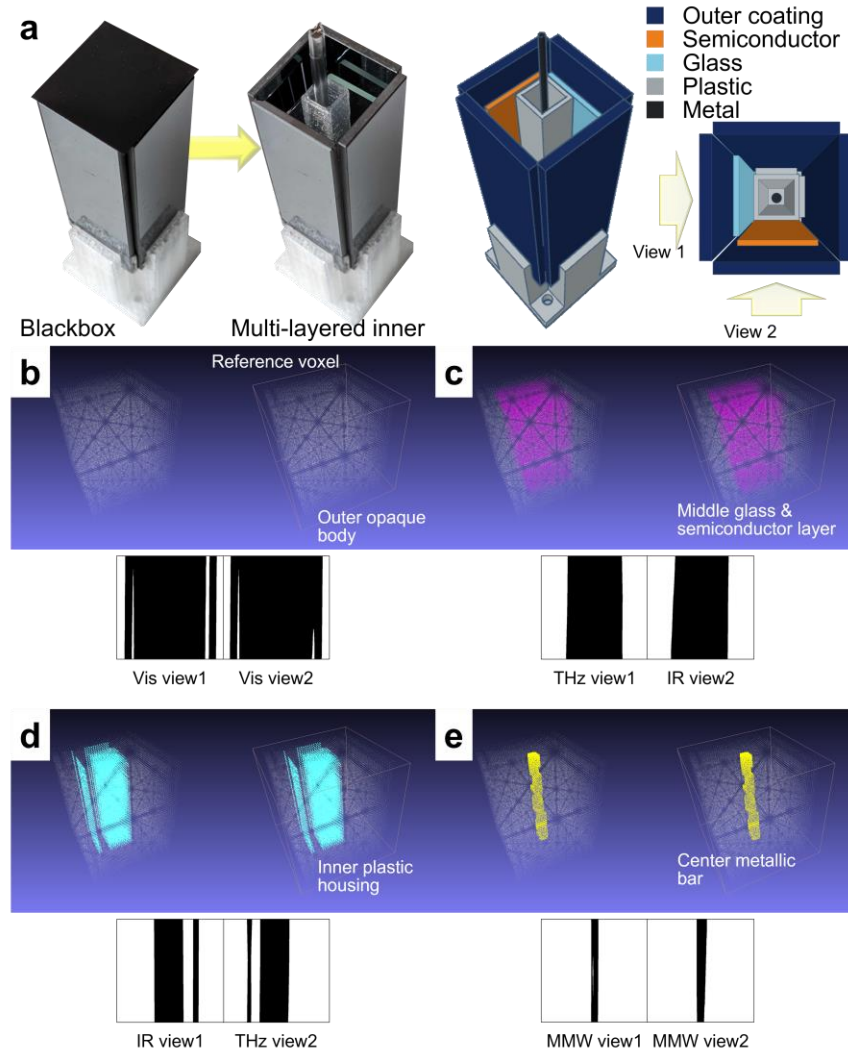


Fig. 3. a, Composite multi-layered 3D target. b–e, Selectively and non-destructively extracted 3D models for the opaque outer (b), the middle layer (c), the inner housing (d), and the center metallic bar (e) from the target in (a).

4. 考察

本研究にて実証する非破壊な材質同定型の構造復元手法は、先述の通りに検査技術への適応性の観点から、既存の CV アプローチの中でも特徴的な位置付けを占める。また CV 分野においても、非侵襲かつ透視性の断層計測として THz 帯でのコンピュータトモグラフィ (CT) ⁷⁾等のアプローチが報告され始めている中で、広範な材質同定に繋げるための広帯域 (多波長 MMW-IR) 計測への拡張はこれまで不十分であった。CNT 膜撮像シートの豊かな光学特性は上記の課題を打破し、本研究が実証するシステムは既存の部分的な構造復元手法の性能に比肩する最小 0.65 mm の解像度・2 %以内のモデリング誤差精度を維持しながら、材質同定を優位に両立する ⁸⁾。これらの詳細や、網羅的な視野角である CT 計測への拡張といった本研究の将来展望等に関しては、学会にて報告予定である。

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) J. Sultana, *et al.* Hollow Core Inhibited Coupled Antiresonant Terahertz Fiber: A Numerical and Experimental Study, *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology* **11**, 3, 245–260 (2020).
- 2) S. Primpke, *et al.* Comparison of pyrolysis gas chromatography/mass spectrometry and hyperspectral FTIR imaging spectroscopy for the analysis of microplastics, *Analytical and Bioanalytical Chemistry* **412**, 8283–8298 (2020).
- 3) S. Nie, Deeply Learned Filter Response Functions for Hyperspectral Reconstruction, *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 4767–4776 (2018).
- 4) K. Li, *et al.* Robot-assisted, source-camera-coupled multi-view broadband imagers for ubiquitous sensing platform, *Nature Communications* **12**, 3009 (2021).
- 5) 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).
- 6) S. Hong, *et al.* In-water visual ship hull inspection using a hover-capable underwater vehicle with stereo vision, *Journal of Field Robotics* **36**, 3, 531–546 (2019).
- 7) M. Jewariya, *et al.* Fast three-dimensional terahertz computed tomography using real-time line projection of intense terahertz pulse, *Optics Express* **21**, 2, 2423–2433 (2013).
- 8) 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).