

ウェハレベルパッケージ可能な超小型MEMSレーザ ドップラ速度計及びその応用に関する研究

森田, 伸友

<https://hdl.handle.net/2324/1806839>

出版情報 : 九州大学, 2016, 博士 (工学), 課程博士
バージョン :
権利関係 :

氏 名 : 森田 伸友

論 文 名 : ウェハレベルパッケージ可能な超小型 MEMS レーザドップラ速度計及び
その応用に関する研究

区 分 : 甲

論 文 内 容 の 要 旨

少子高齢社会における長時間労働や人手不足の解消, 労働者や患者, 介護者の負担軽減による生活の質の向上のため, ロボットや医療機器の高度化が求められている. 一方で, これまでに我々のグループで開発したモータや移動ステージの回転角や移動量を測定する光マイクロエンコーダの移動回折格子スケールを移動散乱物体に置き換えることによって, 超小型レーザドップラ速度計(以下, μ -LDV: Micro-Laser Doppler Velocimeter)として使用できることを見出した. これにより, 従来は大型かつ高価な LDV の新たな応用を検討可能になる. 本研究では, μ -LDV の原理確認および基本特性の評価を行うとともにロボットの指や腕等に内蔵することによって任意の物体を最小の力で把持することを可能にする滑り覚センサ, 人工透析や人工心肺等の医療機器に向けた高精度血流量計測装置の二つの応用について検討した.

第二章では本論文の基本事項として LDV の原理及び基本構成について述べた. また, 市販されている LDV の仕様及び小型 LDV の先行研究についてまとめ, 従来 LDV は多数の光学素子を個別にパッケージし高精度にアライメントする必要があるために量産性に乏しく, どんなに小さくとも例えば $28\text{ mm} \times 18\text{ mm} \times 60\text{ mm}$ と小型化は困難であるために, 数 mm サイズという小型かつ量産性の高い LDV は未だ実現されていないことを述べた.

第三章では開発した μ -LDV の構造及び設計について述べた. μ -LDV ではフォトリソグラフィを基本とした MEMS(Micro-Electro-Mechanical Systems)技術による製造方法を採用し, シリコン基板とガラス基板の二層構造を基本として, 表面実装と部品の一体成形, 各光学素子アライメント後の一括パッケージにより, $2.8\text{ mm} \times 2.8\text{ mm} \times 1.0\text{ mm}$ の超小型チップ化を実現した. また本設計はウェハレベルパッケージによる製造が可能であり, 最終的に個々のチップに分割するまでは同一基板内に数百~数千個のチップを一括で製造することができるため, 量産性にも優れている.

その後, μ -LDV の基礎特性評価として, 散乱板の速度計測及び流体の流速計測について述べた. 散乱板の速度計測では μ -LDV と測定対象までの距離に対する測定精度や測定の可否について実験を行い, アルミ板, 段ボール紙, プラスチック板の 3 種の速度計測対象に対して測定対象までの距離範囲 $1.1\sim 1.3\text{ mm}$ の範囲で一切のキャリブレーションなく, 最大誤差 3.3%以内で速度計測が可能であることを示した. 流速計測では, 内径 0.5 mm のチューブ内に流れる散乱粒子を含んだ液体の流速計測を行った. 小径流路への適用の場合には, 照射レーザ光ビームスポット内に速度分布を持つことからパワースペクトルに現れるピーク周波数も広がりを持つために最大流速を求めることが困難となったが, 信号処理手法を考案し測定誤差 7%での流速計測を可能とし, さらにその補正式を考案することで測定誤差を $\pm 1\%$ 以内にまで低減できることを示した.

また、LDV の適切な作動距離はその用途によって異なるために、作動距離を変更する手法が求められる。そこで、 μ -LDV ガラス表面の加工による方法と μ -LDV ガラス表面に光学部品を付加する方法を検討した。特に、光学部品付加の手法については光学部品としてアクリルブロックを用い作動距離変更に応用可能な方法であることを実証するとともに、本方式は量産性を保ちながら様々な作動距離の μ -LDV を製造するのに有利な方法であることを述べた。

第四章では、ロボットハンド用滑り覚センサとしての応用について述べた。ロボットハンドが生活環境にある様々な物体を最小の力で把持するには、未知の物体とロボットハンド間の滑りを検出する滑り覚センサが必要となるが、サイズ、応答性、汎用性の全てを満たすセンサは実現していない。上下動及び把持動作が可能な簡易ロボットハンドに μ -LDV を実装し、未知の物体であっても滑り覚センサ信号のみを用いて把持制御が可能なことを示した。

第五章では、人工透析や人工心肺等の高精度血流量計測装置としての応用を検討した。現在、これらにおける血流量管理は、ポンプの回転数や超音波または電磁式の流量計によって行われるが、その精度は 10%程度にとどまっている。LDV によって非侵襲かつ高精度な流量計測が期待できる。本論文ではまず、レーザ計測の研究に血液の代わりとして度々用いられ、入手の容易な牛乳を測定対象流体として流速計測を行った。散乱粒子濃度の高さからパワースペクトル形状は第三章で得られたものより鈍化し、ビート周波数の検出が困難となったが、ピンホールによる光路の限定ならびに上述の新規に考案した信号処理手法にて管路中心流速に比例するビート周波数の検出を可能にした。さらに周波数重み付けによる新たな信号処理手法を考案し、検出エラーの低減と測定レンジの拡大を実現した。血液中の主要な光散乱体である赤血球の血液中の体積割合はヘマトクリット値と呼ばれるが、これは性差、個人差があり、透析治療における体水分量の変化によっても変化するため光散乱体の濃度変化の影響を受けない流速計測法であることが重要である。本論文の方法と従来レーザによる血流量の計測方法として知られる LDF(Laser Doppler Flowmetry)法によって、牛乳と水の比率の異なる牛乳濃度 20, 40, 60, 80, 100%の 5 種の流体に対して計測を行い比較したところ、LDF 法では濃度によって 60%以上誤差を生じるのに対し、本論文の方法ではこれを 11%以内に低減できることを示した。また、同様の計測をヘマトクリット値 20, 40, 60%の血液でも実施し、前述の周波数重み付けによる信号処理法を適用することで血流速度を算出可能にし、高精度血流量計への応用の可能性を示した。

第六章では、本論文の結論として、光学素子のボンディングとフォトリソグラフ技術により作製する MEMS 技術の適用により量産可能な超小型 LDV を実現し、これまで不可能であったロボットの指への内蔵を可能にし、さらに新規に考案した信号処理手法と補正式の適用により微小管内の最大流速の測定が可能であること実証したことを述べる。