

(61) 可動再帰反射素子を用いた 微小振動の遠隔センシング技術の開発

脇田 尚英¹

¹ 非会員 パナソニック株式会社 先端研究本部 (〒619-0237 京都府相楽郡精華町光台 3-4)

E-mail:wakita.naohide@jp.panasonic.com

再帰性反射材を構成する直交3枚鏡の一部を弾性体で支持することにより、加速度に応じて再帰反射特性を変化させ、遠方から振動を可視化できる可動再帰反射素子を考案した。これを構造物の計測箇所貼り付け、照明付のカメラで撮影することにより、微小振動を多点同時計測可能な新たな遠隔センシング技術を開発した。試作した可動再帰反射素子に3~40Hz、振幅10galの正弦波状の微小振動を加振器で付与し、70mの距離から市販のデジタルカメラで撮影した画像から振動波形を再現可能なことを実証した。振動を反射光輝度に変換する為、移動体からの撮影や風雨等で解像度が劣化しても計測できるロバストなモニタリング手法であり、センサーは電源・電気部品が不要な為、低コスト、低メンテナンス性が期待できる。

Key Words: vibration, remote sensing, retroreflector, battery free, structure health monitoring

1. 序文

高度成長期に建造した橋梁等、大型構造物の老朽化インフラ問題への対策として、センサーやICTによる点検、監視技術、いわゆるインフラヘルスマニタリング技術の開発が進んでいる。

モニタリングに用いられる指標としては、構造物の剛性を反映する“振動”が重要であり、振動解析による劣化診断の検討事例が数多く報告されている¹⁾²⁾³⁾。振動の計測には、MEMS等の加速度センサーの信号を無線で飛ばす無線ノードがよく使われている⁴⁾。無線ノードは配線不要で設置し易いが、定期的な電池交換が必要であり、僻地や高架橋など危険な箇所での電池交換はメンテナンスコストの増加を招く⁵⁾。電池交換を避けるために振動発電などの環境発電も検討されているが、発電量が僅かな為、近くに基地局の設置が必要となってしまう。

インフラヘルスマニタリングは、そもそも膨れ上がる保守点検費用を低減するのが主な目的であり、より低コストで低メンテナンスのモニタリング手法が望まれている。筆者は、このような要望に叶う、無電源で、低コスト、の新たなモニタリング手法として、交通標識等で広く使用されている再帰反射材の性質を利用した新たな振動検知手法を考案し、遠方からでも微小振動の計測が可能なることを実証したので報告する。

2. 計測の原理

(1) 可動再帰反射素子

再帰反射材には、交通標識等で用いられる高輝度の3枚鏡型と、衣服等で使われるビーズ型があるが、本稿では3枚鏡型について述べる。図-1は、再帰性反射の光線の軌跡を車から見た場面で例示した図で、分かり易さの為に、平面内の直交2枚鏡を描いている。ヘッドライトから出た光は、正面だけでなく斜めから照射した場合でも、直交鏡に2回反射すれば、必ず光源方向へ反射するので、ドライバーは遠方からでも明るく光る標識を視認できる。3枚鏡の場合は、右上部の斜視図のように、3回反射して光源方向に再帰反射する。

この直交鏡の内の1枚を、図-2のようにバネで支持して可動鏡とすると、外部振動によって、鏡の成す角度

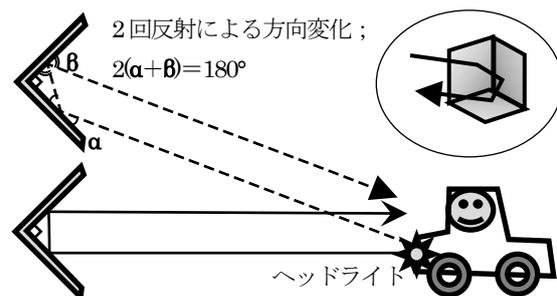


図-1 再帰性反射の原理

、及び光の反射方向が変化する。光源に隣接するカメラ等で観察すれば、振動が輝度変化に変換され、可視化することができる。このように構成した素子を、以下では可動再帰反射素子と呼ぶ。

図-3 は、この可動再帰反射素子による遠隔センシングの原理の概念を、計測システムの構成図と得られる特性図により示した。図-2 では、光の軌跡を線で描いたが、実際には鏡面の微小な凹凸等によって反射光は幾分かは拡散し、主反射方向をピークとする拡散配光分布を示す。図-3において、左端の構造物に振動により、可動鏡に動きが生じたときの可動鏡の位置を、静止時は実線、下方向の最大加速度 $+G_{max}$ 印加時を破線で、逆方向の $-G_{max}$ 印加時を点線で示し、各々の時点での反射光の配光分布を、各々の線種の3つの分布曲線で示した。分布曲線は右方向に光強度、上下方向に方位を表している。破線の加速度が $+G_{max}$ の時に、再帰反射してカメラへの入射輝度が最大となり、 $-G_{max}$ 印加時には最小となり、静止時にはその中間値を取るように、可動鏡の初期位置とバネ定数を、反射光の拡散角 ϕ と対応付けて設計している。このような設定のとき、カメラに入射する光の輝度と、振動の加速度の関係は図-3右のグラフのようにS字状の特性曲線を示し、 γ 補正すれば加速度と輝度のリニアリティを確保することが可能となる。

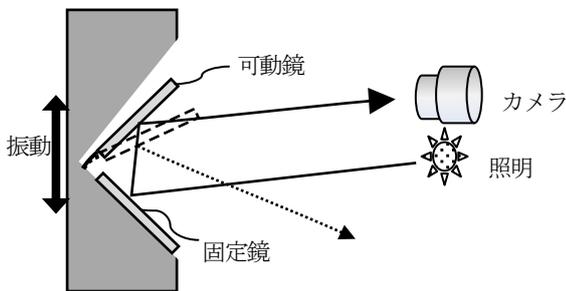


図-2 可動再帰反射素子

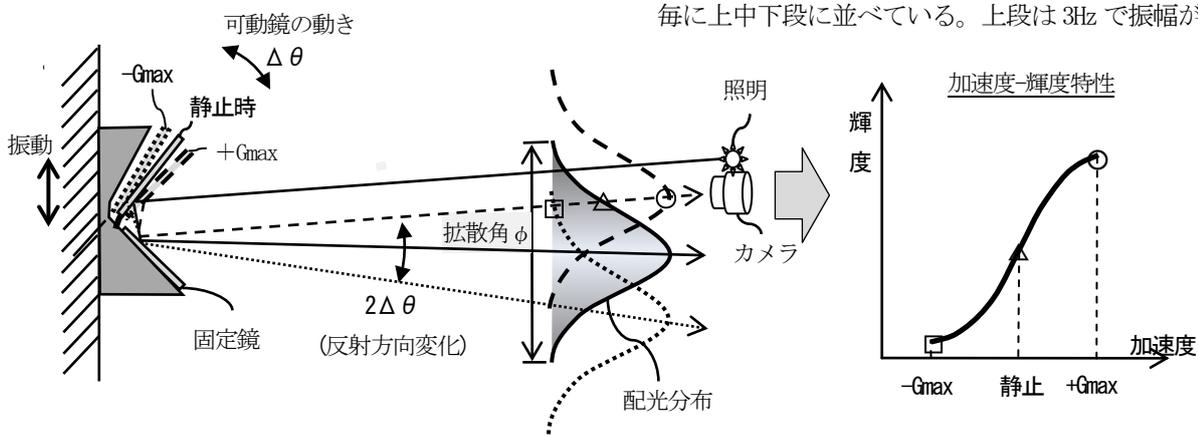


図-3 可動再帰反射素子による遠隔センシングの原理—構成と特性図—

3. 微小振動の遠隔計測実験

(1) 方法

以上のような計測原理を検証する為、可動再帰反射素子の簡易なモデルを3Dプリンターで作成し、計測実験を行った。図-4 は、遠隔センシング実験の状況写真で、右上の吹き出しが、加振器上に固定した可動再帰反射素子の試作品で、右半分は、光造形用エポキシ樹脂から成る土台と上側の板部材を支持する板バネが見える。左半分が、土台の上にガラス鏡を貼った3枚鏡となっており、鏡は20mm角、1mm厚のガラス上にアルミ蒸着している。可動鏡の上に錘を載せて固有振動数を調整している。右下は、カメラの背後から撮った撮影状況の写真で、撮影に使用した市販のデジタルカメラ（パナソニック製 LUMIX DMC-FZ1000）と照明（LED ビデオライト）を三脚に設置し、廊下の向う側7.0m先に可動再帰反射素子を置いている。信号発生器からのサイン波で加振器に上下方向に振動を発生させ、照明を点灯しながら、デジタルカメラで120フレーム/秒のフルHDで動画を撮影した。加振器の振動は、MEMS加速度センサーでモニタリングした。撮影した映像から、測定対象の素子部の輝度変化をOpenCVベースのソフトウェアで抽出した。図-4の中央の写真は抽出処理時のPC画面で、撮影したフルHD映像から素子近傍の四角の部分を選択し、選択した領域の画素を左端の小ウィンドーのように拡大表示しながら動画再生し、フレーム毎に、選択領域内の8bitグレースケールのビットマップの値を合算して輝度信号とし、時系列の輝度波形を得た。

(2) 結果

以上の方法で行った遠隔センシング実験の結果、得られた結果例を図-5に示す。左列が、加振器の振動波形（MEMS加速度センサーの出力波形）、中列が、撮影した画像から抽出した輝度波形、右列が、輝度波形をFFT分析したパワースペクトルであり、3種類の振動波形毎に上中下段に並べている。上段は3Hzで振幅が10gal

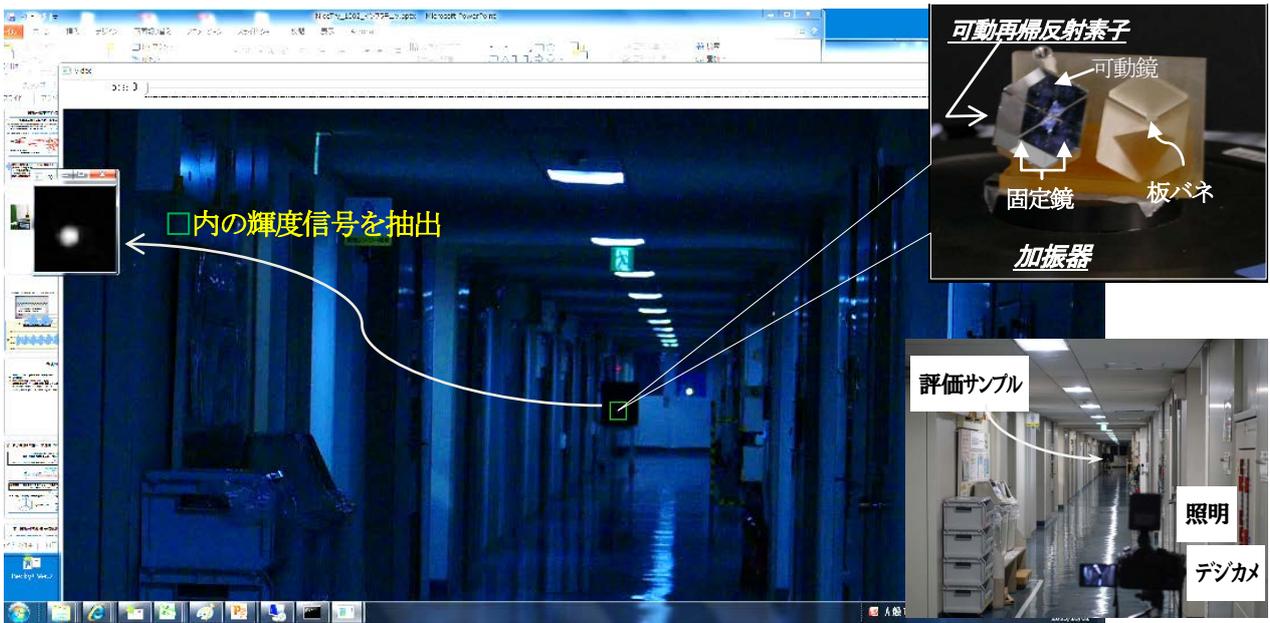


図-4 遠隔センシング実験の状況写真：

右下；撮影状況（サンプルとカメラ間距離 70m）、右上；可動再帰反射素子、中央；映像から輝度信号を抽出する時の PC 画面

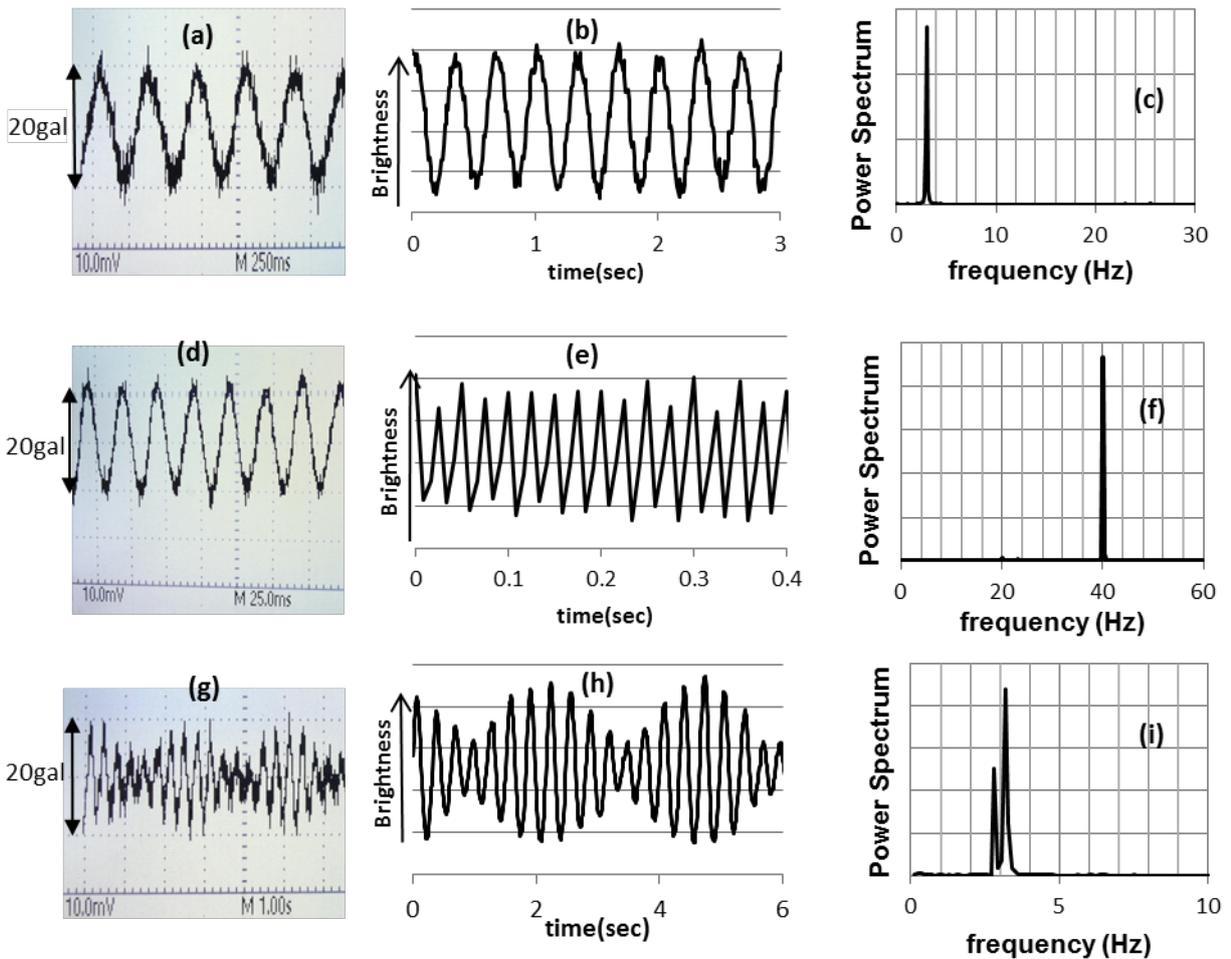


図-5 振動計測実験の結果：

左：MEMS 加速度センサの出力 (a) (d) (g)、中：撮影画像から抽出した輝度波形 (b) (e) (h)、右：FFT 分析結果 (c) (f) (i)

上段：3Hz、 $\pm 10\text{gal}$ の sin 波、中段：40Hz、 $\pm 10\text{gal}$ の sin 波、下段： $\sin 3\text{Hz} \times \sin 0.4\text{Hz}$ 、 $\pm 10\text{gal}$ の AM 波

の正弦波、中段は、40Hz、振幅 10gal の正弦波、下段は、3Hz の正弦波を 0.4Hz の正弦波で変調した振幅 10gal の AM波振動のデータである。中列の輝度波形の横軸は時間、縦軸は画像の選択領域のビットマップ値から算出した可動再帰反射素子の輝度レベルを示しており、フィルター処理で DC 成分は除去しているが、 γ 補正は行っていない。また、輝度の絶対値を、画像データと撮影条件から算出する方法が知られているが⁶⁾、今回は絶対輝度の算出は出来ていない為、縦軸は相対的な輝度を表している。FFT解析のデータ数は 1024 個で行ったので、周波数分解能は $60\text{Hz}/1024=0.0586\text{Hz}$ となる。

図-5(b)の 3Hz、 $\pm 10\text{gal}$ のサイン波では、共振が原因と思われる小さなノイズが見えるが、(c)のパワースペクトルでは 3.0Hz に鋭いピークがあり、リファレンスである (a)の MEMS 加速度センサーと遜色ない低ノイズの計測が出来ている。図-5(e)の 40Hz、10gal のサイン波では、ナイキスト周波数(60Hz)に近い為、サンプル点を繋いだ波形はジグザグ波形に見えるが、(f)のパワースペクトルでは正確に 40Hz にピークが立っており、逆フーリエ変換すれば波形再現可能である。

下段の AM波振動では、図-5(g)の MEMS センサの波形では、小さなピークがノイズでやや見え難いものに対して、図-5(h)の輝度信号では、マイナス側の波形に若干歪んでいるが、 $\pm 1\text{gal}$ 相当の最小ピーク部も明瞭に見える。図-5(i)のパワースペクトルも 3Hz の前後に 2つのピークが確認でき、理論値である $3\pm 0.4\text{Hz}$ とほぼ合致している。

4. まとめ

交通標識等で広く使われている再帰反射材に振動感応性を付与した可動再帰性反射素子を考案し、これを取り付けた構造物の微小振動を遠方から検出できる新たな遠隔センシング技術の原理検証を行った。本稿では割愛したが、実橋梁に素子を取り付けて 200m 遠方からでも、車両通行による振動を市販のデジタルカメラで可視化できることを確認している。

本素子は電源も電気部品も不要であり、低コスト、低メンテナンス、高耐久性を期待できる。再帰性反射は角度依存が小さいため、大型構造物に多数の素子を貼り付けて、遠方から全体を撮影して全体の振動を同期計測できる。また、モアレ法等の画像解像度が計測精度と直結する方式と異なり、解像度が劣化しても素子の輝度変化さえ撮ればよいので、車やドローンのような移動体からの撮影や、風雨など、計測環境が悪くてもモニタリング可能である。

今後は、固有振動数を高くする等の素子性能改善、耐久性の確保、追尾や校正等の画像処理機能開発などを進め、また、振動以外の物理量の可視化への展開も検討して、インフラヘルスマニターの新たなセンシング手法として提案していきたいと考えている。

参考文献

- 1) 松岡弘大, 貝戸清之, 曾我部正道: 動的モデル選択とクラスタリングによる固有振動数の変化点検出, 土木学会論文集 A 特集号, Vol.67, No.2 (応用力学論文集 Vol.14), pp.I_843-I_854, 2011.
- 2) 牧野高, 松田浩, 森田千尋, 一宮一夫: レザードップラ速度計を用いた振動計測による実橋梁の構造同定, 実験力学, vol.11, No.3, pp.201-208, 2011.
- 3) 金哲佑, 北内壮太郎, 杉浦邦征, 川谷充郎, 甲斐正義: 多径間連続鋼トラス橋の交通振動を用いた損傷検知手法, 土木学会論文集 A1, Vol.69, No.3, pp.557-571, 2013.
- 4) Spencer Jr., B. F. and Yun, C. B.: Wireless Sensor Advances and Applications for Civil Infrastructure Monitoring, NSEL Report No. 024, University of Illinois at Urbana-Champaign, 2010.
- 5) 羽田明生, 土屋隆司, 曾我健一: 設置運用費用を考慮した無線センサネットワーク設計手法, 鉄道総研報告, Vol.27, No.9, pp.23-28, 2013.
- 6) 木村均, 野口太郎: デジタルカメラを用いた実行輝度の現場測定に関する研究, 日本建築学会計測系論文集, Vol.67, No.551, pp.23-27, 2002.