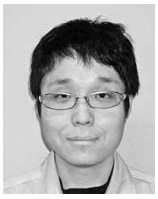
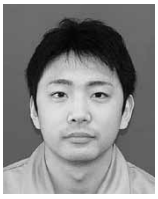
（技術資料）

上下部ブーム自動溶接システム

Automatic Welding System for Top-Bottom Booms of Crawler Crane





岡本　陽[*1] Akira OKAMOTO　飛田正俊[*1] Masatoshi HIDA　大根　努[*1] Tsutomu OONE　山崎雄幹[*1] Takemasa YAMASAKI　淺野達郎[*2] Tatsuro ASANO　小林俊文[*2] Toshifumi KOBAYASHI

An automatic welding system for upper and lower booms was developed at KOBELCO CRANES CO., LTD, to ensure a stable production capacity, high quality, and flexibility for varying work volumes. A technique was also developed for reducing the man-hours spent in teaching the weld lines of lattice pipes, as well as a sensor technology that enables copy welding by the reliable detection of the welding line, even during large-current welding that generates fumes and spatter in large amounts and when welding on a mirror surface.

まえがき＝クレーン事業のグローバル生産化に伴い，国内工場に対しては，マザー機能として世界最高の生産性（省人等）・品質を追及すること，また量の変化にも柔軟に対応することが事業課題になっている。また，海外工場においては，熟練溶接士に依存することなく国内同等の溶接品質を確保することも課題である。

これらの課題に対応するため当社では，従来，溶接士の高度な熟練技能に依存してきたラチスブーム（中間ブーム，上部ブーム，下部ブーム）溶接工程の自動化に取り組んできた。このうち，中間ブームの溶接に対しては既に自動化を完了し，稼働させている[1)～4)]。上下部ブームは，中間ブームに比べて継手数が多く，ロボットの教示時間が増加するなどの上下部ブーム特有の課題が多い。

このたび当社ではこれらの課題を克服し，上下部ブームに対しても溶接の自動化を実現させたので，本稿においてその概要を報告する。

1．ラチスブーム溶接工程自動化における問題点

クローラクレーンのブームは，**図1**に示すようにパイプをラチス配置にした構成（以下，ラチスブームという）としている。このブームは大きく分けて，上部，下部，および中間部という3種類のブームで構成される。パイプを組み合わせたラチス構造の構成部品の溶接は，肉厚の薄いパイプと厚いパイプが混在する溶接継手であり，かつ溶接線方向が上りから下りへと連続的に変化する鞍型溶接線となる。このため，溶接時のトーチ姿勢や運棒動作においては鞍型形状を倣（なら）う必要があり，高度な技能が求められる。

このラチスブームの溶接自動化には，長尺ブームの溶接中に生じる熱ひずみや組み付け誤差のため，溶接部位の開先位置を常時検出する倣い溶接が必須となる。鞍型の複雑形状を有する「パイプ＋パイプ」継手は形状が連続的に変化するため，通常のアーク倣い機能が使えない。これまでに当社は，中間ブーム溶接に対しては倣い機能を実現するために独自のラチスパイプ継手溶接線検出ロジックを開発し，**図2**（右）に示すように，市販の溶接用レンジセンサハードと組み合わせることによって溶接自動化を完了させ，実機稼働中である。対象となる中間ブームは，同じ交差角の継手形状を繰り返し有する平行ブームであり，全て「パイプ＋パイプ」継手である。このため，図2（左）に示すように，総継手数70（7ブーム×10継手）と教示作業の対象が比較的少なく，個別教示で対応できた。

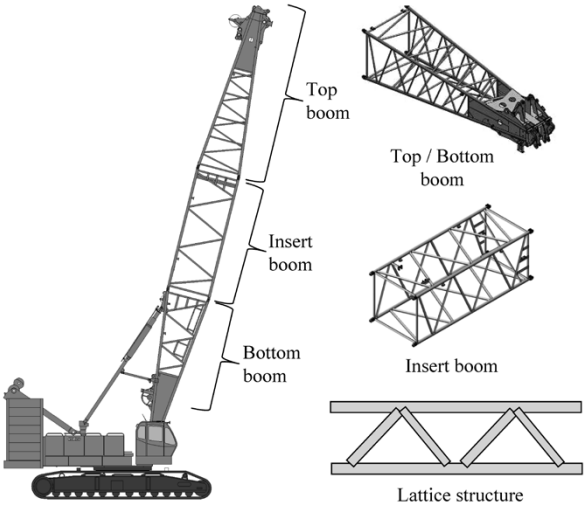


図1　クローラクレーンのブーム構成
Fig. 1　Construction of booms for crawler crane

一方，より設計種が多い上下部ブームにおいては，以下の課題があった（**表1**）。

[*1] 技術開発本部　生産システム研究所　[*2] コベルコクレーン株式会社　生産本部　生産企画部

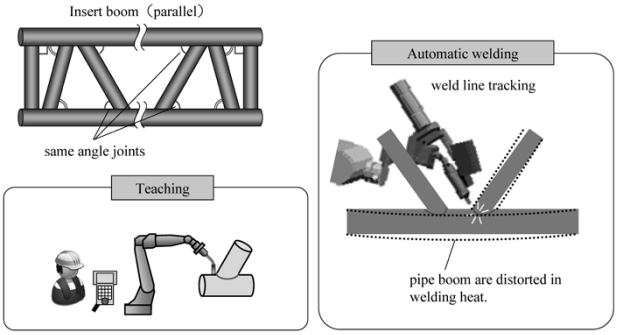


図 2 中間ブーム溶接自動化の取組状況
Fig. 2 Current status of automating process of insert boom

表 1 中間ブームと上下部ブームの違い
Table 1 Differences among booms (top, insert and bottom)

	Boom shape	Welded joint	Welding current	Number of booms	Number of joints
Insert boom	Parallel	Pipe＋Pipe 10joints/boom	180A	7	7×10=70
Top boom	Taper	Pipe＋Pipe 20joints/boom	180A	44	44×20=880
Bottom Boom		Pipe＋Plate Plate＋Plate	250A		

課題①継手形状が多く教示工数大：ブームがテーパ形状であることからパイプの交差角が全て異なり，「パイプ＋パイプ」継手が１機種でも平均20継手ある。このため，全44ブーム×20継手＝880継手もの個別の教示作業が必要となる。そのため，中間ブームに比べて教示工数が大幅に増加し，自動化の障害となっていた。

課題②溶接線の検出が困難：「パイプ＋パイプ」継手に加え，上下部ブーム特有の「パイプ＋板」，「板＋板」継手が存在する。板溶接部の開先は機械加工されて鏡面状態になっていることが多く，市販の溶接用レンジセンサではレーザ光が鏡面反射し，安定した溶接線検出ができないことが多い。また，ウィービングを伴う大電流溶接を行うため，スパッタ・ヒューム環境中でのウィービングにおいても安定した溶接位置検出が必要となる。

2．ラチスブーム教示データ作成支援技術

テーパ形状となっている上下部ブームの880種もの継手を対象とする教示作業には高度な溶接ノウハウが要求され，誰にでもできる作業ではない。熟練オペレータでも１継手１時間程度かかるため，全機種の教示作業が完了するのに何箇月もかかってしまう。そこで，幾何学的な情報から鞍型曲線を計算し，さらにオペレータノウハウを反映して教示データを作成する方法を開発した。また，コンピュータ内で作成した教示データを実機で修正することなく実行できるよう，ロボットごとに発生する機差を効率的に補正する方法を考案した。

2.1　オペレータノウハウを反映した教示データ作成方法

すでに自動化を実現した中間ブームにおいて，総継手数70に対して作成した教示データのデータベース化を行い，教示済み継手に対しては継手位置を平行移動して再利用した。一方，新規の継手に対しては，実機での修正作業のやりやすさを考慮して近似するデータを引き当て（複写し），ワイヤ先端位置がパイプに干渉しないよう少し離した位置に仮教示点を作成し，教示編集作業をサポートする仕組みを構築済みである。

中間ブームでは，継手のパイプ径の組み合わせや取り得る交差角の範囲などが限定的なため，上記のような簡便な方法で十分対応が可能であった。しかし，上下部ブームでは，パイプの継手形状を決定する幾何学的情報（メインパイプ直径，ラチスパイプ直径，交差角度）の組み合わせが多岐にわたっており，ほとんどが新規に作成することとなる。そのため，中間ブームでの近似データに対して修正する方法では，教示作業に何箇月もかかるという課題が判明していた。

パイプの溶接におけるトーチ先端の狙い位置は，パイプとパイプの継手となる鞍型曲線に対して一定量ずらした位置を狙う必要がある。また，溶接中に時々刻々と変化する開先角度や溶接方向（上り／下り）に応じてトーチ狙い角や電流，電圧，溶接速度，運棒動作を都度変更させる高度な熟練スキルが必要である。

そこで，ここで開発した教示データ作成方法では，パイプ継手の幾何学的情報に基づいて溶接線となる鞍型曲線を計算し，その曲線に対し適切な溶接狙い位置となるように半径方向外側にメインパイプに沿ってシフトできるようにした。このシフト量やシフト範囲は，**図 3**（左）に示すように，ラップ部分のビード管理が必要であるため，図３（右）に示すように，継手に応じてオペレータが調整できるよう指定可能とした。

また，熟練溶接士の溶接施工ノウハウ（狙い角度，電流，電圧，溶接速度など）については，まず**図 4** に示すように，蓄積された教示データのデータベースより「適切な教示データ」を引き当てる。つぎに，先に計算した鞍型曲線に対してシフト量が反映された狙い位置に，引き当てた教示データの狙い角度・電流・電圧・溶接速度などの溶接施工ノウハウを展開する方法で対応する。「適切な教示データ」の引き当て方法としては，パイプ直径

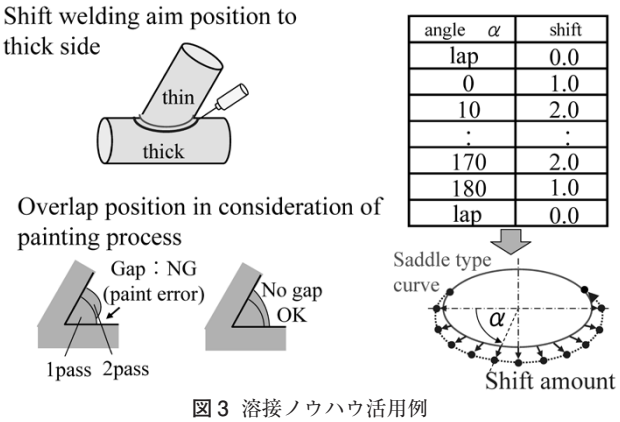


図 3 溶接ノウハウ活用例
Fig. 3 Utilization of welding know-how (example)

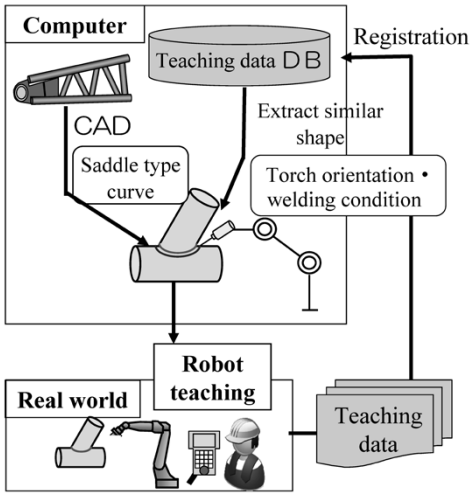


図4 パイプブーム教示データ作成支援
Fig. 4 Data-generation support for teaching robot welding pipe booms

比（ラチスパイプ直径／メインパイプ直径）や交差角度などの幾何学的な全データ対して，ロボットがパイプに干渉しないように空間フィルタを適用し，パイプ幾何学的情報の数値的な距離で、教示データを選定している。

全体の教示作業が進むにつれて蓄積される教示データが増え，引き当てられた教示データでの適合率が上がることによって，溶接施工に関する修正作業が徐々に低減されていく。教示作業時間の低減を目指して本手法の開発を行ってきたが，教示データが十分に蓄積された段階では動作確認と微修正のみで済むようになり，非熟練者でも教示作業が可能となるという副次的な効果も得られた。また，教示ノウハウそのものを抽出してルール化を行っているのではなく，ノウハウの含まれた教示データをデータベースに登録すればすぐに実際の教示に使用できるようにしていることが，本手法のメリットでもある。将来，技術革新などにより溶接施工方法が大幅に変更された場合でも，問題なく対応可能である。

2.2 ロボット機差の効率的な補正方法

前節で述べた方法によって，溶接施工ノウハウを反映する教示データが作成できるが，このデータをそのまま実機ロボットで実行することはできない。なぜなら，コンピュータ内の仮想世界のロボットと実機ロボットには機差（誤差）があり，そのずれ量を補正する必要があるためである。コンピュータ内で生成した教示プログラムを実機ロボットで再生すると数mm程度のずれが発生する。この原因として，ロボット関節の平行度，直交度，位置，およびロボットのリンク長などの設計値との誤差が大きな要因である（**図5**（左））。溶接線を倣う精度として±0.5mm以下を目標にしており，溶接用レンジセンサの分解能・精度などの動作時に発生する誤差を考慮すると，ロボットの機差による誤差の補正目標は±0.2mm以下程度に抑えることが必要となる。

ロボットの機差を補正する方法として，ロボット関節の上述の誤差要因であるリンクパラメータを導出する方法がある。しかし，リンクパラメータ以外の誤差要因（重力によるリンクのたわみ，ギヤのバックラッシュなど）もあり，ロボットの動作範囲空間の位置姿勢を変化させた場合の先端誤差は1mm以下に抑えるのは困難である。このため，精度0.2mmを実現するのは，各位置姿勢での誤差を直接計測し補正する方法が現実的である。

ロボットが持つ6自由度の動作空間に対して誤差を計測するのは現実的でない。そこで，パイプの溶接箇所がロボットから見て常に同じ位置になるように設備そのものの計画・設計段階から検討し，パイプ溶接時のロボットの動作領域を限定した。また，溶接トーチ周りの回転角は，溶接作業に影響を及ぼさない姿勢角であることから，この回転角は常に所定の値となるようにし，誤差として計測すべき姿勢角の自由度を減じた。このように，パイプを溶接するときに取り得る位置と姿勢の範囲を限定した空間にて発生する誤差を計測した。計測方法は，図5（右）に示したようなダイアルゲージ3個を直交に配置し，ロボット先端に球状の計測プローブを持たせ，2自由度（プローブ先端を極とする極座標系における迎角および水平角）の姿勢変化による先端ずれ量をする。この計測作業を，最大パイプの鞍型曲線がほぼ包含できる直方体領域（前後50mm×左右100mm×上下30mm）の8頂点で計測した（**図6**）。この空間内にて，計測した誤差により先端位置を補正した結果を図6（下）に示す。x，y，zとも目標であった誤差0.2mm以下に補正できることを示している。

先の方法で作成した教示データに対して補正を行うこ

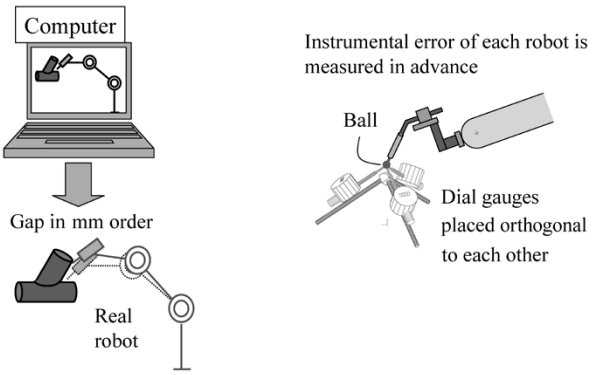


図5 ロボット機差の測定
Fig. 5 Measuring instrumental error of the robot

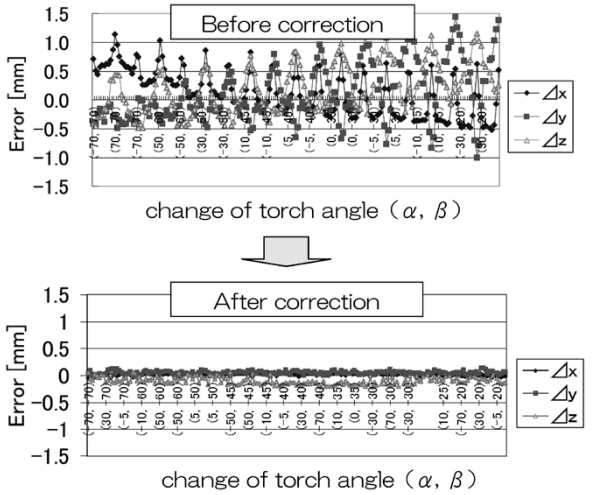


図6 ロボット機差補正の測定結果例
Fig. 6 Measuring the change of torch angle before and after error correction

とで，目標とする補正精度を達成した。その結果，作成した教示データの機差による誤差の修正は不要となった。さらに，ロボットの動作軌跡に関しては動作確認程度で対応できるようになり，実機での教示修正時間の大幅な短縮を行うことに成功した。

3．鏡面ワークや，ウィービングに対応した溶接位置検出技術

上下部ブーム特有の「パイプ＋板」，「板＋板」継手で鏡面状態を有する開先面に対して，レンジセンサのレーザ光を照射すると，多重反射が発生して溶接位置の検出が不安定になるという問題がある。正規の光切断線と多重反射光を分離可能な光学配置関係を特定し，センサ設計に反映すると共に，光切断線の連続性を考慮して正規の光切断線を抽出する画像処理手法を開発し，開先形状を安定して計測することができる溶接位置検出技術を開発した。

3.1　レーザ多重反射に対応したレンジセンサ

V形開先に対して，溶接ロボットアームの先にCCDカメラおよびレーザ投光器で構成された溶接用レンジセンサを**図7**に示す。開先継手に光切断光を照射し，カメラで撮影して三角測量の原理で開先継手までの距離や継手形状を計測する。本センサで溶接線を認識し，あらかじめ教示した位置を補正しながら倣い溶接を行う。**図8**（1）のように，錆や塗装など光が乱反射する拡散面状態の表面では多重反射は発生せず，正規の光切断線のみがはっきり観測される。これに対し，図8（2）のような機械加工などで光が正反射する鏡面状態では，レーザ光の多重反射が発生し，正規の光切断線との分離が難しくなる。

このように上下部ブームの板と板の継手では，検出すべき正規の光切断線と多重反射成分が混在し，溶接線位置の安定した検出が困難である。市販の溶接用レンジセンサでは，光学フィルタや画像処理の工夫によって正規の光切断線を抽出することが一般的であるが，検出には限界がある。そこで当社は，独自の溶接線位置検出技術を組み込んだ溶接用レンジセンサを開発した。

3.1.1　光切断線の映像シミュレーション

図9は溶接用レンジセンサの構成である。図に示すように，開先角度θ（すみ肉継手の場合は$\theta=90$度）の二等分線を示すラインと，溶接線で構成される平面上にカメラとレーザ投光器を配置し，溶接線に対して直交するようにレーザスリット光を照射する。レーザ投光角度をα，カメラ角度をβとする。

両部材とも拡散面の場合は，レーザスリット光の多重反射が発生しないため，カメラで撮像した画像は**図10**（1）のようになる。

片側の部材が拡散面，もう片側の部材が鏡面の場合は，図10（2）のように多重反射（二次反射）のレーザスリット2本が現れる。一本目は，レーザスリット光Aが鏡面である部材Bに写り込んだスリット光A'である。このレーザスリット光A'は，鏡面に映り込んだレーザスリット光Aを見ているため，レーザスリット光A'の位置は見る位置，すなわちカメラ位置によって変化する。二本目は，レーザスリット光Bが，鏡面である部材Bで正反射し，拡散面である部材Aに照射されたレーザスリット光B"である。このレーザスリット光B"は，部材Aで乱反射しているため，カメラがどの位置にあっても見る位置は変化しない。

つぎに，両部材とも鏡面の場合は，図10（3）のようになり，二次反射のレーザスリット光は合計4本現れる。鏡面部材に写り込んだレーザスリット光A'，レーザスリット光B'と，鏡面部材で正反射したレーザスリット光A"，レーザスリット光B"である。

図10の（1），（2），（3）は，あるカメラ角度がβのときの見え方を示したが，カメラ角度βを増やしていく

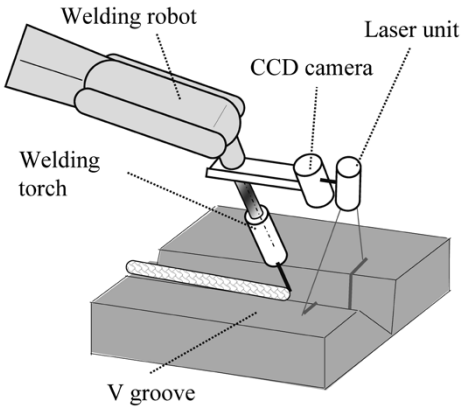
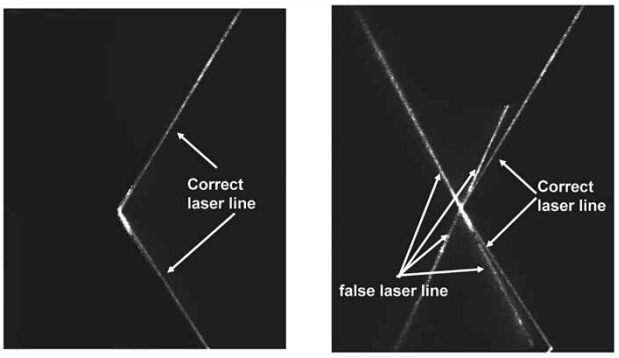


図7　レンジセンサ付き溶接用ロボット
Fig. 7　Welding robot with range sensor



(1) Scattering surface on v-groove　(2)Reflection surface on v-groove

図8　光切断画像の例
Fig. 8　Light-section images (examples)

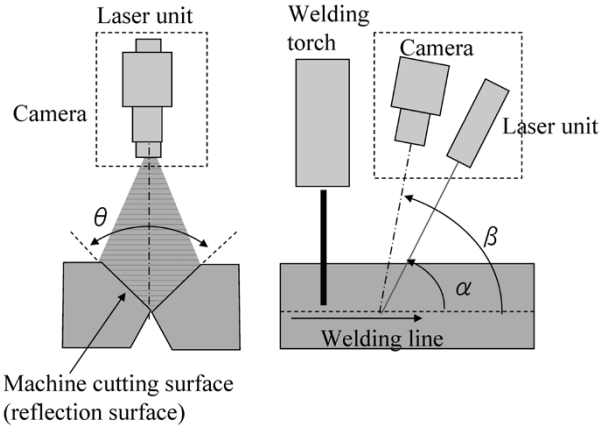


図9　溶接用レンジセンサの構成
Fig. 9　Configuration of range sensor for welding

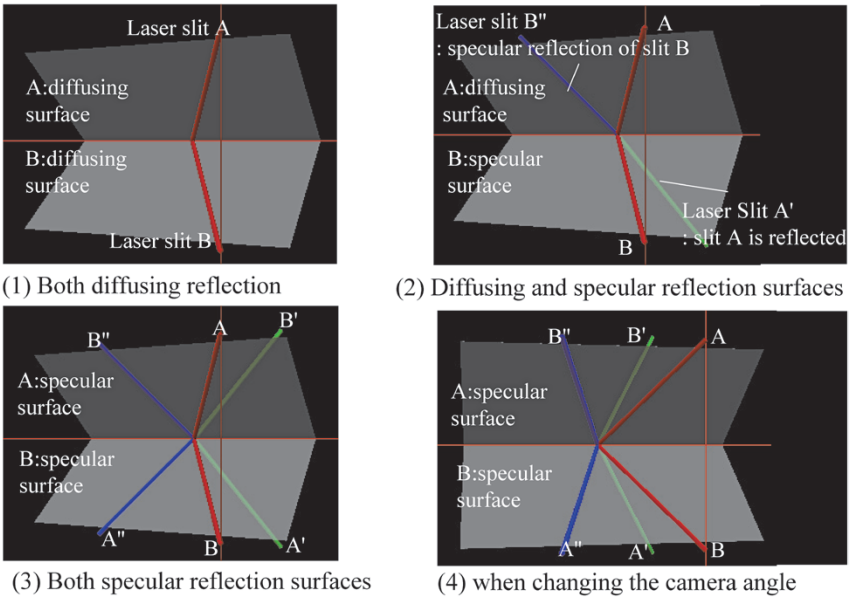


図10 レーザ二次反射光の画像内の見え方
Fig.10 Appearance of secondary reflection image

と,「スリット光A，スリット光B」と,「スリット光A',スリットB'」の位置が逆転する。図10（4）はそのときの見え方を示す。

このように，開先角度θの溶接継手を対象に，レーザ投光角度α，カメラ角度βの溶接用レンジセンサを配置したとき，カメラで観測される二次反射までの光切断線はシミュレーションにより算出できる。θを50度，αを60度としたときのカメラ角度βと，画像中心からの見かけ上の角度γの関係をグラフで示すと**図11**上のようになる。グラフにプロットされた，赤色の真の光切断線と，分離の難しい緑色と青色の多重反射成分の写り込みを分離するためには，例えばβ＝70度のカメラ配置をしても分離ができない。また，筐体（きょうたい）サイズの小型化と溶接トーチなどの機器の制約によりカメラβは小さくできない。つまり，真の光切断線の分離のしやすさと，レンジセンサの小型化の観点から，最適なカメラ角度βは80度であることがわかる。当社は，対象となる開先角度θを約50度と限定することで，画像内における真の光切断線と多重反射成分を分離しやすい配置関係を見出した。すなわち，対象継手を限定すれば，レーザ多重反射が起きにくいセンサの配置が決まる。この配置関係を基に溶接用レンジセンサを設計し，鏡面状態でも溶接線位置を安定して検出することが可能となった。

3.2　センサ保護窓の汚染対策

大電流溶接のためスパッタ（溶接中の飛散金属）やヒューム（金属蒸気）が大量に発生する。これにより，レーザ光を照射・受光しているセンサの保護窓は汚れるため，定期的に交換する必要がある。保護窓の交換頻度が多いと現場作業員にとっても負担が大きい。保護窓の材質により汚れ度合は変化するため，ここでは石英ガラス，アクリル板，およびポリカーボネートを保護窓の材質として溶接を行い，汚れ度合を比較した。溶接電流250Aで50分の溶接を行ったときの保護窓の汚れを**図12**（1）に示す。ポリカーボネートが比較的，汚れを付着

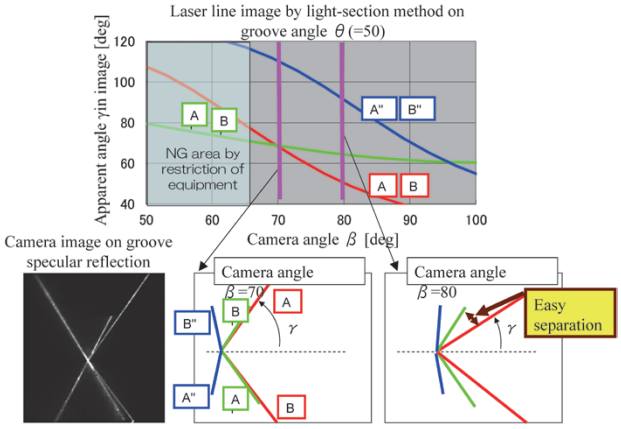


図11 光切断線における画像内の見え方変化
Fig.11 Appearance change of image in light-section method

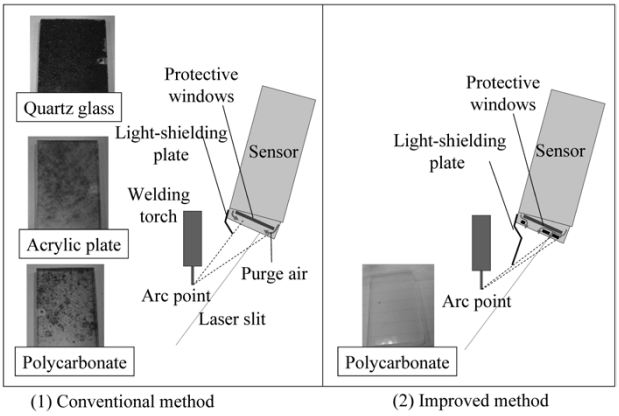


図12 保護窓の汚染対策
Fig.12 Dirt protection by protective window

させていないことがわかる。さらに，溶接アーク光およびスパッタが直接，保護窓に当たらないように遮光板を伸ばし，かつ，狭隘（きょうあい）部でも遮光板がパイプにぶつからないように設計を工夫した場合が図12（2）である。（2）では保護窓はほとんど汚れていないことがわかる。

3.3 ウィービングに対応した光切断線検出技術

スパッタ発生時の溶接の様子（**図13**（1））をレンジセンサ内のカメラで撮像すると，レーザ光による光切断線と同様に，高輝度のため画像に写り込んで光切断線との分離ができず，安定して形状計測ができない問題がある（図13（2））。撮像画像中のスパッタは光切断線より高速に移動することから，スパッタによる誤検出を低減させる方法として時系列画像における輝度変化に着目した。

連続する時系列画像K枚をカメラで撮像したとき，その画像輝度を$Image_1(i,j), \ldots, Image_K(i,j)$とする。$i, j$は画像（サイズ：$M \times N$ピクセル）の座標である。$K$枚の画像の平均輝度$Image_0(i,j)$は式（1）で表される。

$$Image_0(i,j) = (Image_1(i,j) + \cdots + Image_K(i,j))/K \quad \cdots (1)$$

時系列画像の輝度を平均することで高速に移動するスパッタの輝度は下がる。一方，溶接継手の形状は大きく変化しないことを前提とすると，照射している光切断線の輝度は平均しても変化がない。そこで，生成された$Image_0(i,j)$を使って光切断線を抽出することにした。**図14**に$K=3$のときの模式図を示す。

しかし，輝度を画像平均するにあたっては，ウィービング時などのセンサが揺れているときは光切断線の画像もぶれ，安定して検出できない問題がある。そこで，スパッタ飛散方向とウィービング方向が直交していることに着目し，ウィービング溶接時に画像が左右に揺動しても，ウィービング方向に撮像画像を照合することで，より安定して開先形状を計測することができる溶接位置検出技術を開発した。

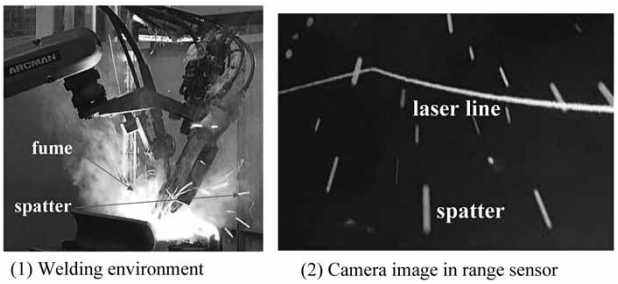


図13 溶接中のスパッタおよびヒューム
Fig.13 Spatter and fume during welding

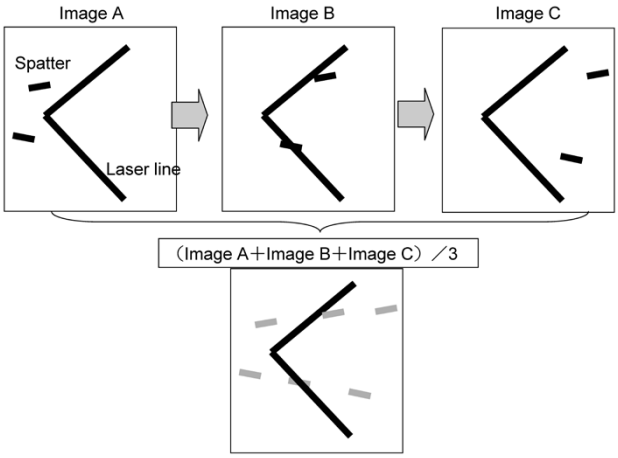


図14 スパッタ環境下での溶接線検出ロジック
Fig.14 Welding-position-detection logic in spatter environment

画像照合に使用する画像間類似度としてSAD（Sum of Absolute Difference）を用いた。$Image_1(i,j)$を基準にすると，時系列画像$Image_2(i,j)$，…，$Image_K(i,j)$のSADは以下のように表される。

$$\left.\begin{aligned} SAD_2 &= \sum_{j=0}^{M-1}\sum_{i=0}^{N-1} |Image_2(i,j-s_2) - Image_1(i,j)| \\ SAD_3 &= \sum_{j=0}^{M-1}\sum_{i=0}^{N-1} |Image_3(i,j-s_3) - Image_1(i,j)| \\ &\cdots \\ SAD_K &= \sum_{j=0}^{M-1}\sum_{i=0}^{N-1} |Image_K(i,j-s_K) - Image_1(i,j)| \end{aligned}\right\} \cdots (2)$$

ウィービング方向は決まっていることが多いので，画像照合のための画像シフト方向も限定することができる。これを式（2）中ではS_2，…，S_Kで表現している。SADが最も小さくなるS_2，…，S_Kを探索し，各画像をシフトすることで，$Image_1(i,j)$，…，$Image_K(i,j)$の光切断の位置を$Image_1(i,j)$とほぼ一致させることができ，式（1）にて$Image_0(i,j)$を計算できる。$K=3$のときの上述のロジックを模式図で示したのが**図15**である。

なお，全ての画素についてSADを計算していると処理時間が遅くなるため，ここでは光切断線を抽出して光切断線領域のみを対象にSADを計算している。これによって計算領域を限定し，計算時間の短縮を図ることによって実時間倣い溶接を実現した。

実験結果例を**図16**に示す。対象継手は水平すみ肉，溶接条件は電流250A，電圧96%，速度40cm/minである。ウィービングしても形状検出は100%であった。

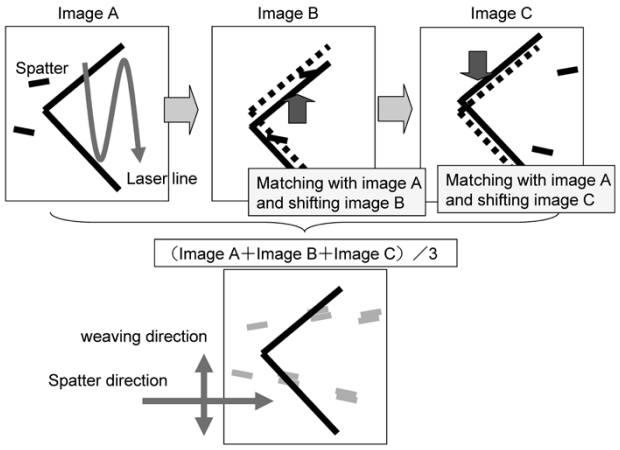


図15 ウィービング時の溶接線検出ロジック
Fig.15 Logic for detecting welding position during weaving

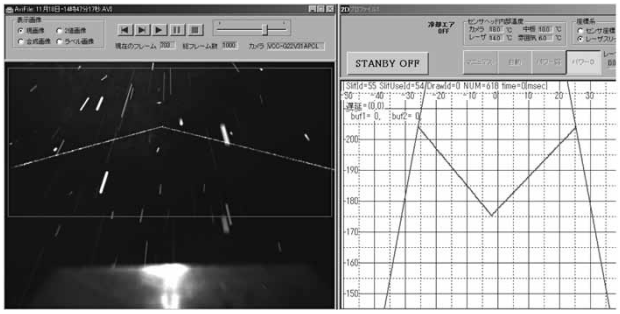


図16 溶接倣い実験結果例
Fig.16 Example of sensor tracking

4. 自動溶接結果

コベルコクレーン株式会社および溶接事業部門の協力のもと，溶接ロボット，ポジショナ，スライダ，倣いセンサなどで構成される上下部ブーム自動溶接システムをコベルコクレーン工場に構築した（**図17**（1））。

本システム構築により，熟練溶接士のノウハウが反映された完成度の高い教示データが作成できるようになった。また，実機に発生するロボット機差を補正することにより，実機での教示作業時間が1/2に短縮できた。さらに，非熟練溶接士にも熟練溶接士同等の教示データが作成可能となり，要員確保が容易になったためモデルチェンジ時の教示時間短縮が可能となった。

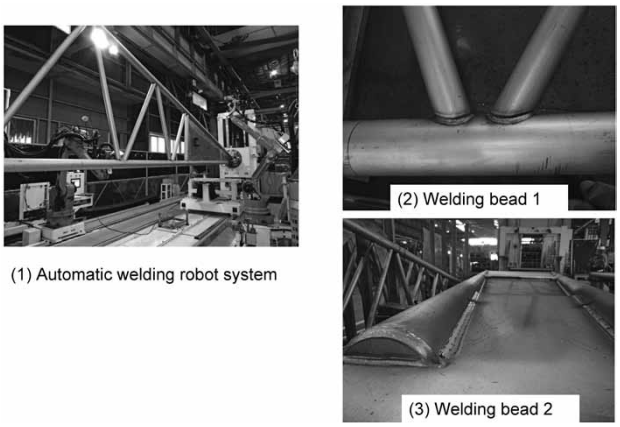


図17 上下部ブーム自動溶接システムの様子
Fig.17 Automatic welding system and welding beads

また，上下部ブーム特有の検出困難な溶接線に対し，鏡面ワークや，スパッタ，ヒュームなどの悪環境中でのウィービングにも対応した溶接位置検出技術の実現により，倣い溶接が可能となった。

これらに加え，上下部ブームで必須の板部溶接のワークずれを検出する新技術の開発や多層盛り溶接の倣い溶接対応を行い，安定・高品位な溶接が実現できる自動化を達成し，先端の溶接倣い精度0.5mm以下を実現，安定した溶接を行うことができた。図17（2），（3）に本システムにて実際に溶接を行ったときの溶接外観を示す。

むすび＝上下部ブームの溶接自動化を達成したことで，今後，パイプブームモデルチェンジ時においても教示工数が低減でき，生産ラインの垂直立上げが可能となる。また，海外工場においても今後生産量が増大したときに，熟練溶接士に代わり，溶接自動化のコア技術をブラックボックス化した上で，溶接自動化が実現でき，海外での需要に応じた迅速で最適な生産体制構築や溶接品質向上に貢献できる。

参　考　文　献

1） 飛田正俊ほか. R&D神戸製鋼技報. 2007, Vol.57, No.1, p.86-89.
2） 飛田正俊ほか. 第22回日本ロボット学会学術講演会. 日本ロボット学会, 2004, p.227.
3） 飛田正俊ほか. 月刊 溶接技術2009年 9 月号. 産報出版.
4） 山下俊治ほか. R&D神戸製鋼技報. 2012, Vol.62, No.1, p.87-90.