

独立成分分析を用いた布のアニメーションの制御

本間 大士¹ 金井 崇² 安生 健一³

¹ 東京大学教養学部広域科学科
〒153-8902 東京都目黒区駒場 3-8-1

² 東京大学大学院総合文化研究科

³ オー・エルー・エム デジタル

本報告は、物理法則アニメーションデータにおける独立成分分析による活用手法について提案するものである。独立成分の値を統計的に処理することで自動的に動きの合成を行い、簡単な調整により自然な動きを生成する。また、ここでは、自然で効果的な表現を満たすアニメーションのありかたについて議論する。

Control of Cloth Animation Using by Independent Component Analysis

TAISHI HOMMA¹ TAKASHI KANAI² KEN-ICHI ANJYO³

¹ University of Tokyo, College of Arts and Sciences
3-8-1 Komaba, Meguro, Tokyo 153-8902, Japan.

² University of Tokyo, Graduate School of Arts and Sciences

³ OLM Digital Inc.

In this paper, we propose a to control physically-based animation by using ICA (Independent Component Analysis). We combine two cloth motions automatically by statistically processing ICA components, and generate natural motions by controlling a few parameters. We also discuss how to create animations which satisfy natural and effective motions.

1 はじめに

二次元のアニメーションの制作現場においては、より短時間での効率的な制作が要求されているため、コンピュータを使った技術が開発されており、CGやモーションキャプチャを活用する作品も増えてきた。しかし、彩色や合成など部分的にコンピュータの力を使うにしろ、今なお手書きベースのセルアニメーションは広く使われており、視聴者でも制作者でも拘る人は多いのが実状である。

そのような中で、主人公などの人物やキャラクタは制作者によって直接描くことが望まれていても、脇役のキャラクタや背景やモノなどそのシーンにおいて大して重要でないものは、極力手間をかけずに効果的な演出描写をすることが望ましいとされる。

一方で、物理法則アニメーションによる布の動きの生成に関する研究が盛んにおこなわれている。BaraffとWitkinは布をメッシュ状に分割して、各メッシュに及ぼす力から布の挙動を計算する物理法則アニメーションの手法をまとめた [1]。ChoiとKoはそれを発展させて線形ばねモデルなどを考えることで、より安定性のある布の挙動が可能となった [2]。細部を繊

細に表現できる物理法則アニメーションは非常に魅力的な方法ではあるが、いくつか問題点を抱えている。第一に動きを制御するために初期位置や材質などのパラメータを変えるしか方法はなく、それらのパラメータの調整だけで望みどおりの動きを実現するのは極めて困難である。第二にアニメーション制作現場の立場からは、リアルだからといって実際に使われるのではなく、効果的に見ることが何より重要だという声がある。

ただし、物理法則アニメーションの繊細さは魅力的であり、ぜひとも利用したいという声も多い。そこで本研究では、物理法則アニメーションによって得られる動きを元にして、有効に活用するための手法の確立を目的とする。ここでは、布のアニメーションによる挙動を分析して、布の特徴を活かしながら制作者の意志に沿うアニメーションを簡易に生成することができる手法を目指す。

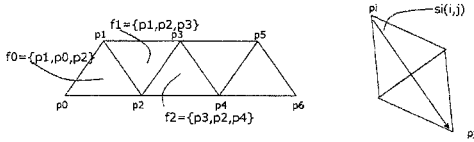


図 1: 布の三角メッシュ分割

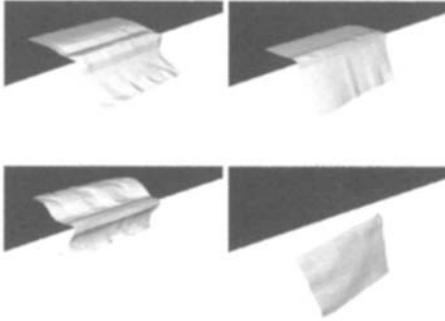


図 2: 物理法則アニメーションにて布が地面に衝突する様子 頂点数 256

2 布の物理法則アニメーション

ここでは、布の物理法則アニメーションについて説明する。布のモデルとして、細かく三角形メッシュ状に分割した形を考える。布の持つ内部エネルギー、外力、またメッシュ間の相互作用を物理法則を考慮しながら計算することで、精密な動きを作り出す。

初期設定として、布を各頂点 p と各三角メッシュとそれに対応する頂点のセット f を定めて、隣り合う二つの三角形間にはバネ s を考える。これらに加えて布の伸縮抵抗と曲折抵抗、それに剪断抵抗を予め定めることで、布から紙やアルミまで様々な材質の様相を表現することが可能となる。また重力や、状況によっては風などの外力を設定する必要もでてくる。

布の内部エネルギーと外力については、頂点位置 x において質量 M と内部エネルギー E と外力 F を使った運動方程式を用いて考える。

$$\ddot{x} = M^{-1} \left(-\frac{\partial E}{\partial x} + F \right) \quad (1)$$

布の内部エネルギーとしては伸縮 (stretch) と曲折 (bend) と剪断 (shear) が考えられ、

$$E = E_{stretch} + E_{bend} + E_{shear} \quad (2)$$

となるので、それぞれの力に分割して各時間で全ての頂点を計算する。

3 独立成分分析

独立成分分析 (Independent Component Analysis, ICA) とは、独立性を仮定することにより観測データ x を元データ s の荷重和と考えることで、 A と s を求める手法である。

$$x = As \quad (3)$$

独立性の計算については、Hyvärinen によって生み出されたネグエントロピーを用いた FastICA という解法により、ICA がより一般的に利用できるようになった [3]。Shapiro らはモーションキャプチャーを使ったアニメーションに ICA を使い、独立成分の交換をすることで人間の動きの合成手法を提案している [5]。

3.1 アニメーションへの適用

ICA をアニメーションで使うために、まず $x = As$ の意味を考える。ここで x は時系列アニメーションデータ、 s はその動きの特徴を生み出す独立成分、 A はアニメーションの頂点と独立成分との対応関係を示す混合行列と考えられる。

まず、モーションキャプチャーによって得られた頂点位置と関節角を示す二種類の時系列データ x_1, x_2 を準備する。これらのデータをそのまま対応する頂点や関節毎につなぎ合わせることで、行列 $x(m \times 2n)$ を考える。ここで、行列の行は頂点及び関節位置、列は時系列を示す。この x を ICA にかけることで、混合行列 $A(m \times a)$ と独立成分の集合 $s(a \times 2n)$ が導かれる。

ここで独立成分の意味を考えると、行は各独立成分、列は時系列、すなわち前半部分は一種類目の動きの特徴に対応しており、後半部分は二種類目の動きの特徴に対応しているのがわかる。よって、任意の独立成分の前半部分と後半部分を入れ替えることによって、一種類目の動きの特徴と二種類目の特徴を交換することができる。したがって独立成分を、二種類目の動きの特徴の一部を伴う一種類目の動きの特徴を示す s'_1 と、一種類目の動きの特徴の一部を伴う二種類目の動きの特徴を示す s'_2 の合成と考えることができる。この s' をもとに再構築した x' は、 x'_1 と x'_2 とに分割して考えられて、 x'_1 には二種類目の動きが合成された一種類目の動き、 x'_2 には一種類目の動きが合成された二種類目の動きとなる。

式で表現すると、 s の一要素を s_{ij} 、 s の交換後 s' の一要素を s'_{ij} として、一種類目の動きのあるフレームを j とした場合、 j に対応する二種類目の動きのフレーム j' を $j' = j + n$ とする。任意の独立成分 i を決めることで、 $1 \leq j \leq n$ の範囲で以下のようになる。

$$\begin{aligned} s'_{ij} &= s_{ij'} \\ s'_{ij'} &= s_{ij} \end{aligned}$$

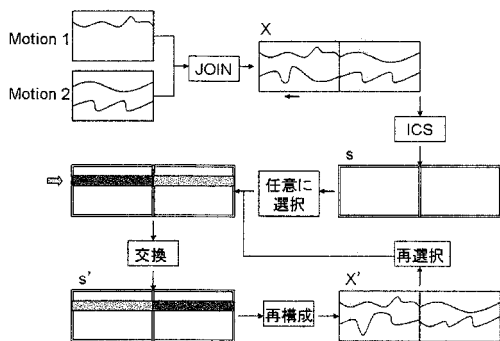


図3: 独立成分交換の流れ. 任意の独立成分を選定することで合成をする. 先行研究ではインターフェイスを実装して独立成分と動きとの対応関係をわかりやすくした.

$$x' = As' \quad (4)$$

Shapiro らの手法 [5] では, 図3で示す流れにおいて選択する独立成分ごとの x' を可視化して表現するインターフェイスを作ること, どの独立成分を交換することで理想に近い動きを作り出せるのかということを探しやすくしている.

3.2 布へ適用する場合の問題点

この手法を布のアニメーションにおいて適用するといくつかの問題点が見られる. 布のアニメーションデータは時系列における分割された頂点データなので, それを行を頂点, 列を時系列と考えて同様に導く.

アニメーションデータの独立成分というのは, 時系列の局所的に大きな変動を示すことがあるので, 各独立成分はある一定の時間に大きな寄与を及ぼす. そのため, 選ばれる独立成分によっては一定の時間だけ異常な変化を引き起こしてしまう.

交換するということは元の成分の特徴を失うことを意味しており, また先行研究における歩行モーションでは, 普通の歩行とすり足という違和感のある動きを組み合わせているので, 少しのズレなら許容できるが, 本研究における布の動きは小さなズレが明らかに違和感と不自然さを醸し出してしまふ. そのため, 単純に交換するだけでは布においては自然が合成がなされないという問題点が明らかになった.

また, 人体のモーションキャプチャーなどの場合, 出てくる独立成分もただかか知れているが, 布のような巨大なデータの場合, 独立成分の数も非常に大きくなるので, 可視化して選ぶのではなく, 一般的な独立成分選定の仕組みも望まれる.

3.3 改良手法の概要

ここでは, Shapiro らの手法 [5] に改良を加えた, ICAを使った新たなアニメーションの生成手法を提案する. 独立成分の交換をそのまま行くと様々な問題点が発生するので, それを解決する方法を探る.

元の動きの特徴を失わないためには, 独立成分の調整においては, 元の独立成分の特徴をなくさないようにする. すなわち, 交換ではなく合成 (足し合わせ) を考える.

$$s'_{ij} = s_{ij} + s_{ij'} \quad (5)$$

ここで j' は, j に対応した x と s のフレーム時間, すなわち列を意味している. j' における $s'_{ij'}$ も同時に考えてもよいのだが, ここでは一種類目の動きの部分のみを考えるため省略する. 物理法則アニメーションの活用という目的を考慮して, 物理法則アニメーションデータを一種類目のデータとして, それに動きを加えるということを念頭に以後考えることとする.

先行研究では同一時間の二つの動きを準備して, 区間全てを入れ替えていたのだが, 独立成分の各列はある一フレームのみに対応しているため, 任意の区間に限定することが可能であり, さらには二つの動きに限らずいくつでも同時に合成を考えることが可能である. よって j と j' の対応関係はユーザーで定める必要が出てくる.

そしてこれまでは頂点データを扱っていたのであるが, 頂点データは一般的に値が大きく独立成分の調整による小さな影響や誤差も大きく受けやすく, それが可視化すると目立つ, という問題がある. そのため, ここでは時間差分, すなわち速度データを元にして考えることとする.

速度データはフレーム間の差分なので値も小さく, たとえ誤差が出たとしても目には見えにくい. ここでなんらかの誤差の母平均は0だと仮定した場合, 実際現れる誤差を重ねた和は, 数を増やせば母平均である0に近づくという大数の法則により, 後の時間に影響を与える恐れも少ない. ただし動きが始まる瞬間や二つ目の動きに変わる瞬間などは直接差分をとれば桁外れた大きな値になって, 後の中心化などでも影響を与えすぎるので, そのようなフレーム j' においては $x_{ij'} = 0$ として, 最後に得られた x' からアニメーションデータの形式を構築する際に調整することとする.

図4では, 本研究で扱う大まかな流れを簡単に図で表現している. s に対して独立成分合成後の s' から, $As' \rightarrow x'$ という再構築を行うことによって x' が得られる.

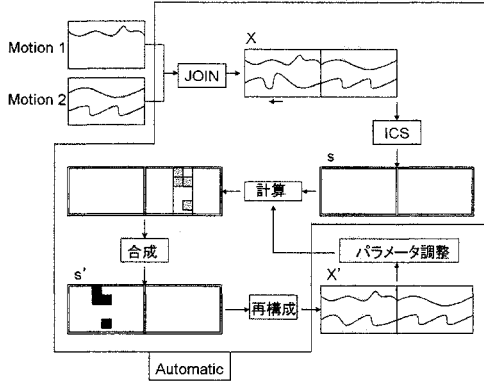


図 4: 独立成分合成の流れ. 最初に範囲さえ決めれば,あとは自動的に進む. 修正するときは少数のパラメータを調整する.

3.4 閾値を用いた独立成分の部分的合成

データ合成の際,独立成分を対象として,どのように合成する成分を選択するかを考える必要がある.ここでは,各フレームごとに考える方法と,一定区間における各独立成分ごとに考える方法の二つを提案する.

3.4.1 各フレームごとに別々に閾値を用いる合成

動きに影響を与える独立成分を考えると,着眼するべきはやはり s_{ij} そのものである.ここでは,主成分分析における寄与率や累積寄与率の考え方をを用いて同様に考える. s_{ij} の大きさは動きの影響への割合を示すと考えられるので,絶対値をとることで $L_{Max}(j)$ を考えることとする.

$$L_{Max}(j) = \sum_i |s_{ij}| \quad (6)$$

そして j を固定した $|s_{ij}|$ において大きいほうからソートした \hat{s}_{ik} について考えることとする. \hat{s}_{ik} を以下のように定義する. k に対応するある j を以下の条件の下で定める.

$$\begin{aligned} \hat{s}_{jk} &= |s_{ij}| \\ (\hat{s}_{j1} > \hat{s}_{j2} > \dots > \hat{s}_{jN}) \end{aligned} \quad (7)$$

つまり \hat{s}_{j1} は j フレームの動きの特徴を最大に内包していると考えられる. 上位から順に足し合わせることで累積寄与率 $L(i)$ を考える.

$$L_n(j) = \sum_{k=1}^n \hat{s}_{jk} \quad (8)$$

p を閾値として,添え字の n は $L_n(j) > L_{Max}(j) \times p$ を満たすうちで最小の n とする.

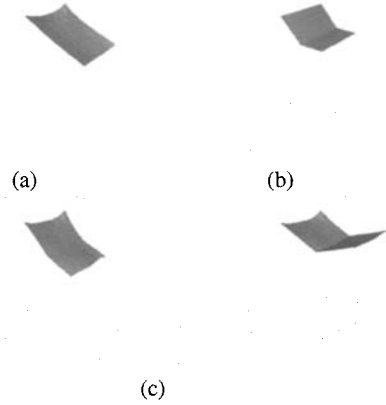


図 5: 布の合成. (a) Motion1 として自然になびく様子. (b) Motion2 として人工的な動き. (c) 合成した動き.

そうして $\alpha \leq n$ を満たす $\hat{s}_{j\alpha}$ に相当する i 行目の独立成分のみが, j フレームと j' フレームで独立成分の合成を行うということになる. これを動きの合成を目指す時間である全ての j' フレームに対して行い, j フレームと合成をすることとする.

図 5 では,布がなびく様子と,人工的に作った動きを合成して,両者の特徴をもった動きを生成した.ここで用いられる閾値は,実験的に 70%~95% の間で設定することが望まれる.この範囲内では視覚的に顕著な違いはさほど見られない.

3.4.2 一定フレーム区間で閾値を用いる合成

前小節で述べた方法では,独立成分をフレームごとに考えているので,独立成分の連続性が失われている.アニメーションの時系列データにおける独立成分は動きのなんらかの特徴を示しているので,あるフレームにおける独立成分のみ抽出して,前後のフレームでは抽出しないということでは自然さに欠けるという問題がおりうる.そこで連続性を失わないように合成を考える区間では独立成分をそのまま全て合成することを考える.

そのため, t_a から t_b の区間で合成するとして,各独立成分ごとに以下の値を計算する.

$$S(i) = \sum_{j=t_a}^{t_b} |s_{ij}| \quad (9)$$

$S(i)$ は独立成分ごとに得られる値で,区間内における独立成分の影響力の総合的な大きさを示している.また以下のように考えることも可能である.

$$S_2(i) = \sum_{j=t_a}^{t_b} s_{ij}^2 \quad (10)$$

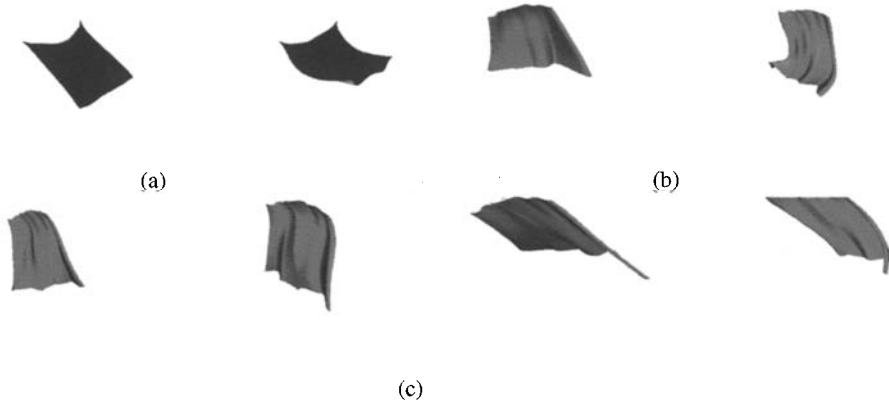


図 6: 布の不完全な合成. (a) 物理アニメーションの動き. (b) デザイナーが作った人工的な動き. (c) 合成したが不完全な動き.

$S(i)$ のソートを考えることで, $S_{Max} = \sum_i S(i)$ として同様に考えることができる.

この方法の問題点としては, 区間が長い場合には $S(i)$ がどれも近い値となってしまう, 影響力のあるはずの独立成分が漏れてしまう可能性がある, 状況によってはこの方法が適さない場合もある.

式 (8) で考えても, 視覚的には大きな変化は見られないのであるが, 短いフレームの合成では独立成分の連続性を保つために式 (9) もしくは式 (10) を考えて, 長いフレームの合成では短い期間に区切って考えたほうがよいと考えられる.

3.5 独立成分係数を用いたより一般的な演出手法

これまでの手法は単純な合成の場合には非常に有用である. しかし複雑な動きに拡張して合成しようとすると, 布が伸びたり不自然な動きになってしまう. この問題を解決するためには足し合わせる独立成分に重み付けをする必要がある. その重み付けにおいては, 式 (5) を以下のように変更する.

$$s'_{ij} = \alpha s_{ij} + \beta s_{ij}' \quad (11)$$

$$\alpha + \beta = 1 \quad (12)$$

この式を満たす任意のパラメータ α と β を定めたいので s' を決定することで, x' における不自然な布の拡張は避けることができる. この場合, $\alpha = 0$ で $\beta = 1$ という状況を想定すれば, これは先行研究における独立成分の交換も意味する.

しかし, このままでは元の動きの独立成分の間に偏りが出ているため, 不自然さが生じる危険性がある. そこで閾値を $p\%$ として, q_i を対応する独立成分 i が閾値を越えたかどうかを示すパラメータ $q_i = 0$ or 1 と定めることで, より一般的に拡張した形式として,

全ての独立成分に対して以下のように変更する.

$$s'_{ij} = \alpha s_{ij} + \beta q_i s_{ij}' \quad (13)$$

$$\alpha + p\beta = 1 \quad (14)$$

式 (13) の意味は閾値を用いて合成する成分では係数 α, β を用いて計算するが, 合成しない成分では α 倍するだけで動きを縮約する. 式 (14) の意味は, 二種類目の成分に β 倍するだけだと独立成分の $(100-p)\%$ は合成されない, 式 (11) と式 (12) だけだと全体的に動きが縮小してしまう. そこで式 (14) のように条件をつけることで動きが縮小されずに形状が安定することになる.

図 6 は実際に現場で使われている動きに, 物理法則アニメーションの動きを組み合わせたものである. 制約をかけないと不自然な大きさになり, 調整する必要が出てくる.

しかし, 基本的には式 (14) のような制約を考えたが, 縦揺れと横揺れの単純な合成の動きではこの制約は意味をなさない. とある軸上で完全に似たようなあるいは対立するような動きではこの条件が必要となるが, そうでない場合は任意に α と β を定めるほうが望ましい.

つまり, 閾値は変更可能ではあるが一定に設定しておいて, ユーザとしてはこの係数と対応する時間を調整することで動きの合成をはかることが, もっとも簡易で演出しやすい手法であると考えられる.

4 結論と考察

提案手法が従来の独立成分活用の手法よりも多くの場面でいろいろな使い方ができる可能性を持っていることが確認できた. また可視化した際に自然な動きを合成するという目的に対して, 独立成分の調整によって, 一定の結果を得ることに成功した.

しかしながら、係数調整の困難さ、意図しない動きの出現や不具合、データ準備の困難さ、それに今回は考慮に入れなかったが障害物をあたらどうするのかなど、一般化するためには課題もまだ多く残されている。

上記の問題などを解決するために以下のような手法が考えられる。

キーフレームなどによる直接的な制約をかける
Kondo らは弾性体における手法 [4] や, Wojtan らの布への手法 [6] の要素を組み合わせる。

布の面積や変化量に制約をかける
伸びを考慮しつつも、再構築した布の形状やフレーム間の動きがあまりに不自然な場合は、独立成分を計算した時点で予め除外あるいは修正を加える制約をかけることが考えられる。

軸ごとに分割した合成
三次元上では軸に沿って動きの質がかなり異なるので、軸ごとに調整ができるような仕組みを組み合わせるほうがわかりやすい結果を生み出すことができると考えられる。

衝突の検証
障害物などがある場合は、勝手に変形させることはできない。予め障害物を考慮した動き同士で考える必要があり、組み合わせた後も不自然さが生じないように考慮する仕組みが必要であると考えられる。

また、布の活用自体に関しても、本質的な観点から以下の拡張が考えられる。

ICA や PCA 以外の多変量解析の活用
今回使わなかったウェーブレット解析や周波数解析といった手法も布の特徴を抜き出すという意味では可能性が感じられる。

布以外のアニメーションへの拡張
当初は布のアニメーションに限定して考えていたのであるが、布に限らず一般的な形状変形にも拡張した手法となっている。よって布以外の形状のアニメーションの合成においても実験することが望まれる。

謝辞

本研究の一部は、独立行政法人科学技術振興機構, CREST の支援の下で推進されました。

参考文献

[1] BARAFF, D., AND WITKIN, A. Large steps in cloth simulation. *SIGGRAPH '98: Proceedings of*

the 25th annual conference on Computer graphics and interactive techniques (1998), 43–54.

[2] CHOI, K.-J., AND KO, H.-S. Stable but responsive cloth. *SIGGRAPH '02: Proceedings of the 29th annual conference on Computer graphics and interactive techniques* (2002), 604–611.

[3] HYVÄRINEN, A. Fast and robust fixed-point algorithms for independent component analysis. *IEEE Transactions on Neural Networks* 10, 3 (1999), 626–634.

[4] KONDO, R., KANAI, T., AND ANJYO, K. Directable animation of elastic objects. *SCA '05: Proceedings of the 2005 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation* (2005), 127–134.

[5] SHAPIRO, A., CAO, Y., AND FALOUTSOS, P. Style components. *GI '06: Proceedings of Graphics Interface 2006* (2006), 33–39.

[6] WOJTAN, C., MUCHA, P. J., AND TURK, G. Keyframe control of complex particle systems using the adjoint method. *SCA '06: Proceedings of the 2006 ACM SIGGRAPH/Eurographics symposium on Computer animation* (2006), 15–23.