

平成22年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「産業ロボットの固体レーザー溶接作業の高精度化による

ティーチングレス・システムの開発」

研究開発成果等報告書

平成25年3月

委託者 中国経済産業局

委託先 地方独立行政法人山口県産業技術センター

目 次

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
Ⅰ. 研究背景	1
Ⅱ. 研究目的及び目標	1
Ⅱ-1. 研究目的	1
Ⅱ-2. 研究目標	2
Ⅲ. 研究内容	3
1-2. 研究体制	4
Ⅰ. 研究組織及び管理体制	4
Ⅱ. 研究者及び協力者	5
1-3. 成果概要	6
1-4. 当該研究開発の連絡窓口	7

第2章 自律型位置補正機能を有する固体レーザー溶接作業ユニットの開発

2-1. 位置補正機構の開発	8
Ⅰ. 開発機構の概要	8
Ⅱ. 開発結果	9
Ⅲ. まとめ	9
2-2. 位置補正機構の動作制御技術の開発	10
Ⅰ. 動作制御の概要	10
Ⅱ. 開発結果	13
Ⅲ. まとめ	14

第3章 ティーチング作業を必要としない産業ロボット動作データ作成法の開発

3-1. 3D製品形状データからのデータ抽出技術の開発	15
Ⅰ. 開発内容 —データ抽出プログラム—	15
Ⅱ. 開発結果 —データ抽出プログラム—	16
Ⅲ. まとめ	17
3-2. 抽出データからの産業ロボット動作データ生成技術の開発	18
Ⅰ. 開発内容 —動作データ生成プログラム—	18
Ⅱ. 開発結果 —動作データ生成プログラム—	19
Ⅲ. まとめ	19

第4章 産業ロボット用固体レーザー溶接作業の信頼性向上及び高速化システムの 試作機の開発	
4-1. 試作機の開発	20
I. 試作機の組み立て	20
II. 試作機動作時の振動測定	22
III. 位置補正に必要な溶接箇所を検出	27
IV. 試作機（位置補正機構あり）での位置補正動作の検証	29
V. まとめ	30
第5章 試作機の性能評価	
5-1. 試作機による実証実験	31
I. 溶接サンプルの品質評価	31
II. 溶接実験（位置補正機構あり）	33
III. まとめ	35
第6章 全体総括	
6-1. 複数年の研究開発成果	36
6-2. 研究開発後の課題・事業化展開	36
I. 研究開発後の課題	36
II. 事業化展開	37

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

I. 研究背景

川下製造業者の抱える課題及びニーズ（該当する高度化指針）

○位置決めに係る技術 3) ロボットに関する事項

エ. 高精度化

オ. 高速化

これまで、産業ロボットによる溶接作業は、金属製の溶接ワイヤ（最小でφ1mm程度）を電極に使用するアーク溶接が主流であったが、製品の軽量化に向け溶接部の微少化に対応できない、溶接後の磨きが必要となる等の問題がある。そのため近年では、製品への熱ひずみの影響が少なく、微少部分の溶接が可能な高出力・高エネルギー密度のレーザー（焦点サイズ0.1mm未満）を熱源に用いる固体レーザー溶接（以下固体レーザー溶接）の導入が行われている。しかし、その多くは特殊製品を製造する高価な専用機で、多品種少量生産の現場で稼動する産業ロボットへの普及は進んでいない。これは、産業ロボットの多関節アームで一般的に採用されているシリアルリンク機構では、動作時の誤差が累積される構造であることや、温度変化の影響等により、実作業時の経路移動の繰返し位置決め精度が±0.2mm程度となり、0.1mm未満の焦点サイズの固体レーザー溶接を精度良く行うことが困難であるためである。産業ロボットによる固体レーザー溶接の高精度化を安価に実現できれば、製品の軽量化や磨きレスによる生産コスト削減の実現が可能となる。

これまでティーチング経路との誤差を補正する手法として、稼働前のティーチング作業で厳密な作業経路を設定し、レーザー変位計やCCDカメラ等の位置検出器を用いて、溶接時の熱ひずみの影響、製品個々のばらつきや生産ライン上での位置ズレ等の検出を行い、産業ロボットの6軸動作制御を駆使して補正する方法が用いられて来た。しかし、この手法では、前述の産業ロボットの繰返し位置決め精度以上の誤差が生じた場合、作業経路の修正というティーチング作業への手戻り工程が発生する。一般的にティーチング作業は多くの時間を要し、手戻り工程の多発は、生産性を著しく低下させる原因となる。したがって、生産コスト削減には、この作業を可能な限り簡略化することも重要になる。

このように川下製造業では、産業ロボットの溶接作業において、製品の軽量化や生産コストの削減を実現するため、固体レーザー溶接作業の高精度化や、ティーチング作業の簡略化により溶接までの作業を高速化したいとのニーズがある。

II. 研究目的及び目標

II-1. 研究目的

本研究開発では、産業ロボットでの固体レーザー溶接作業の高精度化や、ティーチング作業の簡略化により溶接作業を高速化し、製品の軽量化や生産コストの削減を実現することを目的とする。これを踏まえて「高度化指針」の

(十二) 位置決め (3) ロボットに関する事項

ア. 高精度化

エ. 高速化

を高度化目標とし、これらに対応するため以下の技術開発を行い、高度化目標の実現を目指す。

ア. 高精度化

従来の産業ロボットを用いた溶接作業では、

1) 専門技術者による厳密な作業経路のティーチング
(稼働前の経路設定及び稼働時の修正)

2) 位置検出器を用いた実製品とティーチング経路の誤差検出

3) ロボットの持つ6つの動作軸制御を駆使した経路誤差の補正

によって、作業信頼性を向上させる手法が取られているが、これらだけでは“産業ロボットにおける実作業時の経路移動の繰返し位置決め精度限界＝溶接精度の限界”となる課題があり、産業ロボットによる高精度な固体レーザー溶接作業実現のネックとなっている。

“産業ロボットにおける実作業時の経路移動の繰返し位置決め精度の限界”は、6つの動作軸の累積誤差が主な要因になっている。

本研究開発では、産業ロボットの動作軸からは独立して動作し、溶接作業に必要な空間的位置補正を行う技術を開発することで、“ア. 高精度化”に対応する。

エ. 高速化

先に述べた“専門技術者による厳密な作業経路のティーチング”は、産業ロボットの稼動には必須の作業であるが、その実施には手戻り工程も含めて多くの時間を要し（製品形状にもよるが、溶接箇所が5箇所で10～30分）、生産ラインの停止も必要となる。そのため、生産性の向上や段取り時間の短縮などの高速化実現のネックとなっている。

本研究開発では、製品の作業箇所までの移動及び作業経路に必要なロボット動作データを3D製品形状データから抽出する技術と抽出したデータをロボット動作制御用のデータに変換する技術を開発することで、“エ. 高速化”に対応する。

II-2. 研究目標

<目標値>本研究開発で得られる最終目標は次のとおりとする。

開発テーマ	目標値
① 自律型位置補正機能を有する固体レーザー溶接作業ユニットの開発	溶接時の熱ひずみの影響、製品個々のばらつきやライン上での位置ズレなどが5mm程度までならば、±0.1mm以下の精度で位置補正を行える溶接作業ユニットを開発する。
② ティーチング作業を必要としない産業ロボット動作データ作成法の開発	3D製品形状データ（STEP, IGES形式など）から、産業ロボット動作データ生成やレーザー出力部の姿勢制御に必要なデータを抽出・出力するソフトウェアを開発する。また、その抽出データを利用した、産業ロボットの3次元動作データ自動生成及びレーザー出力部の姿勢制御を実現するプログラム技術を確立する。
③ 産業ロボット用固体レーザー溶接作業の信頼性向上及び高速化システムの試作機の開発	ティーチング作業時間（製品形状にもよるが、溶接箇所が5箇所10～30分）不要で、固体レーザー溶接作業を行える試作機を開発する
④ 試作機の性能評価	薄板（SUS材ならば板厚0.5mm以下）で多数の溶接箇所を有する3D形状のサンプルに対して、 <ul style="list-style-type: none"> ・溶接部の幅1mm以下 ・ティーチング作業への手戻り工程なし ・溶接後の磨き仕上げが不要 の固体レーザー溶接作業が安定して行える精度を実現し、製品の軽量化及び産業ロボット溶接ラインの作業時間（手戻り工程含む）を50%程度削減や、汎用産業ロボットでのティーチング不要な積層溶接（ex.板厚10mmからの削りだし製品を、板厚6mmと3mmの積層溶接で製造すると70%程度の生産コスト削減も可能）など生産コストの削減に繋がる技術を確立する。また、製缶板金業以外の業種へのデモにより製品化に向けた問題点を抽出し、開発システムをより汎用性の高いものとする。

Ⅲ. 研究内容

①自律型位置補正機能を有する固体レーザー溶接作業ユニットの開発

(担当実施機関：マイシステムズ有限会社、公益財団法人周南地域地場産業振興センター)

固体レーザー溶接作業時にレーザー出力部の空間的な位置補正が可能な、位置検出器及び位置補正機構を有するユニットの開発を行う。開発ユニットは、産業ロボットの6軸動作とは無関係な位置補正を実現させるため、産業ロボットのアーム先端部に取り付ける構造とし、産業用ロボットの動作軸からは独立して作動する仕組みとする。

②ティーチング作業を必要としない産業ロボット動作データ作成法の開発

(担当実施機関：マイシステムズ有限会社、地方独立行政法人山口県産業技術センター)

サンプル製品形状を用いる従来のティーチング作業とは異なり、既存の3D製品形状データを用いる作業経路の作成方法を開発する。具体的には、3D製品形状データに含まれる製品形状に関する設計情報から、作業経路となる空間位置情報などを抽出し、それを産業ロボットの動作データに変換する技術の開発を行う。

③産業ロボット用固体レーザー溶接作業の信頼性向上及び高速化システムの試作機の開発

(担当実施機関：マイシステムズ有限会社、有限会社森板金製作所、地方独立行政法人山口県産業技術センター)

①及び②の開発技術と市販の産業ロボットを組合わせた試作機を開発し、動作確認を実施する。

④試作機の性能評価

(担当実施機関：マイシステムズ有限会社、有限会社森板金製作所、公益財団法人周南地域地場産業振興センター、地方独立行政法人山口県産業技術センター)

開発した試作機の性能を評価するため、産業ロボットによるレーザー溶接作業の主な対象業界となる企業（製缶板金業）の生産現場で溶接サンプル作成を行い、そのサンプルの溶接品質の評価を行う。

⑤プロジェクトの管理・運営

(担当実施機関：地方独立行政法人山口県産業技術センター)

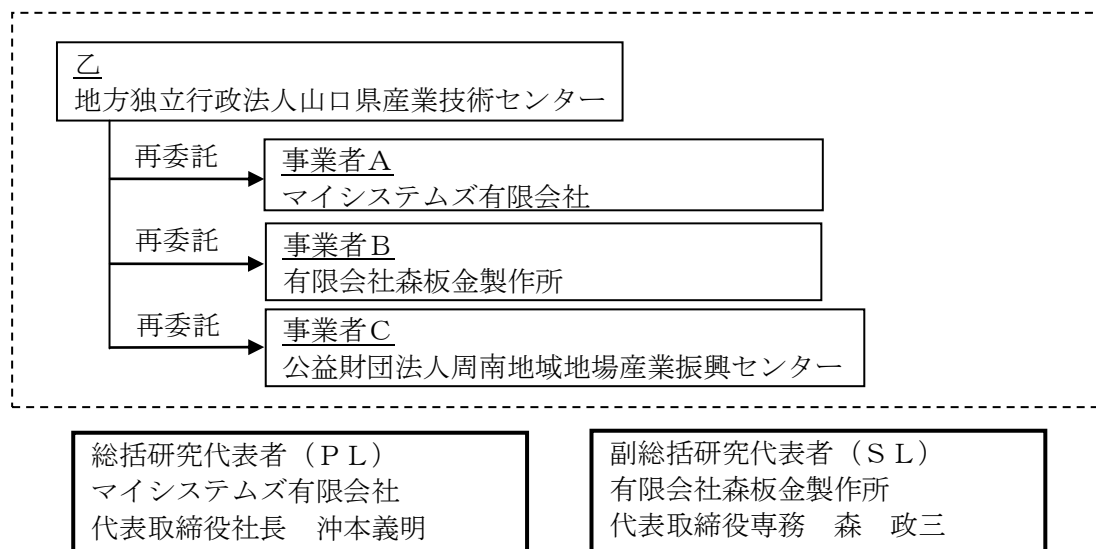
本研究開発の円滑な運営と推進を図るために、研究開発推進会議を開催し、研究開発の進捗のフォローと同時に設備の状況をチェックし、プロジェクト推進管理を実施する。

また、研究開発成果について、報告書作成の検討及びとりまとめを行う。

1-2. 研究体制

I. 研究組織及び管理体制

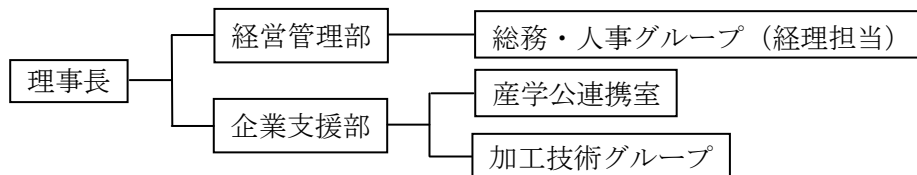
I-1. 研究組織（全体）



I-2. 管理体制

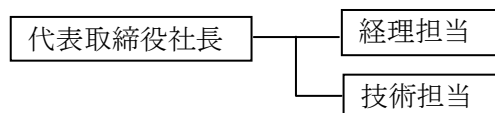
①事業管理機関

[地方独立行政法人山口県産業技術センター]

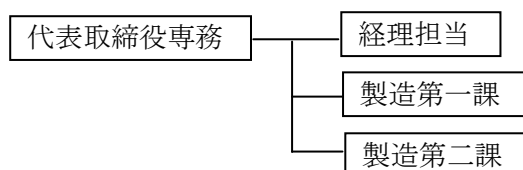


②再委託先

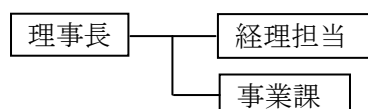
[マイシステムズ株式会社]



[有限会社森板金製作所]



[公益財団法人周南地域地場産業振興センター]



II. 研究者及び協力者

【事業管理機関】 地方独立行政法人山口県産業技術センター

・管理員

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
川村 宗弘	企業支援部 産学公連携室 室長	⑤
松本 佳昭	企業支援部 産学公連携室 サブリーダー	⑤
十川 雅一	企業支援部 産学公連携室 主査	⑤
江藤 秀哲	経営管理部 総務・人事グループ 主任主事	⑤

・研究員

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
永田 正道	企業支援部 加工技術グループ 専門研究員	②、③、④
村川 収	企業支援部 加工技術グループ 研究員	②、③、④

【再委託先】

・研究員

1) マイシステムズ株式会社

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
沖本 義明	代表取締役社長	①、②、③、④
藤井 浩治	技術担当マネージャー	①、②、③、④
西田 進	技術(制御プログラム)担当	①、②、③、④

2) 有限会社森板金製作所

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
森 政三	代表取締役専務	③、④
森 政樹	製造第一課 課長	③、④
末岡 明	製造第二課 課長	③、④
斉藤 剛志	製造第二課 GL	③、④

3) 公益財団法人周南地域地場産業振興センター

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
石川 博幸	事業課 課長	①、④

【協力者】

氏名	所属・役職	備考
小野 誠	安川エンジニアリング株式会社 ロボット統括部ロボットセンター 海外サポート、レトロフィット担当部長	研究開発推進会議 アドバイザー
小川洋司	株式会社小川技研 代表取締役	研究開発推進会議 アドバイザー

1-3. 成果概要

①自律型位置補正機能を有する固体レーザー溶接作業ユニットの開発

産業ロボットによる固体レーザー溶接作業時に、レーザー出力部の高精度な位置補正を行うために、並進±20mm，回転±5°程度の範囲で動作可能な「スチュワートプラットフォーム（Stewart Platform）型」パラレルリンク機構の位置補正機構を開発した。位置補正機構の重量は19.5kgであり、汎用的な産業ロボットの搬送質量30～50kg以下に抑えることを実現した。

位置補正機構による補正動作を実現するため、試作機制御用コントローラー上で動作する位置補正機構の動作制御用プログラムを開発した。位置補正機構の制御は、駆動部となる6本の直動アクチュエーターの連動制御によって行った。位置補正機構と試作機制御用コントローラー間のデータ伝送速度の性能から、20～30mm/secまでの溶接速度（産業ロボットのアーム移動速度）であれば、溶接作業に追従した補正動作が可能となるため、設計仕様上、目標達成に必要な動作制御技術を確立することができた。

また、試作機の動作制御を実現するため、位置補正機構を含む各種の構成機器（産業ロボット、固体レーザー装置、レーザーセンサー、画像処理装置など）の連携動作を制御する、試作機制御用コントローラーを組み込んだ制御盤を開発した。

②ティーチング作業を必要としない産業ロボット動作データ作成法の開発

産業ロボットでのティーチング作業時間を短縮するため、3D製品形状データの設計情報から、レーザー溶接作業に必要な経路（レーザー焦点の空間位置）情報や、製品形状に応じたレーザー照射方向を抽出し、溶接条件（製品材質、溶接速度）に合わせて、レーザー焦点のオフセットや照射方向の調整が行えるプログラム（以下、“データ抽出プログラム”）を開発した。また、抽出データは、試作機で使用する産業ロボットに取り込み可能なデータ形式で出力するようにし、経路途中での退避点の追加や、任意の箇所でのレーザー出力条件の切替えなどが、産業ロボットのコントローラー上で設定できるようにした。

“データ抽出プログラム”で抽出したデータを用いて、産業ロボットの動作制御システム用の固有信号データを生成するプログラム（以下、“動作データ生成プログラム”）を開発した。動作データの生成は、予め“データ抽出プログラム”で抽出したデータを、試作機制御用コントローラーからの指令信号によって、産業ロボット用の固有信号データに変換することで行った。実際に3D製品形状データから抽出したデータを用いて動作確認を行ったところ、従来のティーチング作業を行うことなく、産業ロボットを動作させることができ、開発テーマの目標を達成できた。

③産業ロボット用固体レーザー溶接作業の信頼性向上及び高速化システムの試作機の開発

市販の産業ロボットに開発した自律型位置補正機能を有する固体レーザー溶接作業ユニット（位置補正機構+レーザー出力部）を搭載した試作機を作成し、動作時の振動測定・評価や、位置補正動作に必要な位置検出機能の開発を行った。

振動測定は、2条件の試作機動作速度（30mm/s，50mm/s）に対して行った。各動作速度での振動による変位は、30mm/sで±0.03mm，50mm/sで±0.08mm程度であった。また、位置補正機構の動作時の振動による変位は±0.04～0.05mm程度で、産業ロボットの動作速度の違いによる差はほとんど見られなかった。このことから、開発した試作機は、50mm/sまでの動作速度であれば位置補正時の振動の影響も少なく、「±0.1mmでの位置補正」の目標を達成するために、十分な性能を有していることが確認できた。

2次元レーザーセンサーで溶接作業前に予め採取した位置補正データを用いることで、試作機による位置補正動作を実現した。これにより、位置検出及び位置補正をリアルタイムで行う方式から、位置検出は予め行い、位置補正動作のみをリアルタイムで行う方式となった。

④試作機の性能評価

異なる溶接条件で作成した SUS304 板材の溶接サンプルについて、X 線 CT 装置による溶け込み具合の確認を行い、“溶接後の磨き仕上げを不要”の目標達成に必要な安定した溶接が行える最適条件を確立した。

得られた溶接条件で、開発した試作機による位置補正ありの溶接実験を行い、直線動作で 2mm 程度のズレであれば、0.1mm 程度のレーザー焦点サイズでも位置補正を行い、ほぼ安定した溶接作業が行えるようになり、“溶接後の磨き仕上げ不要”，“ティーチングへの手戻り工程なし”の目標を達成することができた。

しかし、一部の溶接箇所、産業ロボットの動作と位置補正機構による補正動作の同期が不完全なために、溶接状態に乱れが発生しており、“溶接部の幅を 1mm 以下”を実現するためには、試作機の位置補正動作の機能を向上させる必要がある。

以上のことから、開発した試作機で「直線動作」の固体レーザー溶接作業に関する“溶接部の幅 1mm 以下”，“ティーチング作業への手戻り工程なし”の目標は達成できたものの、“溶接後の磨き仕上げが不要”とするための位置補正機構と産業ロボット動作の同期や、より複雑な溶接形状に対応するための課題が残る結果となった。

1-4. 当該研究開発の連絡窓口

(事業管理機関) 地方独立行政法人山口県産業技術センター
(業務管理者) 企業支援部 産学公連携室 室長 川村 宗弘
Tel: 0836-53-5052 Fax: 0836-53-5071
E-mail: kawamura@iti-yamaguchi.or.jp

第2章 自律型位置補正機能を有する固体レーザー溶接作業ユニットの開発

マイシステムズ株式会社
公益財団法人 周南地域地場産業振興センター

産業ロボットによる固体レーザー溶接作業の高精度化の要求に応えるため、固体レーザー溶接作業時にレーザー出力部の空間的な位置補正が可能な、位置検出器及び位置補正機構を有するユニットの開発を行う。開発ユニットは、産業ロボットの6軸動作とは無関係な位置補正を実現させるため、産業ロボットのアーム先端部に取り付ける構造とし、産業用ロボットの動作軸からは独立して作動する仕組みとする。また、開発ユニットでは「速度 数 10mm/s 程度の溶接作業中に、 $\pm 0.1\text{mm}$ 以下の位置補正を行う」ことを目標とする。

2-1. 位置補正機構の開発

I. 開発機構の概要

I. 機構の構成

開発機構は、産業ロボットのアーム先端に取り付けるため、6軸動作をコンパクトな構造で実現可能なパラレルリンク機構とした。パラレルリンク機構の形式には、「スチュワートプラットフォーム (Stewart Platform) 型」と呼ばれる形式を採用した。図2-1に、一般的なスチュワートプラットフォームの構造を示す。図に示すように、“ベースプレート”と“プラットフォーム”が、“ボールジョイント”を介して6本の“直動アクチュエーター”で接続された構造をしている。特徴として、剛性が高く、応答性が良いことや、構成部品の連結部の誤差が平均化されるため高精度な動作が行えることなどが挙げられる。一方で、動作範囲が狭いという短所もあるが、今回開発する機構は、各溶接箇所においてレーザー出力部の位置及び姿勢の微調整を行うことが目的であるため、機能的には問題ないものと考えられる。

また、重量については、機械部品等の生産現場で使用される汎用的な産業ロボット（可搬質量 30~50kg）に搭載することを想定し、機構部のみで 20kg 程度とすることを目指した。

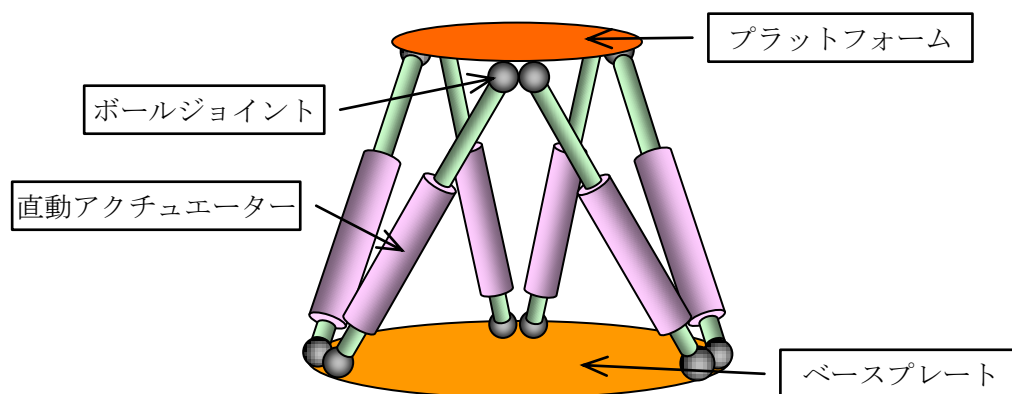


図2-1 スチュワートプラットフォーム (Stewart Platform) 型 パラレルリンク機構

II. 開発結果

図2-2に、開発した位置補正機構を示す。図は、実際に産業ロボットの多関節アーム先端に、取り付けられた状態を示している。機構部の摺動部以外の部品は、アルミ合金等の軽金属を使用することで軽量化を図った。産業ロボットに取り付け状態での重量(レーザー出力部を含む)は29.2kg(機構部のみで約19.5kg)であり、可搬質量の35kg以下に抑えた仕様となっている。

中心に配置された黒い筒状の部品は、レーザー出力部である。6本の直動アクチュエーターを同期制御させることで、レーザー照射箇所の調整やレーザー出力部の姿勢制御が可能となる。なお、この機構の可動範囲は、プラットフォーム部の並進で±20mm、プラットフォーム部の回転で±5°程度である。

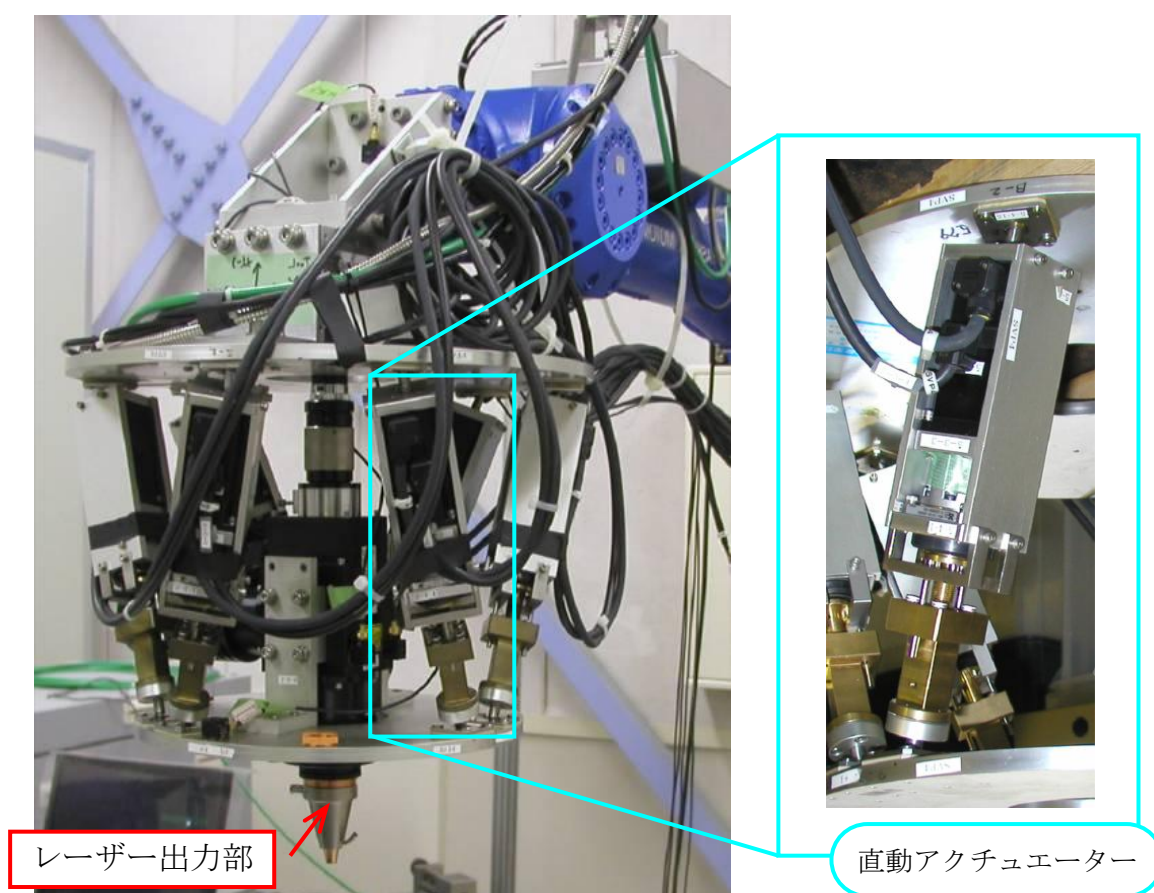


図2-2 位置補正機構

III. まとめ

- (1) 産業ロボットによる固体レーザー溶接作業時に、レーザー出力部の高精度な位置補正を行うために、並進±20mm、回転±5°程度の範囲で動作可能な「スチュワートプラットフォーム(Stewart Platform)型」パラレルリンク機構の位置補正機構を開発した。
- (2) 開発した位置補正機構の重量は19.5kgであり、機構部のみで20kg程度とする目標を達成できた。

2-2. 位置補正機構の動作制御技術の開発

I. 動作制御の概要

開発した位置補正機構では、レーザー溶接作業中にレーザーの照射箇所と製品の溶接箇所とのズレ（熱ひずみの影響、製品形状やライン上の配置のばらつきに起因するもの）を、位置補正することを目的としている。補正動作は、産業ロボットの動作とは無関係に、位置補正機構に独立して行わせるため、レーザーの照射箇所と製品の溶接箇所とのズレ量を、何らかの方法で検出する必要がある。

これに対応するための位置補正機構の軸制御や、各種センサーによる位置検出の概要について、以下に示す。

I-1. 位置補正機構の軸制御

位置補正機構による補正動作は、直動アクチュエーターに含まれる6つのサーボモーターを同期制御し、直交3軸及び回転3軸の6軸動作を行わせる複雑な制御が要求される。このような制御を高速で行いたい場合、「PLC (Programmable Logic Controller)」(プログラムで表現された制御内容を、逐次実行するための“シーケンス制御装置)と「モーションコントローラー」(PLC等からの動作指令を元に、モーター等の動作制御機器に信号を送るための“モーション制御”装置)を組み合わせ、サーボモーターの制御を行なうのが一般的である。「モーションコントローラー」は、動作制御機器との配線を、専用または汎用の高速ネットワークで行えるものが多く、これを利用することで複数機器との接続を効率良く行うことができ、また、機器間の同期制御を高速で行うことが可能となる(図2-3参照)。

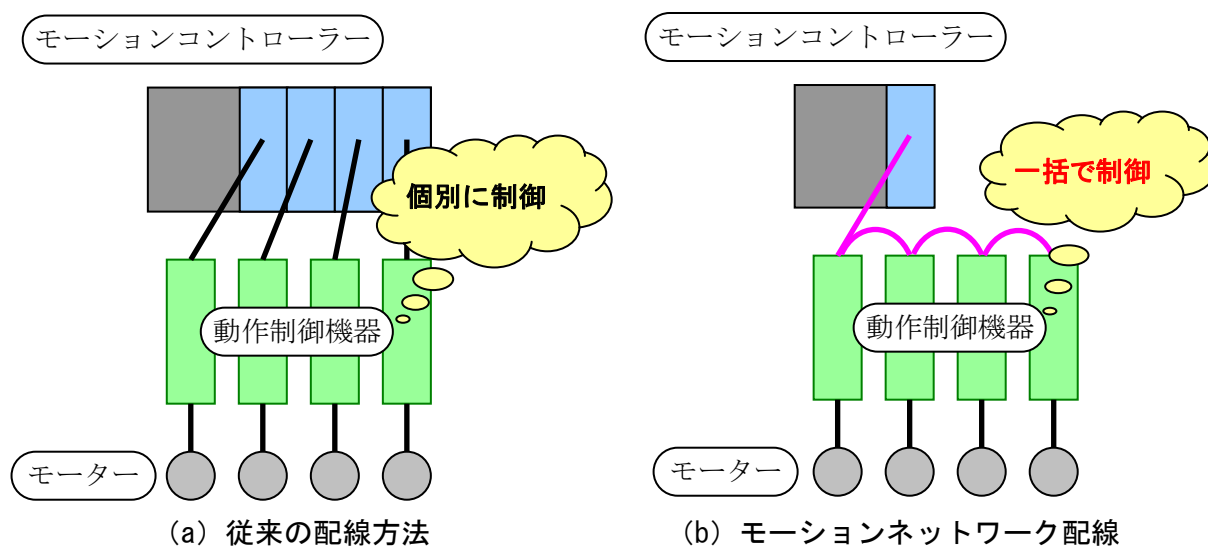


図2-3 モーションコントローラーと動作制御機器の配線方法

図2-4に、位置補正機構の動作制御に使用した試作機制御用コントローラーを示す。このコントローラーで、上記のモーションネットワーク配線を行った場合、接続機器への制御信号の伝送周期は、1.0ms(接続機器9局、伝送byte 32bit時)となる。この伝送周期であれば、

30mm/s の溶接速度（産業ロボットのアーム移動速度）の場合、0.03mm/回の間隔で動作制御指令を行える。位置補正機構の直動アクチュエーター動作プログラムとして、このコントローラー上で動作する“シーケンス制御”及び“モーション制御”のプログラムの作成を行った。



メーカー	株式会社安川電機
型 式	MP2500
仕様、性能	モーションネットワーク方式: MECHATROLINK-II 伝送周期: 高速…0.5～32ms 低速…2.0～300ms その他: “シーケンス制御”と“モーション制御”の同期制御

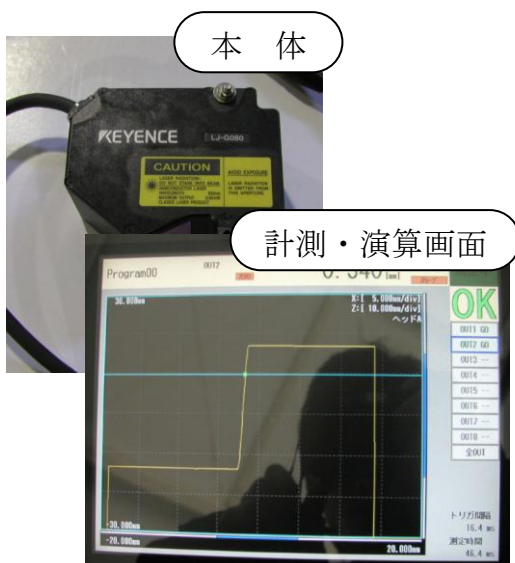
図 2 - 4 試作機制御用コントローラー

I - 2. 位置補正に必要な溶接箇所の検出方法

位置補正に必要な溶接箇所の検出は、「(1) レーザーセンサーによる検出」、「(2) CCD カメラを用いた画像処理」の2つの手法を検証することとした。それぞれの概要を以下に示す。

I - 2 - 1. レーザーセンサーによる検出

この手法では、2次元レーザーセンサーによる溶接箇所近傍の表面形状の輪郭データから、計測・演算機能を用いて、溶接箇所の形状（突き合わせ部分の凹形状など）を自動検出させる。図 2 - 5 に、2次元レーザーセンサーを示す。サンプリング周期は、3.8ms であるため、30mm/s の溶接速度であれば、0.114mm/回の間隔で検出を行えると考えられる。



メーカー	株式会社キーエンス
型 式	LJ-G080
仕様、性能	光源: 赤色半導体レーザー 波長: 650nm(可視光) クラス 2(JIS C6802) 基準距離: 80mm 測定距離: X 軸(幅)…25～39mm Z 軸(高)…±35mm 直線性(Z 軸): ±0.1%, of F.S. 繰り返し精度: X 軸(幅)…10 μm Z 軸(高)…1 μm サンプリング周期: 3.8ms

図 2 - 5 2次元レーザーセンサー

I-2-2. CCDカメラを用いた画像処理

この手法では、レーザー出射方向と同軸上に配置された CCD カメラの映像から、画像処理によって位置検出を行う。レーザー照射位置の近傍の状態を利用するため、より溶接箇所に近い範囲での位置検出が行えると思われる。図 2-6 に、“CCD カメラ”を示す。CCD カメラで溶接時の撮影を行う際、金属表面のレーザー照射箇所には、光吸収による原子や分子の振動が発生し、その発熱により金属が溶けた熔融池が形成される。この熔融池での輻射光（レーザーの反射光）は、溶接箇所近傍の撮影の妨げとなるため、CCD カメラには、レーザー波長領域をカット可能なフィルタを組み込んだ構成となっている。

図 2-7 に“画像処理装置”を示す。この装置では、30 万画素の画像であれば、試作機制御用のコントローラーとのデータ転送を含め 10~30ms の処理時間が必要となる。数 10mm/s 程度の溶接速度に対応した位置補正を行うには、データ転送も含めた処理の高速化が必要となるため、その手法についても検証を行うこととした。



メーカー	東芝テリー株式会社
型 式	CS8620Hi
仕様、性能	CCD サイズ: 1/2 インチ TV 方式: EIA 有効画素数: 768(H) × 494(V) 外形寸法: 29(W) × 29(H) × 31(D) mm 質量: 約 50g レーザー波長カットフィルタ 付き

図 2-6 CCDカメラ（溶接箇所近傍撮影用）



メーカー	株式会社安川電機
型 式	MYVIS-YV260A1-E
仕様、性能	カメラ I/F(EIA): (640 × 480) ~ (1400 × 1050) 白黒 8bitA/D 変換 4 回路 画像解析機能: 濃淡パターンマッチング 2 値画像解析 等 画像前処理機能: 加算, 平均, 減算, 差分 最小データ送受信間隔: 2ms

図 2-7 画像処理装置

II. 開発結果

図2-8に、開発した位置補正機構を含めた試作機用機器類の動作制御盤を示す。制御盤には、位置補正機構のサーボモーター（6台）のコントローラーや、画像処理装置とのデータ通信機器が組み込んである。また、試作機を構成する『産業ロボット』や『固体レーザー装置』等とのデータ通信機器も組み込んであり、試作機制御コントローラーは、試作機の動作全般を統括する役目を担うことになる。

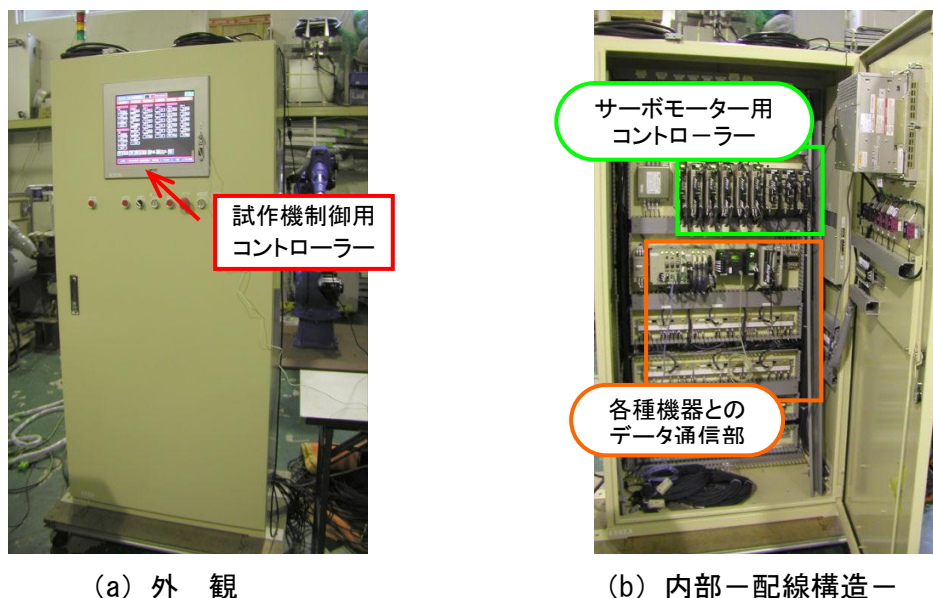


図2-8 試作機用機器類の動作制御盤

図2-9に、開発した位置補正機構の動作制御プログラムの動作設定及び動作状態モニタ画面を示す。プログラムでは、与えられた位置と速度の指令に対して、位置補正機構の各サーボモーターの動作量を算出し、コントローラーへの動作信号を送信する。また、溶接箇所とレーザー照射箇所の位置ズレを補正するため、各センサーからの位置検出データを、位置補正機構の座標系に対応した位置情報へ変換するプログラムも作成した。

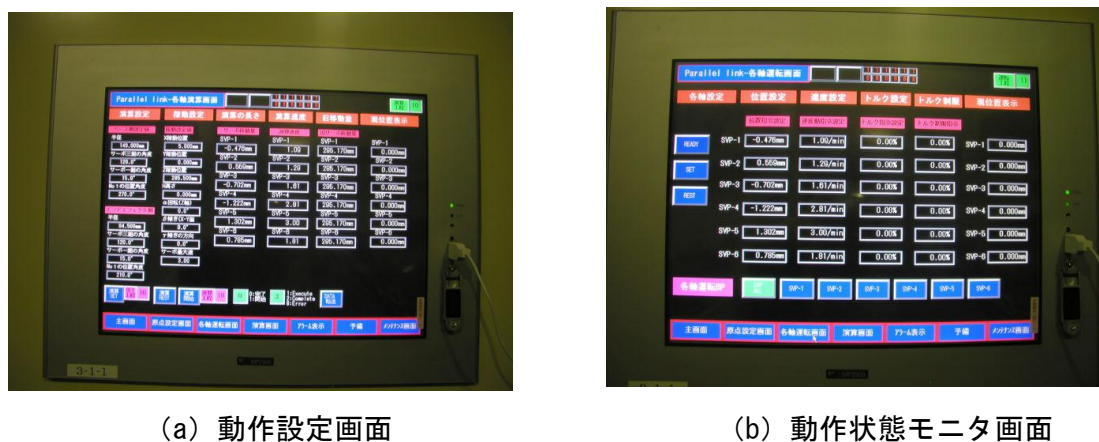


図2-9 位置補正機構の動作設定及び動作状態モニタ画面

Ⅲ. まとめ

- (1) 開発した位置補正機構での補正動作を実現するため、6本の直動アクチュエーターを連動制御する動作制御プログラムを開発した。
- (2) 位置補正機構を含む試作機を構成する各種機器（産業ロボット、固体レーザー装置、レーザーセンサー、画像処理装置など）の動作を制御する制御盤を開発した。
- (3) 位置補正機構のサーボモーターと試作機制御用コントローラー間のデータ伝送速度から、30mm/s程度の溶接速度（産業ロボットのアーム移動速度）であれば、機構動作の追従が可能のため、設計仕様上、目標達成に必要な性能を持った“固体レーザー溶接作業ユニット”を開発することができた。

第3章 ティーチング作業を必要としない産業ロボット動作データ作成法の開発

マイシステムズ株式会社

地方独立行政法人 山口県産業技術センター

産業ロボットによる固体レーザー溶接作業の高速化の要求に応えるため、サンプル製品形状を用いる従来のティーチング作業とは異なり、既存 3D 製品形状データを用いたティーチング作業を必要としない産業ロボット動作データ作成法を開発する。具体的には、3D 製品形状データに含まれる製品形状に関する設計情報から、作業経路となる空間位置情報などを抽出し、それを産業ロボットの動作データに変換するプログラムの開発を行う。

3-1. 3D 製品形状データからのデータ抽出技術の開発

I. 開発内容 –データ抽出プログラム–

このプログラムでは、3D 製品形状データから、産業ロボットによるレーザー溶接作業時の動作に必要な経路（レーザー焦点の空間位置）情報や、レーザー出力部の姿勢制御に必要なベクトル情報の抽出を行った。各データの抽出方法について以下に示す。なお、プログラムの開発は、（地独）山口県産業技術センターで開発済みの 3D 製品形状データを読み込み・表示を行うソフトウェアの機能を拡張することで行った。また、開発言語には Java を使用し、3次元表示ライブラリとして Java3D を使用した。

I-1. 空間位置情報の抽出

一般に機械加工部品の溶接箇所は、3D 製品形状データの“EDGE”部に該当することが多いため、空間位置情報は 3D 製品形状データの“EDGE”に含まれる形状定義情報を用いて、算出を行った。また、溶接条件によっては、レーザー焦点をオフセットして溶接を行う場合もあるため、これに対応できるように空間位置情報のオフセットも行えるようにした。図 3-1 に、任意の空間位置座標の算出のイメージ図を示す。

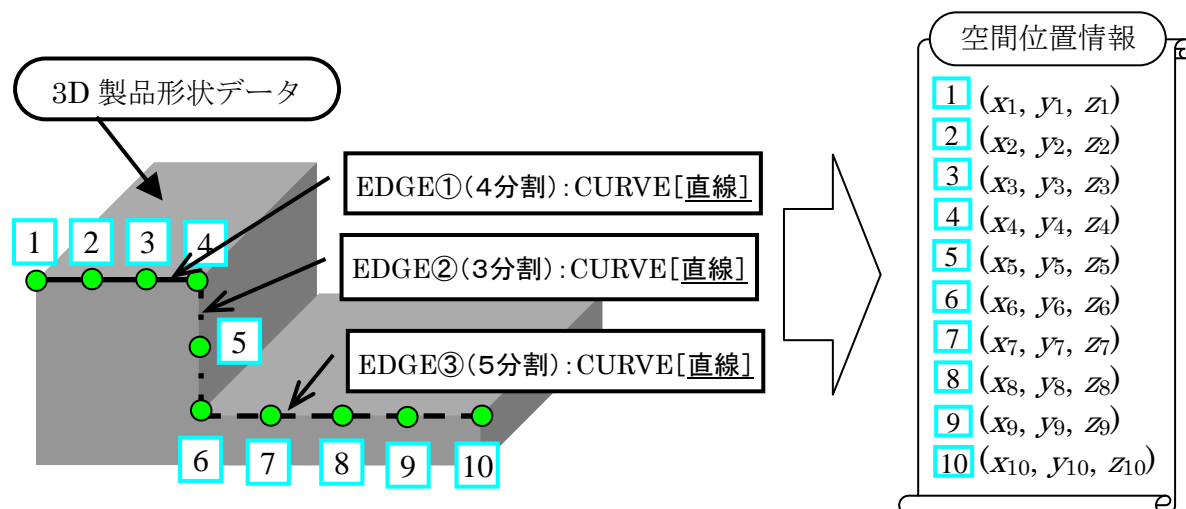


図 3-1 “EDGE”からの空間位置座標の算出

I-2. ベクトル情報の抽出

3次元的な立体形状の製品に対してレーザー溶接作業を行う場合、製品形状に応じて、レーザーの照射する方向を調整する必要がある。この基準となるベクトル情報を、3D 製品形状データの“FACE”データを用いて算出した。“FACE”には、ベースとなる曲面の形状定義情報である“SURFACE”と、“EDGE”と関連付けられた“LOOP”（曲面の境界）データが含まれている。このことを利用すれば、空間位置の算出用に選択された“EDGE”情報から、曲面の法線ベクトルが得られるため、選択“EDGE”を境界に含む全ての“FACE”の法線ベクトルを合成し、レーザー照射方向の基準ベクトルとした。また、レーザー照射方向も、溶接条件によって方向を調整する場合があるため、これに対応できるように基準ベクトルの方向調整が行えるようにした。図3-2に、この基準ベクトルの算出のイメージ図を示す。

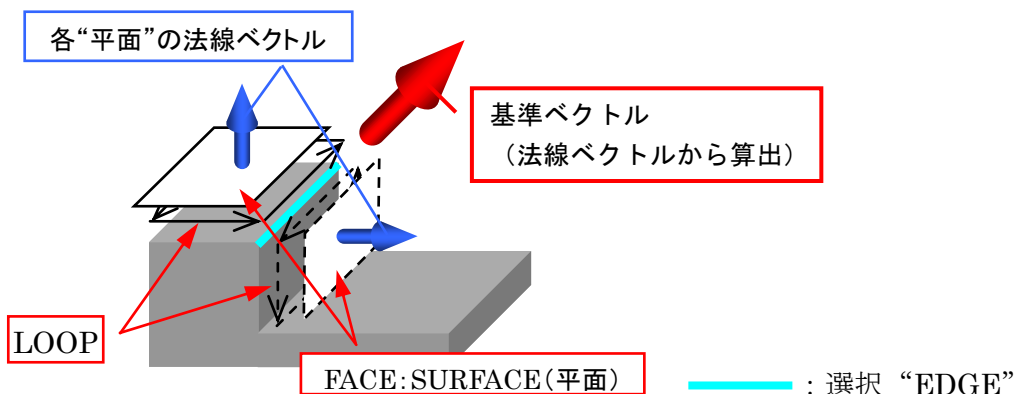


図3-2 “FACE”からの基準ベクトルの算出

II. 開発結果 –データ抽出プログラム–

図3-3に、開発したプログラムの実行イメージを示す。図は選択“EDGE”に対して、任意の分割数で空間位置、ベクトルを抽出・表示した例である。図中で、“緑色のドット”は空間位置、“ドットから伸びる緑のライン”はベクトルの抽出結果を、それぞれ示している。

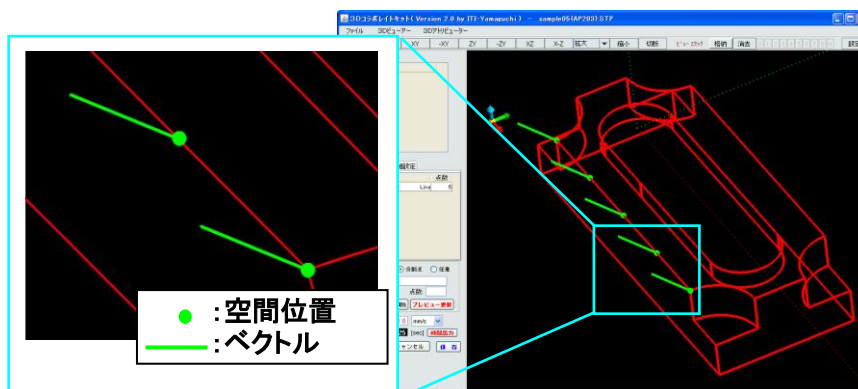


図3-3 選択“EDGE”に対する空間位置及びベクトルの抽出例

図3-4に、抽出データに対して、空間位置情報や基準ベクトル方向を修正したデータの一例を示す。開発した機能を用いることで、溶接条件に合わせて、レーザー焦点位置やレーザーの照射方向を変更して、溶接経路データを抽出することが可能となった。

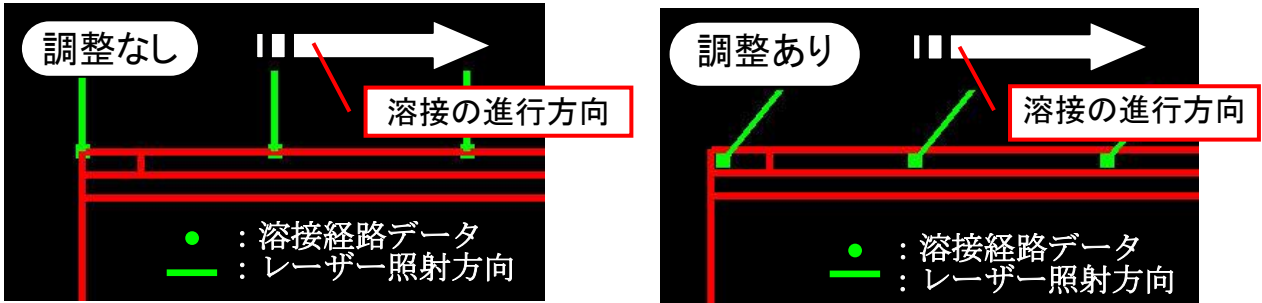


図3-4 抽出データの修正例

図3-5に、抽出データ（空間位置及びベクトル）の出力結果の例を示す。抽出データは、試作機で用いる産業ロボットに取り込み可能なデータ形式で出力するようにしており、退避点の追加や、レーザー出力部の姿勢変更などが、産業ロボットのコントローラー上で直接、追加・修正を行えるようにした。

```
1 | /JOB  
2 | //NAME TEST  
3 | //POS  
4 | ///NPOS 0,0,0,5,0,0  
5 | ///TOOL 5  
6 | ///USER 1  
7 | ///POSTYPE USER  
8 | ///RECTAN  
9 | ///RCONF 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0  
10 | P00001=73.144,-20.495,-456.783,45.000,0.000,0.000  
11 | P00002=96.957,-20.495,-456.783,45.000,0.000,0.000  
12 | P00003=120.769,-20.495,-456.783,45.000,0.000,0.000  
13 | P00004=144.581,-20.495,-456.783,45.000,0.000,0.000  
14 | P00005=168.394,-20.495,-456.783,45.000,0.000,0.000  
15 |  
16 | 空間位置情報 :  
17 |  
18 | ベクトル情報 :
```

図3-5 算出データの出力例

III. まとめ

- (1) 産業ロボットによる固体レーザー溶接作業の高速化を実現するために、3D製品形状データの設計情報から、レーザー溶接作業に必要な経路（レーザー焦点の空間位置）情報や、製品形状に応じたレーザー照射方向を抽出し、溶接条件（製品材質、溶接速度）に合わせて、レーザー焦点のオフセットや照射方向の調整が行えるプログラムを開発した。
- (2) 抽出データは、産業ロボットのコントローラー上で編集が行えるように、試作機で使用する産業ロボットに取り込み可能なデータ形式で出力するようにした。

3-2. 抽出データからの産業ロボット動作データ生成技術の開発

I. 開発内容 - 動作データ生成プログラム -

図3-6に、一般的な産業ロボットの動作形態を示す。図で示すように、産業ロボットの動作は、“実際に産業ロボットを動かし、ロボットアーム先端の手先基準点の位置を順次指示する”「Point to Point」（現在位置から指示位置までの移動）が基本となる。この動作では、産業ロボットの6つの動作軸が最小限の動きとなるよう自動制御されて、指示位置までの移動が行われる。このとき、各動作軸の動作量は、各メーカーの産業ロボット用動作制御システムで固有な信号データとして扱われる。

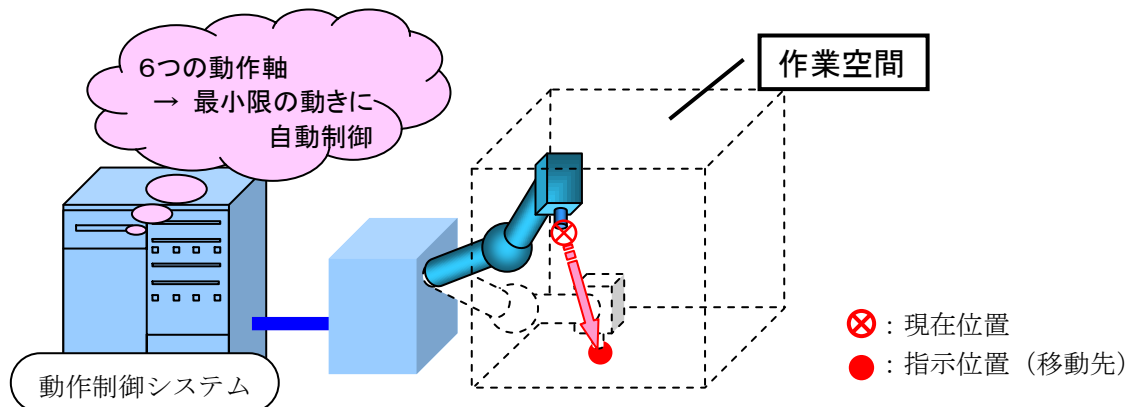


図3-6 産業ロボットの一般的な動作形態 (Point to Point)

このプログラムでは、“データ抽出プログラム”で得られた抽出データから、産業ロボット動作制御システム用の固有信号データの生成を行わせる。これにより、従来のティーチング作業を、“3D製品形状データから抽出した空間位置情報を用いる”ことに置き換えることができ、ティーチングの作業時を短縮に繋がる。ここで生成される動作データは、溶接箇所に沿って、産業ロボットを大まかに動かすためのものであり、溶接作業時の厳密な位置合わせは、開発した位置補正機構で行うことになる。図3-7に、今回行った処理のイメージ図を示す。

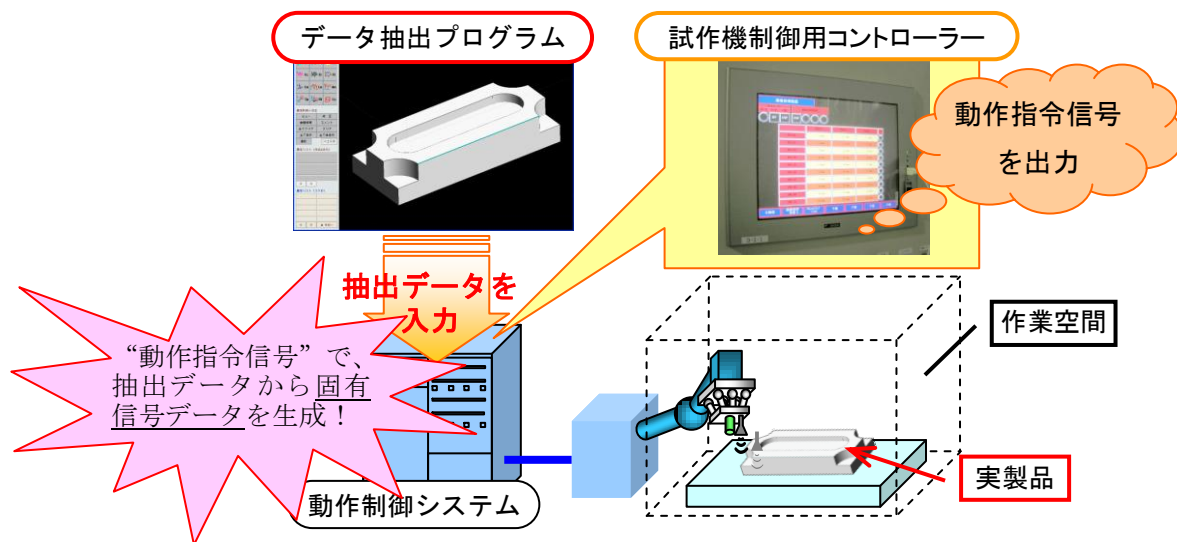


図3-7 抽出データでの産業ロボット動作データ生成処理

II. 開発結果 –動作データ生成プログラム–

図3-8に、開発プログラムで産業ロボットを動作させた状態を示す。図に示すように、ティーチング作業を行うことなく、試作機（産業ロボット）を動作可能なことを確認することができた。

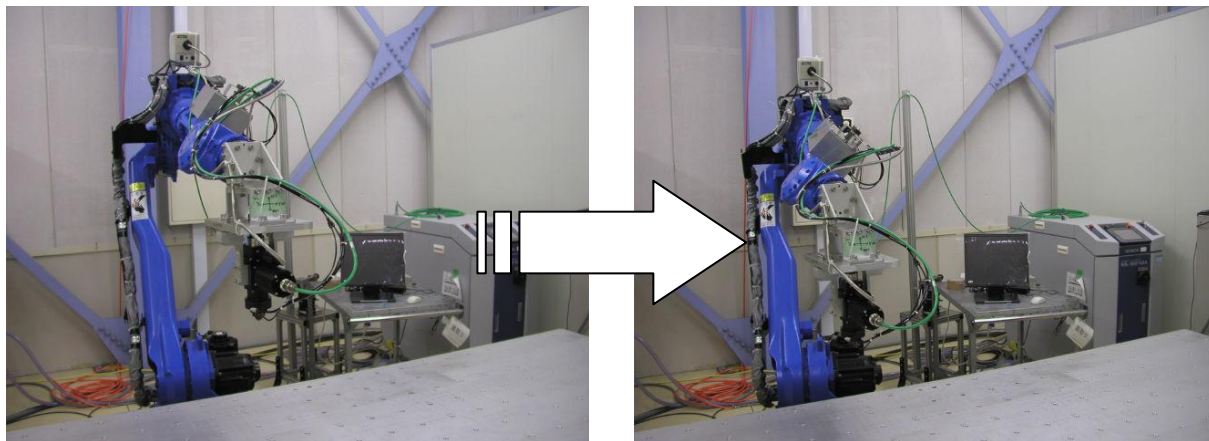


図3-8 抽出データによるティーチング・レスでの試作機（産業ロボット）動作

III. まとめ

- (1) “データ抽出プログラム”で得られた抽出データから、産業ロボットの動作制御システム用の固有信号データを生成するプログラムを開発した。
- (2) このプログラムによって、従来のティーチング作業を行うことなく、産業ロボットを動作させる目標を達成できた。

第4章 産業ロボット用固体レーザー溶接作業の信頼性向上及び高速化システムの試作機の開発

マイシステムズ株式会社
有限会社森板金製作所
地方独立行政法人 山口県産業技術センター

第2章及び第3章で開発した技術を用いて産業ロボットによる固体レーザー溶接作業の高精度化及び高速化を実現するための試作機（レーザー出力部を組み込んだ位置補正機構を、市販の産業ロボットのアーム部先端に取付けたシステム）を開発する。開発した試作機に関して、動作時の振動測定・評価や、溶接箇所近傍の位置情報を用いた位置補正機能の開発を行う。

4-1. 試作機の開発

I. 試作機の組み立て

試作機は、以下、3つの機器を組合わせて構成する。

- ・位置補正機構+レーザー出力部（第2章参照）
- ・『固体レーザー装置』（レーザー出力部を溶接作業ユニットに組込んで使用）
- ・『産業ロボット』

『固体レーザー装置』は、研究期間中に損耗することなく、安定したレーザー発振を行えるように、レーザー媒質として“光ファイバー”（“YAG等の結晶タイプ”に比べて長寿命）を採用している機種を用いた。図4-1に開発した溶接作業ユニット、図4-2に『固体レーザー装置』、図4-3に『産業ロボット』を示す。

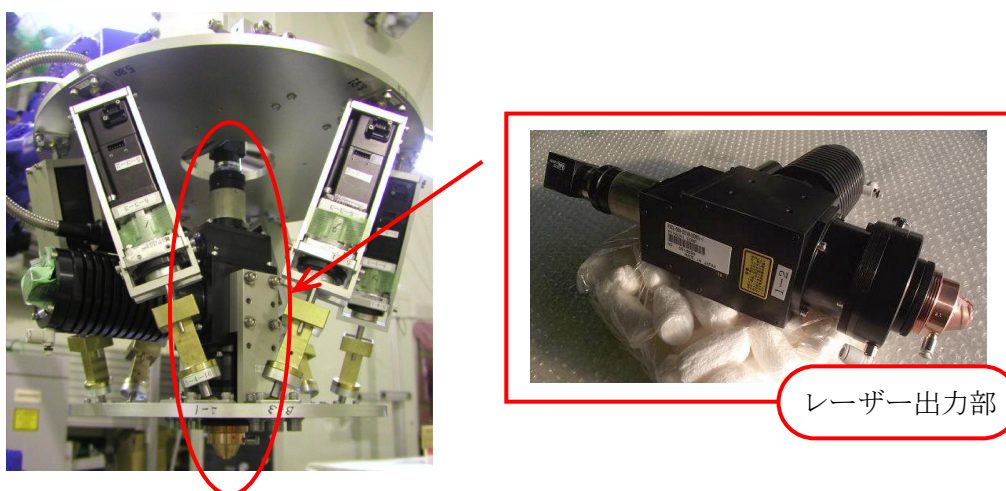
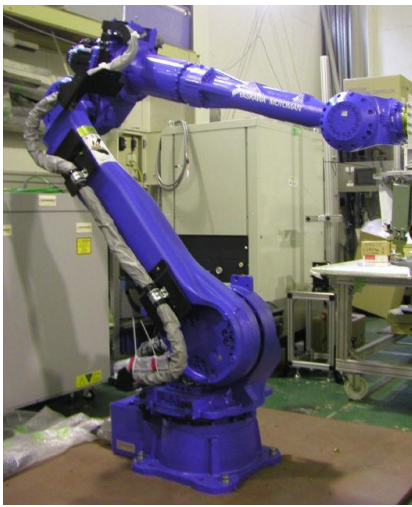


図4-1 レーザー出力部を組み込んだ位置補正機構



メーカー	ミヤチテクノス株式会社
型 式	ML-6810A
仕様、性能	レーザー媒質:光ファイバー(Yb) 最大出力:1000W 発振波長:1070~1100nm 出力モード: ・CW(連続発振) ・QCW(準連続発振) 1~5000Hz (正弦波, 三角波, 矩形波) 出力安定度:±2%以下(10W以上) 出力分岐:2分岐(時間分岐)

図 4-2 『固体レーザー装置』



メーカー	株式会社安川電機
型 式	MOTOMAN-MH50-35
仕様、性能	動作形態:垂直多関節形 自由度:6自由度 可搬重量:35kg 動作範囲, 速度: 旋回…±180°, 180° / s 下腕…+135~-90°, 140° / s 上腕…+296~-160°, 178° / s 手首旋回…±360°, 250° / s 手首振り…±125°, 250° / s 手首回転…±360°, 360° / s 最大リーチ: 水平方向…2538mm 上下方向…4448mm

図 4-3 『産業ロボット』

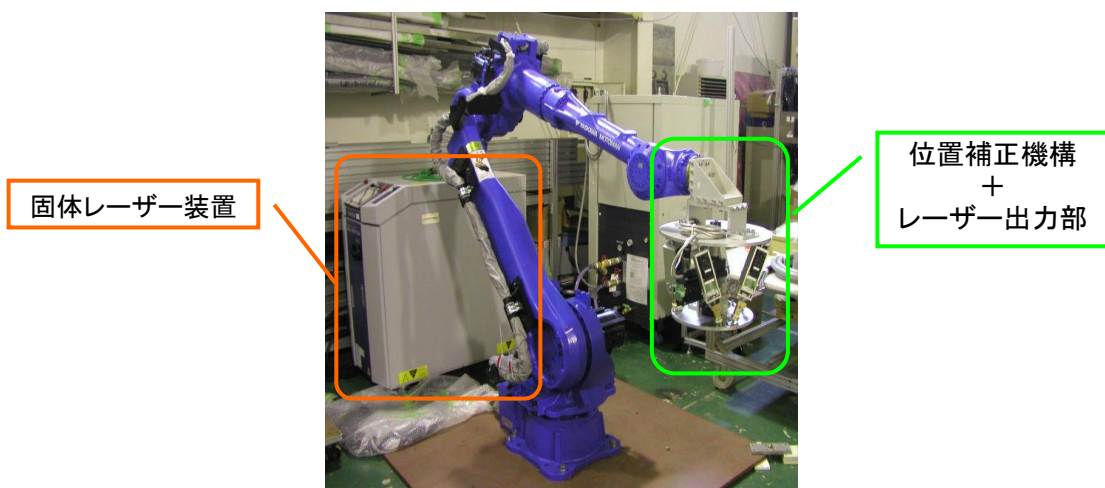


図 4-4 試作機

図 4-4 に、組み上がった試作機を示す。組み上げた状態で、試作機制御用コントローラーを介して各機器がきちんと動作することを確認した。

II. 試作機動作時の振動測定

開発した試作機は、「産業ロボットによる溶接作業での±0.1mm以下の位置補正」の実現を目指している。それには、位置補正機構による補正動作時の振動の影響を無視することはできない。そこで、試作機の動作中に位置補正動作を行った状態の振動データを測定し、その評価を行った。

II-1. 測定方法

図4-5に振動測定システムを、図4-6に加速度センサーを示す。3軸直交型の加速度センサーを複数個使用し、試作機の異なる速度・動作パターンでの振動特性を把握する。具体的には、レーザー出力部、位置補正機構のプラットフォーム及び取付部にセンサーを配置して振動測定を行い、各センサーのデータから振動の影響が大きい動作の確認を行った。



メーカー	株式会社小野測器
型式	AU-4100A
仕様、性能	<ul style="list-style-type: none"> ○本体 チャンネル数:5 (最大4台まで連動可) A/D分解能:24 or 16bit チャンネル間確度: ゲイン…±0.4dB以内 位相…±1.0°以内 ○ソフトウェア ・データ記録用(AU-401) ・信号処理(O-Scope 2)

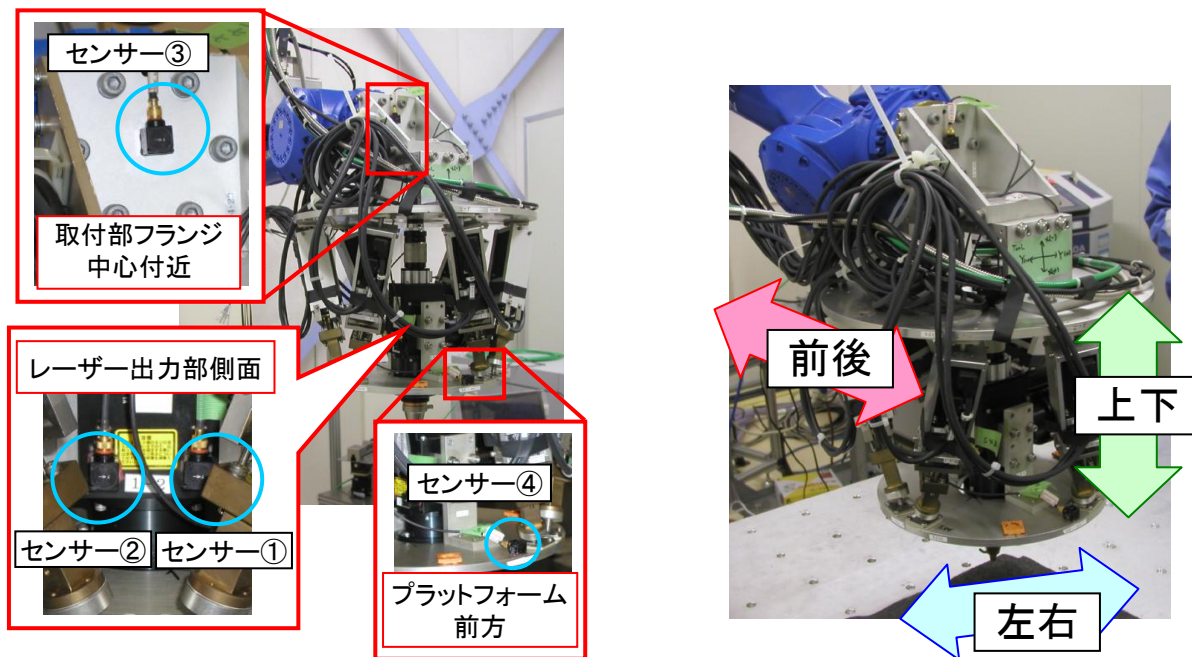
図4-5 『振動測定システム』



メーカー	株式会社小野測器
型式	NP-3574
仕様、性能	<ul style="list-style-type: none"> 構造:シエア型, 直交3軸 感度:10mV / (m/s²) ±10% 共振周波数:約40kHz 周波数範囲: X, Y軸…1Hz~5kHz±1dB Z軸…1Hz~8kHz±1dB 最大使用加速度:400m/s² 質量:8.1g サイズ(mm): 14.2(W)×14.2(D)×14.2(H)

図4-6 3軸加速度センサー

図4-7に、試作機に対する加速度センサーの取付状態及び検出方向を示す。加速度センサーは、3軸の検出方向が、それぞれ産業ロボットを正面から見て、前後、左右、上下方向となるように配置した。



(a) 取付状態

(b) 検出方向

図 4-7 3 軸加速度センサーの取付状態及び検出方向

今回の測定での試作機の動作速度及び動作パターンを整理したものを、表 4-1 に示す。試作機の動作速度は、位置補正機構なしの状態の試作機による溶接実験(板厚 1.5mm の SUS304 の突合せ)で得られた最適条件である 30mm/s と、同じく溶接実験での最高速度である 50mm/s の 2 種類を設定した。図 4-8 に試作機動作パターンのイメージを示す。また、位置補正機構については、 $\pm 2.0\text{mm}$ の範囲を最高速度で 10 往復させた。(ロボットアームの移動方向と直交方向)

なお、振動測定データのデータ記録のサンプリング周期は 48kHz に設定した。

表 4-1 測定条件

(a) 試作機の動作速度 (産業ロボットのアーム移動速度)

動作速度	備考
30mm/s	溶接実験での最適速度
50mm/s	溶接実験での最高速度

(b) 試作機の動作パターン

動作パターン	動作範囲	位置補正機構		備考
		取付状態	動作範囲	
前後	400mm	有・無	$\pm 2.0\text{mm}$	補正動作は“左右”方向
左右	1700mm	有・無	$\pm 2.0\text{mm}$	補正動作は“前後”方向

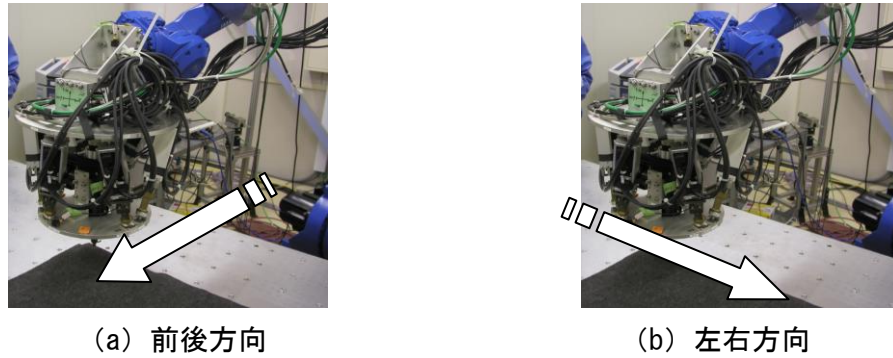


図 4-8 振動測定での試作機動作パターン

II-2. 測定結果

測定データからケーブルノイズ等の影響と思われる変動成分の影響を取り除くため、以下のデータ処理を行った。その際、加速度データから変位データに換算する処理も合わせて行った。

- (1) 測定データを 10 ステップ毎に間引き
- (2) 直線性の除去
- (3) ローパスフィルター (2400Hz 以上カット)
- (4) 線形化速度法による逐次成分 (積分データ間隔 1 ステップ)
- (5) ハイパスフィルター (10Hz 以下カット)

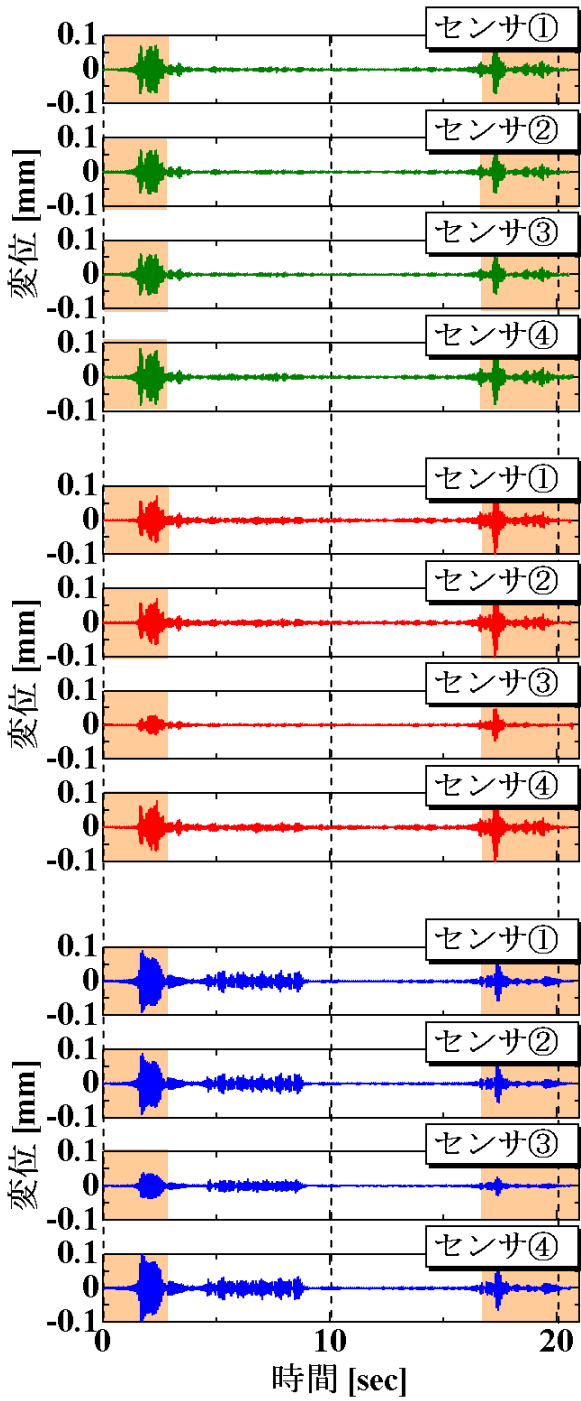
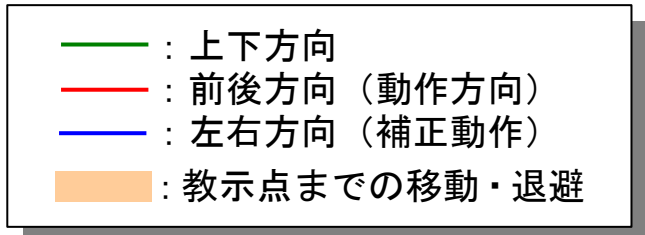
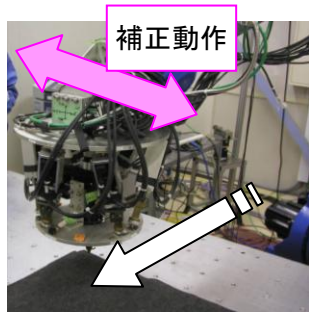
※ フィルターは、FIR フィルターを使用

図 4-9 及び図 4-10 に、データ処理で得られた変位データを示す。図中の白い範囲が表 4-1 で示した“動作範囲”に相当し、肌色部分は初期位置から教示点までの移動及び教示点から初期位置までの退避動作を示している。

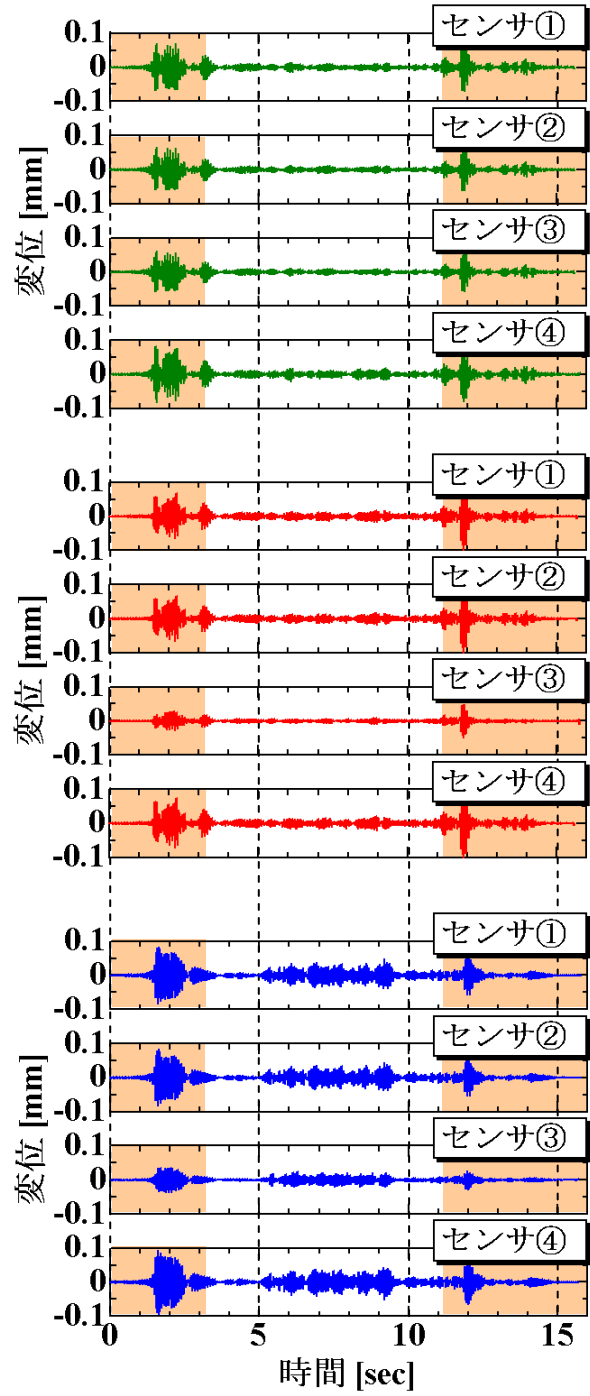
図より発生する変位は、アーム先端が本体から遠のくほど大きく、特にロボットアーム先端を振る動作が加わる“左右”方向で最も顕著に発生していた。各動作速度での最大変位は、30mm/s で±0.03mm、50mm/s で±0.08mm 程度であった。ロボットアーム先端の回転軸 (R 軸) は剛性が最も低いため、この軸への負荷を抑制することで、振動の影響を軽減できると考えられる。

また、位置補正機構の動作時に発生する振動による変位は±0.04~0.05mm 程度で、産業ロボットの動作速度の違いによる差はほとんど見られない。これより、開発した位置補正機構で発生する変位は、産業ロボットの R 軸への負荷で発生する変位よりも小さく、その動作速度の変化の影響も受けにくいことが分かる。実際の溶接作業において、位置補正を行う範囲は、今回の位置補正機構の動作範囲の 10 分 1 (±0.2mm) 程度になると想定されるため、発生する振動も、更に小さくなることが期待できる。

以上のことから、開発した位置補正機構は、産業ロボットの動作速度が 50mm/s までの範囲であれば振動の影響も少なく、レーザー出力部の取付け方向を改善するなど、産業ロボットの R 軸への負担を軽減すれば、より安定した溶接作業を実現できると思われる。

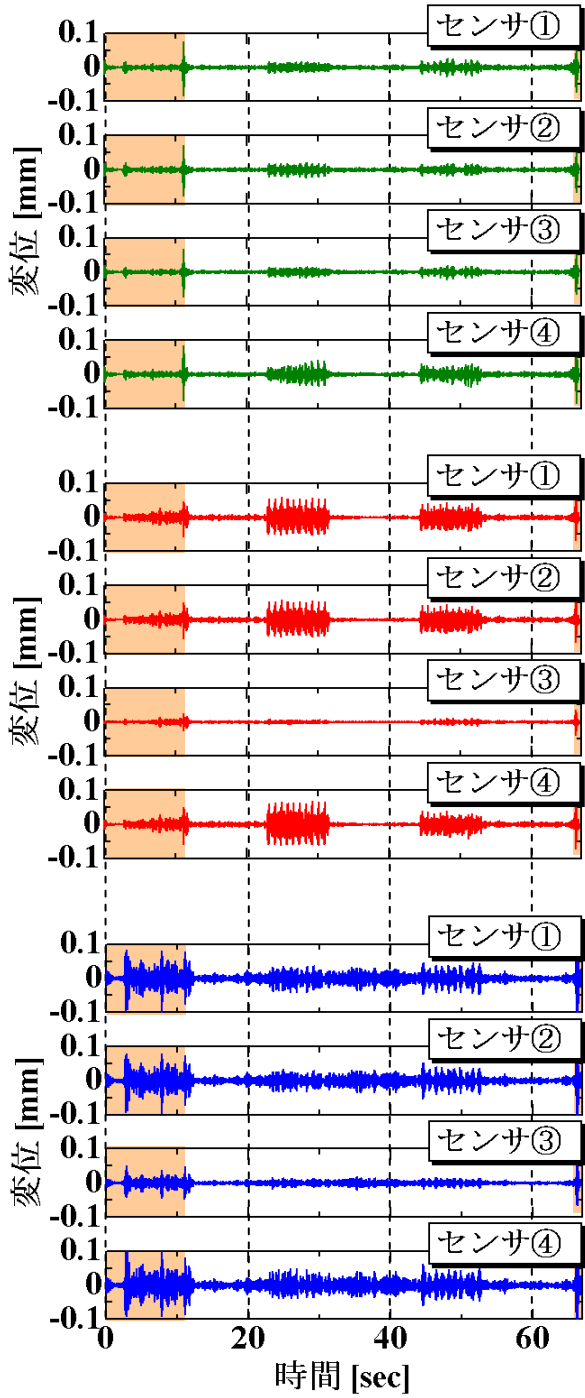
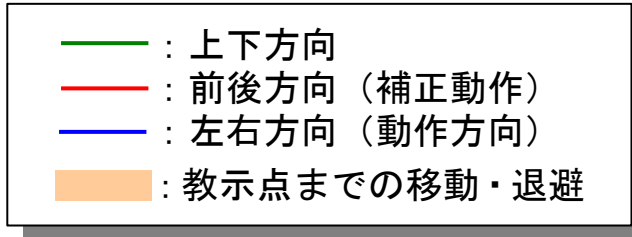
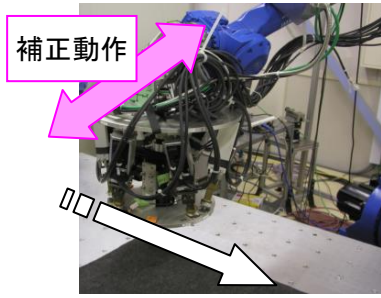


(a) 30mm/s

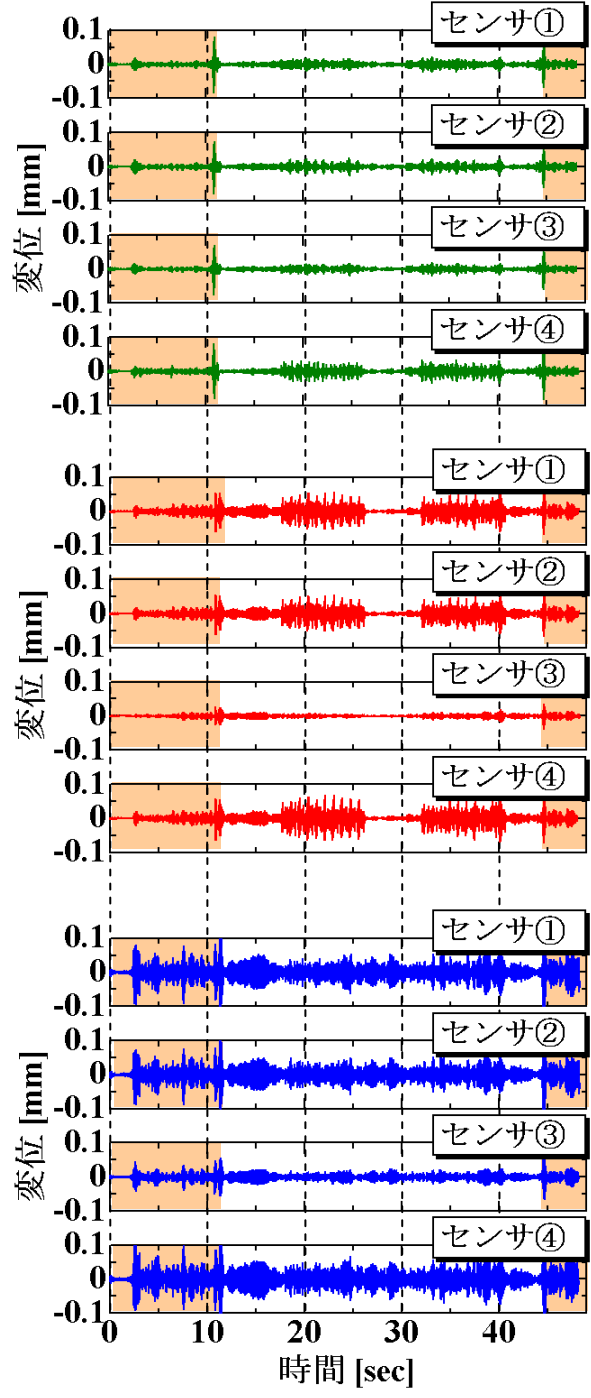


(b) 50mm/s

図 4-9 “前後” 動作での変位データ (位置補正機構の動作あり)



(a) 30mm/s



(b) 50mm/s

図 4-10 “左右”動作での変位データ (位置補正機構の動作あり)

Ⅲ. 位置補正に必要な溶接箇所の検出

位置補正に必要な溶接箇所の位置検出として、2章で示した各手法に関する検証を実施した。その結果を以下に示す。

Ⅲ-1. 2次元レーザーセンサーによる位置検出

図4-11に2次元レーザーセンサーによる位置検出データのセンシング状況を示す。図4-11(a)から、センサーはレーザー出力部先端を避けた配置となるため、こちらの手法では、溶接中にリアルタイムで位置検出させることは難しくなる。そのため位置検出データは、溶接作業前に予め採取する方式に変更した。センシングの対象は、図4-12に示す長さ150mmの“L字の突き合わせ試料”とした。図4-11(b)に示すように、位置検出は2次元レーザーセンサーの計測機能で試料表面の輪郭形状の凹部変曲点を追跡することで行った。図4-13に位置検出データの一例を示す。

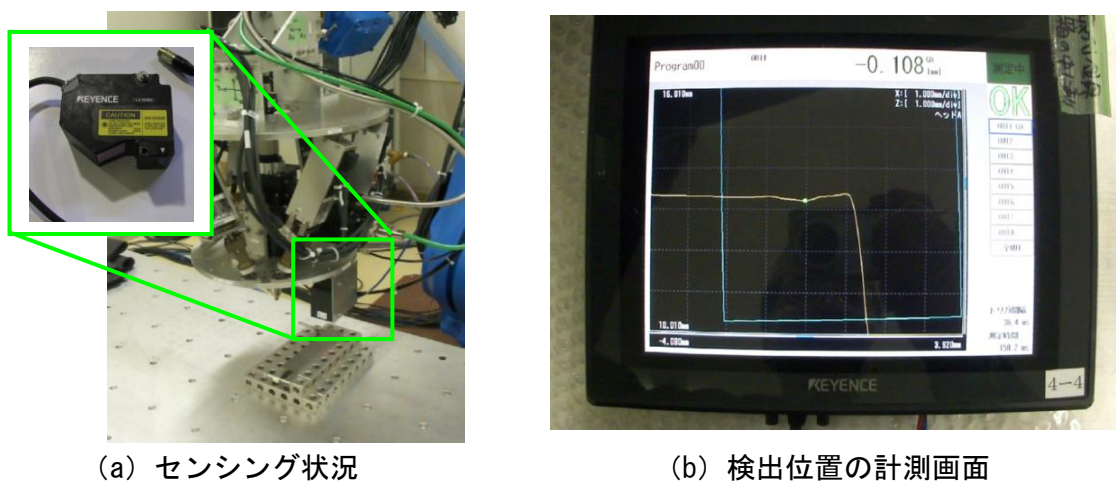


図4-11 位置検出データのセンシング状況

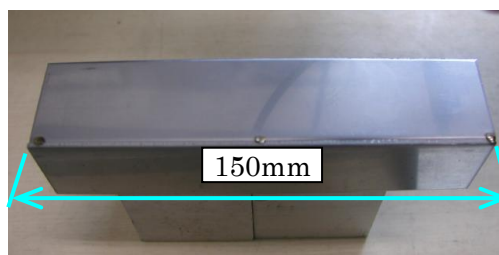


図4-12 位置検出の検証用試料

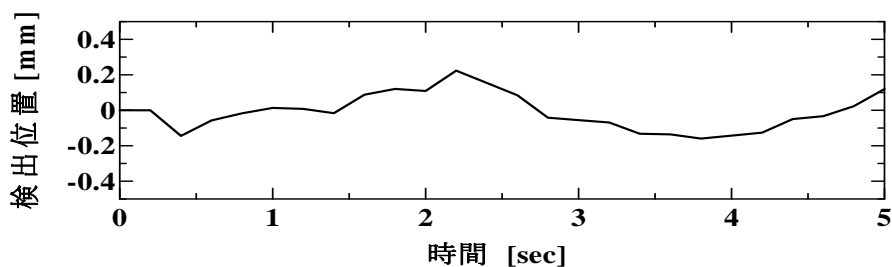


図4-13 位置検出データ例

Ⅲ-2. CCDカメラを用いた画像処理

Ⅲ-2-1. 撮影条件

CCDカメラで溶接時の撮影を行うにあたって、熔融池での輻射光の発生を抑制しつつ、位置検出に必要な溶接箇所を画像を得るための撮影条件を検証した。検証の結果得られた撮影条件で可視化した画像の一例とその時の溶接条件を図4-14に示す。

Ⅲ-2-2. 検証結果

Ⅲ-2-1節の撮影条件で得られた可視化画像に対して画像処理を行い、溶接箇所の位置検出が可能か検証を行った。検証は、2次元レーザーセンサーと同様の試料に対して行った。検証結果を図4-15に示す。図より、画像処理による溶接箇所の検出は、検出対象箇所の輝度差が少なく、画像全体的に薄暗いため、安定した位置検出を行うことは困難であった。

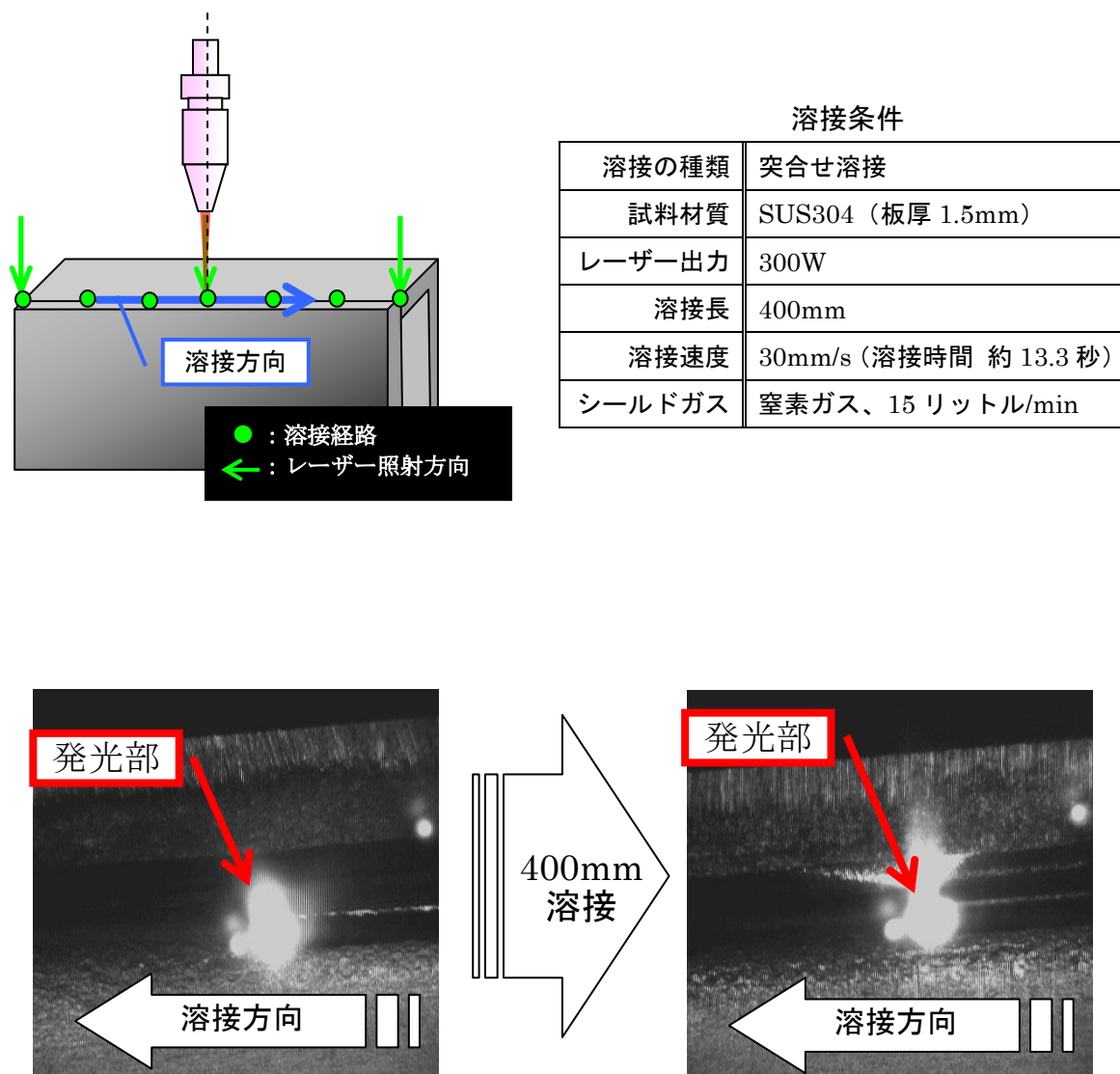


図4-14 確立した撮影条件による撮影画像

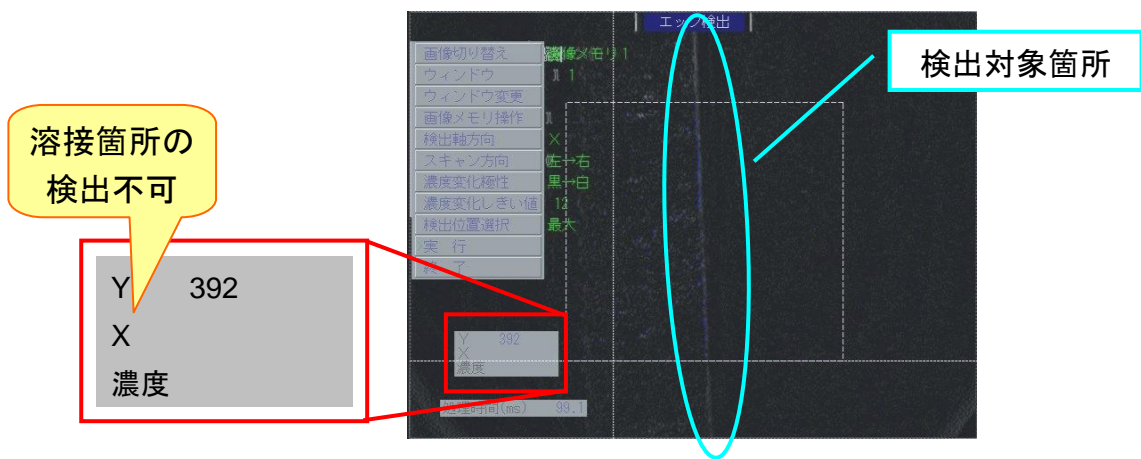
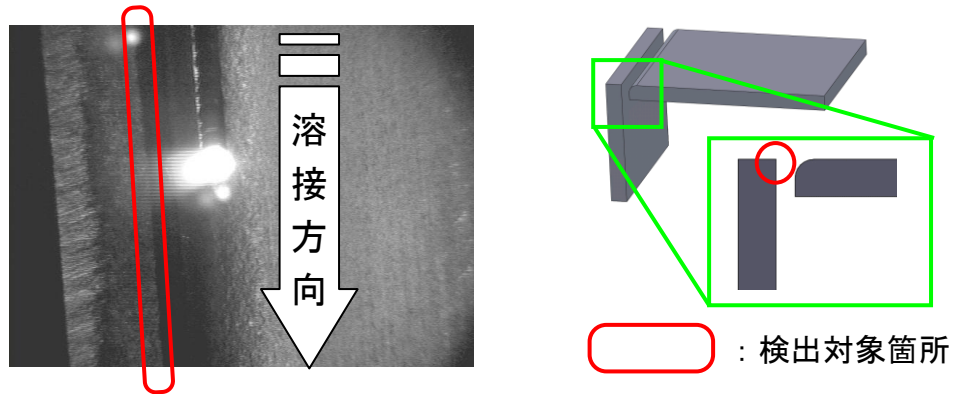


図 4 - 1 5 画像処理による位置検出の検証結果

IV. 試作機（位置補正機構あり）での位置補正動作の検証

Ⅲ節の結果から、2次元レーザーセンサーで位置補正データを用いて、試作機による位置補正動作の検証を行った。検証実験用の試料には“L字の突き合わせ試料（材質：SUS304，板厚：1.5mm，溶接長：150mm）”を用いた。実験では、補正動作の効果を確認するため、試料の突き合わせ部分に沿った2点教示経路データの2点目を意図的に2mm程度シフトさせた経路データを作成し、試作機の動作経路データとして使用した（図4-16参照）。

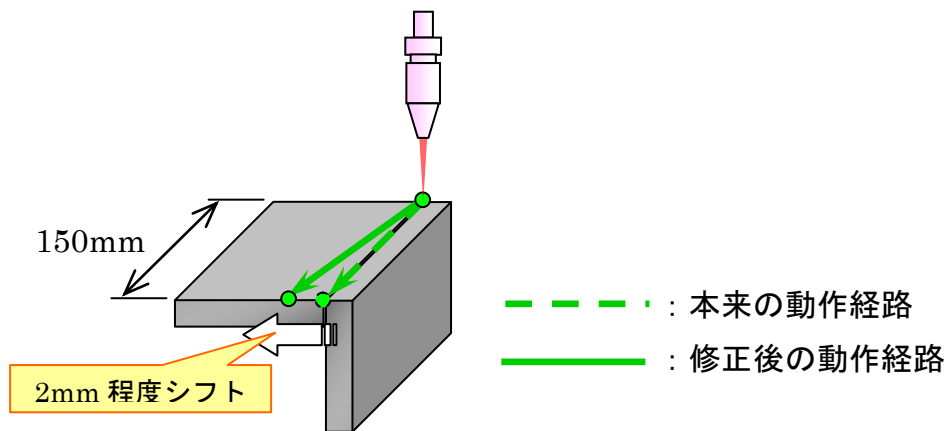


図 4 - 1 6 補正動作検証用の試作機の動作経路

位置補正あり・なしの各状態における試作機のレーザー出力部の軌道を、CCD カメラの映像で確認したものを図4-17に示す。図より、“位置補正なし”の状態では、溶接箇所が画面中央のレーザー焦点付近から下方向にズレていくのに対して、“位置補正あり”の状態では、溶接箇所はほぼ画面中央に位置した状態を保っていることが分かる。これより、溶接作業前に、2次元レーザーセンサーで予め採取した位置補正データを用いることで、試作機での位置補正機能を実現することができた。

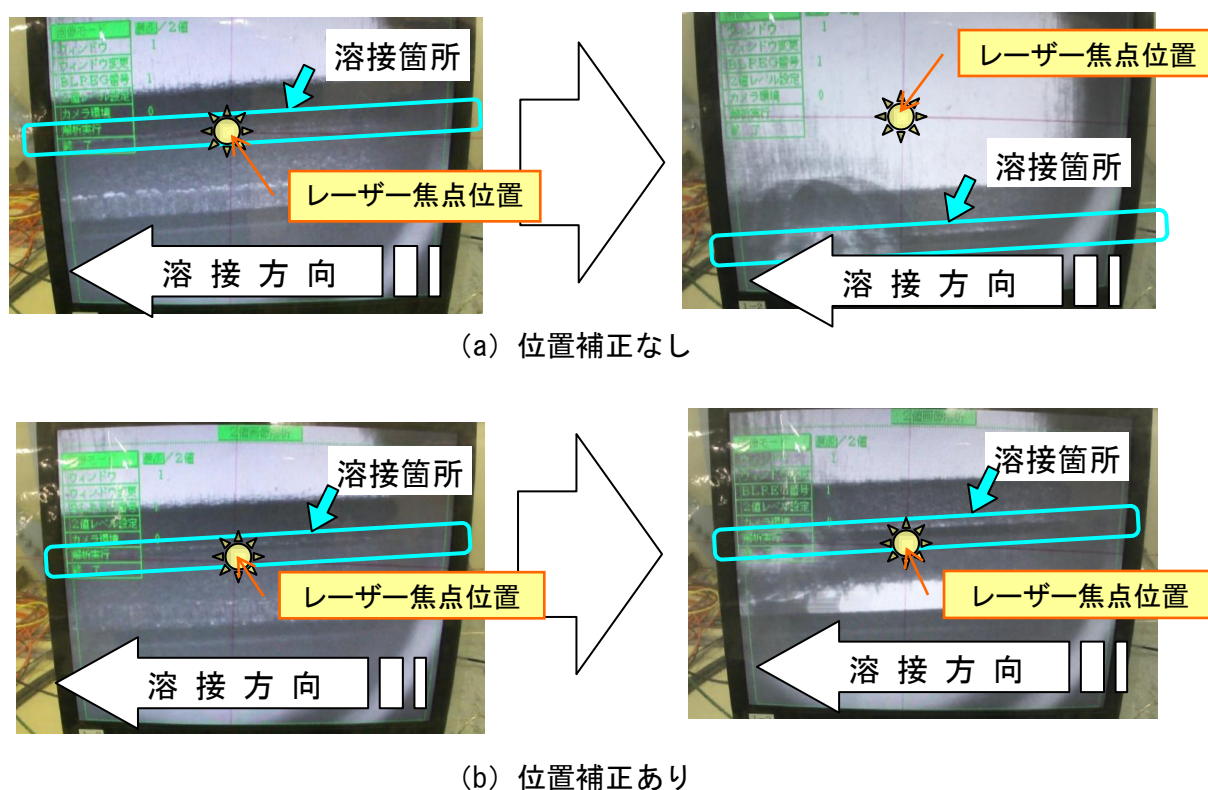


図4-17 位置補正の有無によるレーザー出力部軌道の違い

V. まとめ

- (1) 『位置補正機構+レーザー出力部』を『産業ロボット』のロボットアーム先端に搭載した試作機を作成し、試作機制御用コントローラーを介して各機器が動作することを確認した。
- (2) 2条件の試作機動作速度（30mm/s, 50mm/s）に対して振動測定を行い、振動による変位は、動作速度 50mm/s で±0.08mm程度であった。また、位置補正機構の動作時の振動による変位は±0.04～0.05mm程度で、「±0.1mmでの位置補正」の目標を達成するために、十分な性能を有していることが確認できた。
- (3) 画像処理による位置検出は困難であったが、2次元レーザーセンサーを用いることで、試作機での位置補正動作を実現できた。ただし、センサー組込み状態の制約上、位置補正データは溶接作業前に予め採取する必要があるため、試作機による位置補正動作は、位置補正動作のみをリアルタイムで行う方式に変更した。

第5章 試作機の性能評価

マイシステムズ株式会社
有限会社森板金製作所
公益財団法人 周南地域産業振興センター
地方独立行政法人 山口県産業技術センター

開発した試作機の実用化に向けて、溶接作業の性能を評価する。具体的には、産業ロボットによるレーザー溶接作業の主な対象業界となる企業（製缶板金業）の生産現場で溶接サンプルを作成し、そのサンプルの溶接品質の評価を行う。

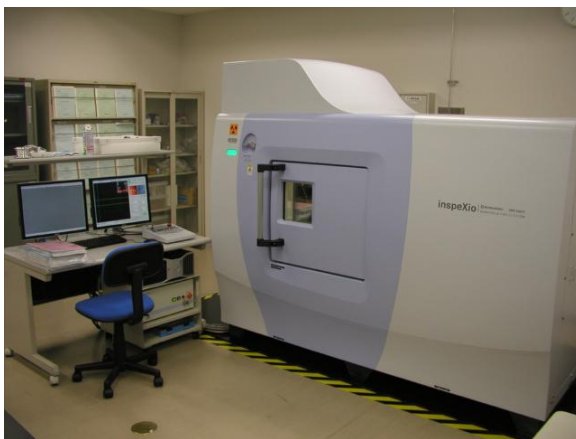
5-1. 試作機による実証実験

I. 溶接サンプルの品質評価

溶接実験の実施に先立ち、溶接条件の違いが溶接箇所“仕上がり”状況に与える影響を確認するため行った“テスト溶接サンプル”に対して、溶け込み具合の良否などの確認を実施した。

I-1. 溶接条件の違いによる溶け込み状態の比較

溶接箇所の溶け込み具合の状況は、最終的な製品強度に影響を及ぼす。“テスト溶接サンプル”に対するその確認は、非破壊での溶接箇所の内部が観察できる X 線 CT 装置を用いて行った。図 5-1 に X 線 CT 装置を示す。

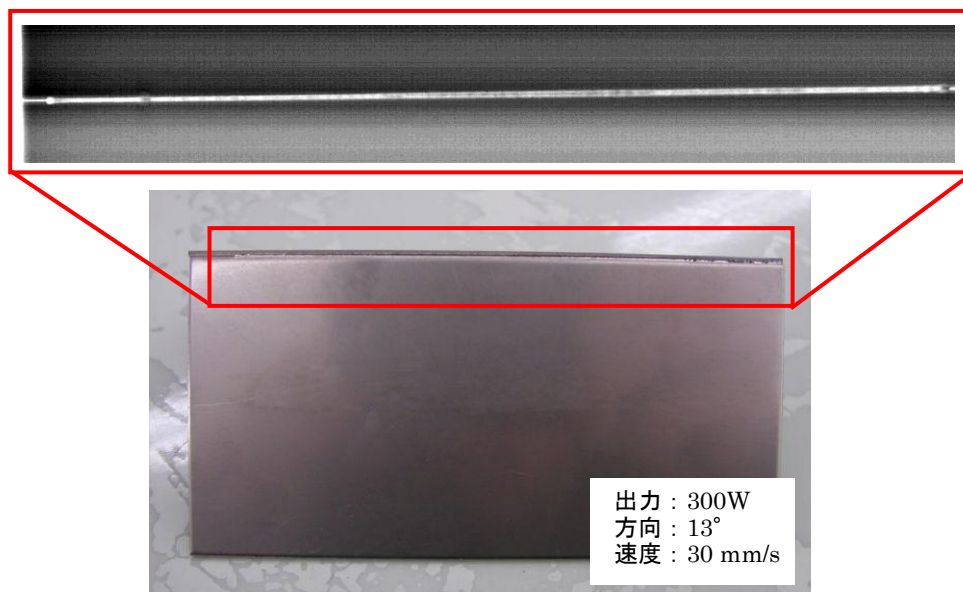


メーカー	株式会社島津製作所
型 式	inspeXio SMX-225CT
仕様、性能	○本体 X線管電圧: 40~225kV 最小焦点寸法: 4 μ m 以下 (100kV, 100 μ A 時) 搭載可能サイズ: ϕ 300mm \times H300mm 9kg (冶具等含む) 視野(スキャン)領域: 約 ϕ 5~200mm 幾何学的倍率: 約 1.5~100 倍

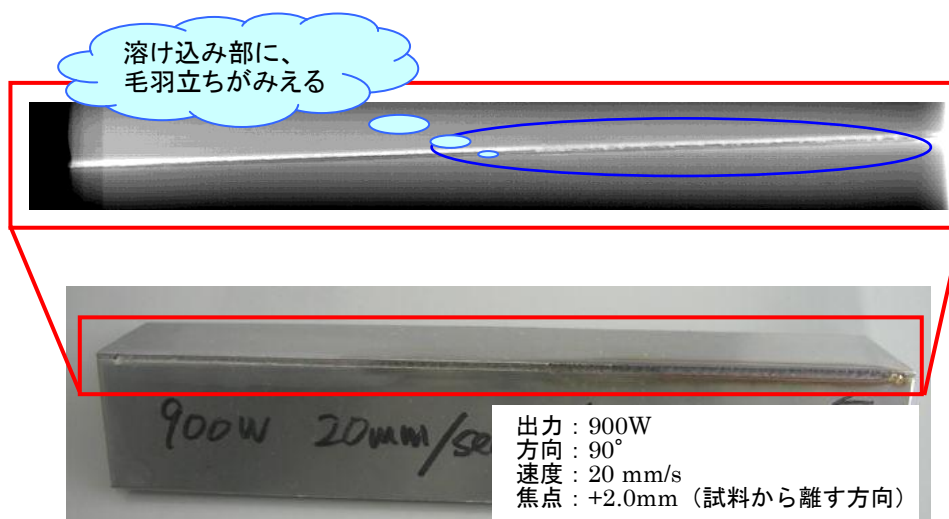
図 5-1 X 線 CT 装置

観察対象となる“テスト溶接サンプル”は、異なるレーザー出力、照射方向（試料表面に対する）、溶接長さ、溶接速度、焦点位置の条件で、レーザーを連続発振させ、平板同士を L 字に接合する隅肉溶接で作成した。なお、試料の材質は、板厚 1.5mm の SUS304 板材とした。

図5-2に撮影した溶接部の透視画像を示す。図より、レーザー出力が300Wの試料では、溶け込み部はほぼ均一な状態となっているものの、900Wの試料では、一部、平板の端面に“毛羽立って”見える箇所が見受けられる。これは溶接部表面の“焼け”が際立っている箇所であるため、溶け込み状態が不均一になっているものと考えられる。このような溶接部の透視画像を用いた溶け込み状態の比較で、“溶接後の磨き仕上げ不要”とする研究開発の目標達成に必要な比較的安定した溶接が行える条件を確立することができた。



(a) 300W



(b) 900W

図5-2 溶接部の透視画像

II. 溶接実験（位置補正機構あり）

実際の製品製造における溶接作業では、位置のばらつきを最小限に抑えるため、固定治具を用いてサンプルを固定するが、サンプル形状の僅かなばらつきなどの影響により、教示点の微調整を行う“ティーチングの手戻り工程”が発生する。この作業は生産性の低下に繋がるため、より少ない教示点で修正も最小限とできることが望ましい。そこで、開発した試作機で、これらの問題点を解消可能かどうかについて検証を行った。

実験用の試料には、4章と同様の“L字の突き合わせ試料（材質：SUS304，板厚：1.5mm，溶接長：150mm）”を用い、試作機の動作データには、補正動作の効果を確認するため、試料の突き合わせ部分に沿った2点教示経路データの2点目を意図的に2mm程度シフトさせた経路データを使用した。

図5-3に試作機で位置補正あり・なしの各状態で、溶接を行ったサンプルを示す。溶接条件は、I節で得られた最適条件を参考にして、試作機動作速度30mm/s，レーザー出力300Wとし、レーザー焦点サイズは最小の0.1mm程度に設定した。図より、“位置補正なし”のサンプルは、溶接箇所から外れた位置にレーザーの照射痕が付き、“位置補正あり”のサンプルは、溶接箇所にレーザーがきちんと照射・溶接されていることが確認できた。

図5-4に実験中の振動測定データから得られた変位データを示す。振動測定やデータ処理は、第4章で行った測定と同一方法で行った。図より、位置補正動作による振動は±20～30μm程度であり、振動の影響を受けることなく、溶接が行えていることが確認できる。

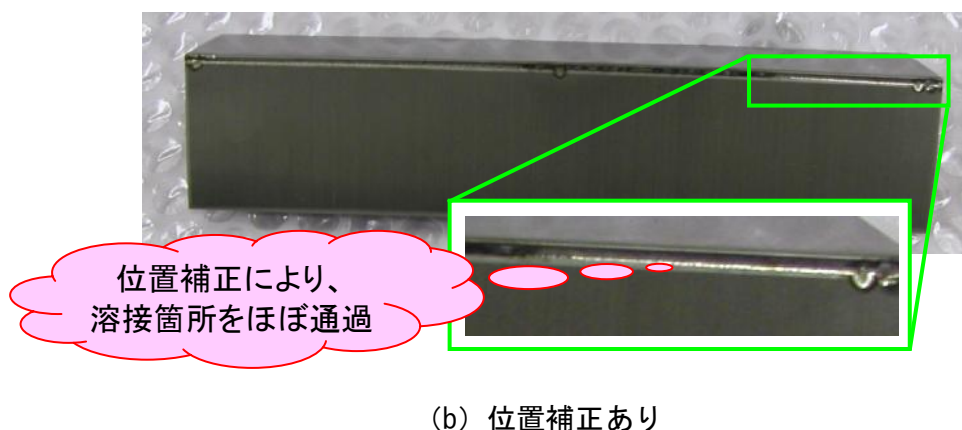
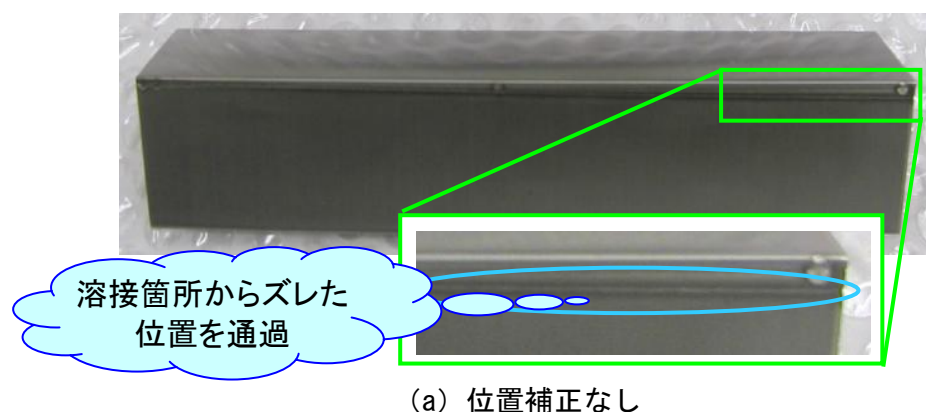
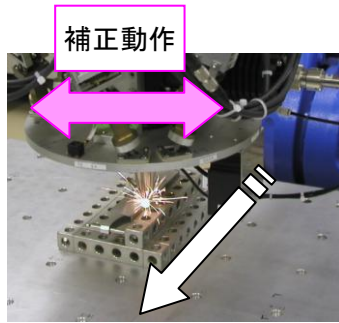


図5-3 位置補正の有無による溶接サンプル



- : 上下方向
- : 前後方向 (動作方向)
- : 左右方向 (補正動作)
- : 教示点までの移動・退避

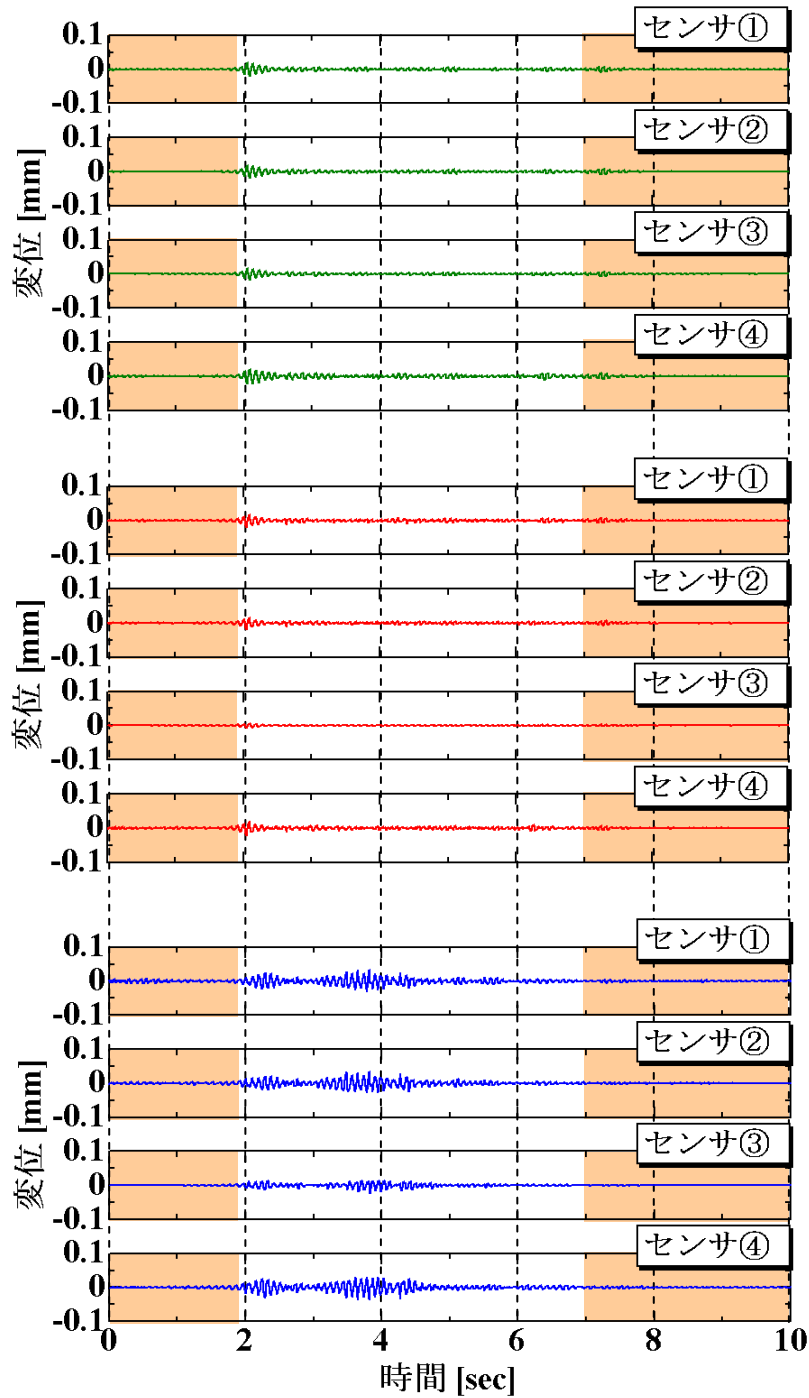


図5-4 溶接実験 (位置補正あり) での変位データ

これらの結果から、開発した位置補正機構を用いることで、SUS304 板材（板厚 1.5mm）の溶接長 150mm の直線的な隅肉溶接に対して、2mm 程度のズレであれば最小限の 2 点教示でティーチング手戻り工程を行うことなく、試作機による固体レーザー溶接作業を実現できた。焦点サイズが最小の 0.1mm 前後の条件であっても、位置補正により、ほぼ溶接箇所の付近にレーザーが照射されているため、“溶接後の磨き仕上げが不要”な溶接を行うことができた。しかし、一部の溶接箇所、産業ロボットの動作と位置補正機構による補正動作の同期が不完全なために溶接状態に乱れが発生しており、“溶接部の幅を 1mm 以下”を実現するためには、試作機の位置補正動作の機能向上が必要な結果となった。

Ⅲ. まとめ

- (1) 異なる溶接条件で作成した SUS304 板材の溶接サンプルについて、X 線 CT 装置による溶け込み具合の確認を行い、“溶接後の磨き仕上げを不要”の目標達成に必要な安定した溶接が行える最適条件を確立した。
- (2) 得られた最適条件で、試作機による位置補正ありの溶接実験を行い、直線動作で 2mm 程度のズレであれば、0.1mm 程度のレーザー焦点サイズでも位置補正によって、ほぼ安定した溶接作業が行えるようになり、“溶接後の磨き仕上げ不要”，“ティーチングへの手戻り工程なし”の目標を達成することができた。
- (3) 一部の溶接箇所、産業ロボットの動作と位置補正機構による補正動作の同期が不完全なために、溶接状態に乱れが発生しており、“溶接部の幅を 1mm 以下”を実現するためには、試作機の位置補正動作の機能を向上させる必要がある。

第6章 全体総括

6-1. 複数年の研究開発成果

本研究開発では、“経路移動の繰返し位置決め精度（±0.2mm）＞レーザー焦点サイズ（0.1mm以下）”である産業ロボットによる固体レーザー溶接作業を安定させ、製品の軽量化や生産コストの削減を実現することを目的とし、溶接作業の“高精度化”や、産業ロボットのティーチング（教示）作業の簡略化による溶接作業の“高速化”に関する開発を行った。最終目標として、ティーチング作業時間不要で、固体レーザー溶接作業を行える試作機を開発し、その試作機で“溶接部の幅1mm以下”、“ティーチング作業への手戻り工程なし”、“溶接後の磨き仕上げが不要”な溶接が安定して行える精度を実現することを目指した。

高精度化については、産業ロボットの動作から独立して作動し、レーザー出力部を組込み可能な「スチュワートプラットフォーム（Stewart Platform）型」パラレルリンク機構の位置補正機構を開発し、50mm/sまでのロボットアームの移動速度であれば、移動中に位置補正機構を動かした場合でも±0.1mmを越える振動が発生しないことを確認した。

高速化については、3D製品形状データから産業ロボットの溶接作業用動作データを抽出・生成するプログラムを開発し、生成データによって従来のティーチング作業を行うことなく、より短時間で産業ロボットを動作可能なことを確認した。

これら“高精度化”、“高速化”に関する開発技術を市販の産業ロボットに組込んだ試作機を開発した。試作機は、3D製品形状データから生成した動作データによって産業ロボットが溶接箇所に沿って動き、その溶接作業中に位置補正機構が溶接箇所への厳密な位置合わせを行うことで、固体レーザー溶接作業を安定させる仕組みとした。位置合わせに必要な溶接箇所の検出方法は、ラインレーザーによる2次元レーザーセンサーを用いて予め溶接箇所のデータを採取する方式で行った。

開発した試作機で溶接箇所への厳密な位置合わせを伴うティーチング作業を行わず、高精度な溶接作業が実現できるかについて、実験での検証を行った。実験では、長さ150mm、板厚1.5mmのステンレス平板をL字につき合わせた試料に対して、意図的に溶接経路をずらした状態でレーザー焦点サイズ0.1mmの隅肉溶接を行い、溶接状況の確認を行った。実験の結果、位置補正機構と産業ロボット動作の同期が不十分な箇所で、多少、溶接状態に乱れがあるものの、2mm程度のズレであれば位置補正を行い溶接作業が行えることを確認した。

以上のことから、開発した試作機で「直線動作」の固体レーザー溶接作業に関する“溶接後の磨き仕上げが不要”、“ティーチング作業への手戻り工程なし”の目標は達成できたが、“溶接部の幅1mm以下”とするための位置補正機構と産業ロボット動作の同期や、「直線動作」以外の動きも含めた、より複雑な溶接形状に対応するための課題が残る結果となった。

6-2. 研究開発後の課題・事業化展開

I. 研究開発後の課題

研究開発後の課題として、以下の2点がある。

- ・位置補正機構と産業ロボット動作の同期精度の向上
- ・複雑な溶接形状への対応

各課題への具体的な対応は以下の通りとなる。

I-1. 位置補正機構と産業ロボット動作の同期精度の向上

同期精度の向上は、産業ロボットの加減速動作に合わせて、位置補正機構に補正データを送り込むタイミングの調整によって行う予定である。調整にあたっては、予め2次元レーザーセンサーでデータ取り込みを行う際の溶接経路移動中の経過時間とデータ取得時間の対応関係と、実際に補正データを使ったテスト溶接サンプルの仕上がり状況を比較することによって、より最適な条件に近づけることを考えている。

また、別の方法として、位置補正に必要な位置検出自体もリアルタイムで行う方法も考えられる。この手法の1つとして、レーザー出力部に組み込まれたCCDカメラを利用した溶接箇所近傍の画像処理によるリアルタイムでの位置検出を試みたが、対象物の材質や加工状態による輝度のばらつきが大きく、安定して位置検出を行える輝度を持った可視化画像が得られなかった。これについては、CCDカメラの光源により光量の大きい光源を使用することや、画像処理のフィルター条件の調整などによって、位置検出の安定を図る予定である。

I-2. 複雑な溶接形状への対応

より複雑な溶接形状への対応には、補正動作の機能向上と、製品内部など入り組んだ箇所への対応の必要がある。

補正動作の機能向上は、円動作などでの位置補正動作の確認と、3次元的な動きの精度を向上させるための高さ位置検出機能の追加を行う予定である。前者については、現状のシステムでも、円を多直線近似させる動きである程度、追従させることは可能であるが、より滑らかな円形状の溶接を行うために、産業ロボットの円弧補間動作での検証を行いたいと考えている。後者については、レーザーセンサーを用いた高さの検出機能の追加を考えている。

入り組んだ箇所への対応は、位置補正機構の小型化が必要である。今回開発したパラレルリンク型については、レーザー出力部自体が小型化しなければ機構部の小型化は難しいため、補正動作の方向を限定した簡易タイプの位置補正機構の利用を考えている。実際に開発システムを製造現場に導入する際に、加工作業の内容に合わせて、提案できる位置補正機構の種類を増やすことで、より汎用性のあるシステム構築が可能である。

II. 事業化展開

開発成果の事業化は、“開発システムの製品化”と“開発システムを用いた部品加工”の2つの方向性で進めていく予定である。

II-1. 開発システムの製品化

提案書の事業化計画で挙げている内容であるが、製品としては、産業ロボットのメーカーと連携したロボットを含めたシステムとしての販売と、既存ロボットの機能追加によるシステムの販売を考えている。まずは直線動作主体の溶接作業を行っている製缶業のメーカーに対して、デモンストレーションを行い、開発システムの売り込みを行っていきたいと考えている。デモで得られた問題点を改善することで、試作機のシステムとしての完成度を高めるとともに、残

課題に関する対応を行い、試作機の補正動作などの向上を図る予定である。

また、開発システムは、レーザー溶接以外にも利用が可能なため、塗装、バリ取りなどの用途についても売り込みを行っていきたい。これらの用途では、レーザー溶接ほど厳密な位置補正は必要でないため、開発成果の“ティーチングレス機能”のみのシステムや、簡易の位置補正機構によるシステムでもニーズに適合する可能性があると考えられる。

II-2. 開発システムを用いた部品加工

現状の試作機では、ティーチングレス機能のみで対応可能な直線主体の製品あれば溶接を行うことが可能なため、これに適合する半導体製造装置や光学機器、熱交換器などの外装品の部品加工を行い、対応する川下企業への納入を進めることで、開発システムの有用性の積極的なアピールを行っていきたい。対象製品としては、研究開発で主対象としていたステンレス製品だけでなく、TIG溶接などでは溶接困難な薄肉のアルミ合金を用いた製品に関する部品加工も行っていく予定である。

また、上記の課題に対応した試作機の改良を進めれば、直線主体の外装品だけでなく、R面などの曲面を含んだカバー部品、特殊形状の配管・ダクト部品や、長尺品などの部品加工も可能となるため、自動車関連や医療機器等の分野の川下企業への市場拡大の可能性があると考えている。

リサイクル適性 (A)

この印刷物は、印刷用の紙へ
リサイクルできます。