

CPSを活用した製造プロセスの自律制御システム

CPS-Based Autonomous Control Systems to Achieve Optimal Manufacturing Processes

坂井 哲男 SAKAI Tetsuo 織田 達広 ODA Tatsuhiko

東芝グループは、生産性向上を担ってきた熟練者に代わり、CPS（サイバーフィジカルシステム）技術を活用して様々な製造プロセスを自律制御するシステムを開発している。これらのシステムは、加工点のモニタリングから得た情報をAI・物理モデル・プロセス知識を用いて分析し、製造設備にフィードバックして制御を行う。

レーザー溶接では、加工点画像からAIが抽出した特徴量に応じて溶接条件を制御することで、安定した溶接を実現した。成膜プロセスでは、装置へ流入する気流のセンシングデータを基に装置内部の粒子数や気流の速度ベクトルを予測し、膜厚分布を均一に制御できた。

The Toshiba Group is engaged in the development of autonomous control systems for manufacturing processes at sites utilizing cyber-physical system (CPS) technologies as an alternative to the skilled engineers that have been crucial for improving productivity up to now. These CPS-based systems can automatically control individual manufacturing processes by means of the following functions: (1) monitoring of the processing area; (2) evaluation of the monitoring information using artificial intelligence (AI) technologies, physical models, and process knowledge; and (3) feedback of the evaluation results to the manufacturing equipment.

As part of this work, we have developed a laser welding system that realizes stable welding processes by controlling welding parameters in accordance with feature quantities extracted by AI from focal point images. We have also developed a film deposition processing system that makes it possible to uniformly control the film thickness distribution by predicting the number of particles and the airflow velocity vector in the equipment based on inflowing air sensing data.

1. まえがき

消費者ニーズの多様化や、予測困難な需要変動、海外生産の拡大などを背景に、東芝グループは、IT（情報技術）の活用でモノづくりの知見やノウハウなどの暗黙知を形式知化してデジタル化する“デジタルマニュファクチャリング”⁽¹⁾を提唱し、仮想設計・製造や設計・生産システムの高度化を進めてきた。近年では、少子高齢化による人手不足が深刻化する一方で、IoT（Internet of Things）やAI技術が飛躍的に進歩し、モノづくりの分野でも活用が進んでいる。

東芝グループは、CPSを活用し、これまでは熟練者に頼っていた製造プロセスの制御を自動化・自律化することで、スキルレス化・省人化とともに、超安定・高品質プロセスの実現や、試作回数の削減、設備稼働率の向上などを目指している。更に、昨今の新型コロナウイルスの時代におけるテレワークなど、新しい働き方に対応する技術としても開発・実用化を加速している。ここでは、CPSを活用して成形や、接合、成膜などの製造プロセスを自律制御する技術について述べる。

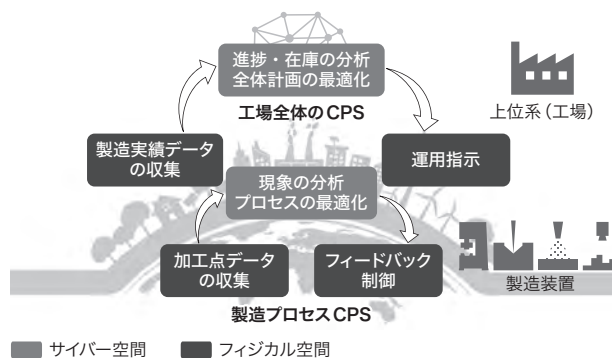


図1. 製造プロセスCPSの概要

フィジカル空間で収集した加工点データをサイバー空間で分析し、製造装置を自律制御するシステムで、工場全体のCPSと結合されてモノづくり力を最大化する。

Overview of CPS-based systems for manufacturing processes at site

2. 製造プロセスCPSの概要

2.1 製造プロセスCPSの構成

“製造プロセスCPS”とは、図1のように、AIや、物理モデル、製造プロセス知識などを用いて加工点のモニタリングデータを分析し、製造設備にフィードバックして自律制御す

るシステムである。製造設備の小さなCPSは、現場で収集したデータに基づいて全体を最適制御・運用する大きな“工場全体のCPS”のループと結合され、相互に協調して高い性能を発揮する。

2.2 製造プロセスCPSの例

表1に示すような開発を進めている。

レーザー溶接のCPSでは、加工点の画像からAIを用いて溶接の特徴量を抽出し、これを実験とシミュレーションで作成したデータベース(DB)と照合して最適な溶接条件を算出する。そして、算出した溶接条件をリアルタイムで装置へフィードバックし、安定な溶接を実現している。

成膜のCPSでは、装置へ流入する気流をモニタリングし、あらかじめ構築したDBを参照して装置内部の気流の速度ベクトルを予測する。この値を流入条件にフィードバックし、基板上の膜厚分布を制御して品質の安定化を図る。

射出成形のCPSでは、成形機や金型から温度・圧力・位置・速度などのデータをセンシングし、品質との相関をAIで分析する。次に、シミュレーションで不良に関わる現象を予測して最適化した成形パラメーターを装置にフィードバックし、品質や歩留まりの向上を目指している。

プレス加工のCPSでは、金型設計時は予測が難しい突発的な現象に対し、金型に設置した振動センサーなどのデータを活用してAIで異常検知や長期間の履歴分析を行い、出来栄を予測する。稼働時は、適切な金型メンテナンス時期を装置に通知し、品質・稼働率の向上とコスト低減を図る。

接合のCPSでは、超音波などの接合装置から、荷重や位置などのプロセス信号データ、及び部材などのワーク情報を収集・解析し、不良やその予兆を検知する。加工点は、部材や、ツール、治具などの膨大な組み合わせの影響を受けるため、AIを用いて特徴量を抽出し、接合工程だけでなく前工程も含めたプロセス全体を接合現象モデルに基づいて制御する。

これらのうち、開発が先行しているレーザー溶接と成膜のCPSについて、以下で詳しく述べる。

表1. 製造プロセスCPSの例

Examples of targeted manufacturing processes for CPS-based systems

プロセス	開発技術	効果
レーザー溶接	加工点AIモニタリング・シミュレーションDBで自律制御	プロセス安定化
成膜	気流モニタリング・AI予測で膜厚分布制御	歩留まり・品質向上
射出成形	成形機、金型データのAI分析・現象予測で自動制御	品質・歩留まり向上
プレス加工	金型振動データのAI分析・寿命予測でメンテナンス適正化	稼働率向上
接合	加工点信号の相関分析・現象モデルで他工程制御	歩留まり向上

3. レーザー溶接のCPS

溶接状態を高速度カメラでモニタリングし、抽出した特徴量を、あらかじめ実験とシミュレーションで作成したDBと照合することで、溶接条件をリアルタイムで装置へフィードバックするシステムである(図2)。“溶接状態の良否判定の根拠となるレーザー溶接モデル”, “加工点を明瞭に観測できるモニタリング技術”, “溶接状態の特徴量を自動抽出するAIネットワーク”の三つが、重要な要素技術となる。

3.1 レーザー溶接のモデル化

キーホール型溶接の複雑な現象の設定因子を調整する前段階として、熱伝導型溶接を対象として開発を進めた(図3)。モデル化では、温度によって変わる光の吸収率や、金属蒸気の圧力・温度、金属蒸気と溶融池の間の熱伝達率など複雑な現象を考慮する必要がある。これらのパ

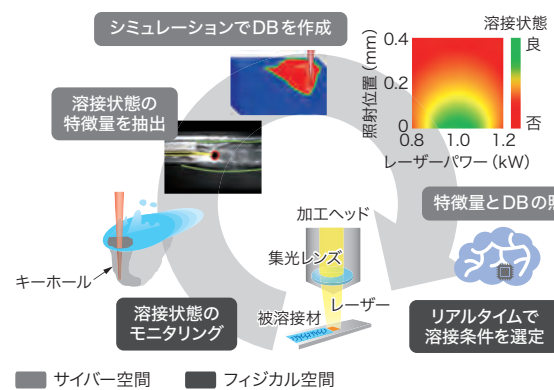


図2. レーザー溶接のCPSの概要

溶接状態をモニタリングし、AIで抽出した特徴量を、あらかじめ作成したDBと照合することで、リアルタイムで溶接条件を選定し装置を制御する。

Overview of CPS-based laser welding system

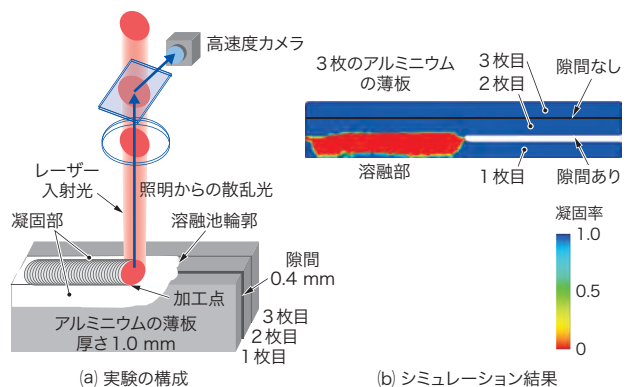


図3. レーザー溶接のモデル化

熱伝導型溶接の計算モデルを開発し、アルミニウム薄板の結束溶接において、隙間を埋める様子をシミュレーションで再現できた。

Modeling of laser welding process

ラメーターを使って現象をモデル化し熱流体解析を行った。図3(a)に示すように、被溶接部は1.0 mm厚の純アルミニウム板を3枚重ね、そのうち2枚の間に0.4 mmの隙間を設けた。この隙間を埋めるように溶接を行い、3枚目のアルミニウム板は溶接されないような条件を良好とし、それ以外は不良とした。

図3(b)にシミュレーション結果を示す。隙間を埋める様子を再現して実際の現象と一致することが確認でき、加工点の特徴量抽出やDBの良否条件の境界領域におけるフィードバックの判定根拠として採用した^{(2), (3)}。

3.2 モニタリングと特徴量の抽出

実験とシミュレーションの結果から、レーザー照射位置、溶融池輪郭、隙間のエッジ、及びビード幅（凝固部の幅）が、プロセスの安定性に強く影響する特徴量であることを確認した。これらを定量的に捉えるため、加工ヘッドに同軸となるように設置した高速度カメラで加工点を観測するモニタリングシステムを試作した。溶接中は、プラズマ発光やレーザー反射光の影響で視認性が低下するため、カメラの感度が高く、プラズマ発光強度が比較的低い波長域の光源として青色LED（発光ダイオード）を選定し、加工点を照明した。

溶接中に発生するヒューム（物質の加熱や昇華で生じる粉体）や加工表面の変動で画像の見え方が変わると、画像処理のアルゴリズムや設定パラメータの修正が必要となり、汎用性が低くなる。そこで、正解となる特徴量を画像に描き、原画像とセットで教師データとしてAIに学習させることで、安定して特徴量を抽出できる技術を開発した（図4(a)）。また、様々な状況での画像変化を想定し、撮像データ以外に、画像の回転や、拡大・縮小、コントラスト

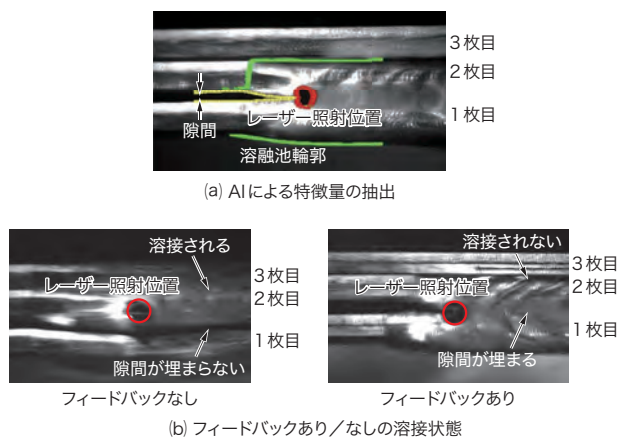


図4. AIによる特徴量の抽出とフィードバック制御の効果

AIで抽出した溶融池輪郭の位置を、DBと照合して溶接条件にフィードバックすることで、適切な位置で溶接できることを確認した。

Feature quantities extracted by AI and effect of their feedback control

などデータを拡張した学習で、従来よりも外乱やばらつきに強い良否判定ができる⁽⁴⁾。

3.3 溶接条件のフィードバック

実験とシミュレーションで作成したDBと現在の加工状況を照らし合わせ、溶接条件をリアルタイムで装置へフィードバックするシステムを構築した。検証のため、溶接条件を1枚目と2枚目のアルミニウム板が接合されないように設定し、最適な条件へ戻るかを試した。図4(b)のように、フィードバックなしでは接合されない状態で溶接が続くが、フィードバックありではレーザーを正しい照射位置へ戻して溶接できており、CPSが機能していることを確認した。

4. 成膜のCPS

4.1 成膜プロセスとCPS

薄膜の膜厚分布は、薄膜を利用した製品の特性や歩留りに影響する。したがって、薄膜形成に用いられる成膜プロセスでは、基板上的膜厚分布を制御することが重要である。粒子を混合した気流を装置内に流し込み、基板やシートへ粉体を堆積させて薄膜を形成する粉体塗布プロセスを対象にCPS化を進めている。図5に示すように、装置へ流入する気流の流量や圧力をモニタリングし、あらかじめ構築したDBを参照することで装置内部の気流の速度ベクトルを予測する。この値を基に流入条件を調整することで、基板上的膜厚分布をほぼリアルタイムで制御することが可能になる。これにより、製造上の環境要因によるばらつきや外乱の影響を低減し、均一に成膜できる。

4.2 成膜プロセスのデジタル化

サイバー空間で成膜プロセスの状態を分析するには、装置内で起こっている現象をデジタルデータに変換する必要

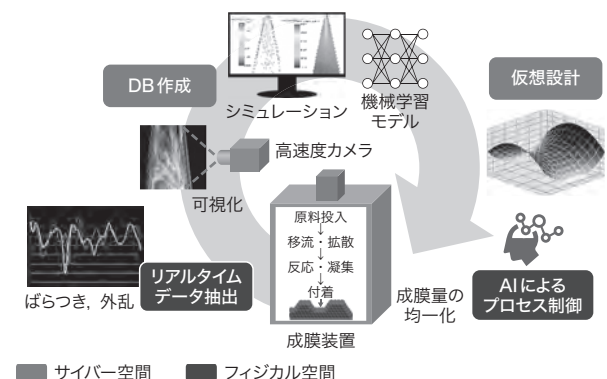


図5. 成膜のCPSの概要

装置へ流入する気流の流量や圧力をモニタリングし、あらかじめ構築したDBを参照して速度ベクトルを予測し、流入条件にフィードバックして基板上的膜厚分布を制御する。

Overview of CPS-based film deposition processing system

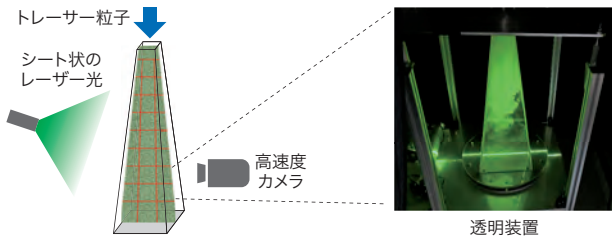


図6. PIVによる気流の可視化

シート状のレーザー光を透明装置内部のトレーサー粒子に照射し、高速度カメラで撮像することで気流を可視化する。

Visualization of airflow using particle image velocimetry

がある。一方、一般に成膜装置は金属材料で覆われており、成膜途中の状態を外部から直接モニタリングすることは難しい。そこで、あらかじめアクリルなどの透明素材で作成した疑似装置に対し、粒子画像流速計測法(PIV: Particle Image Velocimetry)を用いて気流を可視化して装置内部の速度ベクトルをデジタルデータ化し、DBを構築した。PIVは、図6に示すように、シート状のレーザー光を照射して流体に追従するトレーサー粒子を可視化し、高速度カメラで撮像することで、フレーム間の変化から画像解析で任意の位置における粒子の速度ベクトルを求める手法である。

4.3 AIによる気流予測モデル

サイバー空間では、センシングデータを基に速度ベクトルや粒子数を予測し、膜厚分布を最適化する。PIVで構築したDBに対し、まず、装置の計測機器から得た流量や圧力

のセンシングデータと装置内部の速度ベクトルの相関をAIでモデル化する。そして更に、速度ベクトルと、基板の中央及び左右のエリアに到達する粒子数データとの相関をAIでモデル化することで、基板上的膜厚分布を即時に判断できる仕組みを構築した。図7に、ニューラルネットワークを用い、成膜中における装置内部の粒子速度や基板中央に到達する粒子数を予測した結果を示す。

この予測モデルを用いてセンシングデータから基板上的膜厚分布を判断し、流入口での気流の状態へフィードバックすることで膜厚分布を制御できる。このCPSは、粉体塗布だけでなく、インクジェットやエレクトロスピニング⁽⁵⁾などのプロセスにも適用でき、電池や電子デバイスの製造プロセス開発期間の短縮や、試作回数の削減、プロセス安定化・品質向上などへの寄与を目指している。

5. あとがき

レーザー溶接や、成膜、射出成形、プレス加工、接合などを対象とする製造プロセスCPSの構築について述べた。加工点の現象を可視化し、製造プロセスの知見やAIを活用して導き出した制御アルゴリズムを製造装置に組み込むことで、製造装置は自律して高い性能を発揮できる。装置への実装が完了したレーザー溶接のCPSに続き、ほかの製造設備に対してもCPSを展開し、モノづくり現場の能力の最大化を図っていく。

文 献

- (1) 清野武寿, 池田義雄. デジタルマニュファクチャリングによるモノづくり変革. 東芝レビュー. 2003, **58**, 7, p.2-6.
- (2) 坂井哲男, ほか. レーザー溶接のCPS化による製造プロセスの自動化技術開発. 溶接学会誌. 2021, **90**, 1, (掲載予定).
- (3) 坂井哲男. レーザー溶接のCPS化による製造プロセスの自動化. 東芝レビュー. 2019, **74**, 5, p.68-69. <https://www.toshiba.co.jp/tech/review/2019/05/74_05pdf/r01.pdf>. (参照 2020-10-19).
- (4) 鷲谷泰佑, ほか. ディープラーニングを活用したレーザー溶接技術の開発. 溶接技術. 2020, **68**, 2, p.56-59.
- (5) 植松育生. エレクトロスピニング法によるナノファイバー膜の高速形成技術. 東芝レビュー. 2017, **72**, 4, p.74-75. <https://www.toshiba.co.jp/tech/review/2017/04/72_04pdf/r01.pdf>. (参照 2020-10-19).

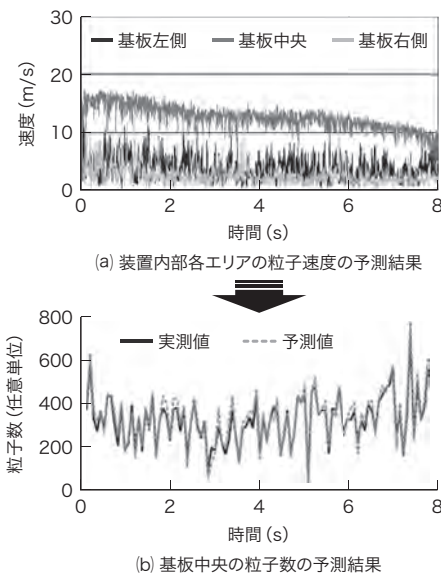


図7. AIによる装置内部状態の予測

センシングデータから、装置内部の速度ベクトルや基板に到達する粒子数を予測した。

Prediction of internal conditions of equipment using AI



坂井 哲男 SAKAI Tetsuo, Ph.D.
生産技術センター 製造プロセス・検査技術領域
光学・検査技術研究部
博士(工学) レーザー学会・応用物理学会会員
Optics & Inspection Technology Research Dept.



織田 達広 ODA Tatsuhiro
生産技術センター 製造プロセス・検査技術領域
材料・デバイスプロセス技術研究部
Material & Device Process Technology Research Dept.