

折紙の会話型シミュレーション・システム

小森 章弘 安田 孝美 横井 茂樹 鳥脇 純一郎

名古屋大学 工学部 情報工学科

グラフィックワークステーション上で会話的に折り紙のプロセスをシミュレートするシステムについて述べる。折り紙は1枚の平面を折っていくことによってさまざまな形状を生みだしていくもので、本システムでは会話型操作による平面の形状変化の過程をリアルタイムに表示することを可能にした。

Interactive Simulation System for Paper Folding

*Akihiro KOMORI Takami YASUDA Shigeki YOKOI
Jun-ichiro TORIWAKI*

Dept. of Information Engineering,
Fac. of Engineering, Nagoya University
Chikusa-ku, Nagoya 464-01 Japan.

An interactive simulation system for paper folding on a graphic workstation is described. Paper folding can create several different shapes from a piece of paper. We are able to make paper foldings on a graphic terminal interactively with this system.

1. はじめに

最近では工業用CADに代表されるように、グラフィック画面上から会話的に3次元形状をデザインすることがよく行われるようになってきている^{1),2)}。コンピュータを用いたこの種のデザインは実際に物を作らなくても、仮想的な映像としてデザイナーに形状を提供できるため、時間的あるいはコスト的に多大な貢献をするものである。このような機能は工業製品のデザインのみでなく、骨を対象とする外科手術のシミュレーションにも有効であり³⁾、また考古学への応用として、古代エジプトミイラの解析にもこの種のシステムが利用可能である⁴⁾。このようにグラフィック画面上からの会話型3次元形状操作は多くの可能性を秘めている。

本文では、3次元形状操作の一例として従来行われていなかった、折り紙を会話的に折るシステムについて、その基本的な機能について述べる。折り紙は1枚の平面を折っていくことによって様々な形状を生み出していくもので、本システムでは会話的操作による1枚の平面の形状変化の過程をリアルタイムに表示することを可能にした。折り紙のグラフィック表示に関しては、折り紙の折られる過程をキープフレーム法で行う研究⁵⁾や、折り紙の展開図から出来上がり図を推論する研究⁶⁾が報告されており、幾何学的な条件が整理されているが、会話的に自由な折り紙を折る方法については報告されていない。

2. システムの概要

2.1 システムの概要

本システムにより「折り紙」を折る過程は、画面上に表示された紙の状態に以下の3つの会話的処理を繰り返し適用していくことで進められていく(図1)。

- (1)折る
- (2)折り込む
- (3)視点移動

ここで操作「折る」とは、ある平面上において軸を指定して、その軸に対してどちらか一方の部分を軸を中心に回転させる処理である(図2)。また、操作「折り込む」とは、ある平面上において折れ線をその線を接続線とする2つの面の間に回転させる処理である(図3)。これらの操作は視点移動による適切な表示位置から会話的に実行され、履歴情報により操作のキャンセルが可能である。

実際の折り紙で用いられる折り方とそれらにより作られる状態は多種多様であり複雑に見えるが、結果のみに注目すれば、多くの場合「折る」と「折り込む」との組合せで実現できると考えられる。

2.2 データ構造

本システムでは折り紙の過程において自由に面の生成、消滅を管理するため、折り紙の各面に対して以下の3種類の情報を持たせている。

- (1)面情報：その面を構成する線の線番号・表裏情報など
- (2)線情報：線の2端点の点番号・折れ線情報など
- (3)点情報：点の3次元座標・点の画面上での2次元座標など

2.3 面の優先順位

本来3次元の物体を2次元画面上で表示する場合、面に優先順位をつけて、視点から遠い順に画面上に描いていく方法を用いる。本システムでは紙の厚みを無視し

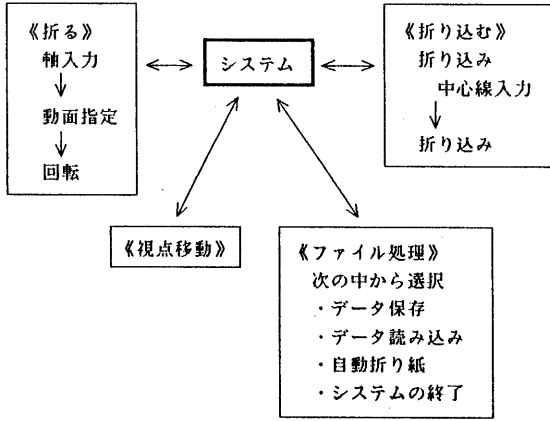


図1. システムの概要

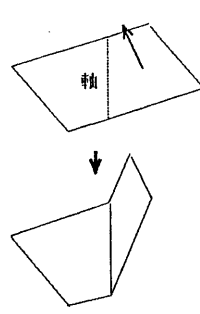


図2. 操作「折る」

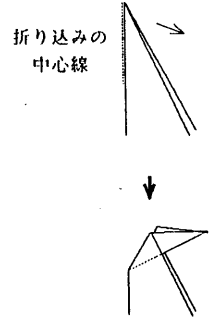


図3. 操作「折り込む」

ているため、折っていく過程で同一平面上に多数の面が存在する場合があります。この場合、それらの面の優先順位を3次元座標による視点からの距離から求めることが不可能になる。そこで、各面を同一平面ごとに視点から遠い順に記憶し、この面の優先順位情報を面が折られる際や、視点が移動する際に更新することで、自由な会話的操作に対して常に各面の優先順位を保持することにした。図4には2つの平面が持つ面の優先順位と、平面2を折る過程で2つの平面が1つの平面1になり、その際の面の優先順位の変化の様子を示す。

また、面の優先順位は、それを含む平面が視点を通過すれば逆転する。つまり、図5において平面1上の面の優先順位が、平面がAにある時とBにある時とでは逆になる。

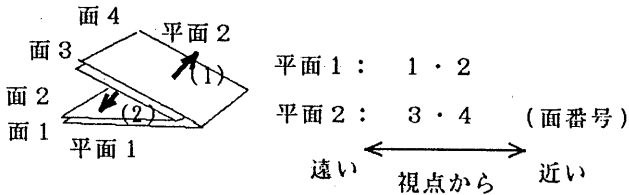


図4. 面の優先順位

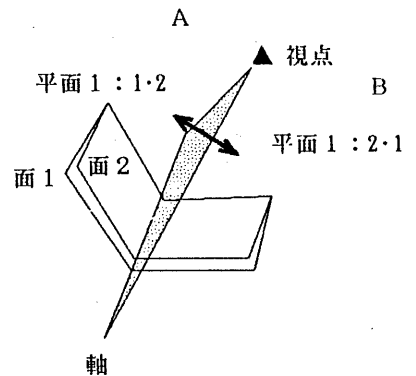


図5. 視点通過時の優先順位の変化

(1) 平面2が平面1の下に位置する

平面1: 3・4・1・2

(2) 平面2が平面1の上に位置する

平面1: 1・2・3・4

2・4 面の表裏表現

面の優先順位の逆転と同様、面を含む平面が視点を通過するとき表裏が逆転し、表示の際、色を変化させる。本システムでは各面に対して表裏状態を示すフラグ（例えば表なら値1を、裏なら値-1をとる）を用意し、面が視点を通過する毎にこのフラグに値-1を掛けてフラグ値を変化させ、これにより表裏それぞれの色で面を表示する。

3. 基本操作の処理方法

3.1 折る

「折る」は、ある直線を軸として面を回転させる最も基本的な折り方である。具体的な処理手順を以下に述べる。

(1) 「折る」平面の指定

まず、処理を行う対象となる平面を選択する。この折り方は1平面上のみで行われる処理なので、処理対象の平面以外の面を表示画面から消し、オペレータの処理を容易にする。

(2) 軸指定

「折る」過程で回転の中心となる軸の指定を端点を指定することで行う(図6)。軸の端点指定は、まず、(1)端点の存在する線分を選び、(2)その線分上での内分点として端点を指定する、といった2段階の処理により行う。これは、中心投影で2次元画面に描かれた面から正確な軸を指定することが困難であるからである。



図6. 軸指定

(3) 動面指定

軸で2分された平面のどちら側を「折る」のかを指定する。この指定の違いによって動く面(動面)が大きく異なることになる。動面は次に述べる動面追跡により求められ、動平面の面スタックに格納される。図7は動面指定の違いにより動平面の面スタックがどのように異なるのかを示している。平面1の左側を動面指定した場合、動面は2つとなるが、右側を指定した場合、動面は4つとなる。

(4) 動面追跡

折り紙における面は他の面とつながっている場合が多く、1つの面が動けばその面とつながっている面も動く必要がある。このため動面指定が行われると、その面が動くときに一緒に動かなければならない面をすべて見つけなければならない。

(以後、この処理を動面追跡と呼ぶ。)

動面追跡は、動面の持つ折れ線(紙を折った線)をたどることで行われる。動面の構成線のうち軸より指定点側に端点を持つ折れ線につながっている面は動面になる(図8)。これを利用して、指定された動面(指定面)から軸より指定点側で折れ線をたどっていけば、動面となるべき面の大部分を知ることができる。但し、この処理のみでは、動面と動面の間に挟まれた面で指定面と軸より指定点側でつながっていない面(図9(a))と、その面が動くために動面となる面(図9(b))を発見できない。そこで指定面からの動面追跡終了後、それらの間の面でまだたどられていない面について再び動面追跡を行い、動面の見落としをなくす。

(5) 動平面作成

動面追跡終了後、追跡された面の優先順位の最も高い面と最も低い面との面を図10に示す3種類の面に分類し、(b)及び(c)の動面部の面で別平面(動平面)を構成する。

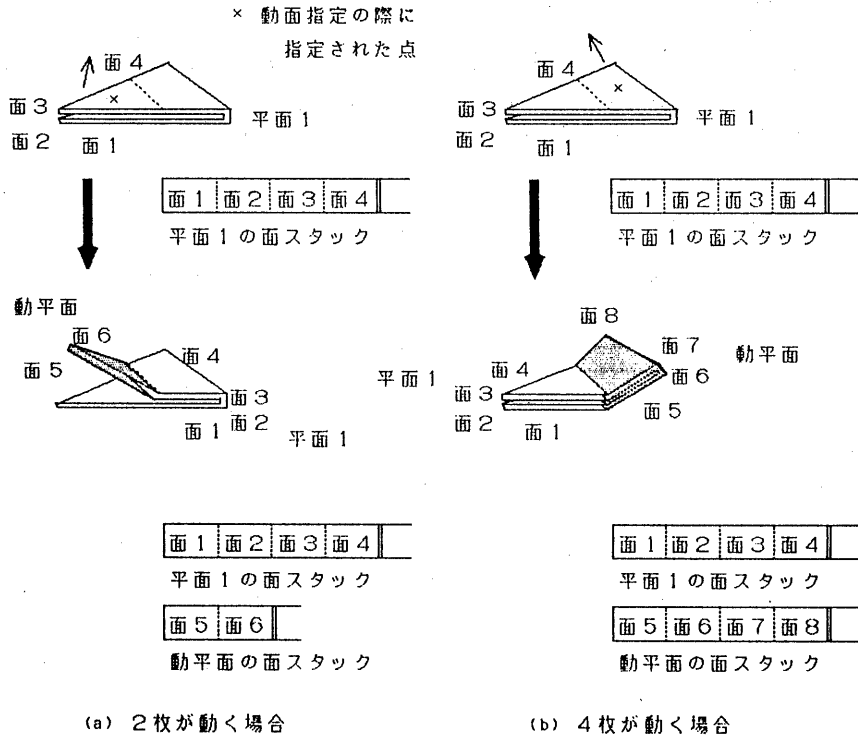
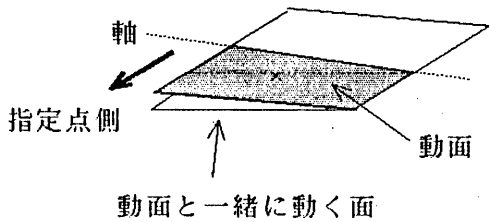


図7. 動面指定による動平面の決定



動面と指定点側で折れ線によりつながって
いれば一緒に動く

図8. 動面追跡

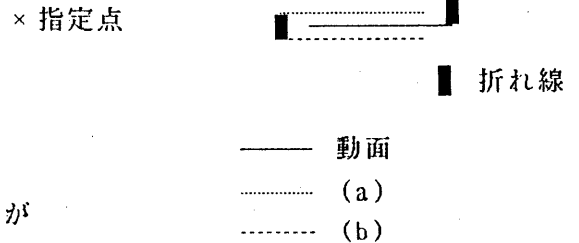


図9. 見落とす可能性のある面

(6) 回転処理

動平面作成後、動平面上の点を軸を中心にオペレータの指定する角度だけ回転させることで「折る」を実行する。動平面が視点を通過したときには動平面上の面の優先順位の逆転処理(図11)及び表裏逆転処理を行う。回転後は、動平面の最終的な位置により平面情報を作り直し(図12)、入力モードに戻る。

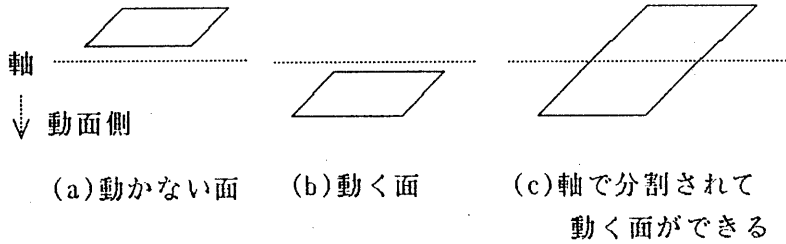


図10. 面の分類

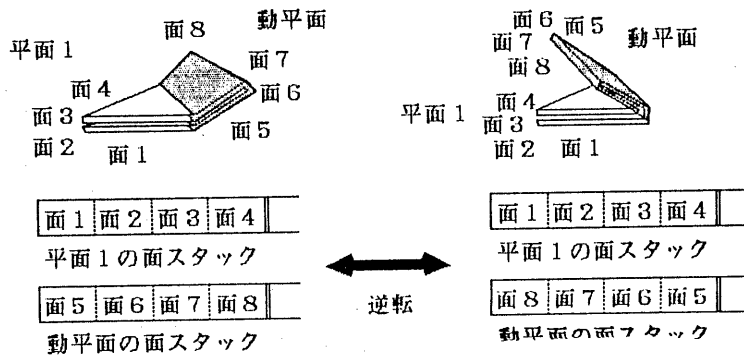


図11. 回転処理後の優先順位の逆転

3・2 折り込む

「折り込む」は、折れ線とその線を結合線とする2面の間に折り込んでいく処理である。具体的な処理手順を以下に述べる。

(1) 「折り込む」平面の指定

「折る」と同様である。

(2) 中心線指定

まず、折り込みの中心となる折れ線(以後、中心線と呼ぶ)を指定する。

(3) 折り込み面搜索

中心線が決定された後、その折れ線を結合線としている2面(以後、中心面と呼ぶ)を求める。そして、他の一緒に折り込まれる面をすべて求める。

(4) 回転処理

折り込む面を折り込む。「折り込む」の過程を図13に示す。

3・3 視点移動

視点の座標は角1・角2による極座標表現により指定する。つまり、図14のような球面上から原点を見ていることになる。視点は、上下左右に5度毎に移動する。但し、角2については、左右の反転を防ぐため -85° から 85° までに制限している。視点移動の際、ある平面を通過した場合、その平面スタックの優先順位の入替えと、その平面上の面の優先順位の逆転処理及び表裏反転処理を行う。

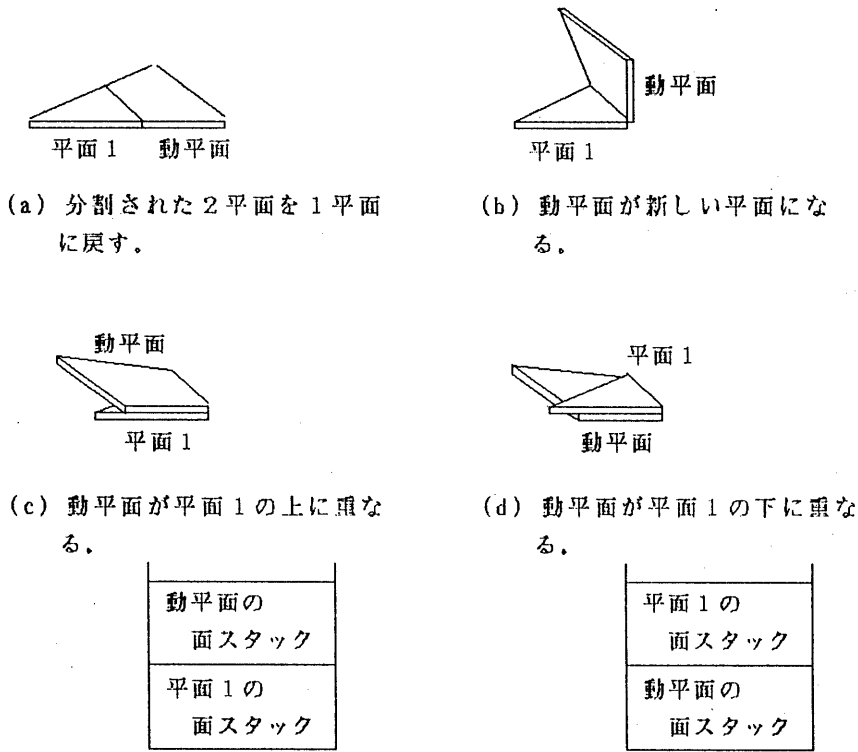


図12. 回転後の状態

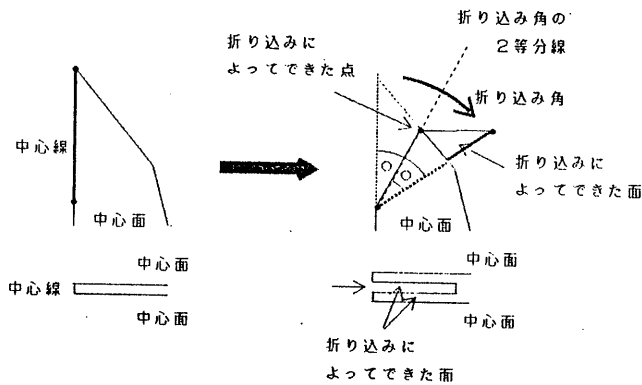


図13. 折り込む処理過程

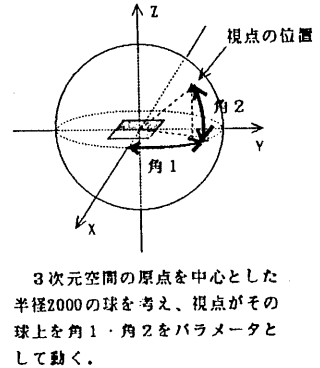


図14. 視点位置

3・4 ファイル処理

本システムで会話的に折られた折り紙は処理手順と共に外部ファイルに記憶し、必要に応じて読み出すことが可能である。以下に、3つのファイル機能について述

べる。

(1) 記憶

現在画面上にある折り紙の状態を「データ用ファイル」に記憶する。また、同時に初期状態からその状態までの手順（マウスで入力された座標）を「手順用ファイル」に記憶する。

(2) 読み出し

「データ用ファイル」に記憶されたデータを読み出し、記憶された最終の状態を表示して、入力待ちの状態となる。

(3) 自動折り紙表示

「手順用ファイル」に記憶されたデータを用い、初期状態から記憶された最終状態までの折る過程をリアルタイムで動画表示する。

4. 実行例

本システムを用いて会話的に折られた折り紙の結果を図15に示す。現在、鶴、兜、飛行機、蟬などの作成に成功している。更にリアルタイムの会話型操作の過程をVTRで報告する。使用計算機はシリコングラフィックス社製IRIS-4D、プログラムはC言語で約6000ステップである。

5. まとめ

本文では、グラフィック画面上から会話的に折り紙を自由に折るシステムの機能について述べ、その実行例を示した。今後はより複雑な折り紙を作成し、現在の機能の能力及び問題点を明らかにすると共に、より人に近い折り方を指示できるインタフェイス機能の改善を行う予定である。

〔参考文献〕

- 1) 佐藤ほか：履歴情報管理による試行錯誤的な設計環境の支援, NICOGRAPH' 88論文コンテスト論文集, pp. 49-56 (1988).
- 2) 西尾ほか：コンピュータグラフィックスによるランプ表示システムの開発, 情報処理学会論文誌, Vol. 31, No. 5, pp. 692-700 (1990).
- 3) 安田ほか：3次元任意形状の骨切断・移動操作が可能な頭蓋形成手術計画支援システムNUCSS-V2, 情報処理学会論文誌, Vol. 31, No. 6, pp. 870-878 (1990).
- 4) 大下ほか：古代エジプトミイラの3次元画像化と解折, NICOGRAPH' 89論文コンテスト論文集, pp. 309-316 (1989).
- 5) 安居院ほか：条件付きキーフレーム・アニメーション, 情報処理学会コンピュータ・グラフィックス研究会資料1-2 (1981).
- 6) 内田ほか：折り紙の知識表現とその処理プログラムの作成, 情報処理学会第42回全国大会予稿集1-53 (1991).

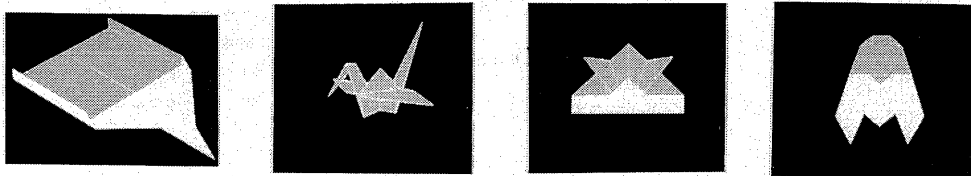


図15. 本システムで作成した折り紙の例