

# 岐阜県生産情報技術研究所研究報告

第3号

平成13年度

岐阜県生産情報技術研究所

Gifu Prefectural Research Institute of Manufacturing Information Technology

# 目 次

1. ヒューマノイドロボット基本ハードウェアの開発 （人とロボットが同居するためのロボット要素技術に関する研究） .....	1
2. インタラクションに基づく親和性の向上に関する研究 （人とロボットが同居するためのロボット要素技術に関する研究） .....	9
3. 柔軟な素材を用いたアクチュエータの開発 （人とロボットが同居するためのロボット要素技術に関する研究） .....	13
4. ネットワークを介した分散型エンジニアリングデータベースシステムの開発（第3報） .....	19
5. VR技術を応用した設計支援システムの開発（第3報） .....	23
6. バーチャルモックアップによる製品評価システムの開発（第1報） .....	29
7. 異なる没入型ディスプレイシステム間における開発環境の統合.....	33
8. 仮想物体の変形を考慮した接触判定手法の提案.....	35
9. 共進化 GA による動的施設配置問題へのアプローチ.....	39
10. 力覚提示機能を有する遠隔作業システムに関する研究（第2報） .....	43
11. ロボット教示高度化のためのセンシング手法に関する研究.....	49
12. 立体紙製品の構造解析に関する研究（第2報） .....	53
13. 陶磁器製品の新しいプロセッシングの開発 .....	57
14. 衣服の実需対応型生産システムの確立 .....	61

# ヒューマノイドロボット基本ハードウェアの開発

- 人とロボットが同居するためのロボット要素技術に関する研究 -

稲葉 昭夫      光井 輝彰      西村 太志

千原 健司      田中 等幸

## Development of biped locomotion legs and an upper limb

Development of Basic Technologies for Coexistence of Human Being and Robots

Akio INABA    Teruaki MITSUI    Futoshi NISHIMURA  
Kenji CHIHARA    Tomoyuki TANAKA

あらまし わが国において世界に例を見ない高齢化が進行する中で、労働人口の減少、障害者や寝たきり老人の増加、それに伴う介護者等の不足などから、福祉をはじめとする多くの分野において、各種の支援にロボットを利用することが強く期待されている。このような分野に使用するロボットには、産業用ロボットとは異なり、「人がロボットに合わせるのではなく、ロボットが人に合わせる」といった新たな機能が必要となる。この機能を実現する要素技術の1つとして、人とロボットの親和性向上技術がある。本プロジェクトでは、ロボットが人の生活環境で各種の支援を行うためのプラットフォームの開発を目指し、人とロボットがインタラクションを行うことにより、人とロボットの親和性を向上させる技術等について検討する。本報では、このプロジェクトにおける研究用ロボットプラットフォームの開発（本年度は、ロボットの基本ハードウェアを開発）について報告する。

キーワード ヒューマノイドロボット、2足歩行、人とロボットの共存

### 1. はじめに

現在、わが国において世界に例を見ない高齢化が進行する中で、高齢者支援ロボットや福祉関連ロボットは、今後、市場の拡大が期待できる民生用ロボットの有力な候補である。現在、この分野の福祉機器は、介護者支援を目的に開発されているものが多い<sup>[1]</sup>が、超高齢化社会においては、高齢者の自立を支援するロボット技術に大きな期待が寄せられている。

このような分野に使用するロボットには、産業用ロボットとは異なり、「人がロボットに合わせるのではなく、ロボットが人に合わせる」といった新たな機能が必要となる。この機能を実現する要素技術の1つとして、人とロボットの親和性向上技術がある。この技術は、人のロボットに対する違和感や恐怖感を和らげるための技術である。これを実現するアプローチとしては、ロボットと人が相互にリアクションすることにより親和性を向上させる手法（インタラクションに基づく手法）とロボットに柔軟な素材を使用したり、機械的な安全機構を装着したりするハードウェア的な手法が考えられる。これらの手法に関して、これまで幾つかの取組がなされている。前者に関して、(株)国際電気通信基礎技術研究所(ATR)の「日常活動型ロボットプロジェクト」<sup>[2]</sup>では、人とインタラクションを行うロボビー(Robovie)を開発した。ロボビーにおいては、人への問いかけを行うなどのイン

タラクション動作が実現されている。日本電気(株)(NEC)は、家庭用の情報端末としての移動ロボットPapero<sup>[3]</sup>を開発した。Paperoにおいては、主に音声を用いたインタラクションが実現されている。しかし、これらの研究において、人とロボットの間に十分な親和性が実現されているとは言い難い。ロボビーにおいては、個人を識別し、それに合わせた動作を生成するまでには至っていない。Paperoにおいては、個人を識別したインタラクションは実現されているが、ハンド等は装着されておらず、動きを伴ったリアクションは、ロボットの移動のみに留まっている。後者に関しては、マニピュレータ表面に粘弾性被膜を付加し、緊急停止と組み合わせることにより衝突安全を実現する試み<sup>[4]</sup>や機械的なインピーダンスを組み込んだ関節の開発<sup>[5]</sup>などがあるが、実用には至っておらず、人に対して十分な親和性が実現されているとは言い難い。

以上を踏まえ、本研究プロジェクトでは、人とロボットの親和性を向上させるため、次に示す研究課題に取り組む。

- 1) インタラクションに基づく親和性向上に関する研究  
画像情報に基づいて人を識別し、その意図に応じたリアクション（ロボットの動作を含む）を行う技術を開発する。ロボットが、各個人に対応したリアクションを返すことにより、従来手法に比べ、ロボットへの親近感が向上することが期待できる。

本課題における具体的な内容としては、研究用ロボットプラットフォームの開発、人物認識、リアクションの行動生成アルゴリズム等がある。

2) 柔軟な素材を用いたアクチュエータの開発

小型の積層静電アクチュエータを新たに開発する。これにより、ハードウェア的にソフトなアクチュエータの民生用ロボットへの適用可能性を検討する。

本報では、インタラクションに基づく親和性向上に関する研究における研究用ロボットプラットフォームの開発(本年度は、ロボットの基本ハードウェアを開発)について報告する。(他の課題については、別報にて報告する。)

2. 開発するロボットの仕様

本研究では、人とのインタラクションを行うための研究用プラットフォームとして、小型のヒューマノイドロボットを開発する。その仕様を次に示す。

- 1) 関節自由度 30自由度(図1)
- 2) 機能
  - ・画像認識
  - ・音声認識
  - ・音声合成
- 3) その他
  - ・身長 80cm程度
  - ・体重 15kg以内
  - ・電源 バッテリーと外部電源の併用

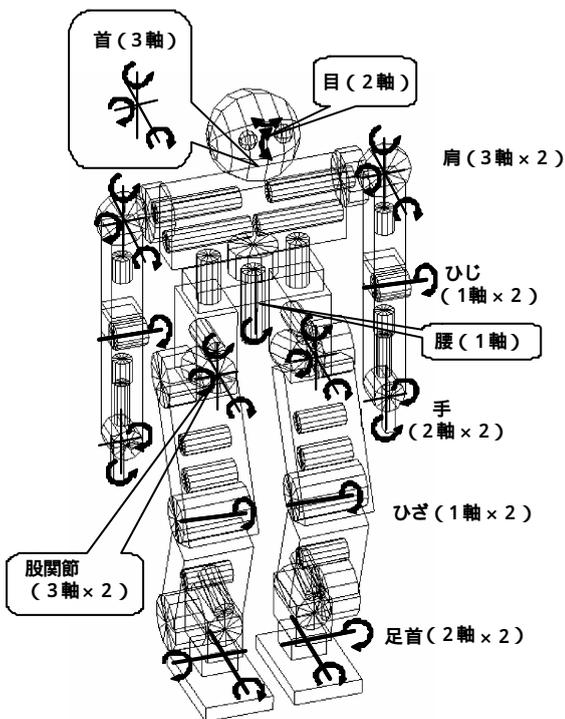


図1 ロボットの関節自由度

3. 制御ハードウェアの設計

3.1 システム構成

ヒューマノイドロボットは、非常に多くの関節を同時に制御するとともに画像、音声処理や行動計画の生成等多くの情報を処理する必要がある。さらに、関節自由度が多いため、可能な限り配線量を少なくする必要がある。このため、処理内容のレベルを3つの階層(アプリケーション、運動制御、モータ制御)に分類し、これらに関して独立のコントローラで処理することとした(図2)。以下に各コントローラの構成と処理内容を示す。

(1) アプリケーションコントローラ

アプリケーションコントローラは、人とのインタラクションを行うための行動計画を行う。具体的な処理内容としては、人物認識、音声認識、音声合成、行動パターンの生成を行う。この結果(行動パターンデータ)を、下位の運動制御コントローラに送る。

アプリケーションコントローラのハードウェア構成を図2に示す。この構成においては、比較的処理の重い人物認識と音声処理を別モジュールにして、負荷を分散させている。

(2) 運動制御コントローラ

運動制御コントローラは、あらかじめ登録した行動パターンに従って、各関節の移動量を計算し、その結果(関節移動量)をモータコントローラに送る。また、モータコントローラから実際の関節の原点からの移動量を受け取る。このデータと各種のセンサ(ロードセル(足裏),

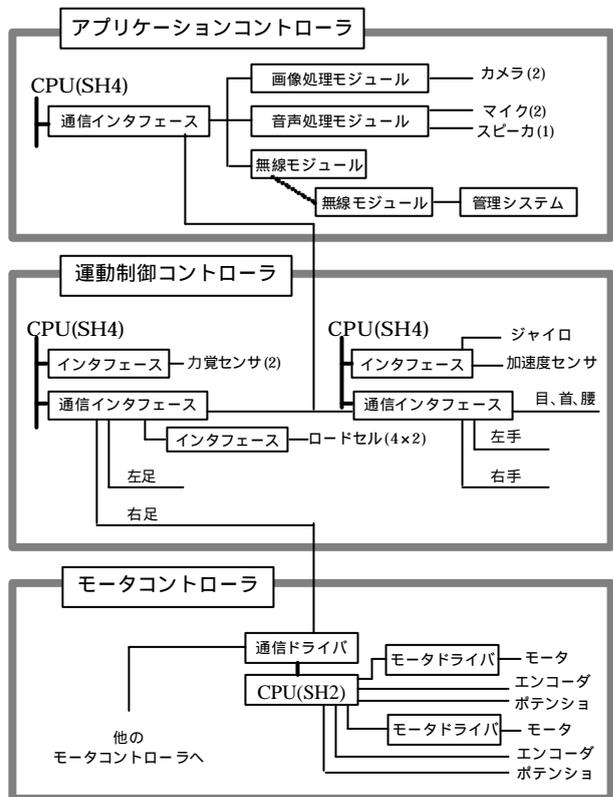


図2 コントローラのシステム構成

力覚センサ(足首),ジャイロ,加速度センサ)の値から,歩行の安定化制御を行い,その結果をモータコントローラへ送信する関節移動量に反映させる.

(3) モータコントローラ

モータコントローラは,運動制御コントローラから関節移動量を受け取り,モータを制御するとともに,現在の原点からの関節移動量を運動制御コントローラに送る.

3.2 体内LAN

本システムは,モータコントローラをヒューマノイドロボットの各部に分散させて配置している.歩行の安定化を図るためには,運動制御コントローラからモータコントローラをミリ秒のオーダーで制御する必要がある.このため,体内LANは,次に示す要件を満たす必要がある.

- 1) 高速(1Mbps以上)に通信ができる.
- 2) CPUに大きな負荷をかけない.
- 3) 配線が容易である.(小型のコネクタでも対応可能)
- 4) 小型のワンチップマイコンでも容易に実現できる.
- 5) ノイズの影響を受けにくい.
- 6) マルチキャストな通信が可能である.

本研究では,これらの要件を満たし,実装が容易であることから,RS-485を体内LANとして使用することとする.また,CPUへの負荷を最小にするため,アプリケーションコントローラと運動制御コントローラに関しては,FIFO機能のあるドライバICを使用する.

4. 歩行制御アルゴリズム

2足歩行ロボットにおいては,動力的な安定規範としてZMP(Zero Moment Point)<sup>[6]</sup>が一般に用いられている.このZMPは,Vukobratovicによって提案されたパラメータで,全身運動にともなって発生する慣性力と重力の合力が路面に作用する点(回転中心)である.このZMPが路面に接しているロボットの足裏の内部(境界を除く)にあれば,ロボットに働くモーメントを打ち消す反力が足裏と路面の間に働き,ロボットは転倒しない.本研究においてもこのZMP規範に基づいて歩行アルゴリズムを構築する.

本研究では,歩行アルゴリズムをZMP規範を満たす歩容を生成する問題と外乱等に対して歩行の安定化を図る問題に分けて検討する.

4.1 歩容の生成

歩容の生成に関してはこれまでいろいろな手法が提案されている.例えば,山口,高西ら<sup>[7]</sup>は,安定なZMP軌道をあらかじめ与えて,その軌道を効率的にFFTを用いて安定な軌道へ収束させる手法を提案した.西脇ら<sup>[8]</sup>は,ZMP導出式を線形・非干渉化して高速に安定な軌道へ収束させる手法を提案した.梶田<sup>[9]</sup>は,線形倒立振子モードを規範とする歩容生成手法を提案した.この手法は,歩容が方程式で表現されているため,リア

ルタイムに歩容を変更することができるという特徴がある.その他,遺伝的アルゴリズム(GA)を用いた生成方法<sup>[10]</sup>,CPG(Central Pattern Generator)に基づいて生成する手法<sup>[11]</sup>等が提案されている.また,これらの手法の多くは,ロボットを側面および正面から見た2次元平面に投影した運動(Sagittal Plane, Lateral Plane: 図3)に分解し,互いの運動の干渉は無視できると仮定し,それぞれ平面に対して歩容を定義している<sup>[14]</sup>.

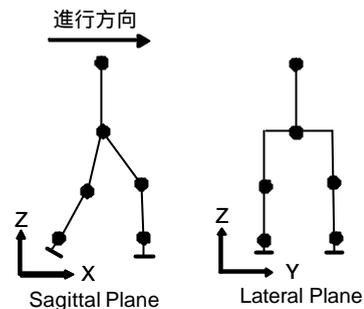


図3 Sagittal PlaneとLateral Plane

本研究では,問題を簡単化するため,歩容をSagittal Plane, Lateral Planeに分離して定めることとする.また,具体的な歩容は,倒立振子の倒れ込みの自由運動を基本としているため,エネルギー消費量が小さくなることが期待でき,リアルタイムに歩容を生成することが可能であるといった理由により,梶田が提案した手法<sup>[9]</sup>に基づいて歩容を生成することとする.但し,この文献には,Sagittal Planeの運動については記述されているが,Lateral Planeの運動は陽には記述されていない.このため,本研究においては,Lateral Planeの運動を倒立振子の運動に基づいて定義する.

また,歩容を支持脚の状態により,次の4つの基本フェーズに分類する(図4).ここで,初期状態は,両足を揃え,腰が水平に運動できるようにするため両膝を曲げた状態とする.

- a. 初期状態から両足支持期になるまで
  - b. 両足支持期
  - c. 片足支持期
  - d. 両足支持期から初期状態になるまで
- 各フェーズに対する具体的な歩容(歩行パターン)を,支持脚に関して,足首から見た腰の運動として,遊脚に

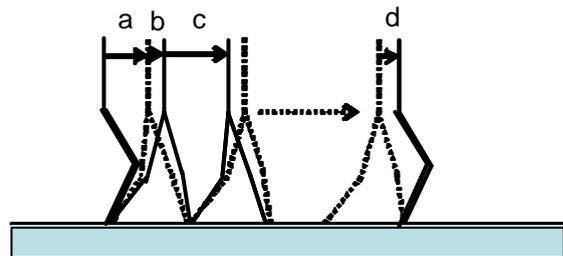


図4 4つの基本フェーズ

表 1 歩容に関する設定パラメータ

歩容パラメータ	
一歩あたりの片足支持期の時間	$T_s$
一歩あたりの両足支持期の時間	$T_w$
一歩の歩幅	$X_s$
両足支持期における腰の X 軸方向の移動量	$X_w$
重心の Y 軸方向の最大移動量	$Y_s$
両足支持期開始時の Y 軸方向の重心位置	$Y_w$
遊脚の運動における足底の床からの最大高	$h$
腰の足首からの高さ	$k$
物理パラメータ	
重心の足首からの高さ	$Z_c$
股関節と重心の間の Y 軸方向の距離	$c$
腰から重心までの Z 軸方向の距離	$d$
足首から膝までの長さ	$L_1$
膝から股までの長さ	$L_2$

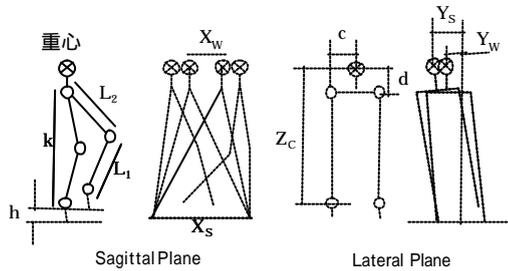


図 5 歩容に関する設定パラメータ

関しては、腰から見た足首の運動として記述する．このように運動を定義することにより、具体的な各関節の回転移動量を容易に求めることができる．本研究において、歩行パターンの定義に用いたパラメータを表 1 および図 5 に示す．

4. 1. 1 Sagittal Plane の歩行パターン

最初に、支持脚の腰の運動について検討する．線形倒立振子モードにおいて、水平面の歩行に関して、腰の高さを定数として設定するため、x 座標における運動のみを定めればよい．線形倒立振子モードにおける片足支持期の腰の軌跡は、

$$x = X_I \cdot \cosh\left(\frac{t}{T_C}\right) + T_C V_I \cdot \sinh\left(\frac{t}{T_C}\right)$$

となる．ここで、 $T_C = \sqrt{Z_c/g}$ 、 $X_I$ 、 $V_I$ 、 $g$  は、初期位置、初期速度、重力加速度である．

次に、片足支持期における歩容パラメータから初速度  $V_{0x}$  を求めると

$$V_{0x} = \left\{ X' + X' \cdot \cosh\left(\frac{T_s}{T_C}\right) \right\} / \left\{ T_C \cdot \sinh\left(\frac{T_s}{T_C}\right) \right\}$$

となる．ここで、 $X' = (X_s - X_w)/2$  である．

本研究では、フェーズ a、d については、各フェーズ

の最初と最後における位置と速度を満足させる 3 次関数として歩容を与える．フェーズ b (両足支持期) は、理想的な線形倒立振子モードの歩容には存在しないが、歩行安定化制御等により目標パターンから外れた腰の運動を補正するために設定している．位置と速度と加速度の補正を実現する最小次元の 5 次関数として歩容を与える．これらより、各フェーズにおける腰の運動は次のようになる．

フェーズ a

$$x = \left( \frac{V_{0x} T_s - 2X'}{T_s^3} \right) t^3 + \left( \frac{3X' - V_{0x} T_s}{T_s^2} \right) t^2$$

フェーズ b

$$x = \left( \frac{12P_{EX} - 12P_{SX} - (6V_{EX} + 6V_{SX})T_w - (A_{SX} - A_{EX})T_w^2}{2T_w^5} \right) t^5 + \left( \frac{30P_{SX} - 30P_{EX} + (14V_{EX} + 16V_{SX})T_w + (3A_{SX} - 2A_{EX})T_w^2}{2T_w^4} \right) t^4 + \left( \frac{20P_{EX} - 20P_{SX} - (8V_{EX} + 12V_{SX})T_w - (3A_{SX} - A_{EX})T_w^2}{2T_w^3} \right) t^3 + \frac{A_{SX}}{2} t^2 + V_{SX} t + P_{SX}$$

ここで、 $P_{SX}$ 、 $V_{SX}$ 、 $A_{SX}$  は前フェーズ終了時の、位置、速度、加速度であり、 $P_{EX}$ 、 $V_{EX}$ 、 $A_{EX}$  は次フェーズの初期値となる位置、速度、加速度で、

$$P_{EX} = (X_s + X_w)/2, V_{EX} = V_{0x}, A_{EX} = \begin{cases} -X'/T_C^2 & : \text{次のフェーズが c} \\ 2\{(3X' - 2V_{0x}T_s)/T_s\} & : \text{次のフェーズが d} \end{cases}$$

となる．

フェーズ c

$$x = -X' \cosh\left(\frac{t}{T_C}\right) + T_C V_{0x} \sinh\left(\frac{t}{T_C}\right)$$

フェーズ d

$$x = \left( \frac{V_{0x} T_s - 2X'}{T_s^3} \right) t^3 + \left( \frac{3X' - 2V_{0x} T_s}{T_s^2} \right) t^2 + V_{0x} t - X'$$

次に遊脚の運動について検討する．遊脚の運動は着地時に足裏が地面に対し垂直 / 水平方向に速度が 0 となるように 4 次関数で記述する．4 次関数で運動を定義した理由は、各フェーズの位置、速度を連続的に結合させるためである．ここでの運動は、腰を原点とし、進行方向を +x、鉛直下向きを +z として記述する．

フェーズ a

$$x = -\frac{2V_{0x}}{T_s^3} t^4 + \left( \frac{3V_{0x}}{T_s^2} - \frac{X_s + X_w}{T_s^3} \right) t^3 + \left( \frac{3(X_s + X_w)}{2T_s^2} - \frac{V_{0x}}{T_s} \right) t^2$$

$$z = -\frac{16h}{T_s^4} t^4 + \frac{32h}{T_s^3} t^3 - \frac{16h}{T_s^2} t^2 + k$$

フェーズ b

両脚支持期に関しては、腰の位置を原点としているため、腰が動く分だけ逆方向に足先が動いているとみなせる。よって、

$$x = \frac{X_S + X_W}{2} - (X_b - P_{SX})$$

$$z = k$$

ここで  $X_b$  はフェーズ b の腰の軌跡  $x$  である。

フェーズ c

$$x = -\frac{2(X_S + X_W + V_{0x}T_S)}{T_S^3}t^3 + \frac{3(X_S + X_W + V_{0x}T_S)}{T_S^2}t^2 - V_{0x}t - \frac{X_S + X_W}{2}$$

$$z = -\frac{16h}{T_S^4}t^4 + \frac{32h}{T_S^3}t^3 - \frac{16h}{T_S^2}t^2 + k$$

フェーズ d

$$x = \frac{2V_{0x}}{T_S^3}t^4 - \left(\frac{X_S + X_W + 5V_{0x}T_S}{T_S^3}\right)t^3 + \left(\frac{3X_S + 3X_W + 8V_{0x}T_S}{2T_S^2}\right)t^2 - V_{0x}t - \left(\frac{X_S + X_W}{2}\right)$$

$$z = -\frac{16h}{T_S^4}t^4 + \frac{32h}{T_S^3}t^3 - \frac{16h}{T_S^2}t^2 + k$$

4. 1. 2 Lateral Planeでの運動

Lateral Plane に関する運動の記述は、重心に質点が集中していると仮定した倒立振子の根元関節に一定のトルクが働く場合の運動方程式から重心の軌道関数を計算する。その後、幾何学的に足首と股の関節角を計算する。

図 6 に倒立振子のモデルを表す。重心に質点  $m$  が集中していると仮定した長さ  $Z_C$  の倒立振子の根元関節に一定のトルク  $\tau$  が働く場合の運動方程式は、

$$mZ_C^2\ddot{q} - mgZ_C \cdot \sin q = \tau$$

この運動方程式の一般解は、 $q$  が十分小さいとすると、

$$q = A \cdot \exp(\mathbf{a} \cdot t) + B \cdot \exp(-\mathbf{a} \cdot t) + C$$

となる。ここで、 $\mathbf{a} = \sqrt{g/Z_C}$  で  $A, B, C$  は未知数である。また

$w = \sin^{-1}(Y_W/Z_C)$ 、 $s = \sin^{-1}(Y_S/Z_C)$  として、これら

の間を往復運動するように未知数  $A, B, C$  を定めると

$$C = \frac{s + b^2 s - 2b w}{(b-1)^2}, A = \frac{s-C}{2b}, B = \frac{s-C}{2b^{-1}}$$

となる。ここで、 $b = \exp\{\mathbf{a} \cdot (T_S/2)\}$  である。

本研究では、フェーズ a, d に関しては、フェーズ b と境界が速度までなめらかにつながるように 5 次関数として歩容を与える。フェーズ b は、歩行安定化制御等に

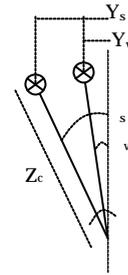


図 6 倒立振子のモデル

より目標パターンから外れた腰の運動を補正するために 5 次関数として歩容を与える。これらより、各フェーズにおける腰の運動は次のようになる。

フェーズ a

$$y = \left(\frac{-24Y_W - 4V_{0y}T_S}{T_S^5}\right)t^5 + \left(\frac{16Y_S + 52Y_W + 8V_{0y}T_S}{T_S^4}\right)t^4 + \left(\frac{-32Y_S - 34Y_W - 5V_{0y}T_S}{T_S^3}\right)t^3 + \left(\frac{16Y_S + 7Y_W + V_{0y}T_S}{T_S^2}\right)t^2$$

ここで、 $V_{0y}$  は、フェーズ c における初速度で、

$$V_{0y} = Z_C(A \cdot \mathbf{a} - B \cdot \mathbf{a})$$

となる。

フェーズ b

$$y = \left(\frac{12P_{EY} - 12P_{SY} - (6V_{EY} + 6V_{SY})T_W - (A_{SY} - A_{EY})T_W^2}{2T_W^5}\right)t^5 + \left(\frac{30P_{SY} - 30P_{EY} + (14V_{EY} + 16V_{SY})T_W + (3A_{SY} - 2A_{EY})T_W^2}{2T_W^4}\right)t^4 + \left(\frac{20P_{EY} - 20P_{SY} - (8V_{EY} + 12V_{SY})T_W - (3A_{SY} - A_{EY})T_W^2}{2T_W^3}\right)t^3 + \frac{A_{SY}}{2}t^2 + V_{SY}t + P_{SY}$$

ここで、 $P_{SY}$ 、 $V_{SY}$ 、 $A_{SY}$  は前フェーズ終了時の、位置、速度、加速度であり、 $P_{EY}$ 、 $V_{EY}$ 、 $A_{EY}$  は次フェーズの初期値となる位置、速度、加速度で、

$$P_{EY} = -Y_W, V_{EY} = -V_{0y},$$

$$A_{EY} = \begin{cases} Z_C(A \cdot \mathbf{a}^2 + B \cdot \mathbf{a}^2) & \text{: 次のフェーズが c} \\ 2\left\{\frac{16Y_S - 23Y_W - 6V_{0y}T_S}{T_S^2}\right\} & \text{: 次のフェーズが d} \end{cases}$$

となる。

フェーズ c

$$y = Z_C \cdot \sin = Z_C \cdot \sin(A \cdot \exp(\mathbf{a} \cdot t) + B \cdot \exp(-\mathbf{a} \cdot t) + C)$$

フェーズ d

$$y = \left(\frac{24Y_W + 4V_{0y}T_S}{T_S^5}\right)t^5 + \left(\frac{16Y_S - 68Y_W - 12V_{0y}T_S}{T_S^4}\right)t^4 + \left(\frac{-32Y_S + 66Y_W + 13V_{0y}T_S}{T_S^3}\right)t^3 + \left(\frac{16Y_S - 23Y_W - 6V_{0y}T_S}{T_S^2}\right)t^2 + V_{0y}t + Y_W$$

4.1.3 歩行シミュレーション

前節で定めた歩容に関してロボットがどのような挙動を示すかをシミュレーションにより検証した。このシミュレーションには、機構解析ソフトウェアDADSを使用した。シミュレーションに使用したパラメータは表2のとおりである。X<sub>s</sub>, X<sub>w</sub>, Y<sub>s</sub>, Y<sub>w</sub>に幅があるのは、歩行中に歩幅等を変更しているためである。

表2 シミュレーションに使用したパラメータ

Ts	1.2	sec	Zc	0.59	m
Tw	0.4	sec	c	0.07	m
Xs	0.05 ~ 0.1	m	d	0.1	m
Xw	0.019 ~ 0.038	m	L1	0.15	m
Ys	0.029 ~ 0.035	m	L2	0.15	m
Yw	0.017 ~ 0.02	m			
h	0.025	m			
k	0.28	m			

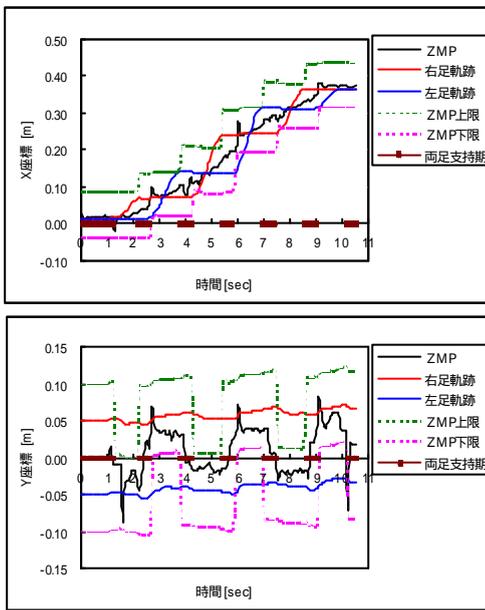


図7 シミュレーション結果

図7にシミュレーション結果を示す。図7に示すグラフにおいて、どの状態においてもZMPは足裏の領域（グラフにおいて、ZMP上限、下限を示す破線に挟まれた領域）に存在することが確認でき、設定した歩容の妥当性を確認した。

4.2 歩行の安定化

外乱等に対する歩行安定化問題は、指標とするZMPの測定とそれを用いたフィードバック制御の2つの課題に大別できる。本研究では、これらについて検討した。

4.2.1 ZMPの測定

ZMPの測定に関しては、足裏センサを用いた手法<sup>[12]</sup>と力覚センサを用いた手法<sup>[13]</sup>がこれまでに提案されている。これらの測定法は原理的には等価であるが、ロボットの振動（サーボ振動を含む）等の外乱の影響でどちらの手法が有利であるかは簡単に見極めることは困難であるため、両者を併用することとする。以下にこれらの測定に関する原理を示す。

足裏センサ（ロードセル）によるZMP測定

図8に示すようにロードセル（A～D）の中心が足底に装着されているとすると、片足支持期のZMPは、次式により求まる。

$$p_x = \frac{(f_A + f_B)\mathbf{a} + (f_C + f_D)\mathbf{b}}{f_A + f_B + f_C + f_D}$$

$$p_y = \frac{(f_A + f_C)\mathbf{g} + (f_B + f_D)\mathbf{d}}{f_A + f_B + f_C + f_D}$$

ここで、 $f_A, f_B, f_C, f_D$ はロードセルが検出した力である。

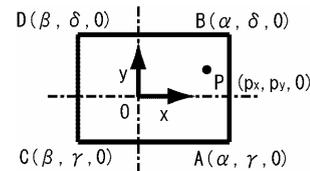


図8 ロードセルによる測定

力覚センサによるZMP測定

図9に示すように、足底座標系の原点は足首中心を通る足底平面に垂直な直線と足底平面が交わる点とする。図中の記号Sは6軸力覚センサおよびその位置 $(s_x, s_y, s_z)$ 、Aはセンサより下の構造物（質量m）の重心位置 $(a_x, a_y, a_z)$ を表す。このとき、ZMPは次式により求まる。

$$p_x = \frac{-s_z F_x - M_y - m g a_x}{F_z - m g}$$

$$p_y = \frac{-s_z F_y + M_x - m g a_y}{F_z - m g}$$

ここで、 $F_x, F_y, F_z, M_x, M_y$ は、力覚センサで検出した力とモーメントで、 $g$ は、重力加速度である。

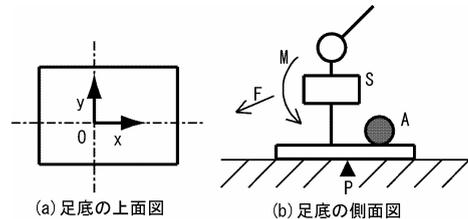


図9 6軸力センサによるZMP測定

4.2.2 歩行安定化のためのフィードバック制御

外乱等に対する歩行安定化制御に関しては、いくつかの手法が提案されている。平井ら<sup>[15]</sup>は、上肢に回転運動を与えることによりZMP補正を行う手法を提案した。長坂ら<sup>[12]</sup>は、腰の位置に補正を加える体幹位置コンプライアンス制御を提案した。Qiang Huangら<sup>[16]</sup>は、足首の回転移動量を調整してZMP補正をする手法を提案した。

本研究では、上肢の運動は人に対するリアクションに使用することを計画しているため、上肢の姿勢に影響を与えない体幹位置コンプライアンス制御(図10)に基づいたフィードバック制御を使用する。このフィードバック制御においては、Qiang Huang らに従って、足裏にフィードバック制御を行わない不感領域(転倒に対する安全領域)を設定し、ZMPがこの領域から外れた距離に関してPD補償器により補正量を決定する。この補正量は、次式により決定する。

$$K \left[ f(\text{margin}, ZMP) + D \frac{df(\text{margin}, ZMP)}{dt} \right]$$

ここで、K, Dはそれぞれ比例動作, 微分動作に関する係数であり,

$$f(\text{margin}, ZMP) = \begin{cases} |\text{margin} - ZMP| & , \text{if } \text{margin} < |ZMP| \\ 0 & , \text{if } \text{margin} > |ZMP| \end{cases}$$

である。

具体的なプログラムの実装に関しては、ZMPの値が離散的にしか得られないため、微分値は現在から直前の過去10個のデータの変化を3次の最小自乗法で近似し、これを微分した値を使用することとする。また補正量が大きすぎるとその位置に移動できない(逆運動学が解けない)ので、補正量には限界値を設定する。

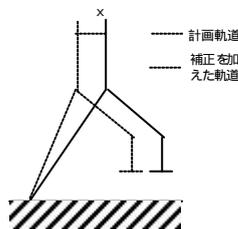


図10 体幹位置コンプライアンス

### 5. 歩行制御ソフトウェア

4章で記述した歩行アルゴリズムに従って、歩行制御ソフトウェアを試作した。各コントローラに対して試作したソフトウェアの概要を以下に示す。

#### 運動制御コントローラ

運動制御コントローラにおける歩行制御ソフトウェアは次に示す3つのタスクからなる。尚、OSには、μITRONを使用した。

- ・コマンド解析タスク

アプリケーションコントローラからの(歩行)コマンドを解析し、それを4.1で述べた歩行パターンに分解して、動作コマンドバッファに登録する。

- ・ZMP測定タスク

力覚センサ等に基づきZMPを計測し、それに基づいて歩行安定化に関する補正量を計算し、それを歩行制御タスクに送信する。

- ・歩行制御タスク

動作コマンドバッファの歩行パターン、ZMP測定タスクから受け取った補正データ、各関節の現在値を基に、各関節へ指令値を作成し、それを各軸のモータコントローラへ送信する。また、モータコントローラから現在値を受信する。

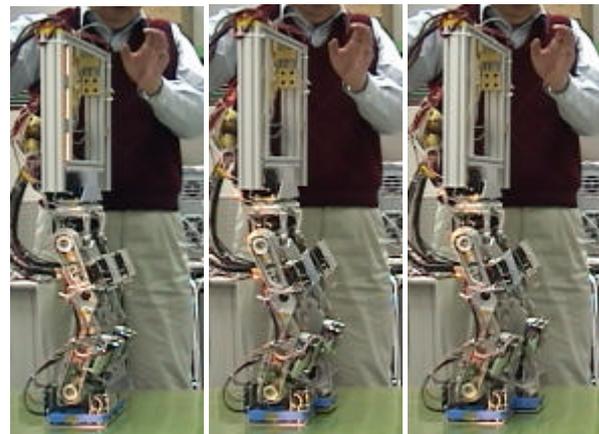
#### モータ制御コントローラ

運動制御コントローラから受信した移動量の目標値に基づいて、モータを制御するとともに、現在の位置データを運動制御コントローラに送信する。

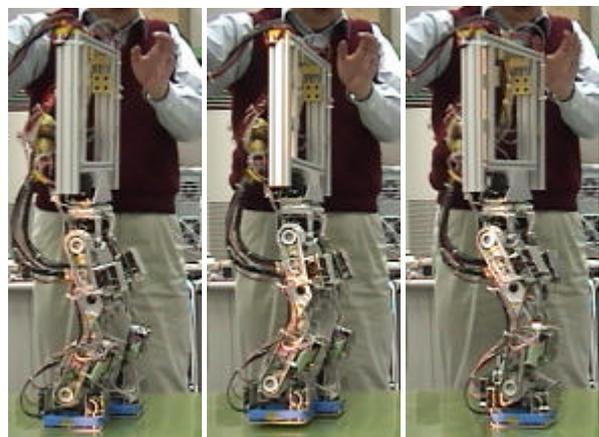
### 6. 歩行実験

先行的に試作した下肢の機構を使用し、4.1で示した歩容に基づいて、歩行実験を行った。使用した歩容パラメータを表3に示す。尚、本実験では、歩行の安定化制御は、行わなかった。

図11に歩行実験結果の一例を示す。この結果において、各フェーズ間の移行がスムーズに行われ、歩行が実現されている。しかし、図11(f)に見られるようにヨー軸のモーメントの影響で、ロボットの移動方向が少し変化している。これを改良することに関しては、足底の素材を検討したり、モーメントを打ち消す補正を加えたりすることが考えられる。図12に歩行中の片足支持



(a) 初期状態 (b) フェーズ a (c) フェーズ bの開始



(d) フェーズ cの開始 (e) フェーズ c (f) フェーズ bの開始

図11 歩行実験

表3 実験パラメータ

Ts	1.2	sec	Zc	0.59	m
Tw	0.4	sec	c	0.07	m
Xs	0.05	m	d	0.1	m
Xw	0.019	m	L1	0.15	m
Ys	0.0525	m	L2	0.15	m
Yw	0.03	m			
h	0.005	m			
k	0.28	m			

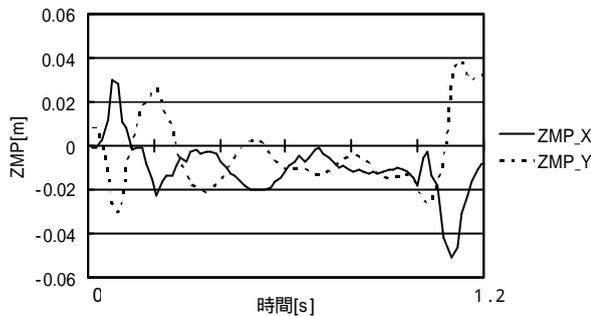


図1.2 歩行中の片足支持期におけるZMP

期（フェーズc）のZMPの変化の一例を示す。足底の範囲は、X座標に関して-0.049～0.068、Y座標に関して、-0.038～0.038である。一部、測定により求めたZMPの位置が、足底の範囲を外れそうになっているところがあるものの、おおむね足底にある。今後、歩行安定化制御を加えることにより、ZMPが安定して足底の範囲に維持されることが期待できる。

## 7. まとめ

本研究では、インタラクションに基づく親和性向上に関する研究における研究用ロボットプラットフォームの基本ハードウェアと歩行のための基本ソフトウェアを開発した。開発したロボットハードウェアは、30の自由度（下肢：12，上肢：18）があり、歩行の他にいろいろなアクションを生成することが可能である。歩行に関しては、線形倒立振り子モデルに基づき歩容を生成するソフトウェアを開発し、その有効性を歩行実験により検証した。今後の課題としては、上肢の制御ソフトウェア、アプリケーションレベルのソフトウェアの開発および下肢の歩行制御ソフトウェアの改良があり、次年度以降、これらの課題に取り組む。

## 文献

[1] 国際福祉機器展「M<sup>3</sup>」, <http://www.hcr.or.jp/>  
 [2] 株式会社国際電気通信基礎技術研究所,  
 [3] “日常活動型ロボットプロジェクト”,  
<http://www.mic.atr.co.jp/~michita/everyday/>  
 [4] 日本電気株式会社, “パーソナルロボット「Papero」”,  
<http://www.incx.nec.co.jp/robot/>

[5] 山田, 吹田, 今井, 池田, 杉本 “痛覚耐性値に基づく安全な人間の接触検出および停止機能を有するロボットシステム”, 日本機械学会論文集C編, vol.63,no.614,pp3552-3557,1997  
 [6] 森田, 鈴木, 川崎, 菅野, “人間共存ロボットマニピュレータの衝突安全設計と制御” 日本ロボット学会誌, Vol.16, No.1, pp.102-109,1998  
 [7] Vukobratovic M.et al, IEEE Transactions on Bio-Mechanical Engineering, Vol.BME-17,pp.25-36, 1970  
 [8] 山口仁一, 高西淳夫, 加藤一郎 “上体運動により3軸モーメントを補償する2足歩行ロボットの開発”, 日本ロボット学会誌, Vol.11, No.4, pp.581-586, 1993  
 [9] 西脇光一, 北川知伸, 杉原知道, 加賀美聡, 稲葉雅幸, 井上博允, “ZMP導出の線形・非干渉化, 離散化によるヒューマノイドの動力学安定軌道的高速生成”, 第18回ロボット学会学術講演会予稿集, pp.721-722, 2000  
 [10] 梶田秀司 “線形倒立振り子モードを規範とする動的2足歩行ロボットの実時間制御” 機械技術研究所報告, 第171号  
 [11] 遠藤謙, 山崎文敬, 北野宏明, 前野隆司, “進化的計算法を用いた2足歩行ロボットの形態と歩行パターンの生成” 第19回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.519-520, 2001  
 [12] Jiang Shan, Fumio Nagashima, “Biologically Inspired Spinal locomotion Controller for Humanoid Robot”, 第19回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.517-518, 2001  
 [13] 長坂憲一郎, 稲葉雅幸, 井上博允, “体幹位置コンプライアンス制御を用いた人間型ロボットの歩行安定化”, 第17回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.1193-1194, 1999  
 [14] 李清華, 高西淳夫, 加藤一郎, “6軸力センサを用いた2足歩行ロボットのZMP測定システムの開発”, 日本ロボット学会誌, Vol.10, No.6, pp.828-833, 1992  
 [15] 李清華, 高西淳夫, 加藤一郎, “上体を有する2足歩行ロボットの学習制御”, 日本ロボット学会誌, Vol.11, No.7, pp.1011-1019, 1993  
 [16] Kazuo Hirai, Masato Hirose, Yuji Haikawa, Toru Takenaka, “The Development of Honda Humanoid Robot”, Proc. of IEEE international Conference on Robotics & Automation, pp.1321-1326, 1998  
 [17] Qiang Huang, Yoshihiko Nakamura, and Tetsunari Inamura, “Humanoids Walk with Feedforward Dynamic Pattern and Feedback Sensory Reflection”, Proc. of IEEE international Conference on Robotics & Automation, pp.4220-4225. 2001

# インタラクションに基づく親和性の向上に関する研究

## ～人とロボットが同居するためのロボット要素技術に関する研究～

小川 行宏                      三浦 達也\*                      山本 和彦\*  
王 剛\*                              稲葉 昭夫                      杉山 正晴

### Improving Human Friendly Interface based on Interaction with Robot - Development of Basic Technologies for Coexistence of Human and Robots -

Yukihiro OGAWA    Tatsuya MIURA\*    Kazuhiko YAMAMOTO\*  
Gang WANG\*        Akio INABA        Masaharu SUGIYAMA

あらまし 本研究は人とロボットのインタラクションによりロボットに対する親近感の創出を目的とし、人とロボットが共存するための要素技術として新たな手法を提案する。自然に人とロボットがインタラクションを行うためには、対応する相手が誰であるかを知り、どのような意図をもっているのかを知る必要がある。本研究ではカメラ画像を用いて人の意図を認識し、その情報を用いてインタラクティブに行動するためのロボットシステムについて提案する。人物認識および顔ポーズの認識実験を行い実環境で使用できる精度であることを確認した。さらに状況に応じた行動をするためにロボットの行動学習に顔ポーズを利用することによる強化学習の枠組みの適用を提案した。

キーワード インタラクション, 画像処理, 人物認識, 顔認識, 行動学習, 顔ポーズ

#### 1. はじめに

現在成長が期待されている産業の一つとしてロボット産業がある。これまでのロボットは産業用ロボットに見られるように人の代わりに重労働や過酷な環境での作業に用いられ、生産の高度化、効率化、省力化のために活用されてきた。しかし今後、ロボットがさまざまな形で人社会に関わり、人の日常生活を支援し、人と共存することが予想される。これら人と共存して生活するロボットは信頼感や親近感を感じられるロボットであることが重要になる。

しかしながら、人がロボットに対して信頼感や親近感を持つためには様々な問題が存在する。鉄の塊であるロボットが動作することに対して恐怖を感じるといったハードウェア的な問題や、人の生活環境をいかにセンシングするか、どのように動作したらよいかというソフトウェア的な問題などが存在する。

これまでに人と共存するロボットの研究開発において様々な手法が検討されてきている<sup>[1-5]</sup>。個人を識別し個人ごとにアクションする手法や、人とロボットのインタラクションにおけるインターフェースのモデルの提案などが挙げられる。しかしインタラクションの中で相手の意図を検出し、それに基づいて行動するものはない。

本研究では新たに人がロボットに親しみを感じるため

の手法を提案する。基本戦略として人とロボットのインタラクションにおける人の意図に着目する。ロボットは人の意図を検出することにより、意図に応じて行動し、行動を学習する。ロボットが各個人に対して人同士のよう自然にインタラクションを行うことができ、各個人がどのような意図をもっているのかを知ることができれば信頼感や親近感を創出できると考える。

本報ではカメラ画像から得られた情報を用いることにより、インタラクティブに行動するためのシステム構成について提案する。主にカメラから得た画像を用いた人物の認識、および人の意図の検出について述べる。また、その画像から得た情報を利用することによりロボットが各個人に対応した行動の学習を行う手法について提案する。図1に人とロボットのインタラクションのイメージ図を示す。



図1 人とロボットのインタラクションイメージ図

\* 岐阜大学 工学部 応用情報学科

## 2. 親近感創出のための戦略

本章では人のロボットに対する親近感を創出するための基本戦略の概要および基本戦略の中心となる意図の認識について述べ、それを実現するためのシステム構成を示す。

### 2.1 基本戦略

人とロボットが人同士のようにインタラクティブに接することができれば、人のロボットに対する信頼感や親近感創出が期待できる。本研究では人とロボットの親和性を向上させる手段として、人とロボットのインタラクションにおける人の意図に着目した手法を提案する。手法の概要を図2に示す。インタラクションにおいて相手が誰であるかを特定し、どのような意図を持っているのかを知ることが重要である。本手法では、ロボットは環境の認識において人物認識と人物の意図認識を行う。この認識結果により人の意図に応じて行動を切り替える。さらに、ロボットは行動した後人の意図を認識することによって、ロボットの行動に対する評価・学習をする。提案した手法により、環境の認識と行動(決定・学習)の操作を繰り返し行うことにより人とロボットの間徐々に親近感が創出されることを期待する。

### 2.2 意図の認識

人の意図という非常に広い意味を持っている。例えば手を上げるということは動き自体が意図である、また行動していなくても人がこちらを向いているだけでも意図であると言うことができる。このような中で本研究では意図の認識に関して顔の表情に着目する。顔の表情は意図の中で目に見える形で認識可能なものの一つであり、意図の表現の中で重要な役割を果たしていると考えられる。この例として「人の顔色を伺う」という言葉があるように、その人物が何を考えているのかを知るために顔を見るということが挙げられる。しかしながら表情は各個人によって異なる。また、同じ表情でも意図が一意に定まるものではない。

本研究では問題を簡単にするため予め顔のポーズを表情として定義する。例えば、「顔をしかめている」場合は「怒っている表情」とし、「目を大きく開けて口を大きく開いている」場合は「驚いている表情」とする。この定義が全ての場合で成立するわけではないが一般的な表情においては多くの場合に成立すると考えられる。顔のポーズを人の意図であると仮定し、それを認識することによりシステムを構成する。

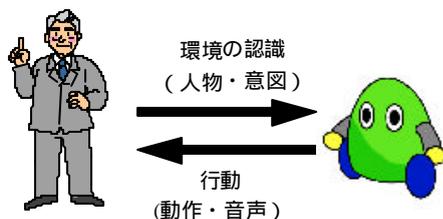


図2 システム概要

### 2.3 システム構成

図3に提案した手法を実現するシステムの構成を示す。ロボットにはカメラとマイクを装着する。カメラからの画像を用いて人物認識および顔ポーズ認識を行う。マイクからの音声を用いて音声認識を行う。画像認識、音声認識ともに常に入力を受け付けること可能で、双方の認識結果に基づいて行動を決定し、実際に行動に移る。ロボットの行動にはロボット動作および音声を使用する。ロボットの動作に対する人のリアクションがロボットに対する次の入力となる。さらに、ロボットは顔ポーズの認識を行うことにより自分のとった行動を評価し学習する。人物認識・顔ポーズ認識について3章で詳細に述べ、行動学習については4章で提案する。

## 3. 環境の認識

### 3.1 人物認識

人とロボットがインタラクションを成立させる上で重要なこととして、相手が誰であるかを理解する必要があると考えられる。そこでカメラから得られる画像を用いて人物認識を行う。入力画像から人物認識の結果を出力するまでの流れを図4に示す。カメラ画像から色情報を用いて人物の肌色らしき領域を抽出し、それを顔領域とする<sup>[6]</sup>。肌色領域の抽出には、人の色に対する感覚に近い均等知覚色空間のひとつであるLUV表色系を用い、ダイナミックに閾値を変化させ、環境の変化や個人差に対応した顔領域抽出を行う。またエッジ特徴である4方向面特徴を抽出し、線形判別分析により特徴量を算出しあらかじめ用意されている辞書とユークリッド距離を比較することにより人物認識を行う<sup>[7]</sup>。線形判別分析はより少ない次元でクラス間の分散を最大限強調する線形写像を構成する多変量解析手法である。4方向面特徴については次節で詳しく述べる。

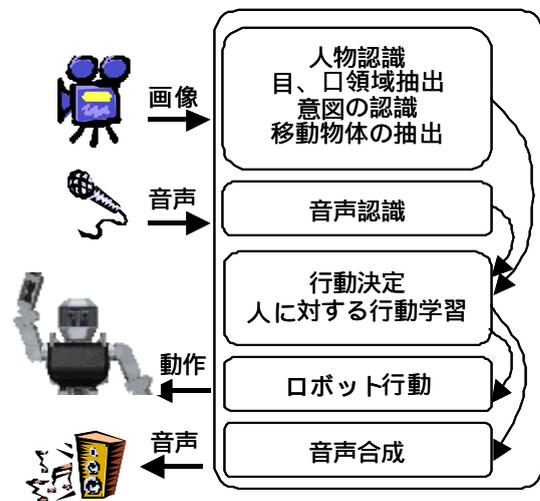


図3 システムの内部構成

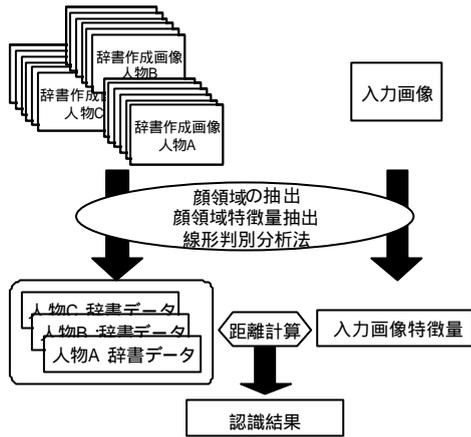


図4 人物認識の流れ

3.2 4方向面特徴

本研究では人物の認識を行うための特徴として4方向面特徴を用いる。一般的にエッジ特徴は文字認識や人物認識の分野で良く用いられている方法である。その中でも4方向面特徴は濃淡の入力画像に対し方向検出フィルタを用いて、方向毎にエッジ強度を濃淡特徴とする手法である。ここで4方向面とは水平方向面、右上がり方向面、垂直方向面、右下がり方向面のことである。

4方向面特徴は高次特徴面に分けた後、低解像度化しているため、1つの画像を4方向面に分ける前にエッジを抽出し解像度を落とす場合と比べて、高解像度でのエッジ情報が残る。また、4方向面特徴では非常に低い解像度まで落とすため、顔自体や顔部品の位置のわずかなずれが特徴量に及ぼす影響が少なくなるという性質を持っている。図5に方向検出フィルタを用いて4方向面特徴を抽出した例を示す。

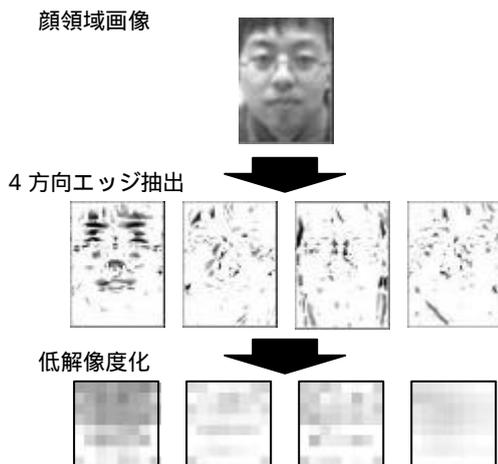


図5 4方向面特徴の抽出



図6 顔ポーズ認識の実験画像

3.3 顔ポーズ認識

人物認識と同様に得られた顔画像領域から4方向面特徴を抽出し、あらかじめ用意されている辞書と比較することにより意図の認識を行う。本研究では図6に示す3パターンの顔ポーズに無表情を加えた4つの顔を表情として定義し顔ポーズ認識を行う。

3.4 認識実験

本節では4方向面特徴を用いた認識実験を行い、認識システムが使用できるものであるか検討する。

各認識実験は5人を対象とする。実験に用いる画像は連続して7.5フレーム/秒で撮影した個人、ポーズごとに400枚、一人につき1600枚の画像とする。400枚のうち100枚を辞書作成用の学習データとし、使用していない残りの画像のうち100枚を未学習データとして使用する。

人物認識の辞書作成用の画像は各個人の無表情のデータを使用する。また、人物認識実験の未学習データには各顔ポーズ画像(無表情を含む)を100枚1人につき400枚ずつの合計2000枚の画像を使用する。人物認識実験の結果を図7に示す。縦軸は認識率である。未学習データに顔ポーズが変化したものを使用したが、非常に高い認識率を得ることができた。

顔ポーズ認識は各個人の1つのポーズごとに100枚、合計2000枚を学習データとして使用した。同様に1つのポーズごとに100枚ずつの未学習データを使用して認識実験を行った。顔ポーズ認識実験の結果を図8に示す。縦軸は認識率である。各ポーズともに学習データに比べ未学習データでは認識率が同じもしくは低下するものの、高い認識率となり、今回使用した辞書は特徴空間をうまく分割しており信頼性の高いものといえる。

3.5 実環境での認識実験

次に前節で使用した辞書データを使用して実環境での認識実験を行う。実験は顔ポーズ認識で辞書に登録して

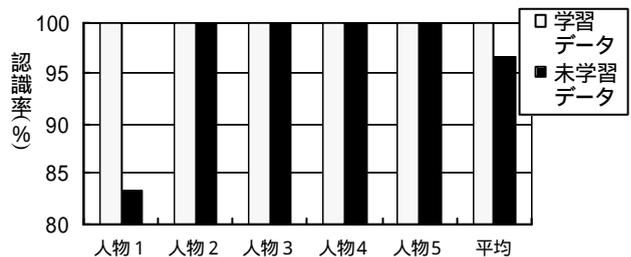


図7 人物認識の認識率

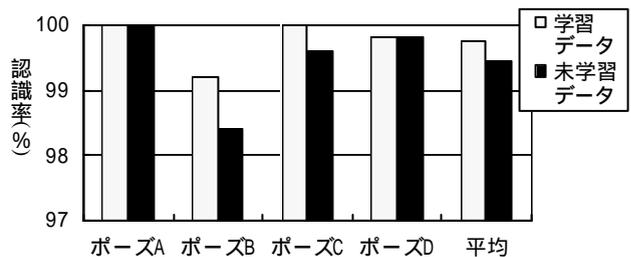


図8 顔ポーズ認識の認識率

ある1名(人物3)を対象に行う。カメラの前に誰もいない状態から辞書に登録された人物が現れ、顔ポーズを変化させカメラから出て行く様子をフレームごとに認識する実験を行った。実験データは辞書データの作成時とは別の時間に実際に認識動作しながら約2フレーム/秒で撮影したものである。

各フレームの認識結果を図9(a)に示す。横軸はフレーム数、縦軸は各フレームの認識結果である。縦軸は認識結果が被験者の各顔ポーズ(4種類)、他人、無人状態の6つのどの状態かを示したものである。また、図の上に被験者が実際にどの顔ポーズ行っているかを示す。各フレームで認識した場合は、1フレームや2フレーム程度の認識失敗が散らばっており認識が安定しないことがわかる。

そこで前16フレームの結果から最も数の多いクラスを認識結果とすることにより安定化を図った。前16フレームによる安定化の結果を図9(b)に示す。前フレームの結果を使用することにより、多少の時間遅れが生じるものの認識結果が安定し、実環境において使用可能な認識率となった。

#### 4. 行動学習

これまでに顔ポーズを用い、ロボットが環境を認識することについて述べた。本章では強化学習の枠組みを取り入れることによりロボットの行動を決定することについて述べる。

強化学習は環境とエージェントの相互作用を通じて目的の行動を獲得する手法として有効であると言われている<sup>[8]</sup>。本研究では強化学習の一手法であるQ学習をロボットの行動系として適用し、相手の状態に応じた行動を学習することを提案する。Q学習は強化学習の一手法でありロボットを含めた環境に関する先見の知識をほとんど必要としないという利点がある。

ロボットが観測する状態を人物および人物の顔ポーズとし、報酬はロボット行動後の相手の状態から受け取る。例えば相手を喜ばせるという政策であれば、顔ポーズが喜んだという状態になった場合に報酬を受け取る。このように状態、報酬を設定し行動を学習することで、相手の意図に添った行動を選択できるようになる。システムの実装については今後の課題である。

#### 5. まとめ

本研究では人とロボットの親和性の創出を目的としたシステムを提案した。その中で重要な要素となる環境の認識として、人物認識、顔ポーズの認識を行い実環境でも使用できる精度であることを確認した。また、状況に応じた行動をとるために、ロボットシステムの行動学習への強化学習の枠組みの適用を提案した。

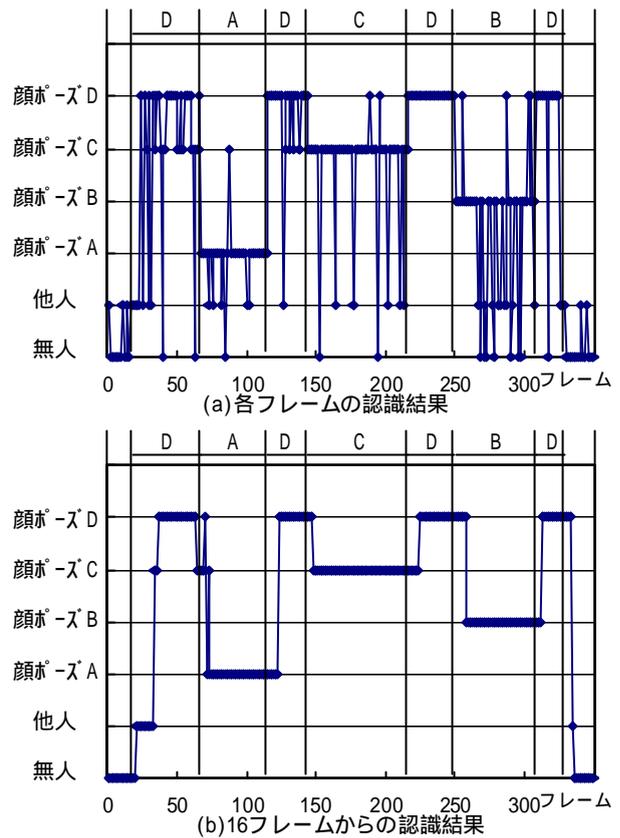


図9 実環境での実験結果

#### 文献

- [1] 日本電気株式会社, “パーソナルロボット「Papero」”, <http://www.incx.nec.co.jp/robot/>
- [2] 藤田雅博, “ロボットエンタテインメント:小型4脚自律ロボット”, 日本ロボット学会誌 Vol.16 No.3, pp.313-314, 1998.
- [3] 株式会社国際電気通信基礎技術研究所, “日常活動型ロボットプロジェクト”, <http://www.mic.atr.co.jp/~michita/everyday/>
- [4] 小野哲雄, 今井倫太, 江谷為之, 中津良平, “ヒューマンロボットインタラクションにおける関係性の創出”, 情報処理学会論文誌 Vol.41 No.1, pp.158-166, 2000.
- [5] 佐部浩太郎, 藤田雅博, “エンターテインメントロボットの商品化”, 日本ロボット学会誌 Vol.18 No.2, pp.185-187, 2000.
- [6] 羽飼直記, 本郷仁志, 加藤邦人, 山本和彦, “顔画像からの眼部抽出方法の提案”, SII'98 ,D-4 pp.185-190, 1998.
- [7] 栗山聖, 山本和彦, 本郷仁志, 加藤邦彦, “顔認識システムにおける高次特徴の効果と性能”, MIRU2000, pp.475-480, 2000.
- [8] Richard S.Sutton, Andrew G.Barto著 / 三上 貞芳, 皆川 雅章訳, “強化学習”, 森北出版社, 2000.

# 柔軟構造を有する静電アクチュエータの開発

西嶋 隆 稲葉 昭夫 山本 晃生\* 樋口 俊郎\*

## Development of a Flexible Electrostatic Actuator

Takashi NISHIJIMA Akio INABA Akio YAMAMOTO\* Toshiro HIGUCHI\*

あらまし 軽量高出力で柔軟な構造を有する静電フィルムアクチュエータを開発した。開発した静電アクチュエータは柔軟なポリイミドフィルムで構成されているため、軽量で柔軟である。本報告では移動子と固定子がそれぞれ1枚で構成される柔軟なアクチュエータを用いて、アクチュエータを曲げた場合における推力特性の理論式を導出し、実験によって推力特性を確認した。試作機では、アクチュエータを3rad以上曲げてでも駆動できることが可能で、6rad曲げた時に推力が0となる。さらに、移動子フィルムと固定子フィルムを積層し高出力化を図った。積層方法に関して3種類提案し、それぞれの方法において、アクチュエータの推力特性、柔軟性、出力の取り出し易さについて考察した。最後に、3相パルス波形駆動を用いた静電アクチュエータ駆動用の簡易ドライバを製作したので加えて報告する。

キーワード 静電気力、アクチュエータ、柔軟

### 1. はじめに

従来、ロボットは産業用として、工場内を中心に利用されてきたが、近年、玩具・ヒーリング用のペットロボットや、介護用パワーアシスト機器などに見られるように、民生用として一般家庭にも普及しつつある。それらは必然的に人と接触する状況で使用されることになる。このため、民生用ロボットは人を傷つけないために柔らかさが必要で、心理的な面でも柔らかいイメージが求められる。

現在の民生用ロボットに用いられるアクチュエータは電磁アクチュエータが多用されている。電磁アクチュエータは一般に磁石やコイル、減速機が必要であるため重量が大きい。また、ロボットの多くはシリアルリンクで構成されており、リンクの先の重量が大きいと必然的にリンク機構は高剛性で重いものとなる。そのため、減速機が不要でパワー密度の大きいアクチュエータはロボットのアクチュエータとして有効である。さらに、生物の筋肉のように柔軟で、人に優しいイメージを得るロボットを開発するには、軽量、柔軟、高出力かつ制御性の優れたアクチュエータの開発が望まれている。また、このような軽量で人に優しいという特徴は、人に接触して用いるデバイスとして、介護問題におけるパワーアシスト機器への応用も期待できる。このような要求には、制御性に優れ、電磁アクチュエータに匹敵するパワー密度が得られる高出力静電アクチュエータ<sup>[1]</sup>が適していると言える。本研究では、この静電アクチュエータの素材の

もつ柔軟性に着目し、アクチュエータを曲げて使用した場合の推力特性について理論的解析と実験による評価を行う。また、高出力化を図るために積層型のアクチュエータを考察する。最後に、従来の静電アクチュエータ用のドライバは大型の高電圧アンプと任意波形発生器で構成され、重量が大きく、移動型のロボットには適していないため、それに替わる小型、軽量の静電アクチュエータ駆動用の簡易ドライバを製作したので報告する。

### 2. 単層の静電アクチュエータ

#### 2.1 基本構成

本研究で製作した静電アクチュエータは、ポリイミドをベースにしたFPC (Flexible Printed Circuit) 基板に3相平行電極を埋め込んだものである。図1に移動子と固定子それぞれ1枚で構成する基本的な静電アクチュエータの模式図を示す。移動子は固定子の表面上を電極に対し、直角方向に駆動する。フィルム厚 $t$ は150 $\mu\text{m}$ 、電極幅 $w$ は100 $\mu\text{m}$ 、電極ピッチ $p$ は200 $\mu\text{m}$ 、重量は各約3.5gである。また、移動子と固定子の間には適切なギャップを維持す

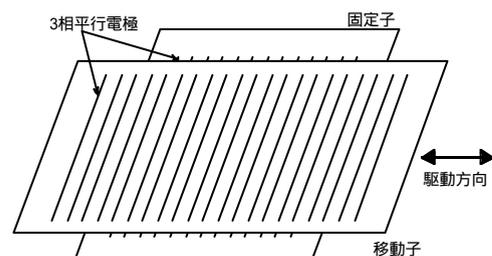


図1 基本的な静電アクチュエータの模式図

\* 東京大学工学系研究科

るために、直径20 $\mu\text{m}$ のガラスビーズが散布されている。また、フィルム間の空気の絶縁破壊を避けるため、不活性液体フッ素系FC-77(3M製)が満たされている。

2.2 推力特性

駆動原理は図2に示すように、移動子と固定子の3相平行電極に3相交流電圧を印加すると移動子と固定子には波線で示すような電位分布が励起される。移動子の移動速度 $v$ は、電極ピッチ $p$ 、印加電圧の周波数 $f$ を用い式(1)で示される。

$$v = 6pf \tag{1}$$

本研究での静電アクチュエータは電極3本毎に同じ特性を周期的に繰り返すため、電極3ピッチ長さを1周期(2 $p$ )となる電気角を導入すると理解しやすくなる。移動子と固定子の間には図3に示す電位分布の位相差に応じた推力が発生する<sup>[2]</sup>。通常、移動子と固定子の電極ピッチは等しく、静電アクチュエータの推力 $F$ は図3に示す印加電圧位相 $q_v$ と移動子位置 $x_e$ の関数となる。移動子位置 $x_e$ は電気角 $q_e$ で表すと、

$$q_e = \frac{2p}{3p} x_e \tag{2}$$

となる。単位面積あたりの推力 $F_n$ を $q_v$ 、 $q_e$ で示すと式(3)で表現される<sup>[3]</sup>。

$$F_n(q_v, q_e) = kV^2(C_1 \sin(2q_v + q_e) - C_2 \sin(2q_v - 2q_e) - C_3 \sin(3q_e)) \tag{3}$$

ここで、 $k$ は定数、 $V$ は印加電圧振幅、 $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$ はアクチュエータの形状や構造に依存する定数である。図4に各移動子位置における推力の変動の模式図を示す。推力は各移動子位置において交流電圧を印加して測定するが、印加電圧の位相に応じて推力の変動が生じる。図4に、各移動子位置で発生し得る最も大きな値を示す。ここで、各移動子位置において発生しうる推力の最大値を最大推力、最低値を鞍部点推力と定義する。鞍部点推力はいかなる移動子位置にあっても最低限保証される推力であるため、アクチュエータの推力性能の重要な因子である。

2.3 曲げた場合での推力特性

移動子と固定子それぞれ1枚の基本要素(これを単層と定義する)からなるアクチュエータを駆動軸方向に曲げた場合、図5に示すように移動子電極と固定子電極の接触面(駆動面)において、電極ピッチのずれ(ピッチシフト量)が生じることにより推力が変化する。ピッチシフト量をアクチュエータの電気角で表したものを $p$ とすると、 $p$ は、電極間距離 $h$ 、電極ピッチ $p$ 、駆動面の曲げ角 $j$ を用いて、

$$p = j h \frac{2p}{3p} \tag{4}$$

となる、図5における角度 $j$ の位置における単位面積あたりの推力は式(3)の移動子位置 $q_e$ にピッチシフト量 $p$ を加え、式(5)で表される。

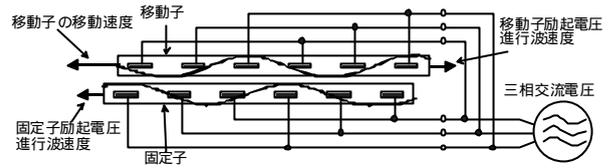


図2 駆動原理

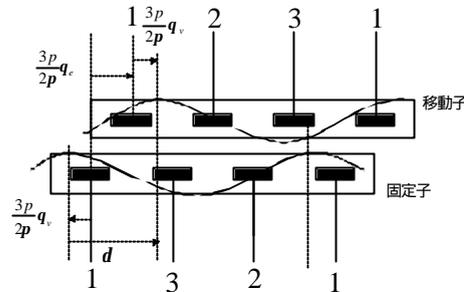


図3 励起される電圧の位相

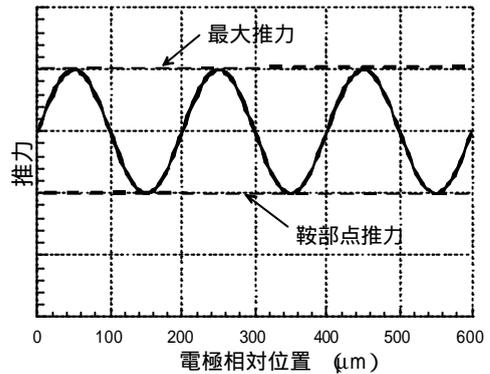


図4 移動子位置による推力の変動

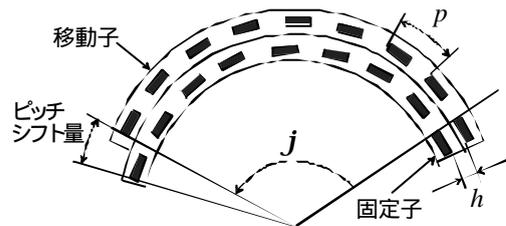
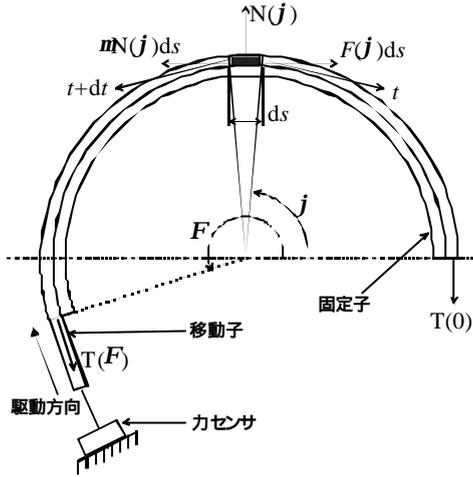


図5 曲げによる電極ピッチずれの様子

$$F(q_v, q_e, j) = kV^2(C_1 \sin(2q_v + q_e + j h \frac{2p}{3p}) - C_2 \sin(2q_v - 2q_e + j h \frac{2p}{3p}) - C_3 \sin(3q_e + j h \frac{2p}{3p})) \tag{5}$$

ここで、図6の推力解析モデルにおいて、アクチュエータの形状や摩擦を考慮し、移動子の張力 $T(j)$ と駆動面の曲げ角 $j$ の関係を求める。固定子は一定曲率で円筒に固定され、外側に移動子が時計回りに巻きつくように駆動すると仮定し、単位奥行きで解析する。



- $m$ : 駆動面の摩擦係数
- $r$ : 駆動面の曲率半径 [m]
- $t$ : 移動子にかかる張力 [N]
- $ds$ : 微小部分の面積 [m<sup>2</sup>]
- $F$ : 駆動面の曲げ角 [rad]
- $N(j)$ : 微小部分が受ける垂直抗力 [N/m<sup>2</sup>]
- $F(j)$ : 微小部分から発生する推力 [N/m<sup>2</sup>]

図6 摩擦を考慮した推力解析モデル(断面図)

移動子の微小部分(図6の黒い部分)の半径方向、接線方向における力のつりあいから、式(6)、(7)となる。

$$(t + dt)\sin\frac{dj}{2} + t\sin\frac{dj}{2} = N(j)ds \quad (6)$$

$$F(j)ds + t\cos\frac{dj}{2} = \mu N(j)ds + (t + dt)\cos\frac{dj}{2} \quad (7)$$

$dj$  と  $dt$  は微小で、 $ds = r dj$  を考慮し整理すると式(8)となる

$$\frac{dt}{dj} = rF(j) - \mu t \quad (8)$$

(8)、(5)から  $T(0)=0$  の初期条件で  $T(j)$  を求める。この  $F(j)$  は式(5)を用いて算出する。この解析では、 $q_v, q_e$  は  $j$  に関係しないため表記を省いた。センサにかかる推力は角度  $F$  における移動子の張力  $T(F)$  である。アクチュエータ単位面積あたりの推力は駆動面の面積  $rF$  で除し、 $T(F)/rF$  となる。 $T(F)/rF$  と  $F$  の関係の理論曲線を図7に示す。図7において、推力は曲げない状態での最大推力で正規化した。理論値の計算では、摩擦係数  $\mu$  は 0.06、 $C_1, C_2, C_3$  はそれぞれ 100, 40, 25、電極間距離  $h$  は 100 $\mu$ m、電極ピッチ  $p$  は 200 $\mu$ m である。

## 2.4 実験及び結果

前節で導いた理論式の検証のために、単層の静電アクチュエータの推力測定実験を行った。実験に用いたフィルムの写真、実験で用いた装置の模式図をそれぞれ図8、図9に示す。実験装置は、固定子を円筒に貼り付け、図6のモデルのように移動子が固定子に巻きつくように駆動する。推力測定方法は、円弧状に固定した固定子を 20 $\mu$ m ずつ移動させ、移動子位置を変えていき、各移動子位置において交流電圧を印加し、そのときの発生し得る

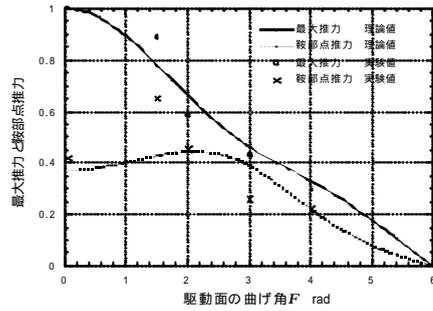


図7 アクチュエータ曲げ角と推力の関係

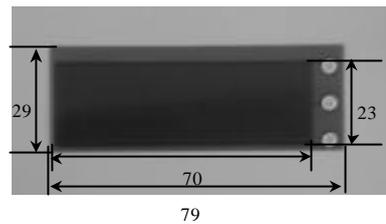


図8 実験に用いたフィルム(移動子・固定子)

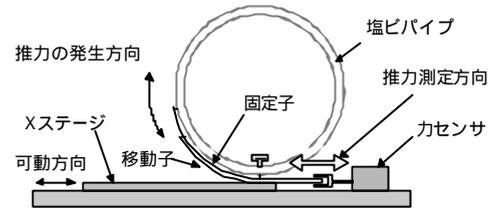


図9 実験装置の模式図

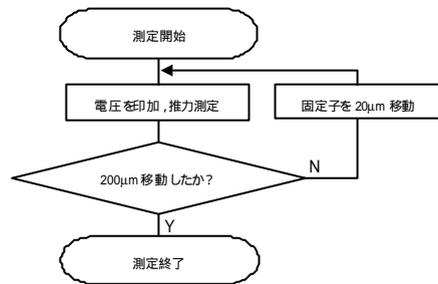


図10 推力測定手順

推力を測定する。図10に実験の手続きのフローチャートを示す。実験条件は印加電圧 1200V<sub>0-p</sub>、印加電圧周波数 2.5Hz (3mm/s) で行った。実験結果を図7に示す。また、カセンサを外した状態において、移動子は駆動面の曲げ角  $F$  が  $\pi$  rad 以上においても移動することが確認された。

## 2.5 考察

実験結果は理論値に近い傾向が得られたが、鞍部点推力には実験誤差がある。これは曲げた場合の摩擦力の変動や曲げていない時の推力が低く見積もられていたと考えられる。また、推力は理論値からも、実験結果からもおよそ 6 rad 曲げると推力が無くなるのがわかる。但し、この特性はフィルムの厚さに大きく依存することを留意しなくてはならない。

### 3. 積層型の柔軟な静電アクチュエータ

本アクチュエータに用いるフィルム(移動子,固定子)は非常に薄いため,積層することが可能で,その結果,高出力化が期待できる.アクチュエータを柔軟に曲げて使わない場合は,移動子,固定子のそれぞれの端で固定する積層方法で問題はない.しかし,柔軟な構造を維持し,推力を得るためには工夫が必要となる.最後に,提案した3つの積層方法の特徴を表1に記す.本章では3種類の積層方法について考察する.

#### 3.1 積層方法の種類

移動子,固定子を交互に積層するためには,フィルム間にスペーサが必要である.これは,直動ガイドの役割を兼ねる.スペーサの取り付け方はアクチュエータを曲げた場合に駆動の妨げとならないことを考慮しなければならない.基本的なスペーサの設置方法を図11に示す.本章で議論するのは,スペーサとフィルムの接合方法(構造)である.ここでは特に,柔軟性,推力特性,出力の取り出し易さ,の3点について考慮しながら,積層方法を考察する.また,ここではアクチュエータ全体が伸縮する構造のみ考察する.スペーサとフィルムの接着剤はエポキシ系弾性接着剤EP001(セメダイン株製)を用いた.

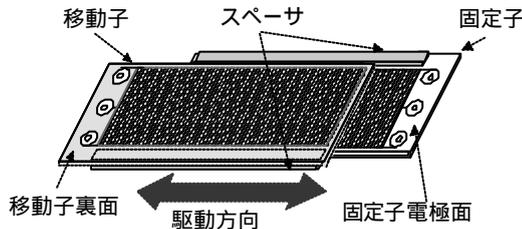


図11 スペーサの設置方法

##### 3.1.1 片持ち型

移動子,固定子の両端で固定する積層方法を図12に示す.これを片持ち型と定義する.片持ち型は移動子,固定子とも両端が束ねられており,出力の取り出しが容易な反面,推力特性がわるい.原因は,後述するように曲げた場合に各層において駆動面の移動子位置の初期ずれが生じるため,ある駆動面では伸びる方向に駆動しようとしても,ほかの駆動面では逆向きの縮む方向に駆動している場合が生じるからである.

次に,片持ち型を用いて一定曲率で曲げた場合のアク

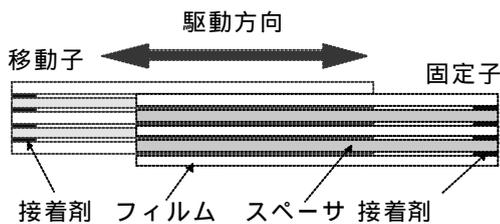
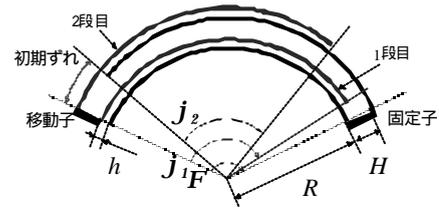


図12 片持ち型の積層方法



- $j$ : アクチュエータ全体の曲げ角
- $j_1$ : 1段目の駆動面の曲げ角
- $j_2$ : 2段目の駆動面の曲げ角
- $R$ : 曲げの中心から1段目の固定子までの距離
- $H$ : 移動子(固定子)間距離
- $h$ : 移動子・固定子間電極距離

図13 片持ち型推力解析モデル

チュエータの推力を電極位置のずれから求める.まず,図13に示す2つの駆動面があるモデルで考え,次に一般にn段の駆動面があるものを求める.

図13において下から数えて1段目の駆動面では左端で電極のずれが無い状態であり,右方に向かうにつれて電極ピッチのずれが生じているとする.1段目の推力は図6のモデルによる解析結果と同じであり,この面(1段目)の推力を式(5)を用い, $F_1(q_v, q_{e1}, j)$ と表す.次に2段目の推力を求めるため, $j_1$ と $j_2$ の関係を解くと,

$$j_2 = \frac{R^2 - H(H+h)}{R(R+H+h)} j_1 \quad (9)$$

となり,上の段ほど駆動面の曲げ角と移動子と固定子の接触している電極面積も小さくなる.したがって2段目でのピッチシフト量 $q_{p2}$ は1段目の $q_{p1}$  ( $q_{p1} = q_p$ )と比較すると,

$$q_{p2} = \frac{R^2 - H(H+h)}{R(R+H+h)} q_{p1} \quad (10)$$

となる.また図13の初期ずれと表記したように,1段目と2段目では,移動子と固定子の相対位置が大きくずれしており,この量は $HF$ である.これを電気角で示すと,

$$\frac{2p}{3p} HF \quad (12)$$

となる.したがって1段目の移動子位置は $q_{e1}$ であると仮定すれば,2段目の移動子位置 $q_{e2}$ は

$$q_{e2} = q_{e1} + \frac{2p}{3p} HF \quad (13)$$

となる.また,式(13)と式(4)から,

$$q_{e2} = q_{e1} + \frac{H}{h} q_p \quad (14)$$

と表記できる.以上を考慮して2段目の推力を求めると,

$$F_2 = F_1(q_v, q_{e1} + \frac{H}{h} q_{p1}, \frac{R^2 - H(H+h)}{R(R+H+h)} F) \frac{R^2 - H(H+h)}{R(R+H+h)} \quad (15)$$

となる.式(15)から,1段目の推力と2段目の推力の関係がわかる.次に一般にn段目の推力 $F_n$ を求める.n段目における駆動面の曲げ角と,n-1段目の比を,駆動面の曲げ角(接触面)の減少率 $D_n$ と定義し,式(16)を導入すると,

$D_n$ は式(17)のように表される。

$$H_n=(n-1)H \quad (16)$$

$$D_n = \frac{R^2 - H_n(H_n+h)}{(R+H_n)(R+H_n+h)} \frac{(R+h)}{R} \quad (n=2,3,4,\dots) \quad (17)$$

以上のことをもとに  $n$  段重ねの場合の推力  $W_n$  とすると、

$$W_n = F_b(q_v, q_{e1}, j) + \sum_{k=2}^n \left\{ F_b(q_v, q_k + \frac{H_n}{h} q_p, D_k j) \cdot D_n \right\} \quad (18)$$

となる。式(18)をもとに、駆動面が4面ある場合の1段目の駆動面の曲げ角  $j$  と推力の関係を求めたグラフを図14に示す。図14から曲げると推力が急激に減少し、曲げ角が1.2rad, 2.1rad付近で推力が大きくなる。これは、曲げることにより電極位置の初期ずれがピッチシフト量よりも急激に変動するため、ある駆動面では伸び、ある駆動面では縮む方向に駆動するからである。実際に片持ち型のアクチュエータを製作し、駆動させたところ、駆動面を  $p$  rad 曲げる間に駆動力が大きくなる曲げ角度が0の状態も含めて3ヶ所あることが確認された。

### 3.1.2 中央固定型

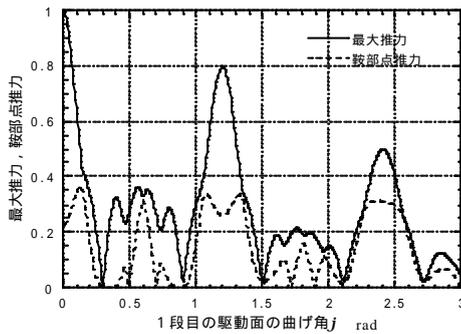


図14 片持ち型積層での出力特性

移動子、固定子をそれぞれの中央で固定する方法を図15に示す。これを中央固定型と定義する。この場合、図16に示すように片持ち型のような問題はなく、各層での移動子と固定子の相対位置は同じであり、単層と同様な推力特性が得られると考えられる。出力の取り出し易さは両端を束ねることができないため、両端からの出力の取り出しが困難になるが、アクチュエータの中央から推力を取り出すことができる。柔軟性の観点から見ると接着面が中央部分に集中し、中央が相対的に硬くなる。

### 3.1.3 交互固定型

中央固定型のように、曲げた状態でも各駆動面での電極初期ずれによる干渉が起こらない積層方法である。積層方法を図17に示す。固定子も移動子も構造が同様で、スペーサの接着部分が交互となる。図18に交互に接着するスペーサの様子を示す。推力特性は単層の場合と変わらないが、出力の取り出しはスペーサが座屈しやすいため困難である。柔軟性は各層間の接着は端面で行われるため比較的よい。弱い出力時には有効である。

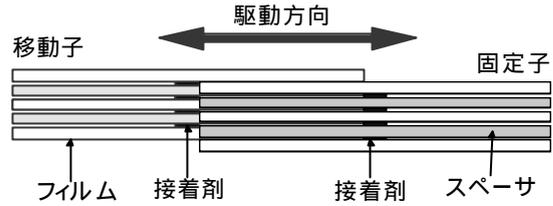


図15 中央固定型の積層方法



図16 中央固定型の3つの駆動面領域

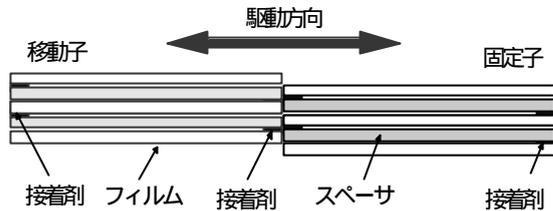


図17 交互固定型の積層方法

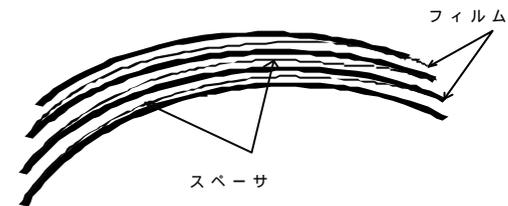


図18 交互に接着されるスペーサ

## 3.2 積層方法のまとめ

高出力化のための積層方法について3つの方法を提案し、単純な片持ち型の積層方法では、移動子位置の初期ずれが大きいため推力が得られず、柔軟なアクチュエータを得ることは困難であることを述べた。表1に3種類の積層方法の特徴についてまとめる。

表1 3つの積層方法の特徴

積層方法	評価項目		
	柔軟性	出力特性	出力の取り出し易さ
片持ち型		x	
中央固定型			
交互固定型			x

## 4. 静電アクチュエータ用簡易ドライバ

従来の駆動装置には、任意波形発生器(AG1200 横河電機(株)製)と、高出力増幅器(定格出力  $\pm 2.4$ kV、 $\pm 30$ mA エヌエフ回路設計ブロック(株)製)を用いていた。これは大型で重量が大きいため、可搬環境での使用や移動型口

ボットなどに応用する場合を想定すると不便であり、静電アクチュエータ用の小型ドライバが必要である。本章では今回開発した小型簡易ドライバについて報告する。

4.1 簡易ドライバの駆動原理

3相交流を用いた静電アクチュエータの駆動原理は2.2節で述べたとおりである。今回製作したドライバはパルス駆動を用いたものである。パルス駆動を用いることによって、ドライバをデジタル回路で構成することが可能で、簡単な部品で構成できる。移動子、固定子の結線

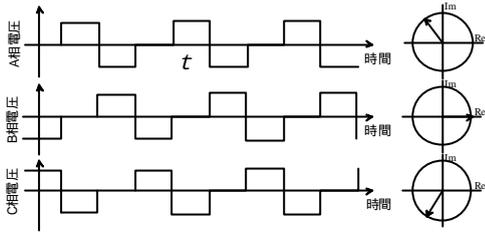


図 1 9 パルス駆動方法

方法は図2と同様である。各相でのパルス波形の時系列を図19に示す。同図の右の時間tにおけるフェーザ図に示すように、それぞれのパルス列は120°ずつ離散的に回転する3相交流であるとみなすことができ、アクチュエータをステップ状に駆動することが可能である。

4.2 仕様

ドライバの構成図を図20に示す。コントローラにはマイコン(PIC16F84)を使用し、アクチュエータの駆動速度と駆動方向を外部信号から制御可能である。高圧電源はDC-DCコンバータ(HPJ1000P/5-D12, HPJ1000N/5-D12)を用いた。入力電圧はAC100V、出力電圧は1000V<sub>0-P</sub>で出力電流は最大5mAである。大きさは約100mm x 160mm x 100mm、重さ約500gである。

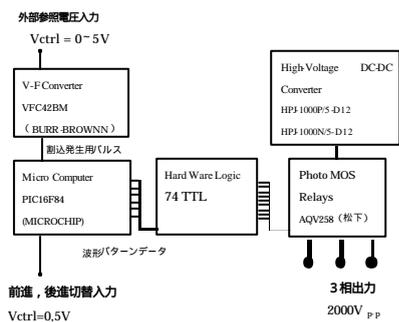


図 2 0 簡易ドライバの構成図

4.3 評価実験

従来の装置でパルス駆動したものと今回試作した装置を用いて、各電圧での推力測定を行った。推力は持ち上げ可能な分銅の重さを測定した。移動子速度3mm/s、移動子・固定子のサイズは120mm x 120mm x 0.2mm、80mm x 160mm x 0.2mmである。結果を図21に示す。

4.4 考察

この実験条件では大型アンプに近い性能が出ている。

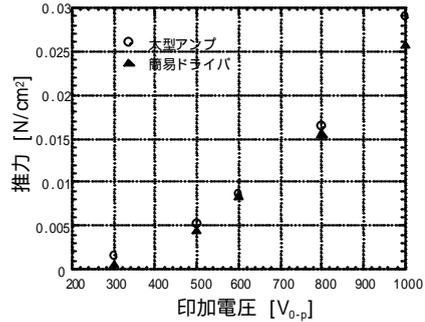


図 2 1 簡易ドライバと大型アンプの比較

しかし、従来のドライバでは1000mm/s以上の駆動速度、出力電圧、3000V<sub>0-P</sub>が得られるが、本ドライバはスイッチングにフォトMOSリレーを用いているため、最高でも約13mm/sの駆動であり、出力電圧1000V<sub>0-P</sub>までの駆動しかできないといった短所がある。また、パルス駆動では推力リップルが大きく、力制御には正弦波駆動の小型ドライバが必要である。

5. まとめ

柔軟な静電アクチュエータの推力特性について、単層では $\pi$ rad以上曲げても駆動可能であることを理論解析と実験から確かめた。また、高出力化のために積層した場合での推力特性を解析し、単純な片持ち型の積層方法では推力が得られなくなることが理論的に示され、試作機でも確認された。また、中央固定型の積層方法が実質的に有効な積層方法であると言え、柔軟な静電アクチュエータの設計指針を示した。今後は、柔軟な静電アクチュエータのパッケージング方法の検討、応用について考える。パルス駆動型の簡易ドライバは低速領域(13mm/s)では十分な推力が得られることを確かめ、低速での応用には利用できる。しかし、今後は高速動作や力制御ができるよう、小型ドライバを改良する予定である。

文献

[1] 新野俊樹, 樋口俊郎, 柄川索, “交流駆動両電極形静電モータ”, 日本ロボット学会誌, vol.15 No.1, pp.97-102, 1997  
 [2] 新野俊樹, 大沢教之, 森本哲矢, 樋口俊郎, “静電アクチュエータの特性評価 - 第2報 印加電圧の位相及び移動子の位置と駆動力の関係 -”, 精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp.669-670, 1994  
 [3] 山本晃生, “静電モータを用いたサーボシステムに関する研究”, 東京大学大学院工学系研究科博士論文, 1998

# ネットワークを介した分散型エンジニアリング データベースシステムの開発(第3報)

窪田 直樹      飯田 佳弘

## A Distributed Engineering Database System( )

Naoki KUBOTA    Yoshihiro IIDA

あらまし インターネット基盤の整備が進むと同時に、CALS(コンピュータを利用した生産・調達・運用に関する総合技術)などの技術が普及し始めている。当初は規模が大きく資金に恵まれた大企業にその動きが見られたが、現在ではその動きが中小企業へと向かっている。中でも、ネットワークを利用したエンジニアリングデータの共有は、データの再利用や開発期間短縮のための一手法として重要視されている。本研究は、中小企業技術開発産学官連携推進事業のもと、中小企業での利用を目的としたネットワーク分散型エンジニアリングデータベースシステムの開発を行うとともに、同事業の参画機関を結ぶエンジニアリングデータの共有についての実証実験を行った。

キーワード 分散型データベース、エンジニアリングデータ、分散オブジェクト

### 1. まえがき

近年、工業製品に対するユーザーニーズの多様化により、少数多品種生産が増加している。同時に、受注から出荷までの期間短縮も叫ばれている。そのため製造業においては、過去のデータを再利用することでユーザーニーズへの対応の迅速化を図り、時には他社と協力して製品開発を行うことが重要となっている。そのため、様々なデータの蓄積、管理、共有のためのシステムが必要となる。

また、岐阜県内の産業構造を見ると、全産業における製造業の事業所数割合は18.8%と全国1位、従業者数は29.5%で全国4位となっており、県内企業のうち製造業の占める割合は非常に高いといえる。また、従業者19人以下の小規模事業所が占める割合は事業所数割合で89.2%と、小規模事業所の占める割合が高い。

そこで、当研究所では、中小零細企業を対象としたデータ管理共有のためのシステム構築を目的として、低価格でかつ容易に利用できるネットワーク分散型エンジニアリングデータベースシステムの開発を行った<sup>[1]</sup>。本報告では、ネットワーク分散型エンジニアリングデータベースシステムの説明と、実際に中小企業に利用してもらう上での改善点について述べる。

### 2. 分散型エンジニアリングデータベース

本研究で開発したネットワーク分散型エンジニアリングデータベースシステムと、同システムをもとに試作した開発支援アプリケーションについて説明する。

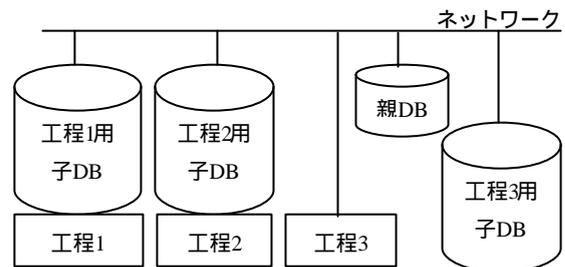


図1 分散データベースシステム概略

#### 2. 1 概要

本システムは、複数の中小企業あるいは部署がネットワークを介して連携して製品を作り上げるような体制に利用されることを想定したデータベースシステムである。図1に、本システムの概略図を示す。

システムは、実際にデータを格納する子DB(データベース)と、データベース全体を管理する親DBとに分けられる。

子DBは基本的に各作業工程ごとに設置する。子DBには、担当工程で製作されたあらゆるデータを保存することができる。ただし、子DBは物理的に担当工程の近くにある必要はなく、ネットワーク上の自由な場所に配置することができる。

親DBには、子DBのネットワークアドレスや、子DBに保存されているデータの概要などが保存されている。子DBにデータが保存されるたびに親DBに更新情報が送られるため、利用者は親DBにアクセスすることで、必要なデータがいつ作られ、どの子DBに保存されているかを知

ることができる。

また、各DBのデータベースエンジンは、オブジェクト指向データベース<sup>[2]</sup>を使用している。

### 2.2 特徴

本システムの特徴として、低コストで構築できると、オブジェクト指向データベースによる柔軟なデータ構造があげられる。

本システムの利用対象として考えている小規模零細企業では、扱うエンジニアリングデータの種類の数が比較的少なく、大企業が採用しているような大規模集中型データベースはコストに見合わないと考えられる。一方で、本システムは、小規模で安価なデータベースを連携させるため導入が容易である。また、将来扱うデータ量が増えたときも拡張がしやすい。

また、現在利用されているデータベースの多くは、リレーショナルデータベースを採用している。リレーショナルデータベースは、人材管理や在庫管理のような定型データの管理には適しているが、CADやシミュレーション結果など定型データに収まらないエンジニアリングデータには適していない。本システムではオブジェクト指向型データベースを採用しているため、データの種類の問わない柔軟なデータ構造を持つことができる。

### 2.3 開発支援システムの試作と実証実験

前節までに述べたシステムを基に、複数の工程を通して製品開発する場合を想定して、仕様の入力から設計・製造に至るまでのデータのやりとりをインターネット上で行うための開発支援アプリケーションを試作し、実証実験を行った。

このアプリケーションでは、仕様の入力から設計・製造に至るまでの工程を一つのプロジェクトとし、各工程ごとにできたデータを子DBに、それらを管理するプロジェクト管理データを親DBに格納する。

プロジェクト管理データには、開発対象ごとの付属情報(発注者や納期など)や開発工程ごとに出力されるエンジニアリングデータの付属情報(所在情報や更新情報)なども含まれる。また、各エンジニアリングデータはプロジェクトごとにツリー構造でデータベースに格納される

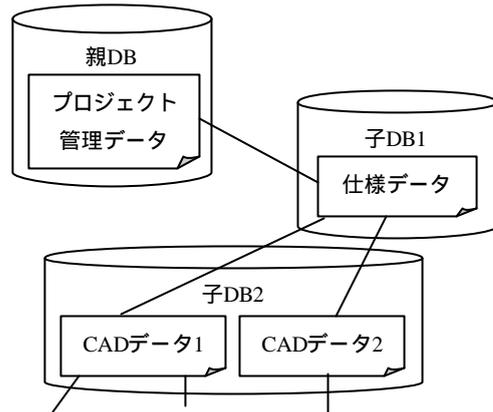


図2 プロジェクトのツリー構造

(図2)。

この開発支援アプリケーションを使って、機械部品であるカムの開発を例にとって実証実験を行った。図3に実証実験体制を示す。なお、本実験では、インターネットに常時接続できない機関があったため、データベースを岐阜県と高知県の2カ所にまとめて設置した。個々のデータベースをネットワーク上に自由に設置できる点を利用したものである。このような協力体制のもと、カムの仕様作成から製造・評価までに作成される各種データのやりとりを本アプリケーション上で行った。

この結果、従来であればメールやftpによるデータの受け渡しや、各担当ごとに行わなければならなかったバージョン管理などの面倒な作業を省くことができた。また、各現場のシステムが出力するデータをそのままデータベースに保存することができることなどから、受注してから品質評価までの期間の短縮にもつながると考えられる。

### 3. データベース利用のための改良

続いて、実際に企業でデータベースを利用してもらうために、検証実験を行う。ここで、企業で利用してもらうにあたり、必要な付加機能の洗い出しを行った。

図4に、想定しているデータベースの利用概略を示す。開発・設計等を担当する開発部門と、製造を行う製造部

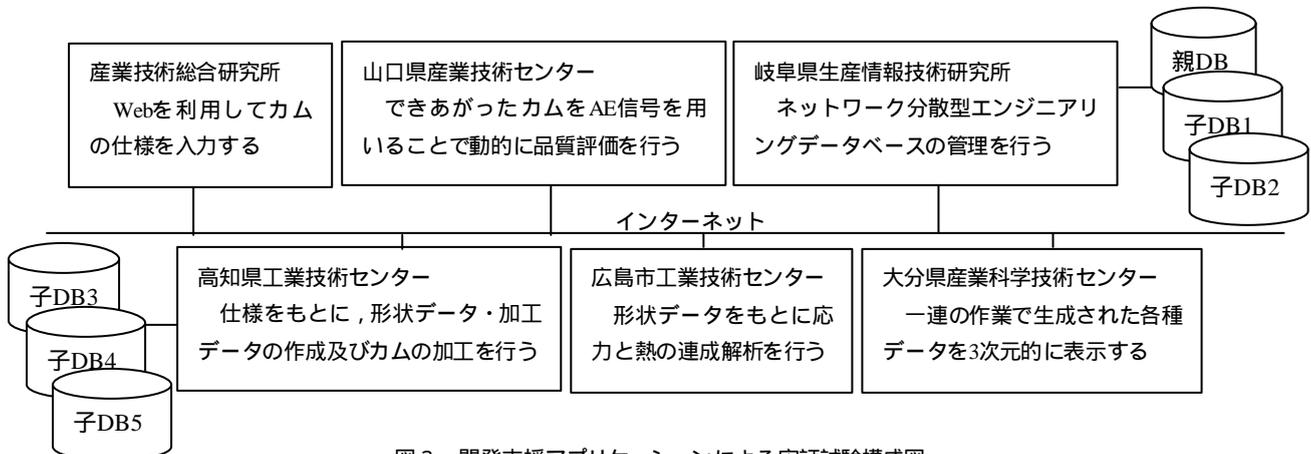


図3 開発支援アプリケーションによる実証試験構成図

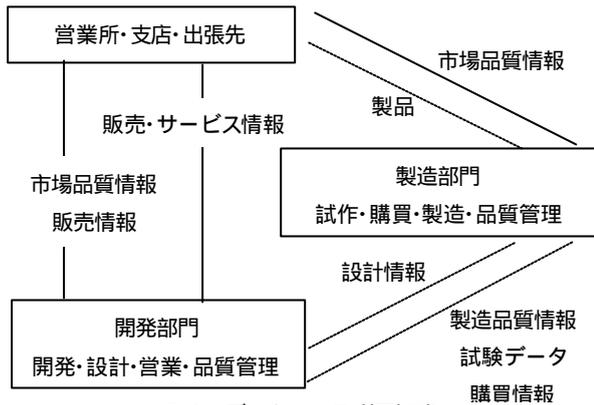


図4 データベース利用概略

門および営業先から相互にデータを利用する。中小零細企業が互いにデータのやりとりをするため、セキュリティを確保する必要がある。また、中小零細企業には、インターネット接続の環境が整っておらず、ダイヤルアップで接続する必要があるところもある。以下に、これらの点に対する対応について述べる。

3.1 セキュリティの確保

本システムは、インターネットを利用してデータのやりとりをしている。インターネットは全世界に普及し、誰もが利用できるという利点があるが、その一方で、悪意を持ったユーザによるデータの盗聴、改竄などが問題となっている。インターネットを介してデータベースを利用する上では、セキュリティの確保が必要となる。

セキュリティ確保のための方法には、次のような方法が考えられる。

- ・ 予めデータを暗号化してからデータベースに登録する
- ・ VPN<sup>[3]</sup>を使用する

データの暗号化は、データの保存時にデータを暗号化し、読み出し時に複合化する方法である。暗号化する方法としては、一般に流通している暗号化ソフトを利用してデータアクセス時に暗号化・複合化する方法と、データベースアクセスソフトウェアに暗号化・複合化のためのプログラムを組み込む方法がある。前者は、データベースにアクセスするために暗号化・複合化の手間がかかるため、ユーザーに負担を強いることになる。また、後者に関しては、暗号化・複合化には高い信頼性が要求されるため困難である。そこで、本研究では、VPN(Virtual

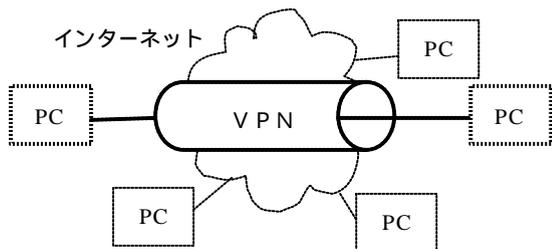


図5 VPNの概念図

Private Network)を利用することでセキュリティの確保をした。

VPNは、インターネット内に仮想の専用線を作ることによってセキュリティを確保するものであり(図4)、現実の専用線をひくことなくインターネットをそのまま利用できる。VPNは、データの暗号化、トンネリングなどの方法でセキュリティを確保している。また、VPNには大きくアプリケーションレベルでセキュリティを確保するものと、IPレベルでセキュリティを確保するものがある。本研究では、後者のVPNのうち、IPSec<sup>[4]</sup>を採用した。IPsecは、IPレベルでセキュリティを確保するためアプリケーションに変更を加える必要がない、OSの基本的な機能として備わっているといった利点がある。

3.2 ダイヤルアップへの対応

インターネットの利用形態の一つに、ダイヤルアップ接続がある。本システムを使うにあたり、ダイヤルアップには、次のような問題点がある。

- ・ 予めダイヤルアップしておくあるいはダイヤルアップ接続のPCへダイヤルするなどしないと、他のPCからアクセスすることができない
- ・ データの転送に時間や通信コストがかかる

本システムは、子DBをネットワーク上に分散して配置し、必要に応じて子DBへアクセスをする。そのため、外部からアクセスできないとなると、ダイヤルアップ接続のコンピュータにデータベースを設置することができず、ネットワーク分散型データベースを構築することができない。そこで、以下のような解決策を採った。

本試験では、データベースを全てネットワークに常時接続しているコンピュータに設置することとした。これにより、常時接続のコンピュータからは自由にデータベースにアクセスすることができ、ダイヤルアップ接続のコンピュータからも、必要なときにダイヤルアップをすることでデータベースにアクセスすることができる。

これによりどこからでもデータにアクセスできるようになった。しかし、ダイヤルアップ側のデータベースを常時接続側に設置したことで、ダイヤルアップ側のユーザは自分が製作したデータに関しても、アクセスするたびにダイヤルアップする必要が生じる。そこで、ダイヤルアップ側にも常時接続側と全く同じデータベースを設置することとした。ダイヤルアップ接続を使っているユーザは、このデータベースにアクセスする限り通信コストを気にする必要はない。

ここで、常時接続・ダイヤルアップいずれかのユーザがデータを書き換えると、双方のデータベースのデータに差異が発生する。そのため、同期を取る必要がある。一般に、同期を取るためには、データベースの入出力インターフェースを介してデータを一つ一つ読み出し、比較する必要がある。しかし、本システムではオブジェクト指向データベースの利点を生かし、図5のように、ネットワーク接続時に直接データにコネクションを張るよう

にした．これにより，入出力インターフェースを介することなく高速にデータにアクセスすることができる．

以上のようにデータベースアプリケーションに改良を加え，検証実験を行っていく．

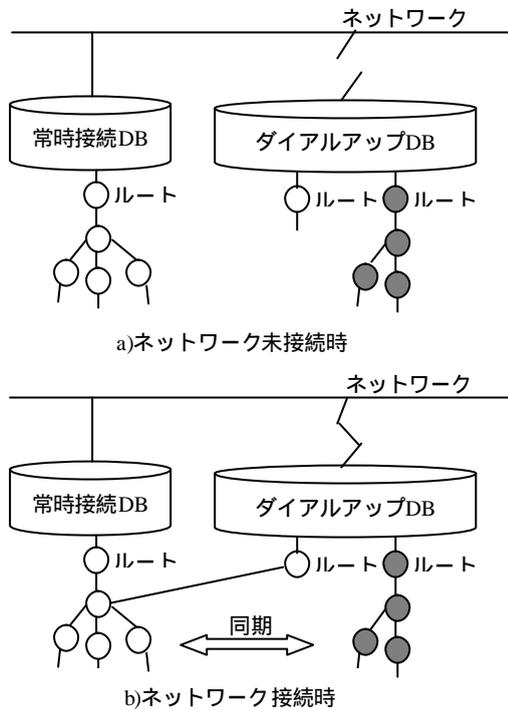


図5 データベースの同期

#### 4. データベースの利用状況と展望

データベースシステムに対する市場調査を行ったので，その結果をもとにデータベースの展望を報告する．

現在，国内企業の約75%がすでにデータベースを保有し，業務に利用している．その利用目的の多くは顧客管理や販売管理などの非エンジニアリング系データの管理に利用であり，生産・資材管理などエンジニアリング系データの管理に利用している企業は全体の30%未満である．また，従来は専用線を利用したグループウェアによるデータベース利用が主であったが，現在はインターネットを利用したシステムが主になりつつある．

また，企業で利用されているデータベースの多くはリレーショナルデータベースである．しかし，今後の導入予定を見ると，企業規模にかかわらずオブジェクト指向

型データベースがリレーショナルデータベースを上回っている．これは，リレーショナルデータベースが得意とする顧客管理などの分野には既にデータベースが行き渡っているが，その一方でまだデータベースが行き渡っていないエンジニアリングなどの分野において，エンジニアリングデータの扱いに適したオブジェクト指向型データベースが期待されている現れと考えられる．さらに，柔軟なデータ構造を持つことができることや，C++やJavaなど現在主流となっているオブジェクト指向プログラミング言語との相性の良さ，XMLなどの構造化記述言語への対応などからも，オブジェクト指向型データベースの普及が見込まれている．ただし，オブジェクト指向ソフトウェア技術者が不足している現状では大規模なデータベースの製作は困難であり，当面の間は小規模なデータベースの需要が高いと考えられる．

以上のことから，中小企業向けの安価なオブジェクト指向型データベースの需要は非常に高いと考えられる．

#### 5. おわりに

本研究では，中小企業での利用を目標に，ネットワーク分散型エンジニアリングデータベースシステムを開発し，カム部品の開発を想定して実証実験を行いその有効性を確認した．

今後，地元企業の協力を仰ぎ，インターネット上で本システムの検証実験を行っていく．企業で利用してもらうことで現場からの声をフィードバックし，よりよいデータベースを目指していく．

#### 文献

- [1] 窪田直樹，大野尚則，棚橋英樹，“ネットワークを介した分散型エンジニアリングデータベースシステムの開発”，2000精密工学会秋季大会，2000
- [2] S.Khoshafian著/野口喜洋・小川東訳，“オブジェクト指向データベース入門”，共立出版，1996
- [3] 石鍋洋一，“ネットワークセキュリティ”，OPEN DESIGN,pp58-76,2001
- [4] 山田英史，“IPsecによるVPN構築”，INTERNET WEEK 2001,2001

# VR技術を利用した設計支援システムの開発(第3報)

藤井 勝敏      横山 哲也      浅野 良直      棚橋 英樹

## Development of Design Supporting Systems using VR Technology(III)

Katsutoshi FUJII    Tetsuya YOKOYAMA    Yoshinao ASANO    Hideki TANAHASHI

あらまし 没入型6面ディスプレイ装置COSMOSを利用した設計支援の可能性有用性を検討し、装置の特性を生かした設計作業支援の手法を研究した。本研究では支援の対象を建築設計とし、それらに関する特別な専門知識を持たない一般の人向けに、COSMOS特有の没入感、スケール感を生かした体験型設計・評価支援システムの開発を目標としてきた。本年度は、建築設計の基本となる間取りを、建物内の視点に立って「空間を掘るような感覚」で作成できる「間取り設計支援システム」と、室内家具のレイアウト設計を臨場感のある仮想空間で行うことができ、「仮想人間」による居住時性を客観的に検討できる「室内レイアウト設計支援システム」の2つを開発した。

キーワード 仮想現実感(VR)、COSMOS、設計支援、間取り、レイアウト

### 1. はじめに

仮想現実感(VR)技術とは、近年極めて高速になってきたコンピュータの処理能力を利用して現実世界の事象を計算モデル化し、立体視機能等をもつ特殊な表示装置を使って人に提示することによって、あたかも実在の物がそこにあるかのような感覚を与えることができる技術である。この技術を利用することにより、例えば失われた古代文明や、遠方の、あるいは空想の世界を散策することや、物理、数学モデルに基づく仮想空間を探索することができる。

一方で、こうしたVR技術を県内製造業の技術革新、活性化に結び付けるため、1998年、岐阜県科学技術振興センターに、世界的に最先端のVR装置である没入型6面ディスプレイ装置COSMOS<sup>[1]</sup>(図1)が建設された。筆者らは、これまでCOSMOSを用いて、製造業における設計作業の支援に適用するために必要なVR技術を開発してきた。



図1 没入型6面ディスプレイCOSMOS

1999年度よりこれまでに、PCやGWSで作成したCADデータをCOSMOSで表示するデジタルモックアップ的な利用方法を基本として、COSMOSの表示特性評価<sup>[2]</sup>、データ作成・表示プログラムの開発、COSMOS内での指示操作作用インタフェースの開発を行った。

本報告では、COSMOSの特徴を活かした応用事例として建築設計作業を取り上げ、今年度開発した「間取り設計支援システム」と「室内レイアウト設計支援システム」について述べる。その上で本研究を通して得られた技術、知見をもとに、VR技術を設計支援に利用する利点と課題について整理する。

### 2. VRによる建築設計支援

VRの世界では、現実世界における物体に相当する、仮想物体を取り扱う。仮想物体は主に座標値や質感パラメータなどの数値情報で表現されるため、数量や大きさに本質的な制限はなく、外観の変更も数値の増減で容易に実現できる。

VR表示装置のCOSMOSは、6画面から成る箱型スクリーンでユーザを囲い、ユーザの視点位置に応じた立体映像を全面に投影することによって仮想物体を表示する装置である。そのためユーザがどの方向を見ても視界が途切れることがなく、またユーザが動いて仮想物体を回り込んで見れば、その視点位置から見えるべき部分が見られるため、ユーザは自分が仮想空間の中に入り込んだような感覚が得られる特徴がある。

これらの特徴は製造業一般の設計作業において、試作コスト削減や修正が容易になるなどの利点があるが、特に建築設計においては、専門家でない一般ユーザに対し

でも大きな恩恵をもたらす。例えば、一般的な住宅設計においては通常、2次元の図面やパース図あるいは小型の模型が用いられている。しかし、これらから完成後の機能性や空間的な広がりや予想することは、経験がない人には難しく、もし施工中や施工後に予想との違いを発見しても、修正することは非常に困難である。そこで、VR技術を利用して住宅の完成イメージを原寸大で仮想体験できれば、事前に問題点を発見、修正できるため、そのような問題を避けることができるだけでなく、コスト削減や工期短縮につながる。そこで本章では、建物の仮想体験を行うシミュレータと、建物の設計変更を可能にしたシステムについて述べる。

### 2.1 仮想建築シミュレータ

筆者らはまず、COSMOSで建築物を原寸大表示するシステムを開発した。第1報[3]では、間取り図をもとに2次元CADで作成したCADデータをCOSMOSで表示し、コントローラでウォークスルーできるシステムを報告した。このシステムでは一般的にCADデータを表示する場合と共通の技術を利用したが、建築物の場合、ユーザが現在いる部屋からは決して見えない部分(別の部屋など)も描画するため、大きな建物になると無意味な描画処理が増え、画面の更新間隔が長くなりユーザにストレスを感じさせる問題が生じた。

そのため第2報[4]では、部屋の接続情報と部屋毎の描画データを併せ持った特殊なデータ構造を定義し、現在いる部屋とその隣の部屋のみ限定して描画することにより、大きな建物であっても描画負荷を抑えて、軽快にウォークスルーできる仮想建築シミュレータ(図2)を報告した。またそのシステム利用中にCOSMOSの中で問題点を発見した場合、その部分に手書きで指示を記入できるようにし、その結果を2次元CADにフィードバックして修正する設計手段を提案した。

### 2.2 間取り設計支援システム

上記のシステムでは、データ作成には2次元CADを使い、作成したデータをCOSMOSに転送して表示する方法を採っている。これは、建物のCADデータ構造が複雑で、



図2 仮想建築シミュレータ



図3 間取り設計支援システム

データ量が多く、COSMOSの中だけでそれらを作成、編集するのは困難であったためである。

そこで本報では、システムの機能を間取りの設計に限定し、個々の部屋の広さと配置、扉の位置の編集をCOSMOSの中で行える間取り設計支援システムを開発した。その基本機能としては、

- ・室内にいる状況を提示
- ・室内を歩行
- ・扉を経由して部屋を移動
- ・部屋の大きさや外観を変更
- ・扉の位置を変更

である。システムの概観を図3に示す。

このシステムは、間取りの基本単位である部屋ごとに大きさや扉の位置などを設定することによって、平面的な間取りを設計する。COSMOSでは、ユーザが現在いる部屋とそこから見える周辺の部屋が提示されており、COSMOS内にいるユーザは、コントローラのジョイスティックを使って室内を自由に移動できる。ユーザが扉の方向を見ると、その扉が反応し戸が開くアニメーションを提示する。ユーザが別の場所を見ると、開いていた扉は閉じる。

ユーザが任意の時点でコントローラのボタンを押すと、図4のようなメニューウィンドウが空間中に表示される。表示されるメニューの内容は、ボタンを押した時点でユーザが見ていた対象によって異なり、見ていた要素に関連して変更、設定可能な項目などが表示される。メニューウィンドウ表示中は、メニュー中の一つの選択項目を目立たせるようにカーソルも表示されており、コントローラで選択操作をした後決定ボタンを押すことで、対応する機能を呼び出すことができる。

例えば壁を見てボタンを押した場合、その方角の壁について、壁を奥行き方向に「拡げる」「縮める」ことができるメニューや、その方角に「扉」を設置するメニューが現れる。ここで「扉」を選択すると、設置可能な扉の種類が選択でき、扉を設置すると、その扉を「左へ」「右へ」移動したり、片開き扉の取っ手の向きなどを「反転」、あるいは扉を「撤去」するメニューが現れる。また、「く

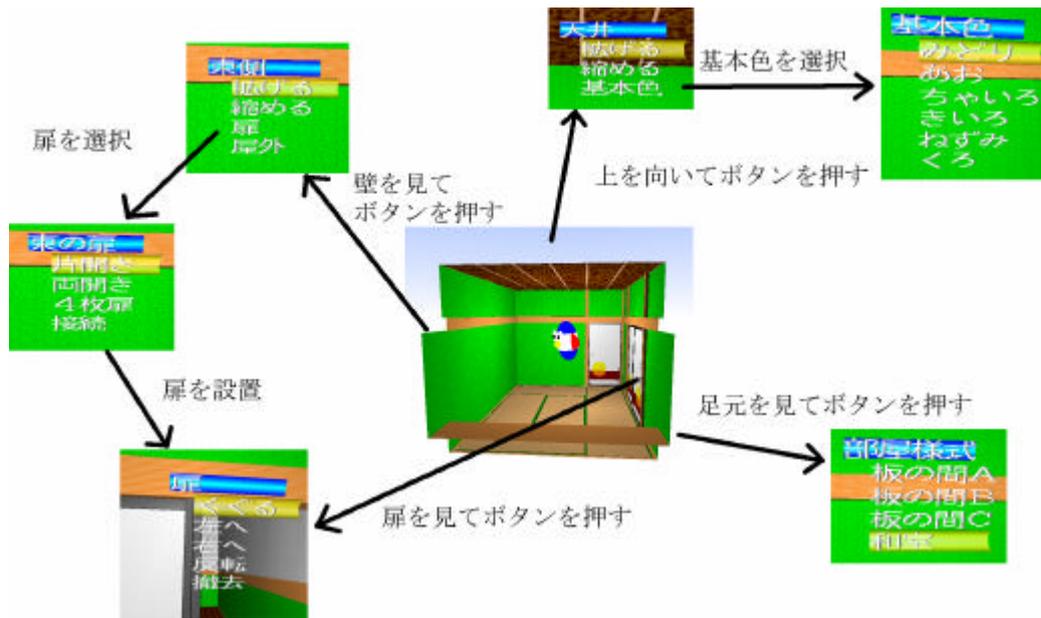


図4 間取り設計支援システムのメニュー表示と操作方法

ぐる」を選択すると、その先の既存または新規の部屋に移動することができる。

### 2.3 特徴と利用効果

間取り設計支援システムは、仮想的な建物の中に居ながらその建物に修正を加える作業を対話的に行えることが特徴である。ふすまなど扉を主観的な視点により直感的に確認でき、不具合があれば簡単に新設、変更、撤去できる。また部屋の拡張も他の部屋と干渉しなければ自由に行うことができ、あたかも「空間を掘るような感覚」での設計手法を実現している。

また、このシステムを使って編集するパラメータ項目数(自由度)は、従来の2次元CAD等と比較して大幅に削減しているが、一つの部屋あたり数十項目ある(表1)。そのためユーザが直感的に変更パラメータにアクセスできるよう、視線方向による対象の選択と、その対象に対応した日本語メニュー表示・選択を導入している。

このシステムを利用することによって、図5のような間取りを簡単に作成することができ、個々の部屋の広さやつながりなどの空間的な機能性評価や防犯上の死角などを、仮想体験を通じて主観的に確認できる。このことから、間取りや部屋割りのアイデアをまとめる上では有効な支援ツールになると考える。

実際に建物を施工する場合には、より詳細な設計図が必要であり、従来通り専門の設計士が図面を引くことに

なるが、このシステムを使って建築主と設計士が建物のイメージを共有できれば、より円滑に設計作業を行うことができる。

さらに、ある程度詳細な設計図ができた段階では、2.1節の仮想建築シミュレータを用いることによって、より現実に近い完成イメージを体験することができる。

このようにして、建築設計においてVR技術を利用することは、建築主が簡単に自分の建物を設計できることによる顧客満足度向上、建築主と設計士間の意思疎通の円滑化、そして現場での設計変更要求の減少によりコストの抑制に貢献できることが期待される。

表1 部屋ごとのパラメータ項目

項目の名称	選択範囲
様式	板の間, 和室など
基本色	緑, 青, 茶, 黄など
位置(X,Y)	32bit整数
大きさ(X,Y,Z)	1~30ブロック
壁[東,西,南,北]	壁, 窓, 壁なし
ドア[最大8]	方向: 東西南北 位置: 0~29

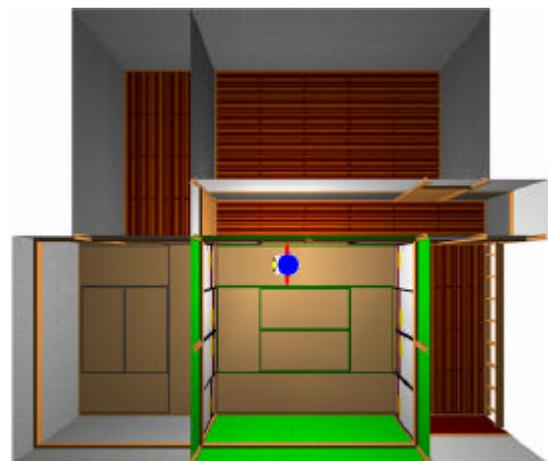


図5 間取り作成例

### 3. 室内レイアウト設計支援システム

前章では、建物自体をCOSMOSを使って設計する手法について述べたが、人が建物の中で生活する場合、家具の配置についても検討が必要である。室内家具のレイアウト設計は、経験から来る常識や作法、あるいは人の行き来のしやすさを最適化する方法などの理論的な手法も考えられるが、一般人にとっては、自分で実際に家具の位置を動かして決めるという原始的な方法が、単純であると同時に納得しやすい。この方法で障害になるのは、現実の重い家具を動かすことが容易ではないという点であるが、VR技術を利用して家具を仮想物体として表示すれば、このことは全く問題にならない。またCOSMOSを利用して、仮想室内で生活する視点に立つことにより、その特徴でもある臨場感を得ることができる。本章では、今年度開発した室内レイアウト設計支援システムについて述べる。

#### 3.1 システムの機能

本システムに要求される基本的な機能としては、

- ・室内にいる状況を提示
- ・室内を歩行
- ・家具を表示
- ・家具を移動
- ・家具を増加・撤去
- ・家具の種類を変更

である。このうち最初の2つは前章の間取り設計システムにも含まれる機能である。

家具を表示する機能については、市販の形状データ集の家具データを読み込み描画する方法や、箱や円柱など簡単な図形を組み合わせるモデリングする方法を検討した。今回のシステムの目的は、個々の家具デザインの評価ではなく、複数の家具を配置した室内の機能性や、広がり感の提示であるため、家具形状は簡易な形状で十分である。これによって複雑な家具データを表示する場合と比較して表示計算負荷を軽減できる利点がある。

家具の移動、増加、撤去、種類変更は、本質的にはシステム内部のパラメータ操作であり、ソフトウェアにより容易に実現できるが、ユーザインタフェースの実装においては使い勝手向上のための工夫が必要になる。本システムでは、家具が地平面上を2次元移動するという拘束条件と衝突検出による幾何的拘束によって家具の配置に関する操作性を向上している。

#### 3.2 利用方法

開発したシステムの概観を図6に示す。利用者はCOSMOSに映し出された室内に入り、生活する時の視点で室内を歩き回りながら、必要に応じて家具を配置、移動することによって、レイアウトを決定する。

家具を移動させたい場合は、手元のコントローラを使って対象を選択し、アナログの2次元スティックを用いて平面上を移動することができる。また、鉛直方向を軸



図6 室内レイアウト設計支援システム



図7 室内レイアウト作成例

として家具の向きを回転させることもできる。

家具を追加、撤去、種類変更する場合は、それぞれの操作に対応したボタンを押すことによって結果が直ちに仮想の室内に反映される。本システムで作成したレイアウトの一例を図7に示す。

#### 3.3 仮想人間の導入

室内レイアウトを検討する場合、機能的かどうかの判断は人が実際の作業を行う時の動作に支障がないかで判断できる。本システムにおいては、ユーザが自分で室内を移動して試すことが出来るが、他人の動作を客観的に観察することも評価の指標になる。そこで本システムではレイアウトの基本機能の他に、仮想人間(図8)を導入した。

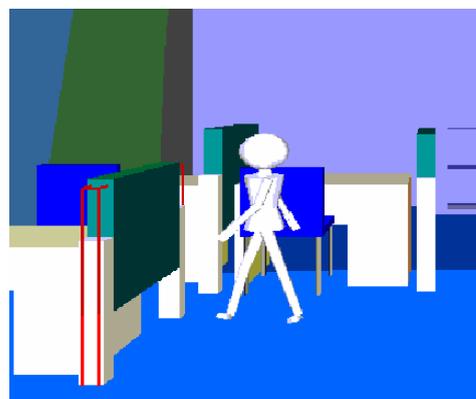


図8 仮想人間

仮想人間はレイアウト中の家具を避けながら、あらかじめプログラムされた行動決定モデルに沿って行動する人形要素である。仮想人間はユーザの直接的な操作対象ではないが、オフィスで想定される入り口から椅子、書架などを経路するような行動を、ユーザが配置した家具を避けるように経路を探索して行動する。経路の探索には人工ポテンシャル法<sup>[5]</sup>を用い、家具のポテンシャルを高く、目標のポテンシャルを低く設定している。

仮想人間を室内に登場させたことによって、居住時に予想される生活者の行動の様子を時系列で観察できることができ、室内レイアウトの機能性を確認する補助になる。また、ユーザ自身が仮想人間と向き合うことによって、他人とすれ違う際のストレスや作業性の変化を直感的に体験することもできる。

#### 4. VR技術を利用した設計支援

VR技術は、人のあらゆる感覚に関わる研究分野であるが、製造業の設計作業においては表示系(視覚)、操作系(触覚)の技術が重要である。表示系の技術は、本研究に関してはCOSMOSそのものであり、操作系は、操作方法、操作手順、入力方式を含むヒューマンインタフェース関連の技術全般を指す。

本章では本研究の中で取り扱ってきた様々なVR技術



図9 COSMOSの背面スクリーン



図10 COSMOSのメインコンピュータ

に関して、建築以外の設計支援への利用に関する観点で有用性や課題について考察する。

##### 4.1 VR表示系の技術

本研究におけるVR表示装置であるCOSMOSの概要は、2章冒頭に述べたとおりである。この装置で特徴的な部分は図9の背面スクリーンで、COSMOSの入り口ドアを兼ねるこのスクリーンを閉じれば、ユーザは現実世界から完全に分離し仮想空間に没入することができる。これにより、COSMOS内部の空間に仮想物体が浮遊している様子を体験したり、その周りを回り込んで観察することを可能にしている。

前述の建築設計支援システムでは、ユーザよりも大きな設計物である建築物を対象とすることでユーザの周りを映像で包み込む前者の利点を強調してきたが、家具や車などの外観を検討する場合、後者の利点の有効である。筆者らはこのような利用方法に関する研究<sup>[6]</sup>も併せて進めてきたが、現在の状況では、実用面において以下の課題がある。

COSMOSにおけるリアルタイムCG映像生成を担うメインコンピュータは、SGI社のOnyx2 Reality Monster Infinet Reality 2(図10)で、導入当時は最先端の処理能力を有していたが、日進月歩で進化するコンピュータ技術動向の中で、約3年半経過した現在では、PCなどの低価格機器に描画速度や解像度など能力的に追いつかれつつある。そのため、PC用のCAD等で作成したデータが複雑化してきた最近では、そのデータをCOSMOSで6画面同期した立体映像として表示することが処理速度的に困難になりつつある。建築設計支援システムにおいては、不要な描画処理を避けたり、描画オブジェクトを簡略化することによってこの問題に対応した。しかし車などの製品の外観を検討する場合は、その目的の関係上、簡略化することは出来ないため、異なる方法で高速処理を実現するか、システム自体を高速化する必要がある。

また、映像を投影するプロジェクタに関して言えば、家具など単体の製品の外観デザインを評価しようとする用途においては、全体的な照度、スクリーン中心部と周辺部の照度差および解像度が、現在の仕様では実用上不足していると言わざるを得ない。この点については、最近のデジタル映写機に使われ始めているDLP方式プロジェクタに交換することで、顕著な改善効果が期待できることを確認しており、今後のVR技術普及や更なる研究開発に備えて導入も検討している。

##### 4.2 VR操作系の技術

仮想空間内で設計作業を行うためには、形状データの個々のパラメータを、設計者の意図に沿って自由に変更できるユーザインタフェースが必要である。形状データに含まれる色や形といったパラメータの数は、設計の対象により差があり、複雑な形状では膨大な数になる場合があるが、通常は何らかの法則で組織化し逐次選択等の方法で特定することができる。



図11 COSMOSの操作入力装置  
(左：任天堂製 右：SONY製)

COSMOSの中での作業は基本的に立つて行うため、パラメータの数値操作に関しては、図11のようなゲーム機用のハンディコントローラが利用しやすい。これらの装置には複数のボタン型スイッチに加えて、2軸のアナログスティックが付いている。

このアナログスティックは数値パラメータを直感的に操作する際に有用であるが、設計作業に必要とされる寸法指定のような正確な数値指示や、スケッチ画のような線の入力には向いていない。そこで、本研究ではこれまで様々な入力方法や装置を検討し開発してきた。例えば、傾斜センサと多回転ボリュームを用いて、直感的な3次元方向指示と、正確な位置決めができる装置を開発した<sup>[7]</sup>。また、磁気式的位置センサを使った手書き入力方式を検討し、時系列を持つ入力指示から有効なデータを曲線として抽出し、利用する手法を開発した(図12)<sup>[8]</sup>。

現在ではアプリケーションごとに最適な装置を使用している。例えば建築設計支援システムでは、ウォークスルー操作の際あまり操作精度が必要でないため、手軽なゲームコントローラを利用している。位置を指示する場合には、直感性を重視する場合は磁気式位置センサを使った手書き入力を、正確さを重視するレイアウト設計にはジョイスティックによる直感的操作に加えて、幾何学的な拘束条件を導入している。筆者らの経験では、VRのアプリケーションでは直感性、簡便性を優先させるべきであり、視覚効果による状況表示の補助や、間取り設計システムで導入したメニュー選択のように、対話的に指示を与える方法が有効であると考えている。

## 5. まとめ

VR技術を利用して、設計作業を支援することの有効性を検討し、建築設計を応用例とした設計支援システムのプロトタイプを開発した。

没入型6面ディスプレイCOSMOSを用いることにより、建築物のように、原寸大試作による事前検討が困難な製品についても仮想試作が可能で、内部を体験することによって、空間機能の評価や不具合の発見、修正を事前に行うことができる。特に本報では建物の基本設計である

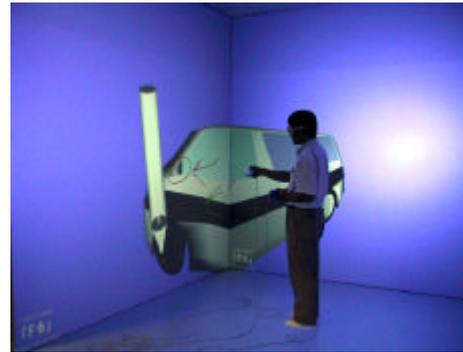


図12 手書き入力インタフェース

間取りを、仮想体験を通して直接空間を加工する「空間を掘るような感覚」での設計手法を提案した。

また、ユーザが実際に生活するときの視点に仮想的に立って、仮想的に同居する人間の動きを見ながら家具の配置を検討し修正できる、室内レイアウト検討支援システムを開発し、その有効性を検討した。

そして、本研究を通して得られた技術、知見をもとに、VR技術を一般の設計支援に利用する際の利点と課題を整理した。

## 文献

- [1] T.Yamada, M.Hirose, Y.Iida, " Development of Complete Immersive Display : COSMOS ", Proceedings of VSMM98, pp.522-527, 1998.
- [2] 藤井, 浅野, 棚橋, " 没入型6面ディスプレイにおける空間知覚特性に関する考察 ", ヒューマンインタフェースシンポジウム'99論文集, pp.207-pp210, 1999.
- [3] 藤井, 浅野, 窪田, 棚橋, " VR技術を利用した設計支援システムの開発(第1報) ", 岐阜県生産情報技術研究所研究報告No.1, pp.11-16, 2000.
- [4] 藤井, 浅野, 棚橋, " VR技術を利用した設計支援システムの開発(第2報) ", 岐阜県生産情報技術研究所研究報告No.2, pp.1-4, 2001.
- [5] 大田, 倉林, 新井, " 知能ロボット入門 ", コロナ社, pp.61-71, 2001.
- [6] 浅野, 藤井, " 多面ディスプレイの高度利用に関する研究 ", 岐阜県生産情報技術研究所研究報告No.1, pp.1-6, 2000.
- [7] K.Fujii, Y.Asano, N.Kubota, H.Tanahashi, " User Interface Device for Immersive 6-screens Display COSMOS ", Proceedings of VSMM2000, pp.275-282, 2000.
- [8] 藤井, 浅野, 横山, 棚橋, " 没入型6面ディスプレイCOSMOSにおける手書き入力インタフェースの提案 ", ヒューマンインタフェースシンポジウム2001論文集, pp.145-146, 2001.

# バーチャルモックアップによる製品評価システムの開発 (第1報)

浅野 良直      藤井 勝敏      小川 行宏      棚橋 英樹

## Development of the Product Evaluation System by Virtual Mock-Up( )

Yoshinao ASANO    Katsutoshi FUJII    Yukihiro OGAWA    Hideki TANAHASHI

あらまし 本研究では没入型ディスプレイシステムにおけるモデルビューア開発を目的としている。没入型6面ディスプレイシステム(以下COSMOS)はユーザの全方位をスクリーンで囲うため大型の製品、建築物等のオブジェクトを実物大で表示できる特徴があるため、製品評価が容易に可能になると考えられる。オブジェクトによる製品評価を行う場合、オブジェクトを表示/操作するためのモデルビューアが必要となる。これまでCOSMOSで使用してきたモデルビューアはコマンドラインで起動するためオブジェクト名や表示オプションの入力が煩わしく、また、オブジェクトの操作はコントローラのみで行うため、操作機能が多くなると複雑なボタン操作を覚えなければならない、といった問題があった。そこで、本年度はGUIによる起動画面の作成を行ってオブジェクト名や表示オプションの設定を容易にし、また、COSMOS内でオブジェクトや操作対象の切り換えができるメニュー画面を表示して操作性の向上を図ったモデルビューアの開発を行ったので報告する。

キーワード COSMOS, バーチャルモックアップ, バーチャルリアリティ, モデルビューア

### 1. まえがき

多くの分野で3次元CADや3次元CGシステムを使用した製品開発やプレゼンテーションが利用されている。こうしたシステムを利用することで、従来では試作段階まで発見できなかった組み付けや部品干渉の問題を設計段階で変更/修正できるようになり、試作コストの削減と共に開発期間の短縮を図れる利点がある。また、家屋や工場、橋、道路といった建築土木分野においても顧客に完成イメージを伝えることが可能となる<sup>[1,2]</sup>。しかし、一般のCRTディスプレイでは大型のオブジェクトを実物大で全体を表示することはできないため、実際の製品は完成イメージと異なる可能性がある。没入型6面ディスプレイ(以下COSMOS)<sup>[3]</sup>(図1)はオブジェクトの実物大表示が可能であり、ユーザの全方位をスクリーンで囲って、視点に合わせた映像を提示するため高い没入感を得ることができる。従って、COSMOSを利用することで、実際の製品や環境に近い状態の評価を行うことが可能となる。しかし、これまでCOSMOSで使用していたモデルビューアはコマンドラインによる起動であるため長いオブジェクト名や複数の表示オプションの入力に適していない。また、COSMOS内でのオブジェクトの操作はコントローラだけで行っており、移動や回転、倍率変更といった基本的な操作以外の補助機能(オブジェクトや操作対象の切り換えなど)の選択はボタンの組み合わせで行うため、複雑ボタン操作となる。また、COSMOS内で操作している対象が切り替わると各ボタンに割り当ててある機能が

変わるためユーザにとって分かりにくい仕様となっている。そこで、本年度はこのモデルビューアの操作性を高める改良を行ったので報告する。具体的にはGUIによる起動画面の作成を行いオブジェクト名などの入力を容易にし、また、COSMOS内での操作の補助機能をメニュー画面として表示することで操作機能の向上を図ったモデルビューアを開発した。



図1 COSMOS

### 2. モデルビューア開発

#### 2.1 メニューインタフェース

没入型ディスプレイシステムにおいてオブジェクトを操作するためのインタフェースには3次元マウス、音声入力、データグローブ、力覚デバイスなど様々な入力デバイスが使用されている<sup>[4-8]</sup>。没入型ディスプレイシステ

ムではユーザが自由にディスプレイ内を動かすため、多くの入力デバイスは手で持ち運べるような小型のものが多く。そのため、ボタンなどの入力部分が少ないので操作できる機能数が限られる。このような問題に対処する方法の1つとして操作機能をメニュー画面で表示/操作する方法がある。しかし、移動や回転などの直感的に行う操作までメニュー画面を使用すると操作性が低下するため、移動や回転のような基本的な操作は入力デバイスの機能を利用する<sup>[9]</sup>。そして、オブジェクトや操作対象の切り換えなどの補助機能にメニュー画面を利用することにした。

## 2.2 開発環境

COSMOSを利用する企業が持ち込むモデルフォーマットには様々な種類がある<sup>[10]</sup>。そのため、予め多くのモデルフォーマットに対応したモデルビューア開発が必要となる。IRIS Performerライブラリ<sup>[11]</sup>には33種類のモデルフォーマットに対応したモデルローダが装備されている。そこで、IRIS Performerライブラリをベースにして開発された「G6」ライブラリ<sup>[12]</sup>を使用した。

COSMOS内で使用するメニュー画面は、表示しているオブジェクトによってメニュー画面が隠れないようにする必要がある。そこで、メニュー画面の作成にはオブジェクトを表示している画面上に新たにウィンドウを生成及び消去できるMotif<sup>[13-15]</sup>を使用することにした。

## 3. オブジェクト設定

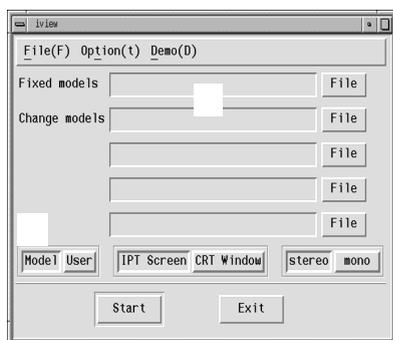


図2 起動画面

図2はモデルビューアの起動画面である(以下、<>内はメニュー項目を示し、【】内はメニューボタン名を示す)。COSMOSを利用した製品ディスカッションでは、1つのオブジェクトで検討を行う場合と複数のオブジェクトを交換しながら検討する場合がある。1つのオブジェクトだけで検討を行う場合、入力された全てのオブジェクトを常に表示する必要がある。複数のオブジェクトを交換しながら検討を行う場合、切り替えを行う複数のオブジェクトの内、表示するオブジェクトは1つだけで良いが、切り替えを行うオブジェクトは常に表示しているオブジェクトの付属品の場合がある。そのため、COSMOSで表

示されるオブジェクトには常に表示されているオブジェクトと切り替えが行えるオブジェクトの2種類がある。しかし、従来のモデルビューアはコマンドラインで行われていたために、オブジェクトの種類を分けることが容易ではなかった。そこで、開発した起動画面では図2-のようにオブジェクト名の入力テキストボックスに<Fixed models>と<Change models>の2種類を用意した。

オブジェクト名の入力方法としては従来のキーボードから入力する方法と【File】を選択してオブジェクト名が選択できる方法がある。これにより、長いファイル名なども容易に設定することができるようになった。

## 4. 操作対象の設定

家具や自動車のようなオブジェクトを評価する場合、“オブジェクト”(図3-)を操作した方が直感的に操作できる。室内や街中のようにオブジェクトが固定されているものを評価する場合にはウォークスルーのように“ユーザの場所”(図3-)を操作した方が良い。また、自動車の運転のようにオブジェクトとユーザの場所が同時に動く場合は“両方”(図3-)を操作することになる。このように、用途によって操作する対象が異なるため、用途に応じて操作する対象を切り換える必要がある。また、操作対象の切り替えができないとCOSMOS内でのコントローラの機能が統一されない問題もある。例えば、操作対象がオブジェクトとなっている状態(図3-)で街並みのオブジェクトの中をユーザが前方に移動しようとコントローラを操作した場合、ユーザの位置は固定されているため、街並みのオブジェクトが前方に移動すると、ユーザには街並みを後退している画像が提示されることになる。そこで、起動時に操作の対象を【Model】及び【User】(図2-)を選択することで設定し、操作対象が両方の場合は、【Model】と【User】の両方を選択することで設定できる。また、操作の対象はCOSMOS内でもメニュー画面を使用して切り換えることができる。(以下、操作対象がオブジェクトの場合は《Model》、ユーザの場所である場合は《User》、オブジェクトとユーザの場所の場合は《Model&User》と示す)

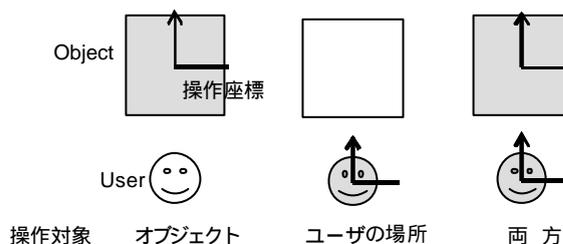


図3 操作対象

## 5. メニュー画面

### 5.1 メニュー画面操作

COSMOS内でのコントローラにはNinteno64コントローラプロス(図4)を使用する。COSMOS内のメニュー画面(図5)はLボタンを押すことで表示され、再度押すと非表示になる。表示されたメニュー画面のボタンを選択するには、メニュー画面と同一平面上に表示されているカーソルを3Dスティックで操作し、カーソルをボタンに合わせてZトリガーを押すことで選択できる。

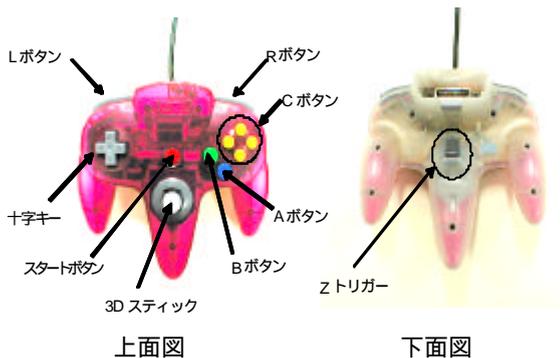


図4 コントローラ

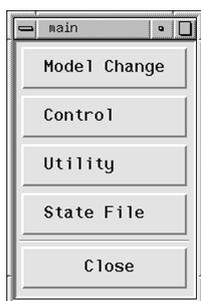


図5 メインメニュー画面

### 5.2 メニュー画面の利点

COSMOS内でメニュー画面を使用することの利点として次のようなことがあげられる。

#### 1) 機能の選択が容易

操作の対象によってユーザから要求される機能が異なるため、従来は操作の対象にあわせてコントローラのボタンの機能を変更していた。また、新しい機能を追加する場合、ボタンの組み合わせで対応していたためコントローラの操作が大変であった。しかし、移動や回転のような直感的な操作以外の機能をメニュー画面で選択できるようにすることで、複雑なボタン操作が不要となる。

#### 2) オブジェクトの切り替えが容易

従来のモデルビューアではコントローラのボタンにオブジェクトを割り当てて表示していたため、オブジェクトの数に制限があり、表示したいオブジェクトを的確に選択することが困難であった。メニュー画面を利用する

ことでオブジェクト数の制限がほぼなくなり、オブジェクトの切り替えもオブジェクト名を確認して選択できるため、オブジェクトの切り替えが容易である。

図5に< Model Change >の階層図を示す。< Model Change >(図6-)を押すことで、COSMOSに表示している切り換え可能なオブジェクト名がボタンで表示される(図6-)。そして、切り換えたいオブジェクトのボタンを押すと、選択したオブジェクトに対応したオブジェクト名の一覧がボタンで表示される(図6-)。

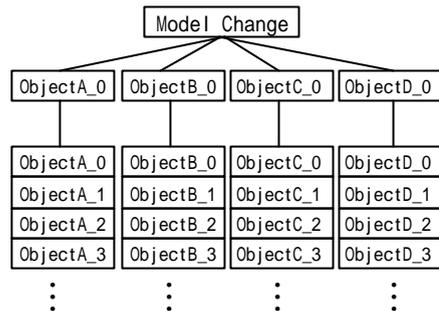


図6 オブジェクト切り替えの階層図

#### 3) 操作対象の選択が容易

従来はコントローラのボタンを押して操作する対象を順番に切り換えていた。そのため、選択している操作の対象が分かりにくい問題があった。また、表示しているオブジェクトを個々に選択する機能もなかった。メニュー画面を使用することで操作する対象の切り替えを確認して行うことができるようになり、表示しているオブジェクトを個別に選択することも可能になる。

図7に< Control >の階層図を示す。< Control >(図7-)を選択すると、【Model】、【User】、【Model & User】の3種類のボタンが表示(図7-)され操作の対象を選択する。【Model】を選択すると【ALL Models】及びCOSMOSに表示しているオブジェクト名がボタンとなった画面が表示される(図7-)。【ALL Models】を選択すると表示している全オブジェクトを操作することができ、各オブジェクトのボタンを押すと選択したオブジェクトのみを操作することができる。

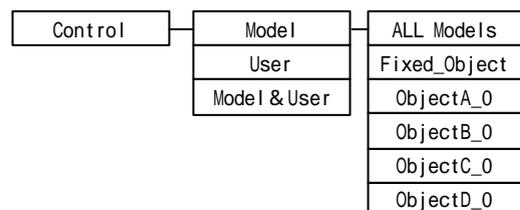


図7 操作対象切り替えの階層図

## 6. 利用例

開発したモデルビューアは以下のような用途で利用することが考えられる。

- 1) 製品または製品を構成する部品を交換しながら行うデザイン検討や干渉部品のチェック
- 2) 土木・建築工事における施工前と施工後を比較しながら行うプレゼンテーション
- 3) 工場内の設備レイアウト

例として図8に自動車の仕様を変更している作業風景を示す。なお、表示した自動車データは市販されているオブジェクトデータ集を利用したものである。



左ハンドル仕様                      右ハンドル仕様  
 図8 メニュー画面によるオブジェクト切り替え

## 7. まとめ

没入型ディスプレイシステムで使用するモデルビューアの開発を行った。従来はコマンドラインで行っていた起動をGUIに変更することで、オブジェクト名や表示オプションを入力する必要がなくなった。また、COSMOS内にメニュー画面を表示することでオブジェクトや操作対象の切り替えをなどの機能を確認しながら容易に行うことができ、コントローラの複雑なボタン操作が容易になった。しかし、「G6」ライブラリのベースであるIRIS Performerのモデルローダにはオブジェクトデータを軽量化するアルゴリズムがないため、データ量の大きいオブジェクトが表示されると実時間性が損なわれる。今後は、オブジェクトデータの軽量化に関する開発を行い、また、開発したモデルビューアを使用したユーザに評価していただき改良を加える予定である。

## 文 献

- [1]緒方正剛, 小林一郎, 福地良彦, “建設プロジェクトにおける合意形成のためのバーチャルモデルの利用”, 土木情報システム論文集vol.6, pp.81-88, 1997.
- [2]難波正幸, 小林一郎, 福地良彦, 緒方正剛, “バーチ

- ャルモデルの建設分野への展開”, 土木学会西部支部研究発表会講演概要集, pp.790-791, 1999.
- [3]Toshio YAMADA, Michitaka HIROSE, Yoshihiro IIDA, “Development of Complete Immersive Display COSMOS”, VSMM98, pp.522-527, 1998.
- [4]久木元伸如, 戸泉協, 橋木卓, 小田隆志, 岩崎勤, “設計支援のための図形思考支援環境の構築”, 日本バーチャルリアリティ学会第4回大会論文集, p323-326, 1999.
- [5]田村祐一, 陰山聡, 佐藤哲也, “没入型VR装置と大規模シミュレーション”, 日本バーチャルリアリティ学会誌 Volume6 No.3, pp.27-30, 2001.
- [6]田村祐一, 陰山聡, 佐藤哲也, “音声入力による数値シミュレーション結果操作”, 日本バーチャルリアリティ学会第6回大会論文集, pp.375-376, 2001.
- [7]Jerome Grosjean, Sabine Coquillart, “Command & Control Cube: a Shortcut Paradigm for Virtual Environments”, Immersive Projection Technology and Virtual Environments, pp.1-12, 2001
- [8]廣瀬通孝, 小木哲朗, 矢野博明, 筧直之, 中垣好之, “ワイヤーテンションを用いたウェアラブルフォースディスプレイの開発”, 日本バーチャルリアリティ学会大会論文集Vol.3, pp.1-4, 1998.
- [9]吉田俊介, 星野俊仁, 宮崎慎也, 大関徹, 長谷川純一, 安田孝美, 横井茂樹, “コンセプトデザインのためのデジタルツール「空間スケッチシステムの開発」”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌vol.6 No.4, pp.313-322, 2001.
- [10] 浅野良直, 藤井勝敏, “多面ディスプレイの高度利用に関する研究” 岐阜県生産情報技術研究所研究報告 No.1, pp.1-6, 1999.
- [11] Sharon Clay, Michael Garland, Brad Grantham, Don Hatch, Jim Helman, Michael Jones, T. Murail, Jhon Rohlf, Allan Schaffer, Christopher Tanner, Jenny Zhao, Derrald Vogt, “IRIS Performer C++ Reference Pages”, Silicon Graphics, Inc., 1995
- [12] 藤井勝敏, 浅野良直, 窪田直樹, “VR技術を利用した設計支援システムの開発” 岐阜県生産情報技術研究所研究報告 No.1, pp.11-16, 1999.
- [13] 朝火英樹, 羽山博, “プログラミングリファレンス Motifプログラミング”, オーム社, 1995.
- [14] 林秀幸, “X Window OSF/Motifツールキットプログラミング[ ] [ ]”, 日刊工業新聞社, 2000.
- [15] Dan Heller, Daniel Gilly, 吉田茂樹, “Motifプログラミング・マニュアル”, ソフトバンク(株), 1993.

# 異なる没入型ディスプレイシステム間における開発環境の統合

浅野 良直      藤井 勝敏      田村 祐一\*      渡邊 國彦\*

## Integration of the Development Environments on Different Immersive Projection Display Systems

Yoshinao ASANO    Katsutoshi FUJII    Yuichi TAMURA\*    Kunihiko WATANABE\*

あらまし 本研究では文部科学省核融合科学研究所が所有する没入型4面ディスプレイシステム（以下CompleXcope）と岐阜県が所有する没入型6面ディスプレイ（以下COSMOS）におけるプログラム開発環境の統合を図ることにより、各研究所が持つ技術成果の交流、共同研究開発を目的としている。そこで、本年度はCOSMOS用開発ライブラリをCompleXcope側で利用できるようにして研究開発プラットフォームの共通化を図った。そして、各システムで開発したプログラムをCompleXcopeで実行して開発環境の統合を確認した。

キーワード COSMOS, CompleXcope, バーチャルリアリティ

### 1. まえがき

イリノイ大学で開発された没入型ディスプレイシステムCAVEの開発当初の目的は“数値データの可視化”であったが、仮想空間への高い没入感が得られ、オブジェクトの実物大表示が可能であるなどの特徴から、製造業においては製品開発期間の短縮や開発コスト削減、土木建築業においては完成イメージのプレゼンテーションなど様々な用途で利用が期待されている。このような没入型ディスプレイシステムが岐阜県内には岐阜県科学技術振興センター（システム名：COSMOS<sup>[1]</sup>）と核融合科学研究所（システム名：CompleXcope<sup>[2]</sup>）に設置されている。COSMOSは日本で唯一の没入型6面ディスプレイシステムであり、様々な分野の企業が自社製品オブジェクトの実物大表示を行って製品評価やプレゼンテーションに利用している。CompleXcopeはCAVEシステムの同じスクリーン構成（正面、左面、右面、床面の4面スクリーン）であり、



図1 COSMOS



図2 CompleXcope

3次元音響システム<sup>[3]</sup>などを利用して磁場の分布や粒子の軌道追跡などの数値シミュレーションの可視化装置として利用されている。没入型ディスプレイシステムのユーザインタフェースや提示技術は大学や研究機関等<sup>[4,5]</sup>で研究開発されており、研究成果の相互利用は重要であると考えられる。そこで、今年度はCOSMOSとCompleXcope双方のシステムの開発環境の統合を行ったので報告する。

### 2. システム構成

COSMOSとCompleXcopeのシステム構成を表1に示す。双方のシステム共に、液晶シャッター眼鏡に磁気式3次元位置センサを取り付けてユーザの位置姿勢検出し、ユーザの視点にあわせた映像提示を行っている。

	COSMOS	CompleXcope
スクリーン	6枚 (正面、背面、左面、右面、天井面、床面)	4枚 (正面、左面、右面、床面)
スクリーンサイズ	3m×3m	10feet×10feet (3.048m)
GWS	Onyx2 InfinityReality	Onyx2 InfinityReality
プロジェクト	MARQUEE9500LC/3D (各面2台)	MARQUEE9500LC/3D (各面1台)
トラック	UltraTrack	Flock of Bird
入力装置	Nintendo64コントローラ	3次元ジョイスティック 音声認識システム
その他		3次元音響システム

表1 システム構成

\* 文部科学省 核融合科学研究所 理論・シミュレーション研究センター

### 3. 開発環境の統合

#### 3.1 開発ライブラリ

CompleXcopeでは、これまで開発ライブラリとしてCAVEライブラリを使用してきた。CAVEライブラリはCAVE用に開発されたライブラリであるため、COSMOSでの使用ができない。COSMOSにおける開発ライブラリにはIRIS Performerライブラリをベースにした「G6」ライブラリとOpenGLライブラリをベースにした「F6」ライブラリを使用している<sup>[6]</sup>。そこで、これらのライブラリに対してCompleXcopeのシステム仕様にあわせたカスタマイズを行った。

#### 3.2 周辺機器

COSMOS側の開発ライブラリを使用するため、Ultra Track で使用しているデータ取得プログラムのデータ形式にFlock of Birdのデータを変換する必要がある。そこで、東京大学が開発したFlock of BirdのデータをUltra Trackのデータとして扱うプログラムをCompleXcope用にカスタマイズして対応した。また、CompleXcopeにNintendo64コントローラを設置して利用できるようにした。

### 4. 相互利用検証



図3 CompleXcopeでの表示画面

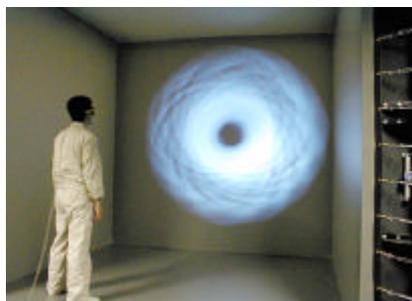


図4 COSMOSでの表示画面

#### 4.1 COSMOS CompleXcope

図3は平成13年度の研究であるバーチャルモックアップによる製品評価システムで開発したモデルビューアをCompleXcopeで表示した結果である。ユーザの視点に合わせて画像が提示され、コントローラもCOSMOSと同様の操作ができることを確認した。

#### 4.2 CompleXcope COSMOS

図4はCompleXcopeに移植した「F6」ライブラリを利用して開発されたSpherical Tokamak<sup>[7]</sup>の圧力分布数値シミュレーションをCOSMOSで表示した結果である。これによりCompleXcope側で作成したシミュレーションプログラムがCOSMOSでも同様に利用できることを確認した。

### 5. まとめ

COSMOSとCompleXcopeの開発環境の統合を行った。COSMOSの開発環境である「G6」「F6」ライブラリやNintendo64コントローラをCompleXcopeで使用できるようにした。これによりCOSMOSとCompleXcopeの開発環境は、ほとんど同じとなり、開発成果の相互利用などが容易になった。今後は、「G6」「F6」ライブラリでCompleXcopeの3次元音響システムやWANDなどを利用できるように対応していきたいと考えている。また、CompleXcopeで使用している音声入力システムをCOSMOSで利用することも検討している。

### 文 献

- [1]Toshio YAMADA, Michitaka HIROSE, Yoshihiro IIDA, "Development of Complete Immersive Display COSMOS", VSMM98, pp.522-527, 1998.
- [2]Akira KAGEYAMA, Yuichi TAMURA, Tetsuya SATO, "Scientific Visualization in Physics Research by CompleXcope CAVE System", 日本バーチャルリアリティ学会論文誌vol.4 No.4, pp.717-722, 1999.
- [3]田村祐一, 佐藤哲也, 陰山聡, 藤原進, 中村浩章, "数値シミュレーションデータ表現のための音情報を付加したバーチャルリアリティシステムの開発", 日本バーチャルリアリティ学会論文誌 vol.5No.3, pp.943-948, 1999.
- [4]廣瀬通孝, 小木哲朗, 矢野博明, 筧直之, 中垣好之, "ワイヤーテンションを用いたウェアラブルフォースディスプレイの開発", 日本バーチャルリアリティ学会大会論文集Vol.3, pp.1-4, 1998.
- [5]吉田俊介, 星野俊仁, 宮崎慎也, 大関徹, 長谷川純一, 安田孝美, 横井茂樹, "コンセプトデザインのためのデジタルツール「空間スケッチシステムの開発」", 日本バーチャルリアリティ学会論文誌 vol.6 No.4, pp.313-322, 2001
- [6]藤井勝敏, 浅野良直, 窪田直樹, "VR技術を利用した設計支援システムの開発", 岐阜県生産情報技術研究所研究報告No.1, pp.11-16, 1999.
- [7]Y. -K. M. Peng and D. J. Strickler, "Features of spherical torus plasmas", Nuclear Fusion, Vol. 26, No. 6, pp. 769-777, 1986.

# 仮想物体の変形を考慮した接触判定手法の提案

横山 哲也      藤井 勝敏      浅野 良直      棚橋 英樹

## Research on Contact Detection for Deformation of Virtual Objects

Tetsuya YOKOYAMA    Katsutoshi FUJII    Yoshinao ASANO    Hideki TANAHASHI

あらまし Virtual Reality (VR) において、仮想物体と操作者の間でインタラクションを図ることで、より高い臨場感を得ることができる。そのためには、接触に伴う拘束に従って仮想物体を操作することが必要であり、物体相互の衝突判定は重要な課題である。本研究では変形を伴う仮想物体の接触判定に着目する。従来の判定アルゴリズムでは仮想物体の変形を想定していない。提案手法では境界表現法 (Winged-Edge) を用いて、仮想物体の表面を構成するパッチの要素 (面, 稜線, 頂点) の隣接関係を定義し、隣接関係により接触要素を探索する。この手法では変形に対し特別な計算を必要としないため、変形を考慮した接触判定が可能になると思われる。今回は想定する仮想物体は凸形状であるが、今後の課題として非凸形状に対する考察を述べる。

キーワード 接触判定, 凸多面体, 境界表現法(Winged-Edge), 対話操作

### 1. はじめに

近年、計算機の性能向上により、仮想空間内での疑似体験が可能となり、VRに関する研究が盛んに行われている。例えば力覚呈示、触覚呈示等の研究に見られるように、インタラクティブに操作者へ情報をフィードバックすることで、より高い臨場感を作り出すことが可能となる<sup>[1]</sup>。

仮想空間において仮想物体を接触に伴う拘束に従い操縦することは、物体を操作する操作者支援に役立つ。そのためには物体相互の接触判定は重要な課題であり、各方面で精力的に研究されている<sup>[2]</sup>。また、操作者の意図で物体を変形させることも、対話的操作性を高めるために重要である。しかし、これまで提案された多くの衝突判定アルゴリズムは衝突対話操作中における物体変形は考慮しておらず、物体変形に伴う再計算のため計算負荷は大きく、操作者にストレスを与える。

本研究では対話的操作性を損なわず、物体を操作・変形できる接触判定アルゴリズムを提案する。対象とする物体形状は凸形状とし、非凸形状に関しては今後の課題として考察を述べる。

### 2. 従来手法の問題点

接触 (衝突) 判定は精度と実時間処理のトレードオフの関係がある。単純な接触判定は物体の全ての面、稜線の組合せに対して交差のチェックを行う。しかし、物体数及び面数が増えると計算量は2乗のオーダーで比例する。そこで多くの接触判定アルゴリズムは、仮想物体を計算コストの低い包含物体に置き換えることで実時間を保

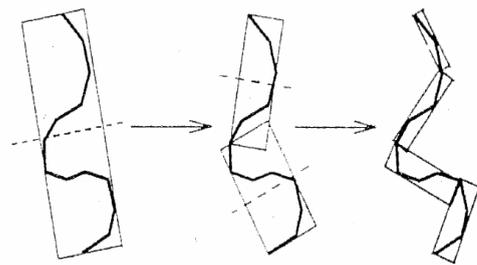


図1 仮想物体を包含する包含物体

証する。

図1に示すような原型により近い包含物体を作成する、階層構造を持つOBB-Tree (Oriented Bounding Box Tree)<sup>[3]</sup>では、OBB軸に統計的手法を用いている。これはつまり、表面の3角パッチ頂点数に比例して計算コストは増えることを意味する。また階層化構造に伴う分割計算も考慮すると、変形に伴う計算負荷は大きい。

空間を均一な形状の立方体で分割し、八分木を用いて包含物体を階層的に管理する手法もある<sup>[4]</sup>。多面体表現以外の木構造の付加的データを持つため、物体が変形する時には付加的データの書き換えも必要となり、計算コストが増加する。

以上のように、包含物体は仮想物体形状に依存した形で予め分割されており、データ構造の初期生成に時間が掛かる。そのため、多くのアルゴリズムでは対話操作中の仮想物体変形は想定していない。

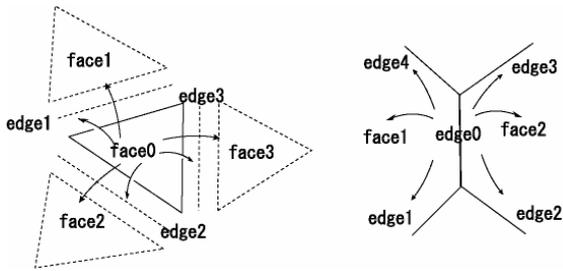


図2 面、稜線を持つリンク

### 3. 仮想物体表面の境界表現

提案手法は境界表現を用いたデータ構造を前提としている。境界表現のWinged-Edgeデータ構造を用いて、仮想物体表面パッチの、幾何要素間の隣接関係（位相）を定義する。幾何要素とは立体の移動・回転、拡大・縮小操作に対して変化する要素であり、ここでは面、稜線、頂点を指す。

Winged-Edgeは立体を稜線の集まりとみなし、頂点の座標値、面を表す方程式の係数など幾何データをトポロジーとして関連付ける<sup>[5]</sup>。例として、図2に面及び稜線からのリンク先を示す<sup>[6]</sup>。隣り合う幾何要素は、互いに隣接関係をデータとして保持している。面要素face0からは、隣接する面要素face1～face3及び稜線要素edge1～edge3へ、リンクをたどって参照することができる。稜線要素edge0からは面要素face1、face2及び、稜線要素edge1～edge4へリンクしている。

これにより、以下に挙げることが可能となる。

- 任意の3角パッチに隣接する3角パッチを抽出
- 任意の稜線の両端に接続する稜線を抽出

4章で述べる提案手法は、幾何要素の隣接関係を利用して、幾何要素の探索に掛かる計算コストを低減している。これは凸多面体間の最接近点位置（最短距離幾何要素対）が、時間的に前後するフレームにおいて大きく変わらないことを利用している<sup>[7]</sup>。

### 4. 接触判定アルゴリズム

提案する接触判定とは幾何要素が接触しているかを判別し、接触しているならば、接触に伴う拘束によって生じる法線を求めることである。接触とは物体の輪郭線を共有していることであり、互いの内部を共有しあう干渉とは異なる。本提案では干渉を前提としている幾何要素間の交差チェック<sup>[8]</sup>は行わず、最短距離と幾何関係により接触判定を行う。つまり、幾何要素間の最短距離が閾値以下になったら要素内の幾何関係を求め、接触を判定する。ここで言う閾値は物体表面からの距離であり、十分小さい値とする。

提案手法では包含物体を使用せず、境界表現を利用している。幾何要素の隣接関係を利用して、探索する幾何要素候補を絞ることで計算コストの低減を図る。対話操作中に物体が変形した場合でも、幾何要素の隣接関係は変化しないため、表面パッチの頂点データは変更するだけで特別な処理は必要としない。本手法では境界表現の付加的データを持つが、初期段階でデータを代入するだけであり、それ以降はパッチの増減がない限り付加的データの更新はない。

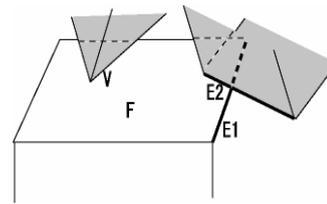


図3 FV接触、EE接触

提案手法の判定アルゴリズムは以下に示すように、物体間の「接触」と「非接触」で考え方が二分される。どちらのアルゴリズムも、最短距離幾何要素が時間的に前後するサンプルにおいて大きく変わらないことを前提とする。

#### 4.1 接触アルゴリズム

物体の表面をパッチで構成している多面体同士の接触は頂点、稜線、面の組合せが考えられる。ここでは図3に示すように、以下の組合せを取り扱う。

- 面-頂点接触（FV接触）
- 稜線-稜線（EE接触）

上記2種類の組合せにより、面と稜線の接触はFV接触へ、面と面の接触はEE接触もしくはFV接触へ置き換えることができる<sup>[9]</sup>。

FV接触、EE接触は以下に挙げる、2つの状態によって決まる。

- EE接触
  - 稜線と面を含む平面との交点が面の外側にある
- FV接触
  - 稜線と面を含む平面との交点が面の内部にある

境界表現法Winged-Edgeを用いた、接触幾何要素の探索方法を、図4、5を用いて説明する。ここでは1サンプル前における接触幾何要素が既知であるとする。

#### 1) 面f0が前サンプルの接触要素であった場合

次サンプルの接触要素第1候補をf0とし、FV接触の判定を行う。

f0が接触要素でなければ、次候補は面f0を構成する稜線e1、e2、e3とし、稜線上でEE接触の判定を行う。

ここでも接触要素が存在しなければ、次に面f0に隣接する面f1、f2、f3を候補とする。

ある探索範囲内で接触要素が存在しなければ、接触はしてないと判定し、非接触アルゴリズムへ切

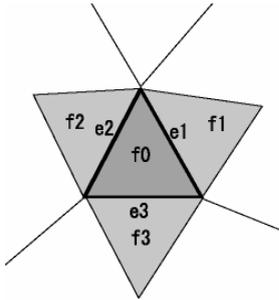


図4 前サンプル接触要素が面の場合

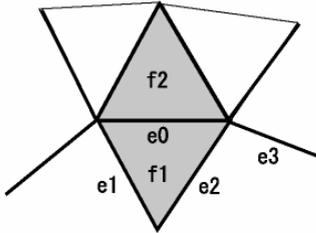


図5 前サンプルの接触要素が稜線の場合

り替える。

2) 前サンプルの接触要素が稜線e0であった場合  
次サンプルの接触要素の第1候補は稜線e0とし、  
EE接触の判定を行う。

e0が接触要素でなければ、次候補は稜線e0を挟  
んでいる面f1, f2とし、FV接触の判定を行う。  
ここにも接触要素がなければ、稜線e0の端点に  
接続している稜線e1~en(n:接続している稜  
線数)を探索する。

ある探索範囲内で接触要素が存在しなければ、接  
触はしていないと判定し、非接触アルゴリズムへ  
切り替える。

上記より、接触を伴う拘束運動において、  
Winged-Edge構造を用いて接触する幾何要素候補を絞る  
ことできる。

図6に、仮想物体同士の接触幾何要素及びその隣接  
要素を示す。

#### 4.2 非接触アルゴリズム

非接触においては、物体間の最短距離を常に監視する。  
サンプル間の時間が小さければ、最短距離は大きく変化  
することはない。

非接触アルゴリズムは以下の手順に従う。

あらかじめ初期段階(物体同士が接触していない  
場合)でモデル間同士の最短距離幾何要素対を求  
めておく。

幾何要素対の最短距離を求める。次サンプルの最  
短距離幾何要素対は前サンプルで求めた最短距  
離幾何要素対に隣接している。境界表現を利用し  
て幾何要素のデータを保持しているため、隣接幾

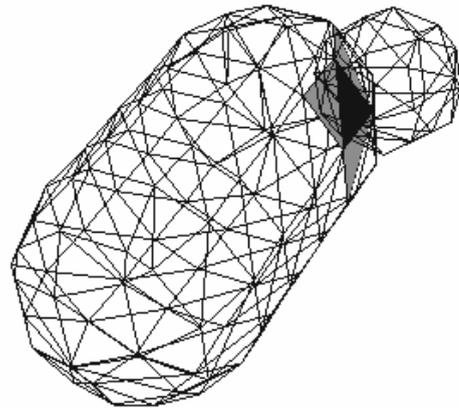


図6 仮想物体同士の接触

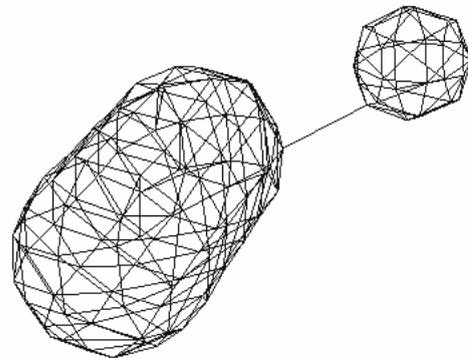


図7 物体間の最短距離

何要素への探索は容易である。

最短距離がある値以下になった場合、接触アル  
ゴリズムへ切り替える。

図7に示すように、対話操作中は常に物体間の最短  
距離を監視している。

#### 5. 今後の課題

今回提案した手法は仮想物体が凸多面体を想定して  
記述している。そのため非凸多面体における接触のよう  
に、2個以上接触点が発生する場合、提案手法は適用でき  
ない。図8に示すように、Aで接触した状態で物体を下

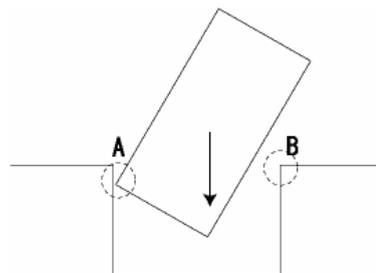


図8 非凸多面体との拘束運動

向きに移動させると、Bで接触する可能性がある。本手法ではA周辺の幾何要素のみを探索し、Bの接触を判定することができない

対応策として、非凸形状部を凸形状で近似することを検討している。具体的には、実時間で非凸形状部を凸形状で覆うアルゴリズム、作成した凸形状のWinged-Edgeと、非凸形状部のWinged-Edge間の関連付けが課題である。

今後はアルゴリズムの実証と有効性について検討を行う。

## 文 献

- [1] 岩田洋夫, “人工現実感生成技術とその応用”, サイエンス社, 1992.
- [2] 北村善文, “衝突検出を利用した仮想物体操作”, ヒューマンインターフェース学会論文誌, vol.1, no.4, 1999.
- [3] S. Gottschalk, M. C. Lin, and D. Manocha, “OBB-Tree: a hierarchical structure for rapid interface detection”, Computer Graphics Annual Conference Series (Proc. SIGGRAPH), pp.171-180, 1996.
- [4] 北村喜文, 竹村治雄, ナレンドラ アフジャ, 岸野文郎, “octreeと多面体表現を用いた3次元物体間の衝突面検出”, 日本ロボット学会誌, vol.14, no.5, pp.121-130, 1996.
- [5] 安田仁彦, “CADとCAE”, コロナ社, 1997.
- [6] 高崎大輔, “多面体の融合接続(修士論文)”, <http://www.kashi.info.waseda.ac.jp/~daisuke/research/pfusse/>. (2001年2月)
- [7] 川地克明, “多面体間の拘束な干渉判定アルゴリズム”, [http://www.kki.yamanashi.ac.jp/~ohbuchi/courses/2000/Simulation2000/PDFs/mp\\_handout\\_kawachi.pdf](http://www.kki.yamanashi.ac.jp/~ohbuchi/courses/2000/Simulation2000/PDFs/mp_handout_kawachi.pdf). (2001年2月)
- [8] John W. Boyse, “Interface detection among solids and surfaces”, Communication of the ACM, vol.22, no.1, pp.3-9, 1979.
- [9] 神徳徹雄, “仮想空間における拘束感生成手法に関する研究”, 機械技術研究所報告 第192号, 2001.

# 共進化GAによる動的施設配置問題へのアプローチ

張 明

杉山 正晴

## A Coevolutionary Genetic Algorithm to the Dynamic Facility Layout Problems

Ming CHANG

Masaharu SUGIYAMA

あらまし 本稿では、動的施設配置問題(Dynamic Facility Layout Problems :DFLP)への共進化型遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithms) によるアプローチについて検討した。まず、協調型共進化GAを動的施設配置問題に適用し、従来より提案されたGAと比べて、その有効性を確認した。つぎに、協調型共進化GAにおける信頼度割り当て問題の一解決策として、共生型共進化GAを提案し、協調型共進化GAに対する優位性を示した。  
 キーワード 遺伝的アルゴリズム、動的施設配置問題、共進化、共生

### 1. はじめに

近年、多品種・少量生産を念頭において、動的施設は一問題が注目されている。施設配置問題は、複数の物理的施設の配置に関する問題である。その定式化によって、複数倉庫間の配達業務問題、工場内の複数の機械配置問題や分散メモリ型マルチプロセッサにおける配線問題などに適用できる。これまでの多くの研究は静的施設配置問題に重点を置いてきたが<sup>[1]</sup>、近年の生産スタイルの変化に伴い、動的施設配置問題の解決が重要視されている。それは生産要求の変動に応じて工場内の施設配置を変えることで、生産コストの削減をしようとするものである。

動的施設配置問題に対して、Dynamic Programming(DP)、Tabu-Searchなどの手法が提案されてきたが<sup>[2]</sup>、大規模な問題に対しては、より効率的な手法が必要となる。近年、遺伝的アルゴリズム(Genetic Algorithms)による解決が試みられている<sup>[3,4]</sup>。DPやTabu-Searchなどの手法における「解個体による探索」に対して、GAでは、「解集団による探索」が特徴である。そのため、探索過程においての集団多様性維持が不可欠である。これまで、個体の突然変異や個体間の組換えによって新しい個体を生成するアプローチがしばしばとられている。しかし、動的施設配置問題では、単純な組換え操作では実行不可能な解が生成されることがあるため、付加的な操作が必要になる。そのため、GAによるアプローチの多くは効率的な組換え操作の構築に着目している<sup>[3,4,5]</sup>。

本稿では、動的施設配置問題の問題特性に注目し、共進化GAの適用を提案する。従来より提案されてきた協調型共進化GAの有効性を示した後、新に共生型共進化GA

を提案し、協調型共進化GAに対する優位性を示す。

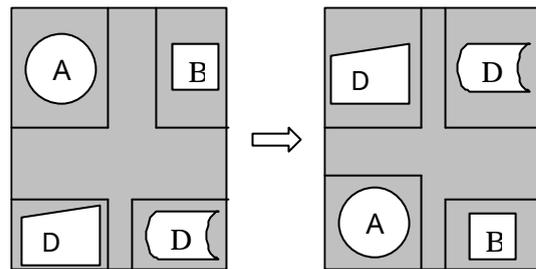


図1 施設の配置を変えることでコストの削減を目指す

### 2. 施設配置問題

施設配置問題(Facility Layout Problem:FLP)は、 $m$ 個の施設を $n(m \leq n)$ ヶ所に配置し、固定投資と運搬コストなどの合計を最少にする問題である。以下に静的施設配置問題(Static Facility Layout Problem:SFLP)及び動的施設配置問題(Dynamic Facility Layout Problem:DFLP)の定式化を示す。静的とは、考慮される生産期間において、施設間の原料運搬量が変動しないことを指す。

#### SFLPの定式化

$$\text{Min} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N a_{ijkl} X_{ij} X_{kl}$$

ただし、

$$\sum_{i=1}^N X_{ij} = 1, \quad j = 1, \dots, N$$

$$\sum_{j=1}^N X_{ij} = 1, \quad i = 1, \dots, N$$

$$X_{ij} \in \{0, 1\}, \quad i, j = 1, 2, \dots, N$$

ここで,

$$X_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{施設}i\text{が場所}j\text{に配置される} \\ 0 & \text{その他} \end{cases}$$

$$a_{ijkl} = \begin{cases} f_{ik}d_{jl} & \text{if } i \neq k \text{ or } j \neq l \\ c_{ij} & \text{if } i = k \text{ and } j = l \end{cases}$$

$c_{ij}$  項が0あるいは, すべての  $i, j$  について等しい場合,

上の式は以下のように書き換えられる.

$$a_{ijkl} = f_{ik}d_{jl}$$

$N$  : 施設数

$i, k$  :  $i, k$ 番目の施設

$j, l$  :  $j, l$ 番目の場所

$c_{ij}$  : 場所  $i$  での施設  $j$  の固定投資

$d_{jl}$  : 場所  $j$  と  $l$  の間の距離,  $d_{jj} = 0$

$f_{ik}$  : 施設  $i$  と  $k$  の間の原料運搬量.

#### DFLPの定式化

$$\text{Min} \left\{ \sum_{t=2}^P \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{l=1}^N A_{ijkl} Y_{tijl} + \sum_{t=1}^P \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N C_{ijkl} X_{tij} X_{tkl} \right\}$$

ただし,

$$\sum_{i=1}^N X_{tij} = 1, \quad j = 1, \dots, N \quad t = 1, \dots, P$$

$$\sum_{j=1}^N X_{tij} = 1, \quad i = 1, \dots, N \quad t = 1, \dots, P$$

$$X_{tij} \in \{0, 1\}, \quad i, j = 1, \dots, N \quad t = 1, \dots, P$$

ここで,

$$X_{tij} = \begin{cases} 1 & \text{時間}t\text{に施設}i\text{が場所}j\text{に配置される} \\ 0 & \text{その他} \end{cases}$$

$$C_{ijkl} = f_{ik}d_{jl}$$

$$Y_{tijl} = X_{(t-1)ij} \times X_{tjil}$$

$P$  : 考慮する生産期間数

$N$  : 施設数

$i, k$  :  $i, k$ 番目の施設

$j, l$  :  $j, l$ 番目の場所

$Y_{tijl}$  : 生産期間  $t$  に, 施設  $i$  を場所  $j$  から  $l$  に

再配置するかどうかに関する0-1の2値変数  $Y_{tijl}$  は再配置を表す

$A_{tijl}$  : 生産期間  $t$  に, 施設  $i$  を場所  $j$  から  $l$  に再配置するコスト

$C_{ijkl}$  : 生産期間  $t$  に, 場所  $j$  での施設  $i$  と場所  $l$  での施設  $k$  の間の原料運搬コスト

$d_{jl}$  : 場所  $j$  と  $l$  の間の距離,  $d_{jj} = 0$

$f_{ik}$  : 生産期間  $t$  に, 施設  $i$  と  $k$  の間の原料運搬量.

### 3. 制約付き動的施設配置問題

DFLPを定式化する際, 再配置コストに関して制約を加えたものが制約付き動的施設配置問題 (Constrained Dynamic Facility Layout Problem : CDFLP) であり<sup>[6]</sup>, 以下のように定式化される.

$$\sum_{t=2}^P \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{l=1}^N A_{tijl} Y_{tijl} \leq B$$

上の式によって, 再配置コストが  $B$  以下に制限される. また, それぞれの生産期間における再配置コストに制約を加えた CDFLP は文献[4]によって定式化されたが, 本稿では以下のように定式する.

$$\sum_{t=2}^T \left( B_t - \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{l=1}^N A_{tijl} Y_{tijl} \right) \leq 0$$

ここで,  $T = 2, \dots, P$  とし,  $B_t$  は生産期間  $t$  での再配置コストに関する制約を表す. 上式は再配置が, それに使える資金が蓄えられた時だけ行えることを表す. 各生産期間における再配置投資資金を  $(B_2, B_3, \dots, B_P)$  のように表す.

### 4. 共進化 GA

DFLPに対してDP, Tabu-Search, GAなどの手法が提案されている<sup>[2]</sup>. この中で, GAによるアプローチにおいて良い結果が報告されている<sup>[3, 4, 12]</sup>. GAは生物の遺伝と進化を計算機上で模倣して人工物の環境適応, 学習及び最適化に適用する手法であり, 多峰性, 非線形や制約付き目的関数を持つ問題に特に適すると言われている. DPやTabu-Searchなどの最適手法での「個体」による探索に対して, 「集団」による探索がGAの特徴と言える. そのた

め、効率的な探索には、探索集団の多様性維持が不可欠である。これまで、集団内の個体が問題の完全解をコーディングし、適応度に基づいて選ばれた個体の突然変異や個体間の組換えによって新しい個体を生成するアプローチがしばしばとられている<sup>[3,4]</sup>。しかし、自然数の順列による個体表現を用いるため、単純な組換え操作では実行不可能な解が生成されてしまう。そのため、多くのGAによるアプローチは効率的な組換え操作の構築に着目している<sup>[3,4,5]</sup>。本稿では、共進化GAによる動的施設配置問題へのアプローチについて検討する。

共進化GAには、協調型共進化GA(Cooperative Coevolutionary Genetic Algorithms: CCGA)がある。その特徴に、多集団による解候補の表現、各集団内の個体は部分解を表す、個体の評価は他集団中の個体と生成した完全な問題解を通じて行われるなどがあげられる。関数最適化<sup>[7]</sup>、Artificial Neural Networkの最適化<sup>[8]</sup>とロボット制御<sup>[9,10]</sup>などの問題において、CCGAがCGAより良い性能を示すことが報告されている。CCGAの問題点に、問題分割に関する一般的な基準がないこと、個体評価における信頼度割り当て問題、つまり完全解が個体らによって生成されたもので、その評価は明確な評価関数さえ存在すれば、容易であるが、各個体が生成された解にどれぐらい貢献しているかは決めにくいなどがあげられる。本稿では、CCGAにおける信頼度割り当て問題の一解決策として共生型共進化GA(Symbiotic Coevolutionary Genetic Algorithm: SCGA)を提案しDFLPを用いてその性能を検証する。

#### 4.1 協調型共進化GA

CCGAをP生産期間のN施設のDFLPに適用するにあたり、まず、DFLPを各生産期間におけるSFLPに分割する。そして、それぞれのSFLPに対して探索集団を用意する。第t集団内の個体は、生産期間tにおける施設配置を表す。個体表現には自然数の順列を用いる。個体の初期評価は他集団内のランダムな個体と生成した完全解の適応度とする。つぎに、各集団に対して、順次にGAを適用する。その時、個体の適応度は他集団内の最良個体と構成した完全解の適応度とする。この評価方法は、分割して得られた部分問題間に相関がある場合には不適切である。CCGAは、最良個体による評価と併せてほかの評価方法を用いることもあるが、最良個体による評価はその根本的な評価方法であると言える。集団内のすべての個体が評価された後、適応度に基づく撰択による集団の更新が行なわれる。選ばれた個体らに突然変異・組換えなどの遺伝操作を適用して次世代の個体を生成する。本稿での実験においては、組換え操作は使われないが、自然数の順列による個体表現を用いるため、これまでに提案された組換え操作は応用できる。突然変異として、シンプルなswap mutation operator、つまり、順列中の二つのランダムに選ばれた数字の位置を交換する操作を使用した。

#### 4.2 共生型共進化GA

CCGAにおける信頼度割り当て問題の一解決策として、ここでは、共生型共進化GA(Symbiotic Coevolutionary Genetic Algorithm: SCGA)を提案する。まず、部分解を表す個体には明示的な適応度を割り当てないことから始まる。つぎに、各部分集団の更新は、並列的に同時に行なわれる。つまり、評価・撰択は個体らによって生成される完全解に、突然変異・組換えなどの遺伝操作は各集団内で部分解を表す個体に対して行なう。つまり、評価・撰択と突然変異・組換えを異なるレベルに分けて考える。具体的な実現方式として、ここでは進

化戦略での( $m^l$ )撰択に因んで、以下のようにする。ま

ず始めに、部分集団からランダムに $l$ 個の完全解を生成し、評価する。つぎに、上位の $m$ 個の完全解を用いて各部分集団を同時に更新する。最後に、各部分集団内に突然変異・組換えなどの遺伝操作を実施する。

### 5. 計算機実験結果

CCGAおよびSCGAを問題I(5生産期間, 2x3のFLP<sup>[11]</sup>)と問題II(5生産期間 3x3のFLP<sup>[4]</sup>)に適用した。パラメータは評価回数が文献[4]の実験と同じになるように設定した。CCGAは個体数5, 10, 20, 40及び80などを用いて実験した。以下に示した結果は其中最良なものである。SCGAは(30, 200)、つまり個体数30の各部分集団から200個の完全解を生成し、その上位の30個を用いてそれぞれの部分集団を更新する。突然変異率はCCGAで0.2, SCGAで0.4とした。実験結果は全て100回の平均結果とする。

#### 5.1 DFLPに関する実験結果

問題Iは最適解として71187が知られている<sup>[11]</sup>。この問題に関して、文献[11]では、DPを使って最適解より1.1%劣った解が見つかった。また、文献[4]では、GAを使って最適解を見つけている。CCGAとSCGAは100回の中に最適解を、それぞれ20回(平均71713, 分散419)、26回(平均71610, 分散326)に見付けた。問題IIは、再配置コストを考慮しない場合に、五つの独立なSFLPに相当し、最適解として592029が知られている<sup>[11]</sup>。文献[4]ではGAを使って、1回試行の結果として、最良解と解集団の平均はそれぞれ593856と595274であり、最適解は見つからない。CCGAとSCGAは100回の中に最適解を、それぞれ2回(平均593858, 分散1306)、14回(平均592982, 分散808)に見付けた。また、再配置コストを考慮した場合での最適解は知られていないが、CCGAとSCGAの100回試行結果はそれぞれ、(最良606762, 平均612157, 分散1775)、(最良606762, 平均610550, 分散1731)のようになっている。

表 1 : DFLP に関する実験結果

問題 I	CCGA	SCGA
Hits	20/100	26/100
平均	71713	71610
分散	419	326
問題 II	CCGA	SCGA
最良	606762	606762
平均	612157	610550
分散	1775	1731

### 5.2 再配置コストの制約付きDFLPに関する実験結果

CCGA と SCGA を各生産期間に再配置コストの制約付き DFLP に適用した。文献[4]での最良解は 608904 であるが、各生産期間におけるそれぞれの再配置コストに関する制約は示されていないため、その最良解での再配置コスト(2,304; 2,349; 2,925; 4,539)を参考に、ここでは各生産期間における再配置コストの制約として(3,000; 3,000; 3,000)を用いた。また、各生産期間での再配置コストが  $B_i$  を超えた場合、ペナルティーとしてその再配置コストの 100 倍のコストを課す。CCGA と SCGA の 100 回試行結果はそれぞれ、(最良 607677, 平均 629311, 分散 8889), (最良 607677, 平均 623411, 分散 6617)のようになっている。

### 6. おわりに

本稿では、動的施設配置問題(Dynamic Facility Layout Problems : DFLP)への共進化 GA によるアプローチについて検討した。まず、協調型共進化 GA を動的施設配置問題に適用し、従来より提案された GA と比べて、その有効性を確認した。つぎに、協調型共進化 GA における信頼度割り当て問題の一解決策として、共生型共進化を提案し、協調型共進化 GA に対する優位性を示した。計算機実験において、二つの小規模の DFLP を用いたが、今後は、大規模な DFLP への提案手法の適用、また、組換え操作を取り入れる場合の提案手法の性能などについて検討したいと考えている。

### 文 献

- [1] Kusiak, A. and Keragu, S. S., The facility layout problem, E. J. Op. Res., Vol.29, pp.229-251 (1987)
- [2] Balakrishnan, J. and Cheng. C. H., Dynamic layout algorithms: a state-of-the-art survey, Int. J. Mgmt. Sci. Vol.26, No.4, pp.507-521 (1998)
- [3] Balakrishnan, J. and Cheng, C. H., Genetic search and the dynamic layout problem, Computer&Operation Research, Vol.27, pp.587-593 (2000)
- [4] Conway, D. G. and Venkataramanan, M. A., Genetic search and the dynamic facility layout problem, Computer & Operation Research, Vol.21, No.8, pp.955-960 (1994)
- [5] Ahuja, R. K., Orlin, J. B. and Tiwari, A., A greedy genetic algorithm for the quadratic assignment problem, Computer & Operation Research, Vol.27, pp.917-934 (2000)
- [6] Bakakrishnan, J., Jacobs, F. R. and Venkataramanan, M. A., Solutions for the constrained dynamic facility layout problem, E. J. Op. Res., Vol.57, No.2, pp.280-286 (1995)
- [7] Potter, M. A. and DeJong, K. A., A cooperative coevolutionary approach to function optimization, in Parallel Problem Solving From Nature - PPSN III, Int. conf. on Evolutionary Computation. Lecture Notes in Computer Science, Vol. 866, Berlin: Springer Verlag, pp.249-257 (1994)
- [8] Potter, M. A. and DeJong, K. A., Evolving neural networks with collaborative species, in Proc.1995 Summer Computer Simulation Conference, Ottawa, Ontario (1995)
- [9] De Jong, K. A. and Potter, M. A., Evolving complex structures via cooperative coevolution, in Proc. 4th Annu. Conf. on Evolutionary Programming The MIT Press (1995)
- [10] Potter, M. A., DeJong, K. A. and Grefenstette, J. J., A coevolutionary approach to learning sequential decision rules, in Genetic Algorithms: Proc. 6th Int. Conf. Morgan Kaufmann, pp.260-267 (1995)
- [11] Rosenblatt, M. J., The dynamics of plant layout, Management Sci., Vol.32, No.1, pp.76-86 (1986)
- [12] 張明 大倉和博 上田完治 杉山正晴: 「共生型共進化GAによる動的施設配置問題の一解法」, 2001年度精密工学会秋季大会

# 力覚提示機能を有する遠隔作業システムに関する研究 (第2報)

久富 茂樹      千原 健司      山田 宏尚\*      武藤 高義\*

## Research on a Force Feedback Remote Control System ( )

Shigeki KUDOMI   Kenji CHIHARA   Hironao YAMADA\*   Takayoshi MUTO\*

あらまし 研磨、検査などの工程においては、作業者の高度な熟練と経験を必要とすることから、作業の自動化は遅々として進んでいないのが現状である。また、これらの作業は粉塵、高温、騒音など劣悪環境下での作業が多いことから作業環境の改善が望まれている。そこで、本研究では研磨作業をはじめとする作業者の力覚(力覚)が必要な作業を対象とした力覚提示機能を有する遠隔作業システムを開発することでこの課題の解決を試みる。本報では、まず、作業者に力覚を提示する装置である力覚ディスプレイ(2種類)について、その力覚提示機能を比較検討した。仮想ばねの硬さを識別する実験を行った結果、それぞれの特徴が明らかになった。次に力覚ディスプレイとパラレルリンク型油圧マニピュレータとでマスタ・スレーブ制御系を構成し、スレーブに研磨装置を取り付けた遠隔作業システムを構築した。本システムを用いて、作業者に力覚を提示しながら、実際に研磨作業を行うことができた。

キーワード 力覚ディスプレイ, 研磨, 遠隔操作, 弁別閾, 油圧, マスタ・スレーブ, パイラテラル制御

### 1. まえがき

近年、各種製造業においては、多様な自動機械が導入されたことにより、生産の合理化・効率化の進捗が著しい。しかしながら、研磨、検査などの工程においては、作業者の高度な熟練と経験を必要とすることから、作業の自動化は遅々として進んでいないのが現状である。また、これらの作業は粉塵、高温、騒音など劣悪環境下での作業が多いことから作業環境の改善が望まれている。この課題の解決には、作業者を作業現場から隔離することが可能な、遠隔操作技術の導入が有効であると考えられる。そこで、本研究では研磨作業をはじめとする作業者の力覚(力覚)が必要な作業を対象とした力覚提示機能を有する遠隔作業システムの開発を目的とする。また、このような実感伝送機能を有する遠隔操作は作業環境の改善に効果があるだけでなく、建設機械や工作機械の操作訓練、技能や技術の伝承においても有効であると考えられている<sup>[1]</sup>。

図1にシステム概念図を示す。本システムはマスタとスレーブの二つのマニピュレータによって構成されている。作業者はマスタを操作することでスレーブを駆動しワークに対して作業を行う。このときスレーブが受けた作業反力はマスタを介して作業者に提示される。このマスタのように人に力覚を提示することのできる装置

は力覚ディスプレイと呼ばれている。これまでに研究開発されている力覚ディスプレイの多くは、制御のしやすさ、比較的高い応答性などの理由から電動アクチュエータを用いている<sup>[2]</sup>。しかしながら、電動アクチュエータは過負荷に弱く、力/質量比が小さいため、作業への大きな力の提示と装置の小型化を両立させることが難しい。そこで、著者らは比較的大きな力、高剛性を必要とする作業に適した力覚ディスプレイとして、油圧式力覚ディスプレイを開発してきた<sup>[3,4]</sup>。

本報では、開発した油圧式力覚ディスプレイと電動アクチュエータを用いた力覚ディスプレイの一つであるPHANTOM 1.5/6DOF (SensAble Technologies社製)を用い

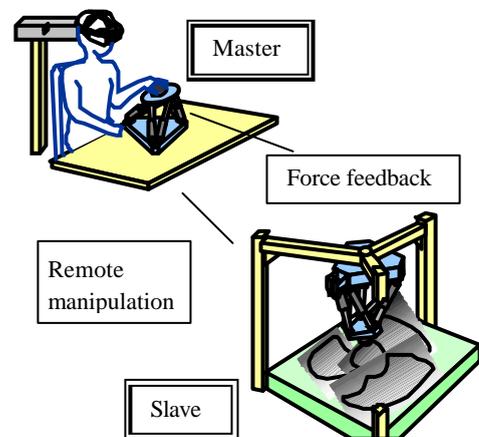


図1 遠隔作業システム

\* 岐阜大学工学部

て、作業者への力覚提示について比較検討する。また、スレーブに研磨装置を取り付けた遠隔研磨システムを構築し、本システムを用いて実際に研磨作業を行う。

## 2. 力覚ディスプレイ

以下に本研究で用いた2種類の力覚ディスプレイの概要を示す。

### 2.1 油圧式力覚ディスプレイ

図2に油圧式力覚ディスプレイの外観を示す。また、表1に主な仕様を示す。本力覚ディスプレイはエンドエフェクタとベースの間にボールジョイントを介して6本の油圧シリンダを配置したスチュワート型の平行リンク機構を採用している。この機構により、可動範囲は狭くなるものの、コンパクトでありながら6自由度の運動を実現できる。また、油圧シリンダを用いることで、剛性が高く、大きな力の提示が可能である。前報では、外乱オブザーバによる外乱推定補償制御あるいは位置目標値生成と位置フィードバック制御を行うことで、各シリンダの動特性差や制御弁の中立点ずれを補償し、操作性の改善を図った<sup>[4]</sup>。本報においてもこれらの補償制御を用いた。



図2 油圧式力覚ディスプレイ

表1 油圧式力覚ディスプレイの主な仕様

位置入力自由度	6
力覚提示自由度	6
最大操作力	100 [N]
出力	各シリンダ 100[N]以上
可動範囲	
・ ロール	28 [deg]
・ ピッチ	27 [deg]
・ ヨー	70 [deg]
・ サージ	79.5 [mm]
・ スウェー	72 [mm]
・ ヒープ	46 [mm]

### 2.2 PHANTOM

PHANTOM 1.5/6DOF(SensAble Technologies社)はDCモータを用いた力覚ディスプレイであり、6自由度の入力と6自由度の出力を備えている。図3にその外観、表2に主な仕様を示す。操作者はペン型のグリップ部を自由に動かすことで位置・回転座標の入力を行うことができる。また、DCモータとワイヤを用いて、ペン型グリップ部に力とモーメントを発生させることで操作者へ力覚を提示することができる。PHANTOMの制御には専用の制御用ライブラリであるGHOST SDK (SensAble Technologies社)を用いた。

## 3. 力覚提示による仮想ばねの識別

それぞれの力覚ディスプレイの機械的特性は2章で述べたとおりであるが、作業者に対する力覚提示機能は心理物理実験を通してその能力を調べる必要がある。本研究では、各力覚ディスプレイを介してどの程度仮想ばねの硬さの違いを識別できるか調べることで、力覚提示機能の比較を行う。

### 3.1 実験手順

各力覚ディスプレイとも、原点から鉛直下向きに操作した場合に、式(1)で表される反力が発生するように仮想的なばねを設定した。



図3 PHANTOM

表2 PHANTOMの主な仕様

位置入力自由度	6
力覚提示自由度	6
最大提示力/トルク	
・ 各軸方向の並進	8.5 [N]
・ 各軸周りの回転	0.17 ~ 0.52 [Nm]
可動範囲	
・ ロール	335 [deg]
・ ピッチ	260 [deg]
・ ヨー	335 [deg]
・ サージ	195 [mm]
・ スウェー	375 [mm]
・ ヒープ	270 [mm]

$$f_r = k_s \cdot x_f \dots\dots\dots(1)$$

ただし、 $f_r$ ：仮想ばねからの反力[N]、 $k_s$ ：仮想ばねのばね定数[kN/m]、 $x_f$ ：鉛直下向き方向の原点からの変位量[m]である。被験者は力覚ディスプレイを鉛直下向きに操作すると仮想ばねの硬さを知覚することができる。

最初に基準となる仮想ばねのばね定数を決めておき、被験者に提示する。次に比較する仮想ばねを提示し、基準の仮想ばねと比べて、「硬い」「同じ」「柔らかい」の3件法により回答してもらった。比較する仮想ばねのばね定数をある一定の間隔で変化させながら、この手順を繰り返した。実験は、比較する仮想ばねのばね定数を基準の仮想ばねと同じものから始めて徐々に大きくしていき、初めて「硬い」との回答が出現した時点で終了し、そのときのばね定数の差を記録する上昇系列と、比較する仮想ばねが明らかに「硬い」と知覚されるばね定数から徐々に小さくしていき、初めて「同じ」もしくは「柔らかい」と回答のあった時点で終了し、その1回前のばね定数の差を記録する下降系列を用いた。各系列を4回ずつランダムに計8回の測定を行った。基準となる仮想ばね定数は、0.2[kN/m]、1.0[kN/m]の2水準について測定を行った。下降系列の場合に最初に提示する比較の仮想ばね定数は、それぞれの場合で、0.4[kN/m]、1.5[kN/m]とした。また、比較する仮想ばね定数の変化量を常に一定にした場合、被験者が提示回数などから仮想ばねの硬さを推測し、データに作為性が紛れるおそれがあるため、変化量は実験毎に一定の範囲内でランダムに変えた。被験者は右利きの男性3名で、利き手で操作してもらった。

3.2 実験結果および考察

各実験において、全被験者の上昇系列と下降系列の結果を平均してばね定数の弁別閾(変化が知覚できる量)とした。図4に実験結果を示す。エラーバーは全データの標準偏差を示している。なお、基準の仮想ばね定数が1.0[kN/m]の場合、PHANTOMでは実験中にしばしばモータを保護するためにソフトウェア上で安全機構が作動し実験を遂行することができなかった。

基準ばね定数が0.2[kN/m]の場合、PHANTOM、油圧式力覚ディスプレイともに0.1[kN/m]程度の弁別閾であり、標準偏差も同程度であった。このことから、0.2[kN/m]という比較的柔らかいばねの提示は両力覚ディスプレイで同程度の硬さ感覚提示性能があることがわかった。しかしながら、PHANTOMは仮想ばねに接触した瞬間(ばねに当たった感覚)が比較的良く知覚できるのに対し、油圧式力覚ディスプレイでは、柔らかい仮想ばねに対して、徐々に力を加えていけば仮想ばねからの反力を知覚できるものの、ばねに接触した瞬間の知覚は困難であるとの意見があった。油圧式力覚ディスプレイはバックドライバビリティ性を補償するために力センサで検出した操作者の力信号に基づき駆動制御を行っているが<sup>[5]</sup>、接触時点において力覚ディスプレイを駆動するための力と

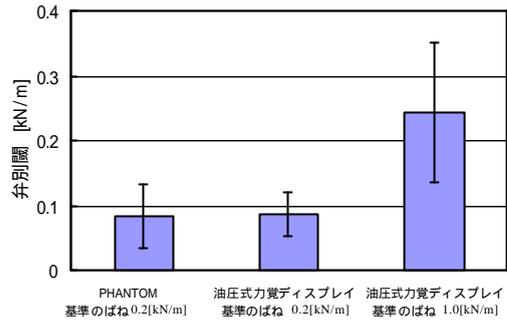


図4 仮想ばね定数に対する弁別閾

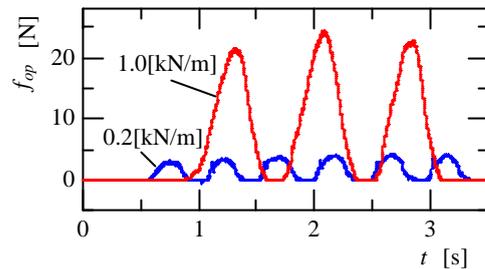


図5 実験中の被験者の操作力

ばねに接触したときの反力が混在しており、被験者がばねに接触した瞬間の知覚をすることは困難であると考えられる。

基準の仮想ばね定数が1.0[kN/m]の場合、油圧式力覚ディスプレイを用いた場合の弁別閾は、0.25[kN/m]程度であり、基準の仮想ばね定数が0.2[kN/m]の場合に比べて約2.5倍になっている。標準偏差も大きくなっており、人間の硬さに対する知覚は、硬い対象物であるほど曖昧になってくることが確認できた。この結果は、ウェーバー・フェヒナーの法則およびべき乗則<sup>[6]</sup>で知られているように、生体の感覚は刺激となる物理量の対数もしくはべき乗を知覚するという性質にあてはまるものであった。また、油圧式力覚ディスプレイを用いた実験中に被験者が加えている力の一例を図5に示す。被験者は、ばねの硬さを識別するためにばねを押す力を強めたり弱めたりしており、ばね定数が大きい場合ほど大きな力を加えていることがわかった。一方、PHANTOMを用いた場合も、被験者はばね定数が1.0[kN/m]の比較的硬いばねに対しては大きな力を加えて硬さを識別しようとしていることが推察できる。しかしながら、PHANTOMの最大提示力を越えるような大きな力に対しては、モータを保護するための安全機構が作動し、その時点でシステムが停止してしまった。そのため、被験者に大きな力を加えすぎないように指示したが、小さな力では、比較の仮想ばね定数を1.5[kN/m]以上にしても基準の仮想ばねとの差を識別することは困難であり、1.0[kN/m]以上のばね定数では

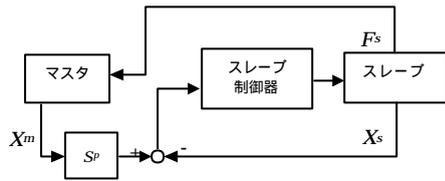


図6 力逆送型バイラテラル制御ブロック図

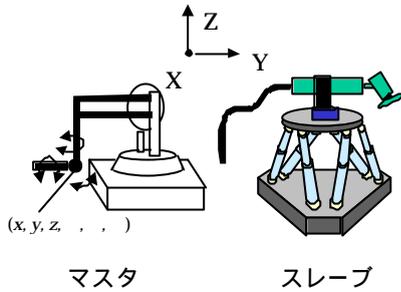


図7 座標系

すべて剛体に接触しているように感じているようであった。

以上の結果より、ばねの硬さを識別しようとした場合、比較的柔らかいばねに対してはPHANTOMが、比較的硬いばねに対しては油圧力覚ディスプレイが有効であることが確認できた。

#### 4. 遠隔研磨システム

小型研磨装置による研磨作業を対象として、力覚ディスプレイをマスタ、作業用マニピュレータをスレーブとするマスタ・スレーブ制御系を構成し、これらをバイラテラル制御（位置と力による双方向の制御）することで遠隔研磨システムを実現する。これまでに、油圧式力覚ディスプレイとそれと同形状の油圧マニピュレータを用いたマスタ・スレーブ制御系を構築してきたが<sup>[3]</sup>、小型研磨装置による作業は、大きな力は必要としないことと、研磨装置がワークに接触したときの接触感覚が重要であるので、本システムでは、3章での検討結果に基づき、マスタにはPHANTOMを用いて、マスタ・スレーブ制御系を構成する。そして、ばね負荷での操作実験および小型研磨装置による研磨実験を行うことでシステムの操作性を確認する。

##### 4.1 PHANTOMを用いたマスタ・スレーブ制御

バイラテラル制御法はこれまでにいくつかの方法が提案されているが、マスタとして用いるPHANTOMには操作者の加えた力を検出する力センサが取り付けられていないため、マスタに力センサが無くても構成できる力逆送型を採用した。図6にブロック図を示す。スレーブはマスタの変位に追従するように位置のサーボ系が構成され、マスタはスレーブの力センサで検出された反力を発生させ操作者に提示を行う。また、運動伝達比 ( $S_p$ ) を

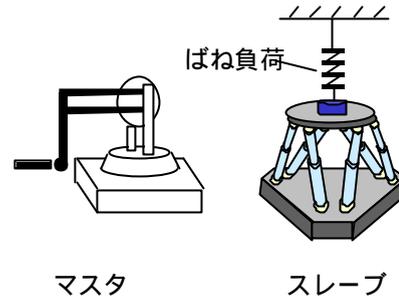


図8 ばね負荷での操作実験

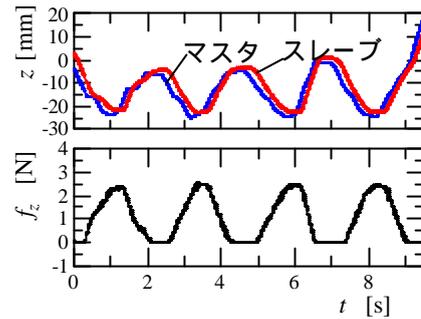


図9 ばね負荷での操作実験結果

導入することでシステムの安定性を図った。本システムではマスタとスレーブのリンク機構が異なるため、以下の方法で位置指令値の変換を行った。なお、座標系は図7に示すように設定した。マスタからはグリッパ回転中心部の位置  $(x, y, z)$  とグリッパ回転角  $(\theta, \phi)$  が得られる。この位置・姿勢の情報とスレーブの幾何学的モデルから平行リンク機構の逆運動学計算を行うことでスレーブの各油圧シリンダへの位置指令値を算出した。また、スレーブ制御器にはPD制御則を採用した。マスタであるPHANTOMに対しては、GHOSTを介してスレーブの力センサで検出された力/モーメントを指令することで、力覚提示プロセスが実行され、操作者に力覚を提示することができる。

##### 4.2 ばね負荷での操作実験

図8にばね負荷での操作実験システムを示す。スレーブの力センサにばね負荷（ばね定数：0.2[kN/m]）の一端を取り付け、もう一端を上部のフレームに固定した。バイラテラル制御における運動伝達比 ( $S_p$ ) は1に設定した。また、マスタへの反力提示はZ軸方向のみとした。マスタをZ軸方向に操作し、ばね負荷に対して操作を行ったときのマスタおよびスレーブのZ軸方向の変位量およびZ軸方向の力を図9に示す。力に関しては、マスタで実際に発生している力を取得することはできないので、スレーブの力センサで検出した力（マスタへの指令値）のみを図示した。マスタからの位置指令値におおむねスレーブが追従して動作しており、力もばねの伸び量に比例して検出されている。本実験により、ばねが伸びることによって生じる反力をマスタによって操作者に提示することができた。

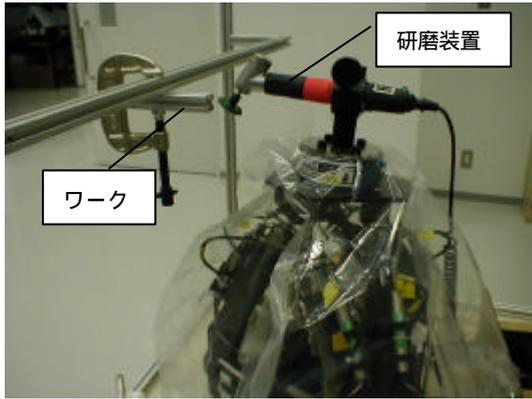


図10 研磨作業実験

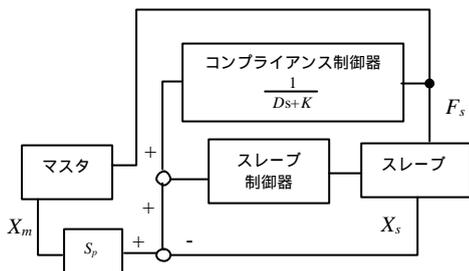
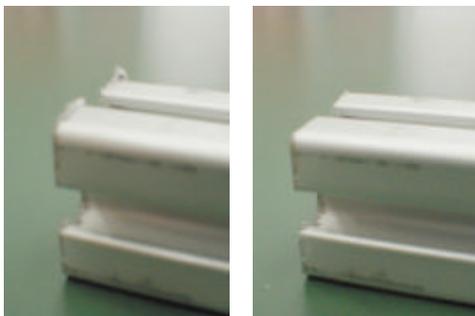


図11 コンプライアンス制御を加えた力逆送型パラレル制御ブロック図



研磨前 研磨後

図12 遠隔研磨システムによる研磨

#### 4.3 研磨作業の実験

図10に示すようにスレーブの6軸力センサ上に小型研磨装置(M11GA:モニター株)を取り付け、研磨作業が行えるようにした。ワークにはアルミのフレーム材を用い、切断面のバリ取り研磨を行う。このような接触作業にはコンプライアンス制御が有効であるとされており<sup>[7]</sup>、本研究においても、力逆送型パラレル制御系にコンプライアンス制御系を加えることにする。図11に制御ブロック図を示す。この方法は、接触によって生じた反力を変位に変換することで、ばねおよびダンパ的な効

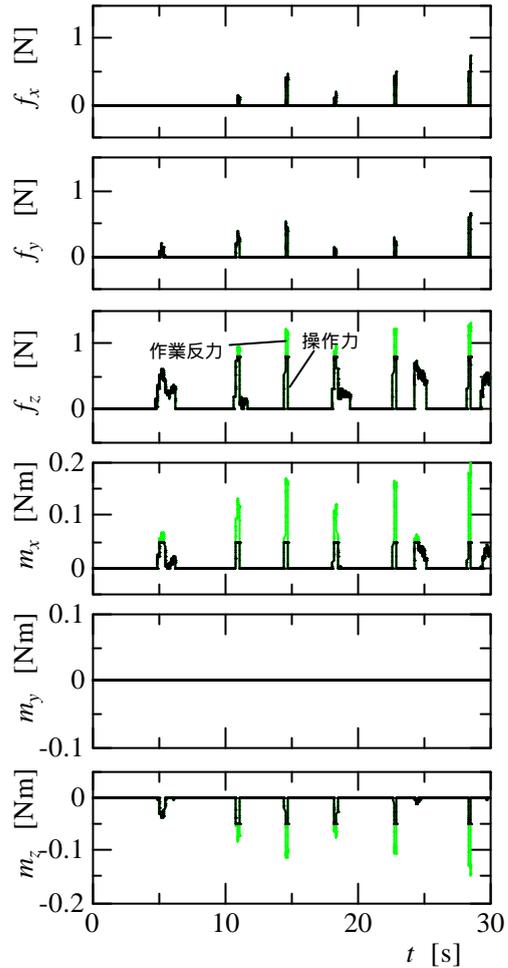


図13 研磨作業時の作業反力と操作者への提示力

果を持たせ、安定した接触作業を実現しようとするものである。運動伝達比は操作のしやすさとシステムの安定性を考慮して0.5とした。また、マスタで必要以上に大きな反力が発生すると操作の妨げとなることから、提示力は0.8[N]、提示モーメントは0.05[N・m]の上限を設定した。さらに、6軸力センサで検出した高い周波数成分を提示しようとするマスタで振動が生じ、操作性を損なったため、ローパスフィルタ(カットオフ周波数31.25[Hz])を通した後の力をマスタで提示することにした。

以上のシステム構成および制御法を用いて研磨作業を行った。図12にバリ取り研磨を行った結果を示す。また、図13に研磨作業時の操作者への提示力およびスレーブの力センサで検出された作業反力を示す。マスタへの指令値を操作者への提示力として図示しているので多くの部分で作業反力と提示力は重なって描かれているが、設定した上限を超える作業反力については上限の力が操作者に提示されている。今回行った作業は、研磨装置を上方からワークに対して押し当てる動作であったため、Z軸方向の力(\$f\_z\$)、X軸周りのモーメント(\$m\_x\$)およびZ軸周りのモーメント(\$m\_z\$)に大きく力が発生していた。図14に

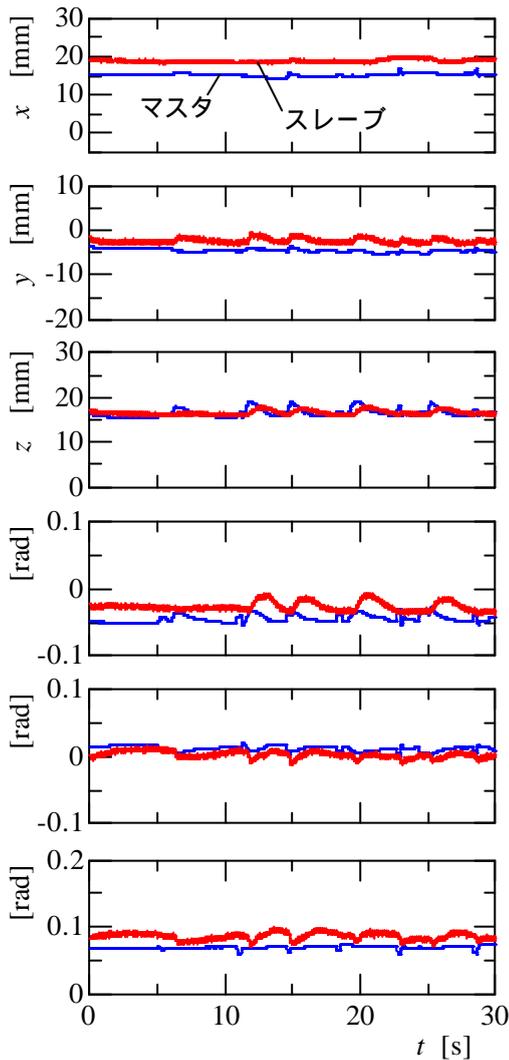


図14 研磨作業時のマスタおよびスレーブの位置・姿勢

マスタおよびスレーブの位置・姿勢を示す。なお、マスタに関しては、運動伝達比を掛けた後の位置・姿勢を明示している。接触時のシステムの安定性を考慮し、スレーブ制御器のゲインを小さく設定したため、位置追従性はあまり良好ではなかった。実際に操作してみた感覚は、操作には慣れが必要で、ゆっくりとした速度で作業を行えば接触時の反力を感じ取れるが、操作速度を大きくすると、現在のコンプライアンス制御の設計では、ワークへの接触と同時に振動して系が不安定になり操作が困難であった。直接作業を行う場合に比べて、より慎重な操作が必要であり、実用的なシステムの構築に課題を残すことになった。また、評価は行っていないが、今回の作業においては、6自由度すべての力・モーメントを提示するよりも、Z軸方向の力のみを作業者に提示したほうが操作しやすく感じた。作業に応じた適切な力覚提示の方法について評価していくことも必要である。

## 5. まとめ

本研究では、力覚提示機能を有する遠隔作業システムの開発を目的として、まず、著者らがこれまでに開発した油圧式力覚ディスプレイと市販の力覚ディスプレイであるPHANTOMを用いて、仮想ばねによる力覚提示機能を心理物理実験により比較検討した。ばねの硬さを識別しようとした場合、比較的柔らかいばねに対してはPHANTOMが、比較的硬いばねに対しては油圧力覚ディスプレイがそれぞれ有効であることが確認できた。次に、PHANTOMをマスタ、平行リンク型油圧マニピュレータをスレーブとするマスタ・スレーブ制御系を構成し、スレーブに研磨装置を取り付け、実際に研磨を行った。ゆっくりとした速度で作業を行えば力感覚を感じ取ることができたが、操作には慣れが必要であり、直接作業に比べて十分であるとは言えない。実用的なシステムを構成するためには安定したシステム動作を行う制御手法とシステム設計が必要である。

## 謝 辞

本研究を遂行するにあたり、機械設備購入のため補助金を頂いた日本自転車振興会に深く感謝いたします。

## 文 献

- [1] 光石衛, 畑村洋太郎, “ S C Sを用いた操作実感伝送による遠隔操作と技術伝送システムの構築”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'97, pp.1001-1002, 1997.
- [2] G.C.Burdea, "Force and Touch Feedback for Virtual Reality", Wiley-Interscience, 1996.
- [3] 光井輝彰, 久富茂樹, 飯田佳弘, “ 力覚ディスプレイによるマスタスレーブシステムの開発”, 岐阜県生産情報技術研究所研究報告, No.1, pp.53-58, 2000.
- [4] 久富茂樹, 千原健司, 山田宏尚, 武藤高義, “ 力覚提示機能を有する遠隔作業システムに関する研究(第1報)”, 岐阜県生産情報技術研究所研究報告, No.2, pp.25-28, 2001.
- [5] 久富茂樹, 丹羽義典, 山田宏尚, 武藤高義, “ 平行リンク型力覚ディスプレイの開発(油圧または空気圧サーボ系による力覚ディスプレイの基礎的検討)”, 平成11年春季フルイドパワーシステム講演会講演論文集, pp.37-39, 1999.
- [6] 大山正, 今井省吾, 和気典二, “ 新編 感覚・知覚心理学ハンドブック”, 誠信書房, 1994.
- [7] 日本ロボット学会編, “ ロボット工学ハンドブック”, コロナ社, 1990.

# ロボット教示高度化のためのセンシング手法に関する研究

柘植 英明      谷 和男\*      田中 等幸

## Study of Sensing Methods for Sophisticated Robot Teaching

Hideaki TSUGE    Kazuo TANI\*    Tomoyuki TANAKA

あらまし ロボットへの教示は、現在もティーチングペンダントを用いた方法が最も多く利用されている。しかし、ティーチングペンダントを用いた教示には、熟練と多くの時間が必要である。特に、バリ取り作業等の教示においては、連続的な経路教示が必要となるために多くの時間が必要となる。そこで教示時間の短縮のために、人が操作するツールの位置・姿勢を計測し、その計測データを基にして教示データを作成する手法に着目する。これにより、バリ取り等の経路教示が必要な作業における教示時間の短縮を目指す。ここで、人が使用するツールの動きから教示データを作成するためには、位置・姿勢を精度良く計測することが必要不可欠である。しかし、現在の計測方法においては、ノイズ等の影響により位置・姿勢を高精度にかつ安定に計測することは困難である。より精度を向上させるためには複数のセンサを用いて計測を行い、ノイズ等の影響による誤差を補正する必要がある。そこで本研究では複数のセンサを用いた計測において、それぞれのセンサに生じるノイズをカルマンフィルタにより除去し、真値を推定する手法を提案する。さらに、構築した教示システムにより計測実験を行い、本手法の有効性を示す。

キーワード ロボット教示、センシング、オブザーバ、カルマンフィルタ

### 1. まえがき

ロボット教示は、現在もティーチングペンダントを用いた方法が最も多く用いられており、依然として教示作業には多くの時間を費やしている。特に、バリ取り等の做い作業の教示においては、連続的な経路を指定する必要があるため、教示により多くの時間が必要となる。この問題に対し、対象物の動きを計測し、そのデータからスキルを抽出して教示データを作成する手法<sup>[1]</sup>や、作業における速度や押しつけ力から加工データベースを構築し、そのデータベースを利用した教示方法<sup>[2]</sup>、仮想環境内で教示を行う手法(オフラインティーチング)<sup>[3]</sup>が研究されている。また、鋳物製品などのバリ取り作業の教示において、レーザレンジファインダーにより、リアルタイムに形状を計測し、その計測したデータを基に教示データを補正する方法が提案されている<sup>[4]</sup>。しかし、これらの方法は、スキルの抽出やデータベースの構築に時間が必要となることや、センサの計測ミスによってロボットが異常な動作を行う危険性を有しているため、現段階では研究の段階に留まっている。また、オフラインティーチングでは、実環境とのキャリブレーションが問題となっている。

そこで、実際の作業現場で教示時間の短縮を行うためには、人が操作するツールや対象物の動きを計測し、その計測したデータを基に教示データを作成する手法が有効であると考えられる。現在、教示用ツールの位置・姿勢を計測して、教示データに利用する製品も存在するが、教示点を指定するためのツールであり、動きの計測は困難である。

一方、空間の位置・姿勢を計測する方法として、超音波センサや、ステレオ画像等を利用した製品が販売されている。しかし、これらの計測方法においても実際の計測環境では、ノイズやデータの欠け、さらには計測環境に左右される等の問題があるため、高精度に位置・姿勢を計測することが困難である。そこで本研究では、複数のセンサを組み合わせ、ノイズ等により生じる誤差をカルマンフィルタによって軽減する手法を提案する。さらに、構築した教示システムを用いて計測実験を行い、本手法の有効性を示す。

### 2. 計測データの処理方法

位置・姿勢を計測するセンサとしては、超音波センサや、ステレオ画像等の計測方法があり、製品として販売されている。しかし、これらのセンシング方法では、精度や計測環境が限定される等の問題があり、計測データを直接教示データとして利用することはできない。そこ

\*岐阜大学工学部応用情報学科

で、複数のセンサを組み合わせることで、ノイズやデータの欠け等の誤差を互いに補い合い、より精度を向上させる必要がある。

しかし、複数のセンサから得られた計測データから、どのように真値を推定するのかという問題がある。そこで、ノイズの除去を目的としてカルマンフィルタ<sup>[6]</sup>を構成することにより、観測出力(計測値)から状態量(真値)を推定することができる。

### 2.1 カルマンフィルタ

前報では、人の作業モデルをバネ・ダンパモデルのシステムとして表現し、計測データに生じるノイズやデータの欠けを考慮して真値を推定するオブザーバについて報告した<sup>[5]</sup>。本年度は、この手法を基に計測データに生じるノイズの大きさから真値を推定することができるカルマンフィルタを構成する。カルマンフィルタとは、システムに生じるノイズおよび観測ノイズが白色ノイズである場合、観測出力から真値(状態)を推定する手法である。図1にカルマンフィルタの構成を示す。システムの状態方程式を、

$$\dot{x} = Ax + Bu + Gw, \quad y = Cx + v \quad \dots$$

とする。ここで、 $A, B, C, G$ はシステムを表現するシステム行列である。このシステムの観測器であるカルマンフィルタのフィルタ方程式は次式となる。

$$\dot{z} = Az + Bu + K(y - Cz) \quad \dots$$

ここで、 $K$ はフィルタゲインであり、

$$K = \bar{X}C^T V^{-1} \quad \dots$$

となる。誤差共分散行列 $\bar{X}$ は、次式のリカッチ方程式の解として得られる。

$$A\bar{X} + \bar{X}A^T - \bar{X}C^T V^{-1} C\bar{X} + GwG^T = 0 \quad \dots$$

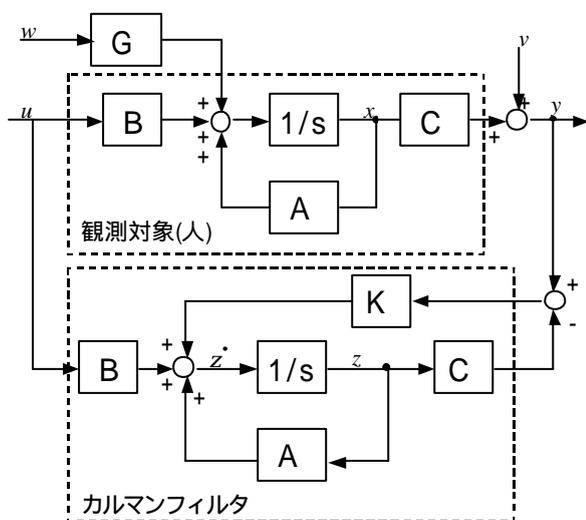


図1 カルマンフィルタの構成

よって、カルマンフィルタではシステムノイズ( $w$ )および観測ノイズ( $v$ )のパワースペクトル密度 $W, V$ によってフィルタゲインを決定することができる。

### 2.2 カルマンフィルタを用いた計測モデル

磁気による位置計測装置であるポヒマスと、PSDカメラによる赤外発光LEDの計測システムを用いた場合の、カルマンフィルタを用いた計測モデルを考える。これらのセンサが、図4に示すようなペン型教示ツールに取り付けられ、その動きを計測する場合は、それぞれの計測位置は完全に一致することが望ましい。しかし、実際にはノイズ等の影響によって両者の計測位置が一致することはほとんどない。よって、この計測結果から実際の位置を推定する必要がある。そこで、図2に示すようなカルマンフィルタを構成する。このモデルは、PSDの計測値は2次元であるため、カルマンフィルタによって推定された奥行き情報を用いて、3次元位置を求めている。それぞれの3次元位置を構成したカルマンフィルタに与えることによって、1つの位置を推定することになる。

## 3. 教示システム

### 3.1 システム構成

図3に、構築した教示システムの外観を示す。教示システムにおける計測センサは、ポヒマス(ポヒマス社、3SPACE FASTRAK)および、PSDカメラ(浜松ホトニクス株, C5949)であり、図4に示すペン型教示ツールの動きを計測することができる。このペン型教示ツール

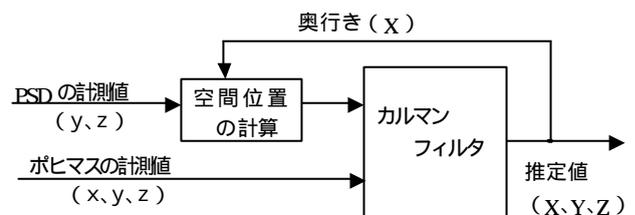


図2 カルマンフィルタを用いた計測モデルの概略



図3 教示システムの外観

には、磁気センサのレシーバと、PSDカメラによって計測される2つのLEDが取り付けられている。

### 3.2 計測データの処理

計測したデータから教示データへ変換するには、ツールの位置・姿勢データから、ロボット先端の位置・姿勢を表す同次変換行列へ変換し、ロボットの各関節角度を逆計算により算出することが必要となる。本研究に用いたロボットシステムにおいては、実ロボットが同次変換行列により動作可能であるため、ノイズ除去等の処理を施したデータから、ロボット先端の位置・姿勢を表す同次変換行列の作成のみを行っている。

### 3.3 動作シミュレーション

産業用ロボットにおいては、各関節角度を指定することによりロボットを動作させるため、位置・姿勢からロボットの各関節角度を求める逆計算が必要となる。この逆計算によって複数の解が求まるため、求めた解の中から適切な解を決定する必要がある。また、ロボットの特異点の問題等により動作可能な関節角度を算出できない可能性がある。従って、計算された各関節角度が適切な角度であるかどうかを、ロボットの動作シミュレーションにより確認することが安全性の面から望ましい。そこで、本システムにおいてはロボットの動作を確認するために、コンピュータ上でシミュレーションを行うこととした。図5に、シミュレーション画面を示す。

### 3.4 教示の実例

構築した教示システムを用いて、習字の教示を行った。本システムにおける教示では、実際の動作を計測し、そのデータを基に教示データを作成して、実際のロボットの動作を行う。図6にロボットが習字を行っている様子

を示す。教示に要する時間は、実際に習字を行う時間とデータの変換時間、さらにシミュレーション時間をあわせても、数十分程度となる。この習字の動作を従来のティーチングペンダントで行う場合では、教示に数時間程度必要である。図7に教示者の字体とロボット動作による字体を示す。今回の動作では、ロボットへの教示データとして、ペン型教示ツール中心の位置データのみを教示しているため、ツール姿勢の影響により教示者の字体がそのまま再現されていない。



図6 ロボットによる動作

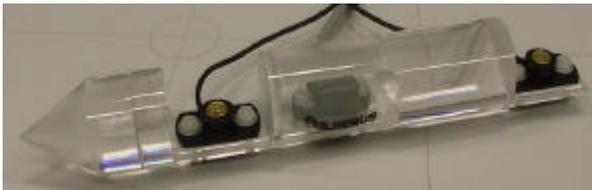
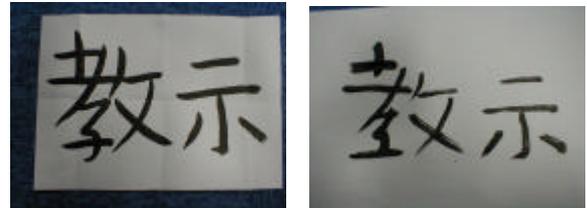


図4 ペン型教示ツール



(1)教示者の字体 (2)ロボット動作による字体

図7 教示およびロボットによる字体

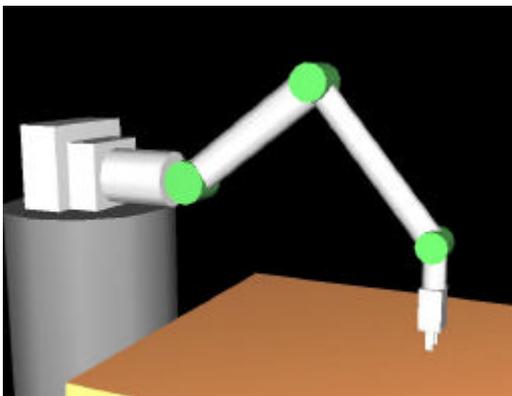


図5 CGによる動作シミュレーション

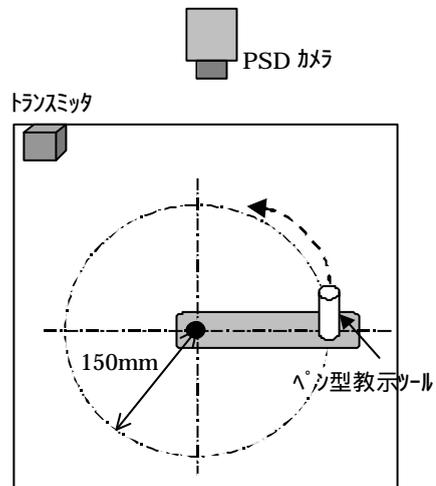


図8 実験方法

## 4. 実験および考察

### 4.1 実験方法

ポヒマスおよびPSDカメラによる計測データから、ノイズを除去し真値を推定する手法の有効性を検証するために、計測実験を行った。計測実験は、図8に示すように、ペン型教示ツールを半径150mmの円周を回転する治具に設置し、ペン型教示ツールを手動にて1回転させた。

### 4.2 実験結果および考察

図9に計測結果およびカルマンフィルタを用いた場合の結果を示す。なお、カルマンフィルタの設計に必要なシステムノイズ( $w$ )および観測ノイズ( $v$ )のパワースペクトル密度 $W$ ,  $V$ は実際の計測結果を考慮し、MATLABによるシミュレーションによって、試行錯誤的に調整を行って決定している。システム行列 $A$ は、空間を移動する質点の運動と捉えて設計した。

本実験における環境では、ポヒマスによる計測値は環境内にある金属物の影響により誤差を生じている。一方、PSDカメラによる計測値には、赤外発光LEDの反射によって生じる計測ノイズのためにばらつきが生じている。半径150mmの円を真値として平均誤差および分散を求めた結果(表1),ポヒマスによる計測値の分散は 34.08, PSDカメラによる計測値の分散は 122.82となった。これ

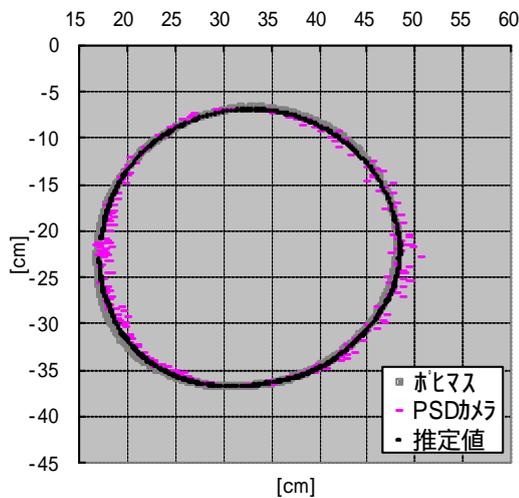


図9 実験結果

表1 計測値および推定値の平均誤差、分散

	ポヒマス	PSDカメラ	推定値
平均誤差[mm]	5.77	5.95	4.32
分散[mm]	34.08	122.82	23.16

に対し、カルマンフィルタをとおした推定値の分散は 23.16となり、カルマンフィルタを用いることによって、誤差の大きさが軽減されていることがわかる。しかし、本実験ではカルマンフィルタの設計に必要なパラメータをシミュレーションにより設定しており、これらのパラメータによって推定値は変わってくる。このため、どのようにパラメータを適切に設計するかということが重要な問題となり、今後更なる検討が必要である。

## 5. まとめ

本研究では、人が操作するツールの動きを計測し、その動きを容易にロボットに教示することができる、教示システムの構築を目指し、本年度は以下のような研究を行った。

- 1) ペン型教示ツールの動きを計測し、その計測データを基に教示データを作成し、実際のロボットを動作させることができる教示システムを構築した。一例として、習字の教示を行い、その動作を確認した。
- 2) カルマンフィルタを用いた計測モデルを提案し、計測実験を行った。その結果、本提案モデルにおいて誤差が軽減されていることを確認した。

今後の課題としては、カルマンフィルタの設計に必要なパラメータをどのように設計するかをさらに検討し、測定精度を踏まえて検討を行う必要がある。

## 文献

- [1] 池内克史, カンS.B., “視覚によるハンドの教示”, 日本ロボット学会誌, Vol.13, No.5, pp599-602, 1995.
- [2] 下倉健一郎, 浅田春比古, 劉申, “バリ取り作業におけるヒューマンスキルの教示方法に関する検討”, 日本ロボット学会誌, Vol.14, No.1, pp144-149, 1996.
- [3] 川崎晴久, 中山寛二, グラハム パーカー, “VR環境での人間の動作意図に基づくロボット教示”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.5, No.2, pp899-906, 2000.
- [4] 草地良規, 加藤晃市, 奥平雅士, “自動倣い作業ロボットシステムのための断面形状認識”, 日本ロボット学会誌, Vol.18, No.6, pp882-889, 2000.
- [5] 柘植英明, 谷和男, 稲葉昭夫, 棚橋英樹, “ロボット教示高度化のためのセンシング手法に関する研究”, 岐阜県生産情報技術研究所研究報告, pp21-24, 2001.
- [6] 野波健蔵, 西村秀和, 平田光男, “MATLABによる制御系設計”, pp75-82, 東京電機大学出版局.

# 立体紙製品の構造解析に関する研究 (第2報)

川島 義隆 西村 太志\* 多賀 郁生

原田 匡人\*\* 戸倉 直\*\* 野口 哲司\*\* 手塚 明\*\*\*

## Research on Structural Analysis of Paper Ware ( )

Yoshitaka KAWASHIMA Futoshi NISHIMURA\* Ikuo TAGA  
Masahito HARADA\*\* Sunao TOKURA\*\* Tetsuji NOGUCHI\*\* Akira TEZUKA\*\*\*

あらまし 現在、包装容器や緩衝材はプラスチック製品から、リサイクルしやすく、かつ生分解性である紙製品へと代替されることが多くなっている。しかし、それらの強度設計は試行錯誤で行われており、効率的な設計方法が望まれている。段ボール製品（緩衝材や箱など）の解析を行うためには、段の構造解析やその構成材料である段ボール原紙の基礎的解析が必要であるが、いまだ十分に検討されていないのが現状である。本報告では、段ボール原紙の基礎的試験、及び汎用解析ソフトLS-DYNAを用いた圧縮特性の解析を行うことにより、その問題点を検討した。その結果、試験片支持具と原紙が接触する部分を節点拘束により簡易化すると、その最大圧縮応力は変わらないが、その座屈後の挙動に差異があった。その簡易化モデルにおいて、1/2モデルはフルモデルに対して最大圧縮応力、座屈後の挙動ともに大きく異なった。また、異方性を持つ材料モデルによる圧縮特性の解析は、実験と比較するとその最大圧縮応力値のオーダーは合うが、その圧縮量や異方性挙動に差異があり、今後の課題であることがわかった。

キーワード 材料試験、有限要素法、構造解析、段ボール

### 1. 緒言

近年まで、工業製品等の輸送や保管に使われる包装材料には発泡スチロールなどのプラスチック製品が多く使用されてきた。しかし、「容器包装リサイクル法」の施行や環境保護の観点から、リサイクルコストが安く、生分解性である紙系の緩衝材や包装容器の利用が多くなっている。紙系の包装材料として代表的なものは段ボールが挙げられ、従来から容器（箱）として広く一般的に使用されている。しかしながら、段ボール箱の積層による変形や耐荷重特性などの解析はなされておらず、それらに対する包装設計現場からのニーズも強い。また、最近の傾向として電気製品や工業部品などの精密機械を包装するための緩衝材として使用されることが多くなっており、正確な強度設計（緩衝設計）も必要とされている。

段ボール製品の実用的な解析を行うためには、材料特性（紙）、構造特性（段構造、2.1参照）の解明およびその有限要素モデル作成の煩雑さの回避が必要となってくる。

る。後者の問題に対して、我々は、段ボール製品は多数の段構造で構成された複合的構造物であり、その段の周期性に着目し、均質化法<sup>[1]</sup>を用いて静的弾性解析を行うことを提案<sup>[2]</sup>している。しかし、前者の問題に対しては学会などでも十分検討されていないのが現状である。そのため、本報告では材料特性、すなわち段ボール原紙の基本的な力学特性の把握を目的として、基礎的実験、圧縮特性解析におけるモデリングの検討及び実験との比較を行い、段ボール原紙の圧縮特性解析における問題点等の検討を行う。

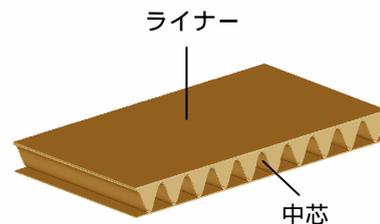


図1 両面段ボール

\* 兼製品技術研究所

\*\* 株式会社日本総合研究所

\*\*\* 独立行政法人 産業技術総合研究所 計算科学研究部門

### 2. 予備実験

#### 2.1 段ボール原紙

段ボールは図1に示すように、ライナー及び中芯と呼ばれる原紙で構成され、中芯を波形に成形し、その片側または両側にライナーを張り合わせることで、段ボールの段構造が作られる。

実験に使用した段ボールの表ライナー（公称坪量170 g/m<sup>2</sup>）、中芯（公称坪量120 g/m<sup>2</sup>）及び裏ライナー（公称坪量170 g/m<sup>2</sup>）の坪量（JIS P 8124）、紙厚（JIS P 8118）の実測値を表1に示す。

表1 段ボール原紙の坪量、紙厚

原紙	公称坪量 (g/m <sup>2</sup> )	測定値	
		坪量 (g/m <sup>2</sup> )	厚さ (mm)
表ライナー	170	171.6	0.205
中芯	120	121.6	0.211
裏ライナー	170	168.6	0.206

2.2 原紙の材料特性の把握及び材料定数の同定

オートグラフ（株）島津製作所AG-20kNIにより原紙の引張強さ試験（JIS P 8113）を行った。試験片は長さ250mm、幅15mm、つかみ具間隔180mmとし、試験速度は10mm/minとした。測定した原紙の縦方向（MD）、横方向（CD）のそれぞれの引張り強さを表2に示す。また、表ライナー、中芯に関して、試験10回測定のうち代表的な曲線を図2に示す。なお、図2は、X軸に関してはオートグラフの引張量（Stroke）をつかみ具間隔（Length=180）で除した値（Stroke/Length）、Y軸に関しては単位面積あたりの引張力でプロットした。

表2 段ボール原紙の引張強さ

原紙	方向	引張り強さ (kN/m)
表ライナー	縦	11.3
	横	4.7
中芯	縦	5.0
	横	2.2
裏ライナー	縦	10.4
	横	4.3

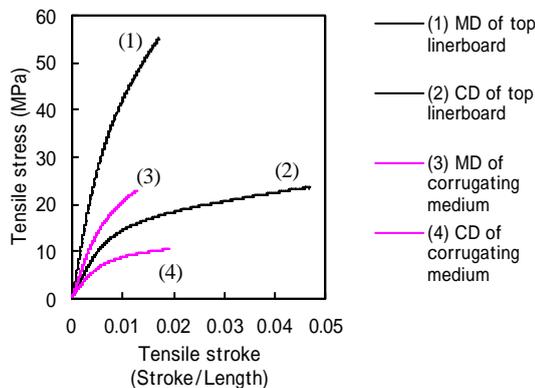


図2 段ボール原紙の引張り特性

段ボール原紙を代表とする機械抄き紙は縦方向に繊維が配向するのが特徴である。その繊維配向性の偏りが図2が示すような強度の差となる。すなわち面内異方性を持つといえる。

また、引張り試験から得られたヤング率、耐力（0.02%とした）を表3に示す。

表3 段ボール原紙のヤング率・耐力

原紙	方向	ヤング率 (MPa)	耐力0.02% (MPa)
表ライナー	縦	5692.0	24.2
	横	2036.7	9.5
中芯	縦	3024.9	11.6
	横	1499.0	4.9
裏ライナー	縦	5473.9	19.5
	横	2171.8	6.9

3. 力学モデルの検討

汎用解析ソフトLS-DYNA（Version 950, (株)日本総合研究所）を用い、原紙の圧縮特性試験のモデル化による解析精度及びその計算時間の違いを検討するため、図3～5に示すような3種類の有限要素モデルを作成した。モデルは試験片支持具をモデル化し、その他のモデルは節点拘束により簡易化したモデルである。また、モデルとの違いはフルモデルと1/2モデルの違いである。



図3 モデル（原紙+支持具、フルモデル）



図4 モデル（原紙、フルモデル）



図5 モデル（原紙、1/2モデル）

原紙モデルの要素は四角形シェル要素を用い、一辺0.5mm程度にメッシュを作成(フルモデル: 節点数8,729, 要素数 8,400), 材料モデルは面内異方性を持つ Mat\_special\_orthotropic<sup>[3]</sup>を使用する. なお, この材料モデルは面外・面内の異方性を扱うこともできるが, 今回は異方性はないものとする. また, 原紙の材料定数は表3の値を使用し, ポアソン比を0と仮定する. 荷重は前章と同様, 試験速度は10mm/minとし, 上部から剛体壁により圧縮を行う. 表4に力学モデルの詳細を示す.

表4 リングクラッシュ試験の力学モデル

要素	原紙	4 節点シェル ( Belytschko-Tsay ) ( 面内 1 点、厚み 2 点積分 )
	支持具	8 節点ソリッド, 剛体
材料モデル		Mat_special_orthotropic <sup>[3]</sup>
荷重条件		上部からの強制変位(10mm/min)
拘束条件	モデル	下面
	モデル モデル	下面 支持具に接触する部分 ・ x,y 方向変位 ・ x,y,z 軸回りの回転
	モデル	切断面における対称境界条件
接触条件		Automatic_general

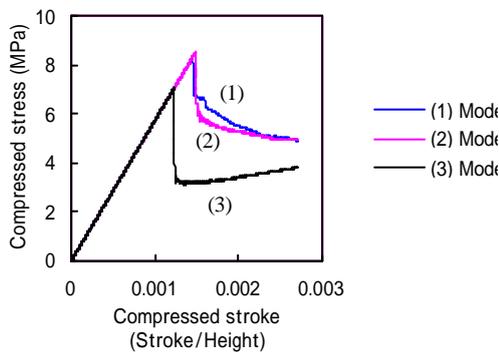


図6 モデル ~ の解析結果の比較

表5 解析結果

	最大圧縮点		計算時間 (Hour)	解析時間 (Sec)
	応力 (Mpa)	圧縮量 (Stroke/Height × 100, %)		
モデル	8.32	0.152	48	0.15
モデル	8.51	0.155	26	0.15
モデル	7.06	0.123	14	0.15

モデル ~ を用いて解析した結果を図6, 表5に示す. モデル, の最大圧縮応力及びその圧縮量は同程度であるが, モデル は, 図6からわかるように, 他のモデルと比較して座屈が早く, 最大圧縮応力, 座屈後の

波形に違いがみられる. これは拘束条件の多さが起因していると思われる.

モデル は に比べると座屈後の挙動に違いが見られるが, 最大圧縮応力は変わらない. よって, 計算時間を考慮し, 次章ではモデル を使用して, 原紙の圧縮特性の解析をすることとする.

## 4 原紙の圧縮特性の解析

### 4.1 実試験

段ボール原紙の圧縮特性の解析を行うため, オートグラフにより圧縮強さ試験(リングクラッシュ試験, JIS P 8126)を行った. 原紙の圧縮試験は, 短冊状に切断した原紙を円形に設置し, その上端部より圧縮を行う. その短冊状の試験片は長さ152.4mm, 高さ15mmとし, 試験速度は引張試験と同様に10mm/minとした. 測定した原紙, それぞれの最大圧縮強さを表5に示すとともに, 表ライナーに関して試験10回測定のうちの代表的な曲線を図7に示す.

表5 段ボール原紙の圧縮強さ

原紙	方向	圧縮強さ (N)
表ライナー	縦	294.3
	横	209.1
中芯	縦	143.1
	横	106.1
裏ライナー	縦	334.4
	横	245.9

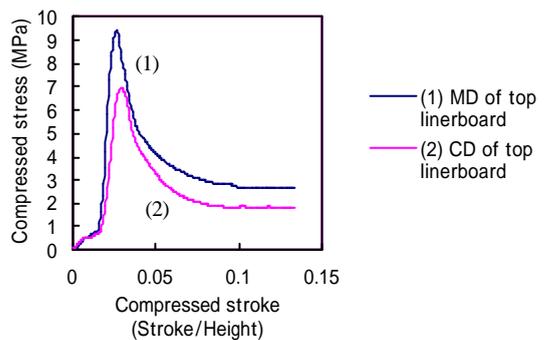


図7 段ボール原紙の圧縮特性



図8 圧縮後の原紙

図7からわかるように原紙が座屈するまで原紙はその強度を保つが、座屈後は急激に強度を失う。圧縮試験後の座屈した原紙（裏ライナー）を図8に示す。なお、図7は、X軸に関してはオートグラフの圧縮量(Stroke)を試験片高さ(Height=15)で除した値(Stroke/ Height)、Y軸に関しては試験片の圧縮部分における単位面積あたりの圧縮力でプロットした。

4.2 解析

モデルを用いて、原紙（表ライナー）の縦方向と横方向の圧縮特性の解析を行った。その結果を図9、またその最大圧縮応力値を実験値とともに表6に示す。

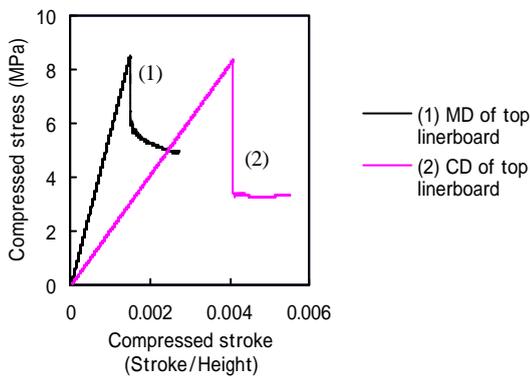


図9 原紙の圧縮特性の解析結果

表6 解析結果と実験における最大圧縮応力値の比較

方向	実験(MPa)	解析(MPa)
縦	9.42	8.51
横	6.69	8.38

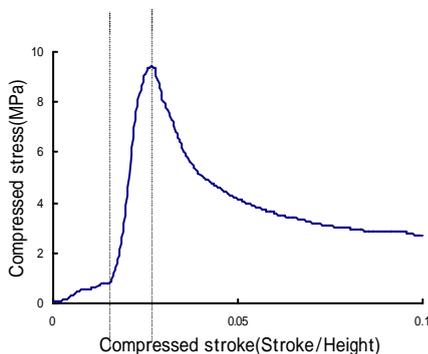


図10 原紙の圧縮特性の区分

図10に示すように、原紙の圧縮特性は、領域は試験機の圧縮面と試験片の間のわずかな隙間を埋める区間、領域は原紙が座屈（折れる）するまでの面内圧縮する区間、領域を座屈後の区間の3つ部分に分けられるとすると、図9の解析結果は図10の領域に相当すると

といえる。

解析（図9）では、縦方向は横方向に対して最大圧縮応力は1.02倍でほとんど差がなく、その圧縮量は0.39倍の差がある。また、実験（図7）では、同様に最大圧縮応力は1.41倍で大きな差が見られ、その圧縮量は0.82と差は小さい。よって、両者において材料圧縮特性の違いがある。また、表6より実験及び解析の最大圧縮応力値はオーダーが合う程度の精度であり、その時の実験における圧縮量は解析のそれに対して縦方向で7.19倍、横方向で3.41倍となり、大きな違いがある。よって、今回使用した解析モデルでは原紙の圧縮特性を十分に表現できておらず、上記の違いを考慮するためには、材料モデルの変更など含めた力学モデルの検討が必要であるといえる。

5.まとめ

段ボール製品の構造解析を目的として、段ボール原紙の引張特性から材料定数を同定し、LS-DYNAを用いて、原紙の圧縮特性の解析を行った。

(1) 試験片支持具をモデル化した場合、座屈後の挙動は実験のそれとよく似ている。また、そのモデルの簡略化として、節点拘束による方法は最大圧縮応力に差がないが、座屈後の挙動に違いが見られる。また、その1/2モデルはフルモデルの最大圧縮応力値及び座屈後の挙動に比べ大きな差が見られ、その精度の問題がある。

(2) 異方性を持つ材料モデルにより、段ボール原紙（ライナー）の縦・横方向の圧縮特性の解析を行った。その最大圧縮応力値は実験のそれとオーダーは合うが、その圧縮量や異方性挙動に違いがあり、これらを考慮した解析を行うには、力学モデルの検討が必要であるといえる。

謝辞

本研究の遂行にあたり、段ボール関連資材を提供して頂いた協和ダンボール(株)の代表取締役 高木良直氏、取締役技術製造部長 土方正和氏並びに関係者の方々、また各種試験を行う際、試験機器の借用及び助言を頂いた岐阜県製品技術研究所美濃分室の方々に深く感謝の意を表します。

文献

[1] Gudes, J. M., Kikuchi, N., "Preprocessing and postprocessing for materials based on the homogenization method with adaptive finite element methods", Comput. Methods Appl. Mech. Eng., pp.143-198, 1990.  
 [2] 川島ら, "均質化法を用いた段ボール緩衝材の解析", 茨城講演会講演論文集, pp.241-242, 2001.  
 [3] (株)日本総合研究所, "LS-DYNA Version950 使用の手引き", pp5.84-5.85,2000.

# 陶磁器製品の新プロセッシングの開発

高山 定次\* 尾畑 成造\*

## Development of Renewed Ceramics Process

Sadatsugu TAKAYAMA\* Seizo OBATA\*

あらまし 近年、コンピュータはその普及の拡大によって低価格化し、利用しやすい環境となってきた。さらに、コンピュータの高速化とメモリの増大によって、フルカラー画像データなどの数MBのデータ処理も可能になり、以前であれば高価なコンピュータを使用しなければ不可能だった処理が低価格のコンピュータで処理できるようになってきた。このようにコンピュータを利用しやすい状況下になってきている。そこで、タイルの製造工程の中で、特に自動化が進んでおらず手作業に頼っている検査工程の省力化を目的に、この検査工程に導入可能な検査手法を検討した。従来の計測機器は狭い領域での計測が主流であるが、短時間で計測可能な2次元計測が要求される。そこで、新たな2次元計測手法を提案し、その有効性を検討する。

キーワード タイル, 検査システム

### 1. はじめに

タイルの製造工程は、プレス成形、施釉、焼成、検査、シャッフル、及びタイルの整列・紙貼りの各行程を経て製造されている。これらの製造工程の中で、成型行程から焼成行程については、自動化が進んでいる。しかし、検査工程以降については、人手に頼っているのが現状であり、自動化が望まれている。

そこで、これまで目視検査工程での省力化、自動化を試みるためにいろいろな取り組みがなされてきた。盛田ら<sup>[1,2]</sup>は、CCDカメラを用いて画像取得及び処理を行うことでタイルの色彩分類、形状および欠陥検出を報告している。しかし、色彩に関しては大きな違いがある場合にしか検出できず、十分な検査手法が提案されているとは言い難い。

これまでに検査の難しい色彩検査について市販の測定機器がどの程度適用可能か検討した結果、タイルの色彩検査で良品、不良品の判定は可能であった。しかし、この測定機器での測定領域は、タイルの一部に限られており、タイル全体での評価は困難であった。<sup>[3]</sup>

そこで昨年度では、色濃度の管理には、取得データのみでの判定が困難なことから、正確な識別手法を加味した検査工程で満足する検査手法の開発を試みた。その結果、色彩と彩度が原料組成と酸化鉄含有量の変化量に伴って変化し、焼成温度については吸水率の変化を加味した明度と彩度に依存性があることを突き止めた。<sup>[4]</sup>

今年度は、実際の検査工程に導入する際、求められるのは、高速で2次元での検査が可能であり安価なシステムであると考え、そのような条件を満たす新たな2次元計測可能な検査手法を提案する。その提案する検査手法の有効性を評価するために、分光測色計による分光データと比較し検討した。今回提案する検査手法は、狭帯域バンドパスフィルタを応用し、デジタルカメラと組み合わせた従来の分光計測に変わる2次元計測可能な計測手法である。

### 2. 実験方法

図1に今回実験に用いた測定装置の概念図を示す。市販のデジタルカメラ(CANON Power Shot S20)の前に偏光フィルタや狭帯域バンドパスフィルタを配置した。それら各種フィルタを通してデジタルカメラで撮影した画

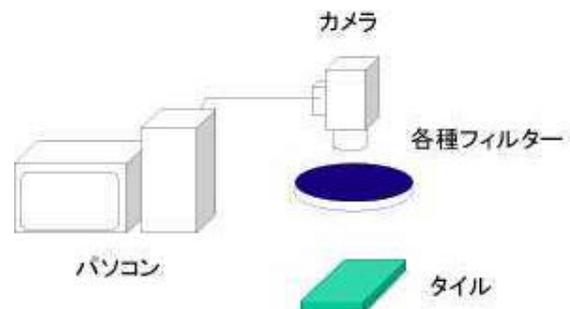


図1 測定装置概念図

\* 兼セラミックス技術研究所

像データをパソコンに取り込んで、タイルの検査を行った。色彩の検査手法として、各特定波長しか透過しない狭帯域バンドパスフィルタを用いることにより、その特定波長の2次元分光データを測定した。その結果を分光測色計(MINORUTA CM-3600d)を用いて測定した結果と比較検討した。

### 2. 1 偏光フィルタの特性

今回実験には、偏光膜を2枚のガラスで両側から挟み、サンドイッチ構造にした偏光フィルタを用いた。400~700nmの可視光域用で、フィルタ1枚の透過率は、約30%である。

また、2枚の偏光フィルタを透過軸の向きが互いに直交するように重ねた時の直交位透過率特性は、400~700nmの可視光域で平均0.15%の透過率に抑えられている。

### 2. 2 狭帯域バンドパスフィルタの特性

バンドパスフィルタは、ガラス基板上に多数の誘電体膜を繰り返し蒸着して製造されている。各膜の厚さは数百ナノメートルオーダーで、蒸着後、湿気等から膜を保護するためにプレートガラスでカバーされている。バンドパスフィルタに光が入射すると、多層膜間で光が反射や透過を繰り返し、最終的には特定の波長のみが透過され、残りの波長は干渉し打ち消し合って消滅するように設計されている。

今回用いた狭帯域バンドパスフィルタの透過率特性を図1に示す。使用した狭帯域バンドパスフィルタは、表1に示すように半値幅が10nmである。この値は、分光測色計の波長分解能には及ばないものの、2次元の広い領域の検査が一回の計測で可能になるので、従来法よりも有効な手法だと考えられる。この手法を実際のタイルの検査工程に導入する際には、検査基準となるタイルを従来の分光測色計で測定し、その測定結果において測定値の差が大きい波長を選択し、検査工程で用いる狭帯域バンドパスフィルタの波長を選択することが望ましい。

この狭帯域バンドパスフィルタは、平行光で0°入射時に図2に示すような所定の透過率特性が得られるよう

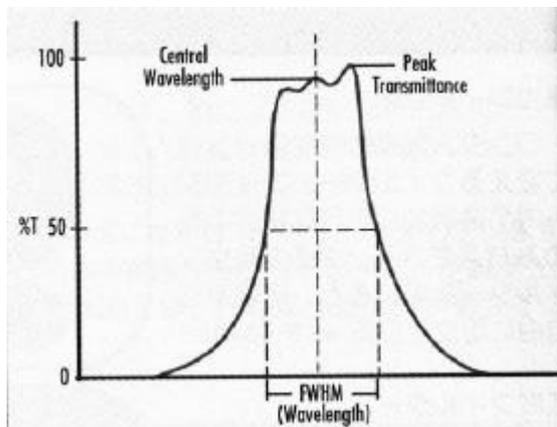


図2 狭帯域バンドパスフィルタの透過率特性

に設計されている。角度を持った光が入射した場合や、集束光や発散光の入射時には誘電体膜の特性として、透過率特性は全体的に短波長側にシフトする。

表1 今回用いた狭帯域バンドパスフィルタ一覧

中心波長(nm)	半値幅(nm)	透過率(%)
450	10	45
550	10	45

### 2. 3 画像データの評価方法

各狭帯域バンドパスフィルタを通してデジタルカメラによって測定された画像データをAdobe Photoshop5.0のヒストグラムの機能を用いて解析した。この測定においては、透過光の強度を測定するので、モノクロカメラで十分である。しかし今回の測定に用いたデジタルカメラは、カラーカメラを使用したので、Adobe Photosop5.0によってモノクロ画像に変換した後、解析を行った。

ヒストグラムとは、画像内の明るさのレベルのピクセル数をグラフに表したものである。ヒストグラムのx軸は、左端が最も暗い値(0)を示し、右端が最も明るい値(255)を示す。また、y軸は画像データのピクセル数を示している。

この狭帯域バンドパスフィルタを用いて測定を行った場合、その用いた狭帯域バンドパスフィルタ種類によって決まる特定波長しか光を透過しないので、測定された画像データは、タイル面での反射光の内その特定波長の反射光の強度を示している。この画像データをヒストグラムで解析すると、y軸がピーク値を示した時のx軸の値が、その狭帯域バンドパスフィルタを透過した光の輝度を示している。ヒストグラムの輝度がその特定波長での透過光の強度を示す。そこで、その平均輝度の値と分光測色計によって測定された反射率測定データとの比較を行い、その有効性を検討する。

## 3. 実験結果

### 3. 1 450nm狭帯域バンドパスフィルタの結果

図3に中心波長450nmの狭帯域バンドパスフィルタを用いて測定した画像を示す。この図の中の実線は、解析した領域の範囲を示している。なお、できるだけ蛍光灯などの影響を除去するために、自然光で撮影した。また、撮影ごとの感度などバラツキを考え、3枚の測定サンプル

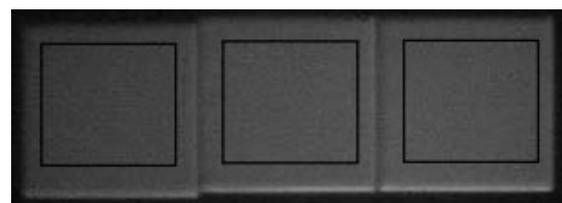


図3 中心波長450nm狭帯域バンドパスフィルタの画像

ルは同時に撮影した。

この画像データをAdobe Photoshop5.0 のヒストグラムの機能を用いて解析した結果を図4～図6に示す。

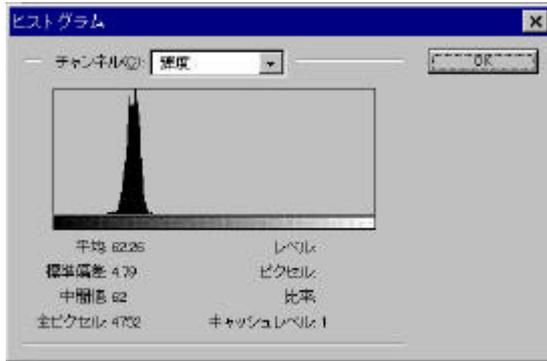


図4 Sample 1の中心波長450nmの時のヒストグラム

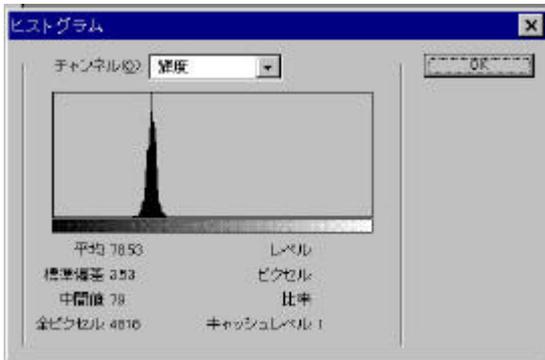


図5 Sample 2の中心波長450nmの時のヒストグラム

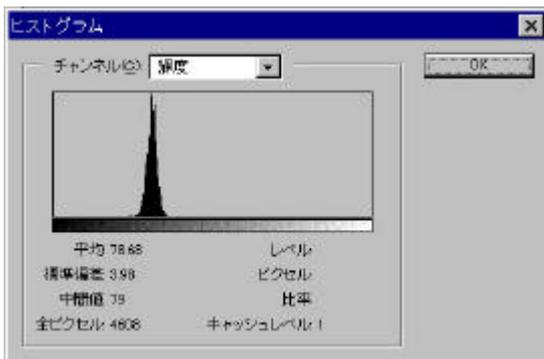
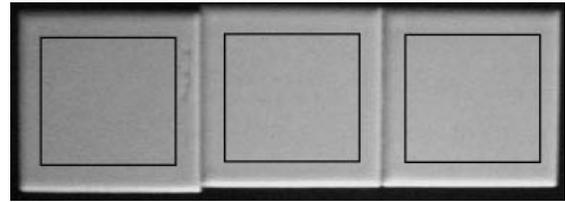


図6 Sample 3の中心波長450nmの時のヒストグラム

### 3. 2 550nm狭帯域バンドパスフィルタの結果

図7に中心波長550nmの狭帯域バンドパスフィルタを用いて測定した画像を示す。この図の中の実線は、解析した領域の範囲を示している。

この画像データをAdobe Photoshop5.0 のヒストグラムの機能を用いて解析した結果を図8～図10に示す。



Sample 1                      Sample 2                      Sample 3

図7 中心波長550nm狭帯域バンドパスフィルタの画像

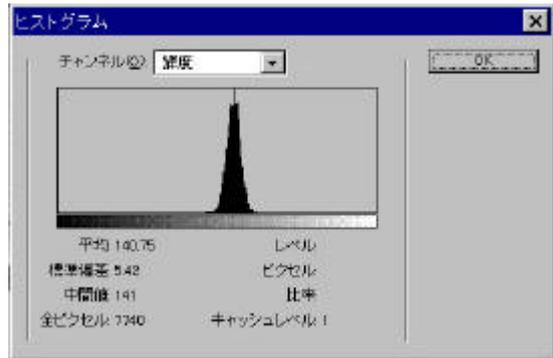


図8 Sample 1の中心波長550nmの時のヒストグラム

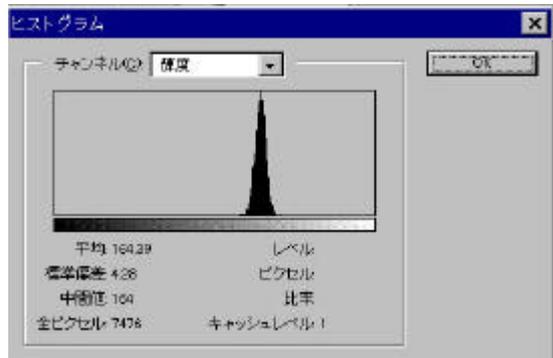


図9 Sample 2の中心波長550nmの時のヒストグラム



図10 Sample 3の中心波長550nmの時のヒストグラム

#### 4. 考察およびまとめ

これらヒストグラムの分布は、輝度の平均値が特定波長における透過光の強度を示し、分布の横の広がりには測定領域内の色むらを示す。今回の測定結果では、サンプル1が、他のサンプルよりもやや広がっているのに、色むらが他のサンプルよりは大きいことが分かる。

図11に狭帯域バンドパスフィルタを用いて測定した結果と分光測色計による分光データを比較した結果を示す。実線、破線、点線で示された曲線は、分光測色計によって測定した反射率のデータを示し、丸、四角、ばつで示された点は、今回の測定によって得られた結果である。また、左軸は分光測色計の反射率を示し、右軸は今回の測定によって得られたヒストグラムの結果を示している。

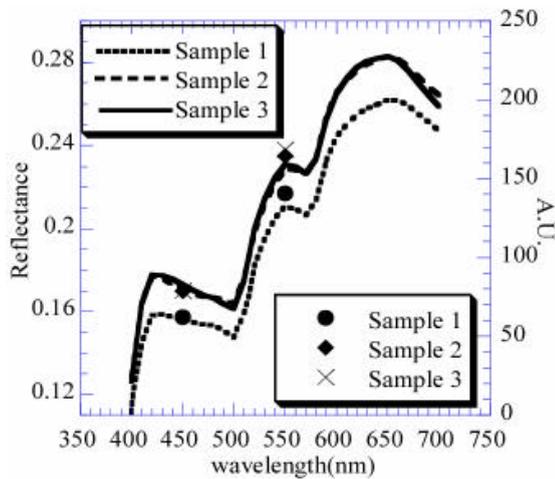


図11 分光データの比較

この結果から、各波長とも3つのサンプルはどちらの測定法においても同様な傾向を示している。このことから、今回提案した測定手法は、それまで分光測定が、分光測色計によって狭い領域での測定に限られていたが、今回提案した測定手法は広い領域での2次元測定を可能にした。

分光測色計による測定は、一回の測定では狭い領域しか検査できないので、タイルの抜き取り検査においては、活用できるものの、生産ライン上での検査には不向きである。今回提案した測定手法は、狭帯域バンドパスフィルタをカメラの前に設置するだけで広い範囲での2次元検査が可能である点から、タイルの検査において、有効な手法になりうると考えられる。

もう一点、偏光フィルタに付いては、実験結果でふれなかったが、生産ラインで検査を行う際、蛍光灯などの散乱光の影響を受けやすいので、そのような散乱光の除去に有効であった。

#### 文献

- [1] 盛田耕作, 水野金義, 松生秀正, “機械部品の検査工程の自動化”, 愛知県工業技術センター報告, pp.101-107, 1984.
- [2] 盛田耕作, 松生秀正, 水野金義, “目視検査の自動化 タイルの色彩分類と欠陥検出”, 愛知県工業技術センター報告, pp.101-106, 1985.
- [3] 高山定次, 尾畑成造, “陶磁器製品の新しいプロセッシングの開発”, 岐阜県生産情報技術研究所報告 pp.73-74, 2000.
- [4] 尾畑成造, 水野正敏, 高山定次, 棚橋英樹, “タイルの色彩評価に関する研究”, 岐阜県生産情報技術研究所報告, pp.45-48, 2001.

# 衣服の実需対応型生産システムの確立

山下 典男\* 小川 廣茂\*\* 奥村 和之\*\*

## Research of new apparel manufacturing systems applied information technology

Norio YAMASHITA\* Hiroshige OGAWA\*\* Kazuyuki OKUMURA\*\*

あらまし ITを活用した個人対応型アパレル生産システムの要素技術として 仮想個人ボディ作成技術：デジタルカメラによる撮影により、個人ボディデータを作成し、パターンへの展開、仮想試着を可能とする技術、パーソナルニット作成技術：横編機でインクジェットにより編糸を着色しながらニット生地を作成する技術进行研究。では複数の2次元画像から3次元データを生成する方法について検討し、デジタルカメラで全方位より撮影された複数のアパレルダミー画像より3次元座標計算結果とサーフェイス表示結果を得た。横編機の左外部に設置したインクジェットノズルにより、キャリッジ移動量に同調して編糸の着色を制御することによって、おおむね±1編目のズレの範囲で50編目幅の縦線を着柄できることを確認した。

キーワード IT, 個人対応, アパレル, ボディ, 3次元データ, ニット, 横編機, インクジェット, 色柄

### 1. はじめに

#### 1.1 背景

海外製品との競合, 慢性化した不況, 国内消費の低迷など繊維産業を取り巻く状況は依然として厳しい。一方顧客の製品に対する要求も高くなってきており, 既製服においても, 着心地, サイズなど顧客個人への対応が望まれてきている。このような状況の中で, 高い技術力を持ちながら低迷している地域の繊維産業を再生させるためには, 今までの「ものづくり」を見直し, ITを活用し顧客満足度の高い製品を低コストで供給するシステムを確立することによって, 海外製品との差別化を図っていくことが必要である。

#### 1.2 研究目的

ITを活用した個人対応型アパレル生産システムを確立し, 中部地域のアパレル産業の再生を図る。

#### 1.3 研究期間

平成13年～15年度

#### 1.4 事業化構想

事業化構想を図1に示す。アパレルはファッション企画を行い小売店で企画情報, サンプル提供を行う。

顧客は小売店で体型をデジタルカメラにより採寸し, ICカードとして持つことができる。顧客は小売店で自分の好みの衣服を選び, 生地, 副資材などの仕様とともにIC

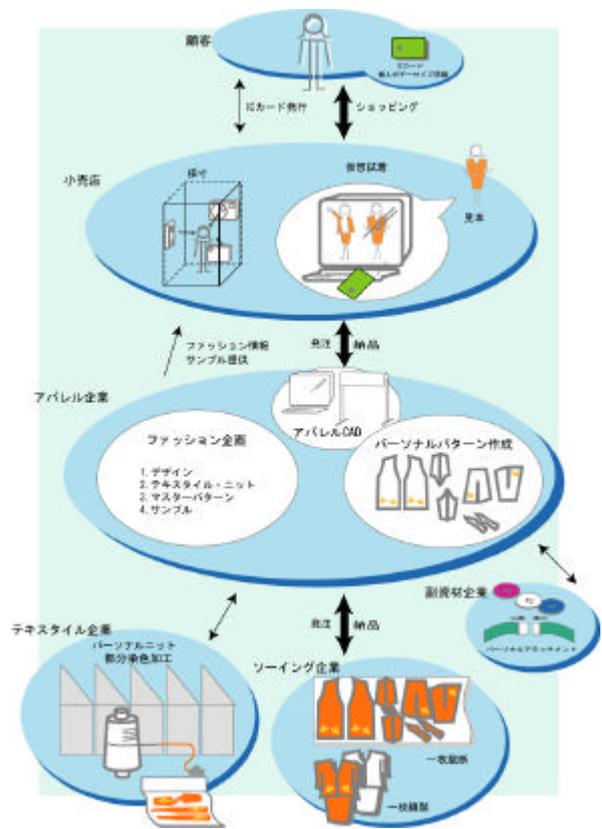


図1 事業化構想

\* 製品技術研究所  
\*\* 兼製品技術研究所

カードデータを基に発注する。その際コンピュータ上で仮想試着することも可能である。

発注を受けたアパレルはICカードデータを基にマスターパターンを変更し個人対応のパターンとし、縫製企業が一枚裁断、一枚縫製を行い、製品となる。

テキスタイル、副資材等に特徴を持たせる場合は、それぞれに個人対応の加工を行う。

1.5 研究内容

上記システムの要素技術として以下4テーマについて研究を行う。

仮想個人ボディ作成技術開発：デジタルカメラによる撮影により、個人ボディデータを作成し、パターンへの展開、仮想試着を可能とする技術を開発する。

パーソナルニット作成技術開発：横編機でインクジェットにより編糸を着色しながらニット生地を作成する技術を開発する。

パーソナルテキスタイル作成技術開発：光化学反応による表面改質技術、植毛技術等により生地を部分的に改質等を行い、機能等を付与する技術を開発する。

パーソナルアタッチメント作成技術開発：衣服の新しい副資材開発

以上の要素技術開発については、今までの製品研における技術蓄積だけでなく産総研、大学等のシーズを積極的に活用するとともに、事業化については県内関連企業、アパレルCADメーカーと協力を得ながら実施する予定である。

次章に、仮想個人ボディ作成技術開発、パーソナルニット作成技術開発の2テーマについて報告する。

2. 仮想個人ボディ作成技術開発

2.1 人体形状モデル

衣服設計においては、平面上に表示された人体形状を概観しただけではその特徴を十分に把握することはできない。また、衣服を着用する場合においては、日本人の体格・体型の変化に伴い既製（標準）サイズに対する消費者の不満や混乱は増大しており、顧客の体型に合ったものが求められている。人体形状モデルは、衣服デザインとりわけ型紙作成のためのデータとして利用することを目的とするため、細かい凹凸までを表す精度は不要であると言える。従って、胸部、腹部、腰部の特徴点を把握して、身長、背丈等の高さ寸法、バストライン、ウエストライン、ヒップライン等の胴回り寸法を採寸できることが基本となる。

2.2 3次元計測技術

現在3次元計測には、接触型デジタイザやレーザなどの特殊光を照射する3次元スキャナが実用化されている。後者の方法は、レーザスリット光で被写体をスキャンして三角測量法で座標値を算出するレンジファインダと呼ばれる技術である。装置は、「多眼正弦波格子位相シフト法」と呼ばれるパターン光投射による3次元形状計測を発展

させたもので、正弦波状に濃淡が変化するパターン光を投射し、対象の3次元形状を計算することができる[1]。しかし、これらの装置は、大規模で高価なシステム構成となるため、簡単に利用することは難しい。

そこで、対象物の全周囲を撮影した複数の二次元画像から三次元形状を復元する方法について検討する[2]。

2.3 研究方法

2.3.1 エッジの抽出

撮影された物体画像から、物体と背景を分離し、物体のシルエット輪郭を求める。クロマキー法を利用して背景色を取り除く[2]。またエッジ抽出には、画素における8近傍で、Roberts Filter（図2）という1次微分（Gradient）を用いてエッジ強調を行った。これは、一般にGradientの近似としてよく用いられる演算である[3]。

0	0	0	0	0	0
0	1	0	0	0	1
0	0	-1	0	-1	0
fx			fy		

図2 Roberts Filter

2.3.2 3次元位置の算出

ここでは、2台のカメラ（ステレオ法）を用いて3次元形状を入力する手法について述べる[4]。

空間中のある一点P(X,Y,Z)をカメラの仮想結像面へ投影した点P'(Xc,Yc,Zc)は、式(1)のように与えられる。

$$\begin{cases} X_c = \frac{f}{f+Z} X \\ Y_c = \frac{f}{f+Z} Y \\ Z_c = 0 \end{cases} \dots\dots (1)$$

ここで、fはレンズの焦点距離である。

カメラ座標系で結像面(Zc=0)における座標(Xc,Yc)は、式(2)になる。

$$\begin{bmatrix} H_c X_c \\ H_c Y_c \\ H_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \dots\dots (2)$$

ここで、Hc=(Z+f)/fである。

C11からC34はカメラパラメータであり、カメラの位置、姿勢、画角などの情報が含まれている。

$$Y_c = \frac{C_{21}X + C_{22}Y + C_{23}Z + C_{24}}{C_{31}X + C_{32}Y + C_{33}Z + C_{34}} \dots\dots (4)$$

$$X_c = \frac{C_{11}X + C_{12}Y + C_{13}Z + C_{14}}{C_{31}X + C_{32}Y + C_{33}Z + C_{34}} \dots\dots (4)$$

式(3)(4)に 物体座標系で基準となる点(X,Y,Z)とそれに対応するカメラ結像面での位置(Xc,Yc)による連立方程

式を作る． $C_{11}$  から  $C_{34}$  を求めるには，同一平面上にない16個の基準点が必要になる．

マーキングされた物体上の3D座標値を求めるには，左右のカメラを使って検出した対応点  $(X_{cn}, Y_{cn})$  と24個のカメラパラメータ  $(C_{n11}, \dots, C_{n34})$  ，  $(n=1, 2)$  を式(5)，(6)に代入し，連立させて解くことにより3D位置  $P(X, Y, Z)$  を求めることができる．

$$X_{cn} = \frac{C_{n11}X + C_{n12}Y + C_{n13}Z + C_{n14}}{C_{n31}X + C_{n32}Y + C_{n33}Z + C_{n34}} \quad \dots(5)$$

$$Y_{cn} = \frac{C_{n21}X + C_{n22}Y + C_{n23}Z + C_{n24}}{C_{n31}X + C_{n32}Y + C_{n33}Z + C_{n34}} \quad \dots(6)$$

ただし， $n=1, 2$  とする．

一方，シルエット輪郭および物体とカメラとの角度の情報を全方位取り込むことにより，3次元形状を求めることができる．

図3に示すように，各断面において最大幅をシルエット輪郭として検出する． $X$ 軸上の  $x_1, x_2$  に垂線を引く，回転して  $x_3, x_4$  ( $x'_3=x_3, x'_4=x_4$ ) に垂線を引く， $180^\circ$  まで繰り返しそれぞれの垂線をつなぎ合わせるにより断面形状が得られる．

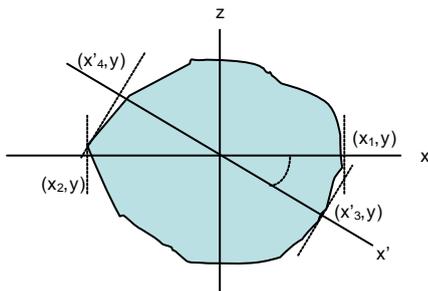


図3 断面におけるシルエット輪郭からの3D復元

## 2. 4 結果

実験には，アパレルダミーを用いた．

ブルーバックにして，デジタルカメラで撮影し，背景画像を取り除いて物体画像のみを取り出す（図4）．

次に，エッジ検出により，シルエット領域を抽出する．

この作業を全周囲に渡って繰り返す．このときカメラと物体との角度を測定しておく（図5）．

撮影条件: 回転範囲  $180^\circ$  ，角度変化量  $5^\circ$  ，撮影枚数37枚

図6には，3次元座標計算結果を示す．

図7に，サーフェス表示結果を示す．

## 2. 5 まとめ

本研究では，複数の2次元画像から3次元データを生成する方法について検討した．

基本的には，カメラと被写体の位置，角度から三角測量法により長さを求めるのであるが，実験においては，これらカメラパラメータ及び基準寸法は既知として行った．各画像のシルエットラインから，3次元形状を計算する方法である．正面からの撮影では，肩の部分をつま

ることができないので，上からの画像も必要となる．実際の場合は，角度を自動検出できるターンテーブルのような装置が必要となるが，次の問題点も指摘される．

人工物のように固定しているものに対しては，良いが人間のように静止し続けることが難しい場合には，一度に複数個のカメラを用いて，全方位の画像をとらなければ，画像のずれや被写体への負担をなくすことはできない．また，くびれた部分では，シルエット輪郭の情報から計算することはできない．

さらに，腕によって隠される部分では，データが欠如してしまうので，それをどう補正するかが課題である．

実際の衣服設計にあいては，胴回りの特徴点(首回り，バストライン，ウエストライン，ヒップライン等の数値が出力されることが要求される．これについては，得られたボディデータから，断層図を描き出す処理が必要となる．型紙作成のためには，肩幅，脇下ライン，腕の長さ，手首回り，肘回り等の数値データが必要になり，これらを精度良く測定することが基本であり，さらにメジャーだけでは得られない詳細なデータを得ることを期待するものであり，これら課題について検討を加えたい．



図4 Photo data

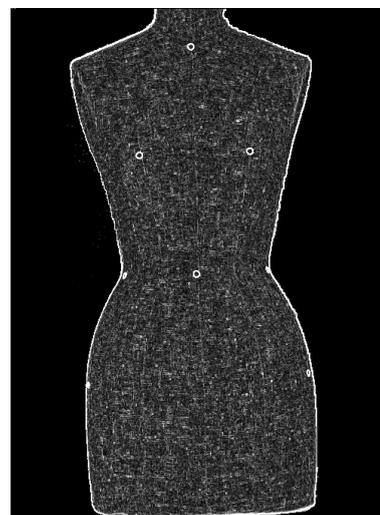


図5 edge

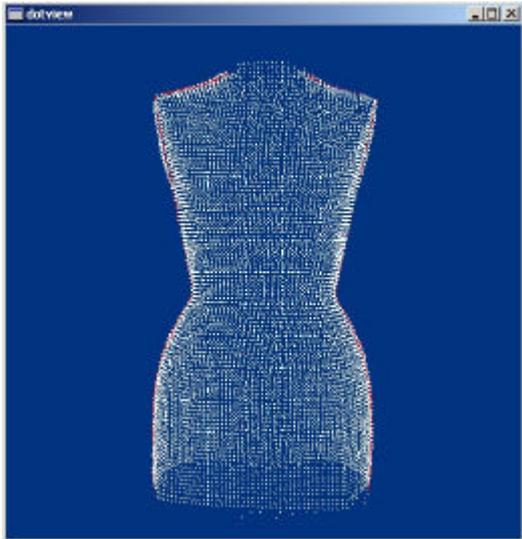


図6 3D point view



図7 3D surface

### 3. パーソナルニット作成技術開発

#### 3.1 パーソナルニット作成

ニットの色柄は色系の切り替え機構（ノッタ、インターシャ）や選針機構により表糸と裏糸を切り替えながら色系を複層に編むこと（ジャガード）により実現している。しかしいずれの手法も、色柄に応じた色系の発注と在庫管理が必要で、色系納入までのタイムラグが発生し、頻繁に色柄を変更する場合はその負担が大きくなる。また、前者の機構では縞柄等に限定され、後者の機構では複層編みが必須で色数も層数により限定される。

このような問題に対し我々は、新規の色柄編成技術として丸編機において編成直前に白糸を計画的に着色する着色編成技術を提案している[5,6]。ここでは、パーソナルニットの作成技術として、ニット製外衣の小ロット生産に適する横編機においての着色編成技術を検討する。

#### 3.2 ハードウェア

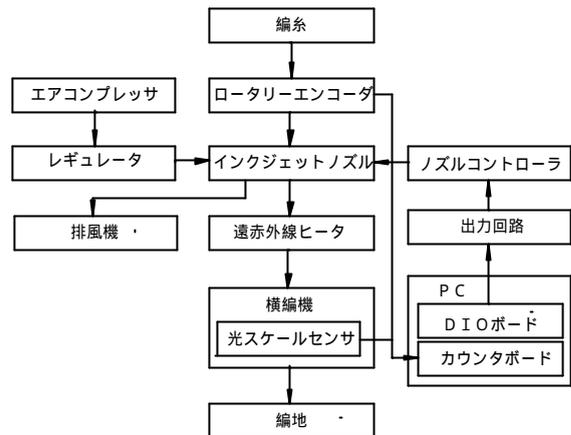


図8 ハードウェア

パーソナルニット作成のために構築したハードウェアのフローを図8示す。

ハードウェアは、横編機（ストールジャパン株，CMS320.6\_50,Gauge:E7,針数:349），横編機キャリッジ移動量計測センサ（株）キーエンス，光スケールセンサVP-90），給糸長計測センサ（オムロン株，ロータリーエンコーダE6A2-CWZ3C,分解能:200p/r），インクジェットノズル及びそのコントローラ（株）エルエーシー，エアスプレ方式，許容エア圧:0.4MPa以下，応答速度:100us，オープンコレクタ入力）エアコンプレッサ及びエアレギュレータ，インク吸引用排風機（1.1m<sup>3</sup>/分），遠赤外線ヒータ（有）サンライズ工業，ハイスピードヒータ，S-10R笠付，14mm,L:1000mm,200V 1.6kW），ヤーンガイド（湯浅糸道株，DOG TAIL GUID N8002001，NON-TORQUE ROLLER B008008），制御用PC（デルコンピュータ株，Precision WorkStatin530,intel Xeon1.7G\*2，RDRAM 1G），デジタル入出力ボード（株）インターフェース，PCI-2703），カウンタボード（株）コンテック，CNT24-4(PCI)，電源から構成される。

キャリッジ移動量は、キャリッジ上部に固定した光スケールセンサ、及び、横編機筐体に固定したスケールにより計測する。編糸の給糸量は、横編機の糸道レール左端に固定したロータリーエンコーダにより計測する。編機内部ガイド、ロータリーエンコーダより編機外部のドッグテールガイド、ローラーガイドを経由して編糸を延長し、延長された編糸に沿って、インクジェットノズルと遠赤外線ヒータを設置する。(図9)

#### 3.3 ソフトウェア

横編機の動作計測、インクジェットノズルの制御は、リアルタイム拡張したLinux[7-9]により行う。表1に開発環境、図10に処理フローを示す。

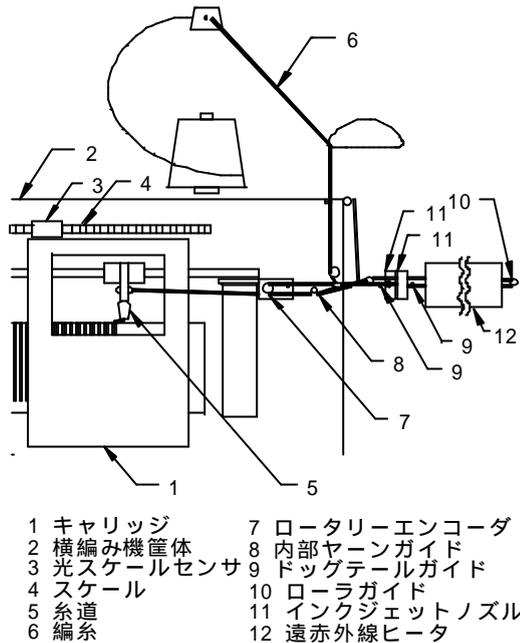


図9 センサ及び着色部の配置

表1 開発環境

カーネル	kernel 2.4.4(LASER5 Linux 7.1) RT-Linux 3.1
基本ライブラリ	glibc 2.1.3
Cコンパイラ	gcc 2.9.6
X Window	Xfree86 4.0.3 GNOME 1.2.4
GUI 開発ライブラリ	GTK+ 1.2.7
GUI 開発ツール	Glade 0.5.13

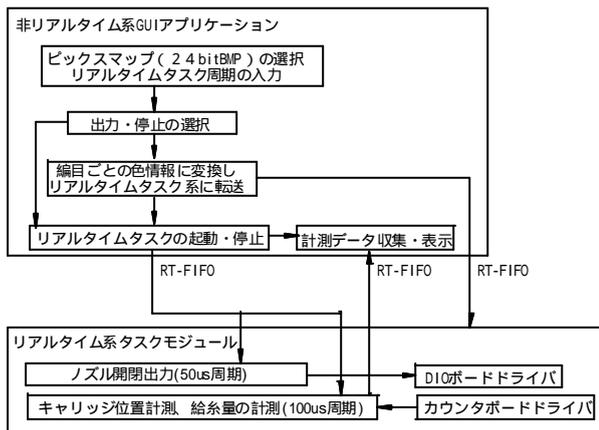


図10 処理フロー

### 3.4 着色編成実験

編成条件は以下のとおりとする。

- 組織：天竺（349ウェール×200コース）
- 糸素材：綿カード（番手：10/3）
- 糸道：左側1番のみ使用
- 編地のミミからの糸道待機距離(YD)：1ステップ

キャリッジの設定速度：0.25m/sまたは0.50m/s

カム：左カムのみ使用

度目自動調整機構(STIXX)：オンまたはオフ

染料：日本化薬㈱, KAYAFECT Black S Liquid

まず、キャリッジが50針幅移動するごとに、編糸に対して染料を噴射するプログラムを作成し、このときのキャリッジ移動量と給糸量の関係を計測、柄の目視評価を行う。

次に、キャリッジが編地の左ミミから右方向に移動するとき、左ミミを起点とした給糸量の計測値が、平均ループ長となるごとにノズルをオンオフする制御プログラム（計測給糸量に同調）と、キャリッジ移動量と平均ループ長より計算される給糸量が平均ループ長となるごとにノズルをオンオフする（キャリッジ移動量に同調）2つの着色制御プログラムを作成する。それぞれのプログラムにより50編目間隔の縦線柄を着色編成し、色柄の目視評価を行う。

### 3.5 結果及び考察

図11にキャリッジ移動量に対するキャリッジ速度と給糸量の関係を、図12に着柄編地を示す。

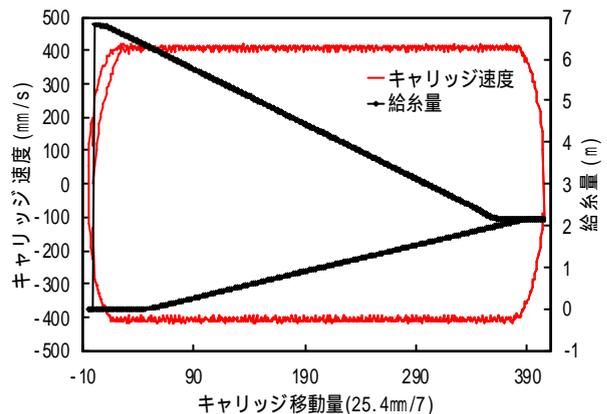


図11 キャリッジ移動量と給糸量・キャリッジ速度の関係  
(キャリッジ原点：右待機位置, 速度設定0.5m/s)

STIXXオンの条件では着色地点から編成位置までの糸により形成されるループ数のばらつきによる柄ズレが著しい(図12(a)(b))。STIXXは過去10コースのループ長の平均値をフィードバックし、編針を上下させるカムの駆動量を調整する。STIXXをオンにした状態では、トータルの糸消費量は所望の値になるかもしれないが、カムが駆動するたびにループ長が大きく変化し、柄ずれの原因となる。着色編成ではSTIXXをオフにしたほうがよい結果が得られる。

図12(c)(d)をみるとキャリッジ移動量に同調させる場合より計測給糸量に同調制御させた場合のほうが柄のばらつきが大きい。キャリッジ移動量に同調させて着色制御を行うことにより、おおむね±1編目のズレの範囲で50編目幅間隔の縦線を着柄することが可能である。±1編目の柄ズレは、おもに糸パッケージの解除テンショ

ンむらによる糸の伸縮に起因していると思われる、糸の解除テンションむらを緩和する糸送り装置を付加することで、さらに柄精度を向上できると考える。

しかしながら、文字柄を出力した場合(図12(e))では、編糸が水分を含んで伸びることによって、柄が横方向に大きくずれる現象がみられる。(ポリエステル糸では同様のズレは生じない。)糸にあらかじめ糊剤を含浸させておく(反応染料を使用する場合はアルカリ等を含んだ糊剤による前処理が必須)ことで、湿潤による糸の伸びを抑制するか、伸び量を補正しながら着色編成していくなどの対策を講じる必要がある。



(a) キャリッジが50針幅移動する毎に着色(STIXオン)



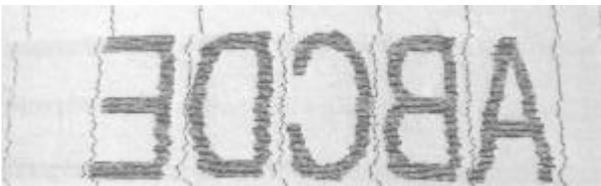
(b) キャリッジが50針幅移動する毎に着色(STIXオフ)



(c) 計測給糸量により制御(STIXオフ)



(d) キャリッジ移動量により制御(STIXオフ)



(e) キャリッジ移動量により制御(STIXオフ)

図12 着柄編地(キャリッジ速度0.25m/s)

### 3.6 まとめ

横編機のキャリッジが編地左ミミから右方向に移動するとき、キャリッジ移動量に同調して着色制御することにより、おおむね±1編目のズレの範囲で50編目幅の縦線を編地に着柄できることを確認した。

今後は、糸パッケージの解除テンションむら、湿潤による糸の伸びに起因する柄ズレの対策を講じるとともに、キャリッジが左方向に移動するときの着色についても検討する必要がある。

### 4. 参考文献

- [1] 産業技術総合研究所プレス発表資料, “「すはやく・くまなく・きれいに、からだの形を測ります」世界最速の人体形状計測装置の開発とデータ蓄積”, 2001.12.12
- [2] 松本幸則ほか, “三次元自動モデリングシステム: CyberModeler”, 計測自動制御研究会
- [3] 谷内田正彦編, コンピュータビジョン電子・情報・通信編, 丸善, pp62\_66, 1990
- [4] 中野幸一ほか, “仮想現実による伝統工芸品作成支援システムの開発”, 石川県工業試験場研究報告 Vol.47, pp31\_38, 1998
- [5] 奥村和之, 小河廣茂, “丸編動作と原糸のインクジェット染色を同調させた色柄編成技術”, 日本繊維機械学会第54回年次大会研究発表論文集, pp124\_125, 2002.
- [6] 奥村和之, 小河廣茂, “丸編みと同調させた糸のインクジェット染色技術の開発”, 岐阜県生産情報技術研究所研究報告第2号, pp49\_52, 2000.
- [7] FSMLabs homepage, <http://fsmlabs.com/community/>, (2002年3月1日現在).
- [8] 森友一朗ほか, RTLinuxリアルタイム処理プログラミングハンドブック, 秀和システム, 東京, pp12\_174, 2000.
- [9] 船木陸議, 羅正華, LINUXリアルタイム計測/制御開発ガイドブック, 秀和システム, pp112\_127, 1999.