

岐阜県生産情報技術研究所研究報告

第2号 平成12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. VR 技術を利用した設計支援システムの開発（第 2 報）	1
2. 没入型多面ディスプレイにおける衝突検出システムの開発	5
3. 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 2 報）	11
4. ファジィ理論を用いた自動装置の制御技術に関する研究	17
5. 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	21
6. 力覚提示機能を有する遠隔作業システムに関する研究	25
7. 立体紙製品の構造解析に関する研究	29
8. 遠隔操作システムにおける立体視に関する研究	35
9. ネットワークを利用した遠隔操作システムに関する研究	39
10. タイルの色彩評価に関する研究	45
11. 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（第 2 報）	49
12. 二重織物のデザインシミュレーションの研究（第 2 報）	53
13. バリアフリー住宅設計支援システムの開発（第 2 報）	57

VR 技術を利用した設計支援システムの開発（第 2 報）

藤井 勝敏 浅野 良直 棚橋 英樹

Development of a Design Supporting System based on Virtual Reality Technology

Katsutoshi Fujii Yoshinao Asano Hideki Tanahashi

あらまし 没入型 6 面ディスプレイ COSMOS を用いて、仮想的、直感的に建築設計を行うシステム、手法を提案する。COSMOS は、ユーザの全視野を立体映像で覆うことができる表示装置であり、目前に迫る位置に原寸大の仮想物体を表示できる。その仮想物体に向かって手を動かすことで、あたかも空中に絵を描くかのように形状の変更要求などを記入することができるユーザインターフェイスを開発した。また、COSMOS 内のユーザの様子を LAN 経由で接続した PC 等で客観的に観察する技術を開発した。そしてこれらの技術を用いて、原寸大の建築を試作・検討できる仮想建築設計システムを開発した。

キーワード COSMOS, バーチャルリアリティ (VR), CAD, 建築設計支援

1. まえがき

現在の製品設計において、CAD の利用が一般的になっているが、製品のデザインを検討する場合、初期段階では画面に表示されたものが紙面に印刷されたもの、あるいは後期ではモックアップが用いられている。紙面に印刷されたものは平面的であり、固定した角度以外から自由に見ることができないため、立体的な製品のイメージを得るには直感的とは言い難い。モックアップはその問題に対して有効な選択であるが、作成コストや時間を要する、修正やその指示が容易ではないなどの問題があるため、最終確認のためだけに利用、あるいは試作自体を

省略したいと考えられている。

画面に表示する場合、物体を見る方向はユーザが自由に操作できる上、立体視眼鏡などの特別な装置を併用すれば立体的に見ることができる。従来は高精細な映像を描写するのに 1 画面数秒以上の時間がかかっていたが、近年の CG 関連技術の進展により実時間で CG 映像を生成できるようになり、HMD や大型スクリーンなどの表示装置の開発と合わせてバーチャルリアリティ (VR) 技術として発達を続けている。

本研究では、これらの VR 技術によって製品設計を支援するための技術開発を目的とし、VR 表示装置の 1 種である没入型 6 面ディスプレイ “COSMOS” (図 1) [1] をプラットフォームとした設計支援システムの研究開発を進めている。設計する対象製品には、人間の全周囲に映像を提示できるという COSMOS 最大の特徴を生かすために原寸大の建築物を選んでいる。本年度は、前年[2] に比べてより巨大で複雑な建物を効率よく取り扱うことができるよう CAD 機能や建物データの構造を拡張した。また本年度に本研究所は新庁舎に移転したが、その事前に制作した仮想新庁舎の利用事例について報告する。

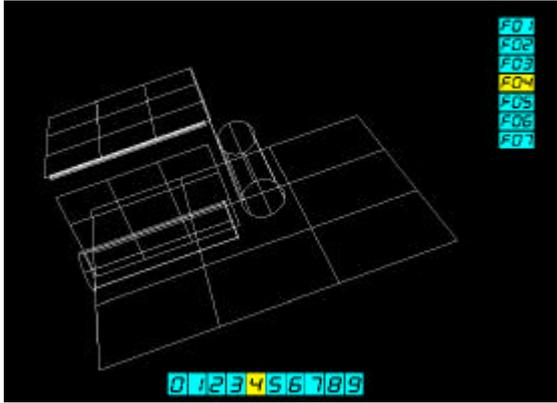
2. VR と設計支援

本節では、製品設計に VR を使うことの利点と、COSMOS の中で CAD を実現する上での課題について述べる。



図 1 没入型 6 面ディスプレイ COSMOS

Fig.1 Immersive 6-screens Display COSMOS



(a) Wireframe Display(1996)



(b) Realtime CG Animation

図2 VR映像技術の進歩

Fig.2 The progress of Graphical Technology for Virtual Reality

2.1. VR を利用した製品設計

VR とは、設計分野では主に CG による映像表現によって、コンピュータ内に構築された仮想的な現実（現物）を体験し得る技術である。この仮想現実にはコンピュータ内では数値表現されているため、修正・変更が容易であり、しかも実際の試作品と違って加工時にコストが発生しないなどの利点がある。初期の VR を利用した研究[3]では計算能力などの制約から図 2(a)のようなワイヤフレームが用いられてきたが、近年の急速な技術発達のおかげによって、図 2(b)のようにリアリティのある映像をリアルタイムで計算し、高精細に表示できるようになってきており、今後の製品設計において VR は欠かせないものになると期待できる。

2.2. VR と COSMOS

没入型 6 面ディスプレイ COSMOS は、この情勢を見据えて平成 10 年度に岐阜県科学技術振興センターによって設置された大規模な VR 表示装置である。この装置は、1 辺 3 メートルの立方体の各面にスクリーンを配置し、その内部にユーザが入ることで全方位を CG 映像で取り囲むことができる装置である。さらに、ユーザに磁気式の位置・角度センサを取りつけた立体視眼鏡(図 3)を装着させることにより、測定したユーザの視点から見

えるべき空間の CG 映像をリアルタイムに生成し、スクリーン上に投影する。これによって目前に迫る物体から遠方に広がる風景までを、まさに仮想現実世界に没入したかのように体験することが可能である。

2.3. COSMOS での CAD 機能

これまで COSMOS はこれらの特徴を生かして CAD で作成した製品形状データの原寸大表示や、町並み景観シミュレーションなどに利用してきたが、ユーザである製造業関係者の間からは形状を単に見るだけでなく修正を行うなどの CAD 機能を要求する声が上がってきている。筆者らはこれまで、VR 空間、特に COSMOS における CAD 機能開発に向けて仮想空間内での操作性や視知覚特性、データ交換可能性などを検討してきたが[2-7]、现阶段ではデスクトップ PC などに採用されているマウスやタブレットなどに比べて、COSMOS 内で利用可能な指示装置の操作精度が低く、PC 等の CAD ソフトと同等以上の実用性を達成するのは困難であると言わざるを得ない。

そこで筆者らは今回、図 4 のように従来の CAD で作成した製品形状を COSMOS で表示し、それに手書きで変更指示を加えて CAD にフィードバックする手法を開

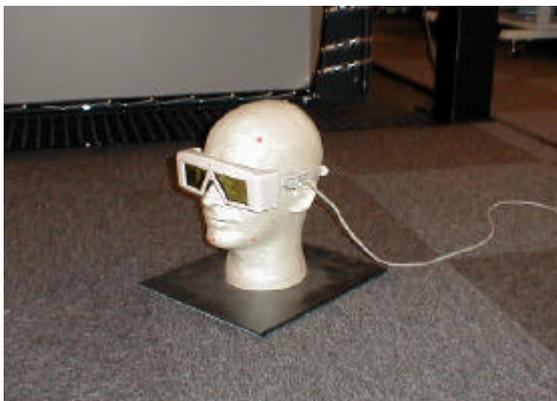


図3 COSMOS用立体視眼鏡

Fig.3 Stereoscopic Glass for COSMOS

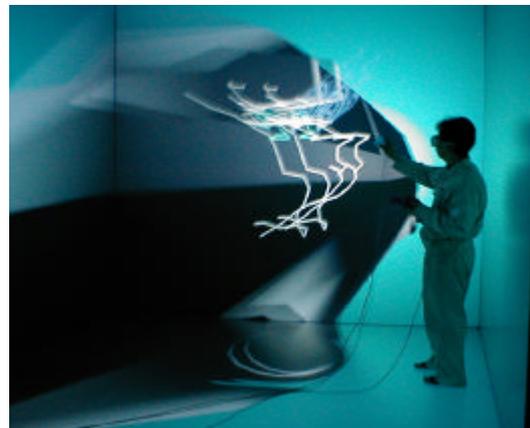


図4 COSMOSの手書き入力機能

Fig.4 Freehand Drawing Interface

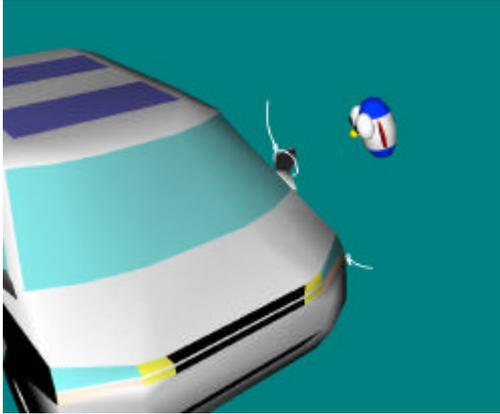


図5 COSMOS アプリケーションの客観視
Fig.5 Objective View of COSMOS's Applications

発した。手書き位置の検出には磁気式の位置センサを使っている。手の動きのデータは、その時の視線の動き情報とあわせて LAN 経由で PC 等に伝送し、図5のように客観的に表示することができる。また、このデータをファイルに保存しておき、後で再生することもできるので、ユーザが仮想空間のどのあたりを見て作業しているかを観察することができる。

この技術によって、利用者である設計者・デザイナーは、対象製品を VR で体感した時の印象をすぐに3次元空間に表し、記録として残せるので、CAD での修正の際に参考にしたたり、グループでのデザイン検討会などに利用できる。

3. 仮想建築設計システム

本研究では前年度に引き続き、建築設計支援を例にしたシステム開発を進めている。今年度は前年度のシステムより多くの部屋を持つ建物全体を設計でき、ドアが設置できるように拡張したほか、ウォークスルーの際に壁との接触判定を行うなどして、よりリアリティを高めている。

3.1. システムの構成

本システムは、デスクトップ PC の上でマウス、キーボードなどの一般的なユーザインターフェースを用いた編集システムと、COSMOS 内でウォークスルー体験をするための VR 表示システムの2つで構成している。

編集システムは PC で動作するプログラムで、対象を建築設計に特化した従来型の CAD ソフトウェアである。このソフトウェアを使用すると、床、壁、天井の3次元形状データに加えて、VR 表示システムに必要な表示負荷軽減のための情報と、ウォークスルーの際に移動を制限するための情報を含ませた建築形状データを作成することができる。

VR 表示システムは COSMOS で動作するプログラムで、建築データを原寸大表示し、専用コントローラを使って仮想的な建築の内部をウォークスルーできる。このとき

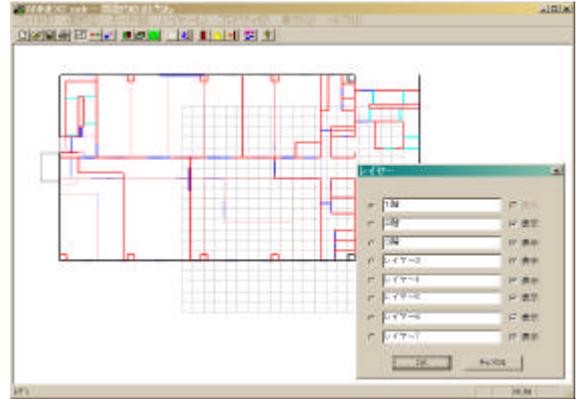


図6 図面入力画面

Fig.6 Screenshot of Building Editor

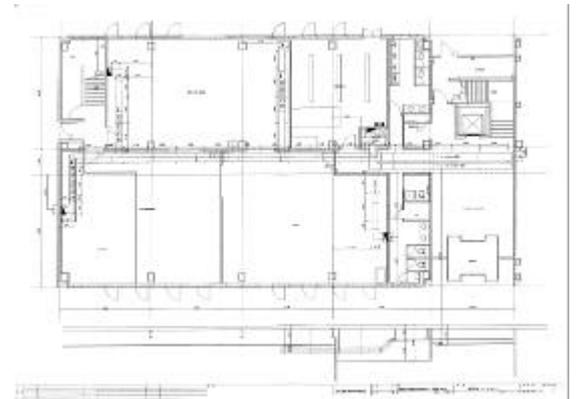


図7 建築平面図

Fig.7 Plan of the building



図8 表示システム

Fig.8 Building Viewer for COSMOS

のユーザの視線情報(位置と方向)は常に LAN を経由して他のコンピュータに伝送することができるため、ユーザが建物のどの部分に注目しているかなどを観察することもできる。

3.2. 編集システムの概要

図6に編集システムの画面を示す。このプログラムは一般的な PC で動作するため、主にマウスを使って作図する要領で建築データを入力できるが、図面などで数値がわかっている場合はキーボードからも入力できる。



図9 新庁舎エントランス付近の写真
Fig.9 Photo of the Entrance Hall



図10 図9と同じ場所のVR映像
Fig.10 VR image in the same place of Fig.9

一般的な建築図面の多くは、建物の階層ごとに部屋の配置関係を示した平面図(図7)で表現されているため、本システムではレイヤー属性を持った線分の集合を2次的に描くことから始める。次に、間取り線で仕切られた空間ごとに1つの部屋をあらわすノードを配置し、ドアなどの間仕切りを介して隣接する部屋ノード同士を接続する。あとは部屋ごとに、床、壁、天井などの描画要素や光源を配置し、接触判定の対象となる壁面や部屋の接続境界面を指示していくことで建物データを作ることができる。

3.3. 表示システムの概要

図8にCOSMOSで建物データを体験している様子を示す。ユーザは左手に持ったコントローラのジョイスティックで建物の中を移動する。ドアの付近でボタンを押せばドアが開き、その先の部屋に入ることができる。このとき描画する必要のある部屋は、現在自分が居る部屋とそれに隣接していてドアで遮蔽されていない部屋に限定することによって表示負荷の増加を抑えている。

壁や閉じているドアに対しては移動時に交差判定を行うことでむやみに通り抜けることを防いでいる。階段は斜面として定義されており、階段に向かって前進すると自動的に上下移動ができる。

また右手には位置センサーを持ち、図4と同様な方法で空間中に手書きで指示を記入することもできる。この機能を用いれば、建物内に何か問題点を発見した場合に直接印を付けることができるため、後でもう一度編集システムでその様子を確認することによって、適切なデータ修正のための参考にすることができる。

4. 利用事例

本研究所は今年度半ばに落成した新庁舎に転居したが、それに先行して仮想建築設計システム上でこの庁舎を構築した。図面データの入力に要した期間は約10日間であった。このデータをCOSMOSで表示することによって、入居前に部屋の構成や広さを仮想体験により確認することができ、部屋割りやレイアウトの検討などに利用した。図9は実際の建物のエントランス付近で、図10は同じ場所から見たVR画像である。

5. まとめ

没入型6面ディスプレイCOSMOSを用いて、建物を原寸大で仮想体験できる設計支援システムを開発した。位置センサを用いて空間中に手書きで記入できるプログラムを開発し、設計変更の指示などを直接仮想空間に記入できるようになった。また、その様子をLANを経由して他のPC等で客観的に観察する技術を開発した。これらの技術を用いることにより、仮想物体の不具合等を記録しておき、再検討の際やデザイナーミーティングに利用することが可能である。

今後は仮想空間内での対話的な操作を取り入れ、その場で設計変更を行えるようにする予定である。

謝辞 本研究の遂行に関して客員研究員として多くの貴重なご意見、ご提案をして頂いた中央大学加藤俊一教授に深く感謝いたします。また本システムのテストならびにデータ作成に協力して頂いた龍谷大学鈴木一哉君に感謝いたします。

文献

- [1]Yamada,Hirose,Iida,“Development of Complete Immersive Display: COSMOS”, Proc. of VSMM98, pp.522-527, 1998.
- [2]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報告, pp.11-16, 2000.
- [3]白井, 藤井, 丹羽, “3D形状モデラーの開発研究”, 岐阜県工業技術センター研究報告, pp.21-26, 1997.
- [4]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報告, pp.1-6, 2000.
- [5]藤井, 浅野, 棚橋, “没入型ディスプレイにおける空間知覚特性に関する考察”, ヒューマンインターフェイスシンポジウム'99, pp.207-210, 1999.
- [6]窪田, 浅野, 藤井, 山田, “没入型6面立体視システムにおけるユーザインタフェースの一検討”, 1999年映像情報メディア学会冬季大会, pp.37, 1999.
- [7]Fujii, Asano, Kubota, Tanahashi, “User Interface Device for Immersive 6-screens Display COSMOS”, Proc. of VSMM2000, pp.275-282, 2000

没入型多面ディスプレイにおける衝突検出システムの開発

浅野 良直 藤井 勝敏 廣瀬通孝* 広田光一*

Development of Collision Detection System for a Full Immersive Display

Yoshinao Asano Katsutoshi Fujii Michitaka Hirose* Koichi Hirota*

あらまし 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むため没入感が非常に高く, 車や飛行機などの 3D モデルを実物大で表示できる利点がある. 多くの企業は “3D モデルの実物大表示” のみを目的として COSMOS を利用している. そのような利用のなかで “モデルに触った感触が欲しい”, “モデル同士の干渉を検出して欲しい” という要望は常に言われてきた. そこで, 本研究では COSMOS のなかでモデル同士の干渉検出やユーザが直感的にモデルに触れて操作できるような衝突検出システムの開発を行った. 衝突検出の方法としてはモデルの形状を外接直方体で近似した方式とモデルを構成するポリゴンデータを利用する方式の 2 つを開発した. この 2 つの方式を組み合わせることで効率的に衝突検出を図ることが可能となった. また, ユーザへの提示方法として衝突したモデルを点滅させる方法と力覚デバイスを利用する方法について開発を行った. 力覚デバイスを利用することでモデルを直感的に操作することが可能となった. キーワード VR, IPT, COSMOS, 衝突検出, 力覚ディスプレイ

1. まえがき

COSMOS[1] (図 1) の特徴の 1 つに “実物大で 3D モデルを表示できる” という点が上げられる. この特徴は従来, 試作を製作するまで分からなかった問題点をデザイン, 設計段階で解消するだけでなく, 試作開発にかかる時間, 費用のコスト削減に大きく影響を与えることが可能となる. そのため, COSMOS を利用する企業の件数も増えているが, その多くは “3D モデルを実物大で表示” してプレゼンテーションを行う程度にとどまっている. そのようななかで従来から要望されていたのが “3D モデルに触って操作したい”, “モデル同士の干渉を検証したい” などである. そこで, 本研究では COSMOS で利用できる衝突検出システムの開発及び力覚ディスプレイの利用を試みることにした. 衝突検出の処理方法としては 3D モデルの形状を外接直方体 (以下 Bounding Box) で近似して行う方法と 3D モデルを構成するポリゴンデータを利用して行う方法の 2 種類について開発を行った [2]. 衝突を検出した場合の提示方法としては, 力覚デバイスを利用した触覚による提示技術を開発した. 力覚デバイスとしては HapticGEAR[3] (図 2) を利用することにした. HapticGEAR は糸の張力を利用してユーザに力覚を返すデバイスであり, ユーザが装着するため仮想空間内を自

由に歩くことができる. ユーザに触覚を与えることで直感的にモデルを操作することが可能になる. 衝突検出システムで表示するモデルは, 多くの 3D モデリングソフトウェアでサポートされている VRML2.0 フォーマット [4][5] を利用したコンバータの開発を行う事とした.



各スクリーンの寸法: 3m × 3m
CPU:16 Memory:4Gbyte HDD:100Gbyte
グラフィクスエンジン:6

図 1 没入型 6 面ディスプレイ COSMOS

Fig.1 Immersive 6-screen Display COSMOS

* 東京大学 先端科学技術研究センター, 東京都
The University of Tokyo RCAST 4-6-1 Komaba,
Meguro-ku, Tokyo, 153-8904 Japan

2. 衝突検出システムについて

2.1 VRML2.0 モデルコンバータ

衝突検出システムで使用する3DモデルとしてVRML2.0フォーマットを利用したモデルコンバータの開発を行った。VRML2.0フォーマットを選択した理由としては以下の点が上げられる。

- ・ 市販されている多くの3Dモデリングソフトウェアから出力できるため、様々なソフトウェアでモデリングを行うことができる。
- ・ データ構造が容易であり、データ構造に関する書籍も多く市販されているため、ジオメトリデータの作成や衝突検出で必要となるデータなどを容易に抽出することができる。
- ・ マテリアルやテクスチャなどが利用できるため、ソフトウェアで作成したモデルに近い状態をCOSMOSで表示することが可能である。
- ・ VRML1.0と異なりモデルの動作やサウンドなどの機能があるため、COSMOSのなかで動きのあるモデルを表示できる可能性がある。

VRML2.0モデルコンバータは、VRML2.0のモデルデータをIRIS Performerライブラリのジオメトリデータで扱えるようにデータを並べ替えた中間ファイルを作成して、COSMOSでの表示を行っている。中間ファイルにはモデルの構成データ（位置座標、構成データ、マテリアルデータ、テクスチャデータ等）以外に、衝突検出で必要とされる以下のようなデータが記載されている。

- ・ 外接直方体を作成するためのモデルの最小/最大値
- ・ ポリゴン毎に衝突検出を行うためのポリゴン数
- ・ 複数のモデルが存在した場合のTree構造

本研究で使ったVRML2.0のモデルデータとしてはPolyTrans（Okino Computer Graphics製）から出力したデータを使用した。

2.2 力覚デバイス

力覚デバイスとして使ったHapticGEARは、糸の張力を利用した力覚デバイスである。糸の張力を利用した力覚デバイスとしてはSPIDER[6]があるが、これは机上に固定するタイプであるためCOSMOSのようにユーザが動きながら作業が行えるシステム環境には不向きといえる。そのため、ポータブル型の力覚ディスプレイとして考えられたHapticGEARが適していると考えられる。

HapticGEARの4本の糸はユーザが持つペン先に取り付けられている。このペンを動かすと各糸に取り付けられたプーリーが回転し、ロータリーエンコーダが回転を検出する。検出された回転から各糸の長さを求めてペン先の3次元座標が算出される。但し、この座標はHapticGEARの座標系であるため、実際は図2(b)に示すように3次元磁気式位置センサ(Polhemus)を取り付けてCOSMOS内で

のHapticGEARの位置を検出し処理を行ってペン先の3次元座標を算出している。3次元磁気式位置センサは磁場のひずみに影響を受けやすい欠点がある。また、磁気発生源からの距離が近いほど検出の誤差が少なくなる。そこでプーリーに取り付けられているDCモータの磁場の影響を避け、また、COSMOSの磁気発生源は上方にあるため、図2(b)のような場所に取り付けられている。



(a) Back



(b) Left

図2 HapticGERAの全景
Fig.2 Photos of HapticGEAR

表 1 衝突検出で対象とした要素
Table 1 Collision detection object element

	操作モデル	近接モデル
点 × 点	原点	Bounding Box の頂点座標
	Bounding Box の頂点座標	Bounding Box の頂点座標
	原点	ポリゴンの頂点座標
	Bounding Box の頂点座標	ポリゴンの頂点座標
	ポリゴンの頂点座標	ポリゴンの頂点座標
点 × 平面	原点	Bounding Box の構成面
	Bounding Box の頂点座標	Bounding Box の構成面
	原点	モデルの構成面 (ポリゴン)
	Bounding Box の頂点座標	モデルの構成面 (ポリゴン)
	ポリゴンの頂点座標	モデルの構成面 (ポリゴン)

2.3 衝突検出方法

衝突検出では表 1 に示すような，ユーザが操作するモデルと近接するモデルの各対象要素の距離等を算出して衝突の検出を行った．但し，衝突を検出する対象要素間の衝突検出距離 l_{col} はユーザが入力できるようにした．

2.3.1 衝突の検出

点 $a(x_a, y_a, z_a)$ と点 $b(x_b, y_b, z_b)$ の衝突検出では，式(1)から 2 点間の距離 l_{pp} を算出して検出を行った．

$$l_{pp} = \sqrt{(x_a - x_b)^2 + (y_a - y_b)^2 + (z_a - z_b)^2} \quad (1)$$

点 (x_0, y_0, z_0) と平面 $(ax + by + cz + d = 0)$ の衝突検出では，平面を構成する頂点座標の 3 点 (x_a, y_a, z_a) ， (x_b, y_b, z_b) ， (x_c, y_c, z_c) から平面の傾き (a, b, c) を算出(式(2))して距離 l_{pf} を求めた(式(3))．但し，Bounding Box やポリゴンは無限平面ではないため，式(4)または式(5)より平面上の衝突座標 $P_{col}(x, y, z)$ を算出し，衝突座標 P_{col} が Bounding Box の構成面またはポリゴンの範囲内であることを条件とした．式(4)は点が平面の法線方向に対して正の位置にある場合に利用し，式(5)は負の位置にある場合に利用する．また，式(2)で求められた平面の傾きは法線ベクトルであるため，力覚デバイスを使用する場合の力覚の方向として利用できる．

$$Na = y_a(z_b - z_c) + y_b(z_c - z_a) + y_c(z_a - z_b)$$

$$Nb = z_a(x_b - x_c) + z_b(x_c - x_a) + z_c(x_a - x_b)$$

$$Nc = x_a(y_b - y_c) + x_b(y_c - y_a) + x_c(y_a - y_b)$$

$$N = \sqrt{Na^2 + Nb^2 + Nc^2}$$

$$\left. \begin{aligned} a &= \frac{Na}{N} \\ b &= \frac{Nb}{N} \\ c &= \frac{Nc}{N} \\ d &= -(ax_a + by_a + cz_a) \end{aligned} \right\} (2)$$

$$l_{pf} = \frac{|ax_0 + by_0 + cz_0 + d|}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} x &= \frac{-l_{pf} + a}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} + x_0 \\ y &= \frac{-l_{pf} + b}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} + y_0 \\ z &= \frac{-l_{pf} + c}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} + z_0 \end{aligned} \right\} (4)$$

$$\left. \begin{aligned} x &= \frac{l_{pf} + a}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} + x_0 \\ y &= \frac{l_{pf} + b}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} + y_0 \\ z &= \frac{l_{pf} + c}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} + z_0 \end{aligned} \right\} (5)$$

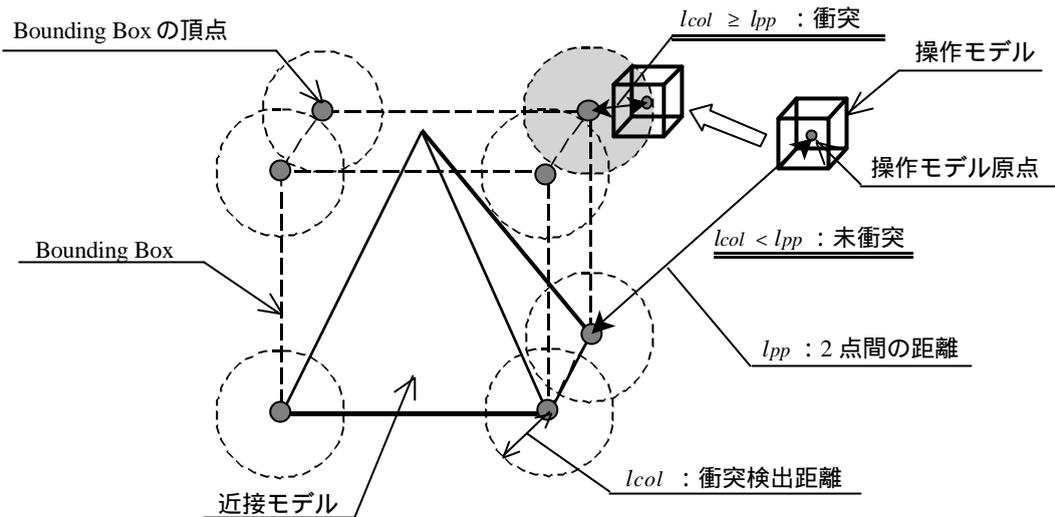


図3 点と点の衝突検出 (例: 原点对 Bounding Box の頂点)

Fig.3 Collision detection (point and point)

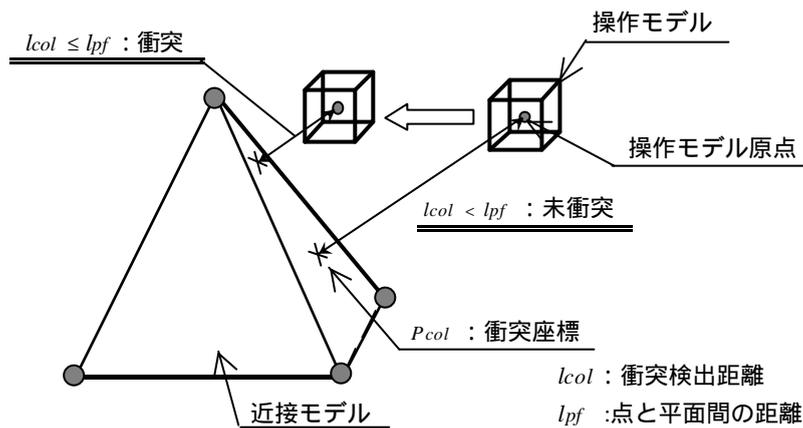


図4 点と平面の衝突検出 (例: 原点对ポリゴン)

Fig.4 Collision detection (point and plane)

2.3.2 点と点の衝突検出

操作するモデルの対象要素 (原点, Bounding Box 及びポリゴンの頂点座標) と近接するモデルの対象要素 (Bounding Box またはポリゴンの頂点座標) の距離が衝突検出距離以下 ($l_{col} \geq l_{pp}$) の値となった場合にのみ衝突と判定する. 図3に原点对 Bounding Box (頂点) における衝突検出のイメージ図を示す.

2.3.3 点と平面の衝突検出+

点と点の衝突検出と同様に操作するモデルの対象要素 (原点, Bounding Box 及びポリゴンの頂点座標) と近接するモデルの対象要素 (Bounding Box の構成面またはポリゴン) の距離が衝突検出距離以下 ($l_{col} \geq l_{pf}$) であり, 衝突座標 P_{col} が対象面上の範囲内にある場合に衝突と判定する. 図4に原点对ポリゴンにおける衝突検出のイ

メージ図を示す.

2.4 提示方法

操作モデルが近接モデルに衝突と判定した場合の提示方法として, 以下の“点滅による提示”と“力覚デバイスによる提示”の2通りを試みた.

2.4.1 点滅による提示

点と点の衝突検出, 及び, Bounding Box を利用した衝突検出の場合には衝突した面の特定ができないためモデル全体を点滅させることで提示を行った. 点とポリゴン面の衝突の場合は衝突した面の特定ができるため, 衝突した面と同じ傾きをもつポリゴンの点滅を行った. 詳細なモデルではポリゴンも非常に細くなり, 衝突面のみを点滅させても分かりにくい. そこで, 衝突した面と同じ傾きを持つ面を点滅させることで衝突部分を認識できるようにした.

2.4.2 力覚デバイスによる提示

点と平面の衝突検出の場合、衝突した面の傾きを利用して力覚の提示を行った。これにより、点とポリゴン面の衝突検出ではモデルの形状にあわせた力覚をユーザに提示することが可能になる。但し、点と点の衝突検出のように衝突した面の傾きを得ることができない場合には、任意の方向に力覚の提示を行って衝突を認識できるようにした。

3. 衝突検出システムの評価

衝突検出システムの評価実験として、“Bounding Boxの構成面×操作点”、“ポリゴン×操作点”の2つ方法について評価を行った。

Bounding Boxは詳細なモデルでも衝突範囲を簡略化して衝突検出の処理を行うため処理時間が短い利点がある。しかし、簡略化するためにモデルの存在していない空間まで衝突を検出する問題がある。そのため、決められた地点にモデルを設置させることは難しいと考えられる。

ポリゴンを利用して衝突検出を行う方法はモデルの表面付近で衝突検出を行うため、Bounding Boxのような問題はないが、全てのポリゴンに対して衝突検出処理を行うためシステムへの負荷が大きくなり、フレームレートが低下する問題が生じる。従って、ポリゴンの数によってはフレームレートが極端に下がりリアルタイムに操作が出来ない可能性も生じる。

そこで、3.1に示す作業を行い、被験者（7人）の作業時間を測定して作業性を検討し、また、描画のフレームレートを測定して検出処理の違いによるCOSMOSにかかる負荷を検討する。

3.1 作業内容

図5に示すようにプレートAの中心に操作するモデルを表示し、それを被験者が把持してプレートBの中心までモデルの先端を移動させる作業を行った。操作するモデルはポリゴン数が異なる7種類のモデル（ポリゴン数：16, 32, 64, 128, 256, 512, 800）を順番に表示、設置の精度としては、実空間における組立作業を考慮して、プレートBの中心から半径1mm以内にモデルの先端が移動するまで行うこととした。操作デ

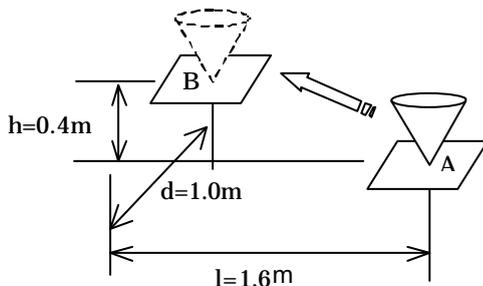


図5 評価実験

Fig5 Evaluation experiment

バイスとしてモデルモデルを直感的に操作するためHapticGEARを利用した。

4. 評価結果

4.1 作業時間

各モデルで要した作業時間の平均を表2に示す。全体的にポリゴンを使用した衝突検出の方が早く作業が終了したことが分かる。そのため、仮想空間内で位置をあわせる操作はポリゴンによる衝突検出を利用した方が有効であると考えられる。しかし、作業時間の平均は全て20秒以上必要であり、被験者によっては180秒以上操作しても設置ができないケースも生じた。このような原因として、本実験ではCOSMOS内のできるだけ広い範囲を作業領域として使用したため、3次元位置センサの精度が悪いスクリーンの付近で位置あわせの作業を行うこととなり、モデルの位置検出が安定しなかったことや、そのような状況下において設置の精度が1mm以下という厳しい条件であったため、このように作業時間が増加したと考えられる。但し、3次元位置センサはCOSMOSの中心付近でも様々な影響を受けるため許容範囲はできるだけ大きくとる必要がある。

表2 操作時間

Table 2 Operation time

ポリゴン数	16	32	64	128	256	512	800	平均
Bounding Box	58.9	61.6	25.4	62.9	55.4	39.1	44.4	49.7
Polygon	56.9	26.4	34.3	34.9	28	23.7	32.6	33.8

4.2 フレームレート

図6に各モデルで作業を行ったときのフレームレートの平均を示す。Bounding Boxはモデルのポリゴン数が増えても、ほぼ同じくらいのフレームレートで描画が行えていることが分かる。ポリゴンによる衝突検出はBounding Boxの方法と比較すると半分程度まで描画の速度が遅くなっている。

本実験ではポリゴン数が最大でも800程度であるが、COSMOSを使用する企業の多くは、非常に詳細なモデルを表示する場合や複数のモデルを同時に表示する場合もあるため、モデルの表示だけでフレームレートが落ちてしまうことがある。このような状況で衝突検出を行う場合には、Bounding Boxを利用した衝突検出を利用すれば、衝突検出を使用しない場合のフレームレートに近い値で処理を行うことができる。それに対して、ポリゴンを利用した衝突検出では大きくフレームレートを低下させることになるが、現実に近い状態で作業が行うことができるため、必要な部分のポリゴンに対してのみ衝突検出を行うようにすればフレームレートをあげることが可能になる。

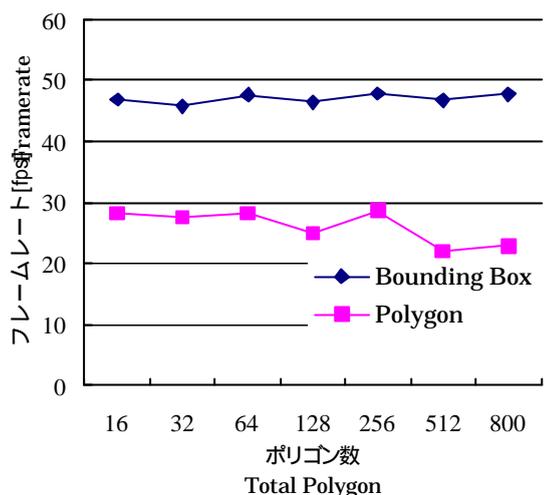


図 6 フレームレートの比較

Fig6 Comparison of frame rate



Work scene

図 7 アセンブルシミュレーション

Fig7 Assemble Simulation

5 . 衝突検出システムの利用方法

5 . 1 アセンブルシミュレーション

衝突検出システムを利用した利用例としてエンジンのピストン部分の組立作業を行うシミュレーションシステムを開発した(図 7)。3次元位置センサは場所によって値が安定していないため、ボルトなどの小さいモデルを把持することは非常に困難である。そのため、衝突検出の範囲が比較的広い Bounding Box による衝突検出方法を使用してモデルの操作を行った。また、モデルが取り付け位置まで移動した場合には、音を出すことでユーザに取り付け完了の提示を行った。

6 . むすび

IPT ディスプレイシステムにおける衝突検出システムの開発を行った。衝突検出の方法としては Bounding Box とモデルを構成するポリゴンのデータを利用し、ユーザへの提示方法として力覚ディスプレイを用いた。

Bounding Box を利用するとモデルの形状にあわせた衝突検出はできないが、処理が簡単なためフレームレートを大幅に落とすことなくモデルの衝突検出を行うことができた。ポリゴンによる衝突検出では、正確に衝突部分を検出できるため、モデルのポリゴン数が少なければ Bounding Box よりも早く位置あわせを行うことができる。但し、ポリゴン数の多いモデルではフレームレートが大幅に落ちるため操作性が悪くなる。そのため、全てのポリゴンに対して処理を行わずに、操作点に近い部分のポリゴンを検出して衝突検出を行うようにすればフレームレートは改善できると考えられる。また、Bounding Box による衝突検出とポリゴンによる衝突検出を組み合わせることで、詳細なモデルを複数表示した場合でも、効率的にモデルの衝突検出を行うことができると考えられる。

謝辞

本研究を進めるにあたり、多大な協力をいただいた東京大学先端科学技術研究センター生命知能システム分野廣瀬研究室の研究生の皆さんに、この場をお借りして深く感謝の意を表します。

文 献

- [1] Katsutoshi Fujii, Yoshinao Asano, Naoki Kubota, Hideki Tanahashi, " User Interface Device for the Immersive 6-screens Display "COSMOS", 'VSMM2000, pp.275-282, 2000
- [2] 北村喜文, " 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, pp.25-32, 1999
- [3] 筧直之, 矢野博明, 齋藤允, 小木哲朗, 廣瀬通孝, " 没入型仮想空間における力覚呈示デバイス HapticGEAR の開発とその評価, " 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, vol.5, No.4, pp.1113-1120,
- [4] Jed Hartman, Josie Wernicke, VRML20 ハンドブック-Web上の世界に動きを, アシソン・ウェスレイ・パブリッシャーズ・ジャパン(株)1997
- [5] Rikk Carey, Gavin Bell, 注解 VRML2.0 リファレンスマニュアル, 星雲社, 1998
- [6] <http://kslab-www.pi.titech.ac.jp/study/spidar-j.html>

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2報）

大野 尚則 窪田 直樹

A Distributed Engineering Database System using HORB()

Naonori OHNO, Naoki KUBOTA

あらまし 製品開発の高速化や効率化のためにデジタルデータの蓄積及び再利用の必要性が高まっている。本報告では、中小零細企業が実現可能なコストで、設計から生産までの工程をネットワーク上で連携して開発を進めていくための方法について述べる。この方法は、生産活動の各作業工程に利用されている既存の CAD システムや加工機などの設備と、小規模なオブジェクト指向データベースシステムを一对一に融合あるいは連携させ、更にその上位の階層に位置するデータベースにより、これら複数のデータベースを階層的に管理する方法である。今回、実際にこの方法を少量生産の工業用部品であるカム製品の開発に適用し、共同研究機関5機関と実験的に運用した結果を報告する。

キーワード 分散データベース、生産システム、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、ユーザのニーズの多様化により、今後更に多品種少量生産や受注生産が増加することが予想され、過去に設計したデータの管理や企業間の技術情報の交換が益々重要となっている。

本研究では、県内企業の情報化支援を目的として、中小零細企業が導入・運用可能な情報管理システムの実現を目指している。現在、大企業で利用されている情報基盤システムは高機能ではあるが高価なシステムとなっており、中小企業にとって導入が困難であることが多い。

多品種少量生産や受注生産の省力化のためにはデジタル化された技術データであるエンジニアリングデータの蓄積・再利用技術が重要なキーワードであることは明らかである。したがって、本研究では利用対象を中小企業に絞り、主に小規模データベースを介したネットワーク連携機能（図1）とデータの蓄積・管理機能を持つ低価

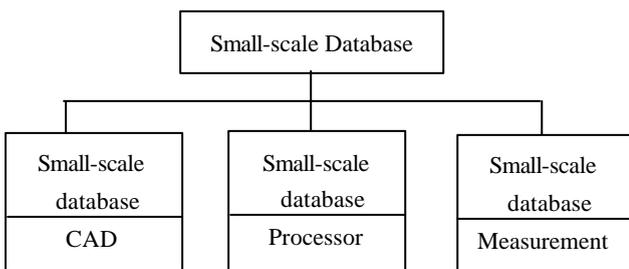


図1 分散型データベースによるネットワーク連携
Fig.1 Network cooperation using a distributed database.

格で実現可能で且つ容易に利用できる情報管理システムの開発を進めている。

現在、平成11年度より中小企業庁の中小企業産学官連携促進事業補助金により、産業総合技術研究所 機械技術研究所、大分県産業科学技術センター、広島市工業技術センター、高知県工業技術センター、山口県産業技術センターと共同で研究を進めており、実証実験を行っている[1]。

本報告では、平成11年度に試作したネットワーク対応

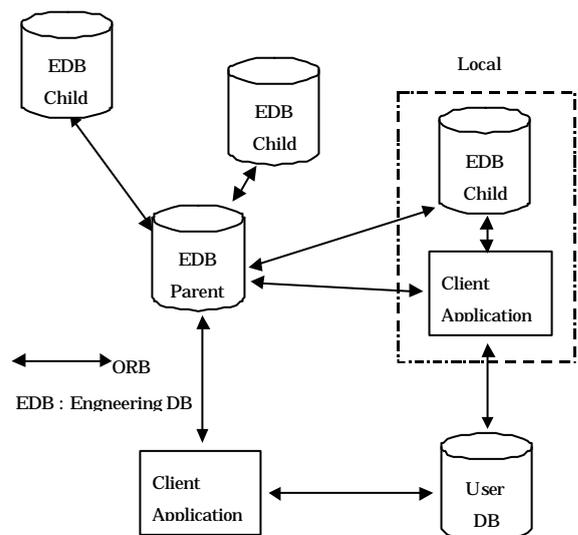


図2 分散型データベース概要
Fig.2 Summary of the distributed database.

型の分散型データベースシステムを改良したものを開発支援システムに応用し、実際に機械部品であるカム部品の開発に適用した事例について述べる。

2. 分散型エンジニアリングデータベースシステム

2.1 概要

図2に分散型エンジニアリングデータベース（以降 EDB: Engineering DataBase）の概略図を示す[2]。EDBは各々、各作業工程に必要なデータのみを格納しており、小規模で低コストで運用できるため、作業に必要な工作機械やCAD（Computer Aided Design）などが生成したデータやそのシステムに特化したデータをアプリケーションが導入されているコンピュータごとやLAN（Local Area Network）ごとにEDBの設置が可能である。このため作成されたデータやファイルを高速にデータベースに蓄積でき、データの頻繁な更新も実現できる。

ユーザがクライアントアプリケーション（図中: Client Application）を起動するとORB（Object Request Broker）により、ユーザ管理用のUser DBに接続し、ログインしようとしているユーザの認証を行った後で、そのユーザの属性情報を取得する。その情報に基づいて各EDBへのアクセス権や使用環境が設定され、サービスが開始する。

最初に、最上位階層の図中のEDB Parentに接続し、下位のEDB Childの情報を取得し、ユーザが要求するデータへと誘導される。実際、データの取得や格納は目的のデータが存在するEDBと直接データの送受信を行う。データを格納する場合には適当なEDB Childに格納された後に、その属性や管理情報はネットワークを介してEDB Parentに格納される。

2.2 EDBのアーキテクチャ

EDBのアーキテクチャを図3に示す。本研究で扱うデータベースはすべて図3に示すEDBと同様のアーキテ

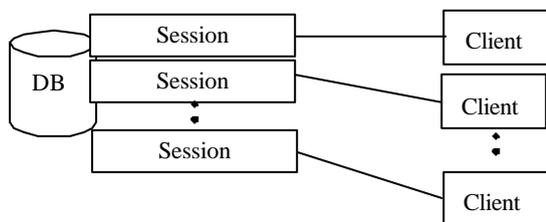


図3 EDBの構造

Fig.3 Architecture of EDB.

クチャで構成されている。データベースにはオブジェクト指向型データベース（以下OODB: Object Oriented DataBase）を用い、市販ライブラリとしてObjectStore PSE pro Ver 6.0（米エクセロン社製、以下PSE pro）を用いている[3]。各クライアントからの接続に対し、Sessionを生成することによりマルチクライアント対応となっている。Sessionとはデータベースに接続するためのシステム資源を意味し、PSE proは複数のSessionを扱うことができるが、一つのSessionから複数のデータベースにはアクセスできない。またSessionはシステムリソースを浪費するため、多くは生成できないが、本システムでは同時に接続されることが予想されるため、Session数の上限は設定していない。

またPSE proのトランザクションの種類は更新用と読み出し専用があり、同時書き込みや書き込み中の読み出しは行うことができない。

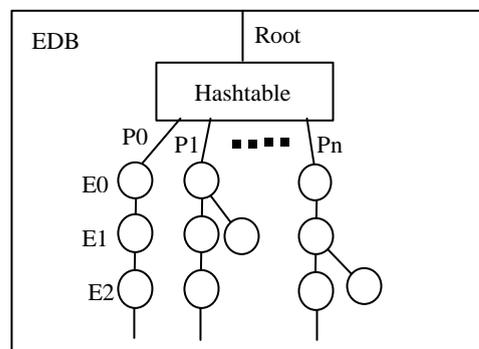
3. 開発支援システムへの応用

2章で概説したEDBの集合である分散型エンジニアリングデータベースシステムを開発支援システムに応用する。複数の中小企業が連携して製品を開発する場合を想定し、インターネット上でのデータ管理や進捗の確認機能を具備する開発支援システムへ応用する。

3.1 データ管理機能

データ管理方法は、EDB Parentをプロジェクト管理用のデータベースとして扱うことにより行うこととした。ここで扱われるプロジェクトデータとは、開発対象ごとの付属情報（発注者や納期など）や開発に必要な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）、またEDB Childの情報を所有している。

また各エンジニアリングデータは、プロジェクトごと



P: Project number

E: Engineering Data (version)

図4 データベースシステム構造

Fig.4 Structure of database.

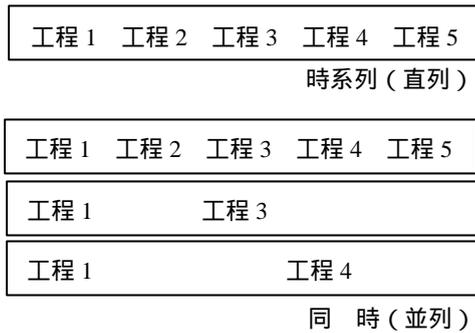


図 5 進捗管理方法

Fig.5 Progress management by this system.

ID	名称	仕様	設計	解析
0	板カム 1	完了	作業中	着手不可
1	並進カム 1	作業中	着手不可	着手不可
2	特殊カム 1	完了	開始可	着手不可

図 6 進捗管理画面の一部

Fig.6 Part view of progress management.

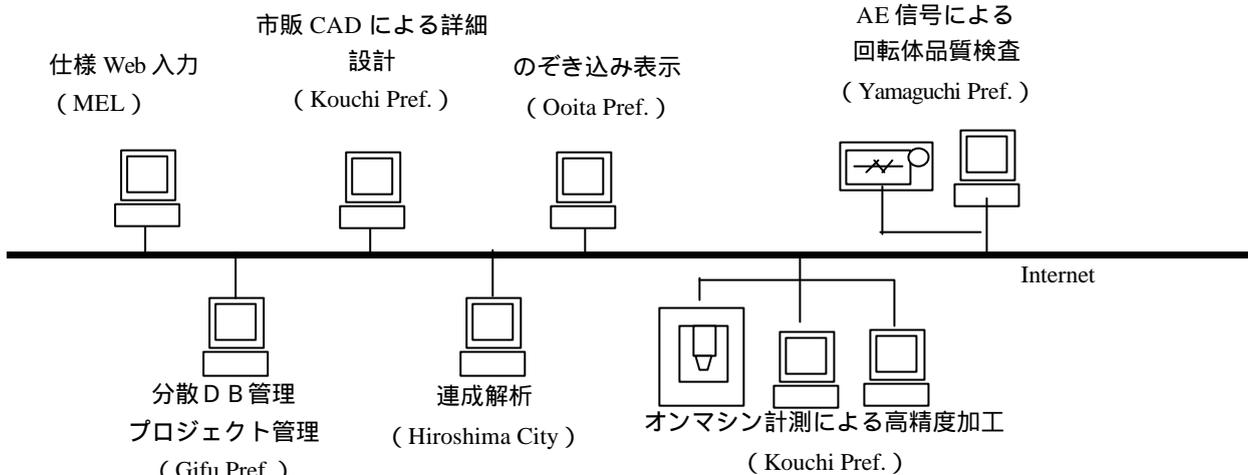


図 7 カム開発実証実験体制

Fig.7 Shared job in averification test.

に管理され、図 4 のような木構造グラフにてデータベースに格納される。したがって、このグラフ情報によってバージョン管理も可能である。

3.2 進捗管理機能

新しい工程の作業を行う場合、前工程のデータ生成が終了しており、且つ最新のデータであることを必ず確認する必要がある。本システムでは、前工程の最新データを取得して初めて実際の設計作業を開始できる仕組みとなっている。しかしながら、一連の工程において作業が時系列になることを意味するものではなく、データ作成が終了していれば、どの工程からも自由にデータを取得することが可能であり、コンカレントな作業開始が可能である(図 5)。図 6 は進捗管理の画面の一部である。

4. 実証実験

4.1 ネットワーク連携の流れ

現在、機械部品であるカム部品の開発を対象に、応用開発した開発支援システムを用いて、仕様入力から設計、

加工、評価までの一連の工程をインターネット上で実証実験を行っている(図 7)。

作業の流れとして、

1) Web 上でカム設計に必要なタイミング線図などの仕様データを入力する。入力されたデータは XML 形式で出力され、データベースに登録される。その後、管理情報が上層のデータベースに自動的に登録される。(担当機関：産業技術総合研究所 機械技術研究所)

2) 詳細設計部門に、データが登録されたというメールが送られる。詳細設計部門は、そのデータを市販のカム専用 CAD に入力し、仕様情報からカムや機構など形状データや加工用データを生成する(担当機関：高知県工業技術センター)。

3-1) 形状データを用いて応力と熱の連成解析を行い、検証する。但し、境界条件やマテリアル情報は手作業で入力する(担当機関：広島市工業技術センター)。

3-2) 同時に加工を行う。加工用データを用いて、加工された形状を計測機で測定し、その情報を基に再度、加工用データを修正し、更に高精度な加工を行う。(担当機関：高知県工業技術センター)

4) 試作品について品質評価を行う。AE 信号を用いることにより、実際に部品を回転させつつ、動的に品質評価を行う（担当機関：山口県産業技術センター）。

5) 一連の作業で利用・生成・出力された情報を、すべてデータベースに登録することにより情報が蓄積され、閲覧できる。特に形状など3次元情報を持つデータは、CCD カメラにより利用者の頭の位置を検出し、その頭の位置に応じて表示を変化させることにより、擬似的に立体的に閲覧することができる。

（担当機関：大分県産業科学技術センター）

今後、図7の各工程にはそれぞれ小規模な分散データベースを配置する計画であるが、現時点でサーバを設置することが不可能な機関があるため、岐阜県には管理用（プロジェクト ユーザ、データベースサーバ）解析用、評価用の5つのサーバ、高知県には仕様用、設計用、加工用の3つのサーバを設置して実験を行っている。

4.2 各工程用サーバ

EDB サーバの詳細図を図8に示す。また、ここで利用しているソフトウェアを表1に示す。図中の User Application が各工程に必要な CAD や加工機のコントローラに該当する。ORB には現時点で最も高速な HORB (Hirano's ORB) [4]を用いており、通常、Firewall が存在する場合には、HORB プロトコルによる通信が困難であることが多い。この問題は HORB のエクステンションパッケージである horbx.http を用いることにより Fire wall を HTTP (Hyper Text Transfer Protocol) で通過させることで解決できる。図中の HttpGateway はこのパッケージの一部であり、動作として HORB サーバと HORB プロトコルと HTTP の相互変換を行い、HTTP で受信したデー

タを HORB プロトコルに変換し HORB server へ発信し、またその逆も行う。これを行う方法として Servlet[5]による方法と CGI (Common Gateway Interface) による方法の2種類があるが、今回は後者を選択し、httpGateway と Web server を配置した。

データの流れについて説明すると、まず DataView を介して必要なデータを他の EDB から取得する。その後、User Application で作業し、発生したデータファイルを EDB に登録する。そのデータファイルに関する属性情報のオブジェクトは HORB によって送受信され、データファイル自身は HTTP と CGI を用いてファイル転送され、共に EDB に格納される。データファイルを登録すると同時に上位の EDB に管理情報が登録される。

4.3 管理用サーバ群

管理部分を図9に示す。両 DB とも管理用情報を格納する。Project EDB は各エンジニアリングデータを含む開発対象ごとのプロジェクト管理情報、User DB はユーザ管理用の情報を格納している。データファイルを格納することは無く、ここで扱うデータはすべてオブジェクト

表1 実験環境

Table 1 The test environment

JavaVM	version 1.3
EDB, UserEDB	PSE pro Ver.6.0
ORB	HORB 2.01 http 1.0a3
Web server	apache1.3.14 Active Perl 5.6
OS	Windows98,2000

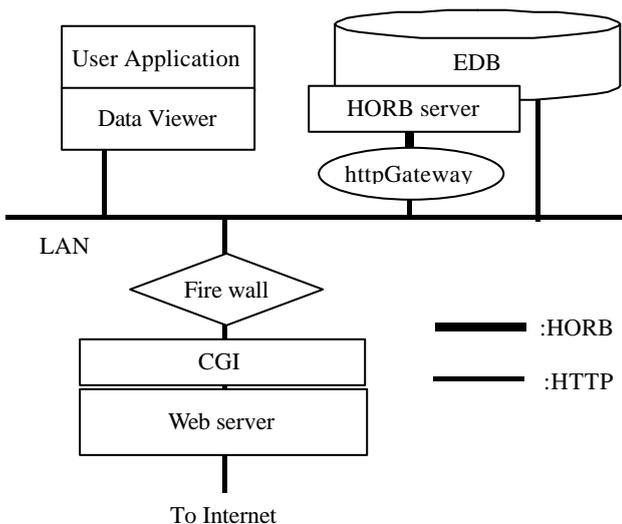


図8 各工程用サーバ構成

Fig.8 The detail component in each process.

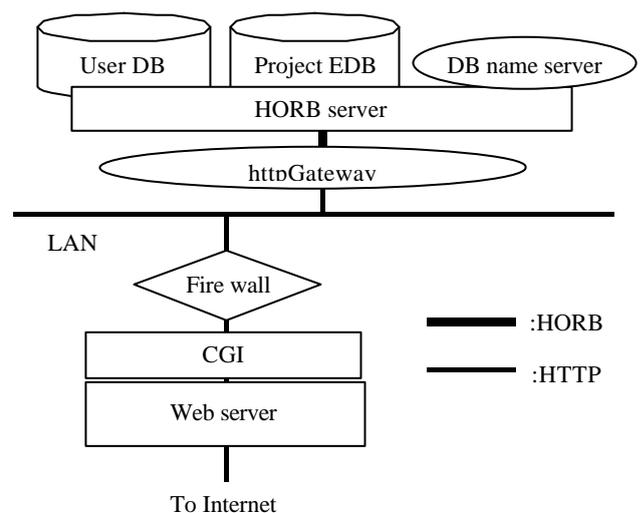


図9 管理用詳細構成

Fig.9 The management site.

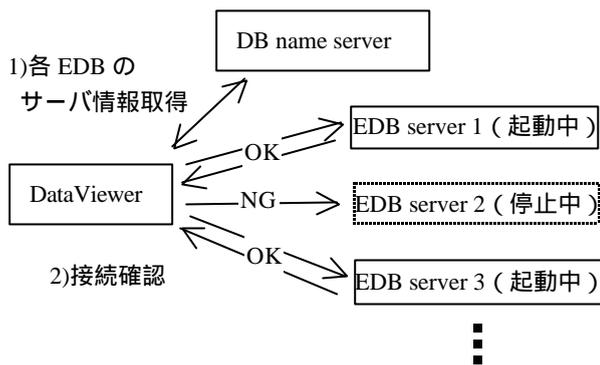


図 10 サーバとの接続
Fig.10 Connection to the servers.

であり HORB によりオブジェクトの送受信を行っている。

また動的に各工程のサーバ情報を更新・変更することを可能とする DB name server を開発した。これにより、現在、連携しているデータベースの最新情報が得られだけでなく、プロジェクトが進行中の場合においても、任意の工程のサーバを別のコンピュータに移設することも可能になる。DB name server の情報は各サーバが立ち上がったときに更新され、クライアントは DataViewer の起動時にその情報を取得し、各サーバの状態を確認することができる。したがって、あるサーバが起動されていない状態の場合には、そのサーバに関連する処理はクライアント側で自動的に実施されないように設定される (図 10)。

4.4 クライアントアプリケーション

クライアントアプリケーション DataViewer は、データファイルの登録・取得機能の他、進捗状況の一覧 (プロジェクト管理機能)、バージョン管理 (簡易 PDM 機能)、Java と CGI を用いた HTTP によるファイル転送機能を持つ。したがって、本アプリケーションを通してユーザはネットワーク連携を行う。

実行環境については、グローバル IP アドレスを持つコンピュータからの接続は可能であるが、利用している ORB の制限上、プライベート IP アドレスからの接続ができない [6]。

図 11～14 に GUI を示す。

4.5 関連付けアプリケーション

データファイルによっては、関連アプリケーションを Java の Runtime クラスを用いて拡張子で関連づけ、DataViewer から立ち上がるようになっている。図 14 は DXF 閲覧ソフトウェアが起動している例である。この実験で利用する User Application を表 2 にその一覧を示す。

表 2 User Application 一覧

Table 2 List of user application

用途	製品名	会社名
DXF閲覧	VoloViz Java3 Dアプリ	Autodesk 試作
表計算	MS-Excel	Microsoft
カム設計	CAMCAD	テクファ
3D空間共有	UnrealED	ケーネットシステムズ
カム仕様入力	Webアプリ	外注
解析ソフト	IDEAS	SDRC
AE信号計測	TYPE7600	エヌエフ回路設計ブロック
振動測定装置	TYPE2635	B & K
加工機	MCV4 10 YBM6 4 0	大阪機工 安田工業
頭の位置計測	C++Lib	アウストラダ

現在は標注の DXF 閲覧ソフトウェア VoloViz (米オートデスク社製) のみが関連付けられているが、今後、利用者がソフトウェアの関連付けができるようなカスタマイズツールを開発する予定である。

4.6 実証実験結果

前節までに記述した構成で、発注者を想定して、Web による仕様設計を行ってもらい、実際に品質評価されたカムが発注者に届くまでの流れを本システムを用いて実験的に行った。通常、データの受渡しやそれに伴うバージョン管理など面倒な作業を省くことができ、またデータの蓄積もでき、更に現場のシステムとの連携も容易となったことから、受注してから品質評価までの期間の短縮にもつながった。

5. おわりに

試作した分散型データベースを開発支援システムへ応用し、実際にカムの開発に用いて実証実験を行った結果、ネットワーク連携とエンジニアリングデータの管理が半自動的に可能となったことで省力化が実現でき、コンカレントな開発を進めることにより、期間短縮効果も確認できた。

今後、更に実証実験を進め、より使いやすいシステムを目指す。そのための課題として、現在、カム開発専用のシステムに近い形となったが、カスタマイズコストが高いため、ユーザの使用目的、開発製品などに適した自動カスタマイズ機能の開発をする必要がある。

謝辞 本研究を遂行するにあたり、産業総合技術研究所 機械技術研究所 物理情報部 小島部長をはじめ、本事業に携わっている研究員の皆様には、貴重なご意見を頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

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 精密工学会秋期大会, 2000
- [2]N. Ohno, N.Kubota and H. Tanahashi, “Development of a Distributed Database System for Network Engineering ”, proceedings of VSMM2000, 2000.
- [3]日本エクセロン(株), “ OBJECTSTORE PSE/PSE Pro for JAVA API ユーザガイド リリース 3.0 ”, 1998
- [4] S.HIRANO, Y.YASU and H.IGARASHI, 'Performance evaluation of popular distributed object technologies for Java', Concurrency: Pract. Exper., Vol.10, pp.927-940, (1998)
- [5] Sun Microsystems Computer Corporation, “JavaTM Servlet 2.3 and JavaServer PagesTM 1.2 Specifications”, 2000.
- [6]大野尚則, 窪田直樹, “ HORB を用い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 4 回 H ORB シンポジウム予稿集, 2001

ID	名称	仕様	設計	製作	加工	検査	出荷
0	部品名1	Task Fab 01	仕様	設計	製作	加工	検査
1	部品名1	Task Fab 01	仕様	設計	製作	加工	検査
2	部品名1	Task Fab 01	仕様	設計	製作	加工	検査
3	部品名1	Task Fab 01	仕様	設計	製作	加工	検査
4	部品名1	Task Fab 01	仕様	設計	製作	加工	検査

図 11 管理情報一覧 (進捗状況)
Fig.11 List of management information.

ID	名称	仕様	設計	製作	加工	検査	VR
0	部品名1	完了	作業中	待ち不可	待ち不可	待ち不可	待ち不可
1	部品名1	作業中	待ち不可	待ち不可	待ち不可	待ち不可	待ち不可
2	部品名1	完了	待ち可	待ち不可	待ち不可	待ち不可	待ち不可
3	部品名1	作業中	待ち不可	待ち不可	待ち不可	待ち不可	待ち不可
4	部品名1	完了	待ち可	待ち不可	待ち不可	待ち不可	待ち不可

図 12 エンジニアリングデータ一覧
Fig.12 List of engineering data.

ID	名称	仕様	設計	製作	加工	検査	VR
0	部品名1	完了	待ち可	待ち不可	待ち不可	待ち不可	待ち不可
1	部品名1	作業中	待ち不可	待ち不可	待ち不可	待ち不可	待ち不可
2	部品名1	完了	待ち可	待ち不可	待ち不可	待ち不可	待ち不可
3	部品名1	作業中	待ち不可	待ち不可	待ち不可	待ち不可	待ち不可
4	部品名1	完了	待ち可	待ち不可	待ち不可	待ち不可	待ち不可

図 13 エンジニアリングデータ表示
Fig.13 Engineering data.

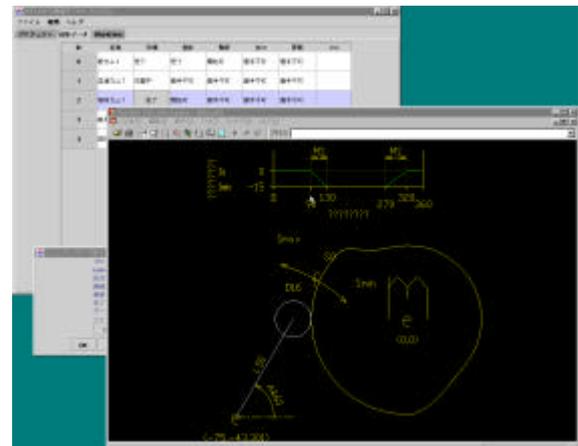


図 14 ファイルデータ表示
Fig.14 File data.

ファジィ理論を用いた自動装置の制御技術に関する研究

シルベスター・コバチ ピーター・バラニー 浅井 博次

Study on Control Techniques by Fuzzy Reasoning in Automata

Szilveszter Kovács Péter Baranyi Hirotsugu Asai*

あらまし 多機能な制御システムの構築に必要な制御規則獲得に有効な強化学習法に着目し、効率的な制御規則獲得のために問題となる計算コストを削減する手法として、SVD(Singular Value Decomposition; 特異値分解)に基づいて代数積・加算重心(PSG; potential based guiding)法に基づいたファジィ規則を近似する技法を適用することを提案した。

キーワード 強化学習, 特異値分解, potential based guiding model

1. まえがき

近年、さまざまな分野で使用されている自動装置は高性能化や多機能化が図られている。その反面、機能向上に伴い制御システムが複雑化し、計算機に求められる能力は急激に増加している。また、自動装置の適用環境についても拡大への要求が増大している。つまり、限られた環境で開発・実行できる多機能システムが要求されている。そのため、少ない計算コストで多機能な(複雑な)システム構築が可能な手法について検討することは非常に意味がある。

複雑な制御を実行するための制御規則を獲得する方法として強化学習法がある。強化学習法はタスクを達成したら“報酬”を与えるように設定するだけで複雑な制御規則を自動的に取得できるため、未知環境での制御など自律ロボット工学の世界で近年ますます注目を集めている。しかし、複雑な状況で強化学習法を応用する場合には、1つ問題がある。状態評価関数あるいは行動評価関数の表現が巨大になってしまうことである[1]。連続的な環境(連続的に評価される)場合、状態評価関数あるいは行動評価関数が連続関数になるため、強化学習はさらに複雑になってしまう。

そこで、本研究では、多機能な制御システムの構築に必要な制御規則獲得に有効な強化学習法に着目し、効率的な制御規則獲得のために問題となる計算コストを削減する手法として、SVD(Singular Value Decomposition; 特異値分解)を応用した方法を提案する。

2. 導入

強化学習法の一般的な目標は、最適な政策を発見することであり、ほとんどの場合状態評価関数あるいは行動

評価関数を構築することによって行われる[1]。

状態評価関数 $V^p(s)$ は出発点として与えられた状態 $s \in S$ と関連付けられ、与えられた政策 p に従う場合の予測される結果の関数である。行動評価関数 $Q^p(s, a)$

は与えられた状態 s で行動 $a \in A_s$ をとり、与えられた政策 p に従う場合の予測される結果の関数である。行動評価関数により、最適な政策は次式で与えられる[1]。

$$p(s) = \arg \max_{a \in A_s} Q^p(s, a) \quad (1)$$

すなわち最適政策を評価するために行動評価関数

$Q^p(s, a)$ を近似する必要がある。離散的な(状態・行動が離散的に定義される)環境において、少なくとも $\sum_{s \in S} \|A_s\|$ の要素を扱われなくてはならないことを意味

している(ここで $\|A_s\|$ は状態 s での可能な行動の集合

数)。複雑なタスクを適応する場合、可能な状態数と可能な行動数の両方が非常に大きい値になる。連続的な(状態・行動が連続的に定義される)環境で強化学習を実行するために関数近似法が広く使用されている。これらの方法の多くは、離散的な場合と同様に連続的な状態・行動空間を扱うために戦略分割を適用している。適当な分割構造を構築する場合の問題点の1つは、行動評価関数がわからないことである。細かく分割すると状態数が大きくなる一方、粗く分割すると不正確で適応能力のないシステムになってしまう。扱う状態数の増加は計算コストの増加に繋がる。それは、多くの実時間アプリケーション

ョンでは、許容できないことである。こういった問題の簡単な解決法として、連続的環境における強化学習アプリケーションの高いストレージ・コストと計算コストに対処するため、文献[2,3]で Yam と Baranyi によって提案された SVD に基づいて代数積・加算重心(PSG; potential based guiding)法に基づいたファジィ規則を近似する技法を適応することを提案する。

3 . SVD に基づいた PSG 近似

複雑さの削減において SVD を使用する鍵となる考え方は、“特異値が与えられたシステムを分解するために適用でき、分解されたパーツの重要度を示す”というものである。割り当てられた特異値に応じて出力に、あまり、または全く寄与しない部分を切り取ることで削減を実施できる。SVD に基づく削減の初期研究で計算の複雑さと近似誤差の関係が述べられている[2]。シングルトンに基づく代数積・加算重心(PSG)近似は、入力空間 X_n 上で定義された前件ファジィ集合 $m_{j_1, \dots, j_N}(x_n)$ によって与えられる N 変数ファジィ・ルールベースを仮定している。前件部のすべての組み合わせは出力空間 Y 上で定義されたひとつの後件部ファジィ集合に対応する。これらの関係は規則によって以下のように表現される。

If $m_{j_1,1}(x_1)$ And $m_{j_2,n}(x_2)$ And ... And $m_{j_N,N}(x_N)$ Then $b_{j_1 j_2 \dots j_N}$

シングルトン後件ファジィ集合 $b_{j_1 j_2 \dots j_N}$ はその位置毎に $b_{j_1 j_2 \dots j_N}$ で定義される。シングルトンに基づく PSG 近似の通常的手法は以下の式で表される[2,3]。

$$f = \sum_{j_1, j_2, \dots, j_N} \prod_{n=1}^N m_{j_n, n}(x_n) b_{j_1 j_2 \dots j_N} \quad (2)$$

文献[2,3]で紹介された SVD に基づくファジィ・ルールベース削減によって、(2)式は次式に変換できる。

$$\tilde{f} = \sum_{j_1, j_2, \dots, j_N} \prod_{n=1}^N m_{j_n, n}^r(x_n) b_{j_1 j_2 \dots j_N}^r \quad (3)$$

ここで、削減の結果として必然的に $\forall n: J_n^r \leq J_n$ となる。本手法を今後 SVD 削減と呼ぶこととする。

強化学習に SVD 削減を適応する我々の場合、ゴールは基本的に未知の関数 $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ を近似することであると仮定する。適当な強化学習法を使用し、可

能な限り多くの近似点を収集する。すなわち、近似 $\tilde{y} = f^a(x_1, x_2, \dots, x_n)$ において P 個の点を使用されると仮定する。近似点数が増加するとその計算によって有効な計算能力 C は急激に食いつぶされる。そこで、文献[2,3]で提案された SVD 削減を適用することにより与えられた誤差の閾値に従い、計算の複雑さを $D \leq C$ に減少させることが、本論文の目的である。これにより、 $C - D$ の計算能力を開放できる。開放された計算能力を使用して、更に近似点数を増やすことによって、誤差を改善することができる。

3 . 応用例

強化学習に SVD に基づく PSG ファジィ・ルールベース近似手法を適用する方法を紹介するために、2つの学習手法を選択した。1つ目が代表的な強化学習法 Q-Learning [4]、2つ目が Fuzzy Prioritised Sweeping 法[5]に基づいたモデルである。離散的な環境での Q-Learning では、行動評価関数は次式を繰り返すことで近似される。

$$\begin{aligned} Q_{i,u} &\approx \\ \tilde{Q}_{i,u}^{k+1} &= \tilde{Q}_{i,u}^k + \mathbf{g}_{i,u}^k \cdot \left(g_{i,u,j} + \mathbf{a} \cdot \max_{v \in U} \tilde{Q}_{j,u}^k - \tilde{Q}_{i,u}^k \right) \\ \forall i \in I, \forall u \in U \end{aligned} \quad (4)$$

ここで $\tilde{Q}_{i,u}^{k+1}$ は状態 S_i において実行した行動 A_u の行動評価値を $k+1$ 回繰り返して更新した値である。 \mathbf{a} は割引率、 $\mathbf{g}_{i,u}^k \in [0,1]$ は学習間隔を決定する学習率である。連続的な環境における Q-Learning に移行するためには、次式に示すように PSG 近似で $\tilde{Q}(s, a)$ を近似することによって連続行動評価関数 $Q(s, a)$ を近似することができる。

$$\begin{aligned} \text{If } s \text{ is } S_i \text{ And } a \text{ is } A_u \text{ Then } \tilde{Q}(s, a) &= Q_{i,u} \\ i \in I, u \in U \end{aligned} \quad (5)$$

そして、関数(1)によって最適政策を構築し、文献[5]で提案されている発見的教授法によって連続的政策へと変更できる。

$$\tilde{p}(i) = \arg \max_{u \in U} Q(i, u) \quad (6)$$

$$\text{If } s \text{ is } S_i \text{ Then } a = \tilde{a}_{\tilde{p}(i)}, i \in I \quad (7)$$

PSG 近似によって $\tilde{Q}(s, a)$ を近似する場合, 前節で提案したように SVD 削減法を適用できる行動評価関数のすべての評価値をゼロに設定し, 行動を適当な探索政策によって選択する. 状態空間と行動空間の分割は三角形状のファジィ集合形式で状態評価値と行動評価値から Ruspini ファジィ分割として構築される(fig.1).

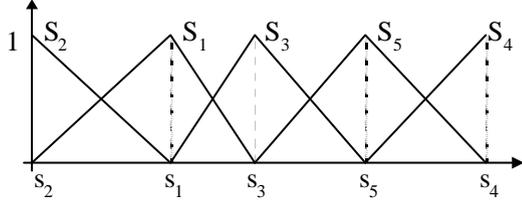


Fig.1. 状態評価値から得られた状態分割例

2つ目の例は, 文献[5]で提案された Fuzzy Prioritised Sweeping 法に基づくモデルである. ここで連続行動評価関数 $Q(s, a)$ は(5)式の PSG 近似で $\tilde{Q}(s, a)$ を近似することによって近似される.

文献[5]では, 行動評価関数は次式の the Bellman equation [6]で近似されると言われている.

$$Q_{i,u} \approx \tilde{Q}_{i,u} = \sum_{j \in I} \tilde{p}_{i,j}(u) \cdot \left(\tilde{g}_{i,u,j} + \mathbf{a} \cdot \max_{v \in U} Q_{j,v} \right) \quad (8)$$

$$\forall i \in I, \forall u \in U$$

ここで, $p_{i,j}$ は行動 A_u の場合における状態遷移 $S_i \rightarrow S_j$ の可能性見積もり値, $g_{i,u,j}$ は対応する平均報酬の見積もりである. 状態遷移の可能性見積もり $\tilde{p}_{i,j}(u)$ と対応する平均報酬の見積もり $\tilde{g}_{i,u,j}$ は, 文献[5]で提案されている最もありそうなモデルの評価戦略によって評価することができる. 行動 A_u の場合における状態遷移 $S_i \rightarrow S_j$ の可能性見積もり値は次式で表される.

$$\tilde{p}_{i,j}^{k+1}(u) = \frac{M_{i,u,j}^{k+1}}{L_{i,u}^{k+1}}, \quad i, j \in I, u \in U \quad (9)$$

ここで,

$$L_{i,u}^{k+1} = L_{i,u}^k + \mathbf{m}_i^S(s_k) \cdot \mathbf{m}_i^A(a_k), \quad i \in I, u \in U \quad (10)$$

は, ファジィ状態 S_i において $k+1$ 回繰り返されたファジィ行動 A_u の試行回数, \mathbf{m}_i^S はファジィ集合 S_i のメンバーシップ関数である.

$$M_{i,u}^{k+1} = M_{i,u}^k + \mathbf{m}_i^S(s_k) \cdot \mathbf{m}_i^A(a_k) \cdot \mathbf{m}_i^S(s_{k+1}) \quad (11)$$

$$i, j \in I, u \in U$$

は, ファジィ状態 S_i において $k+1$ 回繰り返されたファジィ行動 A_u の試行の中で状態が S_j へ遷移した回数である.

(ファジィ状態 S_i におけるファジィ行動 A_u の実行に対する) 平均報酬の見積もり $\tilde{g}_{i,u,j}$ を対応させると[5],

$$\tilde{g}_{i,u,j}^{k+1} = \frac{\sum_{l=0}^k \mathbf{m}_i^S(s_l) \cdot \mathbf{m}_i^A(a_l) \cdot \mathbf{m}_i^S(s_{l+1}) \cdot g_l}{\sum_{l=0}^k \mathbf{m}_i^S(s_l) \cdot \mathbf{m}_i^A(a_l) \cdot \mathbf{m}_i^S(s_{l+1})} \quad (12)$$

$$i, j \in I, u \in U$$

ここで g_l はステップ l において得られる報酬である.

行動評価関数を近似すると最適政策は文献[5]で提案されているように関数(6), (7)で構築される.

1つ目の例と比較すると, この場合における SVD 削減法の唯一の違いは状態空間と行動空間に前もって定義されたファジィ分割が必要であることである(状態遷移の可能性と対応する平均報酬の評価計算に必要). これらの分割を許容される計算コスト内で構築する.

4. 結論

複雑な状況で強化学習法を応用する場合の問題の1つは, 状態評価関数あるいは行動評価関数の表現が巨大になってしまうことである[1]. 連続的な環境での強化学習は更に複雑である. 連続的な空間を記述するため, 即ち基本的に未知の状態評価関数または行動評価関数を正確に近似するために密な分割を適用するからである. 細かく分割すると状態数が増加し, 多数の状態を扱うと計算コストが増大する. これは, 実時間アプリケーションだけでなく実際に使用する(限られた)計算機能力において許容できない問題である. こういった問題の簡単な解決法として, 連続的な環境における強化学習アプリケーションの高いストレージ・コストと計算コストに対処する

ため，SVDに基づいて代数積・加算重心(PSG)法[2,3]に基づいたファジィ規則を近似する技法を適用することを提案した．本手法の適用により，従来計算機の処理能力に制限されていた強化学習法の近似能力を大幅に改善し，効率的な制御規則の獲得が可能となった．

文 献

[1] R. S. Sutton, A. G. Barto: "Reinforcement Learning: An Introduction", MIT Press, Cambridge, 1998.

[2] Y. Yam, P. Baranyi, C. T. Yang: "Reduction of Fuzzy Rule Base Via Singular Value Decomposition", IEEE Transaction on Fuzzy Systems. Vol.: 7, No. 2, 1999, pp. 120-131.

[3] P. Baranyi, Y. Yam: "Fuzzy rule base reduction", Chapter 7 of Fuzzy IF-THEN Rules in Computational Intelligence: Theory and Applications Eds., D. Ruan and E.E. Kerre, Kluwer, 2000, pp 135-160.

[4] C. J. C. H. Watkins: "Learning from Delayed Rewards", Ph.D. thesis, Cambridge University, Cambridge, England, 1989.

[5] M. Appl: "Model-based Reinforcement Learning in Continuous Environments", Ph.D. thesis, Technical University of München, München, Germany, dissertation.de, Verlag im Internet, 2000.

[6] R. Bellman: "Dynamic Programming", Princeton University Press, 1957.

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* 稲葉 昭夫** 棚橋 英樹***

Study of Sensing Methods for Sophisticated Robot Teaching

Hideaki Tsuge Kazuo Tani* Akio Inaba** Hideki Tanahashi***

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、教示には熟練と多くの時間が必要とされるため、特に、連続的な経路を教示することが必要な、バリ取り等の倣い作業の教示には、多くの時間が必要となる。そこで本研究では、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、バリ取り等の倣い作業における教示時間の短縮を目指す。しかし、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・姿勢を高精度に計測することが必要不可欠であるが、現在のセンシング方法には位置・姿勢を高精度に且つ安定して計測する方法はない。このため、より精度を向上させるためには複数のセンサを組み合わせることが必要である。本研究では、複数のセンサを組み合わせることによって、より高精度に位置を計測する手法を検討する。その手法として、オブザーバを用いて位置を推定する手法を提案する。そして、シミュレーションにより本手法の有効性を検討する。

キーワード ロボット教示、センシング、オブザーバ、ティーチング

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いるが、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、バリ取り等の倣い作業の教示に関しては、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[1]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[2]、仮想環境内で教示を行う手法(オフラインティーチング)[3]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、先行して形状を計測し、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[4]。しかし、これらの方法では、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、研究の段階に留まっている。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必要となる。

そこで、実際の現場で教示時間の短縮を行うためには、人が操作しているツールや移動させる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、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、人の動作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、これらの方法では、実際の計測環境では、データの欠けや環境に大きく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できない。そこで本研究では、複数のセンサを組み合わせることで、位置をより高精度に計測する手法を提案する。さらに、シミュレーションにより提案した手法の有効性について検討する。

2. センシング手法

位置・姿勢を計測するセンサとしては、表1に示すようなセンシング方法があり、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、人の作業を計測する方法には適していない。そこで、複数のセンサを組み合わせることで、センサの欠点を互いに補うことにより、より

*岐阜大学工学部応用情報学科
Gifu University Department of Information Science
**兼製品技術研究所
Research Institute of Industrial Products Technology
***兼ソフトウェアジャパン
Softpia Japan

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、どの様に真値を推定するのかという問題がある。そこで本研究では、人の作業モデルを用いたオブザーバを構成し、このオブザーバに複数のセンサから得られた計測データを入力することで、より高精度で信頼性の高い真値の推定値を求める手法を提案する。

表1．主なセンシング方法

Table 1 Sensing methods

	長所	短所
磁気計測	非接触式 位置・姿勢計測	環境依存大
超音波計測	非接触式 位置・姿勢計測	精度低い
光学式ステレオ計測	非接触式	環境の影響大 データの欠け
機械的計測 (リヤ, アム等)	環境の影響小	接触式 拘束が多く作業の計測は難しい

3. オブザーバを利用した計測モデル

3.1 オブザーバ

オブザーバは、システムの入力値と出力値から内部の状態変数を推定する機構であり、制御に必要な状態量が推定できるため、システムの制御に広く用いられている[4]-[8]。一般のシステムは、状態変数表現を用いることにより、

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

と表すことができる。ここで、 x は n 次元状態ベクトル、 u は r 次元入力ベクトル、 y は m 次元出力ベクトルである。同様に、オブザーバも z を n 次元状態ベクトルとすると、

$$\dot{z} = Az + Bu, \quad \hat{y} = Cz \quad \dots$$

と表すことができる。システムの入力 u とオブザーバによって推定された出力 \hat{y} との差にオブザーバゲインをかけてフィードバックする(\dot{z} に足しこむ)ことにより、オブザーバの推定状態量 z がシステムの状態量 x に近づくことになる。

3.2 作業計測のためのオブザーバモデル

人の作業をシステムと考えた場合、機械システムのように入力値を知ることができない。このため、センサにより計測された位置・姿勢等の出力情報のみから、状態量を推定する必要が生じる。そこで、図1に示すように、オブザーバは入力値を用いることなく、センサからの出力データのみから状態量を推定することが可能な、未知入力オブザーバの構成を試みる。

人の作業モデルは、バネ・マス・ダンパモデルを用い

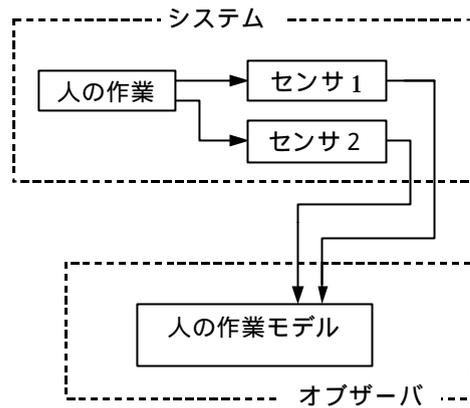


図1 未知入力オブザーバの概要

Fig.1 Unknown input observer

て表現することとし、質量を m 、粘性係数を c 、バネ定数を k とする。このシステムの運動方程式は、加えられた力を u 、変位を x とすると、

$$u = m\ddot{x} + c\dot{x} + kx \quad \dots$$

となる。ここで、状態変数を $z = [x \quad \dot{x}]^T$ として、状態変数表現すると次式となる。

$$\dot{z} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \ddot{x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -k/m & -c/m \end{bmatrix} z + \begin{bmatrix} 0 \\ 1/m \end{bmatrix} u$$

$$y = [1 \quad 0]z \quad \dots$$

しかし、人の動作では制御システムのように入力値を知ることができないため、センサにより計測された位置や姿勢の出力情報から、状態量を推定する必要が生じる。そこで、入力 u をシステム内部に生じる外乱と考えることで、入力を必要とすることなく状態量を推定する、未知入力オブザーバを構成することができる。ここで、状態変数を $z = [x \quad \dot{x} \quad u]^T$ とすると、

$$\dot{z} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -k/m & -c/m & 1/m \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} z$$

$$y1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} z, \quad y2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} z,$$

$$y3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} z \quad \dots$$

となる。ここで、 $y1$ はセンサ1、センサ2両方の出力を利用するオブザーバの出力ベクトル、 $y2$ はセンサ1、 $y3$ はセンサ2のみを利用するオブザーバの出力ベクトルで

ある。

図2に、人の作業計測のための未知入力オブザーバのブロック線図を示す。このモデルでは、人の動作により計測された、センサ1およびセンサ2の計測データから、人の作業モデルを通して、状態量である位置を推定することができる。また、センサ1またはセンサ2の一方が計測不能(データの欠け)などの異常状態になった場合、異常な計測データは、センサ1およびセンサ2の両方を用いたオブザーバと、それぞれ一方のセンサ情報のみを用いたオブザーバとの推定値の差から、推測することができる。そのため、この情報を用いてデータの接続および切断を行うことにより、正常に動作しているセンサのみから、位置を推定することが可能となる。また、センサの特性に応じたモデルの設計を行うことにより、予測されるノイズを軽減することが可能となる。

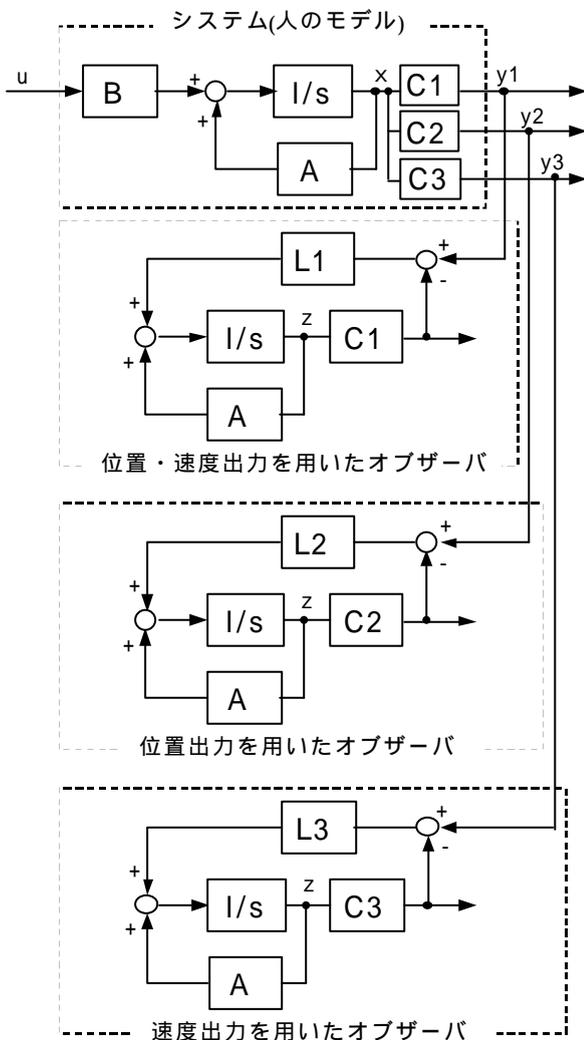


図2 未知入力オブザーバのブロック線図

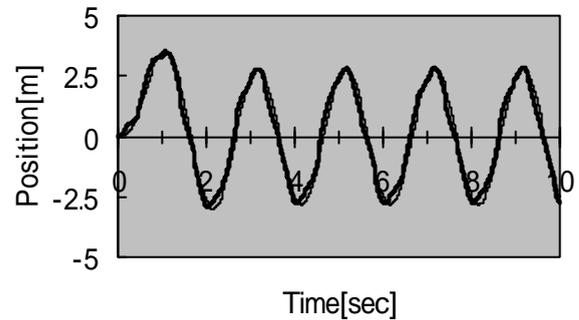
Fig.2 Block diagram of unknown input observer

3.3 結果および考察

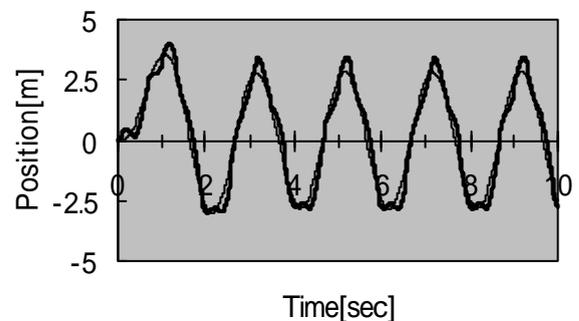
構成したオブザーバシステムの評価として、MatlabのSimulinkによるシミュレーションを行った。このシステムモデルにおける質量 $m=0.1\text{kg}$ 、粘性係数 $c=0.3\text{Ns/m}$ 、バネ定数を $k=0.5\text{N/m}$ とした。また、センサ1の出力を位置、センサ2の出力を速度とした。オブザーバへのフィードバックゲイン L は、 $A-LC$ の固有値の実部が全て負となるように設計した。

(1) センサ1への正弦波ノイズ

次に、センサ1の位置センサが、時間関数として定義されるノイズを発生すると仮定し、センサ1へのノイズとして、 \sin 波(8Hz, 振幅0.5)を加えた。ここで、加えるノイズを8Hzの \sin 波としたのは、人の動作は5Hz以下程度であるため、それ以上の周波数(8Hz)をノイズとした。入力は、 \sin 波(0.5Hz, 振幅1)を用いた。その結果を図3に示す。図3-(a)の太線は、位置・速度両方のセンサ出力を用いたオブザーバにより推定された位置出力、細線は実際の位置出力である。図3-(b)の太線は、位置のセンサ出力を用いたオブザーバにより推定された位置出力、細線は実際の位置出力である。位置・速度両方の出力を用いたオブザーバの方が速度の情報を用いているため、よりノイズの影響が小さくなっている。



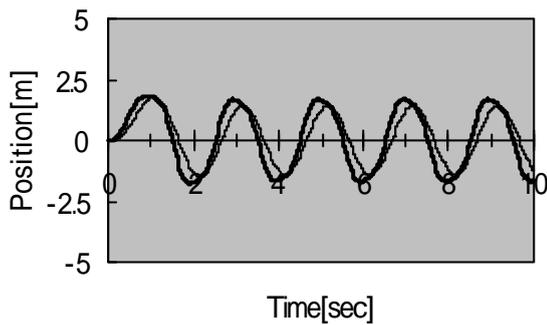
(a)位置・速度両方の出力を用いたオブザーバ



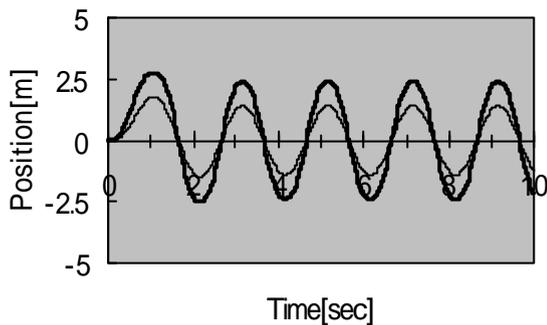
(b)位置出力を用いたオブザーバ

図3 シミュレーション結果(2)

Fig.3 Results of simulation (2)



(a)位置・速度両方の出力を用いたオブザーバ



(b)速度出力を用いたオブザーバ

図4 シミュレーション結果(3)

Fig.4 Results of simulation (3)

(2) センサ2への位置歪ノイズ

カメラを用いたセンサや磁気センサでは、計測位置により位置の歪が生じることが多い。このため、センサ2へのノイズとして、計測位置によって生じる歪を加えた場合のシミュレーションを行った。位置情報に位置歪として位置関数のノイズを加え、これを時間微分して、センサ2の出力(速度出力)とした。位置関数のノイズは、位置を x として、 $0.5 \cdot \sin(x)$ として加えた。入力 u は、 \sin 波(0.5Hz 振幅2)を用いたシミュレーション結果を、図4に示す。図4-(a)の太線は、位置・速度両方のセンサ出力を用いたオブザーバにより推定された位置出力、細線は実際の位置出力である。図4-(b)の太線は、速度のセンサ出力を用いたオブザーバにより推定された位置出力、細線は実際の位置出力である。位置・速度両方の出力を用いたオブザーバでは、位置の出力情報により歪が補正されるため、実際のセンサ出力に近い位置の推定を行っていることがわかる。よって、位置・速度両方の出力を用いたオブザーバでは、速度情報にドリフトのようなノイズが生じる場合についても有効であることがわかる。

4. まとめ

本研究では、複数のセンサを利用した人の作業計測モデルにおいて、

1) 計測データから状態量である位置情報を推定できる、未知入力オブザーバモデルを構築した。これにより、一方のセンサが計測不能になった場合にも、もう一方のセンサを用いて、状態量である位置の推定を行うことが可能となる。

2) 本提案モデルの有効性を評価するために、MatlabのSimulinkを用いてシミュレーションを行った。その結果、一方のセンサが計測不能になった時も、もう一方のセンサ情報を用いて状態量である位置情報を推定することができた。

今後の課題としては、実際に人が行う作業を計測し、本モデルの有効性を評価していく予定である。また、計測データを利用して、ロボットの教示データを作成する方法についても研究を行い、より短時間に教示を行うことができるシステムについて検討を行っていく予定である。

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] 野中潔, “不確実性を持つ離散的センサデータに基づく空間経路生成法とそのロボット備い作業への応用-第2報:シミュレーションによる特性評価-”, 日本ロボット学会誌, Vol.18, No.2, pp221-229, 2000.
- [5] 岩井善太, 井上昭, 川路茂保, “オブザーバ”, コロナ社, 1994.
- [6] 谷和男, 松本治, 白井清一, 堀内英一, “不整地走行アクティブサスペンションロボット”, 機械技術研究所報告, Vol.46, No.2, pp139-155, 1992.
- [7] 松本治, 梶田秀司, 谷和男, “移動ロボットの内界センサのみによる姿勢検出とその制御”, 日本ロボット学会誌, Vol.8, No.5, pp37-46, 1990.
- [8] 谷和男, 川村拓也, 宮永正雄, “複数オブザーバを用いた変動ダイナミクス機構の適応制御”, ロボティクス・メカトロニクス講演会(ROBOMEC'00), 2000.
- [9] バグス マハワン, 羅正華, 韓京清, 中嶋新一, “拡張オブザーバによるロボットの高速度・高精度運動

力覚提示機能を有する遠隔作業システムに関する研究

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 研磨作業のような作業者の力感覚が必要な作業を遠隔で行うためには、操作者に作業反力（力覚）を提示することが重要となる。このような機能を持つ装置として、著者らはこれまでに、大パワー、高剛性といった特長を有する油圧アクチュエータを用いたパラレルリンク型力覚ディスプレイを開発してきた。しかしながら、各油圧シリンダの動特性差や制御弁の中立点ずれの要因によって十分な操作感覚が得られていなかった。そこで、本報では、(1) 外乱オブザーバによる外乱推定補償制御、(2) 位置目標値を生成し、位置フィードバックを行う制御の2種類の制御法を適用し、この問題の解決を試みた。その結果、両制御法ともほぼ同程度に各シリンダの動特性差や中立点ずれを補償し、力覚ディスプレイの操作性を改善することができた。

キーワード 油圧システム, 力覚, パラレルリンク, 研磨, 外乱オブザーバ

1. まえがき

各種製造業の生産工程では、多様な自動機械が導入されたことにより、生産の合理化・効率化の進展が著しい。しかしながら、研磨、塗装、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、作業の自動化は一部の専用機を除いて進んでいないのが現状である。また、これらの工程の多くは、粉塵、高温、騒音など劣悪環境下での作業が多いことから、いわゆる3K（きつい、きたない、きけん）に関わる問題も抱いている。これらの諸課題を解決するには、作業者を作業現場から隔離する遠隔操作技術を導入すること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対象とした遠隔作業システムの開発を目的とする。

研磨作業のような作業者の力感覚が必要な作業を遠隔で行うためには、マスタ装置（作業者が操作する装置）は入力・指示機能の他に、作業によって生じる力を作業者に提示する機能が必要となる。このようなマスタ装置として、これまでに著者らは図1に示すような油圧式パラレルリンク型力覚ディスプレイを開発してきた[1]。本力覚ディスプレイは、アクチュエータに油圧シリンダを用いることにより大きな力の提示が可能で、かつ剛性を高くすることができる。さらに、パラレルリンク機構を採用したことから、可動範囲はやや小さくなるものの比較的簡単な構造で6自由度の動作が実現できるといった

特長を有している。

しかしながら、開発した力覚ディスプレイには各油圧シリンダの動特性が異なるため動作速度が同一ではないという問題や制御弁における中立点のずれ（通常、制御弁が中立の状態にある時、作動油の流出は停止されるが、中立位置がずれると、作動油の流出が生じる）のためピストンの位置が固定されないという問題があり、十分な操作感覚が得られていない[2]。

そこで本報では、力センサの信号に基づき開ループで駆動させていたこれまでの制御法を改め、次の2種類の手法を適用することによりこの問題の解決を試みる。

(1) 各シリンダの動特性差や制御弁の中立点ずれを外乱として捉え、外乱オブザーバによる外乱推定補償制御系を構成する。

(2) 力センサの信号から位置目標値を生成し、位置フィードバックを行う。

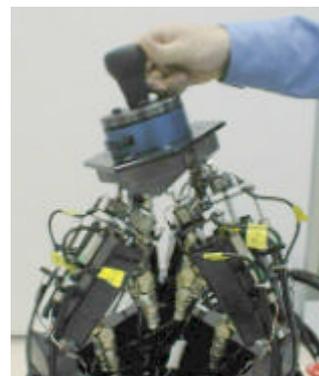


図1 パラレルリンク型力覚ディスプレイ
Fig.1 Parallel link type hydraulic force-display

*岐阜大学工学部機械システム工学科
Department of Mechanical and Systems Engineering,
Gifu University

2. 力覚ディスプレイの操作性の改善

2.1 従来の制御法

油圧サーボ系を力覚ディスプレイに用いる際に生じるバックドライバリティ性の問題を解決するために、著者らは先に図2に示すような力センサに基づくシステムの駆動法を提案した[1]。しかしながら、この手法は位置に関する閉ループを欠いているため、各シリンダの動特性差や制御弁の中立点ずれ等の影響が直接油圧シリンダの動きに現れてしまうという問題がある。例えば、エンドエフェクタの姿勢を保ったまま真っ直ぐ上方に駆動しようとする場合でも各シリンダ速度が一定でないためにエンドエフェクタが傾いたり、力を加えない状態では各ピストンはその状態で停止すべきところ、位置がドリフトしたりする。そこでこれらの問題を解決するために次の2種類の手法を検討した。

2.2 外乱オブザーバによる外乱推定補償制御

本法は、各シリンダの動特性の違いや制御弁の中立点ずれ等の要因を外乱として外乱オブザーバにより推定し、その推定量を制御入力から差し引くことにより6本すべてのシリンダの特性を理想モデルの特性に一致させる手法である。

外乱オブザーバを設計するにあたり、最初に油圧システムの理想モデルを求める。ここで、油圧システムに関して次のように仮定する。

(仮定1) 制御弁とアンプは比例要素として扱う。

(仮定2) 油の圧縮性は無視する。

この仮定により油圧システムは2次遅れ系で近似でき、システムの状態方程式は式(1)のように表される。

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}(t) &= A_0 x(t) + B_0 u(t) \\ y(t) &= C_0 x(t) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここで、

$$x(t) = [x_{pt}(t) \quad \dot{x}_{pt}(t)]^T$$

$$A_0 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & C_1 \end{bmatrix}, \quad B_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ C_2 \end{bmatrix}, \quad C_0 = [1 \quad 0]$$

ただし、

$$C_1 = -\frac{c_p + A_p^2 K_p}{M}, \quad C_2 = \frac{K_p K_x K_v A_p}{M}$$

x_{pt} : ピストン変位, \dot{x}_{pt} : ピストン速度, A_p : ピストン

受圧面積, c_p : ピストン粘性減衰係数, K_v : 制御弁ゲイン, K_p : 圧力流量係数, K_x : 流量ゲイン, M : ピストンの負荷質量である。

実際のシステムを理想モデルに外乱 ($d_i(t)$) が重畳したものと見なすと、システムの状態方程式は以下の方

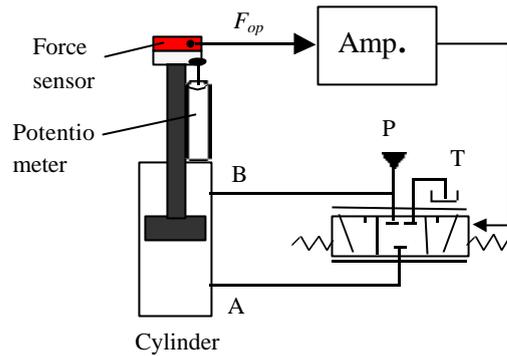


図2 力センサに基づくシリンダ駆動

Fig.2 Driving method by manual force

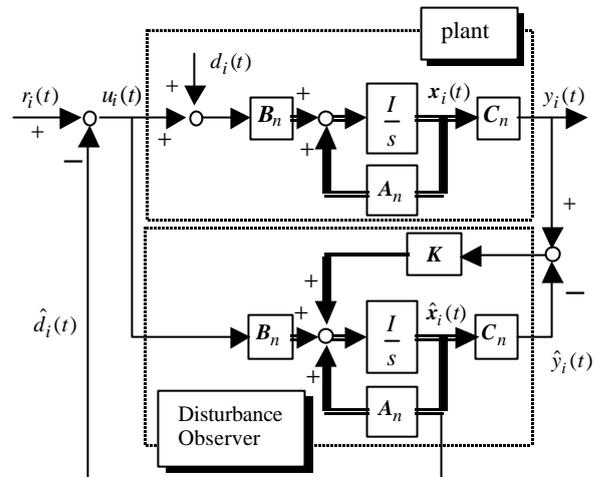


図3 外乱オブザーバによる外乱推定補償制御

Fig.3 Block diagram of system with disturbance observer compensation

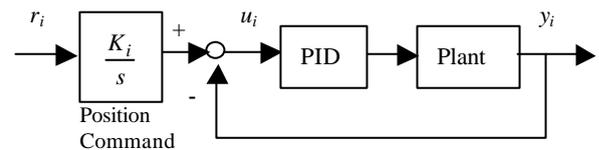


図4 位置フィードバック制御系

Fig.4 Position feedback control system

に表される。ただし、添え字の i はシリンダの番号を表している。

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_i(t) &= A_n x_i(t) + B_n u_i(t) \\ y_i(t) &= C_n x_i(t) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

ここで、

$$x_i(t) = [x_{pt}(t), \dot{x}_{pt}(t), d_i(t)]^T$$

$$A_n = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & C_1 & C_2 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B_n = \begin{bmatrix} 0 \\ C_2 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad C_n = [1 \quad 0 \quad 0]$$

システムの状態変数ベクトルの推定値を $\hat{x}_i(t) = [\hat{x}_{pr}(t), \hat{x}_{pr}(t), \hat{d}_i(t)]^T$ とすると、外乱オブザーバは次式で表される。

$$\dot{\hat{x}}_i(t) = A_n \hat{x}_i(t) + B_n u_i(t) + K(y_i(t) - \hat{y}_i(t)) \quad (3)$$

K は極配置などにより求まるオブザーバゲインである。外乱オブザーバによる外乱推定補償制御では、式(3)で求めた外乱推定値 ($\hat{d}_i(t)$) を制御入力から差し引くことによりシステムを制御する。図3に制御系のブロック線図を示す。

C_1, C_2 は K_p, K_x のように正確な値がわからないパラメータを含んでいるため、6本それぞれのシリンダについてランダムな入力に対する出力の関係からパラメータ同定によって求めた後、6本の平均値をとって、次のように定めた。

$$C_1 = -19, C_2 = 2700$$

また、実際の設計は式(2), (3)を離散化して行った。その際、離散時間領域におけるオブザーバゲイン K は、実際に操作したときに振動が生じない範囲で z -平面上の単位円内において外乱オブザーバの極をプラントの極よりも原点に近い領域に配置して設計を行った。

2.3 位置目標値生成 + 位置フィードバック制御

本方法はカセンサの信号からシリンダの位置目標値を生成し、位置フィードバックする方法である。常に位置制御されているため、手を離れた状態でもその位置で位置制御されるため、制御弁の中立点が多少ずれていても動き出してしまうことはないと考えられる。また、閉ループ制御することで各シリンダの動作速度の違いを補償し得ることが期待できる。図4に制御系のブロック線図を示す。位置目標値生成器は図のように、積分要素で構成した。また、コントローラにはPID制御則を採用した。

ここで、 K_i および PID の各パラメータは、外乱オブザーバによる外乱推定補償制御との間で、同じ大きさの入力に対するピストン速度がほぼ等しくなるように調整した。

3. 実験結果と考察

前章で設計した2種類の制御系を実際に油圧力覚ディスプレイに適用し、その制御性能を実験により検証した。実験は、最初にすべてのシリンダが中立位置（シリンダストロークの midpoint）にある状態から、入力として図5(a)に示すようなステップ状の信号を6本すべてのシリンダに与えた。これは、実際の力覚ディスプレイの操作において、エンドエフェクタの姿勢を保ったまま約 1.3[N] の力で1秒間垂直上向きに持ち上げた後、手を離す動作に

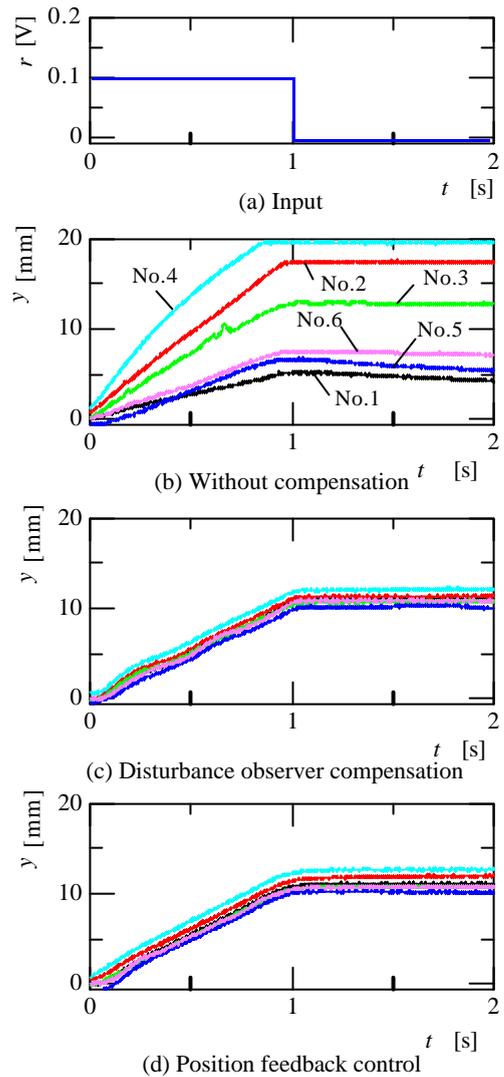


図5 ステップ応答の実験結果

Fig.5 Results of step response

相当する。

図5(b)に従来の制御法を用いたときの6本のピストン変位を示す。図によれば、各シリンダの動特性差のため、それぞれのピストン速度（0~1[s]間の曲線の傾き）が異なっている。その結果、エンドエフェクタの姿勢が傾いてしまう。また、入力が0[V]になった後、すべてのピストンが静止すべきところ、制御弁の中立点ずれにより、No.1やNo.5のシリンダで見られるようにピストンが変位している。これらの特性はシリンダのゲイン調整や制御弁の中立点調整である程度改善することはできるが、作動油の温度変化によりそれらの特性が変動すること、毎回の調整作業は煩雑であることなどの理由から実用的ではない。

図5(c)に外乱オブザーバによる外乱推定補償制御を用いたときの結果を示す。従来の制御法と異なり、6本のピストン速度はほぼ一定であり、実際の各シリンダと理想モデルとの動特性差を外乱として推定・補償した効

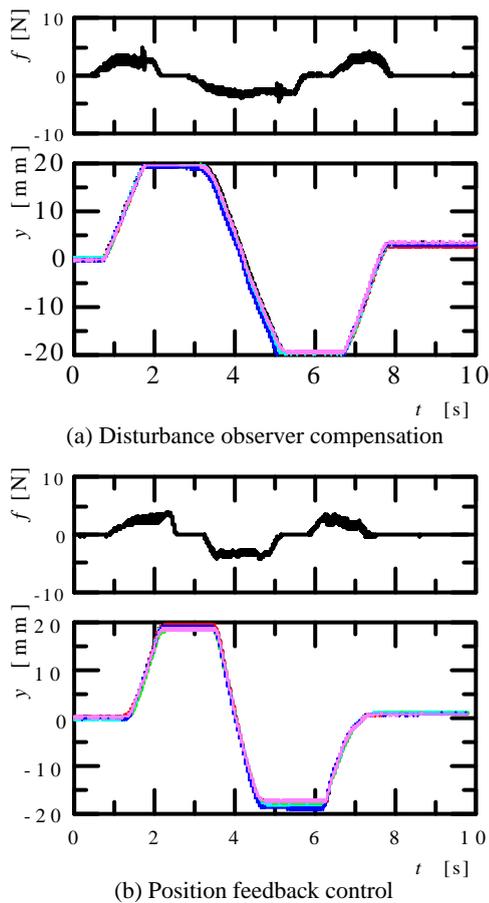


図6 力覚ディスプレイの操作結果
Fig.6 Results of force display operation

果が現れている。その結果、エンドエフェクタはほぼ同じ姿勢を保ちつつ真っ直ぐ上方に移動した。また、入力が 0[V]になった後、ピストンはほとんど動くことなく、その場で静止させることが出来た。

図5(d)に位置目標値生成 + 位置フィードバック制御を用いたときの結果を示す。この場合も外乱推定補償制御を行った場合とほぼ同様の結果になり、特性の改善が見られる。本実験によれば、2つの制御則を試みた結果はほぼ同程度の制御性能と評価された。

本実験では、比較の便宜上、コンピュータで生成したステップ信号を入力としたが、実際にグリップに力を加えて操作したときもそれぞれ良好な操作感覚が得られた。しかしながら、両制御則ともピストンがストローク端に達すると力覚ディスプレイの挙動が不安定になり操作感覚が悪化した。この原因としては、外乱推定補償制御の場合、理想モデルが線形でありストローク端のような非線形部分で実際のシステムとの相違が生じるため、正しい値が推定できないためであると考えられる。また、位置フィードバック制御系では、ストローク端に達した後も可動範囲を越えて位置目標値を生成していることが原因であると考えられる。

そこで、外乱推定補償制御の場合には、ストローク端

では外乱オブザーバによる外乱推定を行わないようにした。また、位置フィードバック制御の場合も同様に、ストローク端では、可動範囲を越えて位置目標値の生成を行わないように改めた。図6に実際にグリップに力を加え、力覚ディスプレイを操作したときの実験結果を示す。結果の表示を明瞭化するため、Z軸方向の並進動作のみ可能な状態で実験を行った。図(a)は外乱推定補償制御の場合、図(b)は位置フィードバック制御の場合である。各図とも上段にシリンダを駆動させるのに用いた操作者の力、下段に各ピストン変位を示す。両制御法の場合とも、ストローク端に到達後も6本のピストンの動きはほとんど同一（図では6本のピストン変位の波形がほとんど重なって描かれている）で、良好な操作感覚を得ることができた。

次年度は、これらの制御法をマスタ・スレーブ制御に適用し、実際に研磨作業を行うシステムを構築する予定である。

4. まとめ

本研究では、各油圧シリンダ間の動特性の違いや制御弁の中立点ずれ等により、これまで十分な操作感覚が得られていなかった油圧力覚ディスプレイに対して、その操作性を改善するため、ピストンストローク端における制御則の切替えを考慮した次の2つの制御法を適用した。

- (1) 外乱オブザーバによる外乱推定補償制御
- (2) 位置目標値生成 + 位置フィードバック制御

その結果、両制御法とも各シリンダの動特性差や中立点ずれを補償することで、動作時における各シリンダ速度をほぼ同じにすることができ、静止時におけるピストン変位のドリフトを低減することができた。これにより、力覚ディスプレイの操作性を改善することができた。

文献

- [1] 久富茂樹, 光井輝彰, 飯田佳弘, 山田宏尚, 武藤高義, “並列リンク型力覚ディスプレイの研究” 岐阜県生産情報技術研究所研究報告 No.1, pp.47-52, 1999.
- [2] 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, 1999.
- [3] 山本敏郎, 横田真一, 田村尉, “電気油圧マニピュレータの高精度制御(外乱オブザーバを用いたモデルマッチング2自由度制御による6軸油圧マニピュレータの軌跡制御)”, 油圧と空気圧, 第28巻, 第1号, pp.108-115, 1997.
- [4] 宮崎友宏, 萩原史朗, “パイラテラル・マスタ・スレーブ・マニピュレータの並列型制御方式”, 日本ロボット学会誌, 7巻5号, pp.46-52, 1989.

立体紙製品の構造解析に関する研究

川島義隆 西村太志 手塚 明*

Research on Structural Analysis of Paper Ware

Yoshitaka Kawashima Futoshi Nisimura Akira Tezuka*

あらし 現在、包装容器や緩衝材はプラスチック製品が主流であるが、リサイクルしやすく、かつ生分解性である紙製品が注目されつつある。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。本研究では、段ボール製緩衝材の力学特性の解析を目的に、段ボールの段の周期的構造に着目して、複合材料の解析で使われる均質化法の適用を試みた。その結果、有限要素モデルとしては段ボールの1段と緩衝材全体の両者の有限要素モデルのみで、段ボールのような多数の段を有する製品の解析が可能となった。これにより、均質化法の有効性を確認することができ、段ボール製品の構造解析への1つのアプローチとなることができた。

キーワード 紙、段ボール、緩衝材、有限要素法、構造解析、均質化法

1. まえがき

現在、工業製品など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いる。しかし、「容器包装リサイクル法」の施行に伴い、容器包装の利用者・製造者はその使用量（製造量）に応じて再商品化（リサイクル）の義務が生じるため、リサイクルコストが安い紙製の包装容器や緩衝材が使われることが多くなってきている。さらに、それらは木材パルプが主原料であり、生分解性であるため環境保護の面からも注目されている。紙製の包装材料として、従来から段ボールや鶏卵トレイなどがあるが、最近の傾向としては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に使用されることが多くなってきている。従って、正確な強度設計（緩衝設計）が必要とされるが、その設計は試行錯誤で行われているのが現状であり、その非効率さがコストの上昇を招いている。本研究では、緩衝材や包装容器等の立体形状を持つ紙製品の効率的な強度設計をするための一つのアプローチとして、有限要素法などの構造解析手法を用いてコンピュータシミュレーションによる力学的特性の解析を行う。

今年度は既存の段ボール技術を用いて安価に製造でき、今後需要が増えると思われる段ボール製緩衝材の静的力学特性の解析を行う。段ボール製品の構造解析をする場合、その解析領域には段が多数存在することとなり、有

限要素モデルを作成する際には、段一つ一つに対してメッシュを切る必要が生じる。そのため、有限要素モデルの作成や境界条件の設定など非常に手間がかかるものとなる。近年、このような微細な構造を持つ構造物の解析には均質化法が使われることが多くなってきているが、紙製品への応用した例はなく、そのため、段ボール製緩衝材の解析において均質化法の適用を試みる。

2. 均質化法

2.1 理論

均質化法[1],[2]は図1のような周期性を持った微視的構造からなる複合的な構造物（例えば、不均質な複合材料など）を等価で均質な構造物として置き換えることにより、微視的構造を考慮しながら巨視的構造の解析を行うことができる。ここで、図1のような微視的構造の一周期にあたる構成単位をユニットセルと呼ぶ。

構造物の全体(図2)を記述する巨視的な座標系を x 、微細な構造(図3)を記述する微視的な座標系を y とすると、巨視的構造物と微視的構造との大きさの比を表すを介して次式が成り立つ。

$$y = \frac{x}{e} \quad (1)$$

また、図1のような構造物を解析対象とした時、領域において、作用する物体力を f 、境界 Γ に作用する表面力を t とすると、仮想仕事の原理は次式のように表される。

*独立行政法人 産業技術総合研究所
National Institute of Advanced Industrial Science and
Technology (AIST), Independent Administrative

$$\int_{\Omega^e} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} \right)^t D_{ijkl}^e \frac{\partial u_k^e}{\partial x_l} d\Omega = \int_{\Omega^e} v_i^t f_i^e d\Omega + \int_{\Gamma} v_i^t t_i d\Gamma$$

$$\forall v \in V^e \quad (2)$$

ここで、

D_{ijkl}^e : 弾性テンソル、 v_i : 仮想変位、
 u^e : 微視的構造を考慮した複合構造物の変位

また、応力 - ひずみ、ひずみ - 変位の関係は次のように表される。

$$e_{kl}^e = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_k^e}{\partial x_l} + \frac{\partial u_l^e}{\partial x_k} \right) \quad (3)$$

$$s_{ij}^e = D_{ijkl}^e e_{kl}^e \quad (4)$$

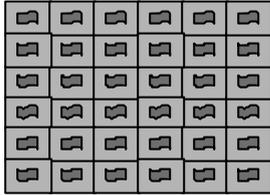


図1 微視的構造を伴った複合構造物

Fig.1 Composite structure with microscopic structures

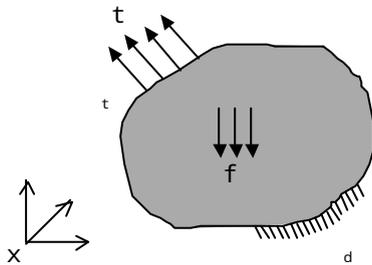


図2 巨視的構造 (全体構造)

Fig.2 Macroscopic structure (Global structure)

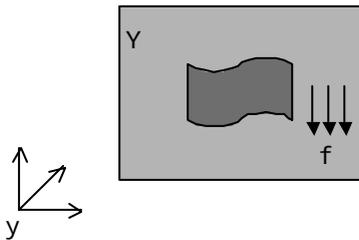


図3 微視的構造 (ユニットセル)

Fig.3 Microscopic structure (unit cell)

微視的構造からなる構造物の変位 u は次のように漸近展開できる。

$$u_i^e = u_i(x, y) = u_i^0(x, y) + \mathbf{e}_i^1(x, y), y = \frac{x}{\mathbf{e}} \quad (5)$$

また、 Y - 周期関数 $\Psi(y)$ に関して次の式が成り立つ。

$$\lim_{\mathbf{e} \rightarrow 0^+} \int_{\Omega^e} \Psi \left(\frac{x}{\mathbf{e}} \right) d\Omega \rightarrow \frac{1}{|Y|} \int_{\Omega} \int_Y \Psi(y) dY d\Omega \quad (6)$$

式 (5) を式 (2) に代入して整理し、極限 $\mathbf{e} \rightarrow 0$ により式 (6) を適用すると、巨視的な部分と微視的な部分が混在した式 (2) を微視的構造を表す式 (7) と巨視的構造を表す式 (8) に分離することができる。

$$\int_Y \left(\frac{\partial v_i(y)}{\partial y_j} \right)^t D_{ijpm} \frac{\partial \mathbf{c}_p^{kl}}{\partial y_m} dY = \int_Y \left(\frac{\partial v_i(y)}{\partial y_j} \right)^t D_{ijkl} dY$$

$$\forall v \in V_Y \quad (7)$$

$$\int_{\Omega} \left(\frac{\partial v_i(x)}{\partial x_j} \right)^t D_{ijkl}^H(x) \frac{\partial u_k^0(x)}{\partial x_l} d\Omega$$

$$= \int_{\Omega} v_i^t(x) b_i(x) d\Omega + \int_{\Gamma} v_i^t(x) f_i(x) d\Gamma$$

$$\forall v \in V_{\Omega} \quad (8)$$

ここで、

$$b_i(x) = \frac{1}{|Y|} \int_Y f_i dY \quad (9)$$

$$D_{ijkl}^H(x) = \frac{1}{|Y|} \int_Y \left(D_{ijkl} - D_{ijpm} \frac{\partial \mathbf{c}_p^{kl}}{\partial y_m} \right) dY \quad (10)$$

である。式 (10) は巨視構造における等価材料定数を求める式であり、均質化弾性テンソルと呼ばれる。

また、微視的構造を考慮した変位 u 、ひずみ、応力は次式で求めることができる。

$$u^e = u^0(x) - \mathbf{e} \mathbf{c}^{kl}(x, y) \frac{\partial u_k^0(x)}{\partial x_l} \quad (11)$$

$$e_{ij}^e = \frac{\partial u_i^0(x)}{\partial x_j} - \frac{\partial \mathbf{c}_i^{kl}}{\partial y_j} \frac{\partial u_k^0(x)}{\partial x_l} \quad (12)$$

$$s_{ij}^e = \left(D_{ijkl}(x) - D_{ijpm}(x) \frac{\partial \mathbf{c}_p^{kl}}{\partial y_m} \right) \frac{\partial u_k^0}{\partial x_l} \quad (13)$$

2.2 有限要素法による定式化

有限要素法により、式 (7) ~ (13) の近似を行った。

2.2.1 特性変位を求める

式 (7) を 8 節点アイソパラメトリック要素 [3] により離散化すると、特性変位と座標 y は次のように近似される。

$$\mathbf{c}_p^{kl} = \sum_{a=1}^{N_t} N_a(\mathbf{x}, \mathbf{h}, \mathbf{V}) \mathbf{c}_{ap}^{kl} \quad (14)$$

$$y_m = \sum_{a=1}^{N_t} N_a(\mathbf{x}, \mathbf{h}, \mathbf{V}) y_{am} \quad (15)$$

ここで、 N_t : 要素内の節点総数
 $N_a(\mathbf{x}, \mathbf{h}, \mathbf{V})$: 自然座標 $\{ \xi, \eta, \zeta \}$
 における形状関数
 $\Xi = (-1,1) \times (-1,1) \times (-1,1)$

そして、式(14)式を用いると、

$$\frac{\partial \mathbf{c}_p^{kl}}{\partial y_m} = \sum_{a=1}^{N_t} \frac{\partial N_a}{\partial y_m} \mathbf{c}_{ap}^{kl} = B_y \mathbf{c}_e \quad (16)$$

と表せる。

ここで、

$$\mathbf{c}_e = (\mathbf{c}_e^1, \mathbf{c}_e^2, \dots, \mathbf{c}_e^{N_t})^T \quad (17)$$

$$B_y = (B_y^1, B_y^2, \dots, B_y^{N_t}) \quad (18)$$

$$\mathbf{c}_e^i = \begin{pmatrix} \mathbf{c}_{i1}^{11} & \mathbf{c}_{i1}^{22} & \mathbf{c}_{i1}^{33} & \mathbf{c}_{i1}^{23} & \mathbf{c}_{i1}^{31} & \mathbf{c}_{i1}^{12} \\ \mathbf{c}_{i2}^{11} & \mathbf{c}_{i2}^{22} & \mathbf{c}_{i2}^{33} & \mathbf{c}_{i2}^{23} & \mathbf{c}_{i2}^{31} & \mathbf{c}_{i2}^{12} \\ \mathbf{c}_{i3}^{11} & \mathbf{c}_{i3}^{22} & \mathbf{c}_{i3}^{33} & \mathbf{c}_{i3}^{23} & \mathbf{c}_{i3}^{31} & \mathbf{c}_{i3}^{12} \end{pmatrix} \quad (19)$$

$$B_y^i = \begin{pmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial y_1} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial N_i}{\partial y_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial N_i}{\partial y_3} \\ 0 & \frac{\partial N_i}{\partial y_3} & \frac{\partial N_i}{\partial y_2} \\ \frac{\partial N_i}{\partial y_3} & 0 & \frac{\partial N_i}{\partial y_1} \\ \frac{\partial N_i}{\partial y_2} & \frac{\partial N_i}{\partial y_1} & 0 \end{pmatrix} \quad (20)$$

よって、式(7)は次のように離散化できる。

$$\sum_{e=1}^{N_y} \int_{Y_e} B_y^T DB_y \mathbf{c}_e dY_e = \sum_{e=1}^{N_y} \int_{Y_e} B_y^T D dY_e \quad (21)$$

$$\sum_{e=1}^{N_y} \int_{\Xi_e} B_y^T DB_y \mathbf{c}_e |J_y| d\Xi = \sum_{e=1}^{N_y} \int_{\Xi_e} B_y^T D |J_y| d\Xi \quad (22)$$

ゆえに、

$$K_y \mathbf{c} = F_y \quad (23)$$

ここで、

$$K_y = \sum_{e=1}^{N_y} \iiint B_y^T DB_y \mathbf{c}_e |J_y| d\mathbf{x} d\mathbf{h} d\mathbf{V} \quad (24)$$

$$F_y = \sum_{e=1}^{N_y} \iiint B_y^T D |J_y| d\mathbf{x} d\mathbf{h} d\mathbf{V} \quad (25)$$

$$\mathbf{c} = \sum_{e=1}^{N_y} \mathbf{c}_e \quad (26)$$

N_y : unit cell 内の要素数、 J_y : Jacobi 行列

となり、周期境界条件を用いて式(23)~(26)を解くことにより特性変位 \mathbf{c} を求めることができる。

2.2.2 均質化弾性テンソル D^H を求める

2.2.1 項と同様に式(16)により式(10)を離散化すると、次式が得られる。

$$D^H = \frac{1}{|Y|} \sum_{e=1}^{N_y} \iiint (D - DB_y \mathbf{c}_e) |J_y| d\mathbf{x} d\mathbf{h} d\mathbf{V} \quad (27)$$

式(27)に式(23)で得られた特性変位 \mathbf{c} を代入することにより均質化弾性テンソル D^H を求めることができる。

2.2.3 マクロ変位 \mathbf{u}^0 を求める

2.2.1 項と同様に、マクロの式(8)を離散化すると、次式が得られる。

$$\sum_{e=1}^{N_x} \int_{\Omega_e} B_x^T D^H B_x u_e^0 d\Omega_e = \sum_{e=1}^{N_x} b^h + \sum_{e=1}^{N_\Gamma} t^h \quad (28)$$

ここで、

- N_x : 全体構造物内の要素数
- B_x : x 座標でのひずみ - 変位マトリックス
- u_e^0 : 要素内節点のマクロ変位
- b^h : 物体力の等価節点力
- t^h : 表面力の等価節点力

よって、式(27)で得られた均質化弾性テンソルを用いて、式(28)を解くことにより、巨視的構造の式(7)を通常の境界値問題として扱うことができる。その結果、巨視的変位 \mathbf{u}^0 、ひずみ ϵ^0 、応力 $\boldsymbol{\sigma}^0$ を求めることができる。

2.2.4 ミクロの変位、ひずみ、応力を求める

微視的構造を考慮した変位 \mathbf{u} 、ひずみ $\boldsymbol{\epsilon}$ 、応力 $\boldsymbol{\sigma}$ 、の式(11)~(13)は式(29)~(31)のように離散化され、それぞれ得られた値を代入することにより求めることができる。

$$\mathbf{u}^e = \mathbf{u}^0 - \mathbf{e} \mathbf{c} B_x u^0 = \mathbf{u}^0 - \mathbf{e} \mathbf{c} \mathbf{e}^0 \quad (29)$$

$$\boldsymbol{\epsilon}^e_{ij} = B_x u^0 - B_y \mathbf{c} B_x u^0 = (\mathbf{I} - B_y \mathbf{c}) \mathbf{e}^0 \quad (30)$$

$$\boldsymbol{\sigma}^e_{ij} = D(\mathbf{I} - B_y \mathbf{c}) B_x u^0 = D(\mathbf{I} - B_y \mathbf{c}) \mathbf{e}^0 \quad (31)$$

2.3 プログラミング

Fortran77により均質化法プログラムを作成した。ソルバーは直接法であるスカイライン法[4]を、境界条件の挿入にはペナルティ法[5]をそれぞれ適用した。またより大きなマトリクスが解析できるようにバンド幅縮小のアルゴリズム[6]も適用した。

3. 段ボール製緩衝材への適用

段ボール製緩衝材の力学特性の解析のために、前節で作成した均質化法プログラムを、図4のような5層の段ボール製緩衝材を対象とし、その微小変形領域における静的力学特性の解析に適用した。

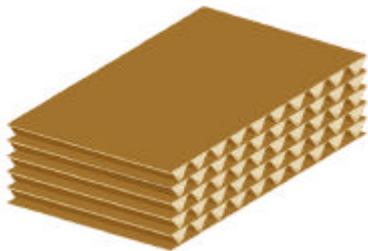


図4 5層の段ボール製緩衝材
Fig.4 5 layered Cushioning material made of corrugated fibreboards

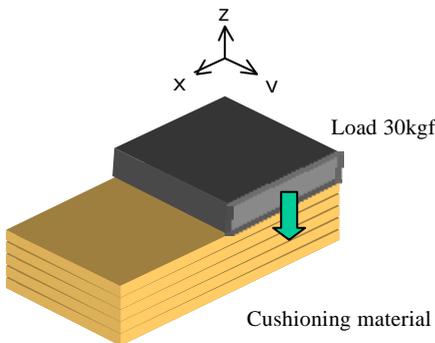


図5 緩衝材の荷重条件
Fig.5 Load condition of cushioning material

3.1 物理的条件

段ボール原紙(ライナー及び中芯原紙)の材料定数は、石淵ら[7]が使用した材料定数を用い、石淵らと同様に原紙を等方性材料として扱った。それらの値を表1に示す。

段ボール製緩衝材は両面段ボールを5層にしたものであり、幅86.0mm、奥行き50.0mm、高さ21.8mmとした。各層の段ボール形状はA段(幅:8.60mm、奥行き:

5.00mm、中芯の高さ:3.93mm)とした。

荷重条件は図5のような緩衝材の上面片側に対して30kgfの荷重とし、拘束条件は底面を全拘束とした。そして、異なる5カ所の段の変形をそれぞれ計算した。

表1 段ボール原紙の材料定数[7]

Table1 Material constants of fibreboards

	ヤング率 (kgf/mm ²)	ポアソン 比	厚さ (mm)
ライナー	189.28	0.06	0.21
中芯	86.30	0.03	0.25

3.2 微細構造(ユニットセル)

段ボールの1つの段をユニットセルとし、図6に示す有限要素モデルを作成した。その詳細を表2に、変位を求める全体構造におけるユニットセルの位置を表3に示す。

表2 ユニットセルの有限要素モデルの詳細

Table2 Specification of finite element model of unit cell

節点数	1353
要素数	600
大きさ(mm)	x=8.6, y=5.0, z=4.35
周期境界の節点数	409(対)
材料の数	2
材料1	ライナー
材料2	中芯

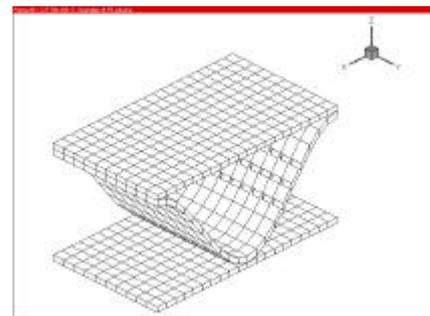


図6 段の有限要素モデル
Fig.6 Finite element model of a flute

3.3 全体構造

緩衝材全体を全体構造とし、その有限要素モデルを図7、その詳細と境界条件を表4に示す。

表3 計算するユニットセルの位置
Table3 Each position of calculated unit cells

Name of unit cell	Position		
	X	Y	Z
Unit cell 1	8.6	20.0	8.7
Unit cell 2	34.4	20.0	8.7
Unit cell 3	68.8	20.0	8.7
Unit cell 4	34.4	20.0	13.05
Unit cell 5	34.4	20.0	4.35

表4 全体構造の有限要素モデルの詳細と境界条件
Table4 Specification of finite element model and boundary conditions of global structure

節点数	2079
要素数	1600
大きさ(mm)	x=86.0, y=50.0, z=21.8
拘束条件	xy=0 面
拘束節点数	693
荷重条件	上面原点側半分の面積に 30kgf の荷重(0.50kgf/mm ²)

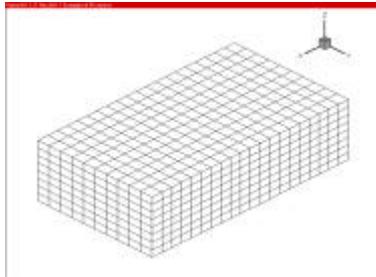


図7 全体構造の有限要素モデル
Fig.7 Finite element model of global structure



図8 全体構造の変位 (×50、以下同様)
Fig.8 Deformation of global structure
(×50, the following figures are same magnification)

3.4 結果

計算を行った全体構造の変位を図8、ユニットセルの変位を図9～図13に示す。

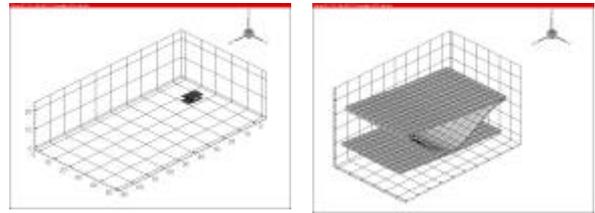


図9 ユニットセル1の変位
Fig.9 Deformation of unit cell 1

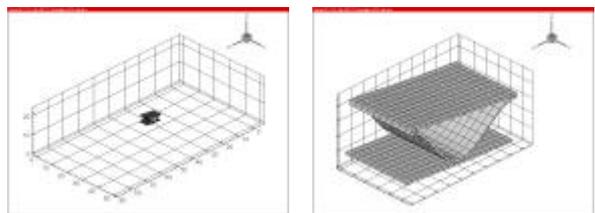


図10 ユニットセル2の変位
Fig.10 Deformation of unit cell 2

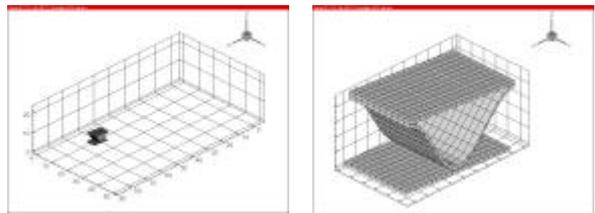


図11 ユニットセル3の変位
Fig.11 Deformation of unit cell 3

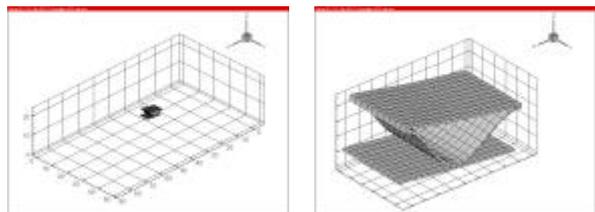


図12 ユニットセル4の変位
Fig.12 Deformation of unit cell 4

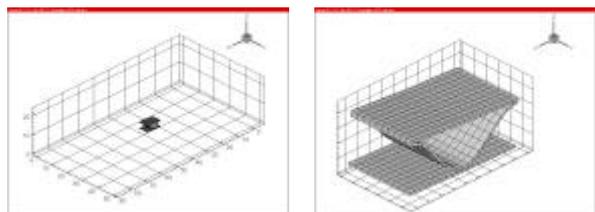


図13 ユニットセル5の変位
Fig.13 Deformation of unit cell 5

表5 段ボールの均質化弾性定数

Table5 Homogenized elastic constants of corrugated fibreboard

	ライナー	中芯	均質化弾性定数
D_{1111}	190.74	86.46	120.52
D_{1122}	12.18	2.67	7.23
D_{1212}	89.28	41.89	63.76

図9～11はユニットセルのx方向の位置の違いによる変形を、図10, 図12～13は中心位置でのz方向の位置の違いによる変形を計算した結果を示している。図8の全体構造の変形と比較してみると、荷重されている部分と荷重されていない部分でのユニットセルの変形は非常に顕著であり、その変形は全体構造の変位(図8)と一致していることがわかる。

また、微視的構造の解析で使用した表1から導出される弾性定数及び全体構造の解析で計算された均質化弾性定数の一部を表5に示す。式(10)(または式(27))で計算される均質化弾性定数は微視的構造を持った構造物が均質な構造物とした場合の等価材料定数であり、この値を用いることにより微細な構造を持った全体構造における構造物を通常の境界値問題として解析できることを示す。

4.まとめ

段ボール製緩衝材の力学特性の解析を目的に、次のようなことを行った。

(1) 段ボールの周期性に着目し、複合材料等の解析で使用されている均質化法の適用を試みるため、有限要素法による近似を行い、その定式化を行った。また、その定式化をもとにFORTRAN77によりプログラムの作成を行った。

(2) ユニットセルを段ボールの1つの段とし、緩衝材全体を全体構造とし、それぞれの有限要素モデルを作成した。

(3) 均質化法を段ボール製緩衝材の静的変形(微小変形領域)の解析への適用を行った。これにより、段ボールなどの微細構造を有した構造物の構造解析において、その有限要素モデルの作成は非常に手間がかかるものであったが、ユニットセルと全体構造の有限要素モデルの作成のみで微細構造を考慮した解析が可能となった。これにより、段ボール製品の構造解析への1つのアプローチとなることができた。

文献

- [1] Gudes, J. M. and Kikuchi, N., Processing and postprocessing for materials based on the homogenization method with adaptive finite element methods, *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, 83(1990) 143-198.
- [2] 小石ら、汎用 FEM プログラムをベースとした均質化法解析システムの開発、*機論*、59,561,A(1993),1395-1400
- [3] 鷲津久一郎、有限要素ハンドブック、(1981), 363-405, 培風館
- [4] Kikuchi, N., *Finite element methods in mechanics*, (1986), 203-209, Cambridge Univ. Press
- [5] Kikuchi, N., *Finite element methods in mechanics*, (1986), 49-52, Cambridge Univ. Press
- [6] Collins, R. J., Bandwidth reduction by automatic renumbering, *Int. J. Numer. Methods Eng.*, 6(1973), 345-356
- [7] 石淵ら、段ボールシートの三次元曲げ応力解析、*機論*、60,580,A(1994),2774-2781

遠隔操作システムにおける立体視に関する研究

今井 智彦 西嶋 隆

Research on Binocular Stereo Vision considering Teleoperation System

Tomohiko Imai and Takashi Nishijima

あらまし 従来のネットワークを利用した遠隔操作システムの多くは、遠隔地の作業環境を写した画像情報を操作者に提示する場合、単眼の画像情報を用いていた。この場合、操作者が奥行感を十分に知覚することができず、操作性が低下することがあった。そこで我々は、両眼立体視が可能な画像情報をそのデータ量について考慮して提示することにより、奥行知覚を向上させ、操作性の低下を防ぐことを考えた。本報告では、両眼立体視が可能な画像情報の画質が操作性に与える影響について検討を行った。その結果、操作者が画質劣化を知覚するに従い作業対象の位置を実際より提示画面の手前方向に目測してしまうため、それを実際より提示画面の奥方向に位置決めしようとする傾向があるという知見を得た。

キーワード 遠隔操作, 両眼立体視, 画質, 操作性

1. まえがき

情報通信技術の発展に伴い、インターネットを代表とするコンピュータネットワークが社会に広く普及しつつあり、それを通じて遠隔地間で各種情報(文字, 映像, 音声等)のやり取りが可能となっている。また、ロボット技術の分野では、人間が直接立ち入ることができない環境での作業を目的としたテレロボティクスの研究が長い間続けられている。近年、その研究にネットワークを利用して、より身近な作業にも活用することを目的としたネットワークロボティクスという研究が拓かれて、現在盛んに行われている[1]。

人間がネットワークを利用して遠隔作業を行う場合、遠隔地の作業環境を写した画像情報が必須である。例えば、遠隔地からの家庭保守や簡単な介護作業、工場内の機器監視や保守を行う場合、操作者に対して作業対象やその周囲の状況を写した画像情報が提示されていないと十分な状況確認を行えないため作業遂行が困難となる。このとき、提示される画像情報中に遠隔作業を行う際に要求される情報が含まれていないと操作性は低下する。遠隔作業のうち、監視のような見るだけでよい作業の場合、作業対象の形状、色彩が知覚できることが最低限必要であるが、単眼の画像情報だけでもこれらの情報が含まれているためその作業は可能である。また、作業対象の水平移動を行うような比較的簡単な作業の場合、単眼の画像情報だけでもおおよその位置への移動程度の作業は可能である。しかし、作業対象の組立など複雑な作業の場合、単眼の画像情報には提示画面に対して上下およ

び左右方向の情報ばかりで奥行情報は十分に含まれていないため操作性が著しく低下する。そのため、立体的な情報を提示する必要がある。従来の研究として、単眼の画像情報を生成する際に補助情報(ツールの影)を付加することにより、立体的な情報を操作者に提示する試みがある[2]が、これは常に安定した補助情報の提示が難しいという問題がある。またその研究では、2台のカメラを用いて作業環境を二方向から撮影し、それらを提示しているが、これは操作者が作業環境を把握するのに時間を費やしてしまう恐れがある。

そこで我々は、直感的に奥行感を知覚できる両眼立体視を用いることを考える。ここで、ネットワークを利用して両眼立体視が可能な画像情報を伝達するとき、それが膨大なデータ量を持つことが問題となる。そのため、そのデータ量を削減する必要がある。現在、画像圧縮技術により画像データ量を削減できるが、データ量を大きく削減するために高圧縮にするに従い画質が劣化し、反対に高画質にするために低圧縮にするに従いそのデータ量が大きくなる。このように画質と画像データ量はトレードオフの関係にある。従来の両眼立体視を用いた研究[3]の多くは、ほぼ可能な限りその情報を高画質にして提示しており、それは広帯域のネットワークを利用することが前提となっている。しかし、ネットワークを利用するすべての人間が広帯域のネットワークを利用できるわけではなく、またいくらそれを利用できるようになったとしてもより効率的に利用する必要はあると考える。そのため、画像データ量の削減につながる画質の検討が必要不可欠である。

そこで本報告では、両眼立体視を用いて操作性の低下を防ぐと共に狭帯域のネットワークを利用することも想定して、両眼立体視が可能な画像情報の画質が操作性に与える影響について検討を行う。両眼立体視が可能な画像情報の画質に関して主観評価を用いた研究はある[4]が、本報告ではそれも含めた操作性について検討する。

2. 実験

両眼立体視が可能な画像情報の画質が操作性に与える影響について検討を行うために以下に示す実験を行い、その作業における目測誤差と位置決め誤差を得る。本実験では、得られるデータに作業環境やネットワークの状態変動に起因する影響が出ないようにするために、以下のような方法を用いる。

2.1 実験方法

図1のように直径15mm、高さ100mmの円柱形状の木片を配置した環境を本実験の作業環境とする。図1中で示した木片がAB間を往復運動する動画像を取得するため、2.2.1項で述べる方法により撮影する。撮影した画像情報は2.2.2項で述べる方法により処理し、これらを用いて次の実験を行う。なお、被験者に提示する画像情報の画質は両眼ともに同じとする。

はじめに、被験者は提示画面上を前後に移動している画面中央の木片(以後、作業対象と呼ぶ)をマウスによりあらかじめ指定された位置に停止させる。なお、作業対象を停止させられるのは1回だけとする。次に、被験者は画面左右に一列に並んでいる木片(以後、マーカと呼ぶ)を基準にして、作業対象の位置を口答で報告する。最

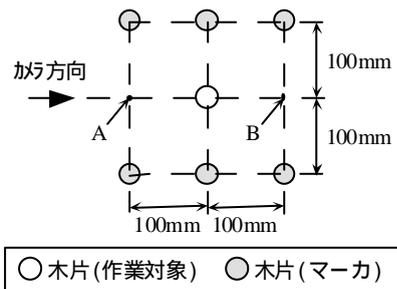


図1 実験用作業環境(上面図)

Fig.1 Working environment for experiment (top view)

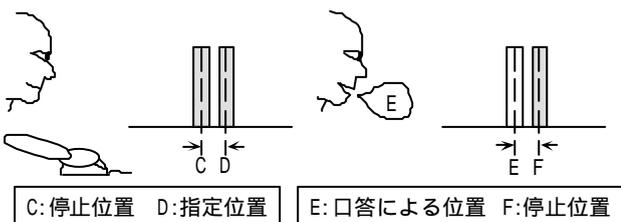


図2 実験データの関係図

Fig.2 Relation of data by experiment

後に、被験者はそのときの画質劣化についての主観評価を後記の尺度に基づいて口答で報告する。

図2に本実験で得られるデータの関係図を示す。実験により得られた、作業対象のマウスにより停止させた位置(図2中C点)とあらかじめ指定された位置(図2中D点)との差より、画質による位置決め誤差を得る。また、作業対象の口答による位置(図2中E点)とマウスにより停止させた位置(図2中F点)との差より、画質による目測誤差を得る。

2.2 実験装置

2.2.1 画像取得

図3に画像取得システムの構成図を示す。前節で述べた作業環境の状態を取得するために、2台のCCDカメラを図1で示した方向に向けて配置する。このとき、カメラの輻輳点は図1中A点とする。

2台のカメラより取得した画像情報はフィールド多重化回路[5]を用いて1つに合成してPC上に取り込む。取り込んだ画像情報は、再度2つに分割してそれぞれをビットマップ形式でPCのハードディスク上に保存する。本実験では、クレイアニメーションの要領で、作業対象を1mmずつ動かした画像情報を左右眼用201枚ずつ取得して保存する。図4にその一例を示す。

2.2.2 画像提示

図5に画像提示システムの構成図を示す。本実験では、画像圧縮方式としてJPEGを用いることとし、WWW上で公開されているソースコード[6]を利用する。これは、画質を表す量としてQuality(Q)を用いており、その値を元に画像制御を行っている。なお、Qは1~100の値をとり、Q=100が最高画質となる。Qを変更することにより、圧縮された画像情報に発生するブロックひずみが変わり、人間に検知されるその劣化の度合いが変わる。本実験では

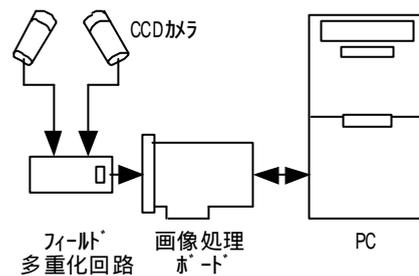


図3 画像取得システム構成図

Fig.3 System configuration of image capturing



(a)左眼用 (b)右眼用
(a) Left eye (b) Right eye

図4 取得画像例

Fig.4 Example of captured image

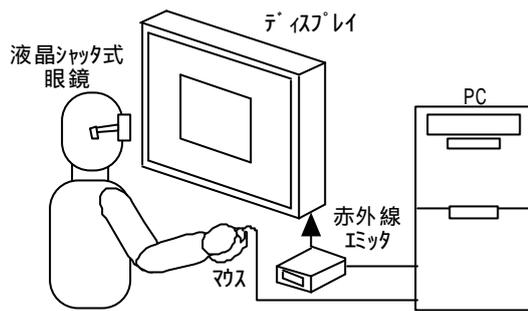


図5 画像提示システム構成図

Fig.5 System configuration of image display



(a) Q=10 (b) Q=100

図6 提示画像例(左眼用)

Fig.6 Examples of displayed image for left eye

このQを画質のパラメータとして扱うこととする。また、実験前に、前項で取得・保存した画像情報をあらかじめQを変更して圧縮・伸張し、ビットマップ形式でハードディスク上に保存しておく。実験時にはそれらをそれぞれの画質に応じてクリアアニメーションの要領で提示する。図6にその一例を示す。

被験者は、液晶シャッタ式メガネ(CrystalEyes, StereoGraphics社製)を装着することにより、ディスプレイに提示された画像情報を立体視することができる。なお、ディスプレイサイズは19インチである。また、マウスをクリックすることにより、提示画像のアニメーション開始・停止を行うことができる。

2.3 結果および考察

成年男子4名に対して、表1の実験条件の下、2.1節で述べた実験について、両眼立体視を用いた場合とこれとの比較のために単眼視を用いた場合で行った。なお、単眼視の実験では、両眼立体視の実験時に左眼に提示する画像情報を左右両眼に提示することとし、その他の実験条件は両眼立体視と同様とした。実験に際し、各被験者はあらかじめ画像圧縮していない画像情報を用いて複数回操作練習を行い、その後各画質について5回ずつ実験を行った。

なお、実験結果のグラフにおいて、各誤差の値が正の値のときは提示画面の奥方向に誤差が生じ、負の値のときは手前方向に生じたことを示す。また、誤差を示したグラフにおいて、グラフを見やすくするために横軸の値を若干左右にずらしている。

2.3.1 両眼立体視と単眼視の差異

図7に両眼立体視および単眼視を用いた場合の目測誤差の平均および標準偏差を示す。図7からわかるように、双方のグラフ共に同様の曲線を描いており、高画質にな

表1 実験条件

Table 1 Experimental conditions

提示画像	320×240pixels
画像圧縮方式	JPEG
画質(Q)	10, 15, 27, 37, 55, 79, 100 (7種類)
ディスプレイ解像度	800×600pixels
ディスプレイの種類	19inch (ブラウン管)
照明	蛍光灯
主観評価尺度	5段階 (表2による)

表2 主観評価尺度

Table 2 Subjective rate scale

尺度	カテゴリ
5	(劣化が)わからない
4	(劣化が)わかるが気にならない
3	(劣化が)気になるが邪魔にならない
2	(劣化が)邪魔になる
1	(劣化が)非常に邪魔になる

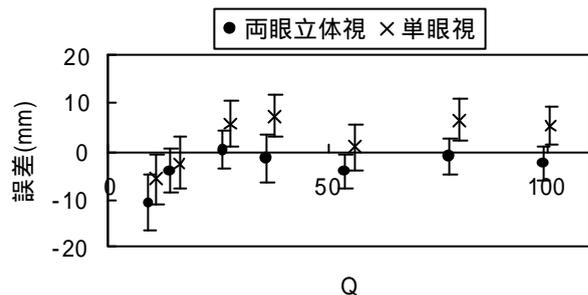


図7 目測誤差

Fig.7 Error of visual measurement

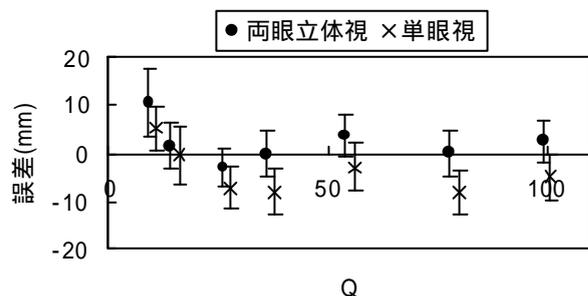


図8 位置決め誤差

Fig.8 Locational error

るに従い誤差がほぼ一定の範囲に留まるが、その値は両眼立体視を用いた場合が単眼視の場合より小さい。図8に両眼立体視および単眼視を用いた場合の位置決め誤差の平均および標準偏差を示す。図8からわかるように、図7と同様にその値は両眼立体視を用いた場合が小さい。

これらは、単眼視の場合は作業対象が床面に垂直に立っているのではなく提示画面の奥方向に倒れこんでいるように知覚されるが、両眼立体視の場合は作業対象と床面との関係をほぼ正確に知覚することができるためと考えられる。つまり、本実験の作業において、単眼視では作業対象の位置が実際より縮小して知覚される傾向があるが、両眼立体視を用いることによりそれを補正できる。

2.3.2 画質が操作性に与える影響

図9に両眼立体視を用いた場合の画質による目測誤差および位置決め誤差の平均および標準偏差を示す。図9からわかるように、画質が劣化するに従って目測誤差が提示画面の手前に向かって大きくなる傾向がある。これは、画質の劣化に伴い作業対象およびマーカの輪郭がはっきりしなくなるため、立体感が乏しくなると同時にそれらが肥大して知覚されるためと考える。また、図9からわかるように、画質が劣化するに従って位置決め誤差が提示画面の奥に向かって大きくなる傾向がある。これは、画質の劣化に伴い、前述のように目測では作業対象が実際より拡大して知覚されるので、位置決めを実際より提示画面の奥方向に行おうとしたためと考えられる。

図10に画質劣化の主観評価の平均を示す。図9および図10からわかるように、目測誤差および位置決め誤差が大きくなるとともに、画像劣化の主観評価値が急激に悪化していることがわかる。

以上より、次のような過程で実験結果の現象が起こったものと考えられる。画質が劣化すると、作業対象およびマーカの輪郭がはっきりしなくなり、立体感の知覚が難しくなるため、画質劣化の主観評価が悪化した。それに伴い作業対象を実際の位置より提示画面の手前方向に目測してしまうため、被験者は実際の位置より提示画面の奥方向に位置決めした。

また、 $Q=100$ を基準として各 Q における目測誤差および位置決め誤差のF検定を行った。なお、検定に用いたデータ数は20(被験者4人×5回)である。その結果、 $Q=15$ 以上のときは5%の有意水準で有意差が見られなかったが、 $Q=10$ のとき有意差が見られた。このことから、本実験の作業において操作性の低下を防ぐためには、画質劣化の主観評価において許容限(主観評価値 3.5)以上の画質が必要であると考えられる。

3. まとめ

ネットワークを利用した遠隔操作システムにおいて、遠隔作業の操作性の低下を防ぐために、作業を行う操作者が直感的に奥行感を知覚できるように、両眼立体視が可能な画像情報を操作者に提示した。両眼立体視が可能な画像情報の画質が操作性に与える影響については、操作者が画質劣化を知覚するに従って作業対象の位置を実

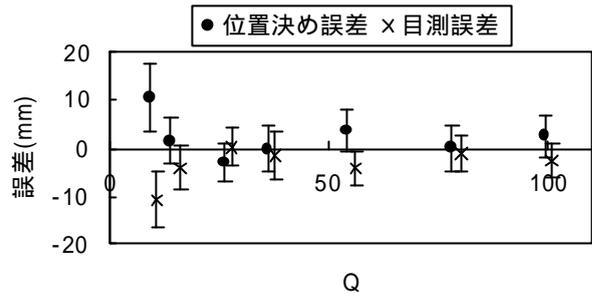


図9 目測誤差および位置決め誤差

Fig.9 Error of visual measurement and location

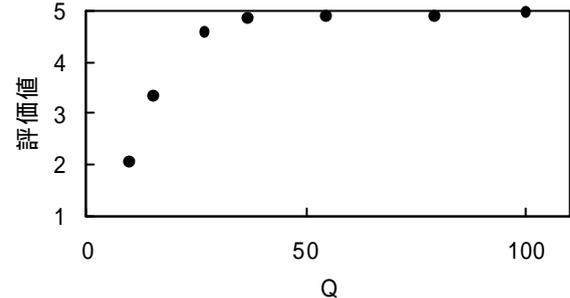


図10 画質劣化の主観評価

Fig.10 Subjective evaluation of image quality

際より提示画面の手前方向に目測してしまうため、それを実際より提示画面の奥方向に位置決めしようとする傾向があるという知見を得た。また、本実験の作業において操作性の低下を防ぐためには、画像劣化の主観評価において許容限(主観評価値 3.5)以上の画質が必要であるという結果を得た。

文献

- [1] 比留川博久, “テレロボティクスからネットワークロボティクスへ”, 日本ロボット学会誌, vol.17, No.4, pp.458-461, 1999
- [2] 富崎真, 吉留巧, 光石衛, 藤原一夫, 橋詰博行, “微細血管縫合用遠隔手術システムの開発”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'99講演論文集, 1P2-10-006, 1999
- [3] 金谷一朗, “通信衛星による遠隔診断プロジェクト”, 情報科学研究会講演集, pp.30-36, 1998 など
- [4] 河合良直, 堀田裕弘, 村井忠邦, “ステレオ静止画像における画質評価モデルの構築”, 映像情報メディア学会技術報告, pp.17-24, 1999
- [5] http://robotics.aist-nara.ac.jp/~yoshio/research/system/mix/mix_j.html
- [6] “JPEG ソースコード”, <ftp://ftp.uu.net:/graphics/jpeg/jpegsrc.v6b.tar.gz>

ネットワークを利用した遠隔操作システムに関する研究

西嶋 隆 今井 智彦

Development of Remote Control System for Network Robot

Takashi Nishijima and Tomohiko Imai

あらまし 近年、インターネットを用いた通信サービスが多様化し、文字情報だけでなく音声や動画の伝送も行われている。今後、ネットワーク通信において、データの転送遅延や遅延揺らぎに関する高品質化や広帯域化が進めば音声、動画の伝送は福祉、医療、アミューズメントなどに応用され、さらに様々な物理的な遠隔操作にも展開されていくと考える。本研究では、ネットワーク（インターネットやイントラネット）を利用した遠隔監視用移動型ロボットの操作システムを試作した。ユーザの利便性を考慮して、遠隔操作のユーザインタフェースにはJava applet を用い、Web ブラウザから操作可能にした。また、通信データの転送遅延や遅延の揺らぎによる操作性の悪化を改善するため、画像圧縮率変更機能、ローカルマップを生成し表示する機能、ロボットの半自律移動機能を提案し、アプリケーションレベルでの操作性改善に関する評価実験によりその有効性を確認した。

キーワード ネットワークロボティクス、ブラウザ、Java、遠隔操作

1. はじめに

現在、インターネットは一般家庭にも普及し、主にWWW やe-mail に代表されるようなアプリケーションが用いられている。特に、EC (Electronic Commerce) においては、顧客の利便性やベンダ側のソフト開発コスト削減等の理由から Web アプリケーションが多用され、ユーザインタフェースには Web ブラウザが使われる。一般的にはこのような Web アプリケーションは文字情報や画像情報の通信手段として用いられ、エンドツーエンドのQoS (転送遅延時間、通信帯域保証) はあまり問題にならない。しかし、リアルタイム性を厳しく要求するような遠隔制御などにおいては QoS が問題となる。IP (Internet Protocol) 網におけるサービスの多様化を背景に、今後は遠隔医療、遠隔介護、遠隔監視など、遠隔地の物理的操作を行うサービスも多く現れてくると考える。

現在、IETF (Internet Engineering Task Force) において転送遅延、遅延揺らぎ等のネットワーク品質を補うために、RSVP (Resource Reservation Protocol) 及びネットワークリソース確保が可能なルータを用いたインテグレートドサービス (IntServ) やディファレンシエーテッドサービス (DiffServ) の標準が規定されてきた。また、光伝送に WDM (Wave Division Multiplexing) 方式を用いた超高速光伝送技術も開発されてきている[1][2]。しかし、近年インターネット上で IP パケットは指数関数的に増加しており、上述したような新技術が広域 IP 網に素早く対応することは難しいと考える。

本研究では、現状のイントラネットやインターネットで遠隔操作する移動型監視ロボットの操作システムを試作し、通信データの転送遅延や遅延揺らぎによる操作性悪化を改善するためのアプリケーションレベルでの手法について検討する。また実際に提案手法を遠隔操作移動監視ロボットに実装してその評価実験を行った。今までに IP 網や専用回線を利用した遠隔操作ロボットの研究はなされており[3][4]、様々なアプローチで通信遅れなどを補う手法の提案、実験がなされてきたが[5]、それぞれの手法は遠隔操作タスクに依存するところが大きい。

今回試作したシステムはオフィスや工場内の巡回監視の遠隔操作を想定しており、ユーザはある程度遠隔地の地形を把握しているが、ロボット側に静的なマップを保持しても対応できないような状況を考えている。また、ユーザは会社や自宅からなどのあらゆる場所から遠隔操作することを想定し、利便性から Web アプリケーションとして試作する。また、操作インタフェースには汎用の Web ブラウザ (Internet Explorer や Netscape Navigator) を用い Java applet を起動する方法を採用。2章に提案手法、3章にシステムの構成、4章に提案手法の評価実験、5章に実験結果及び考察、6章にまとめる。

2. 操作性改善の提案手法

本章では、アプリケーションレベルでの操作性改善の手法を提案する。例えば、インターネット経由で移動ロボットを操作して遠隔地のオフィスの廊下を巡回して遠

隔監視をする作業を想定する．この作業には遠隔地の画像提示が必須である．また，操作するためにはロボットの周囲の状況把握が必要である．しかし，画像提示がなされて周囲の状況が把握出来たとしてもネットワークのデータはリアルタイム性に欠けるためロボットが周辺に接触する危険性はある．このような危険性のあるネットワークを介したロボットをより安全に操作するために2つの方法を検討する．1つはネットワークに送出するデータ量を極力減らし，通信負荷を軽減させ輻辳を起りにくくすること，もう1つはロボットにある程度の自律機能を付加して衝突の危険を回避することである．

2.1 通信データ量の削減による方法

データ量の削減による方法として，本システムにおいては遠隔画像の圧縮率を可変にして通信する画像データ量を変更できるインターフェースを提案する．画質とリアルタイム性はトレードオフの関係である．ユーザはネットワークリソースが少なく画像更新レートが低いと感じれば高圧縮にしてデータ量を少なくすればよい．反対にネットワークリソースが十分にあると感じるときや，どうしても高品質な画像が必要な時は低圧縮にし，高品質の画像を提示させればよい．

また，移動操作時に左右や後方の環境を把握するためには複数のカメラを使って全周囲の画像情報を提示すればよいが，全周囲を画像表示することはデータ量の観点から好ましくない．そこで，超音波センサを用いて作成した局所的な地図を提示する．具体的にはサンプリングしたデータをハフ変換[6]し，周囲の直線(壁)を検出し，マップ情報としてユーザ側に送信して，applet 上に局所的な地図(これを以降ローカルマップと呼ぶ)を提示する．このデータ量は高々数十 Byte であり画像情報に比べておよそ 1/1000 ~ 1/10000 と格段に小さい．また，ハフ変換は雑音に強く，センサの誤検出の影響を少なくする．ただ，正確なローカルマップを得るには多数のサンプリングが必要だが，リアルタイム性とはトレードオフの関係であり，タスクを考慮して適切に決定しなくてはならない．ローカルマップの生成方法は次のとおりである，まず超音波センサのサンプリング開始時の位置を原点とし，周囲の測長データのサンプリングとハフ変換が終了するまで座標系を固定する．その間，ロボットの移動量は移動ロボットの駆動軸にあるエンコーダで逐次記録しており，移動量から座標変換して固定された座標系においてハフ変換する．ハフ変換が終了するとまた新たな座標系を取り直してサンプリングを開始する．この操作を繰り返すことでローカルマップを繋げていく．図1にその様子を示す．ロボットが順路を一巡するとユーザ側には全体のマップが生成されることになる．これによりカメラから見えない方向の壁の把握ができる．

2.2 半自律走行機能による方法

超音波センサデータのハフ変換による周囲の壁までの距離と角度情報及びユーザからの動作命令からロボット

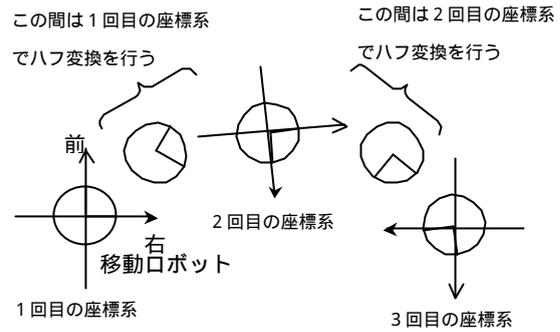


図1 ローカルマップ生成時の座標系

Fig.1 The coordinate axis of local map

の移動する方向を自動的に決定する半自律走行を実装する．この方法にはポテンシャル法を用いる．今回は障害物までの距離に反比例した反発力とユーザの指示方向のベクトル合成で動作方向を決定する方法で行う．これにより周囲の壁に接触しそうになるとユーザの意志を反映した方向に回避して安全性が高まる．またポテンシャルの局所的な最小値からはユーザからの指示で脱出する．

3. 遠隔操作ロボットシステム構成

今回試作した遠隔操作移動型監視ロボットのシステム構成を図2に示す．システム構成の主要素はユーザ PC，Web サーバ，中継サーバ，ロボット制御 PC，画像サーバ，遠隔監視ロボットであり，IP 網で繋がれている．以下にそれぞれの要素について説明する．

3.1 ユーザ PC

ユーザ PC はネットワークインターフェースを備え，Web ブラウザがインストールされている．ユーザインターフェースは Java applet を用いた Web アプリケーションであるため，OS に依存せず，Web ブラウザがあればどこからでも操作可能である．遠隔画像の表示には Java の Media Tracker クラスを用い，ローカルマップ表示には Java2D クラスを用いる．今回は GUI に Java Swing を用いているため，ブラウザに Internet Explorer (以下 IE) や

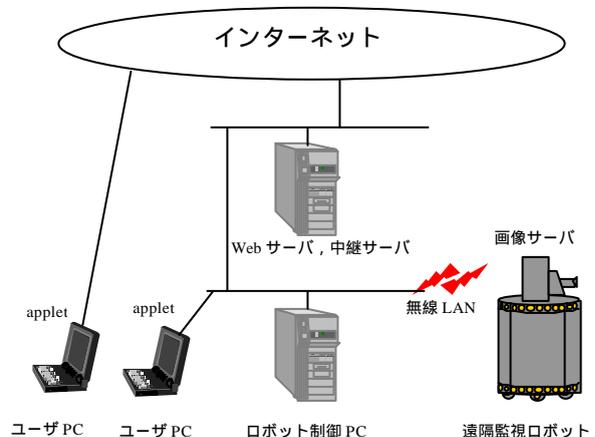


図2 システム構成

Fig.2 Components of remote control system

Netscape Navigator を用いる場合は Java Plug-in が必要であるが、アクセス時に自動で Sun サイト[7]からダウンロードする。今回の実験ではユーザ PC の OS に Windows98、ブラウザは IE5.0 を用いた。ユーザインタフェースを図 3 に示す。左上部がローカルマップ表示、左下部はバッテリーやロボットの座標情報等。右上部は遠隔画像、右下部はロボット移動やカメラコントロール、画像圧縮率変更用のスライダーなどのインタフェースを設ける。図 4 にローカルマップの一例を示す。

3.2 Web サーバ, 中継サーバ

これら 2 つのサーバは LinuxOS を用いた同一 PC 上に実装する。Web サーバには Apache server を用いる。これにロボット操作の HTML と Java クラスファイルを用意しておくことでユーザからのアクセスに応じてユーザ PC へ applet のバイトコードをダウンロードする。中継サーバはユーザ PC とロボット制御 PC とのデータ中継、ユーザ PC と画像サーバとのデータ中継及びハードディスクに遠隔画像データを格納する作業を行う。また、アクセスしてきた複数のユーザを排他制御し、ロボットの操作権利の管理もここで行う。ロボットの操作権利は先にコネクションが成立した人にある。後からアクセスしてきたユーザには操作権利が無いが遠隔画像は提示され操作者と共有する。この中継サーバは Java で実装する。

3.3 画像サーバ

画像サーバは移動ロボット上のコンピュータに実装する。役割は中継サーバを経由してユーザ PC から送られてくるデータ(画像圧縮パラメータ, カメラ動作制御パラメータ)をもとに、画像をキャプチャ、圧縮して中継サーバに画像データを送信するスレッドを生成する。送信する画像ファイルの圧縮には JPEG 圧縮方式を用いている。JPEG 圧縮には IJG(Independent JPEG Group)[8]で開発された JPEG6b ライブラリを用いる。この JPEG 画像をコマ送りで表示することで遠隔地を監視する。画像圧縮の度合いは、ユーザが applet 上のインタフェースから 100 段階で変更できる。図 5、図 6 に低圧縮率及び高圧縮率で圧縮した遠隔画像をそれぞれ示す。また、画像サーバは RS232C 経由でカメラの動作の制御も行う。これは WindowsNT 上に MS-VisualC++ で実装する。

3.4 ロボット制御用 PC

ロボット制御用 PC には主に二つの役割があり、一つは中継サーバとの通信、もう一つはロボット制御である。それぞれは別のプロセスで、共有メモリを介して通信をする。共有メモリにはユーザからの動作命令情報、ロボットからの各種データ(位置情報, 超音波センサ情報, バッテリー情報等)や更新フラグなどがあり、ここに書く情報を各プロセスが適切に処理する。ロボットからの超音波センサデータをハフ変換し、ローカルマップを生成する働きや半自律走行の制御もここで行う。これらは LinuxOS を用い C 言語で実装する。また、ロボット実機との通信は無線 LAN 経由で行う。

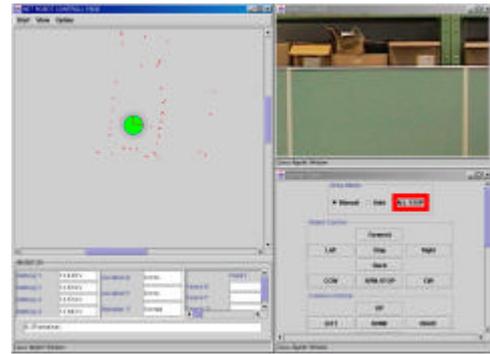


図 3 ユーザインタフェース

Fig.3 User Interface

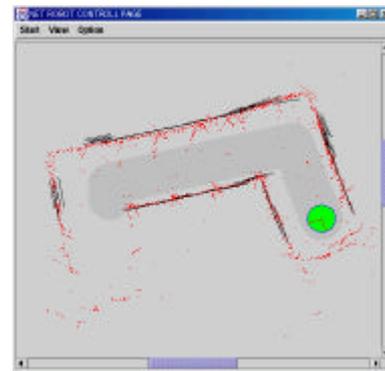


図 4 GUI 上のローカルマップ

Fig.4 Local map on the GUI



図 5 低圧縮率画像

図 6 高圧縮率画像

Fig.5 Low compressed image Fig.6 High compressed image



図 7 移動監視ロボットの外観

Fig.7 Remote Surveillance Mobile Robot

3.5 遠隔操作ロボット

図7に遠隔操作移動型監視ロボットの外観を示す。本機はNOMAD-XR400(元Nomadic Technologies,Inc.製)上にパン,チルト,ズーム可能なカメラVC-C3(Canon製)を搭載している。ロボットは前後左右斜め,回転移動が可能で,円筒の胴体には一周24個の超音波センサが上下に搭載されており,周辺の障害物までの距離を15mmの分解能でおおよそ150mmから4000mm程の範囲で取得できる。超音波センサはレーザや画像処理を用いて測長するシステムに比べて測定精度は劣るが,安価にシステムが構成でき,環境の明るさは問題にならない。更に人体に危険性がないという特徴がある。そのため市販の移動型ロボットには多用される傾向がある。

4. 提案手法の評価実験

試作した遠隔操作システムにおいて操作性の評価実験を行った。実験タスクは開始点からコの字型の通路を通過して目的地にある掲示板の文字がユーザPC上ではっきり読みとれるようにロボットの位置を微調整する。測定項目は,後述する実験条件におけるタスクに要する時間,及び操作のしやすさの主観評価であり10点満点の10段階評価とする。(操作しやすく感じる程評価ポイントが高くなる。)図8に実験に用いた通路の寸法,また図9に実験環境の写真を示す。

実験では提案手法を評価するために,1)画像圧縮率変更機能の有無による操作性への影響,2)ローカルマップ表示機能の有無による操作性への影響,3)半自律走行機能の有無による操作性への影響を調べる。1)から3)のそれぞれの機能(因子)が,有るまたは無いの2水準で実験計画を行う。この実験条件は3因子2水準の実験であり,被験者は一人あたり8通りの実験を行う。表1に8通りの実験条件を,表2にそれぞれの実験条件での特徴を示す。

これらの実験から次の3つの項目を評価する。

- (1)各提案機能の有無によるタスク完了時間の平均の差の検定。
- (2)分散分析による各提案機能の有意性の検定。
- (3)各機能付加による主観評価ポイントの変動値の評価。

5. 実験結果及び考察

実験は8人の被験者で行った。また,事前に遠隔操作の練習を行い,その後ランダムな順序で実験を行った。

5.1 各提案機能の有無によるタスク完了時間の平均の差の検定について

図10から図12に各機能(圧縮率変更機能,ローカルマップ表示機能,半自動走行機能)が有る場合と無い場合での全員のタスク完了時間を示す。なお,各ボック

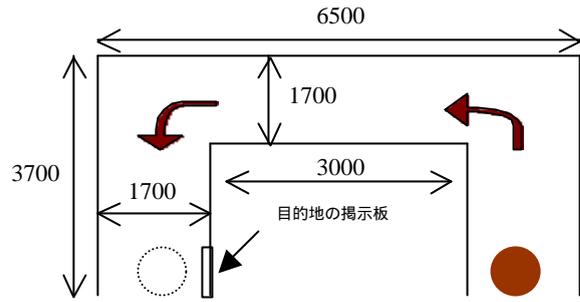


図8 実験に用いた通路

Fig.8 The path for this remote operation test



図9 実験環境

Fig.9 The surroundings of experimentation

表1 実験条件

Table.1 Experimentation condition

	圧縮率変更機能	ローカルマップ表示機能	半自律走行機能
条件1	無し	無し	無し
条件2	有り	有り	有り
条件3	有り	無し	無し
条件4	無し	有り	無し
条件5	無し	有り	有り
条件6	有り	無し	無し
条件7	無し	有り	無し
条件8	有り	無し	有り

表2 各実験条件の特徴

Table.2 The feature of the each experimentation condition

	無し	有り
圧縮率変更機能	画質変更不可 画像鮮明 約60Kbyte/枚 約4.7Frame/sec	画質変更可 画像鮮明~不鮮明 約60K~2Kbyte/枚 約4.7~6.8Frame/sec
ローカルマップ表示機能	周辺の障害物情報がGUIから得られ無い	周辺の障害物情報がGUIから得られる。
半自律走行機能	すべてマニュアル操作	自動で静止障害物を回避

スチャートの髭の上下はそれぞれ最大値，最小値，箱の中央は平均値，箱の上下は平均値に標準偏差を加減した値を示している．更に図 10 から図 12 のそれぞれの機能が有る場合と無い場合において，タスク完了時間の平均の差の検定を行った．(ここではサンプル数大として近似的に正規分布に従うとした．) 結果を表 3 に示す．

表 3 よりローカルマップ表示機能と半自律走行機能は，両方ともその機能がある場合と無い場合でタスク完了時間の母平均が同一であるという帰無仮説は棄却された．従って，この二つの機能はタスク完了時間を短縮させるのに有効であることが示された．また，画像圧縮率変更機能は棄却域に入らないことからタスク完了時間に影響を与えていないことが示された．その理由は今回の実験は所内 LAN で行ったため，各実験条件の特徴(表 2)にもあるように，画像データ量が変化しても画像更新レートはあまり変化が無いためであると考えられる．このことは，今回のタスクにおいて画像圧縮率が上がり画質が少々悪くなくても更新レートが保たれれば操作にあまり影響が無いことを意味している．すなわち，今回のような高品質な画像を要求しないタスクの場合はこのようなインターフェースが用意されていると，余計なネットワーク負荷をかけないで済むと考える．

5.2 分散分析による各提案機能の有意性の検定

全員のデータからタスク完了時間に影響を与えている要因を分散分析で調べた．表 4 に分散分析表を示す．この結果から，ローカルマップ表示機能と半自律走行機能はタスク完了時間を変動させるのに，1%の有意水準においても有意であることがわかる．今回の遠隔操作タスクにおいては，これら 2 つの提案手法は有効であるといえるが画像圧縮率変更機能は有意ではないといえる．このことは 5.1 節と同様に解釈することができる．

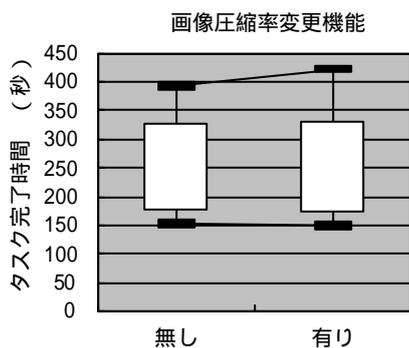


図 10 圧縮率変更機能の有無とタスク完了時間
Fig.10 The relation between the image compress function and the task completion time

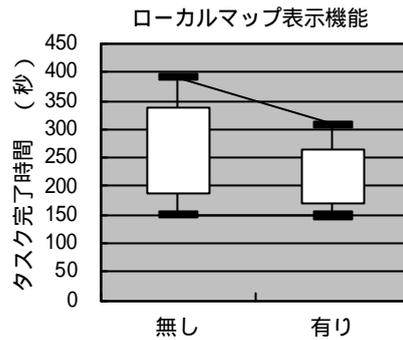


図 11 ローカルマップ表示機能の有無とタスク完了時間
Fig.11 The relation between local map indication function and the task completion time

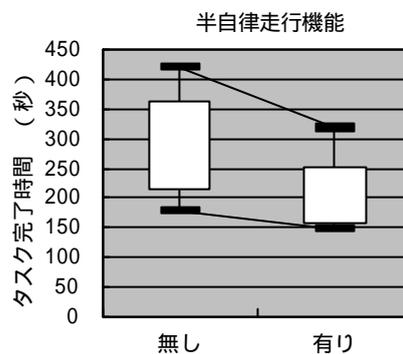


図 12 半自律走行機能の有無とタスク完了時間
Fig.12 The relation between the semi-auto driving function and the task completion time

表 3 タスク完了時間の平均の差の検定

Table.3 Statistical test of hypotheses of difference in the task completion average time

	Z	判定	備考
画像圧縮率変更機能	0.013		$ Z > Z_{0.05} = 1.96$
ローカルマップ表示機能	2.654	**	$ Z > Z_{0.01} = 2.58$
半自律走行機能	5.191	**	

表 4 分散分析表

Table.4 Dispersion analysis table

要因	SS	f	V	F	判定	備考
M	532383.0	1	532383.0	-		F ₄ 7.7 21.2
A	20.3	1	20.3	0.13		
B	4680.3	1	4680.3	29.12	**	
C	16562.0	1	16562.0	103.03	**	
e	642.0	4	160.7			
計	554288.6	8	-	-		

M: 平均 e: 残差 A: 画像圧縮率変更機能
B: ローカルマップ表示機能 C: 半自律走行機能
*: 有意水準0.05 **: 有意水準0.01

5.3 各機能付加による主観評価ポイントの変動値の評価

本節では各機能を付加することにより評価ポイントがどの程度変動するのかを8つの実験条件から導かれる評価ポイントの分解式の連立方程式より推定した。この評価ポイントの変動値(推定値)が正に大きいほど操作をやりやすく感じたことを表す。また逆に負になれば操作がやりにくくなったということになる。図13に被験者全員の各機能付加による評価ポイントの変動値の最大値、最小値、平均値を示す。

この結果から、ローカルマップ表示機能と半自律走行機能の評価ポイントの変動値が高いことがわかる。また、この二つは全員の評価ポイントの変動値が正にあり、被験者全員がこれらの機能により操作が容易になると感じていることがわかる。画像圧縮変更機能においては、評価ポイントが負の値になっている被験者もいる。これは被験者の中にはこの機能がない方が操作は容易と感じる人がいることがわかる。5.1節と5.2節の結果と照らし合わせてみると、主観的な評価ポイントの変動値が上昇するとタスク完了時間が短縮すると考察できる。

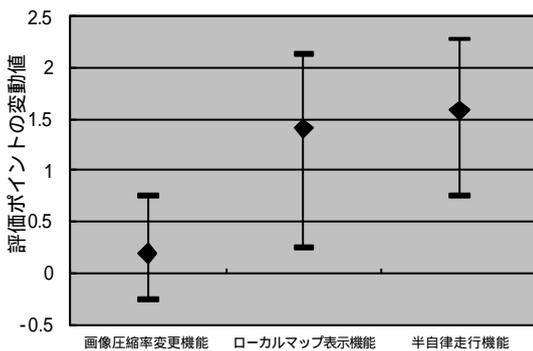


図13 各機能付加時の主観評価ポイントの変動
Fig.13 Subjective score of the each function

6. まとめ

本研究ではWebブラウザをユーザインタフェースとするIP網を用いた遠隔操作監視移動ロボットのシステム

を試作した。また、IP網での通信データの転送遅延や遅延揺らぎによる操作性悪化を補うアプリケーションレベルでの手法を提案してシステムに実装した。遠隔操作実験を行い、その結果を処理して評価してみたところ、提案する機能の一つである超音波センサを用いたローカルマップを表示するインターフェースは通信データの削減の面や操作性の向上の面で有効であった。また、ロボットの半自律走行機能は、ローカルマップ表示機能よりも操作性の向上に有効であり、主観評価もよい傾向がみられた。一方、画像圧縮変更機能は今回の実験タスクにおいては操作性や被験者の主観評価には影響を与えていなかった。

今後は、このような遠隔操作システムを本研究所のロボットプロジェクト(介護、福祉、癒し)において福祉支援の研究に応用して行く予定である。

文献

- [1] Brian E. CARPENTER 寺元昌作(訳): “通信インフラストラクチャを目指したIPネットワーク” 電子情報通信学会誌 Vol.83 No.4 pp.257-262 2000年4月
- [2] 米田進: “IP系伝送技術の動向” 電子情報通信学会誌 Vol.83 No.4 pp.276-279 2000年4月
- [3] 平松, 森, 納谷, 大里: “Javaアプレットを用いたネットワーク型ロボットインタフェース” 情報処学会論文誌 pp.3315-3323 Dec.1998
- [4] 前山, 油田, 原田: “移動ロボットの遠隔操作による美術館鑑賞” 日本ロボット学会誌 Vol.17 No.4, pp.486-489, 1999
- [5] 例えば, 松丸隆文: “通信回線ISDNを介したロボットの遠隔操作” 日本ロボット学会誌 Vol17 No.4, pp481-485, 1999
- [6] 森俊二, 板倉梅子: “画像認識の基礎” オーム社1990
- [7] Java Plug-in URL http://java.sun.com/products/plugin/index_ja.html
- [8] IJG jpeg6b Library URL <http://www.ijg.org/>

タイルの色彩評価に関する研究

尾畑 成造* 水野 正敏** 高山 定次* 棚橋 英樹

Study of Color Quality Control for Tile

Seizo Obata* Masatoshi Mizuno** Sadatsugu Takayama* Hideki Tanahashi

あらまし タイル製造において特に自動化が進んでいない工程の中に検査工程があり、この工程の省力化が望まれている。本研究では検査工程における自動検査システムの開発を目的に、色彩変化に大きな影響を与える酸化鉄含有量と焼成温度に着目して、色彩管理を容易にするためのより正確な識別手法の検討と有用な評価方法について検討した。今回の結果から色彩管理を行う場合には原料組成、酸化鉄含有量の変化は色相、彩度による評価が、焼成温度については吸水率の変化を加味した明度、彩度による評価が有効であることがわかった。

キーワード タイル, 色, 検査システム

1. まえがき

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・紙貼からなり、その形状のために成形から焼成工程に至るまでは自動化が進んでいる。しかし検査工程についてはそのほとんどが手作業に頼っている。

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[1][2]は、CCDカメラを用いての画像取得及び処理を行うことでタイルの色彩分類と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、十分な検査方法が提案されているとは言い難い。

そこで昨年、検査の難しい色彩検査について現在の市販の測定機器がどの程度適用できるか検討した結果、タイルの色彩検査で良品、不良品の判定は可能であったが良品中の色濃度の識別に課題があることを報告した[3]。この色濃度の違いを把握、管理することはタイル張りの微妙な配色を行う上で重要である。

今年、色濃度の管理までを行うには、取得データのみでの判断が困難であることから、正確な識別手法を加味させた実際の検査工程で満足する検査システムの開発を試みた。今回はタイル原料成分中で色変化に大きな影響を及ぼす酸化鉄の含有量を変化させ、酸化鉄含有量と焼成温度が色彩に与える影響を把握し、色彩管理を行ううえでの有効な識別手法について検討した。

2. 実験方法

酸化鉄(Fe_2O_3)含有量の異なる3種の原料[小原赤土(Fe_2O_3 :3.68%)、高田赤土(Fe_2O_3 :1.74%)、市販磁器土(Fe_2O_3 :0.45%)]を使用した。小原赤土と高田赤土を種々の割合で混合したものに磁器土を0~30%添加し泥漿を調整し、これを乾燥、造粒して顆粒を作製した。その後プレス成形して成形体を得、これを1050~1250℃付近で焼成した。焼成温度は(財)JFCC製のリファサーモにて決定した。測色については村上色彩技術研究所製の高速分光光度計(CMS-500)を用いて、この分光光度計は可視領域(390~790nm)についての分光反射率を測定、このデータからJIS Z 8701のXYZ表色系及びJIS Z 8729の $L^*a^*b^*$ 表色系を算出させた。また算出した $L^*a^*b^*$ から彩度: C^* 、色相: h および色彩管理でよく使われる色差: E^*_{ab} についても算出した。ここで L^* は明度を、 a^* 、 b^* は彩度色相を表す指標であり、 a^* 及び b^* の正方向は赤色、黄色を、負方向で緑色、青色を示す。 E^*_{ab} で色彩評価する場合、この値が1.2以上であると差があるとされ、それ以下では確率的な判断がなされる。特に0.4以下になると熟練者でも識別困難であるといわれている[4]。

3. 実験結果

3.1 酸化鉄含有量における色彩変化

1200℃焼成したタイルを使用し、酸化鉄含有量及び、原料混合比の違いによる色彩の変化について検討した。

図1に酸化鉄含有量に対する $L^*a^*b^*$ の変化を示す。酸化鉄含有量の増加に従って徐々に L^* は減少する傾向が、 a^* は徐々に増加する傾向がみられる。この L^* 、 a^* の2つの値は原料混合比の影響はあまりみられない。

* 兼セラミックス技術研究所

**セラミックス技術研究所

Institute for Ceramics Research & Technology

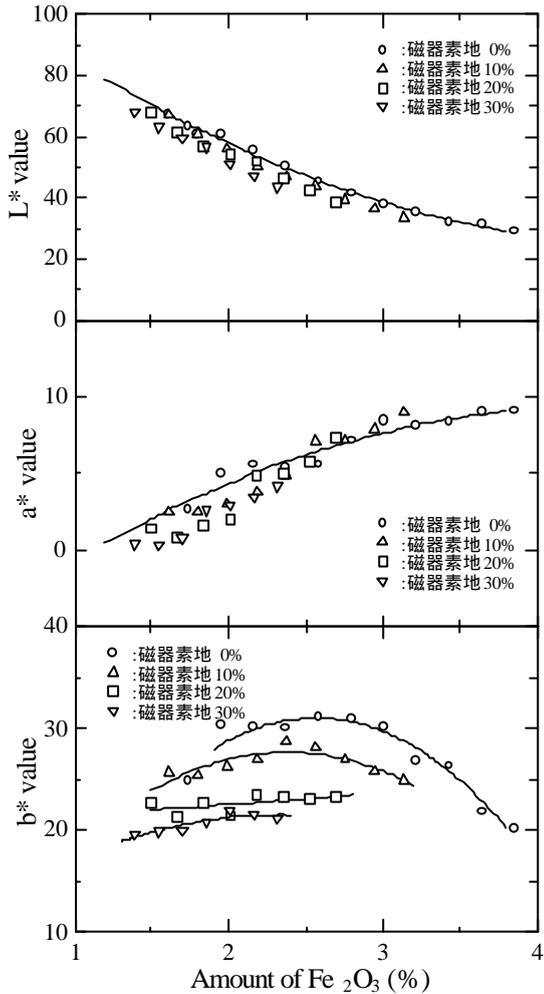


図1 酸化鉄含有量に対する L*,a*,b* の変化
Fig.1 Effect on L*,a* and b* value as a function of the various amount of Fe₂O₃

また、酸化鉄含有量が増加するに従って L* の勾配が緩やかになることから酸化鉄含有量の少ない組成ほど色彩に敏感に影響を与えているものといえる。また a* についても L* と同様に原料混合比よりも、酸化鉄含有量に影響を受けていることがわかる。これから酸化鉄含有量変化に対して L*, a* を用いることが有効であると考えられる。一方、b* は原料の混合比により異なった挙動を示し、磁器土が占める割合が大きくなるにしたがって、b* は減少するとともに、酸化鉄含有量の変化に対する b* の変化は少なくなっている。このため原料の Lot 変更時などは b* を使用することが好ましい。

図2 に酸化鉄含有量に対する E*_{ab}, C*, h の変化を示す。E*_{ab} は原料混合比の影響はほとんどみられず、酸化鉄含有量の増加とともに減少している。C* は b* 同様な傾向を示している。h は直線的に減少しており色相も変化していることがわかる。ここで L*, a*, b* それぞれの寄与率を算出してみると酸化鉄 1~4% の含有量で L* の寄与率が 90~50%, a* が 0~15%, b* が 10~30% であり、

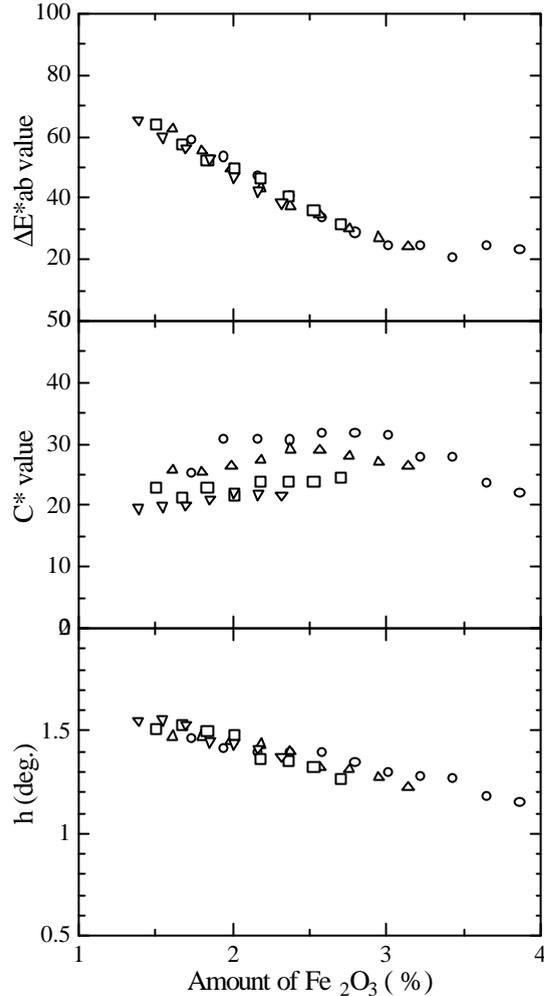


図2 酸化鉄含有量に対する E*_{ab},C*,h の変化
Fig.2 Effect on E*_{ab},C* and h value as a function of the various amount of Fe₂O₃

通常色差として用いられる E*_{ab} による評価では b* で見られる原料の影響がほとんどなくなり、正確な色彩管理は困難である。また色相、彩度ともに変化するために両者を考慮する必要がある。このことから原料の Lot や種類の違いによる製品への色彩の影響は h および C* で判断する事が有効であると考えられる。

3.1 焼成温度における色彩変化

次に上記結果からもっとも酸化鉄含有量が多く色差の変化が少ない意向を示す小原赤土を種々の焼成温度で焼成し、焼成温度に対する色彩変化について評価した。またタイルの焼結状況を調べるために吸水率、収縮率、かさ密度についても測定した。

図3 に焼成温度に対する L*, a*, b* の変化を、図4 に E*_{ab}, C*, h を示す。L* は焼成温度の上昇とともに減少し、1180 °C ではほぼ一定の値を示した。一方、a* は 1130 °C 付近まで緩やかに、その後 1180 °C 付近まで急激に減少し、これ以上の温度でまた緩やかに減少した。b* についても a* と同様の挙動を示している。一方、色相 h の変化は酸

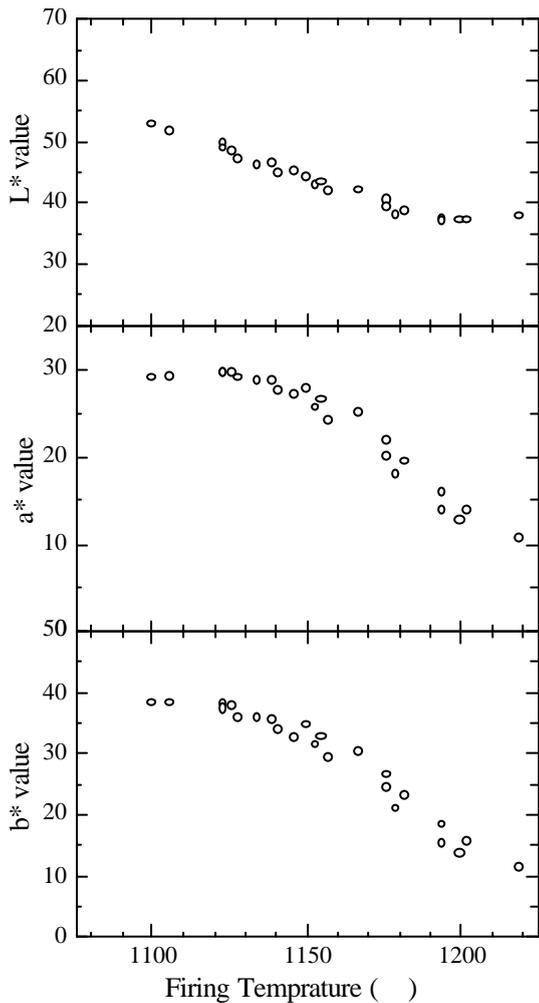


図3 焼成温度に対する L^* , a^* , b^* の変化

Fig.3 Effect on L^* , a^* and b^* value as a function of firing temperature

化鉄 1.5~4%では約 0.2 と小さく、焼成温度は色相変化に影響を及ぼさないことがわかる。 E^*_{ab} は L^* の寄与率 45~70%と過半数を超えていることから L^* の影響を大きく受けるために L^* と同様の変化を示している。 C^* は h^* がほぼ一定であることから色相変化がなく、 a^* 、 b^* と同様の変化を示している。

次に、焼成温度に対して変化する別のファクターであり、焼き締りの目安とされている、吸水率を用いてこの値と色彩の関係について検討した。

図からわかるように色相変化についてはタイルの焼き締りが大きく影響している。特に a^* , b^* は吸水率がほとんどなくなる直前、言い換えれば焼き締まる直前で発色が大きく変化している。吸水率が 2%までは a^* , b^* とともにだだやかな減少を示し、2%から 0.5%への減少では直線的に減少し、0.5%以下ではさらに急激に減少している。この変化は C^* も同様である。一方、 L^* は吸水率に対してほぼ直線的に減少しており、吸水率がゼロに近づいた部分で a^* , b^* と異なり、変化が見られなくなっている。

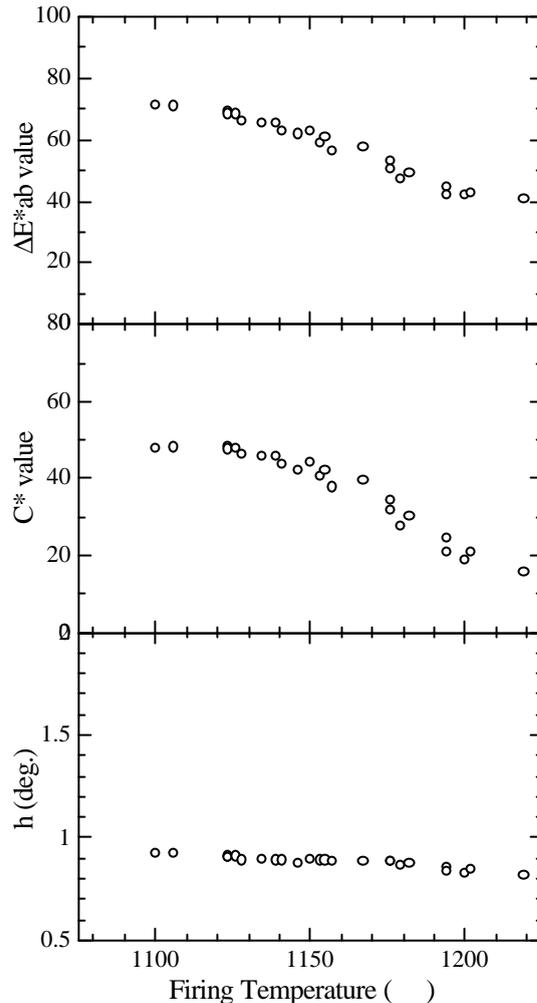


図4 焼成温度に対する E^*_{ab} , C^* , h の変化

Fig.4 Effect on E^*_{ab} , C^* and h value as a function of firing temperature

これは吸水率が高く、焼き締まっていない部分では表面粗さが高く、表面の凹凸から白く見える。焼き締まり始めるにしたがってタイルの構成相内のガラス成分が増加し、酸化鉄の発色がよくなるため、及び表面粗さの減少により L^* の減少が起こる。その後、焼き締まってしまふことで、これらの表面粗さの変化はほとんどなくなり、ガラス成分の増加が緩やかになっているために L^* の変化が少なくなっていると考えられる。これらのことから焼成温度に対する色彩管理は E^*_{ab} ないし C^* と L^* で評価すればいいと考えられる。

なお、吸水率で今回プロットしたが、収縮率、かさ密度でプロットした場合も同様の挙動を示したことから、今回の結果については有効な指標のひとつと考えられる。

昨年のタイル製造業者及び窯製造メーカーからの聞き取り調査では焼成条件により異なるものの、トンネルキルンでの炉内温度ムラは約 30℃、ローラーハースキルンで 10~20℃であり、これを考慮すると 10℃ の温度差による色変化を識別可能とするためにはより変化率の大きな手

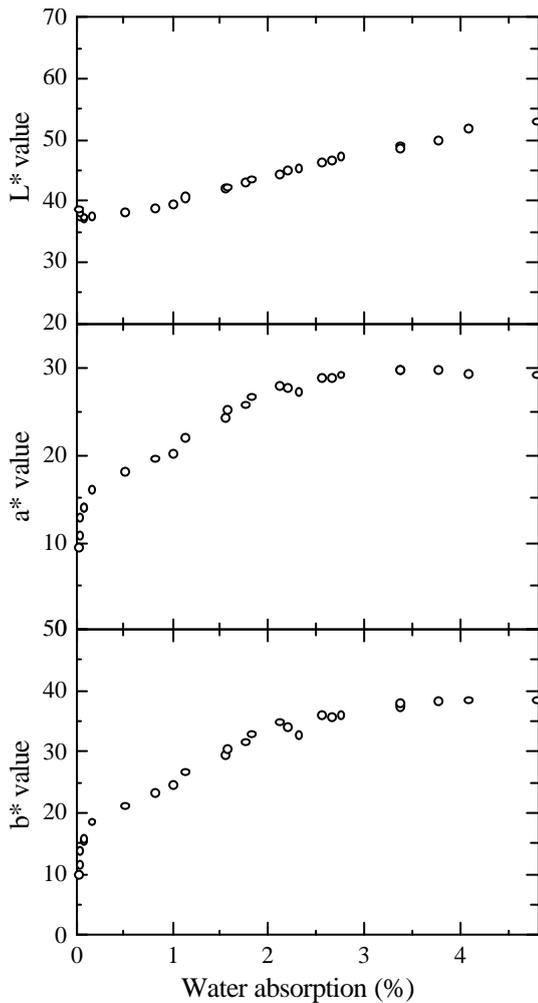


図5 タイルの吸水率に対する L*,a*,b*の変化
 Fig.5 Effect on L*,a* and b* value as a function of Water absorption of Tile

法が望まれる。この点をからも今回の結果からは吸水率などの物性値によるファクターを加味した L*及び C*の併用が有効であると考えられる。

4. まとめ

今回の結果から色彩管理を行う場合には原料組成、酸化鉄含有量の違い、焼成温度の変化などの変化する項目によっては色差 E*ab による評価のみでは不十分であり、L*,a*,b*などといった測定データの傾向を把握し、評価項目を検討する必要があることがわかった。

原料組成及び酸化鉄含有量の変化では色相、彩度による評価が、焼成温度については吸水率、収縮率、かさ密度といった物性値の変化を加味した明度、彩度による評価が有効であることがわかった。

文献

- [1]盛田耕作,水野金儀,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研究報告, No.20, pp101-107,1984
- [2]盛田耕作,松生秀正,水野金儀,“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研究報告, No.21, pp101-106,1985
- [3]高山定次,尾畑成造“陶磁器製品の新プロセッシングの開発”岐阜県生産情報技術研究所研究報告, No.1,2000
- [4]平井敏夫,“色彩管理の基礎と実際”,日本電色工業株式会社 pp41-44,平成 12 年度版

丸編みと同調させた系のインクジェット染色技術の開発（第2報）

奥村 和之* 小河 廣茂*

Development of Ink-jet Yarn Printing Technology Synchronized with the Circular Knitting()

Kazuyuki Okumura* and Hiroshige Ogawa*

あらまし 一般に、ニット製品における色柄は、色系替えによる柄出し、複数の色系を多層に編み込むジャガード、或いは、製布後のプリントが広く知られている。本研究では、色柄ニット製品生産工程の合理化、クイックレスポンス、及び、ニット製品の高付加価値化を目的として、丸編機給糸口手前において、編成動作と同調させて原系のインクジェット染色を行い、ピクセル画像をニットの色柄として出力する新規の色柄ニット生産技術を検討する。

検討の結果、丸編機回転数 15.6rpm、糸速 120m/min の編成速度において、出力用画像の1ピクセルが丸編組織の1ループに対応した多色柄ニットを生産できることを確認した。

キーワード インク、ジェット、染色、丸編機、ニット、糸、色柄

1. まえがき

現在の繊維製造業では、深刻な消費不振の影響によって加工賃の低下と多品種少ロット化が進んでいる。特に、製布製造業においては、これまで生産の高速化に主眼をおいた設備投資が行われてきており、多品種少ロットでかつ高付加価値製品の生産システムへの対応が遅れている。消費の低迷する現在では、多様な消費者ニーズに即応した高付加価値製品を無駄なくクイックレスポンス生産できるシステムが求められている。

昨今、多品種少ロット生産システムの一つとしてインクジェット染色技術が注目され、いくつかの布帛用インクジェットプリンタが開発されている[1][2]。また、このインクジェットプリント技術を製布工程に応用した例もいくつか報告されており、製織工程の経糸をあらかじめインクジェットプリントするほぐし捺染技術の研究報告[3][4]、横編機の布帛巻き取り機構直前で布帛にインクジェットプリントする技術の特許[5]、糸をインクジェット染色しながら紐編みして一旦貯留し、その後、横編機に糸を供給して編成する技術の特許[6]等がみられる。しかし、編成動作と同調させながら原糸をインクジェット染色し、色柄を編成する技術の検討はなされていない。

ニット製品における色柄の編成技術には、色系替えによる柄出し、複数の色系を多層に編み込むジャガードが広く知られている。これら方法では、あらかじめデザインされ

*応用担当 製品技術研究所兼務

Application Division, Hashima-gun Kasamatu-cho

た色柄に応じた色系を手当と色系の在庫管理が必要である。色系の手当が間に合わない場合は、生産が中断され、生産計画にないデザイン変更があった場合は、手当した色系が無駄となる。また、色系替えによる柄出しは、頻りに色系をつなぎ替えることが困難なため色柄が制限される。ジャガードでは糸を多層に編み込むため、生地が必然的に厚くなるとともに層の数に比例して製布時間が長くなる。製布後のプリントでは色柄に制限はないものの表面的な柄表現にとどまり、編み組織と柄の位置合わせも困難となる。

本研究では、色系の手当が不要で色柄の変更も容易な編成システムを実現するため、丸編機の編成動作と同調させながら給糸口手前で原糸をインクジェット染色することにより、あらかじめデザインされた色柄を編成する新規技術を検討する。昨年度は、汎用のスプレーバルブを用いて糸の染色を行うととし、丸編機に設置した近接スイッチより計測される丸編機の回転速度に同調して染色動作を制御するシステムを検討した。その結果、最大6ループの着色位置のズレが認められたが、丸編機回転数 2.6rpm~10.4rpm の編成速度において色柄が編成されることを確認した。

本年度は、色柄精度の改善と生産速度の向上を目的として、光ファイバセンサによる編成動作の計測、高速なスプレ方式インクジェットノズルによる染色、及び、リアルタイム OS による制御を検討する。

2. ハードウェア構成

ハードウェア構成を図1に示す。

本システムは、丸編機((株)福原精機製作所,型式 PFW, 釜直径 660mm, 針数 1500 本, 針間隔 18 本/25.4mm, 回転速度 15.6rpm), 丸編機電源用インバータ(AC200V 3PHASE 0_60Hz), 丸編機動作計測用光ファイバセンサ((株)キーエンス製 FS-M1H, FU-21X, F-2HA, 応答時間 20 μ s), インクジェットノズルとそのコントローラ, ((株)エルエーシー製, スプレ方式, 許容エア圧力 0.4MPa 以下, 応答時間 100 μ s, オープンコレクタ駆動), ノズル用エアコンプレッサ, 入力回路, 出力回路, ヒータ(アルミニウム板 400mm \times 150mm \times 5mm 2 枚, シリコンラバーヒータ 400mm \times 150mm 360W 2 枚), 温度センサ, 計測制御用 PC, 及び, 電源からなる.

丸編機の給糸口事前にインクジェットノズルとヒータを固定し, 複数のノントルクローラーガイド(湯浅糸道工業(株)製 B202020)を利用して, インクジェットノズルからヒータ, 及び, 編機給糸口にわたる糸道を形成する(図 2). ヒータ面の上下で原糸を回転させ, その回転数により乾燥工程長を 40cm, 120cm, 200cm, 280cm と変更可能する. 又, インクジェットノズルからのエアによって糸道が乱れないように, インクジェットノズル先端近傍から前後 5mm の位置に固定ガイドを取り付ける.

丸編みの編目は, 針溝が刻まれたシリンダ状の針床とその針溝に納められた編針が円周方向に回転し, 針床外周に固定されたカムによって編針が溝方向に往復動作するごとに形成される. したがって, 一つの針溝がカムを通過するごとに一つの編み目が形成される. そこで, 編成動作の計測は針床外周の一点に光ファイバセンサを固定し(図 3), 1500 本の針溝の通過を検出することによって行う. 入出力インターフェイスには PC マザーボードに内蔵されるパラ

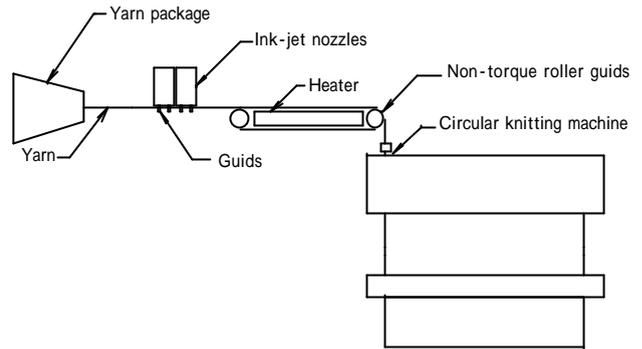


図 2 インクジェットノズルから丸編機までの糸道
Fig.2 Layout of yarn guides from ink-jet nozzles to the knitting machine

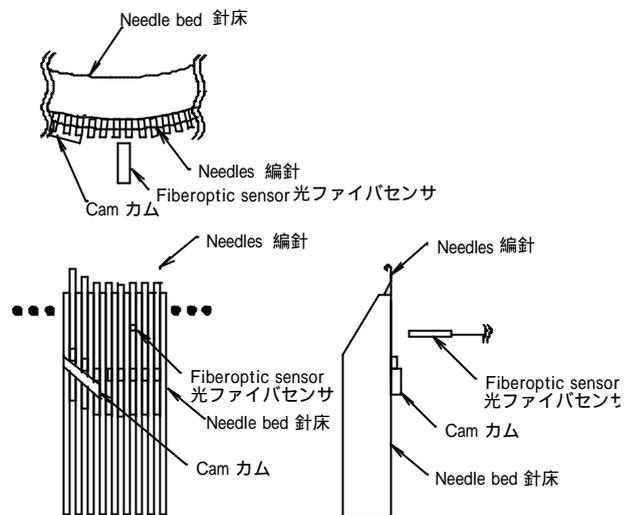


図 3 光ファイバセンサの配置
Fig.3 Layout of fiberoptic sensor

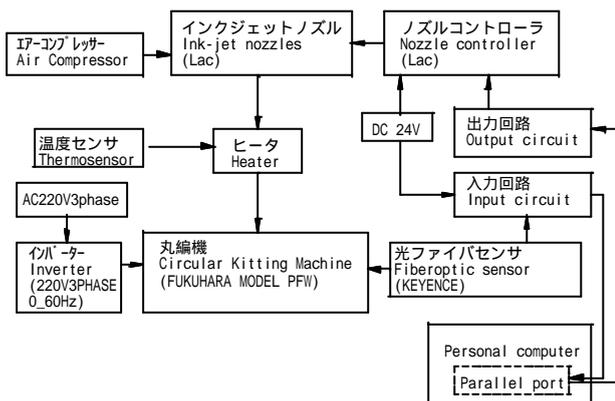


図 1 ハードウェア構成
Fig.1 Components of Hardware

表 1 実験に使用した PC の構成

Table 1 PC in the experiment	
CPU	AMD Athron Processor 700MHz
Motherboard	EpoX EP-K7XA
Memory	256M SDRAM
Interface	Parallel port on Motherboard

レルポートを使用する. 表 1 に実験に使用した PC の構成を示す.

3. ソフトウェア構成

インクジェットノズルの制御には 100 μ s 間隔のリアルタイム処理が要求される. また, 出力データの表示と出力開始・終了命令, 及び, 出力経過表示を行う GUI アプリケーションも必要である. そこで, 計測制御用 PC の OS にはハードリアルタイム性と GUI 開発環境が整ったリアルタイム Linux を利用する.

本実験では OS に RTLinux(Linux をタイムクリティカルなリアルタイムタスクに対応させる拡張するモジュール. [7]Intel MMX Pentium 233MHz 程度の CPU でも 10 μ s 間隔の平行ポート出力が可能. [8][9])によってハードリアルタイム拡張した Linux を採用し, リアルタイム周期タスクによって編成動作の計測, 及び, インクジェットノズルの制御を行う.

出力する画像データのフォーマットは高さ 1000 ピクセル以内、幅 1500 ピクセルの 24 ビット BMP とし、出力データの表示とリアルタイム系タスクに周期動作指示を与える GUI プログラムの部分は、非リアルタイム系の処理として、GTK+[10]を利用して作成する。また、GUI 開発ツールとして Glade[11]を使用する。

本実験の開発環境を表 2 に、制御フロー図を図 4 に、作成する GUI アプリケーションのレイアウトを図 5 に、タスク関連図を図 6 にそれぞれ示す。

RT-Linux モジュールは以下の 2 つのリアルタイム周期タスクを生成する。

1.RT-Task1

初期設定値 40 μ s の周期で動作し、光ファイバセンサの出力信号をサンプリングする。光ファイバセンサを通過した針溝をカウントし、編成される編目数(たて方向、よこ方向)を変数に格納する。たて方向の編目数が更新されたときには、このときの編目数を RT-FIFO に転送し、非リアルタイム系 GUI アプリケーション側において出力進行状況を表示させる。タスク優先度は 5 に設定。

2.RT-task2

初期設定値 100 μ s の周期で動作する。RT-task1 によりカウントされる編目数と GUI アプリケーションより送られる編目数ごとの色情報を参照し、インクジェットノズルの開閉命令をパラレルポートに出力する。タスク優先度は 4 に設定。

表 2 開発環境

Table 2 The development enviroment	
OS	Laser5 Linux 6.2(Kernel 2.2.14)
RT-Linux	RT-Linux 2.2
Compiler	glibc 2.1.3
X Window	Xfree86 3.3.6
GUI Library	GTK+ 1.2.7
GUI Tool	Glade 0.5.13

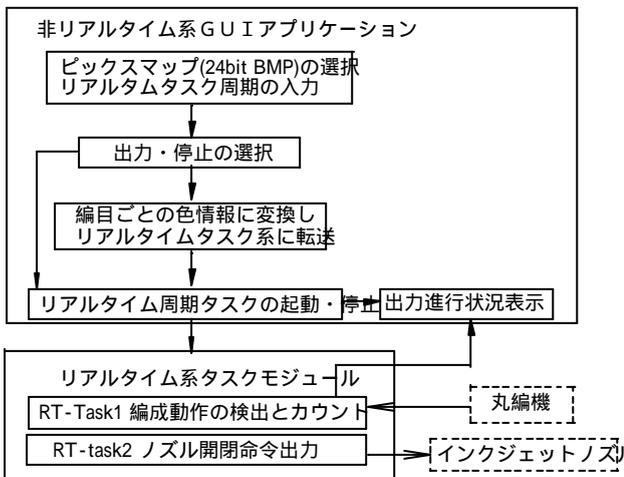


図 4 制御フロー図

Fig.4 Control flow chart

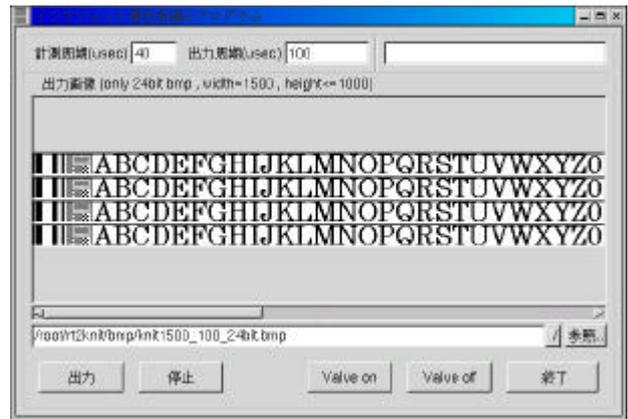


図 5 GUI アプリケーションのレイアウト

Fig.5 The layout of the GUI application software

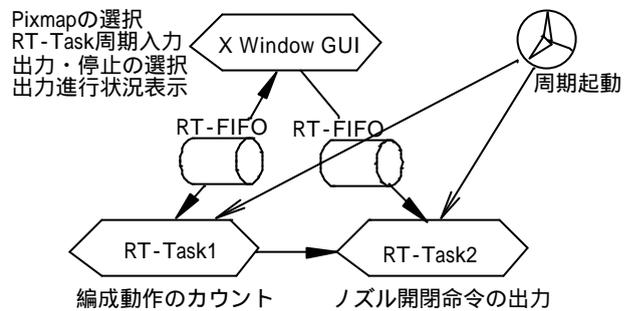


図 6 タスク関連図

Fig.6 The relationship of tasks

表 3 実験に使用したインク

Table 3 Ink in experiment	
1	顔料インク Yellow KW/PJ (KIWA CHEMICAL)
2	顔料インク Magenta KW/PJ (KIWA CHEMICAL)
3	顔料インク Cyan KW/PJ (KIWA CHEMICAL)
4	顔料インク Black KW/PJ (KIWA CHEMICAL)
5	熱昇華転写インク Jet Yellow T(KIWA CHEMICAL)
6	熱昇華転写インク Jet Magenta T(KIWA CHEMICAL)
7	熱昇華転写インク Jet Cyan T(KIWA CHEMICAL)
8	熱昇華転写インク Jet Black T(KIWA CHEMICAL)

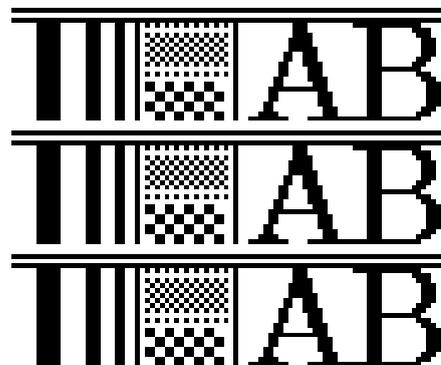
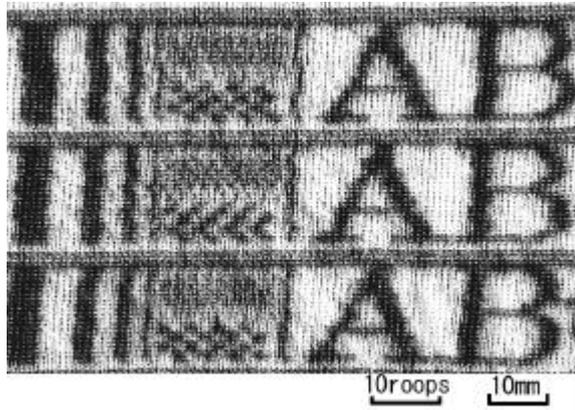


図 7 出力するピクスマップの一部

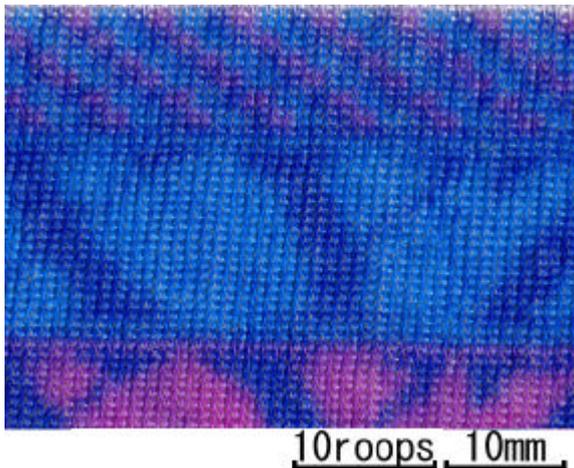
Fig.7 A part of the pixmap in printing

4. 染色編成実験

構築したシステムとポリエステルフィラメント加工系(150d,30filament),及び,市販水系インク(表3)を用いてピクスマップ(図7)の出力を行う。出力される色柄のズレ及び滲みを目視で評価する。



(a)単色柄(mono color)



(b)3色柄(three colors)

図8 出力された色柄

(丸編機回転数 15.6rpm,糸速,120m/min)

Fig.8 colored knit

(Circular knitting speed 15.6rpm,yarn speed 120m/min)

5. 結果及び考察

丸編機回転数 15.6rpm(装置のフルスピード),糸速 120m/min インク吐出量 0.01mL/s,加熱工程長 120cm,加熱ヒータ温度 190 の条件で出力した単色柄と,MagentaとCyanの2ノズルによるMagenta,Cyan,Blue3色柄の出力結果を図8に示す。

色柄のズレを目視で評価したところ,ほぼ1編目以内の誤差で出力されることが確認できた。顔料インクの発色は良好で滲みもほとんど見られなかった(但し,後処理として樹脂による固着処理が必要)。昇華転写用インクの場合についても滲みはほとんどみられなかったが,発色はやや

不十分で,編成後の発色処理(加熱或いは蒸熱)が別に必要であった。

6. まとめ

本研究では,丸編機給糸口における原糸のインクジェット染色と編成動作とを同調させて同時に行う新規の色柄ニット生産技術について検討した。この結果,次のことが確認された。

1. 丸編機回転数 15.6rpm(フルスピード),インク吐出量 0.01mL/s,加熱工程長 120cm,加熱ヒータ温度 190 の条件下で,1編目以内の誤差でニット組織上にピクセル画像を出力できることを確認した。
2. 複数のインクジェットノズルを使用することにより,容易に多色柄のニットを生産できることを確認した。

謝辞

本研究は,(株)エルエーシーと共同で行ったものであり,多大なご協力をいただいた(株)エルエーシー 代表取締役 買場様に感謝の意を表します。

文献

- [1]加藤孝行,双木武政,松木和正,“インクジェット捺染システム Nasserger KS-160 の開発,” Konica Tech Rep,vol.11,pp.65-68,1998.
- [2]草木一男,“捺染手帖 ワンダープリントについて,”繊維加工,vol.49,no.13pp.638-644,1997.
- [3]斎藤洋,寺島征四郎,安部一男,“インクジェットプリントシステムによる絹織物試作”山形県工業技術センター報告,no.28,pp.21-25,1997.
- [4]金子亮,井ヶ田幸生,“ほぐし捺染技術の高度化・省力化に関する研究 ほぐし捺染の高度化に関する研究,” 埼玉県繊維工業試験場研究報告,vol.1995,pp.53-58,1996.
- [5]金谷義博,広崎幸雄,“公開特許公報 横編同時インクジェット染色法”,特開平 07-070953,1995.
- [6] 島正博,“公開特許公報 アパレルシステム及びそれに用いるリリアン編機”,特開平 08-311753,1996.
- [7]RTLinux home page,“<http://www.rtlinux.org/>”,(2001 3月 1日現在).
- [8] 船木陸議,“RT-Linux の導入とプログラミングの基礎知識,”Interface 増刊 技術者のための UNIX 系 OS 入門,山岸誠仁(編),CQ 出版社,東京,pp88_93,2000.
- [9] 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.
- [10]GTK+ home page,“<http://www.gtk.org/>”,(2001 3月 1日現在).
- [11]Glade home page,“<http://www.glade.pn.org/>”,(2001 3月 1日現在).

二重織物のデザインシミュレーションの研究(第2報)

小河 廣茂* 奥村 和之*

Design Simulation of Double Cloth

Hiroshige Ogawa* and Kazuyuki Okumura*

あらまし 織布製造業では、試作品のコスト低減や期間短縮などの目的に、多くの織物用デザインシステムが開発され用いられている。現在利用されているデザインシステムは、一重組織の織物デザインをシミュレーションするように開発されている。このデザインシミュレーションシステムでは二重織のような重ね組織のデザインをシミュレーションすることができない。

本研究では、二重織のデザインをシミュレーションするために、簡単な方法で組織図からZバッファの値を求めることにより、織物のデザインを可視化するソフトウェアを開発する。

本手法によって、二重織の織物のデザインをシミュレーションできる使い易いソフトウェアを開発した。
キーワード 二重織, シミュレーション, 織物デザイン, 織物, コンピュータグラフィックス

1. まえがき

コンピュータグラフィックが開発されるとともに、繊維業界では、デザイン開発の分野でその利用を始めた。コンピュータグラフィックが利用されるようになった初期の頃は、コンピュータが高価であり、グラフィックス機能が貧弱で、かつ処理速度が遅かった。また、デザイナーが満足するレベルのカラー出力装置もなかった。このため、コンピュータグラフィックスの利用は、一部に限られていた。しかし、今では、それらが相当に改良されて、アパレルデザインやテキスタイルデザインにコンピュータを利用することが当たり前になり、プレゼンテーションやカタログ見本、インターネット等に幅広く利用されている。

織物業の分野でも、試作品のコスト低減や期間短縮などの目的に、多くの織物用デザインシステムが利用されている。現在のデザインシステムは、一重組織の織物のデザインをシミュレーションするように開発されている。一重組織の織物とは、Yシャツの生地のように経糸と緯糸が一定規則の元に直交してすきまなく並べられているものである。このような一重組織の織物のシミュレーションは簡単にできる。

しかし、一重組織でない織物のデザインシミュレーションに関しては現在のところ、テキスタイルデザイナーが満足できるようなものはない。

デザインシミュレーションの難しい織物には、二重組織や縮緬のように経糸(緯糸)が不規則に蛇行した織物、特殊な物理加工を施した起毛処理の織物、玉虫発色の織物な

どがある。次に一般的な織物組織の分類を示す。[1]

表1 織物組織の分類

Table1 Classified of cloths pattern

一重組織	三原組織 - 平織, 斜紋織, 朱子織 変化組織 - 三原組織を変化させたもの 特別組織 - 蜂巢組織, 梨地組織 混合組織 - 原組織と変化組織を混合
重ね組織	よこ二重組織 たて二重組織 二重組織 - 通風織, 袋織
絡み組織 ¹⁾	紹, 紗
パイル組織	よこパイル - よこピロード, ベルベット等 たてパイル - たてピロード, タオル等
紋織・綴織 ²⁾	ジャガード織機による紋織 手作業による綴織

1) 経糸が複数組となり、交差しながら緯糸をはさんでいく組織

2) ジャガード織機という経糸一本一本を別々に上下制御する機械は、大きな紋様が織れる。緯糸では綴織がある。

本研究では、このうち一重組織と重ね組織のデザインシミュレーションに関する研究を行う。

この分野の研究としては、王[2]の研究があるが、王の手法は、あらかじめ二重織になるという知見が必要であり、二重織の設計が間違っていたときなどには対応できない。また、すべての二重織を表現できるとは限らない。また、同じテキスタイルシミュレーションでは、伊藤[3]の研究がある。伊藤の研究は、ニットのデザインについての研究であるが、従来のデザインシミュレーションとは違い、糸の空間的な配置を求めるという点で画期的であり、二重織の

* 応用担当 製品技術研究所兼務

Application Division, Hasimagun-Kasamatu-cho

シミュレーションに彼等の考え方を応用することができる。また、太田[4]は組織図と糸の密度から二重織をシミュレーションしようと試みている。しかし、この研究でも、王の研究と同じように二重織になるという知見が必要である。池口[5]は、王、太田とは違った方法で二重織のシミュレーションの方法を提案している。

本研究では、これらの成果をふまえた上で、簡単に実現できる二重織をシミュレーションするためのソフトウェアを開発する。なお、市販の織物デザインシステムや、これまでになされてきた研究では、製織の過程や、織物の物理的なものをシミュレーションしているわけではない。あくまでも、先染め織物のデザインのシミュレーションを目的としている。本研究でも、製織の過程や繊維の物理的な過程をシミュレーションすることを目的としない。織物を企画するデザイナーに役立つことを念頭に、二重織のデザインをシミュレーションする方法を研究する。

2. 織物組織

2.1 織物組織表

図1に平織構造と断面図及び組織図を示す。[1]

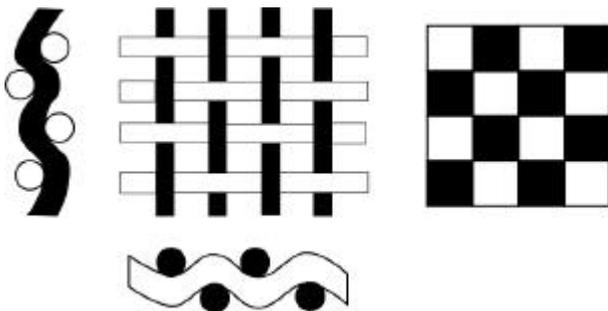


図1 平織の構造と組織図

Fig.1 plain weave structure and design

経糸と緯糸が一本ずつ交互に交差した最も単純な組織で、表裏はない。織物[6]は、経糸と緯糸とが直交して、規則的に絡んでいるもので、その規則性を表す図を、組織図と言い図1に示したように、経糸が浮いている点を印(×などの表記もある)を付け、緯糸が浮いている点では印にする方法を用いる。

そして織柄を決定するためには、糸の配列を指定しなければならない。縞割とは、経糸・緯糸の並べる順番を記述する表のことで、例えば青い糸を4本、白い糸を4本を1循環とする等の情報を定義するものである。

従来の織物デザインシミュレーションは、織物の組織図から経糸・緯糸の交絡を求め、色を塗り分けていた。これは、正しい解釈であるが、この方法は、組織図の中の1つの升目のみに注目し、かつ、平面上で色を塗り分けているので、糸が裏・表に分かれる二重織をシミュレーションすることは難しい。すなわち、実際は図2に示すように、二重組織の断面図は、3段以上の構造を持つものが、図3で示すように単純に表裏の2段で表現しようとするために、

矛盾が生じ、前面の組織にあるべき糸を描画することができない。

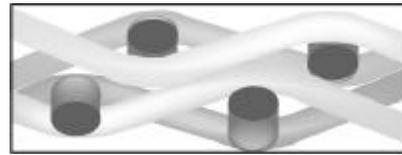


図2 二重組織の断面構造

Fig. 2 Section structure of double cloth



図3 既存システムによる処理

Fig.3 Existing simulator

2.2 シミュレーション方法と仕様

本研究で用いる手法は、昨年の報告書に示した考え方による(本報では詳細な説明は省略する)が、次のようにして二重織のシミュレーションを行う。

- 1) 経糸・緯糸に関して組織図上で浮いているところを + 1, 沈んでいるところを - 1 として升目に「重み」をつける。計算した「重み」を、CGでいうところのZバッファの値とする。この値は、経糸・緯糸の交差点における高さを表しているものとする。
- 2) 糸の交差点から次の交差点までのZの値は線形で補完して求める。Zの値に応じて輝度を変える。
- 3) 糸の幅をr, 糸を真上から見たとき、中心線からの距離をxとし、幅方向の輝度を $y = \sqrt{1-x^2}$ + という計算式で求める。
- 4) 糸の太さ、糸の密度とZバッファの値を考慮して、経糸・緯糸を描画していく。

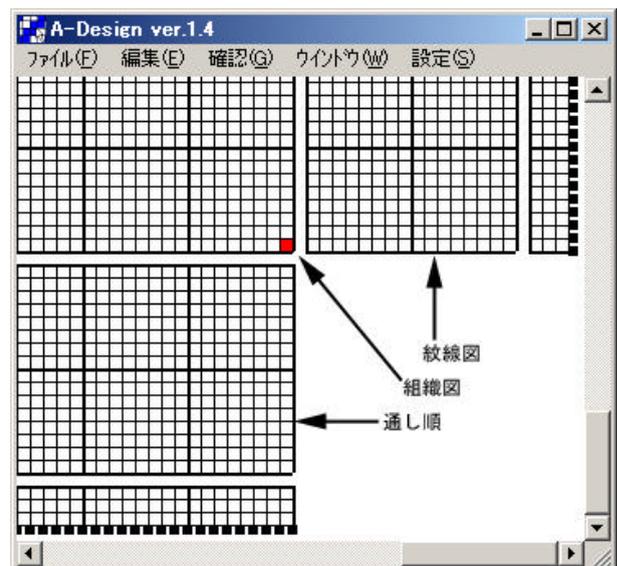


図4 組織図入力画面

Fig.4 Edit design view

図5 編割入力画面

Fig.5 Color coordinate table

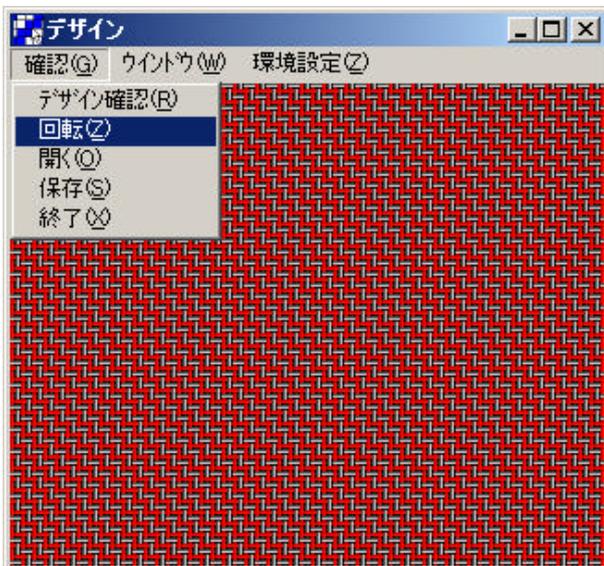


図6 シミュレーション画面

Fig.6 Simulation view

5) 実際の織物構成要素と同様に糸毎に色, 太さを指定して描画する.

表2 仕様

Table2 Specification of software

組織図	160 × 160
編割	経糸・緯糸8種類(色・太さ)
表示	糸の間隔変更, 表裏切替, bitmap保存
補助機能	紋線図と通し順のデータから組織図作成 組織分解, 縦方向の繰返しチェック機能 マーキング機能

3. シミュレーション評価

従来のシミュレーションはX-Y方向のみを考えていたので, 二重織のシミュレーションができなかった. 本研究のようにZ方向の概念を取り入れることで, 二重織のような立体的な織物のデザインをシミュレーションできる.

二重織組織として代表的な二重織組織である風通組織を用いてシミュレーションを行った. 風通組織は, 模様に応じて二重組織の表裏を交換することによって, 織り模様を表した紋織物で, 構造は図7に示すように途中で表糸が裏糸になる組織である. ここで扱った織物は, 図8に示した2種類の組織を組合せたものである.

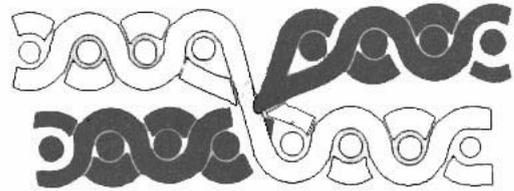
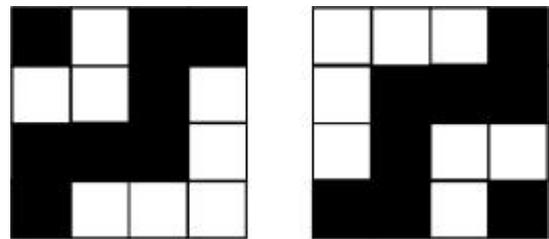


図7 風通の断面構造

Fig.7 Section of futuu



8-a) 組織A

8-b) 組織B

pattern A

pattern B

図8 二重二色風通の色の表れ方

Fig.8 Figured double weave with color effect

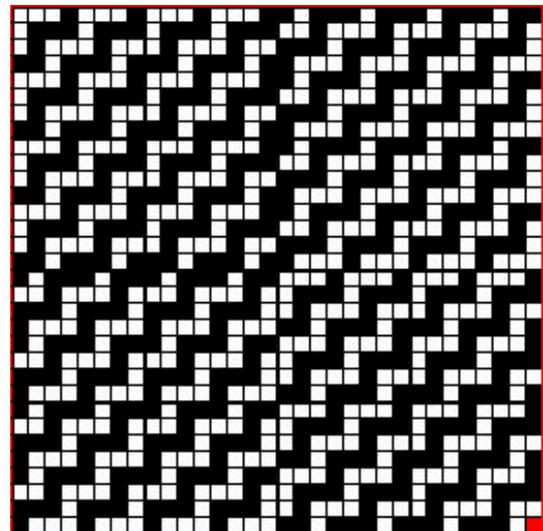


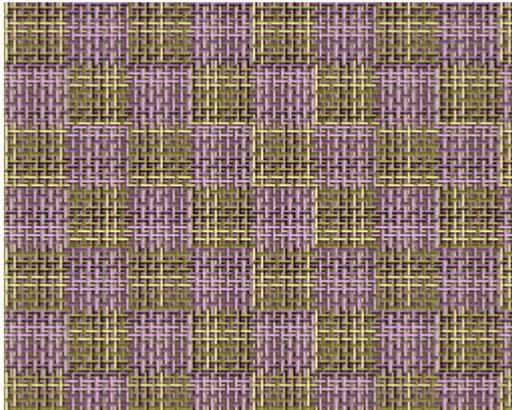
図9 二重織の組織

Fig.9 Double woven design

実際の織物との比較結果として, 図9に組織図, 図10にシミュレーション結果, 図11に実際の織物を示す.

図10と図11を比べてわかるように, 織物のデザインは完全に合っている. しかし, シミュレーションでは糸のむらや蛇行がないために実物の織物よりもきれいに見える. 織物の質感はやや乏しい. 実際の糸の太さと同じように経糸の紫のみを太く指定し, それ以外は細く指定して描画しているのが分かる.

本研究で考案したシミュレーション手法で二重織のデザインをシミュレーションできることが明らかになった。



10-a) 表面
Front side



10-b) 裏面
Reverse side

図 10 シミュレーション結果
Fig.10 Result of simulation

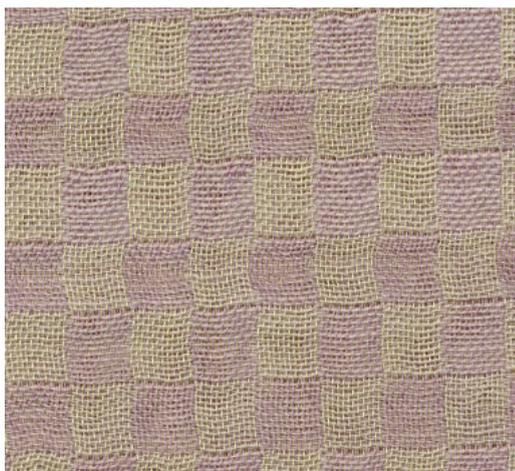


図 11 実際の織物
Fig.11 Real woven

4. まとめ

本研究では、二重織のデザインをシミュレーションするソフトウェアを開発した。

従来の織物デザインシミュレーションは、基本的に織物組織図を糸の色で塗りつぶす方式であった。このため二重織などの重ね組織をシミュレーションすることはできなかった。

本研究で提案した手法は、簡単な方法で、組織図から、Zパツファの値を求めることによって、デザインをシミュレーションするという方法である。本研究の方法によって、Z軸方向の糸の配置を考慮することができるようになり、二重織の織物のデザインをシミュレーションすることができた。本研究では、風通のように途中で表糸が裏糸になる組織、表糸と裏糸の配列が1:1以外の組織も簡単にシミュレーションすることができた。また、本研究では、簡単なデザインシミュレーションソフトウェアを開発した。

本研究で作成したソフトは、糸の設計など豊富な機能は無いが、組織図、糸の色、太さ、配糸などのデータを編集・保存(読出)できる機能を有し、一重組織の織物のデザインや二重織のデザインをシミュレーションすることが可能で、応答性が良い。また、二重組織のデザイン確認に必要な表裏の表示切替えも容易に行うことができる。ただし、本ソフトの動作には、Windows95以上のOSが必要となる。

本研究では、質感が乏しい、カラーマッチングが取れていない、ユーザーインターフェース機能が乏しい、などまだまだ改良の余地があるが、織物業での設計支援、織物見本の確認に利用できると考えている。

謝辞

本研究に対して、(株)VRテクノセンターの遠藤善道氏、愛知県尾張織維技術センターの池口達治氏、都筑秀典氏から、有益な議論と支援をいただきましたことに感謝いたします。

文献

- [1] 深見清, 佐久間滋二, 日下部晴彦, "知りたかった繊維の話", (訓) 日本技能教育開発センター, pp95-99, 1998
- [2] 王躍存, 中島勝, "コンピュータによる二重組織織物のシミュレーション", 織機誌 vol146, No.4, pp51-54, Apl. 1993
- [3] 伊藤裕一郎, 山田雅之, "3次元紐図形表現方法を用いた編み物パターン処理について", 情報処理学会論文誌 vol137, No.2, p249-253, Feb. 1996
- [4] 太田健一, 小柴和彦, "糸表面データベースを用いた織物表面パターンシミュレーション", 織機誌, vol143, No.12, pp63-71, Des. 1990
- [5] 池口達治, 都筑秀典, "表面効果織物のシミュレーション手法", 繊維機械学会第5回2回全国大会, B-1, pp54-55, Jun. 1999
- [6] 文部省, 高等学校用 織物組織, 文部省, pp9-22, 実教出版, 東京, 1968

バリアフリー住宅設計支援システムの開発（第2報）

立川 英治* 田中 泰斗* 安藤 敏弘**

Development of a Barrier-Free House Design Support System

Eiji Tachikawa* Taito Tanaka* Toshihiro Andou**

あらまし VR技術を用いた手動車いす用住宅設計支援システムの開発を目的として、昨年度に引き続き車いすの運動特性について考察を行い、VRシミュレータの開発を行った。開発したシミュレータでは、実際の車いすを操作することにより仮想空間内を移動可能であり、狭路通過の可否を体験できる。さらには、操作者自身の運動を仮想空間内に反映することにより、空間認知度の向上を図っている。また、車いすの直線走行実験において、実車と計算モデルの速度変化はよく一致しており、導出した運動方程式を用い反力を提示することにより駆動時の抵抗や惰性走行感を表現可能な車いすシミュレータの開発が期待できる。

キーワード 車いす, バリアフリー住宅, 設計CAD, VR

1. まえがき

車いすによる移動の可否は、その大きさや旋回半径により制限されるため、車いす利用者の住宅設計の際には通常の住宅設計に比べ間取りや家具の設置場所など様々な配慮が必要である。また、設計された住環境が適正なものであったかどうかは施工後に利用者本人が経験することで初めて理解できるものであり、事前に検討することは難しい。特に、バリアフリー住宅は他の福祉・医療製品に比べ金銭的なリスクが大きく、適正な住環境を想定し設計できるか否かは、障害者にとって死活問題である。

このような問題を解決するため本研究では、車いす利用者の住宅を設計段階で評価、検討することを可能にすることを目的として、VR技術を用いた手動車いす用シミュレーションシステムを開発する。昨年度は、車いすの基礎的運動を考察し、車いすに働く走行抵抗、駆動輪の回転量に基づく移動軌跡の計算および段差乗り越えに必要な力について知見を得た。本年度は、引き続き車いすの運動特性の解析を行うとともに、駆動輪に加えられたトルク値をもとに、車いすの移動、旋回を計算し実際の運動との比較を行った。また、実際の車いすの操作によって仮想空間内の移動が可能なVRシミュレーションシステムの開発を行った。

* 応用担当, 生活技術研究所兼務
Application division, Gifu Prefectural Human Life
Technology Research Institute, Takayama-shi

**岐阜県生活技術研究所 高山市
Gifu Prefectural Human Life Technology Research Institute,
Takayama-shi

2. 車いすの運動

2.1 車いすの運動に関する主な記号

車いすの運動方程式を導出する際に利用する主な記号を以下に記す。また、図1に各記号とその座標系を記す。

$O-X Y Z$: 静止座標系
$p-x y z$: 車体の重心に固定した運動座標系
P	: 車いすの重心
U	: $O-X Y Z$ 座標系 X 軸方向速度成分
V	: " Y 軸方向速度成分
U_p	: $p-x y z$ 座標系 x 軸方向速度成分
V_p	: " y 軸方向速度成分(車いす進行向)
	: 車体姿勢角度 (Y 軸と y 軸のなす角)
F_{fl}	: 駆動輪と床面の接地点に作用する前後力
B	: 駆動輪と床の接地点に作用する横力の和
F_h	: ハンドリムに加える力
Mog	: F_s により発生するモーメント
Mof	: キャスタ輪の走行抵抗により発生するモーメント
Moc	: キャスタ輪の縦軸回り抵抗 (モーメント)
N	: F により発生するモーメント
Q	: 駆動輪回転量
L_f	: キャスタ輪と重心間距離
L_b	: 重心と駆動輪軸間距離
F_s	: 各車輪に働く重力の接地面と平行な分力
R_t	: 走行抵抗
F	: その他外力
H_r	: ハンドリム半径
W_r	: 駆動輪半径

- Wf : キャスタ軸間距離
- Wb : 駆動輪トレッド
- M : 車体重量 (操作者も含む)
- Mr : 駆動輪の重さ
- I : 車体縦軸回り慣性モーメント
- Ir : 駆動輪縦軸回り慣性モーメント
- J : 駆動輪回転軸回り慣性モーメント
- g : 重力加速度
- []f : キャスタ輪に関する値
- []b : 駆動輪に関する値
- []i : i =1 は車いすの左側に関する値
: i =2 は車いすの右側に関する値
- []x : x 方向成分
- []y : y 方向成分

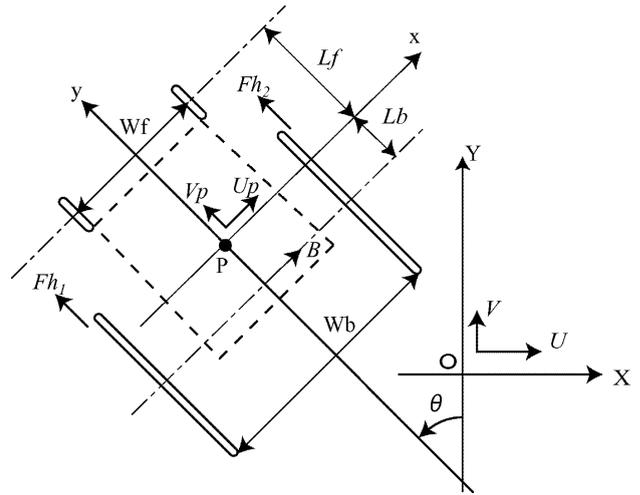


図1 座標系と記号

Fig.1 Coordinate systems and symbols
 動輪の回転量の関係は式 (7) (8) (9) で表される .

2 . 2 車いすの機構学的関係と運動方程式

車いすの運動方程式を導出するにあたって、次の3つの仮定を立てた .

車輪の横滑りはない .

車輪に働く走行抵抗は転がり抵抗であり、その抵抗は各車輪にかかる重量により変動する .

キャスタ軸の回転に伴う走行抵抗は生じない .

これらの仮定のもと、車いすの運動方程式を導出した . 静止座標系 0 と運動座標系 p の関係は次式である [1] .

$$U = -Vp \sin \mathbf{q} + Up \cos \mathbf{q} \dots \dots \dots (1)$$

$$V = Vp \cos \mathbf{q} + Up \sin \mathbf{q} \dots \dots \dots (2)$$

仮定 から x 方向の運動方程式は次式で示される .

$$M \frac{dUp}{dt} = F_x + B - (M + 2Mr) \frac{d\mathbf{q}}{dt} Vp - Rt_{f1x} - Rt_{f2x} + Fs_{f1x} + Fs_{f2x} + Fs_{b1x} + Fs_{b2x} \dots \dots \dots (3)$$

y 方向運動方程式の関数は次式で示される .

$$(M + 2Mr) \frac{dVp}{dt} = F_y + (Ffl_1 + Ffl_2) - M \frac{d\mathbf{q}}{dt} Up - Rt_{f1y} - Rt_{f2y} + Fs_{f1y} + Fs_{f2y} + Fs_{b1y} + Fs_{b2y} \dots \dots \dots (4)$$

仮定 により駆動輪軸回りの回転運動方程式は式 (5) (6) で表される .

$$J \frac{d^2 Q_1}{dt^2} = Fh_1 Hr - Ffl_1 Wr - Rt_{b1y} \dots \dots \dots (5)$$

$$J \frac{d^2 Q_2}{dt^2} = Fh_2 Hr - Ffl_2 Wr - Rt_{b2y} \dots \dots \dots (6)$$

機構学的形状から、重心の速度と車体の旋回角および駆

$$Up = -Lb \frac{d\mathbf{q}}{dt} \dots \dots \dots (7)$$

$$Wr \frac{dQ_1}{dt} = Vp - \frac{d\mathbf{q}}{dt} Wb / 2 \dots \dots \dots (8)$$

$$Wr \frac{dQ_2}{dt} = Vp + \frac{d\mathbf{q}}{dt} Wb / 2 \dots \dots \dots (9)$$

車体重心縦軸回り回転運動方程式を次式に示す .

$$\{ I + 2Ir + 2Mr(Wb / 2)^2 \} \frac{d^2 \mathbf{q}}{dt^2} = Lb B + (Ffl_2 - Ffl_1) Wb / 2 - 2Mr \frac{d\mathbf{q}}{dt} Vp Lb + Mog + Mof + N \dots \dots \dots (10)$$

仮定 のもと、走行抵抗 Rt_f は、キャスタの移動方向と反対方向に発生し、キャスタ軸に生じる走行抵抗による重心縦軸まわりのモーメントは次式であらわされる .

$$Mof = (Rt_{f1x} - Rt_{f2x}) Wf / 2 - (Rt_{f1y} + Rt_{f2y}) Lf \dots \dots \dots (11)$$

重力による影響

車いすの各車輪にかかる力としては、床からの走行抵抗と垂直抗力があげられる . 垂直抗力は常に斜面の法線方向に働くため、車いすが斜面を移動する際には平坦路を移動する時とは異なる車体の旋回や反力が生じる . ここでは、斜面移動時における車いすの運動について考察する .

$n(a, b, c)$ を法線ベクトルとして持つ任意の斜面と静止座標系の X Y 平面とがなす角 α は $\cos \alpha = c$ で表すことができる . ここで、計算のため新たな座標系 $0' - X' Y' Z'$ を定義する . この座標系は静止座標系を

Z軸まわりに回転したもので n を法線ベクトルとして持つ面と Y' 軸は ξ の角度をなすものとする。この座標系が静止座標系となす角は式(12)(13)で表すことができる。

$a > 0$ の場合

$$\tan \alpha = \frac{b}{a} \dots \dots \dots (12)$$

$a < 0$ の場合

$$\tan(\alpha + \beta) = \frac{b}{a} \dots \dots \dots (13)$$

車いすの進行方向を表す座標軸 y を $X-Y$ 平面に投影したベクトルと座標系 O' の Y' 軸のなす角 ψ は $\psi = \alpha - \beta$ となる。車輪にかかる荷重を M_w とすると、各車輪に働く重力の接地面と平行な分力 F_s は次式で表すことができる。

$$F_{s_x} = -M_w g \sin \alpha \sin \beta \dots \dots \dots (14)$$

$$F_{s_y} = -M_w g \sin \alpha \cos \beta \dots \dots \dots (15)$$

式(14)(15)を各車輪に適用し得られた値から、車体の重心縦軸回りモーメントは次式で表すことができる。

$$Mog = (-F_{s_{f1x}} + F_{s_{f2x}})Wf/2 + (F_{s_{f1y}} + F_{s_{f2y}})Lf + (-F_{s_{b1x}} + F_{s_{b2x}})Wb/2 + (F_{s_{b1y}} + F_{s_{b2y}})Lb \dots \dots \dots (16)$$

3. 車いす走行実験

実験には、汎用性が高いと考えられる手動車いす(キャスタ輪7インチエアキャスタ、駆動輪2.4インチ(株)松永製作所製DM-80)を用いた。車いすの駆動輪にかかる荷重および駆動トルクを測定するため、トルク・駆動輪軸荷重計((株)共和電業製PR-S100NM37)を取り付けた。また、駆動輪とキャスタ輪のキャスタ軸の回転角を測定するため、各軸にロータリ・エンコーダを取り付けた。この車いすから測定された値を先に求めた運動方程式に与え、計算モデルと実車の移動速度をもとに運動方程式の妥当性を検証した。

3.1 車いす走行

3.1.1 直線走行実験

実験は平坦な路面をまっすぐ移動するように操作することにより行い、床材としてはカーペットを使用した。また、車いすの走行抵抗は、重心位置により変動し駆動輪にかかる荷重比が大きいほど、車いす全体にかかる走行抵抗は小さくなるとされており、本研究でもキャスタ輪と駆動輪の走行抵抗係数を個別に求め、運動方程式に与えることとした[2]。図3は車いすの駆動輪を1回操作

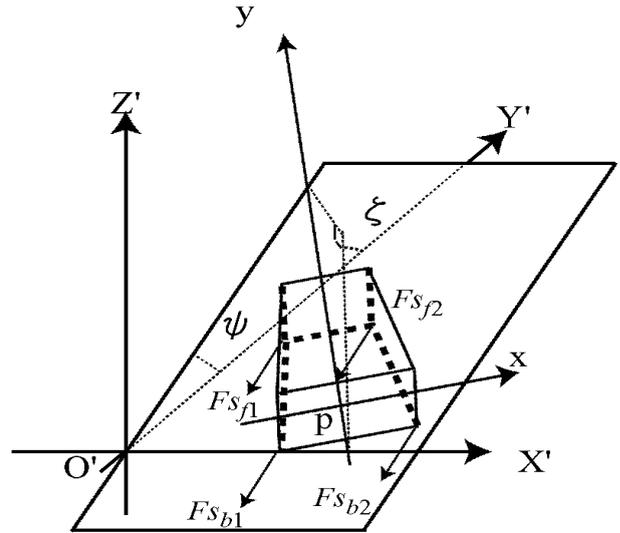


図2 車いすに働く重力の影響
Fig.2 Influence of gravity on wheelchair

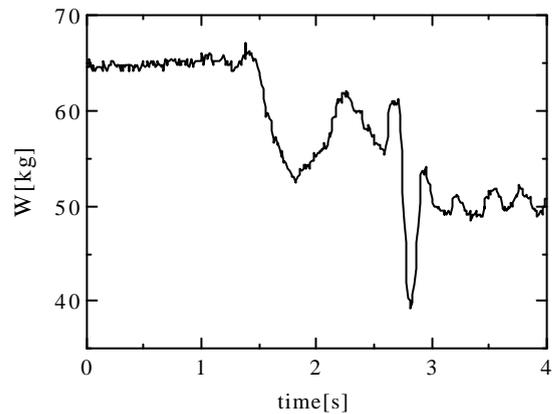


図3 車いすの駆動輪にかかる荷重変動
Fig.3 Load change on rear wheels of wheel chair

したときの駆動輪にかかる荷重変動の例であり、約 25kg の荷重変動が起こっている。走行抵抗係数は、一定重量のおもりを載せた車いすの惰性走行時における速度変化から求めた。重りをおく位置を変えることにより重心位置を変化させ、上記の実験を行うことによりキャスタ輪と駆動輪それぞれの走行抵抗係数を決定することができる。

3.1.2 結果と考察

駆動トルクを運動方程式に与え計算した車いすの速度変化と駆動輪の回転量から求めた速度変化を図4、5に示す。図4は1回のハンドリム操作による速度変化であり、図5は3回の操作によるものである。1回の操作では計算結果と実測値がよく一致している。3回操作でも実測値と計算値に大きな違いは認められないが、1回操作に比べ計算結果と測定結果のずれが大きくなっている。この理由は定かではないが、操作者の重心が激しく前後に変化することによる不規則的な走行抵抗の変化や、

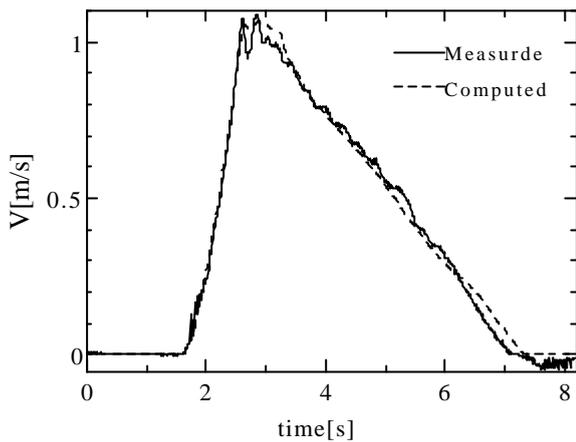


図4 1回駆動による車いすの速度変化
Fig.4 Velocity of wheelchair with once handling

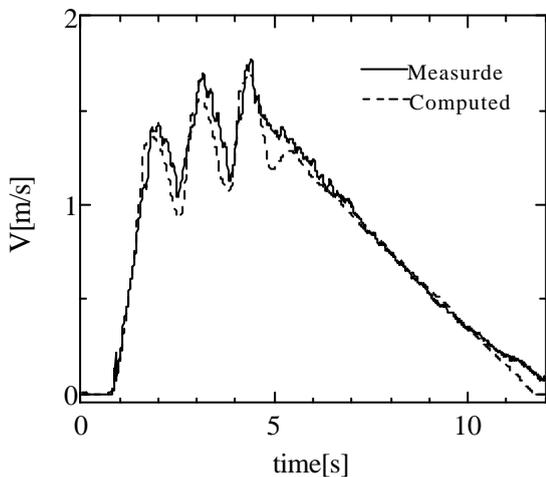


図5 3回駆動による車いすの速度変化
Fig5 Velocity of wheelchair with three times handling
車体の変形による影響、路面と車輪の滑りによる測定誤差の影響などが考えられる。

4. VRシミュレータの開発

4.1 路面形状に基づく車いすの姿勢変化

車いすに生ずる回転のうち、ハンドリム操作に伴い能動的に変化するものは、車いすの垂直軸まわりの回転であり、その他の回転は斜面、段差などの路面変化に伴い受動的に変化する。すなわち、車いすの座標系を図6のように定義した場合、Z軸周りの回転がハンドリム操作により変化し、X、Y軸周りの回転が路面形状により変化することになる。したがって、車いすの姿勢を計算するためには、ワールド座標系における車いす座標系の回転量を計算する必要があり、この座標系は4つのタイヤと路面の接点座標から決定されると考えられる。この場合、車いすのZ軸方向のベクトルは4つの接点座標によ

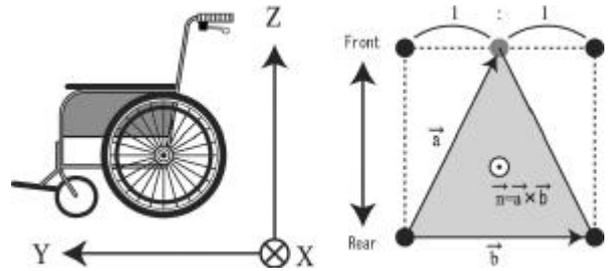


図6 車いすの座標系
Fig.6 Coordinate system of wheelchair

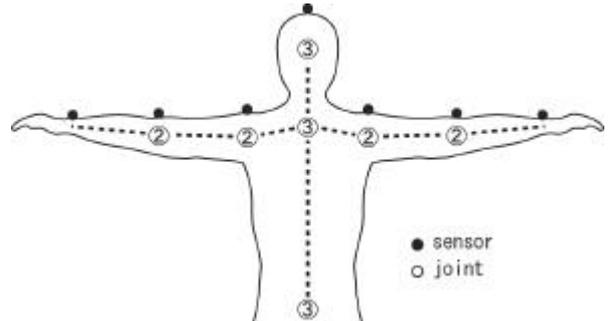


図7 関節とセンサの配置
Fig.7 Position of joints and sensors

り作られる面の法線ベクトルと一致し、外積計算から導出できる。実際は、4つの座標値から法線ベクトルを計算することはできないため、シミュレータ内では、キャスタ輪座標の平均値と2つの駆動輪座標の3点から外積を計算している。(図6)この法線ベクトルに車いすのZ軸周りの回転を表す行列の逆行列をかけて得られたベクトルから、X軸およびY軸周りの回転角を求めれば車体の回転を定義できる。

4.2 人体モデルの仮想空間への導入

実際に車いすで空間を移動するとき、操作者が余裕を持って操作するための空間が残されていることが重要である。車いすの操作に必要な空間は操作者の体格や障害度により異なると考えられる。本システムでは、車いすモデルの周囲にその形状を代表するように線分を定義し、この線分と空間内のオブジェクトとの交差を検出することにより、車いすの形状を反映した衝突検出を行っており、空間移動の可否を決定している。しかし、車いすの形状や大きさを元にした衝突検出のみのシミュレーションで操作者自身が手を伸ばし触れることのできる空間を確認し、住宅の利便性を検討することは難しいと考えられる。そこで、空間認知度の向上のため操作者自身の運動を仮想空間内で再現することを考えた。車いす利用者は下肢が不自由であるため、上半身(腰、肩、肘、首および頭)の擬似的な動きを仮想空間内で表現することとした。操作者の動きをセンシングするために、6自由度モーショントラッキングセンサ(IS-600Mark2、InterSense社)を使用した。この装置は、センサから発信される超音波による距離測定により3次元座標の計測が可能であり、ジャイロセンサと組み合わせることにより

6自由度の位置、回転を計測することができる。このセンサから得た値を元に各関節の回転角を計算し人体モデルの運動を定義した。

人体モデルの関節は、腰、肩、肘および首とした。センサの取り付けおよび各関節の位置を図7に示す。図中の数字は各関節に定義した自由度である。各関節の回転は、センサから得られる3次元座標を元に計算することができる。すなわち、腰関節は常に一定の位置で動かないものとし、腰の座標から見た両肩の相対座標から腰の回転を計算した。同様に、肩関節の回転は肩と肘の関係から、肘関節は肘と手首の位置関係から計算した。首関節は両肩を結ぶ線分の中点座標にあるものとし、その回転は頭頂部に取り付けたセンサ座標との相対関係から計算した。頭部の回転は頭頂部のセンサから得られた値をそのまま用いた。このような計算を行うことにより、操作者の動きを仮想空間内で表現できる。また、座高や腕の長さなど、操作者固有の体格を仮想空間に反映するため、各関節の位置座標は対応するセンサの位置から求めることとした。

4.3 車いすインタフェースの開発

体験者に、現実に近い感覚を与えるためには、手動車いすの操作感や操作性を表現することが重要である。特に、車いすは独立した左右駆動輪を操作することにより移動、旋回するという特異な運動をするため、操作性を表現するためには実際の車いすをインタフェースとすることが有効である。そこで、前述の計測用車いすを用い仮想空間内を移動することを考えた。車いすの運動は、計測用車いすの駆動輪に取り付けたロータリエンコーダの回転量を元に計算した。車いすの移動量および旋回量の計算は、式(17)(18)から計算した [3] 。

$$\mathbf{q} = \frac{dr_i - dl_i}{Wb} \dots\dots\dots(17)$$

$$D_i = \frac{dr_i + dl_i}{2} \dots\dots\dots(18)$$

左駆動輪の移動量	dl_i
右駆動輪の移動量	dr_i
車いす旋回量	i
車いす移動距離	D_i
車いすの駆動輪トレッド	Wb

添え字 i はサンプリング番号である。

4.4 シミュレーションシステム概要

シミュレーションシステムの概要を図8に示す。開発したシステムは大きく分けて車いす入力部と画像提示部から構成されている。車いす入力部は、駆動輪を地面から離して固定された車いすと制御用計算機(PC)により構成されており、画像提示部は視覚演算用計算機(Zx10 VE、SGI社)と6自由度モーショントラッキングセンサ、頭部

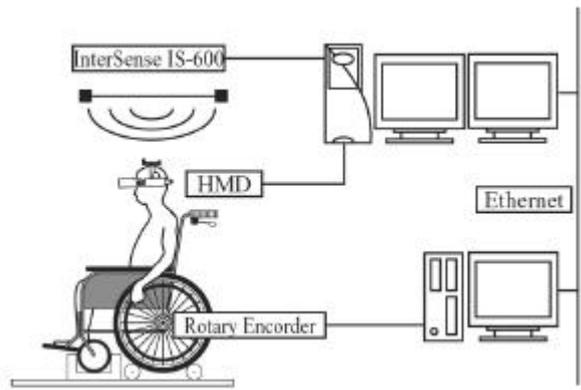


図8 システム概要

Fig.8 Simulation system of wheelchair



図9 システム概観

Fig.9 Overview of simulation system

搭載型ディスプレイ(HMD)(ProView XL50、KAISER ELECTRO-OPTICS社)から構成されている。

車いす入力部では車いすの駆動輪回転量をもとに車体の移動、旋回量を計算し、そのデータを制御用計算機からEthernetを介し、視覚演算用計算機へ送信する。視覚演算用計算機では、受信したデータ及び6自由度モーショントラッキングセンサのデータを受け取り、計算機内の車いす及び人体モデルの位置と姿勢を計算し、その画像をHMDに出力している。HMDに出力する画像には両眼の視差を与えてあり、立体視することができる。また、本シミュレーションでは仮想空間内の住宅オブジェクトと車いすオブジェクトの衝突判定を行っており、住宅内における移動の可否を視覚的に体験できる。図9はシミュレーションの様子である。

5. まとめ

車いすの運動をシミュレータ内で再現するため、車いすの運動方程式を導出した。また、求めた運動方程式の妥当性を検証するため、操作者が加えた駆動トルクをもとにした車体速度のシミュレーションを行い、実際の車いすの速度変化と比較した。その結果、計算結果と実測値はよく一

致していたが、連続して駆動操作を行った場合、誤差が大きくなる傾向が認められた。今回行った実験は直線運動のみであり、車体の旋回についても考察する必要がある。また、路面の材質により走行抵抗は異なるものと考えられ、今後検討する必要がある。

シミュレータ内に人体モデルを導入することにより、空間の認知度は向上したものと考えられるが、今回開発したシミュレータは人体モデルの運動を定義したのみであり、更に空間の認知度を高めるためには、人体モデルと他の物体の衝突を検出し体験者に提示することが重要である。

シミュレータのインターフェースとして、実際の車いすを使用することにより、他のデバイスをインターフェースとして使用する場合に比べ、実際の車いすに近い操作性が得られたが、さらなる操作感の向上のため駆動輪を操作する際の反力提示を検討したい。

謝辞 本研究の推進にあたってご指導、ご助言を頂いた岐阜大学 武藤高義教授、山田宏尚助教授に深く感謝します。

文 献

- [1]藤本英雄, 陳連怡, 館野真, 浅野真博, “VRを用いた力覚呈示車椅子訓練システムにおける斜面走行時の旋回の検討”, 日本バーチャルリアリティ学会第4大会論文集, 1999.9
- [2]米田郁夫, 橋詰努, 藤起拓也他, “車いす重心位置が走行特性に及ぼす影響”, 第12回八工学カンファレンス講演論文集, 1997
- [3]立川英治, 田中泰斗, 安藤敏弘, “バリアフリー住宅設計支援システムの開発”, 平成12年度生産情報技術研究所研究報告