

仮想空間における折り紙の対話型操作の実現

宮崎 慎也 安田 孝美 横井 茂樹 鳥脇 純一郎
名古屋大学

グラフィックスハードウェアの進歩に伴い、グラフィックス環境を用いた人間に親しみやすいヒューマンインタフェースの構築が可能になってきている。ビジュアルな環境を利用すれば仮想空間中の物体を実物と同じように操作することが可能になる。本研究では対話的に紙の「折り曲げ」「折り返し」「折り込み」の操作が可能な折り紙のシミュレーションシステムを開発した。オペレータはスクリーンにモニターされた3次元仮想空間内の紙をマウスデバイスにより紙面の頂点を摘まんで移動する感覚で操作できるので、実物を折るような感覚で仮想の紙を自由に折ることができる。この操作は視点移動により紙をあらゆる方向から観測しながら逐次的に行なうことができる。

INTERACTIVE MANIPULATION OF *ORIGAMI* IN 3D VIRTUAL SPACE

Shin-ya Miyazaki Takami Yasuda Shigeki Yokoi Jun-ichiro Toriwaki
Nagoya University
Furocho, Chikusa-Ku, Nagoya 464-01, Japan

With advance of graphics hardwares, possibility of natural man-machine interface using graphic environments is drawing attention. This paper describes a visual simulation system of ORIGAMI (paper folding art) which realizes interactive folding operations of paper such as 'Bending,' 'Folding up' and 'Tucking in' in real-time. In the system, a piece of virtual paper is defined in a three dimensional (3D) virtual space and displayed on a graphic screen. An operator can fold it freely and iteratively, observing it from an arbitrary direction and manipulating it as if he is folding a real paper, by picking and moving a vertex of the paper using a mouse device.

1. まえがき

グラフィックスワークステーションの性能が急速に進歩し画像の生成速度が向上するに伴い、グラフィックス環境を利用したヒューマンマシンコミュニケーションの新たな可能性が注目されるようになった。グラフィックス環境を利用すればコンピュータ内に定義された仮想的な3次元の世界とのリアルタイムインタラクションによりオペレータは実物を操作するような感覚で仮想空間内の物体を操作することが可能となり、設計、娯楽、教育、訓練など様々な分野への応用が期待されている。仮想世界の物体に対して実物と同じ様な操作を行なう研究に関する報告はまだあまり多くなく単純な性質の物体の操作に限られており[1]-[4]、未解決の問題も多い。

本文では紙という比較的単純ではあるが折れ曲がるという性質をもつ非剛体の素材を対象とし、仮想空間操作により自由に折るプロセスをリアルタイム操作で実行できるシミュレーションシステムを開発した。本システムは3次元仮想空間に存在する1枚の仮想の紙を、スクリーンを通してモニターしながら入力デバイス(マウス)を操作することにより加工する(折る)ものである。本システムでは空間内に定義された操作点(Picker)の位置と状態をマウスデバイスで制御し紙の頂点を自由に移動できるため、オペレータはほぼ実物の紙を折る感覚で仮想の紙を操作できる。基本的な折り方として「折り曲げ」「折り返し」「折り込み」の3種類を用意し、これを組み合わせることにより紙を複雑な形状に加工できる。視点はボタン操作により常時変更が可能であり折り紙をあらゆる方向から観察しながら操作ができる。また本システムは仮想的な空間に対する自由な操作を実現しているため、データグローブやヘッドマウントディスプレイ(H.M.D.)などのデバイスを用いることにより人工現実感システムへの応用も可能である。

【折り紙を対象とした従来のシステム】 折り紙を対象とした計算機処理に関して既にいくつかの報告がなされている。[5]は紙が折られる過程のア

ニメーションを作成するためにあらかじめ入力した折り紙のキープフレーム画像から中間画像を生成することを目的としており、折り紙の状態の具体的な記述方法に関しては述べられていない。[6]は折り紙の展開図から紙の物理的な制約条件をもとに出来上りの状態を推論するものであり、タワーと呼ばれるリスト構造による折り紙の表現を提案しているが、展開図の入力を必要とし平面折りに限定されている。本文で述べる単純な操作の反復による入力では展開図入力とは異なり出来上りまでのすべての折り情報をあらかじめ得ることが不可能であり、この点を考慮した折り紙の表現方法が必要となる。[7]では初めて折り紙の対話型操作を可能にしたが操作性に問題があり、これを実物に近い操作感覚で行うためには複雑な入力方法、折り紙の表現データを改善し、操作に対する応答、それに伴う計算処理をリアルタイムで実現する必要がある。本文で述べるシステムは、人体の動きに連動してリアルタイムで紙の状態が変化するいわゆる仮想空間操作を伴い、これらのシステムとは異なる全く新しいものである。

2. 折り紙シミュレータ

本章では本システムで実現した折り紙の基本操作、及びそれらを実現するために必要な処理について述べる。

2.1 折り方の種類 (Fig.1)

【折り曲げ (Folding up)、折り返し (Bending)] 紙の操作の基本単位となる1回の折り操作は、紙面上に定められた、ある1本の線(折れ線)により紙面を2分割し、そのうち一方の面を折れ線を軸に回転させることで実現される。既に幾度か折られた紙を対象とするとき、面同士の重なり、接続の関係から次の折り操作で複数の面が同時に回転する場合(多重折り)と1つの面のみが回転する場合(一重折り)がある。いずれの場合も移動する全ての面が同一方向に回転する折り方を「折り曲げ」と呼び、そのうちで面の回転角度が180度のものを特に「折り返し」と呼ぶ。

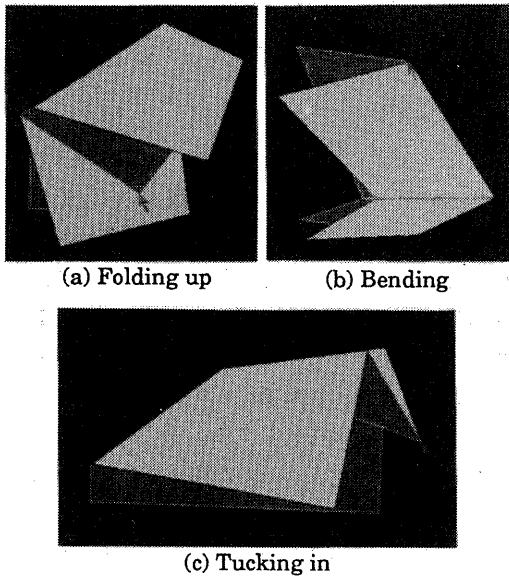


Fig.1. Three kinds of basic folding operations. These are multiple folding. (a) and (c) are plane folding.

【折り込み (Tucking in)】 もう1つの折り方として、ある面を境に面の回転方向が異なる「折り込み」が用意されている。「折り込み」は同一平面内での多重折りであるが、紙面同士の関係から折り込みが可能かどうかを判定する必要があり、更に多重に重なった「折り込み」では折り方の候補が複数存在する場合がある。実際には全ての移動面の形状が同一で対称的に折り込む場合が多いのでインタラクションの単純化のためこのような操作に限定した。

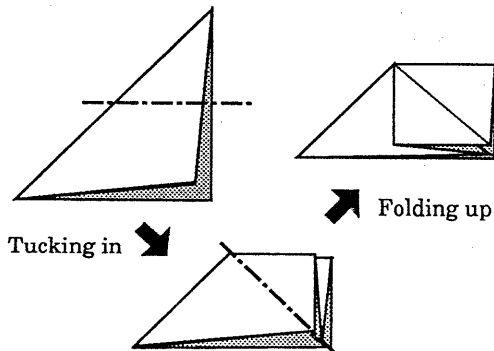


Fig.2. Complex folding with a combination of basic folding operations.

これらの基本的な折り方を組み合わせることにより更に複雑な折り方が実現できる (Fig.2)。

2.2 仮想マニピュレータの定義

仮想物体操作を行なうシステムでは、仮想空間内の物体を操作するための仮想のマニピュレータを定義する必要がある。本システムでは紙面の頂点を掴んで移動するため、3次元座標ポイント Picker を仮想空間内で定義し、この操作をマウスデバイスを用いて制御している。Picker はマウスの中央ボタンの On, Off にそれぞれ対応する 'PICK' 及び 'RELEASE' の2つの状態を持つ。状態 'PICK' 時には Picker はある頂点を掴んで (Pickして) おり Picker の移動に伴いその頂点も移動するが、状態 'RELEASE' 時には Picker は紙と離れて単独で移動する。Picker 自身の位置は、スクリーンに平行な2方向についてはスクリーン上のマウスカーソルの位置で与えているが、奥行方向については3つのマウスボタンのうち両サイドの2つのボタンにより制御している。左ボタンが押されている間 Picker は一定の速度で視点から遠ざかる方向に移動し、右ボタンについてはその逆である。Picker の奥行方向の位置は 'PICK' 時には Pick している頂点と同じ位置にあるので折り紙のスクリーンへの投影像から大まかな位置は感覚的に得られるが、'RELEASE' 時にはわからない。現在は Picker を2次元のマウスで制御しているが、3Dデザイナーなどの他の入力デバイスに置き換えることも可能である。

2.3 基本操作の実現

紙の折りを決定するためには折れ線 (面の回転軸) 及び折り曲げ角度 (面の回転角度) の指定が必要である。平面折りの場合には更に「折り返し」「折り込み」の選択が必要である。

1) 折れ線及び折り曲げ角度の決定

移動したい面の1つの頂点 (選択頂点) を Picker により移動すると、それに伴い自動的に折れ線と折り曲げ角度が決定する。選択頂点の移動元と移

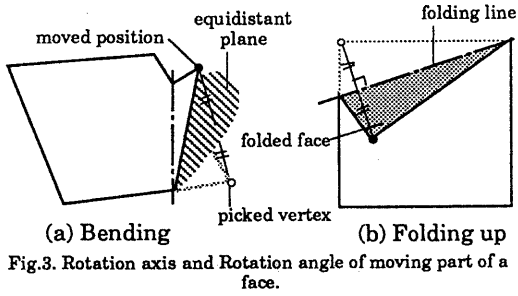


Fig.3. Rotation axis and Rotation angle of moving part of a face.

動先からの等距離平面と折られる面との交線より折れ線が決定され、この2平面の交角の2倍が折り曲げ角度となる (Fig.3)。この方法は実際の紙を操作するのに近い感覚で紙に対するリアルタイム操作を可能にする。

2) マウスデバイスによるPickerの操作手順 (Fig.4)

上記の方法にもとづいて、紙の頂点を掴まむ、頂点を掴まんだまま移動する、頂点を離す、動作からなるPickerの基本操作を次のように実現する。

[頂点の選択] マウスの中央ボタンを押した瞬間に Pickerの状態が PICK'に変わり、紙面の全ての

頂点のうちから選択された唯一の頂点 (選択頂点) が Pickerにより Pickされる。この時 Pickerの位置は 選択頂点の位置 (選択頂点の移動元) に変更される。

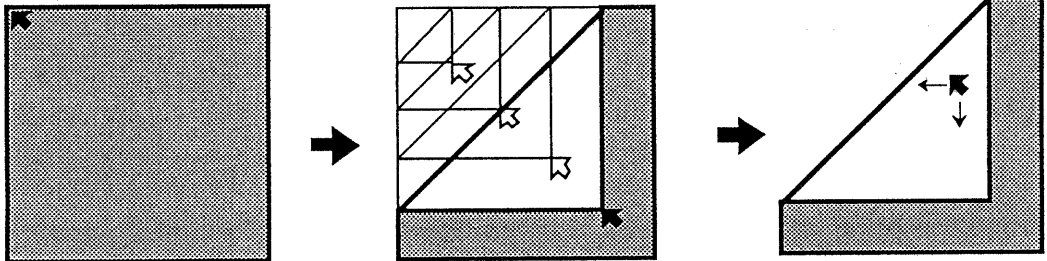
[頂点の移動] ボタンを押している間 (Pickerの状態 'PICK'時) Pickerの移動に伴い逐次的に選択頂点の移動先の座標が獲得され、それに従う折れ線と折り曲げ角度による折り結果がスクリーンに表示される。この反復は非常に短い時間間隔で行なわれるので、オペレータは折り紙の状態をモニターしながら、直接的には頂点を移動することにより折れ線と折り曲げ角度をリアルタイムで自由に变化させることができる。また操作中の視点移動も可能にしている。

[頂点の解放] ボタンを離した瞬間に Pickerの状態が 'RELEASE'に変わり、選択頂点の移動先が固定され、この時の折り結果が折り手順のヒストリーに登録される。以降 Pickerは頂点と離れて単独で移動する。

3) Pickerによる頂点の選択

面の頂点を選択する際、スクリーン上で Picker

1) Folding up



2) Bending

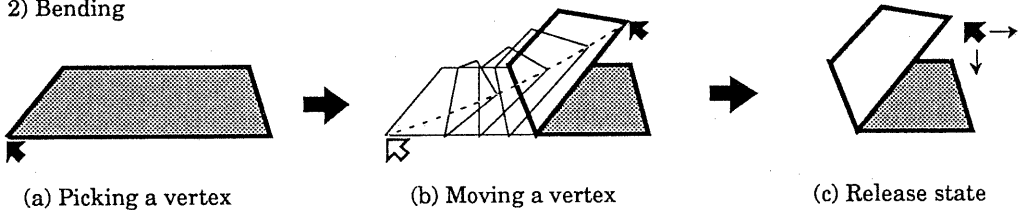


Fig.4. Basic Operations with mouse device. Folding line changes following movement of the mouse.

により正確に頂点位置を指定することは難しいため、2次元のスクリーン投影上でPickerから最も近い頂点を選択するようにする。以下にその手順を示す。

- ①スクリーン上でPickerとの距離がある微小な値以下の頂点を選択頂点の候補とする。
- ②全ての候補頂点のうち、属する紙面が視点から最も近いものを選択頂点とする。

4) 選択頂点の移動先の位置の補正

例えば面の頂点同士を合わせて折りたい場合、その指定をPickerにより正確に行なうことは困難である。本システムでは以下の4つの場合において選択頂点の移動先を自動的に補正する。

[選択頂点を他の頂点に合わせて折る] 選択頂点の移動先との距離がある微小な値以下の頂点が存在すれば、選択頂点の移動先をその頂点の位置にする。

[辺同士を合わせて折る] ある移動辺の両端点との距離が共にある微小な値以下である辺が存在すれば、それら2辺が同一直線上で重なるように折れ線と選択頂点の移動先を補正する。

[折れ線がある2つの頂点を通る] 折れ線からの距離がある微小な値以下の頂点が2点存在すれば、その2点を通る直線が折れ線となるように選択頂点の移動先を補正する。

[ある特別な値の折り曲げ角度で折る] 折り曲げ角度が 30° 、 45° 、 60° 及びその倍数(基準角度)にある程度近いならば、折り曲げ角度がその基準角度となるように選択頂点の移動先を補正する。

2.4 視点の移動

本システムでは4つの基本的な視点移動の組み合わせにより、仮想空間内の折り紙を任意の角度、距離から自由に観測できる。観測物体(折り紙)を原点、視点をX軸上に置くとすると、視点のX、Y、Z軸の周りの回転により視線方向が変更され、視点のX軸上の移動により物体との距離が変更される。各操作はそれぞれ2つのキーにより制御される。

3. 折り紙のためのデータ構造

本章では折り操作により変化していく折り紙の状態を正確に記述するためのデータ構造について述べる。折り紙は折れ線により分割された複数の面の集合であるので基本的にサーフェイスモデルで表現される。データ全体は面層、辺層、頂点層と呼ばれる3つのデータ層により構成されている。

3.1 面層について

面層は面の分割を表す面セルツリーと面の重なり順序を与える面セルックアップテーブルにより構成される(Fig.5(a))。

[二分木リスト構造] 折り紙は1回の折り操作によりいくつかの面が2分割されるので、面情報の記憶には基本的に二分木のリスト構造が適している。1つの面の情報を持つ面セルが木の節に位置し、面の2分割の際には対応するセルに子のセルが2つ生成され、それらが分割後の2つの面を表す。葉のセルの集合が現在の折り紙の状態、木構造全体が折り操作による面分割の過程の全情報を表している。

[面グループと面スタック] 過去の「折り曲げ」により全ての面が同一平面上にない場合、同一平面上の面をグループ化することにより全ての面はいくつかのグループ(面グループ)に分けられる。各グループには同一平面上にある厚み0の面に重なり順序(面番号)を与える面スタックがあり、全ての面セルはいずれかのグループの面スタックに属する。Fig.5(d)で3つの面のうち面F1は単独で1つのグループを形成する。面セルックアップテーブルはグループ番号、面番号により対応する面セルを面セルツリーから高速に検索する。

3.2 辺層について

辺層は辺の分割を表す辺セルツリーから成る(Fig.5(b))。辺セルツリーは面セルツリーとほぼ同様の構造であるが、面の分割に伴って辺は分割されるだけでなく新しく生成もされるのでそれに伴い辺セルツリーの総数は増加する。

3.3 頂点層について

頂点層は頂点セルの線形リストと頂点セルルックアップテーブルにより構成される (Fig.5(c))。頂点セルは対応する頂点の空間座標を保持しており、折り操作に伴う頂点の移動の履歴を頂点セルの線形リストで表す。頂点セルルックアップテーブルは頂点セルリストから頂点の現在の位置を高速に検索する。

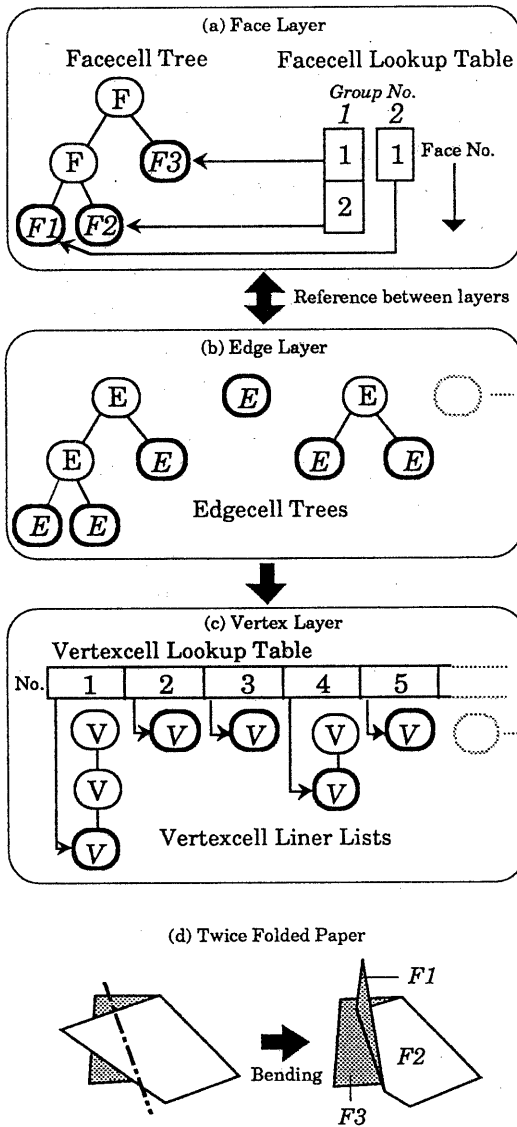


Fig.5. Data structure for a sheet of folded paper. Information of faces, edges and vertices are described with binary trees and linear lists of cells. Folded paper of (d) is represented with (a) (b) (c).

3.4 データ層間の相互検索

データセルは他の層の関連するセルをポインタにより検索する。この検索は後述のリストの更新や面のレンダリングの際に高速に行なわれる。例えば面セルはその面を構成する辺セルへのポインタ配列 (Fig.6(a)) を、辺セルはその辺を含む面セルへのポインタ及びその辺の両端点の頂点番号 (Fig.6(b)) を持っている。

4. リストの更新

前章で述べたデータ構造におけるリストは折り操作の際に更新される。本章ではデータ更新の手続きを述べる。

4.1 移動面の探索

多重折りにおいて選択された面が折られる際、辺の共有による面の接続、面の重なりから一緒に折られる他の面を探索 (移動面探索) する必要がある。Fig.7の折り返しにおいて、面F2は面F1の移動に伴い一緒に移動する。3つの面のうち面F3だけが不動面である。移動面探索の手順を以下に示す。

- ① 選択頂点を含む面は明らかに移動面である (Fig.7の面F1)。
- ② ある面が移動面ならその面の移動部分において辺を共有する面は移動面である (Fig.7の面F2)。
- ③ 「折り返し」「折り曲げ」の場合、ある面が移動面ならその面と、面の回転していく側で移動部分が重なる面は移動面である。
- ④ 「折り込み」の場合、ある2つの面が移動面ならその2面の間にあり、それらの面の移動部と重なりがある面は移動面である。
- ⑤ ①～④の手順により移動面とならなかった面は不動面である (Fig.7の面F3)。

4.2 移動面の分類

すべての移動面は折れ線の両側にまたがる分割面 (Fig.7の面F2) とそうでない非分割面 (Fig.7の面F1) に分類される。分割面は折れ線により2分割され一方の面が回転するが、非分割面は分割され

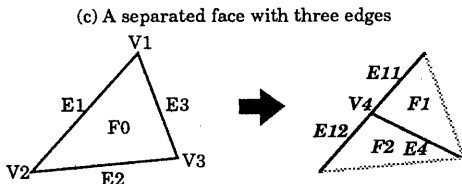
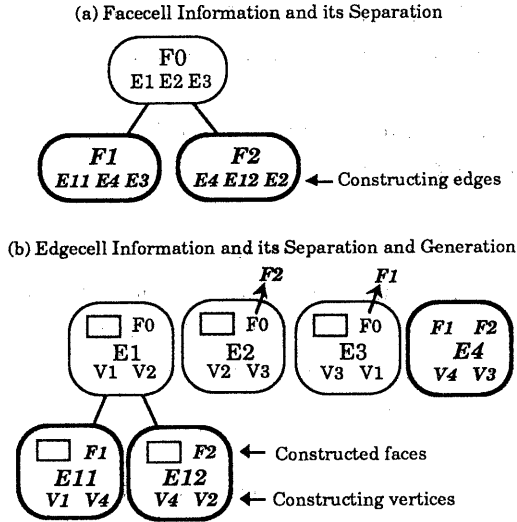


Fig.6. Modification of cells about one face following separation of the face.

ず面全体が回転する。これらのうち分割面についてのみ面層、辺層の更新が行なわれる。この分類は面の頂点と折れ線との位置関係を調べることにより行なわれる。

4.3 面の分割に伴う面セル、辺セルの更新

面の分割に伴う面セルと辺セルの更新手続きを Fig.6の三角形の分割面を例に示す。三角形の面 F0 は、頂点 V1, V2, V3 及び辺 E1, E2, E3 により構成

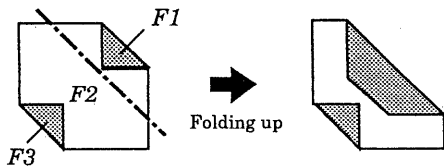


Fig.7. Three kinds of folding faces. F1 and F2 are moved, and F2 is separated.

され、分割されて面 F1, F2 になる。これに伴い辺 E1 は分割されて辺 E11, E12 になり、新しい辺 E4 及び頂点 V4 が生成される。この時のセルの内容の変更過程を以下に示す。

- ① F0 の分割に伴い面セル F1, F2 および辺セル E4 が新しく生成され、E4 を含む面が F1, F2 に決定される。ただし E4 は新しい辺セルツリーの根である。
- ② E1 の分割に伴い辺セル E11, E12 および頂点セル V4 が新しく生成され、E11, E12 の内容と E4 の 1 つの端点が決定する。また E11, E4 が F1 の構成辺に E4, E12 が F2 の構成辺に加えられる。V4 の座標もこの時に計算され頂点セルルックアップテーブルに登録される。
- ③ E2 を含む面の 1 つが F0 から F2 に変更され、E2 が F2 の構成辺に追加される。また E4 の残りの端点が V3 に決定される。
- ④ E3 を含む面の 1 つが F0 から F1 に変更され、E3 が F1 の構成辺に追加される。

更新手続きは辺の数が4以上の面についても同じ要領である。また多重折りの際には全ての分割面に対して更新手続きが行なわれる。

4.4 頂点セルの更新

移動面探索における面の重なり判定は頂点を移動する前に行なわれるので、頂点セルの更新は面セル、辺セルの更新後に独立して行なう。全ての移動する頂点について子のセルを生成し、面の回転による頂点の移動後の座標を与える。以後これらの頂点について、頂点ルックアップテーブルは新しく生成されたセルを検索する。

4.5 面セルルックアップテーブルの更新

1 回の操作で折られる面はすべて同一平面上にあり唯一の面グループに属するので、面セルルックアップテーブルの更新はそのグループのみに対して行なわれる。操作前の面の重なり順序と折りの種類から操作後の新しい面の重なり順序を表すテーブルが決定される。

作成例

本システムはシリコングラフィックス社製 IRIS 4D/70 上で約3000ステップのC言語のプログラムにより実現されている。現在本システムにより飛行機、鶴、蟬などの作成に成功しており、そのいくつかの例をFig. 8 に示す。

5. むすび

本文では、折り紙に対する仮想物体操作を実現し、グラフィックス環境において実物感覚で操作が行なえるマンマシンインタフェイスの可能性を示した。仮想空間操作を行なうシステムにおいてリアルタイムで物体の操作やレンダリングを行なうためには、仮想物体を簡潔に記述することが重要である。またオペレータが操作を円滑に行なえるよう、インタラクションに工夫をすることも必要である。将来的には紙に弾性などの物理的性質

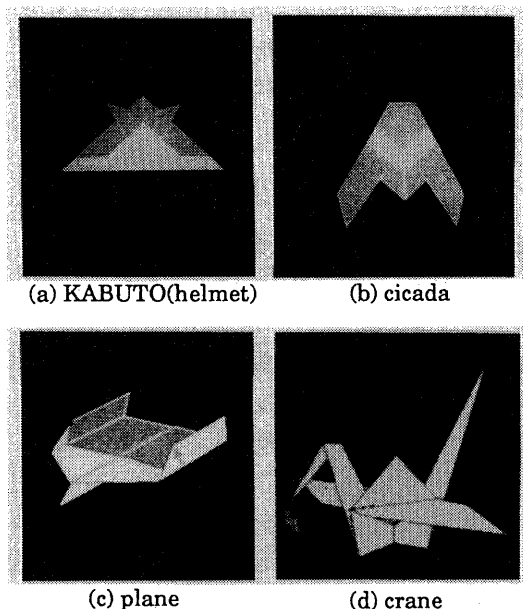


Fig.8. Examples of folding work.

を与えることにより、更に実物に近い紙とのインタラクションを実現することも考えている。

謝辞 日頃熱心に御指導、御討論頂く研究室の皆様感謝します。

文献

- [1] Hiroo Iwata: "Artificial Reality with Force-feedback: Development of Desktop Virtual Space with Compact Master Manipulator", *Computer Graphics*, 24(4): 165-170, August 1990.
- [2] Colin Ware: "Using hand position for virtual object placement", *The Visual Computer*, 6(5): 245-253, November 1990.
- [3] 中村 康浩, 吉村 哲也: "3次元直接操作に於けるポインティングのためのビームカーソル手法", 電子情報通信学会春季全国大会, D-648, March 1991.
- [4] Tinsley A. Galyean, Joho F. Hughes: "Sculpting: An Interactive Volumetric Modeling Technique", *Computer Graphics*, 25(4): 267-274, July 1991.
- [5] 安居院 猛, 竹田 昌弘, 中嶋 正之: "条件付きキーフレームアニメーション", 情報処理学会CG研究会, 1-2, June 1981.
- [6] 内田 忠, 伊藤 英則: "折り紙過程の知識表現とその処理プログラムの作成", 情報処理学会論文誌, 32(12): 1566-1573, December 1991.
- [7] 小森章弘, 安田孝美, 横井茂樹, 鳥脇純一郎: "折り紙の会話型シミュレーションシステム", 情報処理学会グラフィックスとCAD, 50-9, May 1991.