

左官職人の鏝の動きに基づく経路により制御したロボットアームによる土塗り左官 Mud Plastering with a Robot Arm Controlled by Paths Based on the Plasterers' Trowel Movements

○登尾 育海^{*1}, バルナ ゲルゲイペーター^{*2}, 村本 真^{*3}, 西村 智賢^{*4}
Ikumi NOBORIO^{*1}, BANA Geregely Péter^{*2}, Makoto MURAMOTO^{*3} and Tomomasa NISHIMURA^{*4}

*1 京都工芸繊維大学大学院建築学専攻 大学院生 学士(工学)

Graduate Student, Master's Program of Architecture, Kyoto Institute of Technology, B.Eng.

*2 京都工芸繊維大学未来デザイン工学機構 Kyoto Design Lab 特任研究員 博士(工学)

Project Researcher, Kyoto Design Lab, Center for the Possible Futures, Kyoto Institute of Technology, Dr.Eng.

*3 京都工芸繊維大学デザイン・建築学系 准教授 博士(学術)

Assoc. Prof., Faculty of Design and Architecture, Kyoto Institute of Technology, Ph.D.

*4 竹中工務店設計本部設計企画部 修士(工学)

Architect Chief, Planning Group, Planning & Administration, Design Dept., Takenaka Corp., M.Eng.

Summary: There is a problem that decreases in the number of people in succession to expert skills and a shortage of manpower in the construction industry. It is believed that developing robots that work together with humans will solve this problem. On the other hand, expert skills have been succeeded through the tacit knowledge of skilled workers. Therefore, complex teaching is required to develop a robot that performs traditional construction methods. This paper aims to develop robots without difficult teaching, here we develop it based on motion analysis of experts' plasterers. We analyze the basic mud plastering of five plasterers using a motion capture system and create a rigid body from the marker put trowel surface. The analysis is performed in position coordinates and quaternions. We made linear approximations to the analyzed data and calculate the average of the linear expressions for the five plasterers. This equation is used for teaching the robot arm. A mud plastering experiment using KUKA's robot arm KR10 R1100-2 showed that the robot arm based on analysis of the movement of plasterers can plaster. The results confirm that a plastering robot with plasterers' movement can be developed by analyzing of plasterers.

キーワード: 土塗り左官; モーションのキャプチャ; 動作解析; ロボットアーム; ロボット工法

Keywords: Mud plastering; motion capture; motion analysis; robot arm; robot construction.

1. はじめに

近年, 建設業界では熟練者の技能伝承の難しさから, 技能継承者の不足が問題視されている¹⁾.

建設現場の人手不足解消のため, 施工の効率化を目的とした様々な建設ロボットの開発が行われており, 共に働くロボットという考えが建設業界に広がっている²⁾. また, ロボットティーチングの技術の発展もめまぐるしく, センサを用いた自動化や精度の向上が進み, 様々な現場でロボットが活用されている³⁾.

工場で行われる組立作業等のロボット化では, 精密なティーチングを行うことで繰り返し作業が実現できるが, 常に環境が変化する建設現場では, この方法による経路設計では多くの条件を考慮せねばならない. また, 伝統工法の施工は熟練者による直接指導や現任訓練によって継承されるため, 職人の技能は暗黙知とされる. これをロボットアーム上で再現するためには, 科学的な分析によって暗黙知の技能を形式知とする必要がある¹⁾.

建築や内装仕上げを自動で行うロボット⁴⁾が開発されている中, 筆者らは, 建設施工における土塗り左官を対象とし, 左官熟練者のモーションキャプチャデータの分析に基づく経路設計を行うことで, 鏝の細かな動きを複雑なティーチングを行わずに熟練者の技能を再現した左官ロボットの開発を進めている^{5), 6), 7)}.

文献5)では, モーションキャプチャシステムを利用した土塗り左官の動作解析を, 左官熟練者1名を対象として行った. また, モーションキャプチャで得た鏝面のマーカー座標より作成した剛体重心とオイラー角をもとに, 土を塗りつけるロボットのプロトタイプを示した^{6), 7)}. この一連の実験では, 左官熟練者1人の動作を計測し, ロボットアーム上の再現性を確認した. しかし, 熟練者ごとの個性を再現したロボットを開発する以前に, 汎用的な左官技能を獲得した左官ロボットの開発が求められた. また, 鏝の回転の制御で特異点の問題を解決する必要があった.

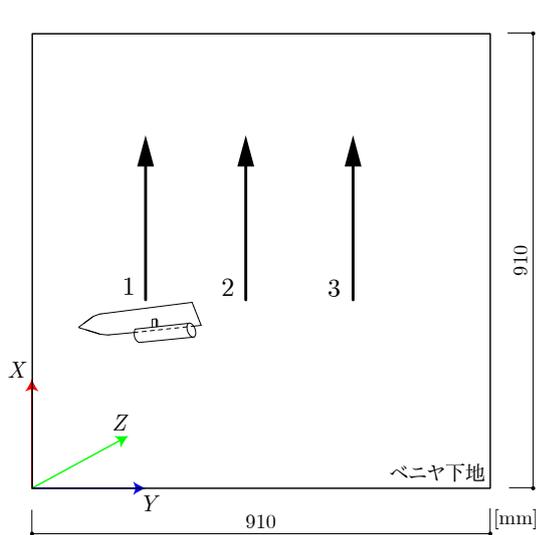


図1 モーションキャプチャ時の座標と鋳動作の概要

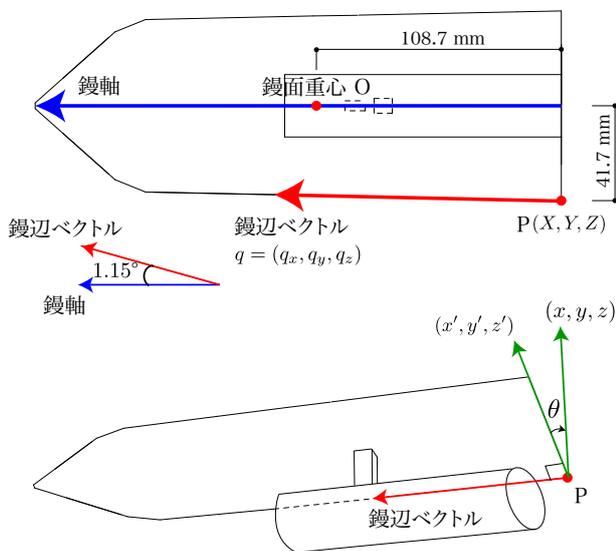


図2 左官鋳の解析モデル

本論文では、さらに左官熟練者5名のモーションキャプチャを行い、左官動作の平均化を試みる。その分析に基づき、左官熟練者の技能の基本的な特徴を捉えたロボットを開発することを目的とする。なお、モーションキャプチャは文献5)と同様の方法とし、左官熟練者5名(左官歴18年~52年の熟練者、以下では職人A~Eと呼ぶ)のデータを取得した。これらのデータについての分析は別報にて報告する予定である。

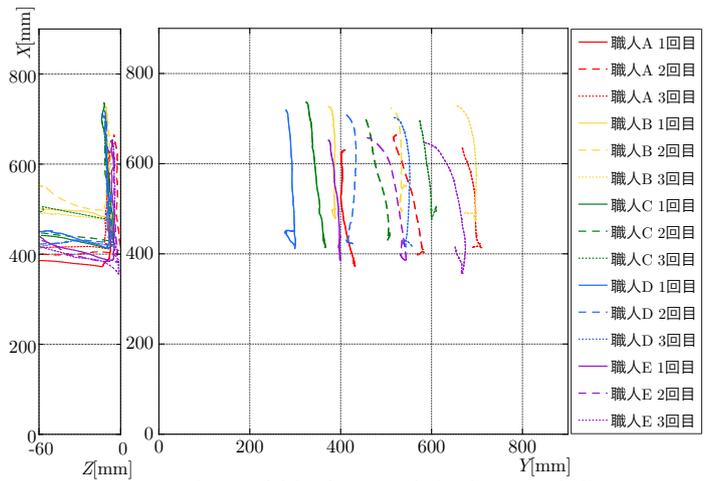
2. 左官のモーションキャプチャ

2.1 モーションキャプチャの概要

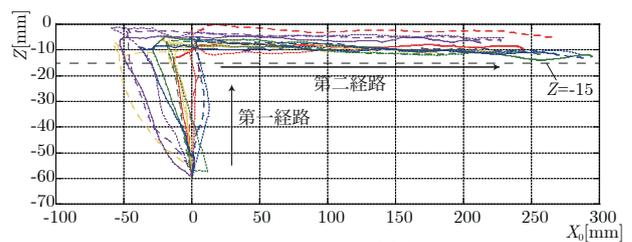
モーションキャプチャは、910×910 mmのベニヤ下地に対して左官熟練者5名の動作と鋳の動きを記録した。本論文では、図1に示した縦塗り3回分を対象として分析に用いる。

2.2 鋳面挙動の解析

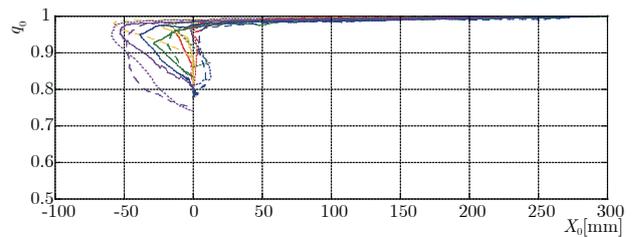
鋳の挙動は、図2に示した鋳面上の点P、鋳辺ベク



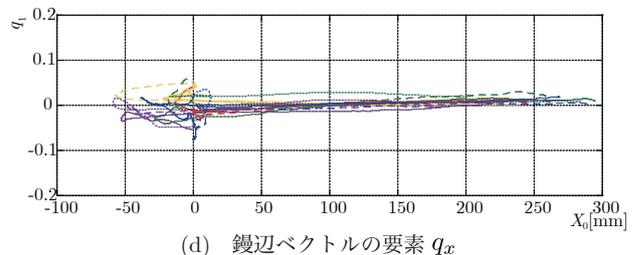
(a) 点Pの座標(左:ZX平面, 右:YX平面)



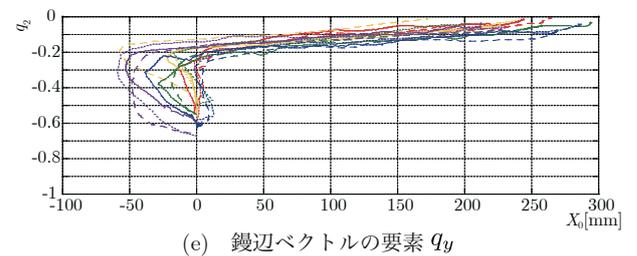
(b) 点PのZ座標



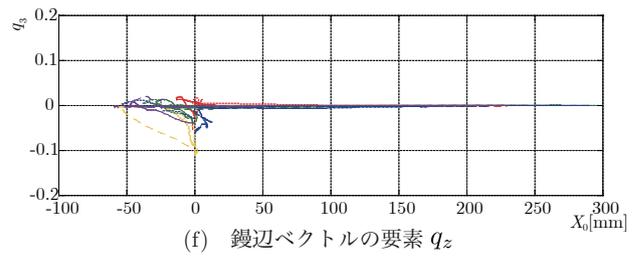
(c) 鋳辺ベクトル周りの回転 θ



(d) 鋳辺ベクトルの要素 q_x



(e) 鋳辺ベクトルの要素 q_y



(f) 鋳辺ベクトルの要素 q_z

図3 左官熟練者5名による壁土塗り付けのキャプチャデータ

トル、鋸辺ベクトル周りの回転について解析する。P は、マーカー座標から作成した鋸面重心 O から図 1 に示した位置として算出する。鋸辺ベクトルは、マーカー座標から求めた鋸軸を 1.15° 時計回りに回転させたノルム 1 の単位ベクトルとする。鋸の姿勢は、鋸辺ベクトル $q = (q_x, q_y, q_z)$ と鋸辺ベクトル周りの回転 θ を用いた以下の式

$$\tilde{q} = \cos \frac{\theta}{2} + q \sin \frac{\theta}{2} \quad (1)$$

$$\|q\| = 1$$

で正規化したクォータニオン

$$\tilde{q} = \left(\cos \frac{\theta}{2}, q_x \sin \frac{\theta}{2}, q_y \sin \frac{\theta}{2}, q_z \sin \frac{\theta}{2} \right) = (q_0, q_1, q_2, q_3) \quad (2)$$

$$\|\tilde{q}\| = 1$$

と、共役クォータニオン \tilde{q}^* を用いた座標系の回転

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \tilde{q}^* \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \tilde{q} \quad (3)$$

で算出する⁸⁾。なお、鋸面が下地面と並行な状態を $\theta = 0$ とする。

以下では、モーションキャプチャした鋸面のマーカー座標からこれらの値を算出する。そして、それぞれの算出値の間の関係について線形近似を求め、職人全体で平均した直線の軌跡を作成してロボットアームの経路設計に用いる。

なお、鋸面上の点 P は、ロボットアームのツールセットアップ時にツールパスとなる点である。縦方向の塗り付け時に必要となる鋸辺を制御することで、経路設計をしやすくしている。

2.3 モーションキャプチャデータの分析

図 1 のような左官職人の動作をモーションキャプチャした結果を図 3 に示す。図 3(a) は下地平面上における点 P の軌跡を表しており、熟練者は概ね上方向に鋸を動かしている。1 回の塗り付けで上方向 (X 方向) に約

300 mm の鋸移動がある。それに対して、横方向 (Y 方向) の動きが少ない。以下では塗り付け方向の X 方向に着目する。左官時は塗り付け前に土取り作業を含む。土塗りの動作のみに着目するため、奥行き方向 $Z > -60$ mm となる時点から、塗り終わり時に X 座標が最大となる時点までを描いている。図 3(b) から図 3(f) では、塗り付けごとの解析開始時の X 座標を 0 とした X_0 を用いて横軸をそろえている。

図 3(b) は、点 P の下地面との垂直距離 (Z 座標) を、 X_0 軸上に描いている。この図から、鋸面の動きは $Z < -10$ mm における鋸を下地方向に寄せる動作 (以下、第一経路と呼ぶ) と、 $Z > -10$ mm における下地に壁土を塗りつける動作 (以下、第二経路と呼ぶ) に分けられる。以下で、これら 2 つの経路を平均化するような軌跡をロボットアームの経路として構築する方法を述べる。

図 3(c) から図 3(f) は、式 (1) で正規化したクォータニオンの各要素を X_0 軸上に描いている。ここで、 q_1 から q_3 は鋸辺ベクトルの向きを表し、 q_0 は鋸辺ベクトル周りの回転量を表している。図を見やすくするために縦軸の範囲を変えているが、これらの値はすべて $-1 < \tilde{q} < 1$ の範囲内で動く。

作成した軌跡に対して、職人 A ~ E の 3 回分の第一経路と第二経路それぞれについて最小二乗法を用いて線形近似直線を求める。次に、ここで得られた 1 次式の係数の平均を求める。これらの直線式は決定係数 R^2 が 0.5 以上となるものを用いた。平均をとると、Z は

$$\bar{Z}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i X + b_i \quad (4)$$

と書ける。ここで、 i は縦塗り 15 回の塗り作業、 j は第一経路と第二経路を表す。Z の近似直線と、その平均の直線 (3) を図 4 に示す。

鋸の姿勢を崩さないために、 \tilde{q} はノルム $\|\tilde{q}\| = 1$ を保持必要がある。図 3(c) から図 3(f) を見ると、4 つの値はすべて第一経路と第二経路内で概ね直線的な軌跡となっている。

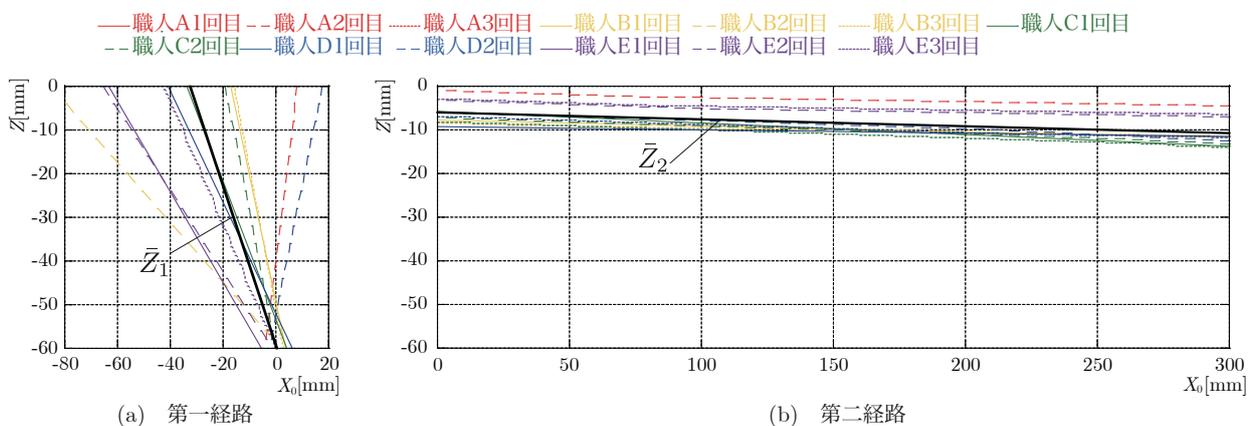


図 4 制御点座標の近似直線

単位クォータニオンは球面線形補間を用いるとノルムを保持することができることから、経路内の始点でのクォータニオン \tilde{q}^s と終点でのクォータニオン \tilde{q}^e を取り出し、割合 t を変数とした式をたてる⁹⁾。

$$\tilde{q}_j(t) = \frac{\sin(1-t)\phi_j}{\sin\phi_j} \tilde{q}_j^s + \frac{\sin t\phi_j}{\sin\phi_j} \tilde{q}_j^e \quad (5)$$

$$\phi_j = \arccos(\tilde{q}_j^s \cdot \tilde{q}_j^e)$$

熟練者の縦塗り 15 回分について $\tilde{q}_j(t)$ を求め、割合 t を 0.5 とした球面線形補間の式を順に適用することで全動作におけるクォータニオンの平均値とする。すなわち、

$$\bar{\tilde{q}}_j(t) = \frac{\sin 0.5\phi_{i,j}}{\sin\phi_{i,j}} \tilde{q}_{i,j}(t) + \frac{\sin 0.5\phi_{i+1,j}}{\sin\phi_{i+1,j}} \tilde{q}_{i+1,j}(t) \quad (6)$$

$$\phi_{i,j} = \arccos(\tilde{q}_{i,j} \cdot \tilde{q}_{i+1,j})$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, 14 \quad j = 1, 2$$

である。 $\bar{\tilde{q}}_j(t)$ は、補間の順序を入れ替えるとわずかに異なる値をとる。図 3(c) から図 3(f) より、それぞれの軌跡はそれほど異なっていないため、ここでは入れ替えの誤差を無視して、職人 1 から順に補間を適用する。求めた $\bar{\tilde{q}}_j(t)$ を要素ごとに図 5 に示す。

式 (4) と式 (6) は左官熟練者による壁土を縦に塗り付ける時の基本的な動作を表す。直線 (6) から得たクォータニオンを、直線 (4) から得た座標に適用してロボットアームのツールパスとなる経路を設計する。この経路には左官

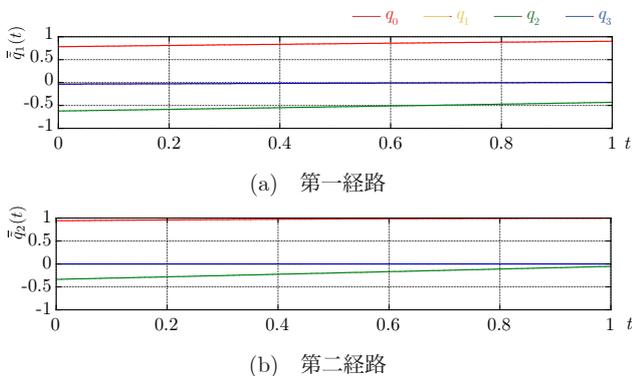


図 5 球面線形補間により平均化したクォータニオン $\bar{\tilde{q}}_j(t)$

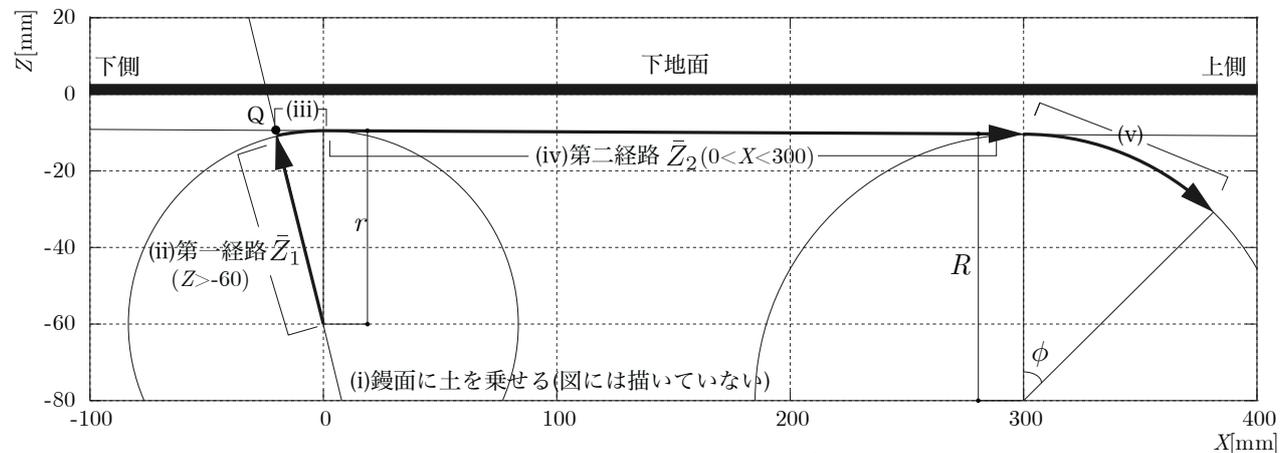


図 7 ロボットアーム上のツールパス経路設計のフロー

熟練者の特徴が含まれていると考えられる。

以上により、左官熟練者のモーションキャプチャの分析に基づく経路設計を行うことができる。このようにすることで、鍍のエッジの使い方や鍍の回転などを塗り付け結果に応じて試行錯誤的に決定する必要もなく、ティーチングを容易にしている。

3. 左官ロボットシミュレーション

3.1 経路設計

式 (4) と (6) から、土塗り左官を行うロボットアームの経路をコーディングする。本論文では、文献 5) と 6) に引き続き、Grasshopper¹⁰⁾ とそのプラグインである KUKA|prc¹¹⁾ を用いてロボットアームをシミュレーションする。図 6 に示すように、下地平面の左下の隅を原点とし、2. と同様の座標系で経路を設定する。

経路設計のフローを図 7 に示す。まず、(i) 土塗りを行うために鍍に壁土を乗せるための姿勢をつくる。本論文では、鍍に壁土を乗せる作業を人間が行うため、作業しやすい高さで鍍面を上に向けて一端静止させる。

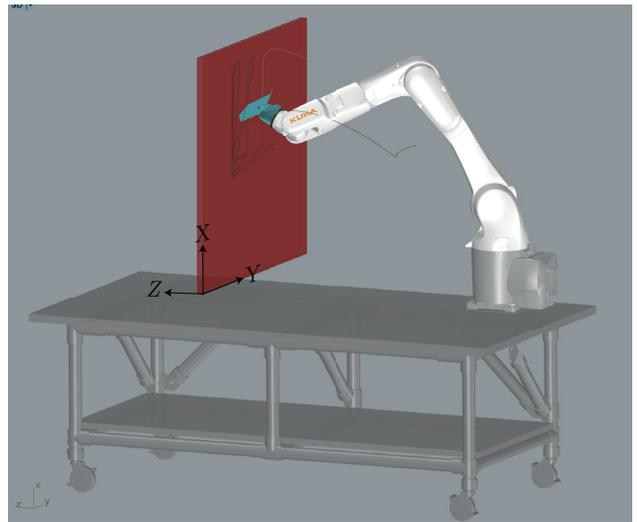


図 6 動作シミュレーション

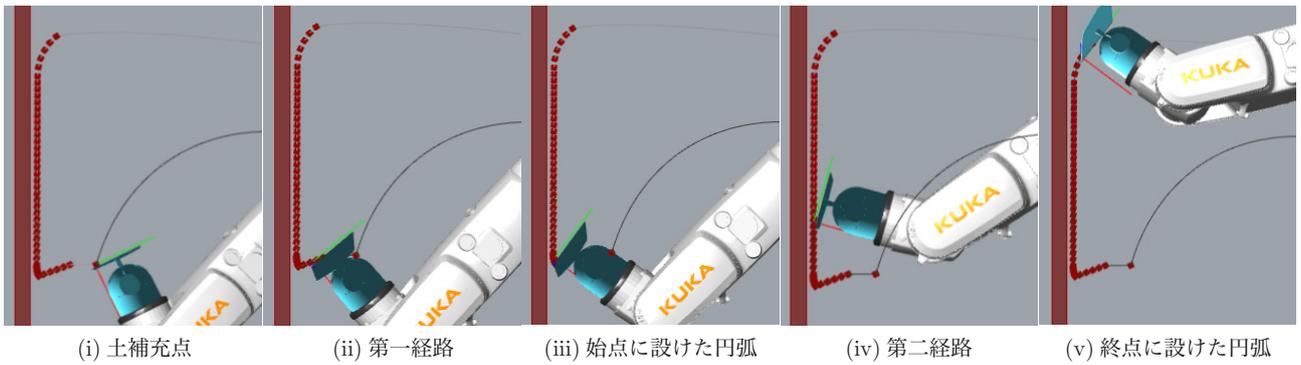


図8 ロボットアームによる土塗り動作シミュレーション

次に、(ii) 式 (5) を用いて $-60 < Z < 0$ の範囲に n 個のツールパスを作成し、 $t = k/n$ を式 (6) に代入することで k 番目のツールパスの姿勢を決定する。

その後、第一経路 Z_1 と第二経路 Z_2 それぞれについて求めた制御点座標の式から、2 直線の交点 Q を求める。この交点が経路の切り替わり点となるが、図 3(b) より左官職人は経路の切り替わり点では丸みをおびた経路をとっている。そこで、第一経路の始点と第二経路の始点を結んだ線分を半径 r とした円弧を設け、経路の切り替わり部分として (iii) を補間する。補間部分の姿勢は、式 (5) に示した球面線形補間の操作で決定する。

そして、(iv) $0 < X < 300$ の範囲で (ii) と同様の処理を行い、第二経路上のツールパスを m 個作成する。

最後に、(v) で塗り終わり時に鍍面を下地面から離れた時の土離れを考慮して、第二経路の終点にも半径 R 、角度 ϕ の円弧を設け、鍍面を滑らすように動作を終了する。ここでは、 R を 80 mm、 ϕ を $1/8$ rad とした。

3.2 動作シミュレーション

動作シミュレーションの様子を図 8 に示す。図 8(i) の状態で一端動作を止め、鍍面に壁土を乗せる。図 8(ii) に示した第一経路を通って鍍面を下地面に近づけ、図 8(iii) に示した円弧から図 8(iv) の第二経路に入る。そして、鍍面を滑らすように図 8(v) の終点に設けた円弧を通り、縦塗り 1 回分の動作とする。このとき、ロボットアームの各関節が可動範囲内にあることも確認している。

図 8(ii) から図 8(iv) をみると、鍍面が徐々に下地面と水平になっていることがわかる。これは、左官熟練者が鍍面に乗せた土を徐々に押し付けていることを表しており、左官の動作の特徴を掴んでいる。

4. 壁土の塗り付け実験

4.1 実験の概要

3. でシミュレーションした動作を用いて、実機を使用した壁土の塗り付けを行う。ロボットアームは小型の産業用ロボットである KUKA の KR10 R1100-2¹²⁾ を使用し、ロボットアームとベニヤの下地壁 (910×910 mm) を台に固定して実験を行う。ロボットアームのツールは左官用

表 1 実験で使用した壁土の調合

土 [g]	スサ [g]	砂 [g]	水 [g]
1000	20	100	500

の半焼き仕上げの鍍面を使用し、専用の取り付け治具を用いてアームフランジに固定した。

実験は、用意した下地面の左から経路の始点を Y 方向に $+150$ mm ずつずらし、3 回塗り付けを行う。塗り付けの様子を図 9 に示す。アームの駆動部分に土が入ることを防ぐため、動作精度に影響しない範囲で養生を施した。

実験で使用する壁土はモーションキャプチャ実験時と同様の京都深草産の中塗り土である。左官熟練者による 2 週間程度の水合わせを実施し、最終的には表 1 に示した調合となった。

ロボットアーム上の鍍面への壁土の補充は塗り終わりの度によく混ぜた状態とし、壁土の性質ができるだけ変化しないようにした。

4.2 実験結果

塗り付けを行った後の壁面を図 10 に示す。結果を見ると、3 回行なった塗り付けは全て土を塗り付けられており、鍍の長さ分並行移動させた繰り返し動作で壁土を面状に塗り広げられている。

鍍に概ね同じ体積の土を乗せて実験したが、結果の仕上がりはやや異なる。2 回目の塗り付けでは鍍に乗せた土を全て壁面に塗り付け、かなり伸ばすこともできているが、1 回目と 3 回目では鍍の土離れが悪く、壁土が少し剥がれ落ちた。

これは、調査された土の不均一な部分 (おそらくスサの多い部分) の影響で、塗り付け時の伸びが悪くなった可能性が考えられる。左官熟練者の場合は鍍板の上で土を何度か練り、塗りやすい柔らかさを確認して塗り付けを行うが、ロボットでは自ら確認と調整を行わないためである。また、下地はベニヤ板であり、土下地の場合より摩擦が小さく、塗り付けが難しい⁷⁾ ことも影響したと考えられる。実際、文献 6) ではベニヤ下地を用いたが、文献 7) の土下地の場合には塗り付け状況に改善がみられ



図9 ロボットアームによる土塗りの様子

ている。

図9と10の1回目と2回目の塗った部分を見ると、1回目の仕上がりとは2回目の間に土が重なった部分がある。このような状態は左官熟練者による土塗りでも確認することができ、熟練者はこの盛り上がりや、縦塗りの後、鏝で均す作業を行っている。本実験でも塗り重ねは実現できており、均す作業についても、本論文と同様に経路を作成することで、良好な壁面の仕上がりが期待される。

5. おわりに

本論文では、左官熟練者5名を対象にモーションキャプチャした鏝の軌跡（縦塗り15回）の分析に基づいて、左官熟練者の基本的な技能を再現した土塗り左官ロボットを開発した。複数名の熟練者の鏝の軌跡を平均化してロボットアームの経路を設計する方法を述べた。この経路には左官職人の鏝の動きの特徴が含まれている。また、本論文で述べた方法によれば経路設計に複雑なプログラミングを要しない。

実験では、開発した左官ロボットである程度塗り付けを行うことができ、繰り返し動作とすることで壁土の面を作ることも可能となった。

今後も左官熟練者のモーションキャプチャデータを用いた左官動作の分析を進め、他の鏝の軌跡からロボットアームの経路設計を実施する。特に、壁土の均し動作を実現させる予定である。また、ロードセルや深度センサを用いた熟練者技能の解析を行い、計測したデータをもとに壁面の仕上がりをリアルタイムで計測し、ロボットアームの制御に用いることを今後の展開としている。

謝辞

本研究は京都工芸繊維大学と（株）竹中工務店の共同研究であり、本論文の左官のモーションキャプチャは、京壁井筒屋佐藤、田中左官工業所の左官職人の方々、京都工芸繊維大学大学院生 辻 雅貴氏の協力を得ました。また、モーションキャプチャシステムについて（株）ノビテッ



図10 ロボットアームによる土塗り後の壁面

クより技術的な支援をいただき、KYOTO Design Lab 井上智博氏には、ロボットアームの環境整備を支援いただきました。ここに記してお礼申し上げます。

【参考文献】

- 1) PTU 技能科学研究会, 原 圭吾編著: 技能化学によるものづくり現場の技能・技術伝承, 日科技連, 2019
- 2) 矢島大輔: 建設現場の助っ人はロボ 誤差1ミリの職人芸・密着けるのにも一役, 朝日新聞, 2021.9.27, 朝日新聞デジタル, <https://www.asahi.com/articles/ASP9W4HKFP9VPTIL00L.html> (2022.6.4 参照)
- 3) Thomas Bock: The future of construction automation: Technological disruption and the upcoming ubiquity of robotics, Automation in Construction, No. 59, pp. 113-121, 2015
- 4) Stefan Neudecker, Christopher Brunsb, Roman Gerberse, Jakob Heyne, Franz Dietrich, Klaus Dröder, Annika Raatzb, Harald Klofta: A new robotic spray technology for generative manufacturing of complex concrete structures without formwork, Procedia CIRP, No. 43, pp. 333-338, 2016
- 5) 登尾育海, 村本 真, 西村智賢: 左官ロボット開発のための土塗り左官の動作解析, 日本建築学会近畿支部研究報告集・構造系, 第61号, pp. 1-4, 2021
- 6) 登尾育海, 村本 真, 西村智賢, 井上智博: 土塗り左官ロボットのプロトタイプの開発, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 情報システム, pp.105-106, 2021
- 7) 登尾育海, 村本 真, 西村智賢, バルナ・ゲルゲイペーター, 井上智博: 左官職人のモーションキャプチャデータを用いた土塗り左官ロボットの開発, 情報・システム・利用・技術シンポジウム論文集, No. 44, pp. 599-602, 2021
- 8) 矢田部学: クォータニオン計算便利ノート, MSS 技報, No.18, pp. 29-34, 2007
- 9) V. E. Kremer: Quaternions and SLERP, University of Saarbrücken, Department for Computer Science Seminar Character Animation, 2008
- 10) Grasshopper: <https://www.grasshopper3d.com/>, (2022.6.2 参照)
- 11) KUKA|prc: <https://www.robotsinarchitecture.org/kuka-prc>, (2022.6.2 参照)
- 12) KUKA Download Center: KR 10 R1100 仕様書, https://www.kuka.com/-/media/kuka-downloads/imported/6b77eecacfe542d3b736af377562ecaa/0000210360_en.pdf, (2022.6.2 参照)