多ビームコヒーレント結合のための位相差制御フィードバック アルゴリズムの開発

衣笠 卓一^{1,2}, 椿本 孝治¹, 岩見 洋輔^{1,2}, 吉田 英次¹, 藤田 尚徳¹,
宮永 憲明¹, 白神 宏之¹

¹大阪大学 レーザーエネルギー学研究センター (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-6)

²大阪大学大学院 工学研究科 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

Development of Feedback Algorithm for Filled Aperture Coherent Beam Combining Technique with Phase Control

Takuichi KINUGASA,^{1,2} Koji TSUBAKIMOTO,¹ Yosuke IWAMI,^{1,2} Hidetsugu YOSHIDA,¹
Hisanori FUJITA,¹ Noriaki MIYANAGA,¹ and Hiroyuki SHIRAGA¹

¹Institute of Laser Engineering, Osaka University, 2-6 Yamada-oka, Suita, Osaka 565-0871

²Graduate School of Engineering, Osaka University, 2-1 Yamada-oka, Suita, Osaka 565-0871

(Received November 12, 2014)

Stable coherent beam combining is demonstrated with a high-precise phase control. We developed a feedback program based on new algorithm for a filled-aperture coherent beam combining. Four beams were coherently combined by using the developed program. A coefficient of variation (C.V.) of the combined beam power was less than 0.78%.

Key Words: Coherent beam combining, Fiber lasers, Pulse lasers, Filled-aperture, CFRP

1. はじめに

炭素系繊維を樹脂で固めて成形したCFRP(carbon-fiber-reinforced plastic)は軽くて高い強度を有する材料として、スポーツ用品や医療機器に広く使われてきた。最近では、航空機の構造材や自動車のボディ等にも使われ始めている。CFRPの加工には、ウォータージェットや機械切削が主流であるが、複雑な形状に対応できない、材料への負荷が大きい、CFRPが剥離するといった問題がある。我々は、これらの問題を解決するために、レーザーを使った加工方法を提案し、レーザーの開発を行っている。CFRPは高融点材料である炭素繊維と、低融点材料である合成樹脂から出来ており、レーザー装置には、炭素繊維切断のための高いピークパワーと高速加工のための高い平均パワーが求められている。そのため、高い集光性能を持つファイバーレーザーシステムの構築を考えた。ファイバーレーザーでは、パルスエネルギーが、非線形効果や端面ダメージにより制限されてしまうため、複数の小口径ビームを足し合わせることで、エネルギーを高める。最終的には、12本のロッドファイバーから出力される光を4ビーム毎にコヒーレントに結合した後、さらに、結合された3本のビームを波長合成により結合することで、平均出力1.5 kW(繰返し150 kHz、パ

ルス幅10 ns, 10 mJ/pulse)のレーザーシステムを開発する計画である。本論文では、開発した4ビームのコヒーレント結合技術について報告する。

2. コヒーレント結合と制御アルゴリズム

複数のレーザービームを結合する方法には、波長の違いや偏光を利用したインコヒーレント結合(Incoherent Beam Combine, 以下ICBC法)と、ビームの位相を揃えて結合するコヒーレント結合(Coherent Beam Combine, 以下CBC法)がある¹⁾。Fig. 1にCBC法の原理図を示す。CBC法は、ビームの加算の仕方により、2つに分類される。Fig. 1 (a)は面内にタイル状にビームをならべて結合するTiled-Aperture結合(TA-CBC)であり、Fig. 1 (b)は、同一位置にビームを重ねるFilled-Aperture結合(FA-CBC)である。TA-CBC法は、結合後のビームを集光した場合、高次の回折成分が発生し、ストレーレレシオが低下するという問題がある。本研究では、CFRP加工時に、レーザー照射周辺部への影響を考え、高次回折が発生しにくいFA-CBC法を採用した。

CBC法では、結合後のレーザーパワーを安定に保つために、高速で、高精度の位相制御が必要となる。TA-CBC法では、SPGD(Stochastic Parallel Gradient Descent)

Fig. 1 Schematic layout of coherent beam combinations. (a) Tiled-Aperture. (b) Filled-Aperture.

アルゴリズム²⁾を用いた高出力化実験^{3,4)}が多数報告されている。また、FA-CBC法では、PID(Proportional Integral Derivative)制御アルゴリズムを用いたコヒーレント結合実験^{5,6)}が報告されている。しかしながら、光の干渉が三角関数的に変化するため、PID制御を使う場合、目標値が極値付近であれば高精度な制御を行えるが、目標値が中間値付近の場合は出力変化が急峻なため、安定な制御が比較的難しい。また、これらの論文では、結合後のビームパワーだけをフィードバックの対象としているため、被結合ビームのパワーが変動した場合、その変動が結合後のパワーの不安定性につながる。また、位相差を計測しているわけではなく、一定の刻み幅で位相を制御することから、目標値への到達までに数ステップの位相制御を必要とする。我々は、これらの問題を解決するために、被結合ビームのパワーを常に計測してフィードバック時の計算に取り入れ、位相差を直接求める制御アルゴリズムを考案した。これにより、被結合ビームのパワー変動と位相差変動の分離ができるため、位相差計算時の誤差を低減することができ、制御ステップ数の削減による高速化が可能となる。

Fig. 2に、開発したアルゴリズムを適用する場合のFA-CBC法による2ビーム結合の概念図を示す。これまでの方法では、2ビーム結合後に一つの計測器でパワーを計測していたが、さらに2台の計測器を追加し、被結合ビームのパワーも計測する。

今、ビーム1のパワーを P_1 、ビーム2のパワーを P_2 とすると、結合後のパワー P は

$$P = P_1/2 + P_2/2 + \mu_{12}\sqrt{P_1P_2}\cos\theta \quad (1)$$

で与えられる。ここで、 μ_{12} はコヒーレンス度であり、2光束の干渉度を決定する。また、 θ はビーム間の位相差

Fig. 2 Schematic layout of coherent beam combining of two beams.

Fig. 3 Optical length control by piezo translation stage and prism pair.

である。式(1)から、位相差を求めることができ、

$$\theta = \cos^{-1} \left\{ \frac{P - (P_1 + P_2)/2}{\mu_{12}\sqrt{P_1P_2}} \right\} \quad (2)$$

となる。 P_1 および P_2 が不明な場合、 θ を特定することが出来ない。式(2)で求めた位相差を直接フィードバックすることにより、1ステップで制御可能であることから、これまでの結合後パワーのみを計測する制御法に比べて少ないステップ数で制御を行うことが可能である。

次に、式(2)を基にした光路長差制御ビーム結合のアルゴリズムを説明する。光路長差制御には、Fig. 3に示すような、ピエゾ駆動の1軸ステージ(THORLABS製NFL5DP20/M、理論分解能20 nm)の上にプリズム(合成石英、頂角30度)をのせたものを用いた。ピエゾ駆動による光軸のずれを防ぐために、同じプリズムを対にして配置している。光路長制御分解能は、ステージ移動方向とレーザーの伝搬方向のなす角が60度なのと空気とプリズムの屈折率から、4.5 nmとなる。Fig. 4 (a)は、式(1)において、 $\mu_{12} = 1$ とした時の結合パワー曲線(P - θ 曲線)を示している。縦軸は結合ビームのパワー(P)、横軸は結合後の2ビーム間の位相差(θ)であり、ピエゾ電圧値(V)に比例する。目標パワーを P_{set} とすると、 P_{set} を得るために必要な位相差は θ_{set} となる。これに対して、実際に計測されたパワーを P_{mea} とすると、現状の位相差は θ_{mea} と推測できる。したがって、 θ_{mea} と θ_{set} との差 $\Delta\theta$ がフィードバックすべき値となる。実際の制御では θ_{mea} 、 θ_{set} に対応したピエゾ電圧値 V_{set} 、 V_{mea} を計算して制御を行う。式(2)より、半波長の光路差を与える電圧幅を V_w

Fig. 4 Conceptual diagram of phase control. (a) P - θ curve. (b) Solid line indicates initial P - V curve. P - V curve is shifted to dashed line by temperature, atmosphere and etc.

Fig. 5 Flowchart of phase control algorithm.

とすると、ピエゾの相対的な電圧値は、結合ビームのパワー(P)の関数となり、

$$v(P) = \frac{V_w}{\pi} \cos^{-1} \left\{ \frac{P - (P_1 + P_2)/2}{\mu_{12} \sqrt{P_1 P_2}} \right\} \quad (3)$$

となる。

Fig. 5に制御アルゴリズムのフローチャートを示す。まず、ピエゾ電圧値(V)を変化させ結合ビームのパワーが最大および最小となるピエゾ電圧値を求める。パワーが最大となるピエゾ電圧値を V_0 とし、ピエゾに印加する。次に、被結合ビームのパワー(P_1 および P_2)、結合ビームのパワー(P_{mea})を計測し、式(3)を用いて、 V_{set} を計算する。結合ビームの計測パワー(P_{mea})と目標パワー(P_{set})の差($\Delta P = |P_{mea} - P_{set}|$)が許容誤差以上ある場合はフィードバック制御を行う。現在の結合ビームの計測パ

ワーと目標パワーの差(ΔP)が、1つ前の計測パワーと目標パワーの差(ΔP_{old})より小さい場合、 $\Delta V = V_{set} - V_{mea}$ で与えられる。逆に大きい場合は、元の電圧値に戻すという動作を行う。制御の安定性を考慮して ΔV には係数 α を掛ける($\Delta V = -\alpha \Delta V$)。次に、 $V_0 = V_0 + \Delta V$ とし、新しい V_0 とする。これは、Fig. 4 (b)に示すように、実線のP-V曲線が環境変化により破線にシフトし、位相差がゼロとなる電圧 V_0 が V_0^* になったと考えることに相当する。こうして得られた新しい V_0 に、目標パワーを与える相対電圧値 V_{set} を加えた電圧をピエゾに印加することにより目標パワーへの制御を行う。

3.4 ビームコヒーレント結合実験

開発したフィードバックプログラムをつかって、4ビームのコヒーレント結合を行った。Fig. 6に実験光学系の配置図を示す。Ybファイバーから出力される中心波長 $\lambda = 1064$ nm、パルス幅15 ns、繰返し周波数100 kHzの直線偏光パルスレーザーを焦点距離 $f_1 = 400$ mm、 $f_2 = 200$ mmの2枚のレンズを用いて縮小、発散調整したのち、ハーフミラーでパワーが1:1になるように2つに分割した。さらに、2つのビームを同様にそれぞれハーフミラーで2つに分け、最終的に4ビームに分割した。その後、2本1組として、ハーフミラーで結合し2つの結合ビームを得た。このとき、結合する2つのビームのうちの片側の光路には、時間差を調節するための遅延光路と、ピエゾ素子を用いた光路長制御機構を挿入している。光路長の制御分解能は、変化が緩やかな極値付近で0.04%、急峻な中間値付近で0.3%のパワー制御に相当する。また、4つのビームのパワーはパワーメーター(THORLABS製PM100USB, S121C)を用いて、サンプリ

Fig. 6 Schematic layout of coherent beam combining of four-beams. M: mirror, HWP: half wave plate, HM: half mirror, BS: beam splitter, PM1: power meter (THORLABS PM100USB, S121C), PM2: power meter (OPHIR PD300R-3W), DS: delay stage.

ング間隔3 msでモニターしており、各ビームのパワー変動もフィードバック制御に組み込んでいる。フィードバックに用いる結合ビームのパワーの計測にも同様のパワーメーターを用いている。制御を統括するコンピュータは、Core-i7(3.40 GHz)を搭載したWindows7マシンを用いた。ピエゾ及びパワーメーターとの通信はUSB2.0を経由している。得られた2つの結合ビームを同様に光路長制御した後、ハーフミラーで結合した。4ビームを結合した後のビームのパワーをパワーメーター(OPHIR製PD300R-3W)で計測し、安定性を評価した。

4. 結果と考察

Fig. 7にパルスレーザーを4ビーム結合したときの結合ビームの5分間のパワー変動を示す。計測のサンプリング間隔は1 sである。フィードバック制御を行わない場合は、結合ビームのパワーが空気の揺らぎ、周囲温度の変動や機械振動等の影響で大きく変動したのに対して、フィードバック制御を行うことで、一定値に保たれていることがわかる。パワーの安定性を評価するために、変動係数 $C.V. [\%]$ を次式により計算した。

$$C.V. = (S_p / P_{ave}) \times 100 \quad (4)$$

式(4)で S_p 、 P_{ave} はそれぞれ結合ビームのパワーの標準偏差および平均値である。フィードバック制御を行った場合と行わなかった場合の $C.V.$ はそれぞれ0.78%、28%となった。

Fig. 8 (a)に分割前のレーザーのパワー、Fig. 8 (b)に分割後にコヒーレント結合したレーザーのパワーの5分間の変動を示す。これらのデータは3 ms間隔でサンプリングし、10サンプルの平均化処理を行った。また、縦軸はそれぞれ最大値で規格化している。バックグラウンドノイズは最小値に対して 10^{-3} 以下であった。結合後のパ

Fig. 7 Power fluctuations of combined beam (a) with and (b) without feedback control.

Fig. 8 Power fluctuation. (a) Input beam. (b) Phase controlled combined beam.

ワーは分割前のパワーを上回らないようにするため、結合後最大値の95%を設定値にした。分割前のレーザーは、 $C.V.$ が5.0%であり、大きく変動している。これに対して、4ビーム結合により、一定パワーに制御したビームの $C.V.$ は、0.78%となった。本アルゴリズムによる制御法により、入力ビームのパワー変動によらず、安定したパワー制御が行えることがわかった。

現在のハードウェア構成における一制御ループにかかる時間は30 msである。今後は、加工現場の機械振動、周囲温度の変動や空気の揺らぎなどのより周波数の高い位相変動に対しても安定した制御を行えるように1 kHz以上の制御速度を実現できるように改良を加える予定である。現在の制御システムにおいて速度の遅延の原因となっている部分はパソコンと制御機器間の通信(パワーメーターのサンプリング速度の低下等をもたらす)、およびピエゾの応答速度にあることがわかっている。パソコンと制御機器間の通信速度の妨げについては、パソコンのオペレーションシステムのオーバーヘッドが大きい。また、ピエゾの応答速度低下は、光学素子による負荷があるためと思われる。今後、統括制御を行う演算装置のFPGA(field-programmable gate array)など、リアルタイム処理が可能な制御機器への置き換え、および高速で高分解能なピエゾの導入と、薄板ミラーの採用による光学素子の軽量化を検討している。

5. 結論

多ビームコヒーレント結合のために、新しいフィードバックアルゴリズムを基にした制御プログラムを開発

し、4ビームのパルスレーザーのコヒーレント結合を行った。考案したアルゴリズムでは、直接位相差を計算してフィードバック制御を行うため、これまでのPID制御に比べて、制御速度が速い。また、被結合ビームのパワーをモニターし、制御ループに組み込んでいるため、被結合ビームのパワー変動と位相差変動の分離がされ、位相差計算時の誤差を低減することができる。本研究で開発した制御プログラムは、任意のパワー設定値に対しても高い安定性で制御が可能である。これらの結果、パワー変動5.0%の入力ビームを使っているにもかかわらず、4ビーム結合後に、変動係数0.78%で安定制御を行った。今後、さらに制御を1 kHzオーダーまで高速化することにより機械振動や周囲の温度の変動、空気の揺らぎなどの影響による高周波の変動にも対応できるようにシステムを改良することを考えている。

6. 謝 辞

本研究の一部は、NEDO「次世代素材等レーザー加工技術開発プロジェクト・次世代レーザー加工技術の研究開発」の委託により実施された。

参考文献

- 1) T. Y. Fan: IEEE J. Sel. Topics in Quantum Electron. **11** (2005) 577.
- 2) M. A. Vorontsov, V. P. Sivokon: J. Opt. Soc. Am. A **15** (1998) 2745.
- 3) P. Zhou, Z. Liu, X. Wang, Y. Ma, H. Ma, X. Xu, and S. Guo: IEEE J. Sel. Topics in Quantum Electron. **15** (2009) 248.
- 4) X. Wang, J. Leng, P. Zhou, Y. Ma, X. Xu, and Z. Liu: Appl. Phys. B **107** (2012) 785.
- 5) H. Tunnermann, J. Neumann, D. Kracht, and P. Webels: Opt. Lett. **36** (2011) 448.
- 6) E. Seise, A. Klenke, S. Breitkopf, J. Limpert, and A. Tunnermann: Opt. Lett. **36** (2011) 3858.