

立体キャンバスを用いた双対制約を考慮する キーフレーム間曲線の対応関係決定手法

藤田正樹[†] 齋藤豪[†]

[†] 東京工業大学 情報理工学院

1 はじめに

手描きによるアニメーション作画は3次元の制約に縛られないという特徴がある。一方で原画補間は3次元的に無秩序ではなく、また単純な線形補間でもない。

我々は手描きの自由度を活かしながら立体的な動きの補間を行う手法である立体キャンバス法と [1]、それを用いた線画間の曲線の対応関係を決定する手法の提案 [2] を行ってきた。本稿ではより高い精度での曲線の対応付けを行う新しい手法を提案する。

2 提案手法

提案手法は2枚の線画 I_0, I_1 間のマッチング手法である。各曲線 $S_i^n \in I_n$ は立体キャンバスによって3次元空間上に投影され、 S_i^n は $N+1$ 点で離散化された3次元点系列 $\{s_{il}^n \in \mathbb{R}^3 | 0 \leq l \leq N\}$ で構成される。

2.1 クラスタリングによる前処理

対応付けの候補を絞り込むことによる高速化と頑健性向上のため、入力線画 I^0, I^1 を部分線画に分割する。

I^0, I^1 の部分線画の組であるクラスタ I_k を定義し、それらに属する線と点を以降では次のように表す。

$$I_k = \text{pair}(I_k^0, I_k^1) \quad I_k^0 \subseteq I^0, I_k^1 \subseteq I^1 \quad (1)$$

$$I_k^n = \{S_{ki}^n\}, S_{ki}^n = \{s_{kil}^n\}$$

次に曲線間の距離 d 、それらの群平均 ave を定義する。

$$d(S_{ki}^0, S_{kj}^1) = \frac{1}{N+1} \sum_{l=0}^N |s_{kil}^0 - s_{kjl}^1| \quad (2)$$

$$ave(I_k) = \frac{1}{|I_k^0||I_k^1|} \sum_{S_{ki}^0 \in I_k^0} \sum_{S_{kj}^1 \in I_k^1} d(S_{ki}^0, S_{kj}^1),$$

I_k の初期値として、線画内の各曲線についてもう一方の線画における最近傍曲線を求めた大きさ1のクラスタ群をつくる。その後、結合した際の $ave(I_k)$ が最も小さいクラスタ同士を逐次結合する階層型クラスタリングにより K 個のクラスタを作る。

2.2 重み計算と最適化

前節で得られた部分線画 I_k^0, I_k^1 から考えられる曲線の対応関係の候補 $L = \{P_l | P_l = \text{pair}(m_l, n_l), 0 \leq l <$

Matching of interkeyframe strokes considering pairwise-constraints using Self-Shaped Canvas

[†] Masaki Fujita

[†] Suguru Saito

School of Computing, Tokyo Institute of Technology ([†])

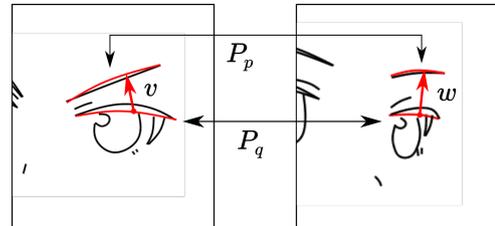


図 1: 双対制約の図示:対応関係 P_p, P_q が双対制約を満たすとき、その間の $c(v, w)$ の値は1に近くなる

$|I_k^0| \times |I_k^1|, 0 \leq m_l < |I_k^0|, 0 \leq n_l < |I_k^1|$ を定義する。ここで、2つの対応関係 P_p, P_q の間に次のような双対制約関数 $C(P_p, P_q)$ を定義する。

$$C(P_p, P_q) = \frac{\sum_{0 \leq i \leq N} c(s_{kmp_i}^0 - s_{kmp_i}^1, s_{knq_i}^1 - s_{knq_i}^0)}{(N+1)}$$

$$c(v, w) = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{v \cdot w}{|v||w|} \right) \cdot \frac{\min(v, w)}{\max(v, w)} \quad (3)$$

式3は P_p, P_q について、それぞれ同じキーフレーム内で2つの曲線の相対的な位置関係が似通っている度合いを示すものである(図1)。求める対応関係の集合 $L_{result} \subseteq L$ は次のように、画像全体で双対制約が最大化されていることが理想となる。

$$\arg \max_{L_{result}} \sum_{P_p, P_q \in L_{result}} C(P_p, P_q) \quad (4)$$

式(4)を最大化するにあたって各対応関係 P_l に対応する重み x_l が、双対制約をもとに Lerdeanu らの手法 [3] に基づいて求められる。

組み合わせ最適化に帰着するため、 x_l を次のような $|I_k^0| \times |I_k^1|$ 重み行列 W_p に書き直す。

$$W_p(i, j) = \begin{cases} x_l & i = m_l \wedge j = n_l \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

W_q によって表わされる重み最大組み合わせ最適化問題を解くことで対応関係 L_{result} が得られるが、その結果には曲線の位置関係が強く反映される。一方で、曲線の形状の類似度は考慮されないという問題がある。

曲線間の形状類似度を考慮する、微分 Dynamic-TimeWarping 距離 \hat{d}_{DTW} [4] を用いた重み行列 W_s を

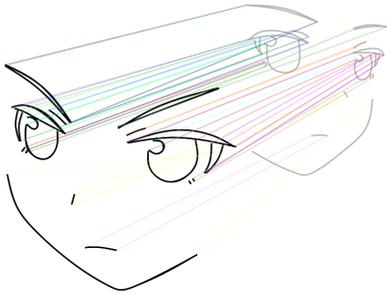


図 2: 結果：線で結ばれた曲線が対応関係を示す

定義する。

$$W_s(i, j) = \hat{d}_{DTW}(S_{ki}^0, S_{kj}^1) \cdot \frac{\max(L(S_{ki}^0), L(S_{kj}^1))}{\min(L(S_{ki}^0), L(S_{kj}^1))} \quad (6)$$

ここで、 $L(S)$ は曲線 S の長さを表す。 W_s の値は小さいほど形状・長さが似通っていることを意味する。

これらの重み行列を合わせて組み合わせ最適化を行う。 W_p は最大化、 W_s は最小化したい重みのため、 W_p を符号反転して扱う。 λ は定数である。

$$W = -W_p + \lambda W_s \quad (7)$$

行列 W で表わされる重み最小組み合わせ最適化問題を解くことにより [5]、曲線の位置関係と形状の療法を考慮する対応関係 L_{result} を求めることができる。

対応付け結果の一例を図 2 に示す。提案手法を用いることにより、形状が類似し位置も近い眉毛やまぶたの線でも誤対応が発生していないことがわかる。

3 評価実験

ここでは提案した線の対応付け手法について数値比較を行う。特に、立体的な動きを伴う頻度が多い人間の顔アニメーションを対象とする。地上波で放送された 2 つのアニメーション [6],[7] から顔の動きを抜き出し、開始・終了フレームを手描きでトレースする。その後、線対応関係の決定を行い、実際の対応と比較して平均正解率を計算する。[6],[7] では作画の密度が異なり、[6] は平均した対象線数が 35 本なのに対し、[7] は 75.6 本となっている。対象としたシーン数は 5 つずつ合計 10 のシーンである。表 1 および表 2 が実験結果および実行時間の平均の表である。提案手法の他に、2 行目に Leordeanu らの手法に従い双対制約のみを考慮した結果と、3 行目に我々の先行研究 [2] による対応付けの結果を載せる。

1 行目と 2 行目を比較した場合、形状重み W_s を加えたことによって対応付けの精度が [6],[7] とともに向上している。双対制約のみを考慮した場合、互いに近いが形状の違う線同士が誤って対応付けられる傾向にある。1 行目と 3 行目を比較した場合、提案手法は従来法と比べて [7] のように画面内の線密度が上昇した場合

表 1: 精度比較:アニメーション [6](平均線数 : 35 本)

手法	正解率	実行時間
提案手法	93.52 %	0.1992 秒
双対制約のみ	87.05 %	0.1940 秒
従来法 [2]	94.11 %	0.3212 秒

表 2: 精度比較:アニメーション [7](平均線数 : 75.6 本)

手法	正解率	実行時間
提案手法	89.41 %	8.47 秒
双対制約のみ	80.95 %	8.23 秒
従来法 [2]	82.53 %	6.899 秒

実行環境:Core™i7-3770 3.40GHz/16GB RAM

でもより正確に対応付けができることが示されている。一方で、線密度の上昇に従って提案手法は実行にかかる時間が大きく上昇する。提案法ではクラスタリングによる前処理により、実行できない範囲まで線数が増えることを防いでいる。

4 おわりに

提案手法では、手描きキーフレームに対し線同士の対応付けを自動で行う手法の提案を行った。従来法と比べクラスタリングによる線画内の線の本数の増加に伴う実行時間の増加の抑制、周囲との位置関係を考慮した双対制約による高密度線画での対応付けの精度向上を実験により示した。

今後の課題として、前処理クラスタリングの結果が最終的な対応関係に大きく影響するため、より曲線の意味を考慮する曲線のグループ化が必要になると考えられる。また、リアルタイムでユーザの操作を反映するための計算速度の向上も必要と考えられる。

参考文献

- [1] Masaki Fujita and Suguru Saito. Hand-drawn animation with self-shaped canvas. In *ACM SIGGRAPH 2017 Posters*, p. 5. ACM, 2017.
- [2] 藤田正樹 藤原 立体キャンバスを用いた線画キーフレーム間での対応線決定手法. 情報処理学会 第 80 回全国大会, 2018. 1ZA-04.
- [3] Marius Leordeanu and Martial Hebert. A spectral technique for correspondence problems using pairwise constraints. In *ICCV*, Vol. 2, pp. 1482 – 1489, 2005.
- [4] Alon Efrat et al. Curve matching, time warping, and light fields: New algorithms for computing similarity between curves. *Journal of Mathematical Imaging and Vision*, Vol. 27, No. 3, pp. 203–216, 2007.
- [5] François Bourgeois and Jean-Claude Lassalle. An extension of the munkres algorithm for the assignment problem to rectangular matrices. *C. ACM*, Vol. 14, No. 12, pp. 802–804, 1971.
- [6] Double decker! ダグ&キリル, 2018.
- [7] ジョジョの奇妙な冒険 黄金の風, 2018.