

氏名（本籍）	浅井 大介（愛媛県）
学位の種類	博士（工学）
学位授与番号	甲第65号
学位授与日付	平成26年3月25日
専攻	システム工学専攻
学位論文題目	位相シフト法を用いたFA向け格子投影型三次元計測の高速化
学位論文審査委員	（主査）教授 和田 俊和 （副査）教授 松本 正行 准教授 藤垣 元治 吉澤 徹（特定非営利活動法人 三次元工学会）

## 論文内容の要旨

### 研究の背景

近年、FA(Factory Automation)分野でのロボットの視覚や検査工程などに三次元計測を用いる場面が増えており、小型・軽量で多点を非接触で高速・高精度に計測可能な装置の開発が求められている。非接触に三次元計測を行う手法の一つとして、格子投影法がある。位相シフト法を用いて格子の位相解析を行い、全空間テーブル化手法により位相を高さに変換することで、高精度に非接触で多点の三次元計測を行うことができる。高速化のためには、入力情報である位相シフトされた格子画像を高速に取得する必要がある。そのためには、高速な撮影装置だけでなく、投影格子を高速に位相シフトすることができる機構を持つ格子投影装置が必要である。しかし、従来の格子投影手法による位相シフト機構においては、FA向けとして十分に高速で小型・軽量のものは開発されていない。格子投影装置の位相シフト機構を用いず、1枚の格子画像から位相シフトされた格子画像を生成処理する手法の一つとして、サンプリングモアレ法が提案されているが、この手法は演算処理に時間がかかる。

### 研究の目的

本研究では、位相シフトされた格子画像の取得の高速化を行うために、FA分野で想定される場面に応じた高速な位相シフト機構を持つ小型・軽量の格子投影装置と、サンプリングモアレ法をハードウェア化することで高速化した小型・軽量のカメラの開発を行う。

### 研究の内容

図1に研究の流れを図式化したものを示す。

まず、投影装置の位相シフト機構の高速化のために3種類の格子投影手法を用いて投影装置の開発を行った。

一つ目は、ラインレーザーの光強度を変調しながら一次元共振型スキャナで走査することによって格子投影を行う手法を用いた、レーザー変調格子投影装置の開発を行った。この手法は、スキャナの走査周波数で位相シフトができるため、従来のガラス格子を移動させる方式や液晶を用いる方式と比べて高速である。また、光学系による結像を用いていないため投影深度が深い。本研究では、その利点を活用して奥行方向の計測範囲を拡大できるように位相接続が可能な投影装置を開発し、三次元計測を行った精度の結果を示すとともに、ピンピッキングへの適用を行った。また、温度や気圧によってスキャナの走査角度範囲が変わっても同じ格子投影できる補正方法を提案し、実験装置を用いて補正方法の有効性を確認した。さらに、その補正方法を組み込んだ小型・軽量の格子投影装置の開発を行った。

二つ目は、光源切替位相シフト法を用いた、複数ラインLED格子投影装置の開発を行った。この投影手法は、LEDを切替えることで位相をシフトできるため高速に位相シフトすることが可能であり、ガラス格子とLEDのみで装置を構成できることから小型・軽量である。また、ガラス格子の影で格子投影を行うため奥行方向に広い範囲の投影ができる。本研究では、まず、実用化に向けて専用設計された複数ラインLEDデバイスの開発を行った。次に、本投影装置を用いて計測精度の確認を行い、位相シフトの応答速度を調査した。さらに、本投影装置を用いて移動する対象物の三次元計測を行うことで高速性の確認を行った。

三つ目は、本研究で提案する複数光路格子投影手法を用いた複数光路格子投影装置の開発を行った。本手法は、投影レンズの像面側の光路を光学系によって複数に分岐させたそれぞれの像面位置に、位相をシフトした格子とLEDを配置する。光源切替位相シフト法と同じように、光源であるLEDを切替えることで位相をシフトできるため高速である。また、面発光のLEDを用いているため光量を比較的簡単に上げることができる。まず、本投影装置を用いて位相シフトの応答速度を調査した。また、本投影装置とカメラを用いて三次元計測装置を構築した。キャリブレーションを行う際に用いる平面度のよい基準面として、静止させた液面を利用し、全空間テーブル化手法を適用して、計測精度の評価を行った。さらに、本投影装置と高速度カメラを用いて三次元計測装置を構築し、液体など高速に形状が変化する動的物体の計測を行うことで、本手法の有効性を確認した。

次に、高速な位相解析が可能な撮影装置として、サンプリングモアレ法を撮影装置内部のFPGAを用いてリアルタイム処理を行うことができる小型・軽量のサンプリングモアレカメラを開発した。この撮影装置を用いた計測結果と、複数枚の格子画像を用いた位相シフト法による計測結果の比較を行った。また、空間分解能は格子投影装置と比較すると低いが、1枚の格子画像からリアルタイムで三次元計測が可能な利点を生かして定在波を発生させた対象物の計測を行った。その結果から振動計測をリアルタイムで行いたい用途に適用できるか検証を行った。

さらに、従来の投影手法である、ガラス格子を機械的に移動させる機構に超音波モータを用いてFA向けに小型・軽量化した投影装置と、DMDの画素による投影装置の位相シフト速度について、本研究で開発した試作装置と比較した。

## 研究の成果

レーザー変調格子投影装置は、200Hzまで位相シフトが可能である。寸法は67mm×65mm×30mmで、重さは300gである。複数ラインLED投影装置は、200kHzまで位相シフトが可能である。寸法は55mm×59mm×65mmで、重さは240gである。複数光路格子投影装置は、600kHzまで位相シフトが可能である。寸法は70mm×70mm×35mmで、重さは170gである。サンプリングモアレカメラは、最小撮影範囲では100kfpsのリアルタイムで三次元計測ができる。その寸法は86mm×44mm×128mmで、重さは720gである。様々なFA分野の用途を想定して、三次元計測を行い、その有効性を確認した。本研究で三次元計測を行った例を図2に示す。

本研究により、FA分野で高速な三次元計測が必要な様々な場面において用いることのできる三次元計測装置の開発を行うことができた。

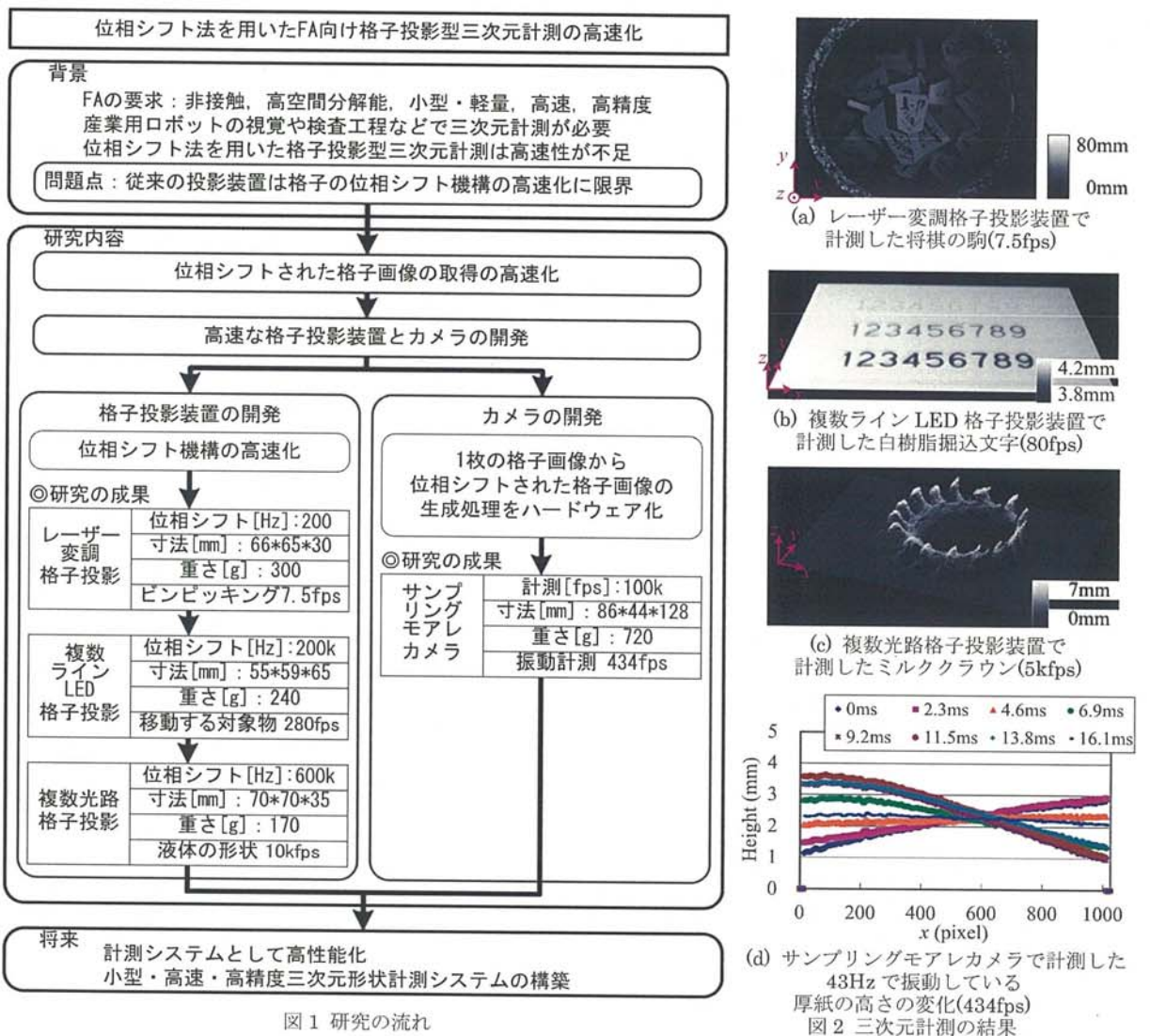


図1 研究の流れ

## 今後の課題と発展

今後の課題として、投影装置では温度や経年劣化による光量変化による計測精度に影響を与える問題が、撮影装置では位相解析処理まではリアルタイムだが結果の転送に時間がかかってしまう問題がある。今後、形状計測装置としてトータルで高性能化に取り組んでいく。将来は、本研究で開発した投影装置や撮影装置を用いて一体型にした小型・高速・高精度三次元形状計測装置の開発を行い実用化していく。

## 論文審査の結果の要旨

まず学位論文および申請書類を検討し、次に公聴会を開催して審査を行った。研究内容については、提案手法により従来手法と比較して格段に高速化が実現されており、その FA 分野における有用性も理解できた。研究の手法については、計測の高速化を行うための提案方式の試作に加えて従来方式の投影装置の試作も行うことで、高速化の実証が行われていた。研究業績については、本論文に直接関係のある掲載済み論文が 2 件、採択済み（掲載待ち）が 1 件であり、必要な要件を満たすと判定した。これらのことより、軽微な修正は必要であるものの、上記の論文内容は博士学位の授与に値するものであると認める。

## 最終試験の結果の要旨

最終試験として、公聴会において諮問を行い、さらに公聴会終了後に追加して諮問を行った。本論文に関連する画像計測分野に関する知識と学力は十分備わっているものと判断した。さらに文章表現力を高めるべき点もあるが、総合的には博士学位の授与に値する十分な学力があると認める。