

## スクリプト言語を用いた折り紙ナビゲータの開発 3DCG Navigator System of Japanese Folding Paper using Script Language.

須藤敦史†  
Atsushi Sudo

新藤義昭†  
Yoshiaki Shindo

### 1. はじめに

近年、折り紙は構造解析やリハビリテーションの分野等に多く使用され、世界共通語「ORIGAMI」として世界中の人々に親しまれている。折り紙の歴史は古く、多種多様な折り方が開発され受け継がれてきた。しかし、日本国内では折り紙は子供の遊戯という認識が強く、年齢が上がるに従って折り紙に接する機会が少なくなっているのが現状である。このような背景から、3DCG アニメーション技術と音声合成技術を用いた「折り紙ナビゲータ 2」(PCML-Navigator2)を開発した。そして、折り紙の形状や折り方をハイパーテキスト型のシナリオ記述言語で記述するスクリプト言語 **Paper Craft Making Language2 (PCML2)**を開発した。

### 2. 折り紙教材の現状

折り紙を学習する際に一般的に参照できるのは、書籍やインターネットから収集できる情報である。インターネットは、折り方の工程の解説として画像形式による平面アニメーションを使用し、折り紙の構造や折り方を伝えようとするものが多い。しかし平面上に表現すると、折り紙を多面的な角度で見ることができず、繰り返し折られた後の複雑な形状を表現するのは困難である。この解決策のひとつは、3DCG アニメーションで折り紙の折り方を提示することである。折り紙の構造を 3DCG 技術で表現する研究は幾つか報告されているが<sup>[1][2][3]</sup>、折り方の学習支援に重点をおいた研究例はまだ提案されていない。本研究の目的は、折り紙の折り方の学習支援を目的とする折り紙ナビゲーションシステムの開発である。

### 3. PCML-Navigator2

PCML-Navigator2 は、**Paper Craft Making Language 2(PCML2)**と名付けたスクリプト言語で記述されたシナリオファイルを用いて、折り紙の折り方を 3DCG アニメーションで再現し、音声合成や字幕機能を用いて、折り紙の折り方を進めるシステムである。このシステムの目的は、折り紙を学ぶ人に、折り紙の折り方を教えることにある。PCML-Navigator2 の機能を以下に示す。

- (1) 折り紙の折り方を、3DCG アニメーションで解説する。視点位置を変えて、自由に折り紙の構造を眺めることができる。
- (2) 音声合成を用いたナレーション機能を有する。音声合成と字幕により、国際的な教育現場で折り紙の折り方を教えることができる。
- (3) 3DCG アニメーションで折り紙を折る映像を提示する際、紙の厚みを表現する工夫を施した。

- (4) カメラワーク機能を有する。学習者はマウス操作によって様々な角度から折り紙の状態を見ることができる。
- (5) 3DCG アニメーションのスピードを自由に変更できる。学習者が 3DCG アニメーションをゆっくりとしたスピードで見たい時は、簡単にスピードを変更できる。
- (6) ひとつ前の折り紙の状態に巻き戻すことができる。
- (7) 3DCG 仮想空間をいかにして、実際の世界では不可能な大きさの紙を取り扱うことができる。
- (8) 折り紙を折るごとに形状を確認できる統合開発環境 "Interactive Folding" を提供する。

PCML-Navigator2 の実行画面を図 1 に示す。



図 1 PCML-Navigator2 の実行画面

### 4. Paper Craft Making Language2(PCML2)

**PCML2** は、折り紙の初期形状の定義と形状変化を、シナリオとして記述できるハイパーテキスト型のスクリプト言語である。折る面にシーングラフ機能を持たせ、リンクパスを変更することで、折り紙自体を切り離すことも可能である。

**PCML2** は、HTML 等と同じように、タグブラケットで囲んだタグブロックを記述文法の基本形態とする。<TAG>はブロックの開始、</TAG>の終端を表す。</TAG>は、ブロック内の処理が終わるまで実行待ち状態を維持する。タグブロックを入れ子状にして、同時に複数のタグブロックを実行することもできる。

**PCML2** は、テキストエディタやワードプロセッサで編集をすることができる。現在までに 12 種類のタグコマンドを開発した。表 1 に **PCML2** の主要なタグコマンドを、図 2 に国際的な教育現場を想定した英語による合成音声と字幕を行う **PCML2** 記述例を示す。

† 日本工業大学 大学院 工学研究科 情報工学専攻  
Graduate School of Computer and Information Major,  
Nippon Institute of Technology

表 1 PCML2 のタグコマンド一覧

タグ名	機能
<PAPER>	紙の定義
<POINT>	点の定義
<LINE>	折り線の定義
<FACE>	面の定義
<SCRIPT>	字幕を表示する
<SPEAK>	音声合成によって喋る
<FOLD>	紙を折る

```
<PAPER WIDTH="50" HEIGHT="50"
FTCCOLOR="150, 180, 56"
BKCOLOR="21,34,55" TEXTURE="tex.bmp"
DECAL="OFF">VertexA,VertexB,VertexC,VertexD
</PAPER>
<FACE NAME="Face1" PATH="/Global Face/Face1">
VertexA,VertexB,VertexC</FACE>
<LINE NAME="Line1">VertexA,VertexC</LINE>
<SCRIPT>Please fold an aspect of origami into half.
<SPEAK>Please fold an aspect of origami into half.
<FOLD AXIS="Line1" ANGLE="180"
WAY="MOUNT">Face1</FOLD>
</SPEAK>
</SCRIPT>
```

図 2 英語による合成音声と字幕の PCML2 タグ記述例

## 5. 研究内容

### 5.1. 折り重ねた紙の厚みの表現技法

実際の折り紙は、折り手順を進めるごとに、何重にも面が折り重ねられていくことが多い。しかし、一般的に 3DCG 空間上では平面の厚みは 0 であり、折り重ねても厚くならない。これらの問題を解消するため、山地、新藤らにより開発された衝突判定技法 Cyber Radar<sup>[4]</sup>を衝突センサーとして利用し、面に厚みを与えることで、現実的な折り紙の重なりを表現した。シナリオ制作者は、面の厚みを意識することなく、面の折り方を記述することができる。

Cyber Radar の設置位置を、図 3 に示す。

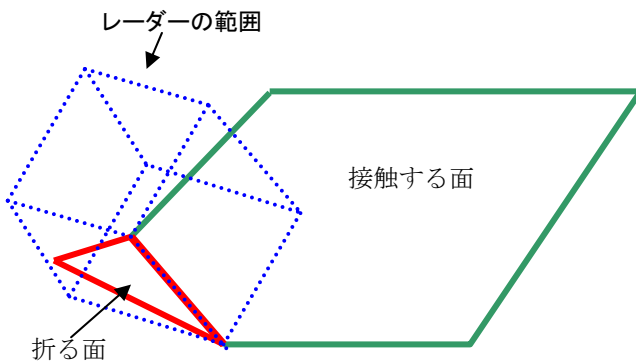
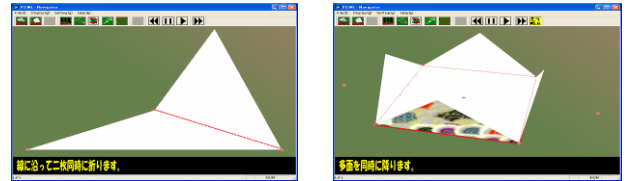


図 3 Cyber Radar を用いた紙の厚みの表現

### 5.2. 多面同時折り機能

PCML-Navigator は、操作者が迷わないよう確実に折ることができる情報を提供するため、当初は片手で折る技法に着目して設計した。しかし、実際の折り紙の教本には、

両手を用いた折り方の表記が多く存在している。そこで、同一軸、または異なる軸を用いて、相対する面に属さない面を他方向に同時折りできる多面同時折り機能を開発した。実行画面の比較を図 4、具体的な PCML タグの記述方法を図 5 に示す。



a) 二重折り

図 4 実行画面の比較

```
<PAPER WIDTH="50" HEIGHT="50" FTCCOLOR="50,50,50"
BKCOLOR="10,10,10" TEXTURE="tex.bmp"
DECAL="OFF">VertexA,VertexB,VertexC,VertexD
</PAPER>
<POINT NAME="VertexE" SPOT="0.5">VertexA,VertexC</POINT>
<POINT NAME="VertexF" SPOT="0.5">VertexA,VertexB</POINT>
<POINT NAME="VertexG" SPOT="0.5">VertexB,VertexC</POINT>
<POINT NAME="VertexH" SPOT="0.5">VertexC,VertexD</POINT>
<POINT NAME="VertexI" SPOT="0.5">VertexD,VertexA</POINT>
<FACE NAME="Face1">VertexA,VertexF,VertexI</FACE>
<FACE NAME="Face2">VertexF,VertexB,VertexG</FACE>
<FACE NAME="Face3">VertexG,VertexC,VertexH</FACE>
<FACE NAME="Face4">VertexH,VertexD,VertexI</FACE>
<LINE NAME="Line1">VertexF,VertexI</LINE>
<LINE NAME="Line2">VertexF,VertexG</LINE>
<LINE NAME="Line3">VertexG,VertexH</LINE>
<LINE NAME="Line4">VertexH,VertexI</LINE>
<SCRIPT>線に沿って折ります。
<FOLD AXIS="Line1" ANGLE="180" WAY="MOUNT">Face1
<FOLD AXIS="Line2" ANGLE="180" WAY="MOUNT">Face2
<FOLD AXIS="Line3" ANGLE="180" WAY="MOUNT">Face3
<FOLD AXIS="Line4" ANGLE="180" WAY="MOUNT">Face4
</FOLD></FOLD></FOLD></FOLD>
</SCRIPT>
```

図 5 多面同時折りの PCML 2 タグ記述例

### 5.3. 中割り折り機能

PCML-Navigator2 の 3DCG アニメーション機能として、折り軸に沿って面を回転移動させる山折り・谷折り機能に加え、新たに 2 つの折り軸を同時に回転させながら折り紙を折り込む中割り折り機能を開発した。移動する点と、その点に関連した面の中の移動しない点をベクトル成分の基準とし、3DCG 空間上で点の回転移動を行うことで 3DCG アニメーション表示する。FOLD タグのパラメータを含む一覧を表 2、実行画面を図 6、具体的に PCML2 タグを用いて記述した例を図 7、3DCG アニメーションに必要な要素を図 8 に示す。シナリオ記述では、図 7 の太字のように記述するだけでよい。中割り折りの際、面は自動的に分割する。自動的に面分割していく手順を説明する。まず<FOLD>タグで指定された軸の情報を基にして、面 ABE と面 DAE 上で新たに面分割し、4 つの面を得る。折りたい面 BEF を指定するだけで、自動的に中割り折りに必要な親の面 4 つを分割して生成し、その中の 2 つの面を分割して、子の面を生成する。具体的に中割り折りを折った後の折り紙の面の状態を表したものを、図 9 に示す。

表 2 FOLD タグのパラメーター一覧

パラメータ名	機能
MOUNT	山折りを行う。
VALLEY	谷折りを行う。
NAKAWARI	中割り折りを行う。

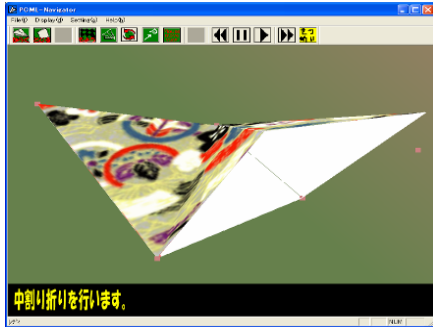


図 6 中割り折りの実行画面

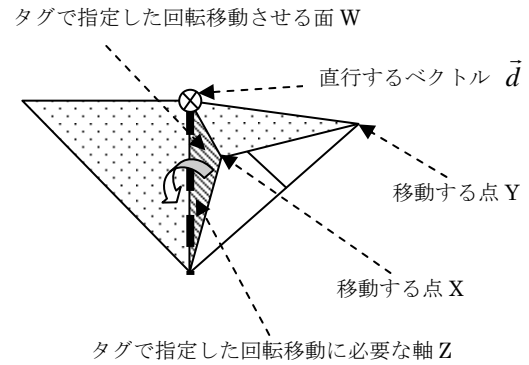


図 8 中割り折りに必要な要素

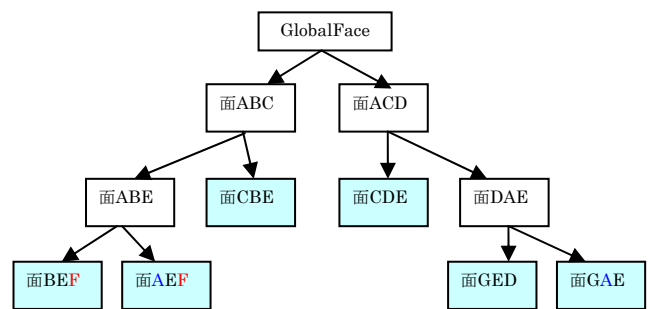


図 9 中割り折り実行後の面分割ツリー

```

<PAPER WIDTH="50" HEIGHT="50" FTCOLOR="10,10,10"
  BKCOLOR="10,10,10" TEXTURE="tex.bmp"
  DECAL="OFF"> VertexA,VertexB,VertexC,VertexD
</PAPER>
<FACE NAME="Face1">VertexA,VertexB,VertexC</FACE>
<LINE NAME="Line1">VertexA,VertexC</LINE>
<SCRIPT>線に沿って折ります。
  <FOLD AXIS="Line1" ANGLE="180"
    WAY="MOUNT">Face1</FOLD>
</SCRIPT>

<POINT NAME="VertexE" SPOT="0.5">VertexA,VertexC</POINT>
<POINT NAME="VertexF" SPOT="0.5">VertexB,VertexC</POINT>
<POINT NAME="VertexG" SPOT="0.5">VertexC,VertexD</POINT>
<FACE NAME="Face2">VertexB,VertexC,VertexE</FACE>
<FACE NAME="Face3">VertexB,VertexF,VertexE</FACE>
<FACE NAME="Face4">VertexC,VertexD,VertexE</FACE>
<FACE NAME="Face5">VertexC,VertexG,VertexE</FACE>
<LINE NAME="Line3">VertexB,VertexE</LINE>

<SCRIPT>中割り折りを行います。
  <FOLD AXIS="Line3" ANGLE="180"
    WAY="NAKAWARI">Face3</FOLD>
</SCRIPT>

<POINT NAME="VertexH" SPOT="0.5">VertexA,VertexB</POINT>
<POINT NAME="VertexI" SPOT="0.5">VertexA,VertexD</POINT>
<FACE NAME="Face6">VertexA,VertexH,VertexE</FACE>
<FACE NAME="Face7">VertexI,VertexE,VertexD</FACE>
<LINE NAME="Line4">VertexD,VertexE</LINE>
<SCRIPT>中割り折りを行います。
  <FOLD AXIS="Line4" ANGLE="180"
    WAY="NAKAWARI">Face7</FOLD>
</SCRIPT>
    
```

図 7 中割り折りの PCML 2 タグ記述例

この機能を用いて、PCML2 に直接移動点や基準となるベクトルを記述して、自動的に面分割と 3DCG アニメーションを行う機能を構築できた。折り紙の教本には、折り軸と面を用いた折り方だけでなく、指定する点を軸に沿って折り込むといった別の表現による折り方も記述されているため、汎用性の高い折り方の記述を実現できた。

## 6. 多重折りシナリオの支援機能

PCML2 は、事前に折り紙の展開図を定義することなく、折り方をインタラクティブに記述することを開発目標にしている。本技法は、面分割機能による折り紙構造のデータ管理と密接に関わっており、折り紙の折り方の手順を巻き戻す技法としても有効であると考えられる。しかし、面を折る頻度が多ければ多いほど分割後の面は多くなる。分割後に分割前の面を使うことなく、絶えず直前に分割した面の状態を意識しながら記述する必要がある。(図 10)

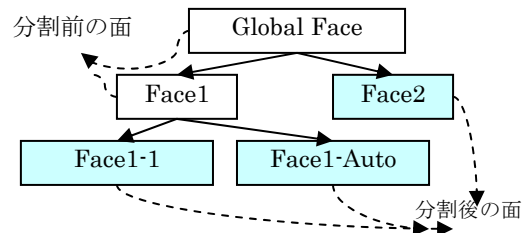


図 10 折り紙を構成する面のデータ構造

PCML<sup>[5][6]</sup>とPCML2の双方のシナリオ記述量を調べるため、試用実験として、折り紙の猫のシナリオを制作し、記述されたタグの数を解析した。解析結果を表3、表4に示す。PCML2で折り紙の猫を記述したところ、表5のタグ数で折り紙を表現することができた。(図11)図10に当てはめると、分割前の面が7枚存在するのにに対し、分割後の面は8枚存在している。実際の記述時には混在している状態で指定するため、タグ指定の際に誤った面を指定する危険がある。しかし、この問題を低減する技法は未だ確立されておらず検討課題である。記述の際に多重化された面を識別する支援機能の開発が必要であると考えている。

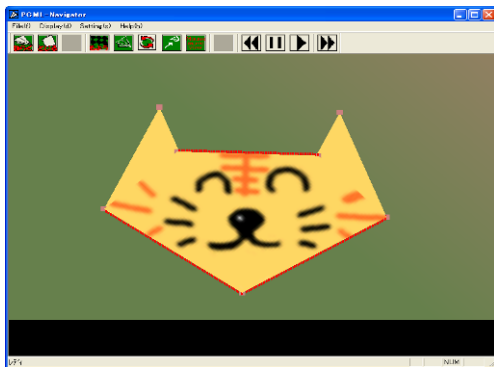


図11 シナリオ:猫の折り方

表3 PCMLのタグ解析

文字数	2247文字
行数	57行
<POINT>	9個
<LINE>	7個
<FACE>	8個
<FOLD>	10個

表4 PCML2のタグ解析

文字数	1985文字
行数	49行
<POINT>	9個
<LINE>	7個
<FACE>	7個
<FOLD>	7個

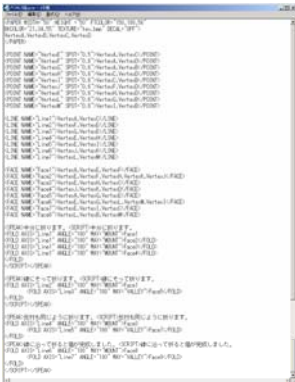


図12 PCMLファイル

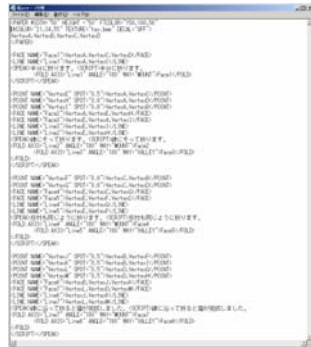


図13 PCML2ファイル

## 7. まとめと今後の検討

3DCG空間上で折り紙に臨場感を与えるための紙同士の重なりに厚みを持たせる手法、また複雑な折り紙を折るための多面同時折りと中割り折り機能を開発した。しかし、現行のPCML-Navigator2は、まだ鶴のような複雑な折り紙を折ることが出来ない。

今後の課題は以下の通りである。

- (1) 複雑な折り紙の代表である鶴を折れるようにシステムを改善する。
- (2) 視覚的に折り紙を折ることが出来る支援システムを開発する。
- (3) 複数の折り紙の合体を検討する。
- (4) 折り紙の実験授業を行って検証する。

以上の課題と、折り紙の学習効果の向上を目的として研究を進める予定である。

## 参考文献

- [1] 宮崎 慎也, 安田 孝美, 横井 茂樹, 鳥脇 純一郎: 仮想空間における折り紙の対話型操作の実現, 情報処理学会論文誌, Vol. 34, No.9, pp.1994-2001, Sep. 1993
- [2] 三谷純, 鈴木宏正: 折り紙の構造把握のための形状構築とCG表示, 情報処理学会論文誌, Vol. 46, No.1, pp. 247-254, Jun. 2005
- [3] 宮崎慎也: 折り紙シミュレーション, <http://www.om.sccs.chukyo-u.ac.jp/main/research/origami/indexj.html>, 2003
- [4] 山地 秀美, 新藤 義昭: Zバッファ法を利用したオブジェクトおよび衝突検出, 情報処理学会論文誌, Vol.43, No.6, pp.1899-1909, 2002
- [5] Naoki Sone, Yoshiaki Shindo: Navigation System of Japanese folding paper based on the 3D-CG animation, International Workshop on Advanced Image Technology (IWAIT2006), pp.514-519, 2006
- [6] Naoki Sone, Yoshiaki Shindo: Navigation System of Japanese Folding Paper Based on the 3DCG Animation, Proceedings of the 5th IEEE International Conference on Advanced Learning Technologies (ICALT2005), pp.626-627, 2005
- [7] 新藤義昭, 阿部正平: OpenGL リアルタイム 3D プログラミング, 2000
- [8] 酒井幸市: OpenGL 3D プログラミング, 2000
- [9] Jackie Neider, Tom Davis, Mason Woo: OpenGL Programming Guide The Official Reference Document for OpenGL, Release 1, 1993