



動的な膜厚分布モデルに基づく 没入型 VR 塗装訓練シミュレータの開発

Development of an Immersive VR Coating Training Simulator
Based on a Dynamic Coating Thickness Distribution Model

松後賢¹⁾, 高橋慶伸²⁾, 加藤史洋¹⁾, 岩田浩康¹⁾

Satoshi, JOGO, Yoshinobu TAKAHASHI, Fumihito KATO and Hiroyasu IWATA

- 1) 早稲田大学 創造理工学部 総合機械工学科 (〒162-0042 東京都新宿区早稲田町 27 グリーン・コンピューティング・システム研究機構, satoshijogo@suou.waseda.jp)
- 2) 早稲田大学 創造理工学研究科 総合機械工学専攻 (〒162-0042 東京都新宿区早稲田町 27 グリーン・コンピューティング・システム研究機構, takayoshi-jean@akane.waseda.jp)

概要: 中小工場での塗装作業は職人の手作業により行われているが、それには経験や知識が必要である。未熟者には技術向上が求められるが、実機での塗装訓練では有機溶媒の吸気による健康被害のリスクがあり、従来より課題とされている。現実に応用可能な塗装スキルが訓練可能な VR シミュレータがあれば健康リスクを抑えつつ技能向上が可能と考えられる。本 VR システムでは、噴射角度、流量、作業者の塗装条件に応じた動的な膜厚分布関数を適用し、膜厚をヒートマップでリアルタイムに表示可能でインタラクティブな塗装訓練が可能である。2名の被験者で塗装作業へのフィードバックを調査し、本手法の有効性を評価した。

キーワード: 塗装訓練, 動的な膜厚分布, VR 訓練システム

1. はじめに

機械への塗装工程は、大工場と中小工場とでは製造手段が異なる。大工場では近年、ロボットによる塗装作業の自動化が試行されているが、中～小規模の工場では、職人の手作業で塗装作業が行われており、長年の経験や数多くの知識が必要とされている。経験を積み、塗装技術を身につけるためには適切で継続的な訓練が必要である。シンナー等の有機溶剤への暴露が長時間なされると、健康への悪影響が懸念されるため、暴露を最小限に抑えた効率的な訓練が求められる。

実空間で訓練が困難な対象に、VR 環境にて訓練が可能なシステムはこれまでにいくつか提案されている。フライトシミュレーター[1][2]、医療訓練シミュレーター[3][4][5]、調理シミュレーター [6]などがある。本論文では、VR 空間内で、塗装の訓練とさらに塗装技能の評価を対象に含めた塗装訓練システムに焦点をあてる。塗装においては、塗料を対象物に繰り返し噴霧し、所望の膜厚とすることが求められる。噴霧毎にどのように塗膜が形成されるかを計算可能な膜厚モデルが必要である。塗装条件と膜厚の関係を記した膜厚分布関数を求める方法[7]が提案されている。本研究では、訓練者がインタラクティブに塗料を噴霧し

塗膜を塗り重ねて所望の厚さにするよう訓練が可能な VR 塗装訓練シミュレータを構築する。膜厚分布関数を動的に利用することによってシステム上で技能評価までサポートが可能な VR 塗装訓練システムを提案する。次節では開発したシステムの構成について記す。

2. インタラクティブな塗装シミュレータ

塗装とは、材料の表面を塗料の被膜で覆う表面処理の一つである。塗装のためのガン（以下、塗装ガン）から、塗料を微粒子の霧として噴射し、ワークに付着させることで塗膜を形成する工程が一般的である。変数として、作業者の持つ塗装ガン位置および角度、ワーク位置、塗装ガンとワークとの距離、塗装ガンにおける塗料の噴出角度、噴出流量が存在する。

インタラクティブな塗装訓練シミュレータを構成するためには、上記変数を反映させること、塗膜の膜厚分布関数を表現することが必要である。

システム要求を満たすために、次に述べる構成で VR 塗装システムを構築した。

2.1 VR 塗装シミュレーションの構成

VR シミュレーションは、多くのゲーム開発に用いられ

る Unity (Unity Technologies, USA) を用いた。HMD には VIVE Pro, VIVE コントローラ (HTC corporation, Taiwan) を用いた。Unity を用いた塗装訓練シーンについて記す。Unity を用いた塗装訓練シーンの画面上には、塗装対象(ワーク)および、塗装ガンが見えている(図1)。塗装対象となるワークは 1m×1m で、地面から垂直に固定されている。塗装ガンについては、VIVE コントローラと Unity 画面上の塗装ガンとを紐づけることで、VIVE コントローラを操作することで画面上の塗装ガンを操ることができる。作業者は Unity で作製した塗装訓練シーンを、HMD を装着して眺めながら疑似的に塗装作業が実施可能である。実際の塗装作業では立位姿勢で作業を実施するためこれを再現して立位での作業シーンとなっている。VIVE コントローラのトリガーボタンを押すと、画面上の塗装ガンから塗料が噴出し、塗装ガンをワークの方向に向ければ、ワークに塗料が付着するようになる。

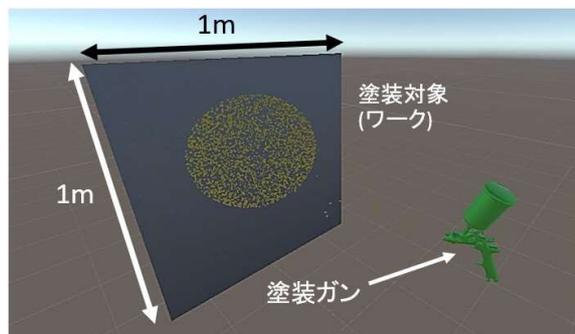


図1: Unity 内に構築した塗装訓練シーン

2.2 膜厚計算アルゴリズム

以下では、本システムに実装した膜厚計算アルゴリズムについて記す。膜厚の濃度を表現するモデルとして、式(1)に示すような3次元ガウス分布関数を用いた[7]。この式は塗料分布の実測値を精度良く表現している[8]。

$$f(x, y) = f_{max} \exp\left(-\frac{1}{2}\left[\left(\frac{x}{\sigma_x}\right)^2 + \left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right]\right) \quad (1)$$

式(1)における変数の定義：

- $f(x, y)$ …膜厚分布関数
- f_{max} …膜厚分布関数の最大値
- $\sigma_{x,y}$ … x, y 方向の標準偏差
- x, y …膜厚分布関数を作製するワーク座標の各地点

しかし、この関数には、塗装ガンの角度やワークまでの距離はパラメータとして考慮されていない。今回はこれら塗装ガン角度、ワークまでの距離を考慮した「動的な」膜厚分布関数を作成した(式(2))。静的な膜厚分布関数ではガンとワークの位置関係や、ガン角度が変化しても膜厚分布は変化しないのに対し、動的な膜厚分布関数では、ガン

とワークの位置関係やガン角度が変化することに応じて、膜厚分布が適切に変化する。動的な膜厚分布関数を適用することで、作業者のガンの動かし方に応じてより精緻な膜厚分布を再現することが可能である。

膜厚分布が変化する本式では、平均からの分布の広がりを表す、 σ の値がワーク座標と塗装ガン座標の値によって変化することが大きな特徴である(式(3))。

$$f(x, y) = \frac{Q\Delta t}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x-x_0'}{\sigma_x}\right)^2 + \left(\frac{y-y_0'}{\sigma_y}\right)^2\right) \quad (2)$$

$$\sigma_{x,y} = \frac{z_0 - z_0'}{3} \left(\tan \frac{\theta_{x,y}}{2}\right) \quad (3)$$

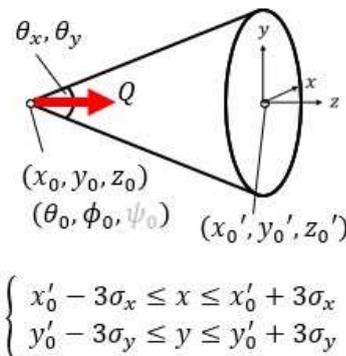


図2 動的な膜厚分布関数のモデル図

式(2), (3), 図2における変数の定義：

- Q …塗料の吐出流量
- x_0', y_0', z_0' …中心ワーク座標(図2 参照)
- θ_x, θ_y …塗料噴出角度
- x_0, y_0, z_0 …塗装ガン位置
- θ_0, ϕ_0, ψ_0 …塗装ガン角度

式(2), (3)の関数を用いることで、作業者のガンの動かし方に応じて膜厚分布が適切に変動する様子を再現可能である。それゆえ、よりリアルな膜厚を計算することが可能である。

上記の膜厚計算アルゴリズムを用いた、膜厚の実際の計算手法について記す。まず、対象のワーク 1m×1m を、1mm×1mmの計算格子に分割する。その後、膜厚分布関数 $f(x, y)$ を、各セルに対して計算する。実行刻み時間 0.1s 毎に同様の計算を繰り返し、これらを加算することで、セル毎の膜厚を得ることができる。

2.3 膜厚の表示方法

以下では、作業者の画面上に映る膜厚の表示方法について記す。本システムでは、塗装モードと膜厚表示モードの2種類が切り替え可能である。塗装モードでは、塗料の付着量に応じて、色の濃さが変化する仕様とした。実機での塗装試験での見え方を再現しており、作業者が塗装をしている最中に適用されるモードである。膜厚表示モードでは、最終的な膜厚の値に応じて色の濃さが変化する事で、ワーク全体をRGBのヒートマップ表示をする(図3、最も厚い部分が赤色、厚みがゼロな部分は青色)。膜厚表示モードは、作業者が塗装を終了させた地点で表示される。厚みに応じた色を割り当てることで、厚みを視覚的に把握しやすい提示としている。

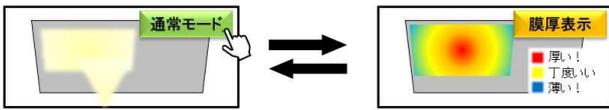


図3：膜厚表示方法のイメージ図

2.4 膜厚の評価方法

以下では、膜厚の評価方法として、評価基準とそれに基づいたスコアの算出、および、スコアに加えて作業者に与えるフィードバック手法について述べる。

まず、膜厚の評価基準として2つの基準を設定した。1つ目が、「ワーク全面の膜厚が60μmで均一に塗装されること」、2つ目が「膜厚の標準偏差が小さいこと」である。前者は、ワーク全体に満遍なく塗装できていることを測る基準である。後者は塗装が局部的に濃い薄いなどのムラがないことを測る基準である。これら2つの評価指標を踏まえてスコアの算出式を作成した(式(4))。

上式より、スコアは100点満点から、1) 平均値からのズレと、2) 膜厚のばらつき、を減点する方式で算出する。構成した評価関数は式(4)に示す。膜厚の平均値μの計算はワーク上の各セルの膜厚の平均値を使用し、膜厚のばらつきは標準偏差を用いて算出している。スコアは、評価関数(4)に示す通り、平均値が60μmに近いほど、また、膜厚のばらつきが0μmに近いほどスコアが高くなるよう設定した。また、評価基準はそれぞれで3通りずつ設定している。(表1)。

$$score = 100 - 0.9 \times |\mu - 60| - \sigma \quad (4)$$

表1 スコアの評価基準

◎ σ<10	◎ μ-60 <10
○ 10≤σ<20	○ 10≤ μ-60 <20
△ 20<σ	△ 20< μ-60

「平均値からのずれ」と、「ばらつき(=標準偏差の値)」の

3段階の評価指標は各々が独立して評価されて、作業者にフィードバックされる。仮に同じスコアである場合でも平均値からのずれが大きい場合と、ばらつきが大きい場合とではフィードバックコメントが変わるようになっている。詳細については3節で述べる。

3. 塗装訓練と評価

本節では塗装訓練および評価の様子を示す。はじめに、プレイヤー視点での試技の様子(図4(左))、および、3人称視点でのプレイヤーのVR訓練の様子(図4(右))を示す。2.2節で示したとおり、実際の塗装試験では直立姿勢で塗装作業を行うため、本システムに関しても直立姿勢で塗装作業を実施する構成である。



図4 プレイヤー視点, 3人称視点での試技の様子

次にシステム評価について述べる。被験者2名(Aさん,Bさん)に実際に本システムを使用してもらい評価した。本システムの評価においては、相対的な比較を実施した。Aさんには“塗装ガンを一定の速度で動かすことで、塗り残しがなく、かつ、ムラがないように塗装する”よう伝え、Bさんには“塗装ガンを動かす速度に緩急を付け、塗り残し部分を作り、全体的にムラが出るように塗装する”よう伝えた。それぞれで膜厚平均値、膜厚バラつきの2つの観点について相対的に値の評価を行った。予想される結果としては、Bさんに比べAさんの方が点数が高くなるという結果であった。表2に比較結果を示す。

表2 システム評価の結果

	Aさん	Bさん
膜厚平均値[μm]	◎ 57.02	△ 37.77
膜厚バラつき[μm]	○ 22.72	△ 44.74
点数	80/100	45/100

塗装終了時に表示される膜厚表示モードのカラーマップ表示の結果を以下の図6(Aさん)、図7(Bさん)に示す。動的な膜厚の評価結果として、画面上にフィードバックコメントが記載される。例えば、平均値が◎、膜厚バラつき評価が○の場合、「厚さは丁度いいですが、もう少し全体が平滑になるよう心がけましょう」とコメントされ、同じ点数を獲得したとしても結果に応じて、より膜厚平均値を意識すべきなのか、膜厚バラつきを意識すべきなのか、に

ついて具体的なフィードバックコメントがなされる。

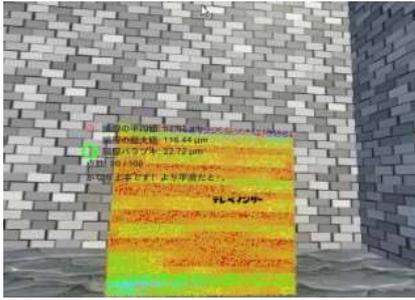


図6 Aさんのカラーマップ表示結果

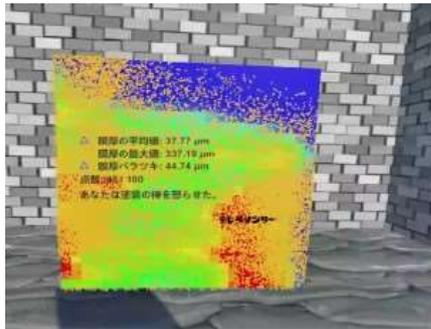


図7 Bさんのカラーマップ表示結果

表2より、AさんBさん各々の塗装方法に応じて、評価が適切に行えていることが示唆される。また、図6、図7より、塗装ガンの位置、動かす速さに対応したヒートマップが表示されていることも確認できる。システム全体として、スコアで表示された値と、生成されたヒートマップの状況には対応関係が確認でき、評価システムとして機能していることが示唆される。

4. おわりに

本稿では、既存の膜厚分布を再現する関数を基に、動的な膜厚分布モデルを開発し、それをを用いて、没入型VR塗装訓練シミュレータの開発を実施した。またVR訓練シミュレータによる試技・評価を実施した。その結果、適切なフィードバックが行えていることが確認された。

今後の展望として、現状は塗装対象のワークが平面であるため、複雑形状のワークへの対応が挙げられる。実際に現場で塗装する対象物は曲面形状をはじめとして、ボス形

状など、複雑なものが多く、それらへの対応が必要と考えられる。また、現状はコントローラ上から吐出流量を変更することはできないため、それを自由に変更できる設定の検討も挙げられる。さらに、現状では塗装終了し終わってから膜厚表示モードに切り替わるが、塗装中に膜厚表示モードを見ることが出来る機能の検討も必要と考えられる。

参考文献

- [1] 黒田嘉宏, 中尾恵, 黒田知宏, 小山博史, 小森優, 松田哲也. 複数臓器間の接触シミュレーションを実現する弾性体間の相互作用モデル(<特集>医工連携とVR). 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, vol. 8, No. 2, pp. 155{162, Jun 2003.
- [2] 鈴木薫之, 鈴木直樹, 服部麻木, 内山明彦. パーチャル手術システムに適した弾性臓器モデルの開発(マルチメディアパターン処理). 電子情報通信学会論文誌. D-II, 情報・システム, II-パターン処理, Vol. 86, No. 9, pp. 1341{1349, Sept 2003.
- [3] 安藤英由樹, 近藤大祐, 飯塚博幸, 小濱和貴, 坂井義治, 前田太郎. 画像合成・切替を用いた腹腔鏡手術トレーニングシステムと評価手法の提案(コミュニケーション支援及びヒューマン情報処理一般). 電子情報通信学会技術研究報告. HIP,ヒューマン情報処理, Vol. 113, No. 73, pp. 195{200, may 2013.
- [4] 梶原景範. 3-1 教育・訓練システム: フライトシミュレータ(3. インタラクティブシミュレーション)(<小特集>バーチャルリアリティ技術). テレビジョン学会誌, Vol. 46, No. 6, pp. 685{689, Jun 1992.
- [5] Microsoft Flight Simulator [online] 2022-7-25 accessed <https://www.flightsimulator.com/>
- [6] Fumihito Kato, Shoichi Hasegawa, CEA 2013 - Proceedings of the 5th International Workshop on Multimedia for Cooking and Eating Activities 33-38 2013
- [7] W. Persoons, H. Van Brussel, "CAD-based robotic coating of highly curved surfaces", 1993.
- [8] B. Zhou *et al.*, "Off-line Programming System of Industrial Robot for Spraying Manufacturing Optimization", 20