

キャラクターイラスト製作における ペンストローク入力を用いた3Dモデル操作支援手法

日比 真実¹ 五十嵐 悠紀^{1,2}

概要: キャラクターイラスト制作において、人体デッサンは多くの制作者にとって技術的な障壁となる。正確なデッサンには美術解剖学などの専門知識や長期間の訓練が必要であり、制作工程の中でも習得が困難な段階である。補助的手段として3Dモデルを利用する方法も存在するが、IKやFKといった専門的知識を要する操作は、イラスト制作者にとって敷居が高い。そこで本研究では、ペンツールによるストローク入力を用いて、3Dモデルのボーンを描画操作に近い感覚で操作可能とする支援システムの開発を目的とする。先行研究を参考に、描画ストロークの形状や方向からユーザの意図を推定し、対応する関節操作を実現する。さらに、関節の可動域制限を考慮した制御を導入することで、より自然で破綻のないポーズを実現する。

1. はじめに

キャラクターイラストの制作工程は、一般にラフ、デッサン、着彩、仕上げの段階に分けられる。その中でもデッサン工程は、構図やポーズの妥当性を決定する重要な過程である一方、制作者の経験や知識に大きく依存する工程である。人体を自然に描くためには、骨格構造や筋肉の動きといった美術解剖学的知識の理解が求められ、その習得には長期間の訓練を要する。そのため、多くの初学者や非専門家にとって、デッサンは制作上の大きな障壁となっている。

このような課題に対し、3D人体モデルを用いてポーズを確認したり、資料として参照したりする支援手法が広く利用されている。しかし、3Dモデルの操作にはIK (Inverse Kinematics) やFK (Forward Kinematics) といった技術的概念の理解が必要であり、イラスト制作者にとっては扱いが容易ではない。その結果、ペンや絵筆を主な制作道具とするイラスト制作者にとって、3Dモデル操作が制作フローと乖離してしまうという問題が生じている。

本研究では、こうした問題を解決するため、制作者が日常的に使用するペンツールによる入力を用いて、追加の操作概念や専門知識を必要とせず3Dモデルを操作可能とする支援システムの実現を目指す。特に、ラフスケッチからデッサンへと移行する過程において、ペンによるストローク入力のみでポーズ調整を行えることを目的とする。

2. 関連研究

デッサン支援のために3Dモデルを活用する手法として、これまでにいくつかのアプローチが提案されている。一般的な3Dモデルソフトウェアでは、ボーン構造を持つ人体モデルをIKまたはFKによって操作することが可能である。しかし、これらの手法では関節や回転軸を明示的に指定する必要があり、3D操作やボーン階層構造に不慣れたユーザにとっては学習コストが高い。

株式会社セルシスのQUMARION [1] は、実際の人型デバイスにポーズを設定することで、対応する3Dモデルを同一の姿勢にする入力デバイスである。物理的操作による直観性を有する一方、意図した固定ポーズを正確に再現し維持することが難しく、またデジタルペンを中心としたイラスト制作環境とは異なるインタラクション手段である点が課題として挙げられる。

BrodtらによるSketch2Pose [2] は、単一のスケッチ画像から3D人体ポーズを推定する手法である。スケッチに含まれる身体比率の歪みや誇張を考慮し、骨方向の一致、自己接触関係、および統計的に補正されたフォアショートニングを制約とした非線形最適化によって3Dポーズを推定する。

しかし、本研究で利用を想定しているラフスケッチは、イラスト制作におけるアイデア出し段階のものであり、多くの修正の余地や制作途中での変更を含む。そのため、推定された3Dポーズに対してユーザが追加調整を行う必要が生じる場合がある。この点を考慮すると、最終的にIK

¹ お茶の水女子大学

² 東京大学

や FK による 3D モデル操作が必要となり、操作の難しさという課題が再び顕在化する。

Mahmudi らによる「Artist-oriented 3D character posing from 2D strokes」[3] は、ペンストロークを用いて 3D モデルを操作するシステムを提案している。ユーザが 2D 画面上に描いた線を解析し、対応する 3D ボーンを自動的に操作することで、関節や回転軸を明示的に指定することなく、描線操作のみでポーズ調整を行うことを可能としている。

一方で、同手法では関節の可動域やメッシュ同士の衝突といった人体構造上の制約が考慮されておらず、結果として不自然なポーズが生成される場合がある。

本研究では、Mahmudi らの先行研究 [3] を基盤として、関節の可動域制限を考慮した制御を導入することで、より自然で破綻のないポージングを実現し、デッサン支援に適した操作性の高いシステムの構築を目指す。

3. 提案システム

本システムの対象ユーザは 3D アニメーションや IK/FK の専門知識を持たない一般的なイラスト制作者である。ペンタブレットや液晶タブレットの描画操作に慣れているユーザを想定し、マウスやスライダによる 3D 特有の操作を必要とせず、ペン入力のみで 3D モデルのポーズを調整することを可能にする。

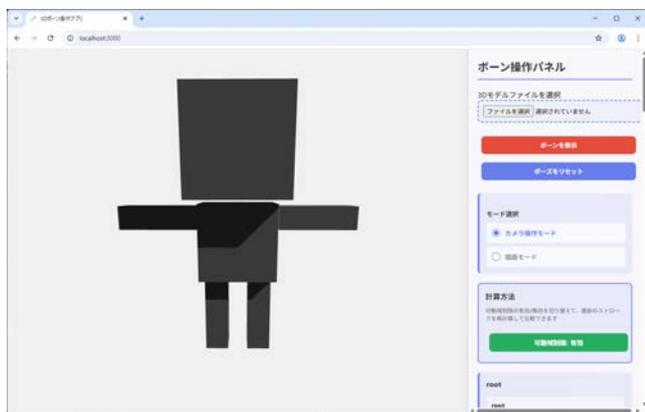


図 1: システムの初期画面

本システムは、TypeScript を用いて実装した Web アプリケーションである。画面は大きく「操作画面」と「メニュータブ」の 2 つに分かれており、ユーザはブラウザ上で 3D モデルを読み込み、カメラ操作やポーズ編集を行うことが可能である。以下にそれぞれの機能を示す。

操作画面 (図 1 左) には、読み込まれた 3D モデルが表示される。カメラ操作モードでは、ドラッグ操作やホイール操作によって視点を自由に回転・拡大・縮小することが可能である。3D モデル操作モードでは、マウス入力によるストロークを 3D モデル上に描画できる。描画されたス

トロークを解析し、始点・終点の位置関係およびストローク方向に基づいて操作対象のボーンを推定する。さらに、ストロークの方向情報に基づいて関節の回転量を算出し、その結果をボーンに適用する。これにより、ユーザは関節を直接選択・回転させることなく、描線操作によってモデルの姿勢調整を行える。

画面右側のメニュータブ (図 1 右) では、システム操作に必要な各種設定を行うことが可能である。上から順に、以下の項目を備える。

- ファイル読み込み: GLB 形式の 3D モデルを読み込む
- ボーン表示: 各ボーンの root 位置を表示
- モード切替: カメラ操作とモデル操作の切替
- リセット: ポーズを初期状態に戻す
- 計算方法選択: 従来手法と本手法の切替

4. 関節可動域制限を考慮したボーン回転計算

Mahmudi らの先行研究 [3] では、ペンストロークによるボーン操作は可能であるものの、関節の可動域制限が考慮されていなかったため、関節の過伸展やメッシュの貫通が生じる場合があった。

本研究では、各関節ごとの制限を事前に設定し、計算時に制限を超えたボーン回転とならないように修正する。これにより、関節構造に基づいた破綻のないポーズを維持しつつ、ストローク操作による自由度も確保することが可能である。

解析手順は以下の通りである。

- (1) 各関節に対して事前に可動域を設定する。例として、肘関節の可動域を $0^\circ \sim 180^\circ$ とする。
- (2) ユーザが入力したペンストロークを 2 次元曲線として取得し、その形状や方向情報に基づいて、操作対象となるボーン (関節列) を推定する。
- (3) 推定されたボーンに対して、ストロークの対応区間を 3 次元空間に対応付け、骨長や視点方向を考慮した幾何的制約の下で各関節の回転角を計算する。この処理により、ユーザの描線操作を関節回転として数値化する。
- (4) 計算された回転角 θ が可動域 $[\theta_{\min}, \theta_{\max}]$ を超えた場合、以下のクランプ処理によって補正を行う。

$$\theta' = \max(\min(\theta, \theta_{\max}), \theta_{\min})$$

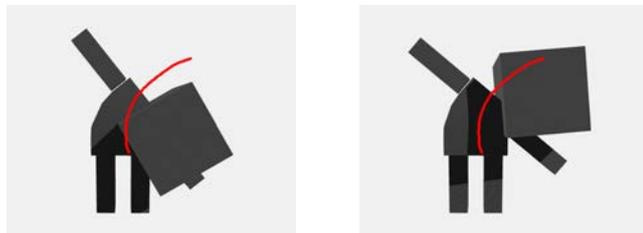
- (5) 可動域制限によって生じた回転量の不足や姿勢の不整合は、先行研究と同様に優先度付き IK (Priority-based IK) を用いて周辺関節へ再分配する。

5. 操作結果の比較

本手法の有効性を確認するため、Mahmudi らの手法に基づく従来計算方法と、本研究で提案する関節制限を考慮した計算方法との比較を行った。同一の 3D モデルおよび

同一のストローク入力を用いてポーズ操作を行い、以下の観点から結果を評価した。

- 関節の過伸展や逆関節の発生有無
- スキンメッシュの破綻やねじれの有無
- デッサン参照として利用可能な姿勢であるか



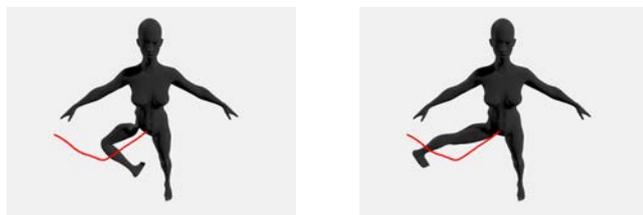
(a) 従来手法

(b) 本手法

図 2: 計算結果の比較

図 2 に比較結果を示す。図 2(a) は従来手法による計算結果であり、ストロークの形状には追従しているものの、胴体部分で不自然な回転が生じていることが確認できる。これは、関節の可動域や人体構造上の制約が考慮されていないため、ストローク方向に忠実である一方で、物理的に不自然な姿勢が許容されてしまうことに起因する。

一方、図 2(b) に示す本手法の結果では、同一のストローク入力に対して関節の回転が可動域内に制限され、胴体の姿勢がより自然に保たれていることが分かる。



(a) 従来手法

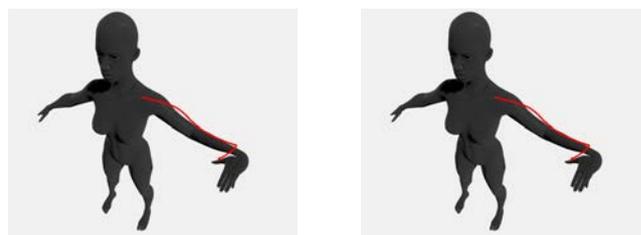
(b) 本手法

図 3: 計算結果の比較-足

対象を女性 3D モデル [4] に変更し、同様の手法で足部のボーン操作を行った結果を図 3 に示す。足部は股関節、膝関節、足首といった複数の関節が直列に接続されており、人体構造上、回転軸や可動範囲に強い制約を持つ部位である。そのため、関節制約を考慮しない操作では、わずかな入力であっても不自然な姿勢が顕著に現れやすい。

図 3(a) に示す従来手法の結果では、ストローク方向に忠実に追従しようとするあまり、股関節および膝関節に人体では不可能な回転が生じている。その結果、大腿部と下腿部の相対的な向きが破綻し、スキンメッシュにも大きなねじれが発生していることが確認できる。このような姿勢は、デッサン時の参照として利用する際に誤った人体理解を助長する可能性があり、支援ツールとしては問題となる。

一方、図 3(b) に示す本手法の結果では、各関節の回転が事前に設定した可動域内に制限されるため、ストローク入力に対して過剰な回転が抑制されている。その結果、膝関節の屈曲方向や脚全体のシルエットが人体構造に即した形で保持され、ストロークの形状を反映しつつも自然な姿勢が生成されている。このことから、本手法は足部のような制約の強い部位においても、破綻の少ないポーズ生成が可能であることが確認できる。



(a) 従来手法

(b) 本手法

図 4: 計算結果の比較-腕

次に、腕部のボーン操作における比較結果を図 4 に示す。

図 4(a) および図 4(b) に示す結果から分かるように、ストローク入力が関節の可動域内に収まる場合には、従来手法と本手法の間で生成される姿勢に大きな差は見られない。これは、本手法が関節制限を導入しているにもかかわらず、不要な補正を行わず、従来手法と同等の計算結果を許容していることを示している。

この特性により、本手法は「制約によって操作が制限される」印象を与えることなく、ユーザが意図したストローク操作をそのまま反映することが可能である。すなわち、本手法は不自然な姿勢が発生する状況においてのみ制約が有効に働き、通常のポージング操作においては従来手法と同様の操作感を維持できているといえる。

6. 考察と課題

前章の比較から、本手法は従来手法がペンによるストローク入力のみでボーン操作を行える操作特性を維持しつつ、人体構造に基づく制約を導入することで、デッサン支援に適した自然なポージングを実現できていることが示唆される。

一方で、本手法の課題として、画面奥行き方向 (z 軸方向) の動きを直接的に指定しづらい点が挙げられる。本手法は 2D 画面上のストローク入力を基に関節操作を行うため、 z 軸方向の変位を明示的に推定することが難しく、関節回転が画面平面内に限定されやすい。そのため、腕を手前に突き出す動作や、身体を奥行き方向にひねるようなポーズにおいては、複数回の操作が必要となり、操作負荷が増加する。

本手法は人体モデルに特化したものではなく、各関節に

対して適切な可動域制限を設定することで、異なる骨格構造を持つキャラクターモデルにも適用可能である。本研究では人体を対象として評価を行ったが、関節構造と可動域が定義されたボーンモデルであれば、人型以外のキャラクターやデフォルメされた体型に対しても、同様の枠組みでストローク入力によるポーズ調整を行うことができると考えられる。

例えば、獣人型キャラクターやロボットキャラクターなど、人体とは異なる関節構成を持つモデルに対しても、各関節の回転軸および可動域を事前に設定することで、構造に即した自然な姿勢生成が期待できる。この点において、本手法は「人体らしさ」を仮定するのではなく、関節制約を明示的に与えることで対象モデルの構造を反映する設計となっており、キャラクターイラスト制作における幅広い利用可能性を有している。

なお、本手法では各関節の可動域を事前に設定する必要があるが、この設定は必ずしもユーザが一から手動で入力することを想定していない。人体モデルに関しては、関節ごとの可動域が体系的に整理された既存資料が存在しており、これらを参照することで標準的な可動域設定をプリセットとして登録することが可能である。

例えば、「関節可動域表示ならびに測定法」[5]では、肩関節、肘関節、股関節など主要な関節について、運動方向ごとの参考可動域が詳細に示されている。このような資料に基づいて可動域情報をあらかじめ定義しておくことで、人体モデルに対する初期設定の手間を大幅に削減できると考えられる。

実運用においては、モデルの骨格構造に応じた可動域プリセットを選択する方式とすることで、ユーザが可動域を意識することなくストローク操作を行えるインターフェース設計が可能である。

7. まとめと今後の展望

本研究では、キャラクターイラスト制作におけるデザイン工程を支援することを目的として、ペンストローク入力によって3Dモデルを操作可能な支援システムを提案した。特に、3D操作やIK/FKの専門知識を持たないイラスト制作者を対象とし、描画に近い感覚でポーズ調整が行えるインタラクションの実現を目指した。

先行研究に基づくストローク解析によるボーン操作手法を基盤としつつ、本研究では関節の可動域制限を考慮した計算方法を導入した。これにより、従来手法で問題となっていた関節の過伸展や不自然な姿勢の発生を抑制し、人体構造に即した破綻の少ないポージングが可能となった。従来手法との比較から、本手法はペンによるストローク入力のみでボーン操作を行える操作特性を維持したまま、イラスト制作時の参照に適した自然な姿勢を生成できることを確認した。

今後の課題としては、奥行き方向の操作性向上が挙げられる。ストロークの速度や筆圧、補助的なジェスチャ入力を用いた奥行き推定手法の導入を検討している。

また、実際のイラスト制作者を対象としたユーザ評価を通じて、制作時間や心理的負担の軽減といった観点から、本システムの有用性を定量的に検証することも重要である。

参考文献

- [1] 株式会社セルシス. 人型入力デバイス qumarion. https://www.clip-studio.com/clip_site/tool/items/quma_plan.
- [2] Kirill Brodt and Mikhail Bessmeltsev. Sketch2pose: estimating a 3d character pose from a bitmap sketch. *ACM Trans. Graph.*, Vol. 41, No. 4, July 2022.
- [3] Mentar Mahmudi, Pawan Harish, Benoit Le Calennec, and Ronan Boulic. Artist-oriented 3d character posing from 2d strokes. *Computers Graphics*, Vol. 57, pp. 81–91, 2016.
- [4] animate1978. Blender アドオン mb-lab. <https://blender-addons.org/mb-lab-add-on/>.
- [5] 日本整形外傷学会. 関節可動域表示ならびに測定法 (2022年改訂), 2022. 参考可動域資料.