

論文の内容の要旨

専攻名 システム創生工学

氏名 張 弘昊

フェムト秒やピコ秒のパルス幅を有する超短パルスレーザーは、ガラスやプラスチックの誘電体、半導体、金属、炭素繊維強化樹脂(CFRP)などの複合材料に対して、切断、穴あけ、表面処理、内部マーキングをはじめとして、多様な材料へのレーザー加工に用いられる。この超短パルスレーザー加工は、自動車部品、半導体デバイス、ガラス部品、プラスチック部品、医療機器などその適用分野は広く、材料とデバイスの高精度加工を提供する。

研究開発における重要課題は、各応用に要求される加工精度を維持しつつ、加工スループットを向上させることである。なお、加工スループットとは、単位時間あたりのパルスショット数、加工点数、加工長、加工面積、物質の除去量であり、その指標は応用毎に決められる。加工スループットは、直接的に加工コストに反映され、その低減はレーザー加工の競争力を高める。

早崎らは、液晶空間光変調素子(LCSLM: liquid-crystal spatial light modulator)計算機ホログラム(CGH: computer-generated hologram)を用いて、レーザービームを空間的に成形することで、高スループットや高光利用効率のレーザー加工を実行可能なホログラフィックレーザー加工法を、2005年、世界に先駆けて発表した。

本加工法における重要課題は、高精度な再生パターンを得られるCGHの生成であり、それを実行するための最適化手法の開発である。一般に、コンピュータ内でCGHの再生像は、目標値に対してその達成値は99%以上(誤差は1%以下)であるが、LCSLMを含む実際の光学系では、光学系の不完全性から、その達成値は悪化する。そこで、2009年、長谷川と早崎は、CGHを光学系内で最適化することで、自動的に光学系の不完全性を補償するインシステム最適化法を提案した。これは、CGHの再生像をイメージセンサーで取得し、その再生結果をもとに、CGHを再計算し、それを繰り返す事で、その再生像を目標値に近づける方法である。

光学系の不完全性は、静的不完全性と動的不完全性に分類される。静的不完全性は、レーザービームプロファイル、LCSLMの位相変調特性の空間的不均一性及び非線形性、光学系の収差やわずかなミスアライメントである。この静的不完全性は、長谷川・早崎らのインシステム最適化法で補償できた。しかし、レーザービーム強度とポインティングのゆらぎ、外部振動や気体運動に由来する光学系の機械的振動、温度変化に由来するLCSLMを含む光学系の変化である動的不完全性は補償出来なかった。実際のレーザー加工の現場では、静粛な状況であるとは限らないため、これらの補償は実用上極めて重要である。

本研究は、ホログラフィックフェムト秒レーザー加工機における静的不完全性の補償に加えて、動的不完全性の補償のための、CGHのインシステム最適化法とその実装法の開発を行った。加えて、これまでのインシステム最適化では、2次元の集光パターン生成のみであったが、3次元的な集光パターン、すなわち、異なる深さへの集光パターンも最適化できるように拡張した。本論文では、最適化手法の原理とその実装法、CGHの再生実験とレーザー加工への適用を示すものであり、その構成は以下の通りである。

第1章では、現在の産業におけるレーザー加工の重要性、フェムト秒レーザー加工の現状と求

められる性能を示し、ホログラフィックフェムト秒レーザー加工の有用性、本研究の目的、意義、方向性を示した。

第2章では、CGHの歴史的展望、特徴、分類、および既存の問題点を述べ、CGHの光実装方法を紹介した。本研究の主要課題の一つであるCGHのインシステム最適化に関し、その分類、重要性、利点について述べ、本研究の位置付けを明らかにした。

第3章では、2次元的に配列される集光(2次元集光)を生成するCGHのインシステム最適化の原理と実装、再生実験とレーザー加工実験について述べる。実装の主要な構成要素である、フェムト秒レーザー、LCOS-SLM、イメージセンサーについて述べる。2次元CGHの使用による利点と有効性を検証し、振動や光強度変動に対する加工実験を通して、その特性評価を述べる。

第4章では、3次元的に配列される集光(3次元集光)を生成するCGHのインシステム最適化の原理と実装、再生実験とレーザー加工実験について述べる。同様に、原理と実装、再生実験とレーザー加工実験を通してその特性評価を述べる。

第5章では、第4章で述べた3次元CGHを用いた方法に基づいた、ガラスの溝加工への応用展開について述べる。集光配置の異なる3種類の3次元集光パターンを用意し、従来の単一ビーム溝加工と比較しながら、溝の深さと幅を調べ、この方法の利点を検証した。

第6章では、総合的な結論を記述し、研究成果の検証と研究の展望を示す。今後、加工対象の状態を含めた最適化、収差補正、システム動作の高速化、3次元集光を検出法等、新たな検討すべき課題も示した。