ISSN 1345-5923

岐阜県生産情報技術研究所研究報告

第5号　　平成15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. 人とのインタラクションに基づくロボットの親和性向上に関する研究 －人とロボットが同居するためのロボット要素技術に関する研究－ 1

2. 積層用両面駆動型静電フィルムアクチュエータを用いた薄型直動テーブルと小型駆動装置の開発..... 7

3. 情報収集(被災者捜索)ロボットの移動機構に関する研究（第２報） 13

4. 福祉ロボットに適応した作業指示技術の研究（第２報） 19

5. マッキベン型アクチュエータを用いた内視鏡訓練用ぜん動運動アクチュエータの開発 23

6. 人にやさしいモニタロボットの研究（第２報） 27

7. 有機栽培技術の高度化に関する研究 ―水田除草ロボット（アイガモロボット）移動機構の開発－.... 33

8. 力感覚が必要な作業スキル解明に関する研究（第２報） 37

9. 立体紙製品の構造解析に関する研究（第４報） 41

10. 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の実用化 －「筆を用いた匠の絵付け再現ロボット」－ 47

11. 人間共存ロボットの衝突安全に関する研究 －ロボット外皮の開発と全身での衝突緩和制御－..... 51

12. IT と VR に基づく次世代設計環境に関する研究..... 54

13. PC 用 CAD と没入型 CAD の共同設計システム －IT と VR に基づく次世代設計環境の研究－ 58

14. PC クラスタを用いた多画面同期描画システムの開発 －IT と VR に基づく次世代設計環境の研究－.... 62

15. 仮想人間モデルを用いた製品シミュレーションに関する研究 －IT と VR に基づく次世代設計環境の研究－ 65

16. ネットワークを介したエンジニアリングデータベースシステムの実証実験について（第２報）..... 69

17. 有限要素法を用いた柔軟物体の力覚提示方法に関する検討..... 73

18. 「ながら」の歩行制御アルゴリズムの開発 77

19. 障害物環境下におけるマニピュレータ制御 80

人とのインタラクションに基づくロボットの親和性向上に関する研究

－人とロボットが同居するためのロボット要素技術に関する研究－

稲葉　昭夫　　張　勤　　小川　行宏　　光井　輝彰　　田中泰斗　　山本　和彦*

Development of Human Interface based on Interaction between Human beings and Robots

Development of Basic Technologies for Coexistence of Human Being and Robots

Akio INABA　Qin ZHANG　Yukihiro OGAWA　Teruaki MITSUI
Taito TANAKA　Kazuhiko YAMAMOTO*

あらまし　わが国において世界的に例を見ない高齢化が進行する中で，労働人口の減少，障害者や寝たきり老人の増加，それに伴う介護者等の不足などから，福祉をはじめとする多くの分野において，各種の支援にロボットを利用することが強く期待されている．このような分野に使用するロボットに求められる基本コンセプトは，産業用ロボットとは異なり，「ロボットが人に合わせる」ということである．本研究では，これを実現する要素技術の１つとして，ロボットが人に対してリアクションを返すことにより，人とロボットの親和性を向上させる手法について検討する．

キーワード　ヒューマノイドロボット，２足歩行，人とロボットの共存，画像処理

１．はじめに

世界的に例を見ない高齢化が進行する我が国において，高齢者支援ロボットや福祉関連ロボットは，今後，市場の拡大が期待できる民生用ロボットの有力な候補である．特に，超高齢化社会においては，高齢者の自立を支援するロボット技術に大きな期待が寄せられている．

この分野に使用するロボットに求められる基本コンセプトは,産業用ロボットとは異なり,「ロボットが人に合わせる」ということである．これを実現する技術の１つとして，人とロボットの親和性向上技術がある．この技術は，人のロボットに対する違和感や恐怖感を和らげるための技術である．本研究では，ロボットが人に対してリアクションを返すことにより，人とロボットの親和性を向上させる手法について検討する．

２．インタラクションの概要

本研究で対象とする人とロボットとの間のインタラクションの概要を図１に示す.

ロボットが人と自然に振舞うためには，相手が誰であるかを特定し，どのような意図を持っているのかを知ることが重要である．最初に，ロボットは人物とその意図の認識を行い(①)，この結果に基づいて行動を切り替える(②)．次に，ロボットが行動した後に，その行動に対する人のリアクションを認識することによって(③，④)，ロボットの行動に対する評価・学習を行う．状況の認識と行動(決定・学習)の操作を繰り返し行うことにより人とロボットの間に徐々に親近感が創出されることを期待する．

図２に本研究で取り扱うインタラクションを実現するシステム構成例を示す．ロボットにはカメラとマイクを装着する．カメラからの画像を用いて人物認識及び顔ポ

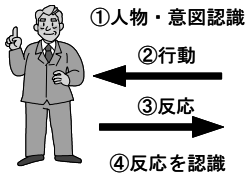
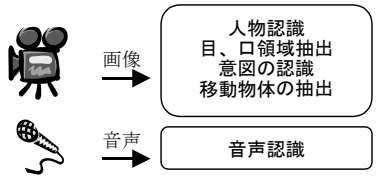


図１　インタラクションの概要



５．インタラクションシステムの開発

５．１　インタラクションによる表情の学習

５．１．１　表情自動学習・認識システム

実環境においてロボットが表情認識を利用する場合に，いつ，どのように表情の学習を行うのかが重要な問題となる．そのため，自然な流れの中で人間とロボットがふれあいながら顔の表情を自動的に学習し，表情を認識するようになるロボットシステム[9，10，11]を構築した．

人の表情は，感情の自然表出としての表情と意図的なメッセージを伝えるための表情の二面性を有すると言われている[12]．例えば，意図的なメッセージを伝えるための表情には，母親が赤ちゃんを叱る時に見せる表情があげられる．本研究で対象とする表情は，この意図を伝えるために表出した表情とする．しかし日常の生活で表出される表情はこの２つのうちのいずれか一方のみというのではなく，これらを複合した意味を持ち，これらを識別することは困難であると考えられる．このため，本研究では，学習・認識モデルにおいて表情を触覚刺激による感情と自然な形で結びつけて学習させることとした．

５．１．２　表情学習モデル

人が自然なコミュニケーションと感じられるようにするため，本研究ではロボットが表情を学習する手法として，赤ちゃんが母親の表情を学習する過程を模倣したモデルを提案する．一般に，赤ちゃんは，頭を撫でる，頭を叩くなどの母親の行動を触覚によって感じ，人間が本質的に持つ感情を変化させる．この時に同時に入ってくる視覚情報(母親の顔の表情)を結びつけることによって母親の表情を学習する．このモデルをロボットシステムに適用することで，人にとって自然に感じられる形の学習を実現する．本システムにより，あらかじめ表情の意味を教示しなくても表情を学習・認識することが可能になる．さらに，これにより個人の顔に応じた表情を学習することも可能となる．

図１０に赤ちゃんの表情の学習・認識モデルを示す．学習の過程は次のとおりである．

（1）　母親が特定の行動によって赤ちゃんを刺激する．この時，母親は行動に対応した表情をする．

（2）　赤ちゃんは与えた刺激に対する感情を持ち，刺激に対して反応し行動する．

（3）　赤ちゃんが感情に対応した表情を覚える．

（4）　(1)から(3)の繰り返しにより，赤ちゃんは母親の表情を見るだけで，刺激された状態と同じ感情を持ち，表情に反応するようになる．

怒りの表情を学習する過程を例に挙げる．はじめに母親は怒った顔をしながら，赤ちゃんを叩く．叩くという行動は怒った時に自然と出てくる行動の一つである．

叩くという行動が行われた時に，赤ちゃん側では触覚情報と感情と視覚情報の統合が行われる．赤ちゃんは触覚によって痛いと感じると，悲しいという感情を持つ．同時に視覚から得られた情報として母親の怒った顔の情報を得て，この時に赤ちゃんは母親の怒った顔を学習している．悲しい感情と母親の叩く行動と母親の表情の結びつきが学習されている.繰り返し学習することにより，その結びつきは強くなり入力として叩くという行動により発生する触覚の情報がなくても，表情を認識し，悲しいという感情を持つようになる．同様に喜びの表情を学習する過程では撫でる動作と喜びの表情を嬉しいという感情に結びつけて学習する．また何も動作が無い時の表情を通常の表情として学習する．

５．１．３　表情自動学習・認識システム

図１１に自動学習・認識システムのフローチャートを示す．システムにおける処理は学習フェーズ，認識フェーズの２つの部分に大別できる．

学習フェーズは表情を自動的に学習し，認識するために必要な情報を抽出するフェーズである．最初にセンサ情報及び画像情報から動作を検出する．行動を検出すると同時に，ロボットは検出した行動に関連する反応を示す．さらに，行動を検出するとそれがトリガとなり，画像処理を行う．入力画像の顔領域から特徴量を抽出し，行動検出の結果を用いて顔の特徴量を蓄積し学習する．行動と結びつけて特徴を蓄積することは，赤ちゃんが感情と顔の表情の関係を学習することに由来する．

認識フェーズは学習した表情の情報を使用して，表情を認識し，反応を返すフェーズである．学習フェーズと同様の手法を用いて入力画像から顔の特徴を抽出する．抽出した特徴を，学習フェーズで作成した表情の情報と比較することにより表情を認識する．これによりロボットは認識した表情に対応した反応を示す.

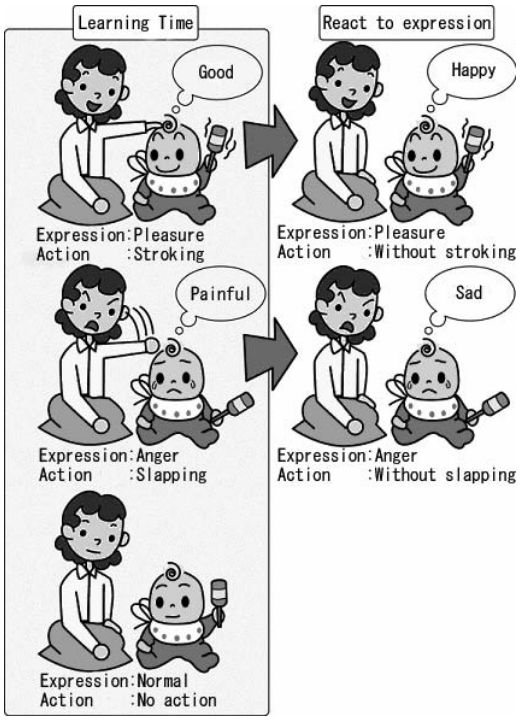


図１０　表情学習モデル

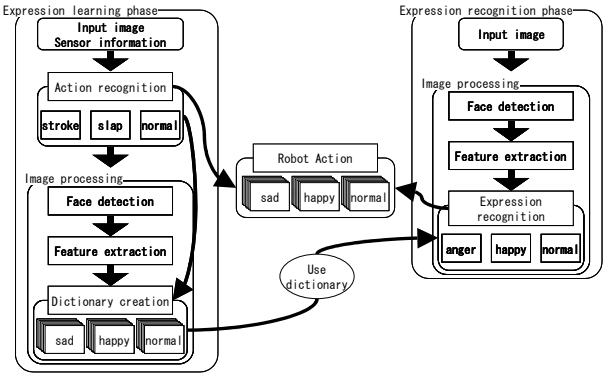


図１１　表情自動学習・認識システムの流れ

図１２　表情学習・認識システムのロボットへの実装
(左) 学習フェーズ　　(右)認識中フェーズ

本システムでは人間の触覚の代わりにCdSセンサアレイを用いて人間の動作の検出を行う．さらに，カメラ画像を用いて人間がロボットの前にいるかどうかも検出する．

５．１．４　ロボットへの実装

表情自動・学習認識システムのロボットへの実装例を図１２に示す．左上はロボットが見ている顔画像，左下はロボットの反応を拡大表示したものである．学習フェーズにおいて笑った顔を教示している様子を図１２左に示す. CdSセンサを用いて人間の行動(撫でる)を検出し表情を学習している．学習後の認識フェーズの様子を図１２右に示す．カメラにより表情(笑った顔)を検出し，笑った顔に反応してロボットが動作している．

６．まとめ

本研究では，ロボットが人に対してリアクションを返すことにより，人とロボットの親和性を向上させる手法について検討した．具体的には，ヒューマノイドロボットの機構を制御するための基本ソフトウェアを開発するとともに,人物･表情認識システムをロボットに実装し，人とロボットのインタラクションシステムを構築した．さらに，人とのインタラクションをより自然に行えるようにするため，各人に対する行動の学習の枠組みについて基礎的な検討を行い，ロボットへの実装を試みた．

文　献

[1] 山口仁一，高西淳夫，加藤一郎“上体運動により３軸モーメントを補償する２足歩行ロボットの開発”，日本ロボット学会誌，Vol.11，No.4，pp.581-586, 1993

[2] 西脇光一，北川知伸，杉原知道，加賀美聡，稲葉雅幸，井上博允，“ＺＭＰ導出の線形・非干渉化，離散化によるヒューマノイドの動力学安定軌道の高速生成”，第１８回ロボット学会学術講演会予稿集，pp.721-722, 2000

[3] 梶田秀司“線形倒立振子モードを規範とする動的２足歩行ロボットの実時間制御”, 機械技術研究所報告, 第171号

[4] 遠藤謙，山崎文敬，北野宏明，前野隆司，“進化的計算法を用いた２足歩行ロボットの形態と歩行パターンの生成”, 第１９回日本ロボット学会学術講演会予稿集，pp.519-520 , 2001

[5] Jiang Shan, Fumio Nagashima, “Biologically Inspired Spinal locomotion Controller for Humanoid Robot”, 第１９回日本ロボット学会学術講演会予稿集，pp.517-518 , 2001

[6] 稲葉昭夫,張勤,光井輝彰,千原健司,小川行宏,田中等幸“ヒューマノイドロボット基本ハードウェアの開発（第２報）”，岐阜県生産情報技術研究所報告No4，pp.1-6，2003

[7] K. Yamamoto：“Present State of Recognition Method on Consideration of Neighbor Points and Its Ability in Common Database”，Trans IECE，Vol.E79-D，No.5，pp.417-422, 1996.

[8] 栗山聖・山本和彦・本郷仁志・加藤邦彦：「顔認識システムにおける高次特徴面の効果と性能評価」，画像の認識・理解シンポジウムMIRU2000講演論文集Ｉ，pp.475-480, 2000.

[9] Y. Ogawa, K. Kato, and K. Yamamoto, "Self-learning System of Facial Expression for Intelligent Robot through Interaction with Human", Proceedings of The 5th IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation, pp.1233-1238 (2003)

[10]T. Kobayashi, Y. Ogawa, K. Kato, K. Yamamoto and G. Wang, "Proposal of an Expression Self-Learning System for a Family Robot", Proceedings of 6th Japan-France Congress on Mechatronics and 4th Asia-Europe Congress on Mechatronics, pp.380-385, 2003.

[11] 小川行宏,加藤邦人,山本和彦,“表情自動学習・認識システムの提案”，電気学会論文誌,Vol.124-C,No.3,pp.699-705,2004.

[12] 吉川左紀子,“表情は何をつたえるのか-メディアとしての表情”，岡田，三嶋，佐々木共編,“身体性とコンピュータ”,共立出版bit別冊, pp376-388, 2000

積層用両面駆動型静電フィルムアクチュエータを用いた薄型直動テーブルと小型駆動装置の開発

西嶋　隆　　山本　晃生*　　樋口　俊郎*　　稲葉　昭夫

A Thin Linear Motor Table using Both Sides Drive Type Electrostatic Film Actuator and Downsized Driving Unit

Takashi NISHIJIMA　Akio YAMAMOTO*　Toshiro HIGUCHI*　Akio INABA

あらまし　積層用両面駆動型静電フィルムアクチュエータを用いた薄型直動テーブルとその小型駆動装置を開発した．直動テーブルの筐体はアクリル樹脂を用い，サイズは180mm×55mm×10mm，重さ約100gである．直動テーブルに用いた両面駆動型の静電フィルムアクチュエータは，フィルム積層時に効率的に推力を得ることが可能であり，従来の静電フィルムアクチュエータと比べておよそ2倍の推力を発生した．小型駆動装置は静電フィルムアクチュエータの汎用性を高めるため，バッテリー駆動が可能な変調駆動法を用いて試作し，電源に±14.4Vのバッテリーを用いたとき約2500$V_{p\text{-}p}$の変調駆動電圧を出力した．駆動装置全体の寸法は180mm×130mm×70mmである．小型駆動装置の設計では，トランスー静電アクチュエータ負荷によるインピーダンス特性から，変調に用いる最適な搬送波周波数を決定した．試作した小型駆動装置を用いて直動テーブルの推力測定を行ったところ，最適な搬送波周波数を印加することで大きな推力が得られ，最大約5.9Nの推力を発生した．

キーワード　静電フィルムアクチュエータ，積層用両面駆動型，小型駆動装置

１．はじめに

筆者らは，軽量，高出力[1]，柔軟[2]な静電フィルムアクチュエータの開発を行っている．このアクチュエータをより使い易くするためには，直動テーブルなどの駆動部やそれらの駆動電源装置，位置センサ類をコンパクトにモジュール化することが重要であると考えられる．

今回，静電フィルムアクチュエータの駆動部のモジュールとして軽量・薄型の直動テーブルを試作した．直動テーブルには両面駆動型の静電フィルムアクチュエータを用いており，従来の片面駆動型の静電フィルムアクチュエータと比べて，フィルム積層時に効率的に推力を増加させることが可能である．駆動装置のモジュールとしては，変調駆動法を用いた小型駆動装置を開発した．本駆動装置はバッテリー駆動で小型であるため，アクチュエータを移動ロボット等に搭載する場合などに有効であると考えられる．

本報告では2章に静電フィルムアクチュエータについて，3章に両面駆動型静電フィルムアクチュエータとそれを用いた直動テーブルについて，4章に変調駆動型の小型駆動装置について，5章に小型駆動装置を用いた直動テーブルの駆動実験について述べ，6章にまとめる．

＊ 東京大学大学院工学系研究科

２．静電フィルムアクチュエータ

静電フィルムアクチュエータの移動子・固定子フィルムは薄型のFPC(Flexible Printed Circuit)フィルムで構成されており，フィルム内部には3相結線された帯状電極が埋め込まれている．図1に示すように，基本的な静電フィルムアクチュエータは，一対の移動子・固定子フィルムで構成する．駆動原理は図2に示すように，移動子・固定子の帯状電極にそれぞれ逆順に3相電圧を印加し，それぞれのフィルム上に互いに逆方向に進行する電位分布を励起させる．互いの電位分布にはそれらの空間的な位相差に応じた静電気力が発生し，移動子は固定子の表面上を電極の長さ方向と垂直な方向に駆動する．図2による駆動方法は固定子・移動子共に同一の駆動電圧を印加する方法であり１周波数法とよぶ．この場合，移動子速度uは以下

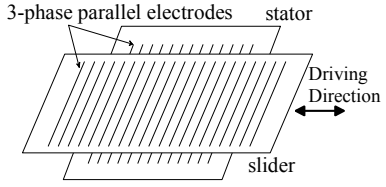


図1　静電フィルムアクチュエータの基本構成

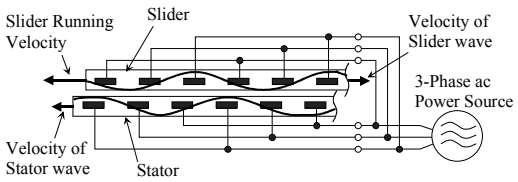


図2　駆動原理

のように表される.

$$u=6pf \qquad (1)$$

ここにpは電極ピッチ，fは駆動電圧の周波数である．フィルム間には，摩擦の低減を図るため直径20μmのガラスビーズを散布し，また，空気の絶縁破壊を防ぐために絶縁液（シリコンオイルまたはフロリナート，FC-77，3M製）に浸してある.

３．両面駆動型静電フィルムアクチュエータ

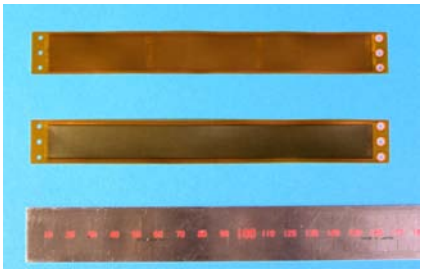
静電フィルムアクチュエータの推力は，固定子・移動子電極の接触面積（有効電極面積）に比例して増加するため，移動子･固定子フィルムを積層することによって，容易に推力を増大することが可能である[3]．従来は一対の移動子･固定子フィルムで1面の駆動面を得ているため，移動子・固定子フィルムそれぞれn枚用いて，n面の駆動面を得ることになる．一方，両面駆動型は同じ条件で駆動面は2n-1面得ることが可能となり，推力の増加が可能となると考えられ，今回，設計・試作を行う.

３．１　フィルム設計

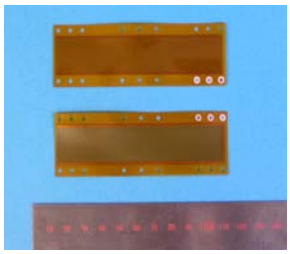
図3に今回開発した両面駆動型静電フィルムアクチュエータの固定子フィルムと移動子フィルムの写真を示す．固定子・移動子とも電極幅60μmの3相の帯状電極が160μmピッチで埋め込まれている．サイズは移動子，固定子それぞれ20mm×160mm，32mm×100mm，1駆動面あたりの有効電極面積は96mm×14mm，厚さは約100μm（スルーホールの無い部分）である.

FPCフイルムの帯状電極を3本毎に結線するには，必ず配線の立体交差が必要であるため，FPCフィルムは厚さ方向に2層の電極基板を用いている．図4に3相結線の模式図を示す．駆動に関与する電極部分はすべて表面に配置されているが，それら電極に電圧を導く集合線は，2相分が表面，残る1相はスルーホールを設けて裏面電極に設けている．図5はフィルムの厚さ方向の模式図を示す．図5(a)，図5(b)はそれぞれ，従来の片面駆動型と今回開発した両面駆動型の断面図を示す．表面電極はベースフィルム（ポリイミド）にエポキシ系の接着剤を用いて圧延接着されており，その上から表面カバーフィルム（ポリイミド）をエポキシ系の接着剤で接着し，外部と絶縁している．裏面電極の集合線はスルーホールを介して結線し，裏面電極にも裏面カバーフィルムが接着剤で貼られている.

静電フィルムアクチュエータが推力を発生するためには，電極ピッチに対する，固定子電極と移動子電極までの最適な距離が解析されており[4]，従来型のフィルムにおいて，移動子フィルムと固定子フィルムを重ねる場合，それぞれの表面同士を対向させた状態ではフィルム間に推力が発生し，裏面を用いた場合は推力が発生しない．これは図5(a)からわかるように，従来のフィルムでは裏



固定子　表面（上），裏面（下）



移動子　表面（上），裏面（下）

図3　試作した固定子・移動子フィルムの写真

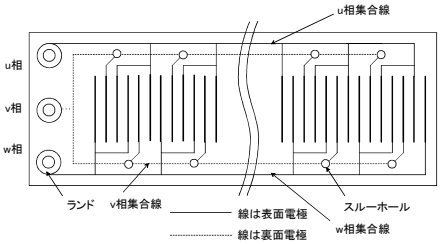
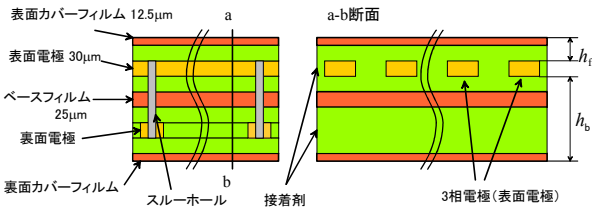
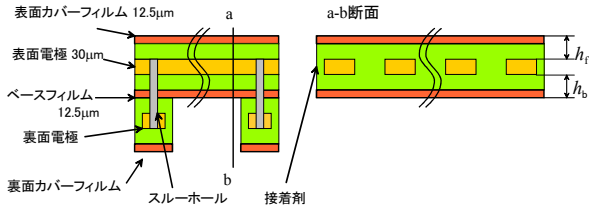


図4　3相結線方法

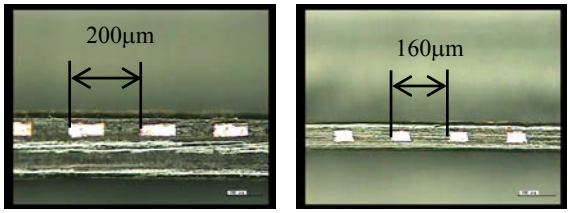


(a) 片面駆動型



(b) 両面駆動型

図5　フィルムの断面模式図



(a) 片面駆動型　　(b) 両面駆動型

図6　フィルム断面写真

面と表面では3相電極の表面からフィルム裏面または表面までの距離（h_bとh_f）が異なっているためである．

今回試作した両面駆動型のフィルムは，図5(b)に示すように，ベースフィルムを従来の半分の12.5μmとし，裏面のカバーフィルムは集合線のみを部分的にカバーする構造にする．したがって，スルーホールの無い電極部分では，h_fとh_bはほぼ同じ距離になる．そのため，裏面と表面を対向させても，裏面同士を対向させても推力が発生する．図6に片面駆動型と両面駆動型のフィルムの断面写真(a-b断面)を示す．

３．２　推力測定

試作した両面駆動型静電フィルムアクチュエータの推力を測定した．図7に推力測定を行った実験装置の模式図を示す．固定子フィルムは，その一端を力センサLTS-2KA（共和電業㈱製）に取り付ける．移動子フィルムはリニアガイド上に固定し，リニアガイドの摺動面はばねを介して定盤に固定する．アクチュエータの推力は移動子を一定速度で駆動し，推力がばねの復元力に降伏したときに検出される力センサの出力とした．移動子の移動速度は10mm/s（駆動電圧の周波数f=10.42Hz），駆動電圧は600～1600$V_{0\text{-}p}$とした．

3.1節で述べたように，フィルムの表面は全面にカバーフィルムが貼られているため平坦であるが，裏面は集合線の上に部分的にカバーフィルムが貼られているため，表面と違い凹凸のある断面をしている．したがって，アクチュエータの駆動面は，表面 - 表面，表面 - 裏面，裏面 - 裏面の3通りを区別する必要がある．実験では1対の移動子・固定子を用い，駆動面を表面 - 表面，表面 - 裏面，裏面 - 裏面の3通りにした状態で推力を測定した．結果を図8に示す．

図8に示すように，表面 - 表面で構成する駆動面が最も大きな推力を発生し，裏面 - 裏面の組み合わせが最も小さいことがわかる．表面 - 表面で構成する駆動面の単位面積あたりの推力は駆動電圧が1600$V_{0\text{-}p}$時に約

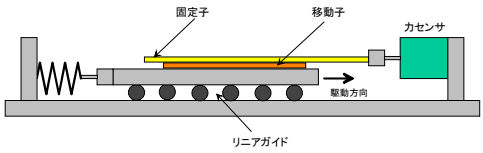


図7　実験装置の概略図

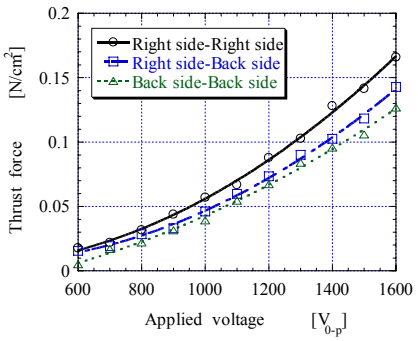


図8　単層時における駆動電圧と推力の関係

0.17[N/cm^2]であった．裏面を用いた場合に推力が減少するのは，裏面には集合線のカバーフィルムによる凹凸があり，その部分でフィルム間に若干の隙間が出来るためであると考えられる．

３．３　両面駆動型静電フィルムアクチュエータを用いた直動テーブル

両面駆動型静電フィルムアクチュエータを用いた直動テーブルを試作した．直動テーブルの写真を図9に示す．ステージのサイズは180mm×55mm×10mm，重量は約100gである．ステージの最大ストロークは50mmである．筐体はアクリル樹脂を削り出して製作し，リニアガイドには小型リニアガイドLWL3（日本トムソン㈱製）を用いた．固定子フィルムは7枚，移動子フィルムは8枚であり，駆動面は全部で14面となる．そのうち表面－表面による駆動面が7面，裏面－裏面による駆動面が7面となるように積層した．固定子フィルムはステージに固定し，移動子フィルムは小型リニアガイドを介して設置したスライダに固定した．

４．変調駆動法を用いた小型駆動装置

静電フィルムアクチュエータを1周波数法で駆動する場合，式(1)に示したような関係があるため，アクチュエータを低速駆動するには低周波の高電圧3相交流が必要となる．そこで，高電圧を得るためにトランスを利用すると低周波数では磁気飽和が発生することが問題となる．この対策の一つにはトランスコアを大型にすることが考えられるが，装置の大型化が避けられない問題となる．また，静電フィルムアクチュエータは低速駆動時（低周波数時）に推力が低下するため，これらの対策として変

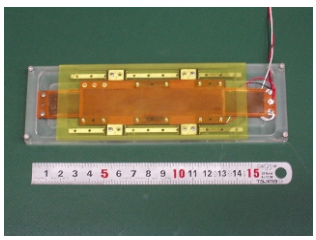


図9　直動テーブルの写真

調駆動法[5]の提案がなされた.

変調駆動法とは3相の駆動電圧を高周波数の搬送波で乗算し，搬送波周波数帯域まで駆動電圧を変調した後，トランスで駆動電圧を昇圧しアクチュエータを駆動する方法である．本駆動装置は変調駆動法を用いて試作し，モジュール化を図った.

４．１　変調駆動法の構成回路

回路構成図を図10に示す.駆動用3相電圧信号はワンチップマイコンH8/3664(HITACHI 製)を用い3相PWM波形を発生させ，その信号をLPF(カットオフ周波数483Hz 4次)に通して得る．駆動用3相電圧の周波数は，外部からの駆動速度制御信号により制御可能で0～約190Hzの範囲で可変である．乗算器はAD534(ANALOG VEVICES 製)を用い，搬送波の信号発生器にはICL8038(HARRIS SEMICONDUCTOR 製)を用いた．終段増幅器にはLM12CLK(National Semiconductor 製)を用いた.昇圧用トランスには，PC44PQ32/30コア(TDK 製)を用い1次側15ターン，2次側1500ターン，コアのエアギャップを0.5mmとした．試作した小型駆動装置を図11に示す.

アクチュエータの駆動周波数ω_dは，搬送波周波数ω_cを入力とする乗算器の変調によって$\omega_c \pm \omega_d$へと搬送波周波数帯へ変換される．変調の様子を図12に示す.

４．２　直動テーブルの静電フィルムアクチュエータとトランスによる負荷のインピーダンス特性

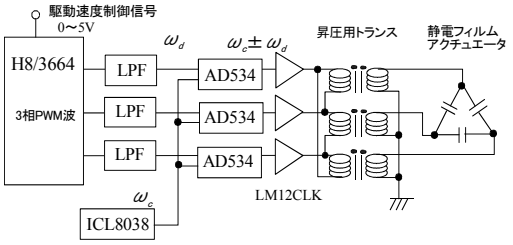


図10　回路構成図

図11　小型駆動装置とバッテリー

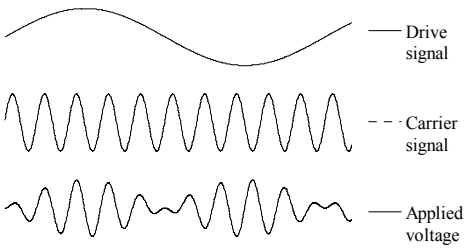


図12　乗算器による変調

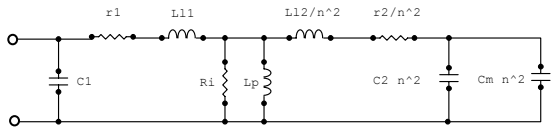
終段増幅器の負荷を考慮すると,駆動装置のトランス1次側からみたトランスー静電フィルムアクチュエータ負荷のインピーダンス特性の把握が必要である．トランスー静電フィルムアクチュエータ容量性負荷の等価回路を図13に示す．なお等価回路は2次側の各パラメータを1次側に換算し,トランス2次側の静電アクチュエータの容量性負荷も1次側に換算し理想トランスを取り除いたものである．同図のC_mは静電フィルムアクチュエータの容量負荷である.

図13は低域ではL_pに比べてL_{l1},L_{l2}は非常に小さいためL_{l1},L_{l2}は短絡と仮定する．低域から周波数を上げると，C_1,n^2C_2,n^2C_mの容量とL_pによる並列共振となり終段増幅器側から見たインピーダンスのピークが現れる.

試作したトランスとアクチュエータのパラメータをインピーダンスアナライザ(HP4194A HP製)で測定したところ，C_1=481nF，C_2=59.8pF，L_p=60.7μH，C_m=4.4nFであった.1次側からみた静電フィルムアクチュエータの容量性負荷n^2C_mは44μF，2次巻き線浮遊容量n^2C_2は598nFとなり，共振周波数f_rはおよそ次式となる.

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_p(C_1 + n^2C_2 + n^2C_m)}} \qquad (2)$$

測定した各パラメータからf_rは約3.04kHzとなる．式(2)から，搬送波周波数を決定するパラメータとしてL_p，C_1及びn^2C_m影響が大きいことがわかる.



r_1:1次巻き線抵抗
r_2:2次巻き線抵抗
L_{l1}:1次巻き線漏れインダクタンス
L_{l2}:2次巻き線漏れインダクタンス
C_1:1次巻き線浮遊容量
C_2:2次巻き線浮遊容量
C_m:静電アクチュエータ容量
L_p:1次巻き線インダクタンス
R_i:鉄損
n:巻き線比（試作機では100）

図13　負荷の等価回路

搬送波周波数は制御するアクチュエータの容量性負荷に依存するため，様々な駆動モジュールに対して汎用的に本駆動装置を利用するためには各駆動モジュールに対して搬送波の周波数を最適にする必要がある．自動的に搬送波周波数を調整する機能の付加は今後の課題である.また，本駆動装置は，搬送波周波数が可聴域の周波数であるため，騒音を発生する点が問題である．この対策も今後の課題とする.

実際に3相トランスの入力側(終段増幅器側)を⊿結線，出力側（アクチュエータ負荷側）をY結線し，負荷に直動テーブルを繋げた状態で1次側からのインピーダンス

を測定した．測定にはLCZメータZM2355(エヌエフ回路設計ブロック㈱ 製)を用いた．結果を図14に示す．結果からおよそ2.5kHzあたりが共振点となることが確認できる．終段増幅器の負荷を考慮すると搬送波の周波数を約2.5kHzに設定すると良いと考えられる．実際の回路インピーダンスより求められた共振周波数と回路モデルによる共振周波数との誤差は回路のモデル誤差によるものと考えられるが，オーダとしては近い値となる．

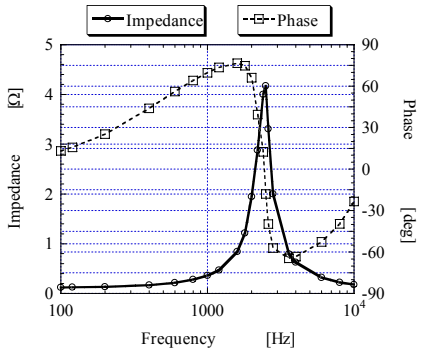


図14　トランスー静電フィルムアクチュエータのインピーダンス

５．小型駆動装置による直動テーブルの駆動実験

５．１　直動テーブルを用いた回路負荷測定

試作した小型駆動装置のアンプを用いて,4章で求めた搬送波周波数近辺において直動テーブルを駆動した時のトランス1次電圧，1次電流，2次電圧，2次電流を測定した．測定にはデジタルオシロスコープTDS3034B(Tektronix製)，高電圧プローブP3000(Tektronix製)，電流プローブTCP202(Tektronix製)を用いた．測定時，1次電圧は無負荷時に30$V_{p\text{-}p}$になるように設定した．結果を図15(a)～(d)に示す．図15(a),(b)において2050Hz付近が共振点であると考えられ，1次電圧の振幅は最大となり1次電流は最小となる.1次電圧が周波数に対して一定とならない理由は，低域，高域では負荷のインピーダンスが小さくなり，終段増幅器が飽和するためである．2次電圧に関しても2kHz付近で最大となる．2次電流は低域で少なく，高域で大きくなりピークを過ぎると減少する．

図15によって推測される共振点は4章で測定した値と比較すると低域にシフトしているが，これはアクチュエータ駆動時にフィルム間の吸引力によってフィルム間の距離が狭まり容量が増加することや，LCZメータでの測定電圧レベルと実際の駆動時の電圧レベルが大きく異なるためであると考えられる．

５．２　直動テーブルの推力測定

搬送波周波数と直動テーブルの推力の関係を実験によって調べた．力センサは3.2節と同様のものを用いた．終段増幅器の出力電圧は前節と同様に無負荷時に30$V_{p\text{-}p}$に設定した．結果を図16に示す．

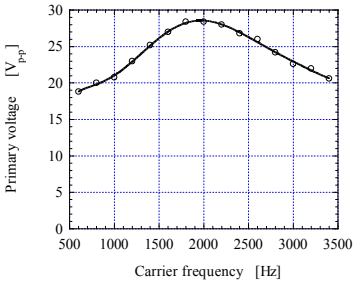


図15(a)　トランス1次電圧

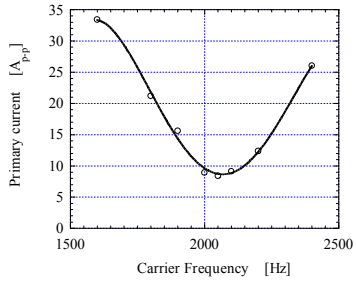


図15(b)　トランス1次電流

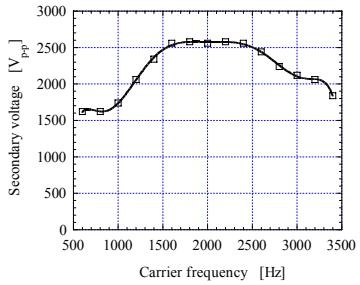


図15(c)　トランス2次電圧

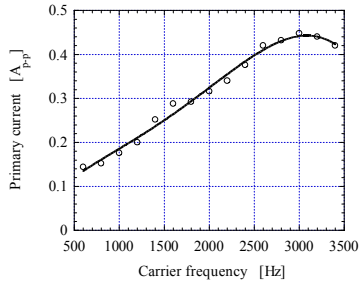


図15(d)　トランス2次電流

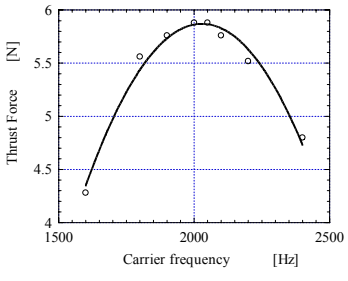


図16　搬送波周波数と直動テーブルの推力の関係

この結果から，推力が最大に達する時の搬送波周波数は，図15と照らし合わせると共振点での周波数であることが確認できる．このときアクチュエータの推力は最大で約5.9N（駆動面単位面積あたり0.063N/cm^2）であった．ステージの最大速度は駆動装置の設計上約180mm/sであった．

６．まとめ

両面駆動型静電フィルムアクチュエータを設計・試作した．試作した静電フィルムアクチュエータは両面で駆動することを確認し，1600V$_{0\text{-}p}$の駆動電圧を印加した場合，表面同士の駆動面では0.17N/cm^{2}の推力を発生した．本アクチュエータ積層した場合，従来のアクチュエータと比べ約2倍の推力を得られた．

両面駆動型静電フィルムアクチュエータを用いた薄型直動テーブルと変調駆動法を用いた小型駆動装置を開発した．直動テーブルの静電フィルムアクチュエータと小型駆動装置の昇圧用トランスのインピーダンス特性を調べ, 変調駆動法での最適な搬送波周波数の決定を行った．

試作した小型駆動装置を用いて直動テーブルの推力測定を行ったところ，最適な搬送波周波数を与えたときに変調駆動電圧1.28kV$_{0\text{-}p}$を発生し，約5.9N（0.063N/cm^2）の推力を発生した．今後は今回問題となった自動的に搬送波周波数を調整する機能，騒音の問題を検討したい．また，ロボット関節等に用いる静電フィルムアクチュエータによる回転型のクラッチモジュール，位置センサモジュールの開発や各モジュール間の統合に関する問題に取り組む予定である．

謝辞

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

文　献

[1] 新野俊樹，樋口俊郎，柄川索“交流駆動両電極形静電モータ”,日本ロボット学会誌，Vol.15，No.1，pp97-102(1997).

[2] 西嶋隆，山本晃生，樋口俊郎，稲葉昭夫“柔軟な構造を有する静電フィルムアクチュエータの開発－推力特性評価－”，精密工学会誌，Vol.69，No.3，pp443-447(2003).

[3] T.Niino, S.Egawa, H.Kimura and T.Higuchi, “Electrostaic Artificial Muscle:Compact, High-Power Linear Actuators with Multiple-Layer Structures” Proc. IEEE Workshop on Micro Electro Mechanical Systems 130-135(1994).

[4] T.Niino,T.Higuchi and S.Egawa , “Dual Excitation Multiphase Electrostaic Drive” Conf. Record of 1995 IEEE IAS annual meeting 1318-1325(1995).

[5] 新野俊樹，山本晃生，樋口俊郎“交流駆動両電極形静電モータの変調駆動”，電学論D，118巻11号，pp.1287-1291(1998).

情報収集(被災者捜索)ロボットの移動機構に関する研究（第2報）

田畑　克彦　　稲葉　昭夫　　張　勤　　天野　久徳*

Development of Mobile Robot to gather Information for Relief Activities -2nd report-

Katsuhiko TABATA　Akio INABA　Qin ZHANG　Hisanori AMANO*

あらまし　大震災等の大規模災害後の災害危険区域における要救助者捜索などの救助作業は，常に二次災害の危険にさらされる状況下であるため，二次災害による人的被害を軽減し，要救助者を安全に発見する一手法として，災害救助ロボットの開発とその利用が期待されている．これらの開発には，建築物の倒壊により生成されたガレキ内外において高い不整地移動能力を有する移動機構の開発が不可欠である．そのため，本研究では不整地に対する走行能力が高い災害救助ロボットの移動プラットフォームを開発している．移動プラットフォームは，各面を移動ユニットで構成した擬似立方体形状であり，各面はアクティブなジョイントにより接続されているので，展開図の形状をとることも可能である．したがって，移動ユニットである各面を展開することにより，不整地の路面状況に応じた形状変化を伴う移動手法をとることができるので，高い踏破性能を持たせることができる．本年度は，昨年度製作した部分試作機の移動戦略の実験的検証と，部分試作機に改良を加えた完全形態の試作機の製作およびその移動戦略の実験的検証をおこなったので報告する．

キーワード　災害救助ロボット，移動機構，形状変化機能，大規模災害，救助作業

１．はじめに

阪神淡路大震災やアメリカ同時多発テロ事件を契機に，危機管理のあり方が積極的に議論され，防災システム，救助システム等の整備が緊急課題として挙げられている．大震災等の大規模災害後の災害危険区域における要救助者捜索などの救助作業は，常に二次災害の危険にさらされる状況下であるため，二次災害による人的被害を軽減し，要救助者を安全に発見する一手法として，災害救助ロボット(レスキューロボット)の開発とその利用が期待されている[1]．

レスキューロボットの開発には，建築物の倒壊により生成されたガレキ内外において高い不整地移動能力を有する移動システムの開発が不可欠である．

現在，複数の移動ユニットを直線的に連結した擬似ヘビ型の災害救助ロボットが数多く開発されている[2～5]．この形態の移動機構は，進行方向に対する断面積が小さいため，狭部への進入に適しており，また長手方向に対する段差等の不整地に対しても高い踏破性を有している．しかし，ガイド(溝)地形のようなガレキ構造にはまった場合には，長手方向のみに高踏破性を有しているだけでは，ロボットのローリング運動によりガイド地形から脱出することができずに，結果としてロボットの活動範囲が制限されてしまう恐れがある．

これらの課題を解決するために，本研究では不整地に対する適応能力が全方向に対して高く，不整地走行中におけるロボットの安定性も高い災害救助ロボットの移動プラットフォームを考案し，開発している．

考案したロボットの独特な形状から，本研究の開発段階では”CUBIC-R (CUBIC Robot for Rescue)”と呼んでいるので，以降は簡便のため”CUBIC-R“と記述する．

本年度は，昨年度製作した部分試作機を用いて想定した不整地における走行実験を行い[6～9]，機構的に不整地において走破可能なことを実験的に確認する[8～9]とともに，機構的な問題点を抽出し，改良を加えた完全形態の試作機を製作した．また製作した完全試作機を用いて，想定した不整地走行実験を行ったので報告する．

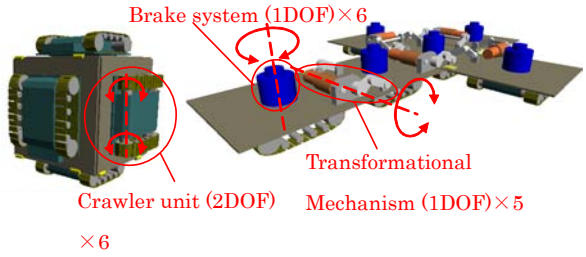
２．ＣＵＢＩＣ－Ｒの基本構造

図1にCUBIC-Rの概要を示す．本研究で提案したCUBIC-Rの形状は，擬似立方体であり，各面プラットフォーム(以下，面)に一対のクローラを搭載したクローラユニットを有する．また，このクローラユニットは，各面に対してヨー方向に１自由度を持つ結合機構により接続されている．この結合機構にはブレーキ機能を持たせているので，これをON/OFFすることで，各クローラユ

* 独立行政法人 消防研究所 基盤研究部

ニットは，信地旋回等により各面と独立にその方向を変化させることや，方向を保持することができる．また，正六面体を構成する各面には，面開閉機構が搭載されており，図1(b)のようにプラットフォーム全体の形状を展開図の状態に変化させることができる．

CUBIC-Rは，平地や軽度の凹凸路等の比較的平坦な路面では，図1 (a)のように面を格納した状態で走行し，段差やギャップ上等の激しい凹凸の不整地では，走路の状況に応じて面を開閉し，移動機構の形状を変化させ，必要ならばクローラユニットを協調動作させることにより，ガレキ内もしくはガレキ上において高踏破性を実現する．



(a) Standard mode　　(b) Full Expansion mode

図1　CUBIC-Rの概観

3．ＣＵＢＩＣ－Ｒの不整地踏破戦略

一般的に移動機構を開発するためには，その活動環境を明確にする必要がある． CUBIC-Rは1章で述べたように大小様々なガレキ環境に対応できることを目的としているため，そのような走行環境として，二次災害が発生する可能性のある半壊家屋内の移動を想定している．

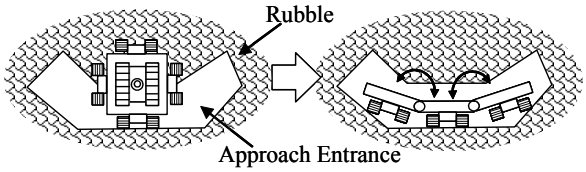


図2 狭い進入路への対応

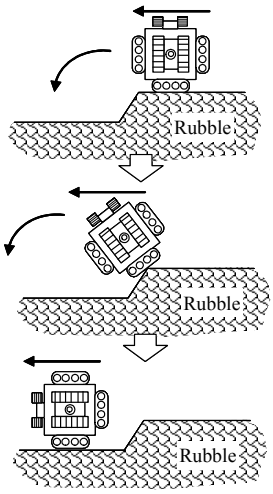


図3 スタック回避および起上り動作の解消

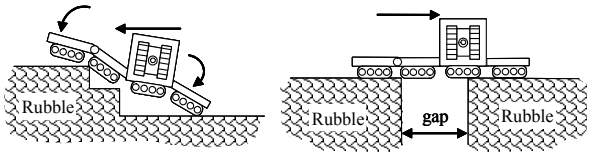


図4 段差(階段)の踏破　　図5 ギャップの踏破

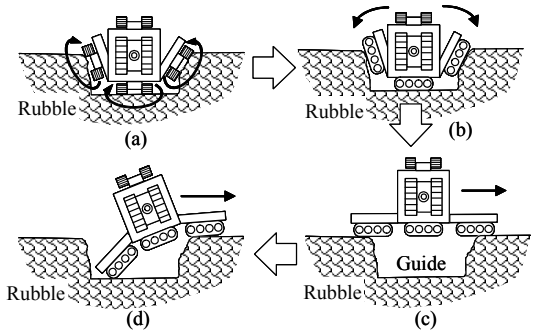


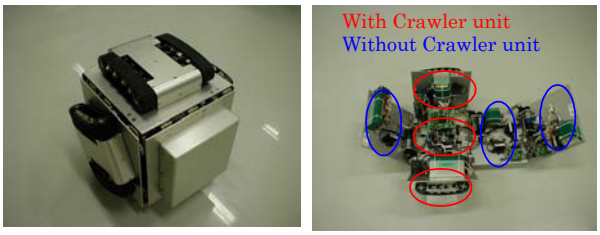
図6 ガイド(窪地)地形からの脱出

図2から図6に半壊家屋内のガレキ環境を想定し，それに対する移動戦略のイメージを図示する．詳細については，昨年度の研究報告および発表[6, 7]において述べているので省略する．

4．ＣＵＢＩＣ－Ｒの部分試作機

本研究で想定した移動戦略の機構面での実現可能性を探るために試作したCUBIC-Rの部分試作機の写真とその諸元を図7と表1に示す．

部分試作機は，図7に示すように，面開閉機構と３基のクローラユニットと結合機構を有している． 表1より，試作機の総重量が27kgとなりやや重くなっているが，強度的に十分な安全を考慮した設計を行ったことも一因となっている．将来的には，細部にわたり軽量化を検討する予定である．



(a) Standard mode　　(b) Expansion mode

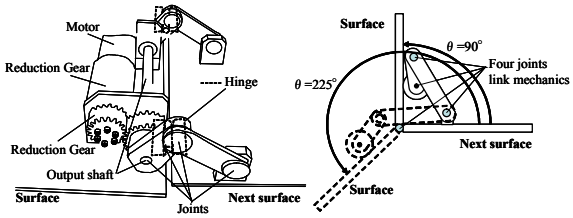
図7 CUBIC-Rの部分試作機

表1 CUBIC-Rの部分試作機の諸元

Total Weight	27.0kg
Cubic Size (Without Crawler unit)	260×260×260mm
Robot Size (Standard mode)	360×360×360mm
Robot Size (Full expansion mode)	1040×780×210mm

本試作機の面開閉機構には，図8(a)に示す四節閉リンク機構を採用している[7]．この理由は，4節閉リンク機構は，回転軸にギヤ・プーリを使用した機構に比べて，面上に設置可能であり，面格納時にはCUBIC-Rの中に格納できるので，路面の塵等の噛みこみによるスタックの可能性を少なくできるためである．

また本機構の可動範囲を図8(b)に示す．当初，可動範囲をθ=90°から190°程度に設定していたが，段差踏破の場面において，接地しているクローラユニットの登坂勾配が大きいために，その駆動モータにかかる負荷が大きくなり，50～60mm程度の段差しか踏破できない問題が生じた．このため，実装スペースの制限から，モータ出力を大きくせずに，リンク機構に必要な出力[7, 8]を維持したままで可動範囲を広くとれるよう，リンク機構を再設計/製作した．これにより，200mm以上のより高い段差を踏破できるようになった．



(a) 概略図　　(b) 可動範囲

図8 四節閉リンク機構

制御システムは，ロボット全体の運動を制御するコントローラの下に，各アクチュエータを制御するコントローラを配置する分散制御方式を採用した[7]．これにより，コンパクトに配線することが可能になった．ロボット内の通信ネットワークしては，単純で高速通信が可能なRS-485を採用した．

5. 部分試作機による不整地走行試験

図7の部分試作機を用いて，クローラの基本運動能力と，3章で想定している不整地の走行が機構的に可能であるかを確認した．

基本運動能力については，クローラの駆動力を確認するために，登坂実験を行う．

また，想定した図2に示す狭い進入口への対応戦略は，理論的には，CUBIC-Rが長手方向へ展開した状態で進入する方法が最も断面積が小さくなり，狭部への進入が容易であるが，一概に断面積の大小だけでなく，その三次元的な形状にも影響されるため，定量的な判断は難しいので本報告では扱わない．ただし，本移動機構は，展開時には平たい形状になる特徴があるため，パンケーキ状に座屈した倒壊家屋内への進入に適していると期待できるが，将来的にNPO国際レスキューシステム研究機構が所有するテストフィールド[10]で走行試験を行い，評価する必要があると考える．

図3に示す転がりによるスタック回避と移動については，物理的に自明であるので省略する．

５．１ 実験形態

図9に示すように，本移動機構は3面方向と4面方向が存在するが，クローラユニットが装備されている3面を用いた走行実験を行った．その他の実験形態は以下の通り．

- 4面方向の形状については，ロール方向のバランスを考慮し，格納した状態
- 3面方向の面開閉機構については，独立に駆動可能
- 進行方向を制御するための面とクローラユニットとの相対角は，それぞれについて，独立に変更可能
- 前後進は，3面すべてのクローラユニットが前後進する
- 操縦の便宜上，進行方向の面およびクローラユニットを常にSurface2とする

５．２ 登坂実験

○方法

木材の板の斜度を増大させ，登坂可能な斜度を計測する．この実験における評価条件は次のとおりである．

- CUBIC-Rを斜面に置いた状態でクローラユニットを駆動し，垂直に登坂させる
- 斜度の変化は，試験機材の関係から12, 15, 24, 27, 及び32°，38°とする
- 二面登坂では，後方面を展開し，前方面を格納した状態で登坂させる

○結果

評価実験の結果を表2に示す．本実験で，少なくとも斜度27°の登坂が可能であることを確認した．また，この表より，ロボットを質点として扱って計算すると，駆動したクローラユニットの数量1，2および3基に対する，登坂に必要な駆動力は，それぞれ68N,

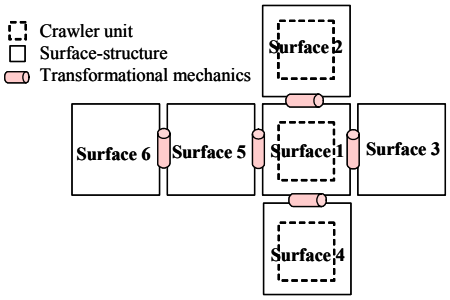


図9 面の名称

表2 部分試作機の走行試験結果

Item	Number of driving crawler unit	Result
Going up a slope	1 (Surface 1) 2 (Surface 1 and 4) 3 (Surface 2, 1 and 4)	Inclination 15 degrees 23 degrees 27 degrees
Climbing a step	3 (Surface 2, 1 and 4)	Height above 200mm
Climbing the stairs	3 (same as above)	Angle of flight 27 degrees (rise 160mm, tread 320mm)
Traveling across a gap	3 (same as above)	Width 325mm
Crawling out of a guide	2 (Surface 2 and 4)	Width 500mm Depth above 200mm

103Nおよび120Nであり，クローラユニット数と登坂に必要な駆動力とは比例関係にない．この理由として，斜面の勾配により重心が後方に移動し，前方面の垂直抗力が低下したために前方面の推力の伝達効率が低下している可能性が考えられる．

５．３ 段差の踏破実験

○方法

コンクリートブロックを用いて路面との垂直の段差を構築し，踏破実験を行う．

○結果

評価実験の結果を表2に示す．本実験で，少なくとも200mmの段差を踏破可能であることを確認した．

５．４ 階段の踏破実験

○方法

実験に用いた階段の形状を図10に示す．本実験では公共の建造物であるJRの駅の階段を模擬している．若干サイズがターゲットよりも小さいが，構造物として用いたブロックの規格のためであり，階段斜度θ=27°は同じ値としている．

なお，段数を3段としたのは，これ以下の少ない段数では，階段構造による地形的拘束が十分に再現できないためである．3段では，少なくとも1段目は，階段構造を再現できていると考える．

○結果

評価実験の結果，図10に示す階段を踏破できることを確認した．

図11(a)～(h)は，階段の地形拘束を最も忠実に再現している1段目から2段目への踏破を時系列的に示している． 本実験により，CUBIC-Rの階段踏破動作は以下の①～⑥のシーケンスの繰り返しによって階段を踏破できることがわかった．これは，1段目の初期の動作(図11(a), (b))と2段目の初期の動作(図11(g), (h))が同じになっていることからも確認できる．

① 面を格納した状態で段差に進行(図 11(a))
② クローラユニットの駆動力と 2 段目の段差衝突による反力のモーメントにより，ロボットをピッチ方向に回転させ，中央面を 2 段目近くに接近させる(図 11(b))
③ 前方の面開閉機構の駆動により前方クローラユニットを 3 段目に接地させる．この駆動力は，ロボットをわずかに前方に移動させる．②と前方の面開閉機構の駆動動作により，後方面の 1 段目の足場を確保できる(図 11(c))
④ 後方面の展開により，2 段目付近まで中央面を持上げる(図 11(d))．これによって，中央のクローラユニットの実際の登坂勾配を減少する．
⑤ 前方面が 3 段目と干渉しないように，格納動作させる(図 11(e))

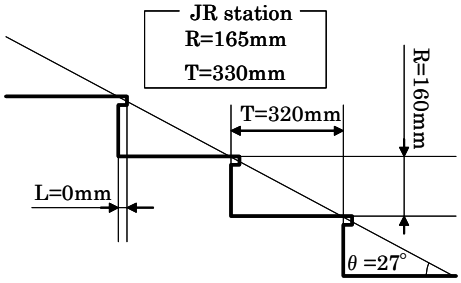


図10 階段の寸法

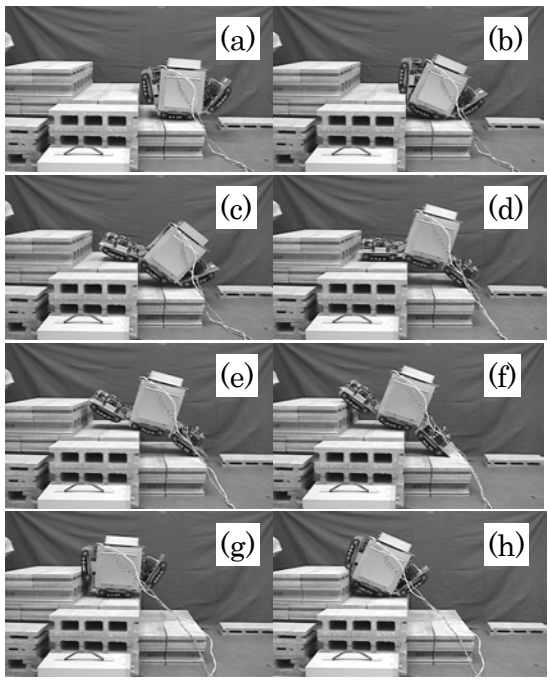


図11 階段踏破実験

⑥ クローラ駆動により，2 段目に移動機構を移動させ (図 12(f))，図 12(g)の面格納状態に戻す

５．５ ギャップの踏破試験

○方法

コンクリートブロックを用いて水平にギャップを構築し，踏破実験を行う．

○結果

評価実験の結果を表2に示す．この結果は，質量が各面に均一に分布していると仮定した理想的な構成での理論値350mmに対して若干小さくなっている．この理由としては，移動機構の重心がやや前方に偏っていることが考えられる．

５．６ ガイド地形脱出（はい上がり）動作の確認

○方法

コンクリートブロックを用いて，幅が500mmで深さが異なる窪地を構築し，窪地這い上がりが可能かどうかを判定する．

○結果

評価実験の結果，すくなくとも幅500mm，深さ

200mmの窪地から這い上がれることを確認した．この実験結果は，機構シミュレーションを用いて設定した値130mmを大きく上回っている．この理由として，面開閉機構の駆動トルクの安全率を大きく設定したことや面の展開動作と同時に，ロボットを持上げる方向にクローラを駆動させたので，クローラの駆動力が這上がりに寄与していることなどが考えられる．

６．完全試作機の製作と不整地走行試験

5章の部分試作機を用いた不整地走行実験により，機構部の改良が必要であることが判明した．本章では，重要な改良内容について述べた後，改良を加えて製作した完全試作機について，部分試作機と同様の不整地走行試験をおこなった結果について述べる．

６．１ 問題点抽出と完全試作機の改良内容

部分試作機における走行実験によって判明した機構面における問題点は4章に示した面開閉機構の改良等，多岐にわたったが，本章ではロボットの移動能力に特に影響を及ぼすサスペンション機構の改良についてのみ述べることとする．

サスペンション機構は，クローラベルトのガイドに装備され，主に地面との衝突にともなう衝撃力からクローラ駆動軸を保護するためと，複数のクローラユニットによる多くの接地点を確保し，より大きな推進力を路面に伝達させるための機構である．したがって，この機構の良否がロボットの移動能力（推進力）に大きく影響する．

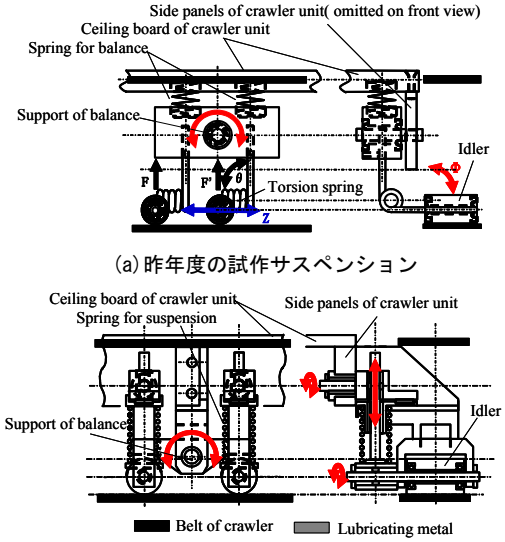
○駆動効率の低下

昨年度試作したクローラユニットのサスペンション機構の概略図を図12(a)に示す．天秤バネとねじりバネによるサスペンション構造をとっているため，そのストロークの方向は，図中におけるz，θおよびΦ方向である．クローラベルトを駆動させた場合，アイドラーは，駆動力と同方向のz方向に変位する．正z方向の変位は，正確にはねじりバネの鉛直軸を中心に回転する変位であるから，アイドラーの回転方向とベルトの移動方向に角度が生じる．結果として，ねじりバネのz方向の復元力がクローラの伝達方向と逆向きに働き，駆動力を低下させている．サスペンションは，各クローラユニットに8基装備されているため，駆動効率が大きく低下している懸念があった．

○天秤機能の問題

図12(a)に示すように，ベルト張力を保つために2つのアイドラーを1組とした天秤機能を備えている．しかしながら，図中において右側のガイドに上方向の力がかかった場合，この力が天秤支点上を通るために，モーメントが発生せずに，天秤が機能しない問題があった．

以上の問題を解決するために，図12(b)に示すような構造とした．ガイドに直結したねじりバネを廃止し，かつガイドを両持ち構造とすることにより，z方向への変位をなくした．さらに，ガイドとサスペンションバネを正面図のように直線上とすることにより，天秤を機能させる構造とした．



(a) 昨年度の試作サスペンション

(b) 改良後のサスペンション

図12 クローラユニットのサスペンション機構

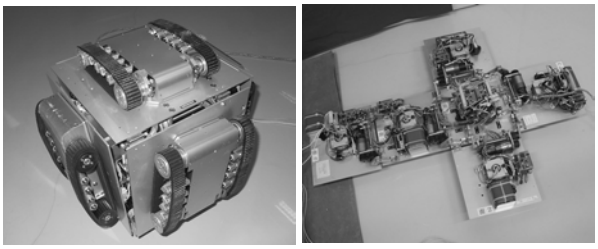
６．２ 完全試作機の製作

図13に本年度製作したCUBIC-Rの完全試作機を示す．本年度製作した完全試作機は，図9の4面側、すなわちSurface1，3，5および6に，新規製作したクローラユニットを取り付け，Surface 3，5および6に結合機構を増設した．

完全試作機はクローラユニットと結合機構を増設したために，31kgと重量が増したが，全体寸法は変化せずに製作できた．重量については，ロボットの移動能力に深刻な影響をもたらすので，来年度以降に製作する予定の二次試作機で，大幅な軽量化が必要である．

６．３ 完全試作機による不整地走行実験

完全試作機を用いて，5章で述べた部分試作機と同様の実験を行った．実験結果を表3に示す．　表3より，不整地踏破に4面を用いることで，全般にわたって踏破性能が向上していることがわかる．これは，4面構造による幾何



(a) Standard mode　　(b) Expansion mode

図13 CUBIC-Rの完全試作機

学的なアドバンテージのほかに，表3の登坂実験結果で明らかなように，4面を用いた実験では38°までのスロープを登坂可能であることから，クローラユニット増加に伴う推力の増加も見られる.5章と同様の方法で駆動力を計算すると，3面で120Nであったものが，4面では187Nの駆動力を有していることになる.

また,サスペンション機構改良に伴う駆動力の向上は,表2と表3における同じ2面を用いた登坂実験により確認できる．完全試作機ではロボット重量が増加しているにも関わらず,登坂斜度は,23°から32°に向上しており,この場合に必要な駆動力は,それぞれ103Nと161Nである.本結果より，駆動効率の大幅な改善を確認できた.

表3 完全試作機の走行試験結果

Item	Number of driving crawler unit	Result
Going up a slope	2 (Surface 1 and 3) 4(Surface 1, 3, 5 and 6)	Inclination 32 degrees 38 degrees
Climbing a step	4(Surface 1, 3, 5 and 6)	Height above 320mm
Climbing the stairs	4 (same as above)	Angle of flight 32 degrees (rise 160mm, tread 260mm)
Traveling across a gap	4 (same as above)	Width 400mm
Crawling out of a guide	3 (Surface 3, 5 and 6)	Width 500mm Depth above 200mm

６．４ 完全試作機における課題

完全試作機の不整地走行実験により，走行中に保持しているはずの面とクローラユニット間の相対角が変化してしまう問題が発生した．現在の結合機構のブレーキ機能は電磁ブレーキにより制動/保持しており,定格以上のヨー方向の力がクローラユニットに加わると，すべりにより変位してしまう構造であるため，制動力が不足していることを意味する.

部分試作機による走行実験ではあまり問題にならなかったことを考えると重量増加によりクローラユニットに対してヨー方向にかかる力が増加したことが原因と考える．今後，ロボット自重の軽量化と平行して，結合機構を改良する必要がある.

7. おわりに

本報告では，昨年度に製作した部分試作機を用いて，想定した不整地走行実験を行い，機構面において可能であることを示した．また，部分試作機における機構的な問題点を抽出し，完全試作機の製作に反映させた．最後に完全試作機を用いた同様の走行実験により，完全試作機においても想定した移動戦略が可能であることを確認した．今後は，ロボットの軽量化ならびに結合機構の改良を行い，移動能力を向上させる予定である.

謝辞

本研究は文部科学省大都市大震災軽減化特別プロジェクトの一環としてなされたものである.

参 考 文 献

[1] 高森ら, “レスキューロボット機器研究会報告書”, 日本機械学会 ロボティクスメカトロニクス部門研究会, 1997年1月17日.

[2] 明石，加藤，西山， “移動形態変化型ロボット～形態変形機構の試作～”, 日本機械学会 ROBOMEC’99講演論文集, 1P2-40-054, 1999.

[3] 北島, 大須賀, ”四面クローラ機構を有する多関節ガレキ内探索ロボットの開発”, 計測自動制御学会 SI2002講演論文集(I), pp.245-246, 2002.

[4] 高山, 広瀬, 新井, “ガレキ内推進連結クローラ走行車「蒼龍III号機」の開発”, 日本機械学会 ROBOMEC’03 講演論文集CD-ROM, 2P1-2F-B5, 2003

[5] 亀川, 山崎, 五十嵐, 松野, “車両連結ヘビ型レスキューロボットKOHGAの開発”, 日本機械学会 RSJ2003講演論文集CD-ROM, 1L14, 2003.

[6] 稲葉，田畑，張，天野，”形状変化機構を有する多面体移動機構の提案”, 計測自動制御学会 SI2002講演論文集(I), pp.243-244, 2002.

[7] 田畑, 稲葉, 張, 天野, “情報収集(被災者捜索)ロボットの移動機構に関する研究”, 岐阜県生産情報技術研究所研究報告書, No.4, pp.31-36, 2003.

[8] 田畑, 稲葉, 張, 天野, “形状変化機構を有する多面体移動機構の開発”, 日本機械学会 ROBOMEC’03講演論文集CD-ROM, 1P1-2F-B2, 2003.

[9] 田畑, 稲葉, 張, 天野, “形状変化機構を有する多面体移動機構の開発-第2報:移動戦略の実験的検討-”, 計測自動制御学会 SI2003講演論文集CD-ROM, 1P1-2F-B2, 2003.

[10]http://www.rescuesystem.org/tmp/NEW/en/framepage06.htm

福祉ロボットに適応した作業指示技術の研究（第2報）

今井　智彦　　張　勤　　小川　行宏
浅井　博次　　張　明　　稲葉　昭夫

A Human-Friendly Interface Design for Instructing Support Robot (II)

Tomohiko IMAI　Qin ZHANG　Yukihiro OGAWA
Hirotsugu ASAI　Ming CHANG　Akio INABA

あらまし　現在，家庭内において高齢者などの自立支援や介護者の作業支援を行う福祉ロボットの実現が期待されている．しかし，ロボットによる支援を実現するためには多くの問題が残されており，その一つに“使いやすさ”という点がある．本研究では，誰もがロボットを利用できるようにするため，簡単に作業指示ができるインタフェースの開発を目指す．具体的には，ロボットの目（カメラ）を通して見える画像を利用して作業指示ができる技術と，指示された作業を実際に遂行するロボットの自律化に必要な技術を開発する．本年度は，前年度検討した指示方法に音声を組み合わせた指示方法と，アームの位置・姿勢制御手法について検討した．また，家庭内における軽量物体の搬送作業を想定し，テストベッド上への実装を試みた．

キーワード　福祉ロボット，作業指示，ヒューマンインタフェース，アーム制御

１．まえがき

現在，人が生活する環境で人と共存し，仕事や生活を支援する民生用ロボットシステムの研究開発が盛んに行われている．この研究開発には，企業の製造ラインにおいて活躍している産業用ロボットシステムを実現する際に培われてきた研究の成果が活かされている．ただ産業用ロボットシステムは，人の労働を支援するものではあるが，専門技術者があらかじめ作業内容を登録し，（基本的に）人が立ち入ることを禁止した作業空間内で，画一的な作業を実行するシステムであることから，人と共存できるシステムとは言い難い．一方，民生用ロボットシステムは，人とロボットが同じ生活環境に存在し，人が要求する内容に応じてロボットが動作することが前提となる．そのため，人とロボットとの親和性を高める必要がある[1]．人と親和性の高いロボットシステムを構築するためには，安全性，情緒性，操作性などの技術的課題を解決していく必要がある．

一般的にロボットに対して作業指示をする場合，専門技術者がそのシステム特有の方法を用いて指示していた．しかし，その方法は特有の知識が必要なため，一般の人々が作業を指示することが困難であり，仮に指示できたとしても使いにくいものである．そのため，一般の人々が指示方法を容易に理解でき，使いやすいと感じられる方法が必要となる．

その一環として，現在ロボットの視点から得られる作業環境の情報を活用する研究が数多く行われている．これらの研究では，ロボットに搭載されたカメラから取得した画像情報に対して直接指示をする方法[2,3]や，画像情報を見ながら音声指示をする方法[4]が検討されている．前者は，ロボットを直感的に指示できる有効な方法であるが，作業の中には画像情報への直接指示だけでは指示が難しい場面（例えば別の部屋への移動指示）が存在する．また後者は，人が自然な形で指示できる有効な方法であるが，現状では入力される指示をロボットが理解できなかったり誤認識したりすることがある．

本研究では，ロボットの目（カメラ）を通して見える画像を利用して誰もが簡単にロボットへの作業指示ができるインタフェースの開発を進めている[5]．これは，人ーロボットの系（指示機能）とロボットー作業環境の系（自律機能）を合わせて検討し，ロボットによる搬送作業（移動，把持作業）を一貫して行えるようにすることを特徴とする．前回の報告では，作業指示の基本方針を定め，それを基に作業の指示方法および指示画面の構成を検討した．本報告では，前年度検討した指示方法に音声を組み合わせた指示方法と，アームの位置・姿勢制御手法について検討する．また，家庭内における軽量物体の搬送作業を想定し，テストベッド上への実装を試みる．

２．作業指示インタフェース[5]

ユーザがロボットに対して作業を遂行させるために行

う“指示”は複数の指示の組み合わせであり，例えば「これを取れ」や「ここへ行け」という形に細分化できる．そこで，指示の最小単位Iを「I = X+Y」(+は前後の項を組み合わせるという意）とする．ここで，Xは物体・場所を示す言葉（名詞，指示代名詞），Yは行動を示す言葉（動詞）が当てはまる．この方法では，ユーザは一回の指示においてXとYを入力する必要がある．この2つの入力を容易にするため，本研究ではXの入力にロボットの目（カメラ）を通して見える画像を，Yの入力にボタンを用いる．また，Xの入力において，画像による入力が難しい場面では補助情報（例えば作業環境の地図）を用いて入力できるようにする．

図1に本研究で使用するテストベッドのシステム構成を示す．前回報告では，家庭内における軽量物体の搬送作業を想定し，テストベッド上に前述の作業指示方法と必要最小限の自律機能を実装した．本報告では，さらに操作性を向上させるため，指示機能と自律機能の高度化について検討し，これらの実装を試みる．

3．指示機能の高度化

3．1　音声による指示

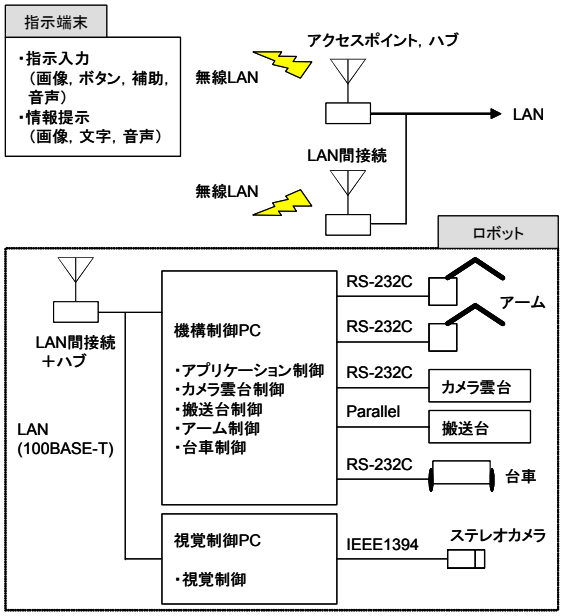
前章で述べたXとYを入力するため，音声を用いることを考える．多くの場合，ユーザがXとYを発話することに問題が生じる可能性は低い．しかし，ロボットシステム上では以下のような問題を解決する必要がある．

（1）指示の未完了

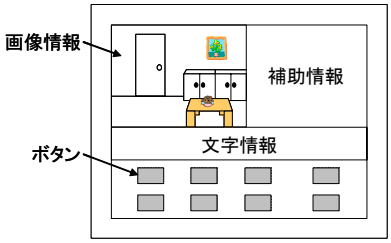
人は何かを依頼するために他者と会話を交わすとき，一回の発話で依頼内容をすべて伝えることもあれば，複数回の発話で依頼内容を伝えることもある．ユーザがロボットに指示を出すときも同様であり，一回の発話で指示が完了しない可能性がある．そのため，ロボットシステム上で期待する指示を完了させるため，指示に不足する情報を入力するようユーザに促す必要がある．そこで本研究では，ユーザとの会話を通して指示を完了する機能を付加する．例えば，ユーザより「Yして」という指示があった場合，Xが不足しているため，ロボットシステムはYに応じて「どれですか？」とか「どこですか？」とユーザに提示してXの入力を促すようにする．

（2）指示の誤認識

現在開発されている音声認識システムは，いずれにおいても入力された言葉を完全に認識することができない．そのため，ユーザからの指示があったにも関わらず指示を受け付けられなかったり，ユーザからの指示をユーザの意図しない指示として受け付けてしまったりする可能性がある．この対策としては，例えば音声認識システムの認識結果が登録された指示と一致しているかどうかを判断し，一致しない場合は別手法を用いて再度認識を試みることにより認識できる言葉を増やすという方法がある[4]．しかし今回は音声認識システムで認識できる範囲



(a) 概略図



(b) 指示画面

(c) 前回報告のロボット外観

(d) 本報告のロボット外観

図1　テストベッドのシステム構成

にとどめて指示を判断する．

（3）指示の複雑化

音声による指示では，画面による指示と比較して入力される項目が増えてしまうことが考えられる．例えば，物体を選択する場合を考える．画面による指示では，画像中の物体を選択すればいい．しかし，音声による指示では，画像中の物体についての情報を発話しなければならないが，画像中の状況によりその内容が変化する．画像中の物体がすべて異なる名称であれば，その名称だけを発話すればいいが，同じ名称の物体がある場合は，名称に加えてその特徴などを発話する必要がある．このように，前節で述べたX,Yだけでは音声による指示が不十分となることがある．ただ人が使用する言葉をすべて網

羅することも困難である．そこで今回はXを修飾する言葉W（形容詞）にとどめて追加する．

３．２　指示の組み合わせ

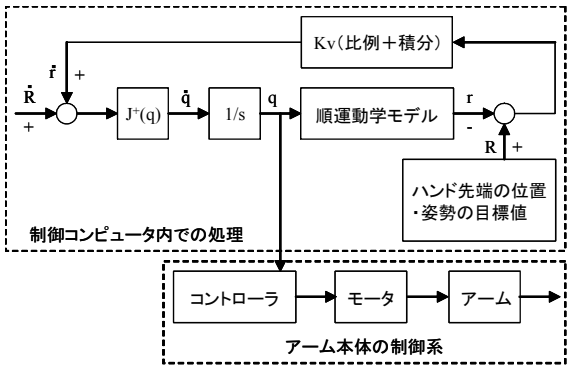
画面(画像やボタン)による指示と音声による指示は，それぞれが独立して機能するのではなく，ユーザが状況に応じて自由に選択して使用できるように，連係して機能した方が，より指示しやすくなると考える．しかし，Xについては，画面による指示と音声による指示では得られる情報の性質が大きく異なる．例えば，物体を選択する場合，前者では画像中の位置となるが，後者では物体に関する言葉となる．そこで，画面による指示と音声による指示を対応づける必要がある.その一手法として，あらかじめ知識データベースを構築しておき，これを基に指示内容に応じた固有データを抽出することで，両方の指示に共通の情報を得るという方法が考えられる．しかしその方法は，指示対象の認識（物体や場所の認識）が必要不可欠であるため，今後の課題とする．今回は指示入力された時点で入力毎にあらかじめ登録された識別子を付与し，これらに応じて後段の処理に必要最小限のデータを抽出することとする．

４．自律機能の高度化

４．１　アームによる物体把持

アームに物体を把持させるためには，物体が存在する位置にハンド先端を移動させ，それと同時に対象物体の状態に応じてその姿勢を制御する必要がある．今回の搬送作業においては，テーブルのような台上に配置された物体の把持を基本動作として想定する．すると，多くの場合，ハンド先端の姿勢が床面と水平になるように制御すれば物体を把持できると考える．

図1(c)に前回の報告で使用したロボットの外観を示す.アームはロボットの肩部分に，産業用ロボットと同様，垂直置きに取り付けられている．この場合，ハンド先端の姿勢を一意に決められるため，ハンド先端の位置だけを制御していた．図1(d)に本報告で使用するロボットの外観を示す．アームはロボットの肩部分に，人と同様，水平置きに取り付けられている．この場合，ハンド先端の姿勢を一意に決められないため，ハンド先端の位置と姿勢を制御する必要がある．



R：目標とするハンド先端の位置・姿勢　Ṙ：目標とするハンド先端の速度
r：ハンド先端の位置・姿勢　ḟ：ハンド先端の速度
q：関節軸の角度　q̇：関節軸の駆動速度
r – R = [dx, dy, dz, δx, δy, δz]ᵀ

図2　アーム制御ブロック図

４．２　アームの位置・姿勢制御手法

本研究では，アームの順運動学モデルを制御コンピュータ内に設け，順運動学モデルが正確であれば実際のハンドも目標値通りの運動をするというセミクローズド制御方式を用いることとする．

図2に制御ブロック図を示す．なお，今回使用するアームは5自由度である．目標となるハンドの位置・姿勢と順運動学モデルにより得られるハンドの位置・姿勢を比較し，それぞれの誤差をフィードバックする．そして，それらを逆ヤコビ行列により各関節軸の駆動速度に変換し，これらの値を積分して各関節軸の角度を得ている．ここで得られた角度は順運動学モデルへの次入力となっている．このループは誤差が決められた閾値を下回るまたは角度の計算回数が既定回数を超えるまで繰り返される．

ここで，位置誤差については，目標と順運動学モデルにより得られる位置との差として，非常に単純かつ一意に求められる．しかし，姿勢誤差については，姿勢ベクトルを修正するためにベース座標系の各軸周りに回転させる微小回転量δx，δy，δzの組み合わせが無限に存在するため，一意に求めることができない．

そこで本研究では，アームの持つ特異姿勢を回避する観点からも，可操作性の概念[6]を用い，最も可操作度を大きくするベース座標系の軸に関しての微小回転を採用することとする．R_1をベース座標系に対するハンド先端の目標姿勢ベクトルとし，R_2をベース座標系に対するハンド先端の現在姿勢ベクトルとしたとき，ベース座標系の各軸周りの微小回転量δx，δy，δzとハンド先端の姿勢を表すR_1，R_2との関係は近似的に

$$\begin{bmatrix} 1 & -\delta z & \delta y \\ \delta z & 1 & -\delta x \\ -\delta y & \delta x & 1 \end{bmatrix} R_1 \approx R_2 \qquad (1)$$

と表せる．式(1)を満足するδx，δy，δzの組み合わせは無限に存在しているが，ハンドの持つ特異姿勢の回避を考慮した微小回転量について，次のような求め方を提案する.ベース座標系の各軸周りの微小回転量δx，δy，δzとアームの関節軸θ_1～θ_5における微小回転量$\Delta\theta_1$～$\Delta\theta_5$との間にはヤコビ行列J(q)より

$$[\delta x, \delta y, \delta z]^{\mathrm{T}} = J(q) \cdot [\Delta\theta_1, \Delta\theta_2, \Delta\theta_3, \Delta\theta_4, \Delta\theta_5]^{\mathrm{T}} \qquad (2)$$

という関係が成立している．これより関節軸θ_1～θ_5に関する可操作度ωについて評価する．

$$\omega = \sqrt{\det J(q)J^{\mathrm{T}}(q)} \tag{3}$$

δx，δy，δzのうちの1つを0とした時の可操作度をそれぞれ求め，これら3つの中で最も可操作度が大きくなるベース座標系の軸に関する微小回転を選ぶと，作業領域の大きさ，位置・姿勢精度，信頼性，安全性が高くなると考える．

５．実装

前回の報告では，“家庭内においてロボットにより部屋にある軽量物体をユーザのいる部屋に運ぶ”作業を想定し，以下のような条件下での実装を試みた．

- 作業環境におけるユーザおよびロボットの初期位置，対象物体を置いた台の位置は既知．
- 対象物体は円筒形状で，大きさおよび色は既知．

今回は，図1(d)に示すテストベッド上にて，前回報告における実装に対して追加・変更を行った．

５．１　音声入力

指示端末上に，音声入力ルーチンを追加した．音声認識された文字列を各項目に分割し，それらを対応する識別子（数値データ）に変換した．今回は認識可能な言葉を，Xについては対象物体の名称と形状，Yについてはボタンに表示された文字，Wについては対象物体の色（赤，黄，緑）とした．なお，音声認識にはViaVoiceおよびViaVoice SDK（IBM製）を利用し，あらかじめ登録された単語や句を認識するようにした．

５．２　アーム制御

機構制御PC上に実装していたアーム制御ルーチンを以下のように変更した．

ハンド先端を目標点に動作させるときの処理は次のようにした．はじめに，目標点から既定距離だけ離れた位置に中継点を設け，さらに目標点と中継点の間にいくつかの点を設けた．次に，中継点から目標点までの間の各点について，前章で述べた位置･姿勢制御手法を用いて，各点における各関節軸の角度を求めた．角度を目標点まですべて求めることができた場合は，中継点，目標点の順にアームを実際に動作させた．角度を求めることができない場合は，中継点を変更して再度同じ処理を行った．いくつか中継点を変更しても角度を求めることができない場合は，処理を終了した．

５．３　動作確認

実装した項目について動作確認を行った．図3に把持作業を指示したときの指示画面およびアーム動作の例を示す．この場合，ユーザにより指示された上部が赤い円筒形状の物体をロボットに把持させることができた．

(a) 指示画面

(b) アーム動作

図3　把持作業例

６．まとめ

本報告では，前回報告した方法に音声を組み合わせた指示方法と，アームの位置・姿勢制御手法について検討した．また，家庭内における軽量物体の搬送作業を想定し，テストベッド上への実装および動作確認を行った．今後は，指示できる項目を増やしつつ指示が複雑にならない画面設計をし、この評価を行う予定である．

文　献

[1] 人間共存型ロボット研究専門委員会，“人間共存型ロボットシステムにおける技術課題”，日本ロボット学会誌，Vol.16, No.3, pp.288-294, 1998.

[2] 相澤伸，小菅一弘，“生活支援ロボットシステム -MARY-　-第2報：複数の作業への対応-”，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'03講演論文集 CD-ROM, 1A1-2F-D8, 2003.

[3] 木野泰之，岡田慧，稲葉雅幸，井上博允，“視覚主導型ヒューマノイドロボットの遠隔操作システム”，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'03講演論文集 CD-ROM, 2A1-1F-G6, 2003.

[4] 濱田純，槙原靖，矢野恵生，滝澤正夫，白井良明，三浦純，島田伸敬，“必要に応じてユーザと対話しながら行動するサービスロボット”，第21回日本ロボット学会学術講演会 CD-ROM, 1E26, 2003.

[5] 今井智彦，小川行宏，千原健司，張明，張勤，棚橋英樹，稲葉昭夫，“福祉ロボットに適応した作業指示技術の研究”，岐阜県生産情報技術研究所研究報告，No.4，pp.23-26, 2003.

[6] 吉川恒夫，“ロボット制御基礎論”，コロナ社，1988.

マッキベン型アクチュエータを用いた内視鏡訓練用ぜん動運動アクチュエータの開発

西嶋 隆　稲葉 昭夫　吉田 敏*　高橋 義人**　鈴森 康一***

A Peristaltic Motion Actuator utilizing McKibben Actuator

Takashi NISHIJIMA　Akio INABA　Satoshi YOSHIDA*　Yoshihito TAKAHASHI**
Koichi SUZUMORI***

あらまし　内視鏡訓練に用いる動的な大腸モデルの開発を目指し，筒状モデルの内壁にぜん動運動を生成するアクチュエータを開発した．本アクチュエータは，腸管に存在する輪状筋を模擬したリング状のマッキベン型アクチュエータを複数配列し構成する．リング状のマッキベン型アクチュエータは空気圧を印加することによりリング内径方向に収縮し，これを配列したアクチュエータに順次空気圧を印加することにより，ぜん動運動を生成する．本研究では，考案するぜん動運動アクチュエータの運動解析を行い，アクチュエータ内に物体が搬送される可能性を示した．試作したアクチュエータを用いてぜん動運動を生成し，物体の搬送実験によって，剛体の鉄球，アルミ丸材や柔軟体のスリーブが搬送されることを確認した．本アクチュエータを用いて人の大腸モデルへの適用を検討し，人の大腸を模擬したスリーブに本アクチュエータを適用した．

キーワード　ぜん動運動，マッキベン型アクチュエータ，内視鏡訓練

１．緒言

近年，外科手術や検診において患者の負担を低減するための低侵襲な内視鏡検査・手術や腹腔内外科手術が行われている．中でも内視鏡下での検査や手術は一般的に広く行われ，患者の負担は低減されてきている．一方，このような低侵襲な内視鏡下での検査や手術は内視鏡操作に熟練が要求され，医師，医学生の高度な技術の習得が大きな課題となっている．

このような内視鏡訓練用として，従来，シリコンゴムで作られた実技用モデル[1]を用いての訓練が行われている．さらにVR技術を取り入れた訓練機器の開発も報告され，そこでは内視鏡操作における力覚を表現可能な「力覚付バーチャル内視鏡システム」の開発[2]がなされている．

本研究では，より臨場感のある大腸内視鏡訓練機器を開発するため，人の大腸と似ている豚の腸を柔軟に固定化処理したものを訓練機器に導入する．この豚の腸にぜん動運動を発生させるアクチュエータを装着し，訓練時に若干の腸の動きを与えるシステムを付加する．

実際の内視鏡手術では，ぜん動を抑える前処理を行うことが殆どであるが，若干の腸の動きも確認される場合がある．また，近年開発されたカプセル内視鏡[3]においては，ぜん動運動を利用してカプセルを搬送するため，腸管のぜん動運動を模擬するアクチュエータによって，カプセル内視鏡の動きを模擬することが可能となると考えられる．以上を踏まえ本研究では，ぜん動運動可能な大腸モデルを開発することを目的とする．

過去にぜん動運動用のアクチュエータは多く報告されているが[4-5]，アクチュエータの表面にぜん動運動を発生させるものが殆どである．本報告では腸管のように管内面にぜん動運動を発生するアクチュエータを考案し，試作したアクチュエータの運動解析，ぜん動運動による物体の搬送実験の結果報告，及び人の大腸モデルへの適用について検討する．

２．ぜん動運動用アクチュエータの構造

ぜん動運動用アクチュエータの模式図を図1に示す．アクチュエータはスリーブとその周りに配列したリング状のマッキベン型アクチュータにより構成する．スリーブはナイロン繊維を編んだものであり，直径方向に収縮すると長さ方向に伸びる性質がある．これは固定化処理した柔軟な豚の大腸を容易に着脱するために設ける．

２．１　スリーブ

固定化処理した豚の大腸とアクチュエータとの着脱を容易にするためのスリーブを試作した．写真を図2に示す．

*　岐阜大学工学部生命工学科
**　岐阜大学医学部
***　岡山大学工学部システム工学科

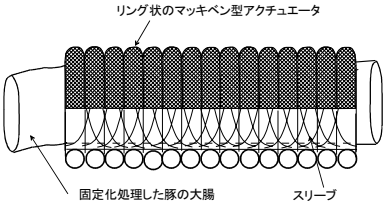


図1　ぜん動アクチュエータの模式図

図2　スリーブの写真

本スリーブ内に固定化処理した豚の大腸を包み込む．スリーブ表面には短冊状にシリコンゴムを塗布することによって，スリーブは形状を保ちながら外力によって柔軟に変形させることが可能である．また，本スリーブのナイロン繊維はその編み方により，直径方向に収縮した場合に長さ方向に伸長するため，ぜん動運動を生成する機能も有する．図2は直線状に固定したものであり，長さ約300mm，内径約40mmである．

２．２　リング状のマッキベン型アクチュエータ

腸管を内径方向に収縮する輪状筋を模擬するためのアクチュエータとして，直線型のマッキベン型アクチュエータをリング状にしたアクチュエータを試作した(図3)．本アクチュエータは外径9mm，内径6mmのゴム管を内径9mm（自然長）のスリーブに挿入し，T字コネクタで接合した．自然長でのリング内径*Di*は約43mm，リング太さ*d*は約9.3mmである．

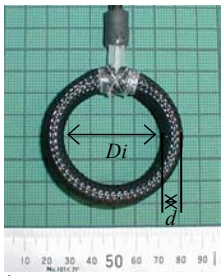


図3　リング状のマッキベン型アクチュエータ

２．３　ぜん動運動用アクチュエータ

2.1節のスリーブと2.2節のアクチュエータを利用して直線状のぜん動運動アクチュエータを試作した．配列したリング状のマッキベン型アクチュエータの内側にスリーブを挿入した様子を図4に示す．リング状のアクチュエータに順次空気圧を印加することによってスリーブ内面にぜん動運動を生成する．空気圧の印加方法は，リング状のアクチュエータを三本毎に配管し（図5），図6に示すタイミングで三相の配管の空気圧をON-OFFする(以下，

図4　ぜん動運動用アクチュエータの全体図

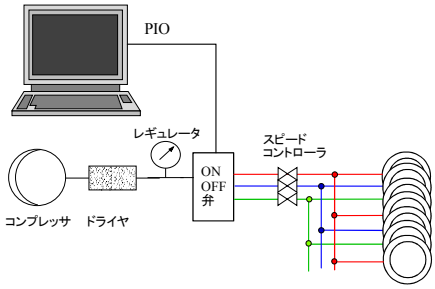


図5　空気圧システムの構成

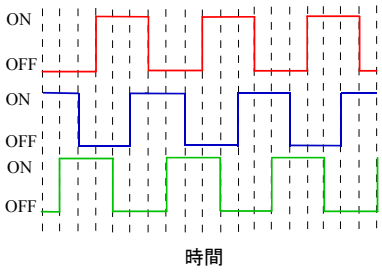


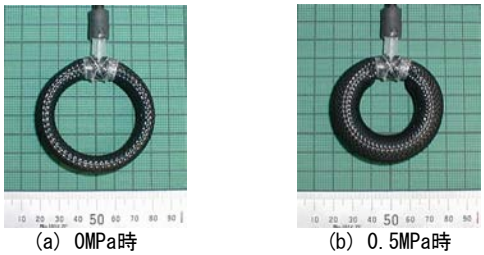
図6　ON-OFF弁タイミング（三相駆動）

この駆動方法を，三相駆動とよぶ)．ぜん動運動による進行波の移動方向は最低限三相駆動することで一意に決めることができる．

ぜん動波の移動速度*u*はリング状のアクチュエータの太さを*d*とすると，*u*=3*df*（*f*=ON-OFFの周波数）となる．ON-OFFの周波数はぜん動波の速度が実際のぜん動運動のぜん動波の速度である2～3cmとなるように0.8Hzとした．

３．リング状マッキベン型アクチュエータの圧力－形状特性

無負荷時のリング状のマッキベンアクチュエータの内圧と形状の関係を調べた．図7(a), (b)はそれぞれ内圧が0, 0.5MPa時のアクチュエータの形状を示す．内圧とアクチュエータのリング内径*Di*，外径*Do*，太さ*d*の関係を図8に示す．結果から，内圧の増加とともにリングの太さが増し内径が減少する．したがって複数のリング状のアクチュエータを配列して内径に腸管を通した場合には，内圧の増加によって腸管を狭め，腸の長さ方向に伸びる運動をすることになる．0.6MPaの空気圧を印加した場合，内径方向の収縮率（変化量／自然長）は約33%であった．



(a) 0MPa時　　(b) 0.5MPa時

図7　空気圧アクチュエータの形状

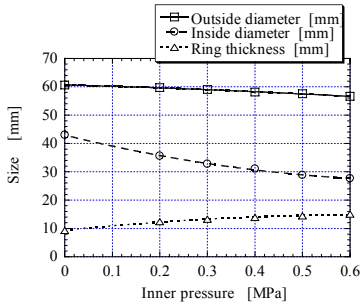


図8　内圧と形状の関係

４．３相駆動によるぜん動運動アクチュエータ内面の運動

ぜん動運動用アクチュエータの内面の運動について考察する．配列したリング状のアクチュエータの断面模式図を図9に示す．座標軸は同図に定義する．全体を左端で固定し，各アクチュエータを左からi=1,2,3…とし，それぞれの内面の点P_iの時間tに対する軌跡を求める．考察に先立ってリング状のマッキベン型アクチュエータをON-OFF弁によって駆動した時の内径を実測した．計測はポテンショメータを用いた．結果を図10に示す．結果をもとに，リングの内径はおおよそ正弦波状に変化すると仮定する．

各リング状のアクチュエータは三相駆動により三本毎に同じ動作をし，i=3n-2ではリング状のアクチュエータ太さ$d_i=\alpha+\beta\sin(\omega t)$, 内径は$D_i=\gamma+\varepsilon\sin(\omega t+\pi)$で変化すると仮定すると，

i=3n-1では$d_i=\alpha+\beta\sin(\omega t-2\pi/3)$，$D_i=\gamma+\varepsilon\sin(\omega t+\pi-2/3\pi)$,

i=3nでは$d_i=\alpha+\beta\sin(\omega t+2\pi/3)$，$D_i=\gamma+\varepsilon\sin(\omega t+\pi+2/3\pi)$

と表される(n=1,2,..).

アクチュエータ内面の点P_i (i=1,2,3…)の軌跡は時間tに対し，i=3n-2では，

$$(x,y)=\left(\frac{2i-1}{2}\alpha+\frac{\beta}{2}\sin\omega t,\frac{\gamma}{2}+\frac{\varepsilon}{2}\sin(\omega t+\pi)\right),$$

i=3n-1では，

$$(x,y)=\left(\frac{2i-1}{2}\alpha+\frac{\beta}{2}\sin(\omega t-\frac{2\pi}{3}),\frac{\gamma}{2}+\frac{\varepsilon}{2}\sin(\omega t+\frac{\pi}{3})\right),$$

i=3nでは，

$$(x,y)=\left(\frac{2i-1}{2}\alpha+\frac{\beta}{2}\sin(\omega t-\frac{2\pi}{3}),\frac{\gamma}{2}+\frac{\varepsilon}{2}\sin(\omega t-\frac{\pi}{3})\right),$$

(n=1,2,..)

となる．試作機では図8の結果から0.6MPa印加時におよそα=12.2mm，β=2.9mm，γ=27.8mm，ε=5.1mmである．これらを基に各点P_i(i=0～5)の1周期分の軌跡を図11に示す．各点P_iは楕円運動をするが，P_3のように一部楕円運動をしない節の部分もあると考えられる．各点の間の部分では中間的な運動をすると考えられる．

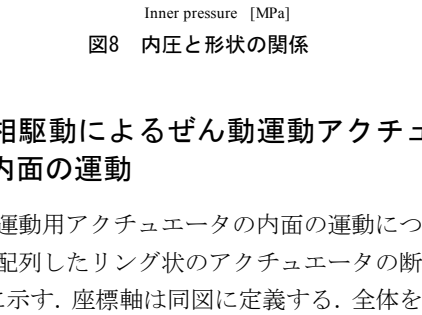


図9　アクチュエータの断面模式図（座標定義）

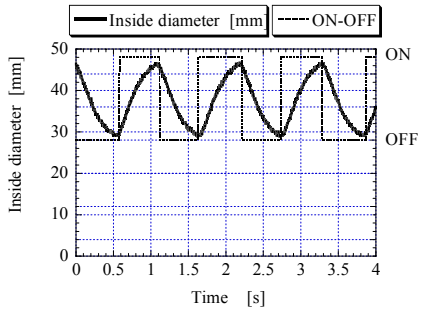


図10　電磁弁ON-OFF時のリング内径

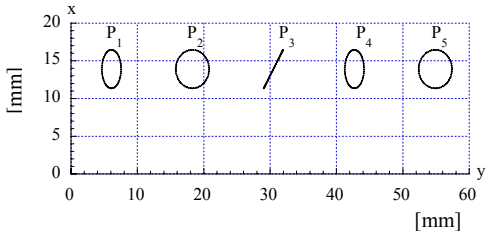


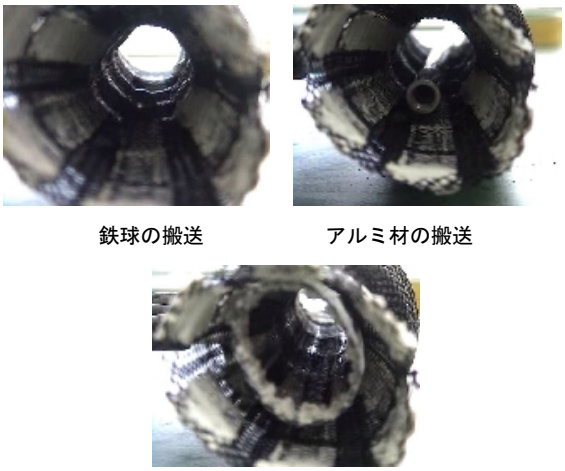
図11　各点P_iの軌跡（i=1～5）

５．ぜん動運動による搬送実験

ぜん動運動アクチュエータ内部に剛体の直径11mmの鉄球，直径10mm，長さ400mmの円柱状のアルミ棒，および柔軟体の円筒状のスリーブの表面にシリコンゴムを塗布したものの3種類の物体の搬送実験を行った．アクチュエータの内圧はOFF時に0MPa, 最大時に0.6MPaとなるように設定し，ON-OFF周波数を0.8Hzとした．

結果，鉄球は毎秒約3cm，アルミ棒とシリコンゴムを塗布したスリーブはそれぞれ毎秒約0.14cm，0.11cmで搬送された．また，アルミ棒とシリコンゴムを塗布したスレーブは鉄球が搬送される方向と逆方向に搬送された．搬送実験の様子を図12に示す．

鉄球は重力によってぜん動波の窪みの進行する方向に



鉄球の搬送　　アルミ材の搬送

スリーブの搬送

図12　搬送実験の様子

搬送されるため移動速度が速く，この速度はぜん動運動による進行波の速度とほぼ一致する．アルミ棒やシリコンゴムを塗布したスリーブは，ぜん動波の波長より長い物体であるため，4章で考察したようにアクチュエータ内面の楕円運動と物体表面の摩擦によって搬送されたと考えられる．

６．人の大腸モデルへの適用検討

本研究の目的である内視鏡訓練用の大腸モデルへの適用を検討した．人の大腸の大きさを想定し長さ約1.5m，直径約40mmの大腸の形状を模擬したスリーブを試作した．スリーブの周囲には63個のリング状のマッキベン型アクチュエータを配置した（図13）．

大腸のぜん動運動は主に輪状筋が収縮してできるくびれが口側から肛門側に移動する運動である[6]ため，この運動を模擬するためには各リング状のアクチュエータに電磁弁を設ける必要がある．本ぜん動運動アクチュエータを用いた場合，このような運動は機構的には可能であると考えられるが，必要となる電磁弁の数は多くなる．今回は，電磁弁の数の都合上，三相駆動による配管とした．

内視鏡訓練時には本アクチュエータ内に柔軟に固定化処理した豚の大腸を挿入することになる．通常，豚の大腸モデルは柔軟であるためつぶれているが，内視鏡の送気によって大腸を膨らませると，豚の大腸はスリーブと接触することでアクチュエータの運動が伝わると考えられる．本アクチュエータを用いた内視鏡訓練装置による評価方法に関しては今後の課題である．

図13　人の大腸を模擬したスリーブに適用した
ぜん動運動アクチュエータ

７．まとめ

内視鏡訓練に用いるための動的な大腸モデルの開発を目指して，筒状の管内壁にぜん動運動を生成するアクチュエータを考案・試作した．

輪状筋を模擬したリング状のマッキベン型アクチュエータの特性を調べ，0.6MPaの空気圧を印加した場合，内径方向の収縮率（変化量／自然長）は約33%であった．

配列した複数のリング状のマッキベン型アクチュエータの動きを解析し，実験によって本ぜん動アクチュエータによって剛体の鉄球，アルミ材，柔軟体のスリーブが搬送されることを確認した．

人の大腸を模擬したスリーブを試作し，本アクチュエータを適用した．柔軟に固定化処理した豚の大腸を用いた内視鏡訓練用の大腸モデルとしての評価方法については今後の課題である．

文　献

[1] 大腸内視鏡モデルI-B型カタログ，株式会社高研(2002).

[2] 生田幸士，竹市正樹，並木隆生：力覚付バーチャル内視鏡システム，日本ロボット学会誌，Vol.18,No3, pp.366-373(2000).

[3] 丸山次郎，原山広一郎：カプセル内視鏡NORIKA3，精密工学会誌，Vol.69,No.5,pp611-612(2003)

[4] 鈴森康一，堀光平，宮川豊美，古賀章浩：マイクロロボットのためのアクチュエータ技術，コロナ社，pp.96-104(1998).

[5] 石川佳延，仕入英武“多孔弾性平面体による蠕動アクチュエータの開発”，日本ロボット学会学術講演会，pp.329-330(1995).

[6] 岩瀬善彦，森本武利，“やさしい生理学”改訂第3版，pp76，南江堂(1997).

人にやさしいモニタロボットの研究（第2報）

光井　輝彰　　横山　貴宏　　永田　可彦*　　福田　修**

Health Monitoring Robot for Human Living Space (Ⅱ)

Teruaki MITSUI　Takahiro YOKOYAMA　Yoshihiko NAGATA*　Osamu FUKUDA**

あらまし　平成14年度より，人の生活空間にやさしく溶け込み健康管理を支援するとともに，日々の生活に潤いをもたらすロボットについて研究を行っている．ここでは，ミミックセンシングの技術を採用し，人がロボットに接触する際に意識することなく自然な状態で生体情報のモニタリングを行うことを目指している．本報では，安定して脈波のミミックセンシングを行うためにセンサー機構の改良を行い，それらを組み込んだロボットを試作した．ロボットには自然の植物を取り入れて，人が植物の世話を行う作業の中で生体情報の計測を試みている．また，ロボットの機能として，植物の育成を管理するための周辺環境のセンシング機能と，その情報を基にした行動生成機能について検討するとともに，植物のアメニティ効果と併用したロボットの効果的な利用方法について検討を行った．

キーワード　ロボット，生体情報，モニタリング，脈波，ミミックセンシング，行動生成

１．はじめに

社会の高齢化が進む中，医療費の急増や，看護・介護従事者の不足が現実化しつつある．このような状況を解消し，高齢者が心身ともに健康に豊かな生活を送るためには，高齢者自身が健康な状態を維持することが重要であり，そのためには日常的な健康管理が必要である．本研究では，橋野，永田らが提案するミミックセンシング[1]の技術を採用することで，人がロボットの一部に触れる際に意識することなく自然な状態で生体情報のモニタリングを行うロボットを提案してきた[2][3]．

ミミックとは擬態という意味であり，ミミックセンシングとは図１に示すように個人の生活パターンを考慮して日常生活で立ち寄る場所や触れる箇所に，検出部を埋め込んで目立たなくさせたミミックセンサーによる生体情報の計測を意味する．これにより，間欠的ではあるが継続的な生理状態の取得を行うことが可能となる．また，センサーを埋め込み隠しているので，一般の計測機器のように計測時に身構えるなどの所作を引き起こすことがなく，日常生活において意識することなく平時の状態で体調測定を行うことができる．さらに，ロボットにセンサーを埋め込み，その機能として人がロボットに触れる機会を作り出すことにより，能動的にミミックセンシングを行うことができると考える．ところが，一般に安静状態で行う生体計測と異なり，目的動作に付随して生体計測を行うミミックセンシングでは，計測自体が困難になることが想定される．

図１　ミミックセンサー

我々はこれまでに，計測中のセンサー接触状態の変化，特に荷重の変化が計測結果に与える影響について調べてきた[2][4][5]．本報では，この荷重変化による影響を緩和するためのセンサー機構を開発し，これをミミックセンサーとして組み込んだロボットを試作した．そして，ロボットの世話や操作などの想定される状況の中で，脈波のミミックセンシングの可能性を探った．また，周辺環境のセンシング機能やその情報を基にした移動機能，植物のアメニティ効果[6]を有効に利用するための機能などロボットの機能について検討を行った．

２．ミミックセンサーの開発

本稿ではモニタリングする生体情報として光電容積脈波（以降脈波という）を選定している．脈派とは指先な

*　新エネルギー産業技術総合開発機構
**　産業技術総合研究所　人間福祉医工学研究部門

どの生体組織へ近赤外領域の光を照射し，その反射あるいは透過光を検出するもので，ヘモグロビンの近赤外光の吸光度を利用して血液の脈動を電気的に計測するものである．この脈波を計測するためのセンサーをロボットの一部に埋め込み，人が触れる際や握る際に計測を行うミミックセンサーとして開発を行った．

２．１　脈波のミミックセンシング

比較的容易に計測できる脈派であるが，ミミックセンシングでは安静状態で計測するとは限らないことから，計測が困難になる.様々な状況において計測を行うため，センサー接触状態の変化による外乱光の混入や計測部位の局所的な血流の変化がその原因と考えられる．この血流の変化は，センサーの形体や人の触れ方の違いから生ずるセンサーの押し付け荷重に大きく依存することから，前報ではセンサー押し付け荷重と計測波形との関係について調べた．その結果，センサー押し付け荷重により脈波波形は大きく変化し，荷重が小さすぎる場合や大きすぎる場合には計測が難しいことを確認した．安定して計測を行うためには，適度な荷重でセンサーを押し付けることが必要で，この最適な荷重は被験者の状態により異なるものの，10mmφのセンサーヘッドを用いた場合には，100～200g程度の荷重であった．

２．２　接触圧調節機構の開発

前節からは，脈波のミミックセンシングを安定して行うためには，センサーの接触圧を適当な値に保ち，外乱光の混入や接触圧の変化を極力少なくすることが重要であると言える．そこで本稿では，図２に示すような緩衝材を用いた接触圧を調節するためのセンサー機構を考案した．可動式のセンサーヘッドを指先に押し付けることで，計測部位の垂直方向の微妙な位置変位にセンサーを追従させるとともに，指先から加わる大きな力はフレームで受け止め，計測部位には過剰な力が加わらない構造を持つ．センサーとの接触圧は緩衝材の物特性とセンサーヘッドの大きさにより調節することになる．

この接触圧調節機構の有効性を確認するために，図３に示すようにセンサーヘッドに力センサーを取り付けた実験装置を製作した．接触圧調節機構のある場合(a)と無い場合(b)それぞれについて，安静状態の被験者の指をセンサーヘッドに載せ，その指の上(爪側)から一定の荷重で指を押し付け，この際に計測されるセンサーヘッドに加わる力と脈波波形について調べた．指への荷重はXYZステージに取り付けたプッシャで行い，レーザー式のセンサーで測長したばね長の変位により荷重の大きさを設定した．実験の様子を図４に，実験装置の仕様を表１に示す．脈波センサー及び力センサーによる計測値は，増幅後にA/D変換ボードを介してPCに取り込んでいる．

図５はウレタン系の緩衝材を使用し，指先をセンサーに押し付ける荷重を25gずつ増加させたときの計測結果の一例で，荷重に対する脈波振幅の変化(上)と計測部位とセンサーとの接触圧の変化(下)を示す．グラフ上の点

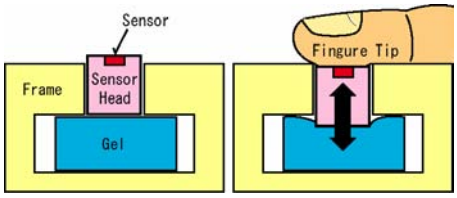


図２　接触圧調節機構

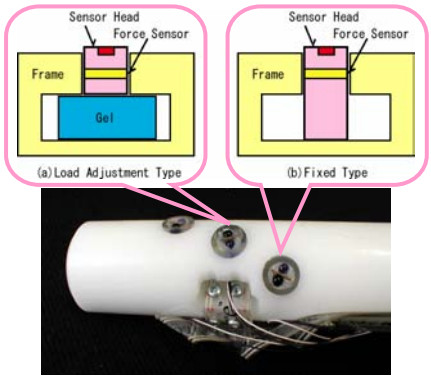


図３　実験装置

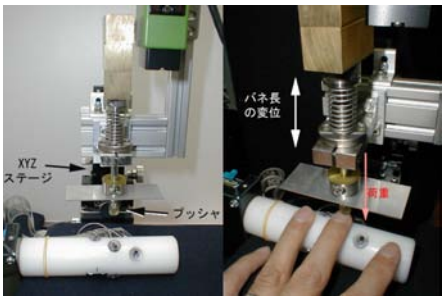


図４　実験の様子

表１　実験装置仕様

脈波センサー	フォトダイオードSHARP GL380 ピーク発光波長：950nm フォトトランジスタ,SHARP PT380F ピーク受光波長：860nm
緩衝材	ウレタン系：エクシールコーポレーション，人肌のゲル シリコン系：ゲルテック，αゲル
力センサー	蒲田工業株式会社 FlexiForce A101-1 最大測定荷重 4.4N
測長センサー	SUNX DSA-L100 繰り返し精度：－0.1～0.1mm
A/Dボード	CONTEC AD12-16U(PC)EH 入力：-5V～5V　分解能：12bit
サンプリング周期	リアルタイムOS(RT-Linux）の周期タスクによるサンプリング：100Hz

は各荷重における脈波10拍分の平均値，その点に付いた縦線は標準偏差を示し，曲線は平均値データを平滑化しスプライン補間したものである．指先を押し付ける荷重がそのままセンサーヘッドに加わる(b)と比較して，荷重調節機構のある(a)ではセンサーヘッドに加わる力が緩和されていることがわかる．(b)の場合は基本的に前報における実験と同じ条件であり，結果は脈波の振幅が荷重により大きく変化し，波形形状が安定するのは荷重が100ｇ強の時という前報と同様の結果を得た．一方(a)を用い

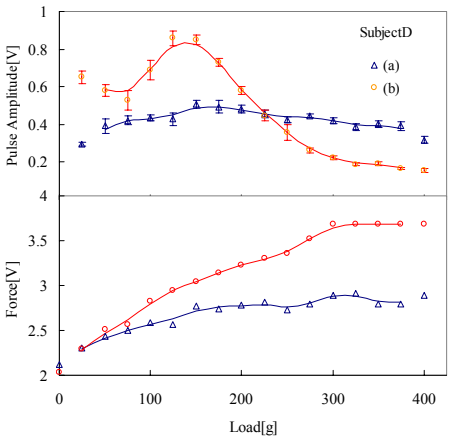
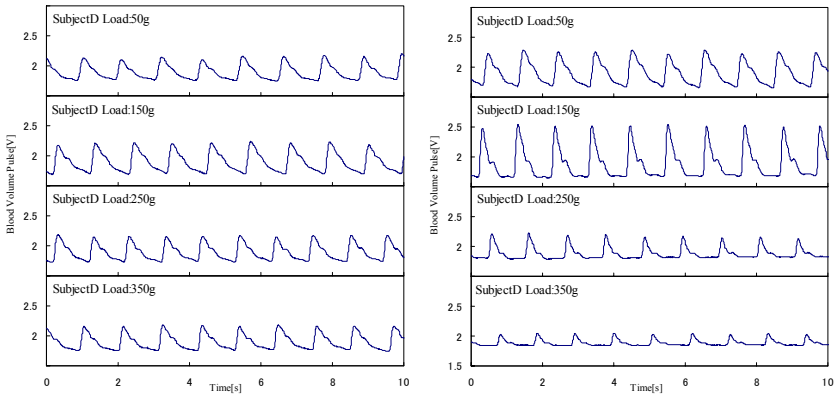


図５　脈波振幅と計測部に加わる力の変化



(a)接触圧調節機構のある場合　　(b) 接触圧調節機構の無い場合

図６　荷重による脈波波形の形状変化

た場合は，指先を押し付ける荷重に対する振幅の変化が減少し，(b)では計測困難であった大きな荷重を加えた場合でも安定した計測が可能であった．図６は各荷重で計測された脈波の波形を示すが，接触圧調節機構のある(a)の場合には，荷重によらず波形形状が安定していることがわかる．以上の結果から，接触圧調節機構が有効に機能していることが確認できた．但し，荷重の動的な変化については未検討であり，今後その確認方法を含めて改善が必要である．また，取得した脈波波形は荷重の変化に対して安定してはいるものの，(b)の脈波波形の振幅の最大値から明らかなように，さらに大きな波形を取得することが可能であり,そのような状態で波形形状を安定させることができれば，更に脈波の可観測性が上がると考える．

３．ロボットの製作と計測実験

接触圧調節機構を備えた脈波センサーを組み込んだロボットの試作を行い，ミミックセンシングによる脈波の可観測性を調べるために計測実験を行った．

３．１　モニタロボット

モニタロボットは図７に示すように観葉植物を構成要素とした植木鉢形の移動機構である．２つの駆動輪と任意方向の回転が可能なローラーを２つ備え，前後進動作のほか超心地旋回を含めた様々な旋回動作が可能である．ロボットの動作はPCからのマニュアル操作のほか，ロボットの周囲に配置したCdSセンサー（CdS光導電性セル EVERLIGHT 9P5-1/H）の情報をもとに明るい方向へ移動する機能を持つ．その他に植物の育成環境の管理に利用することを考え，湿度センサー（サーモメトリクス HF15PF）と温度センサー（National Semiconductor LM35DZ）を植物の真下に当たる部分に備えている．人の生体情報の計測は図８，９に示すように人がロボット上部の運搬用のグリップをつかんだ際や霧吹きを使用する際にミミックセンシングによりに行う．ロボットはこれらのセンサー情報を32msの周期でAD変換して取り込み3周期ごとに外部のPCへ無線送信して，計測データはそこで管理される．また，植物を世話する道具として，霧吹きとじょうろにもセンサーを埋め込み，ここで計測したデータも同様に外部PCへ送信される．図１０にシステム構成を示す．

図７　モニタロボット

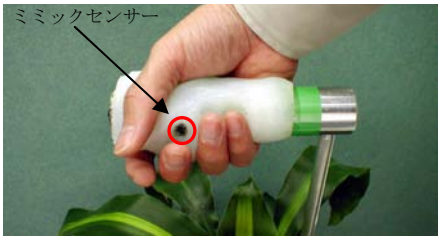


図８　グリップ把持によるミミックセンシング

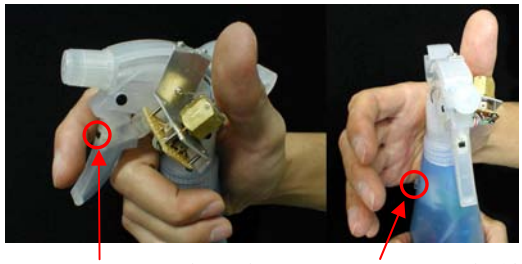


図９　霧吹き使用時のミミックセンシング

３．２　計測実験

植物を日当たりの良い場所へ移して霧吹きで水を与える場面を想定し，図１１に示すようにロボット上部のグリップをつかんでロボットを窓際まで運び，霧吹きで散水する動作を行った．これらの動作の最中に計測された脈波波形とその時にセンサーに加わる力を計測した．

図１２はロボット運搬時の計測結果で，横軸は時間で縦軸はグリップに埋め込んだ力センサーと脈波センサーの出力値を示す．計測開始から約2秒後にグリップをつかんだ時点で力センサーの出力が変化している．ここから約18秒後までは比較のためにグリップを把持して静止した状態で計測したデータであり，比較的安定して脈波の計測が行われている．その後ロボットを持上げて運搬し，約43秒後に運搬を終えてロボットを降ろしている．ロボットの運搬距離は約5メートルである．運搬時は静止した状態と比較すると計測部位に力が加わり，その値も乱れており，センサーと計測部位との接触状態が安定していないことが推測できる．当然ではあるが，ロボットを持上げる・降ろすといった状態が大きく変化する動作を伴うときには，脈波の計測値は大きく乱れている．しかし，ロボットを運搬中でも約26秒後からは計測部位に加わる力がある程度下がっており，何とか脈波の検出が可能になっている．約43秒後に運搬が終了してからは，ロボットを降ろして静止した状態で計測している．ここでの計測結果は振幅が小さく基線も安定しておらず，読み取りにくい計測結果となっている．これは力センサーの出力値がほとんど無負荷状態であることから，脈波センサーと計測部位の接触圧の不足が原因と考える．

図１３は霧吹きで散水の動作をしたときの計測結果で，横軸が時間，縦軸が上から順に指の当たるレバー部分に埋め込んだ力センサーと脈波センサーの出力，手掌の当たる水溜めの部分に埋め込んだ力センサーと脈波センサーの出力を示す．レバー操作の最中は急激な力の変化により脈波センサーと指の接触状態が安定しないことから，脈波の計測値は大きく乱れ計測は不可能である．一方，手掌での計測結果は，力センサー出力の変化が少なく比較的安定している．レバー操作の前後で多少の波形形状の変化や基線の変動が見られるが，全体を通して接触状態が安定していたことが推測される．

これらの計測結果は，ある程度の動作を伴った場合でも脈波として認識できる計測結果が得られることを示している．ただし，計測結果はセンサー周りの形状と人の握り方によるセンサーの接触位置や，人の動作に伴う接触圧の変化等に依存していると考えられる．そのため，より安定した計測結果を得るためには，人の動きや動作を考慮に入れてセンサーを埋め込む位置や形状を調節していくことが必要であると考える．

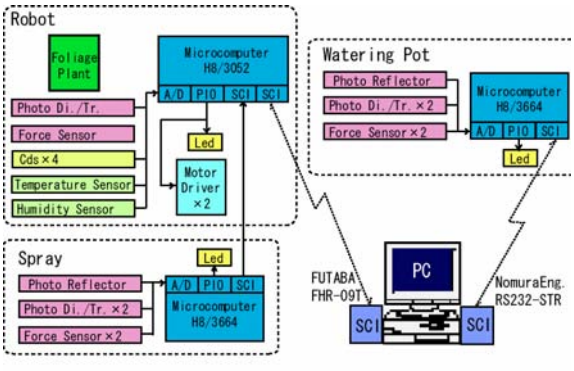


図１０　システム構成

図１１　ミミックセンシングの様子

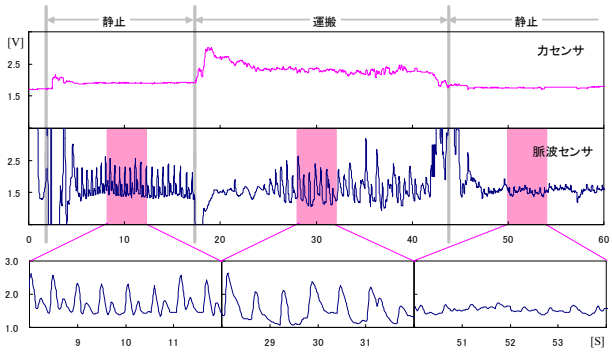


図１２　グリップでの計測結果

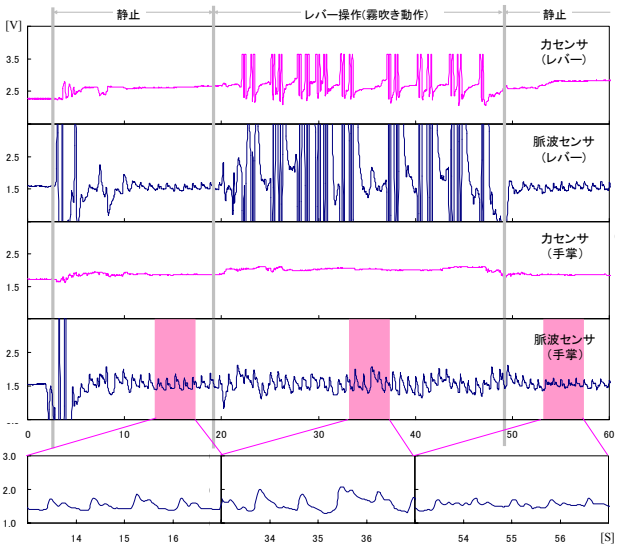


図１３　霧吹きでの計測結果

４．ロボットの機能と利用方法

試作ロボットの機能として，植物を日当たりの良い場所へ移動させるための走光性（明るい場所へ自律的に移動する）機能について検討した．また，気温と湿度の計測データの利用方法について，ロボットの機能と合わせて考察する．

４．１　走光性のアルゴリズム

ここではロボットの前後左右に取り付けられたCdSセンサーにより計測した周辺の明るさの情報(照度情報)を基に，ロボットの動作を生成した．ロボットは前進，右旋回，左旋回，後退，停止の５つの動作を行うこととして，ロボット本体で取り込んだ照度情報を基に外部のPCで動作コマンドを生成した．各動作コマンドはロボット上のマイコンに送信されモーター制御用のPWM波形に反映され，左右両輪の加減速により実行される．

今回使用したCdSセンサーは光導電効果により，照射光エネルギーに対応して内部抵抗が変化する一種の可変抵抗器のようなセンサー[7]であり，ロボットへの実装が容易である半面，照度に対する抵抗変化がリニアではなくその特性変化が低照度と高照度で異なるため，計測データの取り扱いには注意を要する．そのため，センサー情報を基にして５つの動作コマンドから適当な動作を選択するという単純な行動生成に関しても，単純にセンサーの計測値を比較するだけでは，ロボットを微妙な明るさの違いに対応させることはできなかった．もちろん，天候や時間帯により照度が大きく変化する様々な環境に対応できるように，各センサーを正確にキャリブレーションできればよいのだが，これは容易なことではない．そこで本報では，センサーの正確なキャリブレーションを行うことは考えず，入力にセンサー情報を含むニューラルネットを用いて適当な行動を生成することを試みた．ここではCdSセンサーの計測値に，2次の補正関数を適用するにとどめている．この補正関数は室内の明暗の差のある任意の５点における各センサーの計測値の差分から求めた．この処理の流れを図１４に示す．ロボットは32ms毎にCdSセンサーの照度情報を取り込み，この計測データを3周期分まとめて96ms毎に外部のPCへ無線送信する．PCではこの通信周期の5周期の間は停止コマンドを送り，ロボットが停止した間のCdSセンサーの照度情報を蓄積し，これを基に次の行動を決定する．行動はロボットが停止中に計測した前右左のCdSセンサーによる計測値について，それぞれの平均値を正規化した値と，これらの３つの計測値の合計値の増減，前行動の履歴として右旋回と左旋回のフィードバックを合わせた合計６つを入力とするネットワークにより決定する．なお，教示データは表２に示す行動指針を基本として，部屋の数箇所でロボットが実測した計測値とそこで明るい方向へ動くために必要と考えられるコマンドを基にして作成した．ネットワークにはあらかじめこのデータを与えて誤差逆伝播則[8]にしたがって学習を行わせている．動作コマンドは上記の通信周期の5周期の間実行され，その後同様にしてロボットは停止と動作を5周期ごとに繰り返す．

動作実験は，曇りの日の部屋の奥の暗い場所や強い直射日光の差し込む明るい場所において行い，ロボットが比較的良好に周囲の明るさの違いに反応して目的とした明るい場所まで到達することを確認した．図１５にロボットの動作例を示す．図中の数値はロボットの軌跡付近の床面での照度を示している．窓の高さで計測した照度は曇りの日の実験(a)でも床面よりかなり明るく2000lxあり，快晴の日の実験(b)では計測器の測定範囲の最大値5000lxを超える明るさであった．(a)では，照度の差が少ないためか明るい方向を探索しながら動作している様子

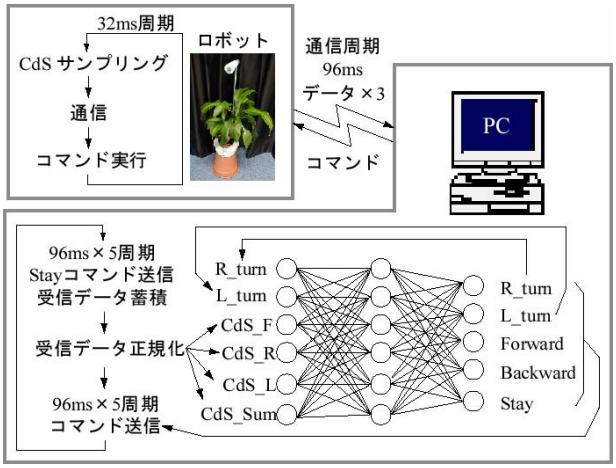
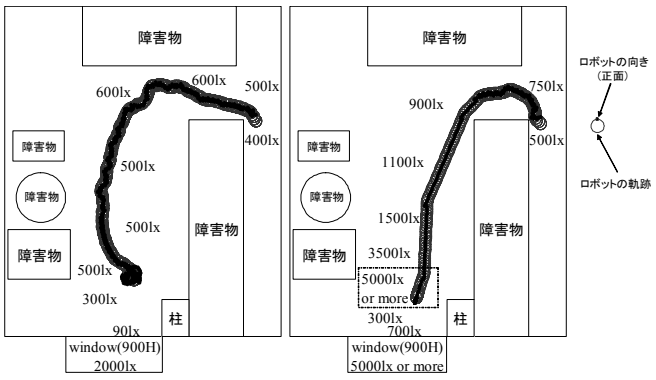


図１４　処理の流れ

表２　ロボットの行動指針

	CdS(前右左)計測値	CdS合計増減	前回コマンド	コマンド
1	それぞれ十分に明るい	—	—	S
2	前方が明るければ	増 減	B以外 F	F B
3	右方が明るければ	—	L以外 L	R F
4	左方が明るければ	—	R以外 R	L F

コマンド F:前進 R:右旋回 L:左旋回 B:後退 S:停止



(a)曇りの日の実験　　(b)快晴の日の実験

図１５　ロボットの動作例（窓際へ移動）

が伺える．この例では，窓の光が差し込む付近まで到達はしたものの，照度不足のためか最終的に停止コマンドが生成されることは無く探索し続ける結果となった．一方(b)では，障害物の陰から窓の明るい方向を確認した後の動作は直線的となり，一気に窓際まで到達して十分な照度があることから停止コマンドで終了している．

現時点では特に評価等を行っていないが，センサーの取り付け位置より低い障害物や複雑な形状，光を透過する障害物は基本的に感知不能である．そのため，他のセンサーの併用や，判断が難しい場面で人のマニュアル操作を教示データとして学習するなど，様々な場面に柔軟に対応できるように改良する必要がある．また，今回使用したニューラルネットにも当然限界があるので，ニューラルネットの組み方や教示データの与え方等を見直し，より動作目標を具体化するための検討も必要と考える．

４．２　植物の効能を引き出すロボットの機能検討

モニタロボットは人の生活空間に共存し，日々人と触れ合いながら生体情報の計測を行うロボットである．そのため，その形態と機能は人を落ち着かせるものが適当であり，ここでは室内に配置した植物がもたらす快適性の向上や心理的安定など，観葉植物のアメニティ効果[6]に着目した．これらの効果は自然植物の形態や色，日々の成長，部屋の湿度調整や空気浄化，芳香作用など様々な要因の関与が考えられるが，本研究ではその一部を工学的に模擬するのではなく，そのまま自然の植物を取り入れて利用することを考えている．さらに，植物の世話などの園芸作業には，循環器系機能や運動機能の改善等の身体的効果，達成感や気力の回復等の精神的効果，協調性やコミュニケーション促進等の社会的効果が確認され園芸療法として実践されている．これら植物の効能は療法とまで考えなくても，健康な人がより一層の健康と長寿を求めて行う「園芸健康法」[9]としても利用されている．このような場面では，植物（ロボット）が人に世話を要求する機能や世話に対して何らかの反応を返す機能，植物の世話を手助けする機能等を持てば，人の植物への関心を高めながら園芸作業をより一層楽しく行うことができると考える．現在は，これらの機能を生成するために必要な情報として，4.1で述べたロボット周辺の照度の他に温度･湿度を取り込み，PC上で管理している．今後はこれらの情報を基にしてロボットの行動生成方法について検討し，ロボットの機能を向上させたい．またこれと同時に，人がミミックセンサーに触れる機会を効率的に作り出しながら，生体情報の計測を効率よく能動的に行う方法を検討する予定である．

５．まとめ

本研究は人の生活空間にやさしく溶け込み健康管理を支援するとともに，日々の生活に潤いをもたらすロボットの開発を目指している．本報では，脈波のミミックセンシングを安定して行うために接触圧調節機構を開発し，荷重の大きさによらず安定して脈波が計測できることを確認した．試作したロボットは自然の植物を取り入れたもので，植物の運搬や散水というある程度の動作を伴う場合でも，脈波の計測が行えることを計測実験により確認した．また，ニューラルネットを利用したロボットの行動生成では，厳密なセンサーのキャリブレーションを行うことなく，３つのCdSセンサーの情報から目標とする行動を達成できる可能性を確認した．最後に，園芸健康法と組み合わせたロボットの機能と活用方法ついて簡単に述べた．最近では，動物型ロボットを用いたロボットセラピー[10]が国内外の医療施設において実験され注目されている[11]が，モニタロボットも同様な用途へ適用が可能であると思われる．

文　献

[1] 単身生活者の健康状態モニタリングシステム，特許3168285

[2] 光井輝彰，千原健二，永田可彦，福田修，“人にやさしいモニタロボットの研究”，岐阜県生産情報技術研究所所報 第4報，pp.27-30，2003

[3] 光井輝彰，横山貴広，永田可彦，福田修，“人にやさしいモニタロボットの研究”，第3回福祉工学シンポジウム講演論文集，pp.137-140，2003

[4] 永田・ほか，“ミミックセンサーを用いた身障者・高齢者体調監視システムの提案”，日本機械学会第11回バイオエンジニアリング講演会論文集，pp.136-137，1999

[5] 光井輝彰，横山貴広，永田可彦，福田修，“ミミックセンシングによる脈波のモニタリングについて”，第18回生体・生理工学シンポジウム論文集, pp.137-138, 2003

[6] 仁科弘重・他，“観葉植物が人間の心理に及ぼすアメニティ効果の脳波およびSD法による解析”, 植物工場学会誌 10巻 2号， pp.65-69，1998

[7] 谷腰欣司，“センサーのすべて”，電波新聞社，1998

[8] D.E.Rumelhart, J.L.McClelland and R.J.Williams, “ Learning Internal Representaions by Error Propagation,”, Parallel Distributed Proceeding, Vol. Ⅰ, pp.318-362, MIT Press, 1986

[9] 武川満夫，武川政江，“園芸療法　21世紀を健康に生きる”，源草社，2000

[10] 浜田利満，横山章光，柴田崇徳，“ロボット・セラピーの展開”, 計測と制御, 第42巻, 第9号, pp.756-762, 2003

[11] 例えば，“アザラシ型ロボット「パロ」が「世界一の癒しロボット」としてギネスブックに登録”, http://www.aist.go.jp/aist_j/topics/to2002/to20020315/to20020315.html

有機栽培技術の高度化に関する研究
―水田除草ロボット（アイガモロボット）移動機構の開発－

光井　輝彰　　小林　孝浩*　　鍵谷　俊樹**　　浅野　雄二**　　坂東　直行***

Research on the Advanced Technology for Organic Agriculture
－Development of Rice Field Rover for Weeding Out－

Teruaki MITSUI　Takahiro KOBAYASHI*　Toshiki KAGIYA**　Yuuji ASANO**　Naoyuki BANDO***

あらまし　食品の品質に対する社会的ニーズが高まる中，国民の主食となる米を生産する水稲の有機栽培技術への要望が大きくなっている．米の有機栽培において最大の障害は雑草対策であり，アイガモや紙マルチ等を利用した栽培技術も開発されているが，除草効果やコストについて課題が残されている．本研究では，中山間地におけるレンゲを緑肥とした有機栽培において，ロボットを用いて効率良く安定して除草を行うことを目的として，水田内を自由に移動するロボットのための移動機構の開発を行った．移動機構はクローラ式で，移動する際に土壌表面を軽く掻き，濁りを発生させることで除草効果を生成する．また，水田内での自律走行に必要となるロボットのセンサーについて検討し，基礎的な計測実験を行った．

キーワード　有機栽培，除草，ロボット，クローラ，PSD，ジャイロ，RTK-GPS

１．はじめに

昨今の各種規制緩和や物流の発達により，農産物の生産現場では従来以上の生産の効率化，低コスト化が必要とされている．一方，消費者の健康志向や高品質嗜好からは，食品に対する安全性や品質に対する関心が高まっており，農薬の使用を減らしたり，まったく使わない農法が望まれている．特に日本人の主食である米に対しては，これらの要求が強く，各種の有機栽培技術が試みられている．これら有機栽培の最大の課題は雑草対策であり，除草機械を用いる方法，アイガモやコイに雑草を食べさせる方法，紙マルチを用いて雑草の繁殖を阻害する方法[1]等が提案されている．これらの方法は一部実践されてはいるものの，手間やコスト，除草効果等に課題を抱えている．

本県では中山間農業技術研究所においてレンゲを緑肥とした有機栽培技術の研究を進めている．ここでは，レンゲ由来の窒素により，ある程度の米収穫量を確保しつつ，レンゲの土壌混和により雑草種子の発生を抑制する効果について検討を行っている[2]．そして，この雑草種子の発生抑制効果と，中山間という地理的気候的な特色により，土壌攪拌のみで雑草の繁殖を抑制できることが確認されている．本研究ではこの土壌攪拌を主体として除草効果を効率的に安定して生成するために，ロボット(アイガモロボット)を用いることを検討する．本年度は水田内を自由に移動しながら除草効果を生成するためのロボットの移動機構を試作するとともに，水田内を自律走行するために必要なセンサーとしてPSD距離センサーとジャイロセンサーを選定して計測実験を行った．

*　情報科学芸術大学院大学(IAMAS)
**　中山間農業技術研究所
***生活技術研究所

２．ロボットによる除草作業

中山間地におけるレンゲ緑肥を用いた有機栽培においては，稲がある程度成長してしまえば，その後は稲の陰で日光が遮断されるため雑草害はあまり問題にならない．よってロボットによる除草作業は稲が生長して30cmほどの高さになる，田植え後約4週間の期間に行うことを想定し，その期間ロボットは水田内を動き回り除草効果を生成する．しかし，水田内は水と泥でできた不整地であり，その中を移動することは非常に困難である．そこで当初は図１に示すようなホイールタイプやボートタイプ等いくつかの移動機構について検討を行った．その結果，安定して高い走破力をもつことから，クローラタイプを採用することにした．また，クローラタイプはクローラベルト表面のパターンにより走行中に効率よく濁りを発生させることが出来る．この土壌攪拌による濁りと拡散した土壌の雑草上への堆積は，光合成を阻害し雑草を枯死に至らす事が予備

実験により確認されている．そしてこの土壌の攪拌効果は濁りを発生させた場所からある程度広がりをみせることから，ロボットが稲の条間を移動するだけでも水田内全体に除草効果を生成できると考える．その他，ロボットによる除草作業では，水田内を走行中に稲の葉に付着した水滴や害虫を払いおとすことで病気や害虫の発生を抑制する効果が期待できる．

３．移動機構の試作

クローラタイプの移動機構は高い走破性と除草効果を期待できる半面，稲を踏みつけた場合に稲が受けるダメージが無視できない．そこで，水田内の稲を痛めることなく移動するために，クローラで稲を跨いでロボット本体を高い位置に置く構造を考えた．これにより電装系が水面から離れ防水加工も容易になる．この構造でロボットの移動機構を試作して，実際に水田内で走行実験を行いながら，安定した走行が行えるように改良を繰り返した．

３．１　試作１号機

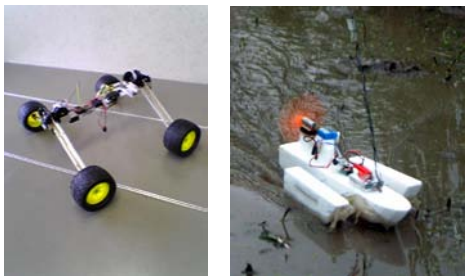
水田内の稲を跨いで走行するためのクローラの形状として，当初は正方形や平行四辺形で検討を重ね，最終的に走破性が高く前後のバランスを失っても回復できることから逆台形を採用した．走行実験では土壌の攪拌効果は確認されたが，クローラベルトが長いためベルトの取り回しが難しく，泥が噛んでくるとベルトの動きが悪くなるため,改良を要した.走行実験の様子を図２に示す.

３．２　試作２号機

クローラベルトを短くするとともに，プーリー等の位置を調整可能にして,ベルトの取り回しの改良を図った.サイズは図３に示すように１号機と比較して一回り小さくなり，旋回スペースも小さくなった．水田での走行実験ではクローラベルトの動きは良好で，効率良く駆動力が伝達できることを確認した．しかし，直進は安定して行えるものの，旋回時にクローラベルトが外れる場面が見られたため，改良を要した．

３．３　試作３号機

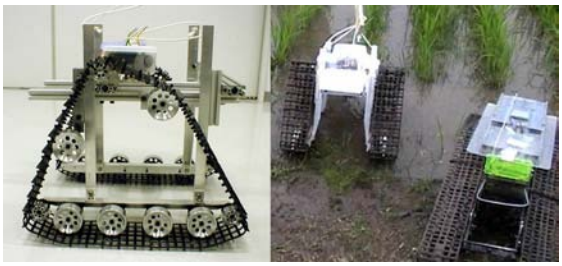
クローラベルトの外れ対策として，ベルトにねじれが発生しないようにプーリーの数を18個から40個に増やし,旋回時に泥の巻き込みを減らすためにカバーを取り付けた．クローラの形状については２号機で動作確認した形状を基本として，障害物を乗り越えやすいように若干の改良を行っている．そして，このクローラ形状を固定して調節機構を外すとともに，アルミフレーム材を薄肉化することにより，軽量化と低重心化を行った．走行実験では，はかなりの負荷をかけて旋回を行った場合でもベルトが外れることが無いことを確認した．また，代掻き直後の泥が非常に軟らかいところからある程度の硬さのあるところまで，水田内の泥の状態に関わらず高い走破性と安定した旋回性を持つことを確認した．走行実験の様子を図４に，各諸元を表１に示す.



ホイールタイプ　　ボートタイプ

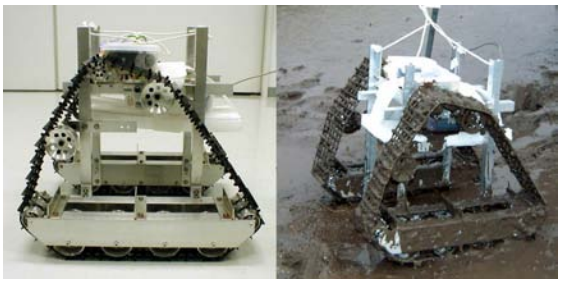
図1　移動機構の検討

図２　試作１号機の走行実験



クローラ形状　　１号機とのサイズ比較

図３　試作２号機



クローラ形状　　泥濘地での走行実験

図４　試作３号機

表１　ロボット諸元

全長	400mm
全幅	400mm（クローラ間200mm）
全高	370mm（クローラ間280mm）
全備重量	3,800g
モーター	380モーター
ギヤ比	36.98:1
バッテリー	NI-MH 3300mAh
クローラベルト プーリー, スプロケット	KYOSHOブリザード プラスチックパーツ

４．センサーとロボットの制御

ロボットの水田内での移動は，稲を跨いで稲の条に沿って走行することを基本とする．試作機の走行実験は人がマニュアル操作で行っているが，最終的にはロボットが自律して走行する必要がある．そのためにはロボットが自身の状態や周辺の状況を把握するための，何らかのセンサーが必要となる．ここで，有効なセンサーを選定するために，市販されているセンサーを表２に示すように分類して整理した．

最終的なロボットの運用形態として，ロボット以外の水田周辺環境に設備が不要で，ロボット単独で利用できるようにするために，ロボットに搭載可能なセンサーに絞って検討することにした．また利用者が一人で容易に取り回しができるような，小型軽量なロボットを目指すことから，センサーのサイズと重量は小さいほど都合が良い．さらに，ロボットの制御システムへデータの取り込みが可能で，取り込んだデータの処理も容易であるセンサーが望ましい．このような条件を考慮すると，有効に利用できるセンサーは限られてくる．現在までに，ロボットの姿勢変化を計測するためのジャイロセンサーと，稲の位置検出のためのPSD距離センサーを選定し予備実験を行った．各センサーユニットの仕様を表３に示す．

４．１　ジャイロセンサーによる姿勢変化計測

水田内は水と泥の不整地であり，その状態によりクローラ接地面の滑り具合も変化する．そのため，何らかの方法でロボットの姿勢変化を知ることが必要となる．ここでは，ジャイロセンサーで計測した角速度情報からロボットの姿勢変化を検出することを試みた．図５に設置したジャイロセンサーとA/D変換器とモーター用のPWMコントローラ，PCとの通信に用いるUSBインターフェースを備えた試作基板を示す．ジャイロセンサーはクローラの駆動軸の間に取り付け，この取り付け面の垂直軸周りの角速度を計測する．実験は試作３号機にジャイロセンサーを搭載して外部PCからの制御で行い，研究室内の整地走行のほか図６に示すような障害物の乗り超え等の不整地走行を行った．図７は直進したときのジャイロセンサーの出力例を示すが，始動や停止時の姿勢変化とクローラベルトのパターンに起因すると考えられる走行中の振動を確認することができる．また，このセンサー出力にFFTをかけてみると，これらの姿勢変化が約20Hzまでの成分であることが分かる．今回は実験室内の固い床の上で実験を行ったが，実際に水田を走行する場合には柔らかい泥の上での計測となることから，クローラベルトのパターンが泥の中に食い込み，ロボットの振動は減り，今回の計測結果よりもセンサーの出力変化は緩やかになると考えられる．今後は水田内でも計測実験を行い，今回の実験結果と照らし合わせながら，センサー出力のサンプリング周期やフィルターの検討を行い，水田内でのロボットの姿勢制御に役立てていきたい．

表２　センサー分類

設置位置	検出分類	センサ	検出対象
ローカル：ロボットに搭載するセンサ	内界センサ：ロボットのシステム内の状態を検出	エンコーダ	クローラの回転
		電流センサ	電流、トルク
		傾斜(重力)センサ	姿勢
		加速度センサ	位置･姿勢
		ジャイロ	位置･姿勢
	外界センサ：外界とロボットとの関係を検出	カメラ	稲、土手、その他
		接触スイッチ	稲、土手
		接触光センサ	稲、土手
		超音波距離センサ	稲、土手
		光距離センサ	稲、土手
		静電容量センサ	稲、土手
		地磁気	姿勢(方位)
		力センサ	稲、土手、外力
		GPS	絶対位置
グローバル：外部環境に設置したセンサ		カメラ	ロボットの相対位
		レーザ＆検出装置	ロボットの相対位
		ビーコン(超音波/画像)	ロボットの相対位
		RF-ID	ICタグ情報

表３　センサー仕様

ユニット	仕様
ジャイロセンサー	Silicon Sensing Systems　CRS 03-02 29x29x18.4mm，20mV/(deg/sec) +-100deg
PSD距離センサー	SHARP　GP2D12 29.5x13.5x13mm 測長範囲約100～800mm

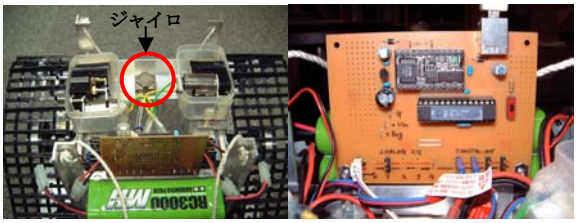


図５　ジャイロセンサーと試作基板（A/D，PWM，USB）

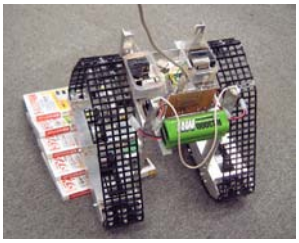


図６　不整地を模した計測実験

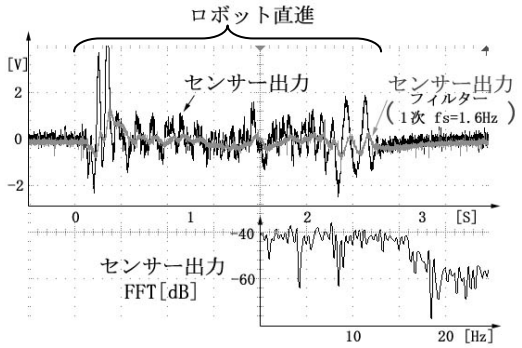


図７　ジャイロセンサーの出力（オシロスコープで計測）

４．２　PSD距離センサーによる稲の位置検出

田植え後の稲は図８に示すように１週間後に草丈約13cmで４週間後には30cm以上に成長する．これらは約1～4本で一株として植えられるが，茎の部分は図９に示すようなサイズの楕円形であり，1週から4週の間で約3倍の茎径に成長する．計測実験では図１０に示すように各成

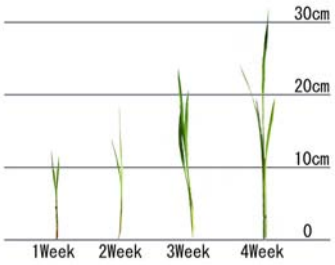


図８　田植え後の稲の丈変化

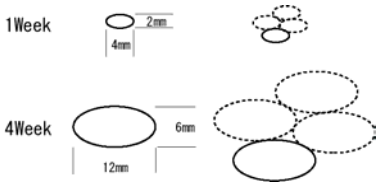


図９　田植え後の稲の茎径と株の大きさ

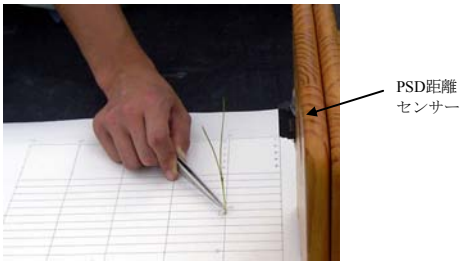


図１０　実験の様子

長段階の稲を１本ずつ一定の距離に立たせ，根から10cmの高さの部分にセンサーの光軸を合わせたときのセンサー出力を計測した．また，稲が光軸からずれたときにセンサーがどこまで反応するのか，稲の検出範囲についても調べた．

図１１に各距離に稲を設置したときの計測結果を示す．グラフ中の直線は予備実験から求めた計測距離とセンサー出力の関係を表す近似直線である．人の手で稲を保持していることも誤差要因となるが，おおむね100mm以上の距離において近似直線に近い値で計測できることが確認できる．稲の距離が50mmのときに一様にセンサーの出力が小さいのは，発光受光の光軸に角度がある反射式センサーの特性と考えられる．仕様上の測長範囲も100mm以上であり近距離の計測には注意が必要である．

図１２はセンサーに反応が現れる範囲を示したもので，光軸からの左右方向へ検出可能な範囲を示す．人の手による稲の保持，稲のたわみや葉の広がりが影響するためか，計測値には大きなバラツキが見られるが，実験を行った250mmまでの距離であれば，光軸に対して左右10mm程度を検出するようである．

今後はロボットに搭載したセンサーで実際に稲の条間を走行しながら計測を行い，稲の条に沿った走行を行うためのデータの利用方法を検討する予定である．また，田植え直後の稲は柔らかく自重によりたわむので，覆いかぶさる葉の部分を押し上げて茎部分を計測するなど，何らかの工夫も必要となるであろう．

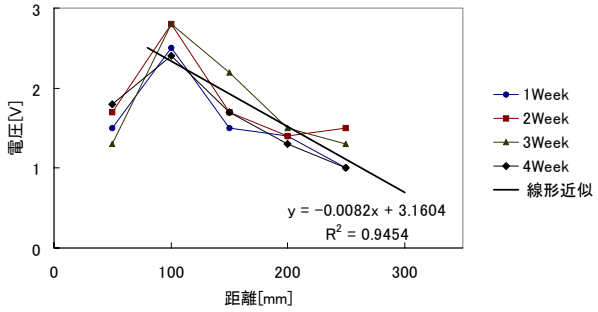


図１１　PSDによる稲の距離計測

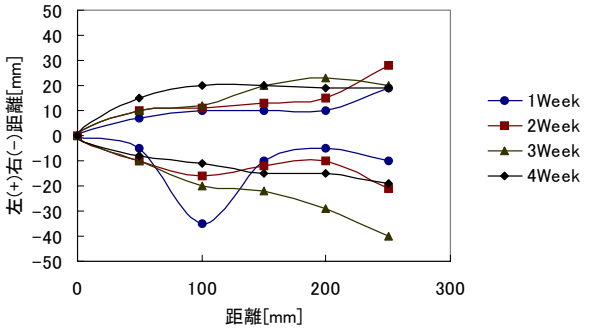


図１２　PSDによる稲の検出範囲

５．まとめ

水稲の有機栽培技術高度化の一環として，水田内で除草作業を行うロボットの開発を目指して，ロボットの移動機構の試作を行った．ロボットの移動機構にはクローラタイプを採用し，走行実験を通してクローラ形状等の改良を重ね，水田内でも安定した走行，旋回が出来るように改良した．さらに，ロボットの自律走行に有用なセンサーとしてジャイロセンサーとPSDセンサーを取り上げて計測実験を行い，その有効性を確認した．

今後は試作機にセンサー類を装着し，実際の水田内を走行させたときのデータを収集し，自律走行に有効なセンサー，制御手法，行動生成手法等について検討を進めたい．ここでは動作検証用に，数センチの精度で位置計測が可能なRTK-GPS(Real Time Kinematics - GPS)を利用してロボットの軌跡情報と各センサー類の計測結果を照らし合わせながら検討を進める予定である．現在までにRTK-GPS移動局を搭載可能な試作４号機が完成している．これを用いた走行実験からロボットの自律走行機能を高めると同時に，ロボットが水田内を移動する際の土壌攪拌による除草効果について調べる予定である．

文　献

[1] “有機物施用による高冷地の良食味米生産技術−マルチ用再生紙利用による減農薬稲作の確立−”，平成４年度岐阜県高冷地農業試験場研究年報　pp.21-22

[2] “有機物施用による高冷地の良食味米生産技術−レンゲ利用による有機質栽培技術−”，平成３年度岐阜県高冷地農業試験場研究年報　pp.21-22

力感覚が必要な作業スキル解明に関する研究（第2報）

久冨　茂樹　　張　勤　　張　明　　田中　泰斗

Acquisition of Force-Sensitive Skills through Investigating the Underlying Mechanisms (Ⅱ)

Shigeki KUDOMI　Qin ZHANG　Ming CHANG　Taito TANAKA

あらまし　製造工程の中には作業者の高度な判断と経験（熟練技能）を必要とする作業が数多くある．この熟練技能は製品の善し悪しを左右したり製品に付加価値を与えたりすることも多い．しかし，熟練技能の習得には一般的に多くの時間が必要とされ，熟練技能者の育成，技能の伝承が大きな課題となっている．本研究では金属製品精密加工における研削工程前の歪み矯正作業を対象として，数値化や自動化による技能伝達の効率化を試みるとともに，作業スキルのメカニズム解明を目指す．本年度は，まず，熟練技能者への聞き取り調査によりねじれ矯正作業手順を理解した後，ねじれの状態を作業者に提示できる測定装置を試作した．次に作業者の技能計測を行い，熟練技能者と非熟練技能者の違いを検討した．さらに，プレス作業の数値化，半自動化を行うためにプレス試験機の試作を行った．

キーワード　熟練技能，スキル，歪み，矯正，技能伝達，プレス

１．はじめに

製造工程の中には作業者の高度な判断と経験（熟練技能）を必要とする作業が数多くあり，この技能習得には一般に多くの時間を必要とする．しかし，近年の開発・製造のリードタイム短縮の追求で技能伝達の時間が十分に確保できない等の状況の中で，熟練技能者の高齢化，後継者不足が進み，熟練技能者の育成，技能伝承が大きな課題となっている．

一方，このような熟練技能を自動化する試みもなされており，有効な結果が得られたものも多くある[1~3]．しかし，技術的には可能であってもそれに要する費用対効果が悪ければ自動化は進まない．また，自動化はこれまでに蓄積された技能に対しては有効に作用するが，突発的な事象への対応が困難となることや，新たな技能の創出を阻害してしまう恐れがあるという問題点も指摘されている[4]．

本研究では歪み矯正作業を対象として，数値化や自動化が比較的容易に低コストで実現できる部分はできるだけ数値化・自動化して，技能の本質的な部分のみ人から人への伝承を行い，技能伝達が効率良く行える支援システムの開発を目的とする．昨年度は曲がり歪みの測定装置試作および矯正作業計測を行った．本年度は，ねじれをともなった歪み矯正まで範囲を広げ検討を行う．

本報告の構成は以下のとおりである．２章でねじれの矯正作業手順を説明した後，３章で歪み状態の把握が難しいねじれの状態を作業者に提示できる測定装置について述べる．４章では作業者の技能特性について述べ，５章ではプレス作業の数値化，半自動化を行うために試作したプレス試験機について述べる．

２．ねじれ矯正作業

前報で曲がりの矯正作業について報告したが[5]，ねじれの生じている加工対象（以下ワークと記述）の場合も作業者は初めにダイヤルゲージを用いてワークに生じている歪みの場所と大きさを把握する．ねじれの場合は曲がりのみの場合に比べて形状が複雑になるため歪みの状態を把握するのが困難であり，歪みを矯正するための手順も複雑になる．

まず作業を理解するために，熟練技能者に作業行動の判断基準やポイントについて質問形式で聞き取り調査した．図１にねじれの矯正作業の基本手順を示す．ねじれのパターンはいくつか考えられるが，ここでは代表的なものを示す（Ⅰ）．ねじれの状態によりワークの角が上を向いていたり下を向いていたりするが，まず，局所的にプレスすることにより４つの角がすべて同方向，同程度に反っている状態にする（Ⅱ，Ⅲ）．この時，ねじれの状態に応じてプレスの位置，方向，強さを調整しながら作業を行う．次に全体をプレスして（Ⅳ）ワークの反りを矯正していく（Ⅴ）．ただし，これは基本手順であって，実際にはワークの材質，形状，状態，矯正作業中のワー

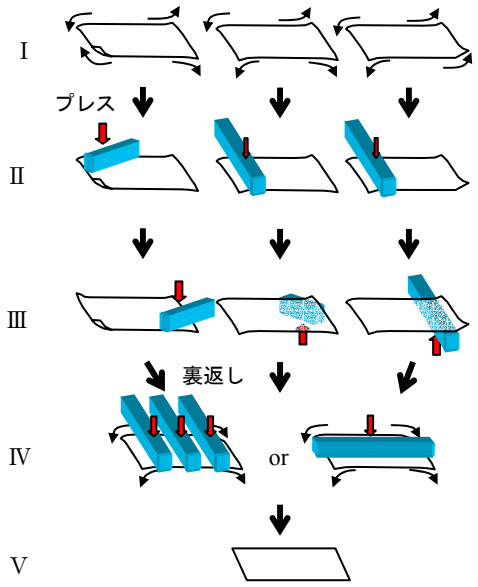


図１ 歪み矯正作業手順

クの反応を見ながら，そのワークにあった矯正手順を判断し，プレス位置，プレス力などを調整しながら矯正作業を行っていた．

３．歪み量測定装置

３．１ 装置の試作

前報で，曲がりのみの歪み状態を測定できる装置の試作について報告した．本年度はワークのねじれの状態も測定できるように，センサを面状に配置した装置に拡張した．図２に試作した装置の外観を示す．センサにはリニアポテンショメータ（㈱緑測器，LP-20FP，以下ポテンショメータと記述）を７点（20[mm]ピッチ）×３列（33[mm]ピッチ）で配置した．本体の３点の足を基準面（定盤面）に接地させ，センサの接触子をワーク表面に接触させることで，ポテンショメータからは各点での基準面からの高さに応じた電圧が出力される．その電圧をAD変換器（㈱コンテック，ADA16-32/2(CB)F，分解能：0.31[mV]）を介してPCに取り込み，ノイズ成分を除去するためにソフトウェアで平滑化処理を行った．ポテンショメータは，測定軸に対してせん断方向の荷重によって，精度が劣化する可能性があるため，リニアブッシュを用いてシャフトを案内した．また，シャフトには摺動摩擦が生じるため，シャフトと本体の間にばねを入れて接触子を常にワークに押さえつけるようにした．さらに，センサをワークに接触させるときの傾き具合によりデータにばらつきが見られたため，リニアガイドを用いて装置本体を案内した．

３．２ 装置の測定性能評価

今回対象としたワーク厚さである5[mm]付近の装置の特性を明らかにするため，4.8 [mm]，5.0[mm]，5.2[mm]のブロックゲージを測定した．ポテンショメータの出力

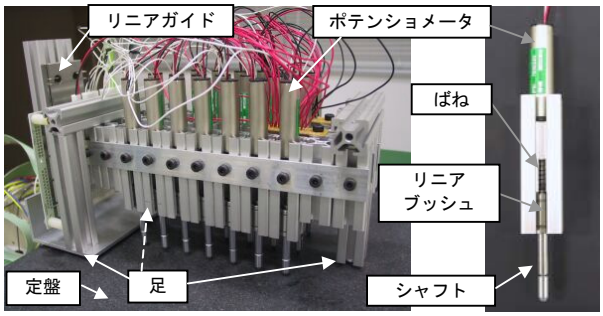


図２ 歪み量測定装置

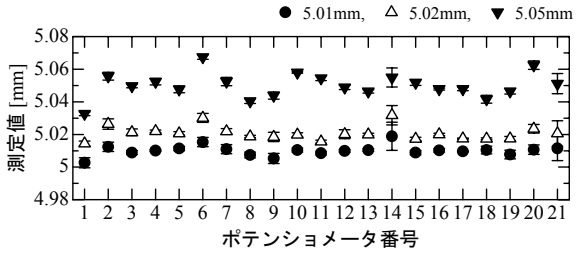


図３ 歪み量測定装置の精度確認

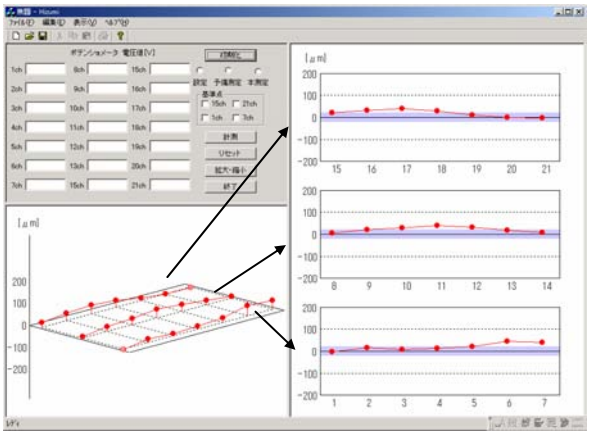


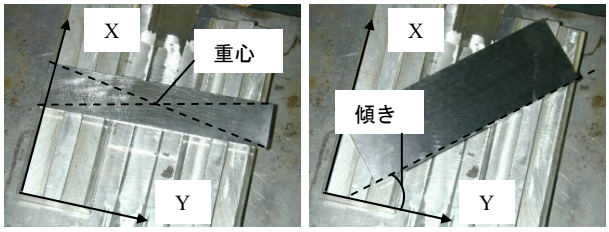
図４ 歪み量の提示

電圧とゲージ厚の関係を最小二乗法により１次式で近似し，ポテンショメータ出力から変位量への変換式を求めた．

求めた変換式を用い， 5.01[mm]，5.02[mm]，5.05[mm]のブロックゲージを測定した結果を図３に示す．プロット値は９回測定した値の平均値で，エラーバーは標準偏差を示す．ポテンショメータによってはばらつきが大きいものもあるが，20[μm]程度の差があればその差を検出できることがわかった．

３．３ 歪み量の提示

本装置で測定した歪み量をモニタ上に表示し，作業者に提示することを試みた（図４）．画面左下にワーク全体の凹凸状態がわかる表示とした．また，画面右側にはワークの奥から順に列ごとの各点のデータを表示した．前節で述べたように，測定のばらつきが大きいポテンショメータがあるため，まだ測定精度が十分ではないが，同じワークを３回計測し，平均値を使用することにより歪



ワークA
(S50C, 125×25×5[mm])

ワークB
(S50C, 125×40×5[mm])

図５ ワークの位置測定

み形状の作業者への提示と，ワーク形状の数値データ化を行うことができた．熟練技能者がダイヤルゲージを使用して得た歪形状のイメージと本装置によって提示した歪形状とがほぼ一致していることを確認した．

４．作業者の技能計測

矯正作業を行う場合，作業者は（１）プレス位置と向きを考慮して，ワークをプレス台に両端支持の状態でセットする，（2）プレス機のハンドルに加える力を調整することで適切なプレス力で矯正を行う，という２つの動作を行う．この２つの動作に関して，どの程度の正確さで作業者が作業を行っているかを調べた．

４．１ ワークのセット

曲がり歪みがあるワークAとねじれ歪みがあるワークBに対して，矯正作業を行う時と同じように，熟練技能者にプレス台にセットしてもらった．このとき，プレス台の上方に固定したデジタルカメラを用いてワークを撮影した．２種類のワークを交互に９回ずつセットしたときに，得られた画像データからワークの重心位置とワークの傾きを求め，熟練技能者がワークをセットする場合の繰り返し精度を調べた．

撮影した画像例を図５に示す．この時の画像分解能は0.1mm/pix であった．得られた画像のデータはカメラの撮影角度等の影響でゆがみが生じているので，以下の変換を行うことによって補正を行った．

画像上での点をP=(x, y), 変換後の点をP'=(x', y')とすると，

$$P'^{T} = R\,P^{T} + S \quad \cdots\cdots (1)$$

$$R = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix}, \quad S = \begin{pmatrix} s \\ t \end{pmatrix}$$

R，Tの各要素は位置が既知の点を16点撮影し，画像上での位置関係からムーアペンローズの逆行列[6]を用いて求めた．この変換を用いて他の測定位置での点を変換すると±1.2[mm]程度の誤差で位置を測定することができていた．

表１に本測定方法を用いて，各ワークをセットした時の重心位置の標準偏差（X軸方向，Y軸方向）と傾きの標準偏差を示す．曲がり歪みのワークAの場合は繰り返しセットした場合のばらつきが測定誤差程度であるが，ねじれ歪みのワークBの場合は重心位置，傾きともにばらつきが大きくなった．２章で述べたように，ねじれ矯正を行う場合，まず４つの角がすべて同方向，同程度に反った状態にするが，熟練技能者はこの作業はそれほど正確に行う必要がないと捉えているため，ワークのセットの仕方にばらつきが生じたと考えられる．また，ワークをプレス台に対して斜めに置かなくてはならないこともばらつきが大きくなった要因の一つと考えられる．ねじれの矯正は曲がりの矯正に比べてより難しいとされるが，熟練技能者にとって特に意識していない動作や判断基準が明確になっていない動作が存在することも技能教育を困難にしている要因の一つだと考えている．このワークのセットもその一例で，正確なワークの位置調整を支援することで技能教育の際に作業者への負担を軽減できると考える．

表１ ワークセット時のばらつき

	X軸方向 [mm]	Y軸方向 [mm]	傾き [deg]
ワークA	1.62	1.17	0.73
ワークB	2.52	5.76	5.09

４．２ プレス力

熟練技能者への聞き取り調査によると，プレス作業では，自分の加えた力と矯正された量からそのワークの曲がりやすさを判断して，最初に加えた力を基準にして力を調節して残りの歪みを矯正していく．それには，同じ力で繰り返しプレスできる技能が必要であると考え，できるだけ同じ力で10回プレス作業を行ってもらい，プレス力のばらつきを求めた．プレス力の測定にはプレス機にロードセルのようなセンサを取り付け，力を測定することも考えられるが，ロードセルの取り付けによりプレスストロークが変化するなど通常作業との違和感が生じる可能性がある．そのため，前報においてプレス力と相関が高かったプレス最下点位置をプレスヘッド部分に取り付けたリニアポテンショメータで測定し，プレス力に変換した．加える力の大きさは40[μm]の曲げ歪みがある場合に必要な矯正の力と，100[μm]の曲げ歪みがある場合に必要な矯正の力の２種類とした．比較のために，熟練技能者の他に，矯正作業を行ったことはあるが熟練していない非熟練技能者にも同様の作業を行ってもらった．この矯正作業では熟練技能者，非熟練技能者ともに，一度のプレス作業につき２回ずつプレスをする方法を採っていたため，プレス力は２回の合計として求めた．

図６にプレス力の平均値を示す．エラーバーは標準偏差である．40[μm]矯正時も100[μm]矯正時も熟練技能者のほうが大きな力を加えているが，標準偏差は両者間で差異は認められず，同じ大きさのプレス力を加えるとい

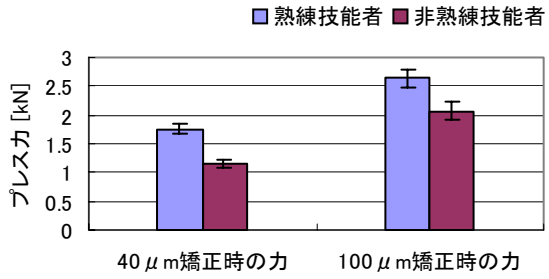


図６ プレス力

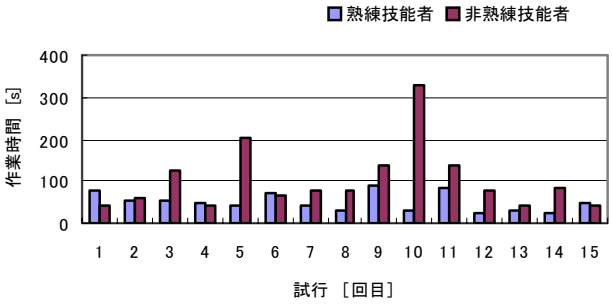


図７ 歪み矯正時間

う能力に関しては熟練技能者も非熟練技能者も差がないという結果になった．

４．３ 歪み矯正作業時間

次に熟練技能者と非熟練技能者の矯正作業に要する時間を測定した．作業内容は，約50[μm]の曲り歪みがあるワークを20[μm]以内の歪みになるようにする矯正作業とした．図７にそれぞれの作業者が15回試行したときの作業時間を示す．平均作業時間は熟練技能者が50[s]，非熟練技能者は103[s]であった．また，熟練技能者は１回の矯正作業を常に100[s]以内に終了させているが，非熟練作業者は100[s]以上必要であった試行が15回中5回あり，作業時間が安定していなかった．前節の結果から熟練技能者と非熟練技能者で同じ大きさのプレス力を加えるという技能に差異は認められなかったため，矯正しやすさなどのワーク状態の捉え方に差が現れたと考えている．

５．プレス試験機の試作

プレス作業の数値化，半自動化を行うために，電動リニアアクチュエータ（㈱ハーモニックドライブシステムズ，LBC-25A-5D6K）を用いたプレス試験機の試作を行った．図８にプレス試験機の外観を示す．また，表２に装置の仕様を示す．本アクチュエータはサーボドライバにより速度制御が可能である．また，ロッドとプレスヘッドの間にロードセル（日計電測㈱，LCT-5KNE353）を取り付け，10[ms]のサンプリング周期でプレス力を計測している．設定した速度指令値で速度制御を行い，プレス力が

図８ プレス試験機

表２ プレス試験機の仕様

最大推力 [N]	2000
シリンダストローク [mm]	50
プレス速度 [mm/s]	0.5～20

設定値になるとプレスを止め，移動方向を反転する制御を行った．今後，熟練技能者が本プレス試験機を使用して矯正作業を行うことにより，プレス作業のデータ収集を進めていきたい．

６．まとめ

本研究では金属製品精密加工における研削工程前の歪み矯正作業を対象として，ねじれの状態を作業者に提示できる測定装置を試作した．また，歪み矯正作業に必要な作業者の基礎的な技能特性を測定した．さらに，プレス作業の数値化，半自動化を目的としたプレス試験機を試作した．今後，これらの装置，手法を用いて，歪み矯正作業データを取得し作業解明を進めると共に，作業支援，技能教育に使用できるように改良を加えていきたい．

謝　辞

本研究を遂行するにあたり，歪み矯正作業の調査および計測にご協力いただきました（株）小森精機の関係者の方々に感謝いたします．

文　献

[1] 水川真，“センサベーストロボットにおける作業スキルの教示ーバリ取り作業事例ー”，計測と制御，第37巻，第7号，pp.499-503, 1998.
[2] 神野誠，永滝真太郎，“仕上げ作業技能の自動化”，計測と制御，第37巻，第7号，pp.504-507, 1998.
[3] 幸田盛堂，“金型磨き作業技能の自動化”，計測と制御，第37巻，第7号，pp.508-511, 1998.
[4] 富岡恒憲，“ノウハウが危ない”，日経デジタル・エンジニアリング，6月号，pp.70-89，2000.
[5] 久冨茂樹，張勤，張明，“力感覚が必要な作業スキル解明に関する研究”，岐阜県生産情報技術研究所研究報告，第4号，pp.75-78，2003.
[6] 現代数理科学事典，大阪書籍発行，1992.

立体紙製品の構造解析に関する研究（第4報）

川島　義隆　　横山　貴広　　岩田　靖三　　野口　哲司*
原田　匡人*　　梅津　康義*　　松井　和己**　　手塚　明***

Research on Structural Analysis of Paper Ware（Ⅳ）

Yoshitaka KAWASHIMA　Takahiro YOKOYAMA　Seizo IWATA　Tetsuji NOGUCHI*
Masahito HARADA*　Yasuyoshi UMEZU*　Kazumi MATSUI**　Akira TEZUKA***

あらまし　工業製品等の輸送や保管に使われる包装材料には，段ボール箱が広く使用されているが，近年，工業製品の精密化や輸送コストの面から，段ボール箱の耐荷重特性や積層による変形・座屈等に対する有限要素法等を使った強度解析の要望が強くなっている．従って，本報告では，段ボール箱の圧縮強度特性に関する検討を目的として，箱圧縮強度計算式の適用と実験との比較，また，有限要素解析・段ボール関連実験による箱圧縮挙動の解析を行い，その検討を行ったのでこれらを報告する．

キーワード　段ボール箱，構造解析，LS-DYNA

１．緒言

工業製品等の輸送や保管に使われる包装材料には発泡スチロールなどのプラスチック製品が多く使用されてきたが，近年，リサイクルコストが安く，生分解性である紙製品への代替が増加している．紙系の包装材料として代表的なものは段ボールが挙げられ，従来から容器（箱）として広く一般的に使用されている．また，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として使用も多くなっている．近年，包装される製品の精密化や包装コストの削減のため，包装材料の正確な強度設計（緩衝設計）が必要とされている．段ボール箱の箱圧縮強度に関しては，従来から様々な検討[1]がなされてきた．しかしながら，段ボール箱の耐荷重特性や積層による変形などの解析は十分になされておらず，それらに対する包装設計現場からのニーズも強い．一方，緩衝材の設計は，落下衝撃試験等による動的試験の評価による方法が一般的になりつつあり，そのため，多数の試験と試行錯誤が伴い，非効率さを招いているのが現状である．

以上のような問題に対処するためには，段ボール製品の有限要素解析を行うことは有用であると考えられ，そのためには原紙の材料特性，構造特性（段構造，箱構造）の解明が必要となってくる．また，段ボール製品は多数の段で構成されているため，その力学モデルの作成が非常に煩雑になることやモデルの大規模化による解析時間の増加という問題も生じる．

そこで，我々は，モデル作成における煩雑さを回避する方法として，段ボール製品は多数の段構造で構成された複合的構造物であり，その段の周期性に着目し，均質化法[2,3]を用いて静的弾性解析を行うことを提案[4]している．大規模解析における計算コストの削減の対策として，「離散化数値解法のための並列計算プラットフォーム」（Parallel Computing Platform/PCP）[5]を用いた並列計算手法による均質化法解析の検討[6]も行った．また，包装材料の強度設計では，静荷重に対する強度解析のみならず，落下衝撃解析などの動的解析が必要となってくる．実用的に構造解析を行うためには，多機能性や利便性等を考慮して，一般的に使用されている商用ソフトを利用するのがよい．そこで，我々は自動車などの衝突解析分野で一般的に使用されている商用構造解析ソフト LS-DYNA[7,8]を用い，線形均質化法による解析手法に関する検討[9]を行った．

一方，段ボール製品の構造解析を行うためには，材料特性，構造特性に関する知見が必要となる．そのため，我々は，段ボール原紙及び段構造の圧縮特性に関して基礎的な検討[10]を行ってきた．さらに，本報告では段ボール箱の構造特性，特に圧縮強度特性に着目し検討を行う．2 章においては，従来から使用されている段ボール箱の圧縮強度計算式を用いて，箱圧縮強さについての検討，3 章では LS-DYNA による有限要素解析を行い，段ボール箱の圧縮挙動の観察及びその圧縮強度要因の検討を行ったので，これらを報告する．

* 株式会社日本総合研究所
** 横浜国立大学
*** 独立行政法人　産業技術総合研究所

２．　段ボール箱の圧縮強さに関する検討

２．１　段ボール箱の圧縮強度計算式

段ボール箱の形式[11]には，たくさんの種類があるが，外装用段ボール箱としてもっとも一般的[12]である 0201 形式の箱圧縮強度について検討を行う．段ボール箱の設計において，一番重要な要因はその圧縮強度であり，従来からその強度を算定するため，ケリカット式，マッキー式，ウルフ式等の計算式[13]が使われてきた．いずれの式も，段ボールの物性値と段の種類，箱の寸法から得られる定数により計算される．計算式に用いられる段ボールの物性値は，ケリカット式は原紙の圧縮強さ（リングクラッシュ強さ）試験，マッキー式，ウルフ式は段ボールの垂直圧縮強さ試験（TAPPI 法）の測定値を用いている．

そこで，本章では，ケリカット式の強度計算式を用い，段ボール箱の圧縮強度を計算し，段ボール箱の強度に関する検討を行う．また，マッキー式，ウルフ式は両者とも TAPPI 法の垂直圧縮強さ試験の測定値を用いるが，ここでは JIS 法により測定した値を用い，その比較を行う．

求める段ボール箱の圧縮強さを P (lb)とすれば，次の式により箱圧縮強度値を計算できる．なお，文献[13]では，使用されている単位はポンド（lb），インチ（in）であり，本報でもそのまま引用する．

・ケリカット式

$$P = P_X \left[\frac{(\alpha x_2)^2}{\left(\frac{Z}{4}\right)^2} \right]^{\frac{1}{3}} JZ$$

・マッキー式

$$P = 5.874 \cdot P_m \cdot Z^{0.492} \cdot h^{0.508}$$

・ウルフ式

$$P = \frac{5.2426 \cdot \sqrt{h} \cdot P_m \cdot \sqrt{Z} \cdot \left(0.3228 \cdot A - 0.1217 \cdot A^2 + 1\right)}{D^{0.041}}$$

ここで，

P_X ：（表ライナー＋α×中芯＋裏ライナー）のリングクラッシュ強さ (lb/in)
P_m ：段ボールの垂直圧縮強さ(lb/in)
α ：中芯の段繰率 (in)
αx_2 ：フルート常数
h ：段ボールの厚さ(in)
J ：箱の常数
Z ：箱の周辺長 (in)
A ：箱の縦・横比
D ：箱の高さ(in)

２．２　段ボール関連試験

段ボールは図1に示すように，ライナー及び中芯と呼ばれる原紙で構成され，中芯を波形に成形し，その片側

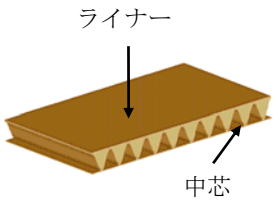


図1　両面段ボール

または両側にライナーを張り合わせることにより，段ボールの段構造が作られる．

試験に使用する段ボールは表ライナー（公称坪量170 g/m^2），中芯（公称坪量120 g/m^2）及び裏ライナー（公称坪量170 g/m^2）で構成された外装用両面段ボール（A段，協和ダンボール（株））である．試験速度は10mm/minとし，試験機はオートグラフ（(株）島津製作所AG-20kNI）を用い，標準状態（JIS Z 8703，温度23±1℃，湿度50±5%）で行った．

2.1 節で記した計算式を適用するに当たり，段ボール原紙の圧縮強さ試験，段ボール垂直圧縮試験（JIS Z 0403-2，A法），段ボール箱の圧縮強さ試験を行ったので，それらの結果を報告する．

２．２．１　段ボール原紙の圧縮強さ試験

試験は原紙の圧縮強さ試験（リングクラッシュ試験，JIS P 8126，図 2(a)）により行い，原紙の圧縮試験は，短冊状に切断した原紙を円形に設置し，その上端部より圧縮を行う．その短冊状の試験片は長さ 152.4mm，高さ 12.7mm とした．測定した原紙，それぞれの最大圧縮強さを表 1 に示す．

表1　段ボール原紙の最大圧縮強さ

原紙	方向	最大圧縮強さ(N)	
		平均	標準偏差
表ライナー	縦	392.9	28.6
	横	274.6	16.1
中芯	縦	134.2	17.9
	横	122.8	10.0
裏ライナー	縦	330.6	12.3
	横	258.9	9.7

(a)　段ボール原紙(JIS P 8126)　(b)　段ボール(JIS Z 0403-2)

図2　段ボール原紙と段ボールの圧縮強さ試験

２．２．２　段ボールの垂直圧縮強さ試験

段ボールの縦方向（段に平行な方向）の強さを測定する試験である．試験方法は段ボール垂直圧縮試験（JIS Z

0403-2，A 法，図 2(b)）に基づいて行った．その結果，最大圧縮強さは平均 253.2N(5.06kN/m)，標準偏差 17.2N であった．

２．２．３　段ボール箱の圧縮強さ試験

（１）試験方法

試験に使用する段ボール箱は 0201 形式，長さ 380mm，幅 300mm，高さ 234mm とし，試験方法は，包装貨物及び容器－圧縮試験方法（JIS Z 0212，B 法）に基づき，計 6 回の試験を行った．対象とする段ボール箱の仕様を図 3 に示す．

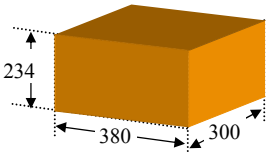
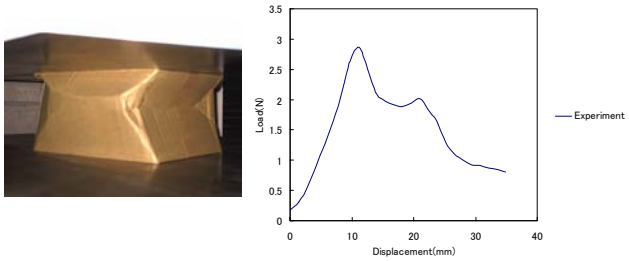


図3　段ボール箱の仕様

（２）試験結果

段ボール箱の最大圧縮強さは平均 2919.8N，標準偏差 156.0N であった．段ボール箱の座屈の様子を図 4(a)に，代表的な変位－荷重特性を図 4(b)に示す．



(a)　変形の様子　　(b)　変位－荷重特性

図4　段ボール箱の圧縮強さ特性

２．３　圧縮強度計算式の適用の結果及び考察

2.2 節に記した各試験の測定値及び 2.1 節で記した 3 つの式を用いて，段ボール箱圧縮強度の計算を行い，その結果を表 2 に示す．ケリカット式の計算式は，実験値に近い値を示している．一方，他の 2 式の値は実験値のそれより 400～500N 程低い値を示す．これは，今回計算時に必要な段ボール物性値として，JIS 法の垂直圧縮強さ試験の測定値を用いたが，本来は TAPPI 法による測定値を用いる必要があるためである．文献[13]によれば，TAPPI 法は JIS 法の測定値に比べ，420～980N/m 程度高い傾向を示すことより，マッキー式は 2628.5～2896.9N，ウルフ式は 2717.1～2994.6N の値を持つことが想定され，表 2 のマッキー式，ウルフ式が若干低い値を持つことは概ね妥当と考えられる．

表2　段ボール箱の圧縮強度の比較

圧縮強さ計算式	ケリカット式	2790.7
	マッキー式	2427.2
	ウルフ式	2509.0
実験		2920.0（平均） 156.1（標準偏差）

３　段ボール箱の圧縮強度要因の検討

３．１　解析手法

ケリカット式は原紙の圧縮強さ，中芯の段繰率，箱の幾何学的形状，及び定数を用いる計算式となっている．すなわち，原紙の強さと段の種類と及び箱の大きさにより圧縮強さを求めていることになる．そのため，段ボール箱の有限要素解析を行うためには，３種の原紙の剛性とそれらで構成される段のメッシュを作成，箱全体の有限要素モデルを作成し，解析することが考えられる．しかしながら，ここでは，モデルの大規模化を避けるため，段ボール箱を一層シェル要素でモデル化を行い，箱圧縮時の挙動解析を行い，その要因の検討を行う．解析ソフトは LS-DYNA を使用する．

３．２　有限要素解析による箱の圧縮特性に関する検討

３．２．１　解析方法

段ボールの材料定数として，段ボール垂直圧縮試験（60mm×90mm の矩形試験片）により，縦・横方向のそれぞれの変位－荷重特性を測定し，段ボール断面を矩形断面とみなし，公称応力・ひずみ曲線より，ヤング率の同定を行った．また，ポアソン比を 0 とする．有限要素モデルを表 3，図 5 に示す．また，モデルをより簡略化するため，上下のフラップのモデル化は行わず，図 5 のモデルに，上辺に周辺固定条件及び下辺に変位固定条件を与えることにより，解析を行う．そして，箱圧縮時の応力分布により，箱圧縮時の挙動を解析する．

表3　段ボール箱の有限要素モデル

節点数	12,784
要素数	12,512
要素タイプ	4 節点Shell
材料モデル	直交異方性弾性体
境界条件	強制変位（上辺）
	周辺固定（上辺） 変位固定（下辺）

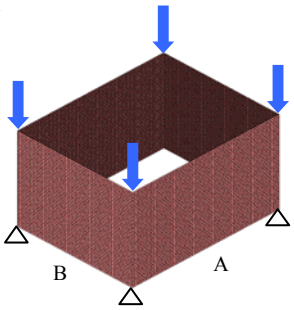


図5　段ボール箱の有限要素モデル

３．２．２　解析結果

シェル要素表面上の第 3 主応力と主応力方向の分布図を図 6～8（左：主応力，右：方向），下辺の反力を図 9 に示す．これらの図より，箱圧縮の挙動を観察すると，最初，図 6 のように段ボールの側板 4 枚に荷重がかかっているが，その後，2 種類の側板の内，平板座屈荷重のより小さい方の板(A)の座屈[14]が生じる（図 9(1)）．そして，次に，他方の側板(B)の座屈が生じることにより，段ボール箱の 4 つのコーナー部でその荷重を支える状態になる．(図 8, 図 9(3))．そして，その後，このコーナー部の座屈・曲げが生じることにより，図 4(b)で示されるような段ボール箱の圧壊が生

じることになる．よって，段ボール箱の最大圧縮強度は，この４つのコーナー部の圧縮による座屈や曲げ特性が大きな要因になると考えられる．

また，段ボール箱は正方形でない限り，２種類，各２枚の計４枚の側板で構成される．図 6 から 8 へ移行する現象は，平板の面内圧縮を行った場合，平板座屈荷重の小さい方の平板の座屈が箱の座屈の起点[14]となることがわかる．そして，段ボール箱圧縮時の挙動をまとめると，①全周長に相当する部分の圧縮，②弱い方の平板による座屈，③他方の平板による座屈，④コーナー部の圧縮，座屈，曲げを経ることになる．

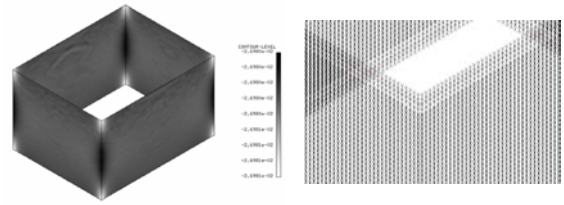


図6　箱圧縮時の応力分布図(1)
（変位：0.083mm，応力：-2.6980e-02～-2.6981e-02MPa）

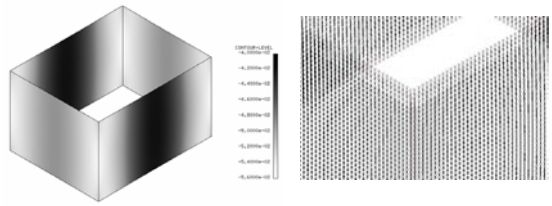


図7　箱圧縮時の応力分布図(2)
（変位：0.167mm，応力：-4.0000e-02 ～-5.6000e-02Mpa）

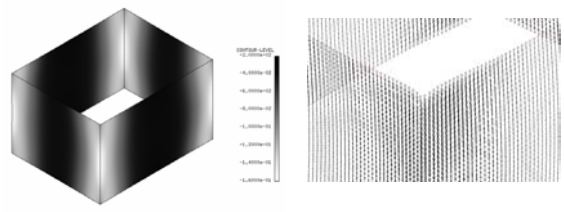


図8　箱圧縮時の応力分布図(3)
（変位：0.417mm，応力：-2.00e-02 ～ -1.60e-01Mpa）

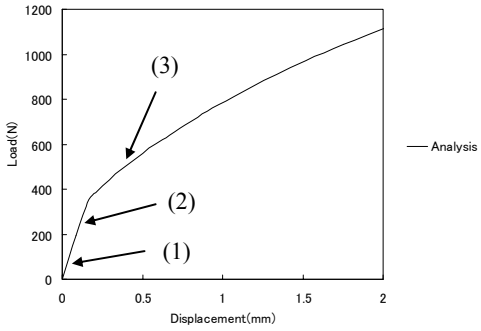


図9　段ボール箱圧縮時の下辺の反力

３．３　箱のコーナー部の強度特性

３．３．１　コーナー部の強度要因の検討

3.2節より，段ボール箱の圧縮強さは箱のコーナー部の強度に大きく影響を受けることがわかった．そのため，コーナー部の強度に関するより詳しい検討を行うため，試験により，その圧縮強さと曲げ強さの評価を行う．

段ボール箱のコーナー部は，罫線と呼ばれる折り曲げ線を入れることにより作成される．そのため，コーナー部の強度の評価を行うため，試験は平板形状の段ボール試験片とコーナー部に相当する折り形状試験片の両者の試験を行い，それらの強度特性の比較を行うことにする．

３．３．２　コーナー部の垂直圧縮強さ試験

（１）試験方法

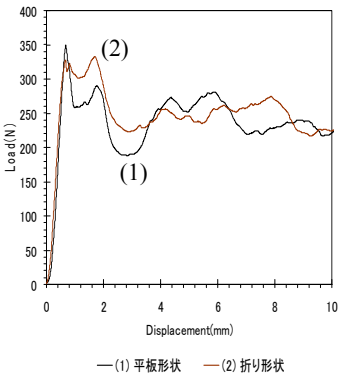
試験片は平板形状（高さ 60mm，幅 90mm）と折り形状（高さ 60mm，片幅 45mm，図 10(b)）の２種類を使用する．折り試験片は平板試験片の幅方向における中央部 45mm の位置で折り，その角度（90°）をセロハンテープで保持することにより作成する．試験回数は平板試験片 10 回，折り試験片 15 回とし，圧縮速度は 2 章での試験と同様である．

（２）試験結果

２種の試験片の垂直圧縮強さの最大値を表 4，変位－荷重特性，折り試験片の変形の様子をそれぞれ図 10(a)，(c)に示す．最大圧縮強さの個々のデータは両者において等分散性が認められ，有意水準 5%で平均に差があるとはいえないことがわかった．また，図 10(a)より通常の平板の圧縮特性とほとんど変わらない．従って，平板試験片と折り試験片の垂直圧縮強さは両者において差がないことがわかる．

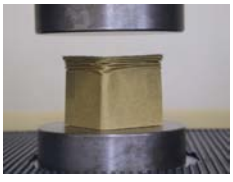
表4　段ボールの垂直圧縮強さの最大値

	平均(N)	標準偏差(N)
平板形状	346.3	18.6
折り形状	335.8	19.4



(a)　変位－荷重特性

(b)　折り形状試験片



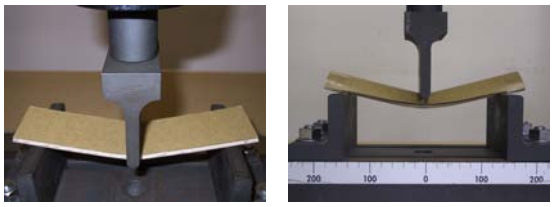
(c)　変形の様子

図10　段ボールの垂直圧縮強さ試験

３．３．３　コーナー部の曲げ強さ試験

（１）試験方法

段ボールの平板試験片と折り試験片の 3 点曲げ強さ試験（図 11）を行う．平板試験片の大きさは長さ 200mm，幅 50mm で，スパン 150mm とし，スパン中央部への集中荷重により試験を行う．折り試験片の大きさは長さ 200mm，幅 50mm（スパン 150mm）で，折りは幅方向の中央部 25mm の位置する．また，折り試験片の角度（90°）を保持するため，試験片の両端をセロハンテープで保持を行う．



(a)　平板試験片　　(b)　折り試験片

図11　段ボールの曲げ強さ試験

（２）試験結果

２種の試験片の曲げ強さ試験における最大値を表 5，たわみー荷重特性を図 12 に示す. 最大圧縮強さの個々のデータは両者において等分散性が認められ，有意水準 5%で平均に差がないとはいえないことがわかった．

折り試験片の最大曲げ荷重は平板のそれに比べ, 2.1 倍の大きさを持つことがわかる．また，折り試験片の座屈後もその曲げ強さが急激に失われることはないことがわかる．

表5　段ボールの曲げ強さの最大値（最大荷重値）

	平均 (N)	標準偏差(N)
平板形状	14.7	0.8
折り形状	30.7	1.2

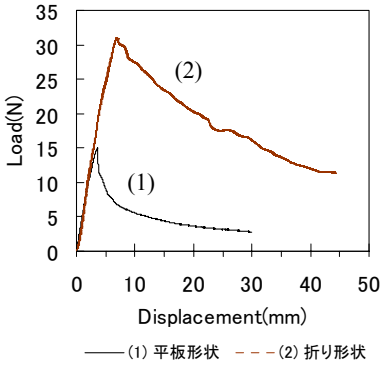
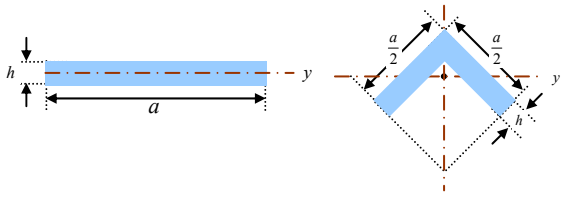


図12　段ボール曲げ試験のたわみー荷重特性

２種の試験片のそれぞれの断面形状を，図 13 のように，密な矩形形状を持つものと想定し，両者の最大曲げ応力の比較を行う．本試験の場合，a=90mm，h=5.35mm であるので，Type1 と Type2 の断面二次モーメントはそれぞれ 638.0，5716.5 となる．そして，Type1 の最大曲げ応力を 1 とすると，Type2 のそれは 2.14 となる．この比例関係は段ボール断面にも適用できることを考慮すると，表 5，図 12 の最大曲げ荷重の相違が説明できる．すなわち，段ボール箱のコーナー部の曲げ強さは平板曲げ強さと比較して，断面二次モーメントの差異であるといえる．

従って，平板形状と折り形状の曲げ強度を比較すると，形状的な強度の差は見られる（折ることによる強度の向上）が，材料的（紙）に強度の変化の影響は見られないといえる．よって，この折り形状の曲げ強さが平板形状に比べ，段ボール箱の強度に寄与しているといえる．



(a)　Type1　　(b)　Type2

図13　断面形状

３．４　段ボール曲げ試験の解析

箱圧縮強度はコーナー部の曲げ強さが大きく影響を与えていることが考えられるが，前項より，折りの幾何学的な形状を除けば，平板の曲げ強さと同じであるといえる．また，2章において，箱圧縮強度計算はある程度の精度で推定できることを確認した．しかしながら，段ボール箱の応力解析・衝撃解析等を行うためには，有限要素解析が必要となってくる．そのため，本項では，原紙の圧縮試験から材料定数（ヤング率）を同定し，平板形状の段ボールを詳細にモデル化して，曲げ特性の解析を試みる．

表6　段ボール原紙のヤング

原紙	方向	ヤング率 (MPa)
表ライナー	縦	1737.1
	横	989.6
中芯	縦	1047.5
	横	679.4
裏ライナー	縦	1601.6
	横	905.4

３．４．１　解析方法

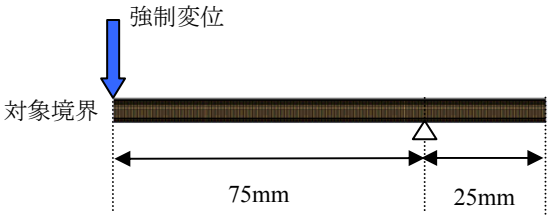


図14　段ボールの曲げ特性解析モデル

原紙の圧縮特性曲線において，最大圧縮応力点までの立ち上がりの部分をヤング率とみなし，材料定数を同定した．原紙3種類のそれぞれの縦方向，横方向のヤング率の平均を表6に示す．

また，曲げ解析モデルは1/2モデル（節点数17,655，要素数17,280）とし，要素は4節点Shell要素，材料モデルは直行異方性弾性体とする．また，境界条件を図14に示す．

３．４．２　解析結果

解析モデルの支点における節点反力を３．３．３で示した平板曲げ試験の変位－荷重曲線とともに図15に示す．解析の最大曲げ荷重は実験値のそれに比べ，変位2.1mmの時，実験10.33Nに対し，解析6.29Nである．従って，解析では実験の60%程度の反力しか出ていないことになり，実験値に比べ低い結果となった．原因として考えられるのは，解析では，原紙の剛性を圧縮特性から同定したが，原紙の曲げ剛性とは相違がある可能性がある．また，中芯とライナーの接着部が他の部分に比べ，剛性が高い可能性がある．そのため，反力の違いに影響を与えているかもしれない．

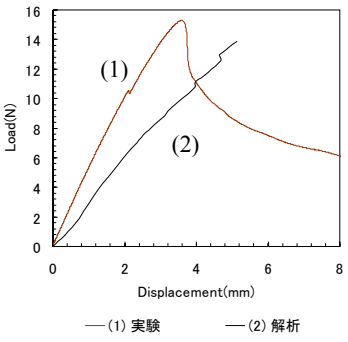


図15　段ボールの曲げ強さにおける変位－荷重特性

４．まとめ

段ボール箱の圧縮強度特性に関する検討を目的として，段ボール関連実験及び箱圧縮強度計算式の適用を行った結果，それらの式による強度値は実験のそれをかなり近い値で推定可能であることを確認した．また，段ボール箱の圧縮時の挙動解析を行った結果，その挙動は，最初，箱全体に圧縮荷重がかかるが，平板座屈荷重の小さい方の側板の座屈が起点となり，最終的には４つのコーナー部に荷重が集中し，その後，それらの圧縮・座屈により箱の圧壊に至る．従って，箱圧縮強さの要因は，このコーナー部の圧縮・曲げ強さが大きく影響を与えていることがわかった．

箱圧縮強度計算式に用いられる段ボール物性値としては，原紙の圧縮強さ，または段ボールの垂直圧縮強さであり，それらに計算式に必要な段ボール箱の形状データを用いることにより，箱圧縮強度を計算している．これは，箱の有限要素解析においても，これらの情報でその強度予測が可能であることを示唆するが，しかしながら，平板曲げの有限要素解析の結果より，実験値よりかなり低い曲げ荷重が得られ，原紙の曲げ剛性や段ボールの接着部の剛性に関する検討も行う必要があることがわかった．

今後は，段ボール製品の構造解析におけるその精度の向上，また，その解析手法として，原紙の塑性や段ボールの座屈などの非線形性を考慮したLS-DYNAによる非線形均質化法解析の開発が必要と思われる．

謝辞

本研究の遂行にあたり，段ボール関連資材を提供して頂いた協和ダンボール（株）の関係者の方々に深く感謝の意を表します．

文　献

[1]五十嵐清一，“新版段ボール製造・包装技術　実務編”，日報出版, 2002.

[2]Gudes, J. M., Kikuchi, N., “Preprocessing and postprocessing for materials based on the homogenization method with adaptive finite element methods”, Comput. Methods Appl. Mech. Eng., pp.143-198, 1990.

[3]寺田ら，“均質化法入門”，丸善，2003

[4]川島ら，“立体紙製品の構造解析に関する研究”，岐阜県生産情報技術研究所研究報告 No.2,pp29-34,2000.

[5]独立行政法人　産業技術総合研究所，http://www.aist.go.jp/infobase/pcp/platform/index.html

[6]川島，“Parallel Computing Platform/PCPの均質化有限要素解析への適用事例”，第1回「離散化数値解法のための並列計算プラットフォーム」（Parallel Computing Platform/PCP）ユーザー会.

[7]Livermore Software Technology Corporation, http://www.lstc.com

[8]（株）日本総合研究所　エンジニアリング事業本部, http://www.jri.co.jp/pro-eng/struct/index.html

[9]川島ら，“立体紙製品の構造解析に関する研究（第3報）”，岐阜県生産情報技術研究所研究報告 No.4,pp79-82,2002.

[10]川島ら，“段ボールの構造解析に関する研究－基礎的実験及びその解析－”，日本機械学会関西支部第77期定時総会講演会講演論文集No.024-1，pp3-45-46,2002.

[11]JIS Z 1507　段ボール箱の形式.

[12]山口誠，“包装設計の基礎知識”，（社）日本包装技術協会，pp109,1998.

[13]五十嵐清一，“新版段ボール製造・包装技術　実務編”，日報出版, 2002.

[14]吉田ら，環境海洋技術官ネットワーク技術情報Q&A掲示板（現在，参照ページは閉鎖中）http://www.naoe.t.u-tokyo.ac.jp/member/tecnet/

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の実用化
―「筆を用いた匠の絵付け再現ロボット」―

横山　貴広　　久冨　茂樹　　光井　輝彰

Developing and Implementation of Sensing Methods for Novel Sophisticated Robot Teaching
- Facilitate The Reproduction of experienced Painter's arts -

Takahiro YOKOYAMA　Shigeki KUDOMI　Teruaki MITSUI

あらまし　陶磁器・看板・染色などの伝統工芸における絵付けなどは，熟練作業者による手作業で行われる．これらの作業に必要な技能や技法の伝承は高齢化や後継者不足の問題を抱えている．さらに海外からの輸入製品の増加によるコスト競争力強化のため，手作業で行われる製品の高効率化が求められている．県内地場産業の存続，技術伝承，活性化にはこうした熟練技能者の技能をデジタルデータで保存し再現する必要性がある．以上の問題を解決するため本研究では平成12年度から14年度の３年間でロボット教示システムに関する研究を行い，教示の簡易化，時間の短縮化に成功し，ペン型教示ツールを用いたシステムの基礎技術を確立した．本年度はこの技術を応用して県内の地場産業に実用化させるため，昨年度までのシステムを「筆を用いた絵付け」作業に特化してシステムの構築を行った．

キーワード　ロボット教示，筆，絵付け，実用化

１．はじめに

県内の伝統工芸を中心とする地場産業には，熟練技能者の手作業による技能を必要とする工程が数多く存在する．とりわけ熟練作業者の技能は長年の経験を必要とするため技能の伝承が難しい．そのため近年地場産業の存続，活性化には技能者の高齢化，後継者不足が深刻な問題となっている．伝統工芸の育成，技術伝承，後継者不足問題の解決のため熟練技能者の作業を保存し再現する必要性がある．さらに海外からの低価格製品の輸入の増加により，産業全体の高効率化，低コスト化が求められている．しかし諸外国に比べ人件費が高い我が国ではコスト競争力には限界があるため，産業の生き残りのためには海外製品より製品の高付加価値化も必須となる．この高付加価値製品の製造に必要な熟練技能者の技能を再現し，伝承するシステムが必要となってくる．

そのため本研究では熟練技能者の作業をロボットで簡単に効率良く再現するシステムの開発を目指す．人の作業をロボットで再現するには人の位置と姿勢の動きを正確に把握し，ロボットに教示する技術が必要となる．この教示に関する研究を平成12年度から３年間実施し[1]~[2]，ペン型教示ツールを用いた簡易教示システムを開発した．本年度は開発したシステムを県内の地場産業に実用化出来る事を目的とする改善を行った．その中で特に陶磁器，提灯，タイル製品等の製造に必要な「筆を用いた絵付け」作業に特化してシステム開発を行った結果，磁器の絵皿の絵付けに応用できる事を確認し，産業に応用，実用化できる可能性を確認した．

２．システムの概要

システムの構成を図１に示す．このシステムは人の筆記動作に用いる筆の位置と姿勢をリアルタイムで測定し，デジタルデータに変換するデータ測定部（①）とデジタル化したデータを採取，蓄積し，人の作業空間からロボットの作業空間へ座標変換するシステムＰＣ部（②）と筆記動作を再現するロボット部(③)で構成されている．

データ測定部（①）ではポヒマス社の６軸磁気センサ（３SPACE FASTRAK）を用い，筆記動作時に動く筆の動作の位置（X，Y，Z）と姿勢（ｱｼﾞﾏｽ，ｴﾚﾍﾞｰｼｮﾝ，ﾛｰﾙ）を同時に測定している．またロボットには（株）三菱重工業製のPA-10ロボットアーム（７軸垂直多関節形）を用い，先端姿勢制御を採用して筆の動作を再現している．なおデータ取り込み開始と終了のタイミングはスイッチ入力をデータ測定部（①）の信号中継器を用いてシステムＰＣ部にスイッチ信号を送信している．

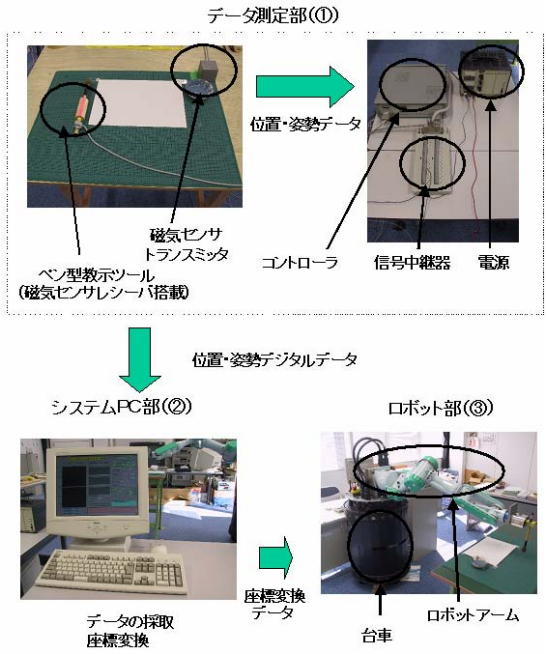


図１　システムの構成

３．システムの改善

３．１　位置と姿勢測定精度の改善

本システムは筆の位置と姿勢の検出にポヒマス社の磁気センサを用いている．この磁気センサから出力するデータは周囲の金属の存在による磁場の歪みの影響を受けやすい特性を持っている．そのため磁気センサのレシーバやトランスミッタの周囲に金属が存在すると出力データに歪み誤差が生じる．人が生活する環境には必ず金属が存在する．そのためにこのセンサを使う際，教示を行う環境での歪み誤差の量を把握し，歪みが大きければ環境を改善する必要が出てくる．

作業空間（研究室環境）の磁気センサの歪み特性を知るため，縦250㎜，横350㎜，高さ100～200㎜の教示作業空間を縦25通り，横35通り，高さ3通りの格子状に分割し，その交点にレシーバを置いた時の出力データを測定した．レシーバを図２（レシーバがトランスミッタより100㎜高い空間）の様な空間の格子点に置いたところ，レシーバの出力からは図３（ａ）環境改善前のような出力を得た．Ａ３用紙の空間の範囲内でトランスミッタから最も離れた箇所での出力は高さ方向に約45㎜程度の歪みが生じていることが分かった．この環境のデータをそのまま利用すると筆の位置を忠実にデータとして取り込むことが出来ない．そのため金属によるセンサの歪み誤差を減らすために，教示作業台として使用した市販の机（フレームと脚に金属を使用）を釘などの金属を一切使用せずに製作した木製作業台（縦900㎜，横900㎜，高さ750㎜）に変更し，筆記動作を行う教示作業台付近に存在する金属を取り除いた．このような環境改善を行った後に同じ

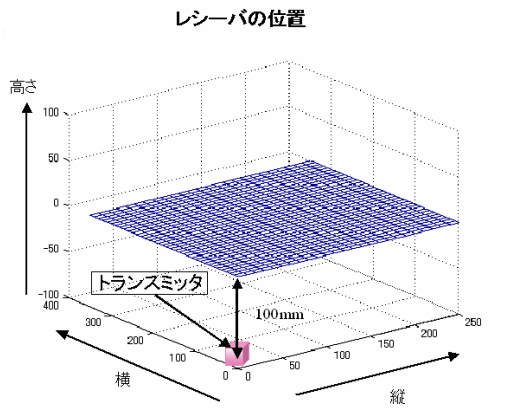
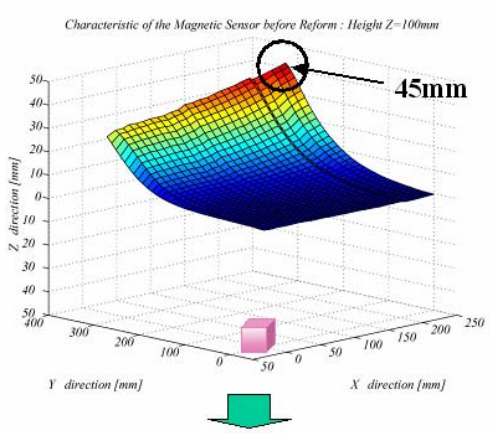
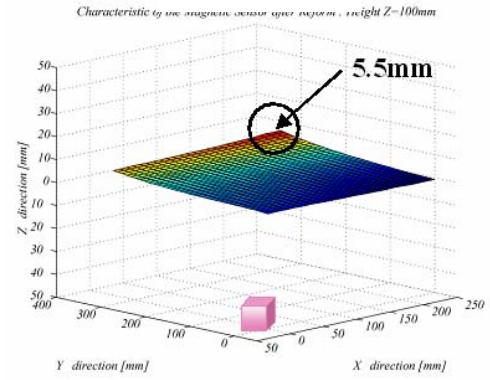


図２　レシーバの位置（高さ１００㎜）

（ａ）環境改善前



（ｂ）環境改善後



（ｃ）拡大図

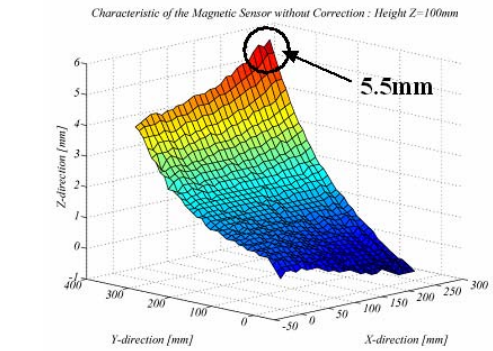
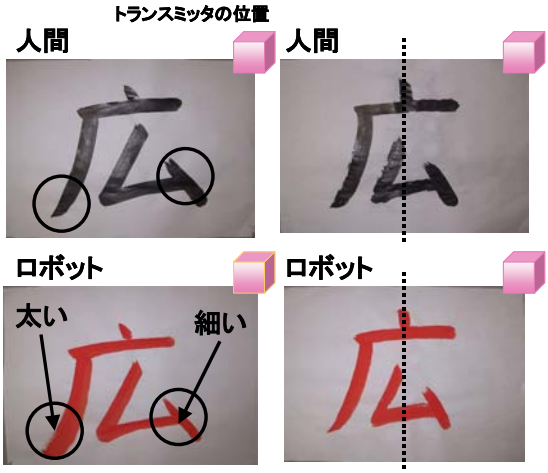


図３　環境改善前後の出力歪み特性

測定をしたところ図３（ｂ）（ｃ）環境改善後の様に最大約5.5㎜程度の歪みに収まった.また姿勢に関しても同様に環境改善によって歪みが減少した事を確認している.

以上の環境改善を行った後，改善の効果を確認するため筆記動作の評価を行った．この結果を図４に示す.（ａ）環境改善前の人間とロボットの文字を比較すると，トランスミッタとの距離が離れている箇所ほど太字になる傾向があり，近いほど細字になっている．これは図３（ａ）環境改善前のグラフが示すように，センサの歪み特性の影響を直接受けているからである.（ｂ）環境改善後の両者を比較すると人間で筆記した文字をロボットが正確に再現出来ている事が分かる.



（ａ）改善前　　（ｂ）改善後

図４　環境改善による筆記文字の比較

３．２　システム全体の改善

従来のように教示動作の確認のために実施した比較的短時間で行う「習字作業」ではなく，本年度は「筆を用いた絵付け」に特化してシステムの構築を行ったためシステムを改善する必要が生じる．システム全体の問題点と改善点を表１に示す．以下にシステム構成別に改善点を報告する.

（１）　データ測定部

比較的長時間の絵付け作業を想定して筆を持ちやすくし，筆記動作中に筆先が見やすいように，グリップと磁気センサ以外の部品をすべて取り外した．さらに紙，絵皿の位置決めが行いやすいように方眼紙マットを敷いた.

（２）　システムＰＣ部

システム画面（筆の軌道の表示）を見やすくし，教示採取時間を長くできるようにシステムプログラムの変更を実施した.

（３）ロボット部

絵付け作業中における筆の位置，姿勢，速度の多様な変化をロボットで再現すると，動作中に全体が揺れるため精度や位置決めに問題が生じる．この件に関しては今後一体型ロボット教示システムの製作によって解決をする.

絵付け作業は習字作業と異なり作業時間が長時間に及ぶため，筆先にインクや顔料を補充する動作と，筆先を整えるため容器に筆を撫でる動作が必要となるので，筆の移動範囲が広くなり，筆の回転動作が多くなる．この改善としてロボットが筆記をする際，腕を伸ばした姿勢（図５（ｂ））で筆記をさせて可動範囲を拡大し，アーム先端の手首を改善（図６（ｂ））することにより絵付け作業におけるの動作を再現しやすいようにした.

表１　システム全体の改善点のまとめ

問題点	改善内容
データ測定部	
1. 位置･姿勢データの測定精度が悪い 2. ペン型教示ツールが持ちにくい 3. トランスミッタと紙の位置決めに時間がかかる	1. センサの特性を測定し環境改善を実施。 2. グリップと磁気センサ以外の部品をすべて取り外した 3. 方眼紙マットを敷設
システムPC部	
1. システム画面が解りにくい 2. 教示データ採取時間が短い（約2分）	1. 教示システム画面の全面改良（解りやすい表示に変更→今後さらに使いやすいシステムに変更予定） 2. システムプログラムの変更（約2分→約15分に変更）
ロボット部	
1. ロボットアームが高速動作をすると全体が揺れる（60㎝/秒以上） 2. ロボットと作業台の位置決めに時間がかかる 3. ロボットアームの可動範囲が狭い	1･2. 一体型ロボット教示システムを製作することによって解決予定 3. ロボットアームの姿勢のプログラム変更とアーム先端の形状の変更により解決

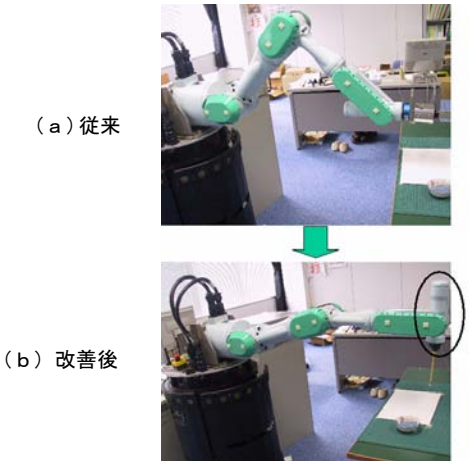


図５　ロボットアームの姿勢改善

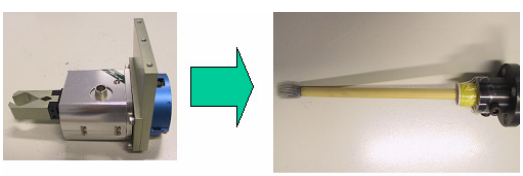


図６　手首の改善

４．磁器の絵皿を用いた評価試験

本システムを用いて素焼きの磁器の絵皿に絵を描いて製品を製作する評価試験を行った．この試験では単に素焼きの絵皿に絵を描かせる動作だけでなく，描画途中に筆に容器内の顔料を補充させたり，顔料補充後に筆先を整えたり，顔料を拭き取るため容器の縁に筆を撫でる動作もすべて教示した．顔料には磁器製品に用いる“ゴス”を用い，筆も磁器の絵皿専用の筆を使用した．

図７（ａ）に陶芸作家の完成作品，（ｂ）にロボットが描いた素焼き状態の作品，（ｃ）にロボットが製作した完成作品の結果を示す．人間（陶芸作家）とロボットの出来上がった製品を比較すると細部には若干の違いは見られるが，ロボットが筆で描いた絵皿はプリントで磁器製品に印刷したものでは表現できないような顔料の濃淡が見事に表現されている．

今後さらに両者を近づけるためには筆の位置と姿勢をロボットに忠実に再現させるだけでなく,顔料の調整,筆記動作中の筆の状態，その他環境などを一致させる事が必要になってくると思われる．

５．まとめ

本年度はロボット教示システムを県内の地場産業へ実用化出来るように，昨年度までのシステムの問題箇所を抽出し，改善を行うことにより，以下のような成果を得た．

【１】人の筆記動作に用いる筆の位置と姿勢検出精度をセンサの特性試験によって特性を把握し，環境改善を行うことによって筆の位置，姿勢検出精度の向上を図った．

【２】本システムを磁器の絵皿の絵付け作業に応用できる可能性を確認できた．

６．謝辞

本研究で行った磁気センサの特性データの測定，解析には岐阜大学山田博行氏のご協力を頂きました．また磁器製品の絵皿の製作には陶芸作家安藤實氏にご協力頂き，（株）カネコ小兵製陶所，（株）東産工業所から試料の提供，システムに関するご意見，ご指摘を受けています．深く心から感謝します．

文　献

[1] 柘植英明，谷和男，稲葉昭夫，棚橋英樹，“ロボット教示高度化のためのセンシング手法に関する研究”，岐阜県生産情報技術研究所研究報告，pp.21-24, 2001.

[2] 柘植英明，谷和男，田中等幸，“ロボット教示高度化のためのセンシング手法に関する研究”，岐阜県生産情報技術研究所研究報告，pp.49-52, 2002

（ａ）　人間　（陶芸作家完成作品）

（ｂ）ロボット　（素焼き状態での作品）

（ｃ）　ロボット　（完成作品）

図７　人間とロボットが製作した磁気の絵皿

人間共存ロボットの衝突安全に関する研究

－ロボット外皮の開発と全身での衝突緩和制御－

田中　泰斗　　稲葉　昭夫　　光井　輝彰　　横山　貴広

Research on Anti-collision Safety for Human-Symbiotic Robot

Development of Robot Skin and Shock Absorbing Control with Entire Body

Taito TANAKA　Akio INABA　Teruaki MITSUI　Takahiro YOKOYAMA

あらまし　近年，医療，福祉，家庭内作業などの分野においてもロボットの利用が期待されており，その実現のためには，ロボットと人間の接触を想定した新たな安全設計や行動計画が必要となる．ロボットと人との接触を効率的に検出するためには，ロボットの全身に接触センサを分布させることが有効であり，要求される性能としては大面積の被覆が可能であること，接触の位置の特定や力の分布情報の検出が可能であること，力の定量およびその方向の検出が可能であることなど多岐にわたる．本研究では，人とロボットが共存するうえで必要な技術のなかで衝突時の安全確保に着目し，接触や衝突の検出，衝撃緩和などの機能を有したロボット外皮を開発し制御に応用することを目的としている．本年度は，ロボットの形状のなかで2次元的な形状により被覆可能な部位における接触時の力およびその荷重中心を検知可能な接触センサの試作と基礎的な特性評価を行った．

キーワード　ロボット，外皮，接触センサ，荷重中心，感圧導電性ゴム

１．はじめに

近年，ロボットを医療，福祉，家庭内作業など人間とロボットが空間を共有する分野で利用することが検討されている．このような用途においては，従来から産業用ロボットにおいて採用されてきた作業空間の分離，緊急停止ボタンなどの安全対策だけで対応することは難しく，ロボットと人間の接触を前提とした新たな安全設計や行動計画が必要となる．人間とロボットの接触には意図の伝達を目的とするものと，不測の衝突によるものに大別でき，その認知，検出にはロボットの全身に接触を検出可能なセンサを配置する必要がある．このような触覚・接触センサに求められる性能は様々であるが，大面積の被覆が可能なこと，接触の位置の特定や力の分布情報の検出が可能であること，力の定量およびその方向の検出が可能であることなどがあげられる．

本研究では，人とロボットが共存するうえで必要となる要素のうち衝突時の安全確保に注目し，衝突検出・衝撃緩和機能を有したロボット外皮を開発し制御に応用することを目的としている．本年度は，接触時の力およびその荷重中心を検知可能な接触センサの試作と基礎的な特性評価を行ったので報告する．

２．接触センサの構造

荷重の大きさとその中心を計測可能なロボット用，接触・触覚センサとしては，対向する電極を有した面状抵抗体により，感圧導電性ゴムを挟み込んだ構造のもの[1]や，歪みゲージ式６軸力覚センサと感圧センサを併用したカバーセンサ[2]などがあげられ，いずれも微細なセンサを分布させることなく，広い面積内に加えられた力の中心位置と大きさを効率的に検出することが可能である．本研究でも，ほぼ同様な機能の実現を目的とした．

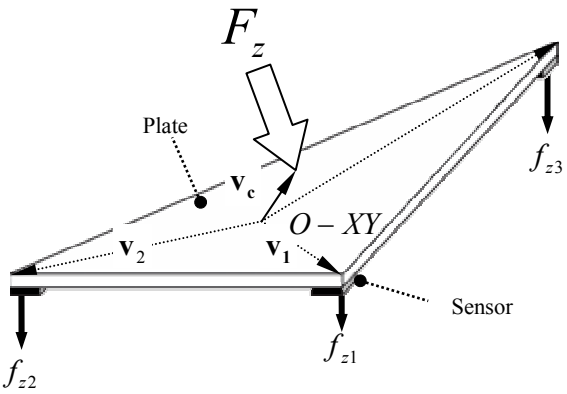


図１　接触センサの構造

試作した接触センサの構造を図１に示す．三角形のプレートの頂点は力センサにより点支持されており，プレート上の任意の場所に鉛直方向から加えられた力F_zとその荷重中心位置$\mathbf{v_c}$はプレート支持点における力の合計および釣り合いから求めることができる．

$$F_z = f_{z1} + f_{z2} + f_{z3} \qquad \cdots(1)$$

$$\mathbf{v_c} = \frac{f_{z1}\mathbf{v_1} + f_{z2}\mathbf{v_2} + f_{z3}\mathbf{v_3}}{F_z} \qquad \cdots(2)$$

（f_{z1},f_{z2},f_{z3}：力センサで検出される力．$\mathbf{v_1},\mathbf{v_2},\mathbf{v_3}$：原点から各力センサ支持点へのベクトル）

このような構造の特徴としては，接触する物体の形状による感度低下が少ないこと，プレートにある程度の剛性が必要なため３次元的な形状を完全に被覆するような用途には適さないことがあげられる．したがって，ロボットへの実装においては，外骨格など限定された部位への利用が想定される．

図２に試作した接触センサの寸法を示す．プレートには，厚さ2[mm]，一辺100[mm]の正三角形のアクリル板を使用した．力センサにおいては，その検出精度や再現性が荷重中心の計算に影響を及ぼすため，高精度なものを利用することが望ましいが，ロボットへの実装の容易さから市販の感圧導電性ゴムを使用した．感圧導電性ゴムはアクリル板の頂点付近に取り付け，その重心位置に座標系の原点を設けた.図中の破線で示した三角形(以下，アクティブエリア）は感圧導電性ゴムの受圧部の中心を結んだ三角形であり，式（２）より荷重中心位置を計算可能な領域を表している．また，アクティブエリアの面積が最大となるように感圧導電性ゴムを取り付けた結果，アクティブエリアはプレートと重心位置を同じくする相似な三角形を原点周りに1.7[deg]程度回転させたかたちになっている．

図３に使用した感圧導電性ゴムの特性例を示す．感圧導電性ゴムの電気抵抗は，絶縁状態から数十Ω程度まで変化し，ヒステリシスおよびクリープがあることが知られている[3]．また，荷重とコンダクタンスの間には比例的な関係が得られることが知られている．感圧導電性ゴムのコンダクタンスは，抵抗との直列回路から得られる分圧をバッファ回路およびAD変換器を介してPCに取り込み，PC内で計算から求めた．図からわかるように本研究で使用した感圧導電性ゴムにおいても顕著なヒステリシスが認められる．一方，加圧力の増加期のみに注目すると，最大加圧力（加圧から除圧に切り替わる瞬間の力）が変化しても再現性のある特性が得られており，大まかな力の計測に利用できるものと考えられる．ただし，安定した特性を得るためには予圧を加えるなどの慣らし操作が必要であった．また，使用した感圧導電性ゴムの最小検出荷重は0.4[N]程度であった．

３．接触センサの特性

３．１　荷重の定量

接触センサの重心位置に任意の荷重を加えたときの特性例を図４に示す．実験は，前述の慣らし操作を行わない状態で，手動ステージに取り付けたロードセルにより荷重を加えることにより行った．また，感圧導電性ゴムにはあらかじめ加圧力増加時の荷重とコンダクタンスの関係を測定し，最小二乗法により３次の近似式を求めたものを使用した．高次の近似式とした理由は，微少荷重領域および高荷重領域においては，荷重とコンダクタンスとの間に比例関係が得られなかったためである．図中の破線はロードセルから得られた荷重であり，実線は感圧導電性ゴムのコンダクタンスから求めた荷重の合計を表している．(A)の領域において，接触センサから得られた荷重が小さい理由は，慣らし操作を行っていないためと考えられる．(B)の領域においては，ロードセルと接触センサから得られた荷重の最大値はほぼ一致しているものの，除圧時の荷重変化にはずれがあり，感圧導電性ゴムのヒステリシスの影響によるものと考えられる．また，(C)の領域においては完全に除圧しない状態で，加圧，減圧を繰り返すことにより加圧の度に荷重のずれが増大しており，履歴が累積していると予測される．なお，試作した接触センサの重心位置における最小検出荷重は1[N]程度であった．

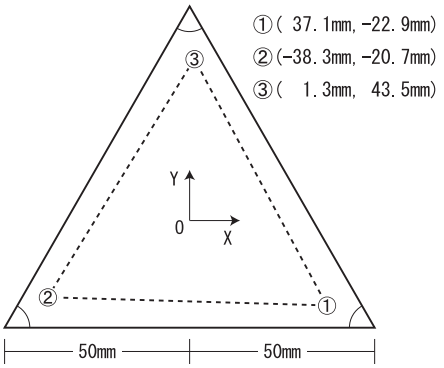


図２　接触センサの寸法

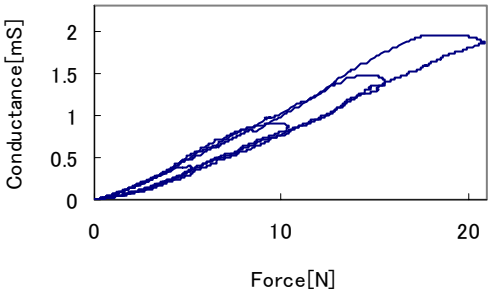


図３　感圧導電性ゴムの特性

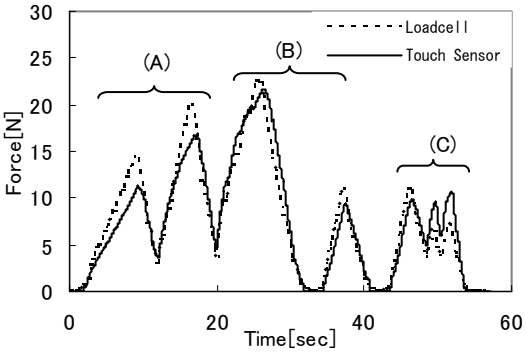


図４　荷重の測定例

これらから，試作した接触センサにおいては，荷重の増加，減少といった定性的変化は捉えられるものの，定量の用途への利用は難しいものと考えられ，荷重の定量に利用するためには，より高精度な力センサを利用する必要がある．

３．２　荷重中心計測

アクティブエリア内の１１箇所に鉛直方向から約10[N]の点荷重を加えたときの荷重中心の計算結果を図５に示す．荷重はX,Y軸に沿って原点から10[mm]間隔で加え，各座標について５回の測定を行った．また，荷重は１秒間加え，20[Hz]でサンプリングした結果の平均を１回の測定とした．実験は感圧導電性ゴムに予圧を加えた後行った．真値と計算結果はほぼ一致しており，全測定点における真値とのずれ（座標間の距離）は，平均2.4[mm]であった．

プレートに加わる荷重を連続的に変化させたときの荷重中心軌跡を図６に示す．実験は紙を貼り付けたプレート上に，「あ」という文字を鉛筆で書くことにより行った．また，接触検出の閾値は，筆圧を加味し2[N]に設定した．写真は実際に接触センサ上に書いた文字である．なお，加えられた最大荷重（筆圧）は10[N]程度であった．同図からわかるように，実際の筆跡と類似した荷重中心軌跡が得られているが，静荷重時の荷重中心計測結果と比べて推定位置の誤差が大きいと推測される．この理由としては，これまで述べてきた感圧導電性ゴムの特性（ヒステリシス，クリープ，力の変動に伴う履歴の蓄積）や近似の精度に加え，鉛筆と紙面との摩擦力など鉛直方向以外の力成分が影響していると考えられる．

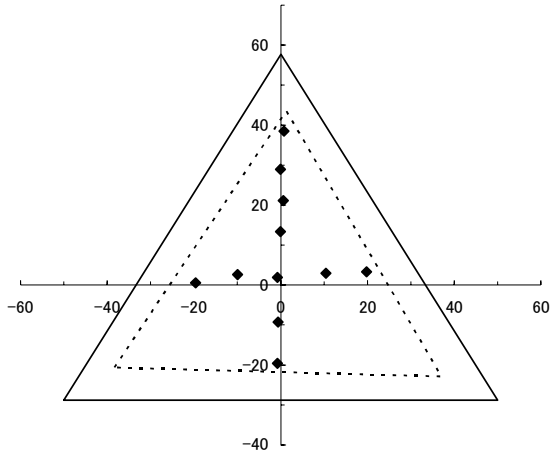
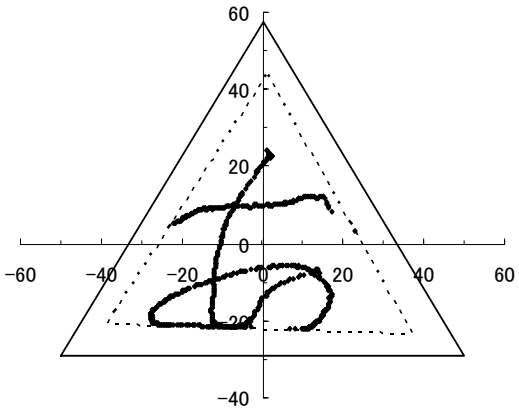


図５　静荷重中心計測



(a)　計算による軌跡

(b) 実際の軌跡

図６　荷重中心軌跡

４．まとめ

人とロボットが共存するための要素技術の一つとして，衝突や接触時の力の大きさと荷重中心位置を検知可能な接触センサの試作を行った．試作した接触センサは，簡単な測定回路で構成することができ，約1[N]の荷重により接触を検出可能であった．接触力の定量および荷重中心の計測においては精度および再現性の面で問題が認められたが，力の増加，減少のような定性的な変化，大まかな荷重中心位置の特定といった用途への利用が期待できる．

文　献

[1] 石川，下条，“面圧力データの検出方法”，特開昭58-17330

[2] 岩田，星野，森田，菅野，“人間共存ロボットのための全身触覚インタフェース”，日本ロボット学会誌,Vol20,No.5,pp543-549,2002.

[3] “感圧導電性ゴムの紹介と応用” http://www.scn-net.ne.jp/~eagle/psecrsyoukai.html

ITとVRに基づく次世代設計環境に関する研究

棚橋　英樹　　山田　俊郎　　藤井　勝敏　　浅井　博次
横山　哲也　　岩田　靖三　　飯田　佳弘

Research on the Neo-Generation Design Environment based on Information and Virtual Reality Technology

Hideki TANAHASHI　Toshio YAMADA　Katsutoshi FUJII　Hirotsugu ASAI
Tetsuya YOKOYAMA　Seizo IWATA　Yoshihiro IIDA

あらまし　COSMOS等の没入型ディスプレイの実物大表示やモデルを実感できるなどの特徴を生かして「感性を重視する製品デザイン設計」や「人間工学的な製品機能評価」を同時にリアルな仮想環境で行うことが可能な次世代の設計環境の構築を図るため，平成15年度から，(1)低価格没入型ディスプレイ構築技術，(2) 市販CADとの連携によるオンライン形状設計技術，(3) 没入型環境における力覚インタフェース技術，(4) 仮想人体モデルを用いた製品使用環境シミュレーション技術の研究を行っている．本稿では，これらの研究の概要と今年度の研究成果概要について述べる．

キーワード　VR，没入型ディスプレイ，オンライン形状設計，力覚インタフェース，仮想人体モデル

１．はじめに

パソコン（PC）上で動作可能な３次元CADシステムの低価格化，高機能化に伴い，設計製造分野では設計の3次元化が急速に進み，製品の設計段階から3次元モデルの作成が行われている．しかしながら，これら3次元モデルは，主にデータ交換やNCデータ等の生成に利用されているのみであり，十分にモデルが生かされているとは言えない．近年，これらのモデルを用いて部品間の干渉など，実際の製品を作成する前に問題点や性能をシミュレーションすることで実際の試作を減らすバーチャルモックアップ技術が注目されているが，多くはパソコン等の画面上でモデルやシミュレーション結果を2次元的に表示するものであり，スクリーンなどの物理的な問題から実物大表示（1/1表示）を行うことは困難である．また，製品の使い勝手など人の感覚的要素にかかわる評価を行うには不十分である．

没入型ディスプレイシステムは，モデルを3次元的に実物大の大きさで表示することが可能であり，大きさを実感しながら製品設計や評価を行うことが可能である．既に，欧米や国内の大手航空機メーカや自動車メーカ等で実際に用いられており，研究段階から実利用可能な段階になりつつある．我々はこれまで没入型6面ディスプレィ（COSMOS）を開発[1]し，この産業応用を図るため，3次元CADデータをCOSMOSに表示できるシステムを開発[2, 3]してきた．しかしながら，企業から持ち込まれるCADデータを表示するためには，個々にデータ変換・調整が必要であり，COSMOS上に表示された実物大仮想モデルを用いた評価結果を即座にモデルに反映することは困難であった．

我々は平成15年度から，設計における3次元モデルの高度利用を図り，COSMOS等の没入型ディスプレイの実物大表示やモデルを実感できるなどの特徴を生かして「感性を重視する製品デザイン設計」や「人間工学的な製品機能評価」を同時にリアルな仮想環境で行うことが可能な次世代の設計環境（図1）の構築を目的として，以下の4つの要素技術を中心に研究開発を進めている．

(1) 低価格没入型ディスプレイ構築技術
(2) 市販CADとの連携による形状設計技術
(3) 没入型環境における力覚インタフェース技術
(4) 仮想人体モデルを用いた製品使用環境シミュレーション技術

本稿では，これら4つの要素技術について行った研究のの概要について述べる．個々の詳細については，文献を参照して頂きたい．

２．次世代設計環境

２．１　低価格没入型ディスプレイ構築技術

これまで我々は，没入型6面ディスプレィ（COSMOS）や傾斜型3面没入型ディスプレイ[4,5]の開発を行ってきた．これらは，視点位置に連動して，リアルタイムに立体映

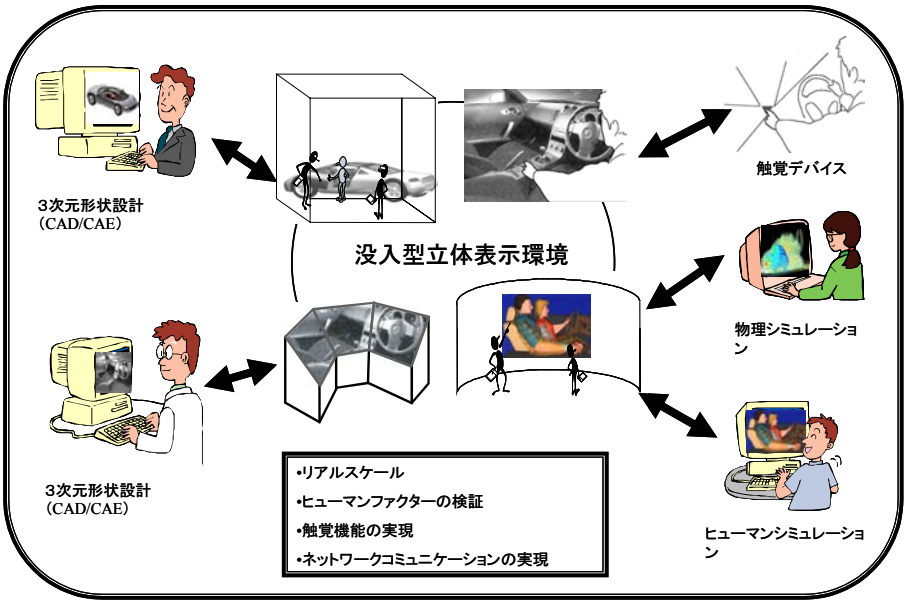


図1　次世代設計環境の目標イメージ

像を生成する必要性から，大型のグラフィックスワークステーション（SGI製：Monster）を用いる必要があった．しかしながら，近年のPCの低価格化，高性能化に伴い，複数台のPCからなるPCクラスタを構成することでリアルタイムの立体映像生成が可能になってきた．そのため，PCクラスタを構築してリアルタイム立体生成を実現して没入型ディスプレイの低価格化を図る．複数のPCを用いて複数のスクリーンで構成される没入型ディスプレイの立体映像を生成するためには，以下の3つの項目について検討する必要がある．

(1)　データの同期

　複数のPC間で同じモデルや視点情報を共有する必要がある．

(2)　スクリーン描画更新の同期

　同じタイミングで複数のスクリーン映像を更新する必要がある．

(3)　ステレオ映像における映像信号の同期

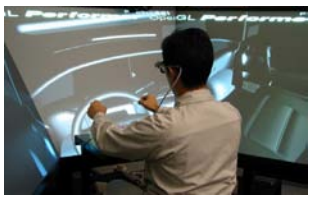
　COSMOS等，液晶シャッタメガネなどシャッタ方式の立体視システムにおいては，右目用と左目用の映像信号を同期する必要がある．

　今年度は，偏光立体視方式である傾斜3面ディスプレイを用いて，高速ネットワークを用いた複数PC間のモデルデータ同期機構を開発した[6]．

　また，メガネなどの特殊な装置をつけることなく，裸眼で立体視可能なディスプレイも開発されており，こうした裸眼立体視ディスプレイを搭載したノート型PCも市販され始めている．これを用いることで，どこでも立体感のある表示が可能となる．そのため，こうした立体視可能なノートPCからCOSMOSまでが同じモデルで3次元的に表示，確認ができる環境の構築も図る．

　今年度は，これまで我々が開発した没入型プログラム

a)COSMOSにおける表示例



b)傾斜3面ディスプレイにおける表示例

c)ノートPCにおける表示例

図2　異なる環境下での立体視

開発環境[7]を裸眼立体視ディスプレイ型ノートPC（SHARP製：PC-RD1-3D）に移植して，同一のプログラムで，COSMOS，傾斜3面ディスプレイ，ノートPCまでの全ての環境において立体視可能とした（図2）．

２．２　市販CADとの連携による形状設計技術

　現在使われている3次元CADシステムは，マウスやキ

ーボードなどを用いて,正確な3次元形状の入力ができるが,2次元ディスプレイ上で3次元モデルを表示するため,モデルを回転させることなどにより,3次元形状の入力や形状確認をする必要がある．また，実際に出来上がる製品の大きさや製品の使い勝手などの評価を行うことは困難である．一方，没入型ディスプレイ環境は，3次元モデルを実寸大で3次元的に確認できるため,製品の使い勝手などの評価を行うことが可能である．また，直接3次元空間を用いて3次元形状を入力できるなど直感的な形状入力が可能である[8]．しかしながら，正確な3次元形状の入力や形状修正などを行うためのインタフェースが無いなどの問題があった．そのため，詳細かつ正確な設計用市販3次元CADシステムと，リアリティのある表示が得意な没入型ディスプレイシステムとを，高速なネットワークを用いて繋ぐことにより,それぞれメリットを活かし,協調して形状を設計可能な環境を実現する.具体的には,没入型ディスプレイ環境の設計者と3次元CADシステムで作業している設計者とがネットワークを介してシームレスに３次元モデルや視点及びカーソル情報を共有することにより，コミュニケーションを図りながら協調して設計する環境を実現する．

今年度，以下の2つの方式について検討した．

(1) 市販の3次元CADを用いて，形状ファイルを介してオンラインでCOSMOSに表示

(2) リアルタイムに形状及び視点，カーソル情報までをCAD－COSMOS間で双方向に共有して，双方で形状作成や修正

(1)の方法は，形状を設計するためのインタフェースは,市販の3次元CAD（本実験では, Shadeを使用）を用いて,CAD上で形状作成を行い，ファイルに保存することで,ユーザは意識することなく，オンラインでCOSMOSに表示可能な方法である．普段使い慣れているCADを用いることで, 形状作成・修正を行うことが可能である．また,COSMOSに実物大で立体表示されたモデルを，COSMOS内にいるユーザが問題点，修正個所を音声等で指示することで，CADのユーザが修正して形状設計を行うことができる．

(2)の方法は，ファイルを介することなくCADとCOSMOS間でモデルをリアルタイムに共有し，CADのユーザだけでなく，COSMOS内のユーザも直接モデル形状の作成，修正が可能で，その結果はCADとCOSMOSの双方にすぐに反映することが可能である．また，COSMOS内の3次元仮想空間上で直接入力した3次元手書き形状[9]もCADと共有することで，正確なモデル生成も可能である．そのため，デザイナー等がCOSMOS内で直感的なモデル作成を行うことができる．CADのユーザとCOSMOS内のユーザは，音声等に加えて，互いのカーソル位置情報及び視点情報を用いて問題点，修正箇所の指示等を行え，協調設計作業効率の向上を図ることが可能となる．現状はプロトタイプシステムのため，円柱やスィープ形状等，作成できる形状は簡単なものに限られるが，特定の用途に限れば十分に活用が可能である[10].

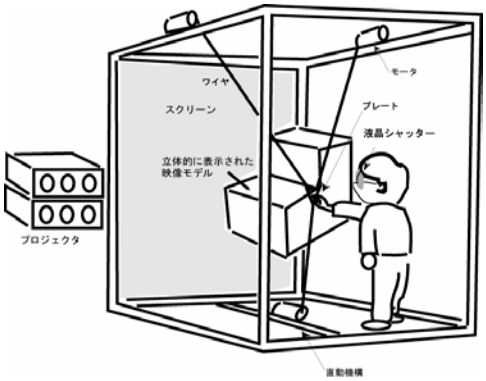


図3　力覚提示装置

２．３　没入型環境における力覚インタフェース技術

没入型環境内に実物大で表示された３次元モデルを用いて，家の室内，航空機のコックピット等におけるリーチング評価（手が操作部に届くか等）など人間工学的な評価（操作性等）可能なシステムの構築を目指し，没入型環境でユーザの指先もしくは掌に反力がフィードバック可能な力覚装置の実現を目指している．COSMOS等の没入型環境で使用する力覚提示装置の条件として，装置が映像を遮らないことがある．我々はこれまで，東京大学で開発された装着型力覚提示装置HapticGEAR[11]を用いてCOSMOS内での力覚の利用を検討した[12,13]．本装置は，ユーザがワイヤの巻き取り機構を有する装置を背中に背負い，ワイヤの張力で制御されるペンを持つことで力覚を提示するものである．ユーザはCOSMOS内を自由に動き回りながらモデルをペンで触ることで力覚を感じることが可能であるが，得られる力覚はペンを通した１点であり，また装置の装着の煩わしさがあった.そのため,本研究では,映像を遮らない構成の非装着非把持型力覚提示装置を開発し、映像と同期して力覚を提示するインタフェースを実現する．これにより，指先が3Dモデルに触れる，モデルの外形に沿って指先を動かすことが可能となり,製品の3Dモデルで機能検討が可能なデジタルモックアップツールを実現できる．

今年度は，1枚の透明プレート，それを保持する3本のワイヤ，ワイヤを巻き取るモータ，モータを直動させる直動機構，及び直動機構を保持するフレームによって構成される．ユーザの指先位置をセンシングすることで,指先がモデルに触れたときにその位置にプレートがあるようにワイヤ及び直動機構を制御することで、モデルの表面に触った感覚を提示する力覚装置を考案し，その基本設計を行った（図3）.

２．４　仮想人体モデルを用いた製品使用環境シミュレーション技術

自動車，住居設備，福祉製品（移動・移乗補助具，ベッド、福祉車両）等のように人間が日常生活の中で使用することを想定した製品の設計あるいは購入を検討する場合，人間の活動や身体動作特性に十分配慮する必要が

ある．これまでこうした検討には平均的な体格を想定した規格に則って行われてきた．この検討を，各個人の体格や身体機能を考慮した仮想化した人間モデルで行うことで，試作品の製作・改修に関わる時間とコストを削減し，製品開発を行うことが可能となる．そのため本研究では，肉体的構造と物理運動学に則った仮想人体モデルをコンピュータ内に構築し，ユーザの骨格や物理特性模擬による人間工学的評価のシミュレーションを行うことにより、製品を実際に使用したときの評価を行うシステムの開発[14]を目指している．

今年度は，動作シミュレーションができる仮想環境構築に向けた仮想人間モデルや拘束条件の構築法について検討した．設計対象製品として介護支援用装置を想定し，用途を動作シミュレーションに限定することで，人体モデルとして親子関係のない剛体リンクモデルを用い，リアルタイム処理が可能な程度に簡略化した．そして，その仮想人体モデルを構築および操作できるソフトウェアを試作し，従来のCGシステムにおける同様な操作との使用感の違いについて検討した[15]．

３．まとめ

本稿では，平成15年度よりスタートした“ITとVRに基づく次世代設計環境に関する研究”の概要と今年度の研究成果概要について述べた．本研究は，COSMOS等の没入型ディスプレイの実物大表示やモデルを実感できるなどの特徴を生かして「感性を重視する製品デザイン設計」や「人間工学的な製品機能評価」を同時にリアルな仮想環境で行うことが可能な次世代の設計環境の構築を図ることを目的として，(1)低価格没入型ディスプレイ構築技術，(2)市販CADとの連携による形状設計技術，(3)没入型環境における力覚インターフェイス技術，(4)仮想人体モデルを用いた製品使用環境シミュレーション技術の4つの要素技術を中心に研究を進めている．

COSMOS等の没入型ディスプレイを始めとするVR技術は，黎明期を終え，今後益々その利用が盛んになると考えられる．特に製品開発分野においては，VR技術を用いることにより3次元CAD／CAE等の3次元設計／解析データをベースに，あたかもそこに開発品が存在するかのように検証や評価ができるため，試作にかかる時間やコストを低減し，製品のリードタイム短縮に大きな効果を発揮するものと期待される．

本研究で得られた成果は，岐阜県生産情報技術研究所主催のCOSMOS研究会を中心に各種研究会，学会等で随時発表をしていく予定であり，皆様からのご意見・ご指導を頂けると幸いである．

文　献

[1] Toshio YAMADA,et al., ”Development of Full Immersive Display: COSMOS”, Proc.VSMM98, pp.522-527, 1998.

[2] 浅野良直ほか，“バーチャルモックアップによる製品評価システムの開発”，岐阜県生産情報技術研究所研究報告第3号，pp.29-32, 2002.

[3] 浅野良直ほか，“バーチャルモックアップを利用した製品評価システムの開発（第2報）”，岐阜県生産情報技術研究所研究報告第4号，pp.47-50，2003.

[4] Toshio Yamada, ,et al., “Desk-size Immersive Workplace Using Force Feedback Grid Interface”, Proc. of IEEE-VR2002 pp.135-142, 2002.

[5] 山田俊郎ほか，“触力覚提示装置のための傾斜3面ディスプレィの開発”，日本バーチャルリアリティ学会第5回大会論文集，pp.287-290,2000.

[6] 山田俊郎，棚橋英樹，“PCクラスタを用いた多画面同期描画システムの開発～ITとVRに基づく次世代設計環境に関する研究～” ，岐阜県生産情報技術研究所研究報告第5号，pp.62-64,2004.

[7] 藤井勝敏ほか，“VR技術を利用した設計支援システムの開発”，岐阜県生産情報技術研究所研究報告第1号，pp.11-16,1999.

[8] 浅井博次，“没入型ディスプレイシステムのためのユーザインタフェースに関する研究”，岐阜県生産情報技術研究所研究報告第4号，pp.61-64,2003.

[9] 藤井勝敏ほか，“没入型6面ディスプレイCOSMOSにおける手書き入力インタフェースの提案”，ヒューマンインタフェースシンポジウム2001，pp.145-146，2001.

[10] 藤井勝敏，棚橋英樹，“PC用CADと没入型CADの共同設計システム～ITとVRに基づく次世代設計環境に関する研究～”，岐阜県生産情報技術研究所研究報告第5号，pp.58-61,2004.

[11] 筧直之ほか，“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

[12] 浅野良直ほか，“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”，岐阜県生産情報技術研究所研究報告第2号，pp.5-10,2000.

[13] 浅野良直ほか，“没入型6面ディスプレイにおける力覚デバイスを利用したモデリングシステムの開発”，日本バーチャルリアリティ学会第6回大会論文集，pp.7-8,2001.

[14] 藤井勝敏，“福祉機器設計のためのVRシミュレーション提示技術に関する研究”，岐阜県生産情報技術研究所研究報告第4号，pp.57-60,2003.

[15] 藤井勝敏，“仮想人間モデルを用いた製品シミュレーションに関する研究～ITとVRに基づく次世代設計環境に関する研究～”，岐阜県生産情報技術研究所研究報告第5号，pp.65-68,2004.

PC用CADと没入型CADの共同設計システム
－ITとVRに基づく次世代設計環境の研究－

藤井　勝敏　　棚橋　英樹

Concurrent Design System along linked PC-CAD to COSMOS-CAD
~ Research on the Neo-Generation Design Environment based on Information and Virtual Reality Technology ~

Katsutoshi FUJII　　Hideki TANAHASHI

あらまし　PC上で動作するCADシステムと，没入型ディスプレイCOSMOSで動作するCADシステムを開発し，双方をネットワークで常時接続して作業空間を共有するデザイン支援システムを開発した．それぞれのCADシステムは，装置の形態およびユーザの作業性に配慮して，それぞれの特徴を引き出した機能を実装している．例えばCOSMOSで３次元空間に直接スケッチ画を記述し，PC側でそれを参考に幾何学的形状を定義するといった利用形態のように，同時分散的に作業を行うことができるようなコミュニケーション手段を提供することによって，互いに不足する機能を補完しあうことができた．

キーワード　CAD，COSMOS，共同設計

１．はじめに

没入型ディスプレイCOSMOS[1]は，視野の全領域を立体映像で囲むことができるとともに，ユーザが装置内で自由かつ自然に視点移動できることから，VR技術により生成される仮想空間を体験する際には最適な提示装置である．そこで当研究所では設立当初からCOSMOSを製造業の高度化に供するために，特にここ数年にかけて情報技術(IT)の導入によって効率化が進められてきた機械，自動車，建築分野等への応用に向けた技術開発を進めてきた[2~4]．これらの研究結果は，研究会，見学会など折に触れて業界関係者に公開してきたが，異口同音に，COSMOSの中でCADのように変更作業を行いたいとの指摘を受けてきた．

そこで本研究は，COSMOSの中で直接設計作業ができる機能をはじめ，ネットワーク協調機能やシミュレーション機能などのITとVRに基づく次世代設計環境を開発し，このような要求に答えることを目的としている．初年度である本年度は，この次世代設計環境のコンセプトモデルとなるデモシステムを最初に開発し，その評価を受けることで，今後の方向性と実用的なシステムに求められる要求仕様を明確にする試みを行った．本報告ではこのデモシステムの概要と機能およびその利用イメージについて述べる．

２．ITVRデモシステム

図１に，本研究で開発したITVRデモシステムの構成を示す．本システムは，Windowsがインストールされた一般的なPC上で使用する専用CADシステム(以下PC)と，高性能なGWSで制御される没入型ディスプレイ(以下COSMOS)で使用する専用ビュアシステムの間を，構内ネットワーク(LAN)により接続することにより構成した．

PCの画面には，任意数の仮想物体を配置することによって構成した仮想空間が、三面図および透視図により提示されており，付属のマウスおよびキーボードを操作することにより，仮想空間内に物体を追加することや，物体の配置や形状を操作・編集することができる．

一方で，COSMOSには同様の内容の仮想空間が実物大で立体的に提示されており，専用眼鏡を掛けてCOSMOS内を見て回ることで，あたかもユーザ自身が仮想空間内に入り込んだかのような感覚を得ながら評価することができる．またCOSMOSのユーザは，手に持つことで３次元的な位置の指示と、指先操作で方向と複数のボタン入力が可能なコントローラを持ち，視点の移動やPC側のCADと同様なモデリング作業を行うことができる．

上述のように，双方のシステムはLANにより常時接続された状態にあり，一方の仮想空間に変化があった場合には，他方を自動的に同じ状態に更新し，仮想空間の同一性を維持している．また，同じネットワークを利用し

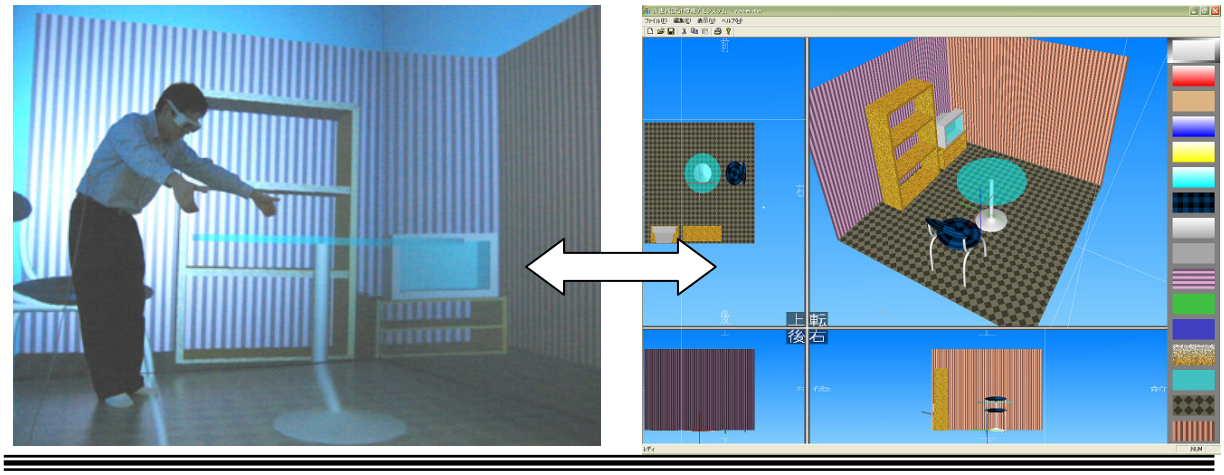


図1 ITVRデモシステム

表1 デモシステムの基本形状

種類	基本形状名
線	長方形 円 ベジェ曲線(直線を含む)
面	長方形面 円板
立体	直方体(立方体を含む) 楕円球(真球を含む)

表2 基本形状の内部表現

サイズ	名称	用途
short	ID	内部の識別番号
char	name	基本形状名コード
char	color	カラーパレット番号
short	com	組み合わせ先のID
short	group	所属グループID
float	v[14]	位置，大きさ情報

て，PCおよびCOSMOSのユーザの作業状態や視点などの情報を相互に交換し共有している．

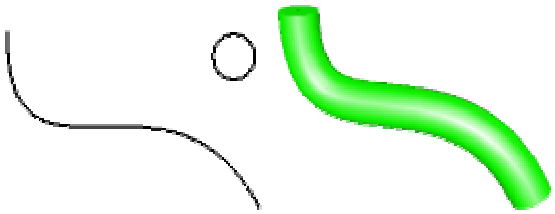
２．１ 作業空間の構成

本報告における作業空間とは、任意数の仮想物体を配置した仮想空間のことであり、それぞれの仮想物体の形状および配置が設計作業の対象となる．一般的なCADシステムにおいては，複数の基本形状を組み合わせて製品形状を表現するため，本システムにおいても，入力やその後の編集が容易で製品形状の表現に有効と考えられる基本形状を数種類導入している(表１)．いずれの基本形状も，位置や大きさ等を規定する値と，色やその他諸属性パラメータにより内部表現されている(表２)．

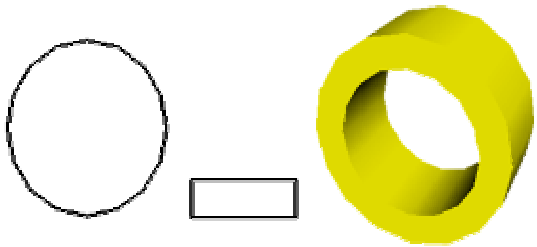
本システムによる設計作業手順は，これらの基本形状を追加，編集することが中心となる．これは，PCでもCOSMOSでもできるが，特にPC側では数値入力をキーボードから直接行うことで精密な指示が可能である．

一部の基本形状は単体で用いるだけでなく，他の形状を参照させて複雑な物体を合成することもできる(図2)．例えばベジェ曲線に円を組み合わせることにより，円で与えられた半径を持ち，ベジェ曲線に沿ったチューブ状の形状が定義される．こうすることにより，先の例ではチューブの位置を変えたければベジェ曲線を編集し，太さを変えたければ円を編集することになるため，複雑な形状であっても更新するパラメータを限定することができ，編集操作を簡便にする効果に加え，本システムのようにネットワークで時々刻々と同期をとるシステムにおいては重要なポイントでもある．

また，一般的なCADにも導入されている基本形状のグループ化や親子関係の設定なども備えており，編集作業の効率化を図っている．



(a)ベジェ曲線に円でチューブを定義



(b)円に長方形でパイプを定義

図2 組み合わせ形状例

２．２　参考形状

本システムでは，作業空間構築に用いる基本形状に加えて，協調設計作業におけるコミュニケーションを補助する目的で，設計の参考となる形状を表示できる．これは，PC側とCOSMOS側とでは入力の方法が全く異なるが，いずれかの側で入力した内容は随時相手側にも反映される仕組みになっている．

まずCOSMOS側の入力方法は，ユーザが特定のボタンを押しながらコントローラを持った手を動かすと，その軌跡に３次元的な線画が残される．これをスケッチ入力と呼び，大雑把な形状や位置，大きさなどを直感的に表現したい場合に利用できる(図3).

PC側の場合は，メニュー操作によって市販のCADシステム等で作成されたDXFファイルの形状データを作業空間内に読み込むことができる(図4)．これにより，既製品や部品データベースの形状に合わせて対象製品を設計するような使い方が可能になる．

この参考形状は，本システムにおいては現在のところ設計操作の対象ではなく，単に仮想空間中に見えているだけで，移動や部分的な編集などは一切しないようにしている．これは，スケッチ入力データも，本システムで扱えるDXFデータも，莫大な数の頂点群で表現されているためで，例えば個々の頂点を選択して編集するのはユーザインタフェースの設計上適切ではなく，あるいはまとまった数の頂点を同時に編集するのは，高度なCAD機能とユーザインタフェースを必要とするからである．従って，PCおよびCOSMOS側で入力された参考形状は一括消去もしくは追記のみ可能にしている．なお，PC側においては，COSMOSで入力されたスケッチ入力はファイルに保存することができ，後で参考形状として読み込むことや，他のCADシステム利用の際の参考にするなどの応用が考えられる．

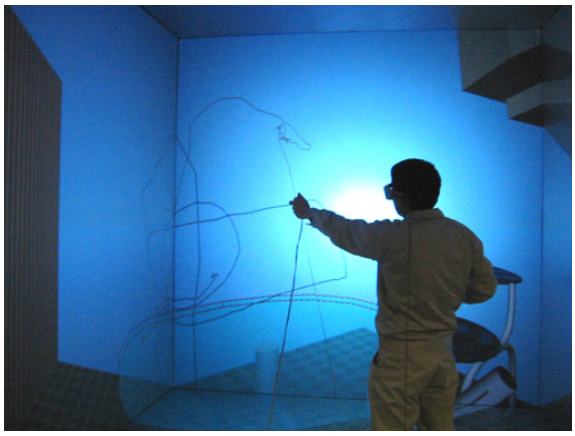


図3 スケッチ入力

図4 DXF(シート形状)の読み込み

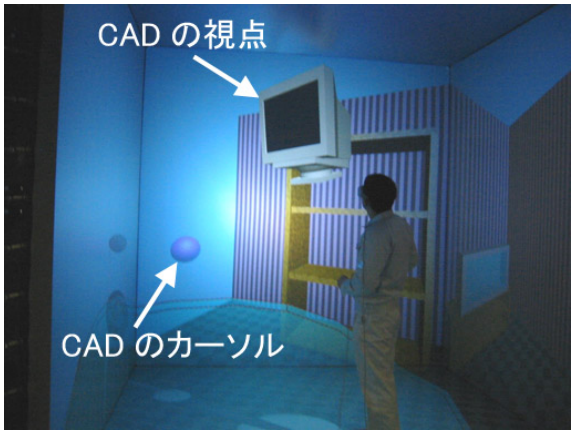


図5 COSMOS側でのCADユーザ情報表示

表3 ユーザ情報

サイズ	名称	用途
float	headX/Y/Z	視点(頭)の位置
float	headH/P/R	視点(頭)の方向
float	handX/Y/Z	カーソル(手)の位置
int	focus	注目している形状番号
float	ext[]	作成メニュー状態変数

２．３　ユーザ情報の交換

本システムの最後の特徴は，図5に示すように，相手側のユーザの視点や作業状態が，自分側の作業空間内にリアルタイムに表示されていることである．これは，表3に示すユーザ情報をそれぞれのシステムが収集し，ネットワークを経由して相手のシステムと共有し，表示することによって実現している．これにより，相手のユーザがどこに注目しているか，また何の作業をしているかを互いに知ることができる．

この機能は，本システムと音声通話(電話)回線を併用して利用すると有効に活用できる．例えば，COSMOSのユーザが指差しして「ここ」と言えることや，PC側で直線的に正確に操作する様子をCOSMOSユーザが見て「もう少し小さく」などのように，見たまま，感じたままの表現を使ってコミュニケーションが取れるからである．従って音声通話は，在来設備が利用できる一般的な通信基盤であり，本システムとは別系統ではあるが，必要不可欠な要素であると言える．

３．利用例

本デモシステムは，特定の製品に特化しない，あらゆる製品設計における様々なシーンを想定しており，本章ではいくつかの利用例を紹介する．

３．１　３次元スケッチの清書

COSMOSの中では空中に自由にスケッチを描くことができる．本システムを利用すれば，デザイナーが直感的にスケッチを描く一方で，PCのオペレータがスケッチに沿って部材を作成し，配置することが同時にできる．もしデザイナーのイメージと異なる部材配置が行われた場合，いずれの側からでも即座に修正できる．この利用形態ではCOSMOS内のデザイナーは煩雑な操作をする必要がなく，ただ直感的にラフスケッチをすればよいため，複雑なCADの操作を覚える必要がない．

３．２　配置シミュレーション

予めPCからDXFファイルにより部屋や機械の骨組みなど固定形状を与えておく．COSMOSユーザは家具や，部品と見なした適当な部材を作成し，実物大で体験しながら位置決め調整を行う．多数の部材の繰り返し配置などの煩雑な操作や，正確な寸法の部材作成はPC側のユーザに依頼することで，全体として効率的に作業ができる．

３．３　コミュニケーションツール

COSMOSユーザが何を見，どこに手を伸ばしているかは，PC側で常に観測することができる．既製の，あるいはほぼ完成した製品をユーザに提示し，試用させることで，ユーザの要求や問題点を見出せる可能性がある．またPC側ですぐに修正することができるため，その場で問題点を解決することもできる．

４．考察とまとめ

COSMOSは，提示された仮想空間の中にユーザが入り，その場所から主観的に見ることによって直感性が得られる装置である．一方のPCは，限定された大きさの画面に作業空間を表示し，ユーザの操作により視点を移動するめ，全体を見渡す客観的な視点で作業することができる．従って両者には本質的に得意，不得意が存在し，長所も短所も存在する．本デモシステムは，これまでの研究の中から見えてきたCOSMOSの長所を生かしつつ，ネットワーク技術を導入することによって短所を補うことができることを示すことも目的の一つとして開発した．

そのために，本デモシステム開発の重点はユーザインタフェース技術およびネットワーク利用技術であったため，一般的に使用されているCADシステムが重要視している形状演算部(CADカーネル)については，本デモシステムの基本形状群だけでは実用に耐え得る水準を満足していない．しかしCADカーネルは，単体で供給されている製品の導入を検討することができるほか，過去に建築用に特化したCADを研究した事例[3]もあり，特定用途に限れば独自に開発することも難しくはない．

本デモシステムの今後は，本研究テーマが目指すシミュレーション技術，データベース技術との連携技術研究を進めながら，具体的なニーズに応じて一般的なCADソフトをベースにした実装を図る予定である．

文　献

[1] Toshio YAMADA,et al., ”Development of Full Immersive Display: COSMOS”, VSMM98 予稿集，pp.522-527, 1998.

[2] 浅野，藤井，” 多面ディスプレイの高度利用に関する研究”， 生産研 研究報告, pp.1-6, 1999.

[3] 藤井他，”VR技術を利用した設計支援システムの開発(I)～(III)”，生産研 研究報告, 1999～2001.

[4] 浅野他，”バーチャルモックアップによる製品評価システムの開発(I)～(II)”， 生産研 研究報告, 2001～2002.

PCクラスタを用いた多画面同期描画システムの開発

－ITとVRに基づく次世代設計環境の研究－

山田　俊郎　　棚橋　英樹

Development of Synchronized Multi-Screen Rendering by using PC Cluster

Toshio YAMADA　Hideki TANAHASHI

あらまし　製造分野での3次元CADの利用が一般的になり，そのデータを用いてCOSMOSに代表される没入型の立体映像ディスプレイで立体的に形状確認を行う，試作レス設計が期待されている．しかし，COSMOSのような大規模な設備を事業所に展開することは困難であるため，CADデータの形状確認に特化した小型の高臨場感立体ディスプレイの開発が求められていた．我々は過去に傾斜型の3面立体視ディスプレイを提案し，今回その描画システムをPCクラスタに置き換える技術開発を行った．PCクラスタでは複数のPCで1つの連続した映像を生成するため，データの同期が重要な技術要素となる．本技術開発では，ギガビット・イーサネットを用いてPC間を接続し，UNIXの共有メモリに似たネットワーク共有メモリライブラリ(NETSHM)を開発し，同期描画の基本ライブラリを作成した．これによって，COSMOS上で動作していたソフトウェアに最小限の修正を加えるだけで，同じアプリケーションをPCクラスタの上で動作させることが可能となった．

キーワード　没入型ディスプレイ，3次元設計，PCクラスタ，ネットワーク，データ同期

１．はじめに

製造分野において，3次元CADを用いた設計作業が一般的になり，従来の平面的な三面図に代わって，立体形状を持ったデータの利用が盛んになっている．このようなデータは直接製造機械にかけることが出来るだけでなく，プロトタイプの試作においても光造形等で利用できるため，試作から製造までの作業の効率化に寄与している．一方，立体映像の表示技術も高度化が進み，COSMOSに代表される臨場感の高い表示が可能になっている[1,2]．COSMOSは全面を囲みこむ究極のディスプレイであり，その映像表現力は非常に高い．これによって，3次CADのデータを臨場感の高い立体映像で評価することが可能となるため，試作レス設計での利用が期待されている[3]．

しかし，COSMOSの利用には，”COSMOSは立ち姿勢での利用を前提としており，長時間の作業には向かない”，”映像生成にワークステーションを用いており，PCとは使い勝手が異なる”，という問題点が指摘されていた．前者に対し我々は，設計作業を想定して，着座姿勢で利用可能な傾斜型3面立体ディスプレイを提案してきた[4,5]．このディスプレイによって，臨場感はCOSMOSに劣るものの，通常のモニタよりも広視野の立体映像を着座姿勢で見ることが可能になり，長時間の使用にも耐えうるシステムが実現できた．しかし，このシステムはCOSMOSのワークステーションを用いて映像を生成しているため，COSMOSとのソフトウェア互換性は高いものの依然2点目の問題点が残されていた．そこで，高性能化が進んでいるPCを複数台用いたPCクラスタによって，傾斜型3面立体ディスプレイの映像を生成する技術を開発した．開発にあたっては，COSMOSのソフトウェア資産が活かせることを考慮し，最小限のソースコードの修正で対応が出来るよう，COSMOSのOSに似たLinux OSの上にライブラリを構築した．

２．　システム構成

傾斜型の3面立体視ディスプレイは，図1～3に示すように3面のスクリーンがユーザを取り囲むように配置したものであり，各面には偏光フィルタを利用した立体映像が提示される．作業姿勢としてデスクトップ作業を想定しているため，各面には傾斜をつけ，下方の視界が広くなっており，傾斜をつけたスクリーンで連続した表示を

図 1　傾斜型3面立体視ディスプレイ

行うために，各スクリーンは台形になっている．ユーザの足元に置かれた3対のプロジェクタから投射された映像は，ミラーで反射してスクリーン上に投影される．

コンピュータシステムは，図4に示すように6台の描画用PCと1台のマスタPCで構成され，これらは高速なギガビット・イーサネットで結ばれている．描画用PCはそれぞれ1台のプロジェクタに繋がっており，各スクリーンの右目用，左目用の映像を生成する．プロジェクタのレンズの前には偏光フィルタが取り付けられ，ユーザが偏光フィルタのついたメガネをかけることでスクリーン上に立体映像を観察することが出来る．COSMOSと同様の入力デバイスも用意されており，ユーザの視点位置を計測するための磁気式センサ，インタラクションを行うためのコントローラはマスタPCに接続されている．

PCクラスタによる多画面映像の生成では，異なったPCで連続した一つの映像を作り上げるため，PC間の同期が重要なポイントとなる．同期のレベルには，ソフトウェア的なものからハードウェア的なものの順に，①データの同期，②描画更新の同期，③映像信号の同期，のレベルがあるが，今回の開発で実現する同期は①のみとした．

①の同期は連続画像生成のためには必須の同期であり，これが実現されないとそれぞれのPCがまったく繋がらない映像を表示することになってしまう．しかし，②の同期が取れていなくても，最大で1更新フレーム以内のずれであり，致命的な映像の乱れに繋がることはない．また，③の同期は液晶シャッタメガネを用いた時分割立体視方式では必須の同期であるが，偏光式立体視では問題にならない．

本システムでは，ギガビット・イーサネット上でデータ共有を行うネットワーク共有メモリライブラリ(NETSHM)を開発して，①のデータ同期を実現した．

３．ネットワーク共有メモリ(NETSHM)

一般にPCクラスタのデータ同期にはMessage Passing Interface(MPI)が用いられているが，これは数値シミュレーション等の大型計算を高速に行うために開発されたものであり，データ同期の信頼性は高いもののオーバーヘッドも大きく，VRのような高速性を要求されるアプリケーションには向いていない．また，APIも固有のものであるため，既存のワークステーション上で動作させていたアプリケーションの移植が容易ではない．本開発では，既存のアプリケーションのコード変更を極力なくすため，UNIXの共有メモリ機能に似たAPIを実装した．また，ネットワーク通信にはUTPプロトコルを用い，ブロードキャストと合わせて高速性を追求した．UTPではパケットの到達が保障されないためPC間のデータ同期を保障することは出来ないが，VRアプリケーションは随時データの更新が行われるため，元になるデータの計算をマスタPCで行い，描画に関する情報だけを随時描画用PCに送ることでたとえパケットの廃棄があったとしても次のデータ更新でリカバリーが可能であり，影響が後に残ることはない．

ソフトウェアの構成は，図5に示すようにLinux

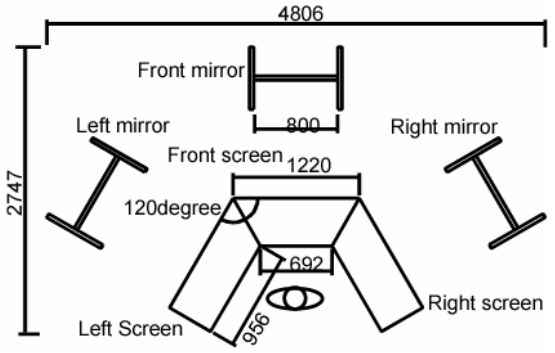


図 2　スクリーン配置　（平面図）

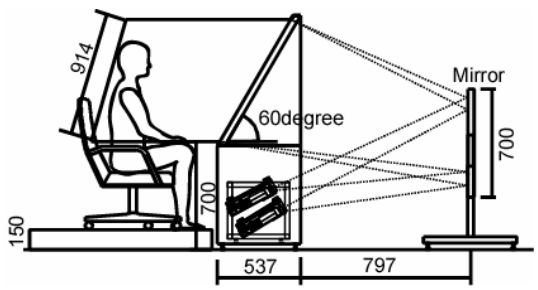


図 3　スクリーン配置　（側面図）

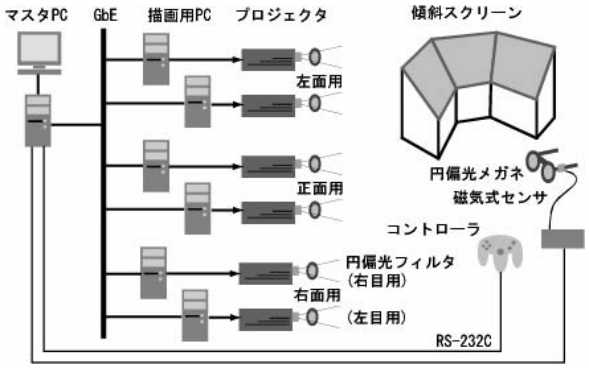


図 4　システム構成

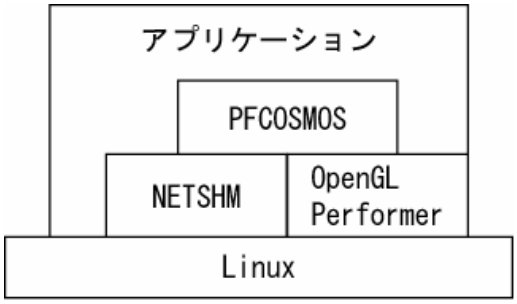


図 5　ソフトウェア構成

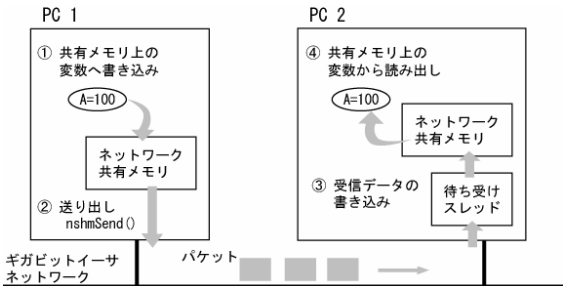


図 6　ネットワーク共有メモリの構成

OS(RedHat 9)の上に描画ライブラリのOpenGL Performer(Silicon Graphics社からダウンロード)をインストールしてベース環境とした．この上にネットワーク共有メモリライブラリと多画面描画ライブラリPFCOSMOSを実装し，アプリケーションに対して多画面同期描画環境を提供している．これによって，COSMOSのワークステーションと同様のプログラミング環境を実現した．

ネットワーク共有メモリは,図6に示す仕組みになっており，UNIXの共有メモリと同様にライブラリの初期化関数で確保されたメモリ領域は通常の変数と同様に読み書きが可能である．唯一の違としては，書き込み後に送り出しの関数を呼び出すことであり，送り出し関数が呼び出されると，指定された領域のメモリ内容が適切なサイズのパケットに分けてネットワーク上に送り出される．受け側のPCでは初期化関数によって作られた待ち受けスレッドが自動的にパケットを取り込み，メモリ上の所定の位置に受け取ったデータを書き込む．そのため，受け側のアプリケーションは何ら特別な処理を行うことなく，ネットワークで更新されたデータへのアクセスが可能になる．この機能は一方通行ではなく，双方で書き換えが可能であり，さらに2台のPC間のみでなく，ブロードキャストを用いることで複数のPCのメモリ内容を1回の操作で同時に書き換えることも可能である．

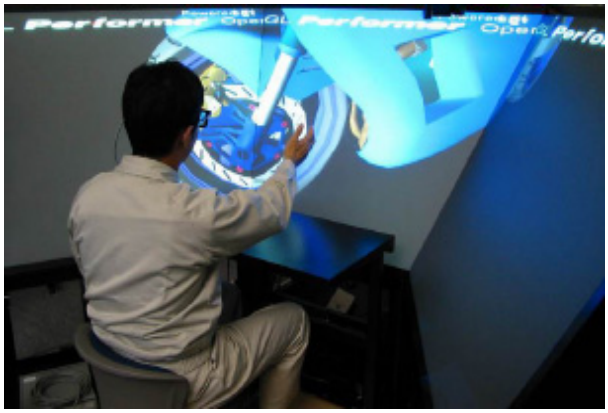


図 7　オートバイモデルの表示例

４．まとめ

本開発では，一般的なオフィスに展開が可能なデスクトップタイプの傾斜型3面立体視ディスプレイのグラフィック描画をPCクラスタで実現する技術を開発した．このシステムによって,図7に示すようにな臨場感の高い連続した立体映像を安価なPCで表示することが可能となった．

今後は，本システムの上に立体空間の操作を行うインタフェースを実装し，立体映像を見ながらCADデータの操作が行える環境の開発を目指す．また，COSMOSディスプレイの映像生成にPCクラスタを用いることも検討している．

文　献

[1] Toshio YAMADA,et al., “Development of Full Immersive Display: COSMOS”, Proc.VSMM98, pp.522-527, 1998.

[2] 山田俊郎ほか，“完全没入型6面ディスプレイCOSMOSの開発と空間ナビゲーションにおける効果”，日本バーチャルリアリティ学会論文誌 Vol.4 No.3, pp.531-538, 1999

[3] F Zorriassatine, et al., “A Survey of Virtual Prototyping Techniques for Mechanical Product Development”, Proc. Instn Mech. Engrs Vol.217 Part B, pp.513-530, 2003

[4] 山田俊郎ほか，“触力覚提示装置のための傾斜3面ディスプレイの開発”，日本バーチャルリアリティ学会第5回大会論文集，pp.287-290,2000.

[5] Toshio Yamada, et al., “Desk-size Immersive Workplace Using Force Feedback Grid Interface”, Proc. of IEEE-VR2002 pp.135-142, 2002.

仮想人間モデルを用いた製品シミュレーションに関する研究
－ITとVRに基づく次世代設計環境の研究－

藤井　勝敏

Research on Virtual Human Modeling for Products Simulation
~ Research on the Neo-Generation Design Environment based on Information and Virtual Reality Technology ~

Katsutoshi FUJII

あらまし　製品開発や評価を支援することを目的に，コンピュータ上で仮想的な人間のモデルを構築する技術に注目し，動作シミュレーションができる仮想環境構築に向けた仮想人間モデルや拘束条件の構築法について検討した．今回導入した仮想人間モデルは親子関係のない剛体リンクモデルとし、設計対象製品として介護支援用装置を想定した動作シミュレーションに用途を限定することで，リアルタイム処理が可能な程度に簡略化した．そして，その仮想人体モデルを構築および操作できるソフトウェアを試作し，従来のCGシステムにおける同様な操作との使用感の違いについて検討した．

キーワード　仮想人間モデル, 設計支援, バーチャルリアリティ(VR)

１．はじめに

工業製品の設計段階において, VR技術を使って製品を評価することは，一般的に，試作レスとすることによるコストメリットが期待できる。そこで本研究所では，没入型6面VRディスプレイCOSMOSを用いてデジタルモックアップ技術に関する研究を行ってきた[1]．しかし，福祉介護機器のような製品分野を対象にする場合，外観だけではなく人が使う状況での評価が必要になる．これを人が実際に使用して評価する方法では，評価に先立って試作品を作る必要があり，コスト面，安全面，開発サイクルの面でメリットを十分に享受することができなかった．

そこで本研究では, この製品分野に対してもVR技術を導入することによって，より競争力の高い製品を短期間に低コストで開発するための，次世代の設計環境の構築を目指す．そのために，従来のデジタルモックアップ技術をベースにして設計された仮想的な試作品を，仮想的な人間モデルに試用させるという発想に基づき，計算機シミュレーションの実現と可視化を中心とした技術開発を推し進めている．

本年度は，昨年度の研究[2]に引き続き仮想人間モデルの構築方法と拘束条件についての検討と実装を行い，振り付け操作方法に関して考察した．次章以降でそれらの内容について述べる．

２．仮想人間モデル

本章では，本研究の基盤技術となる仮想人間モデルの構築について述べる. 仮想人間モデルとは, 人間の構造，挙動，性質等をパラメータとアルゴリズムによって記述し，計算機上で挙動のシミュレーションが行えるようにしたものである．

そのような仮想のモデルを構築するためには、現実の人間の形体、機能、行動などの特性を計測、観測することが必要で、工業分野に限らず様々な分野で研究が進められている。特に、直接人間に関わる医学の分野では先進的であると言えるが、医療機器による計測は、極めて高い精度が追求された結果、高価で取り扱いが専門的になっており，また被測定者の肉体的負担が増すことがある。本研究のねらいは、VRによる試作レスによって低コストの設計環境を構築することであるため，できる限り簡単に導入でき、容易に取り扱いができるような単純かしたモデルを構築する方向で検討する．

２．１　介護支援時の身体動作

そこで設計対象として，患者(要介護者)の起立や車椅子等への移乗を介助する機械装置(ロボット)を想定する．このような介助は，現在は介助者が行っており肉体への負担が懸念される作業の一つであり，機械による補助が望まれている。その一方で患者の安全面への配慮や機械の信頼性の低さなどから，当分の間は製品化が難しいと予想される設計対象である．

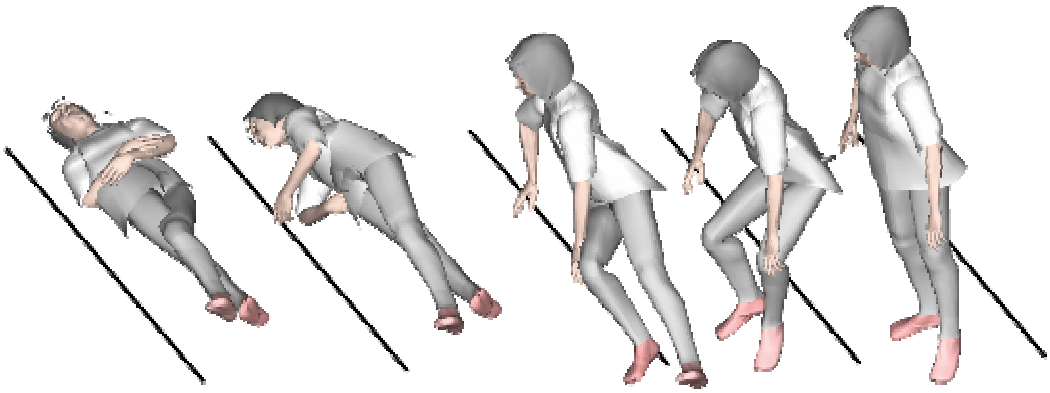


図1 ベッドからの起立動作

まず，一般的なベッドからの起立介助時の動作について検討する(図1)[3]．基本的にはベッド上に仰向けに寝ている患者の，患側(麻痺している側)の手足を健側(力が入る側)に掛け，半身横向きに寝かせる．次に両足をベッドから外に垂らし腰を軸にして肩を持ち上げて上半身を起こす．最後に患者の腰部をベッドの外に引き出しつつ介助者が上体を起こすことで起立が完了する．この手順では，患者の体重はベッドから床に預けられ，梃子(てこ)や振り子の原理を巧みに用いるため，障害の程度や体格にもよるが，介助者，患者ともに大きな負担をかけずに安全に起立を介助するような工夫が指導されている．

このことを踏まえて次に，この手順をVR技術によってシミュレーションすることを考える．患者のモデルは，四肢を重ね，梃子を使う必要があることから，単純な体重相当分の分布モデルでは不十分であるが，指の一本一本や顔の目鼻立ちまでを正確にモデル化する必要はない．従って，今回の仮想人間モデルは，頭部，四肢および胴体等の部位に分かれており，物理的な諸法則に従うモデルを考えることにする．

２．２　剛体リンクモデル

本年度は仮想人間モデルの基本構造として，人間を頭，胴体，腕，大腿，脛，足等のブロックに分解して剛体モデルとしたものを，関節により結合させる拘束条件を追加した，剛体リンクモデルを導入した(図２)．この形式のモデルは，既製のCGシステムやモーションキャプチャシステムなどでも一般的に採用されている実績があり，通常想定される人体の挙動(歩行，ダンス等)を記述する上で，曲がるべき関節は曲がるけれども分離することなく制御できるなど，理にかなった利点がある．

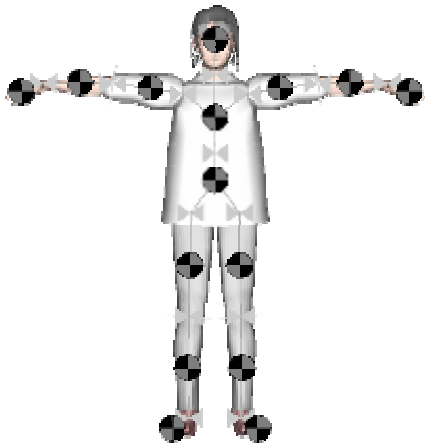


図2 剛体リンクモデル

表１　仮想人間モデルの主要データ構造

剛体ブロック(PARTS)		
	Vector	標準姿勢での重心位置 S_B
	Vector	運動中の重心位置 P_B
	Quart.	運動中の回転 Q_B
	Solid	干渉判定用のソリッド形状群

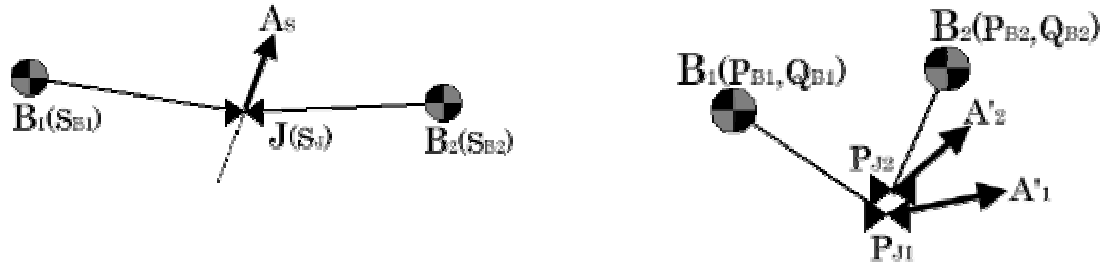
関節(JOINT)		
	PARTS*	参照する剛体ブロック(２個)
	Vector	標準姿勢での回転中心位置 S_J
	Vector	標準姿勢での回転軸 A_S
	float	回転角度制限 θ_{min}, θ_{max}

仮想人間モデル(HUMAN)		
	PARTS[]	剛体ブロック集合
	JOINT[]	関節集合
	Shape	3D形状データ

一般的なCGソフトでは腰をルート(原点ノード)にし，下半身，上半身を樹木の枝のように階層構造で定義することが多く，前報でもその方式を採用していた．しかし介護の場面では，動作の支点を腰以外にも肩や肘，膝など変えながら回転させることが多いため，ルートを自由に変更できるようにするか，もしくは特定ノードを特別扱いしない方が，計算処理や管理上都合が良いと考えられる．そこで今年度の仮想人体モデルでは，階層構造を持たない剛体ブロック集合と，その任意の２個の組み合わせの相対位置関係を拘束する関節群で構築した．今年度の人体モデルの構成を，表1に示す．

２．３　関節モデル

次に，剛体の間をつなぐ関節モデルについて検討する．前述の剛体リンクモデルを構築するには，基本的に関節



(a)標準姿勢　　(b)動作中

図3 関節の拘束条件

ごとに２つの剛体を参照し，それぞれの剛体における特定の点の位置が常に一致するように拘束する必要がある．また，肘や膝の関節に見られるように，関節の参照する二つの剛体間の位置関係がほぼ一定の回転軸周りに限定される場合や，さらに一定角度以上には屈伸しない場合の拘束条件について，次のようにモデル化する．

まず，図２のように，不自然な分離や歪みが全くないことが保証されている剛体の配置状態を「標準姿勢」とする．この姿勢における，ある関節Jと，Jに関する２つの剛体B_1, B_2について考える(図3-a)．J, B_1, B_2の標準姿勢における位置ベクトルをS_J, S_{B1}, S_{B2}とする．また肘のように蝶番状の動作をさせるなら関節Jの回転軸ベクトルA_Sを定義する．姿勢が変化し，剛体が運動した結果，B_1, B_2の位置ベクトルおよび回転クォータニオンが(P_{B1},Q_{B1}), (P_{B2},Q_{B2})となった時，剛体B_1から見た関節の位置P_{J1}と回転軸ベクトルA'_1は，

$$P_{J1}=Q_1(S_J-S_1)+P_{B1} \qquad \cdots\cdots(1)$$

$$A'_1=Q_1A_S \qquad \cdots\cdots(2)$$

で，剛体B_2からの位置P_{J2}と回転軸A'_2も同様にして計算する．今，関節で剛体が分離しない拘束条件からP_{J1}とP_{J2}が一致することが必要条件として導かれ，一定の回転軸周りの移動に限定される場合はA'_1とA'_2が一致することが必要条件になる(図3-b).

次に，一定の角度以上に屈伸しない拘束条件を定義するために，現在の関節角度歪みクォータニオンΔQ_Jと回転角度θ_Jを次式で定義する．

$$\Delta Q_J=Q_2Q_1^{-1} \qquad \cdots\cdots(3)$$

$$\theta_J=\begin{cases}+2\cos^{-1}W_J\left(A\bullet V_J\geq 0\right)\\ -2\cos^{-1}W_J\left(A\bullet V_J<0\right)\end{cases} \qquad \cdots\cdots(4)$$

但し，W_JはΔQ_Jの実数成分，V_JはΔQ_Jの虚数部ベクトル，A'は一致させたA'_1とA'_2もしくは回転軸を設定しない場合はゼロベクトルとする．回転角度θ_Jは，剛体が標準姿勢の時にゼロで，関節が曲がるにつれて絶対値が大きくなるため，ゼロをまたぐ適切な範囲で制限することによって拘束条件が定義できる．

３．仮想人間モデラ

前章で定義した仮想人間モデルを実際にコンピュータ上に構築するために，仮想人間モデラを開発した．このプログラムはMicrosoft®Windowsの動作するPC上で実行し，主にマウスを使用して必要なモデリング操作を行う．主要な作業手順は，

(1) 素体(標準姿勢で作成した３次元人体形状)モデルを読み込む
(2) 適当な位置に剛体ブロックの重心を配置する
(3) 適当な位置に関節を配置し剛体２つと関連付ける
(4) 剛体ごとに体積のある交差判定用形状を配置する
(5) 必要なら関節に回転軸を設定する
(6) 関節ごとに可動範囲を設定する

となっている(図４).

(1)における素体データは，CGソフトなどで流通に利用されるOBJ形式やRIB形式などが利用できる．本稿の素体データは，文献[4]より引用した．(2),(3)の骨格データは素体データにあわせてGUIで微調整する他に，人体寸法データベース[5]を参考に数値入力することや，モーションキャプチャシステムで利用されているBVH形式からの読み込みができる．(4)の交差判定形状は，剛体ブロック間の干渉を回避するための判定に用いるソリッド形状である．素体形状が閉じた多面体等で定義されていれば，それを直接利用することも考えられる．しかしこのモデラでは，リアルタイム性確保のためには厳密さを損なってでも交差干渉計算を省力化したいため，球や円柱などの基本形状の組み合わせで大まかな人体の体積を設定するようにしている．

現在のところ，作成した仮想人体モデルを操作して図3あるいは図1のような一連の振り付けを設定することができる．その際，関節の可動範囲が適切に設定できていれば不自然な姿勢をとることがなく，また関節がどの程度屈曲しているかをスライダーによって定量的に観測することができる．

また図５の様に，任意の剛体から別の剛体に辿る関節の経路が一意に定まれば，目標位置に末端が届くように途中の剛体の位置・回転を計算する逆運動学のアルゴリズム(CCD法[6])が適用できるため，一般的なCGシステムと同等な操作感が得られる．一方で，任意の関節を曲げ

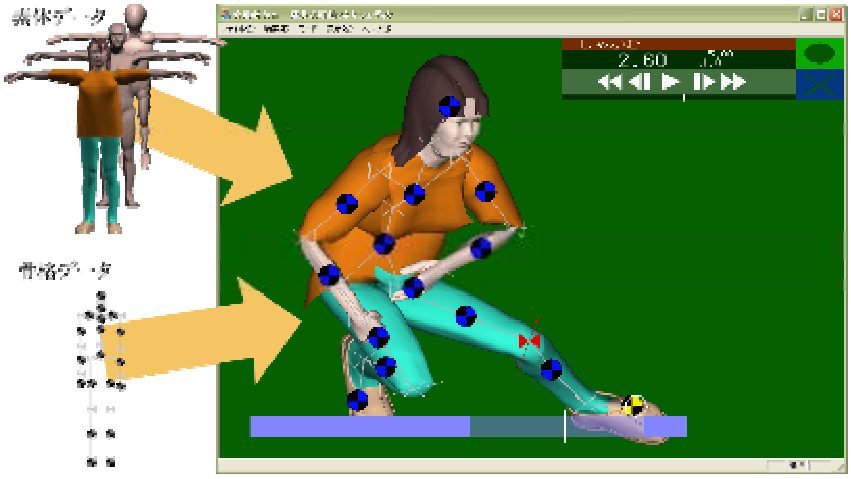


図4 仮想人間モデラ

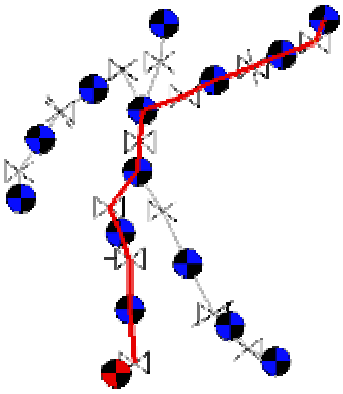
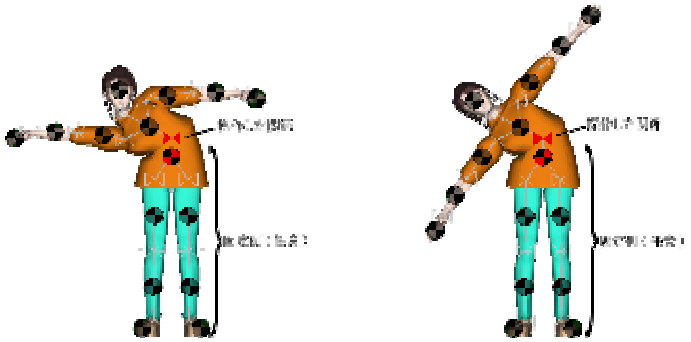


図5 CCD法の遡上経路



(a)親子関係なし　　(b)親子関係あり

図6 関節の回転操作の影響範囲

たときの影響は, 関節を越えるにつれて収束する(図６-a). 親子関係がある場合は親の移動は末端まで影響を受けるため，この点においては若干操作感が異なる (図６-b). しかし，これらの違いは内部計算で吸収できるため，目的に応じて使いやすい操作方法に切り替えられるようにしている.

４．まとめと今後の予定

VR環境で製品を仮想的に設計するデジタルモックアップの応用の一つとして，人間が介在する福祉介護支援機器の製品設計および評価を支援するための仮想人体モデルについて検討した結果、親子関係のない剛体リンクモデルを採用することにし，関節の拘束条件と屈伸角度の評価式を導いた．その仮想人間モデルを容易に構築するためのモデラを試作し，モデリングの方法やモデルの操作感について, CGソフトで一般的な親子関係方式と比較した.

現在のところ，マウス操作で振り付けができ，関節ごとに屈曲の程度を観測できるところまで実装できているが，今後の課題(および目標)として，

- 重量，慣性モーメント，ばね定数等の物理的性質に基づく挙動計算（負荷評価や事故検証）
- 設計対象製品と仮想人体モデルの間の相互作用シミュレーション（介護支援機器や装具類の仮想的な試用・試着）
- 能動的な機械・人体のモデル化とシミュレーション（移動補助・リハビリ支援ロボットの設計支援）

を実現し，最終的に，介護支援用製品の設計から試用実験までを仮想空間内で一貫して行える次世代設計環境を実現する予定である.

文　献

[1] 浅野良直ほか，“バーチャルモックアップによる製品評価システムの開発”，岐阜研生産情報技術研究所研究報告第３号，pp.29-32, 2002.

[2] 藤井勝敏，“福祉機器設計のためのVRシミュレーション提示技術に関する研究”，岐阜研生産情報技術研究所研究報告第４号，pp.57-60,2003.

[3] “在宅介護の基礎と実践②体を動かす介助”，サクセスエンタープライズ，2001.

[4] エクスツールス，“人の森”，Shade実用3Dデータ集

[5] 河内まき子ほか，“日本人人体寸法データベース1997-1998”，工業技術院くらしとJISセンター，2000.

[6] 久保田裕一郎，”Enter the 3D Programming 第10回”, C MAGAZINE 2001.7, pp.110-115, 2001

ネットワークを介したエンジニアリングデータベースシステムの実証実験について（第2報）

杉山　茂樹　　飯田　佳弘

Result Spread of Network Engineering Database(II)

Shigeki SUGIYAMA　Yoshihiro IIDA

当研究所では，過去５年間に渡り分散型データベースシステムの開発を行ってきた[1~4]．これにより，任意にコンピュータ・ネットワーク上に分散されたデータ間のデータ交換が基本的に可能となった．この成果をもとに，岐阜県工業会の三間氏を会長とする情報技術研究会で技術移転とシステム評価も兼ねた実証実験をレシップ株式会社の協力の下，実施する運びとなった．　従来どおり，このシステムの通信機能としては，国で開発されたWeb PortをJAVAベースのHORBを使用し[5]，基本データベースシステムとしては，オブジェクト指向データベースのPSE　Pro(3)を活用している[6~9]．実証実験においては，協力していただいたレシップ株式会社側の要望により，後述するように，本社と工場間でのデータ交換を工場から本社にアクセスをすることにより実施するシステム構成とした．

１．現状の課題について

実証実験に先立ち，今年度の始めにレシップ株式会社から，システム利用性能を向上させる為の下記の六つの課題が提出された．

①各種アプリケーションが編集作業で利用できること．
②システムの起動時に必要な操作が間違いなくできること．
③データベースアクセス時のシステム稼動状況を把握できること．
④データの編集中には，相手側からのアクセスに対して相互にアップデートが実行されないこと．
⑤エラーが生じた時には，その状況が把握できること．
⑥システム安定性の向上を更に図ること．

これらの課題等を解決する事により，実証実験を試みた．

２．課題解決について

①各種アプリケーションソフトが編集作業で利用できること．

基本的な動作として，このシステムのデータアクセスはハードデスクに対して直接的に行われるため，二地点間のデータの遣り取りは可能な状況にある．問題は，データ編集に用いる各種エディタの利用を可能にする事である．データ編集時に各種データにアクセスするには，決められたフォルダに対して.xmlファイル上にアクセスパスを記述する必要があるため，この作業を確認・実施し下記のアプリケーションソフトを利用できるようにした．

1) Microsoft	WORD	;doc
2) Microsoft	Internet Exporer	;html
3) Microsoft	PhotoEditor	;jpg
4) Adobe	Acrobat	;pdf
5) Microsoft	EXCEL	;xls
6) Autodesk	VoloView Express	;dwf, dwg, idw, ipt
7) AshSoft	WinPack32	;lzh

②システムの起動時に必要な操作が間違いなくできること．

システム全体を稼動する為に７つのバッチファイルによるソフトが稼動している．この中には立ち上がりまでの時間がシステムの状況により左右されるものがある．したがって，現状では立ち上がり時間が確実に予測できないものについては，立ち上がりを確認して次のソフトの稼動を行うようにしている．しかし，利用者によっては立ち上がりまでの待ち時間に関係のない誤入力動作をしてシステム全体が立ち上がらない場合も生じている．したがって，コンピュータ画面に現在のシステムの立ち上がり状況を表示するとともに，下記の図１のそれぞれに示すように，必要な場合は「いかなる入力作業もしないで待つ事」を利用者に更に促す表示をするようにした．

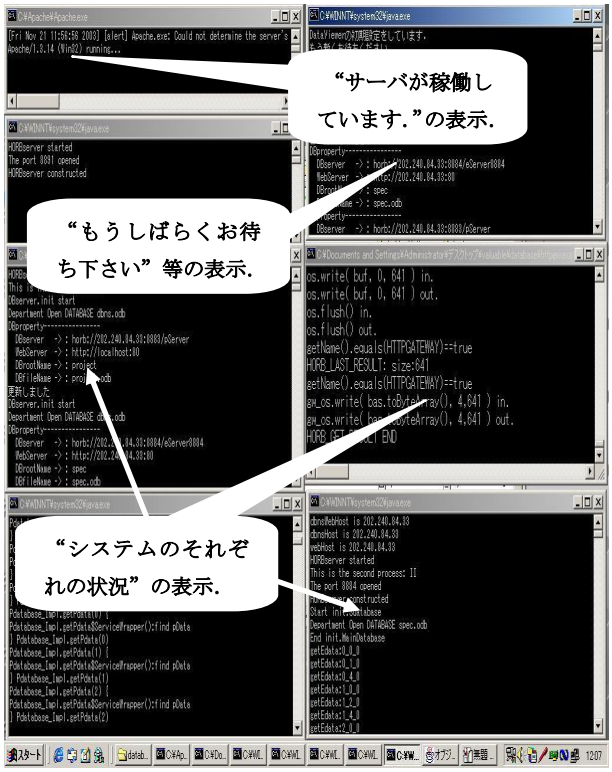


図１　システム立ち上がり状況の表示

③データベースアクセス時のシステム稼動状況を把握できること.

下記に示す主な三点において改良を加え稼動状況を把握できるようにした.

1)システムのアクセス状況の全体が解ること.

コンピュータ画面上に新たなウインドーをオープンし，そこに

・開始時間，経過時間

・アップデート中のプロジェクト名とその開始時刻・終了時刻

・上記についての更なる詳細情報等

についての表示をし，アップデート処理全体の稼動状況が下記の図２のように解るようにした.

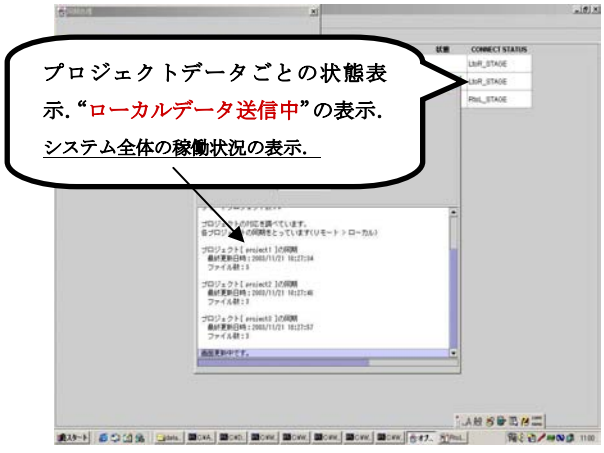


図２　システム稼働状況の表示

2)アクセス状況の部分ごと（プロジェクトごと）の処理状況が解ること.

プロジェクトごとに，下記の四つの処理段階のどれが進行中なのかを確認できるようにした.

・処理のスタート　　：Start_STAGE

・本社から工場へのアップデート：RtoL_STAGE

・工場から本社へのアップデート：LtoR_STAGE

・処理の終了　　：OK_STAGE

3)全体の処理時間の経過が解ること.

・棒グラフでの経過時間の全体表示

④データの編集中には相手側からのアクセスに対してアップデートが実行されないこと.

編集中のデータでアップデートされることを望まないものは，下記のファイルに変更できるようにし，これにより下記の処理を可能とした.

1)"NO"

各プロジェクトにおいて，このファイル名より右に表示されているデータは，アップデートされない.

2)"HtoL"

このファイルのみが，アップデートされない.

⑤エラーが生じた時には，その状況を把握できること.

これについては，通常，どのシステムでも実施される「システム・ログを取る」方法を取った.これにより，エラー状況把握の後追いができる要素を付加した.

⑥システム安定性の向上を更に図ること.

下記の二項目について変更をし，システム安定性の向上を図った.

1)シリアライザの変更

JAVAのシリアライザの方が今回のシステムには安定性の面で愛称が良いことが判明し，そちらを利用することとした.

2)転送量の変更

転送用のクラスであるPdataクラスのオブジェクト転送においてExceptionエラーが多発していることが検証された.よって今回の修正ではストリームメソッドの入出力時のサイズ指定を１０２４バイトにして転送の向上を図った.更なる改善のためには，エラーの多発がTCP/IPソケットと関係付けられたストリームオブジェクトとのインターフェース部分で発生していると判断されるため，この部分の調整が必要と思われる.

３．実証実験について

1)想定される使用場面

本社で，開発・設計・営業・品質管理がなされ，工場で試作・製造・品質管理がなされ，営業所・支店で販

売･サービスがなされる状況での利用を想定している．特に工場と本社間では，製品の試作・製造において情報のやり取りが頻繁に発生する状況となっている．さらに，物理的な距離も海外と日本のように離れている状況である．

2)実験環境

想定される使用場面に類似した下記の図３に示すような実験環境を用意した．

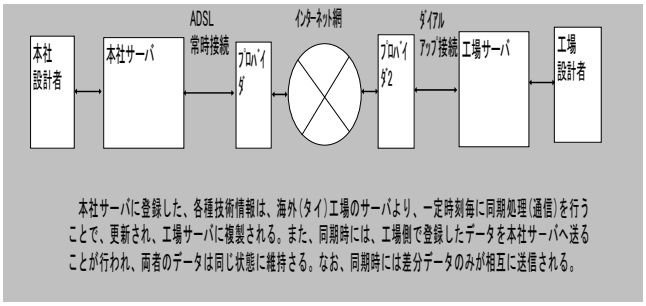


図３　実験システム

本社からADSLを介してプロバイダーのNIFTYに接続し，ダイアルアップ回線を介し模擬工場のPCに接続できるようにした．ダイアルアップの使用は海外での利用環境と一致するものである．

3)実験状況

本社サーバに登録した各技術情報（設計図，生産品，各種フロー等）を，工場のサーバより一定時刻毎にアップデートを行うこととした．

4)アップデートのタイミング

工場側のサーバを利用時に毎回起動し，アップデートは工場側のみから行い，本社のサーバは常時接続の状態で稼動させている．

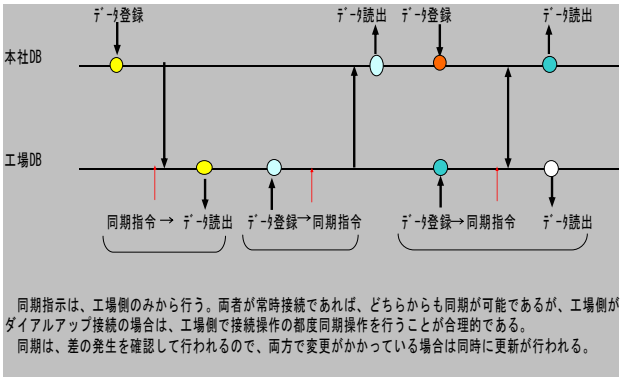


図４　データ同期タイミング

5)利用データのタイプ

データとして使用が想定されるファイルは，下記のような形式である．

○　印のファイルは，画面クリックのみで直接開く事ができる．

◇　印のファイルは，一旦UserHomeフォルダに収納しその後に開く事ができる．

拡張子	アプリケーション	内容	起動方法
doc	WORD	仕様書類	○
jpg	PhotoEditor	説明図，写真，旧資料類	○
dxf	VoloViewExpress	図面類	○
xls	Excel	データ類	○
txt	メモ帳	連絡メモ類	◇
jtd	一太郎	旧仕様書類	◇
lzh	圧縮ファイル	複数ファイル，フォルダ類	◇
pdf*	Acrobat	セキュリティ設定ファイル	○
pdf*	VoloViewExpress	コメント記載ファイル	○

6)実験結果

専用線を介して接続したTCP/IP直接接続の場合と、ADSL回線およびモデムによる公衆回線を介して接続を行った場合について実験を実施し，下記のような結果を得た．

	TCP/IP接続	ADSL/ダイアルアップ接続
データ登録	○	○
登録マシンでのデータ閲覧	○	○
アップデート処理	○	△
アップデート後のデータ閲覧	○	△
特記	まれに停止	アップデート中に停止することがある．

○：ほぼ完全に動作する

△：時折停止することがある

４．結果と考察について

TCP/IP接続においては，システムの安定性が以前と比べ向上し良い結果を得たが，モデムとADSLを介したシステムにおいては，通信の不安定性が若干認められた．更なるシステム安定性の向上については，HORBの詳細で的確な情報を基に，時間を十分かけた全体システムの再設計も含めた検討が必要になると推測される．ただし，現

状においては多くのユーザに利用されている同じような機能を持ったシステムが複数あるため当システムの再構築においては慎重且つ正確な判断が必要とされる.

最後に今回の実証実験を行うにあたり，システムの安定性向上の部分において絶大な協力をしていただいた中部コンピューター株式会社の渡辺氏と掛札氏，多忙の中時間を見つけ実証実験を推進されたレシップ株式会社の三間氏と野田氏に深く感謝を致します.

文　献

[1] 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”，岐阜県生産情報技術研究所研究報告，第1号，pp.23-28，1999.

[2] 大野尚則，窪田直樹，“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（第二報)”，岐阜県生産情報技術研究所研究報告，第2号，pp.11-16，2000.

[3] 窪田直樹，飯田佳弘，“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（第三報)”，岐阜県生産情報技術研究所研究報告，第3号，pp.19-22，2001.

[4] 窪田直樹，飯田佳弘，杉山正晴，“ネットワークを介したエンジニアリングデータベース”，岐阜県生産情報技術研究所研究報告，第4号，pp.71-74，2002.

[5] 独立行政法人産業技術総合研究所ホームページ：http://horb.a02.aist.go.jp/horb-j/,Last Updated 2003/12/08.

[6] PSE/PSE Pro for Java APIユーザガイド　リリース3.0，オブジェクトデザインジャパン株式会社，1998.12

[7] PSE/PSE Pro for Java プログラム（ハードコピー)，オブジェクトデザインジャパン株式会社，1998.12

[8] PSE/PSE Pro for Java APIユーザガイド　マニュアル，オブジェクトデザインジャパン株式会社，1998.12

[9] PSE/PSE Pro for Java 参考資料，オブジェクトデザインジャパン株式会社，1998.12

有限要素法を用いた柔軟物体の力覚提示方法に関する検討

横山　哲也　　川崎　晴久*

Research on Haptic Display Method of Elastic Objects in Finite Element Method

Tetsuya YOKOYAMA　Haruhisa KAWASAKI*

あらまし　Virtual Reality技術を用いた触診トレーニング，手術シミュレータは医学生等の初心者が効率的に診断技術を身に付ける事を可能としてきた．人体組織の力学や生理が計算機の中に記述できれば，よりリアリティの高いトレーニングシステムの構築が期待される．本研究はトレーニングシステムの構成要素技術のひとつ，柔軟物体の実時間力学シミュレーションについて検討した．力学モデルに有限要素法を採用した従来研究は，実時間での力覚提示を可能としたが，物体への接触が分散荷重となり複数の接触部を持つ場合には留意点が残っていた．本研究では複数の接触部を持つ場合を想定し，物体への接触を集中荷重として有限要素法により解くことを試みた．

キーワード　Virtual Reality，力覚提示，有限要素法，SOR

１．はじめに

近年，VR技術を用いて人工現実感を表現するのに，視覚聴覚に加えて力覚が使用されるようになってきた．医療分野においては，手術シミュレータや触診トレーニングに見られるように，人間組織のような柔らかい物体の力覚表現が重要となっている[1][2].

柔らかい物体の力覚提示方法には，大別するとバネマスモデルによる方法と，有限要素法による手法が存在する．バネマスモデルは物体の変位，反力算出を少ない計算量で求めることができる．ただし，物体のヤング率，ポアソン比等の特性値をモデルに直接組み込むことができないため，物体の変形は現実と若干異なる[3][4]．有限要素法を用いる手法は，物体の特性値をモデルに組み込むことが可能なため,物体の変形を正確に表現できるが，計算量が膨大である．ただし最近はモデルの縮退化[5]や，変位の等価荷重を算出する手法[6]を用いることで実時間処理を十分満足させることができるため，有限要素法による柔軟物の力覚提示に関する研究が盛んである．

従来の有限要素法を用いた柔軟物体の力覚提示方法は，道具を介して触る方法であり、接触点の個数は多くて２点であった．そのため，人の指先が物に触る，掴むような複数の接触点が生じる作業には検討が必要である[6].

そこで本研究では，複数の接触点が存在する場合を想定した柔軟物体の力覚提示方法を提案する．

* 岐阜大学　工学部　人間情報システム工学科

２．従来手法の問題点

有限要素法による剛性方程式は，作用力（反力）f，変位uと剛性行列Kを用いて式(1)で与えられる[7].

$$Ku = f \qquad (1)$$

力覚提示における物体の変形には強制変位を用いる．強制変位には物体が空間に固定されている強制変位と，指先が物体に対して加える強制変位が存在する[6]．反力fと変位uを未知，既知成分に分けると，式(1)は式(2)の連立方程式になる．

$$\begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{21} & k_{22} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} u_k \\ u_{uk} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_{uk} \\ 0 \end{pmatrix} \qquad (2)$$

強制変位であるため，拘束ノードにあたる変位u_kは既知,反力f_{uk}は未知である.自由ノードにあたる変位u_{uk}は未知,反力は0となる．それぞれの成分に対応する剛性行列をk_{11}，k_{12}，k_{21}，k_{22}とする．指先と物体の接触点は固定しておらず拘束条件は一定でないため，剛性行列k_{11}，k_{12}，k_{21}，k_{22}は定数とならない．そのため式

(2)を数値計算法で求める必要があり，計算量が膨大となる．

広田らは指先が物体に対して加える強制変位の拘束条件を，等価的な荷重（以下，等価荷重）に置き換えることを提案した[6]．この手法は物体が空間に固定される強制変位の拘束ノードのみを考慮すればよく，剛性行列は不変となる．そこで剛性行列k_{22}の逆行列を前処理で求めておくことで、等価荷重f^*と式(3)を用いて実時間での計算を保証した．

$$u_{uk} = k_{22}^{-1} f^* = Lf^* \qquad (3)$$

ここで接触点変位u_kを，図1(a)に示す接触点を含む３角形ポリゴンのノード(i, j, k)に単独に作用したと仮定する．そのときのノード(i, j, k)に働く等価荷重f_i^*，f_j^*，f_k^*を式(4)で求める．

$$f_i^* = \alpha_i L_{ii}^{-1} u_k, \quad f_j^* = \alpha_j L_{jj}^{-1} u_k, \quad f_k^* = \alpha_k L_{kk}^{-1} u_k \qquad (4)$$

面積座標（α_i，α_j，α_k）は以下のとおりとする．

$$\begin{aligned} \alpha_i &= S(V_f, V_j, V_k) / S(V_i, V_j, V_k) \\ \alpha_j &= S(V_f, V_k, V_i) / S(V_i, V_j, V_k) \\ \alpha_k &= S(V_f, V_i, V_j) / S(V_i, V_j, V_k) \end{aligned} \qquad (5)$$

V_i, V_j, V_kは３角形ポリゴンの頂点ベクトル，V_fは接触点，$S(\ )$は引数の頂点ベクトルから面積を算出する関数である．

上記手法は数値計算を用いないため計算量は少ない．しかし面積座標を用いるため，等価荷重f^*は分散荷重となり，接触点が複数存在する場合には検討の余地がある．具体的には，図１(b)のように３角ポリゴン内に接触点が２点ある場合，頂点ベクトルV_i, V_j, V_kの等価荷重はV_{f1}とV_{f2}の個々の変位による等価荷重の和となり，現実に即していない[6]．これはポリゴン内に接触点１個だけでも，隣接するポリゴン内に接触点が存在すれば同様である．触診トレーニングのように，隣接して接触点が存在する場合，この問題を回避する必要がある．

メッシュを細分化する事で，接触点がノード上に存在し，同じノードに2個以上の接触点による等価過重f^*が存在しないと仮定することは可能であるが，これはモデルのデータサイズを不用意に増大させるだけである[8]．

３．提案手法

そこで本研究では，等価荷重f^*を求めることなく，かつ接触点がノード上に存在，つまり集中荷重として有限要素法を解くことを試みる．具体的にはメッシュを細分化せず，接触点がノード上に存在するように，接触点にノードを新規に作成し，有限要素法を解く手法を提案する．ノード上に接触点が存在することから，面積座標を用いることがないため，分散荷重による問題は発生しない．

新規にノードを挿入するとき，新規ノード及びその近傍ノードのトポロジーを最構成（リメッシュ）する必要がある．ここでは図2(a)に示すように，接触点が存在する３角形ポリゴンの１つの稜線を分解し，図2(b)のように新規にノードを接続し直すことで対応する．３角形ポリゴンのどの稜線を分解するか検討する必要はあるが（３通りのパターンが存在)，ここでは議論の対象とはしない．

新規にノードを挿入することは，剛性行列を変化させることであり，数値計算で剛性方程式を解く必要がある．そのため計算量が膨大となるが，提案手法では以下に述べる方法で，計算量を低減する．ここでは指先が物体に対して加える強制変位の拘束条件のみに着目し，接触点の数は１個とする．

物体表面上に接触点が存在しない初期状態の，n個のノ

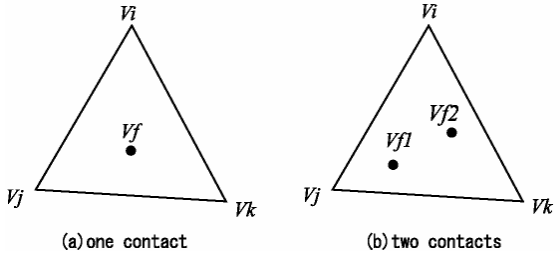


図１　接触点

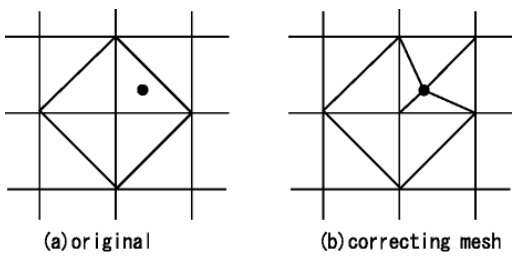


図2　リメッシュ

ードで構成された剛性行列を k_0 とすると，新規にノードを１個追加したときの連立方程式は(6)式で表される．

$$\begin{bmatrix} k_0 + \Delta k_0 & \Delta k_{i,n+1} \\ \Delta k_{n+1,i} & \Delta k_{n+1,n+1} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} u_{uk} \\ u_k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ f_{uk} \end{pmatrix} \qquad (6)$$

Δk_0 は初期剛性行列 k_0 を構成するノードに対しての変化分，Δk は接触点ノードを構成する剛性要素である．

ここで未知変数 u_{uk} に着目する．

$$(k_0 + \Delta k_0) u_{uk} = -\Delta k_{i,n+1} u_k \qquad (7)$$

k_0 の逆行列 k_0^{-1} を式(7)の両辺にかける．

$$(E + k_0^{-1} \Delta k_0) u_{uk} = -k_0^{-1} \Delta k_{i,n+1} u_k \qquad (8)$$

ここで E は単位行列である．k_0^{-1} は定数行列であるから，式(8)は u_{uk} に関する１次の連立方程式となる．

Δk_0 は疎行列であるため，数値計算SOR[9]を用いて，少ない反復回数で u_{uk} が求まる．また，Δk_0 の非ゼロ要素がどの位置に存在するかが既知であるため，プログラムの実装方法によっては，さらに少ない計算量で解を求めることは可能である．

４．シミュレーション

提案手法が妥当であるか検討するため，一定値の強制変位で物体表面をなぞったときの反力を求め，理想解との比較を行う．物体は１辺の長さ1.6[m]の立方体で，ノード数343，四面体数1053で構成した．また物体の特性値のポアソン比は0.4，ヤング率は50000[Pa]とした．図3に押し込み量0.05mで物体表面をなぞった時の分散荷重，集中荷重，理想解の反力値を示す．理想解の算出には非線形構造解析ソフトを用いた．新規にノードを挿入する際，３通りのトポロジー構成が存在する．ここでは３通りのトポロジー構成の反力を求め，その中で最小値を出力した．図3より提案手法は理想解とほぼ等しく，リメッシュの影響が少ないことがわかる．

次に隣接するポリゴン内に接触点が存在する場合の影響を見るため，１点接触，２点接触における反力を調べた．上記のモデルを用い，2点の接触点（A点x=0[m], y=0.15[m], z=0.6[m]，B点x=0.16[m], y=0.15[m], z=0.6[m]）の押し込み量を0.05mとした場合と，１点の接触点の押し込み量を0.05mとした場合の結果を表１に示す．２点接触時の反力は，１点接触時の反力の和にならないことから，複数接触において集中荷重が有効に適用できることが確認できる．

表１　接触パターンによる反力比較

	A点	B点
2点接触時反力fz[N]	-419	-428
1点接触時反力fz[N]	-552	-555

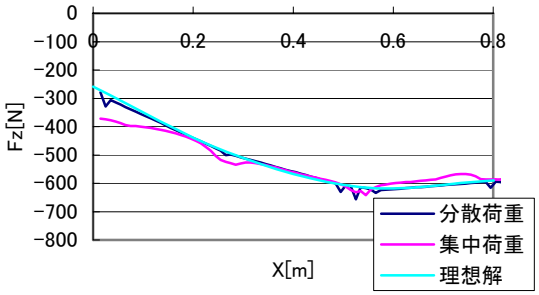


図3 シミュレーション結果１

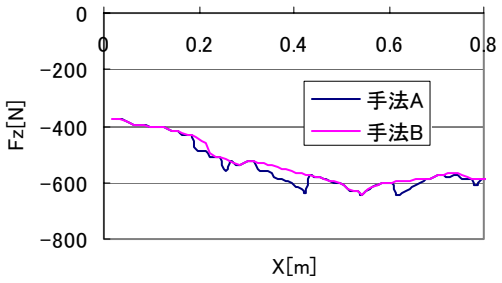


図4 シミュレーション結果２

最後に提案手法を用いて，３通りのトポロジー構成の反力を求めずに，直前の結果を利用して反力を求めた．具体的には，１ステップ前の変位から新規ノード周りの歪みエネルギーを３通りのトポロジー構成毎に算出し，その歪みエネルギーが最小となるトポロジー構成の剛性行列で次ステップの反力を求めた(手法A)．その結果を図4に示す（比較のため，図3の集中荷重結果(手法B)も示す）．近い値は得られているがグラフが一致しないことから，トポロジー選択にはまだ検討の余地がある．

５．まとめ

本研究では複数の接触部を持つ場合を想定し，物体への接触を集中荷重として有限要素法を解くことを試みた．シミュレーション結果より，新規にノードを挿入しても理想解に対して変位，反力は大きく変化しないことを確認した．これより分散荷重を集中荷重に置き換えることが可能であると思われる．

今回の報告では１個の接触点のみの検証だが，今後は２個以上の場合において，有効に作用するか検証を行う必要がある．また現状はリメッシングの方法が確立していないため，反力を求めるために３通りのトポロジー構成で計算を行っている．最適なトポロジーを予め求める

ことができれば，計算量は1/3に削減することができる．以上の２点を今後の課題として取り組みたい．

文　献

[1] 中尾、黒田，“実時間力学計算手法のライブラリ化と手術シミュレータの開発”，IPA未踏ソフトウェア創造事業，2002.

[2] Stephane Cotin, Herve Delingette, “Real-Time Elastic Deformations of Soft Tissues for Surgery Simulation”, IEEE Trans. VISUALIZATION AND COMPUTER GRAPHICS, Vol.5, No.1 1999.

[3] Terzopoulos D., Plat J, “Elastically Deformable Models”, Computer Graphics, Vol.21, No.4, pp.205-214, 1987.

[4] 宮崎、安田，“仮想弾性物体の対話操作のためのモデル化と実現，電子情報通信学会論文誌，Vol.J79-A, No.11, pp.1919-1926, 1996.

[5] Morten, Bro-nielsen, “Finite Element Modeling in Surgery Simulation”, Proc. of IEEE, pp.490-503, 1998.

[6] 広田，金子，“柔らかい仮想物体の力覚表現”，情報処理学会論文誌，Vol.39, pp.3261-3268, 1998.

[7] 三好俊郎，“有限要素法入門”，培風館，1978.

[8] 北村喜文，“仮想箸のための物体変形と力覚提示の一検討”，日本VR学会, Vol.7, NO. 3, pp.291-300, 2002.

[9] 日本機械学会編，“計算力学ハンドブック”，丸善，1998.

「ながら」の歩行制御アルゴリズムの開発

張　明　　光井　輝彰　　浅井　博次　　杉山　正晴

Neural-Oscillator-based Algorithm for Humanoid Robot Locomotion

Ming CHANG　Teruaki MITSUI　Hirotsugu ASAI　Masaharu SUGIYAMA

あらまし　神経振動子に基づいた歩行制御アルゴリズムの開発を行った．同アルゴリズムは，①足踏みを実現する部分，②前進歩行を制御する部分，③重心位置補正を制御する部分など，三つの独立した部分からなる．本報は，アルゴリズムの詳細及び実機による歩行実験の結果について報告する．

キーワード　ヒューマノイドロボット，２足歩行，神経振動子

１．はじめに

２足ロボットの歩行制御には，これまで様々な手法が提案されている．本報では特に神経振動子（neural oscillator）を用いたアプローチに注目する．神経振動子は生体における非線形振動を生成する神経細胞，あるいは神経細胞群を指し，それらによって構成された中枢パターン生成器（central pattern generator）が脊椎動物の脊椎の中に見出され，リズミカルな生体の周期運動，例えば呼吸，歩行，飛ぶ，泳ぐなどを司る実体と考えられている．

神経振動子に基づいた歩行制御に関する研究も盛んに行われてきた．例えば，多賀ら[10]はヒトの安定な歩行運動をCPG，筋骨格系及び環境の三者の相互作用を通じて生成できることを示した．宮腰ら[11]は同手法を用いて２足ロボットの三次元空間における足踏みをシミュレーションし，また木村ら[12]は同様の手法を四足ロボットに適用し，実機による不整地動歩行と整地走行を実現している．最近，富士通研究所はCPGと数値摂動法を用いたヒューマノイドロボットの動作学習に成功した[3-7].
神経振動子に基づいた歩行制御には神経振動子と物理系の動特性の共鳴や上位入力による高度な動作の実現などの特徴があるため，本報では富士通研究所が提案した手法に着目し，神経振動子に基づいて歩容を生成することとする．

２．神経振動子モデル

神経振動子の数学モデルは神経細胞の数，それらの間の結合関係などによって様々であるが[8,9]，振動という特性を得るためには２個のお互いに抑制しあう神経細胞は十分である．例えば図１に示したモデルは，パラメータ $C_{12}C_{21}$ の値により線形・非線形などの波形を発生することができる[5]．本報では神経振動子の出力を，sin()あるいはcos()関数などを用いて近似する．

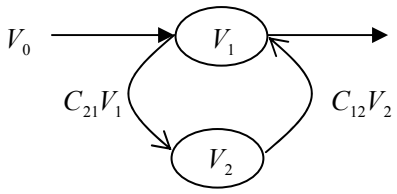


図１　神経振動子モデル

３．２足歩行ロボットのモデル

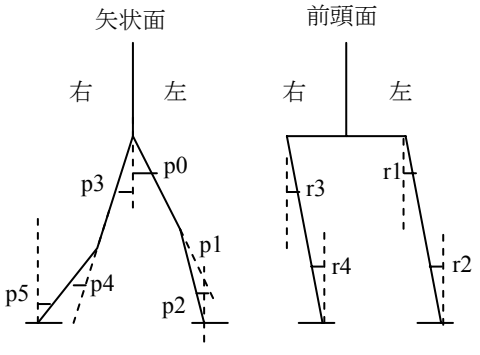


図２　ロボットのモデル

小型ヒューマノイドロボット「ながら」に関する制御ハードウェアの設計詳細については，[13]を参照されたい．ここでは，図２に示すようなモデルを用いる．関節自由度の配置は片足につき股に２，膝に１，足首に２となる．

４．歩行制御アルゴリズム

開発したアルゴリズムの構成を図３に示す．[1,2]に従い，並列プロセスにした．また，歩容を前頭面と矢状面に分離して定義する．

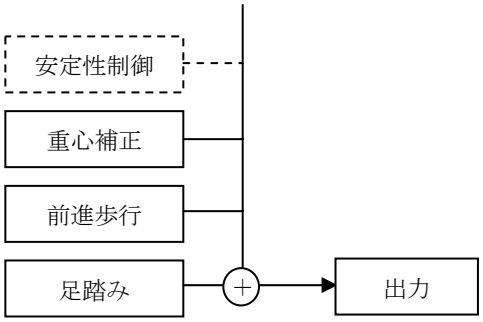


図３　アルゴリズムの構成

４．１　特異姿勢の回避

特異姿勢をさけるため，歩行の前，あるいは歩行と同時にロボットに以下のような動きを与える．

p0=p1/2=p2=p3=p4/2=p5=(-0.5+1/(1+Exp(-wt)))*2.0

ただし，w=2π/Period, Periodは歩行周期を表す．

４．２　足踏み

足踏みはまず前頭面で次のように定義する．

r1=r2=D*SIN; r3=r4=E*SIN

ただし，SIN＝sin(wt)．D，Eは左右振れの度合いを表すパラメータであり，その値は機構解析ソフトウェアDADSによる足踏みのシミュレーションを行うことで決定した．

矢状面では，次のような動きを定義する．

```
if(SIN > 0){
p0+=A*COSS; p1-=2*A*COSS; p2+=A*COSS; }
else{
p3+=A*COSS; p4-=2*A*COSS: p5+=A*COSS; }
```

ただし，Aは足上げの度合いを表すパラメータであり，COSS=(1-cos(2wt))/2.0,

４．３　前進

前進運動は矢状面で定義する．

```
if(t < Period/2.0){
   p0+=H*COS2;   p2-=H*COS2;
   p3-=H*COS2;   p5+=H*COS2; }
else{
   p0+=H*COS; p2-=H*COS;
   p3-=H*COS; p5+=H*COS; }
```

ただし，Hは歩行幅を表すパラメータである．最初の一歩の後は周期運動に入る．

４．４　重心位置補正

重心位置の補正を矢状面だけで行う．図４に示すように重心を一定の高さに保つためには，cos(b) = cos(a)/cos(c) となる必要がある．よって，c = acos(cos(a)/cos(b))となり，補正量はa-cとなる．

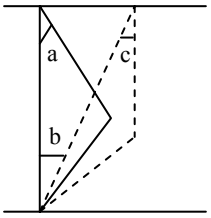


図４　重心位置の補正

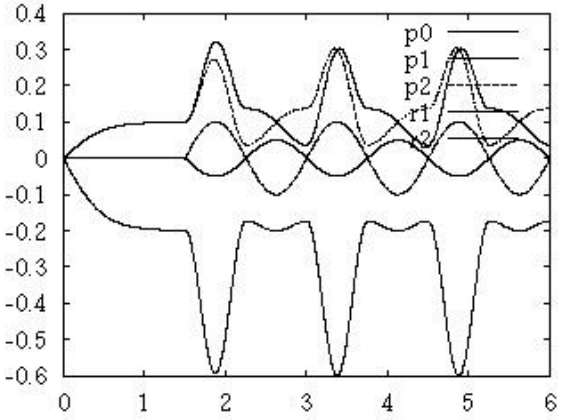


図５　制御波形

５．実験及び考察

以上提案したアルゴリズムを「ながら」に実装した．図５には実際に使った制御波形を示している．実機実験の前，機構解析ソフトウェアDADSによるシミュレーションを行った．提案したアルゴリズムにより，実機での歩行運動を実現した．本報では，各関節に一つの神経振動子を割り当て，神経振動子間の結合を考慮していない．これからは環境からのフィードバックを考慮し，図３に示すように安定性制御部分を付け加えることを考えている．

文　献

[1] Brooks R. A.，“A Robust Layered Control System for a Mobile Robot”，Proceedings of the 3rd International Symposium of Robotics Research, pp.1-8, 1985.

[2] Brooks R. A.，“Intelligence without Representation”，Artificial Intelligence Journal, vol.47, pp.139-159, 1991.

[3] Jiang Shan, Fumio Nagashima,“Biologically Inspired Spinal Locomotion Controller for Humanoid Robot”, 第19回日本ロボット学会学術講演会，pp.517-518, 2001.

[4] Jiang Shan, Fumio Nagashima,“Neural Locomotion Controler Design and Implementation for Humanoid Robot HOAP-1”, 第20回日本ロボット学会学術講演会，pp.-, 2002.

[5] Fumio Nagashima,“A Motion Learning Method using CGP/NP”, Proceedings of the 2nd International

Symposium on Adaptive Motion of Animal and Machines, 2003.

[6] 永嶋史郎,“CPG/NPによるロボット運動学習”, 日本ロボット学会創立２０周年記念学術講演会，2002.

[7] Riadh Zaier, Fumio Nagashime, “Recurrent Neural Network Language for Robot Learning”, 日本ロボット学会創立２０周年記念学術講演会，2002.

[8] Matsuoka K.,“ Sustained Oscillations Generated by Mutually Inhibiting Neurons with Adaptations”, Biological Cybernetics, vol.52, pp.367-376, 1985.

[9] Matsuoka K., “Mechanisms of Frequency and Pattern Control in the Neural Rhythm Generators”, Biological Cybernetics, vol.56, pp.345-353, 1987.

[10] Taga G., “Self-organized control of bipedal locomotion by neural oscillators in unpredictable environment”, Biological Cybernetics, vol.65, pp.147-159, 1991.

[11] 宮腰清一，多賀厳太郎，国吉康夫，長久保晶彦，“神経振動子を用いた三次元２足足踏みシミュレーション”，日本ロボット学会誌，vol.18, pp.87-93, 2000.

[12] 木村浩，秋山征一，桜間一彰，“神経振動子を用いた四足ロボットの不整地動歩行と整地走行”，日本ロボット学会誌，vol.16, pp.1138-1145, 1998.

[13] 稲葉昭夫，光井輝彰，西村太志，千原健司，田中等幸，“ヒューマノイドロボット基本ハードウェアの開発”，岐阜県生産情報技術研究所研究報告第３号，pp.1-8，2002.

障害物環境下におけるマニピュレータ制御

浅井　博次

Manipulator Control in the Presence of Obstacles

Hirotsugu Asai

あらまし　労働力不足や高齢化社会への解決策として期待されているロボットの実用化には，すべての人が簡単にロボットを操作できるシステムが重要である．自律制御と遠隔操作（操作者の指示）の併用により，簡易で柔軟なロボット操作を実現することが，早期実用化への解答であると思われる．そこで，本報告では，ロボットが自律的に行動するための基本行動群を充実させることを目標に，障害物環境下におけるマニピュレータの実時間経路生成手法について検討した．

キーワード　冗長マニピュレータ制御，経路生成

１．はじめに

近年のロボット技術の進展は著しく，従来の工業用ロボットに加え，既にペットロボット，案内ロボット，警備ロボットなどの民生用ロボットが多数市販されている．また，ロボットを扱った展示会では広い世代から多くの来場者を集めており，一般の人々にとってロボットが急速に身近な物へと変わりつつある．このような中，低出生率による労働者不足や高齢化社会への対応策の一つとして，日常生活の中にロボットが当然のように存在し，さまざまな役割を果たすようになるのではないかと期待されている．

日常生活の中にロボットが一般に受け入れられるためには，誰もが簡単にロボットを操作できることが重要である．従来行われてきた遠隔操作では，ロボットのすべての動作を指示する必要があるため非常に煩雑であり，複雑な操作や正確な操作が要求される場合には熟練が要求されるなど，容易にできるものではなかった．これに対し，ロボットに自律性を持たせることによって，ロボットの操作性を向上させようという試みが近年盛んに行われている．先述の案内ロボットなどもその例であり，環境とタスクを限定することで実環境での自律行動を実現している．しかしながら，常に変化する環境を正確に認識し，環境に対応しつつ目的を達成するための行動計画を実時間で自律生成することは非常に困難であるため，様々なタスクを自律制御のみで実行できるようになるにはまだまだ多くの時間が必要である．現状では，自律制御と遠隔操作（操作者の指示）の併用が最適だと思われる．つまり，基本的には操作者の指示でロボットを操作し，自律制御が可能な部分はロボットが自律的に行動するシステムである．これにより，安易なロボット操作の実現とロボットの操作性向上を図ることができると考える．そこで本報告では，ロボットが自律的に行動するための基本行動群を充実させることを目標に，ロボットにおいて最も重要な機能の１つであるマニピュレータを取り上げ，その基本行動である障害物環境下においてマニピュレータのエンドエフェクタを目標位置へ移動させる動作の自律制御について検討する．

マニピュレータの障害物回避問題については様々な研究がなされているが，オフライン型軌道計画とオンライン型軌道計画に大別できる．オフライン型軌道計画とは，障害物の情報が既知であるとして事前に目標位置までの軌道計画を行う手法で，軌道全体を評価して計画を生成できる利点がある．主に，マニピュレータの位置・姿勢を点で表現できる状態コンフィギュレーション空間を用いる方法が採用されているが，マニピュレータの自由度が増すとコンフィギュレーション空間の生成時間が指数関数的に増加するという問題点がある．この問題に対し，関節軌道をBスプライン曲線で記述しコンプレックス法により最適化する手法[1]などいくつかの方法が提案され，現実的な計算時間を実現している．

一方，オンライン型軌道計画では，実時間での軌道生成に重きが置かれている．主に人工ポテンシャル法が用いられているが，大局的な軌道計画ができないため，デッドロックに陥ってしまう場合がある．実時間でのマニピュレータ障害物回避計画に対しては，兼子らがリンクの障害物への接近速度とエンドエフェクタ速度の関係を示す干渉ヤコビ行列を用いた手法[2]を提案しているが，冗長マニピュレータの場合，実時間性を確保するのが困難である．また，視覚サーボを用いた手法[3,4]も検討が進んでいる．

本報告では，冗長自由度を有するマニピュレータの障

害物回避軌道計画を実時間で実現できる手法として，大まかな認識や状況判断で制御計画が可能なファジィ推論と学習オートマトンを用いた手法[5]の適用を検討する．

２．適用手法

２．１　概説

マニピュレータは冗長自由度を持ち，障害物情報（位置･サイズ）は既知であるとする．対象とするタスクは，マニピュレータのエンドエフェクタを指定された目標位置へ障害物を回避しながら安全に移動させることである．

図１に本報告で使用する制御システムを示す．

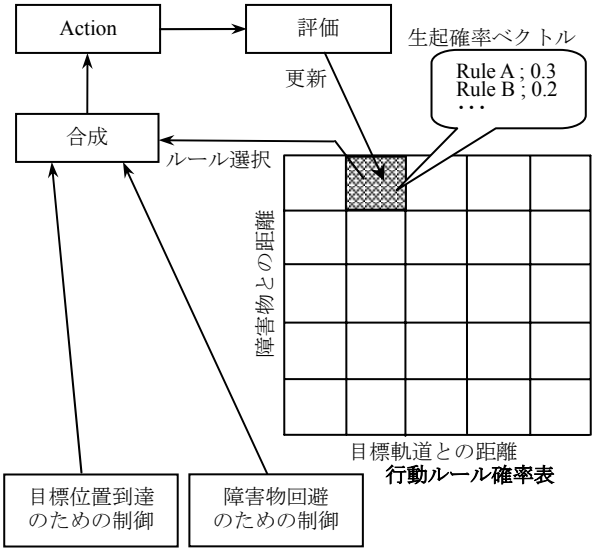


図1　制御量決定システム

本システムは，以下の５つのステップに分けることができる．

１．制御入力算出
　まず，目標位置に到達するための制御入力と障害物回避のための制御入力を独立に算出する．

２．制御入力の合成
　行動ルール確率表を元に既定の合成ルールから適用するルールを選択し，そのルールに従い最終的な制御入力を決定する．

３．制御の実行(action)

４．実行結果の評価

５．行動ルール確率表の更新
　実施した制御の評価に基づいて行動ルール確率表を更新する．

２．２　目標軌道設定

本システムは基本的に局所情報に基づく手法を採用しているため，そのままでは大局的な軌道生成ができずデッドロックに陥ってしまう可能性がある．そこで，現在位置から目標位置までを補間する目標位置列を使用することでデッドロックを回避している．

初期の目標軌道はエンドエフェクタの始点と終点を結んだ直線とする．目標軌道が障害物と交差する場合は，目標軌道と水平でない平面に投影した障害物と重ならない位置に仮想目標点を追加する．この操作を繰り返すことで，始点から終点まで障害物と交わらない目標軌道を折れ線で生成することができる．この他に，視覚サーボ系のシステムで細田らが提案しているエピポーラ拘束を用いた手法[3]も使用することができる．エンドエフェクタが目標軌道から閾値以上離れた場合は，目標軌道を再生成する．

２．３　タスク毎の制御入力決定

制御入力はタスク毎に独立に算出される．本システムでは，目標位置到達タスクと障害物回避タスクの２つのタスクを使用し，障害物を回避しながら目標位置に到達するタスクを実現する．

制御入力の決定にあたり，マニピュレータのエンドエフェクタ及び各ジョイントの移動速度を考慮する必要がある．回転動作の場合，移動速度が回転半径に大きく依存してしまうからだ．そこで，１ステップでの角度変更量の上限θ_{max}を設定しておく．そうすることで，障害物との干渉評価も容易になる．また，細かいステップで制御入力を決定することで，より自然なマニピュレータ形状の生成が期待できる．

目標位置到達タスクについては，発見的手法の１つであるCCD法(Cyclic-Coordinate Descent method)を適用する．一方，障害物回避タスクについては，$\pm\theta_{max}$の範囲での反復評価（反復回数＜ｎ）により障害物とリンクとの最短距離Ｄがより大きくなるθを制御入力として導出する．障害物回避タスクは，Ｄが閾値以下の場合のみ考慮するものとする．

２．４　合成ルールと行動ルール確率表

独立に算出された制御入力を合成する方法を決定するのが行動ルール確率表である．行動ルール確率表はマニピュレータを取り巻く状況を目標軌道・エンドエフェクタ間距離とマニピュレータ･障害物距離を用いて分割し，分割した状況毎に既定の合成ルールの中からどのルールを採用するかを決定する生起確率ベクトルを定義する．本システムでは図２に示す５つの合成ルールを使用した．

ルールNo.	ゴール到達	障害物回避
1	100%	0%
2	75%	25%
3	50%	50%
4	25%	75%
5	0%	100%

図2　合成ルール

独立に算出された制御入力は対応する状況の生起確率ベクトルに基づいてルーレット方式で選択される合成ルールに従って合成される．生起確率ベクトルは実行された行動の評価に応じて更新され，環境に適応するための知識が獲得される．

２．５　学習アルゴリズム

本項では，行動ルール確率表の生起確率ベクトルの学習アルゴリズムについて解説する．

生起確率ベクトルは当初，等しい確率に設定される．その後，選択されたActionの評価に基づいた学習により，環境に適用した行動選択能力を獲得する．ここでは，選択されたActionに対する二値評価*b(n)*｛favorable(1), unfavorable(0)｝に基づいた更新則を採用している．

If　*b(n)=1* and $a_{(n)} = a_i$

$$p_{i(n+1)} = p_{i(n)} + c(1 - p_{i(n)})$$

$$p_{j(n+1)} = (1 - c)\, p_{j(n)} \qquad \text{for} \qquad j \neq i$$

If　*b(n)=0*

$$p_{i(n+1)} = p_{i(n)} \qquad \text{for} \qquad \text{all } i$$

ここで，$a_{(n)}$ は時刻*n*での行動，$p_{i(n)}$ は時刻*n*において*i*番目の行動を選択する確率，*c*(0<*c*<1) は，学習係数である．

２．６　行動評価

実行した行動を評価するためのファジィ行動評価器を図３に示す．静的な障害物との干渉の危険性を示す要素として障害物との距離，動的な危険性を示す要素として障害物との距離の変化を使用した．(a),(b)の評価値の大きい方を行動評価値として採用する．前項で挙げた学習アルゴリズムには，閾値を設けることで適用する．

Distance from obstacles \ Change of Distance to Goal	Negative	Zero	positive
Big	Positive Big	Negative Midium	Negative Small
Medium	Positive Medium	Zero	Negative Miduim
Small	Positive Small	Positive Midium	Negative Big

(a)

Change of Distance from obstacles \ Change of Distance to Goal	Negative	Zero	positive
Positive	Positive Big	Negative Midium	Negative Small
Zero	Positive Medium	Zero	Negative Miduim
Negative	Positive Small	Positive Midium	Negative Big

(b)

図3　行動評価ファジィルール

３．おわりに

障害物環境下において冗長自由度を持つマニピュレータのエンドエフェクタを任意の位置へ移動させるための実時間軌道生成手法についてファジィ推論と学習オートマトンを用いた手法の適用を検討した．本手法では状況を大まかに分類し，分類した状況毎にどのように行動すべきかを学習するため，教示環境への依存度が低く，一般的な行動規範を学習により獲得できる可能性が高い．今後，様々なタスクへの適用を検討し，自律行動が可能な基本行動群の充実に繋げていきたい．また，本報告で検討したマニピュレータ制御については評価検討を進めるとともに，より柔軟な実環境への適用を検討する必要がある．例えば，本報告では障害物情報を既知としているが，実環境に適用するためには，センシングされた不確実な情報をもとに行動を計画する必要がある．環境センシング技術を取り入れることを検討していきたい．

文　献

[1] 尾崎弘明，林長軍，“コンプレックス法による動力学を考慮したマニピュレータの障害物回避軌道生成”，日本ロボット学会誌，Vol.15, No.1, pp139-144, 1997.

[2] 兼子一，新井健生，井上健司，前泰志，“干渉ヤコビ行列を用いたロボットアームの実時間障害物回避”，日本ロボット学会誌，Vol.18, No.4, pp555-560, 2000.

[3] 細田耕，阪本健二，浅田稔，“三次元再構成を行わない視覚サーボ系のための障害物回避軌道の生成”，日本ロボット学会誌，Vol.15, No.2, pp290-295, 1997.

[4] 三河正彦，吉田耕一，丹野瑞紀，松本三千人，“障害物回避のための視覚に基づくマニピュレータ冗長制御と画像特徴推定”，日本ロボット学会誌，Vol.17, No.4, pp534-539, 1999.

[5] 青木猛，岡利明，鈴木達也，大熊繁，早川総一郎，“多段階学習による障害物回避のための行動獲得”，日本ロボット学会誌，Vol.15, No.4, pp648-656, 1996.