

氏名	鬼頭 千尋
学位の種類	博士 (工学)
学位記番号	総博乙第 1 4 号
学位授与年月日	平成 2 9 年 9 月 2 2 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 2 項
文部科学省報告番号	乙第 3 4 1 号
学位論文題目	ブリルアン散乱を利用した分布型ファイバセンシング技術とその通信設備試験への応用 (A study on branched fiber network sensing utilizing Brillouin scattering and its application to the remote testing of telecommunication equipment)
論文審査委員	主査 島根大学教授 伊藤 文彦 島根大学教授 矢野 澄男 島根大学教授 横田 正幸

## 論文内容の要旨

Many of the social infrastructures such as bridges and tunnels constructed during Japan's period of high economic growth will soon reach the end of their useful lives. Despite the increased importance of inspecting such old infrastructures, there has been a serious reduction in the labor force responsible for the inspection work. The development of structural health monitoring (SHM) technology has long been expected to realize the efficient inspection of these social infrastructures. Against the same background, namely the rapidly decreasing labor force, there is also an urgent need for the telecommunications industry to develop a remote monitoring technique for optical communication facilities.

Research on optical sensing technology capable of remotely collecting monitoring information is being actively conducted for use as an SHM technology. A measurement technique utilizing stimulated Brillouin scattering, which is a nonlinear optical phenomenon that occurs in optical fibers, is gaining attention as a leading candidate for SHM. Brillouin sensing technology allows distributed measurement to be performed and makes it possible to sensitively measure changes in temperature or strain in a fiber under test (FUT) fixed to a sensed object. In particular, as regards Brillouin optical time domain analysis (BOTDA), which is a representative technology that employs Brillouin scattering, many studies have been undertaken to improve all aspects of measurement performance including spatial resolution, measurement accuracy, sensitivity, and measurement distance.

However, with BOTDA, it is essential to employ an FUT with a unicursal topology on the sensed object, and so the wiring scalability is very poor when we wish to add the sensed

objects. In addition, the system reliability is insufficient because monitoring ceases immediately when the FUT breaks during an emergency. The FUT should be wired flexibly and effectively according to the shape of the sensed object, and continuous long-term operation is required even under harsh environments including during an emergency. Therefore, it is necessary to improve the wiring scalability and reliability of an optical sensing system that uses Brillouin scattering. Furthermore, simplification of the system configuration reduces the introduction cost. Moreover, if the sensing system can capture the dynamic fluctuation of distortion, the application range will extend to a way of measuring the natural vibration mode, which is directly related to structural deterioration.

As regards the remote testing of optical communication networks, a technique for measuring optical loss distribution is required that corresponds to passive optical networks (PON) with optical splitters, which have already been widely installed. A technique has been developed for measuring the fiber loss of PON branches. The technique is called end-reflection assisted Brillouin analysis (ERA-BA), but in order to put it into practical use, the actual performance should be demonstrated in the field with in-service networks as a test bed. In addition, network operators would desire the wide applicability of ERA-BA to any failure scenario such as a broken fiber fault.

The purpose of this thesis is to investigate distributed sensing technology corresponding to branched fiber topology based on ERA-BA, and contribute to the improvement of wiring scalability and the reliability of optical sensing systems. In addition, the thesis will confirm the performance of ERA-BA as a remote monitoring technology for PON in the field and with a broken fiber fault, which is a preparatory step towards practical use. And the novel Brillouin measurement method proposed in this thesis will expand the optical sensing application field by combining a vibration measurement function with a simplified cost-effective system configuration.

This thesis consists of the 6 chapters summarized below.

Chapter 1 is an introduction that describes the purpose, and organization of this thesis.

Chapter 2 describes the principle of ERA-BA, which is a Brillouin measurement technology corresponding to the branched fiber topology. ERA-BA is the technical basis of the novel sensing method proposed in this thesis.

Chapter 3 proposes a branched fiber sensing technique employing time-division multiplexed probe pulses, which tune ERA-BA for temperature / strain measurement. It also describes the measurement principle, basic configuration and experimental results, and clarifies the applicable area showing the sensitivity advantage over conventional BOTDA.

Chapter 4 describes field test results when employing ERA-BA with in-service networks. In addition, it shows the results of examining the applicability to a broken fiber fault, which is a major type of failure with practical access networks.

Chapter 5 proposes a novel BOTDA technique that uses a frequency-swept pulse compatible with both the simplification of the configuration of optical measurement technology utilizing stimulated Brillouin scattering and an increase in measurement speed. The results of an experimental vibration measurement are shown that made use of high speed Brillouin sensing.

Chapter 6 concludes this thesis by summarizing the main results described in the above chapters.

In conclusion, this thesis contributes to the development of SHM technology with excellent

wiring scalability and reliability. Moreover, the results constitute a preparatory step towards the practical use of PON remote test technology and thus the realization of an effective maintenance scheme for use in the telecommunication industry. Furthermore, by proposing a vibration measurement method utilizing Brillouin scattering with a simple and cost-effective equipment configuration, we can expect to extend the use to both SHM and telecommunication network monitoring.

## 論文審査結果の要旨

本論文は、光ファイバ中のブリルアン散乱スペクトルを測定することによって、光ファイバに加わる歪や温度の変化を分布的に検出するブリルアンセンシング技術に関する研究をまとめたものである。ブリルアンセンシングに関わる研究は数多くなされているが、それらはすべて1本の光ファイバの両端からポンプ光パルスとプローブ光を入力し、ブリルアン散乱を介したプローブ光の増幅スペクトルを観測するものである（一筆書き型トポロジー）。本論文は、従来のアプローチとは異なり、光ファイバの途中に分岐を設け、並列に敷設された光ファイバによってブリルアンセンシングを行う手法を提案している（分岐型トポロジー）。これにより、途中区間の光ファイバ破断の際に一部区間の故障にとどまるという意味で頑丈性の高いシステムの構築を可能としている。加えて、分岐型トポロジーでは分岐損失が生じるにもかかわらず、従来の一筆書きトポロジーに対して、最遠点での信号対雑音比の大幅な向上が実現できること、すなわち総センシング距離の拡大ができることを発見・実証している。また、現在のいわゆるアクセスネットワーク（Fiber-to-the-Home）は分岐型トポロジーを採用しているが、これら通信設備の試験への応用が可能であることを、実際の装置の試作と現場での実証試験によって実証している。

本論文は6章よりなり、英語で記述されている。

第1章の「Introduction(序論)」では、本研究の目的、位置づけ、構成について述べ、誘導ブリルアン散乱を利用した光計測技術に関する研究の歴史的な経緯を概観している。

第2章の「End-reflection-assisted Brillouin sensing in branched network (分岐型ネットワークにおける遠端反射アシストブリルアンセンシング)」では、分岐型光ファイバに対応した損失分布測定技術である遠端反射ブリルアン利得解析法の基本原則について述べている。

第3章の「Robust and high-sensitive Brillouin sensor employing branched fiber topology (分岐型トポロジーを用いた頑丈で高感度なブリルアンセンサ)」は、本論文の眼目となる章であり、遠端ブリルアン利得解析法の測定時間を短縮するために工夫された信号多重方式を新たに提案することにより、従来の一筆書き型トポロジーに対して最遠点での信号対雑音比の大幅な向上が実現できること、すなわち総センシング距離の拡大ができることを発見・実証している。これにより、数十分岐程度の分岐トポロジーにより、光ファイバの破断に対する頑丈性に優れ、かつ高感度性にも優れたブリルアンセンシング技術が実現可能であることをこの章の結論としている。

第4章の「Applicability of end-reflection assisted Brillouin analysis in field (遠端反射ブリルアン利得解析法の実敷設環境下での適用性)」では、光ファイバによる通信ネットワーク（アクセスネットワーク）の試験方法として、遠端反射ブリルアン利得解析法の適用性が検討されている。試験装置の試作とともに、装置の実敷設環境下でのフィールド試験結果について述べられている。

第5章の「BOTDA with frequency-swept pulse for vibration measurement and simplified setup (振動計測のための周波数掃引パルスを用いた簡易型 BOTDA)」では、ブリルアンスペクトルを更に高速に取得するために、周波数掃引プローブパルスを用いる手法が新たに提案されて

いる。提案された手法により、1kHz 程度の速度で変動する動的な歪の変化をとらえることに成功している。

第6章の「**Summaries and conclusions** (要約と結論)」では、以上の各章で得られた結果を総括するとともに、本研究によって得られた成果の、橋梁、トンネルなどの社会インフラ構造物のヘルスマニタリング技術への適用や、光通信設備の遠隔監視技術への適用についての展望が述べられている。

上記の成果については、光工学分野のトップジャーナルの1つである IEEE/OSA J. Lightwave Technology (インパクトファクタ 3.67) に3編、IEEE Photonics Technology Letters (インパクトファクタ 2.1) に1編の論文が掲載されている (いずれもレフリー付)。申請者はそれらの論文の筆頭著者である。以上のことから、本論文の水準は国内外において非常に優れていると判断する。申請者の研究は、博士 (工学) の学位授与に値すると判断し合格と判定した。