

Sketch2Joints: スケッチベースロボットアームの デザイン支援インターフェースの研究開発

品田 康平^{†1,a)} 吉田 匠吾^{†1} 謝 浩然^{†1}

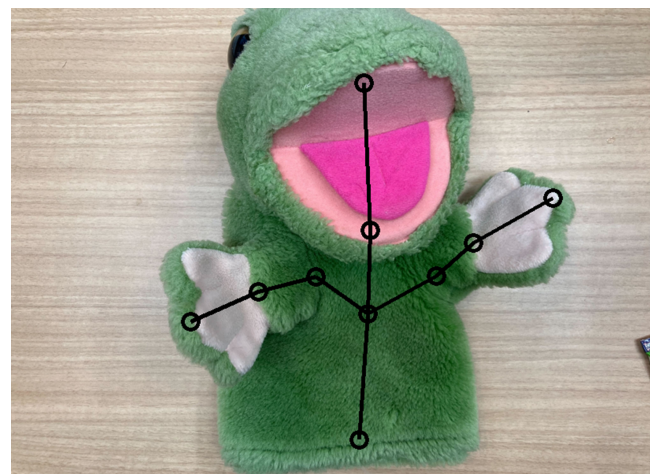
概要: 家庭用 3D プリンタの普及により, 3D モデルの立体化は身近なものになったが, 依然としてロボットアームの製作は困難である. そこで本研究では, 直感的な操作で関節機構を作成し, 3D プリンタでロボットアームの制作を行うシステム Sketch2Joints を開発した. ユーザのスケッチから関節位置と関節種類を読み取って関節機構を設計し, 設計したデータを基にロドリゲスの任意軸回りの公式回転を用いて運動学的シミュレーションを行うことで, これを実現する. ユーザ実験として, むいぐるみ内部に挿入する関節機構を設計し, 実際に製作して, イメージ通りの動作をするかを確認した. また, System Usability Scale(SUS) に基づくアンケートにより設計インターフェースの使いやすさを評価した.

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, 関係する分野の広大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. 3DCAD 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ボ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キャ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ビッド



(a) スケッチインターフェースによる運動学的構造の入力



(b) 製作した関節機構



(c) むいぐるみへの挿入結果

図 1: 研究概要図

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

^{†1} 現在, 北陸先端科学技術大学院大学

^{a)} s2410225@jaist.ac.jp

Sketch2Joints を提案する。Sketch2Joints では、従来キーボードによる複雑な入力で行っていた関節の位置や接続関係の入力をスケッチで行う。これにより、ロボットアームに関する知識を持たないユーザも直感的かつ手軽に入力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、早期に修正を行うことができる。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いながら修正する。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otypingが可能である。評価実験では、被験者に Sketch2Joints を用いて「ぬいぐるみ内部に挿入し、自由にポーズをとらせるための内部構造」を設計してもらう。図 1(b) に示すように、ユーザが設計した内部構造を実際に製作した。ロボットアームは一般的にモータによって関節角度の保持を行うが、ぬいぐるみ内部のスペースの問題でモータは取り付けていない。そこでモータの代わりに、摩擦力で角度を保持することにした。実験後、System Usability Scale(SUS) とインタビューにより、Sketch2Joints の有用性を確認した。

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。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

運動学計算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

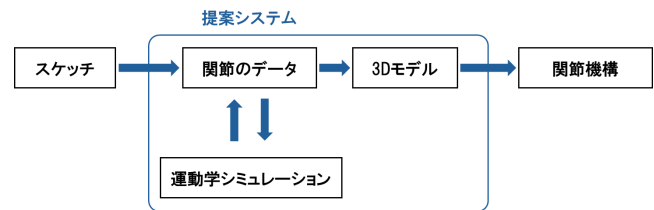


図 2: 提案システム概要図

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[8]、[9]。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。

3. 提案システム

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。

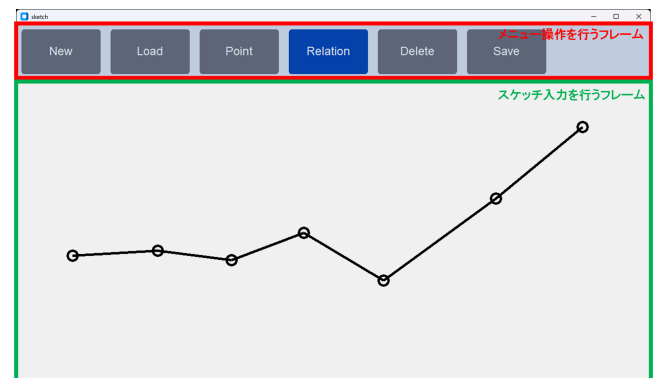


図 3: 関節を配置し、接続関係を入力した様子

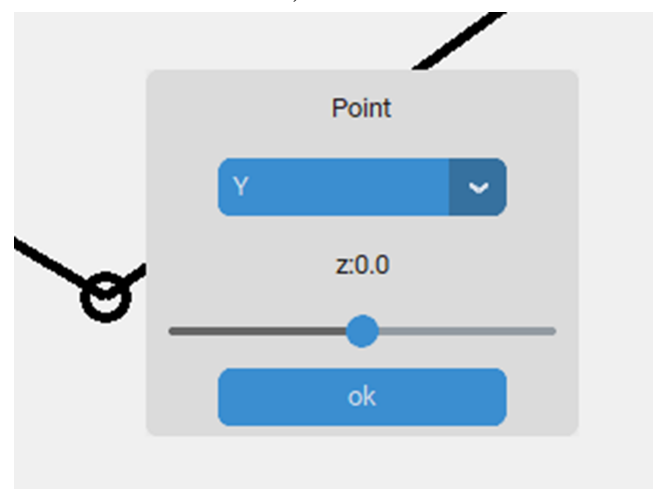


図 4: 関節編集メニュー

3.1 スケッチインターフェース

提案システムのスケッチ入力の様子を図3に示す、赤枠内のメニューで Point モード, Relation モードを切り替えて関節の配置と接続関係の記述を行う。Point モードで赤枠で囲われたキャンバスフレーム内をクリックすると関節位置が入力され、円で表示される。ドラッグで移動ができる。Relation モードで関節間をドラッグすると接続関係が入力され、線分で表示される。関節位置ベクトルの X 成分, Y 成分はキャンバスフレーム上の X 座標, Y 座標を用いる。また、配置した関節をクリックすると、図4に示す関節の編集メニューが表示される。編集メニューには関節種類を選択できるセレクトメニューと、関節位置ベクトルの Z 成分を操作できるスライダが配置されており、ユーザが自由に操作できる。ユーザがスケッチを保存したとき、関節位置ベクトル, 回転軸ベクトル, 接続関係, 関節のタイプを反映した関節のデータを作成する。関節一つ分のデータを下記に示す。

- (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

3.2 運動学シミュレーション

スケッチインターフェースで入力した情報を基に、運動学シミュレーションを行う。スケッチウィンドウで作成した関節のデータを読み込み、図5に示す GUI ウィンドウに表示する。左側赤枠でロボットアームの姿勢を表示する。右側緑枠には、関節の個数分のスライダが表示される。このスライダが各関節の変位を表しており、操作することで、ロボットアームの動きをシミュレーションすることができる。

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 $\mathbf{r}_0$ とし、 J_1 の位置ベクトルを $\mathbf{r}_1$ とする。この時、関節間の距離を (1) 式で求める。

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_0 \quad (1)$$

次に、回転した関節の回転軸ベクトルを $\mathbf{n}$ 、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 $\mathbf{r}'$ を求める。

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

この $\mathbf{r}'$ に $\mathbf{r}_0$ を足すことで回転後の J_1 の位置ベクトルを求める。また、上部メニューバーの Edit ボタンを押下する

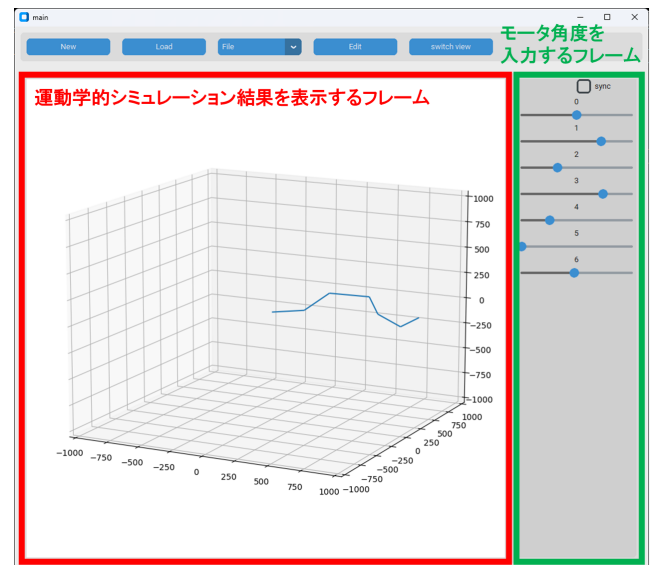


図 5: 運動学シミュレーションを行う GUI

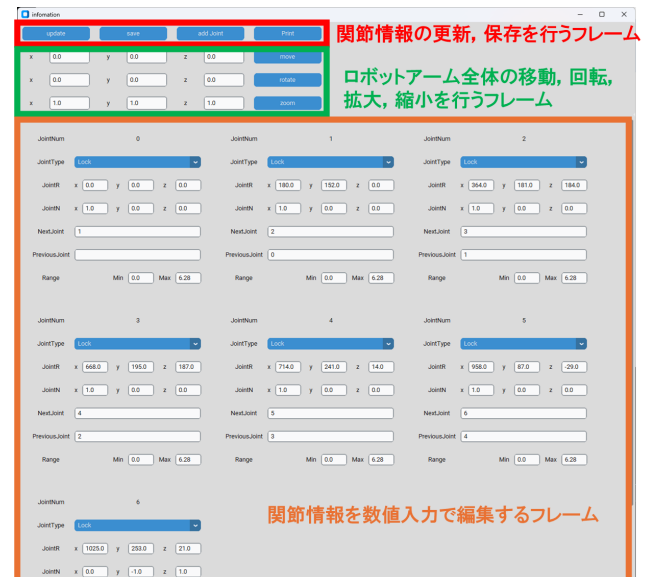


図 6: 編集ウィンドウ

と図6に示す編集ウィンドウが開く。赤枠で囲われた部分は関節の追加やシミュレーションへの反映、関節のデータの上書き保存のボタンが配置されている。緑枠で囲われた部分はロボットアーム全体の編集に関する UI であり、平行移動、回転、拡大・縮小を行うことができる。黄枠で囲われた部分は、数値入力を用いて関節のデータを編集できる UI であり、関節位置を一直線に並べる際の位置調整などの、スケッチインターフェースでは難しい操作を行うことができる。

3.3 リンクの製作

ユーザが作成した関節のデータから、関節位置、関節種類を反映して、関節間をつなぐリンクを 3D プリンタで印刷可能な 3D モデルとして出力する。上位関節の位置に図 7(a) の 3D モデル、下位関節の位置に図 7(b) の 3D モデル

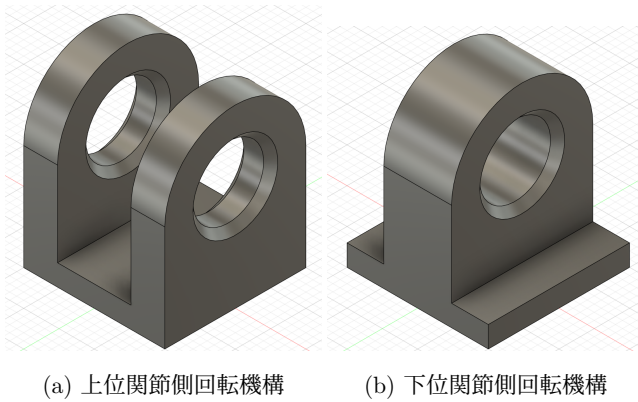
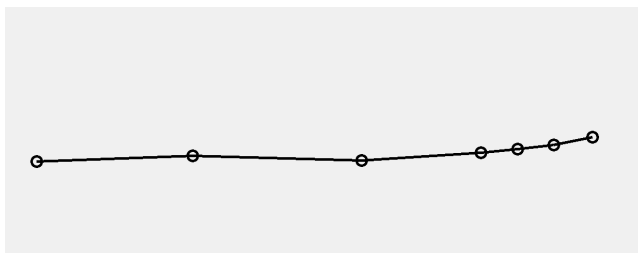


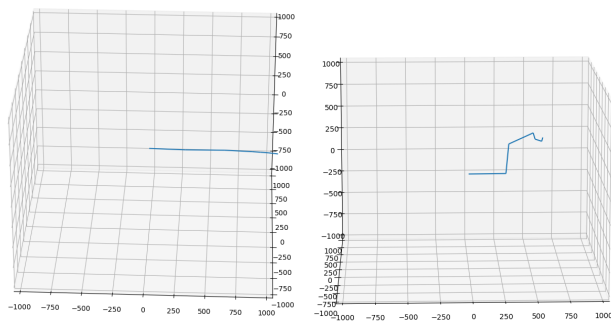
図 7: 関節部分の 3D モデル

を配置する。この時、回転軸の向きに合うように回転させる。最後に、配置したモデルの間を埋めるようにメッシュを作成し、結合することでリンクの 3D モデルを出力する。

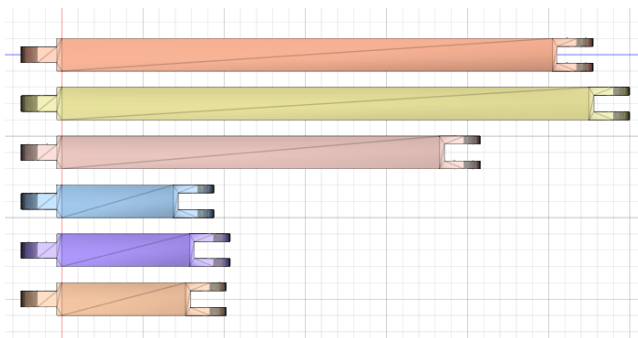
4. 結果



(a) スケッチ画面

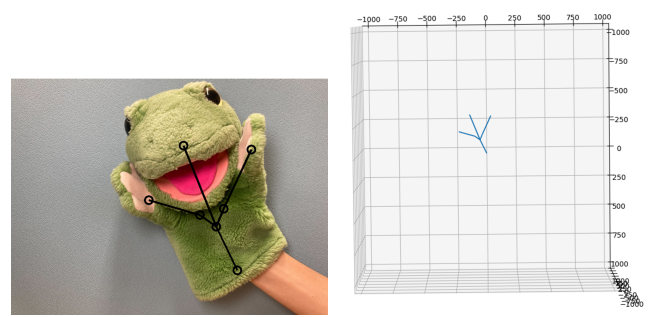


(b) ロボットアームの初期姿勢 (c) 関節回転後のロボットアームの姿勢

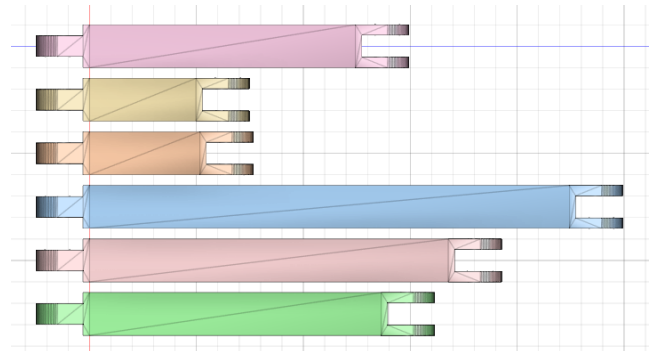


(d) 作成したリンクのデータ

図 8: Sketch2Joints の入出力実験結果 1



(a) テスト用のスケッチ (b) ロボットアームの初期姿勢



(c) 作成したリンクのデータ

図 9: Sketch2Joints の入出力実験結果 2

まず、6 自由度の冗長ロボットアームを図 8(a) のスケッチで設計した。スケッチ自体はほぼ一直線に関節を配置し、接続関係で順に繋いだ。関節の種類は X,Y,Z の 3 種類を交互に配置し、前半のリンクと後半のリンクでは前半が長くなるように設計した。その際のシミュレーション画面を図 8(b),8(c) に示す。シミュレーション画面で動作を確認した後、図 8(d) に示す 3D モデルを出力した。スケッチ上の距離に応じて、長さの異なるリンクが出力されていることが分かる。次に、ぬいぐるみの画像をスケッチウィンドウに読み込み、図 9(a) に示すぬいぐるみの内部構造のスケッチを作成した。このスケッチから作成した関節機構のシミュレーションの画面を図 9(b) に示す。スケッチ時に入力した位置関係とシミュレーションが一致していることが確認できる。また、同じデータから作成したリンクを図 9(c) に示す。これも様々な長さのリンクが出力されていることがわかるが、直線状のリンクのみが出力されており、リンクの分岐に対応できていない。分岐を行うモデルを別途作成する必要がある。

5. 評価実験

提案システム Sketch2Joints をユーザに体験してもらい、設計したロボットアームを 3D プリンタを用いて製作した。製作には Adventurer 5M と Bambu Lab X1 Carbon の 2 台の 3D プリンタを用い、材質は PLA で製作した。SUS による定量的な評価とインタビューによる定性的な評価を行い、Sketch2Joints のユーザビリティとユーザ満足度を

確かめた。

5.1 実験方法

Sketch2Joints の評価はユーザ実験によって行った。20代の男女4名の被験者は、本システムを用いて図9(a)でスケッチに用いたものと同じぬいぐるみの内部構造を設計した。UIの直観性を示すため、操作方法の詳しい説明は行わなかった。被験者は開始1分程度で関節を配置し始め、その後すぐに関節間の接続関係を追加し始めた。10～20分程度で被験者たちは自分の満足するスケッチを作成した。作成後、被験者にSystem Usability Scale(SUS)に基づくアンケートを行った。また、作成したスケッチを基にロボットを作成し、ロボットの達成度や満足度に関するアンケートを行った。

5.2 定性的評価

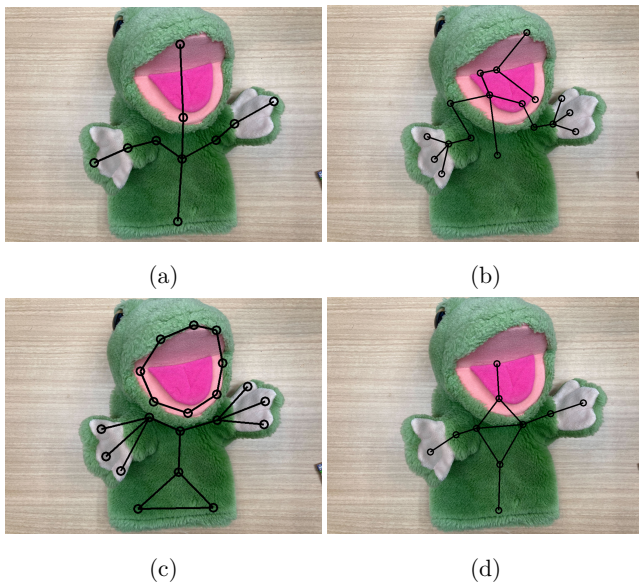


図 10: 被験者の製作したスケッチ

被験者のスケッチを図10に示す。図10(a),(b)はSketch2Jointsでロボットアームとしてシミュレーションと製作が可能だが、図10(c)は構造が2つに分かれてしまっており、2つのロボットアームとして入力される。図10(d)は関節で閉ループができており、リンク構造として入力される。この2つのスケッチはシミュレーション時に不具合が発生してしまう。この問題は前節で挙げたUIが表示する情報の不足が原因である。図10(a)のロボットアームの製作結果を図11に示す。3Dプリンタを用いて製作した内部構造をぬいぐるみに挿入し、被験者がポーズをとらせた。部品は約5時間で製作できた。被験者に聞き取りをした結果、製作した内部構造はイメージ通りの動きができたことがわかった。



図 11: 内部構造 (左) と内部構造挿入後のぬいぐるみ (右)

5.3 定量的評価

SUSに基づくアンケートの結果を図12に示す。平均スコアは65である。「このシステムを使うにはテクニカルサポートが必要」と「このシステムを使っていると自信が持てる」という2つの質問については良い評価を得られなかった。前者は情報不足、後者はフィードバック不足によるものだと考える。改善案として、関節の回転方向の表示や接続関係の矢印で表示して順序を表すなど、UI上の不足している情報を補うことと、スケッチの変更ごとにシミュレーション画面にプロットするなど、スケッチを変更した際のユーザへのフィードバックを明確にすることが挙げられる。

6. 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。評価実験の結果、提案システムを用いることで、ユーザは想像通りのロボットアームを設計、製作できることがわかった。

今後の課題として、ユーザビリティの改善が挙げられる。ユーザがシステムの意図しないスケッチを作成する問題を改善するために、関節の回転方向や接続関係の順序をユーザにわかりやすく図示する必要がある。また、3Dモデルの作成も不十分である。リンクの分岐や斜めの回転軸を与えられた場合に対応できていないため、さらに自由にロボットアーム設計、製作するために、プログラムに修正が必要である。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。

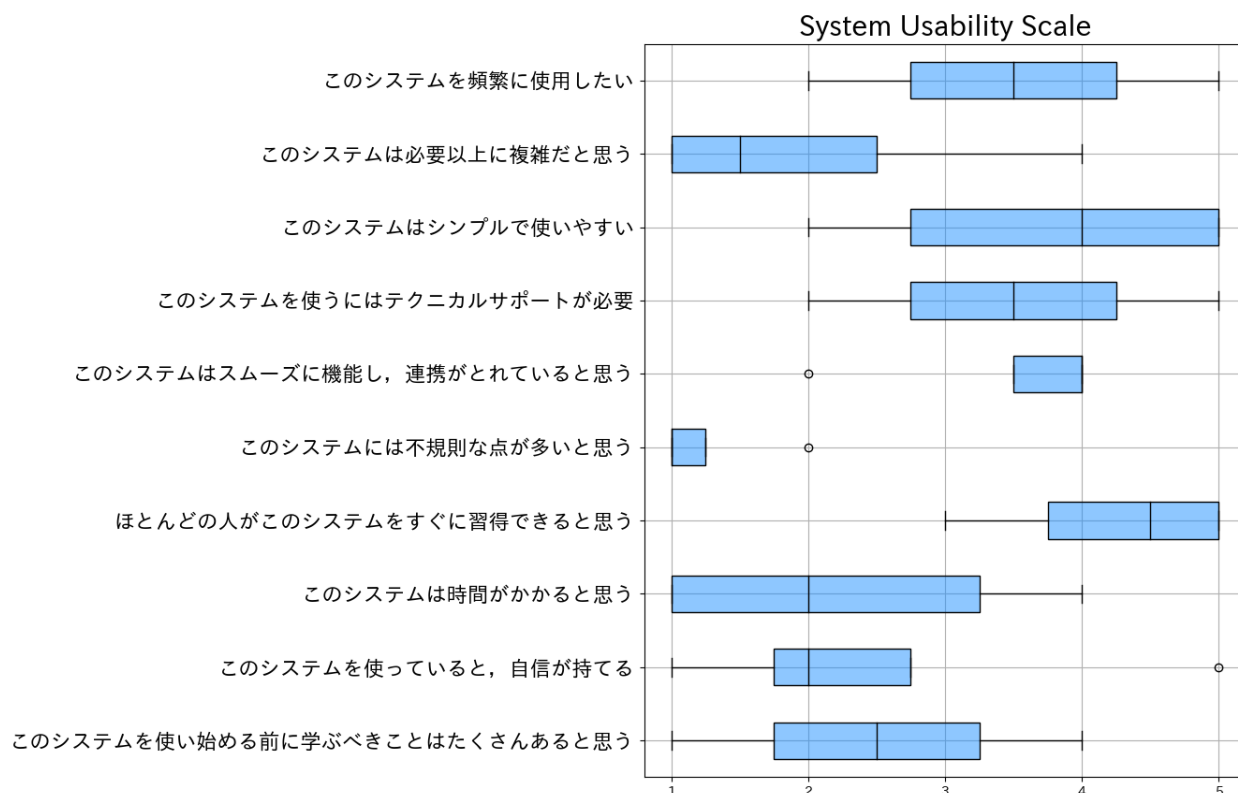


図 12: System Usability Scale に基づくアンケートの結果

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 Fojtk. 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] 福丸浩史, 林朗弘, 佐竹利文, 原槇真也, 成瀬継太郎, 鈴木育男, 西川孝二. 超冗長直列ロボットのための関節独立型順逆運動学計算の構成. 精密工学会誌, Vol. 85, No. 6, pp. 585–590, 2019.
- [9] 原槇真也, 林朗弘, 佐竹利文, 小森望充. 多関節マニピュレータの分散型運動学計算法の研究. 産業応用工学会論文誌, Vol. 5, No. 1, pp. 1–6, 2017.