

特徴点に基づくセルアニメーションの顔の動きの 描画法の分析に関する研究

山川 圭介^{1,a)} 齋藤 豪^{1,b)}

概要：手描きアニメのキャラクターの顔の動きは、三次元幾何学的に一貫した投影像とは異なる独特な像で表現される。アニメーターはこの表現のための描画法を経験的に習得することが多く、若い世代の育成やノウハウ共有の機会の充実が求められているが、描画法を説明した文献や研究は少ない。

提案手法では、セルアニメーションの顔の向きの変化に伴う顔の構成要素の位置や形状の変化を説明するために、まず、特徴点の配置から導出される顔画像上の幾何特徴を入力とし、顔の向きを出力とする顔の向き推定関数を導き、続いて顔の向き推定精度の良い幾何特徴のみを選択し、それらの逆関数に従って幾何特徴群を変化させた顔画像を作成する。顔の向きの変化に伴う幾何特徴のみを顔画像の変化として観察できることと逆関数の概形とから顔の動きの描画の特徴の具体的な説明を可能としている。

A Study on Analysis of Drawing Method of Face Motion of Cell Animation Based on Landmark Points

1. 研究背景と目的

セルアニメーションにおいて、キャラクターの顔の動きは三次元幾何学的に一貫した投影像とは異なる独特な像で表現される。しかしながら、我々は違和感を感じずにアニメーションを見ることができ、そこには、違和感を感じさせない特有の描画方法が存在すると考えられる。アニメーターはこの描画法を経験で習得することが多く [1]、若い世代への技術継承のためにはノウハウの明確な説明が求められているが、描画法を説明した研究 [2], [3], [4] は少ない。また、描画法を説明する文献 [5], [6] は事例に基づく説明であることが多く、一般的な描画規則が説明されているわけではない。

本研究では、セルアニメーションのキャラクターの顔の向きの変化に伴う顔の構成要素の位置や形状の変化を特徴点の配置から導出される画像上の幾何特徴の変化として求め、これらを入力とし、顔の向きを出力とする関数群を導き、それらの逆関数の概形と顔画像上の幾何特徴の変化の様子からキャラクターの顔の動きの描画の特徴を具体的に説

明する。

2. 関連研究

3DCG モデルを用いて手描きアニメーションのように表現する CG アニメーションは数多く制作されるようになってきた [7]。しかし、従来の手描きアニメーション表現は単純な 3DCG モデルの関節の回転のみでは実現できず、顔の向きが変わるカットを作成する場合、顔の向きに合わせてキャラクターの 3DCG モデルを変形させる手間が必要である。3DCG モデルからアーティストの意図を反映させた見たい目を獲得する研究 [8], [9] があり、ある 3DCG モデルに対して、いくつかの視点から見た時のアーティストの意図を反映した 3DCG モデルの変形の様子を用意することで、その意図を反映する任意の視点から見た時の 3DCG モデルの見たい目を得られる。しかし、3DCG モデルの微調整などに 3D 空間の知識と技術を要し、手描きアニメーションのアニメーターにとっては学習コストが少なくない。

そもそも、どのように日本の手描きアニメーションが描かれているのかを説明する研究として、セルアニメーションのキャラクター描画を分析した宮田らの研究 [4] がある。セルアニメーションで描かれるキャラクターと 3DCG モデルの投影像として描かれるキャラクターの振り向き動作の描

¹ 東京工業大学 情報理工学院
School of Computing, Tokyo Institute of Technology

a) keisuke@img.cs.titech.ac.jp

b) suguru@c.titech.ac.jp

画について比較し、両者の顔画像上の特徴点の軌跡が異なると述べているが、どのように異なっているか具体的な説明はなされていない。

そこで本研究は、手描きアニメーションのキャラクターの顔の動きの描画の特徴をアニメータに具体的に説明するための手法を提案する。

3. データ

本研究では、アニメの顔画像としてアニメ「SHIROBAKO」[10]の作品中のキャラクターの顔領域をフレームごとに切り出した画像を用いる。

3.1 基礎データ

各顔画像にはキャラクター ID に加えて顔の向き $\phi = (\phi_{pitch}, \phi_{yaw}, \phi_{roll})$ の入力を行う。顔の向きへの入力、調整法を用いて顔画像の表示するウィンドウとは別のウィンドウに表示された透視投影の立方体の枠を顔と同じ向きになるように回転させることを行う。これは顔画像から知覚される顔の向きを得るためである。さらに図 1 に示す 32 の特徴点群 $\mathbf{p} = (p_1, p_2, \dots, p_{32})$ の入力を各顔画像に行う。

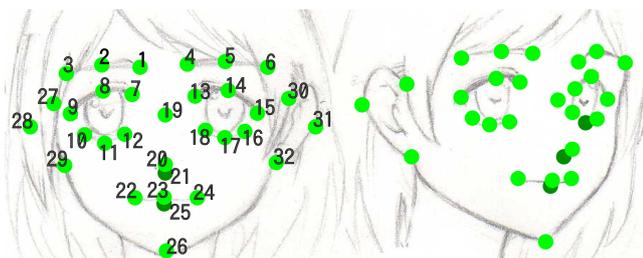


図 1 顔画像に入力する 32 の特徴点
Fig. 1 32 landmark points on a face image

実際の人間の顔画像上に特徴点を入力し顔の自動検出などを行う研究では、Köstinger et al. の研究 [11] で述べられているように対象とする顔画像の条件により特徴点群の位置や数は異なる。iBUG model[12] や Multi-PIE[13] で用いられる 68 の特徴点群は、顔の輪廓に沿って等間隔で特徴点が入力されているなど人間の顔画像の特長に対応している。しかし、これらの特徴点群は画像上の意味が対応していないため顔描画の具体的な説明に不適であるため本研究では入力しない。また、アニメのキャラクターが横を向いたときの耳の位置や大きさの変化はキャラクター顔描画の特徴の一つと考え、両耳外側の特徴点が入力されている。これは本研究のデータの特徴である。

対象とする顔画像はアニメ作品中の顔画像であるため、キャラクターや表情や顔の向きは多様である一方で、同じ方向に振り向き運動を行う画像群は少ない。そこで既存の顔画像データを参考に、ある顔画像に付与した特徴点群の座標を編集し特徴点群データの増量を行った。

これらのデータに対し顔の向きを左右反転させたデータの水増しを行い、4128 枚のデータを作成した。

3.2 特徴点群から作成する幾何特徴データ

キャラクターの顔の構成要素の形や位置を説明する特徴として、各特徴点 p_i の画面上の座標 (x_i, y_i) を並べた特徴点の座標群 $\mathbf{c} = (x_1, y_1, x_2, y_2, \dots, x_{32}, y_{32})$ から求める幾何特徴を説明する。図 2 に求める幾何特徴の定義を示す。緑の点 p_i, p_j, p_k, p_l はそれぞれ i, j, k, l 番目の特徴点である。まず、データに含まれる顔画像の位置を揃えるために全ての顔画像上の鼻上の特徴点が $(0, 0)$ になるように特徴点データの平行移動を行う。さらに、大きさを揃えるために 2 特徴点を選択し、その間隔が一定になるように特徴点データの拡大縮小を行い正規化を行う。

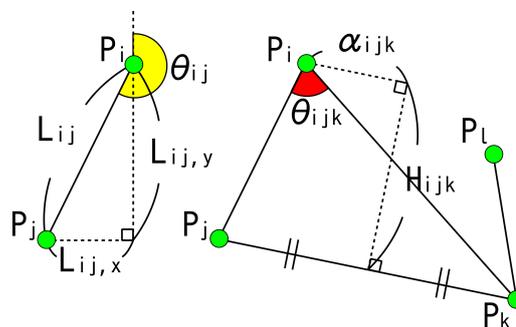


図 2 幾何特徴の定義
Fig. 2 Definitions of geometric features

2 特徴点から特徴 ID1~4 の特徴を求める。

特徴 ID1 L_{ij} : 点 p_i と点 p_j の画面上の長さ

特徴 ID2 $L_{ij,x}$: 点 p_i と点 p_j の画面上 x 軸方向の長さ

特徴 ID3 $L_{ij,y}$: 点 p_i と点 p_j の画面上 y 軸方向の長さ

特徴 ID4 θ_{ij} : 点 p_i から点 p_j への方角

点 p_i 鉛直上方向から点 p_j へ時計回りに方角を求めた後、図 3 のように全ての顔画像の平均方角 $\bar{\theta}_{ij}$ が 180° になるように値を求める。

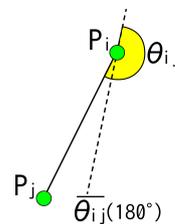


図 3 特徴 ID4 の幾何特徴
Fig. 3 Geometric feature(ID : 4)

3 特徴点から特徴 ID5~8 の特徴を求める。

特徴 ID5 S_{ijk} : 三角形 $p_i p_j p_k$ の面積

特徴 ID6 $\frac{\alpha_{ijk}}{L_{jk}}$: 三角形 $p_i p_j p_k$ の二等辺三角形らしさ、値が 0 に近いほど二等辺三角形に近い

特徴 ID7 $\frac{H_{ijk}}{L_{jk}}$: 3点 $p_i p_j p_k$ の直線らしさ, 値が0に近いほど直線上に並んでいる

特徴 ID8 θ_{ijk} : 三角形 $p_i p_j p_k$ の点 p_i の内角

4 特徴点から特徴 ID9~11 の特徴を求める. ただし, $i < j$ かつ $k < l$ であり, $i = k$ かつ $j = l$ の場合を除く.

特徴 ID9 $\frac{L_{ij}}{L_{kl}}$: 2線分 $p_i p_j$ と $p_k p_l$ の長さの比

特徴 ID10 $\frac{L_{ij,x}}{L_{kl,x}}$: 2線分 $p_i p_j$ と $p_k p_l$ の画面上 x 軸方向の長さの比

特徴 ID11 $\frac{L_{ij,y}}{L_{kl,y}}$: 2線分 $p_i p_j$ と $p_k p_l$ の画面上 y 軸方向の長さの比

特徴 ID6,7 の幾何特徴については図4に示す口の特徴点を除く28特徴点から値を求め, 特徴 ID9,10,11 の幾何特徴については図5に示す9特徴点から値を求める. 特徴 ID1~5 および ID8 の幾何特徴については32特徴点から値を求める. 口や眉の特徴点は同一キャラクタであっても表情により特徴点の位置が変化するため, 顔の向きの変化に伴う幾何特徴の値の変化からアニメキャラクタの顔の動きの描画法を説明する際に不適と考え, 計算量を少なくする目的と合わせてこのように幾何特徴の取捨選択を行う.

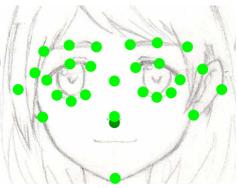


図4 28点の顔の特徴点
Fig. 4 28 landmark points

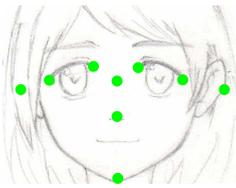


図5 9点の顔の特徴点
Fig. 5 9 landmark points

特徴 L_{ij} と L_{ji} のように値が重複する幾何特徴はその内の1つを求め, 特徴点 p_i を入力する顔の構成要素が顔画像上に描かれていない場合など特徴点が欠損する場合には, そのデータの p_i が関わる特徴の値は欠損扱いとする. また, $\frac{b}{a}$ のように分数の形で表す特徴について, 分子が0でなく, かつ, 分母が0のときは欠損扱いとし, 分子が0ならば特徴の値は0とする.

4. 顔の向きの推定

全データを使った顔の向き ϕ_{yaw} とある幾何特徴の散布図を図6左に示す. 横軸 ϕ_{yaw} は -90° から 90° である. ϕ_{yaw} と幾何特徴の値に規則性があることが伺える. さらに規則性を明らかにするために $-1^\circ \leq \phi_{pitch} < 1^\circ$, $-1^\circ \leq \phi_{roll} < 1^\circ$ を満たすデータの集合 S の散布図を図6右に示す. 散布図から, 図中の赤線で囲う領域のように顔の向きの範囲を限定すると顔の向きと幾何特徴の関係は単調な関数で説明し得ると考えられる. そこで, 顔画像に入力した顔の向き ϕ_{pitch} , ϕ_{yaw} , ϕ_{roll} のうち2つを固定したデータを用いて, 幾何特徴の値を入力, 残り1つの顔の向きを出力とする関数近似を行う. これは, 様々な幾何特徴と顔の向きとの関

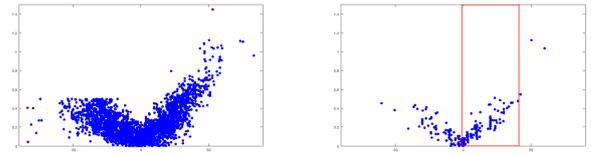


図6 顔の向きとある幾何特徴の散布図, 横軸: ϕ_{yaw} , 縦軸: v_j
Fig. 6 Scatter plot of face direction ϕ_{yaw} in X-axis and a geometric features v_j in Y-axis

係を, 顔の向きの推定誤差という一つの基準で比較するためである. 説明のため, 以下では ϕ_{yaw} を出力とする関数近似を行う.

様々な幾何特徴と ϕ_{yaw} の散布図の様子から, 単調な関数として直感的な理解が可能な式 (1a) から (1h) の8つの関数を考える. これらに最小二乗法を用いて, 式 (2) で求める顔の向きの推定誤差を最小にする $\lambda_{1,l}, \lambda_{2,l}$ を求め, j 番目の幾何特徴の値 v_j から ϕ_{yaw} を推定する. 顔の向き推定関数を8つの中から $f_j^{\phi_{yaw}}(v) = f_{j,l}^{\phi_{yaw}}(v) (l = \arg \min_l (E_{j,l}))$ として選び決定する. また, その誤差を $E_j = E_{j,l}$ とする.

$$f_{j,1}^{\phi_{yaw}}(v) = \lambda_{1,1}v + \lambda_{2,1} \quad (1a)$$

$$f_{j,2}^{\phi_{yaw}}(v) = \sqrt{\lambda_{1,2}v + \lambda_{2,2}} \quad (1b)$$

$$f_{j,3}^{\phi_{yaw}}(v) = \text{asin}(\lambda_{1,3}v + \lambda_{2,3}) \frac{180}{\pi} \quad (1c)$$

$$f_{j,4}^{\phi_{yaw}}(v) = \text{acos}(\lambda_{1,4}v + \lambda_{2,4}) \frac{180}{\pi} \quad (1d)$$

$$f_{j,5}^{\phi_{yaw}}(v) = \lambda_{1,5} \log_2(|v| + 1) + \lambda_{2,5} \quad (1e)$$

$$f_{j,6}^{\phi_{yaw}}(v) = \sqrt{\lambda_{1,6} \log_2(|v| + 1) + \lambda_{2,6}} \quad (1f)$$

$$f_{j,7}^{\phi_{yaw}}(v) = \text{asin}(\lambda_{1,7} \log_2(|v| + 1) + \lambda_{2,7}) \frac{180}{\pi} \quad (1g)$$

$$f_{j,8}^{\phi_{yaw}}(v) = \text{acos}(\lambda_{1,8} \log_2(|v| + 1) + \lambda_{2,8}) \frac{180}{\pi} \quad (1h)$$

$$E_{j,l} = \sqrt{\frac{1}{K+1} \sum_{k=0}^K (\bar{\phi}_{yaw,2k} - f_{j,l}^{\phi_{yaw}}(\bar{v}_{j,2k}))^2} \quad (2)$$

$S_{\phi_{yaw_min}^{\phi_{yaw_max}}}$ を S に含まれるデータの内, $\phi_{yaw_min} - \Delta\phi \leq \phi_{yaw,i} < \phi_{yaw_max} + \Delta\phi$ を満たすデータの集合とし, $K = \frac{\phi_{yaw_max} - \phi_{yaw_min}}{2}$ とする. ただし, $\Delta\phi = 1^\circ$ とする. 顔の向き毎のデータ数の偏りを考慮して, 図7右のように ϕ_{yaw_min} から ϕ_{yaw_max} を $2\Delta\phi$ 毎に区切り, $S_{\phi_{yaw_min}^{\phi_{yaw_max}}}$ のうち, $\phi_{yaw_min} + (2k-1)\Delta\phi \leq \phi_{yaw,i} < \phi_{yaw_min} + (2k+1)\Delta\phi (0 \leq k \leq K, k \in \mathbb{Z})$ を満たすデータから, 図中に赤い点で示す顔の向きの平均値 $\bar{\phi}_{yaw,2k}$ および幾何特徴の平均値 $\bar{v}_{j,2k}$ を求め, これらに対し最小二乗法を用いる. また, $\phi_{yaw_max} \leq 0$ のとき, 式 (1a) から (1h) の右辺を (-1) 倍してから最小二乗法を行う.

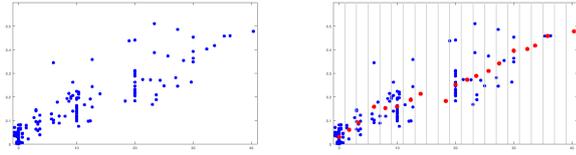


図 7 $S_{\phi_{yaw_min}}^{\phi_{yaw_max}}$ の顔の向きとある幾何特徴の散布図, 横軸: ϕ_{yaw} , 縦軸: v_j
Fig. 7 Scatter plot of face direction ϕ_{yaw} in X-axis and a geometric features v_j in Y-axis from $S_{\phi_{yaw_min}}^{\phi_{yaw_max}}$

5. 顔画像の再構成

顔の向き ϕ_{yaw} が ϕ_{yaw_start} から ϕ_{yaw_end} まで変化するときの顔の構成要素の変形を顔画像の変化として観察するために, ϕ_{yaw} を $\alpha(= \frac{1}{N}(\phi_{yaw_end} - \phi_{yaw_start}))$ ずつ変化させ, 顔の向き $\phi_{yaw}^n = \alpha n + \phi_{yaw_start}(1 \leq n \leq N)$ の顔画像の作成を行う。

5.1 平均顔の作成

顔の向き ϕ_{yaw_start} の平均顔を作成するために, $S_{\phi_{yaw_start}}^{\phi_{yaw_start}}$ に含まれるデータから特徴 ID1 : L_{ij} の幾何特徴および特徴 ID4 : θ_{ij} の幾何特徴を求め, 各幾何特徴の平均値からなる特徴ベクトル \bar{v} を求める。

\bar{v} は特徴ベクトルであり, 顔画像を構成する特徴点の配置ではない. そこで, 顔の向きが ϕ_{yaw_start} に近い顔画像 I_A の特徴点群の座標 c_A を初期値とし, AdaBound[14] を参考に式 (3a) から (3f) の更新式を用いて式 (4) の誤差関数 $E(c^{(t)})$ を小さくする特徴点の座標群を求める. ただし, $v(c)$ は特徴点群の座標 c から特徴 ID1, 4 の幾何特徴からなる特徴ベクトルを求める関数とし, \odot はベクトルの要素積とする. また, w_v は各幾何特徴に対する重みであり, $S_{\phi_{yaw_min}}^{\phi_{yaw_max}}$ に含まれるデータの幾何特徴の標準偏差の逆数である. w_v により, 幾何特徴の分散の差異を打ち消す. 最大反復回数を 20000 回とし, 得られる座標を平均顔の座標 \bar{c} とする.

$$g^{(t)} = \nabla E(c^{(t)}) \quad (3a)$$

$$m_t = \rho_1 m_{t-1} + (1 - \rho_1) g^{(t)} \quad (3b)$$

$$v_t = \rho_2 v_{t-1} + (1 - \rho_2) (g^{(t)})^2 \quad (3c)$$

$$\hat{\eta}_t = \frac{1}{\sqrt{t}} \text{Clip} \left(\frac{\eta}{\sqrt{v_t}}, \eta_l(t), \eta_u(t) \right) \quad (3d)$$

$$\Delta c^{(t)} = c^{(t)} - \hat{\eta}_t m_t \quad (3e)$$

$$c^{(t+1)} = c^{(t)} + \Delta c^{(t)} \quad (3f)$$

$$E(c^{(t)}) = \left\| w'_v \odot (v'(c^{(t)}) - \bar{v}') \right\|_2^2 \quad (4)$$

$$\eta = 0.001, \rho_1 = 0.9, \rho_2 = 0.999, \epsilon = 10^{-8}, \eta_l(t) =$$

$$0.10 - \frac{0.10}{(1-\rho_2)^{t+1}}, \eta_u(t) = 0.10 + \frac{0.10}{(1-\rho_2)^t} \text{ とする.}$$

また, $w'_v, v'(c^{(t)}), \bar{v}'$ は $w_v, v(c^{(t)}), \bar{v}$ の要素の 10% を選択したベクトルであり, その要素は反復処理の 1 回目および 10 回毎に選択し直しが行われるものとし, 局所解に陥りにくくする。

5.2 顔の向きの変化する顔画像の作成

平均顔の特徴点の座標群 \bar{c} を初期値として, 顔の向き $\phi_{yaw}^n = \alpha n + \phi_{yaw_start}(1 \leq n \leq N)$ である顔画像を作成するために, 顔の向き ϕ_{yaw}^n の推定誤差 E_j がしきい値 T より小さい M 個の特徴について顔の向き推定関数の逆関数を用いて, 特徴ベクトル $v^n = (f_1^{-1}(\phi_{yaw}^n), f_2^{-1}(\phi_{yaw}^n), \dots, f_M^{-1}(\phi_{yaw}^n))$ を求める. 特徴点群の座標 c から, これらに対応する幾何特徴の値を求める関数を $v(c) = (v_1(c), v_2(c), \dots, v_M(c))$ とするとき, 式 (5) の誤差関数を小さくする特徴点群の探索を行う. 更新式 (3) 中の式 (3f) の代わりに式 (6) を用いて探索を行い, 最適解 \hat{c}^n を得る. ただし, 探索の初期値 $c^{(0)} = \hat{c}^{n-1}$ とし, $\hat{c}^0 = \bar{c}$ とする.

$$E(c^{(t)}) = \left\| w'_v \odot (v'(c^{(t)}) - v'^n) \right\|_2^2 + \lambda \left\| c^{(t)} - \hat{c}^{n-1} \right\|_2^2 \quad (5)$$

$$c^{(t+1)} = c^{(t)} + w_c \odot \Delta c^{(t)} \quad (6)$$

v'^n は v^n の要素の 10% を選択したベクトルであり, その要素は反復処理の 1 回目および 10 回毎に選択し直す. 式 (6) の w_c は特徴点の配置の探索時の各特徴点の x 座標, y 座標の移動量の重みであり, $S_{\phi_{yaw_min}}^{\phi_{yaw_max}}$ に含まれるデータの各特徴点の座標値の標準偏差を用いる. 図 8 に, この重みの有無による特徴点の座標群の探索結果の比較を示す. 図上段は, 顎の特徴点が画面右側に移動するなど顔らしい特徴点配置ではない. これに対し, 図下段では目の形が崩れないなど, より顔らしい特徴点の配置の探索を行うことが出来ている。

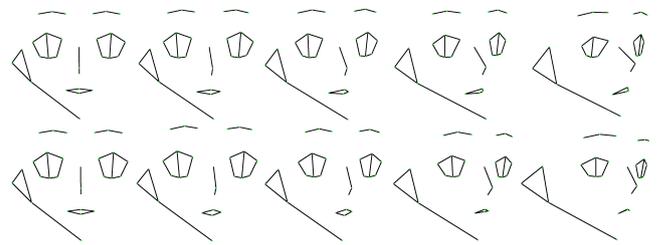


図 8 特徴点の移動量に掛ける重み w_c の有無の比較, 上段:重みなし, 下段:重みあり

Fig. 8 Effect of the weight w_c applied to the amount of movement of landmark points, Upper: without weight, Lower: with weight

探索結果を安定させるため, 初期顔画像から離れすぎな

い特徴点群を探索するための制約として式 (5) の第二項は働く。ただし $0 < \lambda \ll 1$ であり、 $\|\mathbf{w}_v \odot (\mathbf{v}(\mathbf{c}^{(t)}) - \mathbf{v}^n)\|_2^2$ と比べて $|\mathbf{c}^{(t)} - \hat{\mathbf{c}}^n|_2^2$ の影響は小さい。

特徴 ID によって、その幾何特徴を求める特徴点の種類数が異なることを考慮し、探索の際には図 5 の特徴点から求める特徴 ID9, 10, 11 の幾何特徴を用いて最適化を行い、その結果を初期値として図 4 の特徴点から求める特徴 ID6, 7 の幾何特徴を用いて最適化を行う。さらにその結果を初期値として図 1 の特徴点から求める特徴 ID1~5 および ID8 の幾何特徴を用いて最適化を行う。それぞれの最適化の最大反復回数を 3000 回とし、3 通りの特徴点の組み合わせからなる幾何特徴を用いた最適化を行い顔の向き ϕ_{yaw}^n の顔画像を作成する。

6. 結果

顔の向き推定関数の逆関数を用いて顔の向きを変化させた顔画像の様子と、顔の向きの推定精度の良い幾何特徴の関数の概形からアニメのキャラクターの顔の動きの描画の特徴を分析する。

6.1 $(0^\circ, 0^\circ, 0^\circ)$ から $(0^\circ, 40^\circ, 0^\circ)$ の顔の動き

$0^\circ - \Delta\phi \leq \phi_{pitch} < 0^\circ + \Delta\phi$, $0^\circ - \Delta\phi \leq \phi_{yaw} < 40^\circ + \Delta\phi$, $0^\circ - \Delta\phi \leq \phi_{roll} < 0^\circ + \Delta\phi$ を全て満たすデータに本手法を適用した。特徴点データは特徴点 19 番の鼻上および特徴点 26 番の顎の特徴点間の距離が一定になるように正規化を行った。

式 (2) の顔の向き推定関数の推定誤差 5° 以内の 1906 個の幾何特徴の値を、各々の逆関数に従い顔の向き ϕ_{yaw} を $\alpha = 0.50^\circ$ ずつ変化させて作成した顔画像群のうち、顔の向き $0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ$ の顔画像を図 9 左から順に示す。ただし、左耳の特徴点を用いられる推定誤差 5° 以内の幾何特徴は存在せず、左耳の特徴点が $(0^\circ, 0^\circ, 0^\circ)$ の顔画像の位置から変化しないため省略している。

図 9 から、顔の向きが横を向くにつれて奥側の目が鼻上の特徴点に近づくように移動することや、手前側の目は位置があまり変化しないがその形は上下に小さくなる様子が観察できる。また、手前側の耳は手前側の目から離れつつ下方向に移動することが観察できる。単純な 3DCG モデルの横方向の回転では手前耳の位置が上下に移動することはなく、このように従来より説明されているキャラクター顔描画の特長が本手法でも確認できた。この図の作成に用いられた幾何特徴の一部を図 12 に示す。図 12 は個々の幾何特徴の値の、顔の向きに応じた変化とその顔画像上での構成特徴点の位置関係の変化を表す。各行左は推定誤差が何番目に小さい幾何特徴であるか、およびその推定誤差、そして対応する幾何特徴の特徴 ID を表す。また、各行右は顔の向きを横軸、対応する幾何特徴を縦軸とする散布図および顔の向き推定関数の概形を表す。

最も推定精度の良い幾何特徴の変化の様子から、特徴点 7, 17, 20 番の特徴点からなる三角形は顔の向きが $(0^\circ, 0^\circ, 0^\circ)$ のときには二等辺三角形に近いが $(0^\circ, 40^\circ, 0^\circ)$ のときには直角三角形になるように描かれていることが観察できる。また、その変化の様子は顔の向きの変化に対して線形であることが関数の概形から説明できる。この他に、線形ではない関数が顔の向き推定関数として選択された幾何特徴や様々な特徴 ID の幾何特徴が推定誤差の小さい幾何特徴として存在していることが確認できる。このような幾何特徴に基づく数値的、視覚的な顔描画の説明は今までにない新しい説明に繋がり、関数に基づく顔描画の作画崩壊の検出や新しい顔描画の表現の獲得に有効であると考えられる。

6.2 $(0^\circ, 0^\circ, 0^\circ)$ から $(20^\circ, 0^\circ, 0^\circ)$ の顔の動き

$0^\circ - \Delta\phi \leq \phi_{pitch} < 20^\circ + \Delta\phi$, $0^\circ - \Delta\phi \leq \phi_{yaw} < 0^\circ + \Delta\phi$, $0^\circ - \Delta\phi \leq \phi_{roll} < 0^\circ + \Delta\phi$ を全て満たすデータに本手法を適用した。特徴点データは特徴点 29 番の右耳下側および特徴点 32 番の左耳下側の特徴点間の距離が一定になるように正規化を行った。

式 (2) の顔の向き推定関数の推定誤差 4° 以内の 637 個の幾何特徴の値を、各々の逆関数に従い顔の向き ϕ_{pitch} を $\alpha = 0.50^\circ$ ずつ変化させて作成した顔画像群のうち、顔の向き $0^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ$ の顔画像を図 10 左から順に示す。ただし、両耳外側および両耳上側の特徴点を用いられる推定誤差 4° 以内の幾何特徴は存在せず、特徴点が $(0^\circ, 0^\circ, 0^\circ)$ の顔画像の位置から変化しないため省略している。

図 10 から、両目の上下方向の大きさが小さくなるようにして上を向いた顔が描かれるというキャラクター顔描画の特徴が本手法でも確認できた。

図 12 と同様の一部の幾何特徴の変化の様子を図 13 に示す。顔の向きが $(0^\circ, 0^\circ, 0^\circ)$ のときに一直線上に三点が並ぶ幾何特徴が多く観察された一方で、顔の向きが $(20^\circ, 0^\circ, 0^\circ)$ のときに一直線上に三点が並ぶ幾何特徴も多く観察された。どの三点が直線上に並ぶのかは上方向の顔の向きと関わりがあることが示唆される。

6.3 $(0^\circ, 0^\circ, 0^\circ)$ から $(-18^\circ, 0^\circ, 0^\circ)$ の顔の動き

$-18^\circ - \Delta\phi \leq \phi_{pitch} < 0^\circ + \Delta\phi$, $0^\circ - \Delta\phi \leq \phi_{yaw} < 0^\circ + \Delta\phi$, $0^\circ - \Delta\phi \leq \phi_{roll} < 0^\circ + \Delta\phi$ を全て満たすデータに本手法を適用した。特徴点データは特徴点 29 番の右耳下側および特徴点 32 番の左耳下側の特徴点間の距離が一定になるように正規化を行った。

式 (2) の顔の向き推定関数の推定誤差 2° 以内の 1947 個の幾何特徴の値を、各々の逆関数に従い顔の向き ϕ_{pitch} を $\alpha = -0.50^\circ$ ずつ変化させて作成した顔画像群のうち、顔の向き $0^\circ, -4.5^\circ, -9^\circ, -13.5^\circ, -18^\circ$ の顔画像を図 11 左から順に示す。

図 10 から、下を向くときに両耳の位置は鼻上の特徴点

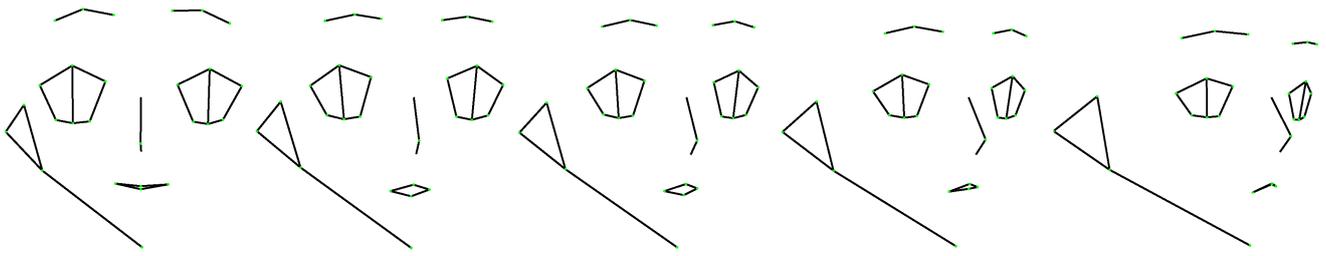


図 9 $(0^\circ, 0^\circ, 0^\circ)$ から $(0^\circ, 40^\circ, 0^\circ)$ に顔の向きが変化する顔画像群

Fig. 9 Face images whose direction changes from $(0^\circ, 0^\circ, 0^\circ)$ to $(0^\circ, 40^\circ, 0^\circ)$

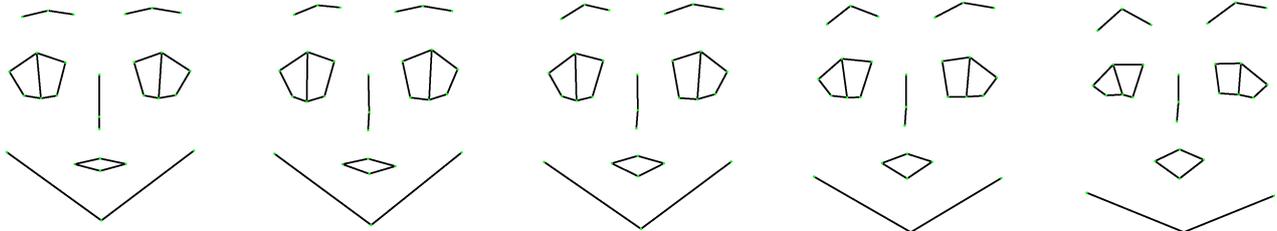


図 10 $(0^\circ, 0^\circ, 0^\circ)$ から $(20^\circ, 0^\circ, 0^\circ)$ に顔の向きが変化する顔画像群

Fig. 10 Face images whose direction changes from $(0^\circ, 0^\circ, 0^\circ)$ to $(20^\circ, 0^\circ, 0^\circ)$

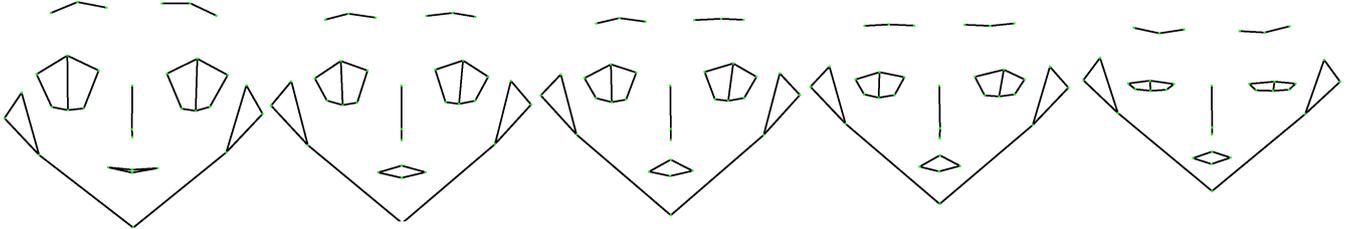


図 11 $(0^\circ, 0^\circ, 0^\circ)$ から $(-18^\circ, 0^\circ, 0^\circ)$ に顔の向きが変化する顔画像群

Fig. 11 Face images whose direction changes from $(0^\circ, 0^\circ, 0^\circ)$ to $(-18^\circ, 0^\circ, 0^\circ)$

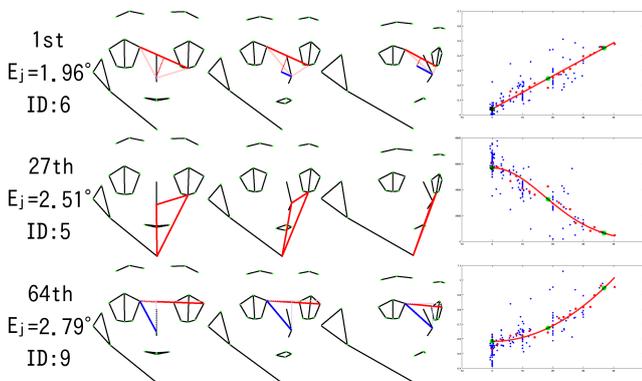


図 12 顔の向き ϕ_{yaw} の推定精度が良い幾何特徴

Fig. 12 i -th superior geometric feature to estimate ϕ_{yaw} (Top: $i=1$, Middle: $i=27$, Bottom: $i=64$)

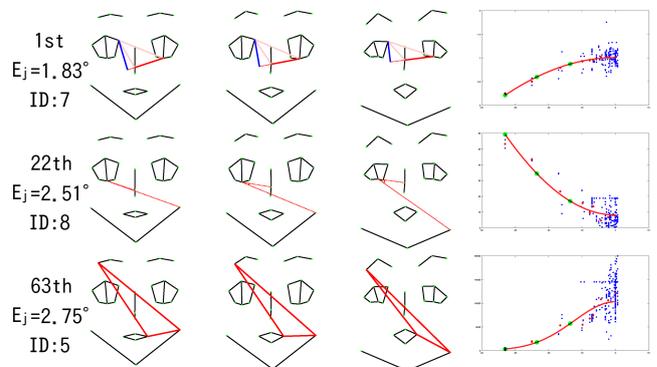


図 13 上方向の顔の向き ϕ_{pitch} の推定精度が良い幾何特徴

Fig. 13 i -th superior geometric feature to estimate upward ϕ_{pitch} (Top: $i=1$, Middle: $i=22$, Bottom: $i=63$)

に対してあまり上下に移動しないが、両目の上下方向の大きさが小さくなることや顎の特徴点の位置が上方方向に移動するというキャラクタ顔描画の特徴が本手法でも確認できた。

図 12 と同様に一部の幾何特徴の変化の様子を図 14 に示す。顔の向きの変化の観察と同じように、両耳のいずれかの特徴点と顎の特徴点とともに用いられる幾何特徴が推定誤差の小さい幾何特徴として多く観察された。幾何特徴の値の変化の仕方は関数で表されており、連続的な変化から

顔描画の特徴を説明可能であると考えられる。

7. 結論と今後の課題

本研究ではアニメキャラクタの顔の構成要素の位置や形状を、特徴点群から求める幾何特徴群として求め、顔の向きに伴う値の変化を連続的な関数で表現した。また、それらを用いた顔画像の再構成を行うことで、キャラクタの顔の向きの変化として幾何特徴の変化の様子を観察可能にし、これと関数の概形からキャラクタの顔の動きの描画の

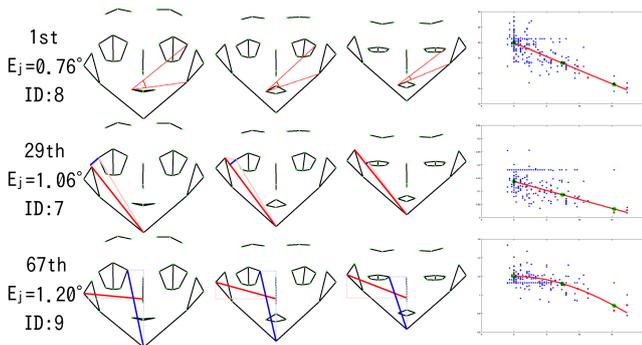


図 14 下方向の顔の向き ϕ_{pitch} の推定精度が良い幾何特徴
Fig. 14 i -th superior geometric feature to estimate downward
 ϕ_{pitch} (Top: $i=1$, Middle: $i=29$, Bottom: $i=67$)

特徴を具体的に説明した。

本手法は対象とするデータに基づく顔の動きを説明する手法であり、異なるデータに対して本手法を適用しキャラクターや作画スタイルの多様性を説明、比較することが可能であると考えられる。また、顔の向き ϕ_{pitch} , ϕ_{yaw} , ϕ_{roll} のうち2方向以上の顔の向きが正面から離れたデータの増量を行い、実際のアニメーションで見られる振り向き運動と比較した顔の動きの説明を行うことでより実用的な描画法の説明が期待される。

参考文献

[1] 一般社団法人 日本アニメーター・演出協会 (JAniCA) 実態調査プロジェクト委員会. アニメーション制作者 実態調査 報告書 2019. 一般社団法人 日本アニメーター・演出協会 (JAniCA) 実態調査プロジェクト委員会, Nov 2019.
[2] 真野航, 齋藤豪. 日本のセルアニメーションにおける振り向き動作時の顔描画の分析. 第 75 回全国大会講演論文集, Vol. 2013, No. 1, pp. 269–271, 03, 2013.

[3] Miyata Ai and Saito Suguru. Difference of the facial feature point loci inturn around motions between 3dcg and japanese hand-drawn animation. In *VRCAI2015*, 2015.
[4] 宮田愛, 齋藤豪: 特徴点の軌跡を用いた日本のセルアニメーションの振り向き描画の分析, 第 77 回全国大会講演論文集, No. 1, pp. 67-68, mar 2015.
[5] 尾澤直志. アニメ作画のしくみ. 株式会社廣済堂, 2012.
[6] 香川久, 馬越嘉彦. バトルヒロイン作画&デザインテクニク. 株式会社玄光社, june 2017.
[7] 一般社団法人日本動画協会. アニメ産業レポート 2017. 一般社団法人日本動画協会, 2017.
[8] Paul Rademacher : View-dependent geometry. In *Proceedings of ComputerGraphics and Interactive Techniques*, SIGGRAPH ' 99, pp. 439–446, NewYork, NY, USA, 1999. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co.
[9] Koyama Yuki and Igarashi Takeo : (2013). View-dependent control of elastic rod simulation for 3D character animation. *Proceedings - SCA 2013: 12th ACM SIGGRAPH / Eurographics Symposium on Computer Animation*. 73-78. 10.1145/2485895.2485898.
[10] 「SHIROBAKO」製作委員会 : SHIROBAKO, 2014
[11] M. K Östinger, P. Wohlhart, P. M. Roth, and H. Bischof. Annotated facia landmarks in the wild: A large-scale, real-world database for facial landmark localization. In *2011 IEEE International Conference on Computer Vision Workshops (ICCV Workshops)*, pp. 2144–2151, Nov 2011
[12] Christos Sagonas, Georgios Tzimiropoulos, Stefanos Zafeiriou, and Maja Pan-tic : 300 faces in-the-wild challenge: The first facial landmark localization challenge. pp. 397–403, 12 2013.
[13] Gross, Ralph & Matthews, Iain & Cohn, Jeffrey & Kanade, Takeo & Baker, S. : (2013). Multi-PIE. 10.1109/AFGR.2008.4813399.
[14] Liangchen Luo, Yuanhao Xiong, and Yan Liu: Adaptive gradient method with dynamic bound of learning rate. In *International Conference on Learning Representations*, 2019.