

光ファイバーにより巨大構造体の“見えない歪み”を検知する新技術を実証 ～飛行機や洋上電力設備など数十 m から数 km の 緩やかな形状の変化を常時モニタリング～

発表のポイント:

- ◆ 多心光ファイバーケーブルを用いた新たな形状解析手法により、光ファイバー形状センシング技術における検出可能な曲率半径を 10 倍以上に拡張し、従来は検出できなかった非常に緩やかな形状変化を検出する技術を実証しました。
- ◆ 飛行機や洋上電力設備等の大型構造物にかかるわずかな歪みや、社会インフラや大型パイプラインにおける数十 m から数 km に渡る配管設備の形状情報をセンシング用光ファイバーケーブルによって検出できます。
- ◆ 今後、構造最適化や測定・形状解析の精度向上により検出可能な曲率半径を 10 m 以上に拡張し、大型構造物の形状センシング技術として確立をめざします。

NTT 株式会社(本社:東京都千代田区、代表取締役社長:島田 明、以下「NTT」)と国立大学法人東京大学大学院工学系研究科(所在地:東京都文京区、研究科長:加藤泰浩、以下「東京大学」)は、既存の光ファイバーケーブル構造を活用したセンシング用光ファイバーケーブルを用いて非常に緩やかな形状変化(数 m 以上の曲率半径)を検出できる光ファイバーセンシング技術を世界で初めて実証しました。

従来の光ファイバー形状センシング技術は検出可能な曲率半径が一般的に数 cm～数十 cm 程度と急峻な変化に限られ、検出距離も数 m 程度と適用シーンが限定的でした。今回実証した光ファイバーセンシング技術により、長さ数十 m から数 km におよぶ大規模なインフラ設備における、曲率半径数 m 以上の緩やかな形状変化を遠隔から検出・監視することができます。本技術により、大型構造物で生じる意図しないわずかな歪みの検出や、地下管路など目に見えない社会インフラの設備形状を可視化し、位置情報をデジタル化することができます。そのため将来的には、大規模設備にセンシング用光ファイバーケーブルを実装することで、大型構造物や社会インフラのデジタルツイン上での可視化や設備の予防保全への活用が期待されます。

本技術の詳細は、論文誌 IEEE Journal of Lightwave Technology の特集号に掲載されました。

1. 背景

近年、光ファイバーに沿った形状を検出する光ファイバー形状センシング技術が開発されています。この技術では、マルチコア光ファイバーと呼ばれる、1 本の光ファイバー内に複数の光の通り

道を持つ構造を用い、それぞれの光経路に生じる違いから、光ファイバーの曲がり具合や位置を推定します。この技術は、細い器具やロボットアームなど、形状の把握が重要な分野で有用なため、特に医療応用やロボティクスなどで活用されています。しかしながら、従来技術では、使用する測定器の制限などにより、検出できる長さは数 m 程度、検出可能な曲率半径も数 cm 以下に限られており、空間的な形状変化が非常に緩やかな大型構造物への適用は困難でした。一方、社会インフラや大型設備では、大型プラントのパイプラインや電力・通信・下水などの地下配管といった、直接観測が困難な構造物が多く存在します。これらの可視化には、カメラ搭載ロボットやレーダーなどが用いられていますが、測定精度は環境条件の影響を受けやすく、構造物の長さ方向に沿った継続的な監視には課題がありました。さらに、大型構造物では、時間の経過とともに生じるわずかな形状変化の蓄積が故障につながる可能性があるため、継続的な監視が重要です。しかし、従来の技術では、構造物の全長にわたってこうした変化を常時モニタリングすることは困難でした。

そこで NTT と東京大学の村山英晶教授は、NTT が通信設備向けに培った光ファイバーケーブルの設計・評価技術を活用したセンシング用光ファイバーケーブル技術と、村山教授が開発した光ファイバー中で生じる歪みの分布から光ファイバーの敷設形状を推定する形状推定技術とを掛け合わせ、曲率半径が数 m 以上の非常に緩やかな形状変化を数 km に渡って検出できる、新たな光ファイバー形状センシング技術を検討してまいりました。

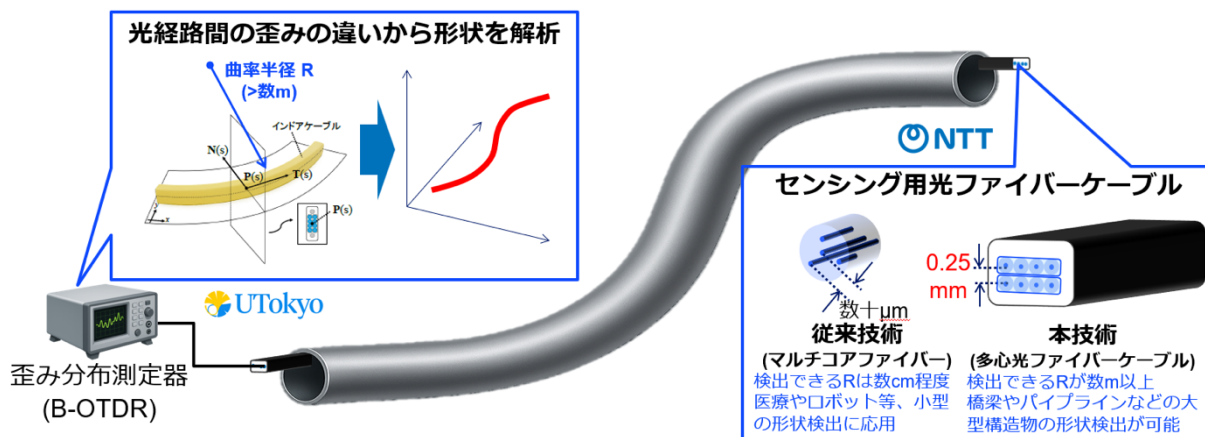


図 1: 大規模設備の形状を検出するセンシング用光ファイバーケーブルと形状センシング技術

2. 技術のポイント

①歪み分布の逐次解析による光ファイバーケーブルの形状推定

光ファイバー中の長手方向の歪みを分布的に測定できる B-OTDR(Brillouin-Optical Time Domain Reflectometry)^{*1} を用いて、複数の光経路における歪みの違いから高精度な形状を推定する解析技術を開発しました。複数の光経路で生じた歪みとそれらの位置関係から地点ごとの曲げ方向と曲がり量を推定し、それを長手方向に沿って逐次的に計算することで、光ファイバーケーブル全体の形状を推定することができます。さらに、既知の曲げ形状あるいは直線状態における歪み分布を参照することで、形状推定精度の向上に成功しました。また、従来の形状センシングで用いる OFDR(Optical Frequency Domain Reflectometry)^{*2} 方式は、測定距離が数 m 以下に制限されますが、B-OTDR を用いた計測手法では、数 km にわたる長距離の形状測定が可能になります。

②形状センシングに適した多心光ファイバーケーブル構造

光ファイバー形状センシングでは、複数の光経路で生じる異なる情報を解析することで光ファイバーの敷設形状を推定し、検出できる曲率半径の大きさは光経路間の距離に応じて大きくなります。従来の光ファイバー形状センシングでは、マルチコア光ファイバーと呼ばれる1心の光ファイバーに複数の光経路を有する構造が用いられてきましたが、光経路の間隔は光ファイバーの細さで制限され数十 μm 程度と小さく、検出可能な曲率半径は数 cm ～数十 cm 程度でした。今回、屋内通信用光ファイバーケーブルとして用いられる、0.25 mm 間隔で整列・固定された8心の光ファイバーを実装した多心光ファイバーケーブル構造を用いることで、数 m 以上の曲率半径の検出を可能としました。この光ファイバーケーブルは長方形の形状を有することから、意図しない捻じれによる解析誤差の低減も期待できます。

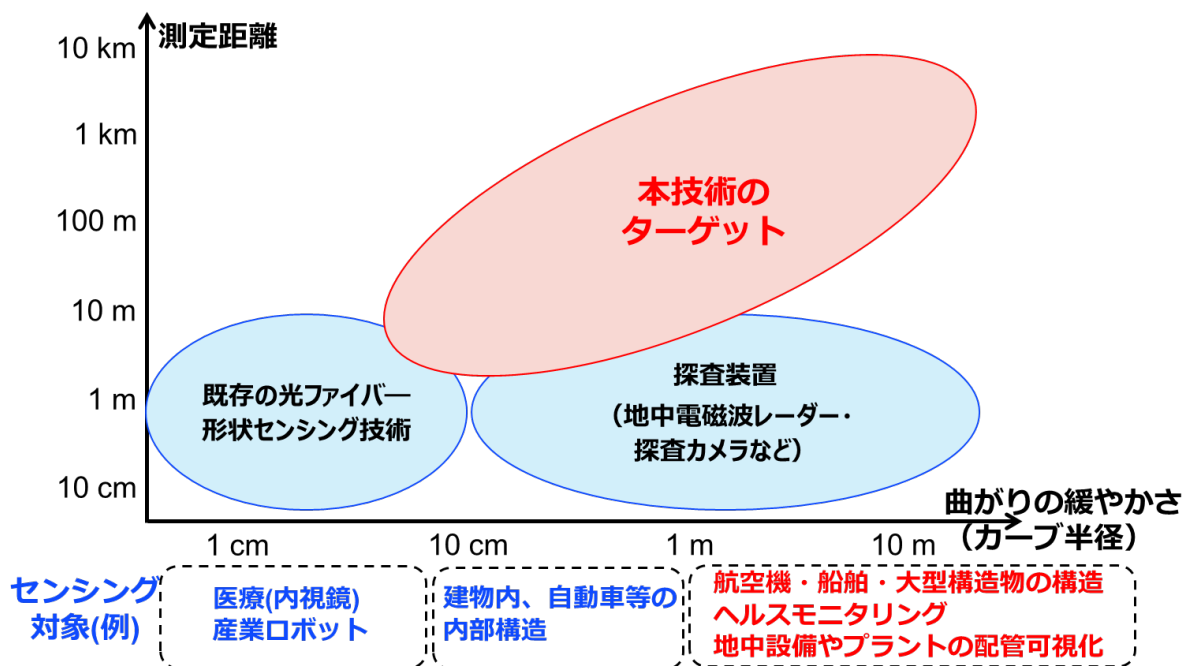


図 2: 本技術のターゲットと既存技術との関係

3. 実験の概要

本実験では NTT 筑波研究開発センタ内に設置した曲率半径 3～10 m の 3 種類の模擬管路を用意し、光ファイバーケーブルを管路に沿って固定して測定・解析を行いました(図 3)。光ファイバーケーブル内に実装された複数の光ファイバーに加わっている歪み分布を B-OTDR により取得し、東京大学の村山英晶教授が開発した形状分布の逐次解析法を用いて、光ファイバーケーブルの形状を推定しました。

最も曲率半径が大きく、検出が最も難しい曲率半径 10 m の模擬管路における実験では、実際の管路形状と、光ファイバーケーブルの歪み分布から推定された形状との誤差は 1%以下となり、高

い精度で一致しました。(図 4: 破線は実際の管路形状、実線は歪み分布から推定された形状)。曲率半径 3 m、7 m の模擬管路でも同様に高い精度で曲げ形状を検出できることを確認しました。これにより、従来の光ファイバー形状センシングでは検出が不可能だった曲率半径数 m の非常に緩やかな形状変化を検出できることを、世界で初めて実証しました。

なお、今回の実験では平面上に湾曲した最大 10 m の曲げ形状を用いて本技術の原理確認実験を行いました。今後は、曲率半径 10 m 以上のより緩やかな形状を含む、より長い距離における 3 次元形状の形状変化の検出についても取り組む予定です。

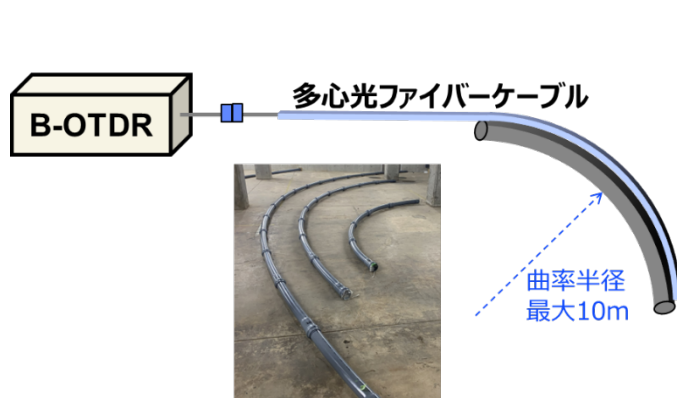


図 3: 実験の様子

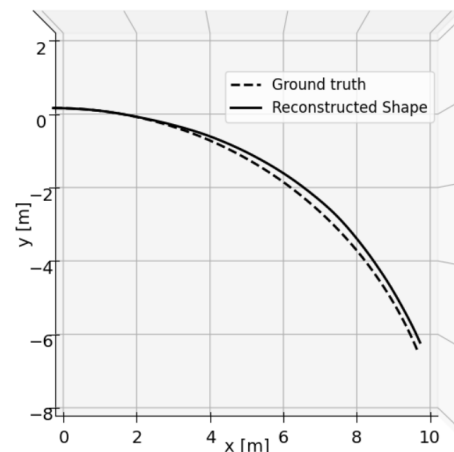


図 4: 実験結果
(最も検出が難しい半径 10 m)

4. 本技術の応用例

本技術は、センシング用光ファイバーケーブルを通線または固定することができる大型設備や社会インフラの形状の可視化や異常予測などへの応用が期待でき、例えば以下のようなユースケースが考えられます。

① 航空機、船舶、電波塔などの大型構造物や洋上風力発電設備などの海洋設備

大型構造物や海洋設備は面的あるいは局所的な意図しないわずかな歪みにより、構造物自体や設備に接続されるケーブル等の故障や破損につながる恐れがあります。本技術で、形状の変化をセンシング用光ファイバーケーブルの長さ方向にモニタリングすることで、被測定対象の寿命や故障予測がデジタルツイン上の解析で実現できると期待されます。

② 油田、化学プラントのパイプラインや通信、電力、ガス等の地下管路設備

直接的に観測できない社会インフラは正確な形状やルートを把握することが難しいですが、本技術によりその 3 次元形状のマッピングとデジタルツイン上での管理が実現できると期待されます。

なお、センシング用光ファイバーケーブル自身に生じる捻じれや温度変化が解析結果に影響を及ぼすため、ユースケースに応じてそれらを補償するシステムが必要になる場合があります。

5. 各者の役割

・NTT: 形状センシングに適した光ファイバーケーブルの設計および実験系の構築

・東京大学：光ファイバーケーブルに生じる歪み分布から形状を推定するための測定と解析技術の開発

6. 今後の展開

本実証では、光ファイバーケーブルに沿った「空間的な形状変化」を連続的に可視化できます。航空機や船舶、大型プラントなどの構造物に沿って埋め込む、あるいは通信・電力設備などの社会インフラにセンシング用光ファイバーケーブルを敷設・挿入することで、構造物全体の形状や変形を遠隔から検出することが可能となります。これにより、海底や地下などの目に見えない設備形状を地図上に可視化することや、設備上の歪みや変形による故障予測に活用でき、大規模インフラの予防保全や防災対策の高度化への貢献が期待されます。

今後、敷設性と検出精度を両立するセンシング用光ファイバーケーブル構造の最適化や模擬設備を用いたより長距離での3次元形状の検出検証を行い、センシング用光ファイバーケーブルを用いた大規模インフラのデジタルツイン化とレジリエンス向上に貢献します。

【発表者・研究者等情報】

東京大学 大学院新領域創成科学研究科

中本 真太郎 修士課程

東京大学 大学院工学系研究科

小林 真輝人 特任研究員

村山 英晶 教授

NTT 株式会社 アクセスサービスシステム研究所

半澤 信智 グループリーダー

松井 隆 グループリーダー／特別研究員

中島 和秀 フェロー

【論文情報】

雑誌名: IEEE Journal of Lightwave Technology

題名: Shape Sensing for Detecting Low Curvature Using Indoor Optical Cable

著者: Shintaro Nakamoto, Makito Kobayashi, Nobutomo Hanzawa, Takashi Matsui, Kazuhide Nakajima and Hideaki Murayama

DOI: 10.1109/JLT.2026.3673315

URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/11433602>

【用語解説】

※1 B-OTDR: 光ファイバー中で生じるブリルアン散乱によって生じた散乱光を時間的に検出し解析することで、光ファイバー中の長手方向に沿った歪み分布を測定する方法

※2 OFDR: 光ファイバー中で生じるレイリー散乱によって生じた散乱光を周波数領域で解析することで、非常に高い距離分解能で光ファイバーの長手方向の変化を測定する方法



■ 本件に関する報道機関からのお問い合わせ先

NTT 株式会社
情報ネットワーク総合研究所
広報担当

東京大学
大学院工学系研究科 広報室