# 平成22年度 戦略的基盤技術高度化支援事業 「圧力容器製造に適応するレーザ溶接の技術開発」

# 研究開発成果等報告書

平成23年3月

委託者 北 海 道 経 済 産 業 局 委託先 財団法人北海道中小企業総合支援センター

# ◇◇◇ 目 次 ◇◇◇

第1章	研究開発の概要 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	1
1 — 1 1 — 2	研究開発の背景・研究目的及び目標 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	1 3
1 — 3 1 — 4	(切見組織及び皆理体前、切見員及び皆理員、協力者) 成果概要 ······ 当該プロジェクト連絡窓口 ······	6 7
第2章	本 論	8
2 — 1	圧力容器、真空容器溶接部へのレーザ溶接の適用化技術の確立 ・・・・・・・	8
2 – 2	レーザ溶接条件のデータベースの構築 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	11
2-3	ロボット動作計画の最適化と3次元軌跡追尾を実現する	
	ロボット制御ソフトの開発・・・・・	19
2-4	ロボット教示点補正を自動化するビジョンセンサの開発・・・・・・・・・	30
2 — 5	ビジョンセンサとロボット制御ソフトを統合したシステムの構築・・・・・・	47
第3章	全体総括	48
3 — 1	複数年の研究開発成果 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	48
3-2	研究開発後の課題・事業化展開・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	49
〔参考び	文献・引用文献〕 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	50

# 第1章 研究開発の概要

## 1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

#### (1)研究の目的

溶接技術に関し、川下製造業者からの要請とは、熱サイクルや圧力サイクルによる金属疲労への 長寿命化、組立寸法の高精度化という品質要件と、製造コスト削減、短納期化への対応である。本 研究では、低入熱、低歪み、深溶込み、高速度溶接が特徴のレーザ溶接を効果的に活用してこれら の課題解決を図るべく、レーザ溶接の技術開発を行うものである。

レーザ溶接が克服すべき課題は、アーク溶接に比べ溶接条件が確立されていないこと、大型 の加工物に対する裕度が少ないこと、すなわち溶接位置合せの高精度化、及びその高能率化である。

本研究では、圧力容器や真空容器の主要な溶接部にレーザ溶接を適用するため、レーザ溶接方法 や溶接条件を確立する。また、ロボットによる溶接位置合せの自動化を図るため、ビジョンセンサ とロボット制御ソフトによるレーザ溶接システムを開発し、大型構造物、少量多品種生産に適応す るレーザ溶接技術を確立する。

#### (2)研究の概要

圧力容器あるいは真空容器は、高温化、極低温化等の高性能かつ長寿命化のための低入熱 溶 接へのニーズと、これに相反する製造コスト削減、短納期化への対応が望まれている。これら 課題を踏まえ、レーザ溶接の低歪み、高速・高精度溶接の特性を活かした、比較的大きな構造 物の3次元形状について、新センサとノズルを備えたレーザ溶接システムの開発と高能率溶接 技術の確立を図る。

#### ① 圧力容器、真空容器溶接部へのレーザ溶接の適用化技術の確立

ア)溶接方法を検討し、溶接実験を行う

コーナー部の溶接や重ね溶接など、単純突き合わせ以外の継手形状について、溶接条件の確立 と品質評価を行う。また、アルミ合金の突き合せ溶接について、溶接条件の確立と品質評価を行 う。

イ)実験結果について試験、分析を行い評価する

上記実験における機械的試験(強度、硬さ等)、化学的試験(化学分析、腐食等)、金属学的試験(マクロ組織等)、表面分析等を実施し、評価する。

#### ② レーザ溶接条件のデータベースを構築

ア)溶接条件を検討し、溶接実験によりデータベースを構築する

コーナー部の溶接や重ね溶接など、単純突き合わせ以外の継手形状について、溶融形状等の溶 接結果をデータベースとして構築する。また、アルミ合金について、溶接条件の違いにおける溶 込み深さや溶融幅、溶融形状等の溶接結果をデータベースとして構築する。

イ)必要に応じ、実験結果の試験、分析を行い評価する

上記実験における①と同様の試験、分析、評価を実施する。

#### ③ ロボット動作計画の最適化と3次元軌跡追尾を実現するロボット制御ソフトの開発

- ア)ロボットの制御ソフトを開発する 平面における突き合せ部の曲線状シームラインについて、ビジョンセンサの計測機能をロボットの動作プログラムに取り込み、計測のためのロボット動作および計測結果に基づき動作するロボット制御ソフトを開発する。
- イ) ロボットの軌跡誤差について検討し、評価する 曲線動作におけるロボット軌跡誤差を計測し、評価する。
- ウ) ロボットの制御ソフトを評価する 上記の開発制御ソフトについて溶接実験行い評価する。
- ④ ロボット教示点補正を自動化するビジョンセンサの開発
  - ア)ビジョンセンサの画像処理ソフトを開発する 前年度までの直線状シームラインについて溶接ヘッドの位置、高さ、角度を求めるビジョンセンサの画像処理ソフトを基に、曲線状シームラインへの適用化を図る。
  - イ)ビジョンセンサのハードウェアを開発する

ビジョンセンサ機能を組み込んだ改良溶接ヘッドについて試作する。

ウ)ビジョンセンサを評価する

上記の画像処理ソフトについて溶接実験行い評価する。

## ⑤ ビジョンセンサとロボット制御ソフトを統合したシステムの構築

ア)レーザ溶接システムについて検討し、評価する 加工機構成とビジョンセンサの適用化により試作したレーザ溶接システムについて評価する。

#### (3)研究の目標

平成22年度は、これらの研究を基にして、次のような成果を目指す。

- ① ロボットの制御ソフトの開発において、2 個の被溶接物の平面における直線状突き合せ部の隙 間の中心をシームラインとして定義し、これの軌跡精度を 0.30[mm]を目標値とする。
- ② ビジョンセンサの画像処理ソフトの開発において、計測精度 XYZ=0.15[mm]、姿勢角  $\alpha \beta = 3^{\circ}$  を目標値とする。
- ③ ビジョンセンサとロボット制御ソフトを統合したシステムの構築において、レーザ溶接にて 1 パス当りの溶込み深さ 6[mm]を想定し、溶融部下方(裏側)の位置ずれ量 0.5[mm]以内とし、 厚さ 10[mm]の板の突き合せ両側溶接において、TIG アーク溶接法に比べ入熱量 1/10、溶接時間 1/5 にて高品質な溶接の実現を目指す。また、これら実現に向け、個々の目安として、軌跡精 度約 0.15[mm]、1 教示点の計測時間 10 秒を目標値とする。
- ④ ビジョンセンサとロボット制御ソフトを統合したシステムの構築において、ステンレス鋼厚 さ4[mm]の平面、曲面における溶接条件を確立する。

# 1-2 研究体制

## (1)研究組織(全体)



## (2)管理体制



# (3)研究員及び管理員

- ① 事業管理者 【 財団法人北海道中小企業総合支援センター 】
  - ア)管理員(プロジェクト管理員)

氏 名	所属・役職
紅葉昭彦	経営支援部 次長
伊藤道雄	経営支援部 診断指導課長
中屋 悟	経営支援部 診断指導課主任

イ)研究員 なし

# ② 再委託先

【 株式会社産鋼スチール 】

氏:	名			所属・役職
大 藤	仁 志	開発部	部長	
福 田	薫	開発部	技術開発課	係長
高 橋	聖 史	開発部	業務開発課	係長
佐 藤	哲 也	開発部	業務開発課	

【国立大学法人北海道大学】

氏 名	所属・役職
金子俊一	大学院 情報科学研究科 教授
田中孝之	大学院 情報科学研究科 准教授
松 下 昭 彦	大学院 情報科学研究科 助教

【 独立地方行政法人北海道立総合研究機構 】

氏 名	所属・役職
鎌田英博	産業技術研究本部 工業試験場 製品技術部 部長
櫻 庭 洋 平	産業技術研究本部 工業試験場 製品技術部 研究職員
鶴 谷 知 洋	産業技術研究本部 工業試験場 製品技術部 研究職員
赤沼正信	産業技術研究本部 工業試験場 材料技術部 部長
片 山 直 樹	産業技術研究本部 工業試験場 材料技術部 研究主幹
斎藤隆之	産業技術研究本部 工業試験場 材料技術部 研究主查
田中大之	産業技術研究本部 工業試験場 材料技術部 主查
中 嶋 快 雄	産業技術研究本部 工業試験場 材料技術部 研究主任
宮 腰 康 樹	産業技術研究本部 工業試験場 材料技術部 主查
相 山 英 明	産業技術研究本部 工業試験場 ものづくり支援センター
	研究職員
高橋 英徳	産業技術研究本部 工業試験場 ものづくり支援センター 主査

# (4) 経理担当者及び業務管理者の所属及び氏名

$\bigcirc$	事業管理者	【 財団法人北海道中小企業総合支援センター 】		
	(経理担当者)	政策管理部 総務課主任	田巻	幸 男
	(業務管理者)	経営支援部 次長	紅 葉	昭 彦

# ② 再委託先

【株式会社産鋼>	スチール】		
(経理担当者)	開発部	中 山	理 奈
(業務管理者)	開発部 部長	大 藤	仁 志

# 【国立大学法人北海道大学】

(経理担当者)	経理課 会計担当	吉 田	紀 子
(業務管理者)	大学院情報科学研究科 教授	金 子	俊一

【独立地方行政法人北海道立総合研究機構】

(経理担当者)	産業技術研究本部	企画調整部	主査		奥	田	篤	
(業務管理者)	産業技術研究本部	工業試験場	製品技術部	部長	鎌	田	英博	萛

# (5)他からの指導・協力者名及び指導・協力事項

【 研究推進会議委員会出席者 】

氏名	名	機関·所属·役職	備考
大藤仁	志	株式会社産鋼スチール 開発部 部長	委員長
金子俊	<u> </u>	北海道大学大学院 情報科学研究科 教授	副委員長
鎌田 革	峬	独立地方行政法人北海道立総合研究機構	<u>禾</u> 昌
	ান্য	産業技術研究本部 工業試験場 製品技術部 部長	女 贞
赤沼正	信	独立地方行政法人北海道立総合研究機構	禾 昌
	ΙĦ	産業技術研究本部 工業試験場 材料技術部 部長	女贞
池田正	幸	北海道大学 名誉教授	アドバイザー
《走 立·7	举	住友重機械メカトロニクス株式会社 第二営業部	マドバノザー
にす。変形	<u></u> ≁	東京営業グループ 担当課長	) [(),()] () =
上 立 一 捕	/書	川重テクノサービス株式会社	マドバノザー
母  「「」」	16	ITシステム部 部長	) [(),()] () =
松下昭	彦	北海道大学大学院 情報科学研究科 助教	技術開発関係者
福 田	薫	株式会社産鋼スチール 開発部 係長	技術開発関係者
森下 貴	文	北海道大学工学部4年生	技術開発関係者
实	<u>57.</u>	財団法人北海道中小企業総合支援センター	市政已
私 朱 昭	厚	経営支援部 次長	尹伤问
(中 燕 ) 送	+#:	財団法人北海道中小企業総合支援センター	市政已
げ膝坦	仏田	経営支援部 診断指導課長	尹伤问
	1	財団法人北海道中小企業総合支援センター	古改曰
	旧	経営支援部 診断指導課 主任	争務同

#### 1-3 成果概要

- (1) 圧力容器、真空容器溶接部へのレーザ溶接の適用化技術の確立 (産鋼スチール、北海道立総合研究機構)
- ① 重ね貫通溶接について、レーザ溶接条件の選定基準を確立した。
- ② アルミ合金(A5083) について、マイクロフォーカス X線 CT にて溶接欠陥となるポロシティを 観察し、空孔の大きさと発生率を測定した。
- (2) レーザ溶接条件のデータベースの構築 (産鋼スチール、北海道立総合研究機構)
- ① アルミ合金(A1050、A2017、A5052、A6061、A7075)について、スポット溶接実験を実施し、 レーザ顕微鏡による観察と、溶融形状の計測を実施し、レーザ溶接の可否検討を実施した。
- ② アルミ合金(A5083)について、溶接部の金属組織試験と硬さ試験を実施した。
- (3) ロボット動作計画の最適化と3次元軌跡追尾を実現するロボット制御ソフトの開発 (北海道立総合研究機構、産鋼スチール)
- ロボットの軌跡精度を確認するとともに、3次元軌跡追尾を実現するロボット制御ソフトを開発した。

②開発した、ロボット制御ソフトの評価を実施し、目標精度に達している事を確認した。

#### (4) ロボット教示点補正を自動化するビジョンセンサの開発 (北海道大学、産鋼スチール)

- ロボット教示点補正を自動化するビジョンセンサを開発するとともに、更なる精度向上を見込める改良版の画像処理アルゴリズムを確立した。
- ② ビジョンセンサの検出精度の評価を実施し、目標精度に達している事を確認した。

#### (5) ビジョンセンサとロボット制御ソフトを統合したシステムの構築 (産鋼スチール)

- ビジョンセンサとロボット制御ソフトを統合したシステムの構築をした。構築したシステムに て目標精度で、溶接線を自動追尾できることを確認し、レーザ溶接に適用可能なことを実証した。
- ② ビジョンセンサの商品化、事業化に向けての課題を抽出した。
- (6)研究全体の統括、プロジェクトの管理運営 (北海道中小企業総合支援センター)

研究メンバーと連絡を密にし、計画全体の進捗管理に努めるとともに、研究推進会議委員会を 実施して研究員の活発な意見交換を促し、意見調整を行うとともに、アドバイザーからの意見を 研究内容や事業化に有益となるよう調整し、反映させた。

# 1-4 当該プロジェクトの連絡窓口

## (1) 事業管理者

## 【 財団法人北海道中小企業総合支援センター 】

〒060-0001 北海道札幌市中央区北1条西2丁目 経済センタービル9F (TEL) 011-232-2001 (FAX) 011-232-2011

# (2) 再委託先

## 【 株式会社産鋼スチール 】

〒047-0261 北海道小樽市銭函3丁目515番地1 (TEL)0134-61-5600 (FAX)0134-61-5588

### 【 国立大学法人北海道大学 大学院情報科学研究科 】

〒060-0814 北海道札幌市北区北14条西9丁目 (TEL) 011-706-6755 (FAX) 011-706-6755

## 【 独立地方行政法人北海道立総合研究機構 産業技術研究本部 】

〒060-8019 北海道札幌市北区北 19 条西 11 丁目 (TEL) 011-747-2321 (FAX) 011-726-4057

# 第2章本 論

### 2-1 圧力容器、真空容器溶接部へのレーザ溶接の適用化技術の確立

#### (1) 溶接方法を検討し、溶接実験を行う(産鋼スチール)

レーザ溶接は、溶け込みが深いキーホール溶接であるため、従来溶接法であるアーク溶接では不 可能な重ね貫通溶接が可能であり、本研究では、実験を通じてその適用検討を実施した。

また、平成 20 年度のステンレス鋼、平成 21 年度のニッケル合金鋼に続き、平成 22 年度はアルミ 合金におけるレーザ溶接条件の検討と、品質評価を実施した。

#### ① 重ね貫通溶接についての適用検討

ステンレス鋼(SUS304)における重ね貫通溶接を実施した。重ね貫通溶接における溶接条件の選定は、平成 20 年度のレーザ溶接条件データベースより溶け込み深さを想定した。

実験の結果、上記データベース通りの溶接結果を得た。本データベースは、突き合せ溶接を想定 したものであるが、重ね貫通溶接についても、条件選定に役立てることが可能である。

重ね貫通溶接の溶接条件選定についてまとめると、突き合せ溶接では、溶融幅が接合部の強度に 影響しないため、パワー密度をより高くして溶接速度を速くし、所定の溶け込み深さを得るための 入熱量を低く抑えることが品質向上に結びつくが、重ね貫通溶接の場合は、重ね合わせた部分の溶 融幅にて強度算定をするため、溶融幅の広い溶接が強度向上、つまりは品質向上に結びつくことと なる。

平成 20 年度のレーザ溶接条件データベースより、キーホール深部の幅が広くなる溶接条件を選定 する場合、所定の深さを得る条件にて同一入熱量で比較すると、パワー密度がより低い溶接条件が キーホール深部の幅が広くなるため、突き合せ溶接とは逆の選択結果となることが確認された。

重ね貫通溶接では、所定の溶け込み深さを得ることを前提とした場合、パワー密度を低くするためにレーザ集光径を大きくする、または、レーザ出力の低い条件を選定する、すなわち低速での溶接条件が選定されることとなる。

#### ② アルミ合金におけるレーザ溶接実験

アルミ合金は、航空機の機体に使用されるジュラルミンに代表させる様、軽量で高強度が得られる材料として様々な構造部材に使用され、従来溶接法での接合では MIG 溶接や TIG 溶接が可能であるが、手溶接においては知識と技量が必要な溶接と位置づけられている。

レーザによるアルミ合金の溶接は、数々の金属の中でも難易度の高い溶接である。その理由は、 YAGレーザ光(波長 1064nm)のアルミニウムにおける反射率が、炭素鋼の約 0.6 と比較して、約 0.75 と高く、よりレーザパワーを必要とするとともに、反射光による機器損傷のための対策が必要 となるためである。

反射光における機器損傷事例としては、正反射によるレーザ光が光ファイバーの出射端に戻って 起こる熱損傷等があげられ、最新のレーザ発振器は装置本体への反射光対策が施されているものが 多いが、本研究にて使用した発振器にはその機能が無いため、装置への正反射を防止するため、被 溶接物に対してスポット溶接の場合は 1.5°、連続溶接の場合は 3°の照射角度を与えて実験を実施 した。

また、図 1-(1)-1 は、実際に使用したレーザ溶接ノズルが熱損傷したものである。溶接表面から は 8mm 離れているが、溶接表面に焦点を合わせた状態でのレーザ反射光で、真鍮製の溶接ノズルが 溶融した状態が見てとれる。写真の損傷は、3°の照射角度を与え、純アルミ(A1100)の突合せ溶

8

接、500mm 長さの連続溶接1回で起こったものである。溶融部が一方向に偏っているため、3°の照 射角度による反射光で損傷したものと推測できる。



図 1-(1)-1 レーザ溶接ノズルの熱損傷

本研究における、溶接時のガスシールド方法は、サイドガスシールド法に比べて溶接品質の良い センターガスシールド法を採用しているが、熱伝導率が高く、かつ、レーザ光の吸収率も低い銅合 金の真鍮製溶接ノズルが損傷する結果を踏まえると、ある程度の溶け込みを必要とするアルミ合金 の溶接に際しては、レーザ反射光による損傷が避け易い、サイドガスシールド法を選択する方が良 いと思われる。

また、後述する 2-1-(2)、2-2-(2)の品質評価に用いた溶接試料の実験条件は次のとおりである。

[実験]

・材質はアルミニウム合金 A5083 (ミルシートより、Si:0.15、Fe:0.28、Cu:0.04、Mn:0.64、Mg:4.53、Cr:0.12、Zn:0.01、Ti:0.03、残部:A1)、厚さ 4mm、溶接長さ 100mm (ビードオンプレート)

・発振器出力 3.5kW(発振器デマンド 78%)、加工点出力 3.0kW、溶接速度 560mm/min、入熱量 320J/mm、照射角度 3°(後進角)

・シールドガス窒素、センターガスシールド法

アルミニウム合金 A5083 の比重は 2.66、溶融温度は約 600℃、熱伝導率は 0.28cal/cm・sec・℃、 レーザ光の反射率が高く、初期溶融には高いレーザパワーを必要とするが、溶融のための熱量は少 なくすむため、初期溶融後は溶融が一気に進むことから、最適な溶接条件の範囲は非常に狭いこと が解った。

#### (2)実験結果について試験、分析を行い評価する(北海道立総合研究機構)

レーザを用いたステンレス鋼等金属への溶接では、従来の溶接法(TIG 等)と比べて、高速での 深溶け込み接合が可能であり、また素材への熱影響も少ないという特徴を有する。一方、レーザ溶 接法が今後さらに普及していくためには、接合部の品質、すなわち溶接部の耐食性(孔食、応力腐 食割れ(SCC))、機械的性質(硬さ、引張り強さ)、金属組織(ポロシティ、割れ)についても他の方 法によるものと比べて優位性があるのかどうか検証される必要がある。

平成 20 年度は、金属基材として各種ステンレス鋼(オーステナイト系ステンレス鋼・4 種類及び

二相ステンレス鋼・1 種類)を対象にレーザ溶接部の品質について検討した<sup>1)2)3)</sup>。

平成 21 年度は、金属基材として純ニッケル及び 3 種類のニッケル系合金、計 4 種類を選択し、 レーザ溶接を行った。レーザ溶接時のアシストガスには、平成 20 年度と同様にアルゴンあるいは窒 素を用いた。

平成22年度は、金属基材としてアルミニウム合金、特に車輌、船舶、建築用材および圧力容器等、 幅広い用途がある A1-Mg 系アルミニウム合金(5083)を選択し、レーザ溶接(ビードオンプレー ト)を行った。なお、アシストガスには窒素ガスを用いた。

A1-Mg 系アルミニウム合金(5083)溶接部の機械的性質と金属組織を評価するため、マイクロ ビッカース硬さの測定と光学顕微鏡によるマクロ組織観察及びマイクロフォーカス X線 CT によるポ ロシティの観察と測定(空孔の大きさと発生率の測定)を行った。

#### ① 溶接部の機械的性質の評価

〔実験〕溶接部での機械的性質の評価として、ここでは溶接部断面(横断面)におけるマイクロ ビッカース硬さを測定した。試験片は、下記の「② 溶接部の金属組織試験(マクロ組織)」で使用 するものと共用した。測定箇所は、溶接部横断面の中心部と溶接部から離れた基材断面で、それぞ れ5点測定し平均値を求めた。測定荷重は50gfとした。

#### 溶接部の金属組織試験(マクロ組織)

〔実験〕マクロ組織観察は、4mm 厚さの基材(5083)にレーザ照射したビードオンプレート試料 に対して、溶接部断面の光学顕微鏡観察を行った。さらに、マイクロフォーカス X 線 CT(島津製作 所製 SMX-225CT)により溶接部内部のポロシティ(空孔)の観察と測定を行った。

マクロ組織観察では、任意の一次サンプルを  $15 \times 15 \times 4$ mm に細断し、これを溶接部の断面(横断面)観察が可能となるよう容器内(内径 $\phi$ 40×30mm)に静置し、その後エポキシ系の樹脂を注入し、埋込サンプルを作製した。次に、エメリー研磨紙での荒研磨の後、ダイヤモンドペースト(3  $\mu$  m)による仕上げ研磨を行った。

マクロ組織観察は、10wt%NaOH 水溶液中でのエッチング(50℃、15s)後、実体顕微鏡で行った。

## 2-2 レーザ溶接条件のデータベースの構築

#### (1) 溶接条件を検討し、溶接実験によりデータベースを構築する(産鋼スチール)

アルミ合金のレーザ溶接条件を得るため、純アルミ系 A1050、A1-Cu 系 A2017、A1-Mg 系 A5052、 A1-Mg-Si 系 A6061、A1-Zn-Mg 系 A7075 にてスポット溶接実験を実施し、溶融部の観察と計測を行っ た。アルミニウム合金の中でも、レーザ溶接の適否検討を行った。

#### ① スポット溶接実験

〔実験〕試験材の材質は、以下の5種類、

- (1) A1050 (ミルシートより、Si:0.07、Fe:0.35、Cu:0.02、Mn:0.00、Mg:0.00、Zn:0.00、 Ti:0.03、V:0.01、A1:99.52)
- (2) A2017 (ミルシートより、Si:0.60、Fe:0.26、Cu:3.89、Mn:0.69、Mg:0.62、Cr:0.02、 Zn:0.03、Ti:0.03、残部:A1)
- (3) A5052 (ミルシートより、Si:0.08、Fe:0.26、Cu:0.01、Mn:0.01、Mg:2.56、Cr:0.17、 Zn:0.01、残部:A1)
- (4) A6061 (ミルシートより、Si:0.60、Fe:0.40、Cu:0.28、Mn:0.03、Mg:0.99、Cr:0.11、 Zn:0.01、Ti:0.05、残部:A1)
- (5) A7075 (ミルシートより、Si:0.04、Fe:0.10、Cu:1.60、Mn:0.02、Mg:2.40、Cr:0.19、 Zn:5.70、Ti:0.04、残部:A1)

発振器出力は1140W(40%)、1640W(50%)、2240W(60%)の3種類、レーザ集光径は0.6mm、レー ザ照射時間は0.1s、レーザ照射角度は1.5°、レーザ焦点位置は試料表面とし、シールドガスは不使 用とした。

レーザ顕微鏡によるスポット外観、立体画像、高さプロファイルを図 2-(1)-1~15 に示す。

純アルミ 1050A は、発振器出力 1140W では表面の溶融が起こらなかった。パワー密度を計算する と、ファイバーその他光学系でのエネルギー損失を 15%、アルミニウムのYAGレーザ反射率 75% とした場合、パワー密度は 8.6×10<sup>4</sup> W/cm<sup>2</sup>となり、溶融のためのパワー密度は、>10<sup>4</sup> W/cm<sup>2</sup>とされ ているが、照射時間 0.1s においては溶融しないことが確認された。

その他の材料は、発振器出力 1140W の照射時間 0.1s から溶融したが、ステンレス鋼に比較して溶 融量が極端に少ないことが確認された。一方で、図 2-(2)-1 マクロ組織写真の溶融断面は、同一溶 接条件のステンレス鋼に比較しても、同等以上の溶け込みが得られていることから、初期溶融にパ ワー密度を必要とするが、入熱量は多く必要としないことが確認できる。

アルミ合金のレーザ溶接には、パワー密度を高くして、入熱量を低くした溶接条件が適する事が 解った。

1140W における溶融量から、各材料のレーザ光吸収率を推測すると、A7075>A5052>A2017= A6061>A1050 と思われる。また、溶融に優位となる熱伝導率の低い順に並べると、A7075(0.31) < A2017(0.32) < A5052(0.33) < A6061(0.40) < A1050(0.56) となる。(括弧内単位は、 cal/cm・sec・°C)

レーザ溶接の溶接性は、1140W、1640W、2240Wの出力変化に対して、溶融量が応答するものが良いと思われ、これにより溶接性の良い順に並べると、A5052>A7075>A6061>A2017>A1050となる。

また、A1050 以外は、凝固割れが確認されるため、品質の良い溶接条件を見出すには、更に様々 な条件を探る必要があり、事業終了後も補間研究にて継続する予定である。







図 2-(1)-2 A1050/1640W(50%)/ø0.6/0.1s/1.5°





 $\boxtimes 2-(1)-4$  A2017/1140W(40%)/ø0.6/0.1s/1.5°



図 2-(1)-5 A2017/1640W(50%)/ø0.6/0.1s/1.5°





図 2-(1)-7 A5052/1140W(40%)/ø0.6/0.1s/1.5°



図 2-(1)-8 A5052/1640W(50%)/ø0.6/0.1s/1.5°



⊠ 2-(1)-9 A5052/2240W(60%)/ $\emptyset$ 0.6/0.1s/1.5°



図 2-(1)-10 A6061/1140W(40%)/ø0.6/0.1s/1.5°



図 2-(1)-11 A6061/1640W(50%)/ø0.6/0.1s/1.5°





⊠ 2-(1)-13 A7075/1140W(40%)/ø0.6/0.1s/1.5°



図 2-(1)-14 A7075/1640W(50%)/ø0.6/0.1s/1.5°



図 2-(1)-15 A7075/2240W(60%)/ø0.6/0.1s/1.5°

(2) 必要に応じ実験結果の試験、分析を行い評価する(北海道立総合研究機構)

#### ① マイクロビッカース硬さ

[実験] 基材の A1-Mg 系アルミニウム合金(5083)のマイクロビッカース硬さ(5 点の平均 値)は、Hv113 であるのに対して、レーザ照射後も溶融部の硬さは Hv116 と大きな違いは認めら れなかった。

#### ② マクロ組織観察

[実験]図2-(2)-1に、板厚4mmの5083板へのレーザ照射・ビードオンプレート試料断面でのマクロ組織写真を示す。これは、加工点でのレーザ出力3kW、レーザ走査速度560mm/min、アシストガスN<sub>2</sub>、ノズル傾斜角度3°での試料断面写真であるが、ビードオンプレート試料であるにもかかわらず基材底面まで溶融し、さらにスプラッシュ現象まで観察されている。これまでも同条件で、ステンレス鋼およびニッケル系合金に対して、レーザ溶接(ビードオンプレート)を行ってきたが、このような現象は認められていない。あらためて、アルミニウムに対してレーザ溶接を行う場合は、レーザ照射初期のアルミニウム表面でのレーザ光の高反射現象と、表面溶融後の高熱伝導による高速溶融といったアルミニウム特有の過渡現象がある<sup>1)</sup>ことが再認識できた。

図 2-(2)-2 に、ビードオンプレート試料に対してマイクロフォーカス X 線 CT でポロシティ(空 孔)の存在を検査した結果を示す。画像では、溶融部全体における個々のポロシティが集合体とし て表されているため、非常に大きなポロシティが数多くあるように見えるが、個々のポロシティの 大きさおよび溶融部に占める体積割合(空孔率)は小さく、すなわちポロシティの大きさ(体積) は 0.1-2.0 (mm<sup>3</sup>)、体積割合(空孔率)は1.6%であった(溶融部体積 221mm<sup>3</sup>、空孔部体積 3.44mm<sup>3</sup>)。

また、その分布は中心部に 2.0mm<sup>3</sup>程度のポロシティが多く、溶融部と基材との境界部に 0.1mm<sup>3</sup>程 度の比較的小さなポロシティが多いことがわかった。



図 2-(2)-1 マクロ組織写真(ビードオンプレート)



図 2-(2)-2 マイクフォーカス X 線 CT によるポロシティの集合画像

# 2-3 ロボット動作計画の最適化と3次元軌跡追尾を実現するロボット制御ソフト の開発

#### (1) ロボットの制御ソフトを開発する(北海道立総合研究機構)

溶接ヘッド先端の移動および位置決め制御は、主に2つの制御システムから構成されている。まず、ロボットのDコントローラ内で動作する移動指令プログラムある。これは、ロボットアーム先端に固着させたファイバーレーザーヘッドの位置や姿勢を制御する役割を担っており、図 に示すようなASプログラム (ロボット専用言語) で作成されている。

次に、PC上で作動する制御ソフトである。これは画像処理ソフトから出力された補正教示デー タを、ロボットコントローラへ送信する役割を担っており、C言語で作成されている。また、ロ ボットツール座標系による数値をロボット用の形式に変換し、許容範囲値か否かも確認する。さら に、ダイアログ画面に必要な情報を表示し、オペレータからの指示を仰ぐなどのユーザインター フェースも装備している。開発中、様々な機能の追加を必要としたこともあり、結果的にシステム 全体を統合するソフトウエアとなった。本システムで繰り返して教示実験を行った結果、ほぼ設計 通りの性能を発揮し、信頼性も向上していることがわかった。しかしメンテナンス性やユーザーの 利便性、処理速度などを考慮すると、その複雑さ故に若干の改良も必要であった。そこで、機能を 絞り込んだソフトを新たに試作し、シミュレーションや実機で運転試験を行いながら、実用化に向 けた改善策を検討した。詳細を次ページ以降で説明する。

ここで図 3-(1)-1 を基にロボットコントローラ内部で作動するプログラムの概要を説明する。図 中のステップ①では、本コントローラからPC上の制御ソフトへ初期設定を指示し、初期設定完了 まで待機する②。2001 のシグナル OFF を確認したら現在地点でレーザヘッドの位置・姿勢を教示す るため、補正教示データの送付をPCへ要求している。ステップ③で補正値が送信されるまで待機 し、補正必要の有無を 2004 のシグナルで確認する④。必要であれば図 3-(1)-2 の6 つの移動量を変 数 ddx ~rrz に代入し、移動命令を実行するためにサブルーチンを呼び出す⑤。



図 3-(1)-1 ロボットコントローラによるレーザヘッドの移動指令プログラム

PROGRAM HOSEI2	(dddx,dddy,dddz,rrrx,rrry,rrrz,tttt)
here ftempl	
DECOMPOSE >	<[0] = ftemp1
PRINT ″移動前	(:(" , X[0],",", X[1],",", X[2],",", X[3],",", X[4],",", X[5],")"
TDRAW.dddx.c	ddv.dddz.0.0.0
BREAK	
TDRAW 0.0.0 r	TX 1117 1117
BREAK	
boro ft1	
DECOMPOSE	/fo] = #4
DECOMPOSE	201 - HU 

# 図 3-(1)-2 ロボットコントローラによるレーザヘッドの移動指令プログラム

制御ソフトの試作段階で、一回の補正教示に 20sec 以上の時間を要する場合もあると判明したた め、その原因を探り、処理時間短縮について検討した。設計当初はシンプルな構造でも、機能を追 加するにつれてデータの表示や確認のための入出力命令等で埋められ、その容量は増大する傾向に ある。現場作業に使用しないコードは削除し、補正教示作業に必要不可欠なコードのみで構成され るプログラムを新たに製作し、制御ソフトの処理時間を測定することとした。

図 3-(1)-3 は、画像処理ソフトから位置・姿勢データを取得する "get\_Comp" 関数の作業フ ローである。本制御ソフトは画像処理ソフトの結果がでるまで待機するが、その時間は、測定対象 の溶接線の形態によって大幅に変動する。したがって、制御ソフトのみの実行時間を測定するため には、一定時間に架空の数値を出力する仮想画像処理ソフトの必要性を感じた。図中の①の "091224\_detection.exe"は、画像処理ソフトとして動作する実行ファイルで補正(位置・姿勢) データを "xyzOAT.txt"に記録する。②では、位置・姿勢データを "xyzOAT.txt"から読み込み、変数 dx\_aft ~ rz\_aft に代入している。③でデータが閾値を超えるか否かで場合分けし、変数 "ret" に代入してメインルーチンへ引き渡す。

この処理において、現時点の測定データと閾値との差を比較検討しているのみで、前回の測定結果 と比較することはしない。すなわち、連続して補正動作する場合、収束へ向かっているかの判断も 可能であるが、"get\_Comp" 関数は、補正に必要な数値を入力する機能のみを担うこととすれば、 処理速度も短縮できることがわかった。下図の様に補正を必要と判断した場合④では、補正データ をダイアログに表示することにより内部記憶として保存する。一方、補正の不要な場合でも③の場 合分けで判断しており、もし要・不要を示すフラグを画像処理ソフトと共有すれば、さらに処理の 軽減に繋がるものと思われる。







図 3-(1)-4 画像処理ソフトからデータ入力する関数

図 3-(1)-4 は実際に動作させた"get\_Comp" 関数の内容である。現在の産業用ロボットは完成度

が高く信頼性も向上しているが、これを外部から制御する場合には、様々なトラブルが予想される。 したがって、外部からの制御システムについては、メンテナンスを繰り返し実施して、安全性・信 頼性を維持する必要がある。このため、構造は可能な限りシンプルが望ましい。また、本ソフトの メインルーチンは、Timer 関数なのでサブルーチンの処理時間もできるだけ短縮し、データ受け渡 し方法も②の様な手法から、さらに簡易な方法へ改善する予定である。また、測定モードを「事前 教示点モード」、「一点教示モード」、「溶接線追尾モード」の3種に分けてユーザーへ提供する予定 であるが、内部でサブルーチンが混在しているため複雑なフローとなっている。それぞれのモード を独立して稼働するよう仕様変更も検討中である。

表 3-(1)-1 は、前述した閾値を設定するにあたって検討した位置決め精度である。本システムで使 用した産業用ロボット (FS20N) において、メーカーから提示された繰り返し精度は±0.1mm,角度 は工業試験場で測定した結果 0.5 °であったため、レーザのスポット径を考慮しても妥当な閾値と 判断し変数 ihosei および shosei に代入して使用した。

		FS020N	工試ロボット( FS20N )	閾値( in ″get_Comp″ )
position	(mm)	±0.1	_	$\pm 0.1$ ( ihosei )
orientation	(°)	—	$\pm 0.5$	$\pm 1.0$ ( shosei )

表 3-(1)-1 位置決めにおける閾値

#### (2) ロボットの軌跡誤差について検討し、評価する(北海道立総合研究機構、産鋼スチール)

平成 21 年度は、直線補間動作の軌跡精度を確認した。その結果、サーボモーターの制御特性から、 基準となる教示ラインを中心にほぼ一定の振幅をもって振れることが解った。

平成22年度は、円弧補間動作の軌跡精度について確認した。傾向としては直線補間動作と同様で あるが、動作中のロボット間接の各軸について着目すると、直線補間動作おいては各軸の回転方向 は一定となるが、円弧補間動作においては各軸の回転方向の逆転現象が発生するため、その部分で の軌跡精度が悪くなることが確認された。つまり、溶接の連続動作においては、任意の軸が正転か ら逆転へ連続的に移行することを強いられるため、この部分での慣性力によるサーボの遅れ、そし てその後に、その遅れを取り戻すための戻り動作が入るため、通常より大きな振幅を繰返し、やが て一定の振幅に収まることが解った。

この問題は、サーボモーターの宿命であるため、抜本的な改善策は見当たらないが、正転から逆 転に転じる際の加減速が速い場合、つまり円弧補間の曲率が小さい時は、より顕著に現れることと なる。

本研究において、 φ 6mm の円弧補間動作について、ソフト的に軌跡精度を改善する方法について 試みた。その方法は、正転から逆転に転じる際の振れは回避できないため、ロボット間接の 6 軸に ついて、各軸が軸反転せず、かつ各軸の変位量や加減速もできるだけ一定となる様に、動作計画を 策定し、円弧補間動作をさせることで、改善されることを確認した。しかしながら、この試みは、 平面における円弧補間動作であり、3 次元での円弧補間動作においては、動作計画の策定が複雑と なり、困難を極める。

溶接に関する限りは、溶融幅があるため軌跡のずれに対しては裕度が見込め、極端に曲率の小さ なもの以外は、現状のロボット精度にて対応可能と判断した。

今後の課題として、円弧補間動作にて溶接に支障の無い曲率半径はどの位かを見極める事が必要 だと考える。

#### (3) ロボットの制御ソフトを評価する(産鋼スチール)

画像処理による計測結果に基づいて、ロボットの位置、姿勢を制御するソフトについて評価した。 本評価は、ビジョンセンサとロボット制御の複合動作による総合評価である。

評価方法は、4mm 厚さのステンレス鋼板の突合せ面 500mm 長さの、板端から各 10mm 内側の 480mm の仮想溶接線について自動追尾させ、120mm ピッチにて P1 から P5 までの 5 点を自動教示させる。 この自動追尾から各点の教示動作を 25 回繰り返し、各教示点座標の溶接線方向 X、溶接線直角方向 Y、高さ方向 Z、X 軸回りの姿勢角 RX、Y 軸回りの姿勢角 RY、Z 軸回りの姿勢角 RZ の各成分について のばらつきを確認した。尚、教示開始点 P1 は同一座標とし、その後の P2~P5 は検出結果に基づい て追尾させた。

#### 計測回数の比較

〔実験〕開始教示点 P1 から 1 回の画像計測から溶接ヘッドの位置と姿勢を補正し、次の教示点 P2 から P5 への順次移動追尾を試みたが、P3、P4 付近にて追尾不可となった。その理由は、1 回の検出 補正動作では姿勢精度が足りないため、次教示点に 120mm 移動した際に、画像視野の約 6mm×4mm か ら溶接線、もしくはガイドレーザが外れることが原因であった。

また、検出精度が上がらない原因の一つが、画像処理にて計測するため、計測する初期画像の焦 点が合っていない場合は、極端に精度が落ちることが解った。

この問題を解決するため、2 段検出法を考案した。比較的に焦点合わせのあまい初期画像の計測 結果から姿勢変化を与えた場合、真値へ向かわずに誤差方向へ導くことがあるため、初期画像では 高さのみの補正動作、つまりは画像の焦点合わせのみを行い、その後の画像計測にて位置と姿勢を 補正動作させる、2段階の検出方法とした。この結果、溶接線全長の480mmの追尾とP1からP5ま での5点の自動教示が可能となった。

次に 2 段階目の画像計測による補正移動の回数を増やすことで、精度向上が見込めるかを確認す るために、2 段階目の画像計測と補正移動の回数を 1 回、2 回、4 回として、各 25 回の繰り返し実 験を実施した。

図 3-(3)-1~6 は成分毎の教示点のばらつきの分布幅である。位置 X の P1 点は、開始教示点で同 一座標からの計測のため、ばらつきが少ないが、その後は計測結果に基づいて追尾するため、順次 誤差分が加味され精度が落ちる事が確認できる。また溶接線方向の位置 X と溶接線方向への傾き RY のばらつきが他の成分に比較して、大きい事が解るが、何れの成分も溶接に関しては裕度の高い成 分であるため、問題無いと判断した。

次に回数毎のばらつきを比較すると、1回、2回、4回において、ばらつきの分布幅に差が無いこ とが確認された。この結果を踏まえて、2段階目の画像計測による補正移動の回数は、1回とする事 とした。

図 3-(3)-7~12 は P4 点の検出結果のヒストグラムである。位置 Y、Z、姿勢角 RX、RZ にて良好な 分布を示す一方で、位置 X と姿勢角 RY にて例外値らしきものも確認された。

また、本実験は平板の直線上の溶接線について評価しているが、実際の板は高さ方向への反りや 凹凸があり、ビジョンセンサによる計測精度から見た場合、3次元に他ならない。冒頭にて記した とおり、計測画像の焦点位置や姿勢が検出精度向上に大きく寄与するため、これをできるだけ真値 に近づけるために、補間移動を考案した。図 3-(3)-1~6の結果が示す移動方法は、各教示点1点の 結果から接線方向ベクトルにて 120mm 移動させているが、実際の板には凹凸があるために、曲面で の接線方向ベクトルによる直線移動では、次の教示点での誤差が大きいため、直前の教示点と現在 の教示点との2点による直線補間にて次の教示点を予想する直線補間法と、直前の2点の教示点と 現在の教示点との3点による円弧補間にて次の教示点を予想する円弧補間法にて、追尾性能が上が るか実験により確認した。

#### 2 補間移動による追尾性能の比較

〔実験〕教示開始点 P1 と教示点 P2 から直線補間により教示点 P3 の位置を予想して移動し、P3 に て自動教示、同様の方法にて P4、P5 を順次自動教示させる直線補間による追尾法と、教示開始点 P1 と教示点 P2、P3 から円弧補間により教示点 P4 の位置を予想して移動し、P4 にて自動教示、同様 の方法にて P5 を順次自動教示させる円弧補間による追尾法と、補間なしの追尾法について、各 25 回の繰り返し実験を実施した。尚、円弧補間による追尾法の P3 へは直線補間にて移動させた。

図 3-(3)-13~18 は各補間動作による成分毎の教示点のばらつきの分布幅である。何れの成分においても、補間移動の方がばらつきの分布幅が小さい事が確認された。

直線補間と円弧補間を比較すると、各成分によって一長一短あるが、曲面への適用が可能な円弧 補間が良いものと判断した。円弧補間による移動を用いた場合は、教示点ピッチを小さくすること で、自由曲面への対応も可能と考える。

ばらつきの分布幅から精度を読むと、何れの成分も目標精度を満たしており、レーザ溶接に支障 の無い溶接線の追尾性能を有すると判断した。

図 3-(3)-19~24 は直線補間による P4 点の検出結果のヒストグラムで、図 3-(3)-25~30 は円弧補間による P4 点の検出結果のヒストグラムである。それぞれを比較すると、直線補間の X、Y にて若干の例外値を確認できるが、その他は良好であり、円弧補間については、おおよそ良好な分布でるが、何れの補間方法においても、RY に精度向上の余地があるように思われる。





図 3-(3)-1 位置 X (溶接線方向)の分布





図 3-(3)-2 位置 Y の分布





図 3-(3)-5 Y 軸回りの傾斜角 RY の分布



図 3-(3)-6 Z 軸回りの傾斜角 RZ の分布





検出位置[deg]

図 3-(3)-12 P4の RZ の分布



図 3-(3)-16 X 軸回りの傾斜角 RX の分布



図 3-(3)-17 Y 軸回りの傾斜角 RY の分布



図 3-(3)-18 Z 軸回りの傾斜角 RZ の分布



図 3-(3)-13 位置 X (溶接線方向)の分布



図 3-(3)-14 位置 Y の分布



図 3-(3)-15 位置 Z の分布





図 3-(3)-20 直線補間 P4 の Y の分布





 $\begin{array}{c} -1.00\\ -0.80\\ -0.80\\ -0.70\\ -0.60\\ -0.40\\ -0.20\\ -0.20\\ -0.20\\ -0.20\\ -0.20\\ -0.20\\ -0.20\\ 0.00$ 

検出位置[deg]

図 3-(3)-24 直線補間 P4の RZ の分布

0





図 3-(3)-26 円弧補間 P4の Yの分布





図 3-(3)-28 円弧補間 P4の RX の分布



図 3-(3)-29 円弧補間 P4の RY の分布



# 2-4 ロボット教示点補正を自動化するビジョンセンサの開発

#### (1) ビジョンセンサの画像処理ソフトを開発する(北海道大学)

#### ① パイプ突合せ溶接のための画像計測とロボット姿勢計算

図 4-(1)-1 に示すパイプの突合せ溶接のための画像計測とロボットの姿勢計算式をもとめる。 レーザヘッドの構造を図 4-(1)-2 に示す。カメラと溶接レーザの光軸は一致するように設定されて いる。溶接用レーザは焦点位置において最もエネルギー密度が高くなる(この点を最良溶接点とす る)。また、溶接においては溶接対象に対するレーザの入射角も適切に制御する必要がある。した がって、溶接する点に最良溶接点を一致させ、適切なロボット姿勢をとる必要がある。レーザの最 良溶接点にロボットのツール座標  $0_{T}$ -X<sub>T</sub>Y<sub>T</sub>Z<sub>T</sub>の原点が設定されている。また、溶接線上の点に目標座 標  $0_{R}$ -X<sub>R</sub>Y<sub>R</sub>Z<sub>R</sub>を一致させ、ロボットのツール座標系をこれに一致させることで位置・姿勢合わせを行 うことができる。

目標座標系は Z<sub>R</sub>が溶接レーザの適切な入射方向ベクトルNに, Y<sub>R</sub>が溶接の進行方向ベクトルT(Z<sub>R</sub> に垂直な平面への投影)に、X<sub>R</sub>がそれらの外積ベクトルT×Nに対応している。画像計測はレーザ ヘッドに取り付けられた平行な2つの計測用スリットレーザ像を計測用カメラで撮影した画像を用 いて行う。



図 4-(1)-1 溶接課題



図 4-(1)-2 目標座標系

# 目標座標系(T×N)-T-Nの各座標ベクトルの導出

図 4-(1)-3 のように、二つの溶接対象の表面上の最良溶接点における内向きの法線ベクトルの平均をベクトルNとする。パイプ1の法線ベクトルを N<sub>1</sub>、パイプ2の法線ベクトルを N<sub>2</sub>とするとは次式で表わされる。

$$N = (N_1 - N_2)/2 \tag{1-1}$$

Tは溶接の進行方向のベクトルT₀を仮想溶接面へ投影したベクトルであるので(図4-(1)-4)、想溶 接面の法線ベクトルNを用いて次式(2)のように計算できる。

$$T = T_0 - (T_0 \cdot N)N \tag{1-2}$$

これらの値より基準座標系から見た目標座標系の姿勢は以下の回転行列で表わされる。

$$R = \begin{bmatrix} R_x \\ R_y \\ R_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (T \times N)^T \\ T^T \\ N^T \end{bmatrix}$$
(1-3)

## パラメータ OAT の導出

O→A→Tの回転行列は

$$R_{z}(O) = \begin{bmatrix} C_{O} & S_{O} & 0\\ -S_{O} & C_{O} & 0\\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
(1-4)

$$R_{y}(A) = \begin{bmatrix} C_{A} & 0 & -S_{A} \\ 0 & 1 & 0 \\ S_{A} & 0 & C_{A} \end{bmatrix}$$
(1-5)

$$R_{z}(T) = \begin{bmatrix} C_{T} & S_{T} & 0\\ -S_{T} & C_{T} & 0\\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
(1-6)

ただし,  $C_0{=}{\cos}$  0,  $S_0{=}{\sin}$  0,  $C_A{=}{\cos}$  A,  $S_A{=}{\sin}$  A,  $C_T{=}{\cos}$  T,  $S_T{=}{\sin}$  T

$$R_{OAT} = R_{z}(O)R_{y}(A)R_{z}(T) = \begin{bmatrix} C_{O}C_{A}C_{T} - S_{O}S_{T} & S_{O}C_{A}C_{T} + C_{O}S_{T} & -S_{A}C_{T} \\ -C_{O}C_{A}S_{T} - S_{O}C_{T} & -S_{O}C_{A}S_{T} + C_{O}C_{T} & S_{A}S_{T} \\ C_{O}S_{A} & S_{O}S_{A} & C_{A} \end{bmatrix}$$
(1-7)

と表せる。 式(1-3)と式(1-7)を比較して次式を得る。

$$O = \arctan \frac{N_y}{N_x}$$

$$A = \arccos N_z \qquad (1-8)$$

$$T = \arctan \frac{T_z}{-(T \times N)_z}$$



図 4-(1)-4 ベクトル Tの導出

### ② 溶接ロボット自動化のための画像計測(Hough 変換によるエッジライン検出)

溶接対象が平板の突合せ溶接において、両方の板に角度のほぼ違いがない場合に溶接線周辺の画 像は図 4-(1)-5 のようになる。それに対して、パイプに垂直にパイプを挿入し溶接する場合、曲面 であっても計測光学系の倍率が大きいため突合せ部分での計測スリットレーザ像は曲線にはならな いが、パイプ同士の突合せ角度がほぼ垂直な凹面であるため、4-(1)-6 のように4本のレーザ像は 溶接線を境にハの字に広がる形状となる.平板突合せの場合と異なり、接合する部分で片方のパイ プが下にあるため、レーザ像が溶接線で断裂した形状とはならない。また、突合せ角度が大きいた め片方の板の表面に反射したレーザ像が映り像の形状は複雑になる(4-(1)-7)。

昨年までは、レーザ像の局所的な変化により溶接線を検出し、溶接線を境界にして画像を分けて、 各々2本のレーザ像の芯線から2枚の平板の姿勢・位置を計測する方法について提案した。それに 対して本報告では、パイプ突合せ溶接に必要とされる凹面の溶接線検出について、Hough 変換を用 いてレーザ像のエッジライン検出をした後にエッジラインの中線である芯線の交点から溶接線を検 出する方法を提案する。



図 4-(1)-5 平板突合せの場合の計測レーザ像



図 4-(1)-6



図 4-(1)-7

## 点群の抽出

画像の画素数は1024pix×1280pix (Super-XGA)であるため、全ての点を計算するのでは処理時間が かかり過ぎるので、2段階で抽出し処理する画素数をしぼった。

(1) 画像を等間隔で格子状に区切った各小区画内で明度勾配が最も大きな点を抽出

(2) (1)の点群から、さらに勾配の大きい順に指定された個数の点群を抽出 抽出された点群の例を図 4-(1)-8 の青色点で示す(個数 5000、小区間 30pix×30pix)。このように2 段階にしたのは、単に画像全体から明度勾配の大きい順に点群を抽出すると、4本あるスリット レーザ像は各々状況が大きく異なるため明度が異なり、選ばれる点群密度に偏りが現れるのを防ぐ ためである。抽出された点群を(u,, v,) (i=1, 2, …, n)とする。

## Hough 変換を用いたエッジ検出

画像から直線を検出する方法として Hough 変換がよく用いられる。Hough 変換は直線を U 軸に対す る角度  $\theta$  と原点からの距離  $\rho$  とでパラメータ表現する方法である (4-(1)-9)。点(u, v) を通過する直 線群の  $\rho$  はパラメータ  $\theta$  により次式で表現される。

$$\rho = u \cos \theta + v \sin \theta \qquad 0 \le \theta < \pi \qquad -\sqrt{W^2 + H^2} \le \rho \le \sqrt{W^2 + H^2} \qquad (2-1)$$

 $\theta$ のパラメータの範囲は $0 \sim \pi$ 、 $\rho$ は画像の対角線の長さ [pix]によって制限された有限領域にできることがこのパラメータ表現の特長である。

画像内の各点(ui,vi)を通過する直線についてθのパラメータの範囲をm等分し各角度θk について、 法線ベクトルNと明度勾配ベクトルDの内積を積算した次式を求める。

$$i(\theta_{k},\rho_{k}) = N(\theta_{k}) \cdot D(u_{i}v_{i})$$
ただし、
$$\rho_{k} = u_{i}\cos\theta_{k} + v_{i}\sin\theta_{k} \quad \& -\sqrt{H^{2} + W^{2}} \le \rho_{k} \le \sqrt{H^{2} + W^{2}}$$
の範囲で量子化した値<sup>(2-2)</sup>

$$\theta_{k} = \frac{\pi}{m}(k-1) \qquad k = 1, 2, ..., m$$

全て点(i=1, 2, …, n)について、全ての角度(k=1, 2, …, m)についての式(2-2)を積算した結果を I ( $\theta$ ,  $\rho$ )とする。I ( $\theta$ ,  $\rho$ )を最大又は最小にする $\theta$ k と $\rho$ k が求めるエッジのパラメータである。



図 4-(1)-8



図 4-(1)-9 Hough 変換のパラメータ表現

#### 溶接線検出

I( $\theta$ , $\rho$ )を計算した Hough 変換パラメータ空間での勾配積分値マップの例を図 4-(1)-10 に示す。白 色の領域は I の極大値、黒色は極小値を示す。赤色の枠と緑色の枠は局値周辺の領域を示し、極大 値及び極小値を検索するときの除外領域である。画像に4つの線分像があるので、図 4-(1)-10 には 極大値と極小値は4組あり、それに対応するエッジラインを実線で図 4-(1)-8 に示す。各組の中間 線が芯線であり一点鎖線で示す。4本の芯線の交点は6つあり、それらの中から交点とその周辺の 明度の合計が大きい方から2つを選択する。その2つの交点を結ぶ直線を溶接線として図 4-(1)-8 に点線で示した。 同様に、図 4-(1)-11・12・13 にレーザの反射がある場合と図 4-(1)-14・15・16 に左上にレーザ像 の断裂がある場合を示す。これらの画像の場合、レーザ像の局所的な変化を利用する前回までに方 法では誤検出になり易い。それに対して、今回検討した大域的なエッジ当て嵌めを用いる方法は、 図 4-(1)-1 のような勾配や傾きがあまり変化しない線分を別々に検出する必要がある場合には誤検 出になり易い。したがって、状況に応じて両者の使い分けが必要である。



図 4-(1)-10



図 4-(1)-11

Hough変換パラメータ空間での勾配積分値マップ 画像番号5



図 4-(1)-12



図 4-(1)-13

<text>

図 4-(1)-14



ρ(−対角線長〜対角線長)



実線:エッジライン 一点鎖線:芯線 点線:溶接線

図 4-(1)-16

# ③ 最小二乗法による仮エッジライン検出

溶接対象が垂直に接合される 2 つの平板とする図 4-(1)-17 (a)と溶接線周辺の画像は図 4-(1)-17 (b)のようになる。レーザ像は溶接線を境にハの字に広がる形状となり、また溶接線位置で溶接線に分けられる左右のレーザ像の間に隙間が生じない状況となる。この状況においては溶接線を直接検出することが困難であるため、レーザ像を検出した後に溶接対象の平面のカメラ座標系からの位置関係を計算し、両平面の交線から溶接線を検出する方法を提案する。レーザ像の検出は最小二乗法によりレーザ像のおおよその位置を短時間で検出(仮エッジライン検出)し、その周辺を従来の手法で検索し高精度に検出する手法を提案する。

エッジライン検出は最初に画像を上下に分割し、それぞれで求めるものとする。





直線のパラメータ表現

直線両端の画像端の切片を用いることで画像上の全ての直線を表現するができる。そこでパラ メータ  $p_i$  (i=0,1)として画像の原点から左回りの画像周長を用いる。また、直線の表現を一意にす るために  $p_0$ ( $p_1$ とする。このパラメータを用いて直線を( $p_0$ ,  $p_1$ )と表す(図 4-(1)-18)。



図 4-(1)-18 直線のパラメータ表現(一例)

### 最小二乗法によるエッジ検出

画像から直線を検出するために、画像を縦方向に検索し各列の画素のうち最大および最小の縦方 向明度勾配値 D<sub>y</sub>を持つ画素の座標(u<sub>i</sub>, v<sub>i</sub>) (u<sub>i</sub>=i, i=0, 1, …, 1280<sub>(画像の水平方向の画素数)</sub>)をデータ点とす る。(最大値データ点は上エッジ、最小値データ点は下エッジのデータである)

#### 局所的エッジ検出による投票

画像上のデータ点からエッジを検出するためには、データ点がどの直線に分類されるのか、ある いは直線に関わりのないノイズなのか区別できなくてはならない。また、それぞれのエッジの情報 は画像上でレーザ像の部分に連続的に分布している。そのためとある短い区間を選択するとそこに 含まれているデータ点はほぼ1つの直線のデータとなる、そこで局所的に複数直線を求め、集計す ることで直線を検出する。

図 4-(1)-19 にフローを図 4-(1)-20 に概略図を示す。探査領域は縦が画像の高さ、横が探査長 L の領域とし、この領域内のデータ点に最小二乗法を適用し求められた直線に投票する。探査は探査 領域を移動距離 d ずつ水平方向に移動して行っていく。また、傾きにより局所的な直線がそれぞれ どちらのエッジに属するか分類することができる。画像全体を探査し終えたら、投票値の最大数の 直線を仮エッジラインとしてそれぞれ検出する。



図 4-(1)-19 直線のパラメータ表現 (一例)



図 4-(1)-20 エッジ検出方法の概略図

# 溶接線検出

得られた仮エッジラインの周辺を従来の手法で高精度にエッジライン検索しレーザ像の芯線を検 出したら、溶接対象の2平面の位置姿勢を計算し、それより溶接線の3次元位置関係を求める。こ のカメラ座標系から見た溶接線の3次元位置より画像上へ投影して結果画像に示した。検出例を図 4-(1)-21に挙げる。



(a)



(b)



(c) 図 4-(1)-21 検出結果

#### (2) ビジョンセンサのハードウェアを開発する(産鋼スチール)

ビジョンセンサを組み込んだ溶接ヘッドの基本設計を実施したが、現行の計測方法においては、 溶接ヘッドの半導体レーザ取付部分が大きくなり、溶接ヘッド全体の小型化に制約が生じる。

また、計測時に溶接ノズルを外す必要があり、溶接ノズル着脱のための作業員が必要なことから、 無人化や連続運転の妨げとなる。

本技術は、多品種少量生産に向けてのものだが、大量生産や無人化にも対応したいと考えている。 この問題と、後述する検出精度の低い成分について精度向上を見込める、新しいアイデアを得た。 今後の課題として、新しい手法による溶接ヘッドを試作し、画像処理アルゴリムズを改良して、 小型で高精度なビジョンセンサ組み込み溶接ヘッドを実用化したい。

#### (3) ビジョンセンサを評価する(産鋼スチール)

〔実験〕アルゴリズムの違う新旧2つの画像処理プログラムにて、ビジョンセンサの繰返し検出精 度を評価した。

評価方法は、ステンレス鋼板の突合せ面にて、焦点位置の高さを0として上下に-0.5、-1.0、-1.5、+0.5、+1.0、+1.5の変位を与え、溶接線方向の位置をXとし、Y、Zと、XYZ 軸回り傾斜角 RX、 RY、RZ の各成分について、25回の繰り返し実験を実施した。25回の実験中には、試料の観察面と 溶接ヘッドの位置関係は固定とし、静状態の画像計測のみの繰り返し実験とした。

新旧アルゴリズムの違いは、旧アルゴリズムはソーベル演算を用いて明度勾配より半導体レーザ の芯線を求める方法で、新アルゴリズムはソーベル演算と最小二乗法を用いて検出したエッジより 半導体レーザの芯線を求める方法であり、新アルゴリズムは、曲面に対応することを目的としたも のである。

図 4-(3)-1~12 は溶接位置 X、Y、高さ Z、姿勢角 RX、RY、RZ の成分に分けた、ばらつきの分布幅 について、新旧プログラムでの結果を示すものである。

何れの成分においても、新プログラムのばらつきが小さく、高精度であることが確認できる。

また、焦点位置の高さ0にて、ばらつきが小さくなっており、前項2-3-(3)-①に記した2段検出 法が有効であることの裏付けとなることが解る。

初期画面にて高さ方向の補正移動を行い、焦点位置の±0.5mm以下にて計測させることで、高精 度な検出を可能とすることができる。

尚、前項 2-3-(3)の評価は、旧プログララムによるもので、新プログラムにより更なる追尾性能 の向上を期待したい。



図 4-(3)-1 新プログラム位置 X の分布



図 4-(3)-2 新プログラム位置 Y の分布



■回転なし 0.18 rv=1 ry=2 0.16 **ry=**3 0.14 0.12 分布の幅[mm] 0.10 0.08 0.06 0.04 0.02 0.00 -1.00  $\cdot 1.50$ -0.50 0.00 0.50 1.00 1.50 試料高さ[mm]

0.20





図 4-(3)-5 旧プログラム位置 Y の分布



45



図 4-(3)-7 新プログラム傾斜角 RX の分布



図 4-(3)-8 新プログラム傾斜角 RY の分布



図 4-(3)-9 新プログラム傾斜角 RZ の分布











図 4-(3)-12 旧プログラム傾斜角 RZ の分布

# 2-5 ビジョンセンサとロボット制御ソフトを統合したシステムの構築

# (1) レーザ溶接システムについて検討し、評価する(産鋼スチール)

2-3-(3)に記したとおり、目標精度を満たす溶接線の追尾性能と、自動教示が可能なシステムに仕上がった。

今後の課題としては、アルミ合金の金属表面においては、画像計測にて検出できないものがあり、 マニュアルでカメラの感度調整が必要であったが、これをオートチューニングとすることを検討し たい。

また、試料表面の曲率が小さい時や、凹凸が激しいときに、溶接線追尾にて外れることが予想さ れるが、前の教示点にプレイバックし、教示点ピッチを自動的に小さくして、やり直す機能を付加 したいと思う。

現在のビジョンセンサでは、溶接ヘッドの小型化が難しいため、既存の原理を応用して溶接ヘッドを小型化し、かつ検出精度を飛躍的に向上させるアイディアを得た。この原理の検証と、新たな 溶接ヘッドの試作を通じて、実用化に結びつけたい。

ロボットシステムの構成としては、理想的なものに仕上がった。実際の溶接への適用化を進め、 用途事例を増やしたいと考える。

# 第3章 全体総括

## 3-1 複数年の研究開発成果

# (1) 圧力容器、真空容器溶接部へのレーザ溶接の適用化技術の確立 (産鋼スチール、北海道立総合研究機構)

- ステンレス鋼の SUS304、SUS304L、SUS316、SUS316L、SUS329J4L について、シールドガス窒素、アルゴンを使用した場合のポロシティ発生状況を X 線検査にて確認するとともに、X 線 CT にて空孔率を測定し、シールドガス窒素におけるポロシティ抑制効果を確認した。
- ② ステンレス鋼の SUS304、SUS304L、SUS316、SUS316L、SUS329J4L について、シールドガス窒素、アルゴンを使用した場合の機械試験を実施し、強度に大きな差が無い事を確認した。
- ③ ステンレス鋼の SUS304、SUS304L、SUS316、SUS316L、SUS329J4L について、シールドガス窒素、アルゴンを使用した場合の腐食試験を実施し、耐食性に大きな差が無い事を確認するとともに、TIG 溶接による溶接部との耐食性を比較し、一部の鋼種において、レーザ溶接の優位性を確認した。
- ④ オーステナイト系ステンレス鋼において、窒素シールドガスの欠陥抑止効果のメカニズムを 解明するため、EPMA、SIMS による元素分析を実施し、メカニズム解明のヒントを得るとともに、 材料中に窒素を含有する鋼種においては、シールドガスアルゴンにおいても、欠陥の抑止効果 があることを確認した。
- ⑤ オーステナイト系ステンレス鋼において、再溶融が起こる様なレーザ溶接による複数パスに おいても、品質に影響が無い事を確認した。
- ⑥ ニッケル合金鋼の低炭素ニッケル、インコネル、モネル、ハステロイについて、シールドガス窒素、アルゴンを使用した場合のポロシティ発生状況をX線CTにて観察し、空孔率を測定、シールドガス窒素における、一部鋼種でのポロシティ抑制効果を確認した。
- ⑦ ニッケル合金鋼の低炭素ニッケル、インコネル、モネル、ハステロイについて、シールドガス窒素、アルゴンを使用した場合の機械試験を実施し、一部鋼種においてシールドガス窒素の場合、強度が増す事を確認した。
- ⑧ アルミニウム合金鋼の A5083 について、ポロシティ発生状況を X 線 CT にて観察し、空孔率を 測定した。
- (2) レーザ溶接条件のデータベースの構築 (産鋼スチール、北海道立総合研究機構)
- ① ステンレス鋼の SUS304 について、パワー密度、入熱量、シールドガス窒素、アルゴンの差に ついて、表面の溶融幅、内部の溶融幅、溶け込み深さを計測し、データベースとして蓄えた。
- ② ステンレス鋼の SUS304 について、入射角度を与え、かつ、パワー密度、入熱量、シールドガス窒素、アルゴンの差について、表面の溶融幅、内部の溶融幅、溶け込み深さを計測し、データベースとして蓄えた。
- ③ ニッケル合金鋼の低炭素ニッケル、インコネル、モネル、ハステロイについて、パワー密度、

入熱量、シールドガス窒素、アルゴンの差について、表面の溶融幅、内部の溶融幅、溶け込み 深さを計測し、データベースとして蓄えた。

- ④ アルミニウム合金鋼の A1050、A2017、A5052、A6061、A7075 について、パワー密度を変えて スポット溶接の溶融部をレーザ顕微鏡で観察し、溶融形状のプロファイルを計測し、データ ベースとして蓄えた。
- (3) ロボット動作計画の最適化と3次元軌跡追尾を実現するロボット制御ソフトの開発 (北海道立総合研究機構、産鋼スチール)
- ① ロボットの軌跡精度を確認するとともに、サーボモーターの特性を把握した。
- ② 突合せ溶接部の3次元軌跡追尾を実現するロボットの制御ソフトを開発し、性能評価を実施 した。
- (4) ロボット教示点補正を自動化するビジョンセンサの開発 (北海道大学、産鋼スチール)
- ① 突合せ溶接部の位置、姿勢を検出するビジョンセンサを開発し、性能評価を実施した。
- ② 円筒面コーナー溶接部の位置、姿勢を検出する画像処理アルゴリズムを開発した。
- (5) ビジョンセンサとロボット制御ソフトを統合したシステムの構築 (産鋼スチール)
- ビジョンセンサとロボット制御ソフトを統合したシステムを構築し、溶接線の自動追尾を実現するとともに、教示点の位置精度 0.15mm、姿勢角 3°の目標精度を達成した。
- ② 開発したシステムにて、ステンレス鋼 4mm 厚さの突合せ溶接部を、自動教示にて高品質な溶 接を可能とした。

#### 3-2 研究開発後の課題・事業化展開

圧力容器、真空容器にて適用するレーザ溶接条件をデータベースに蓄え、溶接線の自動追尾と ロボット教示作業の自動化に一応の目処が立ち、レーザ溶接を少量多品種生産への適用に向けて、 準備が整いつつある。一方で、研究に使用した YAG レーザ発振器がランプ励起の旧式のもので、 現在の主流となるファイバーレーザでの適用検証を行う必要がある。

幸いにして、共同研究機関の北海道立研究機構が最新式の2kWファイバーレーザシステムを導入されたため、協力をあおぎながら開発技術の適用検証を進めたいと考えている。

また、開発したビジョンセンサの商品化に向けては小型化が必要で、かつ、ファイバーレーザ はビーム品質が向上し、長焦点化しているため、開発環境とは光学系に差が有り、ファイバー レーザに適用するビジョンセンサと溶接ヘッドを試作する必要がある。

ビジョンセンサの原理につては、新しいアイディアがあり、かなりの小型化と高精度化が見込めるため、継続研究にて試作、検証を進め、商品化と事業化につなげたい。

開発商品の市場へのアクセスは、本事業のアドバイザーをお願いした、住友重機械メカトロニ クス、川重テクノサービスの協力をあおぎたい。

# 〔参考文献・引用文献〕

2-1(2)

1) 赤沼正信, 飯野 潔, 大藤仁志, 福田 薫, 池田正幸; 化学系学協会北海道支部 2009 冬季研究発 表会, pp. 85 (2009)

2) 飯野 潔, 赤沼正信, 片山直樹, 斎藤隆之, 鈴木隆広; 防錆管理, VOL. 53, NO. 2, pp. 41-47 (2009)

3) 飯野 潔,赤沼正信,片山直樹,大藤仁志,福田 薫,池田正幸;第29回防錆防食技術発 表大 会, pp. 47-50 (2009)

[2-2(2)]

1) 木村盛一郎,牧野英司,池田正幸;レーザー研究, VOL. 23, NO. 3, pp. 12 (1995)