



第16回三菱電機カップ 全国大学生電気・自動化コンテスト
(クリエイティブデザイン部門提案書)

作品名： 「青花」——陶磁器釉下彩インテリジェント描画システム

チームコード： d9y9z5hc

コンテスト参加校： 浙江大学

指導教官： 昊敏、朱新傑

チームメンバー： 王亦楠、張世琦、王俊傑

2023年7月

摘 要： 日常生活をより美しく、そして伝統的手工芸品のデジタルトランスフォーメーションを推進し、陶磁器描画産業の自動化、インテリジェント化、差別化に寄与することを目的として、本プロジェクトでは、職人による釉下彩の技巧に基づき、三菱電機オートメーションRV-4FRL-D産業用ロボットを主体とし、「青花」陶磁器釉下彩インテリジェント描画システムを開発した。本システムは、パーソナルコンピュータをホストコンピュータとし、画像処理と軌道生成を行うものであり、WeChatミニプログラム「浙江省の青花絵」、CR800-D制御装置およびHG-KR13Jサーボモータなどのモジュールを含み、差別化されカスタマイズされた絵付け図案、古典的な釉下彩、迅速な筆の交換と顔料への浸漬などの機能を実現するものである。「中国伝統品トレンド」という美学を発揚し、「クリエイティブIP」の強化を図ると同時に、本システムは、古典的陶磁器の没入型創作環境を創出し、カスタマイズされた生産様式とサービス体系を支援するとともに、製造業の人件費という重圧を軽減し、アフターコロナの文化的消費の新時代を牽引するものである。

キーワード： 陶磁器釉下彩伝統工芸、RV-4FRL-D産業用ロボット、WeChatミニプログラム、デジタル画像処理、スプライン補間と経路選択アルゴリズム

1. プロジェクト設計の背景

2. プロジェクト設計の特長

- 2.1 民間の職人専門技法を踏まえ、伝統的な筆運び手順を体現
- 2.2 モバイル式WeChatミニプログラムを埋め込み、情緒あふれる絵付け図案のカスタマイズを実現
- 2.3 画像データ抽出アルゴリズムの開発、主要なパラメータのインテリジェントな伝達
- 2.4 経路計画ファイルアルゴリズムの設計、筆を下ろす軌道の正確な制御
- 2.5 ユーザーマシンとしてサーボモータを追加し、顔料トレイの角度を柔軟に変更

3. プロジェクト全体設計案

- 3.1 システムアーキテクチャ
- 3.2 プロセス設計
- 3.3 機械設計
 - 3.3.1 ロボットアーム治具と毛筆治具
 - 3.3.2 毛筆ホルダー
 - 3.3.3 顔料切替装置
- 3.4 電気設計
- 3.5 アルゴリズム設計
- 3.6 インタラクティブな設計

4. 期待されるプロジェクトの成果

- 4.1 中小規模の陶磁器カスタム生産というホットスポットにフォーカスした
釉下彩のインテリジェントな描画【9】
- 4.2 中国風オリジナルの復刻が陶磁器の伝統的手工芸の新時代に活力を呼び起こす
- 4.3 使用と鑑賞の両方を兼ねる、「至るところに桃源郷」と表現される生活の美学を構築する

1. プロジェクト設計の背景

「景德鎮は卓越した陶器の産地であるが、陶器の職人を産まず、職人は全国各地より景德鎮に集まり、陶器は全国各地に広がる」。中国の伝統的な陶磁器工芸品は、今昔を問わず、中華民族の文明の成就と精神的気風を物語る重要な側面であると見なされてきた。

釉下彩磁器は、陶磁器の一種であり、まず半製品の白地に顔料を用いて絵付け図案を描き、さらに釉薬を施し高温の窯に入れて焼き上げる磁器のことをいう。その表面は光沢があり、滑らかで、詩や絵画などで彩られる。このような**美術的価値と物質的価値を兼ね備えた**器具は、現代陶芸と陶磁器製造産業の大規模な流れ作業の発展に伴い、すでに世界的に通用する芸術品となっており、振興を図るべきである。

しかしながら、伝統工芸としては、コロナ対策が常態化した時期において、**当該産業全体が内部からの苛烈な再編を余儀なくされた**。釉下彩は、専門の職人が不足し、全てを手作業で行うことによるコストは高額で、時間が掛かり、肉体的な負担も大きく、技術の継承が困難であるなどの問題に直面していることから、自動化、デジタル化、インテリジェント化といった新世代の情報技術生産への投資に生き残りの希望を託す¹⁾。

現在、「第十四次五か年計画」で文化及び観光発展計画が実施される文化大発展時代を背景に、新産業と新経済モデルにおいて「**時代に応じた工芸**」が求められ、新時代の多様なリソースとの「垣根を超えた」差別化と統合がより重視されつつあり、釉下彩の発展もまたカスタマイズされた消費や空気感による消費の傾向が強まりつつある。

三菱電機オートメーション製品は、6軸産業用ロボットとサーボ制御システムに優位性があり、他のブランドに比べ、安定性が高く、高速制御を実現し得る。また柔軟な構成が可能で、強力な技術支援を提供し得るものである。

当チームが設計した「青花」——陶磁器釉下彩インテリジェント描画システムは、三菱電機産業用ロボットの本体構造をベースに、WeChatミニプログラム、人工知能などの新科学技術産業リソースを統合し、差別化された設計とインテリジェント化された描画を一体化することで、**伝統的な陶磁器産業のオートメーション化、デジタル化、インテリジェント化のアップグレードを促すのみならず、伝統文化の品格を守り、民族の文化的遺伝子を継承すること**に寄与し、さらには陶磁器製品の差別化ニーズを満たし、文化の独創性を高め、**中国の陶磁器芸術のグローバル化、ローカリゼーションの統合を後押しするものである**。

2. プロジェクト設計の特長

2.1 民間の職人専門技法を踏まえ、伝統的な筆運び手順を体現

入念な調査研究と設計を通じて、本システムは、伝統的な釉下彩の経験と技巧を最大限に生かし、高精度で制御性の高い三菱製産業用ロボットアームを用いて、ユーザーの描画ニーズに基づき、筆を下ろす角度と絵筆の線の太さを継続的に調整し、筆づかひの魅力を守ると同時に、筆を顔料に浸すに際して顔料の量を制御するため何度も筆をしごき、滑らかな筆先を形作って、精緻な絵付け図案を描画するなどの毛筆での手書き技法を取り入れた。

2.2 モバイル式WeChatミニプログラムを埋め込み、情緒あふれる絵付け図案のカスタマイズを実現

システム稼働シナリオとユーザーの差別化ニーズに基づき、当チームはWeChatミニプログラム「浙江省の青花絵」を自主設計した。当該ミニプログラム内で陶磁器の白地モールドのサイズ、絵筆の色と太さを選択でき、指定のエリアに描画する対応画像をアップロードすれば、システムがバックグラウンドアルゴリズムを介して画像データを抽出する。このようにユーザーのエモーション

ナルな体験を強化し、アプリケーションシナリオを放射的に拡大することで、ユーザーを傍観者から参加者に変え、陶磁器への絵付けのハードルを引き下げる。

2.3 画像データ抽出アルゴリズムの開発、 主要なパラメータのインテリジェントな伝達

ネットワーク上の既存の画像につき、画像の色と線のデータを取得するため、我々は画像に対してエッジ抽出、ラスタライズ、接続性解析、色認識などの一連の操作を実行し、画像データを抽出する画像処理アルゴリズムを開発した。ミニプログラム内の画像抽出については、バックグラウンドアルゴリズムを介して画像データを抽出するものとした。

2.4 経路計画ファイルアルゴリズムの設計、筆を下ろす軌道の正確な制御

筆の交換、色の変更および顔料への浸漬など固定経路の計画につき、我々はデモンストレーターを利用して合理的な位置をデモンストレーションした後、ロボットアームの直線補間と関節補間の方法を用いて経路計画を実行した。描画経路の計画では、我々はバックグラウンドで取得した画像データに対する処理を行い、一連のスプラインファイルを生成し、スプラインファイルをRT Tool-Box3にインポートしてスプライン補間を行うことで、ロボットアームの描画軌道制御を実現した。このプロセスにおいて、我々はPythonを用いてスプラインファイル内の座標点に対する修正を行うことで、太、中、細の三種の筆触効果を実現し、かつ毛筆の起筆、描画、収筆のすべてを精緻に設計することで、ロボットアームによる人の手に近い描画効果を確保した^[2]。

2.5 ユーザーマシンとしてサーボモータを追加し、顔料トレイの角度を柔軟に変更

本システムでは、ロボットアームに追加軸を設置し、サーボモータをユーザーマシンとして、インテリジェント描画回転軸プラットフォームを構築した。ホストコンピュータは制御装置を介してモータ駆動を実現し、ヘリカルギアの機械構造による伝導を介して顔料トレイの固定と回転を制御する。ロボットアームの作業負荷と制御の複雑性を軽減すると同時に、指定色の変更プロセスを完了する。

3. プロジェクト全体設計案

3.1 システムアーキテクチャ

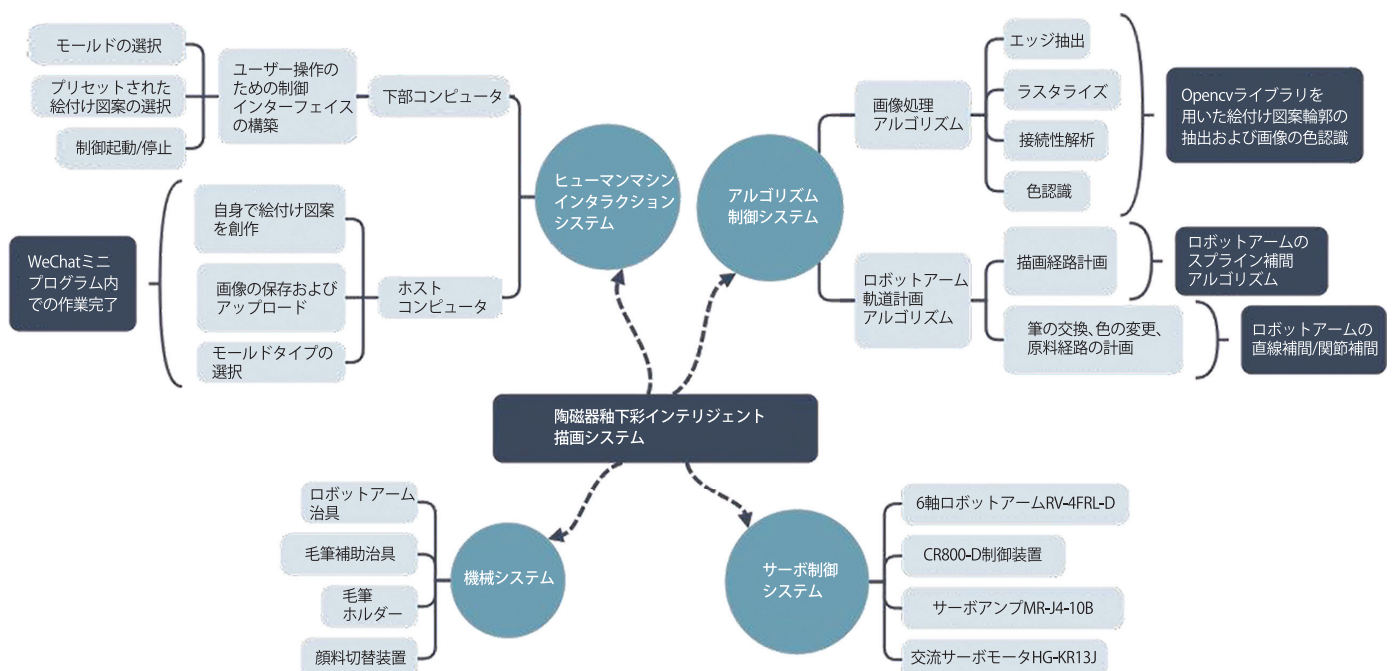


図1 システムアーキテクチャ図

システムは、ヒューマンマシンインタラクションシステム、サーボ制御システム、アルゴリズム制御システムおよび機械システムという四つの部分で構成されるものである。

ヒューマンマシンインタラクションシステムは、主にホストコンピュータとWeChatミニプログラムという2つの部分を含む。WeChatミニプログラム「浙江省の青花絵」を介して、ユーザーは、描画するモールドのタイプ、サイズおよび絵筆の色、太さを自身で選択の上、差別化された絵付け図案を自作し、かつ自作した絵付け図案をホストコンピュータにインポートすることが可能である。ホストコンピュータ部分は制御インターフェイスを含み、描画プロセスの起動と停止をリアルタイムで制御し、プログラムの実行プロセスを監視することが可能である。

サーボ制御システムは、RV-4FRL-D 6軸ロボットアーム、CR800-Dロボット制御装置、MRJ4-10BサーボアンプおよびHG-KR13J交流サーボモータなどの部分を含む。当該システムは、ロボット制御装置を介してロボットアームとモータの動作を同時かつ柔軟に制御し、手作業による描画制作シナリオをシミュレートすることが可能である【3】。

アルゴリズム制御システムは、主に画像データ抽出アルゴリズムとロボットアーム経路計画アルゴリズムを含む。画像データ抽出アルゴリズムは、画像内の一筆毎の位置データを抽出するために使用され、経路計画アルゴリズムは、抽出された画像データに基づきスプラインファイルを設定および生成するものであり、生成されたスプラインファイルをTR ToolBox3にインポートすることで、適切なロボットアーム経路を生成することが可能である。

機械システムは、ロボットアーム治具、毛筆補助治具、毛筆ホルダー、顔料切替装置、磁器プレートホルダーを含む。ロボットアーム治具と毛筆補助治具は、絵筆の正確な保持を実現する。毛筆ホルダーは、主にロボットアームの筆の交換操作を容易にするものであり、顔料切替装置は、絵付けする色を変更するための核心的装置であり、磁器ホルダーは、描画する毎にモールドの位置がほぼ変わらないようにするためのものである。

3.2 プロセス設計

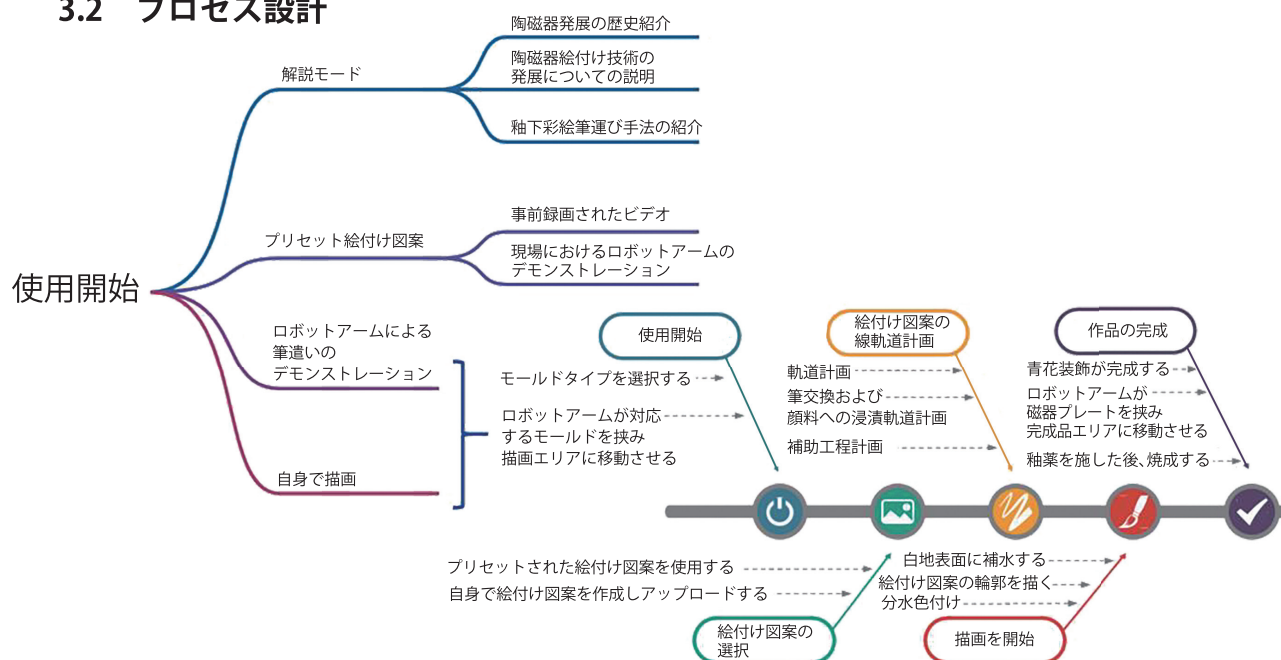


図2 プロセス全体のブロック図

プロジェクトの全プロセス:図に示すとおり、当該システムには選択可能な複数の異なるモデルがある。その中の「自身で描画する」モデルについて重点的に紹介する。ユーザーはWeChatミニプログラムを開き、使用説明に従ってモールドサイズ、絵筆の色と太さを選択し、描画したい絵付け図案を自身で設計しアップロードする。描画の準備作業が完了したら、ホストコンピュータが画像データ抽出アルゴリズムとロボットアーム経路計画アルゴリズムを呼び出し、ユーザー

がアップロードした絵付け図案に対してパラメータの抽出、軌道の最適化、スプライン補間と軌道計画を行い、最終的にロボットアームが認識可能なprgファイルを生成し、ロボットアームに転送する。その後、ロボットアームは、計画された軌道に従い、ユーザーが描画した順序どおりに、ユーザーの絵付け図案を一筆ずつ描画する。

本システムは、ユーザーが選択できるように、3種の異なるタイプのモールドといくつかのプリセットされた絵付け図案を提供するものであり、システムの構築時に、3種のモールドに対する3Dモデリングが実施され、かつプリセットされた絵付け図案の軌道計画も計算済みであり、下位コンピュータに保存されている。

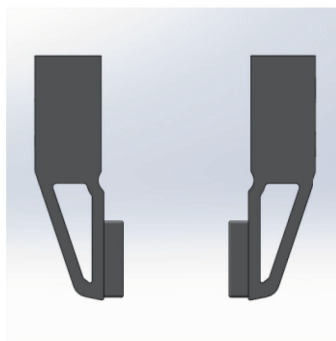
3.3 機械設計

3.3.1 ロボットアーム治具と毛筆治具

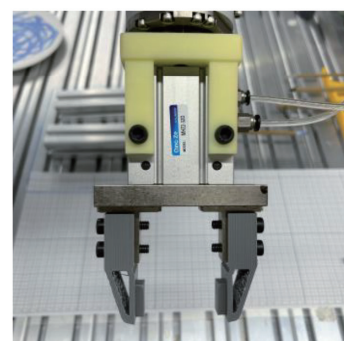
本プロジェクトでは、MHZ2-32Dフィンガーシリンダがロボットアームの作業端として使用され、対応する拡張グリッパーが設計および3Dプリントされている。グリッパーの先端にはロボットアームの位置決めと正確に挟んで固定するための長方形の突起がある^[4]。



(a) MHZ2-32Dフィンガーシリンダ



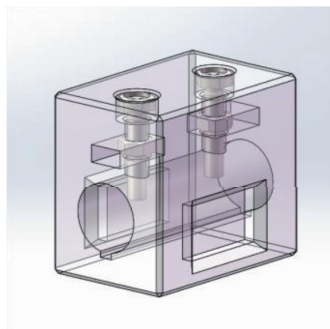
(b) 拡張グリッパー



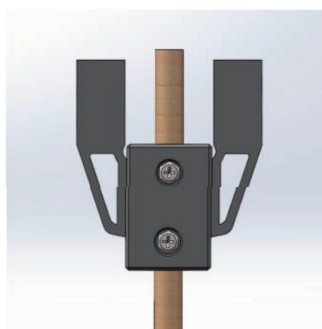
(c) 実物組立図

図3 ロボットアーム治具

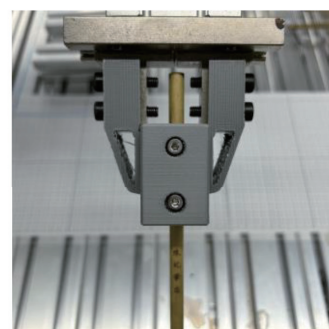
毛筆治具とロボットアーム拡張グリッパーには凹凸の嵌合関係があるため、設計図2(a)に示す毛筆補助治具を設計した。全体の形状は長方形であり、中央には多様な規格の毛筆をその中通すことができる円形の貫通穴がある。貫通穴底部には毛筆の回転を抑え、位置決めに資する凹溝があり、貫通穴上方にはネジ止めを実現し、毛筆の位置を厳密に制限するボルト貫通穴とナット穴がある。治具両側にはロボットアーム拡張グリッパーの突起とぴったり嵌合し、かつ位置決め時の誤差による嵌合位置のズレを防止する凹溝があり、拡張グリッパーの突起にはフィレットが施され、また補助治具の凹溝周辺は面取りされているため、挟んで固定した際の位置決めの耐障害性が向上する。



(a) 毛筆補助治具



(b) 固定シミュレーション



(c) 実物組立図

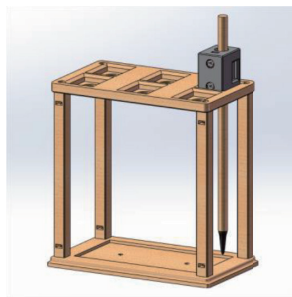
図4 毛筆治具

3.3.2 毛筆ホルダー

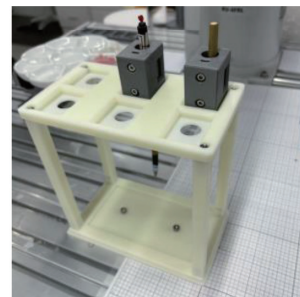
ロボットアームが毛筆を固定しやすいよう、専用の毛筆ホルダーを設計した。図3に示すとおり、ホルダーの6つの位置はそれぞれ異なる規格の毛筆に対応しており、位置決めの誤差を防止するため、凹溝は同様に面取りされている。



(a) 上から見た毛筆ホルダー



(b) 支持シミュレーション

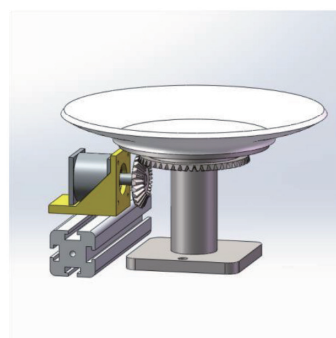


(c) 実物組立図

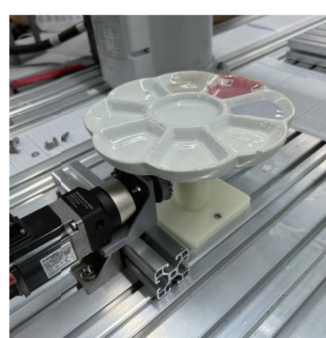
図5 毛筆ホルダー

3.3.3 顔料切替装置

経路計画の形式でロボットアームをさまざまなエリアに移動させ顔料への浸漬を行うと、一面において経路計画の作業負荷が増大し、他面においてロボットアームの動作範囲が拡大するため、動作の不確定性が著しく高まってしまう。したがって、三菱HG-KR13J交流サーボモータをロボットアームの追加軸として導入し、モータの回転を顔料トレイの回転に伝達する歯車伝達機構を設計することで、色変更機能を実現した。三菱製サーボモータの高い制御精度が色変更の正確性を確保すると同時に、歯車伝達機構が空間利用率を大幅に向上させ、システム全体のコンパクト化に成功した。



(a) シミュレーション模型図



(b) 実物組立図

図6 顔料切替装置

3.4 電気設計

システムは、三菱電機RV-4FRL-D産業用ロボットを中心に据え、主制御装置としてサーボ制御装置CR800-Dを、ホストコンピュータとしてPCを、インタラクティブインターフェイスとしてWeChatミニプログラム「青花絵」をそれぞれ採用し、さらにサーボモータモジュールを追加して優良な制御効果を実現したものである。

電気設計では、三菱製電気設備につき、三菱電機製ロボットおよび駆動装置の高精度、高速制御、ならびに三菱電機の統合的サービスが実証された。



図7 電気チャート

3.5 アルゴリズム設計

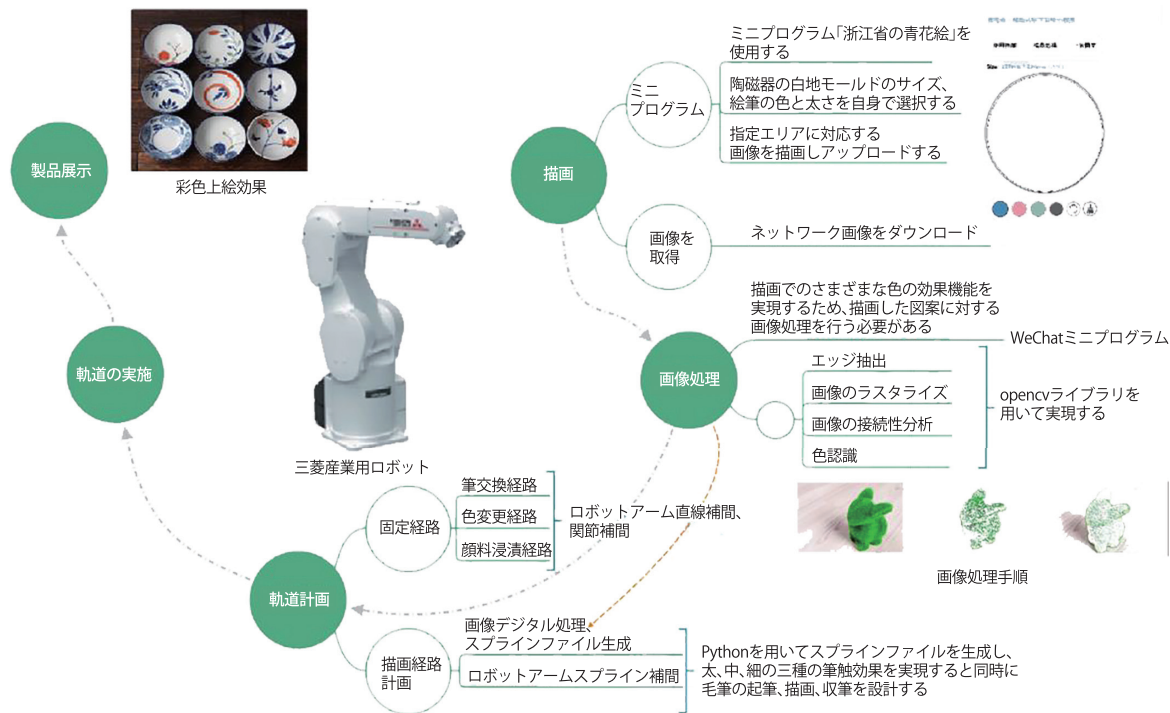


図8 アルゴリズムプロセス設計図

毛筆で太、中、細という3種類の太さの異なる線を実現するには、筆の上げ下げだけでは不十分であり、さらに毛筆とプレートとの傾斜角を小さくし、毛筆とプレートの接触面積を増加させる必要があることから、我々は、描画中に線の太さの分布に基づき、毛筆の筆運びの角度と高さを常に変化させ続けることで、良好な描画効果を実現した^[5]。

この他、毛筆の起筆と収筆も極めて重要であり、起筆は順筆と逆筆に区分され、順筆時は、描き始めをより高く、起筆をより鋭くし、逆筆時は、毛筆を下方に押し当て、起筆を太くする。収筆も蔵鋒と露鋒に区分され、蔵鋒時は、毛筆を垂直に立てて持ち上げ、露鋒時には毛筆に一定の角度を付けて持ち上げる必要がある。我々はスプラインファイルの冒頭と末尾の適切な位置に高さや位置が異なる点を追加し、点の追加と削除によって毛筆の異なる起筆と収筆方法を実現した^[6]。

具体的な実現プロセスは次のとおりである。まず得られたある一筆の座標点データに基づき、当該筆画の筆運び軌道を求め、起筆時における所与の筆先の高さや傾斜角を踏まえて、当該筆画中のある一点の毛筆末端の構えを取得した後、その構えのオイラー角表示を固定角表示に変換し、RT ToolBoxソフトウェア中のロボットアームの体勢表示と一致させ、さらに当該点のその他パラメータを設定した。上述の手順を繰り返して、当該筆画を構成するすべての離散点を含むスプラインファイルを取得し、当該スプラインファイル処理した。起筆処理：スプラインファイルの冒頭に適切な点を追加し、順筆と逆筆を実現した。¹⁷⁾描画時の筆触処理：描画時の筆触処理は、中間点の構えを修正することで実現されるものであり、一定の規律に従って中間点の高さと角度を修正することで筆触に対する制御を行い、描画中の毛筆の押し込みと傾斜を実現した。収筆処理：スプラインファイルの末尾に対する処理を行い、点を合理的に増減および修正し、蔵鋒と露鋒の収筆を実現する。スプラインファイル処理した後、RT ToolBoxをインポートしてスプライン補間を行い、要件に適合する経路を生成するものとした。

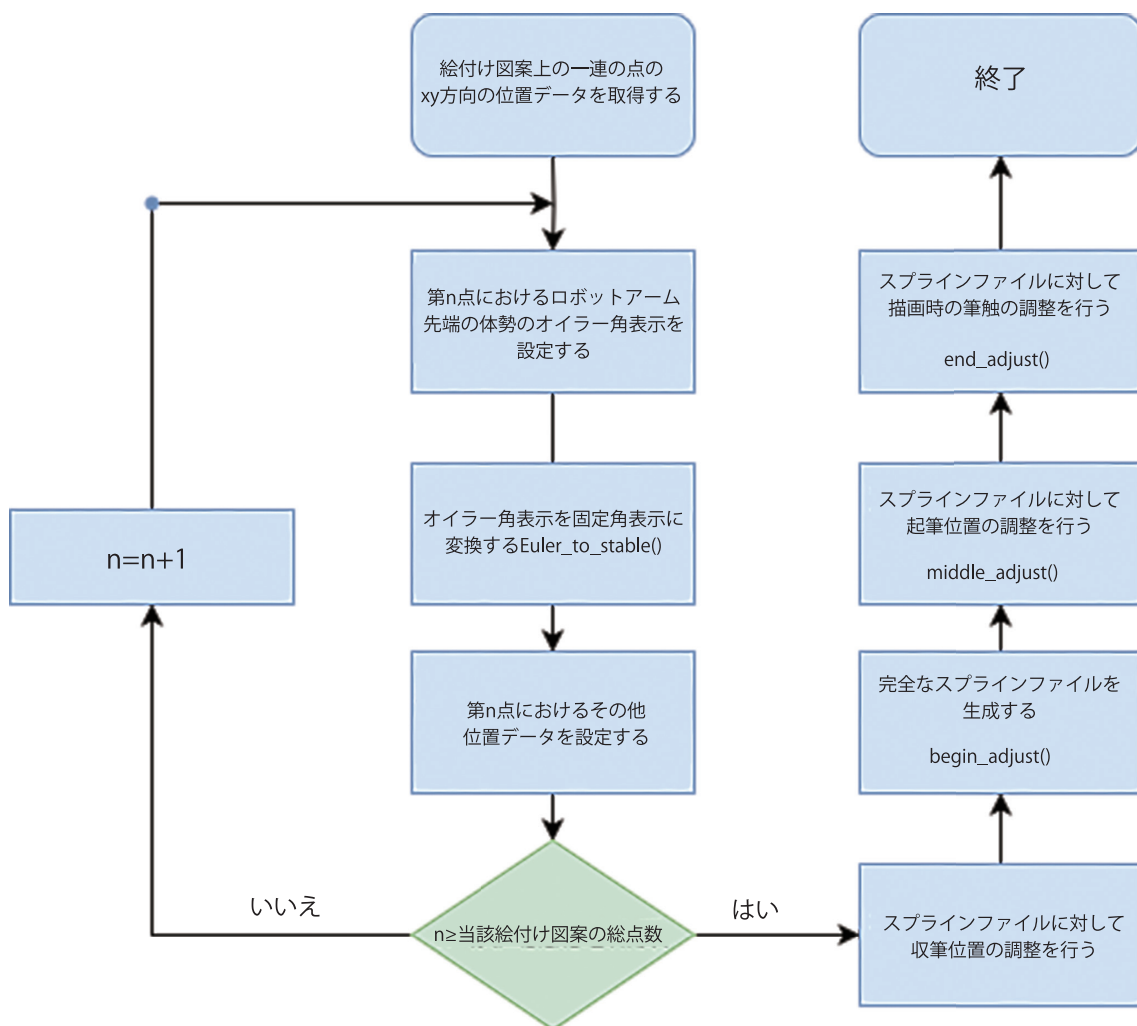


図9 ソフトウェアプロセス図

3.6 インタラクティブな設計

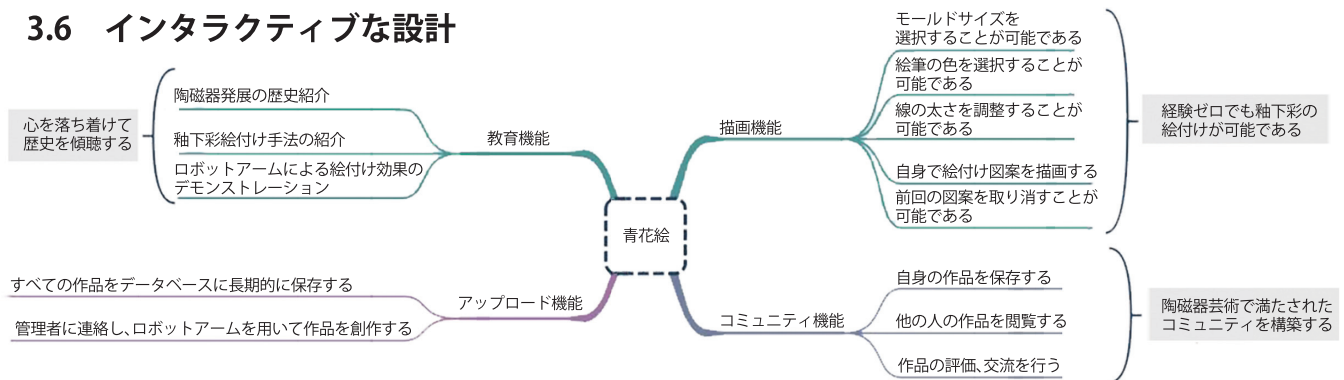


図10 WeChatミニプログラム「青花絵」のアーキテクチャ

本プロジェクトのインタラクティブシステムは、主に自主開発のWeChatミニプログラム「浙江省の青花絵」を採用するものであり、当該ミニプログラム機能の全体的なアーキテクチャはチャートに示すとおりである。その最も重要な機能は描画であり、ユーザーは円盤形のカンバスに自由に(絵付け図案を)創作でき、モールドのサイズ、絵筆の色、太さはいずれも任意に変更することが可能である。本ミニプログラムは、ハードルの高かった釉下彩をいつでもどこでも創作可能な一般向けのプロジェクトに変更し得るものである^[8]。

さらに、本ミニプログラムは、コミュニティ機能を備え、自身の描画履歴を保存できるのみならず、他の人がシェアした作品を閲覧することができ、陶磁器絵付けコミュニティを構築することが可能である。他にも本ミニプログラムには、多くの陶磁器、釉下彩技法発展の歴史などのコンテンツを含むコーナーがあり、一定程度の教育的機能を有する。最後に、ユーザーがロボットアームで自身の作品を制作したい場合には、管理者に連絡すれば、我々がユーザーのアップロードした絵付け図案を後処理した後、ロボットアームに送信し、描画を完成させることが可能である。

後処理は、座標点マッピング、ベジェ曲線フィッティング、サンプリング、筆運び処理などのコンテンツを含むPythonスクリプトを介して完了する。

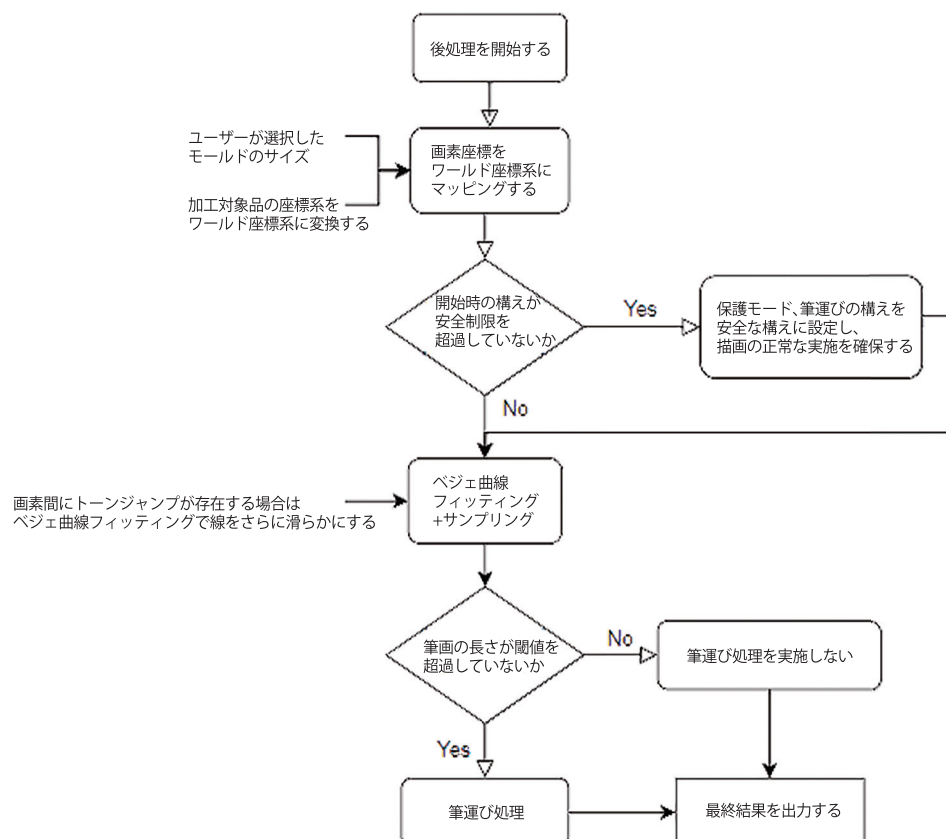


図11 後処理アルゴリズムプロセス

4. 期待されるプロジェクトの成果

本システムは、流れ作業ラインに組み込むことができるため、**中小規模の釉下彩カスタム製造工房**を主なターゲット市場として想定するものである。現在、実行可能な主な描画法には**金箔押し工業製法と伝統的な手描き技法**があり、これらは絵付け図案の重複率が高く、新規性が低いことから、本システムでは、コストを削減し、作業時間を短縮するとともに、陶磁器産業のサービスレベルを向上させることが可能である。

また、中国風の佇まいを呈することから、**さまざまなタイプの展覧会現場**への応用シナリオも想定する。店舗などの小規模シナリオ、博物館、ファーマーズマーケットなどに比べ、展示会では、本システムのインテリジェントで柔軟なヒューマンマシンインタラクションデザイン、ユニークな味わいとアンティークな外観といった特長、展示向きの伝統工芸のプロセスをそれぞれ魅力的に見せることが可能である。

4.1 中小規模の陶磁器カスタム生産というホットスポットにフォーカスした釉下彩のインテリジェントな描画^[9]

本システムは、陶磁器産業が粗放さを脱して、標準化、高品質な発展を遂げることに寄与し、中小規模の陶磁器産業の経済的地位を向上させるものである。カスタム製造サービスのブームを把握し、業界内におけるリソースの冗長性問題を効果的に解決する。カスタマイズされたニーズに対応したインテリジェントで柔軟な産業システムはサービス指向の製造業の変革とアップグレードも強力に推進する。

4.2 中国風オリジナルの復刻が陶磁器の伝統的手芸の新時代に活力を呼び起こす

ハイテクを駆使した伝承手段は「新しい職人」の実現手段とリソースの「垣根を超えた」統合のために素晴らしいチャンスを提供する。本システムは、大衆と無形文化遺産との距離を縮め、手工芸品の展示販売活動に活力を与え、国内外において人々の中国伝統工芸や美術に対する強い関心を惹起し、伝統的な陶磁器文化継承の自主性と創造性を高めるものである。

4.3 使用と鑑賞の両方を兼ねる、「至るところに桃源郷」と表現される生活の美学を構築する

現在、市場に流通する工芸品には、デザイン性、創意性に欠ける、商業的アピールが顕著に過ぎるといった問題があり、ビジネスプロセスにおいて文化的意味合いと販売収益性のバランスを取することは困難である。没入型PRと体験モデルはアフターコロナの文化観光市場経済における差別化された消費の割合を高め、アフターコロナの現代人のレジャースタイルにもフィットする。

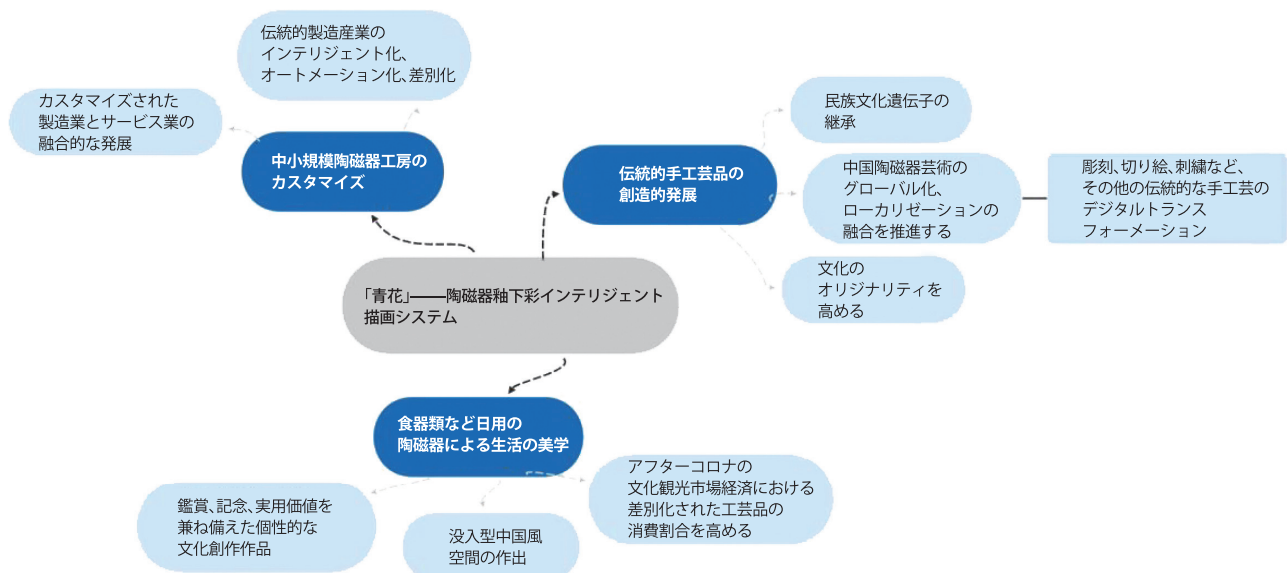
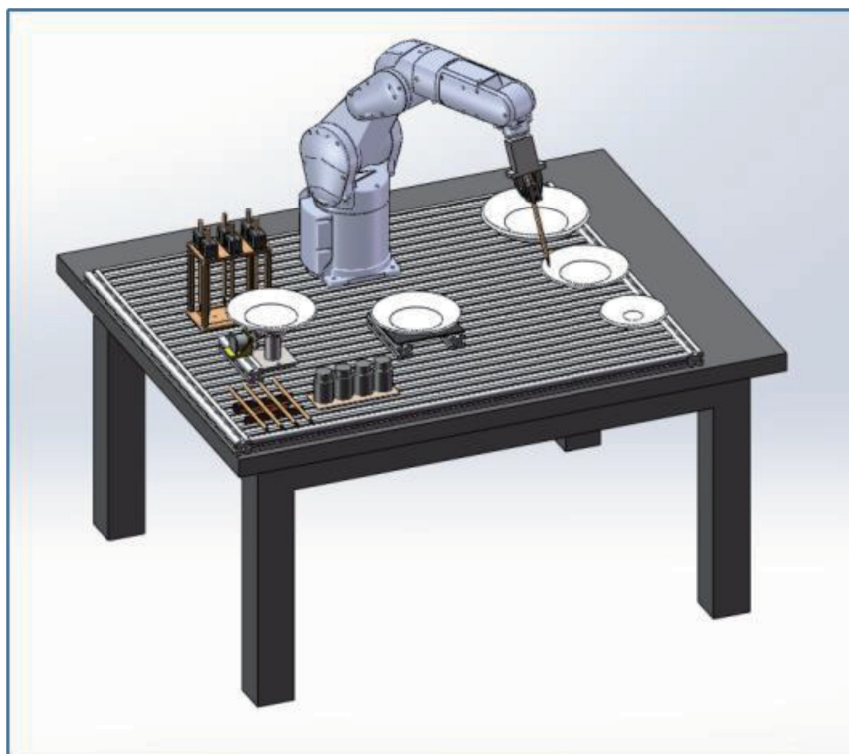


図12 プロジェクトの放射的拡大効果

システム全体の外観設計



シミュレーション組立図



実物組立図

参考文献

- [1] 林岩. 新时代传统手工艺发展热点与趋势[J]. 中国非物质文化遗产, 2022, No. 14 (06) :81-89.
- [2] 三菱电机工业用机器人 MELFA-FR 系列说明书.
- [3] 三菱电机自动化 RT ToolBox3 软件操作说明书.
- [4] Crooks W, Vukasin G, O' Sullivan M, et al. Fin ray effect inspired soft robotic gripper: From the robosoft grand challenge toward optimization[J]. Frontiers in Robotics and AI, 2016, 3: 70.
- [5] 陈红, 王代强. 基于 OpenCV 的高精度视觉测量系统设计[J]. 工具技术, 2022, 56(07) :128-132.
- [6] 段静媛. 中国画的笔法与运笔技巧[J]. 美与时代(中), 2016, No. 649 (04) :42-43. DOI:10.16129/j.cnki.mysdz.2016.04.017.
- [7] 刘淞佐. 基于 Spark 的并行模拟退火算法及其在 TSP 问题中的应用[D]. 北方民族大学, 2022. DOI:10.27754/d.cnki.gbfmz.2022.000263.
- [8] 张龙, 肖俊, 程晓龙等. 基于多类型几何图元匹配的三维点云配准[J]. 中国科学院大学学报, 2023, 40 (02) :258-267.
- [9] 翟新岗. 陶瓷贴花纸装饰常见缺陷分析及解决方法[J]. 陶瓷, 2010, No. 234 (02) :40-43. DOI:10.19397/j.cnki.ceramics.2010.02.010.