

条件付きキーフレーム・アニメーション

安居院 猛 竹田 昌弘 中嶋 正之
東京工業大学 工学部 情報工学研究施設

1. まえがき

コンピュータを用いてアニメーションを作製する試みが、Knowlton¹⁾とZajac²⁾によって行なわれて以来、コンピュータ・アニメーションに関する研究が盛んに行なわれるようになってきた。^{3)~6)} コンピュータ・アニメーションの特長として、アニメーション製作の省力化、リアルタイムアニメーションの可能性などが考えられる他に、従来の手描きアニメーションでは実現不可能であった新しい表現技術の開発を研究の対象にしている点が注目される。たとえば、従来の手描きアニメーションで3次元物体の空間的な動きを数学的に正確にとらえることは非常に困難、あるいはほとんど不可能であるが、コンピュータ・アニメーションにおいては、3次元データ・ベースができていれば3次元空間上での回転、拡大・縮小などの座標計算、2次元平面上への任意方向からの投影などは容易に、しかも正確に行なうことができる。

筆者らは3次元データ・ベースに基づく折り紙のアニメーションを作製するシステムに関する研究を行なっている。⁷⁾ 折り紙は1枚の単純な正方形の紙から出発して、3次元空間上で一定の拘束に従って幾何学的な状態を変化させるもので、手描きで折り紙のアニメーションを作製しようとするとは空間上での正確な動きを表現することがかなり難解な作業になると考えられ、これはコンピュータ向きのアニメーションであると言える。筆者らは、折り紙の折り方が、いくつかの基本的な折り方と、これらを折り紙の幾何学的な条件を満たしながら合成した複合的な折

り方に分けられることに着目し、前者を「基本折り」、後者を「複合折り」とよぶことにした。これらの折り方は、最初と最後の状態だけを指定し、中間画像を自動的に計算するいわゆるキーフレーム法^{8),9)}を用いているが、単純な線形内挿による中割りでは、折り紙の正確な状態を表わすことができないため、折り紙の物理的性質である「紙が伸び縮みしない」ことに注目し、中割りの方法に制約条件を加え、「条件付きキーフレーム法」と名付けた。

本報告では、最初に線形内挿によるキーフレーム法の問題点について述べたあと、折り紙のアニメーションの座標計算をキーフレーム法で行なう方法について述べる。さらに得られた座標データから、カラー階調表現された折り紙をディスプレイする方法について述べ、最後に実例を示す。

2. キーフレーム・アニメーション

2.1 キーフレーム法

キーフレーム法とは、あらかじめキーフレームと呼ばれる絵をデータとしてコンピュータに与えておき、中間の

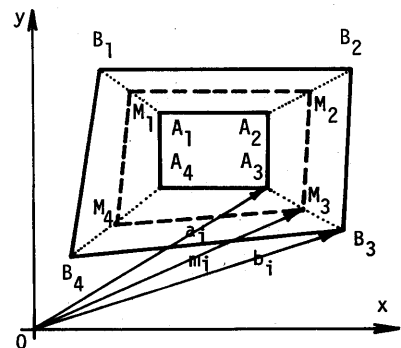


図1 キーフレーム法の原理

絵を自動的に計算する方法である。今、図1に示した四角形 AA_1AA_4 と四角形 BB_1BB_4 をそれぞれキーフレーム(1)、キーフレーム(2)とし、(1)から(2)へ四角形が形状を変えるアニメーションを考える。点 A_i を点 B_i ($i=1,2,3,4$)に対応させ、図中に示したように位置ベクトルをとると、中間画像は

$$m_i = a_i + (b_i - a_i) \times \frac{j-1}{N-1} \quad (j=1,2,\dots,N) \quad (1)$$

として求めることができる。⁶⁾ ただし N はキーフレームを含めた全画像枚数である。

2.2 キーフレーム法の特徴

キーフレーム法は、少ない入力画像でアニメーションを作ることができるという利点があるが、一方次のような欠点もある。

- ・アニメーションの動きが不自然になりやすい。
- ・中間画像の形状・大きさに不都合を生じやすい。

ここで図2に具体例を示す。長方形 $ABCD$ をキーフレーム(1)、長方形の位置を変えたものをキーフレーム(2)として長方形 $A'B'C'D'$ を表わす。このとき式(1)を用いて線形内挿によって求めた中間画像が図中に重ねて示してある。中間画像をキーフレームと比較して明らかなよ

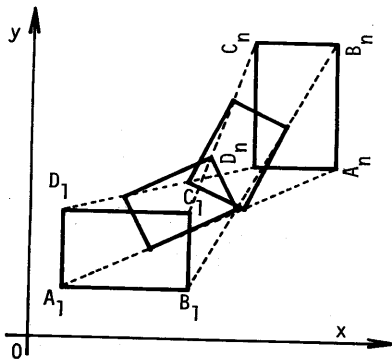


図2 中間画像の大きさが変わる例

うに、中間画像に現われている長方形はキーフレームの長方形と大きさが異なっていることがわかる。これは式(1)の対応する位置ベクトル a_i と b_i が他の位置ベクトル a_{i+j} と b_{i+j} と無関係に結ばれているため、このため図2の長方形 $ABCD$ の隣り合う点、たとえば点 A_1 と点 B_1 の間の距離 A_1B_1 が中間画像での対応する距離とは異なっており、長方形の大きさが一定に保たれなくなる。もし、長方形の大きさを一定に保つとしたら、長方形の中心(対角線の交点)の軌跡を式(1)で求め、中心から頂点までの距離と角度を与えて長方形を構成するなど、別のパラメータが必要となる。

ところで図1と図2で2種類のキーフレーム・アニメーションを考えたが、これらは本質的に性質の異なるアニメーションである。前者は、ある四角形が別の四角形へ形状を変えるアニメーションであるから中間画像の形状は問われないが、後者は、同一の四角形がある状態から別の状態へ姿勢を変化させるもので、この場合は中間画像の形状は常に同じように保たれるべきである。このことから式(1)を用いた線形内挿によるキーフレーム・アニメーションは、形状を変化させるアニメーションには適当であるが、状態を変化させるアニメーションには問題があることがわかる。

3. 折り紙のアニメーション

3.1 折り紙の定義

本研究はキーフレーム・アニメーションのモデルとして折り紙をとりあげる。そこで本研究における折り紙を次のように定義する。

- i) 3次元空間上に正方形の開領域を想定しこれを初期状態という。
- ii) 初期状態から始まり、最終の状態

を完成状態、その途中の状態を中間状態の折り紙という。

ii) 各状態にある折り紙は、点を直線で結んで構成される多角形の組み合わせで表現する。したがって曲面は考えない。

iv) 折り紙の厚さは0とする。

3.2 折り紙の状態の表現法

折り紙の各状態は多角形を組み合わせて表現するが、実際に多角形を構成するのはCRTにディスプレイするときである。したがってそれ以前では、各状態は多角形の頂点となる点の位置ベクトルの集合として記述する。今、ある状態の折り紙を構成する多角形の頂点の総数を n とする。この状態を次のようなマトリクスで表わす。

$$\begin{cases} A = [a_1, a_2, \dots, a_n] \\ a_i = \begin{bmatrix} x_{a_i} \\ y_{a_i} \\ z_{a_i} \end{bmatrix} \quad (i=1, 2, \dots, n) \end{cases} \quad (2)$$

ここで a_i は位置ベクトルである。このマトリクス A を折り紙の位置マトリクスとよぶ。位置マトリクス A で表わされる状態を状態 A とよぶ。状態 A の折り紙を $A+B$ なる状態 B へ後述の隣接条件を満たしながら変化させることを、「折る」という。

3.3 キーフレーム法の利用

ここで折り紙のアニメーションの性質について考える。折り紙は明らかに形状を変えるアニメーションであるが、1枚の紙そのものは、あくまでも1枚の紙であり、その意味で同一の物体が状態を変えるアニメーションでもある。したがって前に述べたように、形状を変えるアニメーションに対しては、線形内挿によるキーフレーム法が有効であるが、折り紙のように状態をも変えるアニメーションに対しては不適当で

ある。そこで、これを解決するために以下次章において「条件付きキーフレーム法」を考案し、その詳細について述べる。

4. 条件付きキーフレーム法を用いた折り紙アニメーション

4.1 隣接条件

折り紙を折るとは位置マトリクス A で表わされる状態 A から異なる状態 B へ隣接条件を満たしながら状態を変えることであるが、ここで隣接条件について述べる。折り紙は、折り紙を記述するのに必要な点を直線で結び多角形を作り、これらを組み合わせることによってCRTに表示される。この多角形は、折り紙の構成上の単位となるもので、基本多角形とよぶ。図3に示すように四角形 $AEFD$ と四角形 $EBCF$ が基本多角形である。ここで隣接点とは、基本多角形のある頂点から見て、辺で連結されている点という。たとえば、点 F の隣接点

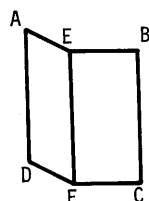


図3 基本多角形

は、基本多角形 $AEFD$ に関して点 E と点 D 、基本多角形 $EBCF$ に関して点 C と点 E である。折り紙の性質を考えると、点 F とこの隣接点との間には FD , FE , FC の長さが常に一定であるという条件が必要である。これを隣接条件という。

4.2 基本折り

次の2種類は折り紙の折り方として最も基礎となり、基本折りと定義する。

4.2.1 平行折り

図4のように初期状態 $ABCD$ の折り紙の内部にあり、正方形の一边 AD に平行な線分 EF を折り目に折り、 $n-2$ 枚の間画像を経て(c)の長方形 $EBCF$ にするこ

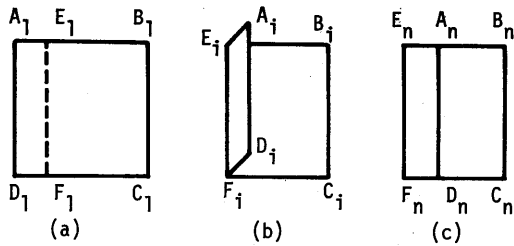


図4 平行折り

とを考える。各点における位置ベクトルを $a_i, b_i, \dots, f_i$ ($i=1, 2, \dots, n$) とする。動点は A_i と D_i だけで、隣接条件は、

$$|a_i - e_i| = |d_i - f_i| = l_1 \text{ (const)} \quad (3)$$

$$|a_i - d_i| = l_2 \text{ (const)} \quad (4)$$

である。また折り目 $E_i F_i$ が辺 $A_i D_i$ に平行であることから直交条件

$$(a_i - e_i) \cdot (e_i - f_i) = 0 \quad (5)$$

$$(d_i - f_i) \cdot (e_i - f_i) = 0 \quad (6)$$

を満足しなければならない。ここで動点の位置ベクトルを

$$a_i = \begin{bmatrix} x_{a_i} \\ y_{a_i} \\ z_{a_i} \end{bmatrix}, \quad d_i = \begin{bmatrix} x_{d_i} \\ y_{d_i} \\ z_{d_i} \end{bmatrix} \quad (i=1, 2, \dots, n)$$

で表し隣接条件および直交条件を考慮して a_i と d_i の軌跡を求める。ただし、 $F_i C_i$ に平行に x 軸、 $E_i F_i$ に平行に y 軸、紙面に垂直に z 軸をとる。

$$\begin{cases} x_{a_i} = \frac{1}{2}(x_{a_1} + x_{a_n}) - l_1 \cos \varphi \\ y_{a_i} = y_{a_1} \\ z_{a_i} = l_1 \sin \varphi \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} x_{d_i} = \frac{1}{2}(x_{d_1} + x_{d_n}) - l_1 \cos \varphi \\ y_{d_i} = y_{d_1} \\ z_{d_i} = l_1 \sin \varphi \end{cases} \quad (8)$$

ただし式(7),(8)において

$$\varphi = \{(i-1)/(n-1)\} \pi, \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (9)$$

である。図4の(a)と(c)をキーフレームとして位置ベクトルの値をあらかじめ与えておけば、中間画像の位置ベクトルは(7)-(9)によって求められる。このように、2動点 $A_i D_i$ を結んだ線分が折り目 $E_i F_i$ に平行である折り方を平行折りとよぶ。

4.2.2 対角折り

図5(a)の初期状態 $A B C D$ の折り紙を対角線 $B D$ を折り目にして $n-2$ 枚の中間画

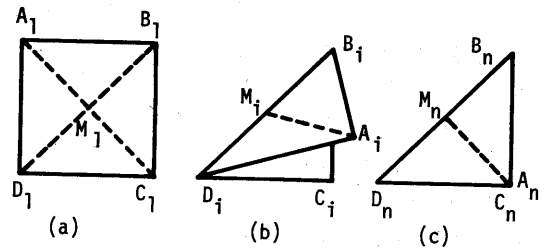


図5 対角折り

像を経て(c)のように A_n と C_n を重ねるように折ることを考える。動点は A_i だけであるので、対角線 $B_i D_i$ の中点を M_i とすれば a_i の軌跡は次のようになる。

$$\begin{cases} x_{a_i} = x_{m_i} - \frac{1}{2} l \cos \varphi \\ y_{a_i} = y_{m_i} - \frac{1}{2} l \cos \varphi \\ z_{a_i} = \frac{1}{\sqrt{2}} l \sin \varphi \end{cases} \quad (10)$$

ただし $l = |a_i - b_i|$ で φ は式(9)による。式(10)で記述される折り方を対角折りおよび平行折りとともに基本折りとする。

4.3 複合折り

図6(a)は初期状態 $A(0,0,0), G(r,r,0), I(r,r,0), E(0,0,0)$ にあった折り紙が $B D$ を折り目に2枚重ねになっている様子を示すものである。今、(a)をキーフレーム(1)、(c)をキーフレーム(2)として図中の記号の

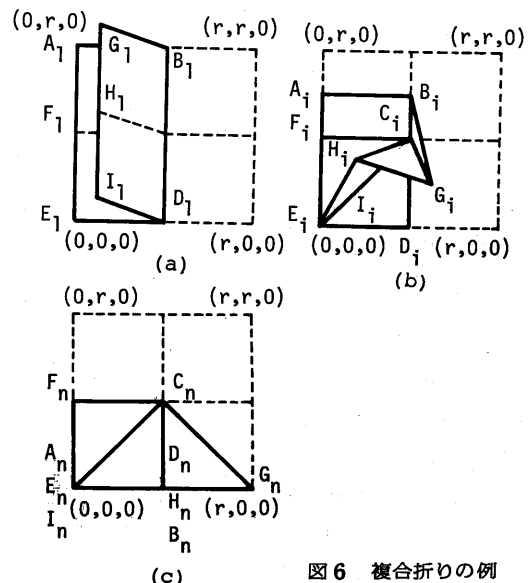


図6 複合折りの例

対応を与えて中間画像 (u) を求めることを考える。動点は A_i, B_i, G_i, H_i で、この折り方には次の基本折りが含まれている。

i) 点 H_i は正方形 $H_i G_i D_i A_i$ の対角線 $G_i A_i$ に関して対角折り

ii) 点 A_i と B_i は線分 $F_i G_i$ を折り目に平行折り

したがって、3点 H_i, A_i, B_i の軌跡は基本折りを記述する式(7)-(10)によって求めることができる。ここで点 G_i の動きが問題になるが、 G_i の始点は図(4)の $G_1(0, r, 0)$ 、終点は図(5)の $G_n(r, 0, 0)$ であるから図中点線で示してある1辺の長さ r の正方形に関する対角折りと仮定して前述の2つの基本折りと合わせて同時に行動を求めた中間画像の1枚を図7に示す。これは明らかに不自然な画像であり、仮定に次のような問題があるために起きたものと考えられる。

・点 G_i が隣接点 B_i, C_i, H_i との隣接条件を無視して動いている。

そこで各点 $A_i, B_i, \dots, H_i$ の位置ベクトルを $a_i, b_i, \dots, h_i$ として点 G_i に関する隣接条件を求めると

$$\begin{cases} |g_i - b_i| = \frac{1}{2}r \\ |g_i - h_i| = \frac{1}{2}r \\ |g_i - c_i| = \frac{1}{2}r \end{cases} \quad (11)$$

となる。式(11)で b_i, c_i, h_i は既知であるから g_i を求めることができる。前述の基本折り i), ii) に式(11)で G_i の動きに条件を与えて合成して得られた中間画像が図8である。図7と比較して

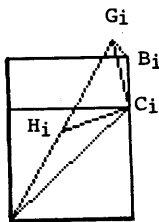


図7 隣接条件無視

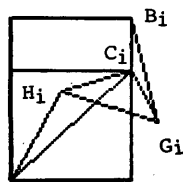


図8 隣接条件考慮

4点 H_i, A_i, B_i, C_i の位置ベクトルは同じであるが、点 G_i の位置ベクトルが著しく異なっていることがわかる。以上述べたように、基本折りと式(11)で表わされる隣接3点に関する隣接条件を組み合わせた折り方を複合折りとよぶ。

ところで式(11)はそれぞれ球面を表わす方程式で、3次元位置ベクトル g_i の各要素 (x, y, z) を未知数とする3元連立非線形方程式となり解析的に解くことは困難である。そこで式(11)を1次までのTaylor展開で近似し、Newton法によって数値解を求める。”

5. ディスプレイ方法

5.1 ディスプレイ装置

画像処理システムは、CPUに16ビットミニコンOKITAC4300bを用い、ディスプレイ装置には、 256×256 の画面9枚をストアできる画像メモリ付きのカラーCRTディスプレイを用いる。カラー画像の各1画素はそれぞれR, G, Bが3ビットずつ計9ビットから成り各ビットの組み合わせによって色彩、明暗が決定される。

5.2 投影法

折り紙の状態を記述するために必要な各点の位置ベクトルが3次元空間上で得られるが、これを原データとよぶ。CRTにディスプレイするためには、原データを2次元平面上に投影しなければならない。CRT面は、 $X-Y$ 平面上

$$\begin{cases} 1 \leq x \leq 256 \\ 1 \leq y \leq 256 \\ z = 0 \end{cases} \quad (12)$$

の領域にとり、投影は $z = \infty$ から $X-Y$ 平面上に行なう。このとき、原データの X, Y 座標を式(12)と同じようにとれば、表示の際に拡大・縮小などの操作の必要がなく、原データの X, Y 座標がそのまま使える。しかし、立体感を強調するために、原デ

ータによる位置マトリクスAにX軸まわりに θ だけ回転させる作用をもつマトリクスRをかける

$$A^* = R \times A \quad (R: 3 \times 3, A: 3 \times n) \quad (13)$$

として得られる A^* を投影してCRTに表示する。 A^* に含まれるデータを投影データとよぶ。

5.3 裏表判別法

基本多角形で構成された折り紙をCRTにディスプレイする際、投影面上で各多角形の表面と裏面のどちらが見えるかを判別する方法について述べる。

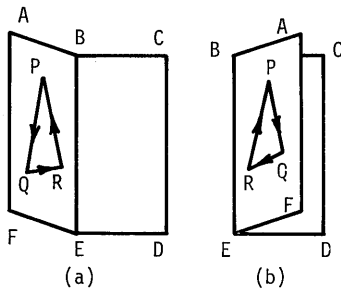


図9 裏表反転の例

図9において(a)に示された基本多角形ABEFが裏表反転して(b)のようになる場合を考える。一般に1つの平面で裏表面面が同時に見えることはないから、着目する平面上に原データで1直線上に並ばない異なる点P, Q, Rをとり投影面上での $\triangle PQR$ の裏表を判別すればよい。今、 $\triangle PQR$ に $P \rightarrow Q \rightarrow R \rightarrow P$ の順序をつけ $\triangle PQR$ の記号で表わすと、図9(a)と(b)では $\triangle PQR$ の囲む向きが逆になる。したがって $\triangle PQR$ を $\triangle \overline{PQR}$ の向きに積分することによって、 $\triangle PQR$ の裏表は積分の符号の違いによって表わされる。

5.4 明度の決定

3次元空間上にある折り紙を2次元平面上にディスプレイする際、立体感を与えるために陰影処理を行なうが、

明暗の度合を表わすパラメータとして明度 I を定義する。図10のように基本多角形の実際の面積を S_1 、投影面上での見かけの面積を S_2 として比をとると、

$$I_A = S_2 / S_1 \quad (14)$$

I_A は $0 \leq I_A \leq 1$ の連続値をとるがディスプレイ装置はR, G, Bそれぞれのビットであるから1色につき $2^3=8$ 階調まで表現できる。式(14)の I_A を

$$\begin{cases} I = [8 \times I_A] & (0 \leq I_A < 1), [] : \text{カウス記号} \\ I = 7 & (I_A = 1) \end{cases} \quad (15)$$

として、0から7までの整数値 I を明度とする。

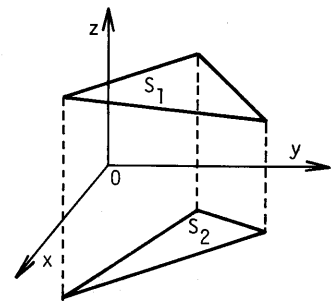


図10 実際の面積と投影面積

5.5 隣接多角形の重なりを検出

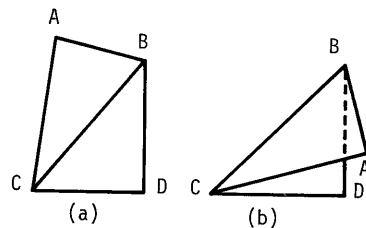


図11 隣接多角形の重なり

投影面上での隣接多角形の重なりを検出法について述べる。図11の $\triangle ABC$ と $\triangle BDC$ は共通辺BCをもつが、このような多角形を隣接多角形という。今、図11(a)の $\triangle ABC$ と $\triangle BDC$ は同じ面が見えているので、同じ向きに順序をつけ、 $\triangle \overline{ABC}$ と $\triangle \overline{BDC}$ で表わす。このとき両三角形を積分することによって得られる符号を含めた面積を $S(\triangle \overline{ABC})$, $S(\triangle \overline{BDC})$ とすると、 $\triangle ABC$ と $\triangle BDC$ に関して、次の関係が成り立つ。

- i) $S(\triangle ABC) \cdot S(\triangle BDC) > 0$
 $\Leftrightarrow \triangle ABC$ と $\triangle BDC$ は重ならない
- ii) $S(\triangle ABC) \cdot S(\triangle BDC) < 0$
 $\Leftrightarrow \triangle ABC$ と $\triangle BDC$ は重なる

6. 折り紙アニメーションの例

これまで述べてきた方法によって作製した折り紙のアニメーションの実際の例を次ページに写真で示す。以下、写真について説明する。

キーフレーム: (1), (4), (7), (11), (14), (17), (20), (23), (26), (31), (34), (37), (40)

- (1)~(4), (14)~(17): 対角折り
 (17)~(21), (21)~(24): 複合折り
 (24)~(27): 裏返し
 (27)~(30), (30)~(33): 複合折り
 (33)~(36): 対角折り
 (36)~(39): 複合折り
 (39)~(42): 対角折り
 (42)~(45): 複合折り
 (45), (48): 完成状態

各画像に関する処理時間は、基本多角形の数によって異なるが、約10~60秒程度である。

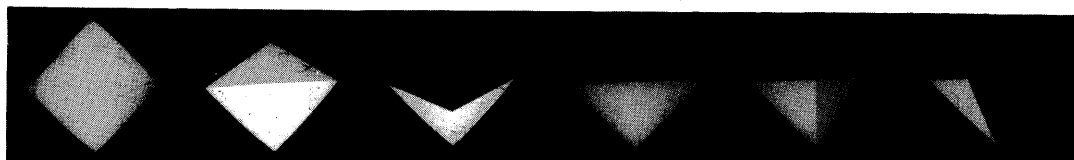
7. あとがき

コンピュータによる折り紙のアニメーションをキーフレーム法で作製する方法について述べてきたが、本方式による2種類の基本折りと複合折りを使つて、多くの折り紙が可能であることがわかった。しかし、途中で複雑な立体の形が現われる場合は、3次元空間での座標をあらかじめ知ることが困難なため、キーフレーム自体を記述する方法に何らかの対策を考えなければならぬと思われる。現在は、基本折り、および複合折りによって、キーフレーム間の中割りができるようなところをさがしてキーフレームを選んでいくが、今後は、キーボードから対話形式でコ

マンドを入力し、折り紙のアニメーションが自由に作製できるような言語、システムを開発することを検討中である。折り紙のアニメーションは、手描きで作製すると大変困難な作業と言われ、あまり例を見ないが、これは3次元物体の扱い方が難しいためであろう。今後、3次元データ・ベースに基づくコンピュータ・アニメーションの研究に期待がかけられると思われる。

8. 参考文献

- 1) Knowlton, K.C., "A computer technique for producing animated movies", *Proc. SJCC*, P.329 (1963)
- 2) Zajac, E.E., "Computer made perspective movies as a scientific and communication tool", *Commun. ACM*, 7, 3, P.169 (1964)
- 3) Catmull, E., "The problem of computer assisted animation", *SIGGRAPH*, 12, 3, PP.348-354 (1978)
- 4) Stern, G., "Soft Cel - An Application of Raster Scan Graphics to Conventional Cel Animation", *SIGGRAPH*, 13, 4, PP.284-288 (1979)
- 5) 香沢, "コンピュータアニメーション", *信学誌*, 60, 5, PP.518-524 (1977-05)
- 6) 香沢, "アニメーション" *テレビ誌*, 33, 4, PP.331 (1979)
- 7) Achland, B., Woot, N., "Real time Animation playback on a frame store display system", *SIGGRAPH*, 14, 4, PP.182-188 (1980)
- 8) 安居院, 竹田, 中嶋, "コンピュータによる折り紙アニメーション", *信学全大*, 5, PP.440-441 (1981)
- 9) Burtynsk, N., Wein, M., "Interactive skeleton techniques for enhancing motion dynamics in key frame animation", *Commun. ACM*, 19, 10, PP.564-569 (1976)
- 10) Burtynsk, N., Wein, M., "Towards a computer animating production tool", *Eurocomp Conference Proceedings*, PP.171-185 (1974)
- 11) 三浦, 田尾, "計算機のための数値計算法概論", サイエンス社, PP.73-74



(1) key frame (2) (3) (4) key frame (5) (6)



(7) key frame (8) (9) (10) (11) key frame (12)



(13) (14) key frame (15) (16) (17) key frame (18)



(19) (20) key frame (21) (22) (23) key frame (24)



(25) (26) key frame (27) (28) (29) (30)



(31) key frame (32) (33) (34) key frame (35)



(37) key frame (38) (39) (40) key frame (41) (42)

写真 折り紙アニメーションの例