

通信と計測を融合する光ファイバセンサネットワークに関する研究

A study on optic fiber sensor networks integrating communications and sensing functions

06D5101 阿部 伸俊

指導教授 勅使河原 可海

ABSTRACT

Optical fiber technologies have been developed for not only high-speed data transmission media but also sensing devices monitoring physical quantities. An optical fiber sensor enables remote and distributed measurement on a fiber line without electric power supply to any sensing point. This paper proposes a novel optical fiber sensor network with hetero-core spliced fiber optic sensors which can play a dual role as a gigabit-class communication network and a bending strain sensing system. This paper also reports the performances of the integrated system with respect to communications characteristics and sensing accuracy. In addition, our trial system has demonstrated the feasibility of our proposed system. Moreover, simulated experiments show our enhanced system can improve number of sensors in a fiber line.

Keywords: ubiquitous sensor network, optic fiber sensor, optical fiber communication

1. 序論

近年、情報通信技術の急速な発展により、インターネット上で、多種多様なサービスが幅広く展開され、数多くの人に利用されている。また、インターネットを利用する際の端末も、PCやモバイル端末をはじめ、ゲーム機やテレビなどが用いられ、多様化が年々広がっている。こうした動向から、近い将来は、あらゆる人やものが当たり前のようにネットワークへ接続される時代が来ると予想される。

「ユビキタス」とは、ラテン語で『遍く存在する』という意味の言葉である。情報通信分野では、このユビキタスという言葉の概念を根幹とした、将来の情報化社会が目指す一つの理想像がある。いわゆる、「ユビキタスネットワーク」である。ユビキタスネットワークとは、あらゆる空間に遍く配備された無数のコンピュータによって、実環境の多様な情報を収集し、その情報を活用して実社会での我々の生活を支援する環境であると言える。

本学では、ユビキタスネットワーク空間創出に向けて、文科省私立大学学術研究高度化推進事業「私立大学社会連携研究推進事業」（平成18年度～平成22年度）：研究課題「測位/光神経複合センサノードによるユビキタス・モニタリング・ネットワークの開発とその産業応用への展開」に取り組んでいる[1]。このプロジェクトでは、特徴的センサ群を用い、特徴的に配置した分散ノードネットワークによる知的モニタリング空間を構成し、ネットワーク全体での重層的かつ総合的判断が可能なユビキタスサービス空間の実現を目指している。

本研究は、このプロジェクトの一環として実施したものであり、プロジェクトリーダーである渡辺一弘教授によって発明されたヘテロコア光ファイバセンサ[2]を用い、通信と計測機能を提供する新たな光ファイバセンサネットワーク（OFSN: Optical Fiber Sensor Network）の開発・実現に取り組んできた[3][4]。

光ファイバは、高速伝送媒体として広く通信分野で利用されているが、散乱などの光特性を利用したセンサとしても機能する。例えば、光ファイバセンサを利用して、歪み、圧力、振動、温度などの環境情報を取得することができる。また、光ファイバセンサは、遠隔かつ多地点での分布的な計測が可能であり、センサ素子への電力供給が必要ないなどの特徴を持つ。このような光ファイバの高速伝送媒体及びセンサ機能を活用した新たなセンサネットワークが実現できれば、従来のセンサネットワークが抱えるバッテリー切れや通信の制限といった課題の解決が期待できる。

本研究の目的は、OFSNの通信及び計測性能を評価すると共に、システムの実現可能性を示すことである。本論文では、センサネットワークに対する一般的な要求からOFSNの得失を議論し、その結果からOFSNの課題を明らかにした。そして、試作システムを構築し、その実現可能性を評価した。また、運用段階における性能を解析するためにシミュレーション実験を行った。

本論文の構成は以下のとおりである。2章では、OFSNの概要を述べると共にその得失から課題を明らかにする。3章ではシステムの実現可能性を検証する。そして、4章では、シミュレーションによりOFSNの性能を分析する。

2. 本研究の目標と課題

2.1. センサネットワークの現状

これまで、センサネットワークに関する様々な提案が行われると共に、そのシステムが満たすべき要求が広く検討されてきた。以下にその要求項目を挙げ、WSNとの比較からOFSNの得失を議論する。

(1)敷設容易性：無線センサデバイスは、小型でかつケーブルを必要としないため敷設が容易である。一方、OFSNでは、光ファイバセンサを空間内に張り巡らせる必要があるため、敷設には手間がかかってしまう。

(2)経済性：WSNでは、MEMS（Micro Electro Mechanical Systems）といった技術の進歩によって、センサデバイスは比較的安価に購入可能であるが、電力事情により通信可能範囲が狭いため、密集させて配置する必要がある。つまり、計測範囲が広い場合には、必ずしもシステム全体として安価であるとは限らない。OFSNは、センサ素子や計測器が、無線センサデバイスに比べて高価である。

(3)電力供給：無線センサデバイスは、バッテリー切れが問題であり、それに伴う管理も極めて煩雑である。OFSNでは、センサ素子への電力供給は不要である。そのため、通信・計測機器への電力供給だけで、長期間継続的に安定した計測が実現可能である。

(4)ネットワーク通信容量：WSNでは、無線通信による電力消費がセンサノードの電力事情を支配するため、低速かつ間欠的な通信とならざるを得ない。一方、OFSNは、高速大容量通信が実現であると共に、通常のLANとしても利用できる。

以上の議論から、WSNとOFSNは互いに補完関係にあると言える。つまり、OFSNの欠点を克服することが出来れば、WSNの課題解決への貢献が期待できる。

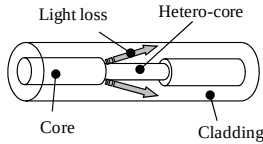


Fig. 1 Structure of hetero-core spliced fiber optic sensor.

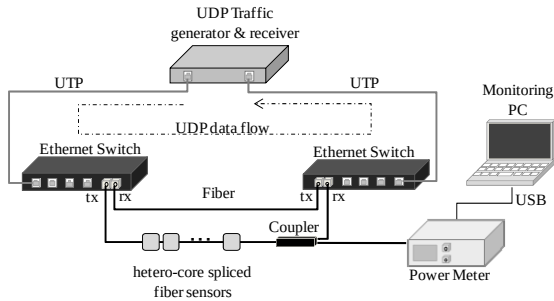


Fig. 2 Trial system configuration.

2.2. 実現に向けた課題

本研究の目標は、光ファイバが持つ本来の通信及び計測性能を維持しつつ、2.1節で挙げた欠点を改善することである。そこで、通信及び計測機能を融合するシステムを具現化する上で考慮すべき課題として、以下の項目を考える。

- (i)デバイスコスト: 安価なセンサ及び機器の利用。
- (ii)システム構成: 基本構成の単純化、構成要素の削減。
- (iii)通信品質: 融合による通信品質への影響が軽微。
- (iv)計測性能: 融合による計測性能への影響が軽微。
- (v)センサ多重度: 1ファイバに挿入可能なセンサ数の向上。

本研究では、まず課題(i)~(iv)を解決するために、通信品質及びセンサ精度の確保及び、システムの低価格化及び構成の単純化について取り組んだ。そして、試作システムを構築し、その実現可能性を評価した。

次に、センサ多重度を向上可能なシステムの提案を行った。このセンサ多重度が高いほど、システム全体の通信・計測機器数及び光ファイバケーブル数の削減に繋がる。これにより、システム全体としてのコスト削減が期待できる。

3. 実現可能性の検証

3.1. デバイスコストの削減

提案システムでは、センサ素子及び伝送媒体としてヘテロコア光ファイバセンサを用いた。ヘテロコア光ファイバセンサの構造を図1に示す。ヘテロコア光ファイバセンサは、伝送路用光ファイバを任意の位置で切断し、その切断部分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。このコア径の小さい部分をヘテロコア部と呼ぶ。このヘテロコア部の境界面では、伝播光の一部がクラッド層へ漏れる。さらに、ヘテロコア部に曲げを与えると、光ファイバの物理的な変位量に応じてクラッド層に漏れる光の量に変化する。この透過光の減衰量を測定することでヘテロコア部に加えられた物理的な変位量を計測できる。

このようにヘテロコア光ファイバセンサは、光ファイバの切断と融着という比較的単純な製造過程によって作成することができるため、センサ素子のコストが非常に安価である。さらに、光源及び光計測器として比較的安価なレーザダイオード(LD: Laser Diode)とPD(PD: Photo Diode)が利用できる。

3.2. システム構成の単純化

試作システムの構成を図2に示す。試作システムでは、

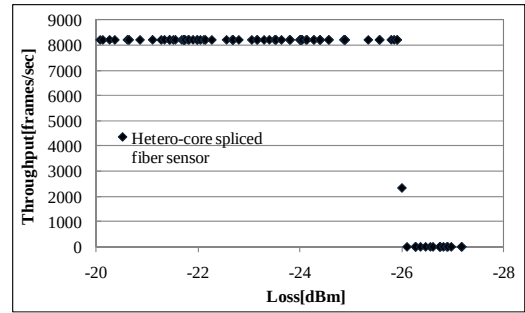


Fig. 3 Light loss vs. throughput for hetero sensors.

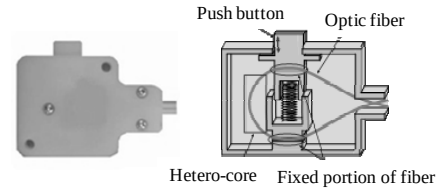


Fig. 4 Binary switch sensor module.

通信・計測共用光源及び通信用受光器としてギガビットEthernetスイッチを用い、計測用受光器としてはパワーメータを用いた。

このEthernetスイッチには、波長1310nmの光を出力する2芯SFP (Small Form factor Pluggable) 光トランシーバが装着されている。また、ヘテロコア光ファイバセンサが挿入された光ファイバは、カプラーによってSFPの受信ポートとパワーメータに向けて2分岐させている。センシングによる通信品質への影響を調査するために、UDPトラフィックを送受信する装置をEthernetスイッチに接続した。この装置は、約1GbpsのワイヤスPEEDでトラフィックを生成することが可能である。

このシステムは、一つのLDによって通信及び計測を行うため、通信・計測用光源を別々に用意する場合に比べて、システム構成が単純となる。また、通信用と計測用に用いられるPDは、原理的に同じものであるため、LDと同様に通信と計測で共有することが期待できる。つまり、一対のLD・PDによって通信・計測機能を同時に提供することが期待できる。

3.3. 通信特性評価

ヘテロコア光ファイバセンサは、光信号を減衰させることによりセンサとして機能するため、通信品質を劣化させる可能性がある。そこで、試作システムを用いて、ヘテロコア光ファイバセンサの通信特性を評価した。実験では、まず光パワーレベルを自由に減衰することができる可変アッテネータを用いて実験を行った。その結果、光損失量が-26dBm付近に達すると急激にスループットが低下した。これは、PDの最小受光感度が-26dBmであることを意味している。

次にヘテロコア光ファイバセンサによる実験を行った。図3にヘテロコア光ファイバセンサを用いた場合の損失量とスループットの関係を示す。図より、PDの最小受光感度である-26dBm付近でリンク断が発生していることが確認できる。これらの結果から、ヘテロコア光ファイバセンサによる光信号の減衰は、可変アッテネータを用いた場合とほぼ同様の特性であることが分かった。

つまり、通信品質劣化要因は、純粋な光の減衰のみであり、それ以外の要因はないことが明らかとなった。従って、ヘテロコア光ファイバセンサによる光損失が、LDの光出力レベルとPDの最小受光感度の差分(リンク許容損失)以内であれば、通信品質に影響はないと言える。

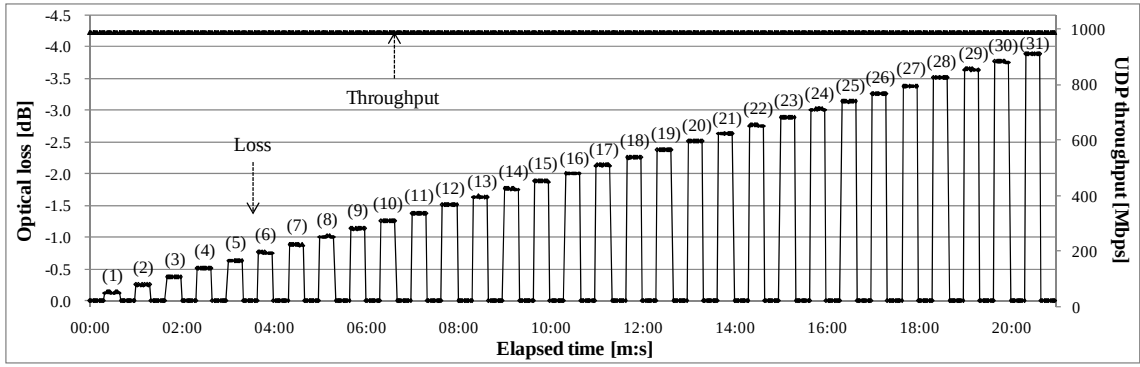


Fig. 5 Light loss of a combination of five switch sensors and UDP throughput.

3.4. 検証実験

実現可能性を検証するために、試作システムの運用実験を行った。ヘテロコア光ファイバセンサとして、図4に示すバイナリスイッチ構造のセンサモジュール(スイッチセンサ)を用いた。スイッチセンサの内部には1つのヘテロコア部が挿入されており、スイッチ部が稼働するとヘテロコア部の曲率が変わり一定量の損失を与える。このスイッチセンサは、ドアや窓の開閉状況といった特定個所における2値情報の取得に適している。このスイッチセンサは、1ファイバ上に複数個挿入した場合でも、各スイッチセンサの損失量に適切な差異を設けることで、各スイッチセンサのON/OFF状態を個別計測することができる。

運用実験では、5つのスイッチセンサをタンデム接続した場合でもそれぞれのON/OFF状態が識別可能であること、そして、通信品質の劣化なしに大容量通信が可能であることを検証した。各スイッチセンサのON/OFF状態の損失差には、リンク許容損失以内となるように、それぞれ0.125dB, 0.25dB, 0.5dB, 1dB, 2dBと設定した。

図5に、5つのスイッチセンサによる光信号の損失量とセンシング中におけるスループットを示す。5つのスイッチセンサにより生じる損失量は、各スイッチセンサのON/OFF状態の組み合わせによって、全部で31通り存在する。図5内の番号は、スイッチセンサのON/OFF状態の組み合わせに対応している。

図5の各番号の損失量を比べると、隣接した番号間の損失量には0.125dBの差分が生じており、各スイッチセンサのON/OFF状況が明確に識別できていることが確認できる。また、損失量が最大となる全スイッチセンサがON状態の場合(図中(31))でも、UDPスループットは全く変化せず、約1Gbpsの高速大容量通信が維持できていることが確認できる。

以上の結果より、提案システムは、センサ多重度が5である場合、通信品質及びセンサ精度を確保しつつ、低価格かつ単純な構成で実現可能であることが示された。

4. センサ多重度の改善

センサ多重度を改善する上で、最大の障害はヘテロコア光ファイバセンサによる光損失である。従来のスイッチセンサでは、計測期間中の光損失が累積されるため、通信品質への影響が顕著であった。

そこで、センサ多重度を改善するために、損失の発生時間が非常に短いバイナリ型スイッチセンサモジュールを利用する。ここでは、このセンサモジュールを、発生する損失の形がパルス状であることから従来のセンサモジュールと区別して、パルス型スイッチセンサと呼ぶ。

このパルス型スイッチセンサの特長から、センサ多重度を増加させた場合でも、センサの利用状況によっては、リ

ンク断の発生確率が低い場合があり得る。そこで、シミュレーション実験により、センサの利用状況とセンサ多重度の関係を分析した。

4.1. パルス型スイッチセンサ

パルス型スイッチセンサの構造を図6に示す。パルス型スイッチセンサは、スイッチ部、板バネ、ヘテロコア光ファイバセンサで構成される。光ファイバは、ヘテロコア部に若干の曲率が生じるように3点で固定されている。

スイッチ部にはかぎ爪状の部品が付いており、スイッチ部が押されると、板バネがかぎ爪部分に引っかかることで変形し、ヘテロコア部の曲率が小さくなる。さらに押し込むと、板バネとかぎ爪部分の接触が無くなり、板バネの弾性によって光ファイバは直ちに初期状態に戻る。この動作をONとする。また、スイッチ部を離すと、今度は逆にかぎ爪部分により板バネが引っ張られる。この時、板バネによって押さえられていた光ファイバは、自身の弾性によって広がるため、ヘテロコア部に与えられている曲率が小さくなり、損失が低下する。さらにボタンが完全に離されると、かぎ爪部から板バネが離れ、光ファイバは初期位置に戻る。この動作をOFFとする。

このように板バネの弾性を利用することで、ヘテロコア部に瞬間的な曲率変化が与えられ、パルス状の損失変化が発生する。このパルス型スイッチセンサは、損失が発生している時間間隔が短い。そのため、多数のパルス型スイッチセンサを1ライン上に挿入した場合でも、通信品質に与える影響は少なくなる。

4.2. リンク断発生条件

一般的に、SFP等の通信機器では、リンクの安定化のために、リンク断が生じる損失値とリンク断から通信が回復するときの損失値には差が設けられている。ここでは、前者をリンク断発生損失値、後者をリンク断回復損失値と呼ぶこととする。また、両者の差をヒステリシス値と呼ぶ。リンク断発生損失値 L_d 、リンク断回復損失値 L_u 及びヒステリシス値 H の関係は、以下の式で表せる。

$$L_d = L_u + H \quad (1)$$

ここでは、このリンク断発生損失値及びリンク断回復損失値を基準とし、センサ多重度とリンク断の関係を述べる。

リンク断が発生するのは、ある閾値以上の正パルス損失が発生し、光信号に与えられた合計損失量がリンク断発生損失値を超えたときである。この閾値 L は、リンク断発生損失 L_d 及び各センサの挿入損失 θ_i から以下の式で求まる。

$$L = L_d - \sum_{i=1}^n \theta_i \quad (2)$$

ここでは、閾値 L を許容損失量と呼ぶこととする。式(2)

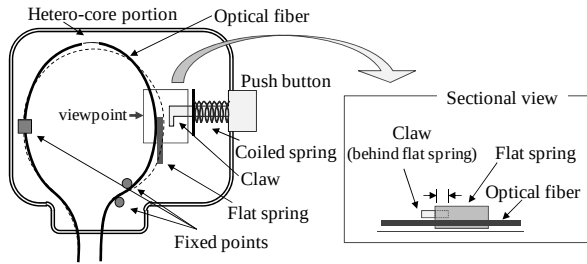


Fig. 6 Pulse switch sensor module.

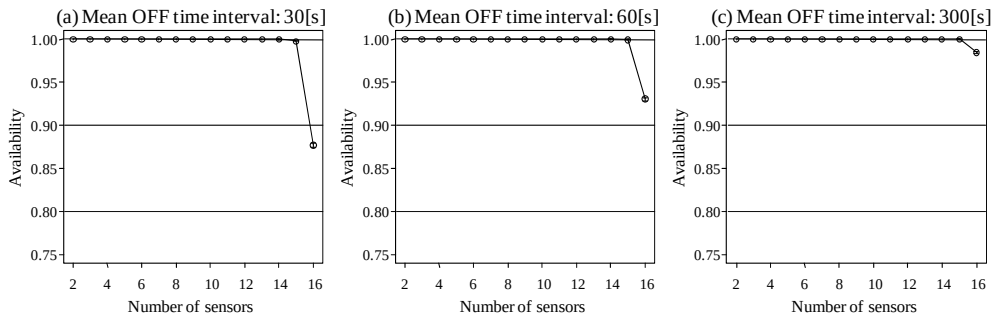


Fig. 7 Number of sensors vs. availability in case of using pulse switch sensor modules

から分かるように、センサ多重度が大きいほど許容損失量は小さくなるため、よりリンク断が発生しやすくなる。

センサ多重度を際限なく増やすと、やがて通信リンクとして利用できなくなる。そのため本研究では、少なくともセンサが稼動していない場合には、通信リンクとして利用できるようにセンサ多重度を制限する。従って、以下の条件を満たす範囲内でセンサ多重度を設定する。

$$L_u \geq \sum_{i=1}^n \theta_i \quad (3)$$

4.3. シミュレーション結果

実際の利用環境を想定した各パルス型スイッチセンサの利用頻度を設定し、シミュレーション実験により通信品質とセンサ多重度の関係について解析する。リンク断による通信品質の劣化具合を表す指標として、一般的な通信リンクの品質指標である可用率を導入する。ここでは、リンクの可用率を、シミュレーション時間に対しリンクが利用可能である合計時間の割合として定義する。

システムの利用環境としては、図書館やオフィスビルなど多数の人が利用する空間を想定する。また、パルス型スイッチセンサは、建物内の複数のドアにそれぞれ設置されるものとする。シミュレーション諸元を表1に示す。

図7は、センサ多重度とリンク可用率の関係を示している。図7より15以下ではほぼリンク可用率が低下していないことが分かる。これは、許容損失と正損失ピーク値の関係によるものと考えられる。式(2)で示したように、センサ多重度が大きいほど合計挿入損失も大きくなるため、許容損失量は小さくなる。そのため、許容損失量以上の正損失ピーク値を持つセンサの割合が増え、リンク断が発生しやすくなったと考えられる。

以上の議論より、センサの平均 OFF 時間が 300 秒で平均 ON 時間が 5 秒である環境においては、正負の損失ピーク値差をそれぞれ 0.2dB 及び 0.05dB に設定すれば、通信及び計測性能を維持しつつ、センサ多重度を 15 まで向上

Table 1 Simulation parameters.

Mean OFF time interval	30,60,300[s] (exponential)
Mean ON time interval	5[s] (exponential)
Mean pulse loss time interval	40[ms] (exponential)
Insertion loss	0.3[dB]
Difference for loss peaks	(+)-0.2(-)0.05[dB]
Link down time interval	500-1000[ms] (uniform)
Link down loss threshold	21.0[dB]
Link up loss threshold	20.0[dB]

可能であることが示された。

5. 結論

ヘテロコア光ファイバセンサを用いた新たな光ファイバセンサネットワークを提案した。OFSN は、センサ自体に電力供給の必要がなく、高速大容量通信ネットワークとしての利用が可能である。そのため、無線センサネットワークにおいて課題とされてきた電力供給や通信速度・通信品質問題への貢献が期待される。

計測機器として安価な LD 及び PD の利用及び通信・計測用光源の共有により、低価格かつ構成の単純な試作システムを構築した。実現可能性の検証実験では、5つのスイッチセンサをタンデム接続した場合において、約 1Gbps の高速大容量通信及び ON/OFF 状態の明確な識別が実現可能であることが示された。

さらに、損失の発生時間が短いパルス型スイッチセンサを用いて、センサ多重度の向上を図った。シミュレーションによる実験結果より、センサの利用頻度が比較的穏やかな場合において、センサ多重度を 15 まで増加可能であることが示された。

今後は、現実の生活空間にセンサを配置し、実際のセンサの利用状況からセンサ多重度を検討する。また、ネットワーク全体の可用率を考慮した設計手法も検討する。

参考文献

- [1] 創価大学, "社会連携研究推進事業「測位/光神経複合センサノードによるユビキタス・モニタリング・ネットワークの開発とその産業応用への展開」," <http://www.soka-span-project.jp/>
- [2] K. Watanabe, et al., "Macrobending Characteristics of a Hetero-Core Splice Fiber Optic Sensor for Displacement and Liquid Detection," IEICE Trans. Electron., vol.E83-C, no.3, pp.309-314, 2000.
- [3] 阿部等, "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(B), vol.J92-B, no.1, pp.150-162, Jan. 2009.
- [4] 阿部等, "通信と計測を融合する光ファイバセンサネットワークにおけるセンサ多重度の向上に関する考察," 信学論(B), vol.J93-B, no.2, Feb. 2010. (掲載予定) .