

レーザプロセッシングの高度化のための位相回復法による

in-situ 集光ビーム診断法の開発

東京大学 大学院工学系研究科

准教授 三村 秀和

(平成 26 年度一般研究開発助成 AF-2014219)

キーワード：集光波面計測，タイコグラフィ，位相回復

1. 研究の目的と背景

近年のレーザ加工の CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastics)への応用，レーザ走査による 3 次元粉末成形法(3 次元プリンタ)，フェムト秒レーザを利用した超微細加工など，レーザプロセッシングは近年大幅な広がりを見せている。これらの発展は，レーザ光源のハイパワー化が一因となっている。

こうした光源のハイパワー化や加工の高分解能にともない，レーザ発振をする光源だけでなく，光学系も複雑になってきている。この中で，光学ミラーやレンズなどの熱変形は，レーザビームの波面を乱すことになり，設計どおりのビームサイズやパワー密度を実現できず，レーザ加工プロセスや積層プロセスにおける空間分解能の悪化の一因となっている。

レーザプロセッシング装置上において，in-situ で高精度にレーザビームの波面診断ができれば，その光学系における問題点を抽出することができ，更に，アダプティブ光学系の導入により補正を行うことができる。現在，シャックハルトマン法などにより離れた位置での波面計測が行われているが，デフォーカスやチルト成分の波面成分の診断は原理上不可能であり，レーザプロセッシングにおいて実際に使用する焦点位置でのビーム径や強度プロファイルの診断が必要となってきている。

2. タイコグラフィ法

2.1 目的

本研究では，2004 年 Rodenburg により提案されたタイコグラフィ法¹⁾と呼ばれる位相回復法を集光点位置での強度と集光ビームの波面誤差の in-situ 診断法を開発する。そして，集光された集光ビームの強度分布の計測を行い，様々なレーザプロセッシングにおいて，本手法が有用であることを実証する。

2.2 測定原理

図 1 に，タイコグラフィの概要を示す。光の集光光学系における焦点面と十分離れたスクリーン上では，Fraunhofer 近似を満たす。この光学系において，集光点近傍に強度遮蔽物体もしくは位相物体を挿入し，ステップ移動させ複数の背面での散乱強度分布を計測する。ステップ毎に得られるすべての散乱強度分布と挿入物体の位置情報を用いることで，焦点面上での位相分布を回復させる。

この手法は強度情報量を大幅に増大させることができ，

従来の位相回復計算よりも測定ノイズに強く，計算精度が高くなる。タイコグラフィ法は，挿入物体の情報を知ることができるため，電子顕微鏡，X 線顕微鏡での高分解能化手法の一つとして開発された。

2.3 特徴

本手法の特徴は，可干渉性の光に物体を挿入し，物体の位置と散乱強度の情報から位相を決定することであり，その達成した測定精度は干渉計に匹敵している。干渉計等と比べ光学系が簡便であり，将来，様々なプロセス装置にそのまま導入可能である。レーザプロセッシングに利用される高強度レーザの光学系の診断は近年課題となっており，本研究内容はその解決の一旦を担う。

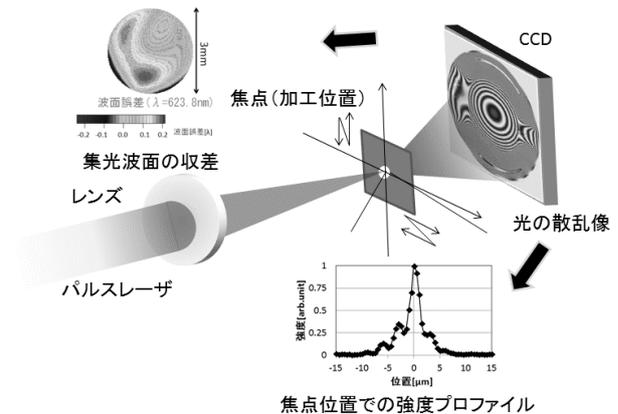


図 1 タイコグラフィ法の概要

3. タイコグラフィ法による集光波面計測システムの構築

3.1 光学系

タイコグラフィ法による高精度波面計測システムを開発するために，He-Ne レーザを用いた集光光学システムを構築した。図 2 にその光学系を示す。

本光学系は，光源を He-Ne レーザから点光源とするためのピンホールを通過し，平面ミラーで複数回反射したあと，ミラーにより集光される。その焦点にピンホールが設置され，背面に CCD カメラが配置されている。ピンホールの直径は約 $20 \mu\text{m}$ としている。ピンホールは，XYZ ステージに搭載されている。ピンホールが焦点面上で XZ スキャンしたとき，変化強度分布を CCD カメラで取得する。測定さ

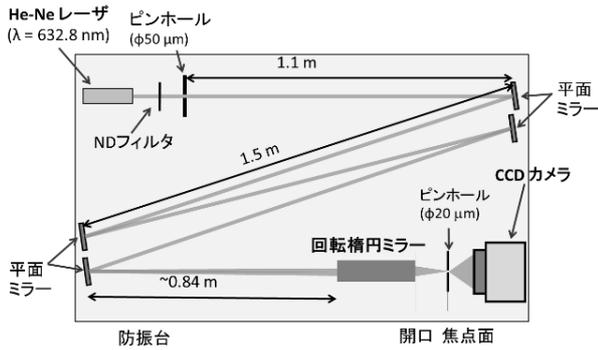


図2 タイコグラフィ法開発のための光学系

れた強度データが一致するように、集光ビームの位相分布が回復される。

3.2 計算の高速化

本手法は、フーリエ変換、フーリエ逆変換の反復計算が必要であり、計算速度の点から実用的ではなかった。本研究では、GPGPU (General-purpose computing on graphics processing units)を用いた高速計算手法を導入している。この導入により、計算スピードが大幅に向上し、リアルタイムでの波面、強度分布計測が可能となった。

3.3 位相回復アルゴリズム

本研究で提案した位相回復手法の概略を図3、図4に示す。焦点面上のピンホールから伝播する複素波動場と CCD面に到達する複素波動場の関係は、基本的にフーリエ変換の関係にあると言える。タイコグラフィ法を含む位相回復計算は、CCD面と焦点面の間でフーリエ変換と逆フーリエ変換を繰り返す。複素波動場は、位相分布と強度分布で表現される。繰り返し計算内で、CCD面内の強度分布を計測データに置き換える。位相分布は、反復計算内で更新されていく。これを繰り返すと測定された強度分布と一致するように位相分布が変化していく。タイコグラフィ法では、使用する強度分布の枚数を大幅に増加させることで、位相

回復の精度を向上させることが可能である。

3.4 空間分解能の向上のための工夫

レーザの集光ビームを高精度に評価するためには、高い空間分解能で集光ビームの複素波動場を決定する必要がある。

焦点面と CCD 面の関係はフーリエ変換の関係である。焦点面の計算上の分解能を向上させるためには、CCD 面において、より広角に散乱する光を観察しなければならない。しかしながら、CCD の撮像面の大きさは有限であるため測定対象の集光素子の NA が高い場合、これは困難である。計算上の CCD 面の範囲をセンサ外部に拡大し、センサ部分のみ強度値の更新を行うことも可能であるが、その場合、センサ外部の領域に周期的なノイズが発生する。

この実験上の制約に対応するために、図3のように、焦点面と集光素子の出口開口面の間における波動場の反復計算を追加している。集光素子の出口開口面の外側には、強度が存在しない。したがって、開口の形状領域を拘束条件として追加しても物理的に問題がない。このように、集光素子開口の外側における光強度をゼロとすることで、位相回復計算の安定性を大幅に向上できた²⁾。

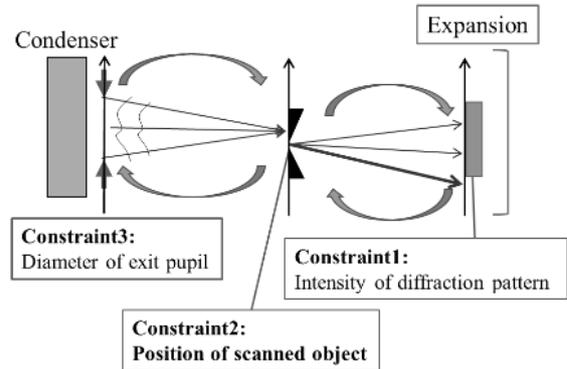


図3 タイコグラフィにおける繰り返し計算の概要

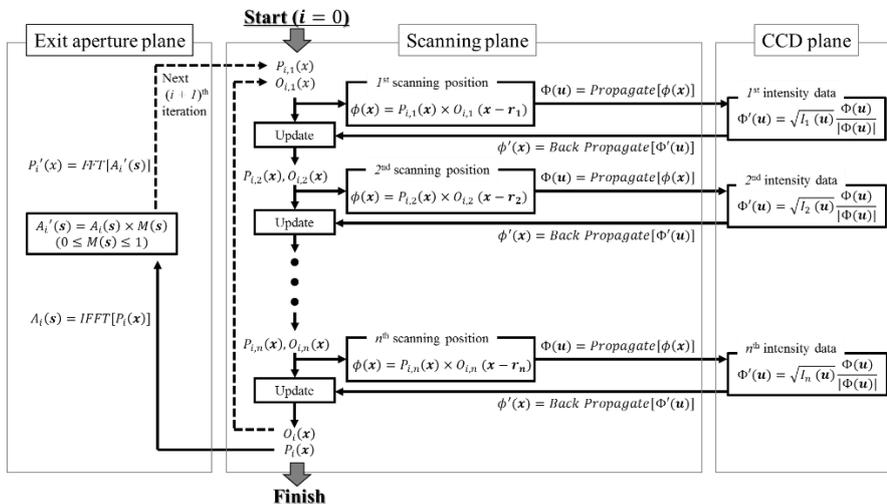
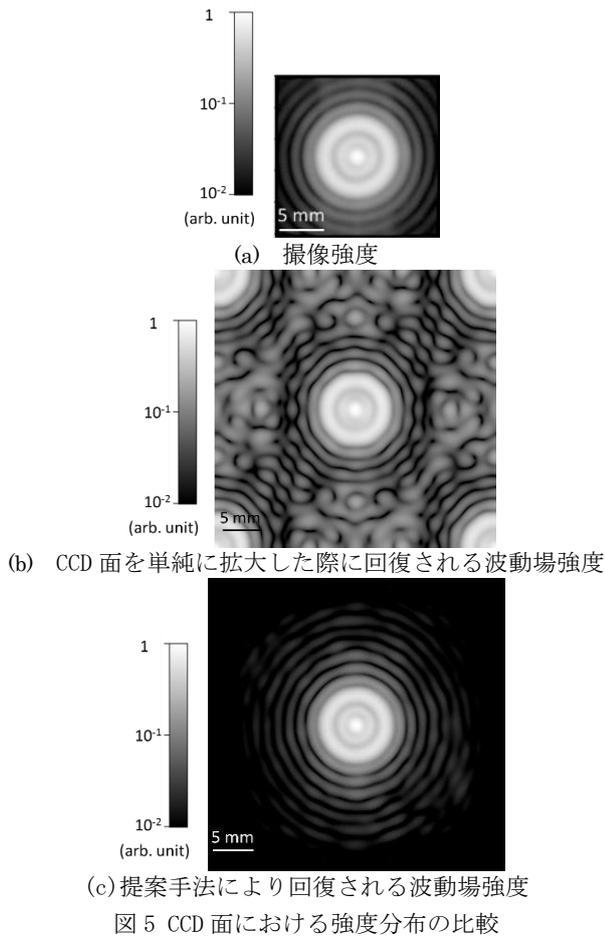


図4 計算アルゴリズム概念図

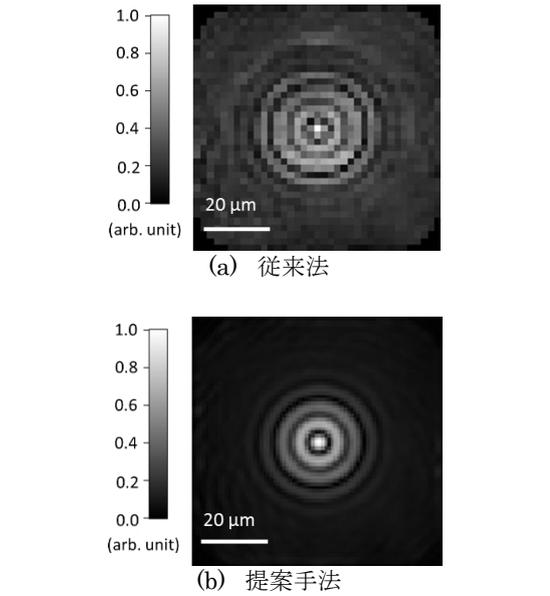


その結果、図5(c)に示すように、CCD面上の計算範囲を、強度分布を取得できていない領域に周期ノイズを発生させることなく拡大することができた。

一般にタイコグラフィ法では、波動場伝播にフラウンホーファ回折を適用するが、これはNAが高い集光ビームの記述に適さない。本手法ではこれに代わり、波動場の伝播に対して高NA近似を適用した³⁾。焦点面に挿入したピンホールの直径が18 μmと十分に小さいことから可能となった。実用上は、事前に撮像したCCD上の強度分布を非線形座標変換し、この歪曲強度分布と焦点面における波動場のためにフーリエ変換の関係を成立させ、計算時間の短縮を図っている。

図6は、従来法と本研究で開発した手法の比較である。従来法、すなわち図5(a)の領域のみを用いて位相回復計算を行った場合、図6(a)のように空間分解能が悪い。本研究で開発した手法を用いると、図6(b)のように大幅に空間分解能が向上していることがわかる。この二つのデータで使用している測定データは、まったく同じである。

このように、本研究では、図3、図4に示した計算アルゴリズムの改良のみで、空間分解能を大幅に向上させることに成功した。



4. レーザ集光ビームの波面計測精度評価とアライメント調整への適応

改良したアルゴリズムを用いて、実際に集光光学素子の一の波面誤差を計測した。表1に計測条件の例を示す。図2に示すように、使用するビームには波長632.8 nmのHe-Neレーザを選択している。光学素子と焦点面との距離である焦点距離は20mmであり、NAが約0.1の集光素子を利用しており、回折限界の集光サイズは約2.5 μmである。測定精度を向上させるため、撮像枚数が678枚と多くしている。

表1 波面計測条件

焦点面上のピンホール直径	18 μm
焦点距離	20 mm
焦点面とCCDカメラの距離	41.5 mm
ピンホールの1stepあたりの送り	3.9 μm/step
撮像枚数	678枚

集光ミラーのアライメントはX,Y,Zの手動ステージ三軸と回転方向のゴニオステージ二軸を用いている。φ50μmピンホール、虹彩絞り、回転楕円ミラー、CCDカメラの中心を大まかに光軸に合わせた後にφ18μmピンホールを挿入する。

図7に本手法を用いてアライメント補正を行った結果を示す。タイコグラフィ法によって回復した下流開口波面を元に、集光ミラーの光軸に対する傾きによって起因する波面収差を取り除く方向に調整する。図7(a)は調整前の集光ミラーの出口開口での波面誤差プロファイルである。図7(b)は、調整後の波面誤差プロファイルである。具体的には、集光ミラーが光軸に対して傾いたことによるコマ収差を補正した。このように、計測された波面誤差を元に集光

ミラーのアライメントを行うことができた。

この状態において、焦点面におけるビームプロファイルを図8に示す。集光ミラーのNAから試算される、632.8nmのHe-Neレーザの理想集光径は2.5 μm である。これらより、波面計測時の光学系アライメントにおいて、集光ミラーは、理想的にHe-Neレーザ球面波を集光していることがわかる。

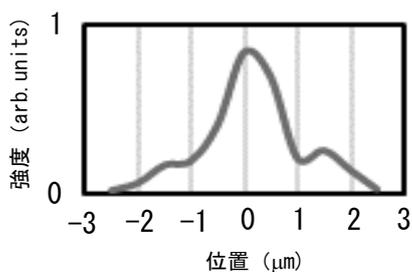


図8 アライメント補正後測定された集光ビームの強度プロファイル

5. 今後の展開

タイコグラフィ法は、顕微鏡として開発された手法であり、集光ビームの波面計測は付加的なものであった。本研究では、集光ビームの波動場を計測するため、位相回復アルゴリズムにおいて集光素子出口開口の外側が強度がゼロになるという工夫を行った。その結果、焦点面での集光ビームプロファイルの波動場算出における空間分解能を大幅に向上させることができた。そして、安定して集光ビームの波面計測を行うことができるようになった。

実際のレーザプロセッシングへの応用を見据え、集光ミラーのアライメント補正へ本手法を適応した。その結果、アライメント補正が可能であることを示し、理想的な回折限界の集光を実現した。

レーザプロセッシングの多くはレーザを集光し、サンプルに照射する。サンプルは走査ステージが取り付けられている。本研究では、最も単純な形状としてピンホールを挿入したが、微小開口であれば円形でなくてもタイコグラフィ法は可能である。したがって、焦点面から十分に離れた位置にCCDカメラを装備さえすれば、本手法は適応可能である。本研究成果は、将来、様々なレーザプロセッシングにおいて、in-situでの波面計測を可能にする。さらにin-situで補正をすることで、理想的な集光状態を維持可能なシステムを構築することにつながる。

謝辞

本研究は、天田財団研究助成において行われました。感謝申し上げます。

参考文献

- [1] H. M. Faulkner, J. M. Rondenburg, PRL 93 023903 (2004).
- [2] 竹尾陽子, 三村秀和, 高NA集光素子の出口波面計測方法及び出口波面計測システム, 特願 2015-158575.
- [3] Y. M. Engelberg and S. Ruschin, J. Opt. Soc. Am. 21, 11, 2135-2145 (2003).