

平成 26 年 5 月 17 日現在

機関番号：32690

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24700077

研究課題名（和文）広領域自然環境モニタリングのための光ファイバセンサネットワークの構築

研究課題名（英文）Optical fiber sensor network for monitoring wide-regional natural environments

研究代表者

篠宮 紀彦（Shinomiya, Norihiko）

創価大学・工学部・准教授

研究者番号：60409779

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,900,000 円、（間接経費） 570,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究では、広領域の自然環境を遠隔かつ自動でリアルタイムに観測するため、センシング機能とデータ通信機能を同一の光ファイバによって融合した環境情報計測システムの構築を目的としている。これまで、光ファイバセンサ単体としての研究は進められてきたが、高精度かつ簡便性を有するヘテロコア光ファイバセンサを利用し、データ通信機能を含めたシステム全体の開発は成されていなかった。そこで、自然環境の微気象測定とデータ通信との融合に適した光ファイバセンサを開発し、広領域モニタリングシステムの詳細設計とフィールド実験を行い、特に、農業に応用するための土壌水検知に関して有効性と実現可能性を示すことができた。

研究成果の概要（英文）：The overall concept of our study is to construct a sensor network which could be utilized in the wide area of environmental monitoring with fiber optic sensor. Focusing on the realization of a fiber optic sensor system, this research objective is to construct a remote monitoring network for soil gravity water in agricultural environments. The study involves the installation of multipoint sensors into the same fiber line and differentiates the response from each sensor by using the internet-standard protocol, Simple Network Management Protocol (SNMP). In order to extend the distance of data transmission for large-area monitoring, the study used an HC-SPR sensor coated with Ta2O5 and adopted a wavelength of 1310 nm. To distinguish the status of multi-point sensors and to construct remote data acquisition sensor networks, a method that uses SNMP is introduced. In a nutshell, the objectives of the study has been achieved and all defined requirements has been met with the proposed method.

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・計算機システム・ネットワーク

キーワード：ネットワーク運用技術 スマートセンサ 情報システム 自然現象観測・予測 リモートセンシング

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 近年、家庭から排出される生活排水や工場から漏洩する化学物質による環境の悪化や汚染は、生態系に大きな悪影響を及ぼしている。生態系を持続可能な状態に維持し、環境汚染および破壊に対して迅速な対策を行うためには、いかにして少ない人員と労力によって、広大な国土をリアルタイムで観測できるかどうかにかかっている。現在の人工衛星による測定など広範囲測定技術の発達一方で、緑や雲で覆われた広大な森林中の微気象や土壌、水中の汚染物質の測定には不向きな点も多い。また、一般的に使用されている各種センサは、人間が現地で測定することを前提に作られているため、遠隔地で自動に測定するには不向きである。そこで、本研究では、腐食による経年劣化や野外でのノイズ影響などに関して、既存の電気センサに比べて優れるヘテロコア光ファイバセンサを用いて、センシング機能とデータ通信機能を同時に実現し、遠隔地でかつ広領域のモニタリングシステムの構築を目指す。

(2) ヘテロコア光ファイバ[1]の基本的な構造は、伝送路用光ファイバを任意の位置で切断し、更にコア径の小さい光ファイバを約1mmから数cm挿入し融着したものである(図1)。光ファイバに曲げを与えたり、加工した表面上に化学物質が付着したりすると、コア径の小さいセンサ部の境界面にて、クラッド層へ漏れる伝搬光の量が変化する。このセンサは簡便な構造であり、透過光やレイリー散乱光を使うため、温度の影響を殆ど受けない。また、緩やかな曲率変化に対して鋭敏に損失が増え、比較的精度が高く、計測器は一般的に提供されている製品を利用することができるためモニタリングシステム全体が比較的安価に構成できる。これまでにヘテロコア光ファイバによる各種センサが開発されており、シングルモードファイバによる物理センサとしては、変位、歪、圧力、音、振動、バイナリスイッチなどの応用がある[2]。一方、マルチモードファイバによる化学センサとしては、屈折率、pH、温度、湿度、界面活性剤、たんぱく質などを検知できる[3]。しかし、これまでの研究はセンサ単体の開発と精度の向上を目的としたものにとどまっている。

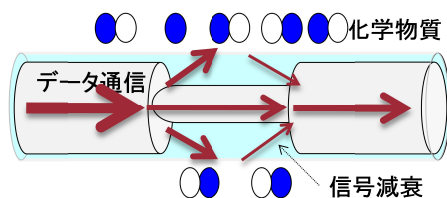


図1：ヘテロコア光ファイバセンサ

(3) ヘテロコア光ファイバによる各種センサは、光の減衰量のみを見て感知する極めて簡便な原理なので、ある一定以上の光強度が残

っていれば、データ通信のための信号が同時に流せるのではないかと考えた。さらに、ヘテロコア光ファイバセンサは利便性が高いので、化学物質を検知できる機能を広領域モニタリングシステムとして実現し、その機能を最大限に活用することができれば、世界的な関心事となっている自然環境保護の技術として応用できるのではないかと考えられる。従来技術に関して、例えば、河川の汚染原因となっている界面活性剤の測定方法は、抽出によるサンプリングを行い、吸光度を計測する方法や、液体クロマトグラフィーを用いる方法といったものが一般的であり、広領域環境における測定では多大な労力と人手が必要な上、リアルタイムでの状況の把握は困難である。これまで、シングルモードファイバとマルチモードファイバそれぞれに関して、限られたセンサ機能とデータ通信との融合に関する実験を行い、条件を限定すれば、実現可能であることが分かっている[4]。

(4) 現在までに研究されている光ファイバセンサに、FBG (Fiber Bragg Grating) や BOTDR (Brillouin Optical Time Domain Reflectometry)、マイクロベンド型といったものがある[2]。FBG および BOTDR は、細い光ファイバ自体を伸張させるセンサであり、その設置の困難さと長期使用による破断の危険性に不安が残る。また、原理的に厳密な波長シフト量の計測が必要な上、温度依存性のための補正等も必要となり、計測器や計測システムが高価になりがちである。FBG センサに関してのみ、単独の通信信号に対する影響について検討した例があり、過度の歪により光ファイバが破断しない限り、所望の計測精度を保ちつつ通信用波長の光に対する影響が無いことを実験により示している[5]。マイクロベンド型センサは、光ファイバに小さな曲率を与える際に生じる伝送損失を利用する簡便な方式であるものの、無理な曲率付与による破断の危険性が内在し、繰り返しの形状再現性が難しく精度が比較的低いという欠点がある。このように他のセンサも計測精度、施行条件、温度影響、価格等の理由から、データ通信用のインフラに組み込み、センシングとの融合システムとして応用するまで研究が及んでいないのが現状である。

## <参考文献>

- [1] K.Watanabe, et.al., "Macrobending Characteristics of a Hetero-Core Splice Fiber Optic Sensor for Displacement and Liquid Detection," IEICE Trans. on Elect., vol.E83-C, no.3, pp.309-314, Mar. 2000.
- [2] 渡辺, "光ファイバ・ネットワークセンシング," 電気学会論文誌, vol.128-C, no.10, pp.1504-1508, Oct.2008.
- [3] M.Iga, et.al., "Gold thickness dependence of SPR based hetero-core structured optical fiber sensor," Sensors and Actuators B,

vol.106/1 : pp.363-368, 2005.

[4] 阿部他, "ヘテロコア光ファイバセンサを用いた高速データ通信と ON/OFF 情報のセンシングを融合する光ファイバセンサネットワーク," 信学論 vol.J92-B, no.1, Jan.2009.  
[5] C.G.Michael, et.al., "Multifunctional fiber optics networks for composite structures," Smart Structures and Materials 2004, Proc. of SPIE, vol.5391, pp.741-752, 2004.

## 2. 研究の目的

(1) 現在、農業分野においては、高齢化や後継者確保が困難な状況が続いており、また、新たに農業へ参入する場合にも、知識や経験を積むための労力が大きいため、深刻な人材不足に陥っており、耕地管理の労働負担を軽減し、新規就農を支援できる情報システムが社会的に必要とされている。一般的に企業や各種研究機関は、農業支援や生産性向上を目的とした無線センサシステムの研究開発を行い、製品として広く普及しつつある。しかし、無線センサシステムは、バッテリーの給電や交換などのメンテナンス問題、センサの腐食や電磁誘導による信頼性の問題、また、通信品質の不安定さや通信範囲と容量の制限に関する問題も残されている。本研究は、無線センサだけでは解決できないシステムの問題を克服するために、水分の計測機能と情報伝達機能とを併せ持つヘテロコア光ファイバ SPR (Surface Plasmon Resonance) センサを利用し、新しい農業支援センサネットワークの設計および構築を目的としている。

(2) 本研究では、図 2 に示すように、農業環境のみならず、河川、自然公園、農園などの広領域における多地点観測を最終的に想定している。例えば、河川においては、上流監視局から光信号と制御データをヘテロコア光ファイバによって送信し、自動計測地点までの間に設置されたセンシング部での光減衰を計測器で感知し、その測定値は制御装置を経由し、データとして光ファイバで次の自動計測地点へ送信され、その通信のための光信号をそのまま次のセンシング部の光源として利用する。また、別の形態として、図 2 のように広大な土地において、河川と同様にリレー形式でセンシングデータを送信し、自動計測地点をループ状に配置すれば、限られた施設で効果的に観測できる。このように、始点である監視局から、終点の監視局までリレーさせて、センシングデータを収集できれば、遠隔かつ広領域の環境モニタリングが実現できる。

(3) 具体的に野外の自然環境下へ展開できるシステムを実現するため、次の課題に取り組む。まず、自然環境における微気象（特に湿度または水分）を測定するヘテロコア光ファ

イバセンサを対象とし、通信で一般的に使用される 850nm と 1310nm 波長帯を用いたデータ通信機能の特性を分析し、計測と通信の融合に適した仕様のファイバセンサを開発する。次に、モニタリングシステムの省電力化を目的とした詳細設計を行い、インターネットを介した遠隔操作による実際の観測を行う。

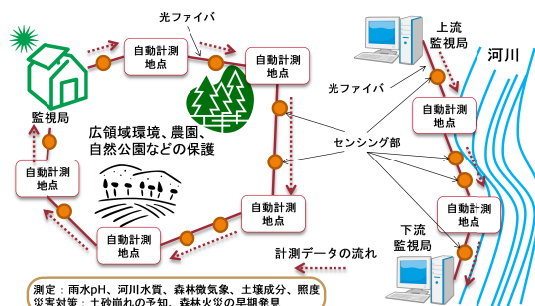


図 2：目的とするモニタリングシステム

## 3. 研究の方法

(1) 本研究は 2 年間にわたる研究計画を立て、光ファイバセンシングとデータ通信との融合技術を開発し、自然環境モニタリングシステムの試作およびフィールド展開を目標とする。まず、世界の農業を取り巻く状況とセンサネットワークとの関係から、農業支援のための情報技術の問題点を分析する。次に、センサネットワークを実現する要素技術の 1 つである様々な光ファイバセンサの開発動向について調査し、農業以外の応用についても利点と欠点を比較検討する。これらの光ファイバセンサの中であって、本研究で用いるヘテロコア光ファイバ SPR センサの優位性を整理する。また、無線および有線を包括する全体的なセンサネットワークの技術動向を調査しつつ、ネットワークシステムを構築するためセンサの敷設容易性、永続的な電源供給、データ通信の伝送性能と高信頼性、機器コストについて機能要求を明示する。これら指標に基づいて現状、未解決の課題を挙げ、本研究の課題と位置づけを明確化する。

(2) これまで述べてきた課題を解決するために提案するシステムの全体像および要素技術について詳細に説明する。特に、土壌の水分検知に特化したヘテロコア光ファイバ SPR センサに焦点をあて、センシングとデータ通信の同時利用を可能にするため五酸化タングステム ( $\text{Ta}_2\text{O}_5$ ) を表面に付着させることにより、光通信で標準的に使用されている 1310nm の波長を用いた計測技術を提案する。屋内における通信性能実験によって、水分計測を実施している最中でも送信データのロスが全く発生しないことを確認し、屋外へのシステム展開を目指し、実際にデータ通信ネットワーク機器とセンサ周辺の計測機器を結合し、土壌中に SPR センサを埋め、水分検知をする実験を行う。ここでは、データ通信

の実例として Web カメラによる動画情報を伝送している最中に、土壌へ意図的に水を散布したところ、センサが水分を検知しつつ、途切れなく動画を認識できるかどうかを確認する。また、1本のファイバ上に複数のセンシングポイントを実装し、遠隔地で計測結果を取得するため、情報ネットワークの標準プロトコルである SNMP(Simple Network Management Protocol)を用いたセンシングデータの識別方法を提案する。

#### 4. 研究成果

(1) 目的とする自然環境モニタリングシステムを構築するにあたり、本研究で満たすべき要求条件を明確にした。(i) シンプルなシステム構成とネットワーク管理：OTDR (Optical time-domain reflectometer) や OSA (Optical Spectrum Analyzer) などの高価なデバイスを避け、簡易なフォトダイオードとパワーメータを利用する。ネットワーク管理には、多くの機器に標準搭載されている SNMP エージェントを利用する。(ii) 継続的な電力供給：光ファイバセンサは、センシングポイントに直接電力が必要ないため、特定の場所に集約された計測機器に対してのみ電力を供給すれば良いので、バッテリーなどを用いずに安定した電力環境を構築できる。(iii) データ通信の信頼性とリアルタイム計測：無線センサネットワークと異なり、光ファイバを用いた通信は外部からの干渉を受けずに大容量のデータを流すことができる。さらに安定した電力供給から通信の信頼性をさらに高めることができる。(iv) 広域な環境に適用可能：ヘテロコア光ファイバは、SPR センシングをしつつ、データ通信の伝送路として同時に利用できる。センシングに利用する光波長として長距離通信の標準規格である 1320nm を利用できれば、理論上、約 2000m の通信が可能となる。(v) 同一ファイバ上の他地点計測：SPR センサ挿入による光強度損失を考慮しつつ、1本のファイバ上に複数のセンシングポイントを埋め込み、他地点同時計測を可能とする。その際、ネットワークを介した遠隔地からの計測を実現するため、インターネット標準の管理用プロトコルである SNMP を用いる。

(2) 自然環境や農場の土壌水分を検出するため、図 3 に示すように、それぞれコア径の異なる 2 種類のファイバを組み合わせたヘテロコア SPR センサを用いる。具体的には、コア径 50 $\mu$ m のマルチモードファイバの途中に、コア径 3 $\mu$ m のシングルモードファイバを数ミリ程度の長さで挿入する。このコア径の異なるヘテロコア部では常に光が漏れており、内部から表面への反射が発生している。この表面に金属薄膜をコーティングし、表面に水分が付着すると、エバネッセント波が金属表面で反射し、表面プラズモン波と共鳴

する。この時、ファイバ内部の光はエネルギーを奪われ強度が減衰し、この減衰量を測定することによってセンサとして機能させる。SPR が発生する波長を、データ通信の国際的な標準として使用されている 1310nm に設定するため、SPR センサの表面にコーティングする金属薄膜として、25nm の薄さの金 (Au) と 60nm の薄さの 5 酸化タンタル (Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) を使用した。これにより、挿入長 10mm で、約 2dB の光強度減衰を検出することができる。

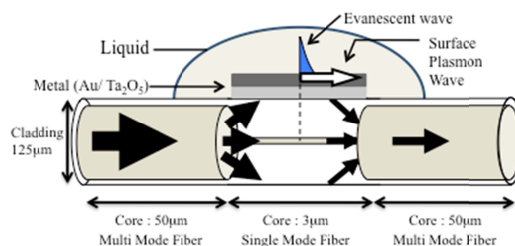


図 3：ヘテロコア SPR センサの構造

(3) 図 4 に示すように、ヘテロコア光ファイバを用いて、長距離データ通信と SPR センサとの融合が実現可能かどうかを調べるため、試験システムを構築して実験を行った。SPR センサの両端にそれぞれ 500m のマルチモードファイバを接続し、屋内に 1000m 強の通信システムを構築した。水分検知の試料として、純水を用いた。図 5 は、実験結果を示しており、最初の 30 秒はセンサが空気中にあるため光の減衰はゼロになっている。その後、センサを水に浸すと平均の減衰値は 0.6dB となった。ネットワーク内に流れるデータ通信の性能解析には、富士通ネットワークテクノロジー製の NextStream を用い、データスループットとデータの FCS (frame check sequence) エラーを測定した。距離による信号減衰および SPR センサ計測による光強度減衰に関わらず、NextStream は一切、FCS エラーを検出せず、データ通信が途切れることはなかった。これは、提案システムによって、広域な環境においてもセンシング機能を維持しつつ、データ通信が途切れなく行える可能性を示している。

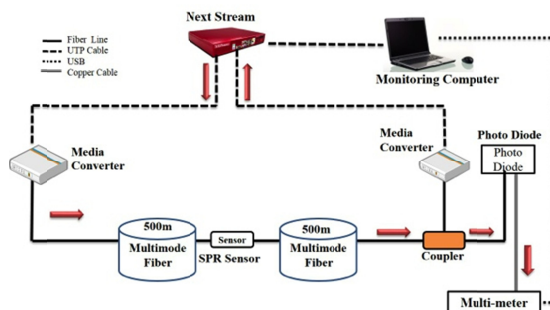


図 4：SPR センサによるデータ通信と水分検知との融合システム実験

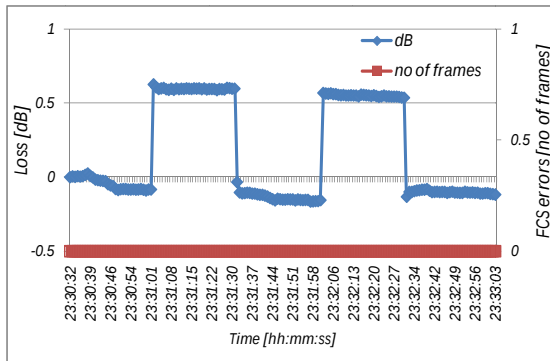


図 5：光信号減衰量とデータ通信の信頼性

(4) 図 6 に示すように、実際の農場を借りて提案するシステムを構築し、目的とする要求条件を満たせるかを確認するための動作実験を行った。具体的には、OSA (Optical Spectrum Analyzer) や OTDR (optical time-domain reflectometers) などの高価で複雑なデバイスを使わず、シンプルネットワーク管理と経済的なシステム構成にした。また、バッテリーを使わず継続的に必要機器へ電力を供給でき、データ通信の品質を保証でき、さらに広域な環境にも適用可能であることを示した。農場を視覚的に監視できるように、計測用 PC から制御可能な Web カメラを接続し、映像データと計測データを受信する。SPR センサに水分を付着させ、計測データから水分検知の確認をしたが、同じファイバ内を通過する Web カメラの映像データは損失無くリアルタイムで見ることができた。この時の映像データは、ファイル形式が WMV フォーマット、ファイルサイズ 12.8MB、撮影時間 5 分 2 秒だった。

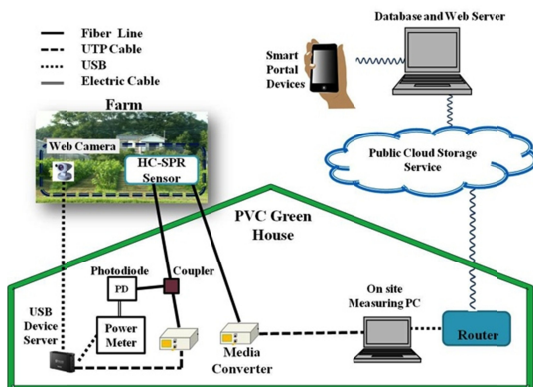


図 6：実際の農業環境を使った計測実験

(5) 図 7 は、農業環境において、SPR センサを用いて土壌水分を検知するためのシステム構成を示している。まず、実験に使用する土壌を 15～20% 程度の湿度に設定する。次に、SPR センサをプラスチックのケース (W:55mm×H:28 mm×D:95mm) に入れ、ケースに泥が入り込まないようにウレタンメッシュで覆ってから穴の空いたふたをする。この後、60 秒間、土壌に 1000ml の水をスプレーによって均等に散布し、Web カメラで写し

ている映像データとセンシングデータが、SPR センサとして使用しているファイバを通して、ネットワークに接続された遠隔地の PC で見ることを確認した。得られたデータは一度、ローカル PC の記憶領域に保存され、パブリッククラウドサービスを利用してインターネット上にアップロードされる。計測サーバはクラウドストレージからデータを取り出し、リアルタイムでそのデータを表示することができる。ユーザは、遠隔地にいても、PC やスマートデバイス、タブレット PC などを利用し、計測サーバと同じ原理で映像データや計測データを見ることができる。

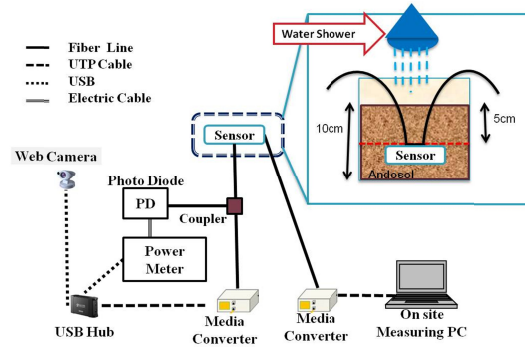


図 7：土壌水分の遠隔監視実験

(6) センサネットワークにおいては、データを転送するための通信プロトコルが大変重要な役割を果たす。本研究では、センサの状態を監視するため、既存のインターネット管理用標準プロトコルである SNMP を用いる。SNMP は多くのネットワーク機器に標準搭載されており、ソフトウェア開発の負担を軽減することができる。特に、SNMP の障害管理機能によって、遠隔地に設置されたマネージャソフトウェアから通信機器の状態を監視できるため、非常に有用であると考えられる。この SNMP の障害管理機能を用いて、SPR センサが反応したときに発生する光強度減衰を一種の通信障害と意図的に見なし、「trap」と呼ばれる障害通知を発行させ、マネージャソフトウェアがネットワークを通じて受信し、センサの状態を把握する。

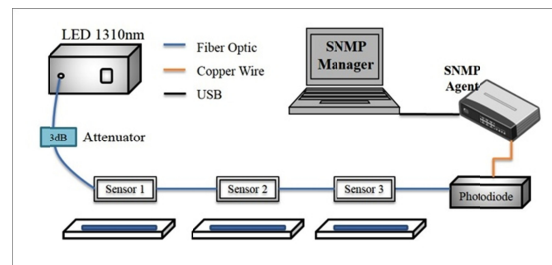


図 8：SNMP を用いたセンサ識別システム

実験構成は図 8 に示すとおり、LED 光源、3dB のアッテネータ、フォトダイオード、SNMP エージェント、SNMP マネージャを接続し、2mm、5mm、15mm という挿入長の異なる 3 つの SPR センサを用いて識別を

試みる。光強度減衰のレベルに対応させた trap 識別番号を設定し、光強度減衰があるレベルに達したとき、SNMP エージェントから trap が出力され、SNMP マネージャがネットワークを介して受信する。図 9 に示された実験結果から、3 つの SPR センサの組み合わせから発生する光強度減衰値を識別できていることが分かる。

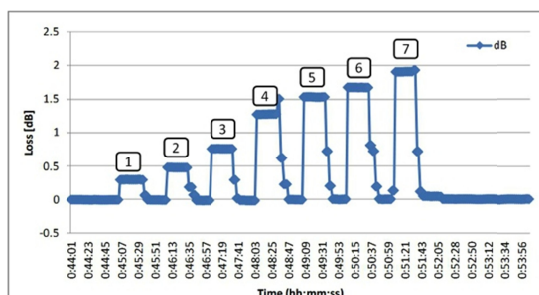


図 9：SNMP 計測で得たセンサの減衰値

(7) 本研究によって実現可能性を示したシステムは、簡便なシステム構成、永続的な電源供給、高いコスト効果、データ通信の高信頼性、リアルタイム計測、他地点同時センシング、広い領域への適用性、という機能要求を実現可能なレベルで満たしている。また、センシングとデータ通信の同時利用を可能にする光ファイバセンサの新たなインテグレーション技法を確立している。これらの内容は、情報システム分野のみならず農業情報工学分野においても独創的であると考えられ、実現可能なシステムとして社会に大きく貢献できることが期待される。また、研究によって培われた要素技術は、他のシステムへの応用も期待できる一般性を含んでいる。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2 件)

Lee See Goh, Yuji Anoda, Kazuhiro Watanabe, Norihiko Shinomiya. Remote Management for Multipoint Sensing System using Hetero-core Spliced Optical Fiber Sensor. Sensors 2014, 査読有, 14(1), 468-477; doi:10.3390/s140100468.

Lee See Goh, Norikazu Kumekawa, Kazuhiro Watanabe, Norihiko Shinomiya. Hetero-core Spliced Optical Fiber SPR Sensor System for Soil Gravity Water Monitoring in Agricultural Environments. An International Journal of Computers and Electronics in Agriculture, ELSEVIER, 査読有, 2014. doi:10.1016/j.compag.2013.12.008

〔学会発表〕(計 8 件)

Koki Fuchigami, Lee See Goh and Norihiko Shinomiya, Remote Monitoring System with Optical Fiber

Sensors and the Internet-Standard Protocol. IARIA the Ninth International Conference on Systems (ICONS) 査読有, Proc. pp.98-101, Nice, France, Feb. 2014. (Best Paper Award)

Junko Ichikawa, Tetsuya Kon, Kazuhiro Watanabe and Norihiko Shinomiya, Support System for Caregivers with Optical Fiber Sensor and Cleaning Robot. IARIA the Ninth International Conference on Systems (ICONS) 査読有, Proc. pp.94-97, Nice, France, Feb. 2014.

Lee See Goh, Kazuhiro Watanabe and Norihiko Shinomiya. Feasibility Evaluation of Multi-point Sensing for Hetero-core Spliced Optical Fiber Sensor Using Internet-based Protocol. 7th International Conference on Sensing Technology (ICST) 査読有, Proc. pp.569-572, Wellington, New Zealand, Dec.2013.

淵上貢記, 吳麗思, 篠宮紀彦, SNMP による光ファイバセンサ状態の遠隔識別手法, 電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-18-29, 福岡県(福岡工大), 2013 年 9 月.

菅野光博, 吳麗思, 久米川宣一, 渡辺一弘, 篠宮紀彦, 水耕栽培のための光ファイバセンサネットワーク, 電子情報通信学会 知的環境とセンサネットワーク研究会, ASN2013-27, pp.139-142, 熊本県(熊本大), 2013 年 5 月.

市川純子, 近哲也, 渡辺一弘, 篠宮紀彦, 生活支援を目的としたセンサネットワークとロボットの統合管理システムの構築, 電子情報通信学会 知的環境とセンサネットワーク研究会, ASN2013-28, pp.143-147, 熊本県(熊本大), 2013 年 5 月.

Lee See Goh, Kazuhiro Watanabe, Norihiko Shinomiya. A Hetero-Core Spliced Fiber Optic SPR Sensor Network for Extensive-area Natural Environment Monitoring. IOP 22th International Conference on Optical Fibre Sensors (OFS-22) 査読有, Proc. of SPIE Vol.8421, 8421AR-1, Beijing China, October 2012.

阿野田祐士, 篠宮紀彦, SNMP による複数の光ファイバセンサ状態の識別手法. 電子情報通信学会ソサイエティ大会. B-19-25. 富山大学(富山県). 2012 年 9 月.

〔その他〕

ホームページ等

[www.t.soka.ac.jp/~shinomi/project.html](http://www.t.soka.ac.jp/~shinomi/project.html)

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

篠宮 紀彦 (SHINOMIYA, Norihiko)

創価大学・工学部・准教授

研究者番号: 60409779