

高効率溶射システムの構築に関する研究 — CADモデルに基づいた溶射姿勢の最適化 —

函館高専 専攻科 ○瀧瀬 愛梨 山田 誠

要 旨

主に水道管などに利用されているダクタイル鋳鉄異形管¹⁾の腐食保護のための溶射は、手作業で行われてきた。だが、手作業のために品質安定性をはかることが困難であり、作業者への影響も懸念されている。本研究では、異形管に対して均質な溶射被膜を得るため、自動溶射システムにおける最適制御方法の構築を目的とする。そこで異形管のCADモデルに基づき、回転斜動装置制御と溶射ガン位置制御による溶射姿勢の最適化方法を提案する。

1. 緒言

水道事業においてダクタイル鋳鉄異形管¹⁾は、ライフラインとして社会生活を支える上水道管路において重要な役割を担っている。耐腐食性の向上を図るため、管外面に亜鉛などを吹き付ける外面溶射²⁾が行われるが、従来、その溶射作業は手作業で行われるために品質安定性確保等は困難であり、また作業者への影響も懸念されている。溶射の手作業による不均一な溶射被膜・低効率性・作業者への影響を、ガンの位置制御及びワーク回転傾動装置で、多様な形状、大きさ、凹凸部を持つ異形管の溶射の自動化を行うことで改善することが可能である。

本論文では多様な形状を持つ異形管の溶射自動化技術を開発し狭窄部にも均一被膜形成可能な技術を確認することにより、品質安定性の確保、さらに生産効率性の向上、作業者への影響改善を達成するために、溶射姿勢の最適化制御を目的とする。

特に、異形管のCADモデルから溶射モデルを定義し、それに基づいた回転傾動装置による異形管の姿勢制御及びガンの位置制御の方法論について示す。

2. 溶射システムの概要

2.1 溶射制御における最適化の定義

本研究では、ダクタイル鋳鉄異形管の外面溶射の制御を行うにあたり、溶射の際、溶射目的箇所のワーク外面に対してガンが垂直方向に向いており、溶射ガンとワーク外面の溶射目的箇所が一定の溶射距離を保つことで均一な溶射被膜が得られるとして考える。また、生産効率性の向上のため、溶射経路や溶射姿勢の考慮も必要である。その制御方法を「自動溶射における溶射姿勢の最適化制御」として定義することとする。図1に、CADモデルに基づいた溶射姿勢の最適化について、その方法論について示す。

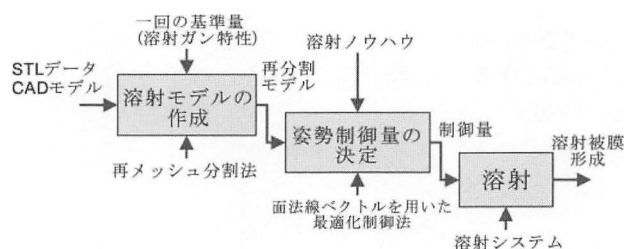


図1 CADモデルに基づいた溶射制御量導出手順

2.2 溶射システム構造

本研究で対象とするワーク回転傾動装置及び溶射ガンを保持する3関節アームについてその構造を、図2に示す。ワークを支持するテーブルは、図2に示すようにA軸(X軸回りの回転)による傾動・C軸(Z軸回りの回転)による回転機構を持つ。また、溶射ガンを保持するアームは3関節であり、B軸、L軸及びU軸(X軸回りの回転)を有する構造とした。任意のガン方向を与えたとき、テーブルのA軸傾動及びC軸回転機構により異形管姿勢を制御し、ガンを保持する3関節アームにより位置制御を行う。

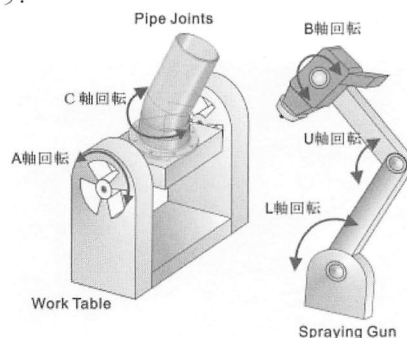


図2 ワーク回転傾動装置及び3関節アーム

2.3 最適化方法

最適化をするにあたり、溶射によって均一な被膜を得るためにはガン方向ベクトル(Gun Vector)に対して溶射面が垂直に位置している必要があるとし、ワークのCADモデルからワーク外面の facet 群³⁾を抽出し、それにより得た溶射面の面法線ベクトル(Normal Vector)から、ワーク回転傾動装置の制御量を導出する。

また、ガンの溶射経路、移動速度、溶射面とガンとの溶射距離など、従来の手作業による溶射技術のノウハウを考慮する必要がある。しかしながら、溶射経路によっては、溶射被膜にムラが生じやすくなる場合もある。したがって、溶射ガンが移動する溶射経路を最適化することで、溶射被膜の均質化、効率化を図る。

さらに、均質安定性を満足しているか否かの評価方法として、ワーク外面の facet 群を再メッシュ分割をしたものを読み込み、その facet 自体に溶射被膜の濃度を数値的情報として与え、溶射面全体の濃度が均一になるかどうかを均質安定性の判定方法とする。

3. 制御量の導出手順

3.1 溶射モデルの作成

- 1) CADモデル化したものからSTLデータを読み取り、ある任意のZ値におけるfacet群を抽出する。この時、抽出されたfacetは、あるZ値における継ぎ手の外面及び内面の両面を合わせたfacetのため、溶射目標箇所の外面だけを抽出する。
- 2) CADにより生成されるSTLデータのメッシュサイズは、狭窄部など形状が複雑な部位はメッシュが細かく切っているが、単純な円筒面や平面では、粗く要素数が極端に少ない場合がある。したがって、三角形facet1辺の長さがある指定値以上の場合は、図3中央に示すように再メッシュ分割を行い細分化をすることによって、ある一定精度以上の制御量算出が可能になる。
- 3) 適正な溶射皮膜形成の評価方法として、溶射面全体が均質になるまで溶射を繰り返すように、細分化した個々のfacetが溶射皮膜の濃度情報(図3右)を持ったモデル構造とする。

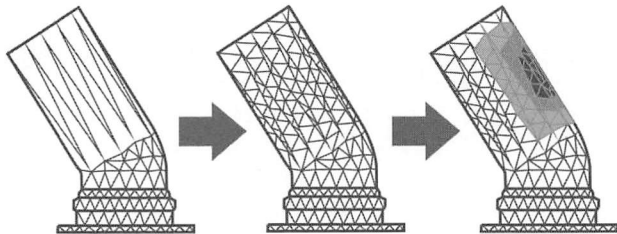


図3 溶射モデル構造

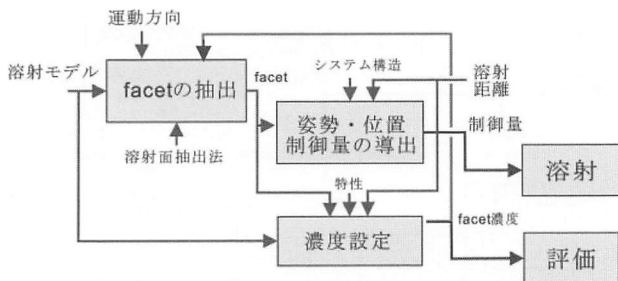


図4 制御量導出手順

3.2 溶射ガンの姿勢位置制御量導出方法

制御量の導出は、図4に示すように、溶射対象となるfacetを抽出し、そのfacetの法線ベクトルから姿勢制御を行う。このfacet群に対して濃度情報を与え、その情報を参照することにより、次のfacet抽出を行う。また、ワークとガンとが一定距離となるような溶射ガンの回転軸 O_{34} の位置より、溶射ガンのアームの位置制御量を算出する。図5に、回転傾動装置及び溶射ガンを保持する3関節アームによる制御構造のモデル図を示す。同次座標変換行列を用いた形状表現式⁴⁾により、目標位置は次のように表される。

$$\mathbf{r} = \mathbf{A}^2(-L_0)\mathbf{A}^3(L_1)\mathbf{A}^4(\gamma)\mathbf{A}^2(L_2)\mathbf{A}^4(\beta)\mathbf{A}^2(L_3)\mathbf{e} \quad (1)$$

$\mathbf{A}^2(dy)$: y軸方向に dy 平行移動, $\mathbf{A}^3(dz)$: Z軸方向に dz 平行移動

$\mathbf{A}^4(\theta)$: X軸まわりに角度 θ 回転

$\mathbf{e} = [0 \ 0 \ 0 \ 1]^T$, L_n : アーム長さ(mm)

β : U軸の制御角度(rad), γ : L軸の制御角度(rad)

式(1)を展開することにより式(2)が得られる。

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \delta & \cos \gamma & 0 \\ 0 & \sin \delta & \sin \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ L_3 \\ L_2 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ Y + L_0 \\ Z + L_1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式(2)から制御角度 γ 及び β は次の式によって表すことが出来る。また、溶射制御において、溶射ガンの手先角度は水平を保ち、一定とするようB軸を制御する。

$$\gamma = \sin^{-1} \left(\frac{Y_{34} + L_1 - L_3 \times \cos \delta}{L_2} \right)$$

$$\beta = \cos^{-1} \left(\frac{L_2^2 - L_0^2 - L_1^2 - L_3^2 - Y_{34}^2 - Z_{34}^2 - 2(L_0 Y_{34} - L_1 Z_{34})}{2\sqrt{(L_0 L_3 + L_3 Y_{34})^2 + (L_1 L_3 + L_3 Z_{34})^2}} \right)$$

$$- \frac{L_1 L_3 - L_3 Z_{34}}{L_0 L_3 + L_3 Y_{34}} - \sin^{-1} \left(\frac{Y_{34} + L_1 - L_3 \cos \delta}{L_2} \right)$$

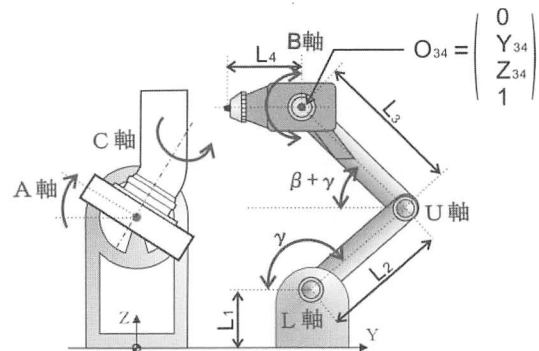


図5 回転斜動装置及び溶射ガンの制御構造

4. 結言

本研究により、高効率溶射システムの確立と実用を目的とし、ダクタイル鋳鉄異形管の外面溶射技術において、STLデータに基づいたC軸及びA軸によるワーク姿勢制御及び3関節を持つ溶射ガンの位置制御を併用した最適化制御方法の構築について、以下のことについて示した。

- 1) CADモデル化した異形管のSTLデータ抽出から、2軸の回転傾動機能を有するワークテーブルによる溶射の最適化方法論について提案した。
- 2) 再メッシュ分割を行い、facetに溶射被膜の濃度を数値情報として与えることによる、品質安定性を判定するための溶射モデルを定義した。
- 3) ワークの姿勢と溶射ガンの姿勢位置決め制御において、その制御量の導出手順について示した。

参考文献

- 1) JIS G 5527 : 1998, ダクタイル鋳鉄異形管
- 2) たとえば, 金属表面技術便覧, pp.959-989,
- 3) 山田誠, 5軸NC工作機械による主軸傾斜曲面加工法に関する研究(第2報), 精密工学会誌, 71, 12 (2005) pp. 1613-1617.
- 4) 山田誠, 形状創成関数に基づいた工学基礎教育—空間形状モデルの構築とその活用—, 国立高等専門学校協会 高専教育 35 (2012) pp. 287-292