

MoNACA: 関節軌道曲線の適応的分割による セルアニメ風モーション変換システム

小六 優依¹⁾ 藤代 一成²⁾(正会員)

1) 慶應義塾大学 大学院理工学研究科 2) 慶應義塾大学 理工学部

MoNACA: A System for Anime-like Motion Transfer by Adaptive Partitioning of Articular Trajectories

Yui Koroku¹⁾ Issei Fujishiro²⁾

1) Graduate School of Science and Technology, Keio University

2) Faculty of Science and Technology, Keio University

{yui.koroku, fuji}@fj.ics.keio.ac.jp

概要

3DCG におけるキャラクタアニメーションでは、セルアニメのような手描きらしい動作を表現するために、コマ打ちを用いることがある。セルアニメにおけるコマ打ちは、少ないポーズ数で動作を表現するために、余剰な動作を省略し速さを強調することにより、現実動作とは異なる質感をもっている。したがって、現実動作に一樣なダウンサンプリング処理を施しても、セルアニメに特有な動作の質感までは再現しづらい。そこで本論文では、モーションキャプチャデータをセルアニメらしい動作へ変換するシステム MoNACA (Motion transfer by Nakawari Adaptation for Cel-anime Articular trajectories) を提案する。MoNACA では、動作の距離配分と余剰性を考慮することで軌道曲線を純化し、その関節軌道から分割点群を選択することで、中割りポーズ群を決定する。さらに、セルアニメの平面性を再現するために微小回転を省略し、動作の視認性を高めるための最適視点位置を自動で決定する。変換動作およびシステム機能に対する評価実験により、MoNACA は、既存手法と比べ、より魅力的な動作変換を効率的に実現できることが実証された。

キーワード：3DCG, セルアニメ, スタイル変換, モーションキャプチャ

Abstract

In 3D character animation, frame rate is often reduced to mimic hand-drawn animations, like anime (Japanese animation). The technique includes the omission of motions and emphasis on speed to express movements with a small number of drawings. As such, sampling real motions at equal intervals does not produce the same effect as anime-like motions. In this paper, therefore, a system called MoNACA (Motion transfer by Nakawari Adaptation for Cel-anime Articular trajectories) is proposed to convert motion capture data into anime-like motion. MoNACA determines nakawari poses by purifying the trajectory curves of motion capture data and selecting a set of segmentation points, taking into account the motion speed between each pair of consecutive keyposes and redundancy. Furthermore, it omits minute rotations to reproduce the flatness of anime and automatically locates the optimal viewpoint to enhance the visibility of the motion. The evaluation experiments on the transformed motions and the system functionalities empirically proved that we can achieve more attractive motion transformation effectivity compared to existing methods.

Keywords: 3DCG, anime, stylization, motion capture

1 序論

コマ打ちとは、1秒あたり24コマを描画するアニメーションデータに対し、数コマずつ同一の絵を描画する手法であり、主に日本のセルアニメで用いられてきた。セルアニメでは、隣接するポーズ間の移動距離を変化させることで動作の速さを自在に調整する、中割りと呼ばれる表現技法が確立している。中割りによる動作表現は、現実動作に含まれる余剰成分を省略し、非写実的な強調によって動作を魅力的に見せられる。

近年の3DCGによるキャラクターアニメーションでは、セルアニメのような動作表現を実現するために、ダウンサンプリングを用いることがある。しかし、モーションキャプチャデータなどの現実動作を等間隔でダウンサンプリングしても、中割りによる動作の質感までは再現しづらい。そこで本論文では、セルアニメで確立された中割り技法に基づき、モーションキャプチャデータをセルアニメらしい動作に変換するシステム **MoNACA** (**M**otion transfer by **N**akawari **A**daptation for **C**el-anime **A**rticular trajectories) を提案する。MoNACAは、大域的な動作特徴を表す速さ分布と局所的な動作特徴を表す、関節軌道曲線に注目し、余剰性を排除した純化曲線の生成と曲線長配分アルゴリズムによりの確な中割りポーズ群を抽出する。

先行報告 [1] からは、主に以下の3点のシステム機能拡張を行った：

- 最適視点の自動選択 (4.2 項)
- 微小回転の省略 (5.4 項)
- インタフェース上でのコマ打ち数およびポーズ指定 (6 節)

また、本手法の目的をより明確にするために、セルアニメ風モーションの心理学的観点における関連研究を調査した (2.1 項)。さらに、MoNACA を用いた変換動作およびシステムの操作性に対する評価実験 (7.2 項) を行い、セルアニメに適した動作変換が実現されていることを示す。

2 関連研究

本節では、セルアニメ風モーションの心理学的研究 (2.1 項) と、ヒューマンモーションからキーポーズを抽

出する研究 (2.2 項)、セルアニメらしい動作に関する先行研究 (2.3 項) を紹介する。2.4 項では、軌道曲線の制御に利用可能なアルゴリズムについて説明する。

2.1 セルアニメ風モーションの心理学的研究

現実動作とセルアニメ動作の違いについては、様々な心理学的観点から議論されている [2, 3]。

映画やテレビなどの映像媒体は、複数画像を短時間で切り換えるように表示することで、実際には表示されていない動作を知覚する現象が用いられている。この現象は仮現運動とよばれ、実写映像の場合、1秒あたりに静止画を24コマ以上表示することで、静止画としてはほとんど認識されず、自然な動作表現が可能である。一方で非写実的アニメーションでは、仮現運動の生じる時間分解能が低くなるため、コマ打ちによる少ない描画数でも十分な動作表現が可能である [4]。

実際の人間が演技した映像をキャラクターの演技としてトレースすることでアニメーションを制作するロトスコープは、コマ打ちによる少ない描画枚数で表現されることが多い。一方でその不気味さ [5] も注目されている。このような写実的動作をセルアニメに導入することによって生じる違和感については、不気味の谷 [6] が原因であるという考察が支持されている。不気味の谷は、ロボットなどにおける人間の再現率が高ければ高いほど親しみやすくなるが、一定の再現率で急激に親和感が低くなり、関係性を示すグラフに谷が現れる現象を示す。この考察により、セルアニメにおける動作表現は、現実動作を忠実に再現するのではなく、アニメーターの経験則により記号化 [7] された誇張・省略技法によって非写実的な動作の魅力を追求する必要があると考えられる。

2.2 動作特性の定量的評価

モーションデータは高次元で冗長であり、動作を要約するためのキーポーズを抽出する研究が多く行われている。動作の速さ分布の極小点となるフレームからキーポーズを抽出する手法 [8] では、各キーポーズ候補を速度下降の度合いで評価し、ポーズ数を容易に調整する。元の動作を厳密に再現するためにキーポーズを選択する手法 [9] では、ユーザが指定したポーズ数に応じて、最短経路問題解決の要領で再現コストが最小となるポーズ群を効率的に探索する。キーポーズは、セルアニメにおける原画ポーズの抽出に有用であるが、中割りの効果をもつような連続したポーズ群の抽出には適していない。

本論文で提案する MoNACA では、速さ分布と関節の軌道曲線に注目し、曲線長を中割り技法に準じて配分することで中割りとなるポーズ群を決定する。

また、単一ポーズに対し適切なカメラ視点を探索する手法 [10] では、ポーズの視認性を評価するために、候補視点から見たときのポーズを囲む長方形の面積と、3D 空間でポーズを囲む直方体の投影面積を求める。この手法は、時間的変化を考慮しておらず、モーションにおけるポーズの特徴量を評価する新たなアルゴリズムの設計が必要である。MoNACA では、動作を定量的に評価するためのポーズ面積を定義し、時間的に安定したカメラ視点を選択する。

2.3 セルアニメ動作

モーションデータをセルアニメ動作へ変換する研究では、現実動作に特有な余剰動作の解消が課題となっている。リップシンクに関する研究 [11, 12] では、音声と少数の口形状を入力することで簡略化されたアニメーションを生成することができる。しかし、全身動作はより複雑であるため、事前にポーズパターンを想定するのは現実的ではない。カートゥーンアニメーションの動作を再現する手法 [13] では、Laplacian of Gaussian フィルタにより動作の振幅を増大させ、予備動作やフォロースルーの効果を強調している。しかしこの手法は、元の動作を増大させることにより余剰な動作も拡大してしまうため、セルアニメのような省略技法を再現するのは難しい。素早い動作を表現するために中割り枚数を減らす、中無しとよばれる手法を模倣する研究 [14] では、高速動作を間引き、間引かれたコマ数の分だけ低速部分を多く描画することで、全体の動作時間を維持したまま速度の変化を強調する。この手法は、特定の速さの動作のみを扱っており、その他の動作部分にはダウンサンプリング処理を施している。モーションデータの低速部分における不連続な動作を防ぐ手法 [15, 16] では、中割りポーズ間の距離和を最大化するポーズ群を動的計画法によって選択し、キーフレーム間のフレーム長が一定以上のときにイージングを用いて補間することで、メリハリのある動作を実現する。この手法では、イージングによりセルアニメらしい速さの強弱を実現できる一方で、動的計画法によって決定されるポーズ群は速さを考慮していない。

我々は、動作の速さを停止、通常、高速の三段階に分

けることで、速さに応じた中割りポーズ群を抽出する手法 [17] を提案した。しかし、中割りポーズ間の移動距離を、モーションデータの各フレームの移動距離の総和から算出しているため、微小動作が発生する区間では実際の動作よりも大きい距離とみなされるといった課題が残っている。

MoNACA では、抽出ポーズ群から再現される軌道曲線を用いて、入力モーションデータの近似度を算出し、キーポーズ間ごとに最適なポーズ数を自動で決定する。

2.4 曲線制御

関節軌道曲線の形状を維持するように中割りを選択する手法は、少数の点群によって元の軌道を再現する曲線近似の考え方を用いることができる [18, 19]。これらの手法は、曲率や近似誤差などにに基づき曲線の特徴点を抽出するため、複雑な形状部分に抽出点が集中しやすい。また、曲線全体の長さを等分割する手法 [20] では、元の曲線との誤差が最小となる曲線セグメントによる等分割問題を解く近似アルゴリズムを提案している。セルアニメ動作は、現実動作の余剰性を省略する傾向があるため、元の曲線形状を厳密に維持する必要はない。

そこで、MoNACA に対しては、キャラクタ動作特有の柔軟性を考慮するために、抽出点群から得られる補間曲線を生成し、動作の速さを考慮したツメ割り配分となる分割点抽出アルゴリズムを提案する。

3 提案手法

MoNACA の処理工程を図1に示す。本論文では、形状に関する情報をもつ主要なポーズをさす用語として「キーポーズ」を、入力された動作データにおいてキーポーズを含むフレームをさす用語として「キーフレーム」を各々用いる。MoNACA はセルアニメの制作手法に倣い、先に原画を定義し、後から中割りを作成するポーズトッポーズ (Pose to Pose) を採用している。まず、モーションキャプチャデータから、原画となるキーポーズ群を抽出する (4.1 項)。次に、動作を好適に撮影するためのカメラ視点を選択する (4.2 項)。キーポーズとカメラ視点は、ユーザの好みに応じて調整可能である。

キーポーズ群を選択した後、キーポーズ間ごとの軌道曲線に基づき中割りポーズ群を抽出する (5 節)。出力動作は 24fps のデータに対し、コマ打ち技法を用いて表現する。

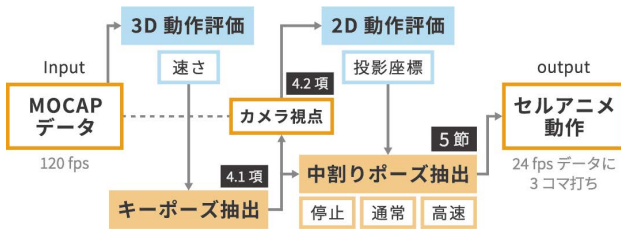


図 1: MoNACA における処理の流れ.

4 動作特性の定量的評価

MoNACA では、モーションキャプチャデータの動作特性を評価するために、速度分布とポーズ面積を算出する。

4.1 速度分布によるキーポーズ選択

モーションデータの関節位置は、3D 空間座標と 2D 画面投影座標で表すことができるが、3D 座標による速度分布の方が増減が緩やかになる。そのため、キーポーズ抽出には 3D 座標の速度分布を、カメラ視点選択後の中割りポーズ抽出には 2D 投影座標の速度分布を各々用いることにした。ポーズ間の移動距離は、各関節の座標移動距離の総和によって求める。このとき、特定部位のみが動く動作を効率的に評価するために、フレーム別に各関節の移動距離の分散に応じたシグモイド活性化関数を乗じ、各関節に相対的な重みを付与する。シグモイド関数を採用したのは、深層学習を用いたヒューマンモーション研究 [21, 22] で主に用いられる ReLU 関数などと比べ、速度の小さい範囲の差を拡大することで極小値となるフレームを特定しやすくなるからである。フレーム k における速度ベクトルの大きさは、直前のフレーム $k - 1$ からの移動距離と定義する。本手法では、速度ベクトルの大きさを速さとみなし、3D 座標を用いた速度分布にローパスフィルタを適用し、極小点をキーポーズの候補として複数個抽出する。各キーポーズ候補には強度として、時間窓内における速さが算出され、ユーザが指定するポーズ数に応じて、強度の大きい順に選択される。

また、ユーザが予め少数のキーポーズ群を指定する場合は、残りのキーポーズを自動で選択するための強度を再計算する。本手法でのキーポーズ候補の時間窓内にユーザ指定のキーポーズがある場合、時間窓を縮小し、

速さの高低差が小さくなるように修正する。これにより、ユーザ指定のキーポーズ付近のキーポーズ候補の選択優先度が低くなり、より最適なキーポーズ群が選択されるようになる。

4.2 ポーズ面積による最適視点選択

コマ打ち表現は一枚あたりの表示時間が長いので、中割り動作では単一のポーズから前後の動作を予想できる躍動感をもつことが好まれる。ポーズ単位の動作情報量は、シルエットの明瞭さによって評価できる。本手法では、イラストなどにおいてダイナミックなポーズを描く際に用いられる技法に基づき、ポーズの概形を三角形で捉えることで、ポーズのシルエットを定量的に評価する。ポーズを概形的に表すために、独立に動く頭 (1)、腕 (4)、足 (4)、着座などで端点となる尻 (1) の計 10 関節のうち 3 点を頂点とする三角形のなかで面積が最大となるものを用いてシルエットを評価する。

一連の動作に対するカメラ視点を全ての視点方向から探索するのは計算量が膨大になってしまうため、フレームごとのポーズ概形である三角形の法線ベクトル \mathbf{v} を候補として用いる。このとき、三角形の表裏ごとの法線ベクトルのうち、キャラクターの顔が向いているベクトル方向となす角が小さい方の法線ベクトルを正方向と定義する。フレーム $[i, j]$ 間の最適視点 $\mathbf{V}(i, j)$ は、視点 $\mathbf{v}_i, \dots, \mathbf{v}_j$ のうち、各フレーム k における三角形 $\mathbf{A}_{3D}(k)$ の投影面積 $P(\mathbf{v}, \mathbf{A}_{3D}(k))$ と速度 $S_{3D}(k)$ の積の総和が最大となるように決定する：

$$\mathbf{V}(i, j) = \operatorname{argmax}_{\mathbf{v} \in \{\mathbf{v}_i, \dots, \mathbf{v}_j\}} \sum_{k=i}^j \{P(\mathbf{v}, \mathbf{A}_{3D}(k)) \times S_{3D}(k)\} \quad (1)$$

なお、カメラの 3 次元位置は、キャラクターを中心とし、ルート関節と同じ高さにある円の周上に設置され、キャラクターの顔正面が優先的に映るように選択する。

5 中割りポーズ選択

4.1 項で抽出したキーポーズ間の動作をコマ打ちによって表現するための中割りポーズ群を抽出する。動作はカメラ視点によって見え方が変化するため、カメラ視点による投影座標を導出する。

セルアニメでは、原画間の動作を一本の曲線で表し、その曲線を分割することで中割りポーズの距離関係を決定する。このとき、各中割りポーズの距離関係は、移動

距離を一定に保つ均等割りと、動作の発生または終了付近の距離を小さく分割するツメ割りがある。そこで、均等割りとツメ割りのどちらも出力可能にするアルゴリズムを設計して、中割り手法の統合的再現を試みる。

ここで、中割り距離配分の条件は以下の2点である。

- 動作が最速となるフレームを含む区間の移動距離が最大となるように分割点群を配置
- 最大距離区間から両端のキーポーズに向けて、次第に距離が減少するように分割点群を配置

これら2条件を満たすように分割点群を配置するために、本アルゴリズムは、キーポーズ間の各関節軌道から取得される分割点群から、関節軌道を純化するための補間曲線を生成する工程(5.1項)と、生成された曲線から各点間の距離を計測し、中割り距離の条件を満たすように分割点を移動する工程(5.2項)を繰り返す。さらに、キーポーズ間の動作が速い区間では、高速動作がより強調されるように距離配分を調整する(5.3項)。

5.1 軌道曲線の生成

各点間の距離を計測するうえで、モーションデータはノイズが多く、余剰軌道を含むため、全フレームの移動量を総和して移動距離とみなすのは適切ではない。そこで、分割点群から新たに曲線を生成することで現実動作の余剰性を排除し、実際に描画される中割りポーズ群のみから得られる軌道を推測する。曲線は、次項で取得される各関節の関節座標点を補間することによって生成する。MoNACAの補間方法は、誇張性の高い3次自然スプライン補間[23]、尖点や自己交差が発生しないCatmull-Rom補間[24, 25]、または直線的な動作に対応する線形補間から選択可能である。

提案アルゴリズムは、カメラ座標系において、各関節の共通フレームから座標点を取得し、軌道曲線を生成する。可動域の異なる複数の関節を複合的に考慮するため、キーポーズ間ごとの各曲線長を正規化し[26]、情報エントロピの考え方[27]を応用し、動作全体における各関節の速さ分散に応じた重みを付与する。これにより、腰座標のように常に動き続ける座標は重みによる変化が小さくなり、足関節などの接地の有無によって移動量が極端に異なる関節は、動きが大きい場合にのみ重視されるようになる。正規化および重み付けされた曲線長を総和することで各中割りポーズ間の移動量を計測する。

本アルゴリズムの疑似コードをAlgorithm 1に示す。

Algorithm 1 移動距離計測アルゴリズム

Input: Extracted articular position list P

Output: Distance list D

```

1: function SPLINELENGTH( $P$ )
2:    $n \leftarrow$  The number of total nakawari poses;
3:    $D \leftarrow [0] \times (n + 1)$ ;
4:   for  $a \leftarrow 0$  to  $P$ .length do           ▷ Articular index
5:      $S_a \leftarrow$  CREATE_SPLINE_CURVE( $P[a]$ );
6:      $R_a \leftarrow$  Normalized length of
           each  $S_a$  segment divided by  $P[a]$ ;
7:      $W_a \leftarrow$  Relative articular weight of each  $R_a$ ;
8:      $D \leftarrow D + R_a \times W_a$ ;
9:   end for
10:  return  $D$ 
11: end function

```

5.2 曲線長配分アルゴリズム

分割点群によって中割り距離を配分するために、点数に関して再帰的に定義される動的アルゴリズムを用いて、両端を除く $n (\geq 1)$ 個の分割点群を取得する。

1点目は、キーフレーム区間内において4.1項で算出した速さが最大となるフレームに候補点を追加し、両端と合わせた3点から補間曲線を生成する。提案アルゴリズムでは、最速フレーム地点に配置した候補点前後の曲線長の大小関係を入れ替えることで、最速フレームを含む区間のポーズ間距離を最大にする。生成された曲線の2点間の曲線長 d_{p_0} , d_{q_0} をそれぞれ算出し、最速フレーム地点に配置した候補点を曲線長の大小関係が入れ替わる方向に移動させる。曲線長の比が $1/d_{p_0} : 1/d_{q_0}$ に最も近づく点を分割点とする。

$m (\geq 2)$ 点目以降は、 $m - 1$ 点目時点の分割点群に最速地点への候補点を加えた m 点と両端による補間曲線を生成する。候補点を追加する際に、最大距離となる区間が他の区間よりも小さくなる場合、取得済みの分割点を両端に移動させることで曲線長を確保する。最大距離区間を確保した時点で、候補点の前後の曲線長 $d_{p_{m-1}}$, $d_{q_{m-1}}$ を算出し、逆比 $1/d_{p_{m-1}} : 1/d_{q_{m-1}}$ に到達するまで最大距離区間の両端点を拡張する。最大距離区間の両端点は、曲率が小さい方から順に移動させる。

逆比に到達した後、他の中割りポーズ間の元の曲線から特徴点を探索し、最速点から両端へ向かう方向に移動させる。特徴点の探索には、文献[9]に基づき、スプライ

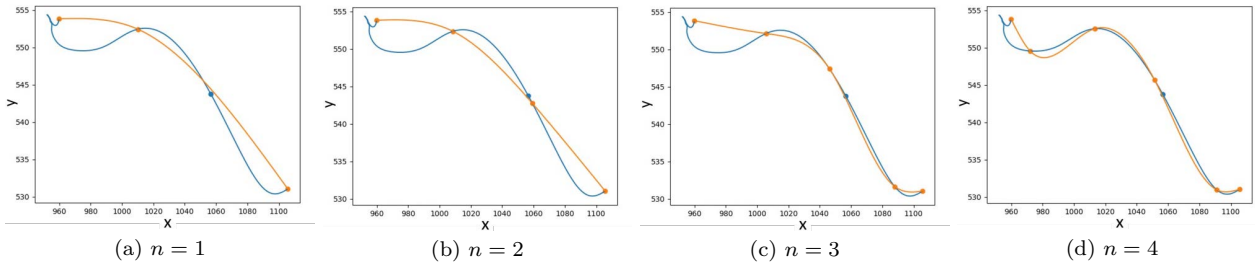


図 2: カメラ座標系におけるモーションデータの関節軌道 (青) に対し, Algorithm 1 および Algorithm 2 によって MoNACA が生成した曲線と抽出した分割点群 (オレンジ). 最速フレーム (青丸) から両端に向け, 距離が減少するように分割点群を抽出.

ン曲線補間ではなく線形補間を用いる. 極端な距離差にならない範囲内で線形補間の和が最長となる点 $L(l)$ を選択し, 最大距離区間から端に向かう順に分割点を更新する:

$$L(l) = \underset{k \in \{L(l-1)+1, \dots, L(l+1)-1\}}{\operatorname{argmax}} (\|C_k - C_{L(l-1)}\| + \|C_k - C_{L(l+1)}\|) \quad (2)$$

ここで, C_k はフレーム k における関節の 2D 投影座標を表す. これらを必要点数 n に到達するまで繰り返す.

また, ユーザによる抽出数を指定する手間を軽減するために, 元の曲線との近似誤差をパラメタとして最適な抽出数を決定する. 近似誤差は動的時間伸縮法 (DTW) [28] を用いて計測し, ユーザによって設定された閾値を下回るまで, 中割りポーズ数を追加していく. これにより, ユーザがキーポーズ間ごとに抽出数を指定しなくても, 簡単に中割り枚数を調整できるほか, 動作が静止しているフレーム区間を考慮し, 余剰な枚数の抽出を防止できる.

本アルゴリズムの疑似コードを Algorithm 2 に示す. さらに, Algorithm 1 および Algorithm 2 によって曲線生成を繰り返し, 中割り距離配分の条件を満たすように分割点群を抽出した例を図 2 に示す.

5.3 高速動作

キーフレーム区間の速さの最大値が一定以上の場合は, 高速動作とみなして中割りポーズ群を抽出する. セルアニメでは, 高速動作に様々な強調手法を用いている. MoNACA では以下の技法に着目した処理を各々施す.

(a) **高速動作の省略:** セルアニメでは, 仮現運動を用いて素早い動作を表現することが可能であるため, 中間動作を意図的に省略する技法が確立している. MoNACA

では, 曲線長配分アルゴリズムの最大距離区間をより大きく確保することで, 高速動作を省略する. 最大距離区間の省略度合いは 0 から 1 の範囲でユーザが指定し, 以下の条件を満たすように最大距離区間が確保される:

$$\frac{d_{l_h}}{\sum_{i=0}^{n-1} d_k} > thr_h \quad (3)$$

ここで, thr_h はユーザが指定した省略パラメタを, d_{l_h} は最大距離区間の曲線長を各々表す.

(b) **オバケの挿入:** オバケとは, 一枚の描画時間内に発生する動作全体の軌道情報を保持するために, 不定型の画によって残像を表現する技法である [29]. MoNACA では, (a) で省略した動作のうち, 特定のポーズを表示することで, 省略による動作の途切れを軽減する. ポーズの選択には, 式 (2) と同様の手法を用いる.

(c) **タメとツメ:** タメとツメは, 動作の開始または終了の動作を実際の速さよりも遅くすることで, 高速動作を相対的に強調する技法である. (a) で省略した動作に対し, 省略されていない前後の動作を遅く表示することで, タメとツメの効果を再現する. 前後のポーズ数は, 対応するフレーム長がなるべく均等に分割されるように決定し, 減速するようにツメ割り処理を行う.

5.4 微小回転の省略

セルアニメにおいて, 前後のキーポーズをもとに中割りポーズを描く際は, 平面的な移動を描くタップ割りや線割りと, 3D 形状を考慮して新たなポーズを描くデッサン割りが用いられている [30]. 特定のキーポーズ間の中割り枚数が多い場合, すべてをデッサン割りで描く必要はなく, タップ割りや線割りを組み合わせることでアニメ特有の平面的な表現を実現している. そのため, 3DCG においても余剰な回転を省略することによって,

Algorithm 2 曲線長配分アルゴリズム

Input: Curve position list C , a highest speed frame k_h

Output: Nakawari frame list L

```

1: function PARTITION( $n$ )
2:   if  $n = 1$  then
3:      $k_{end} \leftarrow C.length - 1$ ;
4:      $L \leftarrow [0, k_h, k_{end}]$ ;
5:      $[d_0, d_1] \leftarrow SPLINELENGTH(C[L])$ ;
6:      $L[1] \leftarrow \underset{k \in \{1, \dots, k_{end}-1\}}{\operatorname{argmin}} \operatorname{ERROR}(C[[0, k, k_{end}], 1/d_0, 1/d_1])$ ;
7:   else
8:      $L \leftarrow \operatorname{SORT}(\operatorname{PARTITION}(n-1), k_h)$ ;
9:      $l_h \leftarrow \operatorname{Index\ of\ } k_h \text{ in } L$ ;
10:     $[d_0, d_1] \leftarrow \operatorname{SPLINELENGTH}(C[L])$ ;
11:     $e \leftarrow \infty$ 
12:    while  $\operatorname{ERROR}(C[L], 1/d_0, 1/d_1) < e$  do
13:       $e \leftarrow \operatorname{ERROR}(C[L], 1/d_0, 1/d_1)$ 
14:      if  $\operatorname{CURVATURE}(C, L[l_h]) < \operatorname{CURVATURE}(C, L[l_h + 1])$  then
15:         $L[l_h] \leftarrow L[l_h] - 1$ ;
16:      else
17:         $L[l_h + 1] \leftarrow L[l_h + 1] + 1$ ;
18:      end if
19:    end while
20:    for  $l \leftarrow 0$  to  $L.length$  excluding  $l_h$  and  $l_h + 1$  do
21:       $C_l \leftarrow C[L[l-1] : L[l+1]]$ ;
22:       $B \leftarrow \operatorname{Boolean\ at\ each\ } c \text{ in } C_l \text{ for the distance relationship is not extreme}$ ;
23:       $L[l] \leftarrow \operatorname{FURTHEST}(C_l, B)$ ;      ▷ Eqn. (2)
24:    end for
25:  end if
26:  return  $L$ 
27: end function

```

セルアニメらしい動作が再現できると考えられる。

MoNACA では、各キーポーズ間で抽出された中割りポーズ群に対し、胴体の体軸方向の微小回転を除去することで、平面的な移動表現を再現する。微小とみなす回転角 ϕ は、文献 [31, 32] の考えに基づき、15 度とした。

はじめに、キーポーズを含む隣接中割りポーズ間の胴体の回転量を算出する。全ての中割りポーズ間の胴体回転量が ϕ 未満かつ両端のキーポーズの胴体回転量が ϕ 未満である場合、そのキーポーズ区間では胴体回転が生じていないとみなし、全ての胴体回転を除去する。回転が生じる場合は、各ポーズ間の回転量が ϕ 未満となる中割りポーズ間の胴体回転を除去する。動的計画法により、

最小回転量が最大となるように胴体角の組合せを探索する。回転の生じるポーズ数がより少なくなるように、順にポーズ数を増やしながら探索を実施し、胴体回転の最小値が ϕ 以上となる組合せを採用する。

胴体回転を省略するポーズに対して、前後どちらかの胴体回転角をコピーする。コピーする回転角は、元のポーズとの角度差がより小さくなる方を選択する。この際、胴体にはルートボーンが含まれているため、手足の位置がずれてしまうため、IK 処理によって手足の位置を元のポーズと同じ位置となるように固定する。

5.5 視点の切替え

セルアニメは、主にカメラの角度を固定して動作を表現するが、動作の見え方に応じて視点を瞬間的に切り替える、カット割り手法を用いる場合がある。そのため、本手法ではカット割りによる時間的分割と、区間ごとに視点を選択するアルゴリズムを用意する。

カット割りによる視点変化には、構図の変化により鑑賞者を混乱させないための規則がある。キャラクタの視線を延長した直線は、イマジナリーラインとよばれ、空間全体をキャラクタ基準で二分する役割をもつ。カット割りの際にこの線を超えてカメラを移動させると、構図の左右が反転してしまうため、映像の繋がりが不自然となってしまう。また、カメラ角度の変化が 30 度以下であると、構図の変化が微小となり、時間的な繋がりが途切れているような印象を与えてしまう [33]。

はじめに、動作全体の各フレームにおける最適視点を算出し、カット割りを生成する際に全ての視点をイマジナリーラインのどちら側から撮影するかを決定する。次に、各キーポーズによって分割された区間ごとに、式 (1) により最適視点を選択していく。このとき、イマジナリーラインを超えているカメラベクトルは反転させる。これらの最適視点のうち、隣接する 2 視点の角度差が 30 度未満となる区間がある場合は、両区間を統合し新たに最適視点を求める。また、単一の区間の表示時間が短い場合も同様に隣接区間と統合し、全ての区間が一定の表示時間 τ 以上となるようにすることで、カット割りの区間を決定する。

この処理の疑似コードを Algorithm 3 に示す。

Algorithm 3 視点選択

Input: Keyframe list F

Output: Viewpoint list \tilde{V} , frame list L

```

1: function PLANNINGVIEWPOINT( $F$ )
2:    $\tilde{V} \leftarrow []$ ;
3:    $L \leftarrow \text{COPY}(F)$ 
4:   for  $i \leftarrow 0$  to  $L.\text{length} - 1$  do
5:      $\tilde{V} \leftarrow \tilde{V} \parallel \text{VIEWPOINT}(L[i], L[i + 1]); \triangleright \text{Eqn. (1)}$ 
6:   end for
7:   while Any DELTA( $\tilde{V}$ ) < 30 degree do
8:      $i \leftarrow \text{argmin DELTA}(\tilde{V})$ ;
9:      $\tilde{V}[i] \leftarrow \text{VIEWPOINT}(L[i], L[i + 2])$ ;
10:    Delete  $L[i + 1]$ ;
11:  end while
12:  while Any LENGTH( $\tilde{V}$ ) <  $\tau$  do
13:     $i \leftarrow \text{argmin LENGTH}(\tilde{V})$ ;
14:     $\tilde{V}[i] \leftarrow \text{VIEWPOINT}(L[i], L[i + 2])$ ;
15:    Delete  $L[i + 1]$ ;
16:  end while
17:  return  $\tilde{V}, L$ 
18: end function

```

6 ユーザ操作

MoNACA は、CPU: Intel (R) Core (TM) i911900K @ 3.50 GHz, RAM: 64.00 GB を用い、blender 3.4 [34] のアドオン機能として開発した。MoNACA のユーザインタフェース画面を図3に、またその操作の様子を添付動画に示す。

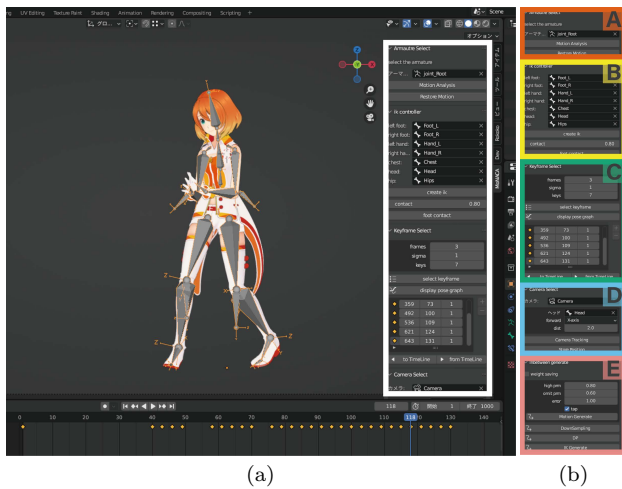


図3: MoNACA のユーザインタフェース画面. (a) ワークスペース. (b) 操作パネル.

まず、モーションキャプチャデータが反映されたキャラクターオブジェクトを入力する (A). 抽出元となる動作データは新規に生成されるビューウィンドウ上で随時確認でき、変換操作中に入力動作と出力結果を比較しながらパラメタなどを調整できる。

足の接地情報は、入力された関節情報の足座標の速さに基づいて二値的に決定され (B), 新規に生成される IK コントローラ内のパラメタに格納される。接地情報は一律に動作全体に対し簡単にパラメタ設定できるほか、blender 上でのオブジェクト操作と同様に編集することも可能である。なお、接地情報は中割りポーズ抽出後にも変更可能であるため、ユーザは入力動作に対し厳密に接地情報を設定しなくても、抽出される離散ポーズ群に対応するように接地情報を設定することで、効率的に接地処理を実現できる。

入力された動作データの速さを評価し、キーポーズ群を抽出する (C). 抽出されたキーポーズ群は、blender 内のキャラクタに随時反映され、ビューウィンドウおよび速さ分布グラフと比較しながら出力結果を確認できる。ユーザはローパスフィルタの強度とキーポーズ数を指定することで、入力動作全体における抽出ポーズの追加や削除、静止フレーム長の指定ができるほか、ビューウィンドウ上で抽出ポーズを指定することで、キーポーズの変更が可能である。キーポーズ群は以降の処理中にも再設定できる。

キーポーズを選択した後、カメラ視点を選択する。カメラオブジェクトとキャラクターオブジェクトの顔ボーンとそのボーンの向きを指定 (D) することで、キーポーズとポーズ面積に基づく最適視点が導出される。計算に用いられるポーズ面積は、三角形メッシュを生成することで可視化される。切替えを含む最適視点の結果は、キャラクターオブジェクトと同様にビューオブジェクトで確認でき、ユーザの好みに応じて編集できる。

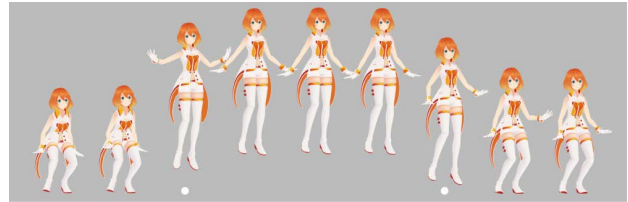
キーポーズの編集およびカメラ視点の選択をした後、中割りポーズ群を抽出する (E). 中割りポーズ数は、入力動作の近似率によって自動的に調整できるほか、各キーポーズの描画フレーム位置や静止フレーム長を設定することで詳細な枚数を指定することが可能である。抽出結果はキャラクタに反映され、高速動作とみなす速さと高速動作の省略度を 0 から 1 の範囲で指定することで、ユーザの好みに応じた強調表現に調整できる。また



図 4: MoNACA (下段) による投球動作のポーズ抽出結果. 上段は入力モーションキャプチャデータ, 白枠はキーポーズ.



(a) 通常速度処理



(b) 高速処理

図 5: 高速処理の有無によるポーズ抽出結果の比較. (b) の白丸はオバケとして抽出されたポーズ.

コマ打ち数やポーズ数, 補間曲線の種類を区間ごとに細かく調整ができる. 接地中の足を IK 制御によって固定するために, 接地中の足座標の平均値を算出し, 中割りポーズ抽出時に適用する.

7 結果と評価実験

本節では, MoNACA を用いて変換した動作例, 変換動作およびシステムの評価実験について説明し, 今後の課題に言及する. 実行環境は 6 節と同一である. 3D モデルはミライ小町 [35] を, モーションキャプチャデータは文献 [36, 37] で公開されているデータを用いた. キャプチャデータのフレームレートは 120 fps とし, 60 fps, 30 fps のデータには事前にアップサンプリング処理を施した. なお, MoNACA による変換動作のポーズ数や高速動作に関するパラメータは第一著者が調整した.

7.1 変換結果

図 4 および添付動画に投球動作における抽出ポーズ例を示す. 通常速度の動作は, 関節軌道曲線の近似誤差によってポーズ数を自動で決定するため, 速さの小さいフレーム区間では抽出ポーズ数が大幅に削減される.

図 5 および添付動画に, ジャンプ動作における通常速度処理のみの変換と高速動作処理を含む変換結果の比較を示す. 通常速度動作の処理に用いた中割り抽出アルゴリズムは, 移動距離が緩やかに増減するようにポーズ群を抽出するため, ジャンプ中の動作はダウンサンプリン

グ処理とほぼ等速となる. 高速処理を用いた抽出結果では, 飛ぶ直前の予備動作や滞空中のポーズを多く選択しているため, 動作の速さに緩急がつき, メリハリのある動作となる. また, 大幅な動作省略によって速さが強調されると同時に, オバケとなるポーズを挿入することで, 動作の途切れを防ぎ, 滑らかな動作表現を実現している.

図 6 および添付動画に, MoNACA による袈裟切り動作のポーズ抽出例を, 等間隔ダウンサンプリング, セルアニメ風モーション変換の既存手法である Morishima らの手法 [15], キーポーズ抽出手法である Roberts らの手法 [9] による結果と比較した. 各手法は, MoNACA によって決定された共通のキーポーズを用いて処理を施している. Morishima らの手法は中割りポーズ間の距離和が最大となるように, Roberts らの手法は入力されたモーションデータとの近似誤差が最小になるように, それぞれ動的計画法を用いてポーズが決定されるため, 複雑な動作時に抽出ポーズ数が増加する傾向がある. そのため, 速い動作の場合, 本来の速度よりも遅く表示され, 不自然な動作になってしまうことがある. MoNACA は余剰な動作に対して枚数を減らし, 代わりにキーポーズを長く表示することで, 動作の情報を損なうことなくセルアニメらしいメリハリのある動作表現を実現している. また, 速さの大きいフレームを避けてキーポーズ付近でツメ割りをを行うため, 自然な速さ変換が実現できている.

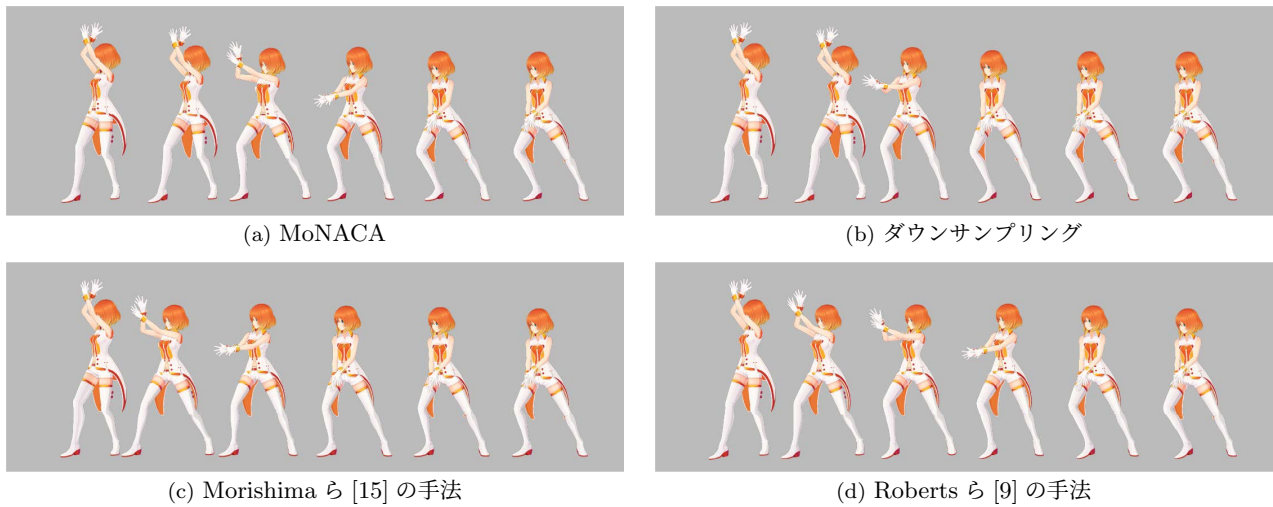


図 6: 各手法による袈裟斬り動作のポーズ抽出結果.

Roberts らの手法は、2 ポーズ間の近似コストを全フレーム数 L に対して算出するため、 $O(L^3)$ の計算量を要する。一方、MoNACA は、中割りとなる候補点群を最大 $L \times \sum_{k=1}^n k$ 回移動させ、そのたびに移動距離を計算するため、全体の計算量は概ね $O(L^2 \times n^2)$ である。 $n \ll L$ であるため、MoNACA の方がより高速に中割りポーズ群を決定することができる。Morishima らの手法は、抽出ポーズ間の距離和を最大化するポーズ群を探索するため、全体の計算量は概ね $O(L^2)$ であり、MoNACA よりも高速に計算できるが、その差は制作システムとしての作業効率性を損なわない程度であり、MoNACA の方がより魅力的な動作を生成することができる点で総合的に優れていると考えられる。実際、ジャンプ動作 (369 フレーム, 5 個のキーポーズ) に対して Morishima らの手法, Roberts らの手法, MoNACA のポーズ抽出アルゴリズムの実行時間の平均はそれぞれ 0.738 秒, 2.63 秒, 0.833 秒であった。

7.2 評価実験

MoNACA による動作変換および視点選択の効果を実証するために、鑑賞者および利用者による評価を実施した。

7.2.1 鑑賞者実験

動作変換の評価では、MoNACA による変換手法, ダウンサンプリング処理 (DS), Roberts ら [9] の手法, Morishima ら [15] の手法によって生成したコマ打ち動作を比較することで定量的に評価した。コマ打ち数は、

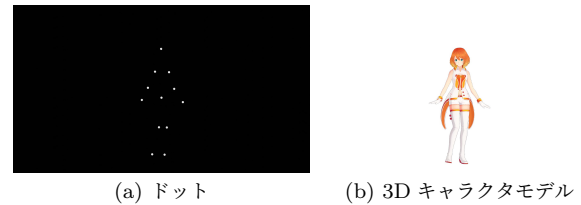


図 7: 評価実験に用いた動作表示.

予備実験で 2 コマ打ちと 3 コマ打ちによる動作を比較した結果をふまえ、平面的に表現できることから 3 コマ打ちを採用した。映像表示には図 7 に示すような 3D キャラクタモデルとキャラクタ外見による影響を受けないドットを用い、 -3 から 3 の 7 点法による評価を行った。3D キャラクタモデル表示では、MoNACA による一連の処理のうち、微小回転を省略しない手法 (MoNACA-) を追加して比較する。カメラ視点は、予備実験でカメラ視点が原因で動作が認識しづらいというコメントがあったため、キャラクタの主な動作に対し、真正面または真横となる視点とすることで視認性を確保するとともに、立体感を軽減するように、第一著者が選択した。各映像の評価項目としては、ドット表示に対しては、モーションキャプチャの動きをセルアニメ風に変換できているかを評価するために、空間的 (3D) と平面的 (2D) のどちらにより近いかを選択させた。3D キャラクタモデル表示に対しては、変換動作がセルルックキャラクタの非写実的外見にどの程度適しているか (質問上では「デフォルメされたキャラクタの見た目と一致しているか」と表

表 1: ドット表示における次元性評価の検定による p 値. 括弧内はサンプルサイズおよび検出力.

	次元性				魅力度			
	MoNACA	DS	Morishima	Roberts	MoNACA	DS	Morishima	Roberts
MoNACA	-	0.069 (24, 0.42)	0.15 (26, 0.21)	0.33 (30, 0.13)	-	0.13 (27, 0.23)	0.29 (26, 0.052)	0.16 (25, 0.095)
DS		-	0.37 (22, 0.055)	0.18 (24, 0.12)		-	0.24 (23, 0.13)	0.051 (22, 0.49)
Morishima			-	0.31 (22, 0.077)			-	0.081 (16, 0.30)
Roberts				-				-

記)を選択することで評価してもらった。また、両者の共通項目として魅力度についても尋ねた。

視点選択の評価では、MoNACAにより選択した視点を、他の視点と一対比較することで定量的に評価した。比較対象となる視点は、鑑賞者が各動作の特性をより正確に把握したうえで最適視点を判断できるようにするために、MoNACAにより選択した視点から、顔がより正面から見える方向に90度回転させた視点をを用いた。表示動作は、各視点に対しMoNACAが抽出した中割りポーズ群を用いた。動作の表示には3Dキャラクターモデルを用い、どちらの視点がより魅力的に感じるかを7段階により評価する形式とした。

動作種は、全身の動きが大きい投球動作、全身の動きが小さい袈裟斬り、高速動作を含み周期的に表示可能であるジャンプ、高速動作を含まない周期動作である歩行の4種とした。なお、キーポーズ群および各キーポーズ間の中割りポーズ数は全ての手法で統一し、MoNACAにおける高速動作などのパラメタは第一著者が調整した。実験時の動作種類および手法の表示順は、参加者ごとに無作為に入れ替えており、理工系学生9人(22~30歳、男性6名、女性3名。謝礼無し)から回答を得た。

(a) ドット表示を用いた動作評価

ドット表示における評価結果を図8に、符号順位検定を用いた p 値を表1に示す。次元性について、MoNACAによる変換動作は他手法と比較して平面的に感じやすく、ダウンサンプリング手法との比較では $p < 0.05$ で有意差が認められた。魅力度について、MoNACAによる変換動作はRobertsらの手法よりも魅力があるという結果が得られ、 $p < 0.05$ で有意差が認められた。一方でMorishimaらの手法とダウンサンプリング手法はMoNACAとほぼ同一の評価となり、MoNACAを除く

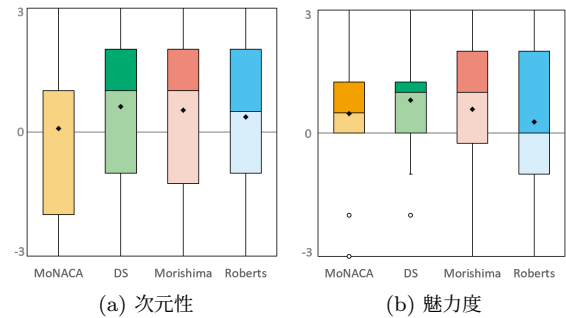


図 8: ドット表示における MoNACA と各手法の比較。次元性は低いほど平面的に感じたことを、魅力度は高いほど魅力に感じたことを示す。白丸は外れ値。

各手法はより空間的に感じる方が魅力を感じやすいという傾向が見られた。このことから、MoNACAによる手法はキャプチャデータの魅力を維持しながら平面的な動作に変換しているといえる。

(b) 3D キャラクターモデル表示を用いた動作評価

次に、3D キャラクターモデル表示を用いた動作比較の評価結果を図9に、符号順位検定を用いた p 値を表2に示す。外見一致性について、MoNACAによる動作変換は、他手法より高いスコアとなり、ダウンサンプリング手法との比較では $p < 0.1$ で有意傾向が、その他の手法では $p < 0.05$ で有意差がみられた。魅力度について、他手法と比較して高いスコアとなり、全ての比較において $p < 0.01$ で有意差が見られた。予備実験時からカメラの視点を正面または側面となるように変更したことで、MoNACAによる動作変換がより適切に機能したことから、コマ打ち動作を制作する場合は視点の選択による視認性や平面性の考慮が重要であると考えられる。また、自由記述のコメントに『多分違いはあるのだろうなと思いつつ、あまりその違いがわからなかった』という意見

表 2: 3D キャラクタモデル表示における外見一致評価の検定による p 値. *は 0.05 以下, **は 0.01 以下. 括弧内はサンプルサイズおよび検出力.

外見一致性	MoNACA	MoNACA-	DS	Morishima	Roberts
MoNACA	-	0.035* (15, 0.52)	0.065 (21, 0.43)	0.0016** (20, 0.91)	0.045* (20, 0.39)
MoNACA-		-	0.36 (16, 0.095)	0.014* (20, 0.69)	0.099 (18, 0.13)
DS			-	0.018* (19, 0.39)	0.32 (21, 0.041)
Morishima				-	0.084 (20, 0.32)
Roberts					-

表 3: 3D キャラクタモデル表示における魅力度評価の検定による p 値. *は 0.05 以下, **は 0.01 以下, ***は 0.001 以下. 括弧内はサンプルサイズおよび検出力.

魅力度	MoNACA	MoNACA-	DS	Morishima	Roberts
MoNACA	-	0.037* (18, 0.52)	0.039* (29, 0.55)	< 0.001*** (22, 0.96)	0.014* (30, 0.61)
MoNACA-		-	0.46 (26, 0.052)	0.061 (25, 0.25)	0.13 (31, 0.18)
DS			-	0.059 (25, 0.20)	0.19 (25, 0.085)
Morishima				-	0.29 (25, 0.052)
Roberts					-

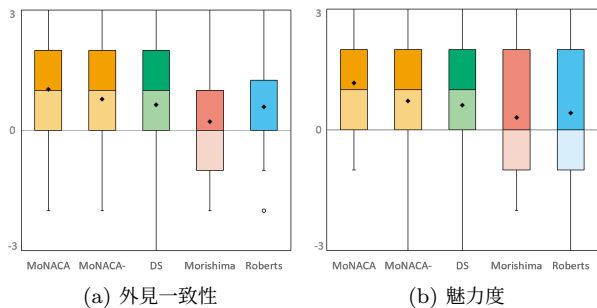


図 9: 3D キャラクタモデル表示における MoNACA と各手法の比較. 外見一致性は高いほど一致していると感じたことを, 魅力度は高いほど魅力を感じたことを示す. 白丸は外れ値.

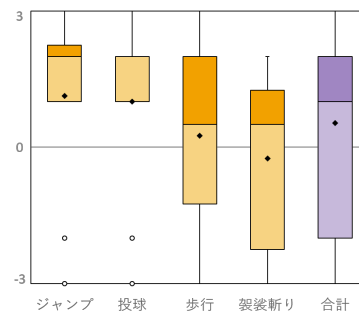


図 10: MoNACA により選択した視点スコア. スコアが高いほど MoNACA が選択した視点が適していると感じたことを示す. 動作は平均値の高い順に並び替えている. 白丸は外れ値.

があり, 微小回転の省略の有無の比較におけるサンプルサイズ N が他手法よりも少なくなっていた. 微小回転の有無は, 気付かない人がいるほどわずかな差でありながら, 省略処理を施すことによる有意差が生じており, 微小回転を省略することで非写実的キャラクタに適した動作として魅力のある動作に変換できることが実証された.

(c) 視点評価

視点比較の評価結果を図 10 に示す. ジャンプ動作と投球動作の評価が高くなり, 袈裟斬りの評価が低いという結果が得られた. 歩行動作についても, MoNACA による選択視点が比較視点よりも側面に近い視点を選択したことで, 平均値がわずかに高くなった. ただし, 評価の高い動作においても -3 や -2 を選択する鑑賞者もい

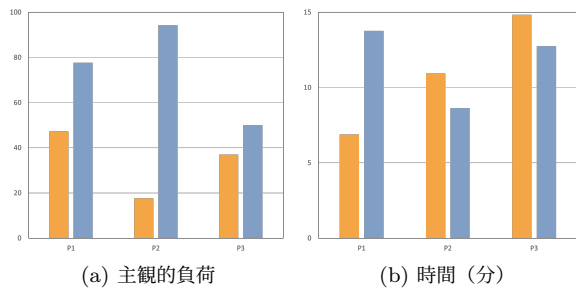


図 11: 各参加者のシステム評価. オレンジは MoNACA, 青は Blender 標準機能.

ることから, ユーザの好みによって最適視点を一律に定めることは難しいことがわかった.

7.3 システム評価

MoNACA と Blender 標準機能を用い, モーションキャプチャデータをコマ打ち動作へ変換する作業に関して, NASA-TLX[38] を用いたユーザの主観的負荷と, 制作時間の比較, アンケートによる定性的評価を実施した. Blender 標準機能による制作手法では, Blender シーン内に読み込んだモーションキャプチャデータからポーズを複数選択し, キャラクターオブジェクトにコピー&ペーストすることでアニメーションを制作する手法とした.

評価時間は 1 時間で, 以下の流れから構成された:

- 研究説明, 基本情報の収集: 10 分
- 前半チュートリアル: 5 分
- 前半モーション制作: 15 分
- 後半チュートリアル: 5 分
- 後半モーション制作: 15 分
- アンケート: 10 分

モーションキャプチャデータはジャンプ動作 (369 フレーム) とし, 前半・後半による手法は MoNACA と Blender 標準機能を参加者ごとに無作為に入れ替えた. セルアニメを除くキャラクターアニメーション, またはイラスト制作経験のある 3 名 (P1, P2, P3) が参加した. 参加者の基本情報を表 4 に示す.

各参加者によるシステム評価を図 11 に示す. 主観的負荷は MoNACA の方が低い結果となった. Blender 標準機能を用いたアニメーション制作に対する意見として, 以下のような労力がかかる点が多く挙げられた:

- 『選択したポーズをどのフレームに打てばよいかの

目安がわかりづらい』 (P1)

- 『キーを打つ位置がまばらになってしまい, データが煩雑になる』 (P1)
- 『最適な中割りポーズを探すのに手間がかかる』 (P2)

一方で, MoNACA による制作では自動で生成することへの好意的な意見が多く挙げられた:

- 『MoNACA は動作を自動で生成してくれるので, アニメーションの目安としてわかりやすい』 (P1)
- 『ジャンプ中の動作は手動で中割りポーズを探すのが大変だったが, MoNACA では自動でなめらかな動作を生成していて楽だと感じた』 (P2)
- 『デフォルトのパラメタ値で動作を生成した後に, いろいろ試しながら調整することができるのがよかった』 (P3)

これらの印象によって, MoNACA を用いた制作手法の方が, 主観的負荷が低くなるということがわかった.

制作時間について, P1 は MoNACA を用いた方が制作時間がおよそ半減したのに対し, P2, P3 は Blender 標準機能を用いた方が早くなった. MoNACA による制作手法に時間を要した理由について, 以下のような意見が挙げられた:

- 『Blender 標準機能では時間をかけてもアニメーションの品質が上がらないと感じ, 早めに諦めてしまった』 (P2)
- 『体感では MoNACA の方が早く感じ, Blender 標準機能の方が長い時間を要したように感じた』 (P3)

これらの意見により, MoNACA は制作における作業負荷を低減させたことで, アニメーションの品質を上げるための調整により多くの時間を要したといえる.

また, MoNACA の改善点についてのコメントでは, 以下のような意見が挙げられた:

- 『パラメタの種類が多く, パラメタと動作の対応性を覚えるのに慣れが必要である』 (P1, P3)
- 『パラメタが多くあるため, 優先度の高いパラメタのみを表示し, 細かいパラメタは隠しておくような工夫をした方がよい』 (P3)
- 『抽出後のポーズがリストの数値表記しかなく見づらい』 (P1)

表 4: 参加者の基本情報

参加者	性別	年齢	キャラクタ作品制作経験	Blender 経験	セルアニメ鑑賞頻度	3D アニメ鑑賞頻度
P1	女	22	半年	1年	週に1, 2日	週に1日以下
P2	男	22	半年	半年	週に1, 2日	週に1, 2日
P3	男	24	10年	無	週に1日以下	週に1日以下

- 『直線運動やガンマ関数などの関数を対応させる形式で動作特徴を判定し、中割りポーズを編集できるとよい』(P2)
- 『ある程度の品質までは MoNACA を使いたいが、最終調整では Blender 標準機能を用いた方が自由度がある』(P1)

MoNACA による動作生成は、簡単に動作を生成できる一方で、Blender 標準機能との相互性を高めることで自動化と手動化を自由に切り替えられるようにすることや、動作特性をより直観的に表現できるデータ形式で扱うことで、さらにユーザの好みを反映させることができると考えられる。

7.4 今後の課題

提案手法ならびに MoNACA について、今後取り組むべき課題を以下に提示する。

微小回転の省略の改良: 回転によるポーズの違いは微小であるため効果が得づらく、また過剰に略すとポーズが破綻するといった問題がある。これらを解消するために、関節構造を考慮した回転量の算出や、省略可能な関節について調査する。

評価実験の拡張: 本論文で実施した鑑賞者実験は、検出力が 0.2~0.3 程度であり、参加人数は十分ではない [39]。また、ツール実験においてもセルアニメ制作経験のない参加者のみであったため、セルアニメおよび 3D アニメーション制作経験の豊富なアーティストに評価実験を実施する必要があると考えられる。

パラメタ学習: MoNACA には、中割り距離配分や関節重みなどのパラメタが多く存在している。これらは現実動作の速度制約や関節可動域によって適切なパラメタ値を用いることで、より直観的な動作特性の定量化が実現できると考えられる。また、これらは多くの動作に共通する値であると考えられるため、モーションデータセットを用いて事前に最適なパラメタを予測すること

で、パラメタ調整の煩雑性の解消を図る。

近似曲線によるポーズ拡張: MoNACA では、入力されたモーションデータから座標点を抽出することでポーズを決定しているが、本手法で生成した軌道曲線に基づいて座標点を調整することで、モーションデータに無い新たなポーズを生成し、より魅力のある動作表現が実現できると考えられる。また、インタフェース上にも軌道曲線を表示することで、ユーザによる直観的な編集が実現できると考えられる [40]。

8 結論

本論文では、モーションキャプチャデータからポーズ群を抽出することで、セルアニメの動作を再現するシステム MoNACA を提案した。MoNACA は、現実動作の余剰性を緩和するための軌道曲線の純化と、中割り動作に適したポーズ間距離の配分を組み合わせたポーズ群抽出アルゴリズムによって、セルアニメらしい動作への変換を行った。さらに、動作の速さに応じたポーズ数削減や、高速動作の強調表現によって、中割りに適したポーズ群を効果的に抽出し、鑑賞者からの評価により、ダウンサンプリングや既存手法よりもコマ打ちに適した動作に変換できることが実証された。またシステム評価により、キャプチャデータからポーズを効率的かつ容易に抽出できることが実証された。さらに、ユーザが手動で最終的な調整を加えることにより、より高品質なモーションを制作できることが期待される。

謝辞

ミライ小町の 3D モデル [35] の使用を許諾してくれた株式会社バンダイナムコ研究所に深謝する。本研究に用いたモーションキャプチャデータセットは米国カーネギーメロン大学グラフィックスラボデータベース [36] および株式会社バンダイナムコ研究所 [37] から入手した。

また、有益なコメントを頂戴した査読者らに深謝する。

本研究の一部は、科研費基盤研究（A）21H04916 の支援により実施された。

参考文献

- [1] 小六 優依, 藤代 一成. MoNACA : 関節軌道曲線の適応的分割によるセルアニメ風モーション変換. 芸術科学会 NICOGRAPH2023 予稿集, pp. F-7:1—F-7:8, 2023.
- [2] 横田 正夫, 戸澤 純子, 中村 浩, 野村 康治, 大山 正, 吉村 浩一. アニメーションの心理学. 誠信書房, 2019.
- [3] 吉村 浩一, 佐藤 壮平. 映画やアニメーションに動きを見る仕組み: 仮現運動説をめぐる心理学的検討. 法政大学文学部紀要, Vol. 69, pp. 87–105, 2014.
- [4] 吉村 浩一. 実写映画とアニメーションの動きの違い: 「不気味の谷」を枠組みに. 法政大学文学部紀要, Vol. 77, pp. 63–75, 2018.
- [5] 畠山 真一. アニメーション作品におけるリアリティ水準と「不気味の谷」. 尚絅大学研究紀要 A. 人文・社会科学編, Vol. 50, pp. 15–30, 2018.
- [6] 森 政弘. 不気味の谷. *Energy*, Vol. 7, No. 4, pp. 33–35, 1970.
- [7] 今間 俊博, 齋藤 隆文, 神谷 由季. CG 化を妨げるアニメにおける動きの記号化. 研究報告グラフィクスと CAD (CG) , Vol. 2011, No. 2, pp. 1–7, 2011.
- [8] Takeshi Miura, Takaaki Kaiga, Hiroaki Katsura, Katsubumi Tajima, Takeshi Shibata, and Hideo Tamamoto. Adaptive keypose extraction from motion capture data. *Journal of Information Processing*, Vol. 22, No. 1, pp. 67–75, 2014.
- [9] Richard Roberts, J. P. Lewis, Ken Anjyo, Jaewoo Seo, and Yeongho Seol. Optimal and interactive keyframe selection for motion capture. In *SIGGRAPH Asia 2018 Technical Briefs*, No. 26, pp. 1–4, 2018.
- [10] Beom Kwon, Jungwoo Huh, Kyoungoh Lee, and Sanghoon Lee. Optimal camera point selection toward the most preferable view of 3-D human pose. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, Vol. 52, No. 1, pp. 533–553, 2022.
- [11] Shoichi Furukawa, Tsukasa Fukusato, Shugo Yamaguchi, and Shigeo Morishima. In *Advances in Computer Entertainment Technology*, pp. 153–171, 2018.
- [12] Shin-ichi Kawamoto, Tatsuo Yotsukura, Ken Anjyo, and Satoshi Nakamura. Efficient lip-synch tool for 3D cartoon animation. *Computer Animation and Virtual Worlds*, Vol. 19, No. 3–4, pp. 247–257, 2008.
- [13] Jue Wang, Steven M. Drucker, Maneesh Agrawala, and Michael F. Cohen. The cartoon animation filter. *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 25, No. 3, pp. 1169–1173, 2006.
- [14] Maki Kitamura, Yoshihiro Kanamori, Jun Mitani, Yukio Fukui, and Reiji Tsuruno. Motion frame omission for cartoon-like effects. In *Proceedings of International Workshop on Advanced Image Technology (IWAIT)*, pp. 148–152, 2013.
- [15] Shigeo Morishima, Shigeru Kuriyama, Shinichi Kawamoto, Tadamichi Suzuki, Masaaki Taira, Tatsuo Yotsukura, and Satoshi Nakamura. Data-driven efficient production of cartoon character animation. In *ACM SIGGRAPH 2007 Sketches*, SIGGRAPH '07, pp. 76–es. Association for Computing Machinery, 2007.
- [16] 森島 繁生, 栗山 繁, 川本 真一. キャラクターアニメーション制作の高効率化手法. 映像情報メディア学会誌, Vol. 62, No. 2, pp. 156–160, 2008.
- [17] Yui Koroku and Issei Fujishiro. Anime-like motion transfer with optimal viewpoints. In *SIGGRAPH Asia 2022 Posters*, No. 8, pp. 1–2, 2022.
- [18] Weishi Li, Shuhong Xu, Gang Zhao, and Li Ping Goh. Adaptive knot placement in B-spline curve approximation. *Computer-Aided Design*, Vol. 37, No. 8, pp. 791–797, 2005.
- [19] Christopher Brandt, Hans-Peter Seidel, and Klaus Hildebrandt. Optimal spline approximation via ℓ_0 -minimization. *Computer Graphics Forum*, Vol. 34, No. 2, pp. 617–626, 2015.
- [20] Costas Panagiotakis, Konstantin Athanassopoulos, and Georgios Tziritas. The equipartition of

- curves. *Computational Geometry*, Vol. 42, No. 6, pp. 677–689, 2009.
- [21] Félix G. Harvey, Mike Yurick, Derek Nowrouzezahrai, and Christopher Pal. Robust motion in-betweening. *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 39, No. 4, aug 2020.
- [22] Xue Bin Peng, Pieter Abbeel, Sergey Levine, and Michiel van de Panne. Deepmimic: example-guided deep reinforcement learning of physics-based character skills. *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 37, No. 4, jul 2018.
- [23] Pauli Virtanen, Ralf Gommers, Travis E. Oliphant, Matt Haberland, Tyler Reddy, David Cournapeau, Evgeni Burovski, Pearu Peterson, Warren Weckesser, Jonathan Bright, Stéfan J. van der Walt, Matthew Brett, Joshua Wilson, K. Jarrod Millman, Nikolay Mayorov, Andrew R. J. Nelson, Eric Jones, Robert Kern, Eric Larson, C J Carey, İlhan Polat, Yu Feng, Eric W. Moore, Jake VanderPlas, Denis Laxalde, Josef Perktold, Robert Cimrman, Ian Henriksen, E. A. Quintero, Charles R. Harris, Anne M. Archibald, Antônio H. Ribeiro, Fabian Pedregosa, Paul van Mulbregt, and SciPy 1.0 Contributors. SciPy 1.0: Fundamental Algorithms for Scientific Computing in Python. *Nature Methods*, Vol. 17, pp. 261–272, 2020.
- [24] Edwin Catmull and Raphael Rom. A class of local interpolating splines. In *Computer Aided Geometric Design*, pp. 317–326. Academic Press, 1974.
- [25] Matthias Geier. *Splines in Euclidean Space and Beyond*, 2023. <https://splines.readthedocs.io>.
- [26] Daniel Carton, Annemarie Turnwald, Wiktor Olaszowy, Martin Buss, and Dirk Wollherr. Using penalized spline regression to calculate mean trajectories including confidence intervals of human motion data. In *2014 IEEE International Workshop on Advanced Robotics and its Social Impacts*, pp. 76–81, 2014.
- [27] Meili Wang, Shihui Guo, Minghong Liao, Dongjian He, Jian Chang, Jian Zhang, and Zhiyi Zhang. Pose selection for animated scenes and a case study of bas-relief generation. In *Proceedings of the Computer Graphics International Conference*, No. 31, pp. 1–6, 2017.
- [28] Stan Salvador and Philip Chan. Toward accurate dynamic time warping in linear time and space. *Intelligent Data Analysis*, Vol. 11, No. 5, pp. 561–580, 2007.
- [29] 佐分利 敏晴. アニメーションにおける通称「オバケ」に関する一考察～数学的・物理学的理論の観点から～. *アニメーション研究*, Vol. 21, No. 2, pp. 3–12, 2021.
- [30] アニメ業界情報局 by アミューズメントメディア総合学院. アニメーションに欠かせない中割りとは. <https://www.amgakuin.co.jp/contents/animation/column/tips/medium-split/>, 最終アクセス日：2024年2月15日.
- [31] George Mather. Early motion processes and the kinetic depth effect. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A*, Vol. 41, No. 1, pp. 183–198, 1989.
- [32] Kei Kitahata and Yuji Sakamoto. Method to make 3DCG movement to anime-style using animation technique. In *SIGGRAPH Asia 2019 Posters*, SA '19. Association for Computing Machinery, 2019.
- [33] Susan Hayward. *Cinema Studies: The Key Concepts: The Key Concepts*. Routledge, 2013.
- [34] Blender Online Community. *Blender—a 3D modelling and rendering package*. Blender Foundation, 2022. <http://www.blender.org>, 最終アクセス日：2024年2月15日.
- [35] Bandai Namco Research Inc. *Mirai Komachi*. <https://www.miraikomachi.com/>, 最終アクセス日：2024年2月15日.
- [36] Carnegie Mellon University. *CMU Graphics Lab Motion Capture Database*. <http://mocap.cs.cmu.edu/>, 最終アクセス日：2024年2月15日.
- [37] Makito Kobayashi, Chen-Chieh Liao, Keito In-

oue, Sentaro Yojima, and Masafumi Takahashi. Motion capture dataset for practical use of AI-based motion editing and stylization. *arXiv:2306.08861*, 2023.

- [38] Sandra G. Hart. Nasa-task load index (NASA-TLX); 20 years later. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, Vol. 50, No. 9, pp. 904–908, 2006.
- [39] Kelly Caine. Local standards for sample size at chi. In *Proceedings of the 2016 CHI conference on human factors in computing systems*, CHI '16, pp. 981–992. Association for Computing Machinery, 2016.
- [40] Tsukasa Fukusato, Akinobu Maejima, Takeo Igarashi, and Tatsuo Yotsukura. Exploring in-between charts with trajectory-guided sliders for cutout animation. *Multimedia Tools and Applications*, pp. 1–14, 2023.

1988年理学博士(東京大学)。CG・可視化や知的環境メディアに関する研究に従事。本会では副会長、評議員、NICOGRAPH International アドバイザリ委員等を歴任。第16回CG Japan Award 受賞。日本工学会、情報処理学会フェロー、画像電子学会名誉会員、ACM シニア会員。IEEE シニア会員、Visualization Academy 会員。現在、日本学術会議連携会員、IEEE PacificVis 常設運営委員長 (VGTC 執行委員会リエゾン)。

小六 優依



2022年慶應義塾大学理工学部情報工学科卒業。2024年同大学院理工学研究科開放環境科学専攻情報工学専修修士課程修了。在学中は、キャラクターアニメーションの研究開発に従事。

藤代 一成 (正会員)



東京大学、筑波大学、お茶の水女子大学、東北大学を経て、2009年より慶應義塾大学理工学部情報工学科教授。現在、同大学院理工学研究科情報工学専修主任。