



Title	Three-dimensional dynamic deformation measurement in a wide-frequency range based on Moiré concept
Author(s)	Yadi, Mona
Citation	大阪大学, 2024, 博士論文
Version Type	
URL	<a href="https://hdl.handle.net/11094/98760">https://hdl.handle.net/11094/98760</a>
rights	
Note	やむを得ない事由があると学位審査研究科が承認したため、全文に代えてその内容の要約を公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、<a href="https://www.library.osaka-u.ac.jp/thesis/#closed">大阪大学の博士論文について</a>をご参照ください。

*The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA*

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

## Abstract of Thesis

Name	( YADI MONA )
Title	Three-dimensional dynamic deformation measurement in a wide-frequency range based on Moiré concept (モアレの概念に基づく広帯域周波数の3次元動的変位計測)
<p><b>Abstract of Thesis</b></p> <p>Investigating the three-dimensional dynamic deformation of oscillators is crucial for optimizing their performance, extending their lifespan, and enhancing their initial design. This study explores innovative approaches to address the challenges associated with current non-contact dynamic analysis methods. While coherent imaging methods such as holographic interferometry, electronic speckle pattern interferometry, and digital speckle shearography offer high sensitivity, they are also sensitive to experimental setup, calibration, and ambient vibration which makes them not suitable for in-situ measurements. Grating-based methods like fringe projection profilometry and moiré profilometry, although featuring simpler and less sensitive setups to environmental conditions, have limitations related to phase-shifting methods for phase retrieval, making them unsuitable for dynamic shape measurement of oscillators. Conversely, numerical methods, which require no experimental setup, demand comprehensive knowledge of material parameters and geometrical profiles, raising questions about accurate modeling, especially for devices with complex structures. This study introduces two novel methods based on the Moiré concept due to its sensitivity to small deformations: One-Pitch Phase Analysis (OPPA) for Z directional or out-of-plane vibration analysis of low-frequency (<math>\leq 10</math> kHz) devices, and Sampling Moiré (SM) for XY directional or in-plane vibration investigation of both low and high-frequency (<math>&gt; 10</math> kHz) oscillators. The practical application of OPPA in automotive vibration measurements is checked which offers insights into car body and engine vibrations. A detailed investigation of in-plane vibrations using the SM method is conducted and sheds light on the dynamic behavior of a weighted tuning fork with a low frequency of vibration. Furthermore, the SM method is extended to analyze Micro-Electro-Mechanical System (MEMS) transducers with a high frequency of oscillation, not only to determine their vibration behavior but also to refine their analytical and numerical models and control the quality of these systems. The study concludes with a comprehensive discussion, analyzing findings, considering implications, and highlighting the contributions of these innovative methods to the field of vibration and dynamic analysis. In essence, this study introduces precise and versatile solutions for three-dimensional dynamic measurements applicable to a wide range of oscillators, from micron to meter sizes and oscillation frequencies from a few Hz to several GHz. These methods address the limitations of existing techniques and open new possibilities for understanding and optimizing the structural and dynamic models of oscillators. The findings underscore the importance of adopting advanced measurement techniques to ensure the reliability and efficiency of oscillators in various applications. Additionally, the research paves the way for future innovations in dynamic analysis, potentially leading to the development of even more sophisticated diagnostic tools. As technology progresses, the implementation of these novel methods could become standard practice in the field of dynamic analysis.</p>	

## 論文審査の結果の要旨及び担当者

氏名 ( YADI MONA )		
論文審査担当者	(職)	氏名
	主査 教授	高谷 裕浩
	副査 教授	大須賀 公一
	副査 教授 副査 准教授	井野 秀一 水谷 康弘

## 論文審査の結果の要旨

本論文は、広い測定領域において高感度な微小変位検出を有するモアレの概念に基づいた、新たな3次元動的変位計測手法を提案している。本手法は、2つの変位測定原理を導入することにより、広帯域周波数の動的変位計測を可能としている。すなわち、低周波数領域( $\leq 10\text{kHz}$ )における面外(Z方向)振動解析に最適なワンピッチ位相解析法(OPPA: One-Pitch Phase Analysis method)に基づく変位測定原理と、低周波数から高周波数領域( $> 10\text{kHz}$ )における面内(XY方向)振動解析への適用性が高いサンプリングモアレ法(SM: Sampling Moiré method)に基づく変位測定原理である。OPPA法およびSM法の変位測定原理に基づいた、独自の3次元動的変位計測システムを設計・試作し、マイクロメートルからメートルサイズの測定対象における動的変形挙動の面計測を実現している。本測定システムは、モアレの概念を具現化する実体格子または格子投影光学系と撮像光学系を最適化したシンプルな測定光学系設計によって、湿度、温度、振動などの環境外乱に対する高いロバスト性と、測定データに基づいた数値解析による動的変形挙動の推定誤差低減を達成し、実用性の飛躍的な向上に成功している。主な成果を要約すると以下の通りである。

1. メートルサイズの領域の面計測が求められる自動車ボディの動的面外変位計測によって、OPPA法による変位測定原理を検証している。短焦点投影システムを使用した格子投影法によって、対象表面全体の振動特性を計測し、エンジンの振動周波数と車体における動的変形挙動の関係性を明らかにしている。
2. 重り付き音叉の動的変形挙動の有限要素解析に基づき、低周波数領域における動的面内変位計測によって、SM法による変位測定原理を検証している。重り付き音叉の表面全体に取り付けられた2次元格子を実体格子として利用することにより、対象表面全体における詳細な面内振動を計測し、その周波数特性を明らかにしている。
3. SM法にストロボスコープ法を導入したストロボスコープ・サンプリングモアレ顕微鏡(SSMM: Stroboscopic Sampling Moiré Microscope)を構築し、高周波数領域における動的面内変位計測手法を確立している。SSMMを利用した、水晶振動子の動的面内変位計測によって、本手法の有効性を検証している。電子ビームリソグライフィーと反応性イオンエッティング技術によって、マイクロメートルサイズの水晶振動子表面にエッティングされた2次元格子を、実体格子として利用することにより、対象表面全体におけるナノメートルオーダの高周波面内振動計測が実現可能であることを示している。さらに、SSMMの計測データと有限要素解析に基づいた、新たな品質管理手法の可能性を示唆している。

以上のように、本論文は、マイクロメートルからメートルサイズの測定領域と、数Hzから数GHzの広帯域周波数領域における面内および面外変位計測を可能とする、新たな3次元動的変位計測手法の提案とその基本特性および有効性を明らかにしている。よって本手法は、これまで未解明であった機械構造部材の動的変形挙動の解析手法としての波及性を有している。さらに、本手法の産業分野への適用範囲が拡がるとともに、測定対象がマイクロスケールへと拡張されたことによって、自動車や携帯電話などへの実装が急速に進んでいるMEMS加速度計などの機械的マイクロデバイスやセンサの高精度化および信頼性や安全性を保証する品質管理への適用が期待される。これらの成果は、機械構造部材の3次元動的変位計測に基づく力学特性解析の高度化およびそれに基づく品質管理の発展に大きく寄与する。

よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。