

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	ウェア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			
論文調査委員	主 査	九州大学 教授	澤田 廉士	
	副 査	九州大学 教授	山西 陽子（工学府）	
	副 査	九州大学 准教授	金谷 晴一（システム情報科学府）	

論 文 審 査 の 結 果 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。このような背景において、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、ならびに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に適用できる MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) 技術を用いた超小型のレーザドップラ速度計 (μ -LDV: Micro-Laser Doppler Velocimeter) について研究した。

市販ならびに先行研究の LDV (Laser Doppler Velocimeter) 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、各辺が数 cm サイズと大型で、ロボットの指や流路の管壁に内蔵することが困難な上に、量産性に乏しいという課題があった。我々の研究室で研究してきた、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に用いる移動回折格子スケールを移動散乱体に置き換えることによって、ロボットの指や管壁に内蔵できるに十分に小さいサイズであり、量産性も高い μ -LDV として使用できることを見出した。この μ -LDV はフォトリソグラフィを基本とした MEMS 技術により製造され、キャビティを形成したシリコン基板と非球面レンズパターンを形成したガラス基板の二層の積層構造で、半導体レーザチップならびにフォトダイオードチップなどの部品を高精度に表面実装した後、一括パッケージ、いわゆるウェアレベルパッケージによる製造が可能であり、サイズ 2.8 mm $\times$ 2.8 mm $\times$ 1.0 mm の超小型レーザドップラを実現している。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、量産性にも優れている。半導体レーザチップの両端から出射した 2 つの光ビームがキャビティに形成した反射ミラーパターンで反射され、ガラス基板に形成された非球面レンズでコリメートされた後、移動散乱体に斜めに照射される。それぞれ正負のドップラシフトを有する 2 つの散乱光の干渉光がガラス基板にボンディングされた中央部のフォトダイオードでビート信号として検出され、そのビート信号の周波数スペクトルあるいはビート信号の周期から移動散乱体の絶対速度を求めることができる。

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されていない。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、アルミ板、段ボール紙、プラスチック板の 3 種の被測定物の移動散乱体（把持対象物）に対して速度を求めた結果、材質や表面形状には依存せず、誤差 3.3% 以内で速度の絶対値計測が可能であること、また、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であることを示した。

さらには、単に透明の亚克力などの光学ブロックを μ -LDV ガラス表面に載置することにより LDV と被測定物までの距離を用途に応じて変更できることも示している。

これまでの透析治療に使用される血流量計測装置における血流量制御は、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、流量計が流路管の管壁に内蔵できない以外に以下の課題がある。1) 流速の測定精度が10%程度にとどまっている、2) 生体の血流量測定に使用される LDF (Laser Doppler Flowmetry) による測定では、濃度の影響を受ける、3) 濃度の影響を受けないレーザドップラーセンサでの速度計測では、高濃度の散乱粒子が混入されている血液などの管内流れの計測に対して、周波数スペクトル形状が鈍化し、ビート周波数の高精度検出が困難である、4) 照射レーザ光ビームスポット内に大きな速度変化の分布を有する小径流路の流れでは、パワースペクトルに現れるビート周波数も広がりを持つために最大流速を高精度に求めることが困難である。

20、40、60、80、100%の5種の水の比率の異なる濃度の牛乳を用いた実験で、従来のLDF法では濃度によって60%以上誤差を生じるのに対し、 μ -LDVのフォトダイオード受光部にピンホールを載置し制限された光路の散乱光を受光することにより、11%以内に低減できることを示した。同様の計測を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を示すヘマトクリット値20、40、60%の血液でも実施し、新規に考案した周波数重み付けによる信号処理法を適用することで管内中央部を流れる最大流速の検出を可能にできることを示した。また、照射レーザ光ビームスポット内に大きく変化する速度分布をもつことから、最大流速度を高精度に測定ができなかった、内径0.5mmの小径チューブ内に流れる散乱粒子を含んだ液体の流速計測で、考案した信号処理手法により測定誤差7%での流速計測を可能とし、さらに補正式を考案し、測定誤差を $\pm 1\%$ 以内にまで低減できることを示した。

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技術ならびに個別部品を不要とする設計により、これまで不可能であった、ロボットの指や微小管壁への内蔵ならびに高い量産性を可能にするとともに、受光部へのピンホールの導入や信号処理手法と補正式を新規に考案することにより、血液などの高濃度の流体の小径管内流れにおいて、濃度の影響を受けない絶対流速測定可能なマイクロドップラ速度計を実現した。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文に値すると認める。