

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月10日現在

機関番号：32638
 研究種目：基盤研究(C)
 研究期間：2010～2012
 課題番号：22560428
 研究課題名（和文） 水中用振動分布計測可視化システムの開発

研究課題名（英文） Visualization of underwater vibrations measured with a multi-channel optical vibration sensor.

研究代表者
 長谷川 淳 (HASEGAWA JUN)
 拓殖大学・工学部・准教授
 研究者番号：30228449

研究成果の概要（和文）：反射型光学式センサユニットにより水中の振動体を非接触で多点同時計測し、その振動分布を3Dアニメーション表示として可視化するシステムを研究開発した。各センサユニットは光ファイババンドルと2つの凸レンズで構成されており、光学系と光電変換回路の最適化により10nmの振動変位分解能と1MHzまでの帯域を実現した。振動の可視化には最大32チャンネルのセンサユニットを6mmの間隔で使用する。超音波洗浄器を使用した計測では振動面の変位を明瞭に観測できた。

研究成果の概要（英文）：Reflection type optical displacement sensor units for underwater use were developed to realize simultaneous multi-point measurements of the vibrating underwater object for visualization of its vibration distribution as a 3D animation. Each sensor unit comprised of an optical-fiber bundle and two focusing plano-convex lenses has displacement resolution of 10 nm and frequency band-width of up to 1 MHz by optimizing its optical design and electronic circuit. Up to 32 sensor units with the spatial resolution of 6mm are simultaneously used to visualize vibration distribution. An ultrasonic cleaner was measured for the test of the system and its vibrating surface can be observed clearly.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2011年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2012年度	500,000	150,000	650,000
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・計測工学

キーワード：計測機器，計測システム，振動分布計測，可視化，光学式変位センサ，水中用振動センサ

1. 研究開始当初の背景

研究者は先に別の科学研究費補助金を受けて光ファイバ式振動センサによる振動分布計測可視化システムを研究開発し、各種振動体の計測に応用した。同システムは小さな振動体の振動分布を非接触で多点同時計測して可視化することに特徴があり、それまではシミュレーションや部分的な計測でしか

推測できなかった振動分布を実際に計測して可視化することで、様々な振動計測分野で成果をあげつつあった。これらの計測は全て空気中のものであるが、研究者の別課題である人工弁のシミュレーションでは水中での振動分布計測が必用となった。しかも人工弁の超音波クリックには600kHzにおよぶ高周波数の信号成分が含まれるが、先に開発し

たシステムの帯域は 80kHz であった。当時、水中での非接触振動計測を行えるセンサ自体市場には見あたらなかったため、超音波領域までの周波数特性を持つ水中用振動分布計測可視化システムの開発が必要となった。

2. 研究の目的

本研究は、水中の振動体を非接触で多点同時計測し、その振動分布を 3 次元アニメーション表示として可視化することを目的とした。まず、先に開発したシステムの光ファイバ型変位センサユニットを水中対応に改良して基本システムの開発をめざし、最終的に 16~32 チャンネル程度の水中用振動分布計測可視化システムを完成させることを目指した。しかし測定対象には超音波領域の振動体が想定されるため、システムの広帯域化をはかり、さらに水中ならではのキャビテーションの影響を評価するとともにその排除法についても研究することとした。当面のターゲットは機械人工弁の超音波領域クリック測定であったが、超音波洗浄器、ソナー等の測定・評価などへの応用も考えられた。

3. 研究の方法

本研究には複数の課題があったため、いくつかのフェーズに分けて開発を進めた。以下、個別に詳述する。

(1) 水中用変位センサユニットの試作評価：

センサユニットは、先に開発した高空間分解能光振動分布計測システムの光ファイバ型変位センサユニットをベースに試作した。このユニットは送受光用ファイバの先端にレンズをつけて集光し、焦点近傍に置かれた被計測反射面からの反射受光量変化により変位を計測するものである。この方式を屈折率の異なる水中に適用するため、光学系の変更を検討した。同方式のセンサユニットの感度、ダイナミックレンジ、ワークディスタンス等の特性はトレードオフの関係にあり光学系で決まるため、試作評価を繰り返してバランスをとる必要があった。そこでまず、各種レンズ交換が可能な評価用水中センサユニットを開発し、基礎特性評価を行った。机上での光学的検討によりあらかじめ抽出した各種レンズを試作ユニットに装着して特性評価を繰り返し、従来の空気中用センサと同等の性能を保ちつつ水中での使用が可能なレンズの組み合わせを決定した。

(2) 量産用変位センサユニットの開発：

試作評価の結果を基に、小型化した量産向けの光学式変位センサユニットを開発した。空間分解能を確保するために、シンプルな構

成で小型化をはかるとともに、防水対策および光学系の調整機能は損なうことの無いよう設計した。

(3) 周波数帯域の拡張：

従来のシステムでは帯域が 80kHz までであるが、これは主に電子回路系の特性によるものであった。SN を確保しつつ周波数帯域を従来の 80kHz から 600kHz 以上まで拡張するためには光電流増加が不可欠であり、光学系のカップリングや光電変換素子など電子回路の見直しを行い周波数帯域の拡張を試みた。

(4) キャビテーションの影響評価：

本研究で開発予定の光学式変位センサは、インコヒーレントな LED 光源の反射受光量の変化のみで変位を検出する方式であり、かつビームもそれほど絞っているわけではないので比較的キャビテーションの影響を受けにくいはずではある。超音波洗浄器底部の振動測定によりキャビテーションの影響を評価した。

(5) システムの多チャンネル化：

(2) のセンサユニットを量産するとともに、(3) で開発した光電変換回路系とオフセット調節機能を持たせた差動増幅回路一体化したアンプシステムを 32 チャンネル分開発した。これにより、先に開発したシステムの計測可視化処理部と組み合わせて、最大 32 チャンネルの水中用振動分布計測可視化システムが完成した。

(6) システムの応用評価：

システムの応用評価としては人工弁の振動計測を考えていたが、別途開発中の人工弁用循環系シミュレータの研究開発が予定通りに進まなかったため、超音波洗浄器底部の振動分布計測・可視化を試みた。

4. 研究成果

研究の方法の項であげた項目ごとに、以下研究成果を詳述する。

(1) 水中用変位センサユニットの試作評価：

図 1 に開発した評価用水中センサユニットの構造を示す。事前の机上検討により平凸レンズ 1 枚では十分な特性が得られないことが明らかであったため、凸部を内向きにして 2 枚のレンズを使用する構造とした。O リングにより防水を確保し、レンズ保持用パーツの交換で $\phi 3 \sim \phi 6$ の各種レンズに対応する。特性は図 2 に示す自動化測定装置により評価した。各種パラメータを総合的に比較判断した結果、 $\phi 3$ のレンズを採用することとした。

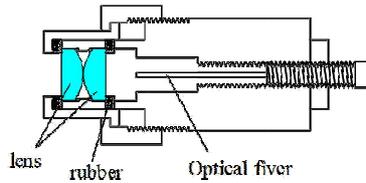


図1 評価用センサユニットの構造

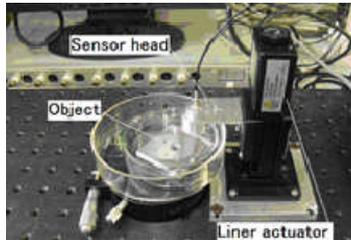


図2 特性評価環境

(2) 量産用変位センサユニットの開発：

(1)の光学系評価の結果選定された平凸レンズを2枚組み合わせる構成で小型化したセンサユニットを設計開発した。防水加工は必須であるが、空間分解能を確保するためにはセンサ直径を抑える必要があり防水パッキンの使用は困難であった。そこで耐水特性の良好な接着剤を選定し、レンズの固定と防水処理を兼ねる事とした。構造と完成したセンサユニットの外観を図3に示す。3mmのレンズ2枚を内蔵しつつ最大外径は5mmに抑えられている。先に空気中用に開発したユニットと比べ外径は一回り大きくなってしまったが、2つのレンズと光ファイババンドルの位置を微妙に調整することで、感度(変位-出力特性)はほぼ同等の特性を実現した。(図4)

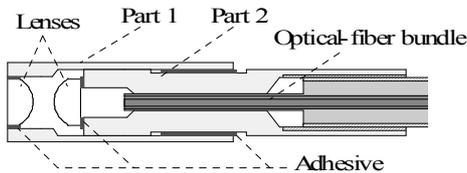


図3 量産用小型化変位センサユニットの構造と外観

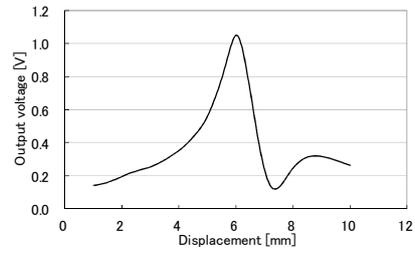


図4 センサユニットの変位-出力特性

(3) 周波数帯域の拡張：

システムの周波数特性は、光電変換回路として使用されるトランスインピーダンス回路(図5)のフィードバックループの特性で決まる。発信防止用コンデンサCの値はすでに限界まで小さくしてあるので、帯域を拡張するには抵抗Rを小さくするしか無く、そのためには光電流の増加が不可欠であった。光学系のカップリングや光電変換素子の見直しにより抵抗値を一桁小さくし、広帯域化を実現した。周波数特性の測定には、これだけの高周波数帯域で安定した振動特性を実現する適切な振動体が無いため、光源のLEDを正弦波駆動して評価した。測定した周波数特性を図6に示す。低域通過の遮断周波数は約1MHzとなり、一桁以上の広帯域化を実現した。なお、遮断周波数を超える帯域では、フィードバックループによる周波数特性にOPアンプの周波数特性が加わることで2次の減衰特性(-12dB/Oct)で感度が低下している。

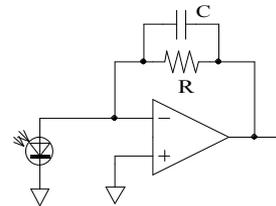


図5 光電変換用トランスインピーダンス回路

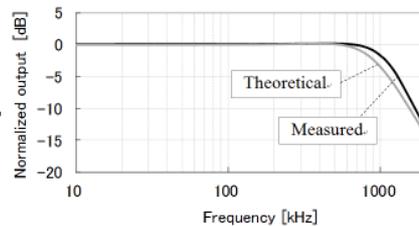


図6 光学式変位センサの周波数特性

(4) キャビテーションの影響評価：

キャビテーションの影響評価に使用した構成を図7に示す。結果として、キャビテーションによるものと思われるノイズはほとんど観測されなかった。これはキャビテーションの発生原因となる振動面の振動変位による光量変化がキャビテーションの存在による光の散乱量と比べて十分に大きいためと考えられた。そのため、当初想定したキャビテーション対策の検討は実施しなかった。

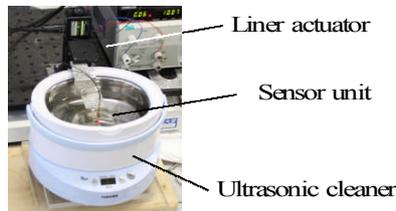


図7 キャビテーション評価環境

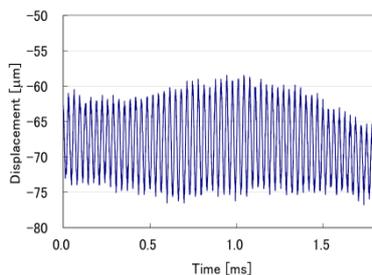


図8 超音波洗浄器の振動測定結果

(5) システムの多チャンネル化：

(2)のセンサユニットを量産し、光学系を調整して比較的特性のそろった32チャンネル分のセンサユニットを完成した。また、32チャンネル分の光電変換回路と後段アンプとからなるシステムを研究開発した。(図9)使い勝手を考え、直流分の打ち消し設定やアンプゲインの切替をPICで制御して1台で8チャンネル分をカバーする装置を4台開発した。この装置に先の研究で開発した可視化処理部を組み合わせることで、最大32チャンネルの水中用振動分布計測可視化システムが完成した。



図9 システムの電子回路部(8ch分)

(6) システムの応用評価：

図10にシステムの応用評価として実施した、超音波洗浄器底部の振動分布計測・可視化の構成と結果の一例を示す。システムは所期の目的通り、水底の振動面の状態をアニメーションで明瞭に表示する事が可能であった。当初計画していた人工弁の振動計測は別途行っている人工弁用循環系シミュレータの開発研究が遅れているために実施していないが、シミュレータが完成し次第測定する準備は整った。

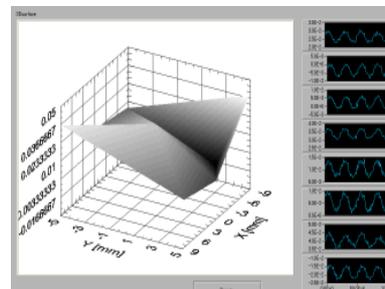
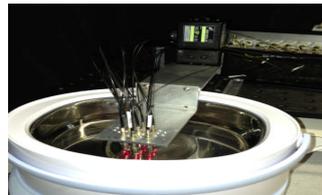


図10 超音波洗浄器底部の振動分布計測と可視化結果の一例

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計2件)

- ① 榛葉昌高、長谷川淳、水中用小型振動計測センサユニットの試作、信学技報、査読無、EA2011-124、2012、25-30
- ② J. Hasegawa, Development of an optical vibration sensor unit for underwater use, Proc. of Symp. on Ultrasonic Electronics, 査読無し, vol. 33, 2012, 323-324

6. 研究組織

(1) 研究代表者

長谷川 淳 (HASEGAWA JUN)
拓殖大学・工学部・准教授
研究者番号：30228449