

マイクロライダーによるキーホール形状のリアルタイム計測と機械学習による評価

光産業創成大学院大学 光産業創成大学院研究科

教授 石井 勝弘

(2020年度 重点研究開発助成 課題研究 AF-2020202-A3)

キーワード：レーザー溶接，キーホール計測，マイクロライダー

1. 研究の目的と背景

日本が提唱する未来社会のコンセプト「Society 5.0」は、サイバー（仮想）空間とフィジカル（現実）空間が融合し、人々に豊かさをもたらす超スマート社会であり、その未来に向かって多くの取組みが進められている。その一つが、サイバーフィジカルシステムにより実現されるスマートファクトリーであり、ものづくりはセンシング・モニタリングにより見える化され、そのデータを用いた制御や、蓄積されたビッグデータと機械学習・AIによる最適化が行われ、最終的に自立化していく。レーザー加工でも「Society5.0」に向けた取組みが進んでおり、内閣府 戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) では、「CPS型レーザー加工機システム研究開発」がある。産業技術総合研究所では、「Society 5.0」へ向けた戦略の柱となる6つ研究の中で、デジタルものづくりに向けた革新的計測技術が挙げられており、製造現場でのリアルタイムかつダイナミックな計測技術の開発が進められている。一方、持続可能な開発目標 (SDGs) では、「資源利用効率の向上とクリーン技術及び環境に配慮した技術・産業プロセスの導入拡大」(9.4) がうたわれており、効率的でスマートなレーザー加工はSDGsの開発目標にも合致する。

レーザー溶接のリアルタイムその場計測はすでに始まっている。直接、レーザー溶接をモニタリングする方法としては、スペクトルドメイン光干渉断層画像化法 (SD-OCT: Spectral Domain Optical Coherence Tomography) によるキーホール深さの計測があり¹⁻³⁾、近年、カナダのレーザー・デプスダイナミクス (Laser Depth Dynamics, LDD) 社とドイツのプレシテック (PRECITEC) 社から販売されている。これらの製品は、加工レーザー照射中にレーザー照射位置のキーホール深さをそれぞれ 250 kSampling/sec と 70 kSampling/sec で高速に計測する。また、我々は、タイムストレッチ技術^{4,5)}を用いた 10 MSampling/sec の高速 OCT を用いてマイクロメートル分解能 LiDAR 計測を行う“マイクロライダー”の開発を進めている^{6,7)}。

本研究では、マイクロライダーを用いて、レーザー溶接中のキーホール形状のリアルタイムその場計測と、その計測結果を溶接レーザーにフィードバックするリアルタイム制御を行う。また、深層学習を用いたレーザー溶接結果の解析を試みる。

2. 実験方法

2.1 マイクロライダーシステムの概要

図1にマイクロライダーシステムの概略図を示す。マイクロライダーシステムの光源は、繰り返し 10 MHz、中心波長 1550 nm、パルス幅 < 1ps の超短パルスレーザーであり、モード同期ファイバーレーザーで作製している。光源からの光は、はじめに高非線形ファイバーにて波長帯域を拡大し、次に長距離の分散補償ファイバーによってパルス幅を伸長し、チャープパルスにする。チャープパルスは半導体型光増幅器 (BOA) にて増幅され、90%が測定光としてレーザー加工ヘッドへと導入され、ガルバノスキャナーを通り、ダイクロイックミラーにて、加工用高出力レーザーからの光と同軸にされ、ワークに照射される。マイクロライダーの光は、ガルバノスキャナーによって、加工レーザーの周辺を高速に走査することができる。ワークからの測定光の反射光は、マイクロライダーシステムへと戻り、サーキュレーターを通り、BOA で増幅された後、50 : 50 ファイバーカップラーで参照光と結合され、バランス検出器で電気信号に変換される。10%の参照光は、測定光と干渉させるために、測定光とほぼ同じ光路長の遅延経路を通過している。バランス検出器で検出された光は高帯域のリアルタイムオシロスコープで記録され、コンピューターで信号解析され、キーホールの深さが計算される。図2にマイクロライダーシステムとレーザー加工ヘッドの外観写真を示す。

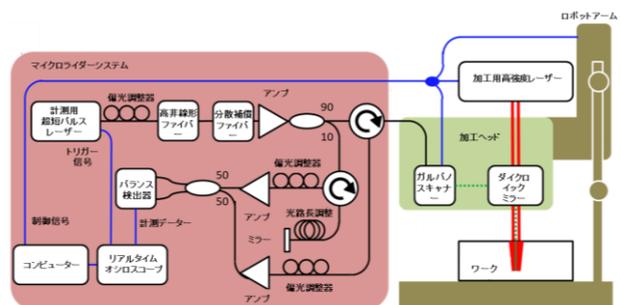


図1 マイクロライダーシステムの概略図

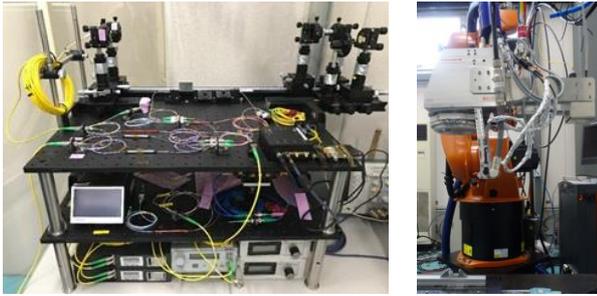


図2 マイクロライダシステム (左) とレーザー加工ヘッド (右) の写真

2・2 信号処理

図3は、マイクロライダで検出された信号の例を示す。この例では、ストレッチ後のパルス幅は約20 nsである。左図のように、100 ns 間隔 (10 MHz) で信号が検出されている。右図より、1つのパルス信号の中に、ワークからの反射光と干渉光の干渉によるビート信号が発生していることが確認できる。反射光と参照光は時間とともに周波数が変化するチャープパルスであり、2つのパルスに時間差があると、干渉しその時間差に応じたビート信号が発生する。ビート信号の周波数を解析することで、反射光と参照光の時間差、つまり、反射光と参照光の光路長差が得られる。

周波数解析の流れは以下の通りである。はじめに、フレーム処理によって、連続したパルス列の信号を1つのパルスごとに切り出す。次に、時間を波数に変換する。分散補償ファイバーの分散量は非線形成分を含むため、チャープパルスの時間と波数の関係も非線形成分を含んでおり、ビート信号がわずかにチャープしており、複数の周波数成分を含むことになる。したがって、非線形成分を補正する必要がある。時間と波数の変換式は、予め干渉信号を測定して求めておく。オシロスコープで取得された信号は、等時間間隔でサンプリングされているため、波数に対しては等間隔ではない。そこで、FFT 処理をするために、波数に対して等間隔になるようにリサンプリング処理を行う。FFT 結果の分解能を高くするために0パディングを行った後にFFTを実行する。ワークの位置にミラーを置き、光路長差を2 mm から16 mm まで変化させた場合のFFT結果を図4に示す。ビート信号による鋭いピークが確認できる。ピークの幅と高さは10 mm 以上の範囲でほぼ一定であり、10 mm 以上の測定レンジで距離測定が可能であることが確認できる。なお、測定レンジは、バランス検出器とオシロスコープの帯域で制限される。この測定では、帯域60 GHzのバランス検出器と20 GHzのリアルタイムオシロスコープを用いて測定を行っている。また、図5は、ワークの位置にミラーを置き高さを変化させて距離測定を行った結果と、2000回測定での標準偏差を示す。13 mmの測定レンジにわたり、10 μmの測定精度で距離測定ができる。

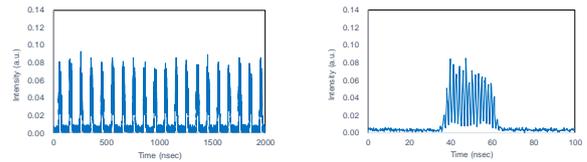


図3 マイクロライダの計測信号 (左) と拡大図 (右)

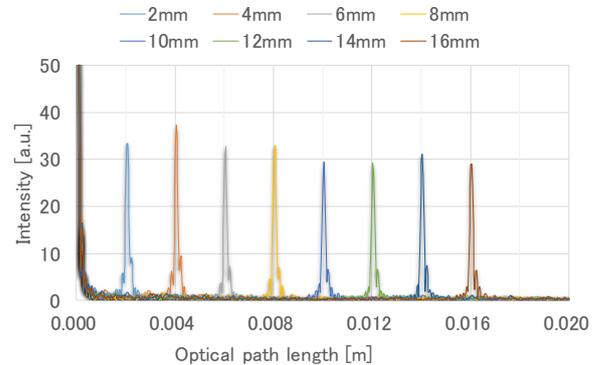


図4 干渉信号のFFT結果

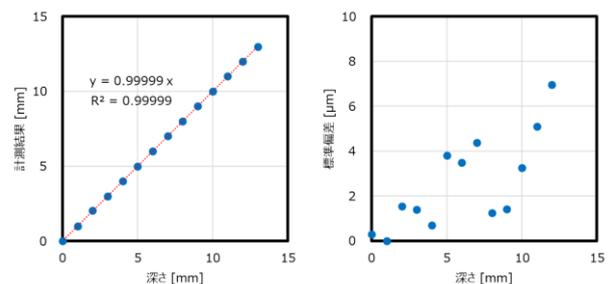


図5 距離測定の結果 (左) と標準偏差 (右)

2・3 リアルタイム計測とフィードバック制御

図1に示すマイクロライダシステムでは、オシロスコープに記録した計測データを後からPCに転送し、データ解析を行うので、リアルタイムでの距離計測と計測結果に基づくフィードバック制御はできない。そこで、AD変換とリアルタイム信号解析、フィードバック制御を行う制御システムを作製し、リアルタイム計測とフィードバック制御を行う。図6に制御システム全体の構成図と写真を示す。

制御システムは信号処理部とフィードバック制御部から構成されている。信号処理部では干渉光学系からのビート信号をA/D変換し、FFT処理により解析された距離情報をフィードバック制御部に転送する。A/D変換ボードは、バランス検出器で検出され増幅された電気信号を、10.25 GSPSのサンプリングレートで12ビットでAD変換し、FMC+規格のケーブルで接続されたFPGAボードに高速かつリアルタイムにデータ転送する。FPGAでは16パイプライン処理によりFFTを含む信号解析をリアルタイムで行う。パイプライン処理の概略図を図7に示す。現在は、FPGAのリソースの制限により、各パイプラインは2つのFFTを並列処理し、9.6 MHzの干渉信号から間引いて

4.6 MHz の干渉信号での連続処理している。各パイプラインで4つのFFTを並列処理すれば、9.6 MHzでのリアルタイム信号処理ができる。

フィードバック制御部では受信した距離情報に基づき、レーザー発振器への出力指令電圧(0~10 V)を制御する。信号処理部から出力されるデータは、FFT解析結果の最大振幅値とその距離情報で、これらはFMCケーブル経由でフィードバック制御部に逐次転送される。フィードバック制御部では受信した解析結果に基づき、レーザー出力のアナログ指令値を増減する。フィードバック制御部のFPGAには、ソフトコアプロセッサ(MicroBlaze)を搭載し、シリアル通信により制御PCから制御条件設定と制御結果のモニタリングが可能である。レーザー溶接中の溶融池計測では、解析結果の変動が大きく、そのままではフィードバック制御に適用することができないので、フィルタ処理を行う専用IPを製作し、外れ値を除外するフィルタ処理を行い、目標キーホール深さとの差分をフィードバックする方法で加工レーザー出力指令値を制御している。

3. 研究成果

3.1 キーホール形状計測

レーザー溶接中のキーホール形状計測の測定例を示す。図8は、レーザー溶接中のマイクロライダの走査方向を示す。黄色がキーホール、赤が溶融池を表している。溶接レーザーは左側へ走査されている。キーホールの中心付近で溶接方向と平行な方向(x方向)と垂直な方向(Y方向)に計測ビームを走査し、キーホールの形状を計測した。レーザー溶接条件と計測条件は表1と表2に、実験装置の外観を図9にそれぞれ示す。

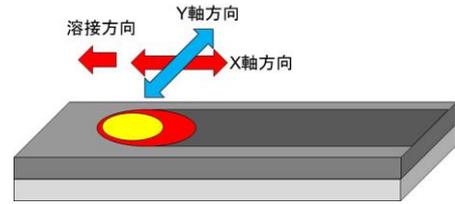


図8 マイクロライダ走査軸模式図

表1 レーザー溶接条件

溶接条件	パラメータ
出力	1.4 kW
溶接速度	3 m/min
DF	10 mm
スポット径	300 μm
ビーム径(表面)	560 μm
上板	SPCC(t=1 mm)
下板	A6061(t=1 mm)

表2 計測条件

計測条件	パラメータ
走査速度	18 m/s
走査距離	3.6 mm
計測時間	200 μs
計測位置	溶接中心
焦点位置	ワーク表面
スポット径	89 μm

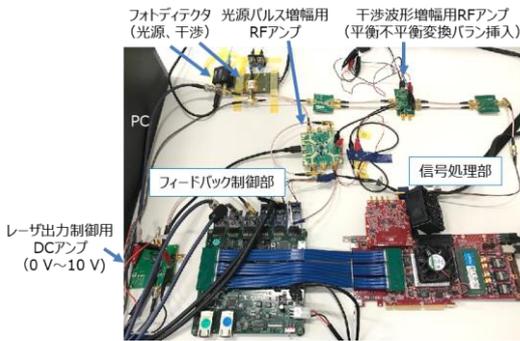
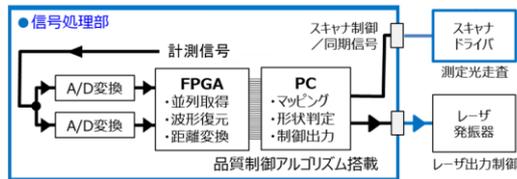


図6 制御システム全体の構成図(上)と写真(下)

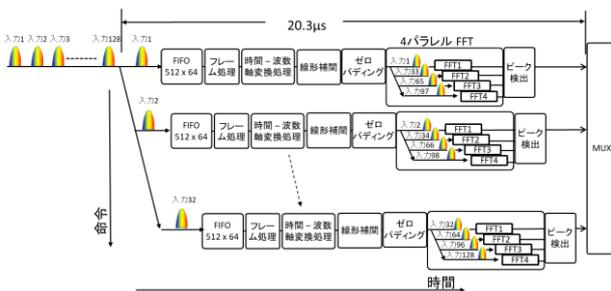


図7 FPGAでのパイプライン処理の概略図

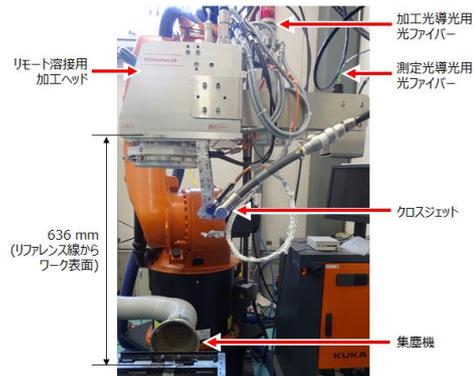


図9 キーホール形状計測実験装置外観

図10は、レーザー溶接中にマイクロライダーで計測したX方向とY方向のキーホールの断面形状を示す。計測データから、開口径が約0.8 mmでは深さ約1.5 mmのキーホールができています。図11に示す断面マクロの溶込み深さが約1.6 mmであり、キーホール通過後の湯流れで最終的な溶込み深さが決まると考えると、妥当な深さである。また、ハイスピードカメラを用いて撮影したレーザー溶接画像から得られる開口径とも一致している。X方向の断面形状において、キーホールの右側のデータがない部分は、溶融池であり、反射率が低いためデータが取得できていない。さらに右側は形状が平坦でないこともわかる。

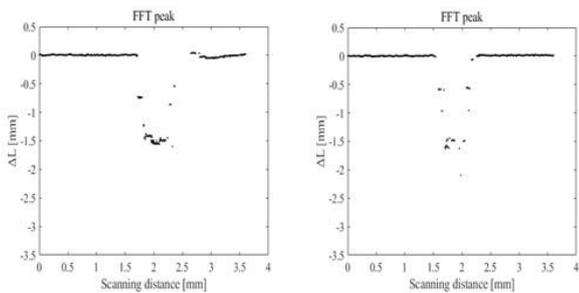


図10 X方向とY方向のキーホールの断面形状

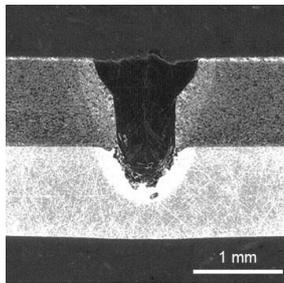


図11 断面マクロ写真

3・2 フィードバック制御

フィードバック制御応答を検証として、溶接中に溶接速度を変化させ、キーホールの深さが一定になるように、レーザー出力を制御する実験を行った。リモート溶接ヘッドへの速度指令値を溶接開始時は4 m/minとし、溶接開始後140 ms経過した時点で5 m/minに変化させた。リモート溶接ヘッドの速度が速度指令値に追従することは予め確認している。SPCC 1.0 tの同材重ね溶接を実施した。表3にフィードバック制御モジュールへの設定値を示す。

表3 フィードバック制御の設定値

目標キーホール深さ	1.25 mm
初期固定出力時間	20 ms
初期レーザ出力	2.8 kW
レーザ出力下限値	2.5 kW
レーザ出力上限値	4.2 kW

図12にキーホール深さ計測結果、図13にオシロスコープで測定したフィルタ処理後のキーホール深さとレーザー出力指令値、図14に縦断面マクロ写真、図15に溶込み深さのプロファイルを示す。オシロスコープで測定したキーホール深さは、制御システムから出力されたフィルタ処理後の深さであり、レーザー出力指令値は、制御システムからの出力である。レーザー出力指令値によって溶接レーザーの出力が変化する。図14中に白の矢印で溶接速度指令値の変更位置を示す。溶接速度変更後、一旦、溶込み深さが1 mmまで浅くなったが、目標キーホール深さの1.25 mmよりも浅くなったことから、レーザー出力がフィードバック制御され、1.35 mmまで深くなった後、1.15 mmとの間で振動して溶接を完了した。溶接区間全体では、目標値1.25 mmに対して、-0.25~+0.2 mmの範囲で制御することができている。

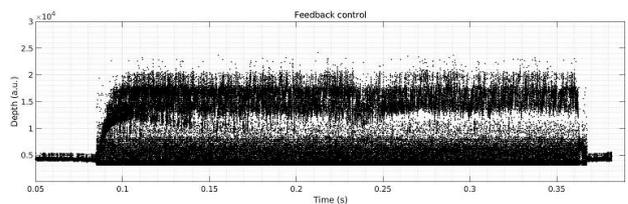


図12 キーホール深さ計測結果

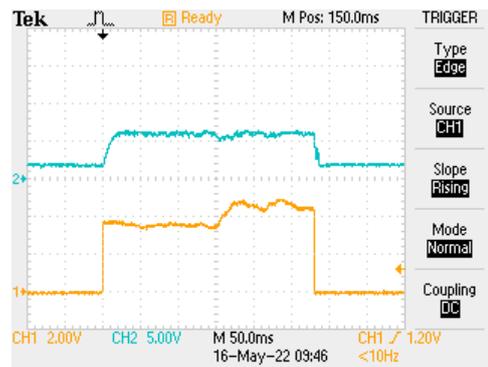


図13 オシロスコープで測定したフィルタ処理後のキーホール深さ（緑）とレーザー出力指令値（橙）



図14 縦断面マクロ写真

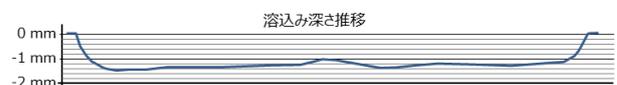


図15 溶込み深さのプロファイル

3・3 機械学習による解析の試み

前節では、高速 ADC と FPGA を用いたリアルタイムフィードバック制御が可能であることを示した。しかし、リアルタイムでの信号解析には、大規模な FPGA プログラムを必要とする。リアルタイムでのレーザー制御には、キーホールの深さだけでなく、キーホール形状の安定性などの情報も利用するとより良くなることが期待できる。しかし、多くのパラメータから制御の条件を設定することは難しい。そこで、機械学習の利用が考えられる。良条件でのレーザー溶接中のマイクロライダの計測結果、悪条件でのマイクロライダの計測結果条件を蓄積し、機械学習によりレーザー条件の良否を判定する。これができるフィードバック制御の処理を簡略化できる可能性がある。また、マイクロライダの信号から機械学習にて直接深さが推定できれば、信号処理の簡略化もできる。ここでは、機械学習による信号処理を行い、マイクロライダの測定信号の機械学習による解析の可能性を示す。

図 1 6 は、計算機で発生させたマイクロライダの疑似信号の例である。光路長差を 0.1 mm から 5 mm の範囲でビート信号を計算し、ガウス型のランダムノイズを加えて作成している。5000 個の学習データと 200 個のテストデータを作成し、学習とテストを実施した。

ネットワークとして 1 層のコンボリューション層と 3 層の全結合層からなる 10 層のコンボリューションニューラルネットワーク (CNN) を用いた。表 4 は CNN の各層のタイプを示す。入力層は $1000 \times 1 \times 1$ の 1 次元データである。出力層は回帰出力としており、距離を出力する。出力層をソフトマックスと分類出力にすれば、良否判定に変更することもできる。

図 1 7 に学習したネットワークを用いて、200 個のテストデータで距離推定を行った結果を示す。横軸が真値で、縦軸が予測値である。機械学習により距離推定ができることが確認できた。RMSE 誤差は $13.7 \mu\text{m}$ である。

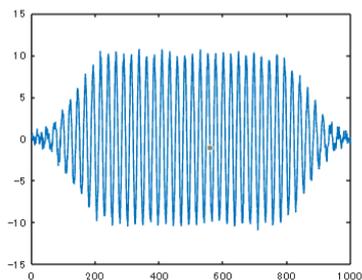


図 1 6 機械学習用のデータ

表 4 CNN の各層のタイプ

レイヤー	タイプ	特性
1	イメージ入力	$1000 \times 1 \times 1$
2	畳込み	$51 \times 100 \times 1$
3	バッチ正規化	
4	ReLU	ReLU
5	平均値プーリング	20×1 の平均値
6	全結合	10
7	ReLU	
8	全結合	10 全結合
9	全結合	1 全結合
10	回帰出力	

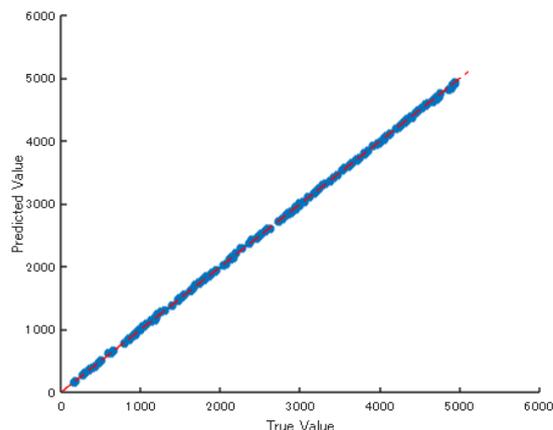


図 1 7 学習結果

4. 結び

10 MSampling/sec でマイクロメートル分解能の LiDAR 計測を行う“マイクロライダ”を用い、レーザー溶接中のキーホール形状の計測と、キーホールの深さのリアルタイム計測とそれを用いたフィードバック制御を行った。フィードバック制御では、キーホール深さが一定となるように溶接レーザーの強度をフィードバック制御し、溶接速度が変化しても溶け込み深さを一定に保てることを示した。

また、マイクロライダの信号解析やレーザー溶接の判断に機械学習を用いることを想定して、CNN によるマイクロライダの信号解析を行った。マイクロライダの信号を CNN で解析しても高精度な距離推定が可能であることを確認した。

謝 辞

本研究は公益財団法人天田財団からの重点研究開発助成 (AF-2020202-A3) により実施した研究に基づいていることを付記するとともに、同財団に感謝いたします。

また、マイクロライダーの開発とレーザー溶接の計測に協力していただいた、情報通信研究機構 (NICT) の古川英昭室長、牧野健氏、橋本崇弘氏、(株) ナ・デックスプロダクツ ナ・デックスレーザーR&Dセンターの長谷川博氏、出口貴大氏、野村涼氏に感謝も感謝いたします。

参考文献

- 1) N. D. Dupriez and A. Denkl: Advances of OCT Technology for Laser Beam Processing, *Laser Technik Journal*, 14 (2017), 34.
- 2) C. Stadter, M. Schmoeller, M. Zeitler, V. Tueretkan, U. Munzert, and M. F. Zaeh: Process control and quality assurance in remote laser beam welding by optical coherence tomography, *J. Laser Appl.* 31, (2019), 022408.
- 3) M. Sokolov, P. Franciosa, T. Sun, D. Ceglarek, V. Dimatteo, A. Ascari, A. Fortunato, and F. Nagel: Applying optical coherence tomography for weld depth monitoring in remote laser welding of automotive battery tab connectors, *J. Laser Appl.* 33, (2021), 012028.
- 4) D. R. Solli, J. Chou, and B. Jalali: Amplified wavelength-time transformation for real-time spectroscopy, *Nature Photonics*, 2, (2008), 45.
- 5) K. Goda, D. R. Solli, K. K. Tsia, and B. Jalali: Theory of amplified dispersive Fourier transformation, *Phys. Rev. A*, 80, (2009), 043821.
- 6) M. Hoshikawa, K. Ishii, T. Makino, T. Hashimoto, H. Furukawa, and N. Wada: Low-coherence interferometer with 10 MHz repetition rate and compensation of nonlinear chromatic dispersion, *Opt. Rev.*, 27, (2020), 246.
- 7) N. Hayashi, M. Hoshikawa, K. Ishii, T. Fujita, M. Kanamori, T. Deguchi, R. Nomura, H. Hasegawa: In-process measurement of a keyhole using a low-coherence interferometer with a high repetition rate, *Optics Express*, 29, (2021), 32169.