

Title	専門的知識を必要としないロボットアームの設計支援システムSketch2Jointsの提案
Author(s)	品田, 康平; 吉田, 匠吾; 謝, 浩然
Citation	情報処理学会第212回ヒューマンコンピュータインタラクション研究発表会, 2025-HCI-212(17): 1-7
Issue Date	2025-02-26
Type	Conference Paper
Text version	publisher
URL	http://hdl.handle.net/10119/19709
Rights	<p>社団法人 情報処理学会, 品田康平, 吉田匠吾, 謝浩然, 情報処理学会第212回ヒューマンコンピュータインタラクション研究発表会, Vol.2025-HCI-212, No.17, 2025, 1-7.ここに掲載した著作物の利用に関する注意: 本著作物の著作権は(社)情報処理学会に帰属します。本著作物は著作権者である情報処理学会の許可のもとに掲載するものです。ご利用に当たっては「著作権法」ならびに「情報処理学会倫理綱領」に従うことをお願いいたします。 Notice for the use of this material: The copyright of this material is retained by the Information Processing Society of Japan (IPSJ). This material is published on this web site with the agreement of the author (s) and the IPSJ. Please be complied with Copyright Law of Japan and the Code of Ethics of the IPSJ if any users wish to reproduce, make derivative work, distribute or make available to the public any part or whole thereof. All Rights Reserved, Copyright (C) Information Processing Society of Japan.</p>
Description	情報処理学会第212回ヒューマンコンピュータインタラクション研究発表会, 芝浦工業大学豊洲キャンパス, 東京, 2025年3月5日-7日

専門的知識を必要としないロボットアームの 設計支援システム Sketch2Joints の提案

品田 康平^{†1,a)} 吉田 匠吾^{†1} 謝 浩然^{†1}

概要: 家庭用 3D プリンタの普及により、3D モデルの立体化は身近なものになったが、2つの理由から、依然としてロボットアームの製作は困難である。理由の1つはロボットアームの動きのシミュレーションに運動学的知識が必要なこと、もう1つは 3D モデリングソフトの操作の習得に時間がかかることであり、どちらも専門的知識を必要とするものである。そこで本研究では、スケッチインターフェースを用いたユーザの設計からシミュレーションと 3D モデルの製作をプログラムで行うシステム Sketch2Joints を開発した。ユーザは画面内のキャンパス上でクリック、ドラッグなどの単純な動作によってロボットアームを設計する。設計したロボットアームをロドリゲスの任意軸周りの回転公式により運動学的シミュレーションを行う。また、設計したロボットアームを 3D プリンタで製作可能な 3D モデルとして出力することで、ユーザは 3D モデリングソフトを使わずに 3D モデルを得ることができる。専門的知識を必要としないロボットアームの設計、製作を実現する。専門的知識を持たないユーザを対象としたユーザ実験により有用性を示した。

1. はじめに

近年、家庭用 3D プリンタが普及したことで、自宅や学校でも容易に 3D モデルを立体化することが可能になった。ロボティクス分野では、逆運動学計算アルゴリズムの実用性を示すために、3D プリンタでロボットアームを製作するなど、以前よりも簡単にロボットアームを製作することが可能になった [1]。設計プロセスを自動化した研究もあり、運動学的構造と実行するタスクを入力することで、システムが自動的に運動解析、動的解析、強度解析を行い、修正しながら解析を繰り返すことでロボットアームを設計する [2]。

しかし、ロボティクス分野以外では、関係する分野の広さから依然としてロボットアームの製作は容易ではない。ロボティクス分野の自動設計システムは Denavit-Hartenberg 記法 (DH 法) のパラメータ入力が必要であり、運動学的知識が不可欠である。3D モデリングソフトで作成した部品から DH パラメータを読み取り、運動学的シミュレーションを行うことも可能だが、Autodesk Fusion や SolidWorks を用いた 3D モデリングは専門的スキルが必要である。

WRLKit[3]はこの問題の解決に取り組んでおり、ロボット工学や人間工学の知識を持たない人々が迅速に装着型ロ

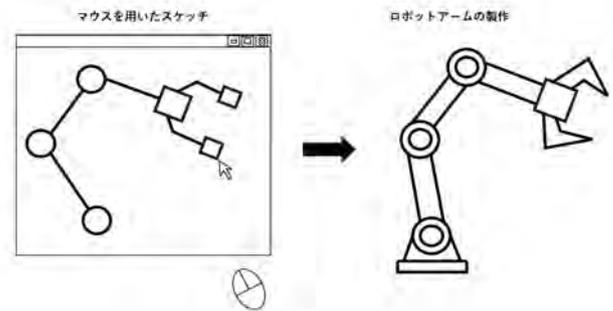


図 1: Sketch2Joints の研究概要図

ットアームのプロトタイプを製作できるように支援することを目的とした研究である。ロボットアームを取りつけるユーザの身体のカプチャと目的のタスクを入力とし、最適な取付位置と構造を生成することでユーザのラピッドプロトタイピングを支援することができる。しかし、この方法ではユーザがロボットアームの設計を行うことはできない。

そこで、本研究では専門的知識を持たないユーザが行うロボットアームの設計と製作を支援するシステム Sketch2Joints を提案する。Sketch2Joints では、図 1 のように、従来キーボードによる数値入力で行っていた関節の位置や接続関係の設計をクリックやドラッグなどの簡単な操作で行う。これにより、ロボットアームに関する知識を

^{†1} 現在、北陸先端科学技術大学院大学

^{a)} s24110225@jaist.ac.jp

持たないユーザも直感的かつ手軽に設計を行うことができる。また、入力段階でロボットアームのイメージが視覚的に伝わるため、関節の個数や回転軸などの変更を早期に行うことができる。加えて、ユーザが入力したデータを基に運動学的シミュレーションを行う。動作が視覚的に伝わり、ユーザのイメージと照らし合わせて設計を確認することができる。さらに、ユーザの設計したロボットアームを自動的に印刷可能なデータとして出力することで、ユーザの知識に左右されないラピッドプロトタイピングが可能である。

2. 関連研究

本研究は、スケッチインターフェース、運動学計算、Human-Computer Interaction(HCI), Human-Robot Interaction(HRI) の分野と深く関係しているため、これらについての関連研究を紹介する。

2.1 スケッチインターフェース

多くのソフトウェアは、マウスを用いて画面上のボタンやメニューを操作するグラフィカルユーザインターフェース(GUI)で構築されている。GUIは、すべての操作をキーボードで入力するコマンドラインインターフェースに比べて操作が簡単であり、覚えやすいという利点がある。しかし、頭の中の曖昧な概念を具体化していくような、従来紙の上で行われていた作業をボタン操作で行うのは直感的でない。そこでスケッチインターフェースが考案された。スケッチインターフェースは大きく2つに分けることができる。一方はスケッチ作業を計算機によって支援する。もう一方は計算機での編集作業をスケッチ操作で表現するものである[4]。近年スケッチインターフェースはアニメとイラストの制作[5][6]および3次元モデリング[7]によく使用された。また、軌跡のスケッチによるアニメーションの作成にも使用された[8]。提案システムは数値入力で行っていたロボットアーム設計の初期段階をスケッチ入力で行うものである。

2.2 運動学計算

ロボットアーム表現の代表的な手法の一つに、各関節に座標軸を設定し、差分を座標変換で表現するDH法がある。DH法のパラメータ表現は前関節との差分であるため、関節の挿入や削除を行った際の処理が非効率的である。提案システムは知的創造活動の初期段階であり、関節の編集操作を何度も行うことが予想されるため、本研究では分散型運動学計算法を用いる[9][10]。分散型運動学計算法は関節一つごとにロドリゲスの任意軸周りの回転公式を用いて運動学計算を行い、下位の関節すべてに適用することで、運動学計算を行う。

この運動学計算は各関節の変位を入力として各関節の位

置を求める計算で、順運動学計算と呼ばれている。反対に、ロボットアームの関節位置を入力として、各関節の変位を求める計算は逆運動学計算と呼ばれている。逆運動学計算は非線形性が高いことや解が複数存在することから、繰り返し計算による解析的な手法が主流であるが、近年では逆運動学計算にニューラルネットワークによる深層学習を用いた手法も研究されている[11][12]。この運動学計算を用いて、ロボティクス分野ではロボットアームの制御や設計に関する研究が行われている[13]。

2.3 HCI 分野におけるロボットアーム

ロボットアームはロボティクス分野のみではなく、HCIの分野においても注目され、研究されている。

MetaArms[14]は被験者に脚で操作できる6自由度のロボットアームを取り付け、物体を保持するなどの作業を行った。また、被験者がロボットアームを使いこなすまでにどの程度の時間がかかるのかを測定し、ロボットアームによる人間の身体拡張の可能性を探った。Liらは、ジェスチャーの認識によってロボットアームの動作を行うことでロボットと人間との自然なインタラクションを目指している[15]。Cherubiniらは、人間との協働組立作業を行うロボットアームが単なる重量補償装置になっていることに着目し、ロボットアームに能動作業と受動作業を交互に行わせることでより高度な協働作業を行うことを目指した[16]。また、Brain Computer Interface(BCI)とARを組み合わせ、手足を必要とせずにロボットアームを操作し、作業することも研究されている[17][18]。

本研究は、ロボットアーム設計に関連する分野の専門的知識をシステム化することで、ロボティクス分野以外の研究者がロボットアームの設計、製作を行う際の手助けになることを目指す。

3. 提案システム

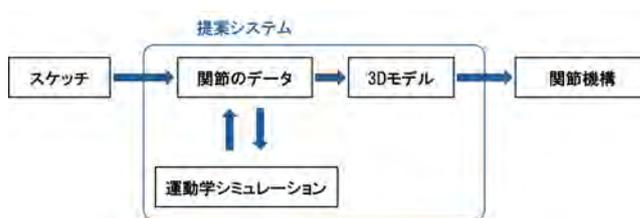


図 2: 提案システム概要図

提案システム Sketch2Joints は、ロボットアームの製作に関連する知識を持たないユーザを支援することを目的に、図2に示すようなユーザからのスケッチ入力、入力を基に行う運動学シミュレーション、シミュレーションと同様の動きをする関節間のリンク部品の3Dモデル出力を行う。

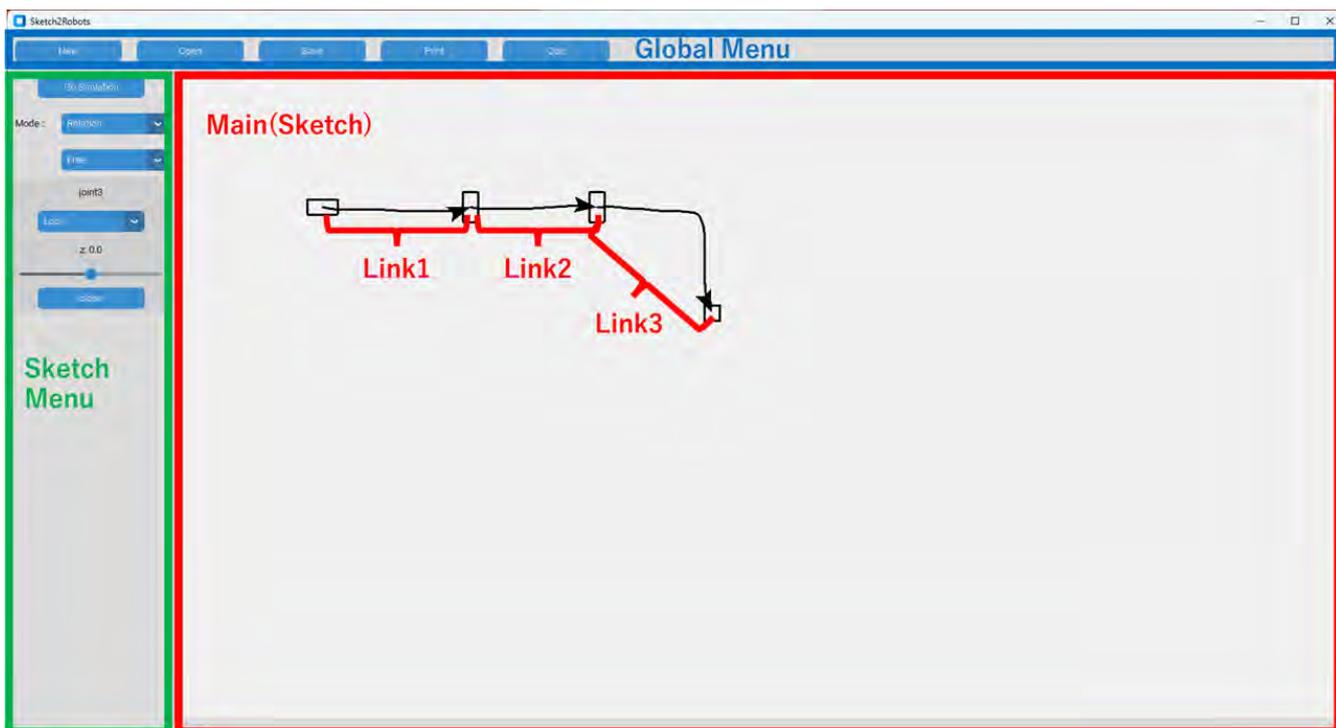


図 3: スケッチインターフェース

3.1 インターフェース

提案システムのインターフェースのスケッチ中の画面を図 3 に示す。赤枠内はスケッチによってロボットアームの設計を行う領域である。青枠内はロボットアームの新規作成や保存を行う領域である。緑枠はスケッチを行う際の特有のメニューフレームで、スケッチモードの切り替えや各関節の編集を行う。スケッチモードは Point, Relation, Delete の 3 種類あり、それぞれ関節の配置、リンクの作成、関節の削除を行うモードであり、Point モードで既に配置した関節をクリックすると、図 4 に示す関節編集フレームが緑枠の SketchMenu フレーム下部に表示される。このフレーム内では関節のタイプ、回転軸ベクトル、関節位置ベクトルの Z 成分を編集することができる。関節の回転軸ベクトルを変更すると、値に応じて異なる表示がされる。例えば、X 軸回転の関節は縦向きの長方形、Y 軸回転の関節は横向きの長方形、Z 軸回転の関節は円で表示される。Relation モードに切り替えると、SketchMenu フレームにリンクの種類を選択できるセレクトボックスが表示される。このセレクトボックスの表示が Linear の場合にはリンクの経路は直線で与えられ、Free の場合は、図 3 に示すスケッチのようにユーザが自由にリンクの経路を決めることができる。ユーザのストロークを等距離で分割し、分割点を制御点としたスプライン曲線をスケッチ上に表示している。ユーザがスケッチを変更する度に、変更内容は以下に示す関節データに反映される。

- (1) 位置ベクトル
- (2) 回転軸ベクトル

- (3) 稼働範囲
- (4) 上位関節のリスト
- (5) 下位関節のリスト
- (6) 関節のタイプ

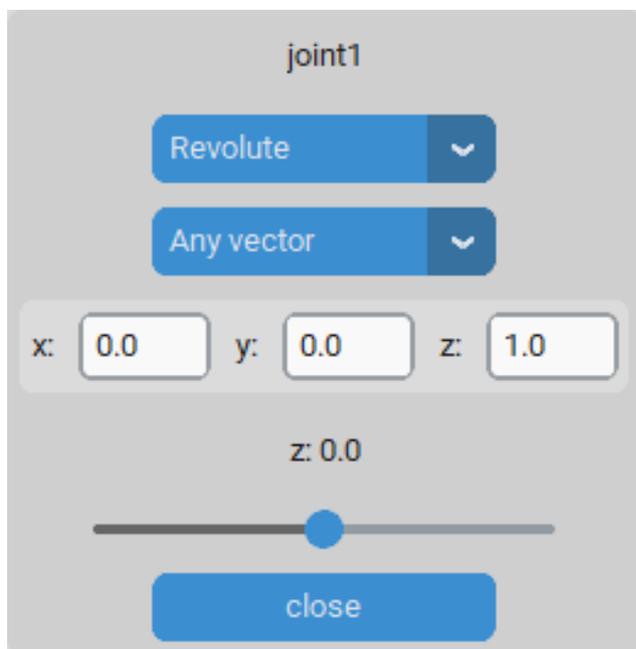


図 4: 関節編集フレーム

3.2 運動学シミュレーション

提案システムのシミュレーション画面を図 5 に示す。緑

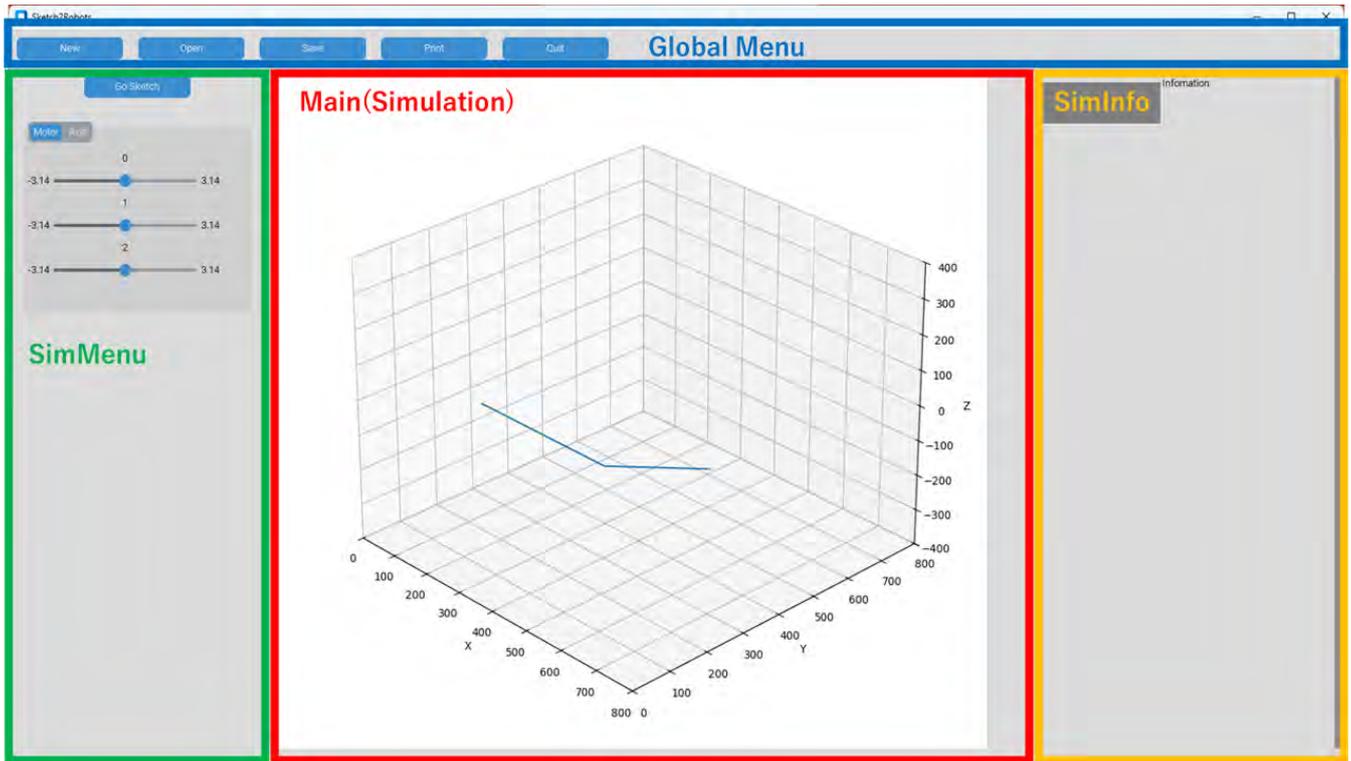


図 5: シミュレーションインターフェース

枠内は図 6,7 に示す Motor タブ, Axis タブが表示される。スケッチが存在する, もしくは事前にスケッチ等から作成したロボットアームのデータが読み込まれている場合, Motor タブに可動関節の数だけスライダが表示される。このスライダの値は各関節の変位を表しており, 値に応じて運動学計算を行い赤枠に表示されるシミュレーション結果が変更される。Axis タブを表示することでグラフの軸の表示範囲を編集すること可能になり, シミュレーションフレームの中心にロボットアームを表示することができる。ここで, 本研究で行う分散型運動学計算法の手順を説明する。まず, 回転した関節 J_0 とその下位関節 J_1 について考える。 J_0 の位置ベクトルを r_0 とし, J_1 の位置ベクトルを r_1 とする。この時, 関節間の距離を (1) 式で求める。

$$r = r_1 - r_0 \quad (1)$$

次に, 回転した関節の回転軸ベクトルを n , 回転した角度を θ としてロドリゲスの任意軸周りの回転公式に基づく (2) 式に代入することで, J_0 から見た回転後の J_1 の位置ベクトル r' を求める。

$$r' = r * \cos \theta + (1 - \cos \theta)(r \cdot n) + (n \times r) * \sin \theta \quad (2)$$

この r' に r_0 を足すことで回転後の J_1 の位置ベクトルを求める。

3.3 関節の製作

ユーザが作成した関節のデータから, 関節位置, 関節

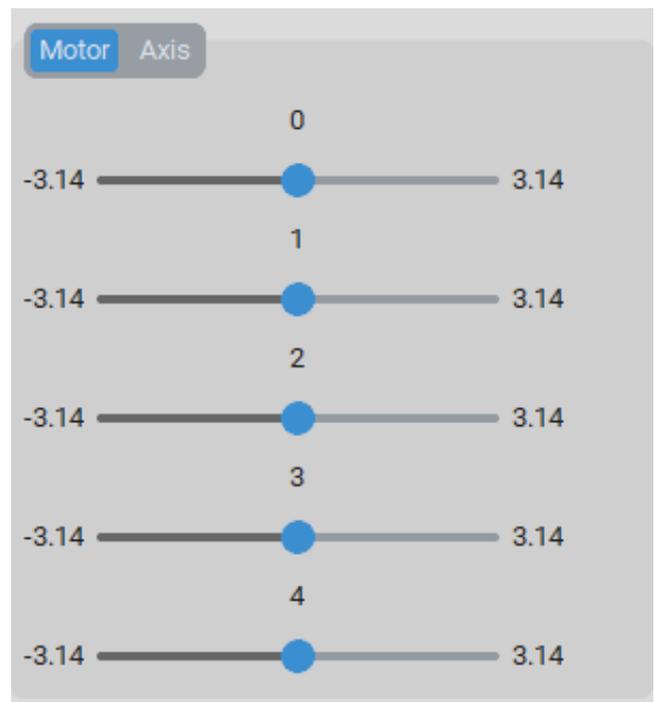


図 6: Motor タブ

種類を反映して, 3D プリントで印刷可能な関節間をつなぐリンクの 3D モデルを作成する。ロボットアームのアクチュエータには Robotis 社 Dynamixel XL330-M077(以下 XL330) を利用した。アクチュエータを取り付ける部品は予め設計している。回転機構の回転軸の向きに応じて図 8(a),8(b),8(c) のいずれかにアクチュエータをはめ込み, 図

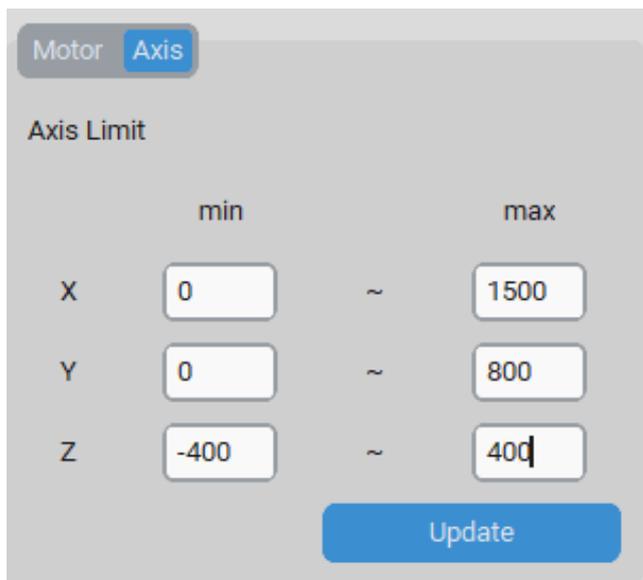


図 7: Axis タブ

8(d) を軸側に取り付けることで、関節モジュールとして完成する。また、ユーザがスケッチした経路を基に関節モジュール間をつなぐリンクを作成する。図 3 のスケッチから作成したリンクの 3D モデルを図 9(a),9(b),9(c) に示す。各関節モジュールと、リンクの接続部は同じ形状になっており、宮大工の技法である宮島継ぎにより部品間を接続するとロボットアームが完成する。製作には QIDI TECH Q1 PRO と FlashForge Adventurer 5M を使用した。製作時間は素材が PLA の場合、約 3 時間、ABS の場合、約 5 時間。重量は PLA の場合、Link1,2,3 がそれぞれ 31 グラム、27 グラム、40 グラム、ABS の場合、Link1,2,3 がそれぞれ 48 グラム、41 グラム、61 グラムだった。

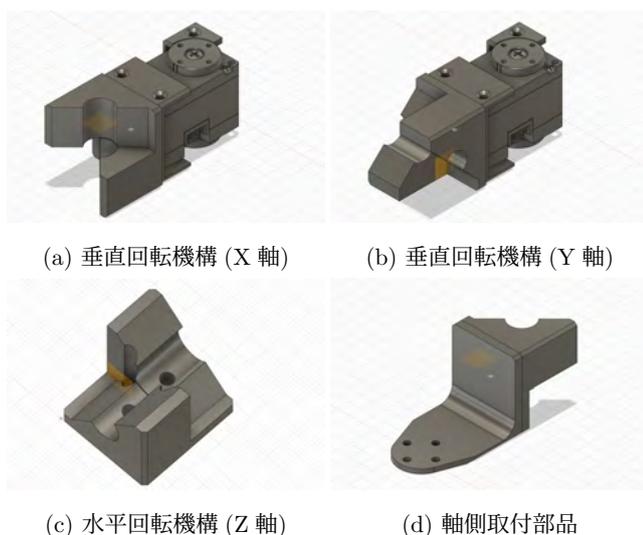


図 8: 関節

4. 製作結果

この節では、提案システムにより設計したロボットアーム

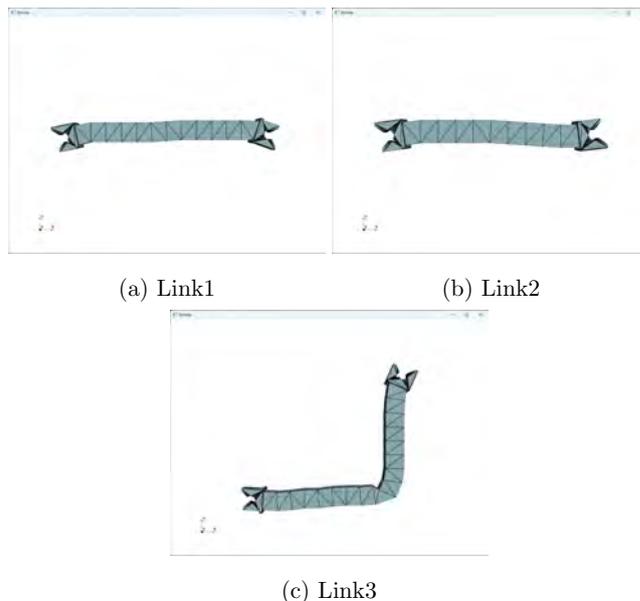


図 9: 図 3 のスケッチから作成したリンク

の製作結果を示す。予め製作している要素を図 10 に示す。

4.1 関節機構

垂直回転関節、水平回転関節を図 10(a),10(b) に示す。両端が宮島継ぎの形状をしているため、他関節やリンクと接続することができる。製作に使用したプリンタは QIDI TECH Q1 PRO で ABS を使用した。製作時間は、垂直回転関節、水平回転関節共に約 1 時間だった。

4.2 制御方法

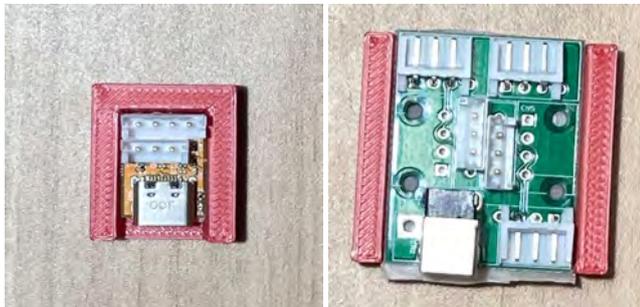
制御には 2 枚の基板を使用した。図 10(c) は PC から指令を受け取り、XL330 に信号を送信する基盤である。USB type-c ケーブルを用いて PC と接続し、3 ピンの JST コネクタケーブルを用いて図 10(d) に示す DXSharingBoard と接続する。DXSharingBoard は XL330 への電源供給を行う。また、複数のモータとの接続が可能な基盤である。実際の接続例を図 10(e) に示す。また、信号は ROBOTIS 社のソフトウェア、Dynamixel Wizard から送信する。

4.3 動作実験

図 11 に示す製作したロボットアームを左下のスケッチと比べると、関節の種類と個数、リンクの形状が一致していることがわかる。床に置いた 50 グラム程度の物体をロボットアームで押して移動させる実験を行った。この実験の様子を図 12 に示す。想定通りに物体を移動させることができた。次に、アクチュエータによってロボットアーム自身を移動させる実験を行った。この実験の様子を図 13 に示す。先端の折れ曲がっているリンクが、床をひっかく様にモータを制御したが、自重を持ち上げるだけのトルクが出ず、移動させることはできなかった。この 2 つの実験



(a) 垂直回転関節 (b) 水平回転関節



(c) USB2DXIF (d) DXSharingBoard



(e) 各要素を接続した様子

図 10: 製作したロボットアームの各要素

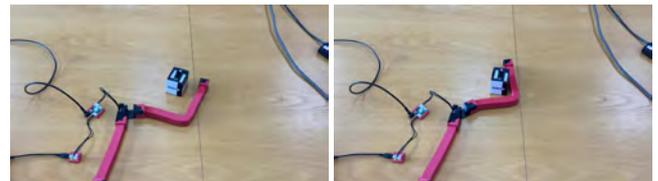
から、設計したロボットアームが重力を受ける方向への動作しないということがわかった。停止の際、過積載のエラーが発生してモータが止まっているため、原因はモータのトルク不足と思われる。



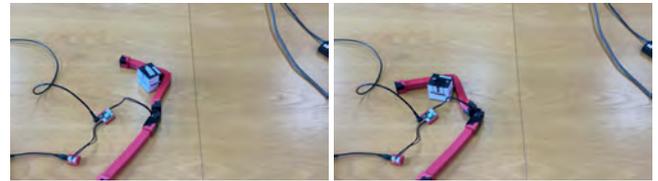
図 11: 図 3 のスケッチから作成したロボットアーム

5. おわりに

本研究では、ユーザのスケッチ入力によるロボットアーム

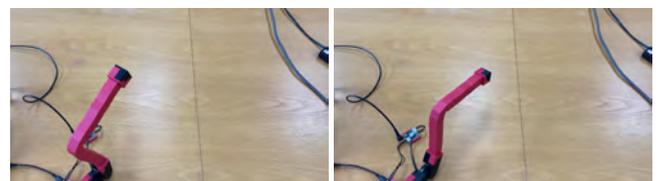


(a) 実験の様子 1 (b) 実験の様子 2

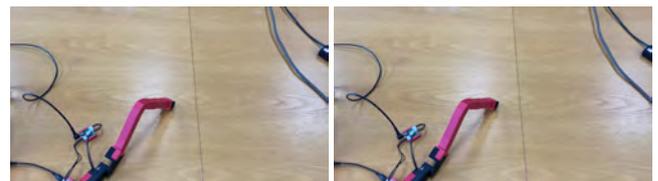


(c) 実験の様子 3 (d) 実験の様子 4

図 12: 物体を運ぶ実験の様子



(a) 実験の様子 1 (b) 実験の様子 2



(c) 実験の様子 3 (d) 実験の様子 4

図 13: ロボットアーム自身の移動実験の様子

ムを設計および運動学的シミュレーションと製作システム Sketch2Joints を提案した。関節をモジュール化し、リンクはユーザのスケッチから作成することで、スケッチからのロボットアームの作成を実現した。小型のモータと、3D プリンタ製の部品を用いて、軽量のロボットアームを製作することができた。代表的な動作であるピックアンドプレイスや自走を行うにはトルク不足な面があるが、比較的トルクを必要としない応用例、例えばぬいぐるみ内部へのロボットアームの挿入による存在拡張、表現拡張などに使用できると考える。

今後の改善点は、システムを用いたより高積載量のロボットアームの製作、製作物に近いシミュレーション結果の表示、システム上からのモータ制御、ユーザの軌跡入力からのロボットアーム制御、動力学的解析などが挙げられる。特に動力学的解析を行うことで、今回のようなトルク不足のロボットアームを製作前に検出することができる。

Sketch2Joints はロボットアームの知識を持たないユーザでもロボットアームを設計、製作できるシステムである。Sketch2Joints によってロボットアームに関する理解を深める、また、ロボティクス分野以外の研究者が自らの研究

にロボットアームを融合させることで新たな知識を創出することを期待している。

参考文献

- [1] Ashok Kumar Saini, Naveen Gehlot, Ankit Vijayvargiya, Rajesh Kumar, and Usha Desai. Design development and analysis of 3-dof robotic arm. In *2023 9th IEEE India International Conference on Power Electronics (IICPE)*, pp. 1–6, 2023.
- [2] Milan Mihola, ZDENEK ZEMAN, ADAM BOLESLAVSKY, Jan Bém, Robert Pastor, and David Fojtík. Automation of design of robotic arm. *MM Science Journal*, 2022.
- [3] Artin Saberpour Abadian, Ata Otaran, Martin Schmitz, Marie Muehlhaus, Rishabh Dabral, Diogo Luvizon, Azumi Maekawa, Masahiko Inami, Christian Theobalt, and Jürgen Steimle. Computational design of personalized wearable robotic limbs. In *Proceedings of the 36th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '23, New York, NY, USA, 2023. Association for Computing Machinery.
- [4] 五十嵐健夫. スケッチインタフェースの研究動向. *コンピュータ ソフトウェア*, Vol. 23, No. 4, pp. 4.3–4.13, 2006.
- [5] Zhengyu Huang, Haoran Xie, Tsukasa Fukusato, and Kazunori Miyata. Anifacedrawing: Anime portrait exploration during your sketching. In *ACM SIGGRAPH 2023 Conference Proceedings*, SIGGRAPH '23, New York, NY, USA, 2023. Association for Computing Machinery.
- [6] Haoran Xie, Keisuke Arihara, Syuhei Sato, and Kazunori Miyata. Dualsmoke: Sketch-based smoke illustration design with two-stage generative model. *Computational Visual Media*, pp. 1–15, 2024.
- [7] Xusheng Du, Yi He, Xi Yang, Chia-Ming Chang, and Haoran Xie. Sketch-based 3d shape modeling from sparse point clouds. In *International Workshop on Advanced Imaging Technology (IWAIT) 2022*, Vol. 12177, pp. 714–719. SPIE, 2022.
- [8] Marek Dvorožňák, Daniel Sýkora, Cassidy Curtis, Brian Curless, Olga Sorkine-Hornung, and David Salesin. Monster mash: a single-view approach to casual 3D modeling and animation. *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 39, No. 6, pp. 1–12, December 2020.
- [9] Shinya Haramaki, Akihiro Hayashi, Toshifumi Satake, and Mochimitsu Komori. Multi agent based kinematics solution method for multi link robot. In *SCIS & ISIS SCIS & ISIS 2010*, pp. 1026–1031. Japan Society for Fuzzy Theory and Intelligent Informatics, 2010.
- [10] Akihiro Hayashi, Toshifumi Satake, and Shinya Haramaki. Polycentric framework for robotic kinematics. In *Intelligent Autonomous Systems 12: Volume 2 Proceedings of the 12th International Conference IAS-12, held June 26-29, 2012, Jeju Island, Korea*, pp. 873–881. Springer, 2013.
- [11] Jiaoyang Lu, Ting Zou, and Xianta Jiang. A Neural Network Based Approach to Inverse Kinematics Problem for General Six-Axis Robots. *Sensors*, Vol. 22, No. 22, p. 8909, November 2022.
- [12] Ruihua Gao. Inverse kinematics solution of Robotics based on neural network algorithms. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, Vol. 11, No. 12, pp. 6199–6209, December 2020.
- [13] Safiuddin Che Suhaimin, Nur Liyana Azmi, Md Mozasser Rahman, and Hazlina Md Yusof. Analysis of Point-to-Point Robotic Arm Control using PID controller. In *2019 7th International Conference on Mechatronics Engineering (ICOM)*, pp. 1–6, October 2019.
- [14] Mhd Yamen Saraiji, Tomoya Sasaki, Kai Kunze, Kouta Minamizawa, and Masahiko Inami. MetaArms: Body Remapping Using Feet-Controlled Artificial Arms. In *Proceedings of the 31st Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp. 65–74, Berlin Germany, October 2018. ACM.
- [15] Xing Li. Human–robot interaction based on gesture and movement recognition. *Signal Processing: Image Communication*, Vol. 81, p. 115686, February 2020.
- [16] Andrea Cherubini, Robin Passama, André Crosnier, Antoine Lasnier, and Philippe Fraisse. Collaborative manufacturing with physical human–robot interaction. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 40, pp. 1–13, August 2016.
- [17] Francesco De Pace, Federico Manuri, Matteo Bosco, Andrea Sanna, and Hannes Kaufmann. Supporting Human–Robot Interaction by Projected Augmented Reality and a Brain Interface. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, Vol. 54, No. 5, pp. 599–608, October 2024. Conference Name: IEEE Transactions on Human-Machine Systems.
- [18] Sebastian-Daniel Rosca and Monica Leba. Using brain-computer-interface for robot arm control. *MATEC Web of Conferences*, Vol. 121, p. 08006, 2017.