

氏名 菅野 明宏  
学位 博士(工学)  
学位記番号 新大院博(工)第208号  
学位授与の日付 平成17年9月20日  
学位授与の要件 学位規則第4条第1項該当  
博士論文名 シュリンクフィッタを用いた光学レンズの超精密接合法の最適化に関する研究

論文審査委員  
主査 教授 新田 勇  
副査 教授 大橋 修  
副査 教授 原 利昭  
副査 教授 田邊 裕治  
副査 助教授 鈴木 孝昌

#### 博士論文の要旨

本論文は「シュリンクフィッタを用いた光学レンズの超精密接合法の最適化に関する研究」と題して6章から構成されている。

第1章「緒論」では、本論文の最終的な目的である、プリント配線板に対して微細な回路パターンを高速で描画するためのレーザ直接描画法について論述している。プリント配線基盤業界の市場規模からレーザ直接描画装置の必要性を、技術革新と時代背景を基に説明している。それらを踏まえて、既存のレーザ直接描画法の問題点を明確にした。すなわち、広い範囲にわたって微細なレーザスポットを高速で走査できるレーザスキャナを実現することである。本論文では、そのためのシュリンクフィッタを用いたレンズの高精度な位置決め方法という要素技術の最適化を行った。さらに、その技術を用いたレーザスキャナを、複数個並列に使用するマルチポリゴン方式に応用することで、レーザ走査幅の超広幅化の実現性を実証している。以上第1章では、本研究の背景と目的および、構成について述べている。

第2章「シュリンクフィッタの内外径加工の最適化」では、シュリンクフィッタの内外径加工の最適化を行うために、シメシロがレンズの球面変形およびスポット径に及ぼす影響を明らかにした。最初に、レンズの変形具合を軸対象有限要素法解析にて数値的に求めた。その後、光線解析プログラムを用いて結像面でのレーザのスポット径を求めた。その結果、絞りばめによるレンズの球面は、レンズの研磨面精度の許容値である $\lambda/2$ に対して一桁以上大きな値で変形しても良いことを示した。すなわち、従来考えられてきた値よりも一桁大きいシメシロを与えても良いことを初めて明らかにした。さらに、本レンズ系の偏心と傾きの許容値をも数値解析で明らかにした。シュリンクフィッタはプラスチック製であり、数ミクロン程度の高精度な加工は難しいとされている。本章の結果は、シュリンクフィッタの内外径加工における寸法公差をかなり大きくしても問題ないことを示したものであり、工学的にも価値のある知見を示したものとと言える。

第3章「シュリンクフィッタ法におけるレンズの光軸方向の最適な位置決め」では、シュリンクフィッタ法におけるレンズの光軸方向の最適な位置決めについて検討を行った。シュリンクフィッタ法は、複数枚のレンズの心合わせ、すなわち半径方向の位置決めを高精度に行う方法であるしかしながら、シュリンクフィッタ材として熱膨張係数の大きな材料を用いるので、環境温度が上昇すると各レンズ間の光軸方向の間隔を大きくしてしまう結果となっていた。

これを解消する方法として、本章では樹脂リングによりレンズを光軸方向に押さえる新しい方法を提案した。そして、実験と数値解析によりその効果を実証した。さらに、半導体レーザとコリメータレンズを固定しているホルダの材質や止めネジの位置を最適化することで、温度変化時の半導体レーザとコリメータレンズまでの距離の変化を抑える方法を試みた。その結果、樹脂リングによりレンズを光軸方向に押さえることで、温度が変化してもレンズの光軸方向の位置決め精度を維持することができた。本章の実験では、40℃の温度上昇時のレンズ群間隔の変化量を $3.7\mu\text{m}$ にすることができた。なお、考案した樹脂リングは、組込時に適切な初期軸力を与える必要があることを示した。最終的には、本章で考案したレンズ締結方法を用いることで、40℃の温度上昇時でもレーザスキャナのビームスポット径を $17\mu\text{m}$ 以下にできた。すなわち、レーザスキャナ光学系の温度補償が可能であることを数値解析と実験により明らかにした。

第4章「シュリンクフィッタに用いる最適な樹脂材料」では、シュリンクフィッタ用に最適な樹脂材料の選定を目的として、材料の調査と圧縮クリープ試験による耐久性能を調べた。それらの結果と機械加工性を考慮すると、POM（ポリアセタール）がシュリンクフィッタの材料に適切であるということを実証した。また、シュリンクフィッタ材の応力緩和を考慮して、ある時間経過後の安定した見かけの弾性率を用いてシメシロの設計を行う方法を提案した。その結果、光学性能の経時変化が少ないレンズの接合方法が可能であり、その際の見かけの弾性率は本実験でのクリープ試験による1週間(168時間)経過後の値を使用するのが最適であることを示した。市販の材料を対象にクリープ試験を行うことに加え、熱膨張係数に異方性のある樹脂を試作した。この試作した材料を用いて実験を行った結果、レンズの光軸方向の位置決め精度の向上が可能であることを明らかにした。しかし、試作した樹脂は、クリープ耐久実験にて破損したため、強度の向上を検討する必要がある。

第5章「レーザ直接描画装置への応用と走査幅の超広幅化」では、第2章から第4章まで確立したシュリンクフィッタ法による高精度な $f\theta$ レンズユニットの要素技術を、レーザ直接描画装置へ応用した。さらに、本レーザスキャナユニットをマルチポリゴンシステムに適用することで、走査幅のさらなる広幅化を目指した。はじめに、レーザスキャナユニットの光学性能を露光実験により評価した。その結果、走査幅中央と1つのユニットの走査幅両端である $\pm 40\text{mm}$ の位置においてドット形状の大きさに違いが見られなかった。すなわち、シュリンクフィッタ法の有効性が実験的に確認できた。次に、マルチポリゴン方式のユニット間の画像のつなぎ部分の精度を露光実験により評価した。露光画像を顕微鏡観察したところ走査方向にはドットのズレは $2\sim 3\mu\text{m}$ 程度であり高精度に接続されていることが確認できた。副走査方向には、 $1/3$ ドット程度のずれが観察される箇所があった。この副走査方向のずれは、各ユニットの姿勢制御の微細な調整により改善できると考えられる。すなわち、シュリンクフィッタ技術を用いたマルチポリゴン方式により、レーザスキャナの走査幅の広幅化が可能であることを示している。

第6章「結論」では、本論文で得られた結果を総括している。本研究において、シュリンクフィッタを用いた高精度なレンズの接合方法の最適化を行ったことにより、広い走査幅を持つレーザスキャナユニットが実現できた。さらに、それらのレーザスキャナユニットを応用したマルチポリゴン方式によるレーザ走査技術は、従来のマスク露光からレーザ直接描画法へ移行するためのブレイクスルー技術になるであろうことを示している。

#### 審査結果の要旨

本論文は、今後高精度プリント配線板製造に不可欠になるであろうレーザ直接描画装置について、超広幅化を実現するための2つの技術について論じたものである。一つは、シュリンクフィッタ技術の高精度・高信頼化技術である。二つ目は、マルチポリゴン化である。一つめについては、2章から4章において、シュリンクフィッタに要求される加工精度を理論と実験の両面から明らかにし、クリープ試験により高信頼化を確実なものとした。さらに、樹脂リング法を提案して、レーザのスポット径をさらに安定させる方法を実験により確認した。二つめについては、5章において小型レーザ直接描画装置を複数台並列に配置し、高精度なレーザ描画が可能であることを初めて実証した。すなわち、これまで難しいとされてきたマルチポリゴン方式を確立した。このように、本論文は高精度・高信頼性のレーザ直接描画装置を安価に製造する方法を実証したものとして、工学的に大変価値が高いと認められる。

したがって、本論文は博士（工学）の博士論文として十分であると認定した。