

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 Development of Mud Plastering Robot by Using Motion Capture of Plasterer

○登尾 育海^{*1}, 村本 真^{*2}, 西村 智賢^{*3}, バルナ ゲルゲイペーター^{*4}, 井上 智博^{*5}
Ikumi NOBORIO^{*1}, Makoto MURAMOTO^{*2}, Tomomasa NISHIMURA^{*3},
BANA Geregely Péter^{*4} and Tomohiro INOUE^{*5}

*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.

*3 竹中工務店大阪本店設計部 修士(工学)

Chief, Building Design Dept., Osaka Head Office, Takenaka Corp., M.Eng.

*4 京都工芸繊維大学デザイン主導未来工学センター 特任研究員 博士(工学)

Project Researcher, Center for Design-centric Engineering, Kyoto Institute of Technology, Dr.Eng.

*5 京都工芸繊維大学高度技術支援センター 技術専門職員 修士(工学)

Chief Technical Officer, Advanced Technology Center, Kyoto Institute of Technology, M.Eng.

キーワード: 土塗り左官; モーションキャプチャ; 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において, 以下の問題が挙げられている¹⁾. (1) 暗黙知の理解を必要とし, 技能の習得に長い期間を要する. (2) 技能伝承する側とされる側の意識の差が大きい. (3) OJT による技能継承が整理されていない. これらの問題によって建設業界では技能継承者不足が進んでおり, 人手不足に繋がっている.

筆者らは, 建設施工における土塗り左官を対象とした施工の効率化を目指したロボットアームによるロボット工法の開発を進めながら, 左官の技能伝承の可能性と技能のアーカイブ化を検討している.

上記の検討では, 左官の動作分析をモーションキャプチャによって実施し, そこで得られた左官の動作分析を経て, 左官鋺の軌跡に着目し, ロボットアームの制御に用いた. 土塗り左官のモーションキャプチャーの詳細については, 文献2) で報告し, 鋺の動きは, 塗り付け時における鋺面と壁面との距離, 鋺面の回転動作が重要であること, 鋺の動きをもたらししている身体の動作は, 手首の回転と肘から肩にかけての動きが大きいことなどを示した. その後, 文献3) において, 文献2) のモーションキャプチャで得た鋺面重心の軌跡を用いたロボットアームの制御プログラムを構築し, それを用いた土塗り実験を行い, 土塗り左官ロボットのプロトタイプを発表した.

本報告では, はじめに文献2) と3) で述べた実験(実験1と呼ぶ)を概括する. 本研究では図1に示すソフトウェアを用いてロボットアームの制御データを作成し, 土塗り実験を実施している. 次に, 文献3) で行った土塗り

実験時のロボットアームの鋺の動きと熟練者の鋺の動きと比較し, 左官ロボットのプロトタイプの問題点を明らかにする. さらに, 下地を変えた場合の追加実験(実験2と呼ぶ)について述べ, ロボットアームによる連続した塗り付けが可能となったことを示す. なお, 本報告では土塗り動作のうち, 縦塗り^{2),3)}を実験対象とする.

2. 左官動作のモーションキャプチャ²⁾

ロボットアームの制御用データを取得するため, 左官熟練者(左官歴約35年)1名による土塗りの動作のモーションキャプチャ(Optitrack Motive 2.0.1 と VENUS 3DR Ver.5.6 を使用)を行った.

この実験で得た鋺面重心 SK の座標とオイラー角を入力とすることでロボットアーム先端の制御点を定義し, ロボットアーム上の鋺を制御する. 図2(a)は左官熟練者による土塗り動作1回分のSKの座標値の時刻歴, 図2(b)はSKのオイラー角の時刻歴である.

3. 土塗り左官ロボットのプロトタイプの開発³⁾

本研究では Grasshopper(ver1.0.0007)⁴⁾ 上で, モーションキャプチャで得たデータを用いた土塗り左官ロボットの制御プログラムを開発した(図1). 解析した鋺面重心の座標とオイラー角を csv ファイルで出力し Grasshopper で読み込む. 前処理として制御に不要な点を除きロボットアーム⁵⁾が動作可能範囲内にあるようにする. 次に, Grasshopper のプラグインである KUKA|prc⁶⁾ を用いてロボットアームの制御プログラムを構築した. 結果を src



図1 研究のフロー

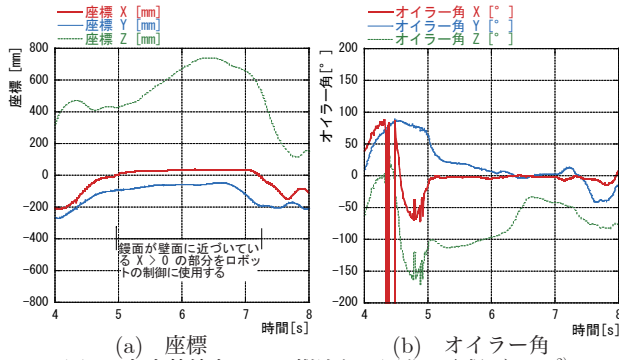


図2 左官熟練者による縦塗り1回分の取得データ²⁾

ファイルで書き出し、USBメモリを経由してロボットアームのコントローラに読み込むことで実機を制御する。最後に、ロボットアームによる縦塗りのシミュレーションを KUKA|prc を用いて Rhinceros⁷⁾ 上で行い、実機を動かす前にエラーの有無を確認した。

4. ロボットアームを使用した土塗り実験 (実験1)

4.1. 実験の概要

左官熟練者が行う単純な縦塗り動作1回分のデータを用いて制御プログラムを構築し、ロボットアームによる土塗り実験(実験1)を行った。また、実験時には熟練者による土塗り時と同様に鍍面に反射マーカを取り付け、モーションキャプチャを行った。

4.2. 実験の結果

前章で構築したプログラムを用いてロボットアームに

よる土塗り実験を複数回実施したところ、図3のような結果となった。1回の塗りでは壁面に塗られる前に滑り落ちてしまい、塗り重ねるごとに土付きが良くなっていったものの、鍍面に乗せた土を余りなく塗りつけられたのは7回目の塗りであった。

1回で土が付かない原因は、以下の可能性が考えられた。

- ロボットアーム上での鍍面の動作が、熟練者のものと違っている。
- 壁面の固定が弱く、鍍圧に負けてしまっている。
- 壁面にベニヤ板を使用したため摩擦が弱く、土が滑ってしまっている。
- 使用した鍍がステンレス製で、土離れが職人と異なる。

4.3. 鍍面の軌跡の比較

ここで、左官熟練者とロボットアームのモーションキャプチャの結果をもとに、土塗り時の鍍面の軌跡を比較し、左官ロボットのプロトタイプの評価を行う。

4.3.1 鍍面重心の軌跡の比較

図4は熟練者とロボットアームの土塗り時における鍍面重心の軌跡を表したものである。図4(a)は壁面と水平方向における鍍面重心の軌跡を表しており、これを見ると、熟練者(青破線)とロボットアーム(赤線)の軌跡の概形はほぼ一致している。ロボットアーム上での鍍面のYZ面の軌跡は左官熟練者の動きを再現している。

図4(b)は壁面と垂直方向における鍍面重心の軌跡を表しており、図上で左へ行くほど壁面との距離が近くなる。縦塗りでは下から上に向かって鍍を動かすため、図より熟練者とロボットアームはどちらも、塗り始めから徐々に鍍を壁面に押し付けている。ところが、ロボットアームは、塗り初めは鍍面と壁面の間に土が挟まるため、反発力でX方向の軌跡が少し異なる。ロボットアームは熟練者のような動作速度を出すことが出来ないため、壁土による押し戻し動作がここに表れている。

4.3.2 鍍の回転角の比較

図5のように鍍面上に鍍軸の直線 AB とその直交軸である直線 CD を定義し、Z 軸との間の回転角を YZ 平面と XZ 平面に投影した角度を用いて、熟練者とロボットアームの土塗り時における鍍の回転角を比較する。回転角は反時計回りを正とする。

熟練者とロボットアームの θ_{yz} と θ_{xz} の時刻歴を図5に



図3 ロボットアームによる土塗り実験(実験1)後の壁土の状態

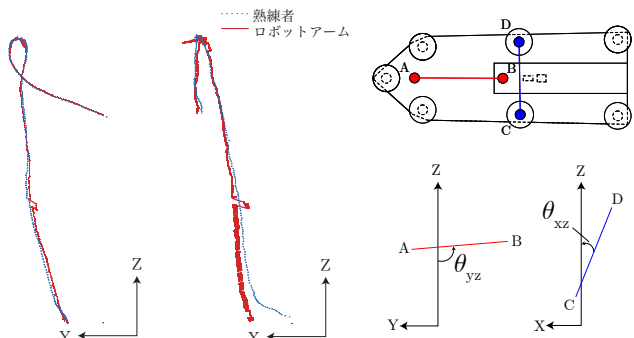


図4 土塗り時の鋳面重心の座標

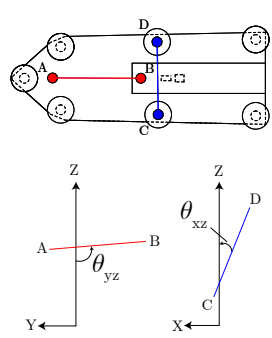
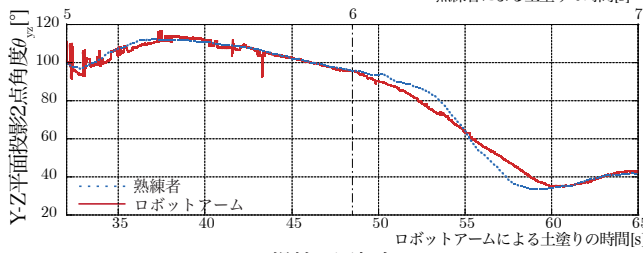
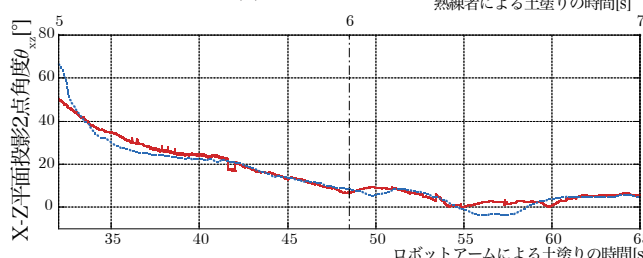


図5 鋳面上に定めた直線と座標軸の平面投影角の定義



(a) 鋳軸の回転角



(b) 鋳軸に対して直交軸の回転角
図6 鋳軸の平面投影角の変化

示す。横軸は計測を開始してからの時間を表しており、鋳が壁面に近づいてから離れるまでをプロットしている。

図6(a)より、熟練者とロボットアームは共に塗り初めは鋳先が横を向いており、塗り終わりに向けて鋳先を滑らかに上に向けている。図6(b)より、両者ともに塗り初めは鋳面と壁面がほぼ垂直で、塗り終わりに向けて徐々に水平に近づく。これは、土を乗せた状態で上を向いている鋳面を徐々に壁面に押し付けていることを表す。

これらより、ロボットアームは、熟練者とほぼ同じ鋳の軌跡を実現している。しかし、KUKA|preでは加速度制御をできず、速度一定でロボットアームが動作するため、時間軸を含めると熟練者と同じとはならない。ロボットアームにも速度限界があり、1回の塗りに熟練者よりも時間がかかる。以上の問題点を次章の実験2で改善する。

5. 土塗り下地による土塗り実験 (実験2)

5.1. 実験の準備

土付きの改善のため、下地を文献3)で熟練者が仕上げた土壁を下地として追加実験を実施した。また、下地は固定度を上げるため鋼製台座に固定し、図7のような配置とした。さらに、ロボットアームの鋳をステンレス製

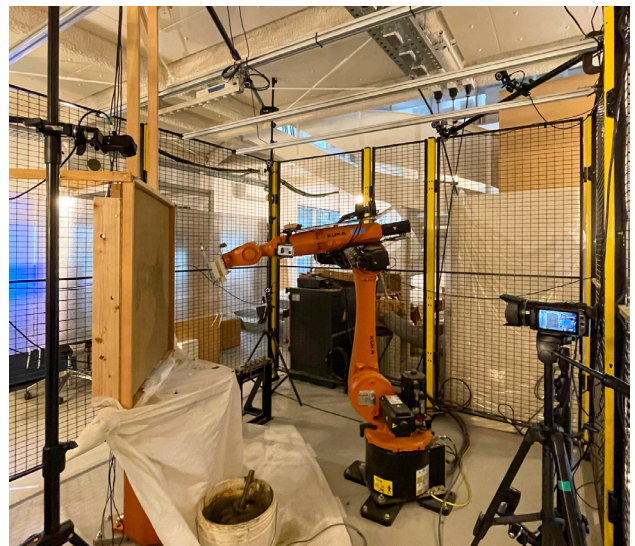


図7 土塗り左官ロボットの実験 (実験2) の様子



図8 土塗り実験 (実験2) の1回塗りの様子

から半焼き仕上げの鋳に変更した。最後に、下地壁面の位置が変更されたため、モーションキャプチャで計測した値を用いてロボットアーム制御の為の原点を調整した。

5.2. 実験の手順

左官職人に倣って壁面にブラシで適度に水掛けし、実験1より摩擦が多い壁面での土付きを調べる。1回塗りの後、同じ動作を水平方向に連続させて塗る実験を行った。鋳に乗せる壁土は、1回につき約500gとなるようにした。

5.3. 実験の結果

土壁を下地としたロボットアームによる土塗り直後の様子を図8に示す。1回の塗りで、図3の7回目より土付きが大幅に改善していることがわかる。

熟練者は、合板のようにすべりがある下地では鋳圧を変えて仕上げることができるが、ロボットアームの座標のみの制御では、下地を工夫し、壁面の固定度を上げることが必要である。

次に、図9のように同じ動作をY方向に-140 mmずつ3回移動させる制御プログラムを作り、4回連続で土塗りを試みる。なお、人のように両手で土の補充ができないため、1回の塗りが終わるごとに初期位置に戻り鋳面を上に向けて静止する動作を作り、人の手で土を補充する。

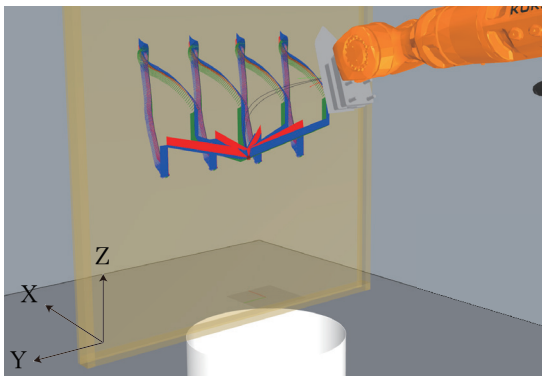
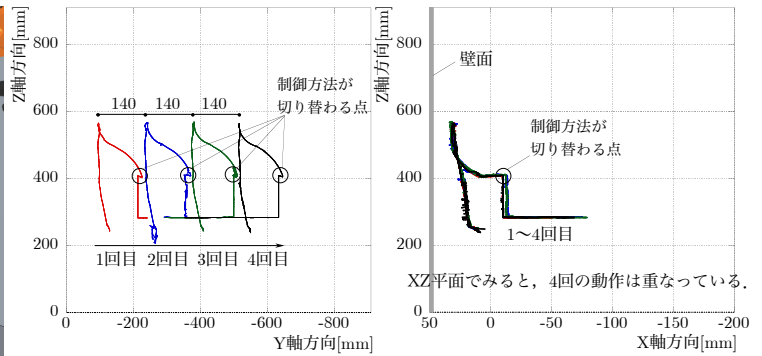


図9 4回連続で行う土塗り動作のシミュレーション



(a) 下地壁面と水平な面 (YZ平面) (b) 下地壁面と垂直な面 (XZ平面)
図11 4回連続で行った土塗り時の鋺面重心SKの軌跡



図10 4回連続で行った土塗り後の壁土の状態

図10は実験直後の壁面の様子である。図8の動作を4回連続して行い、壁面の広範囲に土を塗りつけることができています。ここでは、下地壁面上で一回前に塗った土と少し重なるように動作を計画したため、隙間なく塗りつけられた。また、塗りが重なる部分は、直前に塗った壁面がシミュレーションよりも手前にあるが、問題なく塗りつけることができた。

4回連続で行った土塗り時の鋺面重心SKの軌跡を図11に示す。図11(a)はYZ平面上の軌跡で、壁面上を鋺がどのように移動したかを表しており、ロボットアームが同じ動作をY軸方向に移動して4回繰り返していることがわかる。図中の動作が直線になる点は、モーションキャプチャデータから構築した土塗り動作と、Grasshopper上で定義した土補充動作の切り替わり点である。

図11(b)はXZ平面上の軌跡を表しており、鋺面と壁面の距離の関係を表している。図11(b)を見ると、4回分の土塗り動作時における鋺面と壁面の距離の関係がほぼ一致しており、塗り付け範囲の多少の重なりがあっても、壁土のような柔らかい材料であればロボットアームの制御に影響しないことがわかる。

6. おわりに

土塗りの左官を対象に、ロボットアームを用いたロボット工法を開発した。ロボットの動作は、左官職人の動作をモーションキャプチャーによって取得し、そこから抽出した基本動作によって鋺の座標を制御した。

この手法では壁面状態に応じたリアルタイム制御は困

難ではあるものの、左官動作をロボットアームによって実現できる。いまのところ、鋺圧等による制御もないため、ロボットアームの場合の下地は土付きがよいものが望ましい。本報告では中塗り土で仕上げた下地を使用した。さらに、別途作成した土補充の動作と組み合わせることで、連続的に土塗り作業が実現できることを確認した。

この繰り返し回数をさらに増やすことで、ロボットが粗い塗り付けを行い、それを人間が均して仕上げるといった分担作業の可能性も考えられる。

今後、左官ロボットを壁面状態に応じてリアルタイムに自動制御することが求められ、壁面状態の把握手法の開発と鋺圧による制御などの実装が必要である。

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、本研究のモーションキャプチャーは井筒屋佐藤の職人の方々にお世話になりました。壁土材料も井筒屋佐藤に手配頂きました。また、モーションキャプチャシステムについてノビテックの高橋隆宜氏に技術的な支援をいただきました。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) 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
- 3) 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. 9
- 4) Grasshopper: <https://www.grasshopper3d.com/>, (2021.3.4 参照)
- 5) KUKA Download Center: KR 22 R1610-2 仕様書, https://www.kuka.com/-/media/kukadownloads/imported/6b77eecacfe542d3b736af377562ecaa/0000321011_ja.pdf?rev=e4fbb544ada9852942d3262d6a0&hash=FDD43338643170FA3C89DBC1E2214594, (2021.1.15 参照)
- 6) KUKA|prc: <https://www.robotsinarchitecture.org/kuka-prc>, (2021.3.22 参照)
- 7) Rhinoceros: <https://www.rhino3d.co.jp/>, (2021.3.22 参照)