

光ファイバー給電による広域防災センサーネットワーク

田中 洋介・黒川 隆志

Wide-Area Disaster-Prevention Sensor Network Using Fiber Optic Power Supply

Yosuke TANAKA and Takashi KUROKAWA

An ideal wide-area sensor network for disaster prevention is realized by using fiber optic power supply. This system is composed of hundreds of sensor nodes driven by laser power. Each sensor node controls multiple sensor heads and sends back optical signals produced by modulating a part of the supplied laser light with the sensing data. Because the optical power for driving one sensor node is less than 2 mW, single laser diode with 1 W enables 1,000 sensor heads. This sensor network can also control wireless sensors, which realizes ubiquitous sensing.

Key words: fiber-optic sensor, fiber-optic power supply, disaster prevention

社会の安心、安全を支えるには、大気、雨量、風速などの自然環境や、交通システム、発電所、プラント等の社会インフラを広範囲に監視し、災害に備える必要がある。そのための防災センサー網の構築と整備は、急務である。日本は災害大国であり、年間を通して、地震、洪水、地滑り、火山噴火、雪崩など、さまざまな自然災害が各地域で発生している。最近、特に都市部を中心に、突発的な局地豪雨や都市洪水などこれまでにない自然災害が起り、人命やインフラ施設が被害に見舞われている。これら自然災害に加え、大型構造物の欠陥や、経年劣化による災害には、常に備えなければならない。災害の種類は、水害、火災、爆発、構造物崩壊などさまざまであるから、その検出には、温度、湿度、圧力、ひずみ、振動、ガス、放射線等に対する、多種多様なセンサーヘッドが必要になる。こうしたことから、防災用に整備するセンサー網は、(i) 広域性、(ii) 多点性、(iii) センサーの多様性、(iv) 監視の常時性を備えなければならない。

筆者らは、防災センサー網に求められる上記すべての要件を満たすシステムとして、光ファイバー給電型センサー網を提案している。従来から有線、無線の各種センシング

システムが研究、開発、実用化されてきたが、防災センサー網として挙げた上記4条件をすべて満足することは困難であった。その大きな原因は、従来のセンサー網では、センサー信号の長距離伝送と、安定で高効率な電力供給との両立が、容易でなかったことにある。この問題について、提案するセンサー網は、その第1の特徴である光ファイバー給電によって解決する。このセンサー網の第2の特徴は、光給電で動作するセンサーノードが、ネットワーク内に多数設置される点にある。光給電型センサーノードは、光信号と無線信号をバランスよく組み合わせることで、センサーヘッドの制御と光信号出力を低電力で行い、センサー網全体の信号同期をも達成する。計算では、1 Wの光源で、最大1,000台規模のセンサーヘッドの駆動と、センサー信号の衝突回避ができる。実現する光ファイバー給電型センサー網は、従来のさまざまなセンシング手法の長所を引き継いだ、いわば「いいとこ取り」センサー網となる。本稿では、この光ファイバー給電型センサー網について、最近の研究成果を交えて解説する。

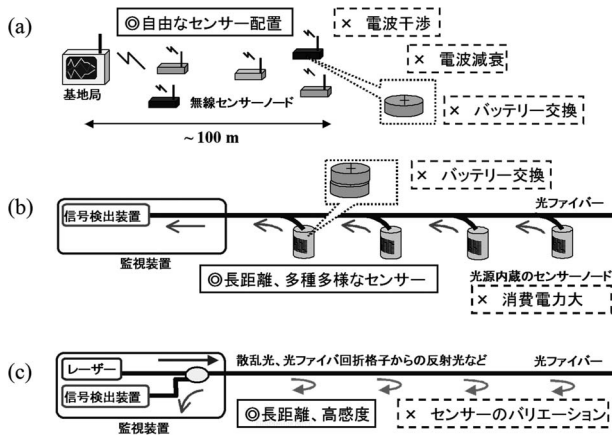


図1 従来の防災用センサーと問題点。(a) 無線方式センサー、(b) 伝送路として光ファイバーを用いたセンサー、(c) 分布型・多点型光ファイバーセンサー。

1. 光ファイバー給電型センサー網

図1に従来の防災用センサー網と問題点をまとめる。近年、さかんに検討が進められているセンサー網のひとつに、無線方式がある。無線方式は、低コストで、設置場所の自由度が高いことが利点である。また、センサーヘッドに多種多様な半導体センサーを使うことができるため、さまざまな環境パラメーターを計測できる。現在、250 kbpsとセンサー用途には十分な信号速度を備え、瞬時電力が60 mW以下と小さくできる Zigbee (IEEE 802.15.4)¹⁾を用いたセンサー網を中心に、検討が進んでいる。ただし無線方式は、防災用途を考えると、電波干渉による設置台数の制限や、センサーノードに用いるバッテリーの保守管理に課題がある。さらに、通信距離がせいぜい100 m以内と、広域化に課題がある。対策として、センサーノード間のパケットリレーで、遠方の基地局との信号送受信を行うアドホック型センサー網²⁾が検討されているが、その制御は容易ではない。

有線方式では、長距離信号伝送ができる光ファイバーセンサー³⁾が防災用に適している。その中でも、光源とバッテリーを内蔵したセンサー端末を用い、光ファイバー伝送路でセンシング情報を監視装置に送り返すタイプの光ファイバーセンサーが実用化されている。無線センサーと同様、センサーヘッドは多種多様である。有線方式は、高電界下、防爆環境下で使用可能なため、プラントや、送電網など、大型施設に設置して用いられる。ただし、一般に、このような危険環境下では、センサー駆動用の直流電力をメタル線経由で供給できないため、バッテリーが必要になる。光源を内蔵した端末の消費電力は比較的大きいため、防災用途では、大容量バッテリーの保守交換が課題となる。

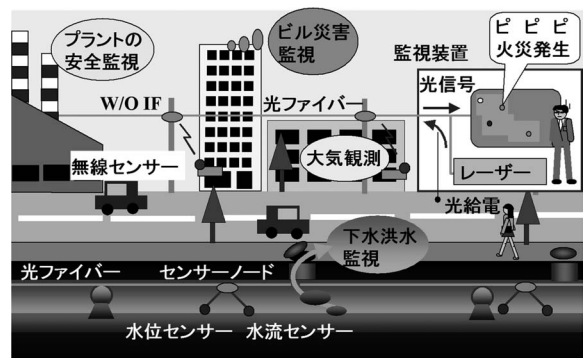


図2 広域防災のための光ファイバー給電型センサー網。

光ファイバーセンサーには、ほかにも、光ファイバー自体をセンサーとする手法が研究され⁴⁾、一部は実用化されている。この方式は、(i) 光ファイバー内で発生する散乱光を利用し、光ファイバーに沿って連続的に温度分布やひずみ分布を測定する分布測定型、(ii) 光ファイバーに沿って離散的にファイバー回折格子 (fiber Bragg grating; FBG)などを複数配置し、それぞれの温度やひずみの変化を測定する多点型に大別できる。いずれの手法も長距離、多点、高感度な測定ができるが、測定量のバリエーションが今のところ温度とひずみに限られている点が、防災用途としては課題となる。

光ファイバー給電型センサー網⁵⁻⁷⁾は、これまでのセンサー網の長所を取り入れつつ、課題点を光ファイバーによる給電と信号伝送の多重化によって解決している。図2に、光ファイバー給電型センサー網の概念図を示す。

無線センサーでは、有線センサーでは得られない配置の柔軟性がある一方、センサー端末と基地局との距離を長く取れないことと、電波干渉が問題であった。この問題を、光ファイバー給電型センサー網では、無線センサー網の基地局に相当する光給電型インタフェースノード (wireless-to-optical interface node; W/O IF node) を光ファイバーに沿って多点配置することで解決する。無線センサーを光ファイバーに沿ったエリアに配置すると、どのセンサーに対しても必ず近くに W/O IFがあるの、センサーの多点配置と広域性を確保できる。

従来型の光源を内蔵したセンサー端末による光ファイバーセンサーでは、特に電力供給が問題であった。これは、光ファイバー給電⁸⁾が解決する。さらに、分布型や多点型光ファイバーセンサーのように、光源から送られた光が環境情報を担って光ファイバーの各点から信号として戻ってくるようにすれば、センサー側の光源は不要になる。光ファイバー給電型センサー網では、光源から光給電型ノードに送られた光の大部分を光電変換により回路駆動

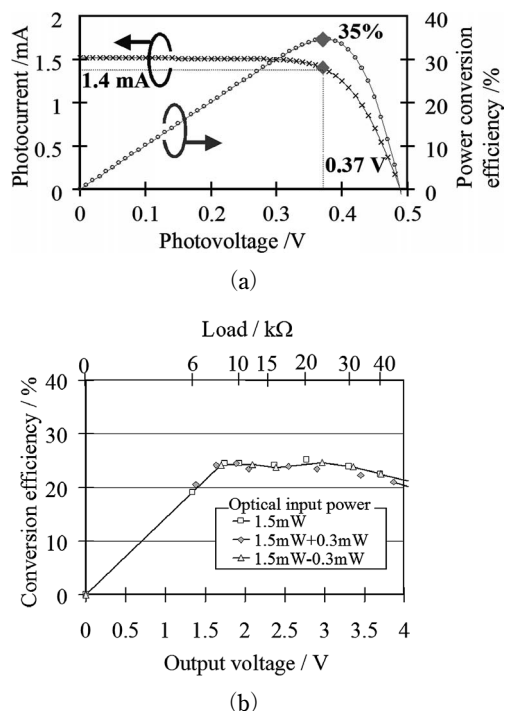


図3 波長 $1.55 \mu\text{m}$ の入射光 1.5 mW に対する (a) InGaAs PV (photovoltaic) セル単体の電流-電圧特性と電力変換効率, (b) 昇圧回路と組み合わせた際の電力変換効率と出力電圧, 負荷の関係。(文献5より転載)

の電力とするが、残りの光はセンサーの信号で変調して監視装置に戻す。これにより、センサー側に光源を使うことなく、低電力で光信号を作り出すことができる。もちろん、多種多様な半導体センサーを使えるので、測定量のバリエーションは広い。このように、光ファイバー給電型センサー網では、広域防災用センサー網の要件をすべて備える。

2. 光給電型センサーノード

センサー網用の伝送路には、伝送損失が低く、長距離伝送が可能な、通信波長 ($1.3 \sim 1.5 \mu\text{m}$ 帯) 用のシングルモード (SM) 光ファイバーを用いる。また、光源には非線形効果を抑圧するため、ファブリー・ペローレーザーを用いる。伝送限界は光ファイバー端面の欠陥や清浄性、ファイバーヒューズ現象⁹⁾、分岐デバイス等の耐光強度等で決まり、通常的光ファイバーでは 1 W オーダーである。限られた光パワーで多数のセンサーノードや W/O IF を動かすには、高効率な光電変換とセンサーノードの低電力化が欠かせない。また、センサーノードの台数が増えれば、各ノードからの光信号の衝突回避が重要なポイントとなる。以下では、これらを中心に光給電型センサーノードの機能を説明する。

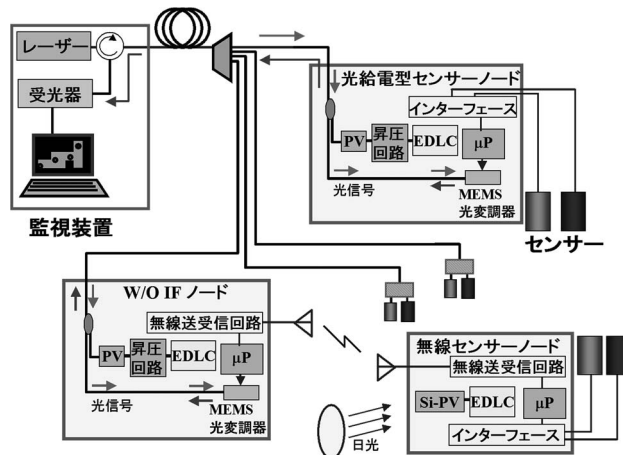


図4 光ファイバー給電型センサー網のノードの構造。

2.1 センサーノードの電源回路

光給電型センサーノードの電源回路に用いる太陽電池は、光源と等しいバンドギャップの材料系を用いることで、高い光電変換効率を得られる。そこで、入射光の波長に合わせ、InGaAs 系の太陽電池を用いる。太陽電池への入射光が 1.5 mW あれば、図 3 (a) に示すように、最大 35% の変換効率で $525 \mu\text{W}$ の電力が得られる。これはセンサーノード回路の動作には十分な電力であるが、出力電圧が 0.4 V 程度と低く、このままでは電子回路を駆動できない。そこで、(i) 複数の太陽電池の直列接続、または (ii) 単一の太陽電池と昇圧回路により、必要な電圧を得なければならない。直列接続構成は、最適条件が確保できれば、高い光電変換効率で昇圧できる。しかし、セルごとの照射光パワーのばらつきや、負荷変動により、効率、電圧ともに大きく変動する。また、高コストとなる点が、センサー網を構築する上では現実的な問題となる。一方、単セル太陽電池と昇圧回路の組み合わせを用いると、図 3 (b) に示すように、光電変換率はやや低下するものの、 $\pm 0.8 \text{ dB}$ の入射光パワー変動に対しても有意な特性変化はみられない。また、回路の動作状態変化に伴う負荷変動 ($10 \sim 40 \text{ k}\Omega$) に対しても、電力変換効率が保たれる。低コストでかつ安定した出力を得る上では、こちらの構成が有利となる。そこで、筆者らが開発したセンサーノードでは、昇圧型の電力回路を採用している¹⁰⁾。

2.2 センサーノードの動作制御と省電力化

図 4 に、光ファイバー給電型センサー網と、使用するノードの構造を示す。一般に、防災センサーが扱う情報は、温度、湿度、ガス濃度などさまざまではあるが、これら次元情報の信号容量は非常に小さい。また、要求されるセンシング頻度も、最大で秒単位である。そのため、各センサーノードが発信するセンサー信号は、kbps オー

ダーの速度でよい。このことから、センサーノードの動作制御に用いるマイクロプロセッサ (μP) は、信号処理速度よりも、低電圧、低電力であることを重視して選択する。 μP による動作制御は、ノード自体のアクティブ状態とスリープ状態の切り替えが中心である。ここで、スリープ状態でも光パワーは常に監視装置側から送られてくるので、その間は、センサーを含め、回路のほとんどの部分には電力を供給しないよう、スイッチを切り替え、エネルギーを電気二重層キャパシター (EDLC) に蓄積する。EDLC は、一般的な充電式電池に比べてはるかに長寿命で、100 万回程度の充放電が可能という利点がある。アクティブ時は、100 ms 以内の光信号送信時間を含め、全体で 200 ms 以内であり、この短時間に EDLC から数 mW ~ 数 10 mW のパワーを取り出し、回路やセンサーを動かす。アクティブ時間を短くすることで、平均消費電力は低くなる。現在、平均消費電力は、センサーノードを 10 秒ごとにアクティブにした場合、500 μW 以下である。光信号生成用に使う光パワーを含め、センサーノードへの入射光パワーは、最小で 1.7 mW となる。つまり、1 W の光源があれば、約 500 台のセンサーノードを動かせる。各センサーノードには、複数のセンサーヘッドを取り付けられるので、数 1000 個のセンサーヘッドを動かせることになる。今後、光信号の変調速度を消費電力が上がらない範囲で高くしたり、信号フォーマットの改善で信号長を短くできれば、入射光パワーは 1 mW 程度までは低減できると考えられる。

2.3 MEMS (micro electro mechanical systems) 光変調器による信号生成

センサーノードにおいて光信号生成を行う光変調器には、低消費電力はもちろんのこと、通信波長帯の光に広く対応するよう、波長依存性の小ささが求められる。また、光ファイバー伝搬後の光はさまざまな偏波状態をとるため、どのような偏波状態の光でも変調できる偏波無依存性が求められる。さらに、高い消光比をもつことで、センサーノードがスリープ時の戻り光を十分抑圧できなければならない。例えば、ノードが 1,000 台あるとき、監視装置に戻ってくる光信号のノイズフロアは、999 台分のノードの戻り信号分だけ上昇する。この場合、監視側で受信信号の SN 比として 5 dB 以上を確保するには、光変調器の消光比は少なくとも 35 dB 以上必要となる。これらの特性を満足できそうな変調器として、過去には液晶光変調器を検討したが¹²⁾、現在は、より高い消光比と変調速度が実現できることから、MEMS 光変調器を使用している¹³⁾。

図 5 (a) に MEMS 光変調器の構造を示す。入力用光

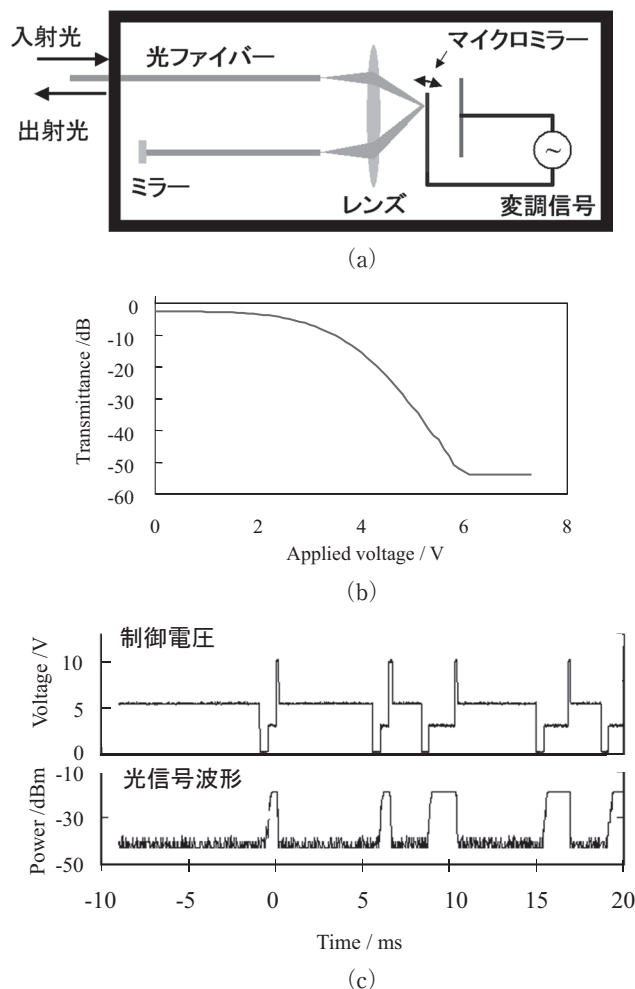


図 5 (a) MEMS 光変調器の構造, (b) 透過特性, (c) 制御電圧と出力光信号。

ファイバーからのレーザー光が、マイクロミラーによって反射され、出射用の光ファイバーに戻される。印加電圧によってマイクロミラーの傾きが変化するため、入射光に変調がかかる。図 5 (b) に MEMS 光変調器の透過特性を示す。変調器の出力端に反射鏡を付けて、入射光が変調器を往復する反射型構成とすることにより、35 dB 以上の高い消光比を達成している。実際の信号生成は、駆動波形にインパルス状の電圧変化を与えることで、光信号の立ち下がり時間を短縮化し、速度 1 kbps の NRZ 信号出力に成功した (図 5 (c))。このとき、MEMS 光変調器の消費電力は 20 μW 以下であった。

2.4 センサーノードの同期

各センサーノードからの光信号は、互いに衝突することなく、監視装置に届かなくてはならない。そのためには各ノードは、順次時間差をもって光信号を送信する必要がある。一回に各ノードから送信される光信号長は 100 ms 以内なので、各光信号列間の空白は 10 ms もあればよい。伝

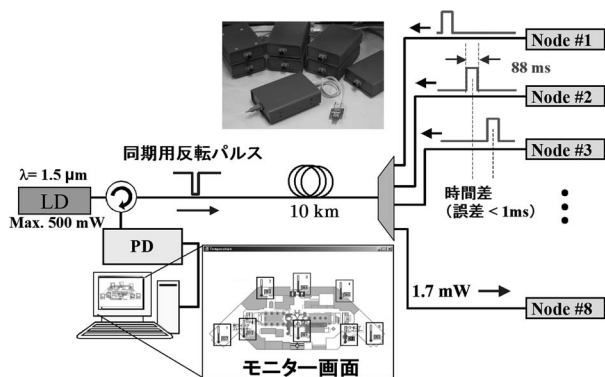


図6 センサーノードの同期.

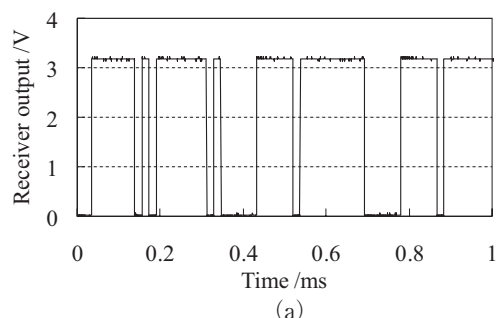
送用ファイバーの全長は最長で 10 km, 往復の伝搬時間は 100 μ s なので, 監視装置とノード間の距離の違いによる伝搬時間の相違は無視できる. そこで問題は, 例えば, 1,000 台のセンサーノードの全クロックをいかに同期させるかに帰着する.

従来型のセンサーシステムの多くは, 監視側から個別に信号送信要求を行い, 指定されたノードが信号を送り返すことで, 信号衝突を回避する. ノードのクロックには個体差や温度等による変動が伴うため, 各ノードが完全な自律運転をすると, すぐに信号衝突が起こる. しかし, 各ノードにそのつど信号送信要求を行ってはいは, 制御信号待ちの時間を確保しなければならず, その分ノードのアクティブ時間が長くなり, 消費電力が増える.

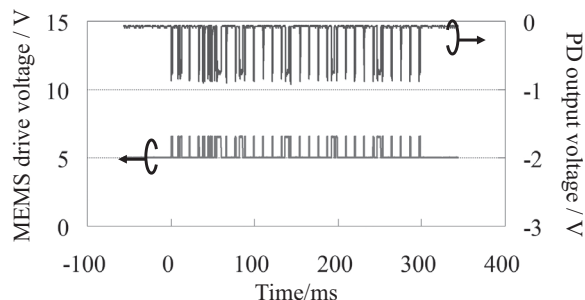
そこで, 光ファイバー給電型センサー網では, 同期信号の一斉送信と各ノードの自律運転とを融合することで, 低電力な信号衝突回避を実現した. 監視装置の光源は, デフォルト状態でオンだが, 全ノードの同期をとるため, 最初に反転パルス信号を送る. 各ノードは, パルスの立ち上がりを検知してカウントをあわせ, 以降はあらかじめ定めた時間差で, センサー信号を監視装置に送り返す. この際の同期精度は 1 ms 以内に収められる. 供給電力の低下による同期信号検知はスリープモードで行えるため, この手法は低電力である. 以降は, 信号列間の接近する時間に応じて, 同期信号を送信し, 衝突を回避する (図6).

3. 無線センサーとの融合

有線センサー網に無線センサーを融合させた点に, 光ファイバー給電型センサー網の大きな特徴がある. 通常の無線センサー網では, 1 台の基地局に対し, できるだけ多くのセンサーノードを広範囲に配置することが目標とされる. これに対し, 光ファイバー給電型センサー網では, ファイバーに沿って W/O IF が多数設置されるため, 各無線センサーは低電力で直近の W/O IF に信号を送ればよ



(a)



(b)

図7 無線信号の速度変換. (a) 無線信号, (b) W/O IF ノードからの光信号.

く, 低電力性, 広域性, 配置の柔軟性と三拍子揃ったセンシングが可能になる.

広域防災センサーとしては, 有線, 無線, 両方のセンサーノードをすべて同期させなければならない. そのため, W/O IF, 光給電型センサーノードは, 2.4 節で述べたように, 監視装置からの反転パルスで同期させる^{14,15)}. さらに, W/O IF と無線センサーノードもまた, 同期をとり, 信号衝突を避けなければならない. そこで, W/O IF から各無線センサーノードに同期信号を送り, 各センサーノードの自律運転も併用して, 信号衝突を回避する. 原理確認実験では, 太陽電池と EDLC からなる電源回路を有する無線センサーノードを作製した. 無線センサーノードは, 平均消費電力 440 μ W で, 10 m 離れた W/O IF ノードに 250 kbps で信号を送信した. W/O IF ノードは, 平均消費電力 450 μ W で, 5 mW の光パワーで駆動できた. 無線センサーからの無線信号は, このままでは速度が速く, MEMS 光変調器の応答速度を超えるため, WO/IF では一旦信号をメモリーに蓄え, 速度変換して伝送する (図7).

4. 光給電型カメラノード

防災センサー網として, カメラによる監視の重要性は見落とせない. しかし, 一次元情報を扱う一般的なセンサーとは異なり, カメラは大量の画像データを出力する. そのため, 光給電により複数のカメラを駆動するためには, カメラノードから高速な光信号をいかに低電力で生成するか

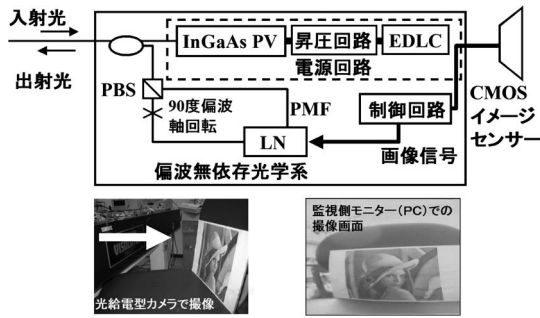


図8 光給電型カメラノード。

が鍵となる。実際、過去にも光給電によるカメラの駆動は提案されているが、光パワーが1 W オーダーと高い^{16,17)}。筆者らは、光ファイバー給電による監視カメラ網の構築に向け、30万画素のCMOSカメラを備えた光給電型カメラノードを作製し(図8)、5 mWの光パワーで回路を駆動することに成功した¹⁸⁾。このカメラノードはMEMS光変調器ではなく、LiNbO₃(LN)強度変調器を内蔵し、光ファイバーで送られた光の一部を変調することで、30秒ごとに288 Mbpsの静止画信号を低電力で出力できる。一般に、LN光変調器はMEMS光変調器と異なり、偏波依存性がある。そこで、偏光ビームスプリッター(polarization beam splitter; PBS)と偏波保持ファイバー(polarization maintaining fiber; PMF)を用いた光学系により、直交した偏波が同等に変調されるようにし、偏波依存性を解消した¹⁹⁾。

光ファイバー給電による広域防災センサーネットワークを紹介した。このセンサー網は、光給電で動作する低電力なセンサーノードを広範囲に多数配置できる。また、多種多様なセンサーをノードに接続できるため、汎用性が高い。1 Wの半導体レーザー1台で数千台のセンサーヘッドからの情報を集められるセンサー網の実現が可能である。

文 献

- 1) P. Baronti, P. Pillai, V. Chook, S. Chessa, A. Gotta and Y. F. Hu: "Wireless sensor networks: A survey on the state of the art and the 802.15.4 and ZigBee standards," *Comput. Commun.*, **30** (2007) 1655-1695.
- 2) E. M. Royer and C.-K. Toh: "A review of current routing protocols for ad hoc mobile wireless networks," *IEEE Pers. Commun.*, **6** (1999) 46-55.
- 3) 大越孝敬編: 光ファイバセンサ(オーム社, 1986).

- 4) 保立和夫: "光ファイバーセンシング", *光学*, **41** (2012) 352-363.
- 5) Y. Tanaka, M. Kinoshita, A. Takahashi and T. Kurokawa: "A Wide-area sensor network based on fiber optic power supply," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **50** (2011) 112501.
- 6) Y. Tanaka and T. Kurokawa: "Disaster prevention by photonics—Toward realization of safe and secure society," *Proc. of European Optical Society Annual Meeting 2012*, 6281 (Aberdeen, 2012).
- 7) Y. Tanaka and T. Kurokawa: "A fiber sensor network using fiber optic power supply," *Proc. SPIE*, **8421** (2012) 84211M.
- 8) H. Miyakawa, Y. Tanaka and T. Kurokawa: "Design approaches to power-over-optical local-area-network systems," *Appl. Opt.*, **43** (2004) 1379-1389.
- 9) Y. Shuto, S. Yanagi, S. Asakawa, M. Kobayashi and R. Nagase: "Fiber fuse generation in single-mode fiber-optic connectors," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **16** (2004) 174-176.
- 10) A. Takahashi, M. Kinoshita, K. Kashiwagi, Y. Tanaka and T. Kurokawa: "Fiber sensor network with optical power supply," *Proc. of Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO/PR) 2009*, WH3-3 (Shanghai, 2009).
- 11) K. Isamoto, K. Kato, A. Morosawa, C. Chong, H. Fujita and H. Toshiyoshi: "A 5-V operated MEMS variable optical attenuator by SOI bulk micromachining," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **10** (2004) 570-578.
- 12) Y. Tanaka, T. Shioda, T. Kurokawa, J. Oka, K. Ueta and T. Fukuoka: "Power line monitoring system using fiber optic power supply," *Opt. Rev.*, **16** (2009) 257-261.
- 13) M. Kinoshita, A. Takahashi, K. Kashiwagi, Y. Tanaka, T. Kurokawa, M. Azemoto and Y. Machijima: "Optically driven sensor network based on microprocessor controlled nodes with MEMS Modulator," *Proc. of 15th Microoptics Conference* (Tokyo, 2009) pp. 280-281.
- 14) M. Kinoshita, A. Takahashi, K. Kashiwagi, Y. Tanaka and T. Kurokawa: "Optically driven sensor network with wireless sensor nodes," *Proc. of 16th Microoptics Conference* (Hsinchu, 2010) pp. 134-135.
- 15) Y. Tanaka, M. Kinoshita and T. Kurokawa: "Laser-driven low-power fiber sensor network integrated with wireless sensors," *Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) 2012, JW2A.123* (San Jose, 2012).
- 16) M. Röger, G. Böttger, M. Dreschmann, C. Klamouris, M. Huebner, A. W. Bett, J. Becker, W. Freude and J. Leuthold: "Optically powered fiber networks," *Opt. Exp.*, **16** (2008) 21821-21834.
- 17) 山下育男, 尾路京一, 青海恵之: "光ファイバ給電型データリンクの屋外伝送路での検討", *電気学会論文誌 C*, **127** (2007) 1266-1267.
- 18) N. Tsuchida, Y. Tanaka and T. Kurokawa: "Monitoring-camera network based on fiber optic power supply," *17th Microoptics Conference (MOC'11)* H-63 (Sendai, 2011).
- 19) Y. Tanaka, Y. Tanaka and T. Kurokawa: "Polarization independent camera node based on fiber optic power supply," *Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim, and OptoElectronics and Communications Conference / Photonics in Switching (CLEO-PR&OECC/PS) 2013, ThF2-1* (Kyoto, 2013).

(2013年9月24日受理)