



Title	レーザ熱加工制御のための機上光学式変位計測に関する研究
Author(s)	多久島, 秀
Citation	大阪大学, 2021, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/82224
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

博士学位論文

レーザ熱加工制御のための機上光学式変位計測
に関する研究

多久島 秀

2021年1月

大阪大学大学院工学研究科
機械工学専攻

要旨

レーザ熱加工を行う産業用レーザ加工機において、自動化による生産性向上と加工精度の高精度化を両立させるためには、機上計測技術による加工制御が必要である。非接触での自動計測が可能な機上光学式計測では、加工前後に表面性状が不均一な金属粗面の高精度計測が求められる。また、現状の接触方式では実現不可能なレーザ熱加工中のインプロセス計測結果に基づいたレーザ熱加工制御による加工精度の向上が求められる。

本研究では、レーザ熱加工プロセスにおける機上光学式変位計測手法を確立することでレーザ熱加工制御を実現し、加工精度の高精度化を目指した。加工前には加工時の走査軸を補正するための段取りされたワークの設計位置からの3次元位置変位量を計測し、加工中にはレーザ熱加工制御のための加工用レーザの焦点位置に対する加工対象面の高さ変位量を計測する。加工後には追加工を行うための設計形状からの実加工形状の3次元位置変位量を計測する。特に3次元レーザ加工や造形加工のようなZ軸の走査を伴うレーザ熱加工において、加工中のインプロセス高さ変位計測結果に基づいてフィードフォワードで加工対象面が加工用レーザの焦点位置となるよう制御することが高精度化には不可欠である。そこで、加工前後、加工中それぞれの機上光学式変位計測手法の確立を目指した。

加工前後の変位計測では、欠けやバリのある金属ワークのエッジ位置変位計測結果をジグザグ走査により平均化する手法と、異方性がある不均一な表面性状による散乱反射角特性変化の影響を低減するための計測中にワーク上を円形走査し、多方向から三角測量を行う高さ変位計測手法を提案し、金属粗面の変位計測の高精度化を可能とした。提案手法により、接触方式と同等精度 $\pm 1 \mu\text{m}$ といった高精度な変位計測を実現した。

加工中の高さ変位計測では、高精度なレーザ熱加工制御を行うため、加工制御時と近い温度環境で高さ変位量を計測するため、加工光学系の対物レンズを計測系と共に用いることで加工光学系と同軸で加工位置近傍でのインプロセス計測を行う手法を提案した。また、加工方向が変化する際にも常に加工位置前方の加工経路上の高さ変位を計測可能な加工位置の周囲を取り囲むようにラインビームを照射する交差ラインビーム光切断方式により、インプロセス計測可能な加工方向を ± 90 度に拡大した。そして、Z軸の走査を伴うレーザ熱加工プロセスであるレーザワイヤ Direct Energy Deposition(DED)金属積層装置を用いて、提案したインプロセス高さ変位計測結果に基づいたレーザ熱加工制御手法の有効性を示し、計測時間を増加させずに加工方向が変化する複雑な加工形状において高精度な造形加工が可能であることを明らかにした。

以上より、レーザ熱加工を行う産業用レーザ加工機における加工前、加工中、加工後の機上光学式変位計測の基本原理を示し、その有効性を明らかにした。レーザ熱加工プロセス全体の自動化が可能となるため、産業用レーザ加工機の生産性向上が可能となり、インプロセス計測結果に基づいたレーザ熱加工制御によってレーザ熱加工の加工精度向上を実現した。

目次

第1章 緒論	1
1.1 研究の背景	1
1.2 機上計測技術の現状	6
1.3 本研究の目的と概要	13
1.4 本論文の構成	14
第2章 レーザ熱加工における機上光学式変位計測	16
2.1 緒言	16
2.2 機上光学式変位計測システム	16
2.3 光学式変位計測原理	24
2.3.1 位置変位計測の原理	24
2.3.2 高さ変位計測の原理	26
2.4 加工前後の機上計測手法	29
2.5 加工中のインプロセス機上計測手法	32
2.5.1 インプロセス機上変位計測の基本原理	32
2.5.2 加工方向変化に対応した高さ変位計測手法	33
2.6 結言	36
第3章 加工前後における金属粗面の高精度機上変位計測	37
3.1 緒言	37
3.2 加工前後の機上光学式変位計測システムの構成	37
3.2.1 投光光学系	38
3.2.2 エッジ位置変位計測光学系	39
3.2.3 高さ変位計測光学系	40
3.3 エッジ位置変位計測	41
3.3.1 反射光強度変化を用いたエッジ位置変位計測結果	41
3.3.2 側面エッジ位置計測	43
3.3.3 ジグザグ走査平均方式	44
3.4 多方向三角測量方式	45
3.4.1 多方向三角測量方式の計測原理	45
3.4.2 多方向三角測量方式を用いた高さ変位計測実験	47
3.5 走査露光方式	48
3.5.1 走査露光方式の計測原理	49

3.5.2 走査露光方式を用いた高さ変位計測実験 ······	53
3.6 機上高さ変位計測による金属ワークのたわみ計測評価 ······	55
3.6.1 金属粗面に対する高さ変位計測実験 ······	55
3.6.2 金属ワークたわみ計測のダイヤルゲージとの比較評価 ······	56
3.7 結言 ······	59
 第4章 加工位置近傍でのインプロセス高さ変位計測	60
4.1 緒言 ······	60
4.2 インプロセス高さ変位計測システムの構成 ······	60
4.3 加工位置近傍でのインプロセス計測結果 ······	62
4.3.1 加工位置に対する高さ変位計測位置 ······	62
4.3.2 インプロセス高さ変位計測結果 ······	63
4.4 リニアリティ評価 ······	66
4.5 インプロセス高さ変位計測精度評価 ······	67
4.6 結言 ······	70
 第5章 加工方向変化に対応したインプロセス高さ変位計測	71
5.1 緒言 ······	71
5.2 交差ラインビーム光切断方式の高さ変位計測原理 ······	71
5.2.1 交差ラインビームの構成 ······	71
5.2.2 交差ラインビームを用いた高さ変位計測原理 ······	72
5.3 交差ラインビーム光切断方式高さ変位計測システムの設計 ······	73
5.3.1 高さ変位計測システムの構成 ······	73
5.3.2 交差ラインビームによる高さ変位計測位置 ······	74
5.3.3 交差ラインビームによるインプロセス計測結果 ······	75
5.4 計測方向に対するリニアリティ評価結果 ······	76
5.5 計測方向に対する精度評価結果 ······	77
5.5.1 計測方向に対する精度評価実験系 ······	77
5.5.2 計測方向に対する高さ変位計測結果 ······	78
5.6 結言 ······	81
 第6章 インプロセス変位計測結果に基づくレーザ熱加工制御	82
6.1 緒言 ······	82
6.2 レーザワイヤDED金属積層装置 ······	82
6.2.1 金属積層装置の概要 ······	82
6.2.2 金属積層装置におけるプロセスモニタリング技術 ······	84

6.3 インプロセス高さ変位計測結果に基づいたレーザ熱加工制御方式	85
6.3.1 レーザ熱加工制御システムの構成	85
6.3.2 レーザ熱加工制御フローチャート	87
6.4 高さ変位計測結果に基づくワイヤ供給速度制御実験	88
6.4.1 C 軸回転円筒の連続積層造形実験系	88
6.4.2 連続積層造形結果	89
6.4.3 造形加工精度の計測結果	92
6.5 加工方向が変化する複雑形状でのレーザ熱加工制御実験	93
6.6 結言	97
第 7 章 結論	98
謝辞	101
参考文献	102
関連発表論文	112

図目次

1.1	Illustration of 3 steps required for the automation of machine tools.	1
1.2	Illustration of a laser processing machine.	2
1.3	Illustration of a laser thermal processing.	3
1.4	Measurement and inspection process in laser thermal processing.	5
1.5	Measurement principle of a touch probe sensor.	7
1.6	Measurement result of grinding surface of metal workpiece: (a) microscope image, (b) result of three-dimensional measuring instrument and (c) cross sectional height distribution of three-dimensional measuring instrument.	10
1.7	Measurement result of scattered reflected light characteristic on grinding surface of metal workpiece: (a) measurement method of scattered reflected angle distribution and (b) measurement result of light intensity distribution by scattered reflected angle.	10
1.8	Detected spot measurement result of triangulation height displacement sensor on grinding metal surface: (a) measurement points on metal workpiece, (b) detected spot image at different positions and (c) cross sectional intensity distribution of detected spot on an image sensor of triangulation sensor.	11
1.9	Experiment setup of in-process height measurement evaluation during laser thermal processing.	12
1.10	Cross sectional height displacement measurement result of height displacement sensor using light section method by the distance from laser thermal processing position.	12
1.11	Construction of this paper.	15
2.1	On-machine measurement using an optical displacement sensor in laser thermal processing.	16
2.2	Measurement process using an optical displacement sensor in laser thermal processing.	17
2.3	Measurement of setup accuracy using an optical displacement sensor in pre-process.	18
2.4	In-process monitoring technique in laser thermal processing.	19
2.5	Principle of laser thermal process control based on in-process measurement results.	20
2.6	Measurement of processing accuracy using an optical displacement sensor in post-process.	21

2.7	Relationship between command position and measurement position of on-machine measurement in pre- and post- process and in-process.	22
2.8	Relationship between processing position and measurement area when laser thermal processing direction changes: (a) the case of point measurement and (b) the case of line measurement.	23
2.9	Principle of edge position displacement measurement using confocal method: (a) optical system of edge position displacement measurement and (b) reflected light intensity distribution when crossing edge position.	25
2.10	Reflected light intensity distribution at edge position by projection spot size: (a) the case of large projection spot size and (b) the case of small projection spot size.	25
2.11	Configuration of height displacement sensor using triangulation method.	26
2.12	Measurement principle of height displacement sensor using triangulation method.	28
2.13	Parameters for measurement accuracy in height displacement sensor using triangulation method: (a) relationship between base line length and tilt of optical axis and (b) relationship between working distance and tilt of optical axis.	29
2.14	Principle of zigzag scanning averaging method for edge position displacement measurement.	30
2.15	Configuration of height displacement sensor using multi-directional triangulation method.	31
2.16	Principle of scanning exposure method.	31
2.17	Configuration of an on-machine optical displacement measurement system at near a processing spot for in-process measurement.	33
2.18	Measurement direction restriction of light section method using straight line beam.	34
2.19	Measurement principle when changing processing direction.	35
2.20	Configuration of line section method using crossed line beams.	35
3.1	Configuration of on-machine optical displacement sensor for pre- and post-process: (a) 3D construction of multi-directional triangulation height displacement measurement and edge position displacement measurement, (b) enlarged view of lens array and (c) a cross section of lens array.	38
3.2	Simulation and measurement result of projection spot.	39
3.3	Depth of focus measurement result of projection spot.	39
3.4	Four spots on an image sensor of multi-directional triangulation height displacement method: (a) illustration of four spots on an image sensor and (b) a cross section of a detected spot.	40

3.5	Microscope images and reflected light intensity distribution at edge position with chipping: (a) measurement position 1 and (b) measurement position 2.	42
3.6	Comparison between edge position measurement results and microscope images of a metal work.	42
3.7	Microscope image of edge position at different focus position.	43
3.8	Measurement result of reflected light intensity distribution by laser power.	43
3.9	Edge position displacement measurement result by averaging parameters. Experiment parameters are shown in Table 3-1.	45
3.10	Illustration of the spot images on an image sensor: (a) when the workpiece approaches the sensor, (b) when the workpiece is at a focused position of the sensor and (c) when the workpiece moves away from the sensor.	46
3.11	Spot images on the image sensor and the spot's shift when the distance between the sensor and the workpiece changes; (a) spot images of "Spot A" and "Spot C" shown in Fig. 3-10; (b) spot images of "Spot B" and "Spot D" shown in Fig. 3-10; and (c) comparison between design and measurement results of average distance L_{ave} , and measurement results of P_{ave}	48
3.12	Height displacement result by the measurement position when using four spots and only one spot.	48
3.13	Height displacement results of scanning exposure method by scanning direction: (a) scanning across grinding machining texture vertically and (b) scanning along to grinding machining texture parallel.	50
3.14	Illustration of scanning exposure method.	51
3.15	Height displacement measurement result using circle scanning exposure method. Experiment parameters are shown in Table 3-4.	52
3.16	Spot images of four spot with and without scanning at P1 and P2: (a) scanning result and (b) stopped result.	52
3.17	Cross-sectional distributions of the spot C images shown in Fig.3-16.	53
3.18	Experimental result of displacement at the same position with scanning and without scanning: (a) result of changing the distance between the sensor and the workpiece and (b) linearity result, which is the difference from the true value.	53
3.19	Displacement result by number of times at the same position.	54
3.20	Displacement result by measurement position on the workpiece with and without the scanning exposure method.	54
3.21	Microscope images of different surface texture's workpiece: (a) grinding surface which is anisotropic stripe texture and (b) electric discharged surface which is isotropic granular texture.	55

3.22 Height displacement measurement result of different surface texture's workpiece: (a) grinding surface which is anisotropic stripe texture and (b) electric discharged surface which is isotropic granular texture.	56
3.23 Experiment setup for deflection measurement of a metal workpiece compared with a dial gauge: (a) optical height displacement sensor setup and (b) dial gauge setup. . . .	57
3.24 Deflection measurement results of optical height displacement sensor and dial gauge: (a) height measurement result and (b) height displacement results estimated from difference from Z = 0 mm.	57
3.25 Linearity results of optical height displacement sensor and dial gauge: (a) linearity result and (b) difference from the command value of Z-stage.	58
3.26 Result of deflection measurement using a plate-shaped workpiece.	58
4.1 Configuration of height measurement system using line section method for laser thermal process control: (a) illustration of height displacement measurement system and (b) enlarged view of laser thermal processing position.	62
4.2 Luminance result by distance from laser processing position. Line laser luminance also shows.	63
4.3 Experiment setup for in-process height displacement measurement.	64
4.4 Detail of workpiece used for the evaluations. Work piece has flat surface and a weld bead: (a) camera images, (b) microscope images and (c) roughness measurement results by NewView 8000 (Zygo Co., Ltd.).	64
4.5 Line beam's images captured by height displacement measurement system: (a) during laser thermal processing and (b) without laser thermal processing.	65
4.6 Line beam projection position during laser thermal processing and without laser thermal processing. Line beam projection positions were estimated by line beam's centroid. . . .	65
4.7 Image of line beam on a weld bead. Height displacement are 0, ±1, ±2, and ±3 mm. . . .	66
4.8 Height displacement measurement results on a weld bead. Z = 0 mm denotes focus position of a processing head: (a) height displacement measurement result by Y position and (b) Z-pitch measurement result by Z-stage displacement, where each Y position's result is calculated by ±50 µm range.	67
4.9 Comparison of height measurement results during and without laser thermal processing and true value: (a) the result of the low height bead and (b) the result of high height bead.	69
4.10 Height displacement measurement error of low height bead and high height bead. Error was estimated from difference between measurement result and true value.	69

5.1	Configuration of crossed line beams: (a) perspective illustration of crossed line beams and (b) illustration of crossed line beams on a weld bead in the X-Y plane.	72
5.2	Height displacement measurement principle by crossed line beams: (a) illustration of cross line beams in X-Z plane, (b) illustration of line beam and a workpiece and (c) image of crossed line beams.	73
5.3	Configuration of height displacement measurement system using crossed line beams for process control of laser thermal processing.	74
5.4	Image of crossed line beams on a flat plane.	75
5.5	Images of crossed line beams on a weld bead during laser thermal processing at 0-degree and ± 45 -degrees direction.	75
5.6	Centroid position of crossed line beams on flat workpiece at $Z = 0$ mm and $+1$ mm.	76
5.7	Displacement by measurement direction on a flat workpiece when processing head moved from $Z = 0$ mm to $Z = +1$ mm.	76
5.8	Experiment setup of accuracy evaluation by measurement direction.	77
5.9	Image of crossed line beams on a weld bead. Measurement directions are $0, \pm 30, \pm 60$ and ± 90 degrees.	78
5.10	Height measurement results of weld bead by measurement directions: (a) measurement directions are $0, -45, -90$ degrees and (b) measurement directions are $0, +45, +90$ degrees.	79
5.11	Height measurement error of a weld bead by measurement directions. The error was estimated from difference between the measurement result and the true value: (a) measurement directions are $0, -45, -90$ degrees and (b) measurement directions are $0, +45, +90$ degrees.	79
5.12	Maximum measurement error of a weld bead by measurement direction. This result was averaging value in flat region ($X = 10\text{-}45$ mm) on a weld bead.	80
5.13	Maximum measurement error of weld bead by small measurement directions estimated by line beams near the cross point. This shows the expansion of Fig. 5-12 from 0 degree to 10 degrees.	80
6.1	Prototype of a laser wire-DED machine and fabricated objects: (a) prototype of a laser wire-DED machine fabricated by Mitsubishi Electric Co. Inc. and (b) examples of fabricated objects.	83
6.2	Configuration of wire-feeding speed control system using in-process height displacement measurement system.	86
6.3	Bead height and bead width results by wire-feeding speed: (a) bead height result by wire-feeding speed and (b) bead width result by wire-feeding speed.	87

6.4	Flowchart of wire-feeding speed controlling using in-process height displacement measurement system.	88
6.5	Experiment setup of continuous deposition using laser thermal process control.	89
6.6	Measured displacement and controlled wire-feeding speed results by deposition height: (a) Z-pitch is 0.2 mm, (b) Z-pitch is 0.25 mm and (c) Z-pitch is 0.3 mm.	91
6.7	Height measurement results of cylinder deposition object with a height gauge.	92
6.8	Width measurement results of cylinder deposition object with a vernier caliper.	92
6.9	Experiment setup of “L” shape continuous deposition using laser thermal process control.	93
6.10	Continuous deposition results of “L” shape: (a) without laser thermal process control and (b) using laser thermal process control.	94
6.11	In-process images of crossed line beams: (a) in X-direction deposition and (b) in Y-direction deposition.	94
6.12	Displacement results by deposition distance without laser thermal process control.	96
6.13	Displacement results and wire-feeding speed by deposition distance with laser thermal process control: (a) Displacement measurement results and (b) controlled wire-feeding speed results.	96
6.14	Side images of deposition objects with and without laser thermal process control: (a) without laser thermal process control and (b) using laser thermal process control.	96
7.1	On-machine optical displacement measurement system in pre- or post-process: (a) edge position displacement measurement and (b) height displacement measurement.	100
7.2	On-machine optical height displacement measurement system during laser thermal processing for laser thermal process control.	100

表目次

1.1	Comparison of displacement sensors used for manufacturing.	7
1.2	Comparison of optical displacement sensor by measurement principle.	8
1.3	Specification of commercial height displacement sensor using light section method for in-process height measurement evaluation during laser thermal processing.	12
2.1	Specification of on-machine measurement in pre- and post- process and in-process.	22
3.1	Experiment parameters for edge position displacement measurement.	44
3.2	Peak to peak value of height displacement result by used detected spot's number. Peak to peak value is estimated within 100-mm measurement position (10-mm pitch).	47
3.3	Spot images of Spot D shown in Fig. 3-1 without scanning and with scanning in the Y and X directions.	50
3.4	Experiment parameters for height displacement measurement by scanning length during exposure time.	51
4.1	Specification of a line laser.	61
4.2	Experiment parameters for in-process height displacement evaluation.	68
5.1	Experiment parameters for accuracy evaluation by measurement direction.	77
6.1	Deposition results by relationship between weld bead height and processing laser focus position as the target height.	85
6.2	Cylinder deposition comparison result between our wire-feeding speed control system and conventional system without any process control. Displacement measurement results and feed wire in gap measurement results are at 180-degree position from deposition start position.	90

主要記号

θ	投光系と受光系の光軸傾き
ΔZ	高さ変位
ΔX	照明光の投影位置ずれ
M	撮像系の光学倍率
$\Delta X'$	受光素子上の投影光の位置ずれ
W	受光素子の画素の大きさ
ΔH	受光素子の 1 画素当たりの高さ変位量
L	基線長
H	計測距離
L_x	ジグザグ走査平均法における X 方向の計測距離
L_y	ジグザグ走査平均法における Y 方向の計測距離
D_y	ジグザグ走査平均法における Y 方向の平均化領域
n	ザグ走査平均法におけるエッジを横切る回数
L_s	露光時間中のワーク上での移動距離
t	イメージセンサの露光時間
v	ステージの移動速度
L_b	ラインビームの長さ
D	加工位置から計測位置までの距離
ϕ_c	インプロセス高さ変位計測が可能な加工方向
ΔL	結像レンズの中心軸からのシフト量
S	高さ変位計測感度
X_i	4 つのスポット像の X 方向の輝度重心位置
Y_i	4 つのスポット像の Y 方向の輝度重心位置
X_L	スポット A と C の X 方向輝度重心間の距離
Y_L	スポット B と D の Y 方向輝度重心間の距離
L_{ave}	輝度重心間距離 X_L と Y_L の平均値
P_{ave}	輝度重心間距離 X_L と Y_L の平均値
L_c	走査する円の直径
C	走査する円の円周長さ
ΔY_ϕ	計測方向に対応した Y 方向位置
ϕ	加工方向

第1章 緒論

1.1 研究の背景

2011年にドイツが「インダストリー4.0」を提唱し、製造業における自動化、データ化の要求が世界中で高まっている[1]。我が国でも2016年に発表された第5期科学技術基本計画の中で「Society 5.0」が提唱され、我が国の強みである工作機械を用いた生産技術のさらなる高度化を行い、多様化するユーザニーズに柔軟に対応するものづくり技術の実現が求められている[2]。このように、近年、ものづくりを取り巻く環境は大きく変化し始め、Internet of Things(IoT)やビッグデータ解析、人工知能(AI)に加え、3Dプリンタなどの新たな生産技術といった革新的な技術開発が官民協力の下で打ち出され始めた[3]。日本はこれまで高精度化、高速化が要求される世界の工作機械市場をけん引してきた[4]。しかし、近年では、ヨーロッパやアジア諸国も大きな成長を見せており、他の追従を許さない独自技術の開発が急務となっている[4]。そこで、生産技術とInformation and Communication Technology (ICT)との融合による工作機械の知能化を推進するため、2017年に経済産業省が発表した「ものづくりスマート化ロードマップ調査」では、IoTやロボットを活用するものづくりのスマート化、つまり自動化・省力化の方向性・ステップが示された[5]。工作機械の自動化に必要な3ステップの概略図を図1-1に示す。まず、ステップ1において、工作機械上に取り付けた計測機を用いてデータの収集・蓄積を行う。次に、ステップ2では収集したデータを分析・学習し、モデル化や将来予測を行う。最後に、ステップ3にて、分析したデータを基に最適な加工制御を実行する。このように、今後、工作機械の自動化・省力化と高精度化の両立を進める上で、工作機械上に取り付けた計測機の結果に基づいて加工条件を制御する加工制御技術が不可欠である。これらのステップのうち、ステップ1で示された工作機械上での計測技術が中核を担っており、加工制御を行う上でステップ1の機上計測技術が実現されなければ、ステップ2やステップ3を実現できないことを意味している。

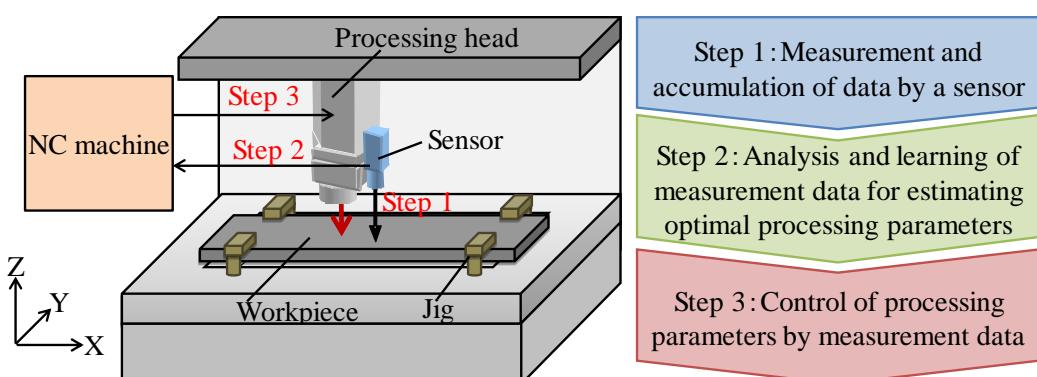


Fig. 1-1. Illustration of 3 steps required for the automation of machine tools [5].

ものづくりを支える工作機械として、機械加工[6-8]、レーザ加工[9-14]や放電加工[15-20]など様々な加工技術が開発されてきたが、近年、複雑な形状を安価に形成できる Additive Manufacturing(AM)加工[21-24]の研究開発も急速に発展してきている。これらの加工技術の中でも、非接触で様々な加工が可能なレーザ加工技術は、加工パラメータのデジタル制御が容易であるため、生産現場の自動化・省力化において欠かすことのできない技術であり、最重要ツールの一つとして期待されている[25]。レーザ加工機の概略図を図 1-2 に示す。レーザ加工は、加工用レーザを対物レンズで集光し、光と加工対象物との相互作用によって加工を行う。その応用は多岐にわたっており、現在、産業用として広く普及している高温プロセスに分類される除去加工や接合加工だけでなく、表面改質、局部加熱などの中温プロセス、化学反応やアブレーションなどの低温プロセスがある。これらのレーザ加工プロセスの中でも生産現場で広く用いられる除去加工や接合加工は、光エネルギーを熱エネルギーに変換して加工を行うため、レーザ熱加工とも呼ばれる。レーザ熱加工プロセスの概略図を図 1-3 に示す。レーザ熱加工では、切断[11, 26-28]、穴あけ[29-32]を行う除去加工や溶接[33-36]を行う接合加工があり、生産現場で広く用いられている。さらに、近年では複雑形状に切断や穴あけを行う 3 次元レーザ加工や複雑形状を短時間で安価に製造可能な造形加工[37-39]が注目されている。特に造形加工において、ビードを複数層積層する Directed Energy Deposition (DED) 方式は、レーザ熱加工に含まれ、既存の金属部品に付加造形が可能である。

レーザ熱加工における加工精度とは、設計された加工経路上に設計通りの加工量で加工できるかどうかであり、加工量とは除去量や接合量を意味する。XY 平面内で走査しながら加工を行う従来の切断、穴あけ、溶接加工では、加工対象物の段取りを高精度に行い、これまで製造現場にて蓄積された最適な加工条件を用いることで高精度な加工を実現している。一方、3 次元レーザ加工や造形加工では XY 平面内での加工だけでなく Z 軸にも走査を行うため、加工対象面の高さが加工用レーザの焦点位置から変化する。レーザ光を集光して光エネルギーを熱エネルギーに変換するレーザ熱加工では、加工用レーザのスポット径によつ

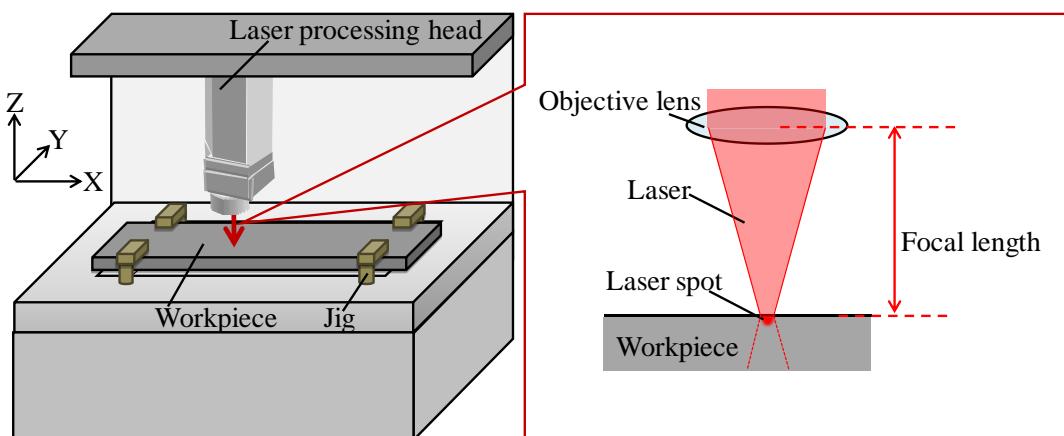


Fig. 1-2. Illustration of a laser processing machine.

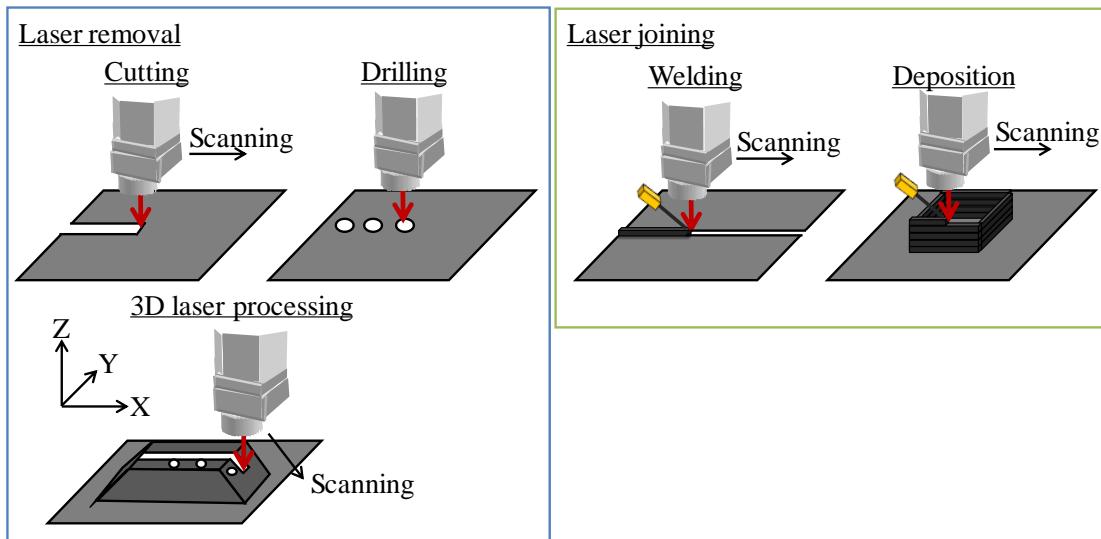


Fig. 1-3. Illustration of a laser thermal processing.

て投入されるエネルギー密度が決まるため、加工対象面の高さが常に加工用レーザの焦点位置となり、常に設計通りのスポット径で加工することが高精度なレーザ熱加工には不可欠である。そこで、3次元レーザ加工機では、事前に加工する経路に沿って加工用レーザの焦点位置と加工対象面が一致するよう加工対象の形状変化を記憶させておく手動でのティーチング工程が必要であり、造形加工では、加工形状や加工条件ごとに1層積層後に上昇させるZ軸の送り量(Zピッチ)を事前に高精度に条件出ししておく必要がある。このように、レーザ熱加工を行う産業用レーザ加工機に対する要求精度が高まっている中で製品の信頼性を維持し、生産性を高めるためには手動でのティーチング工程や事前の条件出しといった加工技術だけではなく計測・検査技術が不可欠となってきた。

そこで、高精度なレーザ熱加工を行うための計測・検査工程について述べる。まず、レーザ熱加工を行う前には、加工機上の所定の位置に段取りされたワークの位置と姿勢を正確に加工機の走査軸に合わせることが高精度な加工には不可欠である。そのため、ワークの基準位置と機械座標系の原点との変位量、および機械の走査軸に対するワークの姿勢を計測する必要がある。段取りされたワークがXY平面内で回転していると設計通りの加工経路上に加工ができず、Z方向に対してワークの姿勢が傾いていると加工対象面が加工用レーザの焦点位置から変位するため加工量が変化する。レーザ熱加工ではワークのサイズが100～1000 mm程度と大型な場合もあるため、回転量や姿勢の傾きが微小でもワーク両端の設置位置の差異は大きくなる。ステージにより μm 単位での高精度な位置決めが可能なレーザ熱加工において設計通りの加工を行うためには、加工前に段取りされたワークの設計位置からの変位量を1 μm 程度と高精度に計測することが求められる。また、レーザ熱加工中には設計通りの加工量となるよう加工用レーザの焦点位置(設計位置)とワークの加工対象面との変位量を計測する必要がある。計測した変位量に基づいて加工用レーザの焦点位置と加

工対象面が一致するよう加工ヘッドとワーク間の距離を制御することで設計通りの加工量が得られ、高精度な加工を実現できる。これにより、3次元レーザ加工や造形加工のようにZ軸の走査を伴う場合でも高精度な加工を実現できる。レーザ熱加工を行う加工用レーザの焦点距離が数100 mmであり、焦点深度が数100 μm程度であるため、加工中計測には100 μm程度の変位計測精度が必要である。最後に、レーザ熱加工後には、加工経路と加工量が設計通りであるかを検証するため、加工後のワークの設計形状に対する加工形状の差異を計測する必要がある。一般にサブmm～10 μm程度の精度で加工が可能なレーザ熱加工においては、設計形状とワークの実加工形状の変位量を1 μm程度と高精度に計測することが求められる。このように、レーザ熱加工において、加工前、加工中、加工後に設計位置に対するワークの3次元位置の変位量を計測することが非常に重要である。

しかし、これまでのレーザ熱加工プロセスにおける計測・検査工程は作業者の熟練技術による手動工程が多く、自動化・省力化の妨げとなっており、計測精度が作業者の熟練度に依存する。これまでのレーザ熱加工プロセスにおける3次元位置の変位量を計測・検査する工程を図1-4に示す。まず、加工前にはダイヤルゲージ[40]を用いて加工機上に段取りされたワークの位置・姿勢の調整精度、つまり段取り精度を手動計測する[41]。加工ヘッドを動かしながら加工ヘッドに取り付けたダイヤルゲージを用いて、ワークの位置や姿勢の機械座標系からの変位量を計測し、計測結果が必要な段取り精度を満たすようにワークを再段取りする。このように、ダイヤルゲージが工作機械上では広く使用されているが、先端プローブの接触状態によって計測精度がばらつくため、熟練した技術が必要であり、計測作業には長時間を要する。

次に、ワークの段取りを高精度に行うことができても高精度なレーザ熱加工が可能となる訳ではない。ダイヤルゲージではレーザ熱加工中に加工用レーザの焦点位置に対する加工対象面の変位量を計測できない。そのため、高精度に加工を行うためには、事前にテスト加工を行い、あらかじめレーザ出力や走査速度など様々な加工条件の最適値を加工形状や加工材料ごとに準備する必要があり、非常に手間を要する。また、要求される加工精度が高くなるにつれて、事前に最適な加工パラメータを準備しても加工中の温度変化やワークの変形といった加工環境変化や機械のランダム要因による誤差が支配的になると十分な加工精度が得られないこともあります。加工中に作業者が加工条件を手動で変更する必要もある。

最後に、レーザ熱加工後には、次の生産工程に移る前に加工されたワーク形状が設計通りかどうか加工精度を検査する必要がある。そこで、加工機からワークを取り外して、3次元測定機など別の検査装置を用いて設計形状と実加工形状の変位量を計測し、加工精度を評価する。必要な加工精度を満足していない場合は追加工による補正を行うが、一度加工機からワークを取り外しているため、加工前の段取り工程から再度やり直す必要があり、十分な精度で再段取りできない場合には加工したワークが破棄されている。また、大型ワークを加工する場合、加工機から計測機に移動させる際にワークを落下させる安全上のリスクもあり、ワークを接触させた際に損傷させる恐れがある。

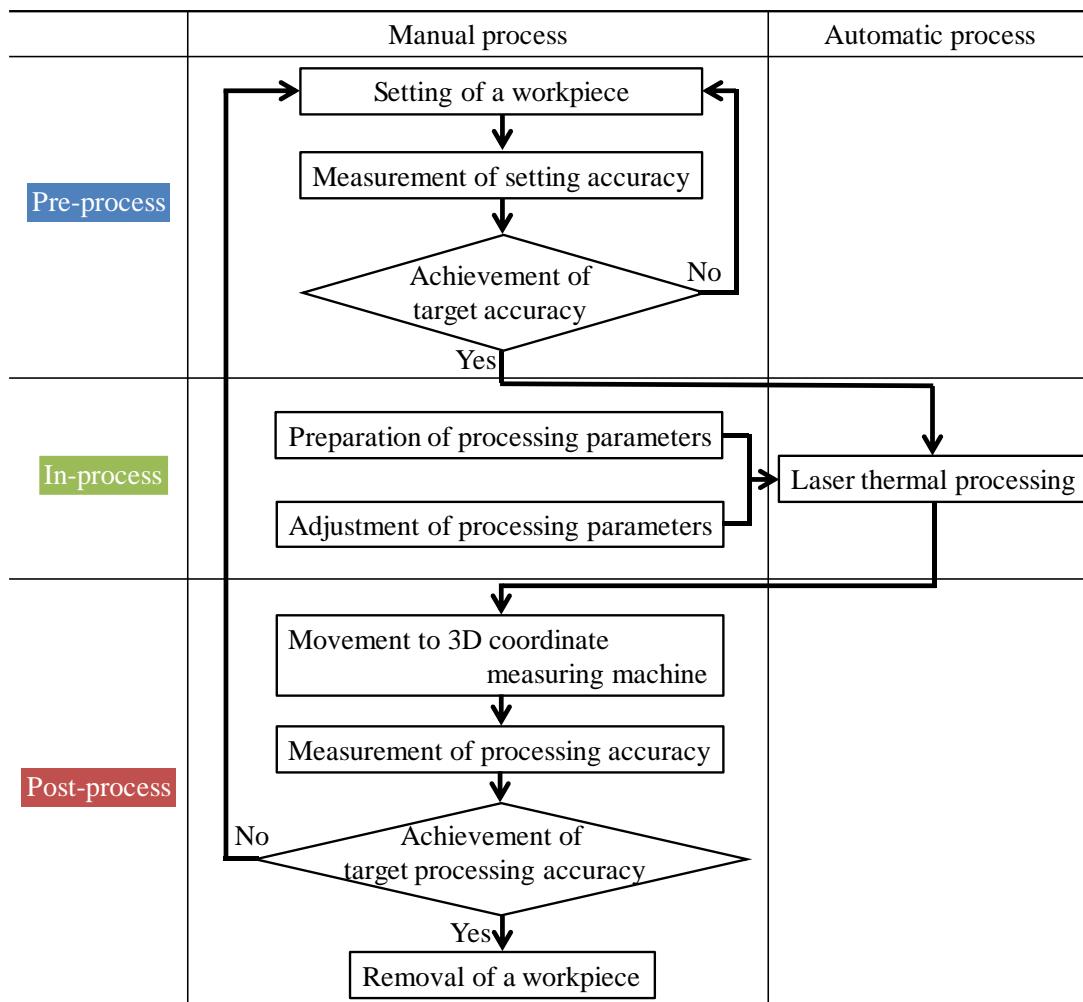


Fig. 1-4. Measurement and inspection process in laser thermal processing.

このように、これまで高精度・高品位なレーザ熱加工を行うためには、加工前、加工中、加工後に作業者の熟練技術による手動工程が必要であり、自動化による省力化、タクト短縮による生産性向上が妨げられている。そこで、現在、要求されているレーザ熱加工プロセスの自動化・省力化を進め、高精度な加工を実現する上で加工機上に計測機を取り付けた機上計測技術への期待が高まっている[42-45]。加工機上に計測機を取り付ける機上計測技術を用いることで、加工機のステージを用いた自動計測が可能となる。機上計測技術としては、加工機上に取り付け可能な計測機の小型化技術や様々な表面性状を有する金属ワークを高精度に計測する技術が重要である。また、加工前、加工中、加工後といったレーザ熱加工の各プロセスにおける最適な計測手法が必要であり、加工プロセス全体の時間を短縮し、稼働率を向上できる高速計測可能な技術が望まれる。

1.2 機上計測技術の現状

高精度・高品位なレーザ熱加工を実現するためには、加工前、加工中、加工後のそれぞれの工程において、ワークの設計位置に対する3次元位置の変位量を計測することが求められる[45]。加工機上に計測機を取り付け、加工機のステージを用いて走査することでワークの3次元形状を計測する機上計測では、計測機を機械座標系上で使用できるため、プログラム上に設定されたワークの設計位置に対する変位量を計測できる。また、機上計測機の入出力は加工機のNumerical control(NC)に接続されることで、計測結果のデジタル化が可能であり、デジタル化された機上計測結果は今後の産業用レーザ加工機のスマート化に不可欠である[46]。

そこで、生産現場で使用される変位計測手法を計測原理ごとに分類した結果を表1-1に示す。レーザ熱加工を行う産業用レーザ加工機の加工対象は金属であることが多いため、これまで金属表面の形状や材質に依存せずに安定した高精度計測が可能な接触式タッチプローブセンサが機上計測機として研究されてきた[44, 47-49]。タッチプローブセンサの計測原理を図1-5に示す。タッチプローブセンサは、加工対象物にプローブ先端を押し当てて接触した際に生じるトリガ信号を取得し、接触した後に後戻りして測定点を移動するという動作を繰り返すことで、3次元方向の変位量を計測する。ここで、本論文では、XY方向の設計位置からの変位量を位置変位とし、Z方向の設計位置からの変位量を高さ変位と呼ぶ。これまでタッチプローブセンサを図1-4に示したレーザ熱加工プロセスにおける計測工程に適用することで自動化が進められてきた。まず、加工前にはプログラム上の設計位置に対するワークの段取り精度を自動計測し、計測した段取り精度のデジタルデータに基づいて加工機NCが加工時の加工軸を補正することで、ワークの物理的な位置や姿勢を高精度に加工機の走査軸に合わせる手動での段取り調整を無くすことができる。しかし、計測位置に接触させて変位量を計測するタッチプローブセンサをレーザ熱加工中に使用することは難しく、レーザ熱加工中の計測結果に基づいた加工制御を行うことができない。そのため、加工プロセスの途中にタッチプローブセンサを使用するためには、加工を一時停止し、これまでの加工形状を計測し、その結果をフィードバックする必要がある[50]。最後に、加工後には、加工精度を自動計測し、加工機上で加工精度を評価することで加工精度が不十分である場合、段取りされたワークの位置や姿勢が変わっていないため、追加工を行うことができる。上記の通り、タッチプローブセンサを用いた機上計測により、加工前と加工後の計測工程を自動化できるが、加工用レーザが照射されるレーザ熱加工中に使用することはできない。また、プローブ先端を接触させる際には低速動作が必要であり、計測位置を移動させる度にワーク上方への退避が必要であるため長い計測時間を要し、加工前と加工後の計測工程のタクト短縮による生産性向上が課題である。ここで、先端プローブを加工対象物に押し当てた状態で走査することで変位量を連続的に計測するスキャニングプローブ法の適用も試みられているが、プローブの姿勢制御が複雑なため、汎用的に使用することは難しい。

Table 1-1. Comparison of displacement sensors used for manufacturing.

	Contact	Non-contact		
		Optical	Overcurrent/Capacitance	Ultrasonic
Working distance	Short	long	Short	Long
Accuracy	High	High	High	Low
Spatial resolution	High	High	Low	Low
Measurement speed	Slow	fast	fast	Slow
Metal surface	Possible	Low accuracy	Possible	Possible

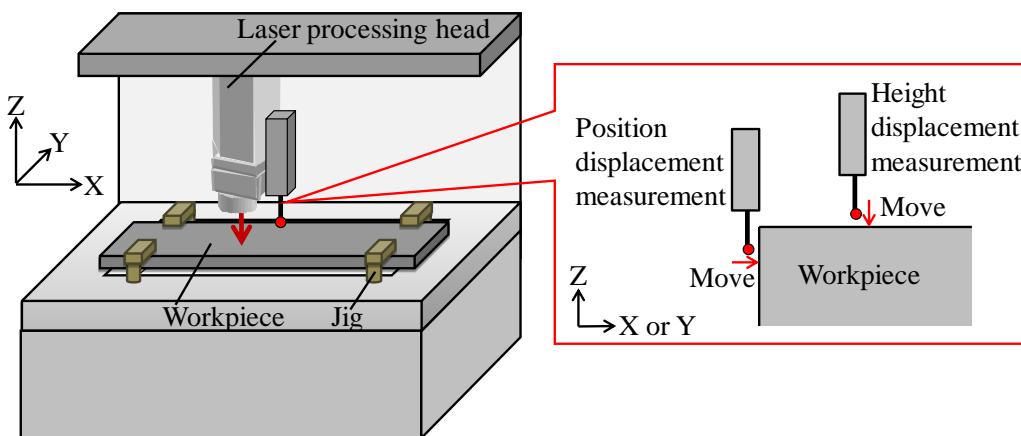


Fig. 1-5. Measurement principle of a touch probe sensor.

このように、レーザ熱加工プロセスにおける機上計測には、生産性を向上するため、タッチプローブセンサよりも高速計測可能であり、レーザ熱加工中のインプロセス計測が可能な非接触方式が必要である。そこで、表 1-1 の中で非接触での高速計測が可能な光学方式は、高精度計測が可能であるため、生産技術分野の中でも共通基盤技術の一つとして、製造現場の生産ラインで数多く使用されてきた[51-56]。同様に、静電容量方式の変位センサ[57-60]は、切断加工を行うレーザ加工機での加工中計測に使用されているが、加工ヘッド先端にセンサを取り付け、ワークとの距離を近づける必要があるため、溶接や造形など加工対象物が平坦ではない場合には、加工ヘッド先端が大型化するため適用できない。また、一定領域の変位を平均的に計測する静電容量方式は、空間分解能が低く、複雑な形状のワークを計測できない。一方、遠方から高空間分解能で非接触計測が可能な光学式変位計測[61]を用いれば、加工ヘッド先端にセンサを取り付ける必要が無く、溶接や造形、3 次元レーザ加工などを含むレーザ熱加工中のインプロセス計測が可能となり、レーザ熱加工中の計測結果に基づいた加工制御を実現できる。また、タッチプローブセンサに対して計測時間を高速化できるため、自動化された加工前後の計測工程のタクト短縮が可能となり、生産性を向上することもできる。

そこで、産業用レーザ加工機上でワークの3次元位置の変位量を計測するため、生産現場で使用されてきた光学式変位計測方式について比較した結果を表1-2に示す。ここで、比較のため、接触式タッチプローブセンサについても記載した。非接触の光学式変位計測は、高精度計測が可能であるため、生産技術分野の中でも共通基盤技術の一つとして、生産ラインで数多く使用してきた[62]。生産現場で使用される光学式変位計測として、三角測量方式[53,55,63-65]、共焦点方式[66-70]、干渉計方式[71-75]、TOF(Time-of flight)方式[76-78]がある。

Table 1-2. Comparison of optical displacement sensor by measurement principle.

Measurement method	Non-contact					Contact
	Triangulation			Confocal	Interference	TOF
	Spot type	Line section method	Pattern projection method			
Measurement area	Point	Line	Plane	Point	Point	Point
Measurement accuracy	○ (1 μm<)	○ (1 μm<)	✗ (100 μm<)	○ (1 μm<)	○ (1 μm<)	✗ (1 mm<)
Working distance	○	○	○	△	○	○
Cost	○	○	✗	○	✗	○
Size	○	○	✗	○	✗	○
Measurement time	○	○	✗	○	○	○
Metal surface texture	✗	✗	✗	△	○	○
Ambient light	✗	✗	✗	✗	✗	○

表1-2に示す光学式変位計測方式を用いて加工前後にXY方向の位置変位を計測するためにはワークの側面方向から変位量を計測する必要があるが、加工機上に取り付けた機上計測機を用いる場合、ワーク上方から位置変位を計測しなければならない。そこで、ワーク上方からワークの位置変位を計測する方式として共焦点方式が最も適している。共焦点方式はワークからの反射光量変化を計測する方式であるため、ワーク上方からエッジ位置を横切るように走査する際の反射光量変化からワークの位置変位を計測できる。一方、加工機上に取り付けた機上計測機を用いて高さ変位を計測する場合、ワーク上方から鉛直方向の変位量を計測できる。表1-2の変位計測方式の中で高さ変位を機上計測する方式として三角

測量方式、特にスポット方式と光切断方式[79-82]は金属粗面の表面性状(金属面性状)や外乱光といった機上計測特有の課題はあるもののその他の仕様は機上計測に適している。パターン投影方式[83-86]は広範囲の変位量を一度に面計測できるが高精度化は難しく、複数回のパターン光投影が必要であるため計測時間がかかり、機上計測には向きである。そこで、生産ラインなど産業分野で広く使用されており、小型かつ高精度な計測が可能な三角測量方式を用いたスポット方式や光切断方式を機上高さ変位計測へ適用する。しかし、これまでレーザ熱加工プロセスにおいて機上光学式変位計測の実用化は進んでいない。その理由として、加工前の計測では加工対象である金属ワークの表面性状、加工後の計測ではレーザ熱加工された表面性状が様々であるため表面性状によって高精度に計測できない、加工中のインプロセス計測では高温プロセスであるレーザ熱加工中に加工位置で発生する加工用レーザの反射光や熱輻射光といった外乱光が同じ光学式である機上計測に影響する、などが挙げられる。そこで、従来方式に対する金属粗面の不均一な表面性状、加工中の外乱光の影響をそれぞれ示す。

従来方式では、加工対象物である金属ワークの表面性状の違いにより高精度な計測が難しく、加工前後の機上計測に光学式変位計測を実用的に使用できていない。レーザ熱加工に用いられる金属ワークの表面性状は様々であり、特にレーザ熱加工部材として用いられることが多い、図1-6に示す一方向に筋状の加工痕が形成された異方性がある表面性状の研削面を高精度に光学式変位計測することは難しい。表面性状が均一で拡散反射特性に偏りのない場合に最も精度が良い拡散反射光を用いる三角測量方式では、受光素子上のスポット形状が計測位置によってばらつき、計測精度が低下する[87,88]。図1-6(a)の顕微鏡写真に示すように研削面には筋状の加工痕があり、図1-6(b), (c)の3次元測定機での計測結果が示すように位置によって大きさやピッチが異なる 2~3 μm 程度の筋状の凹凸がある。このように、表面性状が不均一な金属粗面からの散乱反射光の特性も均一ではないことが考えられるため、ワーク表面に投光したスポット光の反射光を 2 次元カメラで観察することで散乱反射角特性を計測した結果を図1-7に示す。筋状の加工痕の並び方向である X 方向の光強度分布は反射角度によって大きく変化し、ワーク上の計測位置を ±3 μm 変化させると散乱反射角特性も大きく変化する。そのため、計測位置によって散乱反射角特性が変化する場合、共焦点方式を用いた位置変位計測では、計測位置によって反射光量が変化するため、反射光量変化から位置変位を高精度に算出できなくなる。また、三角測量方式を用いた高さ変位計測では、高さ変位を受光素子上の計測用照明光の位置から算出するため、受光素子上での強度分布が計測位置によって変化すると高精度に計測できない。そこで、同一高さの金属ワーク上の 2 点 P1 と P2 について、三角測量方式の高さ変位センサで計測した際の受光素子上の計測用照明のスポット像と断面強度分布を図1-8に示す。図1-8(b)に示すように同一高さである P1 と P2 のスポット形状が異なっており、図1-8(c)に示すように、同一高さであっても計測位置が異なると不均一な表面性状の影響により、受光素子上のスポット像の断面分布が変化する。そのため、重心位置などから算出するスポット位置が変化するため、高精度

に高さ変位を計測できず、例えば、金属粗面上での三角測量方式による変位計測の結果、計測位置に対して約 $50 \mu\text{m}$ の計測ばらつき(peak to peak)が生じる。このように、加工前後の計測において、接触方式と同等精度± $1 \mu\text{m}$ の計測精度を目標とする場合、市販の光学式変位センサでは実現困難である。したがって、共焦点方式の位置変位計測技術と三角測量方式の高さ変位計測技術を加工前後の機上計測に適用する際には、金属粗面の表面性状、特に異方性がある不均一な表面性状の影響を低減し、高精度に計測する手法が必要である。

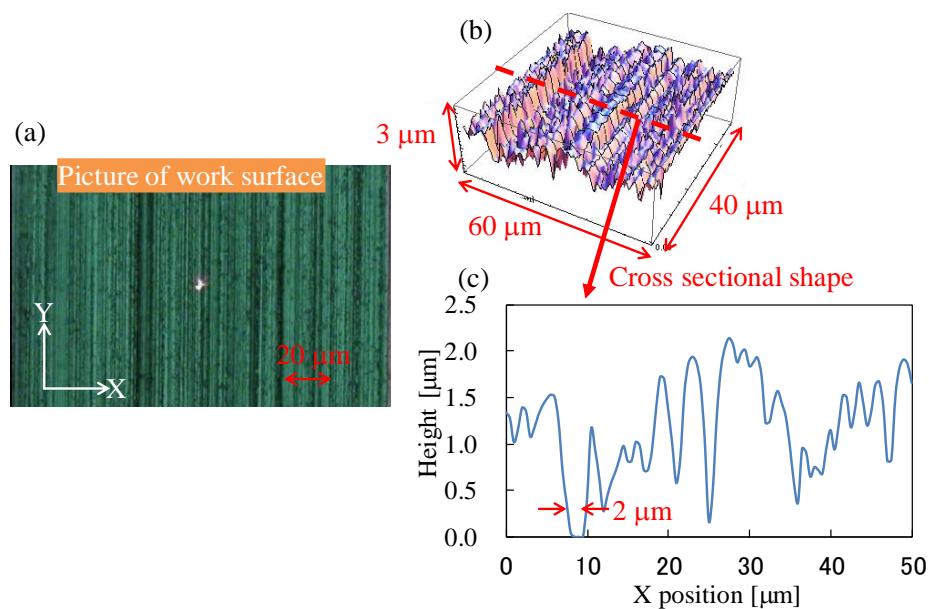


Fig. 1-6. Measurement result of grinding surface of metal workpiece: (a) microscope image, (b) result of three-dimensional measuring instrument and (c) cross sectional height distribution of three-dimensional measuring instrument.

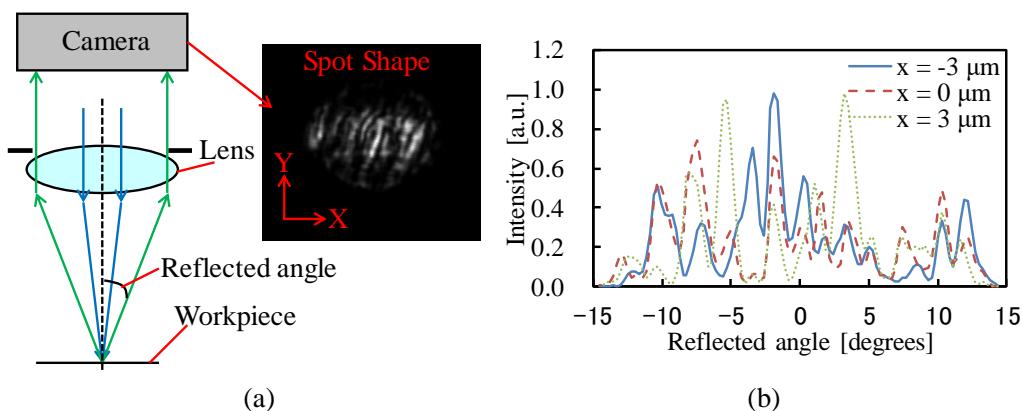


Fig. 1-7. Measurement result of scattered reflected light characteristic on grinding surface of metal workpiece: (a) measurement method of scattered reflected angle distribution and (b) measurement result of light intensity distribution by scattered reflected angle.

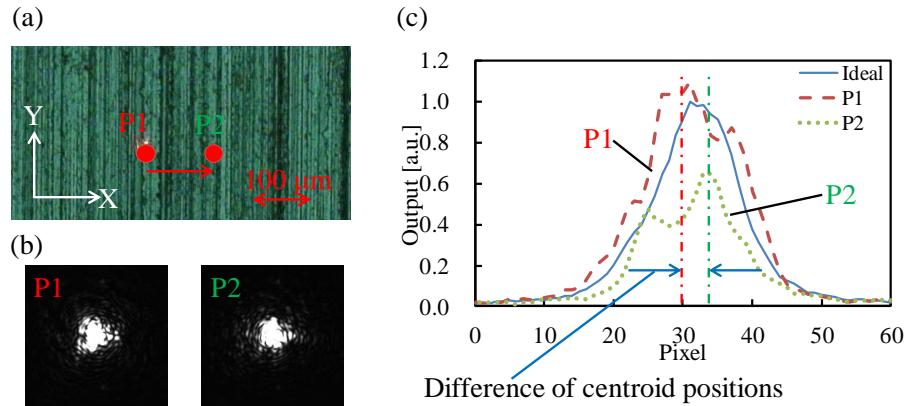


Fig. 1-8. Detected spot measurement result of triangulation height displacement sensor on grinding metal surface: (a) measurement points on metal workpiece, (b) detected spot image at different positions and (c) cross sectional intensity distribution of detected spot on an image sensor of triangulation sensor.

次に、レーザ熱加工中の加工位置には数 kW の加工用レーザ光が照射され、1000 度近い高温となる。そのため、レーザ熱加工中に加工対象物の高さ変位を計測する場合、加工位置で発生する加工用レーザの反射光や熱輻射光といった外乱光が、同じ光学式である高さ変位計測機の撮像系に入射する。三角測量方式では、不要な外乱光が受光素子に入射する場合、受光素子上の計測用照明光の重心位置などから算出する高さ変位計測結果に誤差が発生するため、高精度な計測ができなくなる。そこで、従来の光切断方式の高さ変位センサを用いてレーザ熱加工中の加工用レーザの反射光や熱輻射光といった外乱光の影響を評価している。今回、使用した光切断方式の高さ変位センサの仕様を表 1-3 に示す[89]。赤色のラインビームを用いており、外乱光に強い光学系として、光学フィルタや光源と受光素子を同期するなどの方式が用いられている。加工用レーザ照射中の高さ評価実験系の概略図を図 1-9 に示す。測定方法の概略手順を以下に示す。

- ・加工ヘッドにできるだけ接近させて加工ヘッド側面(-Y 方向)にセンサヘッドを設置
- ・加工位置を $X = 0 \text{ mm}$ とし、 $X = 4 \text{ mm}$, 8 mm の位置で Y 方向の断面高さ分布を計測
- ・加工条件 1.5 kW , 3 秒 で加工レーザ(1080 nm)を照射し、照射中にセンサ出力を保存

加工用レーザを照射中と照射していない状態での Y 方向の断面高さ分布を計測した結果を図 1-10 に示す。ここで、平坦なプレート表面が高さ変位センサの高さ原点となるよう事前に調整した。加工位置から 8 mm 離れた位置では加工していない状態と同様に平坦なプレートワークの高さ変位を計測でき、外乱光の影響はない。一方、加工位置から 0 mm , 4 mm の位置では、加工位置付近の Y 方向位置で計測誤差が発生する。このように、レーザ熱加工中の高さ変位計測位置を外乱光が発生する加工位置に近づけると外乱光の影響で計測誤差が発生することを明らかにしている。

Table 1-3. Specification of commercial height displacement sensor using light section method for in-process height measurement evaluation during laser thermal processing.

Parameters	Value
Manufacturer	LMI Technologies Inc.
Model name	Gocator 2340
Working distance	190~400 mm
Accuracy	0.021 mm (estimated from linearity)
Sampling frequency	170 – 5000 Hz
Spatial resolution	0.095 - 0.170 μm (Field of view: 96 – 194 mm)
Wavelength	660 nm
Laser power	3R
Size	49 x 75 x 197 mm

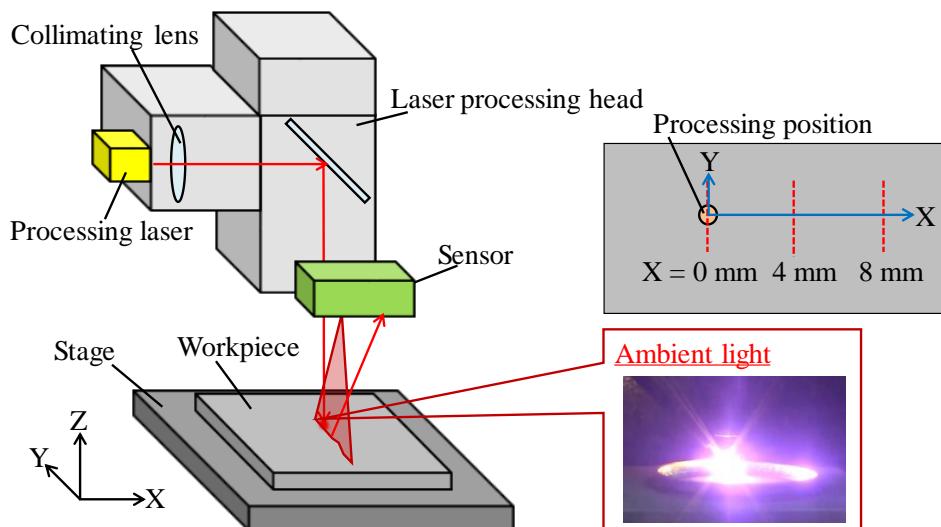


Fig. 1-9. Experiment setup of in-process height measurement evaluation during laser thermal processing.

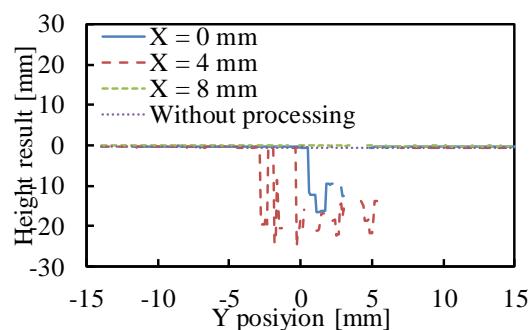


Fig. 1-10. Cross sectional height displacement measurement result of height displacement sensor using light section method by the distance from laser thermal processing position.

このように、レーザ熱加工プロセスにおける加工前後の計測を接触方式より高速化し、接触方式では実現不可能なレーザ熱加工中のインプロセス計測と計測結果に基づいた加工制御を実現するため、非接触計測が可能な光学式変位計測に注目する。これまで光学式変位計測機を加工機上で使用した例は報告されているが、市販されている汎用変位センサでは加工前後に金属粗面を高精度に計測できず、レーザ熱加工中には加工位置で発生する外乱光の影響により加工位置付近では高精度な計測が難しく、実用的な研究成果は得られていない。そこで、産業用レーザ加工機のうち特にZ軸への走査を伴う3次元レーザ加工や造形加工を高精度化することを目指し、加工対象面が加工用レーザの焦点位置となるよう加工制御を行うための機上光学式変位計測手法を提案する。従来の接触方式では加工中のインプロセス計測が不可能であるが、機上光学式変位計測によりインプロセス計測を実現することで、ワークの取り付けから取り外しまでの全てのレーザ熱加工プロセスを自動化する。また、加工前と加工後の工程では非接触計測により接触方式に対して高速計測を実現し、表面性状が不均一な金属粗面の影響を受けずに接触方式と同等精度 $\pm 1\text{ }\mu\text{m}$ で計測可能な手法を提案する。これにより、加工前後の計測工程において高精度な計測を実現しつつ、タクトを短縮し、生産性の向上が期待される。さらに、レーザ熱加工中に加工用レーザの焦点位置に対する加工対象面の変位量をインプロセス計測する手法を提案し、加工対象面が常に加工用レーザの焦点位置となるよう加工制御を行うことでレーザ熱加工を行う産業用レーザ加工機の加工精度を高精度化する。加工位置で発生する外乱光の影響を低減し、加工位置近傍でのインプロセス計測手法を確立することで、加工制御時と近い温度環境での計測が可能となるため、加工制御を高精度に行うことが期待できる。また、複雑な加工経路を加工する際にも常に加工経路上をインプロセス計測可能な手法を提案し、加工制御を適用できる加工経路の形状自由度を向上することを目指す。

1.3 本研究の目的と概要

本研究で提案する計測手法は、レーザ熱加工における加工制御、つまりレーザ熱加工制御のための機上光学式変位計測技術である。レーザ熱加工を行う産業用レーザ加工機における機上計測では、加工前後・加工中それぞれに適した機上光学式変位計測技術が必要となる。しかしながら、これまで光学式変位計測を機上計測に適用した例は報告されているものの、産業用レーザ加工機におけるレーザ熱加工プロセスに対してレーザ熱加工制御を行うための加工中のインプロセス計測手法や加工前後の機上計測手法に対して体系的に議論がなされていない。

そこで、本研究における目的は、レーザ熱加工制御を実現するための小型で非接触計測が可能な機上光学式変位計測手法の確立である。加工前後の計測では、表面性状が不均一な金属粗面による散乱反射角特性変化の影響を低減し、接触方式よりも高速に同等精度で金属ワークの3次元位置の変位量を計測することを目指す。また、加工中のインプロセス計測で

は、加工制御時と近い温度環境である加工位置近傍で加工用レーザの焦点位置に対する加工対象面の高さ変位量を計測するためのインプロセス計測の基本原理を示す。また、加工方向が変化する際にも常に加工経路上の高さ変位量を計測可能なインプロセス計測手法を提案する。さらに、インプロセス計測結果に基づいたレーザ熱加工制御により、加工精度向上できることを明らかにする。

1.4 本論文の構成

本論文は、第1章を緒論、第7章を結論とする全7章で構成されており、上述の通り、レーザ熱加工制御のための機上光学式変位計測に関する研究内容について述べる。本論文の構成を図1-11に示す。

第1章は、緒論であり、本研究の背景と目的について述べた。

第2章では、主に産業用途で使用されるレーザ熱加工を行うレーザ加工機上で使用する機上光学式変位計測システムを示し、各工程の機上計測に必要な特徴について述べる。次に、位置変位計測と高さ変位計測の原理をそれぞれ示し、加工前後、レーザ熱加工中それぞれにおける機上変位計測手法について述べる。

第3章では、加工前後に金属の加工対象物を高精度に計測するための光学式変位計測手法について述べる。金属粗面の表面性状によらず、位置変位を高精度に計測する共焦点方式と、三角測量方式を用いて高さ変位を高精度に計測するための「多方向三角測量方式」と「走査露光方式」を示す。また、提案した高さ変位計測手法を用いて金属粗面に対する計測精度評価を行い、接触方式と比較した結果について述べる。

第4章では、レーザ熱加工中に加工位置近傍の加工対象物の高さ変位を計測するため、加工光学系の対物レンズを計測系と共に用い、加工光学系と同軸で計測する手法を示す。加工用レーザの反射光や熱副遮光による外乱光を低減し、レーザ熱加工中にも加工していない状態と同等精度で高さ変位を計測できることを示し、加工位置近傍でのインプロセス計測が可能であることを明らかにする。

第5章では、レーザ熱加工中に加工方向が変化する際にも加工経路上の高さ変位を計測するための2つのラインビームを交差した「交差ラインビーム光切断方式」について示す。従来の光切断方式に対してラインレーザを1つ追加するだけの簡単な構成で、計測方向を±90度方向まで拡大でき、計測方向に対する計測精度を評価した結果を示す。

第6章では、得られた知見を基にレーザ熱加工中に加工位置近傍での加工経路上のインプロセス高さ変位計測結果に基づいたレーザ熱加工制御評価により、提案手法の実用性を検証した結果を述べる。近年注目されているAM加工機であるレーザワイヤDED金属積層装置を用いて、インプロセス高さ変位計測結果に基づいてワイヤ供給速度を制御することで加工精度向上できることを明らかにする。

第7章は、結論であり、本論文内容を統括する。

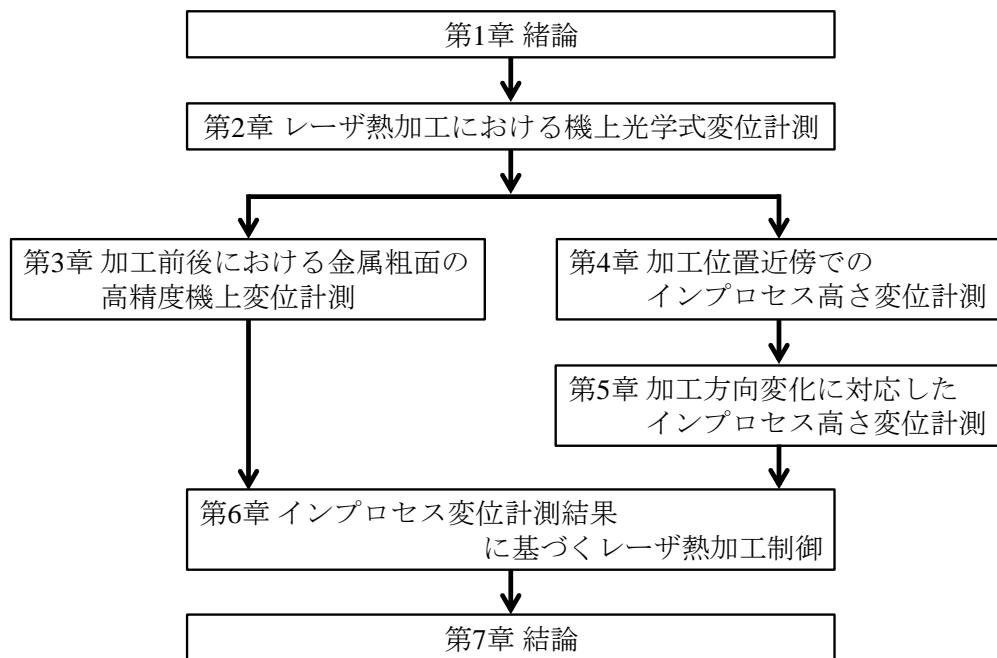


Fig. 1-11. Construction of this paper.

第2章 レーザ熱加工における機上光学式変位計測

2.1 緒言

本章では、まず、レーザ熱加工プロセスにおける機上光学式変位計測システムを提案し、その特徴について述べる。加工前、加工中、加工後の各プロセスにおいて自動計測する必要があるワークの3次元位置変位量について示す。特に、接触方式では計測できないレーザ熱加工中のインプロセス計測の特徴、およびインプロセス計測結果に基づいた加工制御手法について述べる。次に、レーザ加工機上で使用するワークの位置変位と高さ変位を計測するための光学式変位計測の計測原理について述べる。加工前後の計測では、レーザ熱加工に使用される表面性状が不均一な金属ワークを高精度に計測する手法を提案し、レーザ熱加工中のインプロセス計測では、高精度に加工制御を行うため、加工制御時と近い温度環境である加工位置近傍で高さ変位を計測するための基本原理を提案する。さらに、加工方向が変化する際にも常に加工経路上の高さ変位を計測する手法についても示す。

2.2 機上光学式変位計測システム

レーザ熱加工を行う産業用レーザ加工機の高精度化を進める上で、レーザ熱加工中のインプロセス計測結果に基づいてリアルタイムで加工条件を制御するレーザ熱加工制御が不可欠である。また、プロセス全体のタクトを短縮し、生産性を向上するためには機上計測の高速化が重要である。レーザ熱加工プロセスにおける光学式変位計測技術を用いた機上計測工程は、図2-1に示すように大きく3つに分けることができ、加工前(Pre-process)計測、加工中(In-process)計測、加工後(Post-process)計測である[61,90]。また、機上光学式変位計測を用いた際のレーザ熱加工プロセスについて図2-2に示す。

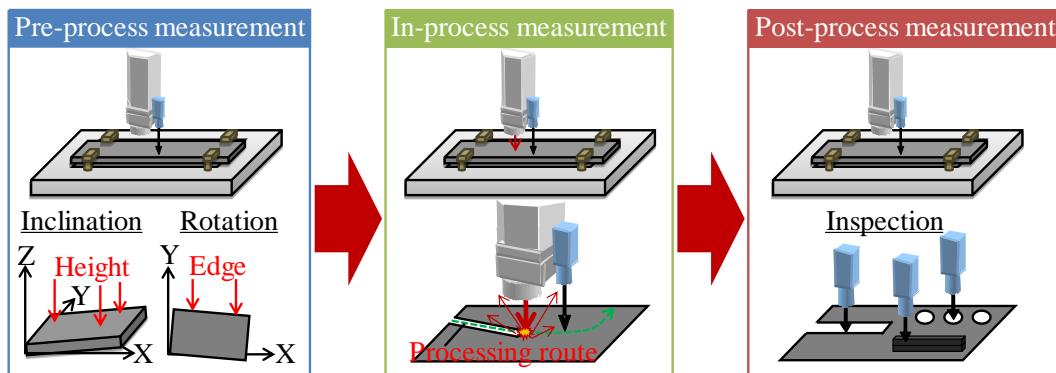


Fig. 2-1. On-machine measurement using an optical displacement sensor in laser thermal processing.

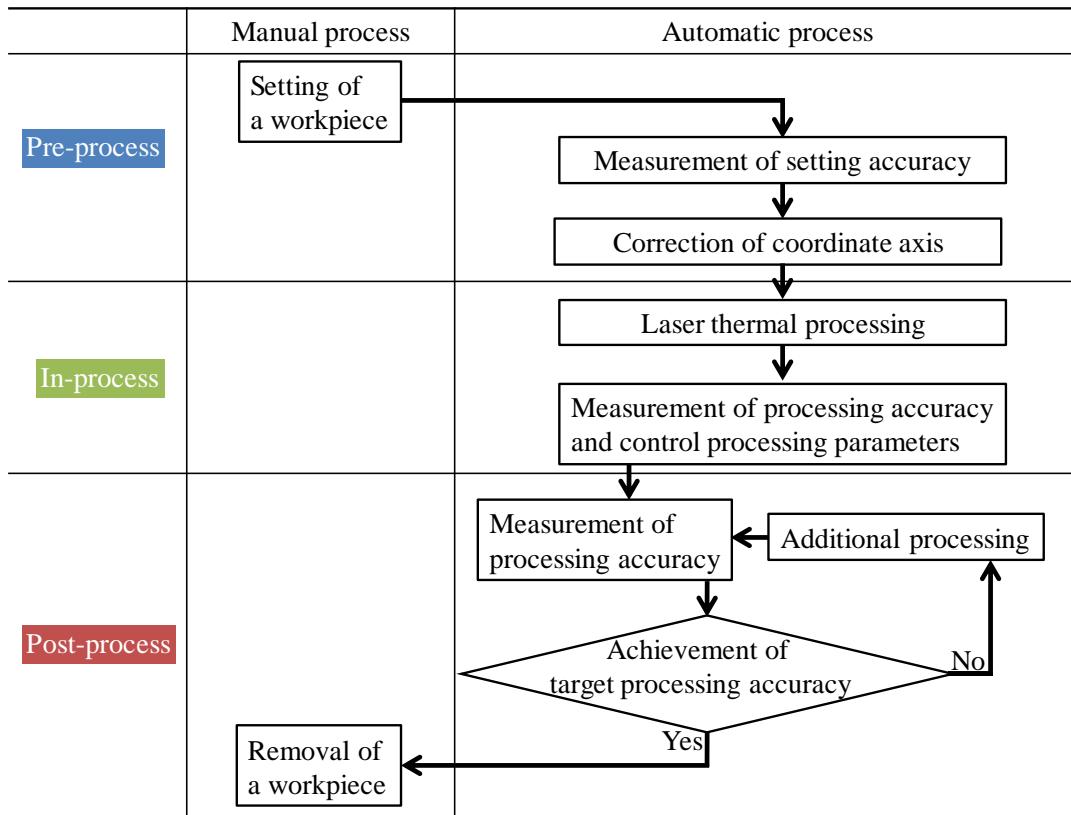


Fig. 2-2. Measurement process using an optical displacement sensor in laser thermal processing.

まず、加工前計測の目的は、計測した段取り精度に基づいて加工軸を補正することで高精度なレーザ熱加工を実現することである。光学式変位計測により加工前の段取り精度を計測する概略図を図 2-3 に示す。加工機上に取り付けた光学式変位計測機の計測位置をプログラムされたワーク上の設計位置に移動させ、走査軸に対する平行計測・位置計測を行う場合は、ワークのエッジ位置について XY 方向の設計位置からの変位量を計測し、平面度を計測する場合はワーク上の Z 方向の設計位置からの変位量を計測する。本論文では、エッジ位置の XY 方向の設計位置からの変位量を加工前計測における位置変位、Z 方向の設計位置からの変位量を加工前計測における高さ変位と呼ぶ。このように、計測したワークの段取り設計位置からの変位量を基に加工機 NC によるデジタル制御によって機械座標系に対する位置オフセットや走査軸の傾きを補正する。このように、加工前に段取りされたワークの機械座標系における位置や姿勢を高精度に機上計測することで、加工精度の向上が可能だけでなく、インプロセス計測結果に基づく加工制御を高精度に行うこともできる。また、非接触計測が可能な光学式変位計測は、ワーク上方から計測可能であるため、計測時に計測機をワークに近づける必要が無く、タッチプローブセンサに対して高速計測が可能となる。

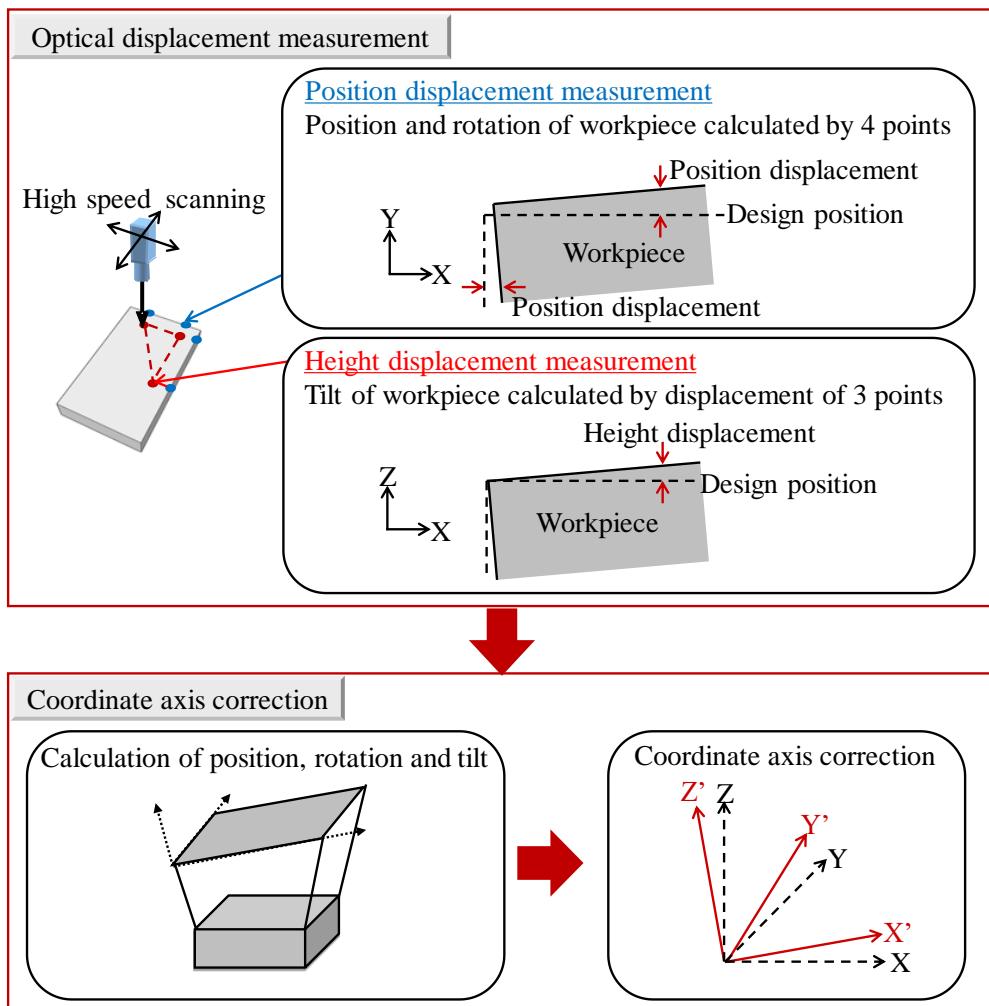


Fig. 2-3. Measurement of setup accuracy using an optical displacement sensor in pre-process.

次に、加工中計測の目的は、加工中の加工現象や加工対象物をレーザ熱加工中にリアルタイムで計測し、その結果を基に加工条件を最適制御することによる加工精度の向上である[91,92]。図2-4に示す通り、レーザ熱加工では、加工用レーザの光エネルギーを熱エネルギーに変換することで、主に金属である加工対象物を加工する。しかし、実際のレーザ熱加工中には、温度環境やワークの変形といった加工中の環境変化や機械の振動といったランダム要因により、加工量の再現性が得られず、加工誤差が生じる。そこで、レーザ熱加工中の加工量の誤差を低減し、高精度な加工を実現するためには、加工中のプロセスモニタリング結果に基づいた加工制御が有効である。これまでレーザ熱加工中のインプロセス計測として、加工光強度[93-97]や温度[98-100]、加工状態モニタリング[101]といった様々な計測対象が研究されている。これらの中でも加工ヘッドと加工対象物間の距離を一定に保ち、加工対象面が加工用レーザの焦点位置となるように制御することは、1章で述べた通り、レーザ熱加工において設計通りの加工量を得るために重要である。本論文では、加工用レーザの焦点位置、つまり、設計位置からの加工対象面のZ方向の変位量を加工中計測における高さ変

位と呼ぶ。特に、3次元レーザ加工や造形加工では、Z方向の走査を伴うため、加工対象面が加工用レーザの焦点位置となるような加工制御が高精度化には不可欠である。

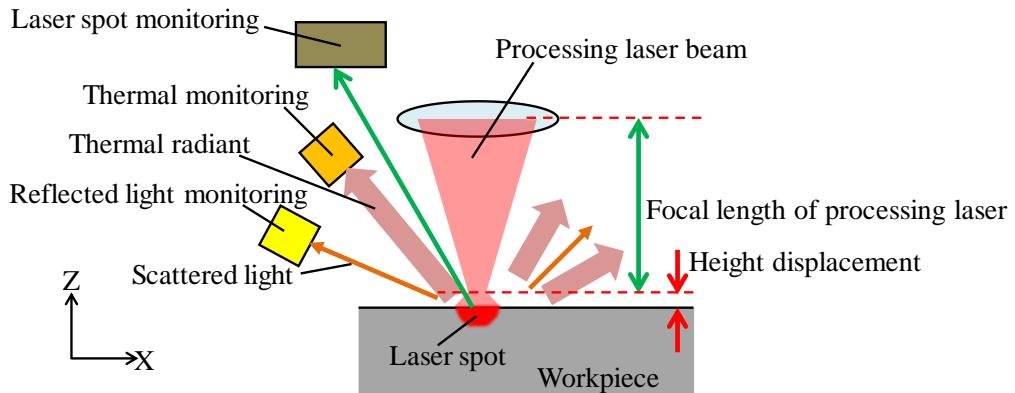


Fig. 2-4. In-process monitoring technique in laser thermal processing.

しかし、レーザ熱加工中の加工位置は集光されたレーザ光により高温となったワークが溶融されて形状が定まらないため、高さ変位量を正確に計測できない。そこで、レーザ熱加工中に加工経路上の加工位置より前方の加工対象物の加工用レーザの焦点位置からの高さ変位量を計測し、高さ変位量を計測した位置を加工する際に計測結果に基づいてフィードフォワードで加工対象面が加工用レーザの焦点位置となるよう制御する方式を提案する。本論文では加工対象面が加工用レーザの焦点位置となるよう制御することをレーザ熱加工制御と呼ぶ。インプロセス高さ変位計測結果に基づいたレーザ熱加工制御の基本原理を図2-5に示す。+X方向にレーザ熱加工を行っており、加工位置 X_0 での計測位置を X_1 とし、ワークの反りなどによって加工位置 X_0 に対して計測位置 X_1 では加工対象面の高さが Z_1 変位しているとする。3次元レーザ加工や造形加工では、加工対象面がZ方向に変化する複雑形状への加工も行うため、図に示す高さ変位が生じやすい。本手法では、加工位置 X_0 を加工している際に計測位置 X_1 での高さ変位 Z_1 を計測し、加工機NCで計測位置に対する高さ変位量を保存しておく。高さ変位を計測した位置 X_1 に加工位置が到達する際に高さ変位計測結果 Z_1 に基づいてフィードフォワードで加工対象面が加工用レーザの焦点位置となるよう加工ヘッドとワーク間の距離を最適制御する。また、加工位置 X_1 を加工する際には計測位置 X_2 の高さ変位量を計測しているため、加工経路上を走査しながら加工制御を行うことができる。このように、加工経路上の加工位置より前方の高さ変位量を計測し、計測した位置を加工する際に加工対象面が加工用レーザの焦点位置となるよう制御すれば、設計通りの加工量が得られるため、高精度な加工を実現できる。ここで、加工位置や加工後の加工経路上をインプロセス計測し、その結果をフィードバックして加工制御を行う方法も考えられるが、加工対象面が加工用レーザの焦点位置となるよう制御する場合、加工後の計測結果から次に加工する加工経路上の高さ変位量を知ることはできないため、高精度な加工制御が

できない。そのため、本手法のように加工位置より前方の加工経路上の高さ変位量を計測し、その結果に基づいてフィードフォワードで加工制御する手法が適している。また、ここでのインプロセス計測は、加工プロセスと計測プロセスを時間的にも共有し、同時にを行うことを意味する。レーザ熱加工中にリアルタイムで高さ変位を計測できれば、一度加工を停止して計測する場合と比較して追加での計測時間が必要なく、加工プロセスの時間を増加させずに高精度な加工を実現できる。そこで、本論文ではレーザ熱加工中のインプロセス計測結果に基づいたレーザ熱加工制御を実時間制御と呼ぶ。

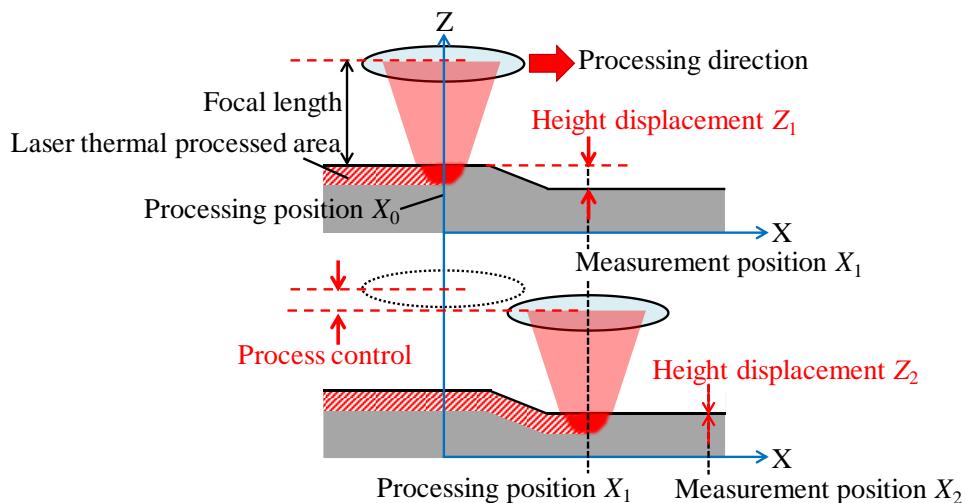


Fig. 2-5. Principle of laser thermal process control based on in-process measurement results.

本制御手法において、加工位置と計測位置の距離が重要である。レーザ熱加工を行う加工位置は 1000 度程度と高温になるため、加工していない状態に対して蓄熱によるワークの変形が生じる。例えば、レーザ熱加工に使用される鉄製ワークの板厚を数 mm 程度とし、加工用レーザが照射される加工位置の温度が 1000 度程度に上昇すると、熱膨張の影響で板厚が変化し、加工用レーザの焦点位置に対して加工対象面が数 10 μm 変化する。これは、加工用レーザの焦点位置に対する加工対象面の制御精度 100 μm 程度に対して無視できない変化量である。そこで、レーザ熱加工制御を高精度に行うためには、ワークの蓄熱や変形といった加工環境が加工制御時と近い条件でのインプロセス高さ変位計測が望まれる。ここで、本論文での加工環境をワークや周囲の温度環境とすると、レーザ熱加工制御時と近い加工環境で高さ変位を計測するためには、加工位置に対して計測位置をできるだけ近づけた加工位置近傍での高さ変位計測が必要である。したがって、高精度なレーザ熱加工制御を実現するための加工中のインプロセス計測手法として、加工位置近傍での高さ変位計測手法を提案する。一方、レーザ熱加工における加工精度は加工終了後の温度環境での形状であるため、理想的にはレーザ熱加工中の加工制御時と近い加工環境での高さ変位と加工していない状態(または加工位置から十分離れた位置)での高さ変位をそれぞれ計測し、それらの結果を統

合して加工制御を行う方が良い。しかし、次に示す加工後計測にて最終的な加工形状の評価が可能であるため、本論文では、加工中のインプロセス計測の基本原理として、加工制御時と近い加工環境で高さ変位を計測するための加工位置近傍でのインプロセス計測手法の有効性を示し、その結果に基づいたレーザ熱加工制御の実用性を検証する。

最後に、加工後計測の目的は、加工機上に取り付けた計測機によって、加工精度を自動計測することである[44]。加工後計測では、図2-6に示すように加工前計測と同様に加工後のワークの設計形状からの3次元位置の変位量を機械座標系で計測する。本論文では、XY方向のエッジ位置の設計位置からの変位量を加工後計測における位置変位、Z方向の設計位置からの変位量を加工後計測における高さ変位と呼ぶ。そのため、加工前計測と同様にワーク上方からの高速・高精度計測が求められる。加工機上で加工精度を計測できれば、加工精度が不十分である場合にも加工機NCが計測結果を基に必要な追加工量を算出し、段取りされたワークの位置や姿勢が変わっていないため、追加工を行うことができる。再段取りの必要が無いため、加工精度だけでなく、生産性の向上も実現できる。

このように、光学式変位計測を用いた機上計測により、加工前、加工中、加工後におけるレーザ熱加工プロセスの自動化が可能となり、加工精度を向上できる。特に、接触方式では実現不可能であるレーザ熱加工中のインプロセス計測は、さらなる高精度化が要求される産業用レーザ加工機において必要不可欠である。また、インプロセス計測とレーザ熱加工制御が実現すれば、加工精度を左右する加工前後の変位計測の重要性が増していくとともに、ワーク上方から非接触で計測可能な光学式変位計測によって接触方式に対する計測時間の高速化が求められる。計測時間を高速化できれば、タクト短縮により限られた計測時間内に多くの位置を計測できるため、計測精度の高精度化にもつながる。

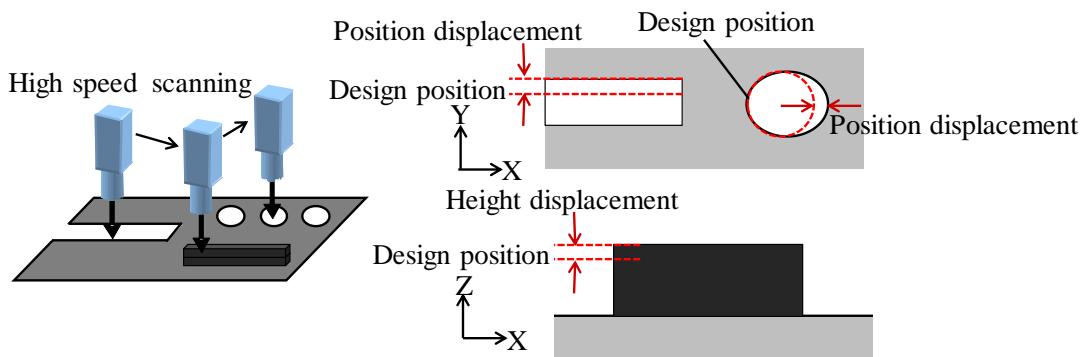


Fig. 2-6. Measurement of processing accuracy using an optical displacement sensor in post-process.

全てのレーザ熱加工プロセスにおいて、ワークの変位量を計測することは非常に重要であるが、レーザ熱加工を行っていない加工前後とレーザ熱加工中に行うインプロセス計測では要求される特徴が大きく異なる。ここで、加工前後の機上計測とインプロセス機上計測の特徴を表2-1に示す。まず、加工前後の計測とインプロセス計測の最も大きな違いは、計

測位置と加工機上の指令位置の関係である。それぞれの計測位置と加工機上の指令位置の関係を図2-7に示す。加工前後の計測では、レーザ熱加工を行わずに機上計測のみを行うため、加工位置から適切なオフセット量を設定することで加工機上の指令位置を計測位置とすることができます。つまり、機上計測機の計測位置が、加工機の可動範囲内となるよう指令すれば、変位量を計測できる。そのため、加工前後の機上計測に求められる計測領域は接触方式と同様に点計測でも良く、計測位置に合わせて計測点を移動させれば良い。

Table 2-1. Specification of on-machine measurement in pre- and post- process and in-process.

	Pre- and post-process measurement	In-process measurement
Command position	Measurement position	Processing position
Measurement area accuracy	Point measurement	Line or plane measurement
	Few μm	About 100 μm
Ambient light	None	With ambient light

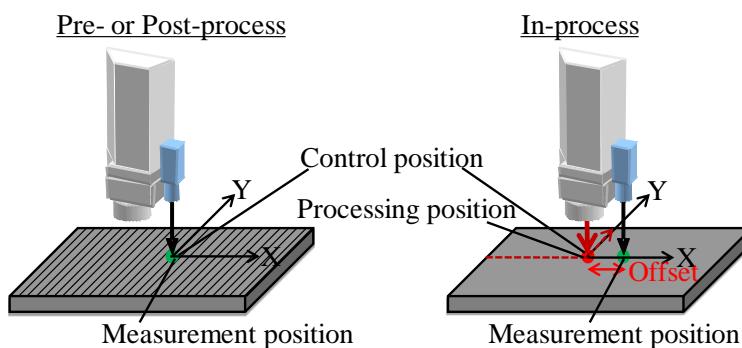


Fig. 2-7. Relationship between command position and measurement position of on-machine measurement in pre- and post- process and in-process.

一方で、レーザ熱加工中の指令位置は加工位置であるが、高温となる加工位置は金属が溶融しているため、インプロセス計測において加工位置でのワークの高さ変位を計測することはできない。そのため、加工位置と異なる位置を計測する必要があり、加工機の指令位置と計測位置にオフセットが生じる。したがって、加工前後計測と同様に点計測を用いると加工方向が変化する場合に加工経路上の高さ変位を計測できない。図2-8に加工方向が変化する際の加工位置と計測領域の関係を示す。図2-8(a)に示すように、レーザ熱加工中に加工方向がXY平面内で変化する場合、点計測では加工経路上の計測ができない。計測スポットをガルバノミラーなどで機械的に走査する方法もあるが、装置が複雑で大型化するため、加工機上で計測する機上計測には不向きである[102]。そのため、図2-8(b)に示すように、インプロセス計測では加工位置と同様に計測位置も移動するため、点計測ではなくラインビームを用いた線計測が可能な変位計測技術を用いれば、加工経路上の高さ変位を計測可能な加

工方向が広くなる。また、加工形状によらず加工経路上を計測するためには、加工位置と計測位置はできるだけ近い方が良い。加工位置に対して計測位置が離れるほど線計測を用いても加工経路上の計測が難しい。このように、レーザ熱加工中のインプロセス計測において、加工方向が変化する際にも常に加工経路上の高さ変位を計測するため、線計測やさらに計測領域が広い計測手法が求められる。

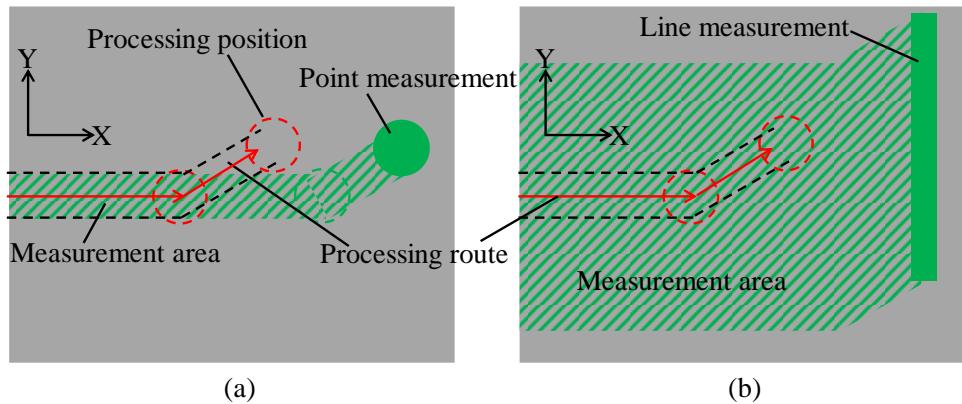


Fig. 2-8. Relationship between processing position and measurement area when laser thermal processing direction changes: (a) the case of point measurement and (b) the case of line measurement.

最後に、加工前後の計測とレーザ熱加工中のインプロセス計測に要求される計測精度も異なる。加工前の段取り精度計測や加工後の加工精度計測では、近年の加工精度やステージの位置決め精度の向上を受け、接触方式と同様に μm オーダーの精度でワークの3次元位置の変位量を計測する必要がある。しかし、レーザ熱加工に多く使用される金属ワークの表面性状や加工後の表面性状が様々であるため、1章で述べた通り、表面性状が不均一な金属粗面を高精度に計測するための光学式計測手法が求められる。ここで、本論文では金属粗面の表面性状を金属面性状と呼ぶ。一方で、レーザ熱加工中のインプロセス計測の目的は、計測結果を用いたレーザ熱加工制御による加工精度の高精度化である。本論文では、レーザ熱加工制御対象として加工用レーザの焦点位置と加工対象面の高さ変位とする。1章で述べた通りレーザ熱加工を行う産業用レーザ加工機の加工用レーザの焦点深度が数 $100 \mu\text{m}$ であることを考慮すると、インプロセス計測に必要な高さ変位計測精度は $100 \mu\text{m}$ 程度である。しかし、レーザ熱加工制御を高精度に行うためにはできるだけ加工位置に近い加工経路上の高さ変位を計測できる機上光学式変位計測手法が求められるが、1章で述べた通り、加工位置近傍では外乱光の影響を低減する必要がある。また、加工位置と計測位置が異なるため、加工方向が変化する際にも常に加工経路上の高さ変位を計測可能な方式が求められる。

このように、加工前後と加工中の計測技術では、それぞれ要求される仕様が大きく異なる。加工前後、加工中それぞれの機上計測に必要な条件を下記に示す。

加工前後の機上計測

- (1) 段取り精度や加工精度を評価するため、表面性状が不均一な金属粗面の高精度計測
- (2) 計測時間短縮のため、高速計測
- (3) 加工機上に設置するため、小型で簡便な構成

加工中の機上計測

- (1) 加工制御時と近い加工環境で計測するため、加工位置近傍での計測
- (2) 加工方向が自由に変化するため、加工方向変化に対応した計測手法
- (3) 加工機上に設置するため、小型で簡便な構成

つまり、機上計測には、加工機上の限られた配置制約の中で設置する必要があるため、小型で複雑なアライメントが不要な簡便な構成という共通の必要条件はあるものの汎用的な光学式変位計測技術で全てを包括できる訳ではなく、その用途によって最適な手法が異なる。そこで、本研究では、それぞれのプロセスにおける最適な機上光学式計測技術を提案する。

2.3 光学式変位計測原理

2.3.1 位置変位計測の原理

ワークの設計位置からのエッジ位置変位量を計測するための共焦点方式を用いた位置変位計測の概略図を図 2-9 に示す。まず、投光光学系を用いてワーク方向にスポット光を投光し、金属ワーク表面からの散乱反射光を対物レンズで取込み、Photo Diode(PD)上に集光する。本来の共焦点方式では、ワークとの距離が変化する際に PD 上に集光されるスポット径が変化することを利用して変位計測を行う[62]。ここでは、加工機上に取り付けた機上計測機をワークのエッジ位置を横切るように走査し、計測位置に対する投光されたスポット光の散乱反射光強度変化からエッジ位置変位を計測する。例えば、図 2-9(a)に示すように、X 方向に高さが急激に変化するエッジ位置がある場合、金属ワークに対して機上計測機の位置を X 方向に走査する際に得られる反射光強度を図 2-9(b)に示す。ワーク上方に機上計測機がある場合は反射光を受光できるが、エッジ位置を横切り、ワークの高さが機上計測機の焦点位置から十分離れると反射光が得られないため、反射光強度が急激に低下する。このように、得られた反射光強度変化に対してしきい値を引くことでエッジ位置変位を計測できる。ここで、エッジ位置変位を高精度に計測するためには、投光スポット径を小さくする必要がある。図 2-10 に投光スポット径に対する位置変位計測結果の概略図を示す。図 2-10(a)に示す通り、スポット径が大きい場合には、エッジ位置を横切る際の反射光量が変化する範囲 ΔR_1 が広くなる。一方、図 2-10(b)に示す通り、スポット径が小さい場合には、エッジ位置を横切る際に反射光量が急峻に変化するため、反射光量が変化する範囲 ΔR_2 はスポット径が大きい場合に対して狭くなる。したがって、位置変位計測光学系の投光スポット径をできるだけ小さく設計することで位置変位計測の高精度化が可能となる。

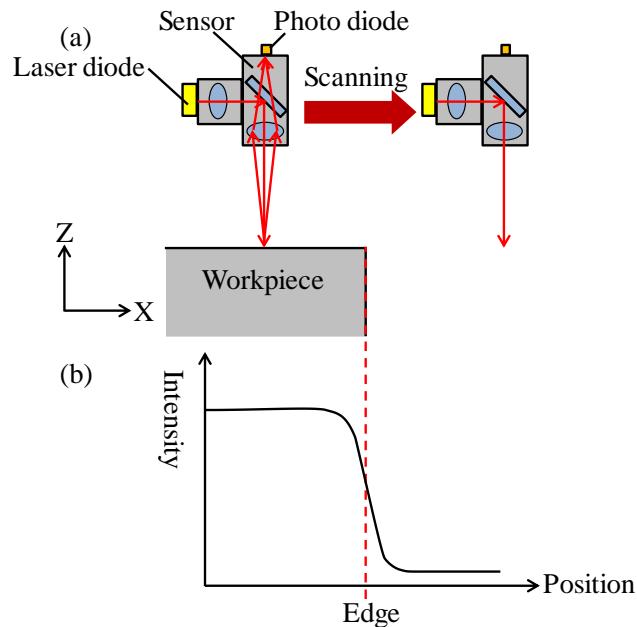


Fig. 2-9. Principle of edge position displacement measurement using confocal method: (a) optical system of edge position displacement measurement and (b) reflected light intensity distribution when crossing edge position.

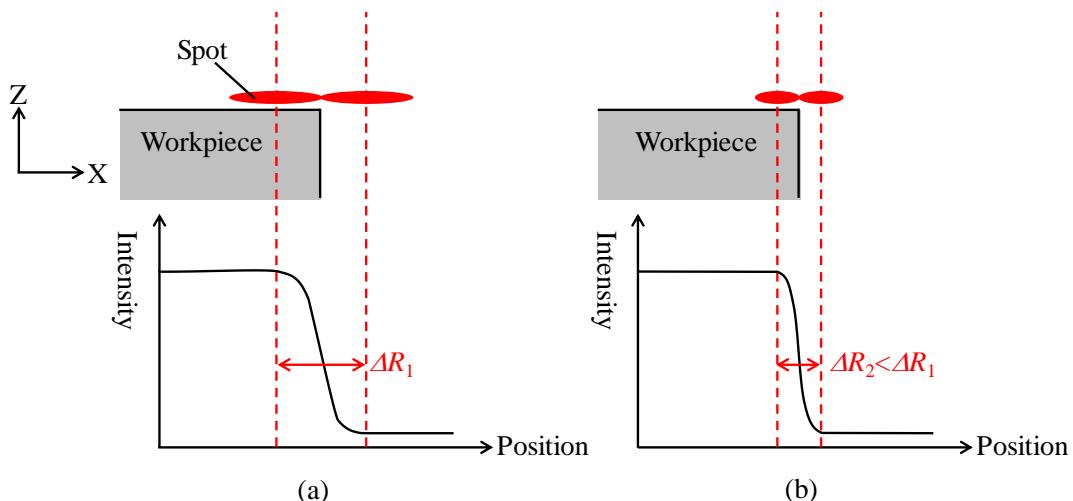


Fig. 2-10. Reflected light intensity distribution at edge position by projection spot size: (a) the case of large projection spot size and (b) the case of small projection spot size.

投光スポット径は開口数 numerical aperture(NA)によって決まるため、物体側の焦点距離が短く、光が透過する対物レンズの口径が大きい方がスポット径を小さくできる。しかし、光の回折により、波長以下のスポット径を得ることは難しいため、本方式での投光スポット径は数 μm が限界である。一方、距離方向にスポット径が変化しない焦点深度は近似的に NA

の2乗に反比例するため、物体側の焦点距離が長く、光が透過する対物レンズの口径が小さい方が焦点深度を長くできる。そのため、最適なNAはスポット径と焦点深度のトレードオフによって決定する必要がある。また、共焦点方式を用いたエッジ位置変位計測では図2-10に示すように、ワークに対する機上計測機の位置を相対的に走査し、反射光強度分布を取得するため、エッジ位置を横切る際の計測ピッチが小さい方が高い空間分解能が得られる。上記を考慮すると、本方式におけるエッジ位置変位の計測精度は数 μm が限界であり、加工前後の計測で要求される接触式計測と同等精度±1 μm が適用の限界である。

2.3.2 高さ変位計測の原理

三角測量方式のレーザ変位センサは、低コスト、高速計測可能などのメリットがあり、生産現場で広く利用されている[62]。市販の一般的な散乱型三角測量方式は、レーザ光をワーク上面に垂直に投光し、斜め方向の散乱反射光を受光素子上に集光する構成である[63]。三角測量方式の高さ変位計測の概略図を図2-11に示す。照明系にスポットレーザを用いた点計測方式について示すが、照明系にラインレーザを用い、受光素子を2次元イメージセンサとすれば、投影された線上的断面高さ分布を計測できる光切断方式となる。照明系の構成が異なるだけであり、基本となる高さ変位計測原理は同様である。対象物にレーザ光を照射し、対象物から反射した光を受光素子に結像するが、照明系の光軸と撮像系の光軸を相対的に傾けて配置することで対象物との距離が変化すると受光素子上の集光位置が変化する。この受光素子上の集光位置の変化が対象物の高さ変位量に比例することを利用し、高さ変位を高精度に計測する。ここでは、照明光を計測対象物に対して垂直に投影し、撮像系を傾ける構成について示したが、撮像系を垂直とし、照明系を傾けても良い。三角測量方式は対象物上での散乱光を利用する構成が一般的であるが、正反射光を用いる構成もある。

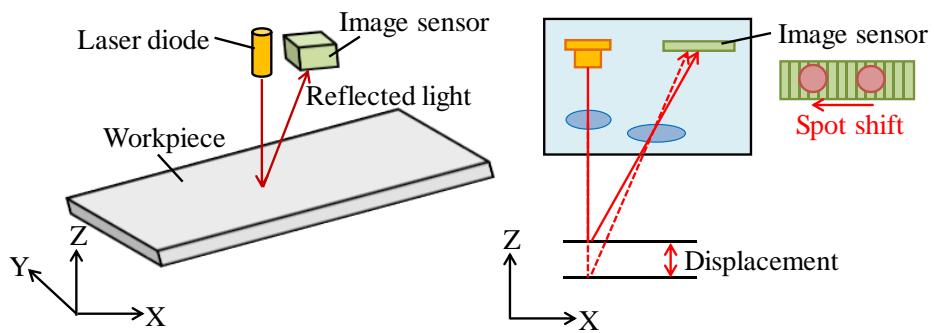


Fig. 2-11. Configuration of height displacement sensor using triangulation method.

三角測量方式を用いた高さ変位計測原理を図2-12に示す。ここでは、説明の都合上、撮像系が垂直であり、照明系を斜めに傾けた構成を示す。三角測量方式の計測精度は、投光系

と受光系の光軸傾き θ によって決まる。対象物高さ変位 ΔZ に対する計測対象物上での照明光の投影位置変位 ΔX は以下のように表される。

$$\Delta X = \Delta Z \cdot \tan \theta \quad (2-1)$$

ここで、撮像系の光学倍率(横倍率)を M とすると、受光素子上の投影光の位置変位 $\Delta X' = M \cdot \Delta X$ より、式(1)は以下のように書き換えられる。

$$\frac{\Delta X'}{M} = \Delta Z \cdot \tan \theta$$

$$\Delta X' = M \cdot \Delta Z \cdot \tan \theta \quad (2-2)$$

このように、光軸傾き θ が大きく、撮像系と照明系の光軸を傾けた方が対象物の高さが ΔZ 変位する際の受光素子上の投影光の位置変位 $\Delta X'$ が大きくなる。そのため、受光素子の画素の大きさを W とし、受光素子の1画素当たりの高さ変位量 ΔH を高さ変位計測分解能とするとき、(2-2)式より、次のように表される。

$$\Delta H = W / (M \cdot \tan \theta) \quad (2-3)$$

ここでは、照明系を傾けた構成を用いて説明したが、照明系と撮像系の配置についてはどちらを傾けても高さ変位計測原理は変わらない。照明系を傾けた場合、対象物の距離によって照明光の投影位置が変位するが、撮像系を計測面に対して垂直にできるため、イメージセンサの視野と計測面が同じであり、高精度な計測が可能となる。一方、照明系を垂直とする場合、計測距離によって照明光の投影位置変位は生じないが、撮像系が傾いているため、視野内でボケが生じる。そのため、撮像系を傾けた構成で高精度な計測を実現するためには、照明光の光軸上と受光素子の撮像面が一致するようシャインブルーフ光学系を用いる必要がある[82,103-105]。また、スポット方式の場合、対象物の高さが変化すると投光スポットが一方向(図2-12の場合X方向)に変位するため、受光素子としてリニアイメージセンサやPosition Sensitive Detection (PSD)を使用できる。一方、光切断方式ではラインビームを用いて投影するライン上の断面高さ分布を計測するため、受光素子として2次元のイメージセンサが必要となる。取得画像からX方向に対する重心位置を算出し、式(2-2)より、Y方向に対する断面高さ分布を算出する。このように高さが変化する際のラインビームの位置変位方向をX方向とすると、計測するY方向位置に対するX方向のラインビーム位置変位を計算することで任意の位置の高さ変位を算出できる。さらに、加工機のステージを用いてX方向に走査すれば、連続的に断面高さ分布を計測できる。ここで、断面高さ分布の空間分解能はイメージセンサの画素の大きさ W と撮像系の倍率 M で決まる。一般に使用できるイメージセンサの画素サイズが数μmであることを考慮すると、撮像系の倍率 M によるが数μm～数10μmでの計測が可能であり、レーザ熱加工を行う加工用レーザのスポット径が数mmであることを考慮すると十分な空間分解能が得られる。

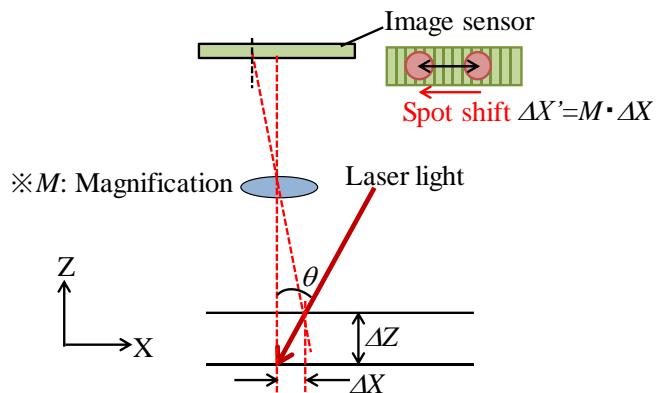


Fig. 2-12. Measurement principle of height displacement sensor using triangulation method.

このように、高さ変位計測分解能は光軸傾き θ が大きい方が良い。そのため、一般に三角測量方式では、図2-13(a)に示すように、基線長 L を大きくするほど計測精度が向上する。そのため、計測精度は装置サイズとトレードオフの関係にあり、また、同じ基線長 L の場合、図2-13(b)に示すように計測距離 H が長くなるほど照射角度が小さくなるため、計測精度が低下する。また、高精度に計測するためには、受光素子上のスポット位置やラインビーム位置を正確に計算する必要がある。受光素子上の投影位置は、投影されたスポットやラインビームの断面照度分布の重心位置やピーク位置などの算出方法があり、計測対象物の表面性状に合わせて使い分けることができる。このように、画像処理技術を用いてサブピクセルで受光素子での投影位置を算出することで、高さ変位を高精度に計測できる。また、式(2-3)より、撮像系の倍率 M が1以上となる拡大系では高さ変位計測分解能が小さくなり、撮像系の倍率 M が1以下となる縮小系では高さ変位計測分解能が大きくなる。ここで、現在、一般に使用できるイメージセンサの画素サイズが数 μm であることを考慮すると、加工前後の機上計測のため、接触方式と同等精度 $\pm 1 \mu\text{m}$ で計測するためには、高さ変位計測分解能が数 μm 程度となるよう撮像系の倍率 M と光軸傾き θ を設計し、重心計算をサブピクセルの画像処理で算出する高精度な計測が求められる。一方、加工中のインプロセス計測ではレーザ熱加工に使用される加工用レーザの焦点深度が数 $100 \mu\text{m}$ であることを考慮すると、イメージセンサの画素サイズ数 μm に対して数 $10 \mu\text{m}$ 程度の高さ変位計測分解能が得られるように撮像系の倍率 M と光軸傾き θ を設計すればよい。

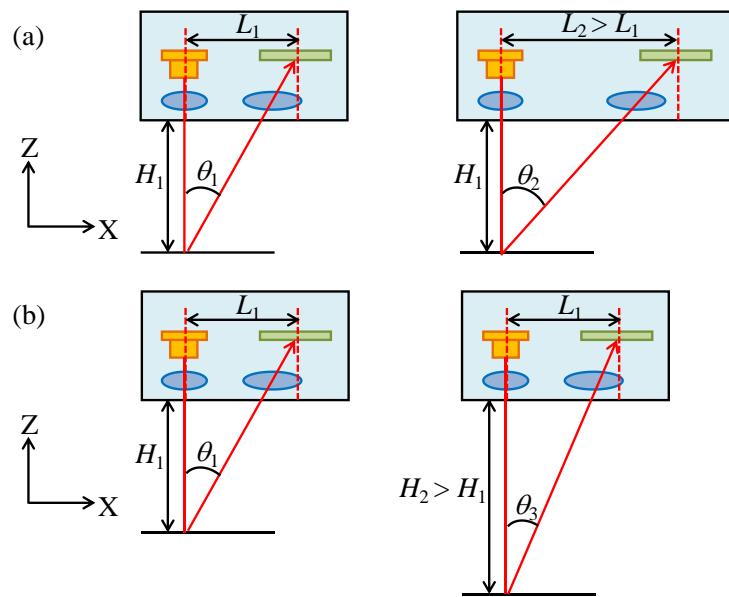


Fig. 2-13. Parameters for measurement accuracy in height displacement sensor using triangulation method: (a) relationship between base line length and tilt of optical axis and (b) relationship between working distance and tilt of optical axis.

2.4 加工前後の機上計測手法

1章で示した通り、これまで加工前後の機上計測に光学式変位計測が使用されなかつた最も大きな理由が、加工対象物である金属ワークの表面性状の違いによる計測ばらつきである。そこで、金属粗面の表面性状、特に異方性がある不均一な金属面性状の影響を低減し、高精度にエッジ位置変位と高さ変位を計測する手法について示す。

まず、エッジ位置変位計測の高精度化手法について述べる。金属粗面からの散乱反射角特性は図1-8で示した通り、計測位置によって大きく変化するため、できるだけ広い角度で散乱反射光を取り込めるように共焦点方式の対物レンズの取り込みNAを大きく設計する方が良い。また、従来の接触式タッチプローブセンサでは、計測位置に接触させる先端球の大きさは1mm程度が一般的であり、広範囲の位置変位を平均的に計測する。一方、光学式でのエッジ位置変位計測での計測領域は投光スポット径で決まるが、図2-10で示した通り、高精度にエッジ位置変位を計測するためには投光スポット径を小さくする必要がある。このように、投光スポット径が小さいと金属ワークのエッジ位置の微小な欠けや切削痕による凹凸の形状を計測してしまう。そこで、図2-14に示すようにX方向のエッジ位置変位を計測する場合、X方向に L_x 移動し、エッジ位置を横切った後、Y方向に L_y 移動し、再度、X方向にエッジ位置を横切るようにジグザグ走査を行い、得られた複数位置の計測結果を平均することで接触方式と同様に広範囲のエッジ位置変位を平均的に計測する手法を提案する。ここで、本手法を「ジグザグ走査平均方式」と呼ぶ。エッジを横切る回数をn回とす

ると平均化領域 D_Y , つまり計測範囲は以下のように表される。

$$D_Y = \Delta Y \cdot n \quad (2-4)$$

このように、Y 方向のある一定範囲内 D_Y の結果を平均化することで金属面性状の違いによる散乱反射角特性の計測位置に対するばらつきの影響を低減でき、接触方式と同様に広範囲におけるエッジ位置変位を平均的に計測することで高精度なエッジ位置変位計測が可能となる。

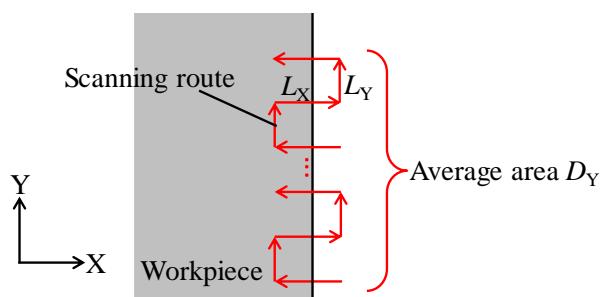


Fig. 2-14 Principle of zigzag scanning averaging method for edge position displacement measurement.

次に、高さ変位計測の高精度化手法について示す。図 1-9 で示した通り、表面性状が不均一な金属粗面上の高さ変位を計測する場合、計測位置によって散乱反射光の角度分布が変化するため、受光スポット形状が計測位置によってばらつき、計測誤差が発生する。そこで、散乱反射光の角度分布変化の影響を低減するため、一つの計測系で多方向から三角測量を行う「多方向三角測量方式」を提案する。多方向三角測量方式の構成を図 2-15 に示す。ワークに対して垂直に投光する計測用レーザ光の反射光を対物レンズで取り込むが、ここでは 4 方向から三角測量を行うための 4 つのレンズを十字に配置するレンズアレイを用いる。対物レンズで取り込んだ散乱反射光は、4 つの開口が十字に配置されるアーチャアレイで 4 つの光線束に分離され、それぞれの光線束は 4 つのレンズからなる結像レンズアレイによってイメージセンサ上の異なる位置に集光される。通常のスポットタイプの三角測量方式では受光素子にリニアイメージセンサを使用するが、本方式では 2 次元イメージセンサを用いることで一つの受光素子上で 4 つの受光スポットを一度に計測できる。このように、多方向三角測量方式では、従来の三角測量方式に対して 4 倍の角度方向から受光した散乱反射光を用いた高さ変位計測が可能であるため、計測位置に対する金属面性状変化の影響を低減し、金属粗面での高精度な高さ変位計測が可能となる。

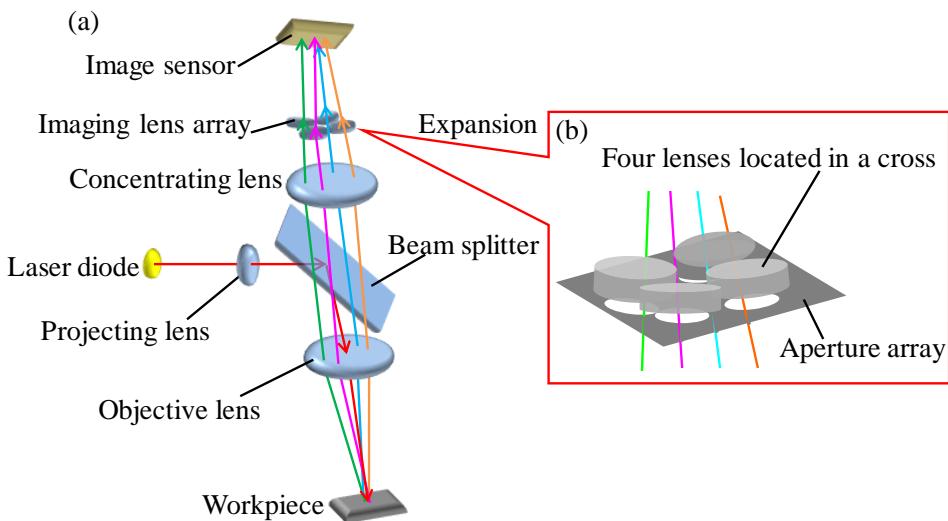


Fig. 2-15. Configuration of height displacement sensor using multi-directional triangulation method.

また、散乱反射光の角度分布変化の影響を低減するための計測手法として「走査露光方式」を提案する。走査露光方式の原理を図 2-16 に示す。表面性状が不均一な金属粗面上の高さ変位を計測する場合、計測位置によって散乱反射光の角度分布が変化するため、複数位置での計測結果の平均化が有効であるが、高さ変位を複数回計測すると計測時間を要する。そこで、イメージセンサの露光時間中にワークに対して光学系全体を走査し、ワーク上の投光ビームの照射位置を走査することで複数位置からの反射光を一度の露光時間中に蓄積し、散乱反射光分布を平均化する。イメージセンサの露光時間を t とし、ステージの移動速度を v とすると、露光時間中のワーク上の移動距離 L_s は以下のように表される。

$$L_s = v \cdot t \quad (2-5)$$

この露光時間中の移動距離 L_s が大きいほど複数位置からの反射光を一度に受光でき、平均する金属粗面上の範囲が広くなるため、高さ変位計測を高精度化できる。本高精度化手法を用いた加工前後のエッジ位置変位計測と高さ変位計測の詳細については、3 章にて詳しく述べる。

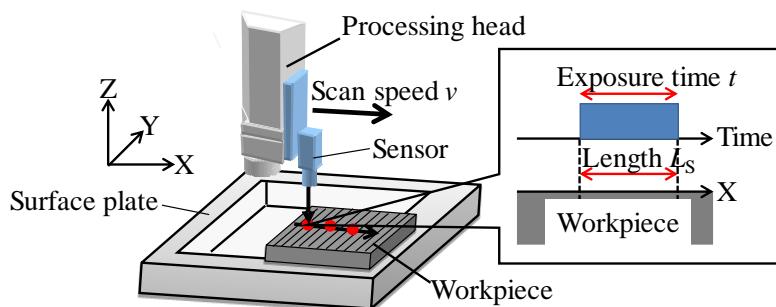


Fig. 2-16. Principle of scanning exposure method.

2.5 加工中のインプロセス機上計測手法

加工中のインプロセス計測では、2.3節で示した三角測量方式の高さ変位計測の基本原理を適用するだけでは2.2節で示した必要な3つの条件を満足できない。そこで、産業用のレーザ熱加工プロセスにおけるレーザ熱加工制御を実現するためのインプロセス機上光学式変位計測手法について示す。

2.5.1 インプロセス機上変位計測の基本原理

レーザ熱加工制御を行うためのインプロセス計測では、加工制御時に近い環境で高さ変位を計測するため、加工位置と計測位置は近い方が良い。そこで、レーザ熱加工と機上光学式変位計測がどちらも光学式であることに着目し、加工ヘッド上部に機上計測機の撮像系を取り付け、加工光学系と同軸で計測するため、加工光学系の対物レンズを計測系と共用する加工位置近傍でのインプロセス計測手法を提案する。加工光学系と同軸で計測する加工位置近傍でのインプロセス機上計測系の構成を図2-17に示す。ここで、加工光学系は、加工用レーザをビームスプリッタでワーク方向に反射し、反射されたレーザ光を対物レンズで集光して金属ワーク上の加工位置に照射する構成とする。高さ変位計測系は、加工ヘッド側面に照明系を、加工ヘッド上部に撮像系を取り付け、加工光学系の対物レンズを共用することで加工光学系と同軸で三角測量方式を用いて高さ変位を計測する。これにより、加工中の機上計測に必要な条件の(1)加工位置近傍の計測と(3)小型で簡便な構成を実現できる。このように、加工光学系と同軸に計測系を配置する構成が、加工ヘッドを挟んで撮像系と照明系を配置する構成や加工ヘッド側面にセンサを配置する構成と比較して、加工位置近傍でのインプロセス計測に最も適している。そのため、市販の光学式変位センサを使用するのではなく、加工ヘッドと一体化した加工光学系と同軸の配置が望まれる。しかし、加工光学系の対物レンズを計測系と共用する場合、計測系の設計は対物レンズの仕様に制限される。例えば、レーザ熱加工を行う加工用レーザの焦点距離が数100mmであることを考慮し、式(2-3)より、必要な高さ変位計測分解能が得られるように撮像系の倍率 M と光軸傾き θ を設計する必要がある。特に撮像系の倍率 M は一般に対物レンズの焦点距離と計測用撮像系の焦点距離の比で決まる。そのため、撮像系は複数枚のレンズを組合せるなど仕様に合わせた設計が必要である。また、レーザ熱加工中の加工位置は金属が溶融しており、加工位置の高さ変位を計測できないため、計測用照明系を加工ヘッドと一体化し、加工光学系の対物レンズを共用する場合、照明系の光軸は対物レンズ中央を通すことができず、レンズ中央から外れた位置を通さなければならない。この場合、ワークに対して垂直に投光ビームを投影するためには、レンズの収差の影響を考慮し、複雑なレンズ設計を行う必要がある。そこで、三角測量方式を用いた加工中計測では、加工ヘッド側面から照明光を照射し、加工ヘッド上に取り付けた撮像系によって加工光学系と同軸で計測する構成が良い。

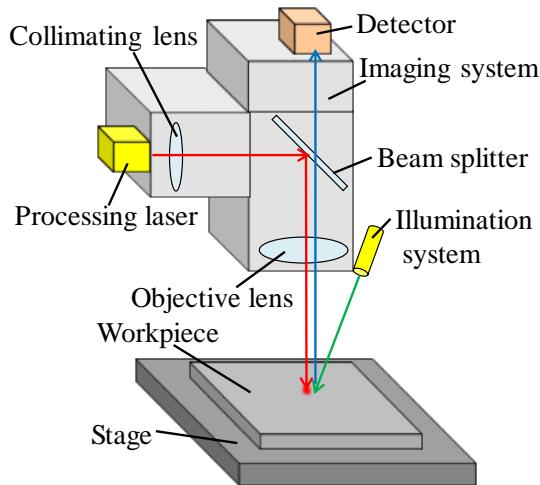


Fig. 2-17. Configuration of an on-machine optical displacement measurement system at near a processing spot for in-process measurement.

一方、1章で述べた通り、レーザ熱加工中には加工位置で加工用レーザの反射光や熱輻射光といった外乱光が発生しており、計測位置が加工位置に近いほど影響が大きい。加工光学系と同軸で計測するインプロセス計測手法では、加工位置で発生する外乱光が対物レンズを通って撮像系内に入射し、計測用受光素子に到達する。その結果、三角測量方式を用いた高さ変位計測では、外乱光により重心計算結果に誤差が生じ、高精度な計測ができない。そこで、加工光学系の対物レンズを共用する同軸配置にて加工位置近傍でのインプロセス計測を実現するため、受光素子上に到達する外乱光を低減する。 CO_2 レーザやファイバーレーザなどレーザ熱加工に用いられる波長が赤外領域に多く、加工位置の温度が1000度程度である場合、広いスペクトルを持つ熱輻射光のピーク波長が一般に赤外領域であることを考慮し、外乱光の影響を低減するためには、計測用照明の波長を赤外領域からできるだけ離れた波長とする方が良い。例えば、一般に使用できる計測用照明波長を考慮すると、波長520 nmや波長450 nmなどの波長帯が良い。計測用受光素子に到達する加工用レーザの反射光と広い波長スペクトルを持つ熱輻射光の強度を低減するため、計測系の撮像系内に計測用照明波長のみを透過するバンドパスフィルタを設置する。これにより、図2-17で示したように加工光学系と同軸で計測する場合にも加工用レーザの反射光や熱輻射光の影響を大幅に低減できる。このように、加工位置近傍で高さ変位を計測するレーザ熱加工中のインプロセス計測手法の詳細については、4章にて詳しく述べる。

2.5.2 加工方向変化に対応した高さ変位計測手法

レーザ熱加工中のインプロセス計測では図2-8に示した通り、加工位置と計測位置が異なるため、加工方向がXY平面内で変化する際に加工経路上の高さ変位を計測できること

がある。そこで、直線状ラインビームの光切断方式を用いた際の加工経路上の高さ変位を計測可能な加工方向を図2-18に示す。ここで、+X方向に加工しており、長手方向がY方向であるラインビームを用いる場合、ラインビーム長さを L_B 、加工位置と計測位置の距離を D とすると、インプロセス高さ変位計測が可能な加工方向 ϕ_C は、以下のように表される。

$$\Phi_C = \tan^{-1}(L_B/D) \quad (2-6)$$

このように、ラインビーム長さ L_B を長くし、加工位置と計測位置の距離 D を近くするほど計測可能な加工方向の角度範囲は広くなるが、加工方向がX軸から離れるほど加工方向に対して直線状ラインビームが垂直ではなくなるため、計測精度は低下する。また、加工位置に対してラインビームが投影されている+X方向を0度方向とすると、原理的に±90度方向は計測できないため、計測可能な加工方向には限界がある。このように、直線状ラインビームを用いた光切断方式では、基本的には+X方向付近しかインプロセス計測ができない。

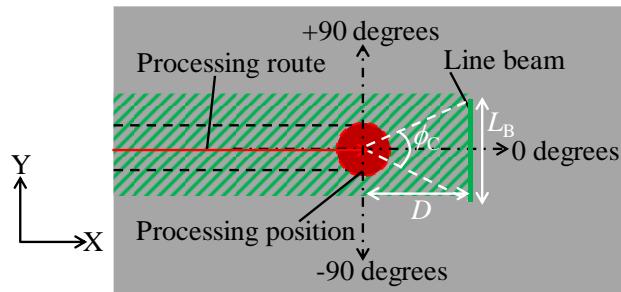


Fig. 2-18. Measurement direction restriction of light section method using straight line beam.

そこで、レーザ熱加工中に加工方向が変化する際の高さ変位計測を実現するため、機上計測では計測用ラインビームが加工位置と一緒に移動することに着目し、図2-19に示すように加工位置の周囲を取り囲むようにラインビームを投影する手法を提案する。本手法により、加工方向が変化しても常に加工経路上の高さ変位計測が可能となる。加工位置を円形に取り囲むことができれば、加工方向によらず加工位置から一定の距離での高さ変位を計測できるが、三角測量方式を用いる場合、撮像系の光軸に対して同心円状に中心に向かって傾けてラインビームを照射する必要があるため、複雑な光学系が必要となり機上計測には向きである。そこで、機上計測に要求される小型で簡便な構成と簡単な演算処理を実現するため、交差した2本のラインビームを用いる高さ変位計測手法を提案する。ここで、本方式を「交差ラインビーム光切断方式」と呼ぶ。交差ラインビーム光切断方式の構成を図2-20に示す。加工ヘッド側面(+X方向)に2つのラインレーザを取り付け、ワーク上に交差ラインビームを照射することでXY平面において-Y方向から+X方向、+Y方向までの±90度方向の加工経路上にラインビームを照射できる。図2-20に示すように、+X方向に加工しており、+Y方向に加工方向を変更する際にも常に加工経路上の高さ変位を計測できる。また、交差ラインビームを+X方向からXZ平面内で傾けて照射するため、加工方向によらず従来

の三角測量と同様の重心計算処理で高さ変位を算出できるため、複雑な演算処理も不要である。このように、交差ラインビーム光切断方式では、従来の直線状ラインビームを用いた光切断方式に対してラインレーザを一つ追加するだけの簡単な構成でインプロセス計測可能な加工方向を±90度方向まで拡大できる。また、加工ヘッドと一体化した一つの撮像系に対して-X方向からも同様に交差ラインビームを照射することで加工位置を取り囲むようにラインビームを照射でき、360度全ての加工方向に対して加工経路上の高さ変位を計測できる。本手法の詳細については、5章にて詳しく述べる。

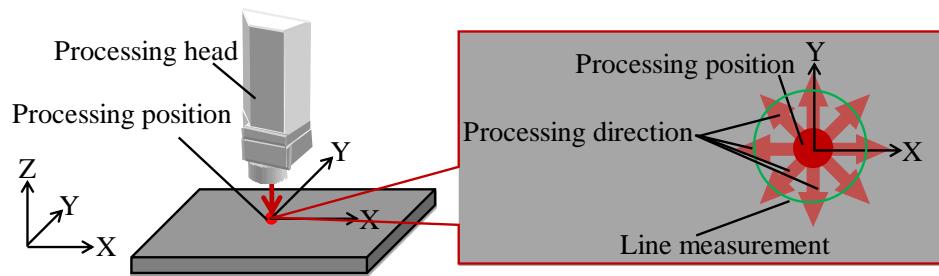


Fig. 2-19. Measurement principle when changing processing direction.

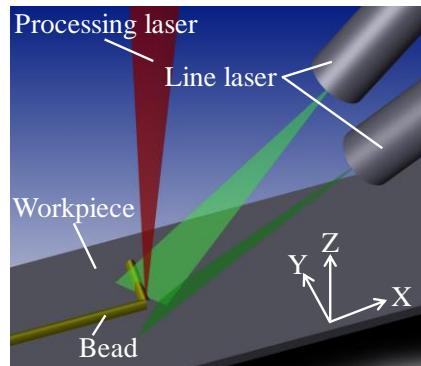


Fig. 2-20. Configuration of line section method using crossed line beams.

2.6 結言

本章では、レーザ熱加工制御のための光学式変位計測技術を用いた機上計測手法について述べた。レーザ熱加工プロセスを自動化するための機上光学式変位計測システムとその特徴について述べ、加工前後と加工中に計測すべき3次元位置変位量を示した。また、共焦点方式を用いたエッジ位置変位計測と三角測量方式を用いた高さ変位計測の原理について述べた。加工前後、加工中それぞれの機上計測に必要な特徴を以下の通りまとめた。

加工前後の機上計測

- (1) 段取り精度や加工精度を評価するため、表面性状が不均一な金属粗面の高精度計測
- (2) 計測時間短縮のため、高速計測
- (3) 加工機上に設置するため、小型で簡便な構成

加工中の機上計測

- (1) 加工制御時と近い加工環境で計測するため、加工位置近傍での計測
- (2) 加工方向が自由に変化するため、加工方向変化に対応した計測手法
- (3) 加工機上に設置するため、小型で簡便な構成

加工前後の機上計測では、表面性状が不均一な金属粗面を高精度に計測する手法としてエッジ位置変位計測には「ジグザグ走査平均方式」、高さ変位計測には「多方向三角測量方式」と「走査露光方式」を提案した。また、加工中のインプロセス計測では、加工制御時に近い環境である加工位置近傍での高さ変位計測手法として、加工ヘッド上部に機上計測機の撮像系を取り付け、加工光学系の対物レンズを計測系と共にすることで加工光学系と同軸で計測する手法を提案した。レーザ熱加工と機上光学式変位計測がどちらも光学式であるため実現できる構成であり、加工ヘッドと一体化することで小型化を実現した。また、加工光学系と同軸で加工位置近傍での高さ変位を計測する際に計測用の撮像系に入射する加工用レーザの反射光や熱輻射光による外乱光の影響を低減する方式を示した。さらに、加工方向が変化する際にも常に加工経路上の高さ変位を計測するため、加工位置の周囲を取り囲むようにラインビームを投影する方式を提案した。機上計測に要求される小型で簡便な構成と簡単な演算処理を考慮し、2本のラインビームを交差した照明光を用いることで加工位置に対して±90度方向の加工経路上の高さ変位を計測できる「交差ラインビーム光切断方式」の構成について述べた。

これらの光学式変位計測技術を用いた機上計測手法により、レーザ熱加工プロセス全体の自動化を行うとともに、高速・高精度な加工前後の加工精度計測が可能となり、レーザ熱加工中のインプロセス計測によるレーザ熱加工制御が実現可能になる。提案した機上光学式変位計測システムの基本原理はレーザ熱加工を行う産業用レーザ加工機全般へ適用でき、特にZ方向の走査を伴う3次元レーザ加工や造形加工の加工精度向上が期待される。

第3章 加工前後における金属粗面の高精度機上変位計測

3.1 緒言

2章では、レーザ熱加工プロセスにおける機上光学式変位計測について、加工前後の計測と加工中の計測に大きく分けられることについて述べた。本章ではレーザ熱加工制御のために、加工前後の変位計測を高速・高精度に行う光学式変位計測手法について述べる。2章で述べた通り、加工前後の変位計測における最大の課題は、表面性状が不均一な金属粗面の位置変位や高さ変位を接触方式と同等精度で高精度に計測することである。特に、三角測量方式を用いた高さ変位計測では計測位置による表面性状の違いによって高精度な計測が難しいことが知られており、金属粗面の影響を低減する計測手法が求められる。

本章では、まず、加工前後に表面性状が不均一な金属粗面を高精度に計測するためのエッジ位置変位計測と高さ変位計測が可能な機上光学式変位計測システムの構成を示す。次に、共焦点方式を用いた位置変位計測システムを用いて、欠けのある金属ワークのエッジ位置を高精度に計測するジグザグ走査平均方式について述べ、不均一な表面性状の影響を受けずに金属粗面の高さ変位を高精度に計測するための多方向三角測量方式と走査露光方式について述べる。最後に、機上に取り付けた高さ変位計測システムによる金属ワークのたわみ計測結果をダイヤルゲージと比較し、本構成により接触方式と同等精度での計測が可能となることを明らかにする。

3.2 加工前後の機上光学式変位計測システムの構成

加工前後の変位計測では、2.4節で示した通り、レーザ熱加工に使用される金属ワークを接触方式と同等精度で高精度に計測する必要がある。そこで、レーザ熱加工前後のエッジ位置変位計測と高さ変位計測を行う機上光学式変位計測システムの構成を図3-1に示す。図3-1(a)に示す変位計測システムは、2.3節で述べた共焦点方式のエッジ位置変位計測部と金属粗面を高精度に計測する多方向三角測量方式を用いた高さ変位計測部から構成される。スポット光を計測対象物上に照射する投光部は、エッジ位置変位計測と高さ変位計測で共用する。また、加工前後の機上計測では、レーザ熱加工とは独立した計測が可能であるため、本章では加工ヘッド側面に機上光学式変位計測システムを取り付ける構成について示す。

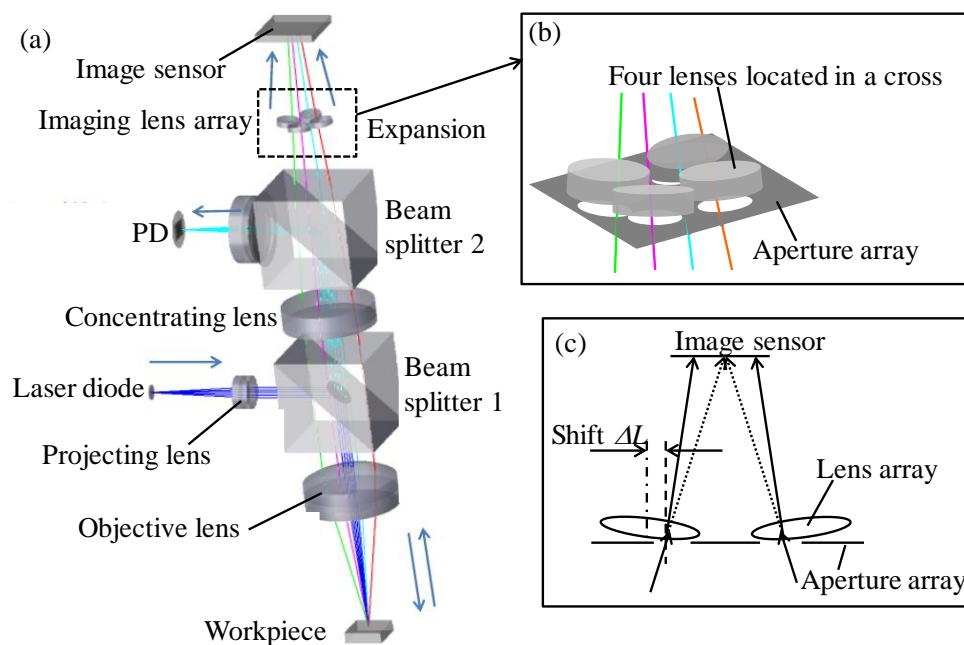


Fig. 3-1. Configuration of on-machine optical displacement sensor for pre- and post-process: (a) 3D construction of multi-directional triangulation height displacement measurement and edge position displacement measurement, (b) enlarged view of lens array and (c) a cross section of lens array.

3.2.1 投光光学系

投光光学系は、半導体レーザ光(波長 650 nm)を投光レンズで平行光とし、ビームスプリッタ 1 を用いてワーク方向へ反射する。投光スポットの強度分布の設計結果と実測結果を図 3-2 に示す。設計結果は光線追跡シミュレータにより計算した結果であり、実測結果はビームプロファイラでの計測結果を示した。一般に市販の三角測量方式の高さ変位センサでは表面性状の影響を低減するため、投光スポットサイズを 100 μm 以上と大きく設計されている。しかし、本構成では、エッジ位置変位計測と高さ変位計測で同じスポット光を使用するため、図 2-10 に示した通り、スポット径が大きい場合、エッジ位置変位計測の空間分解能が低下する。したがって、本構成では、後に示す多方向三角測量方式と走査露光方式により高さ変位計測への不均一な金属面性状の影響を低減する。2.4 節で示したように加工対象物である金属ワーク上面の加工痕による凹凸形状は 2~3 μm ピッチであるため、対物レンズを通してワーク上面に集光されるスポット径($1/e^2$ 全幅)は、ワーク上の集光スポットが凹凸 2 つ程度を含むように 5.5 μm と設計した。しかし、実測では組立誤差により、スポット径が約 10.0 μm と大きかった。また、投光スポットの焦点位置からの距離を変えてスポット径を計測し、焦点深度を計測した結果を図 3-3 に示す。スポット径が変化しない焦点深度は土 60 μm であるため、計測時にはこの範囲での焦点位置の調整が望まれるが、高精度な位置決め精度である加工機のステージを使用できる機上計測においては十分可能である。

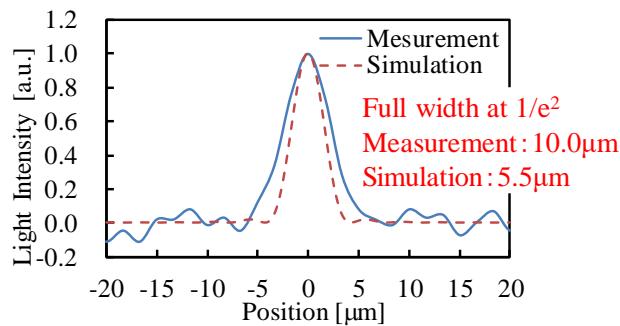


Fig. 3-2. Simulation and measurement result of projection spot.

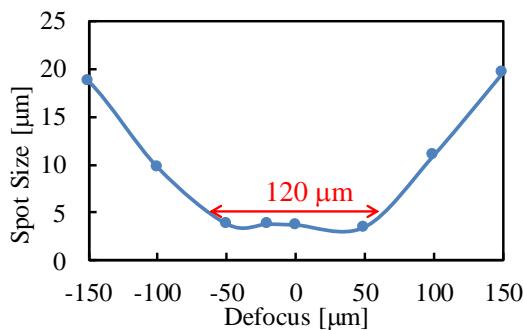


Fig. 3-3. Depth of focus measurement result of projection spot.

3.2.2 エッジ位置変位計測光学系

エッジ位置変位計測部は、共焦点方式により計測位置に対する金属ワークに投光されたスポット光の散乱反射光強度変化からエッジ位置変位を計測する。図3-1に示すように、金属ワークからの散乱反射光を対物レンズで取り込み、ビームスプリッタ1を透過した光を集め光レンズで集光し、ビームスプリッタ2で高さ変位計測を行う光線とエッジ位置計測を行う光線に分離する。ビームスプリッタ2で折り返された光線は、エッジ位置変位計測のためにフォトダイオード上に集光される。図2-8に示した通り、例えば、X方向に高さが急激に変化するエッジ位置がある場合、金属ワークに対して図3-1に示す機上計測システムの位置をX方向に走査する。その結果、得られる反射光強度は、ワーク上部に計測システムがある場合は反射光を受光できるが、エッジ位置を横切り、ワーク高さが計測システムの焦点位置から離れる領域では反射光が得られないため、反射光強度が急激に低下する。このように、得られる反射光強度変化によりエッジ位置計測が可能となる。しかし、金属粗面からの散乱反射角特性は2.4節で示した通り、計測位置に対するばらつきが大きい。そのため、できるだけ広い角度で散乱反射光を取り込めるよう本システムでは取り込み角度±15.8°、取り込みNA=0.273と設計した。エッジ計測の詳細は、3.3節で詳しく述べる。

3.2.3 高さ変位計測光学系

高さ変位計測部は、不均一な金属面性状の影響を低減するため、一つのセンサで多方向から三角測量を行う多方向三角測量方式を提案する。計測位置によって散乱反射角特性が異なる金属粗面では、一般的な三角測量方式のように一方向から計測するだけでは計測誤差が発生する。そこで、本方式では、金属ワークに対して垂直に投光するスポット光に対して斜めに傾いた4方向から三角測量を行う。図3-1(b)に4方向から三角測量を行うためのレンズアレイを示す。金属ワークからの散乱反射光のうち、ビームスプリッタ2を透過する光線は、4つの開口を十字に配置するアーチャアレイによって4つの光線束に分離され、それぞれの光線束は、4つのレンズからなる結像レンズアレイによってイメージセンサ上の異なる位置に集光される。ここで、図3-1(c)に示すようにアーチャアレイで分離された光線束の光軸に対して4つの結像レンズの中心軸を外側に ΔL シフトさせて配置することで、光線を外側に偏向し、イメージセンサ上でそれぞれ異なる位置に結像する。イメージセンサ上の4つのスポットの概略図とスポットの断面強度分布を図3-4に示す。通常のスポットタイプの三角測量方式では受光素子にリニアイメージセンサを使用するが、本方式では、図3-1(c)に示すように4方向から三角測量を行い、4つの受光スポットの投影位置を計測する必要があるため、2次元イメージセンサを使用する。イメージセンサ上の4つのスポットが十分離れた位置となるよう4つの結像レンズの中心軸からのシフト量 $\Delta L = 1.15 \text{ mm}$ と設計し、スポットAとD、またスポットBとDの間の距離は3.3 mmとした。また、各イメージセンサ上のスポット断面分布を図3-4(b)に示す。 $1/e^2$ 全幅は11 μm であり、使用するイメージセンサは、画素サイズ1.67 μm 、3840×2748 pixelであるため、スポットサイズは6.6 pixelとなる。これは、高さ変位計算時にスポット位置をサブピクセルで重心計算するためには十分な大きさである。多方向三角測量方式による高さ変位計測の詳細は3.4節で詳しく述べる。このように、レーザ熱加工前後のエッジ位置変位計測と高さ変位計測のための金属粗面を高精度に計測する機上光学式変位計測システムの構成について示した。次節以降、それ各自的詳細について示す。

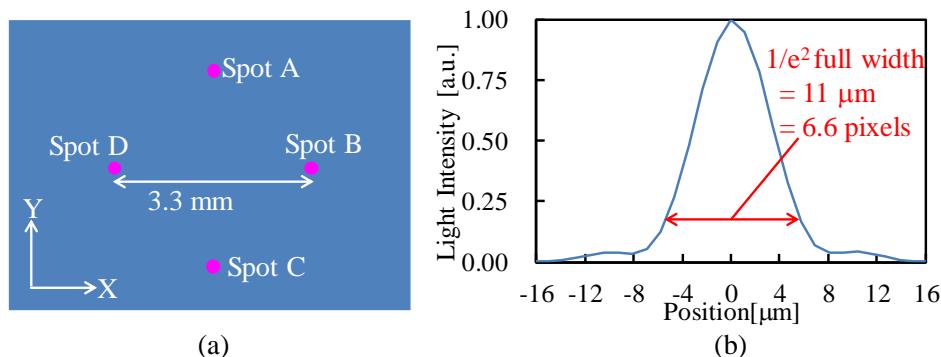


Fig. 3-4. Four spots on an image sensor of multi-directional triangulation height displacement method: (a) illustration of four spots on an image sensor and (b) a cross section of a detected spot.

3.3 エッジ位置変位計測

本節では、3.2節で示した加工前後の光学式変位計測システムを用いたエッジ位置変位計測について詳しく述べる。金属ワークのエッジ位置を横切った際の反射光強度の変化を計測し、高精度にエッジ位置変位を計測するため、少しずつ異なる位置のエッジを複数回ジグザグ走査により横切って取得した結果を平均化するジグザグ走査平均方式について示す。また、実際の金属ワークのエッジ形状と反射光強度変化との関係を実験的に評価し、高精度にエッジ位置を計測した結果について述べる。

3.3.1 反射光強度変化を用いたエッジ位置変位計測結果

計測対象である金属ワークのエッジ位置は、バリや欠けなどによって理想的な垂直形状ではない。そこで、エッジ形状と反射光強度変化の関係を確認するため、反射光強度を計測したエッジ位置の形状を顕微鏡で観察した。エッジ位置の顕微鏡写真と反射光強度の計測結果を図3-5に示す。Y方向に0.01 mmずつ移動させ、X方向に0.1 mmの範囲を移動させながら金属ワークからの反射光強度を計測した。図3-5(a)と(b)はそれぞれY方向の異なる位置での計測結果を示した。顕微鏡写真が示すように金属ワークのエッジ位置は計測位置によって局所的に5 μm程度の微小な欠けがあった。そのため、計測するY方向位置によって反射光強度が得られ始めるX方向位置が異なっていた。例えば、図3-5(a)の場合、Y=0.01 mmとY=0.02 mmの位置は欠けがあるため、反射光が得られる位置が+X方向にシフトしていた。また、図3-5(b)では、Y=0.02 mmより+Y方向側の位置では欠けにより、反射光が得られ始める位置が+X方向にシフトしていた。

反射光強度が得られるX方向位置から+X方向側と-X方向側に金属ワークがあるエッジ位置をY方向に0.01 mmピッチで計測し、顕微鏡での上面写真と比較した結果を図3-6に示す。計測したエッジ位置の結果を顕微鏡写真に重ねた結果、金属ワーク上面の局所的なバリや欠けの形状によるエッジ位置変位を計測可能であることを明らかにした。

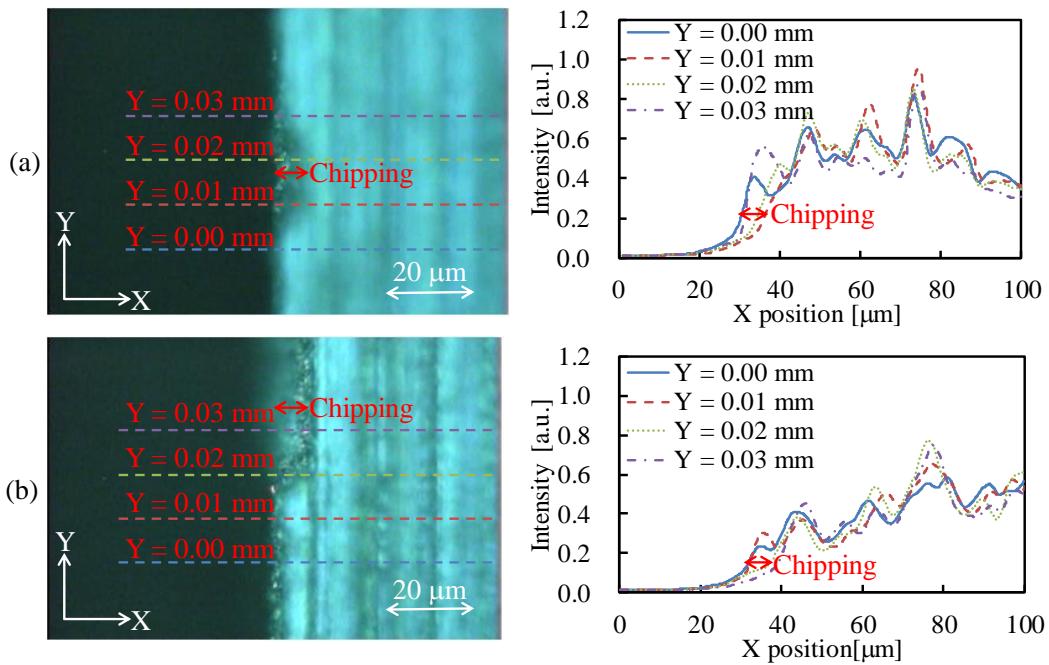


Fig. 3-5. Microscope images and reflected light intensity distribution at edge position with chipping:
(a) measurement position 1 and (b) measurement position 2.

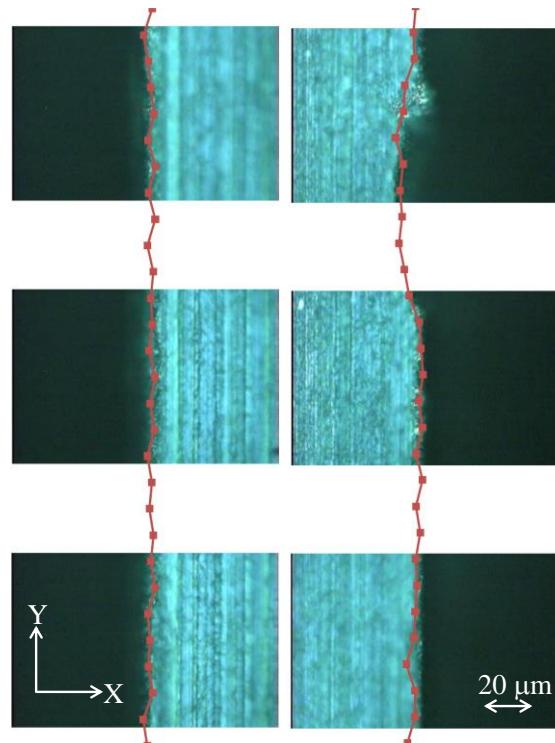


Fig. 3-6. Comparison between edge position measurement results and microscope images of a metal work.

3.3.2 側面エッジ位置計測

エッジ位置を横切る際の反射光強度変化からエッジ位置変位を計測すると、ワーク上方から計測するため、バリや欠けの形状を計測可能であることを明らかにした。しかし、実際に計測する必要があるエッジ位置は欠けがある上面部ではなく、基準位置となるワーク側面部のエッジ位置である。そこで、顕微鏡の焦点を変えてエッジ位置を観察した結果を図3-7に示す。顕微鏡の焦点を金属ワーク上面に合わせた場合にワーク表面には欠け形状が見られたが、顕微鏡の焦点を $5\text{ }\mu\text{m}$ ずらすと側面に相当するエッジ位置が観察された。このように、真に計測すべきは側面エッジ位置であるが、3.3.1節ではワーク上面からの反射光強度が得られる計測用レーザ出力で計測したため、側面エッジ位置からの信号光が得られていなかったと考えられる。そこで、計測用レーザ出力を変えて同一のエッジ位置からの反射光強度分布を計測した結果を図3-8に示す。計測用レーザ出力を増加させるとワーク上面からの反射光強度は飽和するが、段差側面となるエッジ位置からの反射光強度が強くなり、エッジ部での強度変化が大きく垂直に近くなった。これは計測用レーザ出力が小さかった場合に対してエッジ部の信号波形を拡大していることに等しい。計測用レーザ出力 1.225 mW 以上では反射光強度が得られ始めるX方向位置が変わらず、側面エッジ位置からの反射光を計測可能となった。このように計測用レーザ出力を増加させ、側面エッジ位置からの反射光を得ることで接触方式と同様に側面エッジ位置変位を計測可能であることを明らかにした。

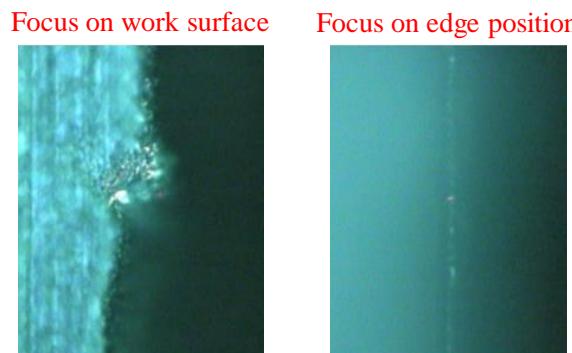


Fig. 3-7. Microscope image of edge position at different focus position.

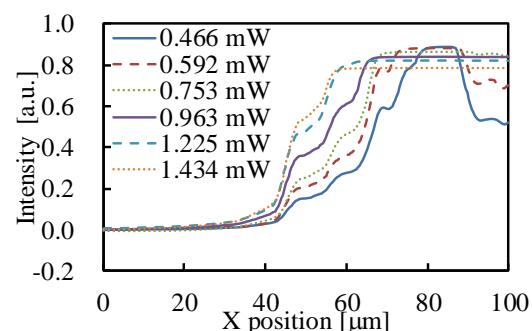


Fig. 3-8. Measurement result of reflected light intensity distribution by laser power.

3.3.3 ジグザグ走査平均方式

エッジ位置を高精度に計測するためのジグザグ走査平均化方式の詳細について示す。図 2-14 に示したように X 方向に L_X 移動し、エッジ位置を横切った後、Y 方向に L_Y 移動し、再度、X 方向に横切るジグザグ走査を行い、得られた複数位置の計測結果を平均化する。そこで、平均化を行うためのジグザグ走査条件の最適化を行った。一般に接触式タッチプローブセンサの先端球は $\phi 1 \text{ mm}$ 程度と大きいため、本システムでも 1 mm の範囲をジグザグ走査し、平均化を行う。その際の Y 方向の移動量 ΔY と走査速度を変えたエッジ計測評価の条件を表 3-1 に示す。本実験では $L_X = 50 \mu\text{m}$ 、Y 方向の総移動量 $D_Y = 1 \text{ mm}$ とし、ワーク側面が Y 方向と平行になり、6 点のエッジ位置が等しくなるよう事前にダイヤルゲージ(分解能 $\pm 1 \mu\text{m}$)で調整した。Y 方向の異なるエッジ位置を 6 点計測し、各計測点での計測ばらつき P-P(Peak to Peak)を計測した結果を図 3-9 に示す。まず、走査速度 6 mm/min とし、Y 方向の移動量 $L_Y = 100 \mu\text{m}$ (平均化回数 $n = 10$ 回)とした条件 No. 1 と $L_Y = 50 \mu\text{m}$ (平均化回数 $n = 20$ 回)とした条件 No. 2 では、どちらも計測ばらつきが $\pm 1 \mu\text{m}$ 以内であり、平均化回数は 10 回で十分である。また、走査速度を 20 mm/min とした場合、計測のばらつきが増加した。これは X 方向の計測ピッチが $0.35 \mu\text{m}$ から $1.2 \mu\text{m}$ に大きくなり、空間分解能が低下したためである。そのため、走査速度は 6 mm/min とする必要がある。ここで、走査速度 6 mm/min とする場合、条件 No. 1において Y 方向に平均を 10 回行った 1 点当たりの計測時間は約 15 秒であった。一般にタッチプローブセンサの計測時間が 1 点当たり 20 秒程度であるため、走査速度は 6 mm/min としてもタッチプローブセンサより高速計測が可能である。また、タッチプローブセンサでは先端球を押し当てるが、計測位置間を移動する場合は Z 方向に上昇させワークに接触しないよう退避する必要がある。一方、本構成ではワーク上方から非接触で計測可能であるため、上下方向の移動は必要なく、水平方向の移動のみで良い。そのため、複数のエッジ位置を計測する場合の総計測時間においても本機上計測システムを用いることで大幅に短縮でき、生産性を向上できる。

Table 3-1. Experiment parameters for edge position displacement measurement.

Parameter	No. 1	No. 2	No. 3
Speed [mm/min]	6	6	20
Measurement pitch [mm]	0.35	0.35	1.2
Count n	10	20	10
$L_X [\mu\text{m}]$	50	50	50
$L_Y [\mu\text{m}]$	100	50	100
Average area $D_Y [\text{mm}]$	1000	1000	1000
P-P [mm]	0.95	1.40	3.00

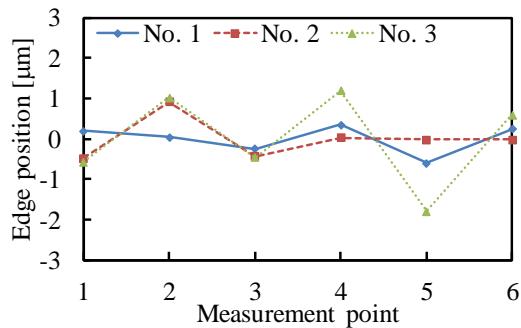


Fig. 3-9. Edge position displacement measurement result by averaging parameters. Experiment parameters are shown in Table 3-1.

3.4 多方向三角測量方式

本節では、3.2節で示した加工前後の機上高さ変位計測システムを用いて表面性状が不均一な金属粗面の高さ変位を高精度に計測する多方向三角測量方式について詳しく述べる。金属粗面上の計測位置によって変化する散乱反射角度分布の影響を低減するため、4方向から三角測量による高さ変位計測を行う。まず、4方向から三角測量を行う多方向三角測量方式の計測原理について示し、1方向から三角測量を行う場合と4方向から三角測量を行う場合の計測精度について実験的に評価した結果を示す。

3.4.1 多方向三角測量方式の計測原理

図3-1に示した多方向三角測量方式を用いた機上高さ変位計測システムの高さ計測原理について述べる。まず、機上計測システムと金属ワーク間の距離が変化する際のイメージセンサ上のスポット像を図3-10に示す。三角測量の原理によって、センサからワークまでの距離が変化すると、ワークからの反射角度が変化し、4つの結像レンズに入射する光線束のイメージセンサ上での集光位置が面内で移動する。ワークが計測システムに近づくと図3-10(a)に示すように4つのスポット像の位置が外側に移動し、ワークが遠ざかると図3-10(c)に示すように4つのスポット像の位置が内側に移動する。したがって、イメージセンサ上の4つのスポット像の移動量から機上計測システムの基準高さに対する変位量を算出可能である。ここで、基準高さを機上計測システムの焦点位置とし、スポット位置はイメージセンサ上のスポットの輝度重心位置とする。スポットAとCは高さが変化するスポット位置がY方に移動するためY方向に対する輝度重心位置を計算し、スポットBとDはX方向に対する輝度重心位置を計算する。ワークの焦点位置からの高さ変位量 ΔZ に対するイメージセンサ上のスポット移動量 $\Delta X'$ は、高さ変位量 ΔZ が対物レンズの焦点距離に対して十分小さい時、2.3節で示した通り、三角測量の原理により以下の近似式で表わされる。

$$\Delta X' = S \cdot \Delta Z$$

$$S = M \cdot \tan \theta \quad (3-1)$$

ここで、 M は光学系の横倍率、 θ は投光スポットの光軸に対する受光光学系の光軸傾き、 ΔZ はワークの焦点位置からの高さ変位量を示し、 S を高さ変位計測感度とする。ここでは、目標精度±1 μmを計測するため、 $M = 1.35$ 、 $\theta = 10.6$ 度と設計し、目標精度±1 μmの高さ変位に相当するイメージセンサ上のスポット移動量 $\Delta X'$ は0.25 μmすなわち0.15 pixelとした。

4つのスポット重心位置からワークの変位量を演算する方法について、図3-10(b)の4つのスポット像A~Dを用いて説明する。まず、4つのスポット像の輝度重心位置 $P(X_i, Y_i)$ 、 $i = A \sim D$ を計算する。次に、XとY方向の対向する2つのスポット像の輝度重心間の距離 X_L 、 Y_L をそれぞれ算出する。

$$X_L = X_B - X_D \quad (3-2)$$

$$Y_L = Y_C - Y_A \quad (3-3)$$

算出したXとY方向の輝度重心間距離 X_L と Y_L の平均値 L_{ave} と式(3-1)で示した感度 S からワークの変位量 ΔZ を算出する。

$$\Delta Z = L_{ave} / 2S \quad (3-4)$$

このように、4方向から三角測量により算出した輝度重心位置の変化を平均することで不均一な金属面性状による散乱反射角度特性のばらつきの影響を低減する。

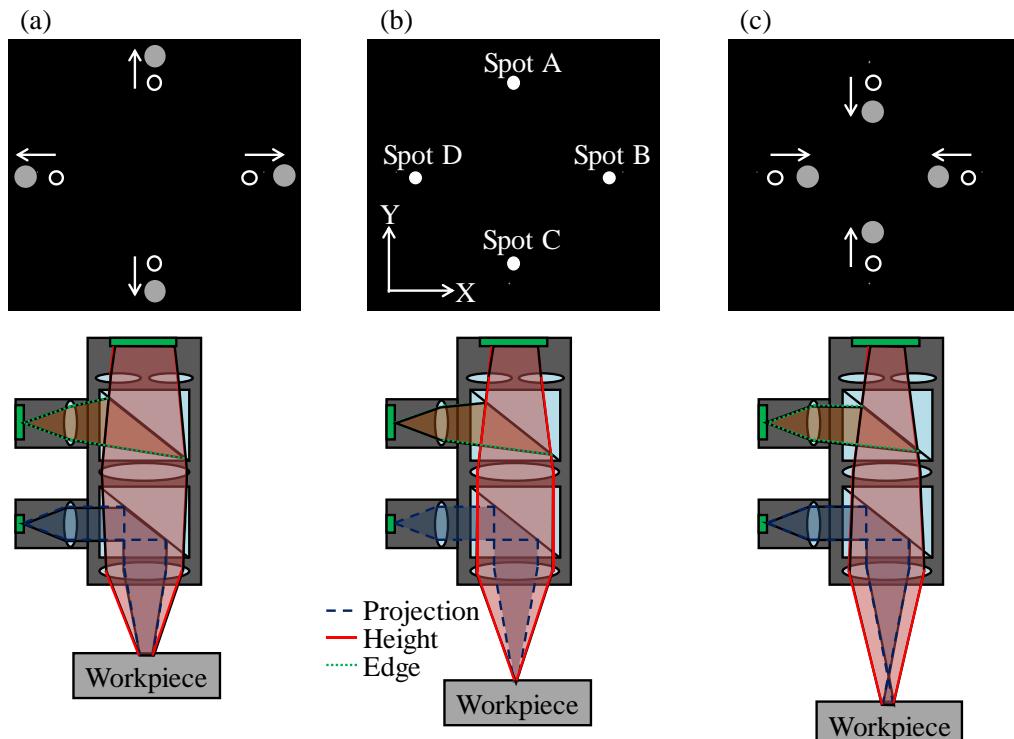


Fig. 3-10. Illustration of the spot images on an image sensor: (a) when the workpiece approaches the sensor, (b) when the workpiece is at a focused position of the sensor and (c) when the workpiece moves away from the sensor.

3.4.2 多方向三角測量方式を用いた高さ変位計測実験

図3-1に示した多方向三角測量方式の試作機を用いて、計測システムとワークの距離を変えた場合のイメージセンサ上のスポット画像を測定した結果を図3-11(a)と(b)に示す。これらスポット像は図3-10に示した4つのスポット像の内、図3-11(a)が上下のスポット像AとCであり、図3-11(b)が左右のスポット像BとDである。ワークが近づいた場合には各スポット像の位置が中心から離れる方向にシフトし、ワークが遠ざかった場合には中心に近づく方向にシフトしており、ワークの高さ変位に対して設計通り4つのスポット位置が変位した。また、ワークの高さ変位量に対する4つのスポット移動量の平均値を図3-11(c)に示す。式(3-4)で示した各スポットの高さ変位に応じて重心位置が変化する方向の重心計算結果の平均値 L_{ave} はワーク変位量±50 μmの範囲では設計値と一致した。しかし、ワーク変位±50 μm以上、特に+50 μm以上で設計値通りにならなかった理由として、図3-3に示した通り、投光スポットの焦点深度外となつたことが考えられる。ワーク変位が±50 μm以上では投光スポット径が大きくなるため、受光スポット径がボケて大きくなり、スポット重心計算結果に誤差が発生した。一方、各スポットの高さ変位に応じて重心位置が変化しない方向の重心計算結果の平均値 P_{ave} は設計通り、機上計測システムとワークの距離が変化してもスポット位置が変化しなかつた。

次に、4方向から三角測量を行うことで、金属粗面に対する高さ変位計測誤差を低減できるか評価を実施した。計測面が研削面である金属ワークを事前に水平となるようダイヤルゲージ(分解能±1 μm)で段取りし、4つのスポット像を使用した場合と1つのスポット像のみを使用した場合のワーク上の位置に対する変位量の計測結果を図3-12に示す。また、計測距離100 mm(10 mmピッチ)内での計測ばらつきPPを表3-2に示す。1つのスポット像の輝度重心位置の変化から変位計測した場合に対して、4つのスポット像を使用することで計測ばらつきの低減を実現できる。したがって、提案した多方向三角測量光学系が、表面性状が不均一な金属粗面での高さ変位計測精度の向上に効果があることを明らかにした。しかし、4つのスポット像を使用した場合でも計測ばらつき±8 μmであり、目標精度である接触式センサと同等の±1 μmを達成するためには、計測ばらつきをさらに1/10に低減する必要がある。そこで、次節にて本機上計測システムを用いて不均一な金属面性状の影響をさらに低減するための走査露光方式について示す。

Table 3-2. Peak to peak value of height displacement result by used detected spot's number. Peak to peak value is estimated within 100-mm measurement position (10-mm pitch).

	Spot A-D	Spot A	Spot B	Spot C	Spot D
Peak to peak [μm]	16.5	34.5	28.0	50.0	51.3

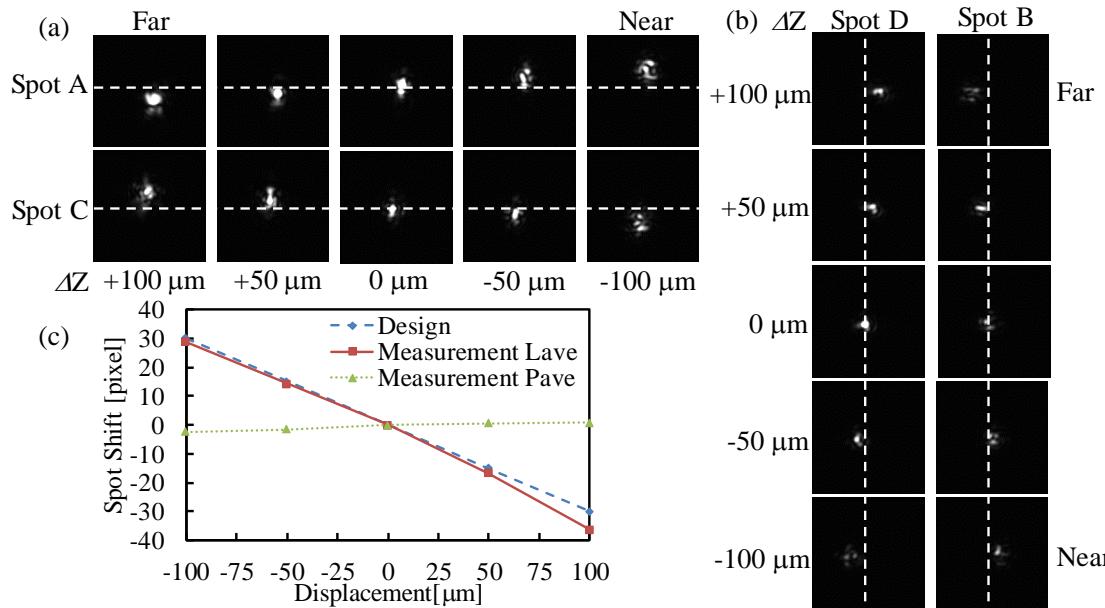


Fig. 3-11. Spot images on the image sensor and the spot's shift when the distance between the sensor and the workpiece changes; (a) spot images of “Spot A” and “Spot C” shown in Fig. 3-10; (b) spot images of “Spot B” and “Spot D” shown in Fig. 3-10; and (c) comparison between design and measurement results of average distance L_{ave} , and measurement results of P_{ave} .

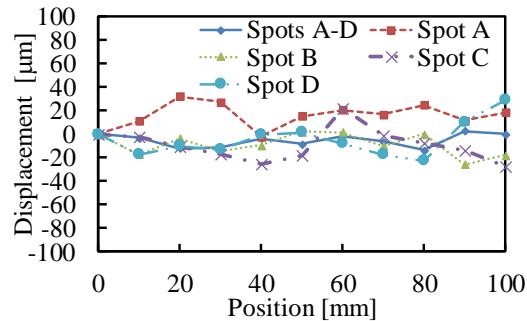


Fig. 3-12. Height displacement result by the measurement position when using four spots and only one spot.

3.5 走査露光方式

一般の三角測量方式の変位センサは投光スポット径を $100 \mu\text{m}$ 以上と大きくすることで、広い計測エリアからの反射光を受光し、計測エリア内の結果を平均化することで不均一な金属面性状の影響を低減している。しかし、本システムでは投光ビームをエッジ位置変位計測と高さ変位計測で併用するため、投光スポット径を小さくする必要がある。また、複数位置で計測した結果を平均化する方法もあるが、計測時間の増加を伴う。そこで、本節では計測時間の増加を伴わず、複数位置からの反射光を平均化する計測手法について示す。

3.5.1 走査露光方式の計測原理

走査露光方式は、図2-16で示した通り、イメージセンサの露光時間中にワークに対して機上計測システムを走査し、ワーク上の投光ビームの照射位置を変えることで複数位置からの反射光を一度の露光時間中に蓄積する。レーザ加工機などの工作機械上での機上計測では、機上に取り付けた計測機に対して加工ステージ上の金属ワークを相対的に走査することは容易である。その結果、得られる受光スポット像の断面分布は複数位置からの反射光を積分した形状となるため、金属粗面からの反射光が平均化されたスポット像を得ることができる。このように、走査露光方式を用いれば、金属粗面上の異なる位置を計測してもスポット重心位置のばらつきを低減できるため、三角測量方式による表面性状が不均一な金属粗面の高精度な高さ変位計測を実現できる。

しかし、研削面などの金属ワーク表面には2.4節に示したように異方性を持った加工痕がある。異方性がある表面性状の金属粗面を計測する場合、加工痕の並び方向が加工機上のどの方向に設置されるか分からぬ。そこで、加工痕の並び方向に対する走査方向の影響を評価するため、露光時間 $t = 10 \text{ msec}$ 、走査速度 $v = 1000 \text{ mm/min}$ とし、図3-1に示した多方向三角測量光学系を用いて、直線走査しながら異方性のある加工痕を横切るように走査した場合と加工痕と平行に走査した場合の高さ変位計測結果を図3-13に示す。また、比較のために、走査露光方式を使用せず、各計測位置で停止させた結果も示した。事前に金属ワークが水平になるよう段取りしたが、停止測定では $10 \mu\text{m}$ 以上の計測ばらつきが生じた。一方、走査露光方式を使用することで、停止測定に対して計測ばらつきの低減を実現できる。特に、加工痕と水平方向に走査した図3-13(b)の場合に対して加工痕を横切るように走査した図3-13(a)の方が高精度な計測が可能となった。これはイメージセンサの露光時間中に複数の加工痕からの反射光を受光することで不均一な金属面性状による散乱反射角特性のばらつきを平均可能なものである。走査露光方式の効果を検証するため、イメージセンサ上のスポットを撮影した結果を表3-3に示す。図3-1で示した多方向三角測量方式の4つのスポットのうち、スポットDの結果を示した。停止した場合と加工痕に平行なY方向に走査した場合には、計測位置によってスポット像の形状が大きく変化した。一方、加工痕を横切る方向に走査した場合は、異なる位置を計測してもスポット像の形状変化が見られず、スポット像の重心計算結果のばらつきが低減され、高精度な高さ変位計測が可能となった。このように、異方性のある不均一な金属面性状の影響を低減するためには、加工痕を横切るように走査する必要がある。

そこで、本システムでは、金属ワークの設置方向によらずに高精度な計測を実現するため、加工痕の並び方向の影響を受けない走査軌跡として、図3-14に示す円形走査を提案する。ここで、走査する円の直径 L_c が大きいほど、多くの加工痕を横切ることができ、円形に走査する場合、円周1回転の中で常に異なる凹凸形状からの反射光を蓄積できるメリットがある。ここで、走査する円の円周長さを C 、円の直径を L_c とすると、式(2-5)より、露光時

間中の移動量は次のように表される。

$$C < v \cdot t \quad (3-5)$$

$$L_C < v \cdot t / \pi \quad (3-6)$$

このように、露光時間中の移動距離 $L_s = v \cdot t$ が、走査する円周長さ以上となるようイメージセンサの露光時間と走査速度を設定すればよい。その結果、露光開始と円形走査開始のタイミングを厳密に合わせる必要が無く、円周 1 回転分の反射光を用いた高さ変位計測が可能となる。

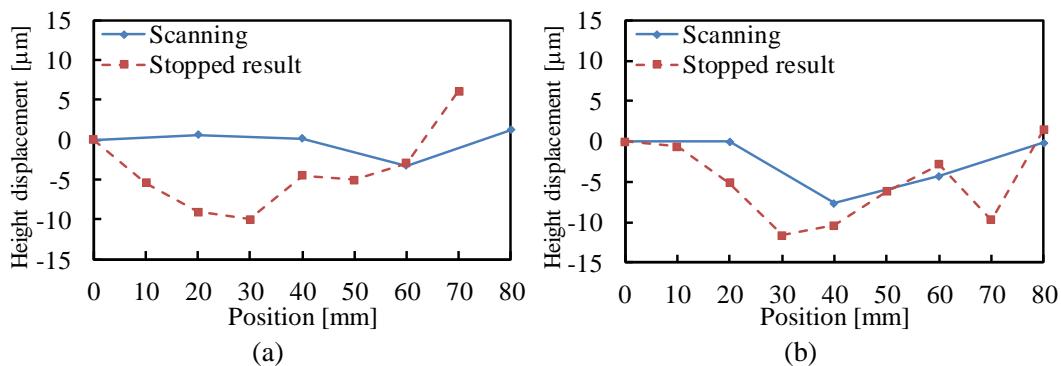


Fig. 3-13. Height displacement results of scanning exposure method by scanning direction: (a) scanning across grinding machining texture vertically and (b) scanning along to grinding machining texture parallel.

Table 3-3. Spot images of Spot D shown in Fig. 3-1 without scanning and with scanning in the Y and X directions.

	Point 1	Point 2	Point 3
Stopped result			
Scanning along to grinding machining texture parallel			
Scanning across grinding machining texture vertically			

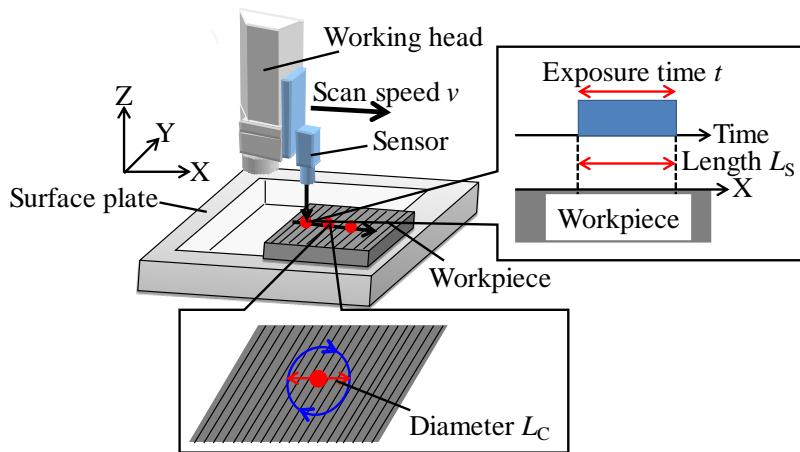


Fig. 3-14. Illustration of scanning exposure method.

事前に金属ワークが水平になるよう段取りし、図3-1に示した多方向三角測量光学系を用いて表3-4に示す実験条件にて露光時間中の移動量 L_s に対する計測ばらつきを評価した。また、各点で円形の走査露光方式を用いて高さ変位計測を実施した結果を図3-15に示す。露光時間中の移動量 L_s が小さい条件1での計測ばらつきは18.5 μmであり、露光時間中の移動量 L_s は同じであるが円形走査円形の半径が異なる条件2と3では、条件2の計測ばらつきは3.4 μmと低減可能であったが、条件3では計測ばらつき11.0 μmとなった。条件3では露光時間中の移動量 L_s を円周長さと同等としたが、高速に走査したことにより指令した円半径より小さい円形で走査され、同一の円周上を複数回走査されたため、計測ばらつきを低減するための平均化効果が得られなかったと考えられる。そこで、走査する円半径の指令値としては条件2の0.8 mmが良く、これは先端球が約1 mmであるタッチプローブセンサとほぼ同等の範囲の高さ変位を平均的に計測することを意味する。

Table 3-4. Experiment parameters for height displacement measurement by scanning length during exposure time.

Parameter	No. 1	No. 2	No. 3
Exposure time [sec]	0.2	0.3	0.3
Speed [mm/min]	500	500	500
Scanning length [mm]	1.67	2.5	2.5
Circle diameter [mm]	1.0	1.6	0.8
Circumference [mm]	3.14	5.03	2.51
P-P [mm]	18.5	3.4	11.0

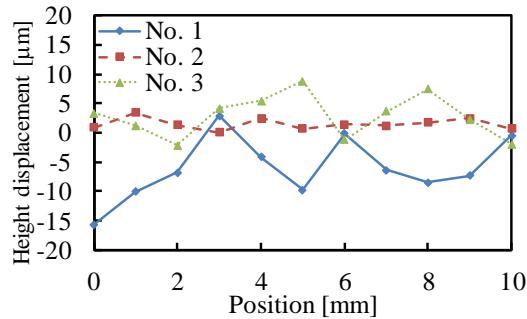


Fig. 3-15. Height displacement measurement result using circle scanning exposure method. Experiment parameters are shown in Table 3-4.

図 3-1 に示した多方向三角測量光学系におけるイメージセンサ上の 4 つのスポットについて、研削面上の異なる計測位置 P1 と P2 について、停止測定時と円形走査露光方式を用いて撮像したスポット像を図 3-16 に示す。走査露光法を使用した図 3-16(a)では、スポット A～D の全てについて P1 と P2 で同一形状のスポット像が得られた。一方、停止測定時には計測位置が異なるため、全てのスポットが P1 と P2 でスポット形状が変化した。ここで、スポット C について、断面強度分布を比較した結果を図 3-17 に示す。停止測定ではスポットの断面強度分布形状が大きく変化したため、高さ変位を算出するための重心計算結果がばらつき、高精度な計測が難しかった。一方、走査露光時には異なる位置を計測した際にも断面強度分布に大きな変化は無かった。これは、金属粗面上の表面性状の変化による散乱反射角特性のばらつきの影響を低減できていることを示している。

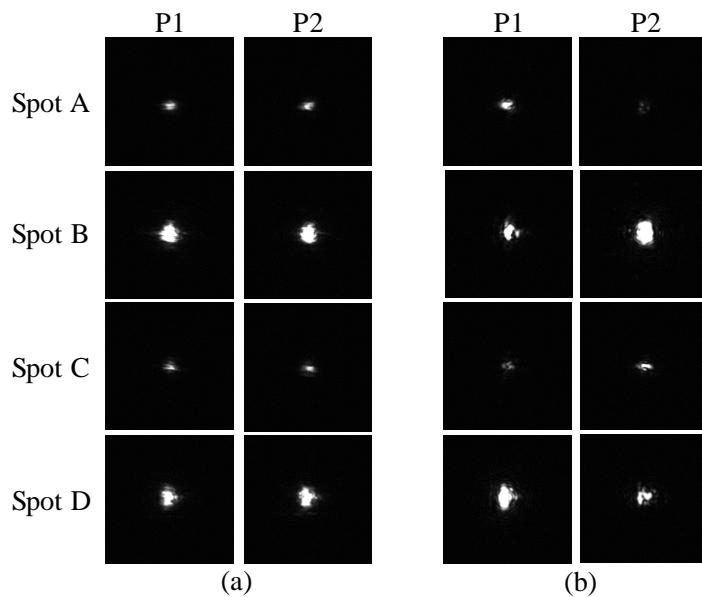


Fig. 3-16. Spot images of four spot with and without scanning at P1 and P2: (a) scanning result and (b) stopped result.

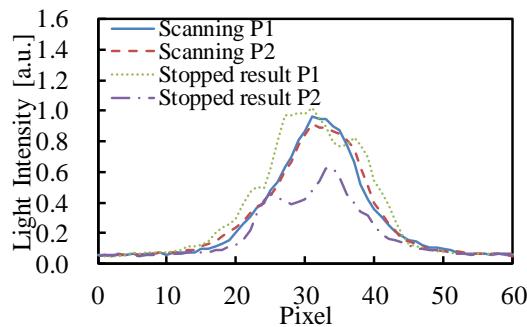


Fig. 3-17. Cross-sectional distributions of the spot C images shown in Fig. 3-16.

3.5.2 走査露光方式を用いた高さ変位計測実験

走査露光方式により不均一な金属面性状の影響を低減可能か評価するため、従来の停止時の測定結果との比較を実施した。本節での走査露光条件は表 3-4 の条件 2 とした。まず、同一位置で機上計測システムとワークとの距離 Z を変えて高さ変位計測を行った結果を図 3-18(a)に示す。また、 Z ステージの移動量との差異を算出した結果(リニアリティ特性)を図 3-18(b)に示す。走査露光方式により、真値との差異を最大 $32.2 \mu\text{m}$ から $4.9 \mu\text{m}$ まで低減でき、デフォーカス時の高さ変位計測ばらつきの低減も実現できる。つまり、本方式では、ワークに対するセンサのキャリブレーションを厳密に行う必要が無く、 $\pm 100 \mu\text{m}$ の範囲に調整できれば十分であり、使用上の利便性が高いことを明らかにした。

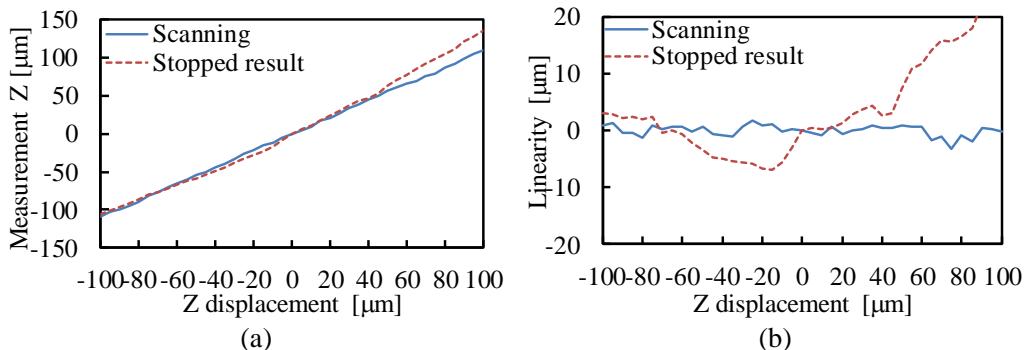


Fig. 3-18. Experimental result of displacement at the same position with scanning and without scanning: (a) result of changing the distance between the sensor and the workpiece and (b) linearity result, which is the difference from the true value.

次に、同一位置で 50 回計測した際の繰り返し計測誤差の結果を図 3-19 に示す。繰り返し計測誤差は走査露光方式と停止測定時で大きな差異はなく、約 $\pm 2 \mu\text{m}$ となった。これは、計測手法によらず同等であることから、信号処理や加工機の振動など機構系の影響が考えられる。

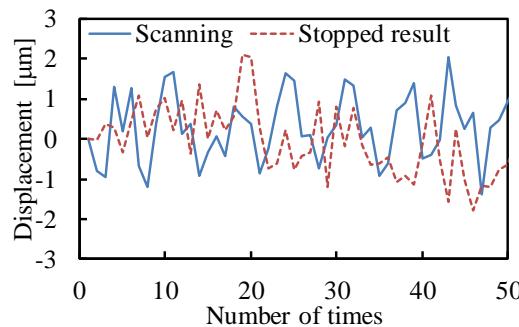


Fig. 3-19. Displacement result by number of times at the same position.

最後に、金属ワーク表面が同一高さとなるよう事前に調整し、走査露光有無での露光時間などを同一条件とし、計測位置を 1 mm ピッチで 50 mm まで走査し、走査露光方式有無での金属ワーク上の計測位置に対する高さ変位計測ばらつきの結果を図 3-20 に示す。ここで、走査露光方式では各位置で円形走査により変位計測を行った。走査露光無しでは、高さ変位計測ばらつき(Peak to peak)が 32.3 μm であったが、走査露光方式により、金属粗面での高さ変位計測ばらつきを 5.4 μm に低減可能であった。今回の測定での繰り返し計測誤差は図 3-19 で示した通り約 $\pm 2 \mu\text{m}$ であるため、図 3-20 の走査露光方式を用いた高さ変位計測結果は繰り返し誤差とほぼ同等精度である。したがって、繰り返し計測誤差を低減するため、同一位置で 5 回計測した結果を平均すれば、計測ばらつきを約 $1/\sqrt{5}$ に低減でき、目標精度 $\pm 1 \mu\text{m}$ を達成できる見込みを得た。

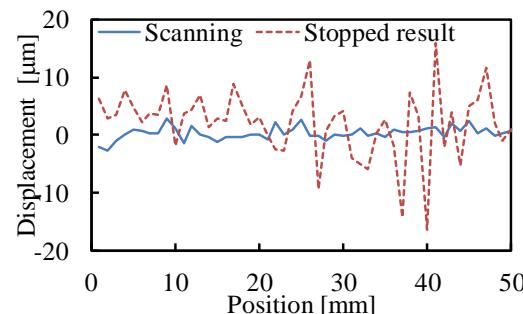


Fig. 3-20. Displacement result by measurement position on the workpiece with and without the scanning exposure method.

このように、イメージセンサの露光時間中に金属ワーク上面を走査する走査露光方式によって表面性状が不均一な金属粗面での高さ変位計測精度を高精度化できることを明らかにした。タッチプローブセンサなどの接触方式と同等精度 $\pm 1 \mu\text{m}$ を達成するためには、繰り返し誤差を低減するため、同一位置で 5 回程度平均すればよい。走査露光方式は計測位置を移動させて複数回計測する訳ではなく、イメージセンサの露光中にステージを円形走査するだけで良いため、高速計測が可能である。本システムでは露光時間に対して十分長い時

間円形走査を行い、5回平均を行っても1点当たりの計測時間は10秒程度であった。これはタッチプローブセンサの1点当たりの計測時間約20秒に対して半分である。また、3.3節で示したエッジ位置変位計測と同様にタッチプローブセンサでは計測位置ごとにセンサの上下移動が必要であるが、本システムはワーク上方からの非接触計測が可能であるため、計測プロセス全体の時間短縮も可能である。

3.6 機上高さ変位計測による金属ワークのたわみ計測評価

前節までレーザ熱加工に使用する表面性状に異方性がある金属粗面の高さ変位を高精度に三角測量方式で計測する手法について示した。本節では、これまでの知見を基に実際に加工機上に計測システムを取り付け、金属ワークのたわみ計測評価を実施し、接触方式との比較を行った結果を示す。本実験では、図3-1に示した計測システム単体を試作し、加工ヘッド側面に取り付けて実験を行った。まず、異方性のある表面性状と均一な表面性状である金属ワークでの計測精度評価を行った結果を示す。次に、加工前後の計測において最も広く用いられるダイヤルゲージでのたわみ計測結果と本システムの比較結果を示す。

3.6.1 金属粗面に対する高さ変位計測実験

金属ワークの表面性状はワーク表面の加工状態によって様々である。ここでは、異方性がある表面性状として研削面、均一な表面性状として放電加工面を使用した。それぞれの顕微鏡写真を図3-21に示す。どちらの加工面も表面粗さ R_z は約 $2.8 \mu\text{m}$ と同程度であるが、凹凸の形状は全く異なる。そこで、本高さ変位計測システムを加工機上に取り付け、事前に水平となるよう段取りしたそれぞれの金属ワークを用いて、Y方向に4mmずつ異なる3ヶ所についてX方向30mmの範囲を3mmピッチで計測位置に対する高さ変位計測評価を実施した結果を図3-22に示す。異方性がある研削面ではY方向位置が異なる3ヶ所での計測ばらつきPPの平均は $2.7 \mu\text{m}$ であった。一方、均一な放電加工面では計測ばらつきPPの平均は $1.6 \mu\text{m}$ であり、より高精度な計測が可能となった。このように、加工前後の高さ変位計測において、金属粗面の表面性状によって計測ばらつきが異なることを明らかにした。

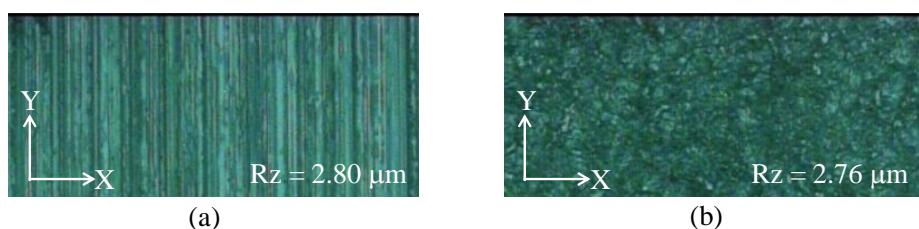


Fig. 3-21. Microscope images of different surface texture's workpiece: (a) grinding surface which is anisotropic stripe texture and (b) electric discharged surface which is isotropic granular texture.

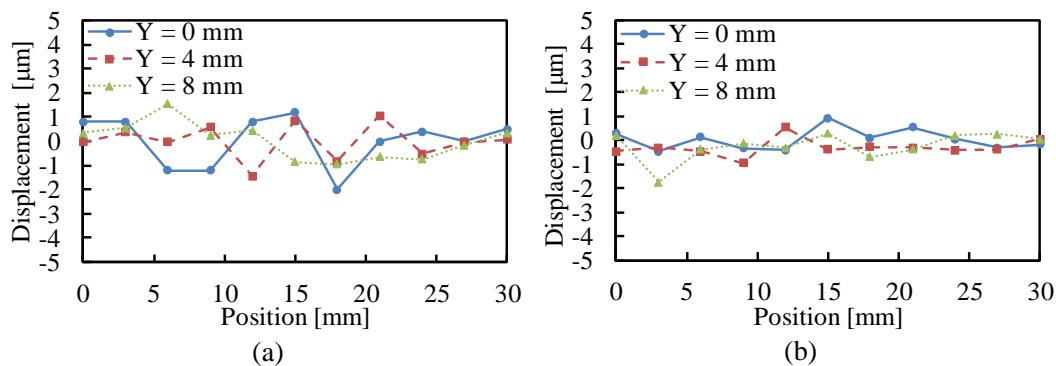


Fig. 3-22. Height displacement measurement result of different surface texture's workpiece: (a) grinding surface which is anisotropic stripe texture and (b) electric discharged surface which is isotropic granular texture.

3.6.2 金属ワークたわみ計測のダイヤルゲージとの比較評価

これまで加工前後の機上計測で最も広く用いられてきたのは接触式のダイヤルゲージである。そこで、加工前の平面ワークのたわみ計測結果を提案手法とダイヤルゲージ(分解能 $1 \mu\text{m}$)で比較した。実験系の概要を図 3-23 に示す。加工ヘッド側面に高さ変位計測システムとダイヤルゲージをそれぞれ取り付け、金属ワークに対するセンサの距離を変えて X 方向に 400 mm の範囲を 20 mm ピッチで計測した。センサと金属ワークの距離は $0, 0.5, 1, 2, 3, 5, 10 \mu\text{m}$ の 7 通りで実験した。高さ変位計測システムとダイヤルゲージでのたわみ計測結果を図 3-24(a)に示す。また、 $Z = 0 \text{ mm}$ での計測結果と各距離での計測結果の差分を図 3-24(b)に示す。センサと金属ワークの距離 $0.5 \mu\text{m}$ は仕様通り分解能が不十分であったが、それ以外の変位量では同等に計測可能であった。次に、計測した X 方向 400 mm の結果を平均し、各計測距離に対するリニアリティ特性を算出した結果を図 3-25(a)に示す。また、Z ステージの指令値に対して各計測結果の差分を算出した結果を図 3-25(b)に示す。Z ステージの指令値に対する差異は高さ変位計測システムとダイヤルゲージで同等の結果が得られ、その差は $0.5 \mu\text{m}$ 以下であった。また、距離が離れるほど高さ変位計測システムとダイヤルゲージ共に Z ステージの指定値との差異が大きくなり、高さ変位 $10 \mu\text{m}$ で $1 \mu\text{m}$ の差となつた。これは高さ変位計測システムとダイヤルゲージで同等の結果が得られたため、本評価時に加工機の Z 軸の指令値に対して実際の移動量が異なっていた可能性が考えられる。

最後に、プレート状の金属ワークを用いてたわみ計測を実施し、同一位置を接触式のダイヤルゲージで計測した結果を図 3-26 に示す。繰り返し計測誤差の影響を低減するため、同一位置で 5 回計測した結果を平均した。点 12 を除いてダイヤルゲージとの差異 $\pm 1 \mu\text{m}$ 以下を実現した。点 12 の差異が $3.4 \mu\text{m}$ と大きかったが、加工機によって発生した一時的な振動の影響が考えられる。このように、多方向三角測量方式と走査露光方式によって、金属粗面の高さ変位をダイヤルゲージと同等の目標精度 $\pm 1 \mu\text{m}$ で計測できることを明らかにした。

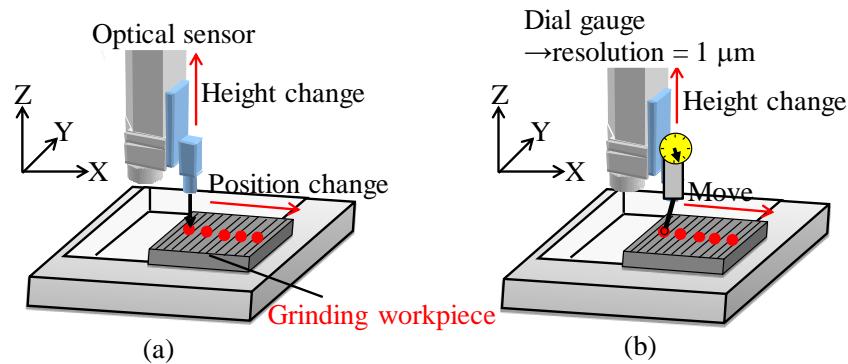


Fig. 3-23. Experiment setup for deflection measurement of a metal workpiece compared with a dial gauge: (a) optical height displacement sensor setup and (b) dial gauge setup.

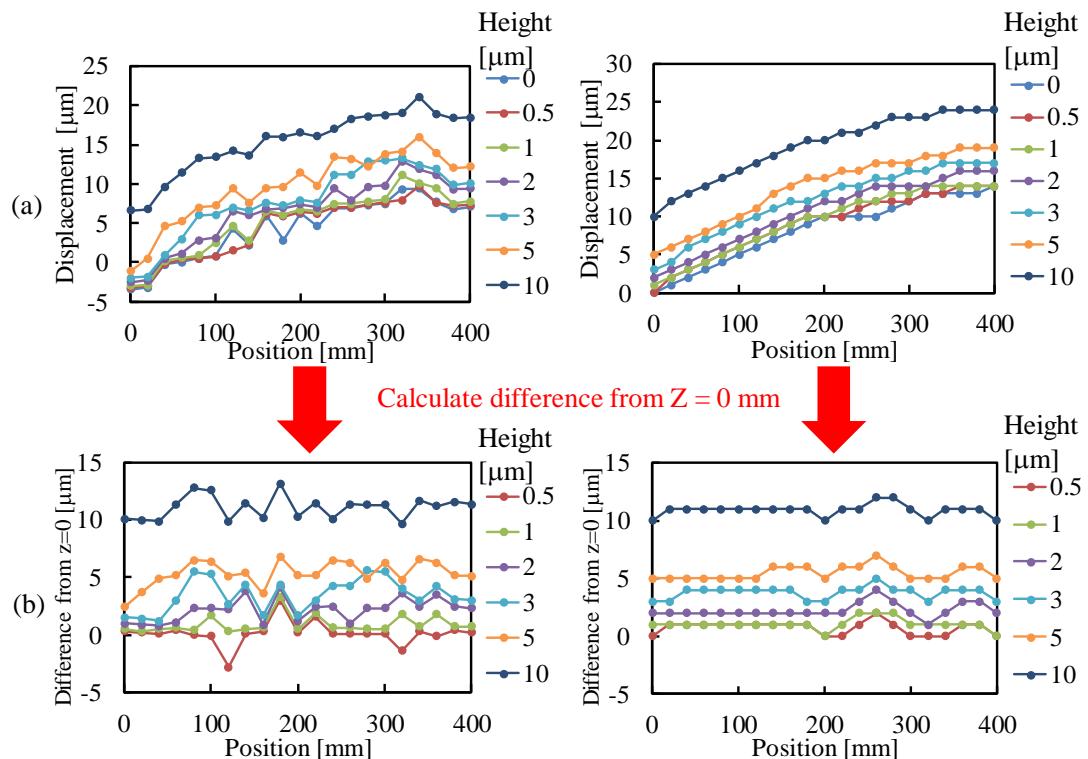


Fig. 3-24. Deflection measurement results of optical height displacement sensor and dial gauge: (a) height measurement result and (b) height displacement results estimated from difference from $Z = 0$ mm.

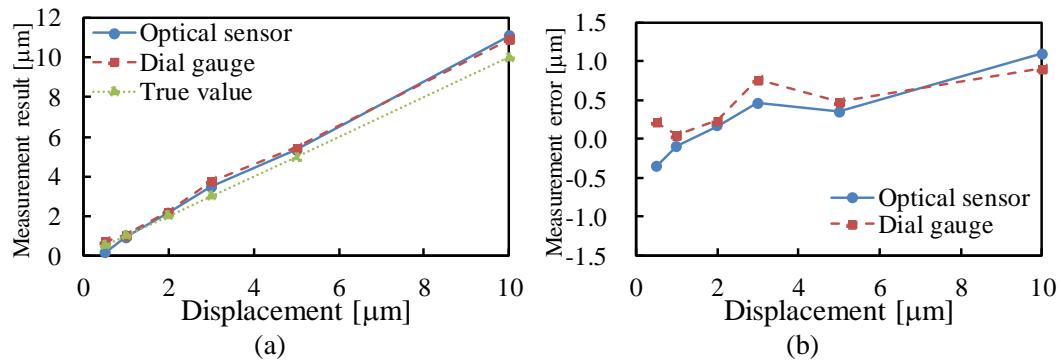


Fig. 3-25. Linearity results of optical height displacement sensor and dial gauge: (a) linearity result and (b) difference from the command value of Z-stage.

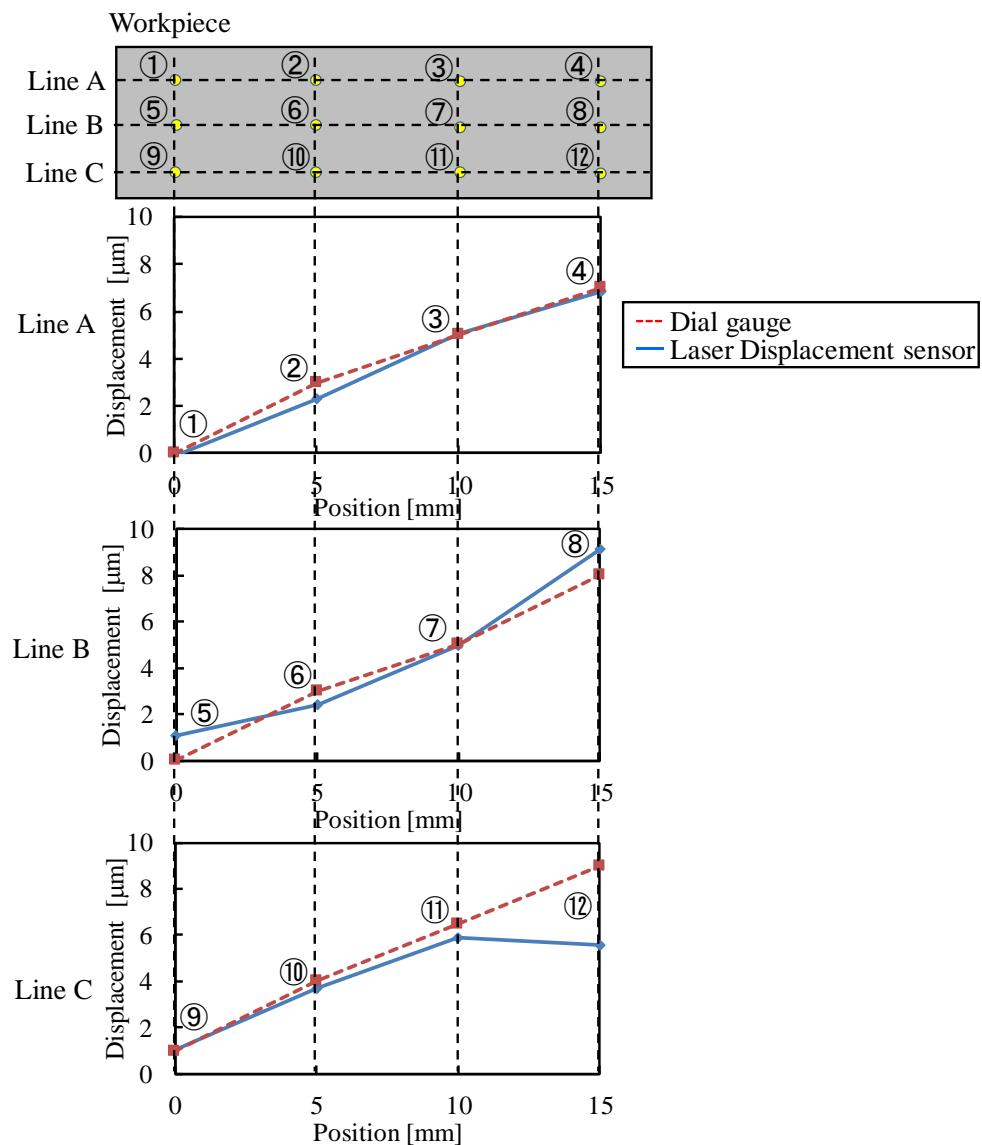


Fig. 3-26. Result of deflection measurement using a plate-shaped workpiece.

3.7 結言

本章では、レーザ熱加工前後の機上変位計測において、表面性状が不均一な金属粗面の位置変位を高精度に計測可能な機上光学式変位計測システムの有効性を示した。提案手法により加工前の段取り精度を高精度化し、加工後に高精度に形状精度を評価できるため、レーザ熱加工を行う産業用レーザ加工機の加工精度を向上できることを明らかにした。

まず、ワークの位置や回転などの位置変位を計測するエッジ位置変位計測手法について示した。エッジ位置を横切るように走査した際の反射光強度の変化からエッジ位置を算出する共焦点方式の変位計測システムの構成を示した。高精度にエッジ位置を計測するため、ジグザグ走査による複数回エッジ位置を計測し、その結果を平均するジグザグ走査平均方式を示した。また、欠けがある金属ワークのエッジ位置を計測するため、投光するレーザ光の出力を最適化し、エッジ位置を接触式タッチプローブセンサと同等精度の $\pm 1 \mu\text{m}$ で計測でき、計測時間をタッチプローブセンサの半分程度に高速化できることを示した。

また、異方性のある表面性状を持つ金属粗面の高さ変位を高精度に計測するため、4方向から三角測量を行う多方向三角測量方式の光学系を示した。十字に配置したレンズアレイを用いて4方向から三角測量を行い、4つの受光スポットのイメージセンサ上の投影位置を平均することで、従来の1方向から三角測量を行う方式に対して不均一な金属面性状の影響を低減可能であることを明らかにした。さらに、イメージセンサの露光時間中に円形に走査する走査露光方式によって、金属粗面上での計測位置に対する散乱反射角特性のばらつきを高速に平均化可能であることを示した。タッチプローブセンサに対して半分の計測時間で、同等精度 $\pm 1 \mu\text{m}$ を実現できることを明らかにした。

最後に、機上高さ変位計測システムを加工機上に取り付け、異方性のある表面性状である研削面と均一な表面性状である放電加工面の高さ変位計測評価を実施し、異方性のある表面性状より均一な表面性状の方が高精度な計測が可能であることを明らかにした。また、加工前後の機上計測に広く使用されているダイヤルゲージとの金属ワークたわみ計測結果の比較評価を実施し、ダイヤルゲージと同等精度で計測でき、加工前後の機上計測システムとして、接触方式と同等精度で高速計測が可能であることを示した。

このように、提案手法によって接触方式と同等の高精度計測が可能な加工前後の機上光学式変位計測システムを実現可能であることを明らかにした。さらに、ワーク上方から非接触計測が可能な機上光学式変位計測システムは、接触方式に対して計測時間を大幅に短縮できるため、加工前後の計測工程のタクト短縮が可能となる。例えば、加工前の段取り工程において、従来のタッチプローブセンサを用いて平面度計測のために高さ変位を3ヶ所、平行計測のためにエッジ位置変位を2ヶ所計測する場合、接触方式に対して非接触式の機上光学式変位計測システムを用いることで約60%の計測時間短縮が可能であった。このように、非接触式の機上光学式変位計測システムによって加工前後の自動計測工程の高速化・高精度化が可能であることを明らかにした。

第4章 加工位置近傍でのインプロセス高さ変位計測

4.1 緒言

本章では、高精度なレーザ熱加工制御のための加工光学系と同軸に計測系を配置する加工位置近傍でのインプロセス高さ変位計測システムの構成とレーザ熱加工中の高さ変位計測実験結果について述べる。まず、加工光学系と同軸に計測系を配置することで加工位置近傍でのインプロセス計測が可能であることを実証するため、光切断方式の機上高さ変位計測システムの構成を示す。また、加工用レーザの反射光や熱輻射光による外乱光の影響を低減することで加工位置近傍でのインプロセス計測が可能となることを明らかにする。

4.2 インプロセス高さ変位計測システムの構成

レーザ熱加工中に加工位置近傍の加工対象物の高さ変位を計測するインプロセス高さ変位計測システムの構成を図4-1に示す。2.5節で示した通り、高さ変位計測システムの撮像系を加工ヘッドと一体化し、加工光学系の対物レンズを計測系と共にすることで加工用レーザの光軸と同軸で加工対象物の高さ変位を計測する。加工用ファイバーレーザ光はビームスプリッタでワーク方向に反射され、反射されたレーザ光は対物レンズで集光され、加工位置に照射される。高さ変位計測システムの撮像系を加工ヘッド上部に取り付け、焦点距離が数100mmである加工用の対物レンズを共用する。また、光切断方式の高さ変位計測に使用するラインビームは加工ヘッド側面から照射する。使用したラインレーザの仕様を表4-1に示す。本章では、加工光学系と同軸で計測する加工位置近傍でのインプロセス計測手法の有効性を評価するため、従来の光切断方式である直線状ラインビームを使用する。装置への取り付け制約により、ワーキングディスタンスを220mmとし、投影されるラインビーム長さは19.25mmである。計測位置の詳細は、4.3節で詳しく述べる。計測位置で反射したラインビームは、加工用の対物レンズで取り込まれ、ビームスプリッタを透過して、撮像光学系によりカメラ上に結像される。このように、加工用の対物レンズを機上高さ変位計測システムと共にすることで、加工位置近傍のラインビーム照射位置を計測可能である。加工光と同軸で加工位置近傍をカメラで撮像するため、共用する対物レンズの性能を考慮し、高さ変位計測システムの撮像系を設計した。2.3節の式(2-3)に示した通り、三角測量の原理によってラインビームの照射角度 θ と撮像系の倍率 M によって高さ計測分解能 ΔH が決まる。本設計では、カメラの1画素当たりの高さ変位計測分解能 ΔH が30μmとなるようラインビームの照射角度 $\theta = 24\text{ degrees}$ と光学系の横倍率 $M = 0.33$ 、カメラの画素サイズ $W = 5.5\text{ }\mu\text{m}$ を設計した。これは、2.3節で示した通り、レーザ熱加工における加工用レーザの焦点位置に対して加工対象面を100μm程度で制御するために十分な高さ変位計測分解能である。また、ライ

ンビームの投影位置変位をサブピクセルで重心計算するためには 5~10 pixel のライン幅が必要であるため、本構成ではライン幅が 7 pixel となるようライン幅($1/e^2$ 全幅)を 0.1 mm と設計した。また、ラインビーム長さ方向の断面高さ分布の空間分解能は 16.7 μm であり、加工用レーザのスポット径に対して十分な空間分解能である。このように、高さ変位計測システムの撮像系を加工光の光軸と同軸にすることで、一つのカメラで高さ変位計測と加工位置モニタリングの両方を行うことができ、将来的にインプロセス高さ変位計測結果と加工位置のインプロセスモニタリング結果の両方にに基づいたレーザ熱加工制御が可能となる。

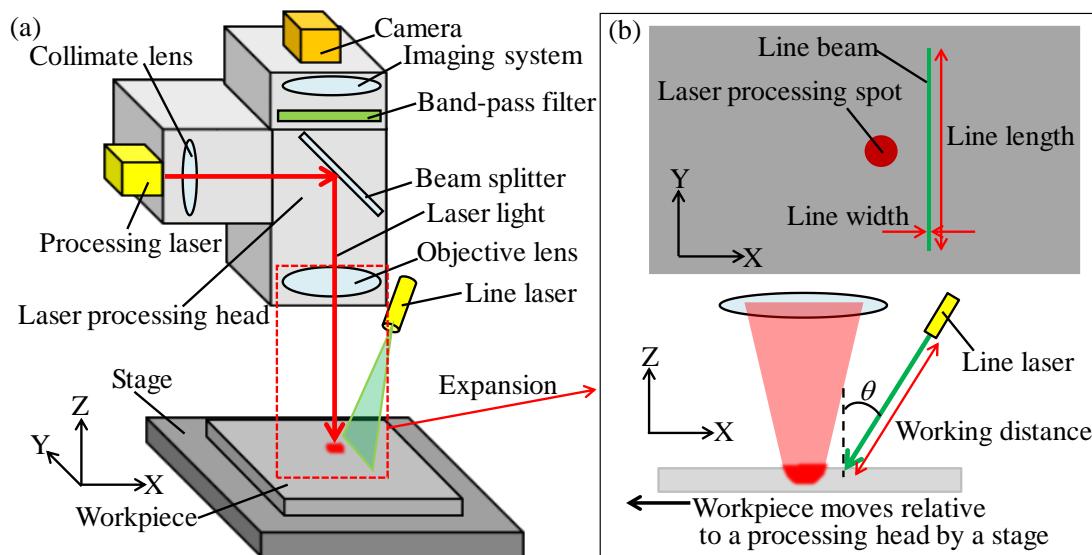


Fig. 4-1. Configuration of height measurement system using line section method for laser thermal process control: (a) illustration of height displacement measurement system and (b) enlarged view of laser processing position.

Table 4-1. Specification of a line laser.

Parameter	Value
Wavelength	520 nm
Power	50 mW
Projection angle	26 degrees
Working distance	220 mm
Fan angle	5 degrees
Line length	19.25 mm
Line width	0.1 mm

4.3 加工位置近傍でのインプロセス計測結果

2.2 節で示した通り、レーザ熱加工中のインプロセス高さ変位計測位置は、加工位置に近い方が良い。つまり、4.2 節で示した光切断方式の高さ変位計測システムにおける計測位置であるラインビームの照射位置は、できるだけ加工位置に近い方が良い。加工制御時と近い加工温度環境で計測可能であるため、高精度な加工制御が可能となる。しかし、1.2 節で示した通り、レーザ熱加工中に加工位置近傍を光切断方式で計測すると、加工用レーザの反射光や熱輻射光による外乱光の影響で計測誤差が発生し、高精度な計測ができない。そこで、レーザ熱加工中にできるだけ加工位置に近い位置で高さ変位計測を行うため、加工用レーザの反射光や熱輻射光による外乱光の影響を低減し、加工光学系と同軸で計測する提案手法により、加工位置近傍でのインプロセス計測が可能となることを明らかにする。

4.3.1 加工位置に対する高さ変位計測位置

2.5 節で示した通り、加工用レーザの反射光や熱輻射光による外乱光の影響を低減するため、加工用レーザ波長 1080 nm と加工位置の温度が 1000 度程度である場合に広いスペクトルを持つ熱輻射光のピーク波長が赤外領域であることを考慮し、表 4-1 に示す通り、計測用ラインレーザ波長を 520 nm とした。また、計測用受光素子であるカメラに到達する外乱光強度を低減するため、図 4-1 で示した通り、高さ変位計測システムの撮像系には計測用ラインレーザ波長 520 nm を透過するバンドパスフィルタを設置した。バンドパスフィルタは中心透過波長 525 nm、透過波長の半値全幅 50 nm とした。計測用ラインレーザの出力は 50 mW であり、ラインビームの Fan Angle は 5° とした。この時、投影されるラインビーム長さ 19.25 mm、ライン幅 0.1 mm を考慮すると、照射されるラインビームの照度は 29.5 mW/mm² となる。

次に、上記の構成において外乱光の影響を低減可能か検証するため、加工位置からの距離に対するレーザ熱加工中の輝度計測を実施した。加工用レーザは、レーザスポット径 $\phi 3$ mm、レーザ出力 1.5 kW で照射し、上記のバンドパスフィルタを取り付けた輝度計(コニカミノルタ株式会社製 CS-160)を用いて加工位置からの距離に対するレーザ熱加工中の外乱光の輝度を計測した結果を図 4-2 に示す。輝度計測の結果、特に加工中心から 5 mm の範囲は非常に輝度が高く、加工中心から 5 mm 以上離れると輝度が小さくなることを明らかにした。この結果は、1.2 節で示した従来の光切断方式を用いた外乱光の影響評価結果とも一致しており、加工位置から距離 4 mm 以内で市販の光切断方式の高さ変位センサに計測誤差が発生した原因が加工用レーザの反射光や熱輻射光による外乱光であることが示された。本評価に使用する出力 50 mW のラインビームを投影した際の輝度を計測した結果も図 4-2 に示す。計測用照明波長を加工用レーザ波長や熱輻射光のピーク波長と異なる波長とし、計測用照明波長のみを透過するバンドパスフィルタを用いることで、加工位置近傍で外乱光に対し

て十分な計測用照明光の輝度が得られ、インプロセス計測が可能である見込みを得た。ここで、計測用ラインレーザの輝度が外乱光に対して2倍以上となり、十分な信号強度が得られる位置は加工中心から3 mmである。斜め方向からラインビームを照射する光切断方式では、ワークの高さ変位に対してラインビームの照射位置がX方向に変位することを考慮し、本構成では加工用レーザの焦点位置にワークがある際のラインビームの照射位置を加工中心から4 mmとした。加工中心からの距離4 mm±1 mmの範囲のラインビームの照射位置から高さ変位を計測する場合、式(2-2)と4.2節で示した設計結果を用いて、加工用レーザの焦点位置から計測可能な高さ変位量は±2 mmとなる。これは、加工対象面を数100 μmである加工用レーザの焦点深度に制御するためには十分な計測範囲である。また、使用するラインレーザの計測距離に対するライン幅を計測した所、±2 mm以内でライン幅が変化せず、十分な照明深度が得られたため、±2 mmでの高さ変位計測が可能であることを確認した。

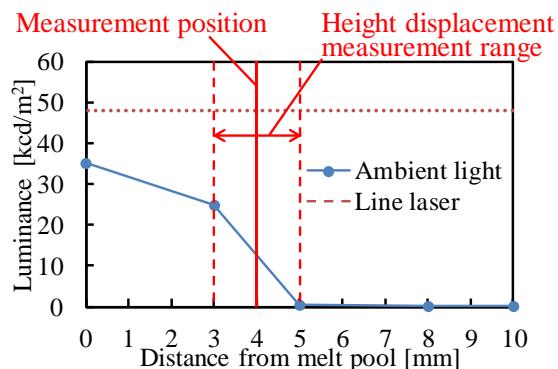


Fig. 4-2. Luminance result by distance from laser processing position. Line laser luminance also shows.

4.3.2 インプロセス高さ変位計測結果

設計通り、外乱光の影響を低減可能か実験的に検証した。図4-3に外乱光の低減効果を確認するために使用した実験系の概略図を示す。今回の実験系では、加工ヘッド側にXYZステージがある。溶接ビードがあるワークを用意し、溶接ビード上にラインビームの長手方向が垂直に照射されるように配置した。本評価で使用したワークを図4-4(a)に示す。表面をブラスト処理された平坦な金属ワーク上に溶接ビードがある。図4-4(b)に溶接ビード上部と平坦部の顕微鏡写真を示す。平坦部はブラスト処理により均一な表面性状であるが、溶接ビード上部は、一度金属が溶融して再度凝固しているため表面粗さが低い。それぞれの粗さ曲線をZygo社のNewView 8000で計測した結果を図4-4(c)に示す[106]。平坦部は±3 μm程度の表面粗さであるが、溶接ビード上部に細かい凹凸は無い。

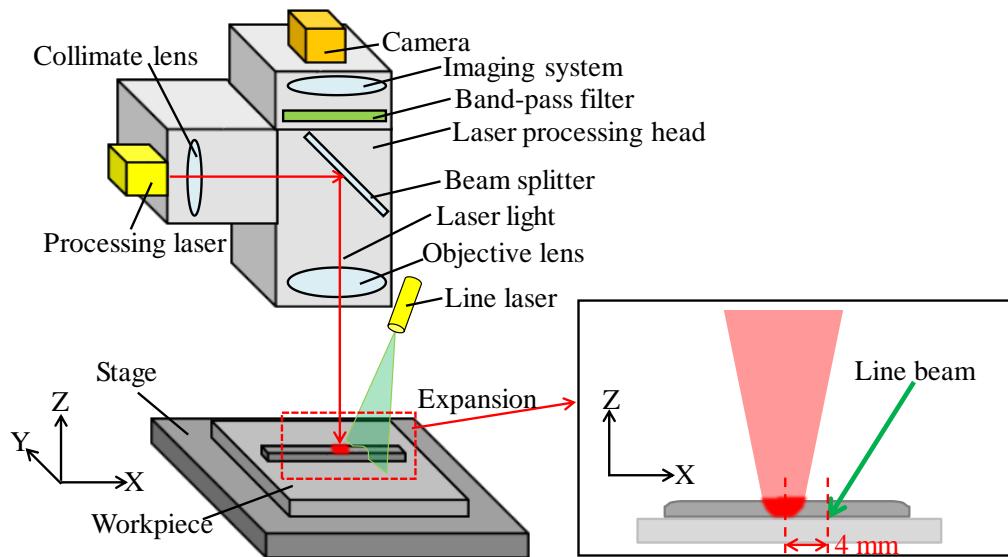


Fig. 4-3. Experiment setup for in-process height displacement measurement.

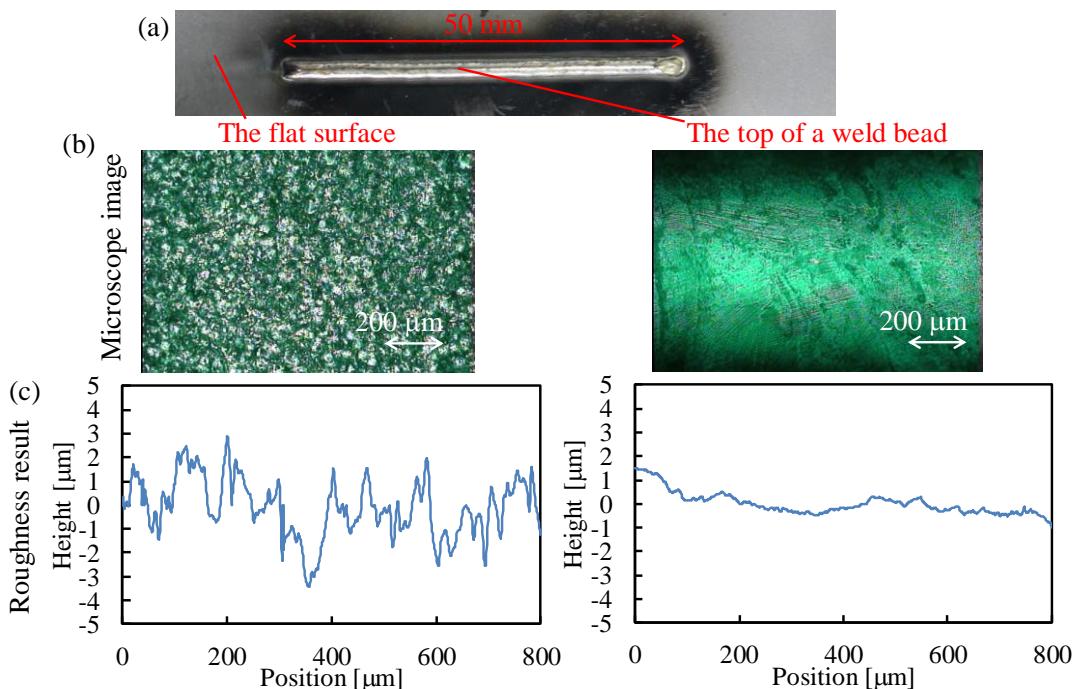


Fig. 4-4. Detail of workpiece used for the evaluations. Work piece has flat surface and a weld bead: (a) camera images, (b) microscope images and (c) roughness measurement results by NewView 8000 (Zygo Co., Ltd.).

これらの実験系を用いて溶接ビード上の同一位置で加工用レーザの照射中とレーザを照射していない状態でラインビーム画像を取得した。取得したラインビーム画像を図 4-5 に示す。加工位置から 4 mm の位置に照射したラインビームは、溶接ビード部で画像右側にシフ

トし、溶接ビードの高さが平坦部に対して高いことを意味する。図4-5のラインビーム位置を重心計算により算出した結果を図4-6に示す。ラインビームの投影位置はレーザ照射中とレーザを照射していない状態で同様の結果が得られており、外乱光の影響を低減可能であることを明らかにした。このように、計測用照明の波長を加工用レーザ波長や熱輻射光のピーク波長と異なる波長とし、撮像系にバンドパスフィルタを設置することでレーザ熱加工中にも外乱光の影響を受けずにレーザ熱加工をしていない状態と同様に加工位置近傍4 mmでのインプロセス計測を実現できる。これは、加工用レーザのスポット径 $\phi 3\text{ mm}$ を考慮すると物理的に最も加工位置近傍での高さ変位が計測可能であることを意味しており、1.2節で示した市販の高さ変位センサよりも加工位置に近い位置での計測が可能であることを明らかにした。

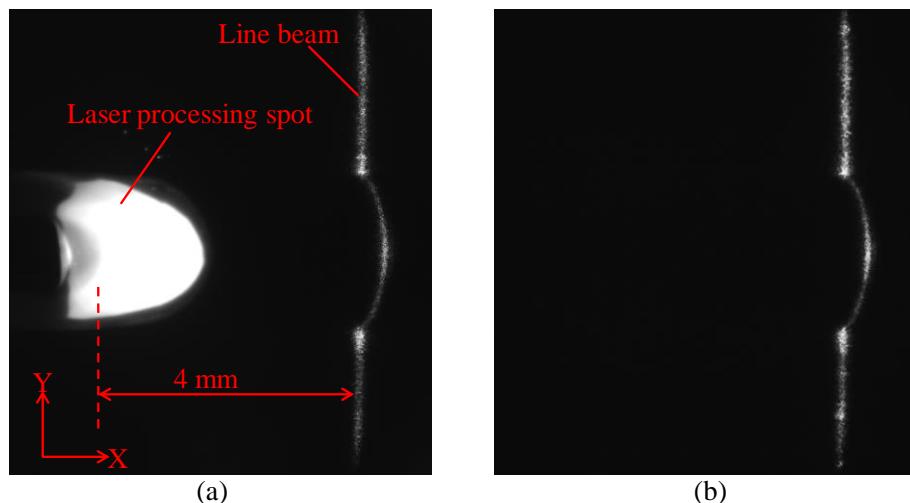


Fig. 4-5. Line beam's images captured by height displacement measurement system: (a) during laser thermal processing and (b) without laser thermal processing.

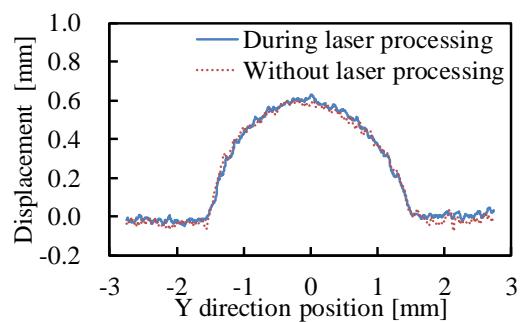


Fig. 4-6. Line beam projection position during laser thermal processing and without laser thermal processing. Line beam projection positions were estimated by line beam's centroid.

4.4 リニアリティ評価

設計した高さ変位計測システムの計測精度を評価するため、計測距離を変化させて高さ変位を計測するリニアリティ評価を実施した。図4-3の実験系と図4-4のワークを用いて、投影したラインビームが溶接ビード上となるようにXYステージを静止させ、Zステージを用いて溶接ビードに対する加工ヘッドの距離を変化させた。ここでは、前節でレーザ熱加工中にもレーザ熱加工していない状態と同様にラインビーム位置を計測可能であることが示されたため、レーザ熱加工をしていない状態で評価を実施した。加工用レーザの焦点位置をZ = 0 mmとし、距離-3 mmから+3 mmの範囲(250 μmピッチ)で計測した。高さ変位0, ±1, ±2, ±3 mmでのラインビーム画像を図4-7に示す。設計通り、加工対象物から加工ヘッドが離れる-Z方向ではラインビームは画像の左側に移動し、加工ヘッドが近づく+Z方向ではラインビームは画像の右側に移動した。

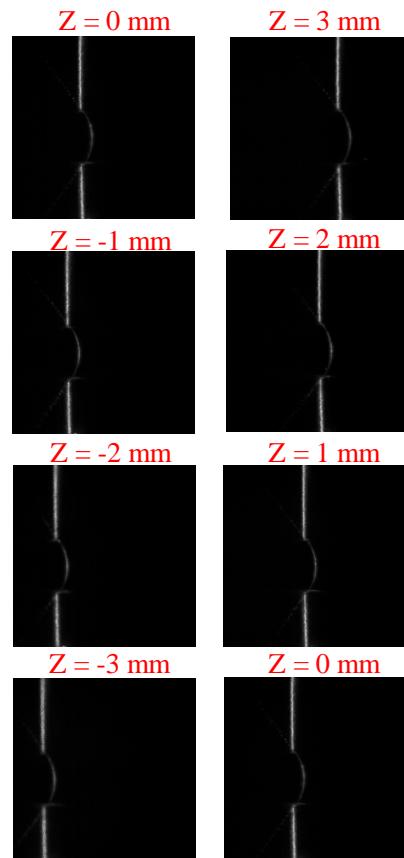


Fig. 4-7. Image of line beam on a weld bead. Height displacement are 0, ±1, ±2, and ±3 mm.

各ラインビーム画像を重心計算し、Y方向に対する断面高さ分布を算出した結果を図4-8に示す。計測した断面高さ分布からビード上部Y = -0.6 mm, 平坦部Y = -3.5 mm, 2.5 mmの

位置での計測距離のピッチを算出した結果を図4-8(b)に示す。ここで、各Y方向位置のピッチはY方向に±50 μm(11 pixel)の範囲の平均から算出した。溶接ビード上部であるY = -0.6 mmとワークの平坦部共に計測誤差±50 μm以下の計測が可能となった。これは、4.2節で示したカメラの1画素当たりの高さ分解能 ΔH の設計値30 μmと同等の結果であり、計測システムとして十分な計測精度が得られた。また、ワークの平坦部はプラスチック処理された金属粗面であるため、拡散反射しやすいが、溶接ビード上部は溶融した金属が凝固しているため、表面粗さが小さく拡散反射率は小さい。しかし、反射特性の影響を受けることなく、溶接ビード上部と平坦部共に同等のリニアリティ特性であることを明らかにした。

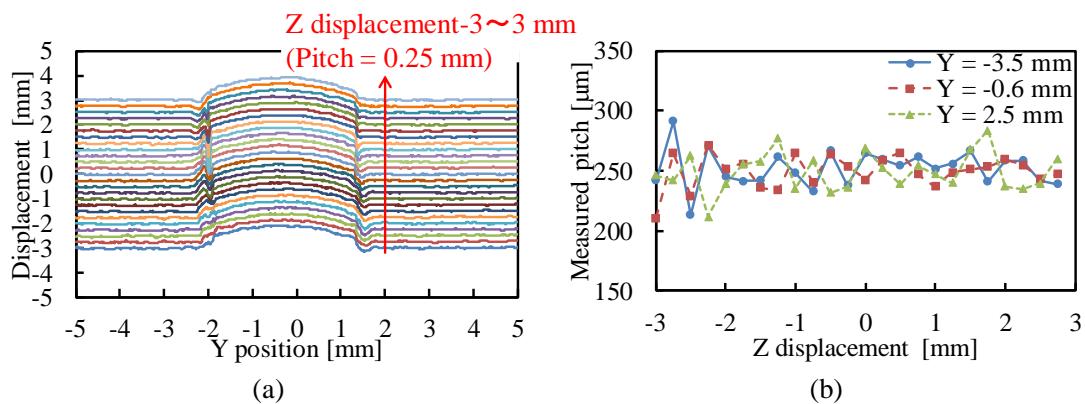


Fig. 4-8. Height displacement measurement results on a weld bead. $Z = 0$ mm denotes focus position of a processing head: (a) height displacement measurement result by Y position and (b) Z-pitch measurement result by Z-stage displacement, where each Y position's result is calculated by ±50 μm range.

4.5 インプロセス高さ変位計測精度評価

前節までに加工位置近傍でインプロセス計測を行う光切断方式の光学系を設計し、レーザ熱加工中に加工していない状態と同様にインプロセス計測が可能であることを実証した。また、加工していない状態でリニアリティ特性を評価し、計測誤差が±50 μm以下であることを明らかにした。そこで、本節では、レーザ熱加工中のインプロセス高さ変位計測精度を定量的に評価する。評価方法は、事前に別の非接触3次元測定機で高さ変位を計測した溶接ビードをレーザ熱加工中と加工をしていない状態で計測し、3次元測定機の結果を真値として比較する。本システムの高さ変位計測は図4-3に示す実験系を使用し、計測対象として図4-4と同様に表面をプラスチック処理された平坦の金属ワークを用いるが、高さ変位計測精度評価用に高さの異なる溶接ビード①と②がある。これらの溶接ビードの高さ変位を計測することで、本高さ変位計測システムのレーザ熱加工中の計測精度評価を行う。

まず、高さ変位計測システムより十分高精度な非接触3次元測定機(三鷹光器製 NH-3N)

を用いて、溶接ビード高さを計測した[107]。今回使用した3次元測定機の計測原理は、オートフォーカス方式である。顕微鏡レンズを用いてスポット径約 $2\text{ }\mu\text{m}$ とし、三角測量方式により計測する高さ変位に応じて対物レンズをオートフォーカスしながら3次元形状を計測する。計測精度は $\pm 1\text{ }\mu\text{m}$ であり、我々の高さ変位計測システムより十分高精度であるため、本評価では3次元測定機の結果を真値と見なした。3次元測定機で溶接ビード上部と平坦部の高さ変位を計測し、金属ワークを加工機上に段取りした。ステージを用いて溶接ビード上部を走査しながら、高さ変位計測システムを用いてレーザ熱加工中と加工していない状態で各計測位置でのラインビーム画像を取得した。実験条件を表4-2に示す。本実験では、カメラ画像を取得する際にトリガ信号を加工機NCに送信して加工機のステージ位置情報と一致させた。計測位置に対する溶接ビード高さを算出した結果を図4-9に示す。溶接ビード高さは、平坦部の計測結果と溶接ビード上部との差分とした。図4-9(a), (b)に示すように高さの異なる溶接ビードに対して終端部の盛上りも含めて溶接ビード高さが計測可能となった。また、加工中の計測結果と加工していない状態での計測結果に差異はなく、レーザ熱加工中のインプロセス高さ変位計測が可能となった。

次に、急な斜面形状となる始終端を除いた計測位置 $X=5\sim 55\text{ mm}$ の加工中の計測結果と真値との差異より算出した高さ変位計測精度の結果を図4-10に示す。高さが低い溶接ビード①では 50 mm の計測範囲で真値に対して $PP = 64.6\text{ }\mu\text{m}$ ($\sigma = 13.2\text{ }\mu\text{m}$)、高さが高い溶接ビード②では真値に対して $PP = 87.6\text{ }\mu\text{m}$ ($\sigma = 11.5\text{ }\mu\text{m}$)であり、4.2節で示したカメラの1画素当たりの高さ分解能 ΔH の設計値 $30\text{ }\mu\text{m}$ であることを考慮すると、 $\pm 1\text{ pixel}$ 程度の計測精度に相当し、十分な高さ変位計測精度である。このように、レーザ熱加工において加工対象面が加工用レーザの焦点位置となるよう加工制御を行う際に必要なインプロセス計測精度約 $100\text{ }\mu\text{m}$ に対して提案した加工位置近傍でのインプロセス高さ変位計測手法では $\pm 50\text{ }\mu\text{m}$ の精度での計測が可能であるため、レーザ熱加工における加工制御への適用が可能である見込みを得た。

Table 4-2. Experiment parameters for in-process height displacement evaluation.

Parameter	Value
Stage speed	10 nm/sec
Frame rate of an image sensor	20 fps
Measurement pitch	0.5 mm
Exposure time	0.1 msec
Processing laser power	1.5 kW

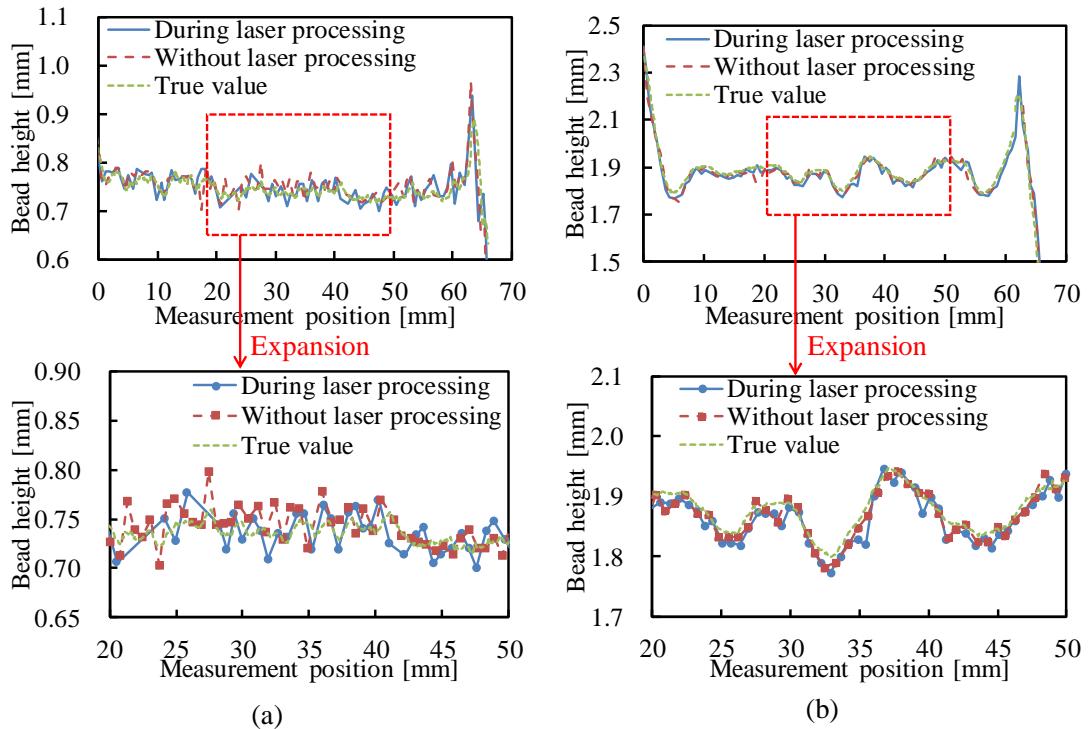


Fig. 4-9. Comparison of height measurement results during and without laser thermal processing and true value: (a) the result of the low height bead and (b) the result of high height bead.

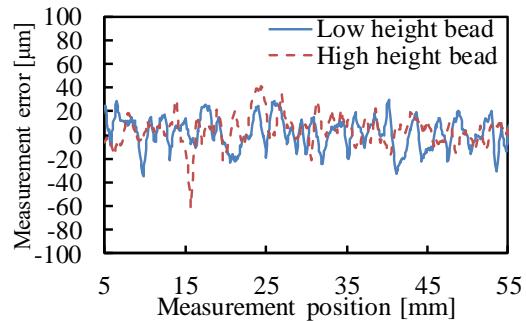


Fig. 4-10. Height displacement measurement error of low height bead and high height bead. Error was estimated from difference between measurement result and true value.

4.6 結言

本章では、加工制御時と近い加工温度環境で高さ変位を計測する構成として、加工光学系と同軸に計測するインプロセス高さ変位計測システムを示し、レーザ熱加工中の外乱光の影響を低減することで加工位置近傍での計測が可能となることを示した。これにより、高精度なレーザ熱加工制御を実現するための加工光学系と同軸に計測系を配置する加工位置近傍でのインプロセス計測手法の有効性を明らかにした。

高さ変位計測システムの撮像系は、加工光学系の対物レンズを共用することで加工ヘッドと一体化する小型な構成を実現し、加工ヘッド側面からラインビームを加工位置近傍 4 mm の位置に照射した。加工用レーザの反射光や熱輻射光による外乱光の影響を低減するため、計測用ラインレーザ波長を 520 nm とし、高さ変位計測システムの撮像系には計測用ラインレーザ波長を透過するバンドパスフィルタを設置することで加工用レーザスポット $\phi 3$ mm に対して加工位置からの距離 $4 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ においてインプロセス計測が可能であることを明らかにした。また、インプロセス計測精度を評価するため、レーザ熱加工中と加工していない状態で溶接ビードの断面高さ分布を計測し、加工位置近傍 4 mm の位置で加工していない状態と同様に $\pm 50 \mu\text{m}$ の計測精度で高さ変位計測が可能となることを明らかにした。

このように、加工光学系の対物レンズを計測系と共に用い、加工光学系と同軸に配置する加工位置近傍でのインプロセス計測手法の有効性を明らかにした。これにより、加工制御時に近い加工温度環境で高さ変位を計測可能であるため、高精度なレーザ熱加工制御が可能となる見込みを得た。また、産業用レーザ加工機におけるレーザ熱加工での加工用レーザの焦点深度が数 $100 \mu\text{m}$ であるため、計測精度 $\pm 50 \mu\text{m}$ はレーザ熱加工制御を行うためには十分な精度である。しかし、レーザ熱加工機では加工経路によって加工方向が変化するため、直線状ラインビームを用いた光切断方式では加工方向が変化する際に常に加工経路上の高さ変位を計測できない。そこで、次章では、加工方向が変化するような複雑な加工経路を加工する際のレーザ熱加工制御を実現ため、インプロセス計測可能な計測方向を拡大し、本章で示した加工位置近傍でのインプロセス計測手法を用いて加工方向が変化する際にも加工経路上の高さ変位を計測する手法の詳細を示す。

第5章 加工方向変化に対応したインプロセス高さ変位計測

5.1 緒言

前章では、直線状ラインビームを使用した従来の光切断方式を用いて、加工光学系の対物レンズを計測系と共に用い、加工光学系と同軸に配置する加工位置近傍でのインプロセス計測手法の有効性を明らかにした。しかし、直線状ラインビームを用いた従来方式は、XY平面内で自由に加工方向が変化するレーザ熱加工において全ての加工方向に対して加工経路上の高さ変位をインプロセス計測できない。

そこで、本章では、機上計測に要求される小型で簡便な構成で加工方向が変化する際にも加工経路上の高さ変位を計測可能な交差ラインビーム光切断方式について示す。まず、交差ラインビームを用いた高さ変位計測原理を示し、計測方向に対する高さ変位計測精度評価結果を示す。また、交差ラインビーム光切断方式によりインプロセス計測可能な加工方向を±90度方向まで拡大可能となることを明らかにする。

5.2 交差ラインビーム光切断方式の高さ変位計測原理

5.2.1 交差ラインビームの構成

2.5節で示した通り、レーザ熱加工中のインプロセス高さ変位計測では、加工位置と計測位置が異なるため、一般的な直線状ラインビームを用いた光切断方式では加工方向が変化する際に常に加工経路上の高さ変位を計測できない。そこで、加工方向が変化する際にも加工経路上の高さ変位をインプロセス計測するため、加工位置の周囲を取り囲むようにラインビームを投影する交差した2本のラインビームを用いた交差ラインビーム光切断方式の高さ変位計測手法を提案する。

交差ラインビーム光切断方式における交差ラインビームの構成を図5-1に示す。本システムでは、図5-1(a)に示すように加工ヘッド側面(+X方向)に2つのラインレーザを取り付け、ワーク上に交差ラインビームを照射する。ここで、図5-1(b)に示すようにXY平面において+X方向を0度方向とし、+X方向に溶接加工を行っており、+Y方向に加工方向を変える場合を示す。本方式では、-Y方向である-90度から0度、+Y方向である+90度までの±90度方向の加工経路上にラインビームを照射できる。図5-1(b)に示すように、+90度方向の溶接ビードによって高さが変化する場合、従来の光切断方式と同様にラインビームの投影位置変位が生じるため、高さ変位を計測できる。このように、交差ラインビーム光切断方式では、従来の光切断方式に対してラインレーザを一つ追加するだけの簡単な構成で、インプロセス計測可能な加工方向を±90度まで拡大可能である。

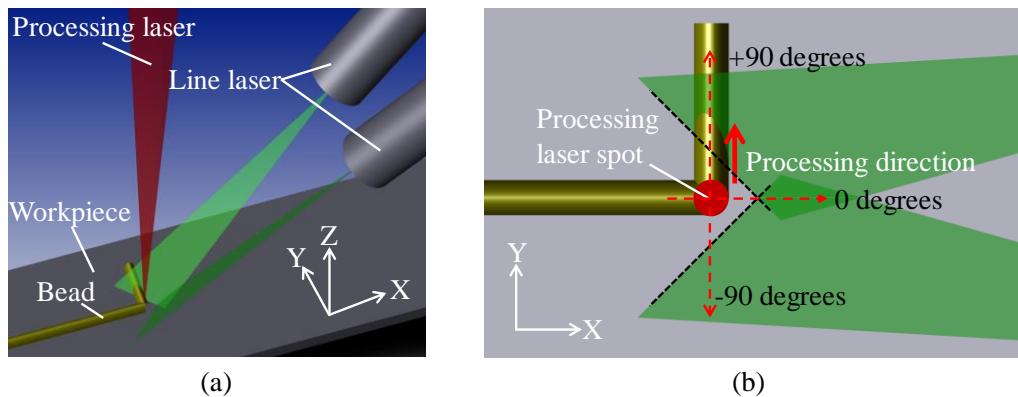


Fig. 5-1. Configuration of crossed line beams: (a) perspective illustration of crossed line beams and (b) illustration of crossed line beams on a weld bead in the X-Y plane.

5.2.2 交差ラインビームを用いた高さ変位計測原理

交差ラインビーム光切断方式の高さ変位計測原理を図 5-2 に示す。図 5-2 (a)に示すように XZ 平面内において、交差ラインビームを 2.3 節で示した三角測量の原理と同様に照射角度 θ でワーク上に照射する。図 5-2 (b)は、ワークの高さ変位が基準高さから ΔZ 高い場合を示す。ここで、点線が基準高さを示し、基準高さとは加工用レーザと高さ変位計測システムの焦点位置である。ラインビームの投影位置変位 ΔX と計測高さ変位 ΔZ の関係は、2.3 節の式 (2-1) と同様に三角測量の原理により、照射角度 θ を用いて以下のように表される。

$$\Delta X = \Delta Z \cdot \tan \theta \quad (5-1)$$

本方式では、交差ラインビームを $+X$ 方向から照射角度 θ で照射するため、計測高さが変化すると交差ラインビームは計測方向によらず X 方向に ΔX シフトする。次に、カメラ画像上の交差ラインビームの概略図を図 5-2 (c) に示す。ここで、点線が基準高さを計測した際のラインビーム位置である。撮像光学系の横倍率を M とすると、高さ変位計測システムに対する対象物の高さが ΔZ 変化すると画像上のラインビームが X 方向に $M \cdot \Delta X$ シフトし、実線の位置となる。従来通り、 $+X$ 方向に加工する場合には、 Y 方向の画像中央に対するラインビームのシフト量から高さ変位を計算する。ここで、 Y 方向画像中心の測定位置は、2 本のラインビームの交差点である。一方、加工方向が ϕ 度の場合、画像中央から Y 方向に ΔY_ϕ の位置のラインビームのシフト量から高さ変位を計算する。このように、計測方向に対応した Y 方向位置 ΔY_ϕ のラインビームの X 方向シフト量を算出することで、-90 度から+90 度までの ± 90 度方向の高さ変位計測が可能となる。計測方向に対応した Y 方向位置 ΔY_ϕ は、加工機 NC と高さ変位計測システムを連携させることで計算できる。加工機 NC にて加工経路情報から加工方向を推定し、推定した加工方向を基に計測方向を計算すればよい。ここで、カメラの画素サイズを W とすると、カメラ画像上のシフト量 $M \cdot \Delta X$ を用いて 1 画素当たりの高さ変位量 ΔH は、2.3 節の式(2-3)より、以下のように表される。

$$\Delta H = W / (M \cdot \tan \theta) \quad (5-2)$$

カメラ画像上のラインビームの位置は、重心位置から算出する。あらかじめ、基準高さとなる平面部で交差ラインビーム上のY方向位置に対するX方向重心位置を計算しておく。この基準高さでの重心位置と計測した重心位置の差異を計算し、式(5-2)を用いて高さ変位を算出できる。ここで、基準高さとの差異によって計算される高さ変位は、加工用レーザの焦点位置からの加工対象面の高さ変位である。このように、交差ラインビームを用いた高さ変位計測システムでは、計測方向によらずX方向のラインビーム重心位置の変位から高さ変位を計測可能であるため、高さ変位演算が非常に簡単である。加工位置の周囲を取り囲むようにラインビームを投影する方法として様々な方向からラインビームを照射する構成も考えられるが、ラインビームの照射方向ごとに画像上のラインビームの重心計算方向が変わるために、高さ変位演算が複雑になる。このように、交差ラインビーム光切断方式では、従来の光切断方式に対してラインレーザを一つ追加するだけの簡単な構成、かつ、計測方向に対して重心計算方向が同じである簡単な高さ変位演算処理により、XY平面内でのインプロセス計測可能な加工方向を±90度まで拡大できる。また、前章で示した加工光学系の対物レンズを共用する撮像系に対して-X方向からも同様に交差ラインビームを照射すれば、360度全ての加工方向に対して加工経路上の高さ変位計測を実現できる。

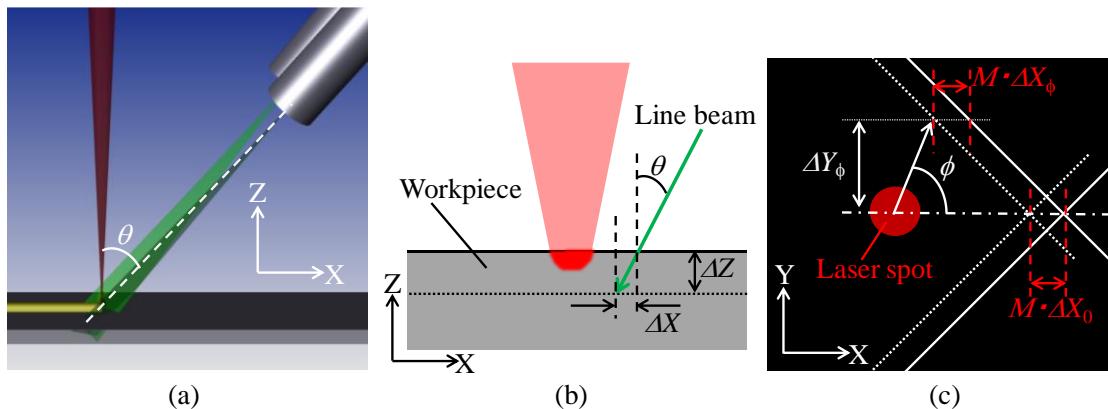


Fig. 5-2. Height displacement measurement principle by crossed line beams: (a) illustration of cross line beams in X-Z plane, (b) illustration of line beam and a workpiece and (c) image of crossed line beams.

5.3 交差ラインビーム光切断方式高さ変位計測システムの設計

5.3.1 高さ変位計測システムの構成

実験に使用する交差ラインビーム高さ変位計測システムの構成を図5-3に示す。今回の実験セットアップでは、加工ヘッド側にXYZステージがあり、ワーク側にC軸の回転ステー

ジがある。加工ヘッド、および高さ変位計測システムの撮像系は、4.2節の構成と同様に加工用の対物レンズを高さ変位計測システムと共にすることで加工光学系と同軸に計測する構成とするため、詳細の説明を省略する。撮像系に取り付けたカメラを用いて加工位置近傍の交差ラインビーム画像を撮影し、画像上のラインビームの照射位置から高さ変位を計測する。本実験での撮像系のパラメータは、式(5-3)により、カメラの1画素当たりの高さ分解能が $15 \mu\text{m}$ となるようラインビームの照射角度 $\theta = 40 \text{ degrees}$ 、光学系の横倍率 $M = 0.44$ 、カメラの画素サイズ $W = 5.5 \mu\text{m}$ と設計した。

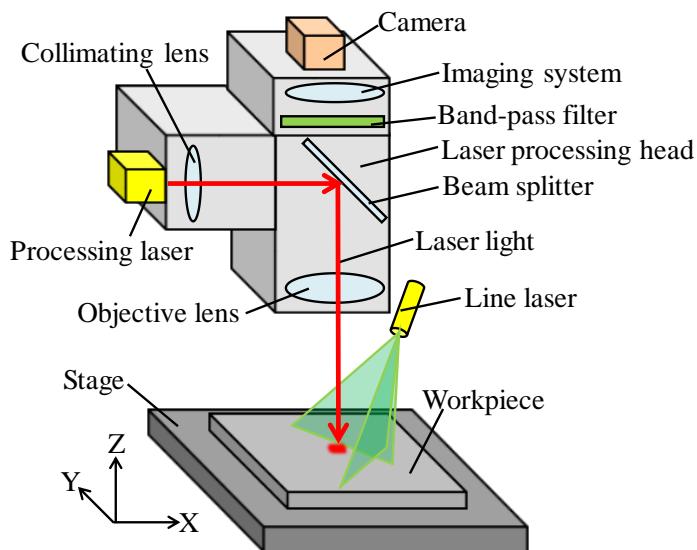


Fig. 5-3. Configuration of height displacement measurement system using crossed line beams for process control of laser thermal processing.

5.3.2 交差ラインビームによる高さ変位計測位置

交差ラインビームは、加工ヘッド側面に取り付けた2本のラインレーザを用いて照射する。しかし、4.3節と同様にラインビームの照射位置はできるだけ、加工位置に近い方が良い。加工制御時に近い温度環境での高さ変位計測が可能となるだけでなく、曲線などの複雑な経路を加工する際に加工機NCでの計測方向の推定が容易になるためである。本システムでは、4.3節と同様に図5-4に示す通り、0度、 ± 90 度方向の交差ラインビームの照射位置を加工位置から4mmとした。この場合、最も加工用レーザスポットに近づく ± 45 度方向の照射位置は2.8mmである。ここで、本構成における加工用レーザのスポット径が $\phi 3 \text{ mm}$ であるため、最大1.3mmのラインビームの重心位置変化を計測可能である。式(5-1)より、高さ変位計測範囲は $\pm 1.5 \text{ mm}$ となる。高さ変位計測位置が加工位置に近いほど加工中の外乱光の影響は受けるため、4.3節と同様にラインレーザ波長520nmのみを透過するバンドパスフィルタを撮像系内に設置し、外乱光の影響を低減した。

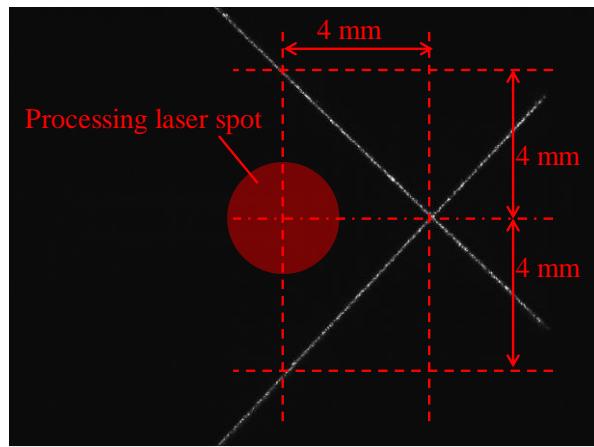
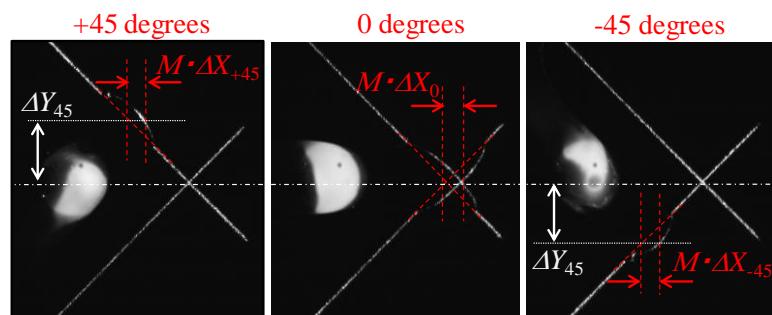


Fig. 5-4. Image of crossed line beams on a flat plane.

5.3.3 交差ラインビームによるインプロセス計測結果

交差ラインビーム高さ変位計測システムを用いて、レーザ熱加工中に0度、 ± 45 度方向にある溶接ビードを計測した際のカメラ画像を図5-5に示す。本システムでは計測方向 ± 45 度が最も加工位置に近づくが、図5-5に示す通り、前章と同様に外乱光の影響を低減したことでレーザ熱加工中に外乱光の影響を受けずに加工位置近傍で交差ラインビーム画像を取得可能であることを明らかにした。ここで、0度方向の高さ変位を計測する場合には画像中央のY方向位置のX方向に対する重心位置を計算し、 ± 45 度では画像中心からそれぞれ ΔY_{45} 上下にずれたY方向位置の重心位置を計算することで、加工方向が変化する際にも加工経路上の高さ変位を算出できる。このように、本構成では加工用レーザのスポット径 $\phi 3$ mmに対して、加工方向 ± 90 度以内において加工方向に応じて加工位置から2.8~4mmでの高さ変位をレーザ熱加工中にインプロセス計測できる見込みを得た。

Fig. 5-5. Images of crossed line beams on a weld bead during laser thermal processing at 0-degree and ± 45 -degrees direction.

5.4 計測方向に対するリニアリティ評価結果

平坦な金属ワーク上で交差ラインビーム高さ変位計測システムとワークの距離を変位させてリニアリティ特性評価を実施した。基準高さ($Z = 0 \text{ mm}$)と加工ヘッドを 1 mm 離した際のラインビームの重心位置を図 5-6 に示す。ワークに対して加工ヘッドが離れたため、交差ラインビームの投影位置は計測方向によらず-X 方向に変位した。重心位置から高さ変位を計算し、 $Z = +1 \text{ mm}$ で計測した結果と基準高さで計測した結果の差異から計測方向に対する変位量を算出した結果を図 5-7 に示す。計測方向 ± 90 度の範囲で加工ヘッドの移動量に対して誤差 $\pm 50 \mu\text{m}$ 以下の計測を実現した。これは、5.2 節で示したカメラの 1 画素当たりの高さ分解能 ΔH の設計値 $15 \mu\text{m}$ に対してラインビームの重心位置を \pm 数 pixel の精度で計測可能であることを示しており、計測システムとして十分な計測精度が得られた。また、5.2 節で示したように 2 本のラインレーザを加工ヘッド側面(+X 方向)に設置し、XZ 平面において照射角度 θ で交差ラインビームを照射することで、計測方向、つまり、画像の Y 方向位置によらず、式(5-2)の通り計測距離に応じて同様にラインビームの投影位置が変位することを明らかにした。したがって、交差ラインビーム光切断方式では、従来の光切断方式と同様に簡単な演算処理で高さ変位計測が可能となり、加工経路上の高さ変位をインプロセス計測可能な計測方向を ± 90 度方向に拡大可能であることを明らかにした。

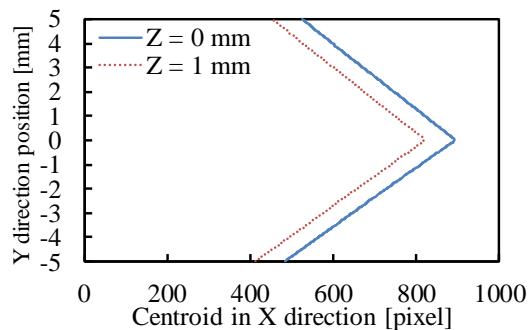


Fig. 5-6. Centroid position of crossed line beams on flat workpiece at $Z = 0 \text{ mm}$ and $+1 \text{ mm}$.

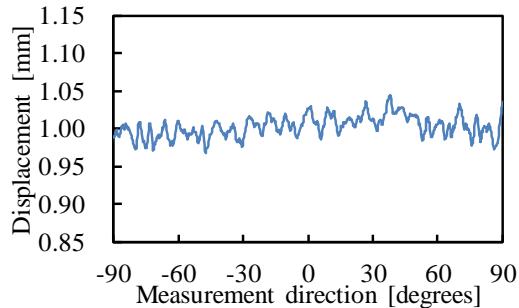


Fig. 5-7. Displacement by measurement direction on a flat workpiece when processing head moved from $Z = 0 \text{ mm}$ to $Z = +1 \text{ mm}$.

5.5 計測方向に対する精度評価

5.5.1 計測方向に対する精度評価実験系

平坦なワーク上に溶接ビードがある場合の計測方向に対する高さ変位計測精度評価結果を示す。交差ラインビーム光切断方式は、計測方向によって使用するラインビームのY方向位置が異なる。そこで、同一の溶接ビードを用いて計測方向に対する高さ変位計測評価を実施した。実験条件を表5-1、計測方向に対する精度評価系を図5-8に示す。ここで、加工光学系と撮像系は省略する。また、使用したワークは図4-4と同様である。加工機上にワークを段取りし、加工をしていない状態で加工ヘッド側のXYステージを走査して高さ変位計測を行う。4.5節で示した通り、レーザ熱加工中と加工をしていない状態の高さ変位計測精度に差異が無かったため、今回は加工をしていない状態で計測する。ビード側のC軸回転ステージを用いて溶接ビードを±90度以内で回転させ、各方向に合わせてXYステージを動かすことによって、同じ溶接ビードを用いて計測方向に対する高さ変位計測評価を実施した。本実験では、4.5節と同様にカメラ画像を取得した際にトリガ信号を加工機NCに送信して加工機のステージ位置情報と一致させた。

Table 5-1. Experiment parameters for accuracy evaluation by measurement direction.

Parameter	value
Stage speed	10 nm/sec
Frame rate of an image sensor	20 fps
Measurement pitch	0.5 mm
Exposure time	0.1 msec

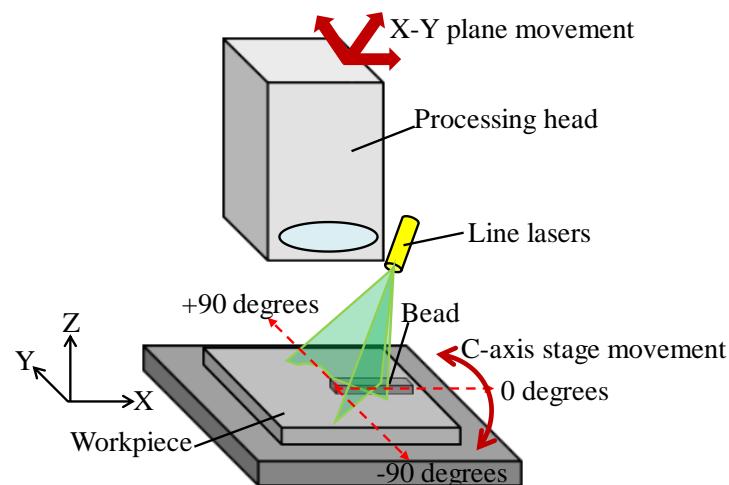


Fig. 5-8. Experiment setup of accuracy evaluation by measurement direction.

5.5.2 計測方向に対する高さ変位計測結果

計測方向 0 度, ± 30 度, ± 60 度, ± 90 度のビード中央で計測したラインビーム画像を図 5-9 に示す。設計通り、計測方向によって溶接ビードによるラインビームの投影位置変位が生じる Y 方向位置が異なっていた。これらのラインビーム画像から計測位置に対する溶接ビード高さを算出した結果を図 5-10 に示す。ここで、4.5 節と同様に高さ変位計測システムよりも高精度な 3 次元測定機(三鷹光機 NH-3N)を用いて事前に計測した結果を真値とする。全ての計測方向で終端部の盛上りも含めてビード高さを真値と同等に計測可能である。

また、急な斜面形状である始終端を除いた計測位置 $X = 10 \sim 45$ mm の真値との差異より算出した高さ変位計測精度を図 5-11 に示す。また、計測方向ごと(10 度ピッチ)の真値に対する最大誤差を図 5-12 に示す。計測方向 ± 60 度以内では平坦なワーク上と同等に計測方向によらず計測精度 $\pm 50 \mu\text{m}$ 以下であった。一方、 ± 70 度以上ではビード側面の斜面で反射した正反射光により計測精度 $\pm 150 \mu\text{m}$ となった。 $+X$ 方向から照射したラインビームが Y 方向に延びるビード側面の曲面部で正反射条件を満たし、散乱反射光ではなく正反射光として撮像系に入射したため、図 5-9 で示した ± 90 度方向のラインビーム画像のビード上部の光強度が飽和した。正反射光によりラインビームの $+X$ 方向側の光強度が飽和しライン幅が広がったため、高さ変位演算時の重心計算結果が $+X$ 方向にばらつき、演算された高さ変位計測結果に $+X$ 方向の誤差が発生した。また、この正反射光の反射特性はビード側面の凹凸形状に依存するため、計測位置によって誤差量が変化した。このように、溶接ビードのような曲面形状を計測する場合、高精度な高さ変位計測にはラインビームの照射方向により発生する正反射光の影響を低減することが必要であることを明らかにした。

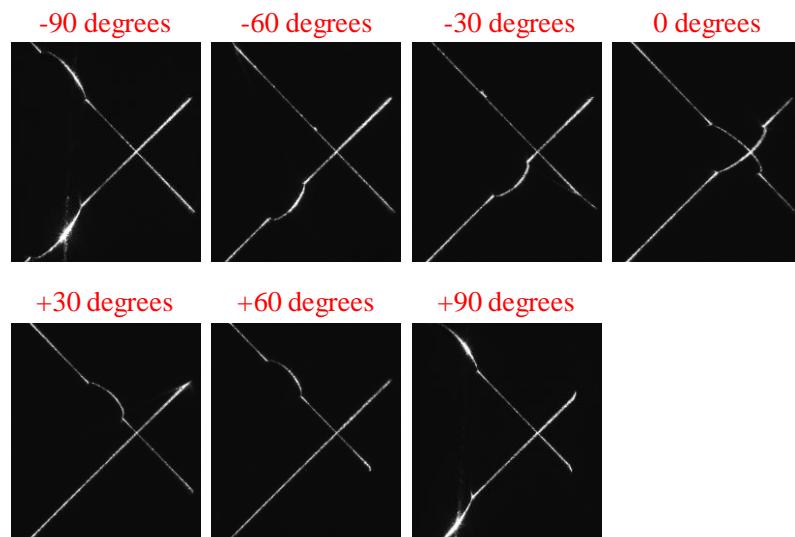


Fig. 5-9. Image of crossed line beams on a weld bead. Measurement directions are 0, ± 30 , ± 60 and ± 90 degrees.

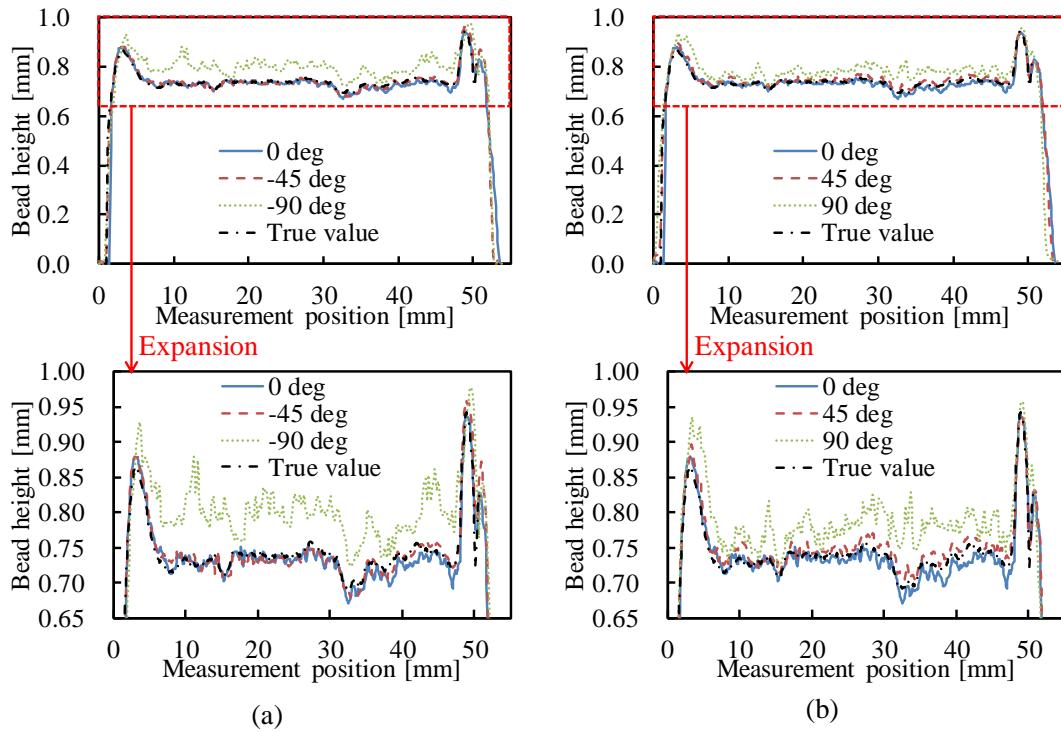


Fig. 5-10. Height measurement results of weld bead by measurement directions: (a) measurement directions are 0, -45, -90 degrees and (b) measurement directions are 0, +45, +90 degrees.

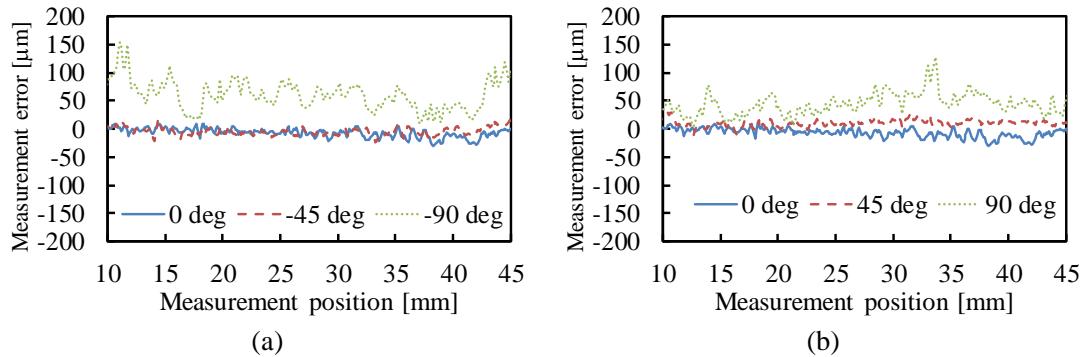


Fig. 5-11. Height measurement error of a weld bead by measurement directions. The error was estimated from difference between the measurement result and the true value: (a) measurement directions are 0, -45, -90 degrees and (b) measurement directions are 0, +45, +90 degrees.

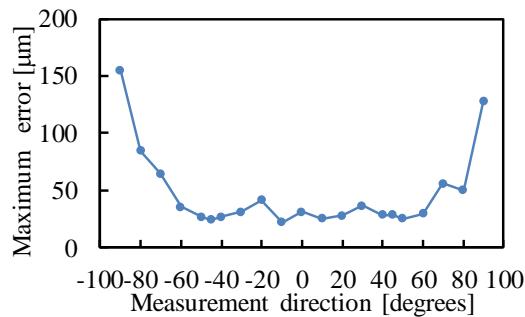


Fig. 5-12. Maximum measurement error of a weld bead by measurement direction. This result was averaging value in flat region ($X = 10\text{--}45\text{ mm}$) on a weld bead.

計測方向 0 度から 5 度まで 1 度ピッチで計測し、2 本のラインビームが交差する 0 度方向付近の高さ変位計測精度を詳細に評価した結果を図 5-13 に示す。2 本のラインビームが交差する 0 度付近でも精度低下は無く、 $\pm 50\text{ }\mu\text{m}$ 以下の計測精度で高さ変位を計測可能であることを明らかにした。このように、交差ラインビーム光切断方式では、 ± 60 度以内の計測方向では、溶接ビードを計測する際にも平坦なワーク上と同等の $\pm 50\text{ }\mu\text{m}$ 以下の計測精度である。一方、 ± 70 度以上の計測方向では、正反射光の影響により計測精度が $\pm 150\text{ }\mu\text{m}$ となる。このように、加工方向が変化する際にも加工経路上の高さ変位を計測する交差ラインビーム光切断方式では、レーザ熱加工において加工対象面が加工用レーザの焦点位置となるよう加工制御を行う際に必要なインプロセス計測精度約 $100\text{ }\mu\text{m}$ に対して $\pm 150\text{ }\mu\text{m}$ の精度で計測可能であるため、レーザ熱加工における加工制御への適用が可能となる見込みを得た。しかし、平坦なワークを加工する除去加工では加工方向によらず高精度な計測が可能であるが、加工対象面が傾くことがある 3 次元レーザ加工や造形可能などの接合加工では、交差ラインビームの照射方向と加工方向の関係によって正反射条件を満たすと計測精度が低下することを考慮する必要があることを明らかにした。

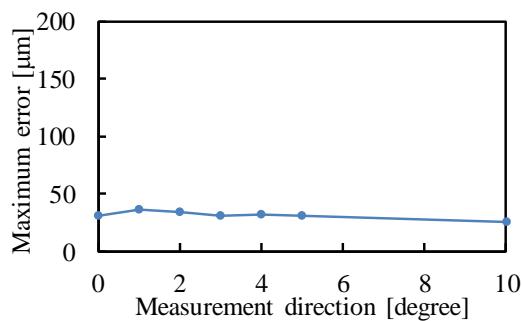


Fig. 5-13. Maximum measurement error of weld bead by small measurement directions estimated by line beams near the cross point. This shows the expansion of Fig. 5-12 from 0 degree to 10 degrees.

5.6 結言

本章では、レーザ熱加工中に加工方向が変化する際にも加工経路上の高さ変位を計測可能な交差ラインビーム光切断方式の有効性を示した。交差ラインビーム光切断方式では、加工方向変化に対応するために加工位置の周囲にラインビームを投影する手法として、2つのラインビームを交差させて加工ヘッド側面からワーク上に照射し、光切断方式にて高さ変位を計測する。従来の光切断方式の構成に対してラインレーザを一つ追加するだけの簡単な構成で±90度方向の加工経路上のインプロセス高さ変位計測が実現可能である。また、交差ラインビームは計測方向によらず、高さが変化する際に画像上の重心位置が同一方向に変位するため、簡単な高さ変位演算処理でインプロセス計測可能な加工方向を拡大可能である。これにより、インプロセス計測によるレーザ熱加工制御を適用できる加工経路の形状自由度を向上できる。

交差ラインビーム光切断方式を用いた高さ変位計測原理を示し、加工光学系と同軸に配置する加工位置近傍でのインプロセス計測システムにおいてレーザ熱加工中の外乱光の影響を低減し、加工用レーザスポット $\phi 3\text{ mm}$ に対して加工方向に応じて加工位置から 2.8~4 mm の計測位置でレーザ熱加工中にインプロセス計測可能であることを示した。同一の溶接ビードを用いて交差ラインビーム光切断方式の計測方向に対する高さ計測精度評価実験を実施した。計測方向±60度以内では平坦なワーク上と同等の高さ変位計測精度±50 μm であり、±70度から±90度の計測方向では、溶接ビード側面の曲面部で正反射条件を満たし計測精度が±150 μm となった。正反射光の対策として、照射されるラインビームが正反射条件を満たさないような H/W 構成や高さ変位計測時の重心計算アルゴリズムの改善が考えられる。

このように、交差ラインビーム光切断方式により、簡単な構成でインプロセス計測中に加工経路上の高さ変位計測が可能な加工方向を±90度に拡大できることを明らかにした。また、交差ラインビームを対向する2方向から照射すれば、加工位置の周囲を取り囲むようにラインビームを照射可能であるため、加工経路によらず 360度方向の加工経路上のインプロセス計測が可能となる。本方式では計測方向によって正反射光が入射して計測精度が低下するが、産業用レーザ加工機におけるレーザ熱加工での加工用レーザの焦点距離に対する加工対象面の制御精度約 100 μm へ適用できる見込みを得た。このように、交差ラインビーム光切断方式を用いることで、レーザ熱加工中に加工方向が変化する際にも常に加工経路上の加工位置近傍でのインプロセス高さ変位計測が可能であることを実証したため、次章では提案した機上光学式変位計測システムによるインプロセス計測結果に基づいたレーザ熱加工制御の有効性を検証した結果を示す。

第6章 インプロセス変位計測結果に基づくレーザ熱加工制御

6.1 緒言

第4章では、加工制御時に近い環境で高さ変位を計測することでレーザ熱加工制御を高精度化するための加工光学系と同軸に計測系を配置する加工位置近傍でのインプロセス計測手法の有効性を明らかにした。また、第5章では、インプロセス計測によるレーザ熱加工制御を適用できる加工経路の形状自由度を向上するための加工位置の周囲を取り囲むようにラインビームを照射する交差ラインビーム光切断方式により、インプロセス計測中に加工経路上を計測可能な加工方向の拡大を実現した。

本章では、これまでに得られた知見を基に、レーザ熱加工中に計測する加工位置近傍での加工経路上の加工用レーザの焦点位置に対する加工対象面の高さ変位計測結果に基づいたレーザ熱加工制御の実用性を示す。インプロセス高さ変位計測結果に基づいて加工対象面が加工用レーザの焦点位置となるよう加工ヘッドとワーク間の距離を制御することで、事前の加工条件出しの尤度を緩和し、加工精度を向上できることを明らかにする。ここでは、レーザ熱加工プロセスの中でも特にZ軸への走査を伴う加工方式として、近年研究が盛んに行われている造形加工を行う金属AM加工機を用いて、金属積層物の高さ変位を加工中に計測し、造形面が常に加工用レーザの焦点位置となるよう最適制御することで高精度な造形加工が可能であることを示す。第2章で述べた通り、Z方向の走査を伴う造形加工において、高精度な加工を行うためにはレーザ熱加工制御が不可欠である。そこで、本章では、インプロセス高さ変位計測結果に基づいたレーザ熱加工制御システムを構築し、連続積層加工時のZピッチを変えた円筒造形評価により、レーザ熱加工制御の有効性を検証する。提案したインプロセス計測システムを用いて、加工方向が変化する複雑な加工経路を造形加工する際にレーザ熱加工制御によって加工精度を向上できることを明らかにする。

6.2 レーザワイヤDED金属積層装置

6.2.1 金属積層装置の概要

本章のレーザ熱加工制御実験では、近年研究が盛んに行われている金属AM加工機の中でもレーザワイヤDirected Energy Deposition(DED)金属積層装置を使用する。AM技術は、複雑形状を短時間、低コストで製造できるため、革新的な製造技術として注目されている[108-111]。特に金属加工では、従来の切削加工で実現困難である複雑形状を高速に加工可能であるため、製造業において大きな期待が寄せられており、バイオメディカル[112]、航空宇宙[113,114]、加工工具[115]など様々な分野で研究されている。Powder bed fusion(PBF)方式は、

金属粉末を敷き詰め、レーザあるいは電子ビームを用いて層状に造形を行う方式である[116-118]。PBF 方式は、繊細な加工が可能であるが、大型化が難しく、加工に時間がかかるという課題がある。一方、DED 方式は、付加する部分に金属ワイヤや金属粉末を供給しながら、レーザやアークプラズマ、電子ビームを照射することで造形を行う[119-121]。DED 方式は、部分的な加工が可能であり、欠損部分の補修や大型部品を高速に加工でき、既存の金属部品に造形部を付加することで加工コストの低減が可能となる。その中でも、レーザ熱加工に分類されるレーザ DED 方式では、材料供給、プロセス制御が容易なパウダー方式が多く研究されてきた[119]。一方、金属ワイヤを用いたレーザ DED 方式[121]の方が、溶接装置用のワイヤ材料を使用できるため、様々な金属材料を容易に用いることができ、造形速度が速く、造形密度が高い[122]。また、粉末材料を用いないため、クリーンプロセスが可能である。図 6-1(a)に金属ワイヤを用いたレーザ DED 金属積層装置の例を示す。三菱電機(株)は、2018 年に JIMTOF2018(第 29 回日本国際工作機械見本市)にてレーザワイヤ DED 金属積層装置を参考出展した[123-125]。レーザワイヤ DED 金属積層装置では、5 軸加工を行うことで図 6-1(b)に示すように、複雑形状の造形物を短時間で加工できる。例えば、プロペラ形状では、既製品の円筒部品に羽根形状のみ金属積層することで、巨大な基材から切削加工を行う場合や全て金属積層造形する場合に比べて格段に加工時間を低減できる。さらに、従来の切削加工の場合、プロペラの羽根同士の隙間や円筒の内部など約 95% が切りくずになるため、金属積層装置を用いることで製造コストも低減可能である。また、中空タンク形状のような密閉形状を造形する場合、パウダー方式であれば内部に粉が残ってしまうが、金属ワイヤを用いることで完全な密閉状態を作ることができるメリットがある。インペラ形状のような複雑形状でもニアネットシェイプに造形することにより、後加工を含めたトータルの生産性を向上できる。

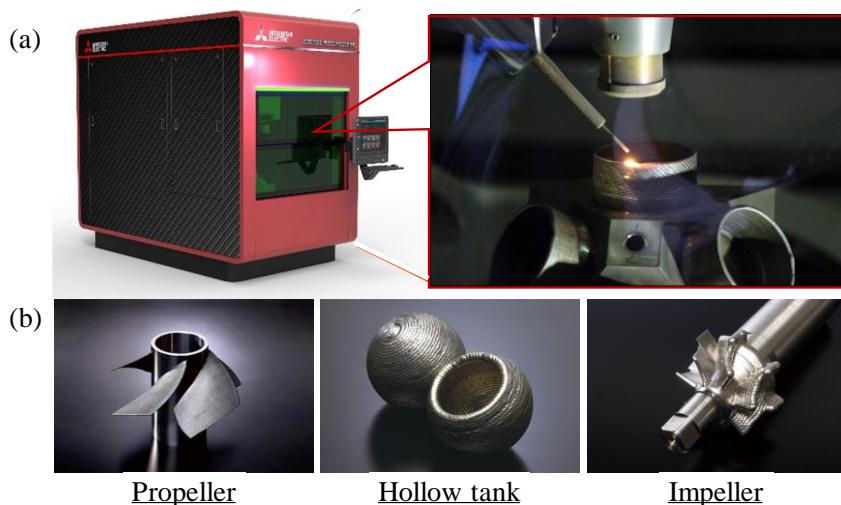


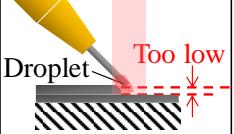
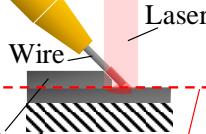
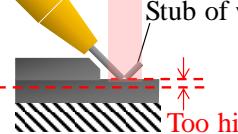
Fig. 6-1. Prototype of a laser wire-DED machine and fabricated objects: (a) prototype of a laser wire-DED machine fabricated by Mitsubishi Electric Co. Inc. and (b) examples of fabricated objects.

6.2.2 金属積層装置におけるプロセスモニタリング技術

レーザ DED 金属積層装置において高精度な加工を行うためには、プロセスモニタリング技術が重要である[126]。これまで造形加工において、溶融池の画像[121,126]、溶融池温度[120,127]、造形物の高さ[128-130]などをモニタリングする研究が行われている。特に、レーザワイヤ DED 金属積層装置では、金属ワイヤを溶融する加工用レーザの焦点位置に対する加工対象面である造形物の上面高さを最適範囲に維持しなければ、高精度な加工が難しい。つまり、1層積層するごとに Z 軸を上昇させ、1層ずつ積層する造形加工において、毎層造形した後の造形物高さが次層を造形する際の焦点位置となることが望ましく、ここでは次層の加工用レーザの焦点位置を毎層の目標造形高さとする。表 6-1 に目標造形高さと造形物上面高さの関係に対する造形結果の例を示す。例えば、目標造形高さに対して造形物上面高さが低い場合、造形物に対して溶融される金属ワイヤの位置が高くなるため、加工光が照射されて溶けた金属ワイヤが積層済みの造形物に十分付着せず、溶滴(ドロップ)が発生し、加工後の造形物に凹凸が生じる。一方、目標造形高さに対して造形物上面高さが高い場合、金属ワイヤを溶融する加工用レーザの焦点位置が造形物上面に対して低くなるため、金属ワイヤが積層済みの造形物に突っ込みすぎ、加工光が照射されても金属ワイヤが全て溶けきらず、溶け残り(スタブ)が発生する。このように、レーザワイヤ DED 金属積層装置において高精度な加工を実現するためには、毎層の造形物高さが設計通り目標造形高さとなるよう積層し、金属ワイヤが溶融される加工用レーザの焦点位置と造形物上面の関係を一定に保つ必要がある。特に複数層を連続積層加工する場合には造形物が蓄熱し、1層分の積層高さが加工開始時と比較して低くなる。そのため、連続積層を行う前には、各層を積層後に上昇させる Z 軸ピッチについて、最適条件を事前に算出しておく必要がある。しかし、この連続積層するための最適な Z ピッチは、造形形状や加工条件(ワイヤ供給速度やステージ速度、レーザ出力など)を変更する度に高精度に調整しなければならず、金属造形プロセスを自動化する際の妨げとなっている。一方、造形加工の場合、1層積層するごとに造形加工を停止し、加工経路内の造形物高さを計測して、次層を造形する際にレーザ熱加工制御を行うことでレーザ熱加工プロセスの自動化と高精度な加工を実現できる。このように、事前に計測した造形物の高さ変位に基づいてレーザ熱加工制御を行うことで、5軸加工を用いた複雑形状の連続積層が可能となる。しかし、事前に高さ変位計測を行う場合、レーザ熱加工プロセスの自動化は可能となるが、加工時間に加えて計測時間がかかるため、プロセス全体の時間が増加する。したがって、自動化された金属造形プロセスをさらに高速化するためには、造形物の高さ変位をレーザ熱加工中にリアルタイムでインプロセス計測し、加工条件を最適制御する実時間制御が望まれる。レーザ熱加工制御により、1層当たりの積層高さを Z ピッチと等しくできれば、事前に調整する Z ピッチの調整精度によらず、金属ワイヤが溶融される加工用レーザの焦点位置である目標造形高さに対して常に造形物の上面高さを最適範囲内に維持でき、高精度な連続積層造形加工を実現できる[128,129,131]。

現在、事前に計測した高さ変位計測結果に基づいて加工条件を最適制御することで5軸加工による複雑形状の自動造形加工が可能となっており、レーザワイヤDED金属積層装置の実用化が進められている[124]。一方、さらなるタクト短縮による生産性向上のためには、レーザ熱加工中のインプロセス高さ変位計測技術とリアルタイムでの実時間制御技術が望まれる。そこで、まず、次節では、インプロセス高さ変位計測結果に基づいたレーザ熱加工制御システムの構成を示す。次に、4章で示した直線状ラインビームを用いた光切断方式の加工位置近傍でのインプロセス高さ変位計測システムを使用したレーザ熱加工制御実験結果により、レーザ熱加工制御の有用性を明らかにする。最後に、5章で示した交差ラインビーム高さ変位計測システムを用いたレーザ熱加工制御により、加工方向が変化する複雑な加工経路の造形形状を高精度に造形可能であることを明らかにする。

Table 6-1. Deposition results by relationship between weld bead height and processing laser focus position as the target height.

	Droplets	Smooth	Stubbing
Bead height	Low	Optimal value	High
Configuration	 Droplet	 Wire	 Stub of wire
Bead			

6.3 インプロセス高さ変位計測結果に基づいたレーザ熱加工制御方式

6.3.1 レーザ熱加工制御システムの構成

次に、レーザワイヤDED金属積層装置におけるインプロセス高さ変位計測結果に基づいたレーザ熱加工制御システムを図6-2に示す。レーザワイヤDED金属積層装置は、複数層の積層造形を行う場合、1層積層ごとにZ軸を一定ピッチで上昇させるが、加工用レーザによって金属ワイヤが溶融される造形プロセスにおいて造形加工中の金属積層物は連続積層

が進むにつれて蓄熱される。このように、蓄熱の影響で各層の造形物高さは一定とならないため、1層ごとに上昇させるZピッチと1層当たりの積層高さが異なり、金属ワイヤが溶融される加工用レーザの焦点位置に対する造形物の上面高さが造形中に変化する。そこで、高さ変位計測システムを用いて加工経路上の加工用レーザの焦点位置に対する造形物の上面高さ変位を計測する。ここで、高さ変位計測システムの基準高さを加工用レーザの焦点位置とすることで、計測した高さ変位が加工用レーザの焦点位置に対する造形物の上面高さの変位量に等しくなる。計測した高さ変位量を加工機NCに送り、加工機NCは造形物高さが狙い値、つまり、次の層を積層するためZピッチを上昇させた後の加工用レーザの焦点位置となるよう1層当たりの積層高さを制御する。ここで、造形加工では造形物の上面高さが加工用レーザの焦点位置となるよう加工ヘッドとワーク間の距離をZ軸制御するよりも1層当たりの積層高さが設定されたZピッチと等しくなるよう制御する方がよい。Z軸を制御することで造形物の上面高さを加工用レーザの焦点位置に制御可能であるが、積層量が設計値と異なり、加工後の造形形状が設計通りとならない。そこで、本構成では1層当たりの積層高さを制御するパラメータとしてワイヤ供給速度を使用する[128]。基準となるワイヤ供給速度を1とし、±0.5倍変動させて1層ビードを造形した際のビード高さとビード幅の結果を図6-3に示す。ワイヤ供給速度を変化させた際にはビード高さは変化するが、ビード幅はほとんど変化しない。これは、レーザ出力やステージの走査速度をえていないため、単位時間当たりに加工位置に供給されるエネルギー量は一定であり、ワイヤ材料の供給量のみ変化させているため、幅方向に溶け広がることなく金属ワイヤの供給量に応じて高さ方向にのみ変化するためである。したがって、本章では、計測した造形物高さ変位に応じて制御するレーザ熱加工パラメータとしてワイヤ供給速度を使用する。

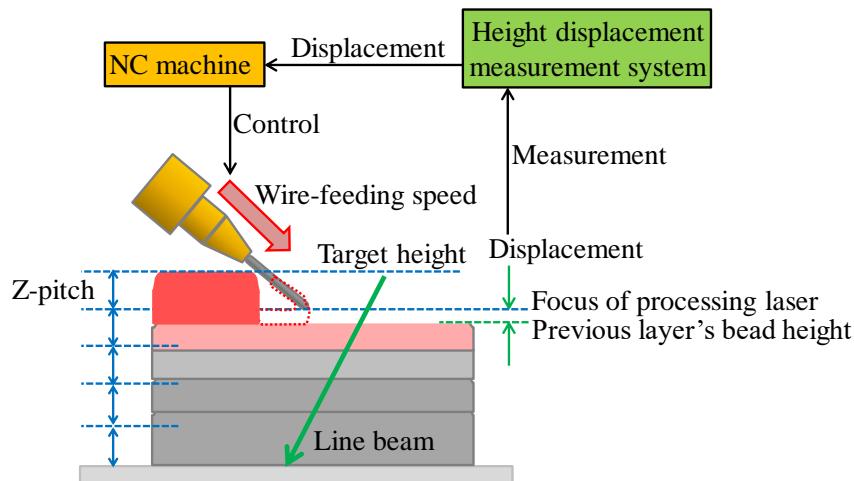


Fig. 6-2. Configuration of wire-feeding speed control system using in-process height displacement measurement system.

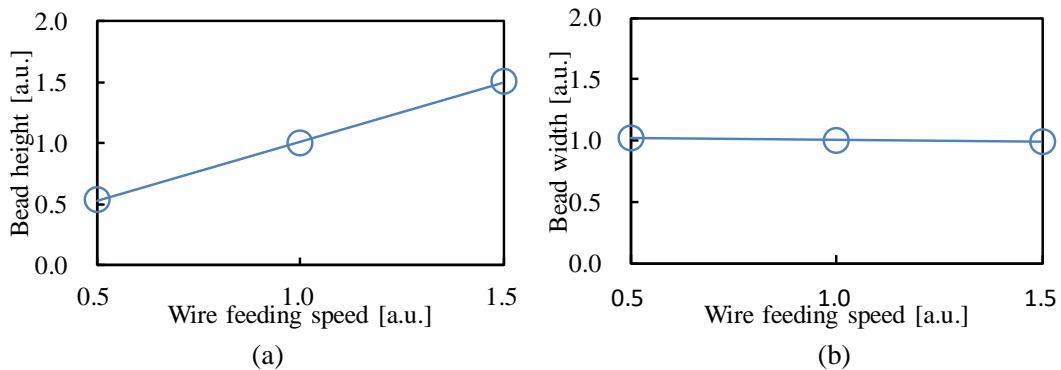


Fig. 6-3. Bead height and bead width results by wire-feeding speed: (a) bead height result by wire-feeding speed and (b) bead width result by wire-feeding speed.

6.3.2 レーザ熱加工制御フローチャート

レーザワイヤ DED 金属積層装置において、インプロセス高さ変位計測結果に基づいてワイヤ供給速度を最適制御する際のフローチャートを図 6-4 に示す。まず、造形開始と同時に加工経路上の造形物高さ変位をインプロセス計測する。ここで、第 1 層目を造形する場合には、まだ造形物が無いため、高さ変位計測を省略することも可能であるが、平坦なワーク上に造形する場合にはワークが反っている可能性もあり、また、補修加工を行う場合などは 3 次元形状上に造形することもあるため、1 層目から高さ変位計測を行っても良い。造形中に計測した高さ変位計測結果に基づいてワイヤ供給速度を制御する。例えば、4 章で示した構成では、加工位置から 4 mm の位置で高さ変位を計測するため、加工機 NC を用いて 4 mm 移動後に計測した高さ変位計測結果に応じてワイヤ供給速度を制御すればよい。ワイヤ供給速度の制御量は、図 6-3 の結果を使用する。1 層分の加工経路の造形が終了すると設定された積層数 N が終了したかを判定する。もし、 N 層が終了していなかった場合には、Z ステージを用いて Z 軸を上昇させ、再度造形加工を開始する。また、事前に設定された積層数 N の造形が終了した場合には、造形プロセスを終了する。このように、インプロセス高さ変位計測結果に基づいた実時間制御により、事前の加工条件出しの尤度を緩和し、加工精度向上可能か次節で検証する。

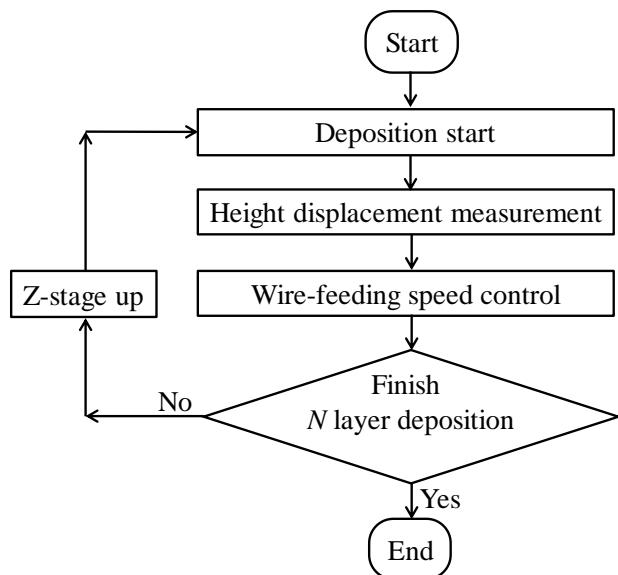


Fig. 6-4. Flowchart of continuous deposition process by wire-feeding speed controlling using in-process height displacement measurement system.

6.4 高さ変位計測結果に基づくワイヤ供給速度制御実験

6.4.1 C 軸回転円筒の連続積層造形実験系

提案したインプロセス計測結果に基づいた実時間制御の有効性を検証するため、前節で示したワイヤ供給速度制御システムを用いて、C 軸回転による円筒形状の連続積層造形を実施した。実験系の概要を図 6-5 に示す。今回使用した金属ワイヤ材料はインコネル 718 である。本構成ではワーク側の C 軸回転ステージを用いてワークを回転させ、加工ヘッド側にある Z 軸ステージを用いて 1 層積層するごとに加工ヘッドを上昇させ、円筒形状の連続積層造形を行う。C 軸回転円筒造形では加工方向が変化しないため、4 章で示した直線状ライソビームを用いた従来の光切断方式と加工位置近傍でのインプロセス計測手法を使用する。事前の実験において、加工制御を行わずに $\phi 70$ mm の円筒形状を連続積層造形するための最適な Z ピッチは 0.25 mm であった。そこで、本実験では、事前の Z ピッチの調整精度と連続積層造形性を評価するため、 $\phi 70$ mm の円筒形状を連続積層造形する際に Z ピッチを ± 0.05 mm 変化させて連続積層評価を実施した。また、同じ 0.25 mm の Z ピッチであっても円筒径を $\phi 50$ mm とした際に連続積層が可能かどうかを同様に評価した。

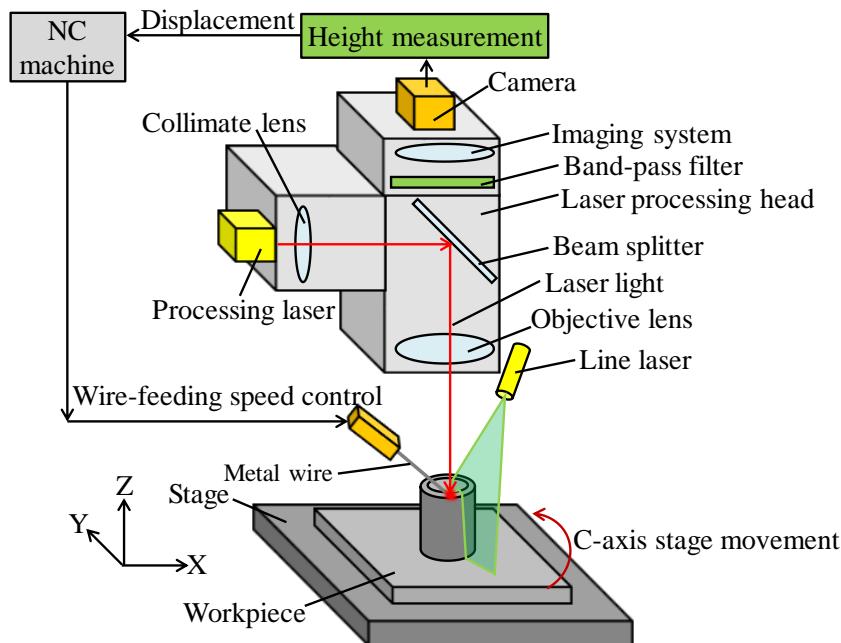


Fig. 6-5. Experiment setup of continuous deposition using laser thermal process control.

6.4.2 連続積層造形結果

インプロセス高さ変位計測結果に基づくワイヤ供給速度制御を行った場合と従来通りワイヤ供給速度を制御しなかった場合の連続積層結果を表 6-2 に示す。表 6-2 中に示している積層高さに対する造形物の高さ変位は、円筒形状のうち造形開始位置から 180 度位置の結果である。高さ変位が+方向である場合、目標の造形高さである加工用レーザの焦点位置に対して造形物の上面が高いことを意味し、高さ変位が-方向である場合、造形物の上面が低いことを意味する。また、積層高さは積層数と Z ピッチから算出した値を用いた。ワイヤ供給速度を制御しない従来法の場合、円筒径 $\phi 70$ mm, Z ピッチ 0.25 mm の条件で造形した際に積層高さ 44 mm まで造形可能であった。しかし、表 6-2 中の積層高さに対する加工用レーザの焦点位置に対する造形物上面の高さ変位が示す通り、積層高さ 15 mm 程度までは造形物の高さ変位が目標に対して高く、金属ワイヤが造形物に突っ込み気味で造形されていた。しかし、それ以降は蓄熱の影響で 1 層当たりの積層高さが低くなり、加工用レーザの焦点位置に対する造形物上面の高さ変位が低くなっている、積層高さ 44 mm 付近でドロップが発生したことによって連続積層が不可能であった。一方、Z ピッチを 0.20 mm と小さくし、Z ピッチ 0.25 mm と同じ加工条件で造形すると、積層高さ 18 mm で造形が不可能であった。積層高さ 5 mm 付近でスタブ状態となり、ワイヤが造形物に突っ込み過ぎ、造形物表面が削られたため高さ変位計測ができなかった。また、Z ピッチを 0.30 mm と大きくした場合には、積層高さ 10 mm 付近でドロップが発生し、連続積層が不可能であった。このように、インプロセス高さ変位計測結果を用いたレーザ熱加工制御を行わない造形方法では、同じ造形

形状でも Z ピッチを事前に ± 0.05 mm 以下で最適に調整しなければ、加工用レーザの焦点位置に対して加工対象面の高さが変化するため高精度な加工が難しい。また、Z ピッチは 0.25 mm であっても、円筒径が $\phi 50$ mm となると連続積層可能な高さが 25 mm となる。したがって、最適な Z ピッチは造形形状ごとにも事前調整が必要であるため、レーザ熱加工プロセスの自動化の妨げとなることが明らかとなった。

Table 6-2. Cylinder deposition comparison result between our wire-feeding speed control system and conventional system without any process control. Displacement measurement results and feed wire in gap measurement results are at 180-degree position from deposition start position.

Cylinder diameter ϕ [mm]		70	70	70	50
Z-pitch [mm]		0.20	0.25	0.30	0.25
Without control	Displacement measurement result				
	Picture of deposited cylinder				
Control	Displacement measurement result				
	Picture of deposited cylinder				

一方、インプロセス高さ変位計測結果に基づいてワイヤ供給速度を制御した場合、Z ピッチや円筒径によらず、積層高さ 50 mm までの連続積層が可能となった。また、この時の目標の造形高さである加工用レーザの焦点位置に対する造形物上面の高さ変位の制御精度は ± 0.1 mm である。これは、産業用レーザ加工機におけるレーザ熱加工での加工用レーザの焦点距離に対する加工対象面の制御精度約 100 μm と同等であり、本提案手法がレーザ熱加工に適用可能であることを明らかにした。今回の実験では造形物上面の高さ変位量に対するワイヤ供給速度の制御量は一定値としたが、さらに高精度に造形物高さを制御するためには、造形物の温度や計測した造形物高さ変位を用いて制御量を動的に変更すればよい。また、図 6-6 に円筒径 $\phi 70$ mm で造形した際の積層高さに対する計測した高さ変位量とワイヤ供給量の制御結果を示す。ここで、Z ピッチ 0.25 mm で加工制御を行わない場合の最適なワイヤ供給速度を 1 とした。図 6-6(b)に示す通り、Z ピッチが 0.25 mm の場合は、目標の造形高さに対して造形物上面が高い積層高さ 15 mm 程度までは、ワイヤ供給速度を設計値に対

して遅くして金属ワイヤの供給量を減少させ、蓄熱の影響で加工用レーザの焦点位置に対して造形物高さが低い積層高さ 15 mm 以上ではワイヤ供給速度を速くし、ワイヤ供給量を増加することで Z ピッチと 1 層当たりの積層高さを等しくする制御を実現した。一方、Z ピッチが小さい 0.2 mm の場合にはワイヤ供給速度を遅くし、Z ピッチが 0.3 mm の場合にはワイヤ供給速度を速くして、1 層当たりの積層高さが Z ピッチと同程度になるよう制御可能であった。このように、本実験では最適な Z ピッチ $0.25 \text{ mm} \pm 0.05 \text{ mm}$ での造形評価を実施し、インプロセス高さ変位計測結果に基づいたワイヤ供給速度制御により、連続積層造形が可能であることを示した。つまり、インプロセス高さ変位計測によるレーザ熱加工制御を行うことで事前の最適な加工条件出しの尤度を大幅に緩和可能である。ただし、事前に準備した Z ピッチが最適条件から大きく外れており、レーザ熱加工制御を用いても造形高さの最適範囲内を維持できない場合は連続積層が難しくなるため、一定の加工条件出しは必要である。しかし、レーザ熱加工制御を用いない従来法であれば、複数の加工パラメータがある中で、Z ピッチだけでも $\pm 0.05 \text{ mm}$ と高精度に条件出しを行う必要があるが、提案したインプロセス高さ変位計測結果に基づいたレーザ熱加工制御により、事前の加工条件出し工程を大幅に緩和でき、レーザ熱加工プロセスの省力化・生産性の向上が可能となることを明らかにした。

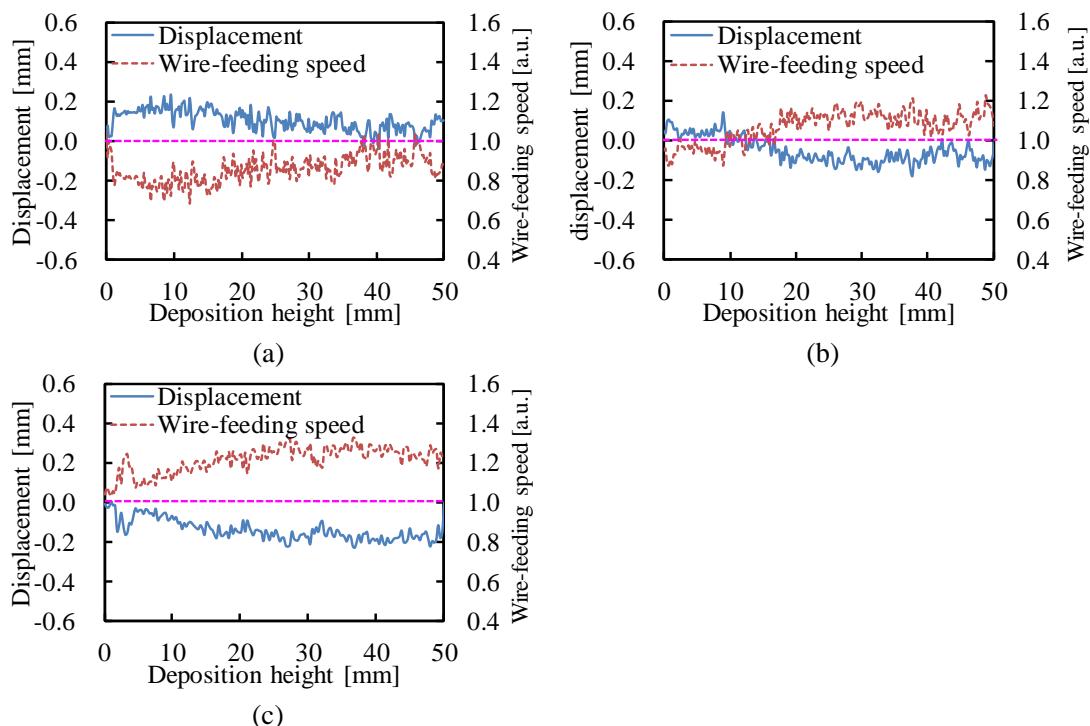


Fig. 6-6. Measured displacement and controlled wire-feeding speed results by deposition height: (a) Z-pitch is 0.2 mm, (b) Z-pitch is 0.25 mm and (c) Z-pitch is 0.3 mm.

6.4.3 造形加工精度の計測結果

インプロセス高さ変位計測システムとワイヤ供給速度制御システムを用いて連続積層した $\phi 70\text{ mm}$ の円筒形状の造形加工結果の評価をするため、造形物の高さと幅を計測した。まず、ハイドゲージ(ミツトヨ製)を用いて、造形した円筒高さを計測した結果を図6-7に示す。造形開始位置から45度ピッチで円筒1周内のベースプレートからの積層高さを計測し、円筒1回転内の平均高さからの差分を示した。これまでに[128]によって示された造形物高さ変位計測結果に基づいてプロセス制御を行った造形精度0.4mmに対して、本実験結果では、1回転内の造形物高さを精度 $\pm 0.1\text{ mm}$ で積層可能であった。このように、インプロセス高さ変位計測に基づいて加工条件を制御することで連続積層が可能となるだけでなく、高精度な造形が可能となる。また、ノギスを用いて造形した円筒形状の1回転内の造形幅を造形開始点から45度ピッチで計測した結果を図6-8に示す。1回転内の造形物幅のばらつきは $\pm 0.05\text{ mm}$ であり、造形物幅はZピッチによらず高精度な造形が可能であった。このように、6.3節で示した通り、ワイヤ供給速度を制御することで造形物幅を変化させずに造形物高さを制御でき、高精度な造形加工が可能となることを明らかにした。

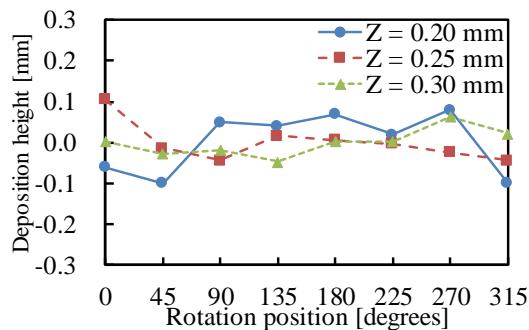


Fig. 6-7. Height measurement results of cylinder deposition object with a height gauge.

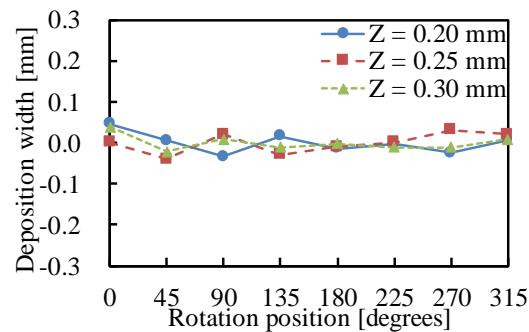


Fig. 6-8. Width measurement results of cylinder deposition object with a vernier caliper.

6.5 加工方向が変化する複雑形状でのレーザ熱加工制御実験

前節にて提案したインプロセス高さ変位計測結果を用いたレーザ熱加工制御方式の有効性を示し、事前の加工条件出しの調整尤度を拡大し、高精度な造形加工が実現可能であることを明らかにした。本節では、5章で示した交差ラインビーム光切断方式を用いて加工方向が変化する加工経路におけるレーザ熱加工制御実験の結果を示す。図6-9に加工方向が変化する造形経路としてL字形状を連続積層造形する際の実験系を示す。本構成では加工ヘッド側にあるX軸とY軸ステージを用いてワークに対する加工ヘッドの相対位置をL字形状の加工経路に沿って走査し、加工ヘッド側にあるZ軸ステージを用いて1層積層することに加工ヘッドを上昇させることで連続積層造形を行った。+X方向に40 mm造形後、ステージを停止させずに加工方向を+Y方向に変更し、同様に40 mm造形した。高さ変位計測システムは交差ラインビーム光切断方式を用いて加工経路上の高さ変位を計測するが、加工機NCが加工経路情報から加工方向を推定し、その情報を高さ変位計測システムに送ることで加工方向が変化する際にも加工経路上の高さ変位計測が可能となる。計測した高さ変位計測結果に基づいたワイヤ供給速度制御方式は前節と同様である。

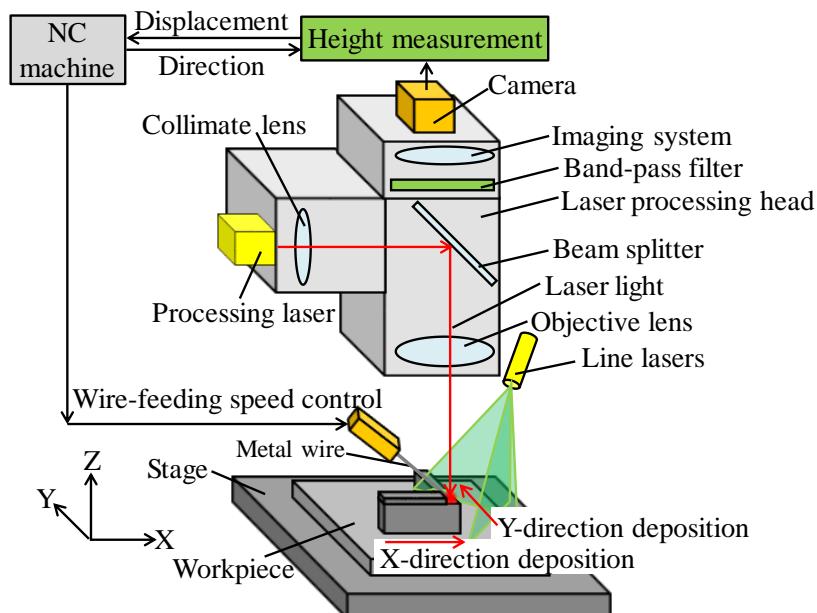


Fig. 6-9. Experiment setup of "L" shape continuous deposition using laser thermal process control.

レーザ熱加工制御有りとレーザ熱加工制御を行わない従来法でL字形状を造形した結果を図6-10に示す。図6-10(a)に示すように、レーザ熱加工制御を行わない場合、ステージの加減速が発生するため、加工方向が変化する直角部付近で盛り上がりが発生した。また、加工方向が変化した+Y方向造形時にドロップが発生して13層で連続積層が不可能となった。

さらに、図 6-9 に示すように、-X 方向から金属ワイヤを供給していたため、+Y 方向に造形する際には金属ワイヤの供給量が多すぎ、造形物の-X 方向側が削られていた。一方、図 6-10(b)に示すように、レーザ熱加工制御を行ったことで加工方向が変化する複雑形状で 200 層(約 84 mm)の連続積層造形を実現した。図 6-11 に+X 方向に造形している場合と+Y 方向に造形している場合の交差ラインビーム画像を示す。このように、加工方向に応じてレーザ熱加工中に加工経路上の高さ変位を計測することで、複雑な加工形状に対応したレーザ熱加工制御を実現した。加工方向が+X 方向から+Y 方向に変化する直角部は、ステージの加減速が発生するが、直線部と同様に平坦な形状である。また、+X 方向に造形する場合と+Y 方向に造形する場合では、造形方向に対して金属ワイヤの送給方向が異なるが、どちらの方向においても同様の造形が可能となった。

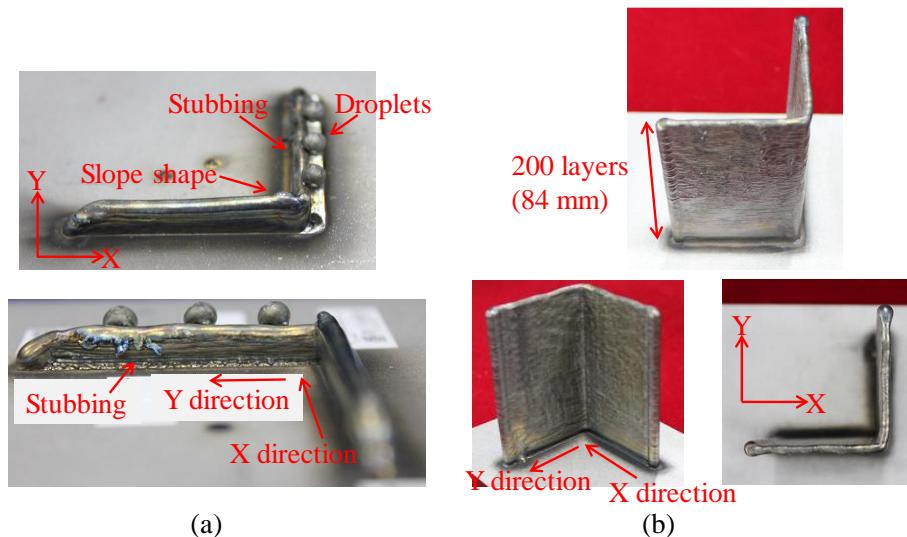


Fig. 6-10. Continuous deposition results of “L” shape: (a) without laser thermal process control and (b) using laser thermal process control.

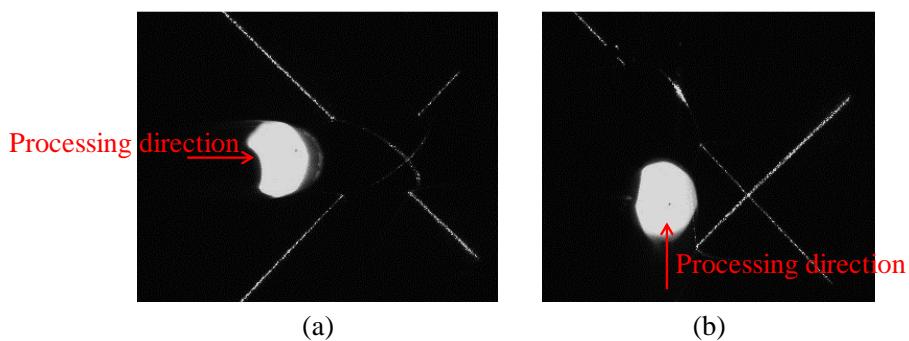


Fig. 6-11. In-process images of crossed line beams: (a) in X-direction deposition and (b) in Y-direction deposition.

レーザ熱加工制御を行わない場合の造形距離に対する高さ変位計測結果を図 6-12 に示す。始終端を除いた造形距離 10~70 mmまでの結果を示しており、造形距離 10~40 mmまでが+X 方向造形、造形距離 40~70 mm が+Y 方向造形の結果である。5 層目と 10 層目、連続積層が終了する直前の 13 層目の結果を示した。レーザ熱加工制御を行わない場合、加工方向が変化する直角部である造形距離 40 mm 付近の造形高さが、ステージの加減速が発生したため、連続積層造形が進むにつれて盛り上がっていた。同様に、レーザ熱加工制御を行った際の積層造形中の高さ変位計測結果とワイヤ供給速度の制御結果を図 6-13 に示す。造形開始 30 層までの結果を 5 層おきに示しており、造形開始 15 層までは加工方向が変化する造形距離 40 mm 付近や+Y 方向に造形する際に造形高さが大きく変化し、それに合わせてワイヤ供給速度を制御していた。造形開始時は蓄熱が始まり加工環境が変化するが、本実験でのワイヤ供給速度制御量は前節と同様に 1 層造形時に算出した図 6-3 の結果を使用したため、ワイヤ供給速度の制御量が加工環境変化に対して十分ではなく、大きな高さ変化が発生したと考えられる。この対策としては前節でも述べた通り、造形物の温度や計測した造形物高さ変位を用いて制御量を動的に変更する方法が考えられる。一方、積層数が 20 層以上になると加工環境が安定したため、加工方向が変化する直角部も含め、レーザ熱加工制御により ± 0.25 mm 以内の高さ変位で造形可能であった。このように、加工方向が変化する複雑形状ではステージの加減速や金属ワイヤの供給方向に対する加工方向変化が発生するため、特に造形開始直後は蓄熱による温度変化など加工環境変化の影響を受けやすいが、レーザ熱加工制御により連続積層造形を実現した。また、加工環境が安定すると、レーザ熱加工制御により造形物高さ変位に応じたワイヤ供給速度制御が可能であるため、加工方向が変化する際にも高精度な連続積層造形が可能である。

最後に、図 6-14 にレーザ熱加工制御を行わない場合に 13 層造形した場合とレーザ熱加工制御を行い 30 層造形した場合の造形物の側面写真を示す。加工方向が変化する直角部を見ると、レーザ熱加工制御を行わない場合には盛り上がっていたが、レーザ熱加工制御を行った場合には平坦な形状となっていた。このように、交差ラインビームを用いた高さ変位計測システムにより、加工方向が変化する複雑形状のレーザ熱加工制御が実現可能であることを明らかにした。また、加工方向が変化する形状において、レーザ熱加工制御を用いることで加工精度の向上を実現した。

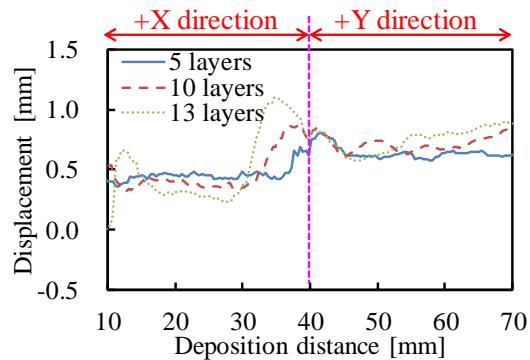


Fig. 6-12. Displacement results by deposition distance without laser thermal process control.

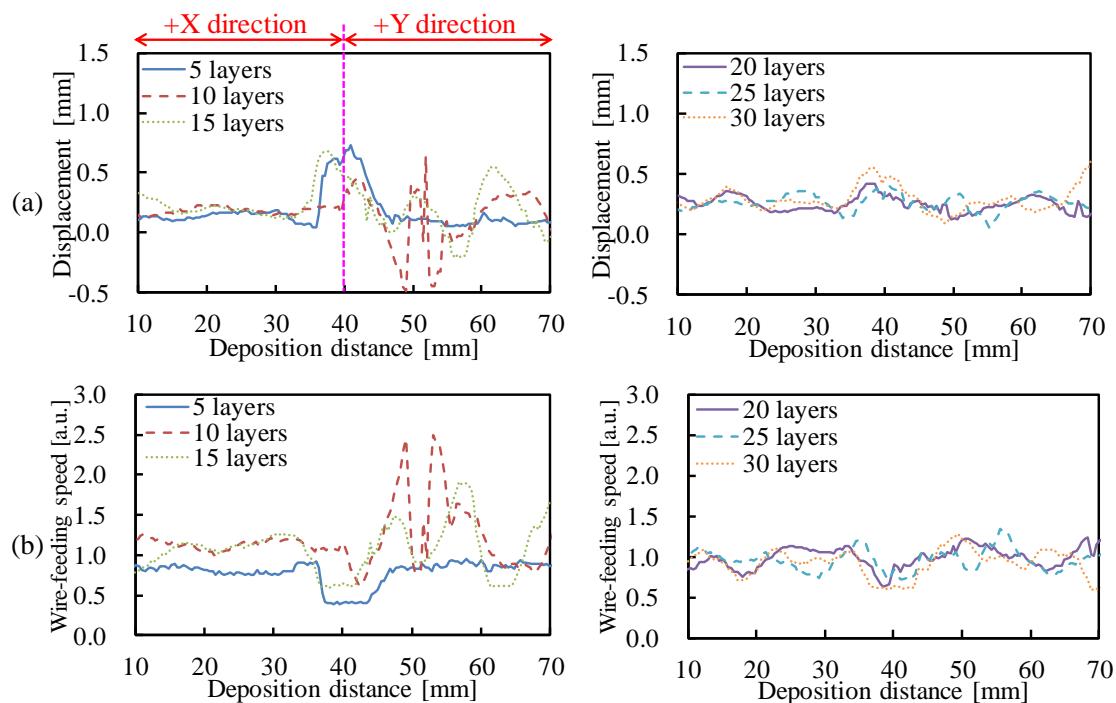


Fig. 6-13. Displacement results and wire-feeding speed by deposition distance with laser thermal process control: (a) Displacement measurement results and (b) controlled wire-feeding speed results.

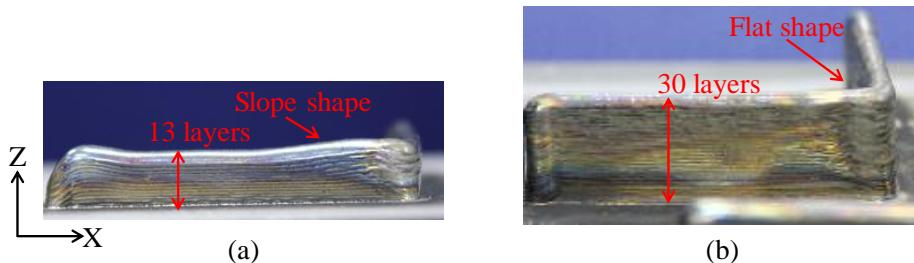


Fig. 6-14. Side images of deposition objects with and without laser thermal process control: (a) without laser thermal process control and (b) using laser thermal process control.

6.6 結言

本章では、近年研究が盛んに行われている金属 AM 加工機を用いてインプロセス高さ変位計測結果に基づくレーザ熱加工制御システムの有効性を検証し、事前の加工条件出し精度の緩和と複雑形状の高精度加工が実現可能であることを明らかにした。本論文では、レーザワイヤ DED 金属積層装置を使用したが、提案した加工用レーザの焦点位置に対する加工対象面のインプロセス高さ変位計測手法や加工対象面を加工用レーザの焦点位置とするレーザ熱加工制御手法の基本原理は、レーザ熱加工を行う産業用レーザ加工機全般に適用できる。例えばパウダー方式レーザ DED 金属積層装置では加工中に加工位置近傍で飛散するパウダーの影響など本手法を適用する際の個別の課題についての検証は必要であるが、Z 方向の走査を伴う 3 次元レーザ加工や造形加工において本手法は有効である。本手法によって 3 次元レーザ加工における手動ティーチング工程を不要にし、造形加工における 1 層積層後に上昇させる最適な Z ピッチの条件出し精度を緩和でき、レーザ熱加工における自動化と高精度化の両立が期待できる。以下、本章で得られた知見を示す。

まず、本実験で使用したレーザワイヤ DED 金属積層装置の概略を示し、インプロセス高さ変位計測結果に基づいたレーザ熱加工制御システムの構成を示した。積層後の造形面が加工用レーザの焦点位置となるよう 1 層当たりの造形量を制御するパラメータとしてワイヤ供給速度を使用した。次に、連続積層時の Z ピッチを変えた C 軸円筒造形によりインプロセス高さ変位計測に基づいたワイヤ供給速度制御システムの有効性を検証した。加工制御を行わない従来法では、Z ピッチが最適値から $\pm 0.05 \text{ mm}$ 変化すると蓄熱の影響で 1 层当たりの積層高さと Z ピッチが一致せず、連続積層が不可能であった。一方、ワイヤ供給速度を制御する提案手法により、Z ピッチと 1 层当たりの積層高さを等しくでき、Z ピッチや円筒径によらず連続積層が可能であることを明らかにした。このように、インプロセス計測結果に基づいた実時間加工制御により、事前の加工条件出しの尤度を緩和しつつ、高精度な造形加工を実現した。また、 $+X$ 方向から $+Y$ 方向に加工方向が変化する L 字形状造形により交差ラインビーム光切断方式を用いて加工方向が変化する際にも加工経路上をインプロセス計測する手法の有用性を検証した。加工制御を行わない従来法では、加工方向が変化する際にステージの加減速が生じる直角部が盛り上がり、13 層で連続造形ができなくなった。一方、加工経路情報から計測方向を加工機 NC で推定してレーザ熱加工制御を行った結果、加工方向が変化する直角部も平坦に造形でき、200 層の連続造形を実現した。このように、加工方向が変化する複雑形状においても加工経路上の高さ変位計測結果に基づいてレーザ熱加工制御を行うことで高精度な造形加工が可能であることを明らかにした。さらに複雑な形状を造形加工する 5 軸加工では、ワークが傾いた際に加工位置と高さ変位計測位置が異なるために生じる高さの差異情報を加工機 NC により加工経路情報とワークの姿勢情報から算出することでインプロセス計測が可能になる。このように、レーザ熱加工制御のためのインプロセス高さ変位計測にはさらなる発展の余地がある。

第7章

結論

本研究では、レーザ熱加工制御のためのレーザ熱加工プロセスにおける機上光学式変位計測システムを提案し、提案手法の有用性を実験的に検証することで、レーザ熱加工を行う産業用レーザ加工機の加工精度を向上できることを明らかにした。以下に、本研究を通して得られた知見を各章ごとに述べる。

第1章では、研究背景として、レーザ熱加工を行う産業用レーザ加工機において、自動化による生産性向上と高精度化を両立させるため、レーザ熱加工プロセスにおける機上計測、および加工制御の必要性をまとめた。しかし、現状の接触方式ではレーザ熱加工中のインプロセス計測が実現できないため、非接触方式である機上光学式計測を提案した。本研究では、加工前後に金属粗面の不均一な表面性状の影響を低減し、金属ワークの3次元位置の設計位置からの変位量を高精度に計測し、レーザ熱加工中に加工方向が変化する際にも加工制御時と近い温度環境である加工位置近傍の高さ変位を計測する機上光学式変位計測を用いたレーザ熱加工制御が加工精度に及ぼす影響を明らかにすることを本研究の目的とした。

第2章では、本研究の核となるレーザ熱加工制御のためのレーザ熱加工プロセスにおける機上光学式変位計測システムについて述べた。レーザ熱加工前後の機上計測とレーザ熱加工中のインプロセス機上計測に対する必要条件を明らかにし、加工前後と加工中に計測すべき3次元位置変位量を示した。また、インプロセス計測結果に基づいてフィードフォワードで加工条件を制御する手法について述べた。さらに、共焦点方式を用いたエッジ位置変位計測と三角測量方式を用いた高さ変位計測の原理について述べ、加工前後の計測と加工中のインプロセス計測それぞれにおける機上光学式変位計測手法を提案した。

第3章では、加工前後の機上光学式変位計測について、表面性状が不均一な金属粗面のエッジ位置変位と高さ変位を高精度に計測する手法を示した。共焦点方式によるエッジ位置変位計測光学系と三角測量方式による高さ変位計測光学系で投光光学系を共有する構成を示した。エッジ位置を横切る際の反射光量変化により金属ワーク上方からエッジ位置変位を高精度に計測するジグザグ走査平均法を提案した。また、4方向から同時に三角測量を行うことで表面性状の違いによる散乱反射角度特性変化の影響を低減する多方向三角測量方式と受光素子であるイメージセンサの露光時間中に円形走査することで表面性状に異方性がある際にも複数位置からの反射光を一度の計測中に平均化して高さ変位計測を行う走査露光法を提案した。これらの提案手法により、計測時間を高速化でき、接触方式と同等精度での金属粗面の変位計測が実現可能となることを明らかにした。

第4章では、加工位置近傍の高さ変位を計測するための加工光学系と同軸に配置するインプロセス計測手法について、加工光学系の対物レンズを計測系と共に用する構成を示した。

また、加工位置で発生する加工用レーザの反射光や熱輻射光の影響を低減し、加工位置近傍でのインプロセス計測が可能となることを明らかにした。また、レーザ熱加工中のインプロセス高さ変位計測精度評価を実施し、高精度な3次元測定機での計測結果に対してレーザ熱加工中の高さ変位計測精度 $\pm 50 \mu\text{m}$ を実現し、レーザ熱加工における加工制御を実現するための計測精度を満足できる見込みを得た。本手法により、高精度なレーザ熱加工制御のための加工制御時と近い加工温度環境である加工位置近傍での高さ変位計測を実現した。

第5章では、加工方向が変化する際にも常に加工経路上の高さ変位をインプロセス計測可能な手法を示した。機上計測に必用な小型な構成で加工位置の周囲を取り囲むようにラインビームを照射する方法として交差ラインビーム光切断方式を提案し、 ± 90 度方向の加工経路上の高さ変位がインプロセス計測可能となることを明らかにした。さらに、計測方向 ± 60 度以内では計測対象の形状によらず計測精度 $\pm 50 \mu\text{m}$ であることを示し、 ± 70 度から ± 90 度の計測方向では、ラインビームの照射方向に対して垂直な曲面部を計測する際に生じる正反射光が計測精度に影響することを示した。本手法により、インプロセス計測によるレーザ熱加工制御を適用できる加工経路の形状自由度を向上でき、交差ラインビームを対向する2方向から照射すれば、加工位置に対して360度方向の高さ変位計測を実現できる。

第6章は、第4章および第5章で得られた知見をもとに、インプロセス高さ変位計測結果に基づいたレーザ熱加工制御手法の実用性を検証した。本章では、近年、研究が盛んに行われている金属AM加工機であるレーザワイヤDED金属積層装置を用いて、連続造形中に加工経路上の加工用レーザの焦点位置に対する加工対象面の高さ変位のインプロセス計測結果に基づいてフィードフォワードでワイヤ供給速度を制御した。レーザ熱加工制御により、造形加工における1層積層後に上昇させる最適なZピッチの条件出し精度の緩和が可能となることを明らかにした。また、加工方向が変化する複雑形状での連続造形により、交差ラインビーム光切断方式を用いたインプロセス計測結果に基づいてレーザ熱加工制御を行った結果、加工方向が変化する際にも加工経路上の高さ変位をインプロセス計測することで高精度な造形加工が可能となることを明らかにした。

以上の知見により、レーザ熱加工制御のための機上光学式変位計測により、レーザ熱加工を行う産業用レーザ加工機の高精度化・自動化が実現可能となることを明らかにした。本論文では、加工前後と加工中の機上光学式変位計測システムを別構成で示したが、図7-1、図7-2に示すように、全プロセスの機上計測システムを組み合わせたレーザ熱加工プロセスにおける機上光学式変位計測システムが期待される。図7-1に加工前後の位置・高さ変位計測の構成を示し、図7-2に加工中の高さ変位計測の構成を示す。本構成により、加工前・加工中・加工後の全工程を自動化する機上計測システムを実現でき、インプロセス計測結果に基づいたレーザ熱加工制御によってレーザ熱加工の高精度化が可能となる。さらに、本提案手法の基本原理は、3次元レーザ加工や造形加工といったZ方向の走査を伴うレーザ熱加工において、今後、5軸加工を行う場合にも適用できる見込みがあり、レーザ熱加工を行う産業用レーザ加工機のさらなる発展が期待される。

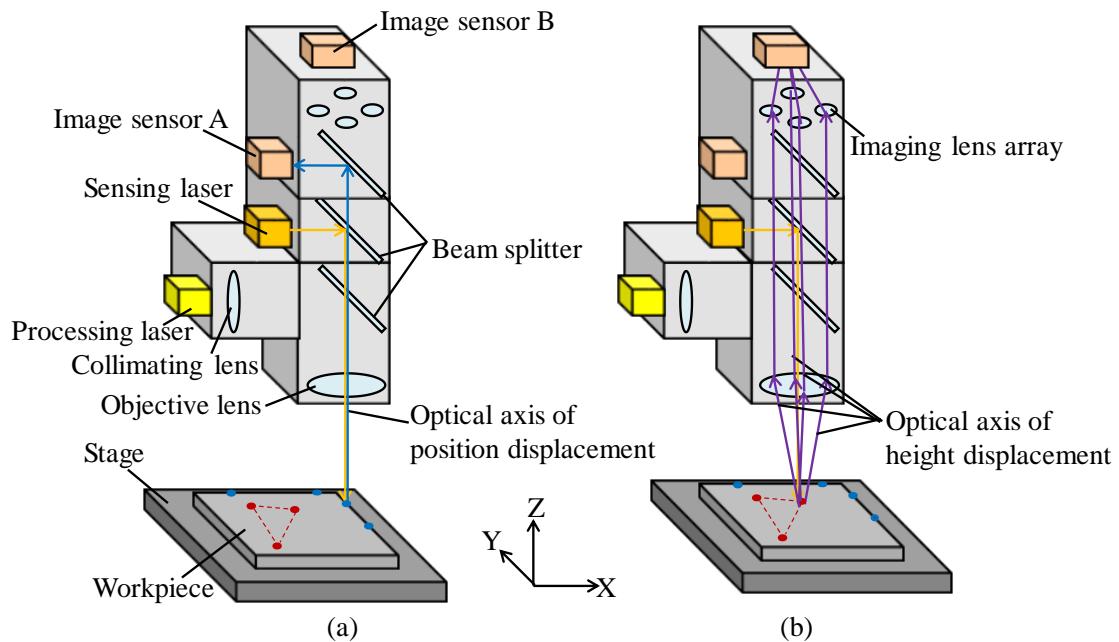


Fig. 7-1. On-machine optical displacement measurement system in pre- or post-process: (a) edge position displacement measurement and (b) height displacement measurement.

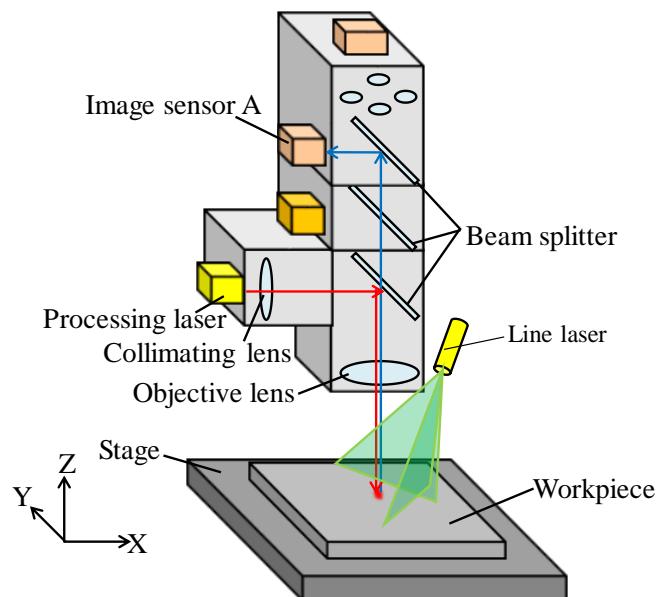


Fig. 7-2. On-machine optical height displacement measurement system during laser thermal processing for laser thermal process control.

謝辞

本研究を遂行するにあたって終始、親切丁寧にご指導下さいました大阪大学 工学研究科 機械工学専攻 高谷 裕浩教授に心から感謝の意を表します。本研究成果をまとめる機会を下さったことに深く感謝致します。同様に、本研究の実施の機会を与えて頂き、本研究の遂行にあたって多大なるご指導を頂きました大阪大学 工学研究科 機械工学専攻 水谷 康弘准教授には深謝の意を表します。また、本論文をまとめるにあたり、親切丁寧にご指導下さいました大阪大学 工学研究科 機械工学専攻 上野原 努助教に感謝の意を表します。

お忙しい中、副査をお引き受け頂きました、大阪大学 工学研究科 機械工学専攻 榎本俊之教授、大阪大学 接合科学研究所 塚本 雅裕教授に心から感謝の意を表します。

本研究を遂行する過程において様々な貴重な助言を頂き、また、研究成果をまとめるにあたって時に厳しい指導を賜りました三菱電機株式会社 名古屋製作所 橋本 隆氏、鷺見 信行氏、近久 晃一郎氏に心から感謝の意を表します。

本研究を遂行するにあたりオプトメカトロニクスに関連した知見について、様々な助言を頂きました三菱電機株式会社 先端技術総合研究所 岸上 智氏、中原 宏勲氏に心から感謝の意を表します。

本研究の実験において、特に加工機の取り扱い、加工機での実験準備、実験の遂行にご協力頂いた三菱電機株式会社 先端技術総合研究所 黒川 聰昭氏、森田 大嗣氏、篠原 暢宏氏に深く感謝の意を表します。工作機械上での実験において様々な制約がある中で苦労を共にし、成果を分かち合えたことに心よりお礼申し上げます。

さらに、本研究を進めるにあたり、課題解決のプロセスを修得し、研究開発に向かう姿勢をご指導下さるとともに、新しい光計測技術を実現することの喜びを教えて下さいました三菱電機株式会社 先端技術総合研究所 河野 裕之氏をはじめ、光電磁センサグループ、また、センサ情報処理システム技術部の諸先輩方、諸同輩、諸後輩には深く感謝の意を表します。

最後に、これまで私の進む道を応援し、温かく見守ってくれた両親、祖父母、また、私のことをいつも応援し、支えてくれた妻、娘、そして新しく生まれてこようとしている我が子には深い感謝の意を表して謝辞と致します。

令和3年1月7日

多久島 秀

参考文献

- [1] Dietrich Imkamp, Jürgen Berthold, Michael Heizmann, Karin Kniel, Eberhard Manske, Martin Peterek, Robert Schmitt, Jochen Seidler, and Klaus-Dieter Sommer. Challenges and trends in manufacturing measurement technology-the “Industrie 4.0” concept. *J. Sens. Sens.Syst.*, Vo. 5, pp. 325–335, 2016.
- [2] 内閣府. 科学技術基本計画. 2016.
- [3] 経済産業省 中部経済産業局. 2040 年のものづくりの未来の姿. 2016.
- [4] 市村 和雄. 日本の工作機械業界の現状と開発動向. 2005年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, A01, 2005.
- [5] 経済産業省 中部経済産業局. ものづくりスマート化ロードマップ調査. 2017.
- [6] Sheng Yang, Jingxia Yuan, and Jun Ni. Accuracy Enhancement of a Horizontal Machining Center by Real-Time Error Compensation. *Journal of Manufacturing Systems*, Vo. 15, pp. 113–124, 1996.
- [7] Yusuf Tansel, and Mustafa Yurdakul. Development of a decision support system for machining center selection. *Expert Systems with Applications*, Vo. 36, 3505–3513, 2009.
- [8] M. R. H. Mohd Adnan, Arezoo Sarkheyli, Azlan Mohd Zain, and Habibollah Haron. Fuzzy logic for modeling machining process: a review. *Artificial Intelligence Review*, Vo. 43, pp. 345–379, 2015.
- [9] Walter W. Duley. *Laser Processing and Analysis of Materials*. Springer, 1983.
- [10] Siuchung Tam, R. Williams, Linjuan Yang, Sourav Kanti Jana, Lennie Enk Ng Lim, and Michael Wai Shing Lau. A review of the laser processing of aircraft components. *Journal of Materials Processing Technology*, Vo. 23, pp. 177–194, 1990.
- [11] Paul Di Pietro, and Y. Lawrence Yao. An investigation into characterizing and optimizing laser cutting quality - A review. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 1994, 34, pp. 225–243.
- [12] Dieter Bäuerle. *Laser Processing and Chemistry*. Springer, 2000.
- [13] Stefan Nolte, Matthias Will, Jonas Burghoff, and Andreas Tünnermann. Ultrafast laser processing: New options for three-dimensional photonic structures. *Journal of Modern Optics*, Vo. 51, pp. 16–18, 2004.
- [14] John Ion. *Laser Processing of Engineering Materials: Principles, Procedure and Industrial Application*. Elsevier, 2005.
- [15] Abdulkadir Erden. Effect of Materials on the Mechanism of Electric Discharge Machining (E.D.M.). *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vo. 105, pp. 132–138, 1983.

- [16] Norliana Mohd Abbas, Darius G. Solomon, and Md. Fuad Bahari. A review on current research trends in electrical discharge machining (EDM). *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vo. 47, pp. 1214–1228, 2007.
- [17] Sanjeev Kumar, Rupinder Singh, Tejinder Paul Singh, and Bhavana L. Sethi. Surface modification by electrical discharge machining: A review. *Journal of Materials Processing Technology*, Vo. 209, pp. 3675–3687, 2009.
- [18] Sushil Kumar Choudhary, and R.S Jadoun. Current Advanced Research Development of Electric Discharge Machining (EDM): A Review. *International Journal of Research in Advent Technology*, Vo. 2, No. 3, pp. 273–297, 2014.
- [19] Chander Prakash, Harmesh K Kansal, BS Pabla, Sanjeev Puri, and Aditya Aggarwal. Electric discharge machining – A potential choice for surface modification of metallic implants for orthopedic applications: A review. *Journal of Engineering Manufacture*, Vo. 230, pp. 331–353, 2015.
- [20] Gangadharudu Talla, S Gangopadhyay, and CK Biswas. State of the art in powder-mixed electric discharge machining: A review. *Journal of Engineering Manufacture*, Vo. 231, pp. 2511–2526, 2016.
- [21] Ian Gibson, David Rosen, and Brent Stucker. *Additive Manufacturing Technologies*. Springer, 2010.
- [22] Andreas Gebhardt. *Understanding Additive Manufacturing: Rapid Prototyping, Rapid Tooling, Rapid Manufacturing*. Hanser Pub Inc, 2012.
- [23] William E. Frazier. Metal Additive Manufacturing: A Review. *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vo. 23, pp. 1917–1928, 2014.
- [24] Dirk Herzog, Vanessa Seyda, Eric Wycisk, and Claus Emmelmann. Additive manufacturing of metals. *Acta Materialia*, Vo. 117, pp. 371–392, 2016.
- [25] NEDO IoT 推進部. 高輝度・高効率次世代レーザー技術開発 基本計画. 2016.
- [26] Avanish Kumar Dubey, and Vinod Yadava. Laser beam machining—A review. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vo. 48, pp. 609–628, 2008.
- [27] Pedram Parandoush, and Altab Hossain. A review of modeling and simulation of laser beam machining. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vo. 85, pp. 135–145, 2014.
- [28] H.A. Eltawahni, K.Y. Benyounis, and Abdul-Ghani Olabi. High Power CO₂ Laser Cutting for Advanced Materials – Review. *Materials Science and Materials Engineering*, 2016.
- [29] C. Y. Yeo, Siuchung Tam, Sourav Kanti Jana, and Michael Wai Shing Lau. A technical review of the laser drilling of aerospace materials. *Journal of Materials Processing Technology*, Vo. 42, pp. 15–49, 1994.
- [30] Gan K. W. Eric, H.Y. Zheng, and G.C. Lim. Laser Drilling of Micro-Vias in PCB Substrates. *Electronics Packaging Technology Conference*, pp. 321–326, 2000.

- [31] Hongjian Wang, Huatay Lin, Chengyong Wang, Lijuan Zheng, and Xiaoyue Hu. Laser drilling of structural ceramics—A review. *Journal of the European Ceramic Society*, Vo. 37, pp. 1157–1173, 2017.
- [32] Girish Dutt Gautam, and Arun Kumar Pandey. Pulsed Nd:YAG laser beam drilling: A review. *Optics and Laser Technology*, Vo. 100, pp. 183–215, 2018.
- [33] J. Mazumder. Laser Welding: State of the Art Review. *Journal of Metals*, Vo. 34, pp. 16–24, 1982.
- [34] Martukanitz Richard. A critical review of laser beam welding. *Proceedings of SPIE*, Vo. 5706, pp. 11–24, 2005.
- [35] Josefina Svenungsson, Isabelle Choquet, and Alexander F. H. Kaplan. Laser Welding Process – A Review of Keyhole Welding Modelling. *Physics Procedia*, Vo. 78, pp. 182–191, 2015.
- [36] Kyung-Min Hong, and Yung C. Shin. Prospects of laser welding technology in the automotive industry: A review. *Journal of Materials Processing Technology*, Vo. 245, pp. 46–69, 2017.
- [37] Scott M. Thompson, Linkan Bian, Nima Shamsaei, and Aref Yadollahi. An overview of Direct Laser Deposition for additive manufacturing; Part I: Transport phenomena, modeling and diagnostics. *Additive Manufacturing*, Vo. 8, pp. 36–62, 2015.
- [38] Nima Shamsaei, Aref Yadollahi, Linkan Bian, and Scott M. Thompson. An overview of Direct Laser Deposition for additive manufacturing; Part II: Mechanical behavior, process parameter optimization and control. *Additive Manufacturing*, Vo. 8, pp. 12–35, 2015.
- [39] Saad A. Khairallah, Andrew T. Anderson, Alexander Rubenchik, and Wayne E. King. Laser powder-bed fusion additive manufacturing: Physics of complex melt flow and formation mechanisms of pores, spatter, and denudation zones. *Acta Materialia*, Vo. 108, pp. 36–45, 2016.
- [40] 平山 国浩, 川越 新吾, 布施 泰史, 長友 良行, 知念 武志. 精密加工技術に関する研究. 宮崎県工業技術センター・宮崎県食品開発センター研究報告, No. 50, pp. 53–58, 2005.
- [41] 草薙 典子, 勇田 敏夫, 佐藤 敏一. レーザー加工の研究—微小穴あけ加工特性について一. 北海道大学精密工学科精密工学第二講座資料, pp. 31–46, 1968.
- [42] 上野 滋. 工作機械における機上計測技術. 精密工学会誌, Vo. 75, No. 11, pp. 1269–1272, 2009.
- [43] 井原 之敏, 大塚 裕俊. 工作機械の機上計測技術. 精密工学会誌, Vo. 75, No. 11, pp. 1281–1284, 2009.
- [44] Unai Mutilba, Eneko Gomez-Acedo, Gorka Kortaberria, Aitor Olarra, and Jose A. Yagüe-Fabra. Traceability of On-Machine Tool Measurement: A Review. *Sensora*, Vo. 17, 1605, 2017.
- [45] 佐山 邦彦. 工作機械における工具計測・ワーク計測技術. 精密工学会誌, Vo. 75, No. 11, pp. 1277–1280, 2009.

- [46] 西田 勇, 村瀬 元章, 佐藤 隆太, 白瀬 敬一. 工程設計情報に基づいた機上計測の自動化. システム制御情報学会論文誌, Vo. 32, No. 5, pp. 212–217, 2019.
- [47] Jin-phil Choi, Byung Kwon Min, and Sang-Jo Lee. Reduction of machining errors of a three-axis machine tool by on-machine measurement and error compensation system. *Journal of Materials Processing Technology*, Vo. 155-156, pp. 2056–2064, 2004.
- [48] Ji-Hun Jung, Jin-Phil Choi, and Sang-Jo Lee. Machining accuracy enhancement by compensating for volumetric errors of a machine tool and on-machine measurement. *Journal of Materials Processing Technology*, Vo. 174, pp. 56–66, 2006.
- [49] Soichi Ibaraki, Takeyuki Iritani, and Tetsuya Matsushita. Error map construction for rotary axes on five-axis machine tools by on-the-machine measurement using a touch-trigger probe. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vo. 68, pp. 21–29, 2013.
- [50] Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB). Available online: <https://www.ptb.de/emrp/ind62-home.html> (accessed on 20 March 2017).
- [51] Wei Gao, Makoto Tano, Shinji Sato, and Satoshi Kiyono. On-machine measurement of a cylindrical surface with sinusoidal micro-structures by an optical slope sensor. *Precision Engineering*, Vo. 30, pp. 274–279, 2006.
- [52] 大塚 裕俊, 水江 宏, 秋国 元, 嶺 正好, 丸山 祐治. 機上計測を用いた超精密金型部品の高効率切削加工技術の研究. 大分県産業科学技術センター 研究報告, 2008.
- [53] Cefu Hong, and Soichi Ibaraki. Non-contact R-test with laser displacement sensors for error calibration of five-axis machine tools. *Precision Engineering*, Vo. 37, pp. 159–171, 2013.
- [54] Meiyun Chen, Satoru Takahashi, and Kiyoshi Takamasu. Development of high-precision micro-roundness measuring machine using a high-sensitivity and compact multi-beam angle sensor. *Precision Engineering*, Vo. 42, pp. 276–282, 2015.
- [55] Zhouxiang Jiang, Bao Song, Xiangdong Zhou, Xiaoqi Tang, and Shiqi Zheng. On-machine measurement of location errors on five-axis machine tools by machining tests and a laser displacement sensor. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vo. 95, pp. 1–12, 2015.
- [56] 入野 成弘. 工作機械の機上計測測定技術. 2018 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, A62, 2018.
- [57] Peter B. Kosel, Gregory S. Munro, and Richard Vaughan. Capacitive transducer for accurate displacement control. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vo. 30, pp. 114–123, 1981.
- [58] F. Zhu, Jo W. Spronck, and Willem Chr Heerens. A simple capacitive displacement sensor. *Sensors and Actuators A: Physical*, Vo. 26, pp. 265–269, 1991.

- [59] Andreas Albrecht, Simon Park, Yusuf Altintas, and Guenter Pritschow. High frequency bandwidth cutting force measurement in milling using capacitance displacement sensors. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vo. 45, pp. 993–1008, 2005.
- [60] Moojin Kim, Wonkyu Moon, Eui-Sung Yoon, and Kwang-Ryeol Lee. A new capacitive displacement sensor with high accuracy and long-range. *Sensors and Actuators A: Physical*, Vo. 130-131, pp. 135–141, 2006.
- [61] 河野 嗣男. 機械加工のためのインプロセス計測技術. 光学, 第 23 卷, 第 3 号, pp. 176–180, 1994
- [62] Garry Berkovic, and Ehud Shafir. Optical methods for distance and displacement measurements. *Advances in Optics and Photonics*, Vo. 4, pp. 441–471, 2012.
- [63] Z. Ji, and M. C. Leu. Design of optical triangulation devices. *Optics & Laser Technology*, Vo. 21, pp. 339–341, 1989.
- [64] Chien-Hung Liu, Wen-Yuh Jywe, and Chao-Kwai Chen. Development of a diffraction-type optical triangulation sensor. *Applied Optics*, Vo. 43, pp. 5607–5613, 2004.
- [65] Zhifeng Zhang, Qibo Feng, Zhan Gao, Cuifang Kuang, Cheng Fei, Zhang Li, and Jinyun Ding. A new laser displacement sensor based on triangulation for gauge real-time measurement. *Optics & Laser Technology*, Vo. 40, pp. 252–255, 2008.
- [66] H. J. Tiziani, and H.-M. Uhde. Three-dimensional image sensing by chromatic confocal microscopy. *Applied Optics*, Vo. 33, pp. 1838–1843, 1994.
- [67] H-J Jordan, M Wegner, and H Tiziani. Highly accurate non-contact characterization of engineering surfaces using confocal microscopy. *Measurement Science and Technology*, Vo. 9, pp. 1142–1151, 1998.
- [68] E. Shafir, and G. Berkovic. Expanding the realm of fiber optic confocal sensing for probing position, displacement, and velocity. *Applied Optics*, Vo. 45, pp. 7772–7777, 2006.
- [69] Yasuhiro Takaya, Kenji Maruno, Masaki Michihata, and Yasuhiro Mizutani. Measurement of a tool wear profile using confocal fluorescence microscopy of the cutting fluid layer. *CIRP Annals*, Vo. 65, pp. 467–470, 2016.
- [70] Xicong Zou, Xuesen Zhao, Guo Li, Zengqiang Li, and Tao Sun. Non-contact on-machine measurement using a chromatic confocal probe for an ultra-precision turning machine. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vo. 90, pp. 2163–2172, 2017.
- [71] Toshihiko Yoshino, M. Nara, Sergay Mnatzakanian, Byron S. Lee, and Timothy C. Strand. Laser diode feedback interferometer for stabilization and displacement measurements. *Applied Optics*, Vo. 26, pp. 892–897, 1987.
- [72] Toshihiro Kubota, Makoto Nara, and Toshihiko Yoshino. Interferometer for measuring displacement and distance. *Optics Letters*, Vo. 12, pp. 310–312, 1987.

- [73] L. Montgomery Smith, and Chris C. Dobson. Absolute displacement measurements using modulation of the spectrum of white light in a Michelson interferometer. *Applied Optics*, Vo. 28, pp. 3339–3342, 1989.
- [74] Makoto Yamauchi, and Kenichi Hibino. Measurement of air turbulence for on-machine interferometry. *Applied Optics*, Vo. 42, pp. 6869–6876, 2003.
- [75] Koichiro Iwasawa, Akito Iwama, and Kimiyuki Mitsui. Development of a measuring method for several types of programmed tool paths for NC machine tools using a laser displacement interferometer and a rotary encoder. *Precision Engineering*, Vo. 28, pp. 399–408, 2004.
- [76] John S. Massa, Gerald S. Buller, Andrew C. Walker, Sergio Cova, Manikam Umasuthan, and Andrew M. Wallace. Time-of-flight optical ranging system based on time-correlated single-photon counting. *Applied Optics*, Vo. 37, pp. 7298–7304, 1998.
- [77] Robert Lange, and Peter Seitz. Solid-State Time-of-Flight Range Camera. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, Vo. 37, No. 3, pp. 390–397, 2001.
- [78] Yan Cui, Sebastian Schuon, Derek Chan, Sebastian Thrun, and Christian Theobalt. 3D Shape Scanning with a Time-of-Flight Camera. In Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 1173–1180, 2010.
- [79] 西野 治彦, 秋山 健二, 小林 幸雄. 光切断法による 3 次元立体形状計測と形状再構成. 電子情報通信学会論文誌 D, Vol. 172-D2, No. 11, pp. 1778–1787, 1989.
- [80] 山本 新, 小関 修. 光切断法を用いた部品形状の計測と検査. 精密工学会誌, Vol. 56, pp. 1371–1374, 1990.
- [81] Peter Schalk, Ronald Ofner, and Paul O’Leary. Pipe eccentricity measurement using laser triangulation. *Image and Vision Computing*, Vol. 25, pp. 1194–1203, 2007.
- [82] Hao Gao, Qingyi Gu, Takeshi Takaki, and Idaku Ishii. A self-projected light-section method for fast three-dimensional shape inspection. *International Journal of Optomechatronics*, Vol. 6, pp. 289–303, 2012.
- [83] Perard Denis, and Beyerer, Juergen. Three-dimensional Measurement of Specular Freeform Surfaces with a Structured-lighting Reflection Technique. *Proceedings of SPIE*, Vol. 3204, pp. 74–80, 1997.
- [84] Mikael Sjodahl, and Per Synnergren. Measurement of shape by using projected random patterns and temporal digital speckle photography. *Applied Optics*, Vol. 38, pp. 1990–1997, 1999.
- [85] Peter Lutzke, Martin Schaffer, Peter Kühmstedt, Richard Kowarschik, and Gunther Notni. Experimental comparison of phase-shifting fringe projection and statistical pattern projection for active triangulation systems. *Proceedings of SPIE*, Vol. 8788, pp. 878813–1-7, 2013.
- [86] Pu Cao, Jiangtao Xi, Yanguang Yu, Qinghua Guo, and Limei Song. 3D shape measurement based on projection of triangular patterns of two selected frequencies. *Optics Express*, Vol. 22, No. 23, pp. 29234–29248, 2014.

- [87] Rainer G. Dorsch, Gerd Hausler, and Jurgen M. Herrmann. Laser triangulation: fundamental uncertainty in distance measurement. *Applied Optics*, Vol. 33, No. 7, pp. 1306–1314, 1994.
- [88] Klemen Žbontar, Boštjan Podobnik, Franc Povše, and Matjaž Mihelj. On-machine laser triangulation sensor for precise surface displacement measurement of various material types. *Proceedings of SPIE*, Vol. 8839, pp. 88390M–1-10, 2020.
- [89] LMI Technologies. Workhorse 3D Laser Line Profile Sensors.
<https://lmi3d.com/products/gocator/g2/2300-series/laser-line-profile-sensors>, (参照 2020-11-02).
- [90] Wei Gao, Han Haitjema, Fengzhou Fang, Richard Leach, Benny Cheung, Enrico Savio, and Jean Marc Linares. On-machine and in-process surface metrology for precision manufacturing. *CIRP Annals*, Vo. 68, pp. 843–866, 2019.
- [91] J Shao, and Y Yan. Review of techniques for On-line Monitoring and Inspection of Laser Welding. *Journal of Physics*, Vol. 15, pp. 101-107, 2005.
- [92] Kruth Jean-Pierre, Duflou Joost, Mercelis Peter, Van Vaerenbergh Jonas, Craeghs Tom, and De Keuster Johan. On-line monitoring and process control in selective laser melting and laser cutting. *Proceedings of the 5th Lane Conference, Laser Assisted Net Shape Engineering*, Vol. 1, pp. 23-37, 2007.
- [93] Jorgensen Henning, and Olsen Flemming. Process monitoring during CO₂ laser cutting. *Proceedings of SPIE*, Vol. 1412, pp. 198-208, 1991.
- [94] Claus J. Lorenzen, Christoph Carlhoff, Ulrich Hahn and Martin Jogwich. Applications of laser-induced emission spectral analysis for industrial process and quality control. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, Vo. 7, pp. 1029–1035, 1992.
- [95] L. Li, D. J. Brookfield, and W. M. Steen. Plasma charge sensor for in-process, non-contact monitoring of the laser welding process. *Measurement Science and Technology*, Vo. 7, No. 4, pp. 615–626, 1996.
- [96] Antonio Ancona, Vincenzo Spagnolo, Pietro Mario Lugarà, and Michele Ferrara. Optical sensor for real-time monitoring of CO₂ laser welding process. *Applied Optics*, Vo. 40, No. 33, pp. 6019–6025, 2001.
- [97] Mohammad Montazeri, Abdalla R. Nassar, Alexander J. Dunbar, and Prahalada Rao. In-process monitoring of porosity in additive manufacturing using optical emission spectroscopy. *IISE Transactions*, Vo. 52, pp. 500–515, 2020.
- [98] Sung-Hoon Baik, Min-Suk Kim, Seung-Kyu Park, Chin-Man Chung, Cheol-Jung Kim, and Kwang-Jung Kim. Process monitoring of laser welding using chromatic filtering of thermal radiation. *Measurement Science and Technology*, Vo. 11, pp. 1772–1777, 2000.
- [99] Lijun Han, Frank W. Liou, and Srinivas Musti. Thermal Behavior and Geometry Model of Melt Pool in Laser Material Process. *J. Heat Transfer*, Vo. 127, pp. 1005–1014, 2005.

- [100] Yinggang Tian, and Yung C. Shin. Thermal Modeling for Laser-Assisted Machining of Silicon Nitride Ceramics with Complex Features. *J. Manuf. Sci. Eng.*, Vo. 128, pp. 425–434, 2006.
- [101] Yousuke Kawahito, Masayuki Kito, and Seiji Katayama. In-process Monitoring and Adaptive Control for Laser Spot and Seam Welding of Pure Titanium. *J. Manuf. JLMN-Journal of Laser Micro/Nanoengineering*, Vo. 1, No.3, pp. 269–274, 2006.
- [102] Philippe Ackermann, and Robert Schmitt. Tomographical process monitoring of laser transmission welding with OCT. *Proceedings of SPIE*, Vol. 10329, pp. 103290H–1-8, 2017.
- [103] G. Bickel, G. Hausler, and M. Maul. Triangulation With Expanded Range Of Depth. *Optical Engineering*, Vol. 24, No. 6, pp. 975–977, 1985.
- [104] Sergei Vasilievich Mikhlyaev. High-precision triangulation sensing of mirror surface. *Proceedings of SPIE*, Vol. 4416, No. 6, pp. 400–403, 2001.
- [105] Antonin Miks, Jiri Novak, and Pavel Novak. Analysis of imaging for laser triangulation sensors under Scheimpflug rule. *Optics Express*, Vol. 21, pp. 18225–18235, 2013.
- [106] Zygo. NewView™ 8000 シリーズ. <https://zygo.jp/?/met/profilers/newview8000/>, (参照 2020-11-02).
- [107] 三鷹光器株式会社. NH シリーズ “非接触三次元測定装置” .
http://www.mitakakohki.co.jp/industry/nh_series/, (参照 2020-11-02).
- [108] Claus Emmelmann, Jannis Kranz, Dirk Herzog, and Eric Wycisk. *Laser Additive Manufacturing of Metals*. Springer, 2014.
- [109] Dirk Herzog, Vanessa Seyda, Eric Wycisk, and Claus Emmelmann. Additive manufacturing of metals. *Acta Materialia*, Vol. 117, pp. 371–392, 2016.
- [110] 小泉 雄一郎, 千葉 晶彦, 野村 直之, and 中野 貴由. 金属系材料の3次元積層造形技術の基礎. まてりあ, 56巻, 12号, pp. 686–690, 2017.
- [111] Syed A.M. Tofail, Elias Koumoulos, Amit Bandyopadhyay, Susmita Böse, Lisa M.T. O'Donoghue, and Constantinos Charitidis. Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities. *Materials Today*, Vol. 21, pp. 22–37, 2018.
- [112] J. Giannatsis, and V. Dedoussis. Additive fabrication technologies applied to medicine and health care: a review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 40, pp. 116-127, 2009.
- [113] Adrian Uriondo, Manuel Esperon Miguez, and Suresh Perinpanayagam. The present and future of additive manufacturing in the aerospace sector: A review of important aspects. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part G Journal of Aerospace Engineering*, Vol. 229, pp. 2132-2147, 2015.
- [114] Annamaria Gisario, Michele Kazarian, Filomeno Martina, and Mehrshad Mehrpouya. Metal additive manufacturing in the commercial aviation industry: A review. *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 53, pp. 124-149, 2019.

- [115] Gideon N. Levy, Ralf Schindel, and J.P. Kruth. Rapid manufacturing and rapid tooling with layer manufacturing (LM) technologies, state of the art and future perspectives. *CIRP Annals Manufacturing Technology*, Vol. 52, pp. 589-609, 2003.
- [116] Abdolreza (Arash) Simchi, and Haiko Pohl. Direct laser sintering of iron-graphite powder mixture. *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 383, pp. 191-200, 2004.
- [117] Abdolreza (Arash) Simchi. Direct laser sintering of metal powders: Mechanism, kinetics and microstructural features. *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 428, pp. 148-158, 2006.
- [118] Eyyitayo Olatunde Olakanmi, Robert F. Cochrane, and Kenneth W. Dalgarno. A review on selective laser sintering/melting (SLS/SLM) of aluminium alloy powders: Processing, microstructure, and properties. *Progress in Materials Science*, Vol. 74, pp. 401-477, 2015.
- [119] John O. Milewski, Gary K. Lewis, Dan Thoma, G. I. Keel, Ronald B. Nemec, and R. A. Reinert. Directed light fabrication of a solid metal hemisphere using 5-axis powder deposition. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 75, pp. 165-172, 1998.
- [120] Joseph N. Zalameda, Eric R. Burke, Robert A. Hafley, Karen M. Taminger, Christopher S. Domack, Amy Brewer, and Richard E. Martin. Thermal imaging for assessment of electron-beam freeform fabrication (EBF3) additive manufacturing deposits. *Proceedings of SPIE*, Vol. 8705, pp. 87050M-1-8, 2013.
- [121] Shuang Liu, Wei Liu, Masoud Harooni, Junjie Ma, and Radovan Kovacevic. Real-time monitoring of laser hot-wire cladding of Inconel 625. *Optics & Laser Technology*, Vol. 62, pp. 124-134, 2014.
- [122] Janne Nurminen, Jouko Riihimäki, Jonne Näkki, and Petri Vuoristo. Comparison of laser cladding with powder and hot and cold wire techniques. *Proceedings of international congress on application of lasers & electro-optics – ICALEO*, pp. 634-637, 2006.
- [123] 三菱電機株式会社. レーザーワイヤ DED 方式金属積層技術.
<https://www.mitsubishielectric.co.jp/corporate/randd/list/mechatronics/b233/index.html>, (参照 2020-11-02).
- [124] 三菱電機株式会社. シナジーコラム. https://www.mitsubishielectric.co.jp/business/biz-t/contents/synergy/metal3dprinter001.html?utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=bizt_20200915&utm_content=3dprinter&gclid=EAIAIQobChMI2u3zpM3j7AIVxLmWCh30AQEIEAYASAAEgLOQvD_BwE, (参照 2020-11-02).
- [125] 森田 大嗣, 篠原 暢宏, 中野 善和, 橋本 隆, and 鵜飼 佳和. レーザーワイヤ指向性エネルギー堆積法(DED)方式金属 3D プリンタによる点造形技術. *レーザー学会誌*, 48 卷, 8 号, pp. 431-435, 2020.
- [126] Sarah K. Everton, Matthias Hirsch, Petros Stravroulakis, Richard K. Leach, and Adam T. Clare. Review of in-situ process monitoring and in-situ metrology for metal additive manufacturing. *Materials and Design*, Vol. 95, pp. 431-445, 2016.

- [127] Zhaorui Yan, Weiwei Liu, Zijue Tang, Xuyang Liu, Nan Zhang, Mingzheng Li, and Hongchao Zhang. Review on thermal analysis in laser-based additive manufacturing. *Optics and Laser Technology*, Vol. 106, pp. 427-441, 2018.
- [128] Almir Heralic, Anna-Karin Christiansson, Mattias Ottosson, and Bengt Lennartson. Increased stability in laser metal wire deposition through feedback from optical measurements. *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 48, pp. 478-485, 2010.
- [129] Almir Heralic, Anna-Karin Christiansson, and Bengt Lennartson. Height control of laser metal-wire deposition based on iterative learning control and 3D scanning. *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 50, pp. 1230-1241, 2012.
- [130] Simone Donadello, Maurizio Motta, Ali Gökhan Demir, and Barbara Previtali. Monitoring of laser metal deposition height by means of coaxial laser triangulation. *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 112, pp. 136-144, 2019.
- [131] Petter Hagqvist, Almir Heralic, Anna-Karin Christiansson, and Bengt Lennartson. Resistance based iterative learning control of additive manufacturing with wire. *Mechatronics*, Vol. 31, pp. 116-123, 2015.

本研究に関連する研究論文、口頭発表などの業績

査読付投稿論文

- (1) S. Takushima, H. Kawano, H. Nakahara and T. Kurokawa: "On-machine multi-directional laser displacement sensor using scanning exposure method for high-precision measurement of metal-works", Precision Engineering, Vol. 51, (2018), pp. 437-444
- (2) S. Takushima, D. Morita, N. Shinohara, H. Kawano, Y. Mizutani and Y. Takaya: "Optical in-process height measurement system for process control of laser metal-wire deposition", Precision Engineering, Vol. 62, (2020), pp. 23-29
- (3) S. Takushima, N. Shinohara, D. Morita, H. Kawano, Y. Mizutani and Y. Takaya: "Measurement direction dependency improvement with in-process height displacement measurement system by crossed line beams line section method for process control in laser metal-wire deposition", International Journal of Automation Technology, (投稿中)

国際学会発表論文

- (1) S. Takushima and H. Kawano: "Laser displacement sensor using multi-direction triangular surveying method", International Conference on Optics-photonics Design and Fabrication, (2016), 2S3-10
- (2) S. Takushima, K. Chikahisa, H. Kawano, T. Kurokawa, K. Inukai, Y. Mizutani and Y. Takaya: "ON-MACHINE HIGH-PRECISION DEFLECTION MEASUREMENT BY MULTI-DIRECTIONAL LASER DISPLACEMENT SENSOR USING SCANNING EXPOSURE METHOD", International Symposium on Flexible Automation, (2018), S013
- (3) S. Takushima, D. Morita, N. Shinohara, H. Kawano, Y. Mizutani and Y. Takaya: "In-process height monitoring system by light section method for laser metal-wire deposition", International Symposium of Measurement Technology and Intelligent Instruments, (2019), P17

国内学会発表

- (1) 多久島 秀, 河野 裕之, 仲嶋 一: 光学式ワークエッジ検出センサの開発, 2012 年電気学会全国大会, (2013), 333-A1, 3-119
- (2) 多久島 秀, 河野 裕之, 仲嶋 一: 光学式ワークエッジ検出センサの開発, 2013 年電気学会計測委員会, (2013), IM-13
- (3) 多久島 秀, 河野 裕之, 関 真規人: 面取りされたエッジ位置計測のためのオンマシン高さ計測, 2014 年センシングフォーラム, (2014), 1B1-4:13
- (4) 多久島 秀, 河野 裕之, 中原 宏勲, 黒川 聰昭: 三角測量方式を用いた金属ワークでの変位計測を高精度化するための走行露光法の開発, 2016 年精密工学会秋季大会, (2016), B21

特許

- (1) エッジ検出装置
【登録番号】特許第 6056798 号
【登録日】2016.12.16
- (2) 変位センサ、変位検出装置及び変位検出方法
【登録番号】特許第 5925390 号
【登録日】2016.04.28
2019.03.05 US, 2019.09.24 CN にて登録
- (3) 変位測定装置
【登録番号】特許第 6156590 号
【登録日】2017.06.16
- (4) 積層造形装置
【登録番号】特許第 6576593 号
【登録日】2019.08.30

(5) 積層造形装置

【国際公開番号】 WO2020/095453

【公開日】 2020.05.14

(6) 積層造形装置、積層造形方法、および積層造形プログラム

【出願日】 2019.08.07

未公開

(7) 積層造形装置

【出願日】 2019.11.11

未公開

表彰

(1) 2014 年センシングフォーラム若手研究奨励賞受賞 (2014)

(2) Precision Engineering Editors' Choice Article 受賞 (2020)