

# 岐阜県生産情報技術研究所研究報告

第4号

平成14年度

岐阜県生産情報技術研究所

Gifu Prefectural Research Institute of Manufacturing Information Technology

# 目 次

|  |    |
|--|----|
| 1. ヒューマノイドロボット基本ハードウェアの開発(第2報)<br>(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. ヒューマノイドロボット「ながら」の歩行技術に関する改良<br>(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) | 7  |
| 3. 繰り返し順変換を用いた立脚ロボットにおける持ち上げ動作生成                                 | 11 |
| 4. ヒューマノイドインターフェースに関する研究<br>(表情認識ソフトウェアの実装と精度検証)                 | 15 |
| 5. 静電フィルムアクチュエータを用いたロボットアームの開発                                   | 19 |
| 6. 福祉ロボットに適應した作業指示技術の研究<br>(介護・福祉支援ロボットの開発)                      | 23 |
| 7. 人にやさしいモニタロボットの研究  | 27 |
| 8. 情報収集(被災者搜索)ロボットの移動機構に関する研究                                    | 31 |
| 9. 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                                    | 37 |
| 10. 絵付けイメージ構築に関する研究開発  | 43 |
| 11. 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)                             | 47 |
| 12. デジタルモックアップのための剛体運動シミュレーションに関する研究                             | 51 |
| 13. 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(第1報)                          | 57 |
| 14. 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                            | 61 |
| 15. 進化戦略における撰択操作に関する一考察  | 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                                     | 71 |
| 17. 力感覚が必要な作業スキル解明に関する研究   | 75 |
| 18. 立体紙製品の構造解析に関する研究(第3報)  | 79 |

# 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)

- 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 光井 輝彰 千原 健司

小川 行宏 田中 等幸

## Development of biped locomotion legs and an upper limb ( )

Development of Basic Technologies for Coexistence of Human Being and Robots

Akio INABA Qin Zhang Teruaki MITSUI Kenji CHIHARA

Yukihiro OGAWA Tomoyuki TANAKA

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。これを実現する要素技術の1つとして、本プロジェクトでは、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技術について検討する。本報では、このプロジェクトで使用する研究用ロボットプラットフォームの開発(本年度は、ロボットの基本制御ソフトウェアを開発)について報告する。

キーワード ヒューマノイドロボット, 2足歩行, 人とロボットの共存

### 1. はじめに

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。これを実現する要素技術の1つとして、人とロボットの親和性向上技術がある。この技術は、人のロボットに対する違和感や恐怖感を和らげるための技術である。本プロジェクトでは、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技術について検討する。本報では、このプロジェクトで使用する研究用ロボットプラットフォームの開発について報告する。本年度は、昨年度試作したヒューマノイドロボットの機構を制御する基本ソフトウェアの開発を行った。具体的には、昨年度実施した歩行に関する基礎実験において開発した歩行アルゴリズムを改良(旋回動作等を付加)し、それをヒューマノイドロボットに搭載した。さらに、上肢に関して、腕と顔を制御するソフトウェアを開発した。

### 2. ハードウェア構成

本章では、昨年度試作したヒューマノイドロボット基本ハードウェアの概要を示す。

#### 2.1 機構系

本研究で開発したヒューマノイドロボットの機構系の概要は次のとおりである。人とロボットのインタラクションに関する研究のプラットフォームとして使用することを考慮し、上肢の自由度を多くしている。

- 1) 身長 約80cm
- 2) 体重 約15kg
- 3) 関節自由度 30自由度(図1)
- 4) 電源 バッテリーと外部電源の併用

#### 2.2 制御系

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

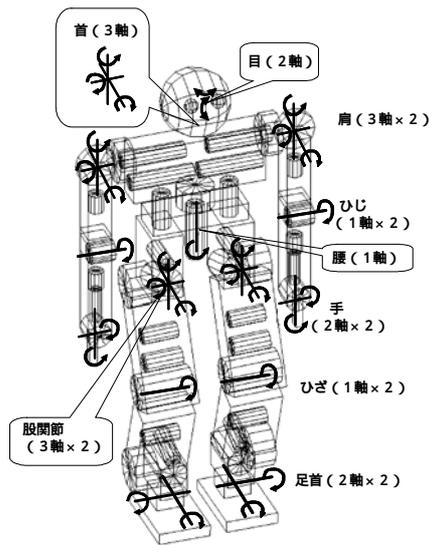


図1 ロボットの関節自由度

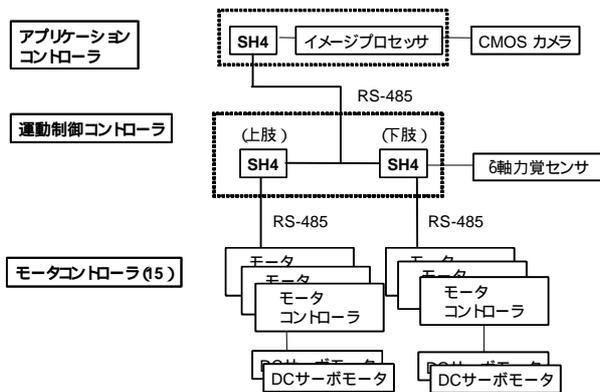


図2 制御ハードウェアの構成

は、SH4 ((株)日立製作所)を、モータに関してはSH2 ((株)日立製作所)を使用した。体内LANには、1Mbps以上の高速通信が可能で、マルチキャストな通信が可能であり、実装が容易である等の理由から、RS-485を使用した。

### 3. 制御アルゴリズム

#### 3.1 歩行アルゴリズム

歩容の生成に関してはこれまでいろいろな手法が提案されている<sup>[1]-[5]</sup>。これらの多くがオフラインであらかじめ歩容を生成する手法である。しかし、ロボットが環境に適応して歩行したり、人の行動に対して歩行を伴ったリアクションを返すためには、リアルタイムに歩容を生成する必要がある。本研究では問題を簡単にするため、歩容をSagittal Plane (XZ平面), Lateral Plane (YZ平面), XY平面に分離して検討する。各平面に関する歩容は、倒立振子の倒れ込みの運動を基本とし、各フェーズのパターンが滑らかにつながることを考慮して定めた。

具体的な歩容は、昨年度の予備実験に準じて、Sagittal Plane に関しては、線形倒立振子モード<sup>[4]</sup>の考えに基づいて、Lateral Plane に関しては、重心に質点が集中していると仮定した倒立振子の根元関節に一定のトルクが働く場合の運動として定める。また、XY平面の運動に関しては、支持脚における股関節のヨー軸周りのなめらかな回転運動として定める。

最初に、歩容を支持脚の状態により、次の4つの基本フェーズに分類する<sup>[7]</sup>(図3)。初期状態は、両足を揃え、腰が水平に運動できるようにするため両膝を曲げた状態とする。

- a. 初期状態から両足支持期になるまで
- b. 両足支持期
- c. 片足支持期
- d. 両足支持期から初期状態になるまで

ここで、両足支持期(フェーズb)は、理想的な線形倒立振子モードの歩容には存在しないが、歩行安定化制御等により目標軌道から外れた腰の運動を補正するために設定している。

各フェーズに対する具体的な歩容(歩行パターン)を、支持脚に関して、足首から見た腰の運動として記述し、遊脚に関しては、腰から見た足首の運動として記述する。このように各パターンに関する運動を定義することにより、具体的な各関節の回転移動量が容易に求まる。

#### Sagittal Plane の歩行パターン

最初に支持脚の腰の運動について検討する。線形倒立振子モードにおいて、床からの腰の高さは変化しないので、x座標における運動のみを定めればよい。線形倒立振子モードにおける片足支持期(フェーズc)の腰の軌跡は、

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

となる。ここで、

$Z_C$ : 足首から見た重心の高さ

$T_S$ : 片足支持期の時間

$$T_C = \sqrt{Z_C/g}$$

$g$ : 重力加速度

$X_S$ : 歩幅

$X_W$ : 両足支持期における重心のX軸方向の移動量

$$X' = (X_S - X_W)/2$$

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

である。

フェーズa, dについては、各フェーズの最初と最後における位置と速度を満足させる3次関数として歩容を与える。フェーズbについては、位置と速度と加速度の補正を実現する最小次元の5次関数として歩容を与える。

遊脚の運動は着地時に足裏が地面に対し垂直/水平方

向に速度が0となるように4次関数で記述する．4次運動を定義した理由は，各フェーズの位置，速度を連続的に結合させるためである．

Lateral Planeでの歩行パターン

Lateral Plane に関する運動は，重心に質点が集中していると仮定した倒立振子の根元関節に一定のトルクが働く場合の運動とし，これに関する運動方程式から重心の軌道関数を計算する．これにより，支持脚に関する片足支持期（フェーズc）の腰の軌跡は，

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

となる．ここで，

$q_s$ : 倒立振子の最大振れ角

$q_w$ : 両足支持期へ移行時の倒立振子の振れ角

$$a = \sqrt{g/Z_C}, b = \exp\{a \cdot (T_S/2)\}$$

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

である．

フェーズ a, b, d に関しては，Sagittal Planeと同様にして定める．

また，遊脚の運動は，支持脚に平行になるように定める．

XY平面の運動

XY平面の運動は，片足支持期（フェーズc）における支持脚の股関節のヨー軸周りの運動として3次関数で次のように定義する．

$$q = 2 \cdot \frac{a-b}{T_S^3} \cdot t^3 - 3 \cdot \frac{a-b}{T_S^2} \cdot t^2 + a$$

ここで，

a: 片足支持期開始時の支持脚のヨー軸周りの回転移動量

b: 片足支持期終了時の支持脚のヨー軸周りの回転移動量

$T_S$ : 片足支持期の時間

である．

実際のロボットの歩容は，これらの各平面の運動を合成することにより得られる．例えば，直線歩行に関しては，Sagittal Plane とLateral Planeの運動を，旋回歩行に関しては，直線歩行の運動にXY平面の運動を合成すればよい．

3.2 上肢制御アルゴリズム

本研究においては，上肢は人に対するリアクションのジェスチャを表現するために使用する．このため，腕に関しては，指先の姿勢と軌跡を指令値として与える．顔に関しては，視覚によりとらえた方向を向くように制御する．また，試作したロボットの腕においては，手先の

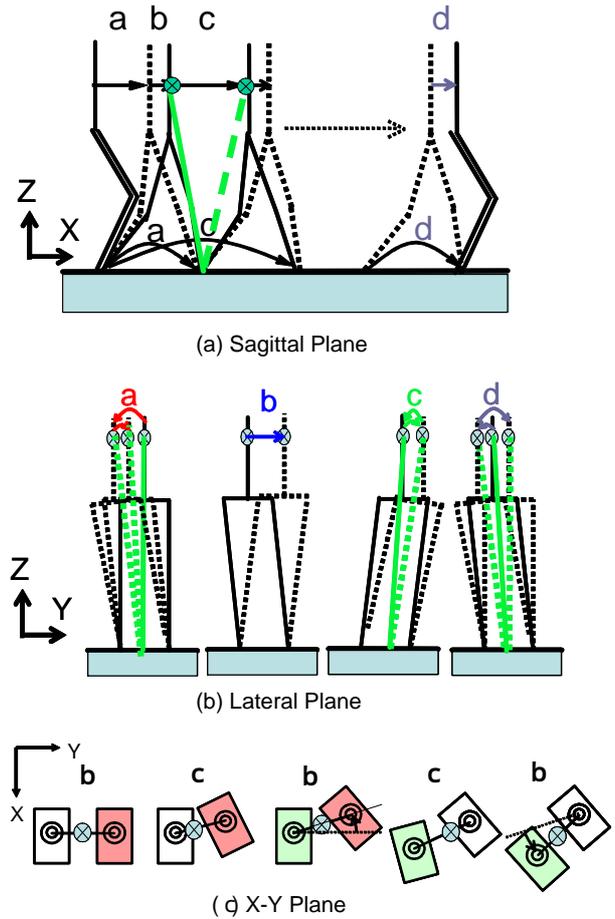


図3 歩行パターン

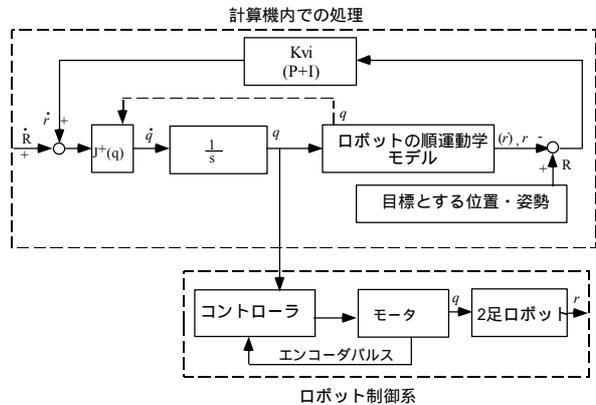


図4 制御のブロック線図

3自由度の回転軸が1点で交わらないため，解析的に逆運動学を解くことが困難であることや顔の制御に関しては，腰の自由度を含めると冗長になることを考慮して，図4に示すような制御系を用いて制御することとした．この制御系においては，目標とする位置・姿勢（R）とそれらの移動速度（R-dot）を指令値として与え，ロボットの前運動学モデルにより算出した現在の位置・姿勢（r）との偏差に対して，比例成分と積分成分を速度指令値にフィードバックする．これにより得られた移動速度に逆ヤコビ行列を乗じて各関節の速度に変換し，それを積分

して目標の関節位置を求める．これを各モータコントローラに指令値として与える．本研究で用いた腕および顔の運動学モデルおよびヤコビ行列等を次に示す．

### 腕の運動学モデルとヤコビ行列

図5に本研究で各関節に対して設定した座標系を示す．本研究では，腰の中央に基準座標系  $B$  を設定し，目標値はこの座標系での値となる．この座標系における各関節の回転移動量と手先の座標の関係を表す同時変換行列

${}^B T_E^R, {}^B T_E^L$  (運動学モデル)は次式ようになる．ここで，R,Lは右手，左手の区別を表す．

$${}^B T_E^R = {}^B T_A^R {}^0 T_1^R {}^1 T_2^R {}^2 T_3^R {}^3 T_4^R {}^4 T_5^R {}^5 T_6^R {}^6 T_E^R$$

$${}^B T_E^L = {}^B T_{A'}^L {}^0 T_1^L {}^1 T_2^L {}^2 T_3^L {}^3 T_4^L {}^4 T_5^L {}^5 T_6^L {}^6 T_E^L$$

ここで，

$${}^B T_A^L = \begin{bmatrix} 0 & -\cos w & -\sin w & -L7 \sin w \\ 0 & -\sin w & \cos w & L7 \cos w \\ -1 & 0 & 0 & L8 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^B T_{A'}^R = \begin{bmatrix} 0 & -\cos w & -\sin w & L7 \sin w \\ 0 & -\sin w & \cos w & -L7 \cos w \\ -1 & 0 & 0 & L8 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^0 T_1 = \begin{bmatrix} \cos q_1 & -\sin q_1 & 0 & 0 \\ \sin q_1 & \cos q_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^1 T_2^R = \begin{bmatrix} -\sin q_2 & -\cos q_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ \cos q_2 & -\sin q_2 & 0 & -L1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^1 T_2^L = \begin{bmatrix} -\sin q_2 & -\cos q_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ \cos q_2 & -\sin q_2 & 0 & L1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^2 T_3 = \begin{bmatrix} -\sin q_3 & -\cos q_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -L2 \\ \cos q_3 & -\sin q_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^3 T_4 = \begin{bmatrix} \cos q_4 & -\sin q_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ \sin q_4 & \cos q_4 & 0 & L3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^4 T_5 = \begin{bmatrix} \sin q_5 & \cos q_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & L4 \\ \cos q_5 & -\sin q_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^5 T_6 = \begin{bmatrix} \cos q_6 & -\sin q_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\sin q_6 & -\cos q_6 & 0 & L5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^6 T_E = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -L6 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

である．

また，ヤコビ行列は次式により求まる．

$$J_v = [J_{v1}, J_{v2}, J_{v3}, J_{v4}, J_{v5}, J_{v6}]$$

$$J_{vi} = \begin{Bmatrix} {}^B z_i \times {}^B p_{E,i} \\ {}^B z_i \end{Bmatrix}$$

$${}^B z_i \equiv {}^B R_i \cdot e_z, \quad e_z = [0, 0, 1]^T$$

$$p_{E,j} = {}^B p_E - {}^B p_j$$

${}^B z_i$  : ベース (腰) から見た関節  $i$  の姿勢の  $Z_i$  方向の成分，

${}^B p_j$  : ベースから見た関節  $i$  の位置

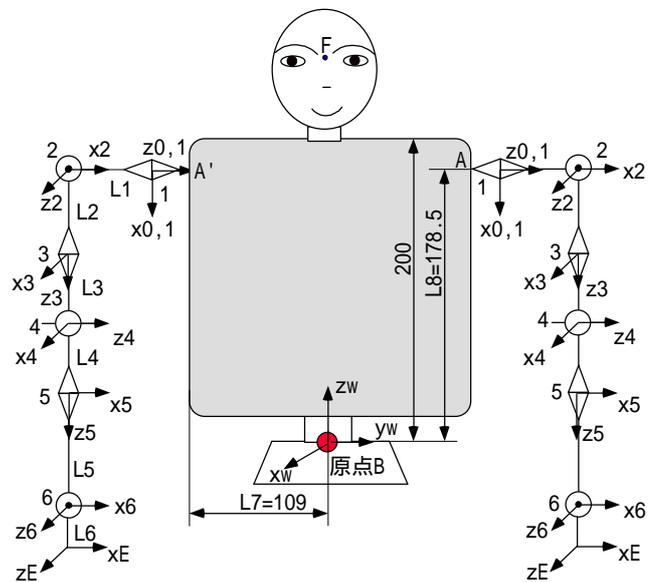


図5 腕の座標系

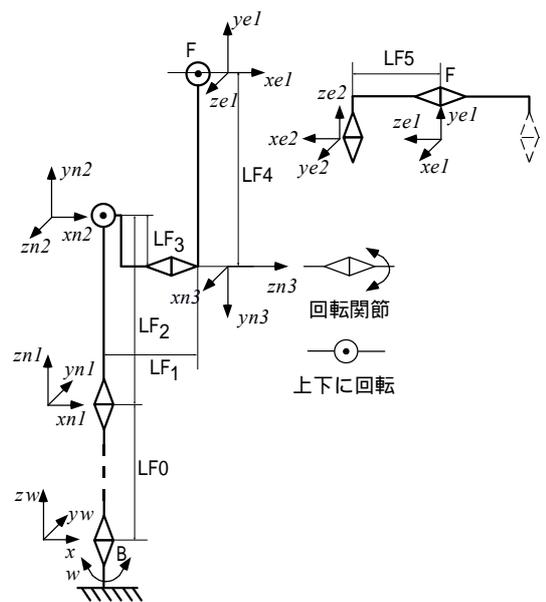


図6 顔の座標系

### 顔の運動学モデルとヤコビ行列

図6に本研究で各関節に対して設定した座標系を示す。本研究では、腰の中央に基準座標系  $B$  を設定し、目標値はこの座標系の値となる。この座標系における各関節の回転移動量と手先の座標の関係を表す同時変換行列  ${}^B T_F$  (運動学モデル) は次式ようになる。

$${}^B T_F = {}^B T_w \cdot {}^w T_{n1} \cdot {}^{n1} T_{n2} \cdot {}^{n2} T_{n3} \cdot {}^{n3} T_F$$

ここで、

$${}^B T_w = \begin{bmatrix} \cos q_w & -\sin q_w & 0 & 0 \\ \sin q_w & \cos q_w & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^w T_{n1} = \begin{bmatrix} \cos q_{n1} & -\sin q_{n1} & 0 & 0 \\ \sin q_{n1} & \cos q_{n1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & LF0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^{n1} T_{n2} = \begin{bmatrix} \cos q_{n2} & -\sin q_{n2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ \sin q_{n2} & \cos q_{n2} & 0 & LF2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^{n2} T_{n3} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & LF1 \\ -\sin q_{n3} & -\cos q_{n3} & 0 & -LF3 \\ \cos q_{n3} & -\sin q_{n3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^{n3} T_{e1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\sin q_{e1} & -\cos q_{e1} & 0 & -LF4 \\ \cos q_{e1} & -\sin q_{e1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^{n3} T_F = {}^{n3} T_{e1}(q_{e1} = 0)$$

である。

また、顔の正面F点に関するヤコビ行列は、次式で与えられる。

$$J_F = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \sin q_{n1} & \cos q_{n2} \cos q_{n1} \\ 0 & 0 & -\cos q_{n1} & \cos q_{n2} \sin q_{n1} \\ 1 & 1 & 0 & \sin q_{n2} \end{bmatrix}$$

## 4. 動作実験

3章で述べたアルゴリズムに基づいて、制御ソフトウェアを実装して動作実験を行った。図7, 8, 9にその動作実験の一例を示す。図7は直進歩行の動作である。図中の(a)~(c)は、初期状態から片足を半歩踏み出す動作であり、(c)~(f)は両足支持期から一步踏み出す動作である。図8は旋回歩行の動作例であり、図中の(a)~(c)は、支持脚の右足の股関節のヨー軸に回転運動を加えた旋回動作であり、(c)~(e)は、支持脚の左足の股関節のヨー軸に回転運動を加えた旋回動作である。この2つ旋回動作

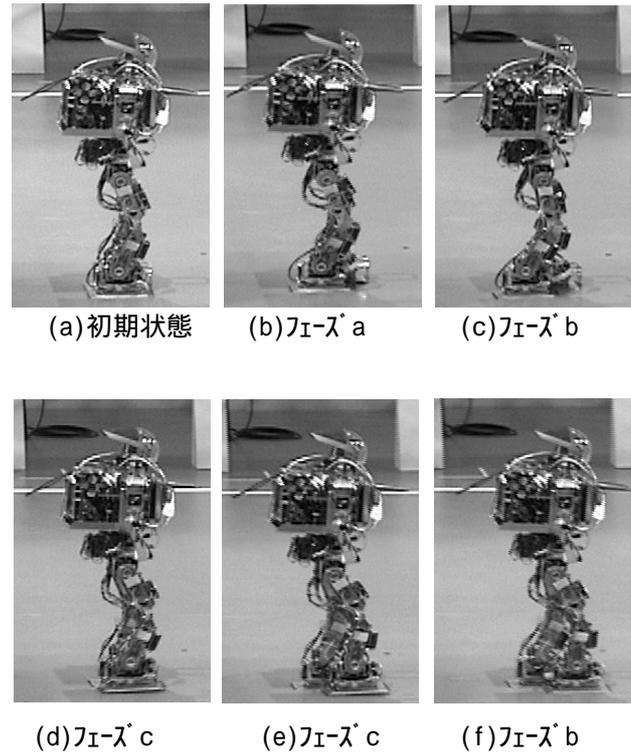


図7 直進歩行

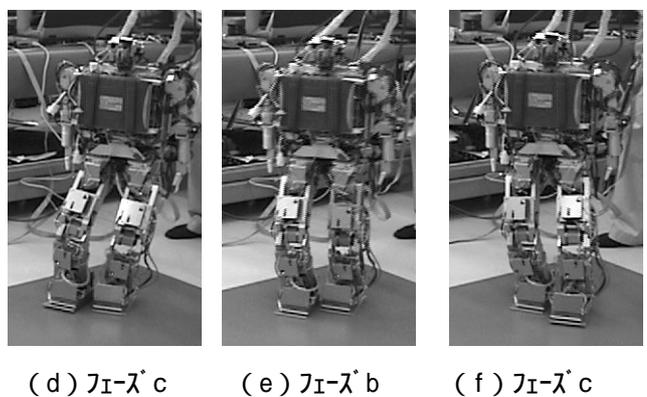
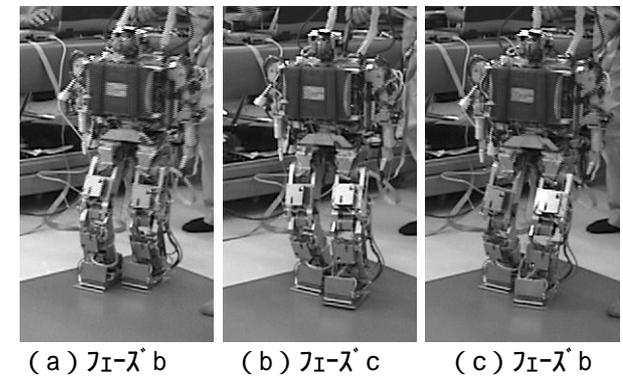
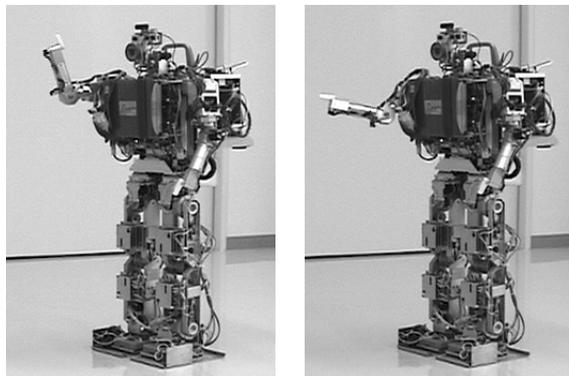


図8 旋回歩行

を一对として巡回動作を行う。(e)(f)は次の巡回動作である。図9は上肢のジェスチャの例で、図中の(a)は、あいさつのために手を挙げる動作であり、(b)は、目標物を指し示す動作である。いずれも設定したとおりに動作していることが確認できる。



(a) (b)  
図9 上肢のジェスチャ

## 5. まとめ

本年度の研究では、昨年度試作した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し、その実証試験を行った。実証試験においては、歩行動作が可能であることと、上肢（腕、顔）に関して設定したとおりに動作することを確認した。

今後は、人とのインタラクション制御ソフトウェアを開発し、親和性向上手法の検討をしていく予定である。

## 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 “ 線形倒立振り子モードを規範とする動的2足歩行ロボットの実時間制御 ” 機械技術研究所報告, 第171号
- [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, 光井, 西村, 千原, 田中 “ 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報告No3, pp.1-8, 2002

# ヒューマノイドロボット「ながら」の歩行技術に関する改良

- 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 -

千原 健司 稲葉 昭夫 光井 輝彰 小川 行宏

## Development of Walking Techniques of Humanoid Robot ‘NAGARA’

Kenji CHIHARA Akio INABA Teruaki MITSUI Yukihiro OGAWA

あらまし 本研究所では平成13年度よりヒューマノイドロボット「ながら」の開発を進めている。「ながら」は、福祉や介護といった民生分野で利用できるロボットの要素技術研究のためのプラットフォームとして開発された。民生分野で作業をするロボットは、これまでの産業用ロボットとは違い、人間と同じ空間で作業をしなくてはならない。人の生活環境を改造することなくそのままの状態でも自由に動き回るためには、ロボットの移動形態として2足歩行が適していると考えられ、「ながら」に採用されている。しかし平成13年度では直進歩行しかできず、また多少の段差があっても転倒してしまうため、その歩行性能は十分とはいえない。そこで本年度は、後退、旋回、横歩きといった基本歩行パターンを追加し、また歩行安定化のための足首ダンパを開発したので報告する。

キーワード ヒューマノイドロボット, 2足歩行, 歩行パターン, 歩行安定化

### 1. はじめに

現在、日本において少子高齢化が急速に進行しており、2025年には、2人で1人の高齢者の生活を支える必要があると言われている。その中で、人間型ロボットは、高齢者の介護や、人間と協調して作業を行うなど、人の生活環境に入って様々な活動を行う存在として期待が大きい。本研究所では、平成13年度よりヒューマノイドロボット「ながら」の開発を進めている。しかし平成13年度においては、直進歩行しかできず、また多少の段差があっても転倒してしまうため、人の生活環境に入って様々な活動を行うためには、その歩行性能は十分とはいえない。そこで本年度は、後進、旋回、横歩きといった基本歩行パターンを追加し、また歩行安定化のための足首ダンパを開発する。

### 2. 基本歩行パターン

「ながら」の歩行パターンは、ロボットを側面および正面から見た2次元平面に投影した運動（Sagittal Plane, Lateral Plane）に分解し、互いの運動の干渉は無視できると仮定し、それぞれの平面に対して定義されている<sup>[1]</sup>。Sagittal Planeに関しては、梶田<sup>[2]</sup>が提案した線形倒立振り子モードを規範とした歩行パターンの生成手法を参考にしている。Lateral Planeに関しては重心を唯一の質点とし、両足裏の中心へ無質量脚を下ろした倒立振り子の運動に基づいて定義している。「ながら」は、股にロール・ピッチ・ヨーの3自由度、膝にピッチの1自由度、足首にロール・ピッチの2自由度を両脚に有している（図1）。

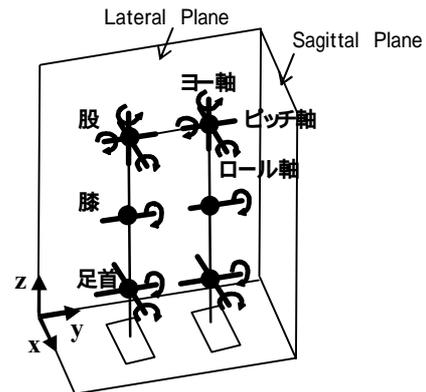


図1 ロボットの脚関節自由度

そこで、Sagittal Planeの運動に関しては、股・膝・足首のピッチ軸の駆動で、Lateral Planeの運動に関しては、股・足首のロール軸の駆動で、それぞれ定義した運動を実現している<sup>[1]</sup>。今回、新たに定義した旋回歩行パターンは通常の直進歩行パターンに加えて、股のヨー軸を駆動することにより実行される。横歩きパターンは、通常の直進歩行パターンの股と足首のロール軸の駆動に、横移動用の駆動関数を重ね合わせるにより実行される。後退パターンは、Lateral Planeの運動は直進歩行パターンと同じであるが、Sagittal Planeでの腰と足先の進行方向を反対にする。2.1節に旋回パターンに関して、2.2節に横歩きパターンに関して詳細を述べる。

#### 2.1 旋回パターン

旋回時に股関節のヨー軸に与える指令値の例を図2に示す。図の上段は、与える関節角度の指令値であり、中段は上段に対応する時間において脚を上から見た図であ

り、下段は正面から見た図である．この例では両脚の股関節のヨー軸に同じ指令値を与えている．指令値の立ち上がりと立ち下りの部分は速度が連続となるように3次関数で与える．また、体重が片足に乗りきれていない時に駆動させると慣性力によってバランスを崩すので、図2に示すように、股・足首のロール軸の駆動に対してやや遅らせて駆動させている．直進歩行パターンを0にすればその場で旋回し、歩幅を持たせれば歩きながら旋回する．以上の動作を機構解析ソフトウェアDADSによるシミュレーションによりパラメータ値を調整して歩行安定性を確認した後に、C言語により動作プログラミングを行った．

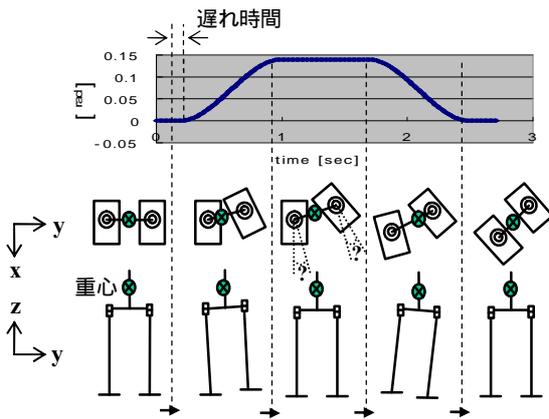


図2 旋回時に股のヨー軸に与える値

## 2.2 横歩きパターン

横歩き時に股と足首のロール軸に加える指令値の例を図3に示す．図3の図内配置は図2と同様である．この例では両脚の股と足首のロール軸に同じ指令値を与えている．3次関数で滑らかにし、基準となる股・足首のロール軸の駆動に対し遅らせることは旋回パターンと同様である．直進歩行パターンを0にすれば横歩きし、歩幅を持たせれば斜めに歩く．旋回パターンと同様にDADSによるシミュレーションによりパラメータ値を調整した後、動作プログラミングを行なった．

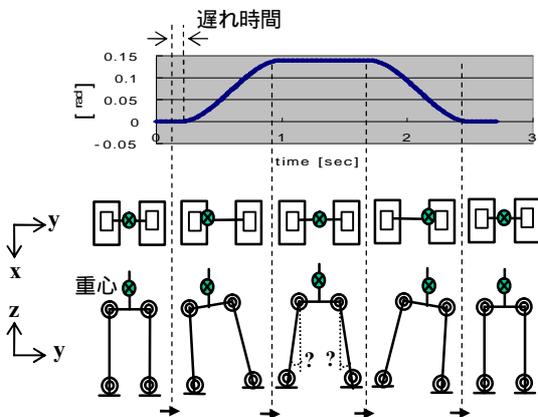


図3 横移動時に股と足首のロール軸に加える値

## 3. 足首ダンパによる歩行安定化

2足歩行ロボットにおいて着地時の衝撃は、歩行を不安定にさせる大きな要因であり、その衝撃を緩和するために、これまでも研究がなされている<sup>[3][4]</sup>．山口ら<sup>[3]</sup>はオープンセルフフォームとウレタンフォームの2層を組み合わせたものを足底部に装着し、着地時の衝撃を吸収している．広瀬ら<sup>[4]</sup>は足底部に、法線方向に対してゴムブッシュとガイド、水平方向に対してスポンジとゴムを配した構造で着地の衝撃を吸収している．これらの研究では緩衝材を足底部に装着することで歩行の安定性が向上することが確認されているが、緩衝材の取り付け部分の検討や、バネ定数、ダンパ定数に関する検討は行われていない．また、その緩衝機構は、その固有のロボット専用のものであり、他のロボットに使いまわしができない．そこで本研究では、衝撃吸収機構をロボットの部品ととらえ、装着・脱着が容易に行うことができる油圧ダンパを開発する．本章では、3.1節にダンパの取付け位置に関する検討を、3.2節にバネ定数、ダンパ定数に関する検討をDADSによるシミュレーションで行った結果を示す．3.3節に実際のロボットのモデルを用いて段差乗越えのシミュレーションを行った結果を示す．3.4節に油圧ダンパの設計方法を示す．3.5節に作成されたダンパの特性測定結果を示す．3.6節にダンパを装着したロボットの歩行実験の結果を示す．

### 3.1 取付け位置に関するシミュレーション

図4にダンパの取付け位置シミュレーションのモデルを示す．ダンパの取付け位置を境にして、Aは上半身と下半身の質量比が1:5のモデル、Bは1:1のモデル、Cは5:1のモデルである．全体質量は「ながら」と同等の16[kg]、足底の面は10cm×10cmの正方形とし、10cmから落下させる．バネ定数、ダンパ定数は20k[N/m]、2k[Ns/m]とした(3.2節参照)．床と足裏との衝突要素は、ヤング率 $7 \times 10^{10}$ [N/m<sup>2</sup>]、反発係数0.8とした．

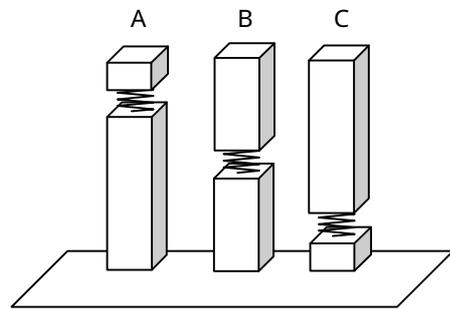


図4 取付け位置シミュレーションのモデル

図5にシミュレーションの結果を示す．横軸は時間、縦軸は足底を原点とした上/下半身の重心位置である．Aは上半身と下半身が共に振動的である．Bは下半身がやや沈み込むものの、上半身の変動が一番少ない．Cは上半身がやや沈み込むものの、下半身の変動が一番少ない．この結果から、ダンパは必ずしも足の底に取付ける

必要はなく、質量比が1:1の部分より下に付ければ十分に機能することが分かる。「ながら」では取付けの容易さから、足首部分に取付けることにした。

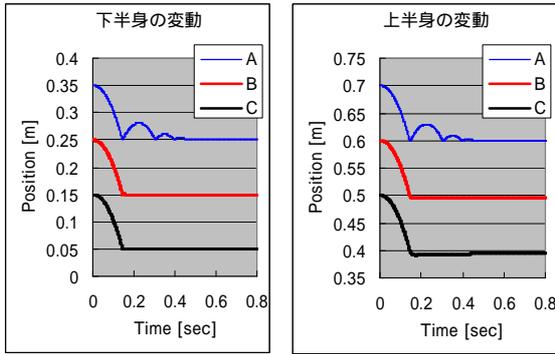


図5 取付け位置シミュレーション結果

### 3.2 バネ定数, ダンパ定数のシミュレーション

図4のCのモデルにおいて、バネ定数とダンパ定数を変化させ、落下シミュレーションを行った。質量、衝突要素などの条件は3.1節と同様である。図6にバネ定数を20k[N/m]で固定して、ダンパ定数を1k[Ns/m], 2k[Ns/m], 3k[Ns/m]と変化させた場合のシミュレーション結果を示す。ダンパ定数が小さいと足と胴体部分が衝突し上半身と下半身が大きく変動する。ダンパ定数大きいと上半身が静定する時間が長くなるので、上記条件では2k[Ns/m]が適当であることが分かる。

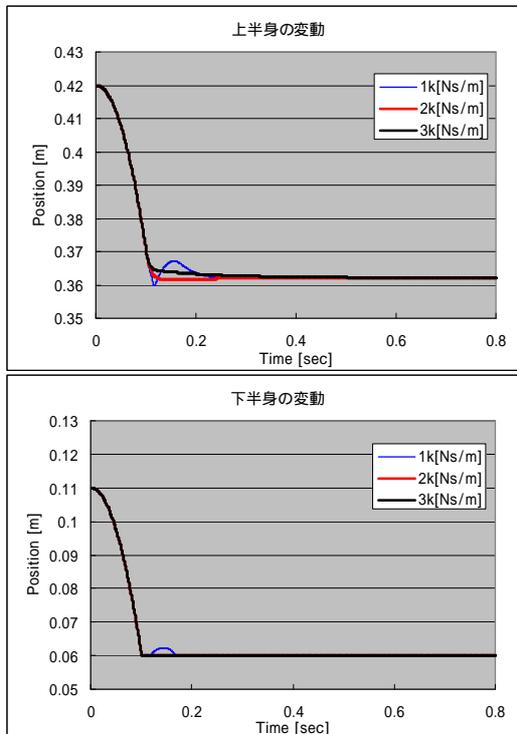


図6 ダンパ定数を変えた時の結果

図7にダンパ定数を2k[Ns/m]で固定して、バネ定数を10k[N/m], 140k[N/m], 300k[N/m]と変化させた場合のシミュレーション結果を示す。バネ定数が小さいと上半身

が沈み込みすぎ、バネ力よりも粘性力の方が大きいと足が遊脚である間に復帰できない。バネ定数大きいと着地後しばらくして足底が跳ね上がることが分かる。この条件の他に、バネ定数をいろいろ変えてみた結果、20k ~ 140k[N/m]が適当であった。

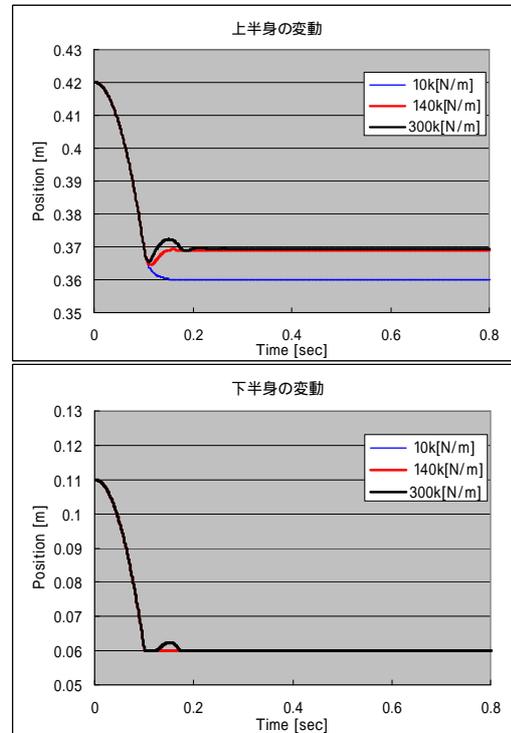


図7 バネ定数を変えた時の結果

### 3.3 段差乗越えシミュレーション

可動範囲10[mm], 自由度を鉛直方向のみとし、バネ定数20k[N/m], ダンパ定数2k[Ns/m]としたバネダンパ要素を、足首部分に取付けた2足歩行ロボットのモデルを用いて±4[mm]の段差を乗越えるシミュレーションをDADSにて行った。バネダンパ要素がない場合は乗越えられなかった段差を、乗越えられることを確認した。足が着地した直後は着地した足のダンパが衝撃を吸収し、その後、両足のダンパが連動してスムーズに体重が移動している様子が確認できた。

### 3.4 ダンパの設計

市販されているショックアブソーバで一般的に使用されているシリコンオイルを用いたダンパを製作する。自由度を鉛直方向に固定し、十分な剛性を持ち、かつストロークが10mmで止まるように、図8のような構造を提案する。可動部分の半径をr, 隙間をg, 隙間高さをh, 充填オイルの粘度をμとすると、この構造におけるダンパ係数は、隙間から逆流するオイルとシリンダの摩擦によるせん断応力から計算すると、式(1)となる。

$$D = \frac{4prhm}{g} \left( 1 + \frac{3r}{4g} \right) \cong \frac{3pr^2hm}{g^2} \dots (1)$$

シリコンオイルにGE東芝シリコン社製のTSF451-3M

(粘度  $\mu = 29.2[\text{Pa} \cdot \text{s}]$ ) を使用し,  $r=15[\text{mm}]$ ,  $h=8[\text{mm}]$  とすると, 3.2節で求めた  $D=2\text{k}[\text{Ns/m}]$  としていた場合は式(1)を変形して式(2)より求められる.

$$g = \sqrt{\frac{3pr^2hm}{D}} \cong 0.5[\text{mm}] \quad \dots(2)$$

バネはシミュレーションの結果に従って  $20[\text{N/m}]$  のものを使用した. 材料は, はめ合いが生ずる部分には S45C を, その他の部分は軽量化のため A5056 を用いた.

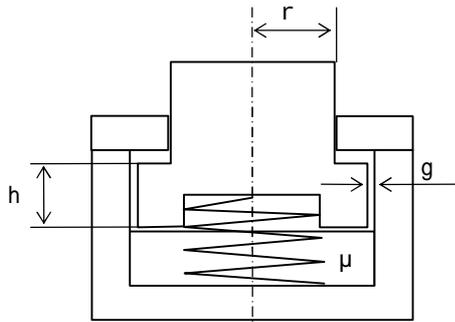


図8 ダンパ構造

### 3.5 ダンパの同定実験

11[kg]のおもりをダンパに接した状態から落とし, ダンパの変位量を測定した. これは約  $108[\text{N}]$  の力の単位ステップ入力を行うことに等しい. 測定結果の最大変位量を用いてバネ定数を求めた後, 時系列データを用いて, Matlabのコントロールツールボックスによるシミュレーションとのヒューリスティックなマッチングにより, ダンパ定数を求めた. 2個のダンパを作成し, それぞれについて測定したところ, バネ定数は  $34.8[\text{N/m}]$ ,  $51.8[\text{N/m}]$ , ダンパ定数は  $2.2\text{k}[\text{Ns/m}]$  と  $2.8\text{k}[\text{Ns/m}]$  であった. 設計値との相違や, 2つのダンパ間の特性の差は, ダンパ内の気泡の量や位置によるものと考えられるため, これら特性差を改善するのであれば, 空気を含まない構造にすべきである.

### 3.6 歩行実験

これまでの「ながら」の安定歩行の限界は, 歩幅  $60\text{mm}$ , 足の上げる高さ  $6\text{mm}$ , 乗り越え段差は  $1\text{mm}$  である. そこで, 両足首部に作成したダンパをとりつけ, 以下の3種類の実験をおこない, ダンパの有効性を確かめる. A) 歩幅は  $60\text{mm}$  で一定で足を上げる高さを変える. B) 足を上げる高さは  $20\text{mm}$  で一定で歩幅を変える. C) 歩幅  $100\text{mm}$ , 足を上げる高さは  $20\text{mm}$  で,  $3\text{mm}$  の段差を乗り越える. 以下に実験結果と考察を述べる.

A) 歩幅は  $60\text{mm}$  で一定で足を上げる高さを変える

図9に示すように, 足の上げる高さを  $30\text{mm}$  にしても安定して歩行することを確認した. これまでの限界であった  $6\text{mm}$  と比較すると大幅に改善されたことが分かる.



図9 足上げ高さ  $30\text{mm}$  の歩行の様子

B) 足を上げる高さは  $20\text{mm}$  で一定で歩幅を変える. 歩幅  $120\text{mm}$  までは安定して歩行したが,  $150\text{mm}$  まで広がると転倒した. この転倒を観察すると, 支持脚のヨー軸まわりのスリップが原因と考えられるため, 上半身による補償が必要と考えられる. ただし, これまでの安定限界であった  $60\text{mm}$  と比較すると大幅な効果が認められる.

C)  $3\text{mm}$  の段差を乗り越える

図10に示すように  $3\text{mm}$  の段差を安定して乗り越えることができた.  $5\text{mm}$  の段差も実験は行ったが, これは転倒してしまった. これ以上の段差は歩行パターンを変えることにより対応すべきであると考えられる.



図10 段差乗り越え実験

## 4. まとめ

後進, 旋回, 横歩きといった基本歩行パターンを作成し, その生成方法について解説した. また歩行安定化のための足首ダンパを開発し, その有用性をシミュレーションと実機での実験により確認した. 今後は足首ダンパを改良し, 特性のパラッキの改善を計る予定である.

## 文献

- [1] 稲葉, 光井, 西村, 千原, 田中 “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報告No3, pp.1-8, 2002
- [2] 梶田秀司 “線形倒立振り子モードを規範とする動的2足歩行ロボットの長時間制御”, 機械技術研究所報告, 第171号, 1996
- [3] 山口仁一, 高西淳夫, 加藤一郎 “衝撃緩衝材料を用いた足底機構による2足歩行の安定化と路面位置情報の取得”, 日本ロボット学会誌, Vol.14, No.1, pp.67-74, 1996
- [4] 広瀬真人, 竹中透, 五味洋, 小澤信明, “人間型ロボット”, 日本ロボット学会誌, Vol.15, No.7, pp.983-985, 1997

# 繰り返し順変換を用いた立脚ロボットにおける持ち上げ動作生成

張 勤      稲葉 昭夫      関 啓明\*      足津 正利\*      神谷 好承\*

## Lift-up Motion Generation for Stance Robot using Repeatedly Direct Kinematics

Qin ZHANG    Akio INABA    Hiroaki SEKI\*    Masatoshi HIKIZU\*    Yoshitsugu KAMIYA\*

あらまし 多関節構造を有する立脚ロボットのような機械においては、まずロボット本体が転倒しないように、また全関節にかかる負荷トルクができるだけ小さくなるリンク姿勢を選択することが可能である。本研究では立脚ロボットの持ち上げ動作を一例として取り上げ、ロボットが平面から持ち上げ動作、あるいは斜面から持ち上げ動作の生成に伴う各関節の軌道生成に関する考察を試みる。本研究では立脚ロボット（5自由度）のモデルを考察の対象とし、ロボットが転倒しなく、かつ全関節にかかる負荷トルクをできるだけ小さくする姿勢を繰り返し順変換を用いて逐次選択することによりロボットにおける荷物の持ち上げ動作生成を試みる。

キーワード 立脚ロボット, 繰り返し順変換, 持ち上げ動作生成, 負荷トルク

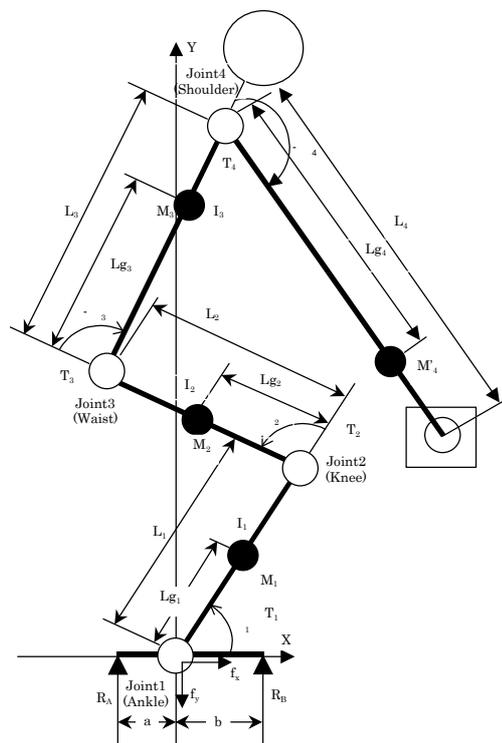
### 1. はじめに

多関節構造を有する立脚ロボットにおいては、そのリンク姿勢を巧みに操作することにより所望の動作が得られる。立脚ロボットを用いた荷物の持ち上げ作業に関しては、まず、荷物の持ち上げ動作時にロボットが転倒しないこと、そして各関節に作用する関節負荷トルクをできるだけ小さくすることなどが求められる。これらは荷物の持ち上げ動作中のロボットの各関節の曲げ角の与え方に依存している。ロボットにおける各関節の軌道生成手法として遺伝的アルゴリズムを用いた研究がこれまでも数多くなされているが、遺伝的アルゴリズムでは軌道生成の評価に用いる適合度関数の与え方には多様性があり、適合度関数中の重み係数は計算結果を見ながら与えることが多い。本研究では関節負荷トルクや関節曲げ角における幾何学的拘束などの多様な評価を設けることのできる最適化のためのアルゴリズムとして繰り返し順変換を用いることとし、立脚型ロボットにおける荷物の持ち上げ動作の生成を試みる。

### 2. 繰り返し順変換を用いた持ち上げ動作生成のアルゴリズム

#### 2.1 立脚型ロボットのモデル

本研究では図1に示すような立脚ロボットを考察の



| Joint  | 1   | 2    | 3   | 4   |
|--------|-----|------|-----|-----|
| M(kg)  | 9.6 | 14.4 | 36  | 30  |
| L(mm)  | 463 | 450  | 787 | 700 |
| Lg(mm) | 180 | 252  | 311 | 600 |
| i(deg) | 60  | 90   | -80 | -90 |

図1 立脚ロボットのモデル

\* 金沢大学 工学部

対象とする。図1のロボットは5つの自由度(4つの関節と前後移動)を持ち、リンク $L_1$ とリンク $L_2$ が人間の脚部に、リンク $L_3$ 、 $L_4$ が人間の上半部と腕に対応している。立脚ロボットの場合、各関節は減速機つきモータで駆動されることが多いため、本研究では十分にゆっくりとした立脚型ロボットの運動を扱うことを前提とする。このため、各リンクの持つ慣性力の影響を無視し、ロボットの持つ静力学的性質に基づいて議論する。このとき、立脚型ロボットがその姿勢を維持するために各関節に作用する関節トルク( $T_1, T_2, T_3, T_4$ )と足底部のつま先とかかとに作用する床反力( $R_A, R_B$ )は次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} T_4 &= M'_4 L_{g4} g \cos(\mathbf{q}_1 + \mathbf{q}_2 + \mathbf{q}_3 + \mathbf{q}_4) \\ T_3 &= (M_3 L_{g3} + M'_4 L_3) g \cos(\mathbf{q}_1 + \mathbf{q}_2 + \mathbf{q}_3) + T_4 \\ T_2 &= \{M_2 L_{g2} + (M_3 + M'_4) L_2\} g \cos(\mathbf{q}_1 + \mathbf{q}_2) + T_3 \\ T_1 &= \{M_1 L_{g1} + (M_2 + M_3 + M'_4) L_1\} g \cos \mathbf{q}_1 + T_2 \\ R_A &= \frac{T_1 + b(M_1 + M_2 + M_3 + M'_4)g}{a + b} \\ R_B &= \frac{-T_1 + a(M_1 + M_2 + M_3 + M'_4)g}{a + b} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここでロボットが転倒しないためには $R_A > 0$ かつ $R_B > 0$ であることが必要である。これよりロボットが転倒しないためには足首部の関節に発生させ得るトルク( $T_1$ )には限界が存在することになる。

$$-b(M_1 + M_2 + M_3 + M'_4)g \leq T_1 \leq a(M_1 + M_2 + M_3 + M'_4)g \quad (2)$$

関節トルク $T_2, T_3$ と $T_4$ については任意に発生トルクの限界値を設定することができる。本研究では以下のような発生トルクの範囲を設けた場合を一つの基準として扱うこととする。

$$\left. \begin{aligned} |T_2| &\leq 300 \text{ Nm} \\ |T_3| &\leq 350 \text{ Nm} \\ |T_4| &\leq 200 \text{ Nm} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

以上の議論をふまえて、本研究では、上式(1)に基づいた立脚型ロボットにおける各関節の軌道生成を試みる。

## 2.2 繰り返し順変換による持ち上げ動作生成のアルゴリズム

本研究では各関節軌道の生成に用いる評価内容が力学的により直接的に与えられるように繰り返し順変換の手法を用いて解析することとする。これはロボットにおける順運動学を繰り返し解き、そのとき用いる評価内容に最も適した解としての各関節の曲げ角を逐次選択していく手法であり、比較的容易に最終的なロボット姿勢を生成できる単純なアルゴリズムである。

以下に繰り返し順変換を用いた動作生成アルゴリズムの概略を示す。

発生可能な各関節でのトルク範囲 $T_{i\max}$  ( $i=1 \sim 4$ )を設定する。

4つの関節、1つの移動(足の前進・後退)それぞれについて( $- \quad_i, 0, + \quad_i$ )( $i=1 \sim 5$ )だけの微小増分を加えることにより、その姿勢近傍に $3^5$ 通りのロボット姿勢を得る。

ロボットの肩位置が上昇するロボット姿勢を選択。このときにすべての解が $R_A \cdot R_B < 0$ の場合にはロボットが転倒することになるため、負である $R_A$ あるいは $R_B$ がより大きくなるロボット姿勢を選択し(このときロボットは荷物を持ち上げることはできない)へ戻る。

$R_A > 0$ かつ $R_B > 0$ の姿勢を選択する。条件を満たしたロボット姿勢の各関節の負荷トルク $T_i$ を求め、次に $H_i (= T_i / T_{i\max})$   $i=1 \sim 4$ を求める。 $H_i$ の最大値 $H_{i\max}$ をそれぞれの姿勢で比較し、その中で $H_{i\max}$ が最も小さい姿勢を選択し、へ戻る。

ロボットの肩位置が上昇しない時、荷物を持ち上げたとし、プログラムが終了する。

上述のアルゴリズムは、基本的には、あるロボット姿勢における4つの関節の中で最もつらい関節に対して最も余裕を持たせようとする考え方である。

## 3. シミュレーション事例

### 3.1 荷物の持ち上げ動作

上述のアルゴリズムを用いて計算した荷物の持ち上げ動作のシミュレーション結果を図2に示す。ロボットが30kgの荷物を持ち上げようとするが足底反力が転倒条件に入っているため荷物の方へロボットが近づき、その後で荷物の持ち上げ動作に移っている。図2(a)はロボットの前進の様子、(b)は持ち上げ動作時の各関節の曲げ角の様子、(c)は各関節のトルクの様子、(d)は各関節の $H_i$ の様子、(e)に足底床反力、(f)にロボットのZMPの位置を示す。

### 3.2 立ち上がり動作

ロボットが荷物を持たない、腕に自重(3kg)だけを与える場合、ロボットの立ち上がり動作のシミュレーション結果を図3に示す。図2と比較すると、立ち上がる場合より、持ち上げる場合の方が、膝にかかるトルクが大きいことがわかる。

### 3.3 斜面における荷物の持ち上げ動作

立脚ロボットが斜面上で荷物を持ち上げるとき、転倒しやすくなる。ロボットが斜面上で荷物を持ち上げるときの動作シミュレーション結果を図4に示す。

### 3.4 斜面における立ち上がり動作

手荷物が無い場合、腕の姿勢が立ち上がる動作に与える影響が小さくなる。腕の姿勢は立ち上がり動作中はフリーである。シミュレーション結果を図5に示す。

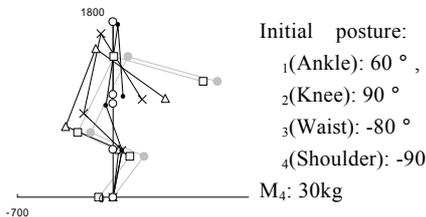
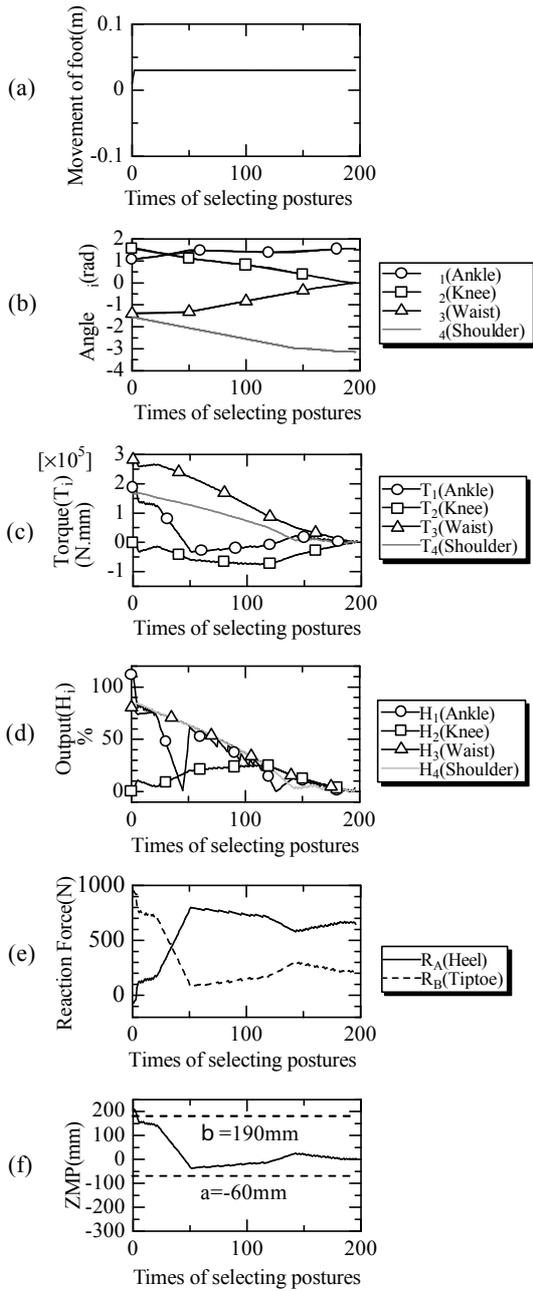


図2 持ち上げ動作の生成

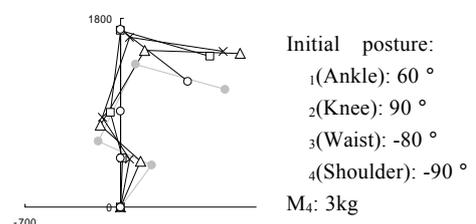
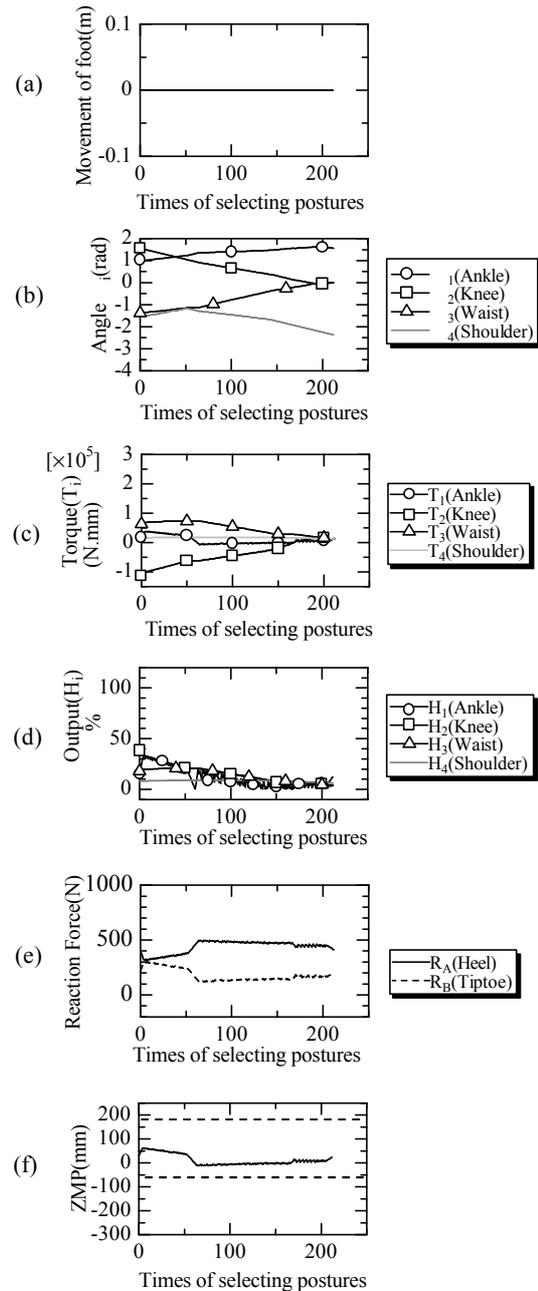


図3 立ち上がり動作の生成

#### 4. 結 言

本研究では繰り返し順変換の手法を用いて多関節構造を有する機械の一つである立脚型ロボットにおける荷物の持ち上げ動作の軌道生成を試みた。本研究を通して得られた結論をまとめて以下に述べる。

- (1) 繰り返し順変換の中でロボットが転倒しなく、かつ全関節にかかる負荷トルクをできるだけ小さくする姿勢を逐次選択していくことにより、立脚ロボットにおける荷物の持ち上げ動作を生成した。
- (2) 今後は本アルゴリズムを用いて福祉機器における手すりの効果について発展させていく予定である。

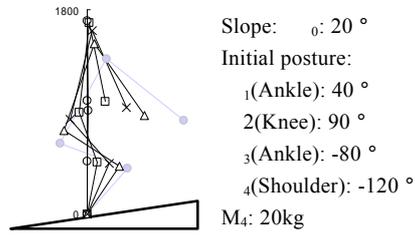
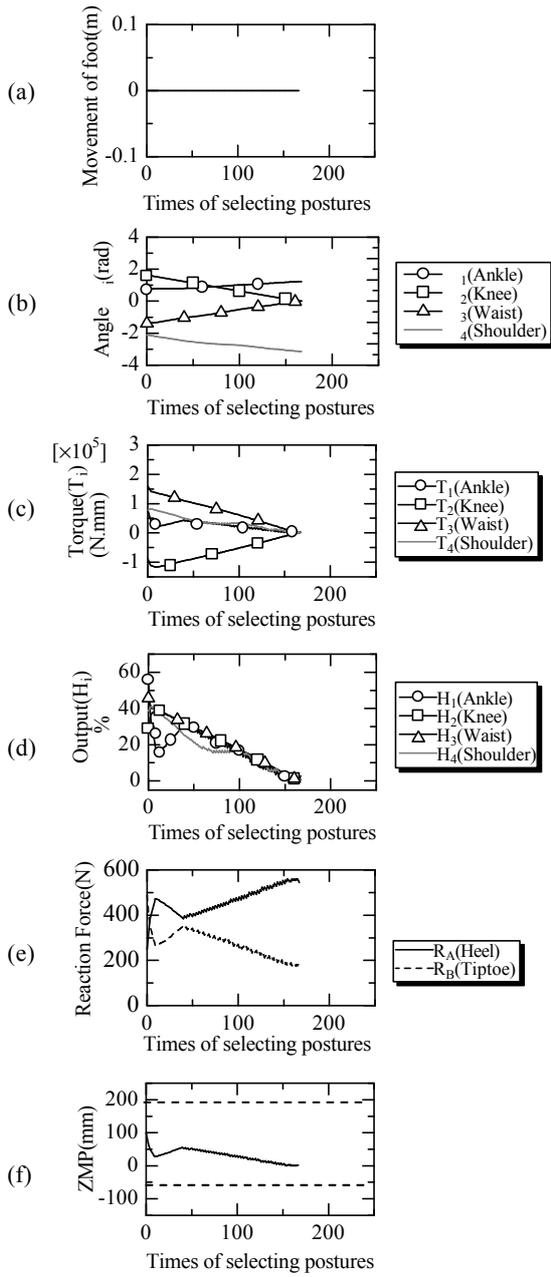


図4 斜面上における持ち上げ動作の生成

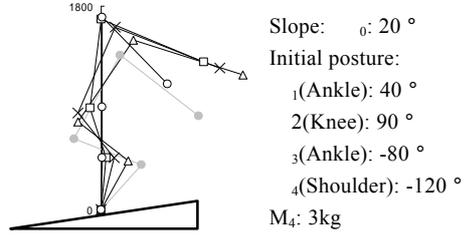
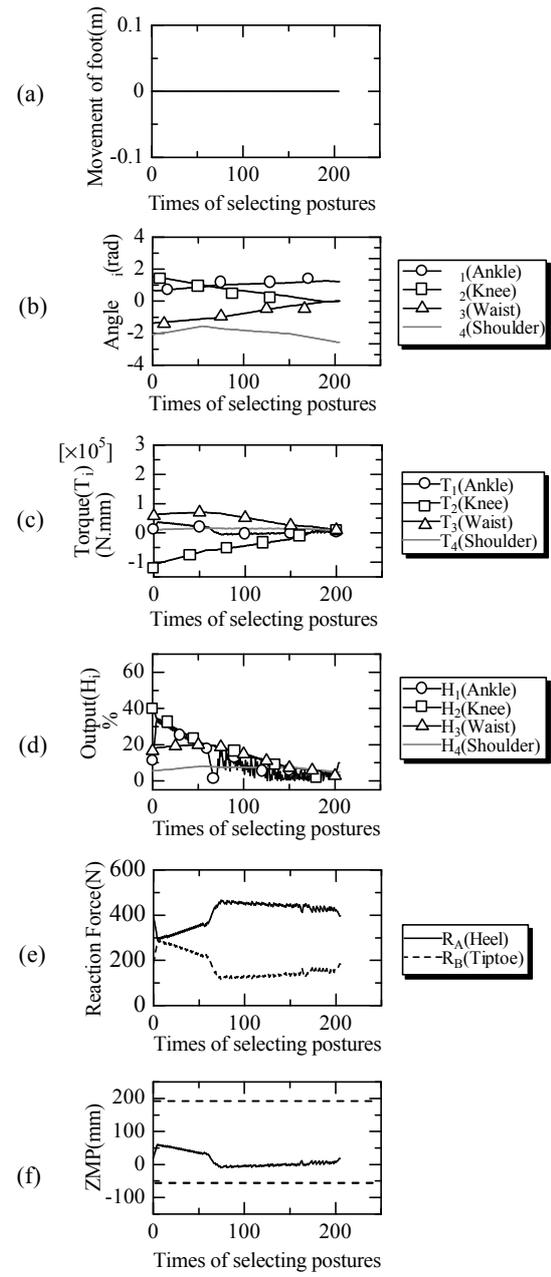


図5 斜面上における立ち上がり動作の生成

文献

[1] 神谷好承, 久保哲也, 青柳誠司, 岡部佐規一, “繰り返し順変換によるロボットの運動制御”, 日本機械学会論文集(C編), vol.59, No.564, pp125-130, 1993.

[2] 小栗健一郎, 宮田なつき, 太田順, “個人差を有する人間動作のモデル化, (第2報) 動作全体に対する評価関数を用いた持ち上げ動作生成”, 日本ロボット学会創立20周年記念学術講演会, 2002.

[3] 宋祿波, 神谷好承, 張勤, “多関節構造有する機械の軌道生成に関する考察”, 精密工学会誌, vol.67, No.12, pp.1966-1969, 2001.

# ヒューマノイドインターフェースに関する研究

～ 表情認識ソフトウェアの実装と精度検証 ～

小川 行宏

山本 和彦\*

稲葉 昭夫

杉山 正晴

## Research on Humanoid Interface

- Implementation and Accuracy Verification about Expression Recognition -

Yukihiro OGAWA Kazuhiko YAMAMOTO\* Akio INABA Masaharu SUGIYAMA

あらまし 著者らはこれまでに人とロボットが共存するための要素技術として人とロボットのインタラクションの中で人の意図に着目したシステムを提案してきた。本システムは人の意図の中で顔の表情に着目し、顔の表情を検出することにより、それに応じて行動するシステムである。本報告ではその中で重要な要素となる人物認識及び表情認識について、ヒューマノイドロボットに実装した。また、ヒューマノイドロボットにより人物・表情認識を行い、システムの有効性を確認した。表情の認識手法に人物認識の認識結果により表情認識辞書を選択する手法を用い実験により手法の有効性を確認した。

キーワード インタラクション、画像処理、人物認識、表情認識

### 1. はじめに

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

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

これまでに人と共存するロボットの研究開発において様々な手法が検討されてきている<sup>[1-5]</sup>。個人を識別し個人ごとにアクションする手法や、人とロボットのインタラクションにおけるインターフェースのモデルの提案などが挙げられる。しかし、より親密なインタラクションを実現するためには相手の意図に基づいてリアクションすることが大切であり、このような取り組みを行っているものは少ない。

著者らはこれまでに人がロボットに親しみを感じるための手法として、人とロボットのインタラクションの中

で人の意図に着目するシステムについて検討してきた<sup>[6]</sup>。本システムは人の意図の中で顔の表情に着目し、顔の表情を検出することにより、それに応じて行動するシステムである。本報告ではこのシステムの枠組みをヒューマノイドロボットに適用するために、人物認識及び人の表情認識をヒューマノイドロボットに実装したので報告する。図1に実装したヒューマノイドロボット及び人とヒューマノイドロボットのインタラクションの様子を示す。

本報告は次のような構成になっている。2章ではこれまでに提案してきたシステムについて述べる。3章ではロボットへの人物・表情認識の手法について述べ、4章で認識手法の評価実験を行う。5章でまとめる。

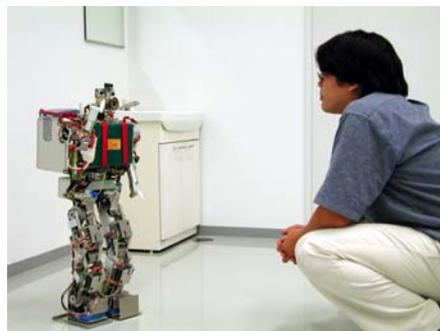


図1 ヒューマノイドロボット「ながら-2」と人間とのインタラクションの様子

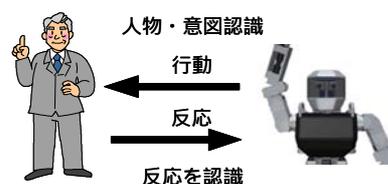


図2 システムの概要

\* 岐阜大学 工学部 応用情報学科

## 2. 親近感創出のための戦略

### 2.1 基本戦略

著者らはこれまで人とロボットの親和性を向上させる手法として、人とロボットのインタラクションの中で人の意図に着目したシステムを検討してきた。本章ではこのシステムの概略について述べる。

図2にシステムの概略を示す。本システムにおいて相手が誰であるかを特定し、どのような意図を持っているのかを知ることが重要である。まず、ロボットは人物認識と人の意図認識を行い( )、得られた認識結果に応じて行動を切り替える( )。さらに、ロボットが行動した後に、ロボット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( )、ロボットの行動に対する評価・学習をする。環境の認識と行動(決定・学習)の操作を繰り返し行うことにより人とロボットの間に徐々に親近感が創出されることを期待する。

本システムの中で最も重要となるのが意図の認識であり、著者らは意図の中でも顔の表情に着目する。顔の表情は意図の中で目に見える形で認識可能なものの一つであり、意図の表現の中で重要な役割を果たしていると考えられる。本研究では予め顔のポーズを表情として定義しそれを認識する。例えば、「顔をしかめている」場合は「怒っている表情」とする。この定義は全ての場合で成立するわけではないが一般的な表情においては多くの場合に成立すると考えられる。

### 2.2 システム構成

図3に提案したシステムの構成を示す。ロボットにはカメラとマイクを装着する。カメラからの画像を用いて人物認識及び顔ポーズ認識を行う。マイクからの音声を用いて音声認識を行う。画像認識、音声認識ともに常に入力を受け付けることが可能で、双方の認識結果に基づいて行動を決定し、実際に行動に移る。ロボットの行動にはロボット動作及び音声を使用する。ロボットの動作に対する人のリアクションがロボットに対する次の入力となる。さらに、ロボットは顔ポーズの認識を行うことにより直前の行動を評価し学習する。

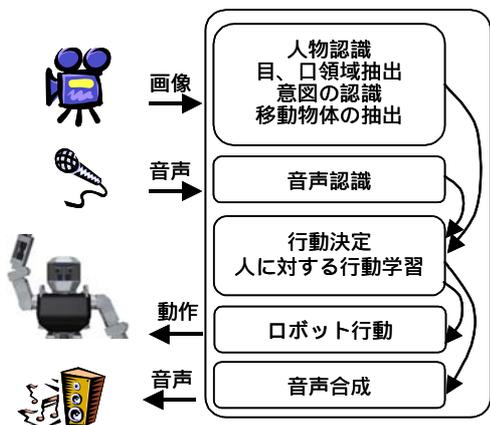


図3 システムの構成

## 3. 人物・表情認識ソフトウェアの実装

本システムではカメラから得られる画像を用いて人物・表情認識を同時に行う。本章ではロボットの画像処理ハードウェア及びそのハードウェアを使用した認識手法について述べる。

### 3.1 画像処理ハードウェア

画像処理を行うためのビジョンセンサとしてVision sensor IP7500EB(株)日立ハイコス)を使用した。図4にIP7500EBの外観を示す。IP7500EBはCPUにSH-4<sub>0S</sub>にLinuxを採用した組込み型のビジョンセンサである。専用画像処理プロセッサSuperVchip(166MHz)を搭載しており高速に画像処理を行うことが可能である。

### 3.2 顔領域の抽出

入力画像から顔の特徴量を抽出するまでの流れを図5、抽出過程を図6に示す。まず、入力画像から色情報を用いて人物の肌色らしき領域を抽出し<sup>[7]</sup>(図6(b))、抽出した肌色領域のうち最大の肌色領域を顔領域候補とする。肌色領域の抽出には人の色に対する感覚に近い均等知覚色空間の一つであるLUV表色系を用いることにより環境の変化や個人差に対応した肌色抽出を行う<sup>[8]</sup>。

次に顔候補領域の水平・垂直方向エッジを抽出し、水平方向エッジをy軸方向(縦)に、垂直方向エッジをx軸方向(横)に射影したヒストグラムを作成する(図6(c))。水平方向エッジのヒストグラムのピーク値を求めることにより顔候補領域中の目の位置を推定する。図6(c)では水平方向の白いラインで示したのが検出した目の位置である。また、垂直方向エッジのヒストグラムの左右からそれぞれのピーク値を求めることにより顔のサイドラインの位置を求めることができる。サイドラインにより顔の幅を決定する。図6(c)中の垂直方向の黒ラインで示したのが検出したサイドラインである。求めた目の位置と顔幅から顔領域の上部、下部を決定する。これらは顔幅に予備実験で求めた一定の比率をかけた値を目の位置の上下に取ることで求める。図6(d)の黒のラインが抽出した顔領域である。



図4 IP7500EB外観

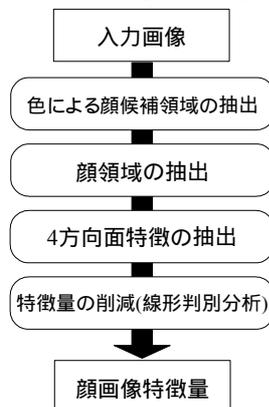


図5 顔特徴量抽出の流れ

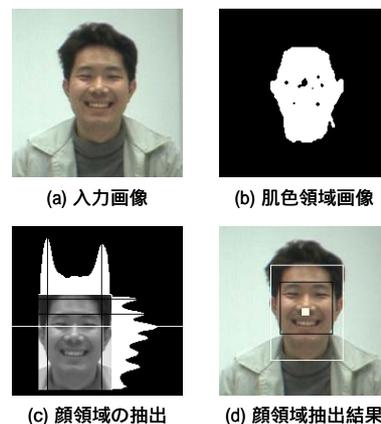


図6 顔領域の抽出

### 3.3 特徴量の抽出

顔領域からエッジ特徴である4方向面特徴<sup>[9]</sup>を抽出し、線形判別分析により特徴量を算出する。一般的にエッジ特徴は文字認識や人物認識の分野で良く用いられている手法である。その中でも4方向面特徴は濃淡の入力画像に対し方向検出フィルタを用いて、方向毎にエッジ強度を濃淡特徴とする手法である。ここで4方向面とは水平方向面、右上がり方向面、垂直方向面、右下がり方向面のことである。4方向面特徴は高次特徴面に分けた後、低解像度化しているため、1つの画像を4方向面に分ける前にエッジを抽出し解像度を落とす場合と比べて、高解像度でのエッジ情報が残る。また、4方向面特徴では非常に低い解像度まで落とすため、顔自体や顔部品の位置のわずかなずれが特徴量に及ぼす影響が少なくなるという性質を持っている。図7に方向検出フィルタを用いて4方向面特徴を抽出した例を示す。

### 3.4 人物・表情判別

本システムでは、人物認識用の辞書及び各個人ごとの表情認識用の辞書を予め抽出した特徴から線形判別分析により作成し使用する。抽出した顔特徴量と辞書のユークリッド距離を計算し、辞書ごとの距離を比較することにより人物・表情認識を行う<sup>[10]</sup>。線形判別分析はより少ない次元でクラス間の分散を最大限強調する線形写像を構成する多変量解析手法である。

図8に人物・表情認識の流れを示す。まず、入力画像から得られた特徴量を人物認識用の辞書データと比較し人物認識を行う。次に得られた人物認識結果を用いて認識した個人の表情辞書を選択する。選択した辞書と入力された特徴量を比較することによって表情認識結果を得る。

## 4. 人物・表情認識実験

本章ではロボットに実装した画像認識システムの認識実験を行う。

### 4.1 実験手法

各認識実験は6人の4つの表情(無表情・笑い・怒り・驚き)を対象とする。実験に用いる画像は「(無表情 笑い) × 3 (無表情 怒り) × 3 (無表情 驚き) × 3」と連続して顔の表情を変化した映像を約4フレーム/秒で取得した画像を用いる。1人につき約1000枚の画像を取得し、取得した画像を無表情・笑い・怒り・驚き・その他(表情変化の途中)と分別し、1人1表情につき54枚、合計1296枚の画像を使用した。そのうち半数を学習用データとし、残りの半数を未学習用データとして使用した。図9に人物・表情認識実験に使用した画像の一部(顔部分を切抜いたもの)を表示する。学習用データを用いて人物認識用辞書、各個人の表情認識用辞書を作成した。

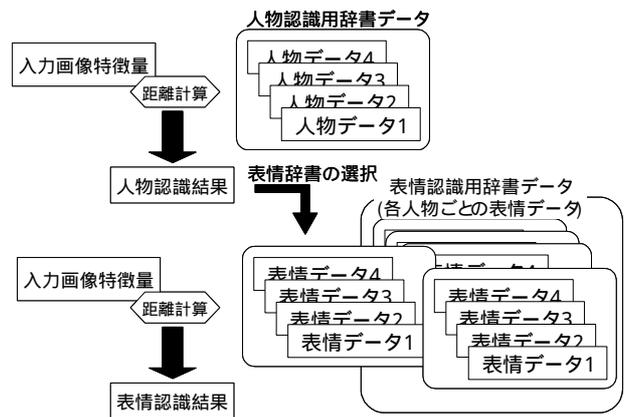


図8 人物・表情認識の流れ

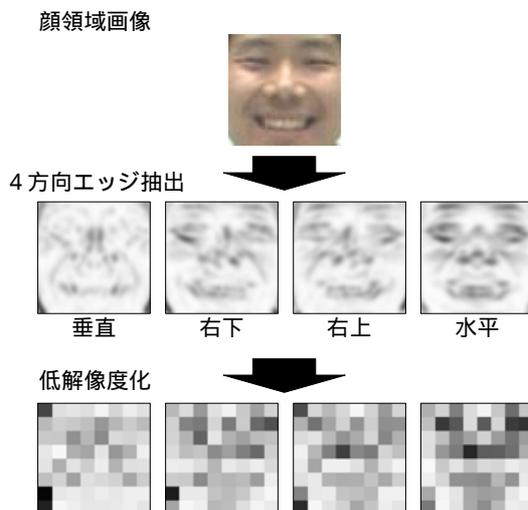


図7 4方向面特徴の抽出



(A) 驚き (B) 喜び (C) 怒り (D) 通常

図9 人物・表情認識の実験画像の一部(切抜き)

#### 4.2 人物認識結果

未学習用データに対する人物認識の結果を図10に示す。縦軸は認識率である。未知データの認識率は平均で99.54%と各人物ともに高い認識率となり、本システムにおいて人物の顔特徴の空間をうまく分割しており信頼性の高いものといえる。

#### 4.3 表情認識結果

本システムでは人物認識結果に基づいて表情認識の個人用辞書を選択する。この手法の有効性を確認するため全員分の表情を分類する1つの共通辞書を用いた場合と本システムの個人辞書を用いた場合の比較を行った。

未学習用データに対する表情認識の結果を図11に示す。共通辞書を用いた認識結果と本システムで用いた個人毎の認識結果を示す。縦軸は認識率である。

各表情ともに個人用辞書を用いた手法の認識率が高くなっている。共通辞書の認識率の平均は91.15%，個人毎辞書の認識率の平均は平均94.6%であり、本システムで用いた手法の有効性が確認できた。

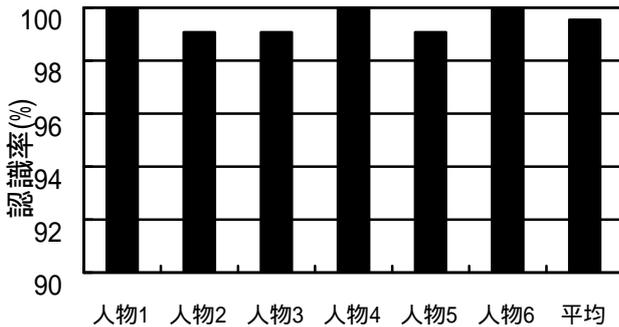


図10 人物認識の認識率

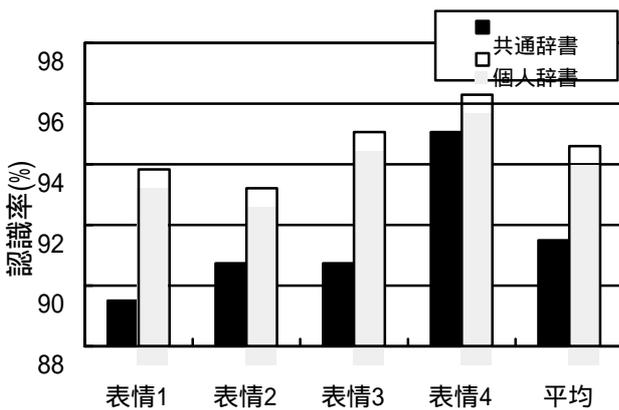


図11 表情認識の認識率

## 5. まとめ

著者らは人とロボットの親和性の創出を目的として、インタラクションに基づくシステムを提案してきた。本報告ではその中で重要な要素となる人物認識及び表情認識について、ヒューマノイドロボットに実装した。実装したソフトウェアを用いて人物・表情認識の評価実験を行い高い認識率が得られることを確認した。また、表情の認識手法に人物認識の結果に基づいて表情認識辞書を選択する手法を導入することにより、認識率の向上を図った。

実際に人とロボットのインタラクションの中でシステム全体を動作させることが今後の課題である。

## 文献

- [1] 日本電気株式会社, “パーソナルロボット「Papero」”, <http://www.incx.nec.co.jp/robot/>
- [2] 藤田雅博, “ロボットエンタテインメント: 小型4脚自律ロボット”, 日本ロボット学会誌 Vol.16 No.3, pp.313-314, 1998.
- [3] 株式会社国際電気通信基礎技術研究所, “日常活動型ロボットプロジェクト”, <http://www.mic.atr.co.jp/~michita/everyday/>
- [4] 小野哲雄, 今井倫太, 江谷為之, 中津良平, “ヒューマンロボットインタラクションにおける関係性の創出”, 情報処理学会論文誌 Vol.41 No.1, pp.158-166, 2000.
- [5] 佐部浩太郎, 藤田雅博, “エンターテインメントロボットの商品化”, 日本ロボット学会誌 Vol.18 No.2, pp.185-187, 2000.
- [6] Y. Ogawa, G. Wang, K. Yamamoto, A. Inaba, "Improving Human Friendly Interface based on Interaction with Robot -Development of Basic Technologies for Human Friendly Robot-", In Proc. of the Eighth International Conference on Virtual Systems and MultiMedia, pp.500-505, September, 2002.
- [7] 加島英樹, 本郷仁志, 加藤邦人, 山本和彦: “マン・マシンインタフェースのための高速な虹彩検出法の考察”, 電気学会論文誌, Vol.123-A, No.4, pp.346-352
- [8] K. Yamamoto, "Present State of Recognition Method on Consideration of Neighbor Points and Its Ability in Common Database", IECE Transactions, Vol.E79-D, No.5, pp.417-422, 1996.
- [9] 栗山聖, 山本和彦, 本郷仁志, 加藤邦彦, “顔認識システムにおける高次特徴の効果と性能”, MIRU2000, pp.475-480, 2000.

# 静電フィルムアクチュエータを用いたロボットアームの開発

西嶋 隆      山本 晃生\*      樋口 俊郎\*      稲葉 昭夫

## A Robotic Arm using Flexible Electrostatic Actuator

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

あらまし 静電フィルムアクチュエータを用いた2自由度ロボットアームを開発した。本静電フィルムアクチュエータはポリイミドをベースとしたFPC(Flexible Printed Circuit)基板で製作した移動子、固定子フィルムから構成され、軽量、高出力、柔軟という特徴を有している。これらの特徴をいかし、2種類のアクチュエータの構成を提案し、2自由度ロボットアームに適用した。アームは前腕部と上腕部からなり、上腕部はアームの構造をシンプルにするためにアクチュエータを柔軟に曲げた状態でアームの筐体内の隙間に配置し、前腕部はアームの軽量化のために、ギア類の力伝達機構を用いず、生物の拮抗筋を模擬したアクチュエータの配置とした。

試作した上腕部のアクチュエータと前腕部のアクチュエータはそれぞれ約23N, 10Nの推力を発生した。次に、アーム間接角を制御するフィードバック制御系を構成し、アーム回転運動のステップ応答を測定した。また、アクチュエータの優れたバックドライバビリティをいかし、ダイレクトティーチングによるPick and Placeタスクを実行した。最後に本アクチュエータをロボットに用いる際の有効性についてまとめる。

キーワード 静電気力, アクチュエータ, 柔軟, ロボットアーム

### 1. はじめに

近年、非製造業分野で用いられる民生用ロボットの開発研究<sup>[1][2]</sup>や商品化が活発に行われており、今後その市場は拡大すると期待されている。このようなロボットが人間に対して行う作業にはさまざまなレベルがあると想定されるが、ロボットの運動性能の向上や使用する環境の安全性確保のためには、ロボットは必要最低限の重量であることが望ましい。

一般的にロボットには数多くのアクチュエータが配置されるため、ロボットの軽量化には軽量でパワーのあるアクチュエータの開発や効率的なアクチュエータの配置方法の考案が有効的な手段であると考えられる。

本研究で用いる静電アクチュエータ<sup>[3]</sup>は、軽量、高出力、柔軟性<sup>[4]</sup>を有する特徴がある。これらの特徴は、ロボットで多く用いられるシリアルリンク系のマニピュレータに応用する場合、様々な利点を見いだすことができる。

本報告では、柔軟な静電アクチュエータを利用したロボットアームを試作し、アクチュエータの性能評価やロボットアームの制御を行い、本アクチュエータをロボットに適用する際の有効性について議論する。

### 2. 静電アクチュエータの駆動原理

アーム駆動用に用いる静電フィルムアクチュエータは柔軟なFPC基板製の移動子、固定子フィルムで構成される。各フィルム内には電極幅100 $\mu\text{m}$ の3相の帯状電極が200 $\mu\text{m}$ ピッチで埋め込まれている。図1に一对の固定子、移動子からなる基本的な静電フィルムアクチュエータの概要図、図2に一对の移動子、固定子フィルムからなるアクチュエータの構造を示す。アクチュエータは2枚のフィルムの平行電極を対向させるように重ねて使用する。移動子と固定子の間には、フィルム間の摩擦低減のために直径20 $\mu\text{m}$ のガラスビーズを散布し、フィルム間の空気

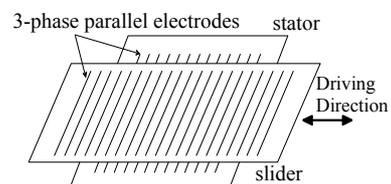


図1 静電フィルムアクチュエータの基本構成

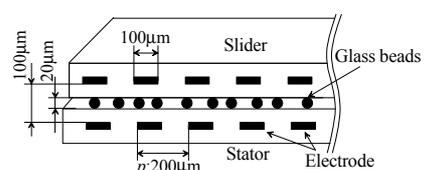


図2 アクチュエータの構造

\* 東京大学大学院工学系研究科

絶縁破壊を防ぐためにシリコンオイル(SH200, 100cSt, 東レダウコーニング製)が満たされている。

駆動原理は、図3に示すように移動子と固定子の電極に3相電源を結線し、3相交流電圧を印加することにより、移動子と固定子には図中太線で示すような互いに逆方向に進行する電圧分布を励起させる。フィルム間には電位分布間の空間的な位相差に応じた静電電力が発生し、移動子は固定子の表面上を電極の長さ方向と直角の方向に駆動する。本アクチュエータは同期モータであり、移動子の移動速度 $v$ は、印加電圧の周波数 $f$ 、電極ピッチ $p$ を用いて次式で表される。

$$v=6pf \quad (1)$$

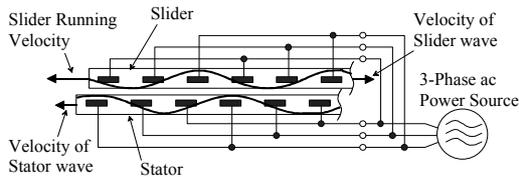


図3 駆動原理

### 3. 2 自由度ロボットアームへの適用

試作したロボットアームの全体写真を図4に示す。図5に構造の模式図を示す。アームの筐体は円筒状の亚克力製で、機構は3つのリンクが回り対偶をなしている。アームの全長は500mm、全体の重量は約320gである。アームは根本から上腕部、前腕部、最終リンクとする。図6に各関節の間接角を定義する。今回、様々なアクチュエータの構成を検討するため、リンク1とリンク2内には異なる構成のアクチュエータを試作した。その構成と性能について述べる。

#### 3. 1. 1 上腕部のアクチュエータの構成

上腕部に用いる静電アクチュエータの写真を図7に示す。フィルムサイズは移動子120mmx120mmx200 $\mu$ m、固定子160mmx80mmx200 $\mu$ m、重量は1枚あたりそれぞれ3.7g、3.4gである。アクチュエータの配置方法は、柔軟性を利用し、筐体の内壁に沿わせて丸めた状態で配置する(図8)。筐体の内壁に沿わせることで、アクチュエータの移動子電極と固定子電極の重なる面積(有効電極面積)を大きくすることが可能となり、推力を増大させることができる。さらに推力を得るために移動子と固定子の組を3セット積層している。また、筐体内部のスペースには駆動用のベルトや電源供給用の配線を格納することが可能となり外見上シンプルとなる。上腕部の重さは約165gであり、上腕部と前腕部のリンクの回転範囲はおおよそ $\pm 35$ 度である。

#### 3. 1. 2 前腕部のアクチュエータの構成

前腕部の移動子と固定子に用いるフィルムは同形状で、サイズは20mmx80mmx200 $\mu$ m、重量は1枚あたり0.6gである(図9)。アクチュエータは移動子と固定子の5組を積層し、図10に示すように生物の拮抗筋を模擬している。駆



図4 ロボットアームの全体写真

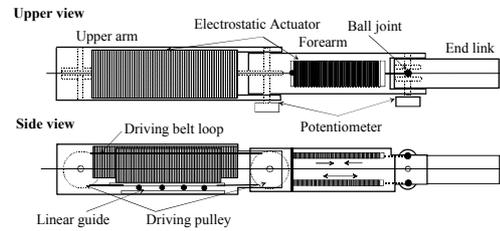


図5 ロボットアームの機構

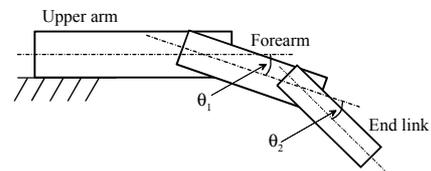


図6 各関節角の座標定義

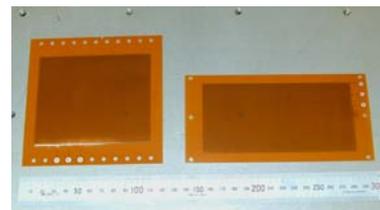


図7 上腕部に用いたフィルム  
移動子(左) 固定子(右)

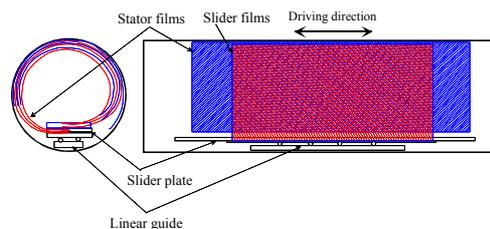


図8 曲げた状態で配置されたアクチュエータ

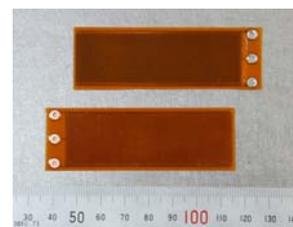


図9 前腕部に用いたフィルム

動時には2つのアクチュエータは互いに逆方向の伸縮運動をする。アクチュエータは最終リンクに対して、回転半径15mmの位置でボールジョイントを介して連結され、

トルクはアクチュエータの収縮時に得ている。アクチュエータの構成上、駆動時にはアクチュエータが伸縮するため有効電極面積は変動する。 $\theta_2=0$ 度の状態で、2つのアクチュエータの有効電極面積は等しく $40\text{cm}^2$ となり、 $\theta_2=60$ 度の状態で、アクチュエータの有効電極面積は伸び側は $27\text{cm}^2$ 、縮み側は $53\text{cm}^2$ である。前腕部の重さは約 $140\text{g}$ 、リンクの可動範囲は $\pm 60$ 度である。

### 3.2.1 上腕部のアクチュエータの推力

丸めた状態の積層形アクチュエータの推力は、積層数の増加に伴い、フィルム間の摩擦による損失が増加すると考えられる。そのため、積層数が1~3の3種類を用いて推力測定実験を行った。推力の測定方法は分銅を鉛直方向につり上げる方法を取り、推力と印加電圧の関係を調べた。なお、駆動速度は $3\text{mm/s}$ とした。図11に各積層数における有効電極面積 $1\text{cm}^2$ あたりに発生する推力と印加電圧の関係を示す。

図11から、積層数が増加しても単位面積あたりに発生する推力はあまり変化せず、摩擦による損失は少ないと考えられる。

試作機の上腕部は3層のアクチュエータを用いており、有効電極面積は駆動中一定で約 $150\text{cm}^2$ である。アクチュエータは、印加電圧が $1600\text{V}_{0-p}$ の時に約 $23\text{N}$ の推力を発生する。回転軸には半径 $15\text{mm}$ のプーリを介してトルクに変換するため、トルクは $34.5\text{N}\cdot\text{cm}$ となる。

### 3.2.2 前腕部のアクチュエータの推力

前腕部に用いるアクチュエータ単体の推力を測定した。実験では、有効電極面積が $30\text{cm}^2$ 、 $40\text{cm}^2$ 、 $50\text{cm}^2$ 、 $60\text{cm}^2$ の時の推力を測定した。結果を図12に示す。結果から、推力は有効電極面積にほぼ比例するといえる。回転トルクは、機構上、回転軸の角度によって変動し、 $\theta_2=0$ 度の位置で、印加電圧 $1600\text{V}_{0-p}$ 時には約 $9\text{N}\cdot\text{cm}$ となる。

## 4. ロボットアームの制御

### 4.1 ステップ応答

各関節角を制御するフィードバック制御系を構成し、ステップ応答を測定した。本アクチュエータはモータ組み込み式の静電容量型位置センサを併用して無脱調制御が可能である<sup>[5]</sup>が、今回は単に印加電圧の周波数を制御し、移動子の速度を制御する方式をとった。

制御システムはDSPボードDS1104 (dSPACE, Inc.製)とMATLABシステム(MathWorks, Inc.製)を用いた。図13に制御系のブロック図を示す。検出された各関節の角度は、目標値と比較し、偏差をPDコントローラに送る。PDコントローラの出力によって3相交流信号の周波数を変化させる。3相交流信号はアンプで1000倍し、アクチュエータに印加される。アクチュエータの脱調を防ぐために、周波数リミッタをPDコントローラと3相発信器の間に設け最大 $41.7\text{Hz}$  (移動子速度 $50\text{mm/s}$ )とした。上腕部、前腕部とも同じ制御系を用いた。

図14及び図15はそれぞれ上腕と前腕の回転動作のステ

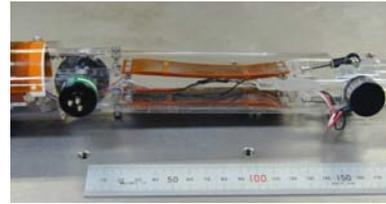


図10 拮抗筋を模擬した前腕部のアクチュエータ

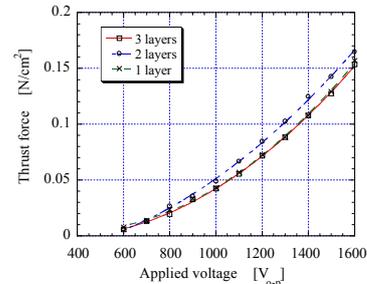


図11 積層数による推力と印加電圧の関係 (上腕部)

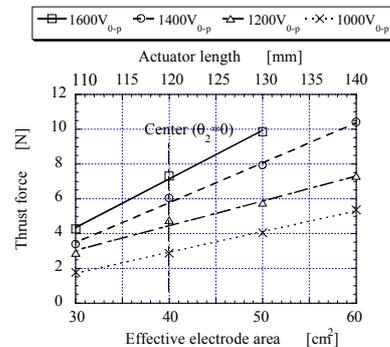


図12 有効電極面積と推力の関係 (前腕部)

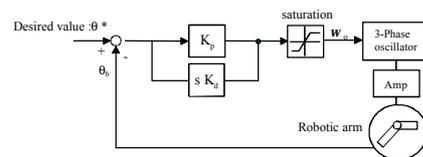


図13 アームの制御系 (前腕部, 上腕部)

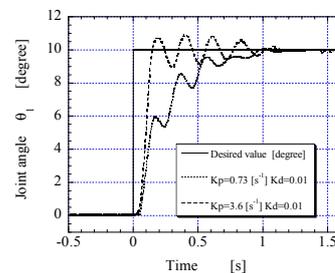


図14 ステップ応答 (上腕部)

ップ応答を示す。各関節は初期位置 ( $\theta_1=\theta_2=0$ 度) から目標値 ( $\theta_1=\theta_2=10$ 度) へ駆動している。実験は無負荷の状態状態で駆動電圧は $1\text{kV}$ とした。

前腕部のステップ応答は、目標値に $0.5$ 秒以下で追従することが可能であることがわかる。一方、上腕部のステ

ップ応答は上腕部と比較して振動的であることが認められる。この原因は、上腕部は前腕部が負荷となることや、ドライビングベルトの撓みやロボット構造の剛性によるものと考えられる。

#### 4.2 ダイレクトティーチング

試作したロボットアームを用いてダイレクトティーチングによるプレイバック動作を行った。本アクチュエータはダイレクトドライブであり減速ギアを有していないため、アクチュエータに電力を供給していない状態では動作が自由である特徴がある。そのため、アーム動作のティーチングが容易である。

アクチュエータに電圧を印加していない状態では、上腕部と前腕部の摩擦トルクはそれぞれ2.1N/cm, 2.4N/cmであり、非常に少ない。

ティーチング内容はPick and Placeタスクとした。タスクの手順は以下のとおりである(図16)。

1. アーム先端に取り付けられたフックで下段に置かれているブロックを吊り上げる。
2. 上段の棚を回避しつつ、ブロックを上段の棚へ運ぶ。
3. ブロックを上段の棚に載せ、フックを外す。
4. 初期位置にアームを戻す。

ティーチング時は、2つの間接に取り付けられたポテンショメータ出力の値を時系列で記憶する。データのサンプリング周期は0.1秒とした。

プレイバック時の様子を図17に示す。ティーチング時とプレイバック時の各関節角度を図18示す。図18に示すように再現性良く作業をおこなうことが可能であった。

#### 5. まとめ

以下に試作したロボットアームによって示された、静電フィルムアクチュエータの特徴をまとめる。

1. 薄型、柔軟であり、変形した状態で駆動できるため、狭い場所に組み込むことが可能である。
2. 非常に軽量であるため、シリアルリンク機構において負荷が軽減される。
3. 減速機が要らないため、アクチュエータ自身のバックラッシュがなく構造が単純である。
4. 電圧を供給していない状態において、アクチュエータは外力によって自由に動かすことが可能である。
5. 大きな外力がアクチュエータに加わっても、アクチュエータが破壊されることが無い。

5番目の項目は、民生用ロボットなどのように人間に接する用途で使われる場合に要求される項目であるといえる。

今後は柔軟な静電フィルムアクチュエータを用いたエンドエフェクタの開発などを行う予定である。

#### 文献

[1] Cynthia Breazeal and Brian Scassellati, "Robots that imitate humans", Trends in Cognitive Sciences, Volume 6, Issue 11, 1 November 2002, pp. 481-487

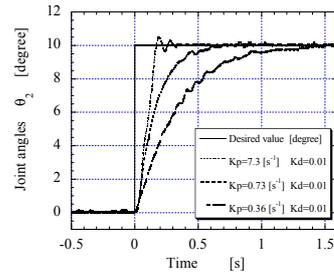


図15 ステップ応答(前腕部)

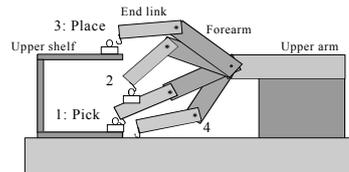


図16 Pick and Place taskの手順



図17 プレイバック中の様子

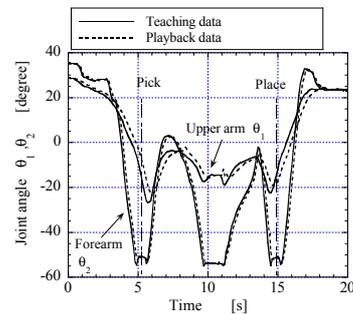


図18 各関節角の変化  
(ティーチングしたデータと実際の出力)

[2] 柴田崇徳, “人とロボットの身体的インタラクションを通じた主観的価値の創造? アザラシ型メンタルコミットロボットの研究開発?”, 日本ロボット学会誌, Vol.18, No.2, pp.200-203,2000.

[3] 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

[4] 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

[5] A.Yamamoto, T.Niino, and T.Higuchi, “Servo Control of High-Power Electrostatic Linear Motor” in *Proceedings of the ICMT'99*, 1999,pp.274-279

# 福祉ロボットに適応した作業指示技術の研究

- 介護 福祉支援ロボットの開発 -

今井 智彦      小川 行宏      千原 健司      張 明  
張 勤      棚橋 英樹      稲葉 昭夫

## A Human-Friendly Interface Design for Instructing Welfare Robot

- Developing of Welfare Support Robot -

Tomohiko IMAI    Yukihiro OGAWA    Kenji CHIHARA    Ming CHANG  
Qin ZHANG    Hideki TANAHASHI    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、それ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。そこで本研究では、誰もがロボットを利用できるようにするために、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と補助情報およびボタンを用いて作業指示ができる指示画面と、その画面からの作業指示を実際に遂行するロボットの自律化に必要な機能を開発する。本報告では、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。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、位置計測

### 1. まえがき

企業の製造ラインにおいて溶接や塗装作業を行っている産業用ロボットは、企業におけるものづくりに多大な貢献をしてきた。産業用ロボットの実現には、多くの基本機能の獲得を目指した研究の成果が生かされており、現在もその高度化のための研究が続けられている。

わが国の全人口に占める65歳以上の人口比率（高齢率）は、2015年には25%に達すると予測されている。このような超高齢社会を迎えようとしている現在、高齢者の自立した生活を確保し、その家族の身体的・精神的・経済的な負担を軽減するための対策を講ずることが急務となっている。このため、企業の製造ラインではなく、家庭のような一般の人々が暮らしている環境において福祉貢献できる民生用ロボットの開発が進められている。これまでに開発されたロボットとしては、手の不自由な人の食事支援をするロボット<sup>[1]</sup>や、人とのコミュニケーションをするペットロボット<sup>[2]</sup>などがある。今後、家庭内において高齢者などの自立支援や作業支援を行う福祉ロボットを実現し、それにより人々の日々の暮らしで発生する様々な負担を軽減することが期待されている。そこで本研究では、福祉ロボットの実現に必要な技術のうち、ロボットに作業指示をするためのインタフェースの

開発を目指す。

福祉ロボットを実現するためには多くの問題があり、その一つに“使いやすさ”という点がある。これまでロボットに作業指示する場合は、産業用ロボットに見られるように、専門技術者がロボット特有の方法を用いて指示してきた。しかし、その方法では一般の人々が作業を指示することは困難であり、仮にできたとしても使いにくいものとなる。したがって、福祉ロボットの作業指示には、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。

現在開発されている民生用ロボットでは音声指示が多く用いられている<sup>[3]</sup>。しかし、音声だけではロボットがすべての指示を正確に理解し行動することが非常に困難であり、その実現にはまだ多くの期間を要する。

本研究では、人がロボットの状況を把握しながら指示できる方法を考える。その手法としてロボットの視点から作業環境を見る方法がある。これを用いた作業指示インタフェースの研究として、相澤ら<sup>[4]</sup>は“WYTIWYG Interface”というGUIベースのインタフェースを提案している、また、Layら<sup>[5]</sup>はロボットアシスタントのコンセプトビデオにおいて同様の提案をしている。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人が直接指示する方法を用いており、これ

はロボットを直感的に指示できる有効な方法である。しかし、作業指示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（例えば別の部屋へ移動指示）が存在する。

そこで本研究では、ロボットの目（カメラ）を通して見える画像と補助情報およびボタンを用いて作業指示ができる指示画面を開発する。また、その画面からの作業指示を実際に遂行するロボットの自律化に必要な機能を開発する。

本報告では、はじめに作業の指示方法および指示画面の構成を検討する。次に、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。

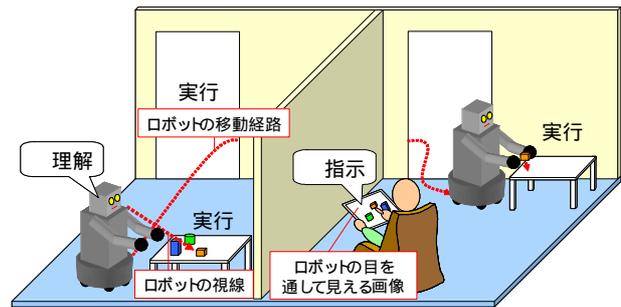


図1 作業のイメージ図



図2 作業の流れ

## 2. 作業指示インタフェースの検討

### 2.1 基本方針

現状では人のあらゆる作業指示を理解して作業を遂行することができる完全自律型ロボットを開発することは非常に困難であり、実現にはまだ多くの開発期間を要する。そこで本研究では、ロボットにとって難しい状況の判断、行動の選択などは人が指示し、ロボットにとって比較的簡単に行える計測、移動などはロボットが自律的に動作する、というように人とロボットが作業分担することを基本方針とする。この方針に従って誰もが簡単に作業指示ができるインタフェースの開発を行う。

図1に人がロボットに作業指示を行いロボットが作業を遂行するときのイメージ図を示す。また図2に作業の流れを示す。人がロボットに遂行させる作業を細分化すると“指示”、“理解”、“実行”の3つに分けることができる。まず、人がロボットに作業指示をすると、ロボットはその指示内容を判断する。次に、ロボットは指示内容に従って行動するために必要な情報（例えば物体の位置など）を理解する。必要な情報を理解できると、ロボットは実際に作業を実行する。

ここで、人とロボットの作業分担を次のように考える。現状ではロボットは人の意図を完全に把握することが困難なため、“指示”については人が担い、逐一指示を出すこととする。“実行”についてはロボットをできる限り自律化することによりロボットが担うようにする。ロボットを自律化するためには、家庭内で作業を行うことを考慮すると、対象物体や作業環境を認識できることが重要であると考えられる。しかし、現状では完全な認識は困難なため、“理解”についてはロボットで認識できる部分はロボットが担い、認識できない部分は人が担う。また、ロボットが認識を誤った場合は人が補正する。

このように、使いやすい作業指示インタフェースを検討するには、人とロボットとの接点である“指示”の検討だけでは不十分であり、ロボットと作業環境との接点である“理解”、“実行”も合わせて検討する必要があると考える。それは、人とロボットが作業分担をした際、

どの程度までならば人が容認できるかが明確ではないためである。そこで、本研究では図1のような作業過程全体を通して“使いやすさ”を検討する。

### 2.2 指示方法

“指示”は複数の指示の組み合わせであり、一つの指示は「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、指示の最小単位を「X{を,に,へ}Yする」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）が入る。この指示方法では、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、画像では入力が難しい場合（例えば、画像では見えない場所への移動指示）は補助情報を用いて入力を行う。このとき、指示入力の手順が一通りではなくその逆の手順が存在する場合、双方できることが望ましい<sup>[6]</sup>。そこで本研究では、Xの入力とYの入力をどちらからでもできるようにする。これにより、ユーザが指示方法に束縛されることを低減できる。

また、“理解”、“実行”において、例えばロボットが対象物体を認識できない場合や作業中に予想外の動作をする場合のように、ロボットの自律動作だけでは不十分であるとユーザが判断した場合は、ユーザが直接操作できることも必要であると考え、そのためのボタン入力を用意する。

### 2.3 画面構成

本研究ではロボットの目（カメラ）を通して見える画像と補助情報およびボタンを用いて作業指示を行うため、これらを指示画面上に用意する。図3に指示画面構成を示す。画面上半分をXの入力、画面下半分をYの入力を用いる。画面左上にはロボットの目（カメラ）を通して見える画像を、右上には画像では入力が難しいときに用いる補助情報を提示する。画面下半分には、ロボットにどのような行動をさせるかを示す言葉が記されたボタン

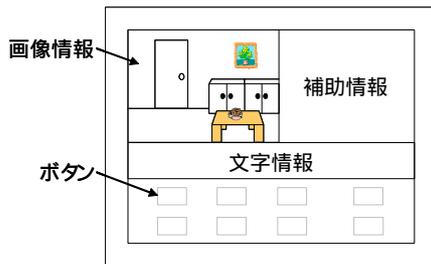


図3 指示画面構成

を配置する。このとき、ユーザが操作をする際に混乱しないようにするため、ボタンは必要最小限のものだけを表示するようにする。その他に、ユーザに入力を促すため、画面中央に文字を提示する。これにより、ユーザがどのタイミングでどのような入力をすればよいかを認識しやすくなり一連の指示をスムーズに行うことができる。

### 3. テストベッド

図4にテストベッドのシステム構成を示す。また、表1にロボットの仕様を示す。本テストベッドは指示端末、ロボット、これらの間の情報伝達を行うための通信機器からなる。ロボットは、軽量物体を把持するためのアームを有するヒューマノイド型の上肢と、それを移動するための台車（車輪型移動ロボット）からなる。OSについては、機構制御PCはRed Hat Linux 8.0であり、視覚制御PCはMicrosoft Windows XP Professionalである。通信については、指示端末とロボットの間は無線LAN（IEEE802.11b準拠）を、ロボット上の2台のPCは有線LAN（IEEE802.3u準拠）を用いている。また、組込型PCと各部位とはRS-232Cを用いている。

### 4. 実装

本報告では、“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、以下に示す条件を満たすようにテストベッド上への実装を行った。

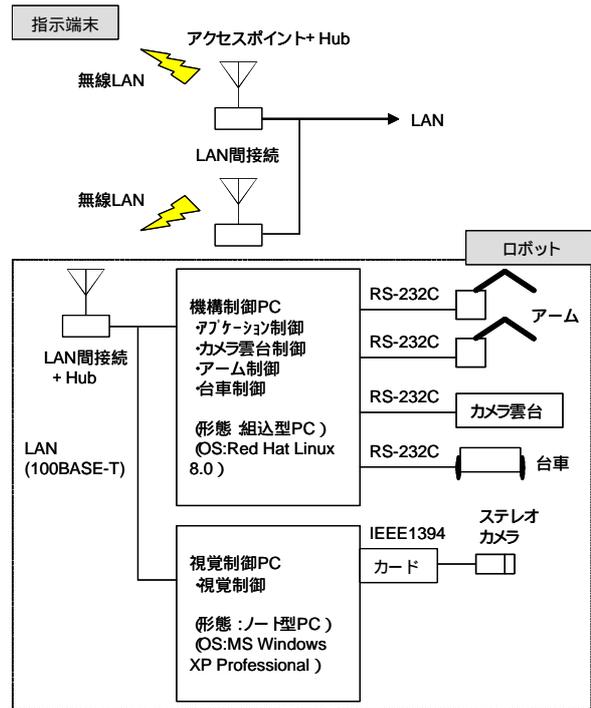
- 作業環境におけるユーザおよびロボットの初期位置、対象物体を置いた台の位置は既知。
  - 対象物体は円筒形状で、大きさおよび色は既知。
- このとき、図1で示した“指示”、“理解”、“実行”を実現するため、以下に示す機能を実装した。

#### “指示”

- 画像上に映し出された物体を選択する。
- マップ上にてロボットの移動先を選択する。
- 「行く」「取る」「手渡す」「誘導する」ボタンを押す。

#### “理解”

- ユーザによる画像中の選択位置から、対象物体を特定し、その位置（補正值）を指示端末へ通



(a)概略図



(b)指示端末



(c)ロボット

(愛称:Uちゃん(優友遊/鶏))

図4 テストベッドのシステム構成

表1 ロボットの仕様一覧

| 部位   | 名称              | 型式, メーカー                           |
|------|-----------------|------------------------------------|
| 頭部   | ステレオカメラ         | STH-DCAM, Videre Design製           |
|      | カメラ雲台           | Biclops PT-M, TRACLabs製            |
| 腕部   | ロボットアーム (5DOF)  | Katana, Neuronics社製                |
| 腹部   | 機構制御PC (組込型PC)  | SI7SM, TMC製                        |
| 背面部  | 視覚制御PC (ノート型PC) | Inspiron 8200, Dell Computer製      |
| 下半身部 | 移動ロボット (2輪型)    | Pioneer2-DX8, ActivMedia Robotics製 |

知する。

- ユーザの選択した物体の位置を計測する。

#### “実行”

- 既知の場所へ移動する。
- 計測した位置にある物体を把持する。
- ユーザに把持した物体を手渡す。

表2に実装に用いたコマンド一覧を示す。このコマンドはユーザの指示した作業を遂行するために用いる。作業コマンドはユーザの作業指示をロボットへ伝えるときに用い、制御コマンドは作業を遂行する際にロボット内にて用いる。これらの送受信は、指示端末 機構制御PC 視覚制御PC間をTCPにより行った。また、指示画面上に提示する画像情報は指示端末 視覚制御PC間をUDPにより行った。

#### 4.1 指示端末

指示端末上に、指示画面を実装した。画面左上には視覚制御PCより送られてくる画像を受信・処理し、提示する。また、ユーザが画像上を選択をした場合は赤色の円を、機構制御PCより画像処理による選択位置の補正値が送信された場合は緑色の矩形を描画する。これにより、ユーザが自分の選択した位置およびそれに対してロボットが認識できているかを知ることができる。また、画面右上には今回は作業環境のマップを提示する。このとき、機構制御PCより定期的に送信されるロボットの現在位置を用いて、マップ上のロボット位置を更新する。これにより、ユーザがロボットの位置を把握しやすくなり、次の指示が容易になると考える。

表2で示したコマンドを発行するために、画面下半分にはコマンドに対応する言葉の記されたボタンを配置する。このとき、ボタンは必要最低限のものだけを表示するようにする。例えば、コマンド中に“手渡す”とあるが、これはロボットが搬送中でなければ必要としないものである。搬送中でないときは非表示に、搬送中のときは表示するようにする。また、ユーザがロボットを直接操作するための“誘導する”ボタンを用意するが、今回は台車の移動だけにとどめる。

その他の処理としては、ユーザが上記を用いて作業指示すると、それらを作業コマンドに変換して機構制御PCに送信する。

#### 4.2 機構制御

機構制御PC上に、アプリケーション制御、カメラ雲台制御、アーム制御、台車制御ルーチンを実装した。アプリケーション制御では、指示端末より送信された作業コマンドを受信し、内容に応じて制御コマンドに変換する。カメラ雲台、アーム、台車の各制御は制御コマンドが該当する場合にその動作を行う。

#### 4.3 視覚制御

視覚制御PC上に、画像伝送、画像処理ルーチンを実装した。なお、PC上で使用しているステレオカメラの制御はSVS (Small Vision System, SRI International製)を用いた。また、ここで取り扱う画像のサイズは320 × 240 (pixels)とした。画像伝送については、ステレオカメラの左カメラより一定間隔で画像を取得し、JPEG圧縮した後、指示端末に送信する。また、画像処理については、はじめに左右カメラより取得した画像についてそ

表2 コマンド一覧

| 分類      | 作業コマンド                                 | 制御コマンド                 |
|---------|--|------------------------|
| 作業指示    | 行く, 取る, 手渡す                            | 首, 足 (直進, 旋回), 腕, 画像処理 |
| 直接操作    | 足 (前, 後, 左旋回, 右旋回)                     |                        |
| ロボットの状態 | 作業開始, 作業終了, 停止<br>状態通知 (動作 / 停止, 質疑応答) |                        |

れぞれ楕円検出を行い、それらの対応付けができたものだけを抽出する。次に、指示端末で選択された画像中の位置 (左カメラ画像中の位置) に最も近い楕円を求め、その三次元位置を算出する。なお、処理はIPL (Image Processing Library v2.5, Intel製) とOpenCV (Open Source Computer Vision Library, Intel製) を利用した。

## 5. まとめ

本報告では、ロボットに対して誰もが簡単に作業指示ができるインタフェースについて検討を行い、作業は人とロボットが分担して行うことを前提とした。その枠組みの中で作業指示を容易にするための一手法として、ロボットの目 (カメラ) を通して見える画像と補助情報およびボタンを用いて作業指示をする方法について述べた。また、家庭内における軽量物体の搬送作業を想定し、検討した指示画面をタッチパネルによる入力可能な端末上に、その端末からの作業指示を遂行するためにある程度の自律機能をロボット上に実装し、想定作業のもとでの動作確認を行った。今後は、指示画面の高度化およびロボットの自律性向上を図る予定である。

## 文献

- [1] 石井純夫, “四肢障害者のための食事支援ロボット”, 日本ロボット学会誌, Vol.16, No.3, pp.306-308, 1998.
- [2] 南部雅幸, 中島一樹, 田村俊世, “情報機器を利用した高齢者自立・介護支援”, 計測と制御, Vol.40, No.5, pp.368-372, 2001.
- [3] 例えば”wakamaru”, <http://www.sdia.or.jp/mhikobe/products/etc/robot.html>
- [4] 相澤伸, 小菅一弘, “生活支援ロボットシステム - MARY-”, 日本ロボット学会創立20周年記念学術講演会 CD-ROM, 3D25, 2002.
- [5] Klaus Lay et al., "morpha", <http://www.morpha.de/>
- [6] 加藤直樹, 大美賀かおり, 中川正樹, “携帯型ペン入力情報機器におけるペンジェスチャ入力指示インタフェース”, 情報処理学会論文誌, Vol.41, No.9, pp.2413-2422, 2000.

# 人にやさしいモニタロボットの研究

光井 輝彰      千原 健司      稲葉 昭夫      永田 可彦\*      福田 修\*

## Health Monitoring Robot for Human Living Space

Teruaki MITSUI    Kenji CHIHARA    Akio INABA    Yoshihiko NAGATA\*    Osamu FUKUDA\*

あらまし ペットロボットに代表される民生用ロボットのブーム以降、様々な分野でロボットの活用が期待されている。本研究は福祉分野でのロボットの活用として、日常生活の中で健康管理を意識することなく行うことを目的とした、人の生活空間にやさしく溶け込むことができる、生体情報のモニタリングロボットを提案する。このロボットは日々の生活の中で人に働きかけ、人と触れ合う際にミミックセンシングにより生態情報の計測を行う。本報ではミミックセンシングで安定した生体計測を行うために、基礎的な計測実験を行った。計測する生体情報として、非侵襲かつ比較的容易に計測が可能な脈波を選定し、センサー押し付け荷重と脈波波形との関係を調べ、脈波の可観測性について検討した。

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

### 1. 緒言

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に健康管理が行われることが望ましい。しかし、在宅での健康管理のための様々な計測機器が開発されてはいるものの、これらを利用した体調測定や健康管理を普段の生活の中で継続して行うことは、本人や介護者にとって大きな負担となりうる。特に、“情報弱者”であることの多い高齢者が、これらの計測機器を使いこなし、計測データを自ら管理したり、あるいは医療機関に持ち込んで利用することは困難である。そこで、日常生活の中で自動的に生体情報を計測<sup>[1]</sup>したり、同時に遠隔地で診断を行うシステム<sup>[2]</sup>が研究されているが、計測の可観測性や運用性を考慮すると、実用化には課題が残されている。

本研究では日常生活の中で自動的に生体情報を計測する技術として、永田らが提案するミミックセンシングという概念<sup>[3]</sup>を利用する。ミミックとは擬態という意味であり、ミミックセンサーとは検出部を生活用品や家具の中、または部屋の壁などに埋め込むことで、目立たなくさせたセンサーである。これを個人の生活パターンを考慮して日常生活で必ず立ち寄る場所や触れる箇所に配置すれば、間欠的ではあるが継続的に生理状態を取得することが可能となる。また、センサーを埋め込んで隠しているため、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できなく、日常生活における平時の体調測定を行うことができる。本研究はこのミミックセンシング機能をロボットに持たせることにより、日々の生活での健康管理を意識することなく行う、生体情報のモニタリングロボットを提案する。ミミックセンシングでは一般の生体計測のように安静状態での計測ではなく、センサーとの接触状態が変化しうるなかで計測を行うことが最大の難点である。本年度はミミックセンサーの開発のために、脈派のミミックセンシング技術について、その可観測性を確かめるための基礎的な計測実験を行ったので報告する。

### 2. モニタロボットイメージ

ミミックセンシングによる生体情報のモニタリングとして本稿では光電容積脈波（以降脈波という）の計測を選定した。脈波は非侵襲に比較的容易に計測を行うことができ、抹消血管循環動態や自律神経機能と関わることから、計測したデータから多くの情報を取り出すことが出来る。単純に心拍数を数えるだけではなく、波形を微分したり周波数解析<sup>[4]</sup>することにより、多くの生体情報を得ることができると考えられている。例えば、脈波波形を2回微分した加速度脈波は、動脈系全体の硬化性を反映する指標となるとが示されている<sup>[5]</sup>。各種パラメータにより定量的が可能であり、最近では専用の装置で簡単に血管年齢を診断できる計測装置も販売されている。

本研究では脈波を計測するためのセンサーをロボット本体や、ロボットとのインターフェースにミミックセンサーとして組み込み、ロボットとのインタラクションを

\*独立行政法人 産業技術総合研究所  
人間福祉医工学研究部門 福祉機器グループ

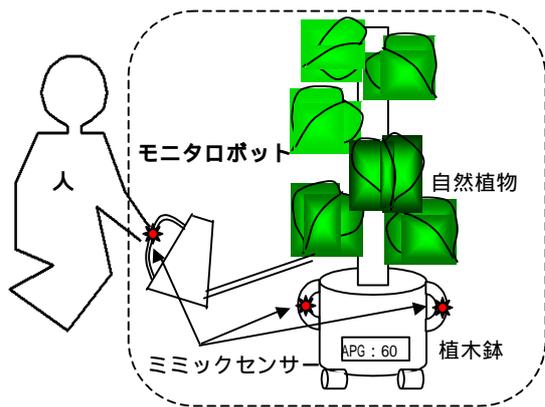


図1 モニタロボットイメージ

通じて、意識することなく生体情報をモニタリングするモニタロボットを提案する。図1に独居老人等を対象としたモニタロボットのイメージを示す。ロボットは観葉植物などの自然植物を構成要素とすることで、人の生活空間に溶け込む。植物と一体となったロボットは湿度や明るさ温度などに反応して、植物の育成環境が整うように人に要求する。また、動物のペットのように、かわいがられると喜び、ほっておかれるといじけるといった喜怒哀楽の感情表現を行う。これらの要求や感情表現は、音や光などのサインで植物らしく単純に行う。このようにしてロボットは日々の生活の中で人に働きかけ、幾つかの要求を行いながら、人が世話をする際に生体情報をモニタリングする。こうして日常生活において、意識することなく継続して生体情報を計測することで健康管理を行うとともに、毎日一定の時刻に人にロボットの世話をさせることにより、その人の生活リズムの維持を助ける。さらに、自然の植物を構成要素とすることで、ロボットの世話が植物の成長につながり、その行為が無気力な状態に陥ることを防ぎ、日々の生活に潤いを与えることが期待できる。また、単純なロボットの人への働きかけや感情表現も、生きた植物をフィルターとすることで人の主観へ効果的に働きかけると考える。

### 3. 脈波計測実験

光電容積脈派とは指先な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氣的に計測するものである。本稿ではこのセンサーの部分に 発光波長と受光波長共に940nm付近にピークを持つコーセイ電子株式会社のフォトリフレクタSG-105を使用した。図2はセンサー出力の交流成分を記録したものであるが、同時に計測した心電図と並べると、きれいに脈波が計測されていることが分かる。

#### 3.1 実験方法

生体情報の計測は、ほとんどがベットサイド等の安静

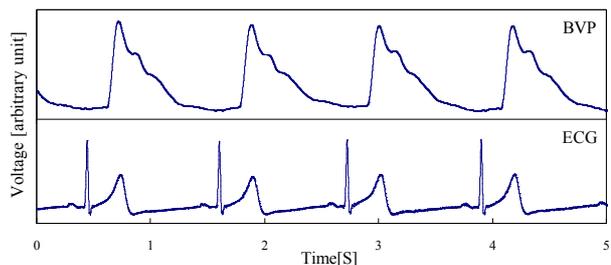


図2 脈波と心電図



図3 センサー検出部, 実験装置, 実験の様子

状態で計測を行うことを基本とするが、ミミックセンシングによる計測では、様々な状況で単純にセンサーと接触した状態を作り出しただけで計測を行う必要がある。モニタロボットではセンサーを埋め込んだロボットの一部(ミミックセンサー)を握ることにより、脈波の計測を行うことを想定する。この場合、センサーの形体や握り方の違いにより、センサー検出部と生体の接触状態が変化することになる。そこでセンサー検出部を押し付ける力を段階的に変化させて脈波を計測し、センサー押し付け荷重と計測波形との関係調べた。図3にセンサー検出部と実験装置、実験の様子を示す。センサー検出部は直径8mmのプッシャにフォトリフレクタを取り付け、周りを直径約10mmの緩衝材(株式会社ジェルテック:ゲルテープGT-2)で囲んだものを用いた。押し付け荷重はパネ長の変位から求めている。実験は被験者として20代後半から30代前半の男性健康者4名に対し、左手中指の腹部にセンサーを押し付け、安定して脈波が計測できていることを確認した後に行った。25gから400gまで25gきざみで荷重を加え、それぞれの荷重状態で約10拍の計測を順次行い、これを5分程度の間隔を空けて2回行った。計測データは株式会社NF回路設計ブロックのデジタル生体アンブシステム5200により、表1の条件で取り込んだ。

表1 計測条件

|           |                                 |
|-----------|---------------------------------|
| サンプリング周波数 | 100Hz                           |
| A/D分解能    | 12bit                           |
| ハイパスフィルタ  | 0.53Hz 6dB/oct                  |
| ハムフィルタ    | 60Hz 2次対相当                      |
| ローパスフィルタ  | 30Hz 24dB/oct<br>250Hz 24dB/oct |

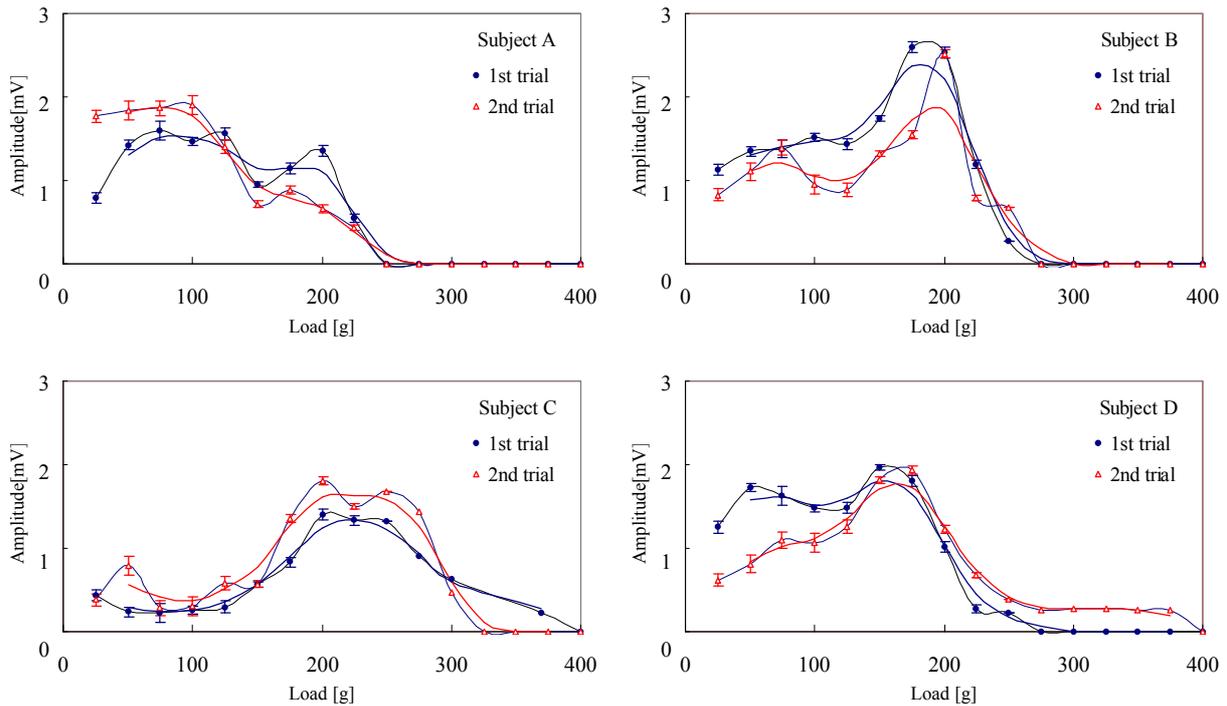


図4 センサー押し付け荷重と脈波振幅

### 3.2 実験結果

図4に4人の被験者のセンサー押し付け荷重と脈波振幅との関係を示す。グラフ上の点は各荷重での計測波形10拍の振幅の平均値、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。4人の計測結果は、荷重の小さい100g付近の振幅にはばらつきがあるものの、全体に共通して荷重200g付近に一つの振幅のピークが認められる。また、ピークを越えて荷重がさらに大きくなると、振幅は極端に減少し300g付近からは波形の認識が出来なくなった。これは荷重が大きくなりすぎると、体組織の変形により血管が潰れてしまい、十分な血流が確保できなくなるためと考えられる。これは、レーザー光のドップラーシフトにより血流量を計測するシステムを使用した、永田らの実験でも確認されている<sup>[6]</sup>。

センサーの押し付け方に関しては、きわめて軽くおくと、表層の毛細血管および静脈の状態が記録され、中等度では小動脈、さらに強いと主として大きい動脈の状態が記録される<sup>[7]</sup>ことが確認されている。これは、体組織での血圧分布が図5のようになっており、力学的に脈波の振幅は動脈管が無負荷状態になったところで弾性の最大化ともなって最大振幅を示す<sup>[9]</sup>ことから説明できる。また、小動脈の内壁では中膜の筋繊維が特に発達しており、交感神経の支配により内径を能動的に大きく変化させて血流に対する抵抗を変えることができる<sup>[8]</sup>ことも確認されている。図4ではセンサー押し付け荷重と振幅の関係に被験者毎の特徴が見られるが、これは以上のことから説明できるのではないだろうか。つまり、各被験者の血圧や手掌の血管の発達具合、計測時の健康状態、心理状態などの要因により、センサー押し付け荷重と振幅の関係は特徴付けられると考えられる。

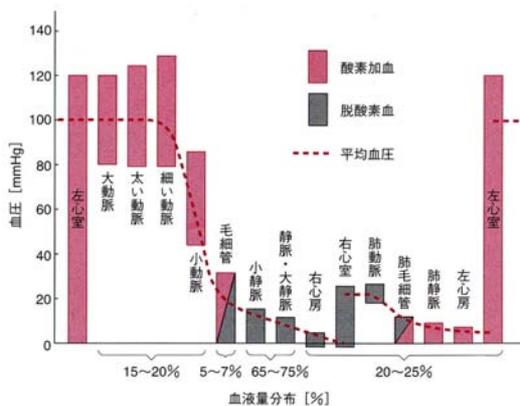


図5 血圧分布<sup>[8]</sup>

つぎに波形形状について考察する。波形形状は脈波を解析するには重要な要素であり、多くの情報を含んでいる。図6に示す脈波を2回微分した加速度脈波では、それぞれの波高が生理的変動と関わっており、波形評価のパラメータであるAPGインデックスもこれらの波高から



図6 加速度脈波とAPGインデックス

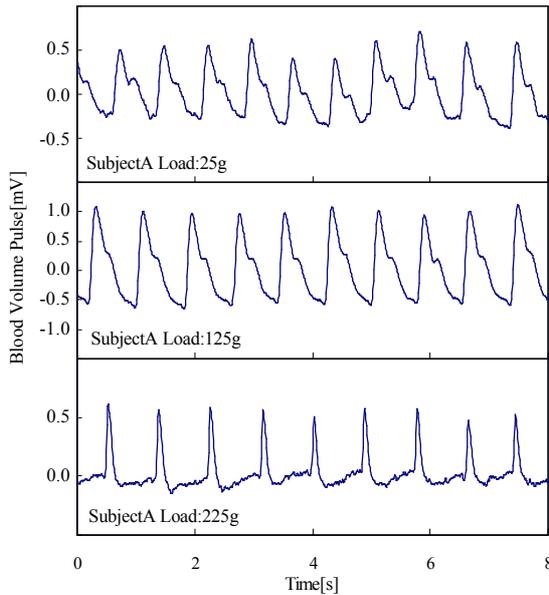


図7 センサー押し付け荷重と脈波波形

計算される．そこで，センサーの押し付け荷重に対する脈波波形の形状変化に着目してみた．図7は一人の被験者のセンサー押し付け荷重が25g, 125g, 225gのときの計測波形である．荷重が小さいときは，25gの計測波形に見られるように基線の動揺が目立つが，荷重が大きくなると安定する．これは荷重が小さいと，センサーとの接触状態が安定しないためと考えられる．しかし，さらに荷重が大きくなると，計測器の時定数を下げていく時の波形変化に似ているが，225gの計測波形に見られるように波形自体が変化し波高値が強調されたものになる．この傾向は4人すべての被験者の計測結果に共通して見られた．225gの計測結果からでも，心拍数ぐらいは読み取れるが，先に紹介した加速度脈波のように脈波波形自体を解析するには適していない．脈波波形を解析し，有用な指標を得ることを考えた場合，図7の3例では基線も波形形状も安定した125gの計測結果が最も望ましい．荷重が小さすぎるのでも大きすぎるのでもなく，波形の基線が安定するまで適当な荷重を加えた状態で計測を行うことが望ましいといえる．

#### 4. まとめ

本研究はミミックセンシングの概念を応用することで，日々の生活での健康管理を意識することなく行う，生体情報のモニタリングロボットを提案する．本報では，生体情報として脈波を選定し，ミミックセンシングにおいて問題となるセンサーと生体の接触状態の変化について検討した．実験では，センサー押し付け荷重と計測される脈波波形について調べた．その結果，荷重200g付近に一つの振幅のピークが認められ，さらに荷重を大きくしていくと極端に振幅が減少することを確認した．また，加

重により計測される脈波の振幅は変化し，その関係は被験者毎に特徴があるものの，波形の基線と形状を共に安定させて計測するには，適当な荷重を加える必要があることを確認した．今後は計測波形の処理と利用方法について検討を進めミミックセンシング技術の向上を目指すとともに，ロボットの機能やデザインについても検討を行い製作を進める予定である．

#### 文 献

- [1] 例えば “在宅健康管理のための生理量自動計測システム”，国立長寿医療研究センター老人支援機器開発部，<http://www.nils.go.jp/organ/ddse/index-j.html>
- [2] 例えば “HETEMIS”，University of New South Wales，Integration of GP Managed Home Telecare with Established Clinical Services for Ambulatory Care FINAL REPORT，24<sup>th</sup> December 2001.
- [3] 永田・ほか，“ミミックセンサを用いた身障者・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
- [4] 梁熙卿，松浦弘毅，村本健一郎，藤井寿美枝，“指尖血流量変動解析による糖尿病性神経障害者の自律神経機能評価”，医用電子と生体工学，pp.48-55，2001
- [5] “総説 加速度脈波と血管年齢 高田晴子 岐阜大学医学部” <http://www.asahi-net.or.jp/~vk2h-tkd/rev.html>
- [6] 永田可彦，福田修，本間敬子，甲田壽男，“ミミックセンサーを埋め込んだ受話器の脈波取得性について”，日本機械学会福祉工学シンポジウムCD-ROM論文集，W108，2001
- [7] 高木健太郎，“岩波講座 現代生物科学10 組織と器官II”，岩波書店，1977
- [8] 藤沢清，柿木昇治，山崎勝男，“新 生理心理学 1巻 生理心理学の基礎”，北大路書房，1998
- [9] 池田研二，嶋津秀昭，“生体物性 / 医用機械工学”，秀潤社，2000

# 情報収集(被災者捜索)ロボットの移動機構に関する研究

田畑 克彦      稲葉 昭夫      張 勤      天野 久徳\*

## Development of Mobile Robot to gather Information for Relief Activities

Katsuhiko TABATA    Akio INABA    Qin ZHANG    Hisanori AMANO

あらまし 大震災等の大規模災害が発生した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、かつ要救助者を効率良く発見する方法として、災害救助ロボットの開発とその利用が期待されている。災害救助ロボットは、要救助者やその周囲状況などの災害情報を得るために、ガレキ表面だけでなく、ガレキ内への進入も可能な移動機構であることが要求される。単に狭部に進入するのであれば、超小型のロボットの活用が考えられるが、このようなロボットは一般的に移動速度が著しく遅く、大きな構造を有する不整地の踏破性にも劣る。一方、大きな構造を有する不整地の踏破性を高め、移動速度を向上させようとするるとロボットサイズが大きくなり、ガレキ内などの狭部への進入が困難になるといった問題が発生する。この問題を解決するため、本研究では形状変化機能により、狭部への進入を可能にする形状変化型移動機構についての研究の進捗状況を報告する。

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<sup>[1,2]</sup>。大地震等の発生時に、人的被害を最小にする有効な手段の一つにガレキ内にとり残された要救助者を早急に発見することがあり、移動ロボット(レスキューロボット)による要救助者の捜索や危険状況等の情報収集等はこれを有効に行う手段として期待されている。

一方、これまでの研究において、ガレキ等の不整地を移動するための移動機構<sup>[3~7]</sup>(クローラ型(無限軌道機構)、ぜん動型、織毛型、多足歩行型、二足歩行型 等)が数多く提案されている。しかしながら、これらの移動機構は、大規模災害時の情報収集ロボットの移動機構として十分であるとは言い難い。ぜん動型及び織毛型は狭部への進入は可能であるが、その移動速度は著しく遅い。二足歩行や多足歩行では不整地において高い移動性能が期待できるが、これに耐えうる十分な制御則が提案されているとは言い難い。クローラ型に関しては、ガレキの表面を移動するいくつかの有効な機構が提案されている(例えば、iRobot社のPackbot等)。しかし、大きなギャップを乗り越えるためには、大きなボディが必要となり、これが狭部への侵入の障害となる。このような状況を踏まえ、本研究では、あまり大きなボディでなくても大きなギャ

ップに対応でき、かつ、狭部等への進入が可能なクローラ型の移動機構を新たに考案し<sup>[8]</sup>、基本構成の検討及び主要機構部の設計を行ったので報告する<sup>[9,10]</sup>。

### 2. 提案する移動機構の概要

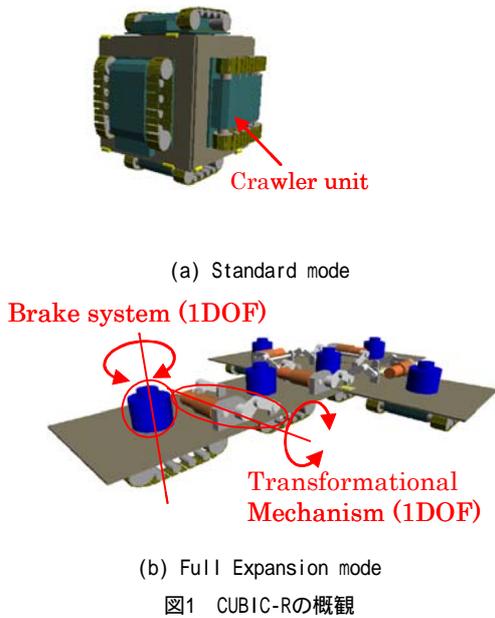
図1に提案する移動機構の概観を示す。本研究で提案する移動機構(CUBIC(RESCUE)ROBOT, 以下, CUBIC-R)の形状は、正六面体であり、各面に一対のクローラを有するクローラユニットを搭載している。また、このクローラユニットは、各面に対する相対角を変更できるよう、1つの自由度を持つため、各クローラユニットは、信地旋回によりボディと独立にその方向を変更することができる。また、正六面体を構成する各面プラットフォーム(以下、面)には、面開閉機構が搭載されており、これにより、ボディの形状を変化させることができる。

この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。なお、図1(b)は、CUBIC-Rの各面を完全に展開させた形態を示している。

### 3. CUBIC-Rの不整地踏破戦略

本研究で提案したCUBIC-Rにおいて、様々な状況の不整地を踏破する基本戦略を次に示す。

\* 独立行政法人 消防研究所 基盤研究部



#### 1) 狭い進入路への対応戦略(図2)

進入路の形状や大きさに合わせて、移動機構の形状を変化させ、狭部に侵入する。この戦略は、進入口が小さく、内部空間は比較的確保されているような倒壊家屋等を想定している。

#### 2) 起上り動作の解消戦略(図3)

階段、建物構造物の落下、家具の横転等により生成された段差から落下した場合であっても、いずれかの面が接地状態となるため、いわゆる引っ張り返ることによる移動機能の停止を防ぐことが可能となる。

#### 3) 段差(階段)への対応戦略(図4)

階段、建物構造物の落下、家具の横転等により生成された段差をCUBIC-Rの面を展開することにより、連結クローラ型移動機構の機能を実現する。

#### 4) ギャップへの対応戦略(図5)

面を展開することにより、コンクリートの亀裂、建物構造物の落下、家具の横転等により生じた溝状のギャップの上を落下せずに移動する。

#### 5) 窪地への対応戦略 (図6)

建物の床の陥没、建物構造物の落下、家具の横転等により生成された窪地に落下した場合に、窪地の外壁に面を押し当て、クローラを回転させながら、面を開くことにより、窪地から脱出する。

本章で行った移動戦略構想の検討により、CUBIC-Rが様々な状況の不整地を踏破できる高踏破性を有する移動機構であることを確認できた。

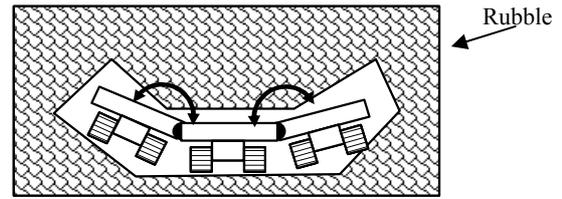


図2 狭部への進入

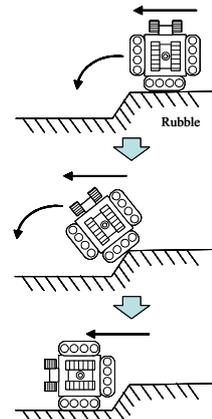


図3 起上り動作の解消

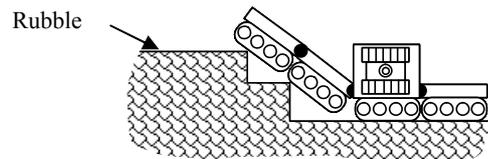


図4 段差への対応

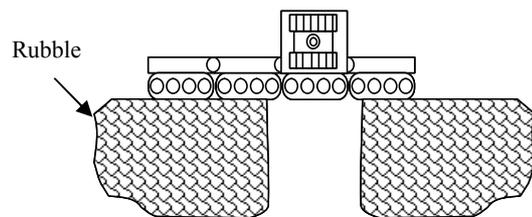


図5 ギャップへの対応

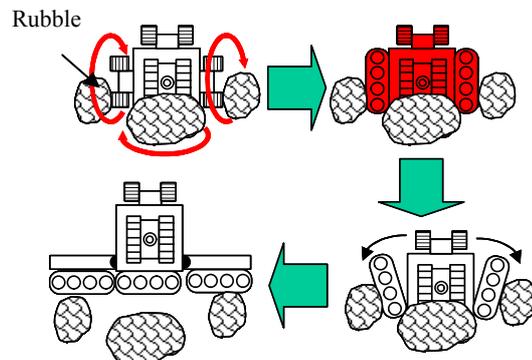


図6 窪地からの脱出

## 4.基本設計

### 4.1 基本構造

本章では、CUBIC-Rの基本構造を以下に述べる。

#### (1)機構部

機構部は六面体形状変化機構、クローラユニット及びこれらの結合部からなる。

##### 六面体形状変化機構

立方体形状を構成するための面プラットホームとそれらを開閉する機構からなる。各面プラットホームには、面開閉機構、コントローラ、傾斜センサ、バッテリー等を装着する。

##### クローラユニット×6

底面を正方形とする直方体形状。底面の一边の寸法は、クローラユニット間の接触を避けるため、六面体形状変化機構の正方形の一边の長さの1/2以内とする。左右のクローラは独立に駆動する。

##### クローラユニットと六面体形状変化機構の結合部

クローラユニットと六面体形状変化機構をパッシブな軸で結合し、相対角度を維持するための電磁ブレーキと相対角度検出用のポテンショメータを装着する。

#### (2)制御システム

制御システムは、運動制御コントローラ、面開閉制御コントローラ、クローラ制御コントローラからなり、各コントローラは体内LAN(RS-485)で結合される。制御システムのブロック図を図7に示す。

##### 運動制御コントローラ

移動機構全体の運動を制御する。

##### 面開閉制御コントローラ

運動制御コントローラの指令に基づいて、面展開機構及びクローラユニットとの結合部のロック機構を制御するとともに、傾斜センサからのデータを運動制御コントローラに送る。

##### クローラ制御コントローラ

運動制御コントローラの指令に基づいて、クローラユニットの左右クローラを駆動する。

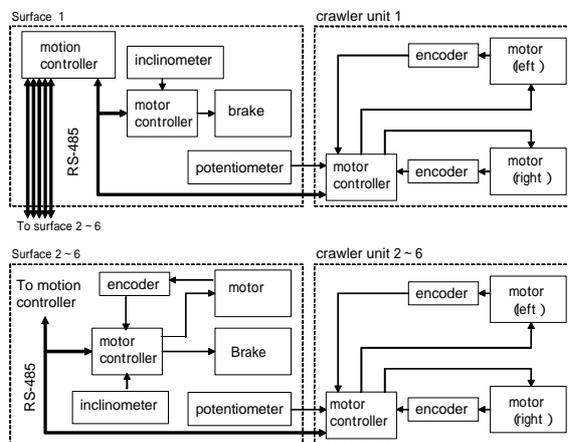


図7 CUBIC-Rシステムブロック図

### 4.2 面開閉機構の基本設計

面開閉機構はCUBIC-Rの重量及び寸法を決定する上で最も影響が大きい要素である。なぜなら、3章5)項で述べた窪地からの脱出時に開閉機構で移動機構全体を持ち上げる必要があるため、これに必要なトルクは他の移動戦略に比べ非常に大きいと考えられるからである。

#### 4.2.1 面開閉トルクの推定

最初に、シミュレーションにより、面の開閉に必要なトルクを推定する。このシミュレーションに用いたパラメータは次のとおりである。

- ・各面のサイズ 500×500×100mm
- ・各面の質量 3kg(一様に分布していると仮定)
- ・面の運動

各面開閉時には静止した状態から、加速、等速、減速を経て終点に静止とする。(開閉開始から終了まで3secとし、加速度、減速度時間0.5secとする。等速運動時の速度は、 $36^\circ/s$ とする。)

- ・摩擦係数 面と障害物との動摩擦係数を0.5とする
- ・ヤング係数 面と障害物のヤング係数を $1 \times 10^9$ とする
- ・各面開閉機構の番号(図8)

シミュレーションには、機構解析ソフトウェアDADSを用いた。

#### 1) 面格納トルクの推定

面を展開状態から格納する際に必要トルクは、Joint2のみが2面を格納する必要があるため、格納時のトルクが最も大きくなる。図9に示す駆動系2のトルクシミュレーション結果より、格納時の最大トルクは22Nmとなる。

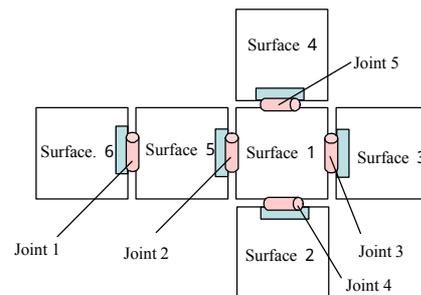


図8 面と駆動系の番号割振り

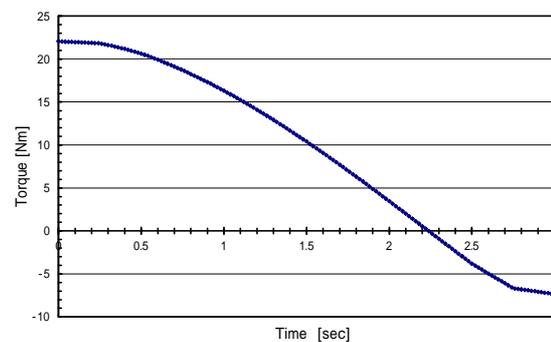


図9 Joint2の面格納トルク

2) 面展開トルクの算出

面を格納状態から展開する際は、通常であれば大きなトルクを必要としないが、窪地脱出時には大きなトルクが必要となる。このため、窪地脱出時の条件を図10のように設定し、必要トルクを推定する。窪地の幅に関してはCubic-Rが回転できない状況を想定しており、また窪地の高さhは、立方体の一辺の長さ(500mm)の30%(150mm)、50%(250mm)、80%(400mm)の値に対してシミュレーションを行った。また、展開する面は、面2と4とし、駆動するアクチュエータはJoint4及び5とした。

h=150, 400mmにおけるシミュレーション結果を図11に示す。図11(a)における領域Aは、窪地の壁面との干渉なしに展開している領域である、領域Bは、窪地の壁面と展開面が衝突して振動している領域である。領域Cは、窪地の壁面と展開面が接触して移動機構を持ち上げている領域であり、このときのトルクが求めるトルクとなる。3つのパラメータの結果において、必要となるトルクはほぼ同じで、その値は、おおよそ27Nmとなる。

1)と2)項のシミュレーション結果から、面開閉に必要な最大トルクは、27Nmとなる。実装検討を行った結果、製作するCUBIC-Rの寸法等の仕様を表1に示すように定めた。これより、製作するCUBIC-Rの正六面体の一辺の長さは26cmとなり、各面の質量は、シミュレーションで用いた値とほぼ同じになる。したがって、製作するサイズにおける必要な面開閉トルクは、27Nm × 260/500=14Nmとなる。

4.2.2 面開閉機構の設計

面開閉のための具体的な機構は、クローラユニットとの干渉や、土砂による噛み込みを極力回避するために、立方体内に実装することが望ましく、かつ、面展開時と格納時の開閉伝達トルクに大きな差が出ない機構とするため 図12に示す四節リンク機構を採用することとした。

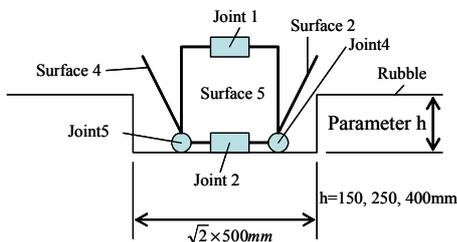


図10 窪地からの脱出を想定したモデリング

表1 CUBIC-Rの諸元

|                                   |                          |
|-----------------------------------|--------------------------|
| Total Weight                      | 18 kg                    |
| Each surface weight               | 3 kg (approximate value) |
| Cubic size (Without Crawler unit) | 260 × 260 × 260 mm       |
| Robot size (Standard mode)        | 360 × 360 × 360 mm       |
| Robot size (Full expansion mode)  | 1040 × 780 × 210 mm      |

この四節リンク機構に関して、面展開・格納に必要なトルクを満足するリンク長について検討する。

最初に、面を完全に格納(または展開)した状態から展開(または格納)する時の瞬間のトルクについて検討する。これらのトルクは、駆動系の出力軸のトルクを  $t$  とすると、次式により求まる。

1) 面展開トルク(図.12 (a))

$$t_o = \frac{t \cdot \sin q_2 \cdot \sin q_3 \cdot \sqrt{L_3^2 + L_4^2}}{LA} \quad (1)$$

ここで、

$$q_1 = 180^\circ - \sin^{-1}\left(\frac{LC - LAX}{LA}\right)$$

$$q_3' = \sin^{-1}\left(\frac{L_2 + LC - L_3}{LB + L_5}\right)$$

$$q_3 = q_3' + \sin^{-1}\left(\frac{L_3}{LZ}\right)$$

$$q_2 = 180^\circ - q_1 - q_3'$$

$$LB = \sqrt{L_4^2 + (L_2 + LC - L_3)^2} - L_5$$

$$LA = \sqrt{(LC - LAX)^2 + (L_1 - LAY)^2}$$

$$LAX = L_5 \cdot \frac{L_2 + LC - L_3}{LB + L_5}, LAY = L_5 \cdot \frac{L_4}{LB + L_5}$$

である。

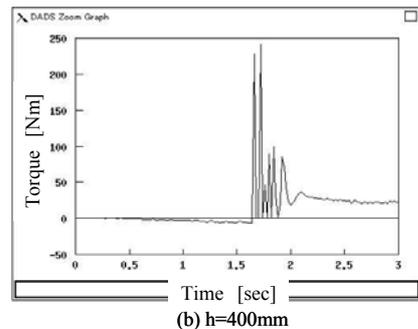
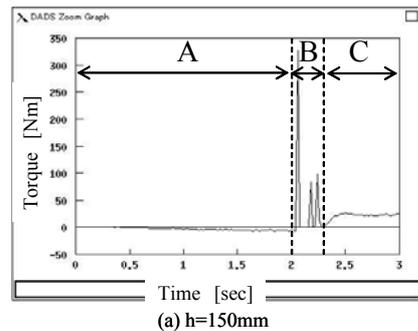


図11 駆動系4(5)の面展開トルク

2) 面格納トルク(図.12(b))

$$t_c = \frac{t \cdot \sin q_5 \cdot \sin q_6 \cdot \sqrt{L_3^2 + L_4^2}}{LA} \quad (2)$$

ここで

$$q_6 = q_6' + \cos^{-1} \left( \frac{LX^2 + LZ^2 - (L_1^2 + L_2^2)}{2LX \cdot LZ} \right)$$

$$q_6' = 180^\circ - q_4 - q_5$$

$$q_5 = \cos^{-1} \left( \frac{X}{LB} \right)$$

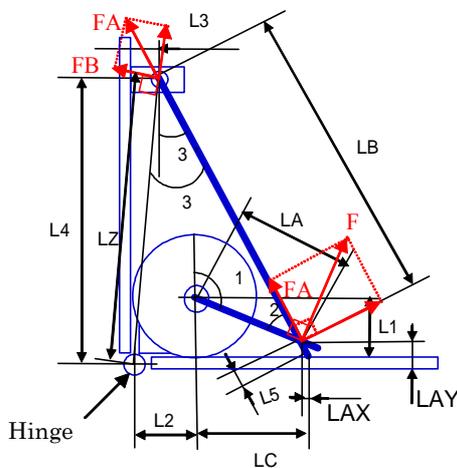
$$q_4 = \cos^{-1} \left( \frac{LA - X}{LX} \right)$$

$$X = \frac{LA^2 + LB^2 - LX^2}{2LA}$$

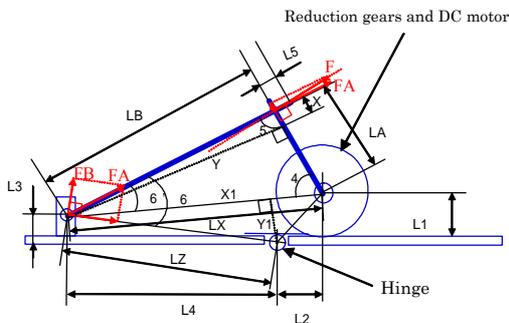
$$LX = \sqrt{L_4^2 + (L_1 - L_3)^2}$$

である。

(1), (2)式において, LCを変数として, 面展開(格納)トルクの変化を計算した。この計算に用いたパラメータは次のとおりである。



(a) standard mode



(b) Full expansion mode

図12 面開閉トルクシミュレーションモデル

駆動系(モータ + 減速機)の出力軸の最大連続トルク

15Nm

・パラメータLCの範囲0 ~ 50mm

・その他寸法

L1=L2=20.0mm, L3=18.0mm,

L4=50.0mm, L5=10.0mm

図13に計算結果を示す。この結果において, リンク長の候補として, 展開・格納トルクとも大きな値を示す LC=30.0mm(LA=27.2mm, LB=49.4mm)のポイントを選択する。

先に決定したリンク長の候補に関して, 面格納位置から面展開位置へ展開・格納する場合のトルク変化をシミュレーションした 図14にシミュレーション結果を示す。この図において, q1 は駆動系の出力軸に結合したリンク LAと駆動系を固定した面プラットホームに平行な線とのなす角である。この結果により, 面の可動範囲内では極大値をとるようになめらかに展開(格納)トルクが変化しており, 特異点等の存在は認められなかった。面格納時における面展開トルクが要求仕様の14 Nmよりいくらか下回っているが, この要求仕様は, 図6,10に示す窪地脱出戦略において, 窪地の壁にクローラが接触する場合を想定している。本研究では, 窪地の壁の高さを立方体の1辺の80%までを想定しており, このとき, 壁と接触する 1の値は7.0°(図14におけるA点)で, このときの面展開トルク値は約17.5Nmとなり, 要求仕様を満足している。

以上の検討結果から, 四節リンク機構のリンク長LA, LBをそれぞれ27.2mm, 49.4mmとする。

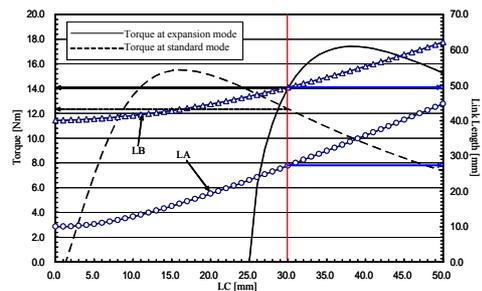


図13 リンク長と面開閉トルクの関係

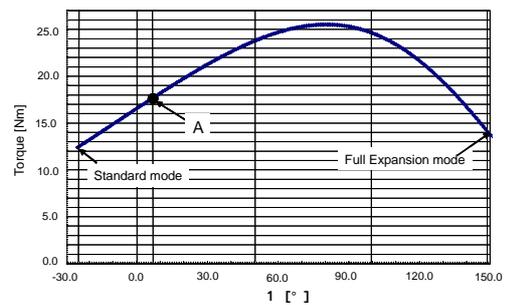


図14 面格納から面展開までのトルク変化

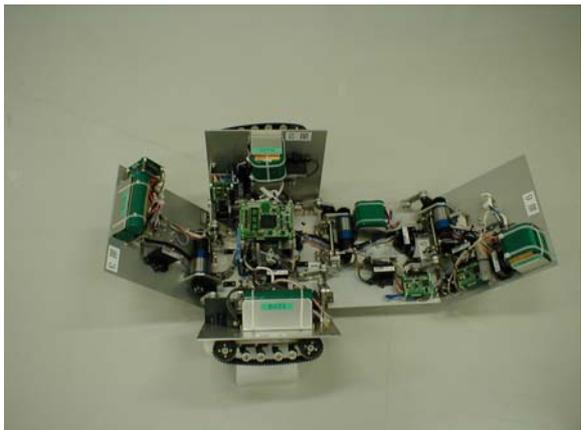
#### 4.2.3 部分試作機

図15に部分試作機を示す。なお、本年度は部分試作機のため、クローラユニット及びピクローラユニットと六面体形状変化機構との結合部は、全6式のうち3式である。

ここで、図15(a)は、standard modelにおけるCUBIC-Rを、図15(b)は形状変化時(Expansion mode)におけるCUBIC-Rを示す。



(a) Standard mode



(b) Expansion mode

図15 CUBIC-Rの部分試作機

#### 4.4 CUBIC-Rのシステム運用設計

CUBIC-Rは、モータ及びブレーキを含め23個のアクチュエータを有するため、CUBIC-Rを操作する際のヒューマン・マシンインタフェースとこれに関連する動作モードを慎重に検討する必要がある。

そこで、本研究では以下を基本構想として、今後の設計を実施する予定である。

##### コントローラ

素人でも扱い易いようブレーステーション2のコントローラで操作可能とする。

##### モニタ

ガレキ内におけるCUBIC-Rの姿勢等の状況を瞬時に把握できる姿勢モニタソフトを開発する。

##### 動作モード

項の要求を満たすための効果的な動作モードを

設定する。

#### 5.おわりに

本報告では、あまり大きなボディでなくても大きなギャップに対応でき、かつ、狭部等への進入が可能なクローラ型の移動機構CUBIC-Rを新たに考案した。

また、基本構成の検討、及び主要機構部の設計を行い、部分試作機を製作した。最後に、今後のCUBIC-Rのシステム運用の構想についても述べた。

今後は、CUBIC-Rを実際に動作させて評価試験を行い、問題点を洗い出し、来年度の完全試作品製作に繋げる。また、並行して運用システムの構築を行う予定である。

#### 参考文献

- [1] 高森, “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] John G. Blich: "Rapid technology Injection for crisis Assessment & Response", ONR Industry Partnership, 14th/Aug/2002, www.naval-industrypartners.com/02%02presentations/aug13/blich.pdf
- [3] 広瀬, "屋外で活躍するロボットの機構設計", 日本ロボット学会誌, Vol.18, No.7, pp.904-908, 2000.
- [4] 渡部, 松原, 稲垣, 高橋, 佐々木, "ガレキ内の要救助者探査機器の開発その1-進入機構の試作-", 日本火災学会発表会概要集, pp.235-238, 1991.
- [5] 塚越, 北川, 小山, "ガレキ内推進を目指した多自由度能動ホースの開発", SI部門学術講演会, pp.389-390, 2001.
- [6] 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 ROBOMECH'99講演論文集, 1P2-40-054, 1999.
- [7] 小林, 高森, 高島, 下中, 小濃, "レスキュー探査用ユーティリティービークル3号の開発", 日本機械学会 ROBOMECH'01講演論文集, 1P1-E4, 2001.
- [8] 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", SI2002講演論文集(I), pp.243-244, 2002.
- [9] 天野, 稲葉, 田畑, "ガレキ下に取り残された要救助者探査に必要な要素技術に関する研究", 文部科学省大都市大震災軽減化特別プロジェクト 被害者救助等の災害対応戦略の最適化 レスキューロボット等次世代防災基盤技術の開発 公開シンポジウム論文集, pp.19-20, 2003.
- [10] 稲葉, 田畑, 張, 天野, "ガレキ下に取り残された要救助者探査に必要な要素技術に関する研究-新しい移動機構の提案-", 文部科学省大都市大震災軽減化特別プロジェクト 被害者救助等の災害対応戦略の最適化 レスキューロボット等次世代防災基盤技術の開発 公開シンポジウム論文集, pp.21-26, 2003.

# 絵付けイメージ構築に関する研究開発

柘植 英明\* 臼井 正和\*\* 岩田 靖三\*

浅野 良直 棚橋 英樹 小川 行宏

## Development of Printing Image for Inkjet System

Hideaki TSUGE\* Masakazu USUI\* Seizo IWATA  
Yoshinao ASANO\*\* Hideki TANAHASHI Yukihiko OGAWA

あらまし 岐阜県の陶磁器産業（美濃焼）は、自動化による量産技術を駆使し、飲食器・タイルを主要製品として国内外に出荷することで発展してきた。しかし、飲食器の市場は、国内需要の大幅な落ち込みに加え、海外製品の輸入攻勢などからピーク時の半減という厳しい状況となっている。そこで、飲食器の市場競争力の強化と美濃焼の活性化を図ることを目的として、見本品の作製や小ロット受注にオンデマンドで対応できるロボットシステムの構築を目指す。印刷解像度100dpi、フルカラー絵付けという高付加価値製品の創出を目標に、デジタル画像を無機顔料インクで絵付けを行う、カップ用および皿用の加飾ロボットシステムを開発する。本研究では、1)飲食器の3次元形状を計測するプログラム、2)ロボット座標系と計測座標系とをマッチングさせるキャリブレーションプログラム、3)3次元形状計測データからモデリングするプログラム、4)モデリングした形状に画像をマッピングし、描画位置と色情報から加飾データを作成するプログラムの開発を行った。

キーワード 陶磁器、インクジェット、キャリブレーション、モデリング、マッピング

### 1. はじめに

#### 1.1 背景

飲食器の市場は、ライフスタイルの変化や自分志向という価値観の変化から、「百元均一に代表される低価格製品」「高級なブランド品」「自分らしさを表現できるオリジナル製品」「手づくり風製品」等、ますます多様化、個性化している。また、技術面では、中国をはじめとする東南アジア諸国の製造技術が格段に向上し、品質面においても遜色のない製品が市場に供給され、美濃焼メーカーが得意とする量産品の分野で厳しい価格競争を強いられている。そのため、飲食器メーカーにおいては、他の産地や海外製品との差別化による市場拡大を図るために、多品種少量生産・オンデマンド対応等による、高付加価値製品の創出が求められている。特に、飲食器における絵付けは、商品価値を高め、オリジナリティを出す重要なポイントとなっているが、美濃焼メーカーでは、パット印刷やシルクスクリーン印刷による絵付けを行っているため、多品種少量生産向けの新しい加飾技術を模索している。

#### 1.2 研究目的

このような背景から、多品種少量生産・オンデマンド対応等による、高付加価値製品の創出を目的として、飲食器のカップ用および皿用加飾ロボットシステムの開発を行う。これにより、飲食器の市場競争力の強化と美濃焼産業の活性化が期待される。このシステムは、カップおよび皿の素焼き製品に、デジタル画像を、印刷解像度100dpi、フルカラーで絵付けを行うシステムであり、見本品の作製や小ロット受注にオンデマンドで対応することが可能となる。

#### 1.3 研究内容

見本品の作製や小ロット受注にオンデマンドで対応可能な加飾ロボットシステムを構築するためには、デジタルカメラやスキャナー等から得られるデジタル画像を用いて、容易に加飾できるシステムを構築する必要がある。そこで、本研究では、3D計測した形状データを基に、パソコン上に形状モデルを構築し、そのモデル上に画像を貼り付けることで、印刷(加飾)データを作成できるインターフェースを開発する。この3D計測から、加飾データの作成までを行うために、以下のプログラムを開発する。

飲食器の3次元形状を計測するプログラム

ロボット座標系と計測座標系とをマッチングさせるキャリブレーションプログラム

計測データから、加飾に必要な形状を抽出するプログラム

\* 兼セラミックス技術研究所

\*\*セラミックス技術研究所

モデリングした形状の上に画像の貼り付け(マッピング)を行い、形状と画像位置および色情報から加飾データを作成するプログラム

これらのプログラムにより、異なる製品に対しても容易に加飾データを作成することが可能となる。

## 2. 3D計測およびキャリブレーション

### 2.1 3D計測の概要

加飾システムでは、飲食器とノズル先端との距離を3mm～5mmの間の任意値に保ちながら、ノズル位置制御とインク噴霧制御を同期させ、指定された飲食器加飾領域に絵付けを行う。そのため、飲食器の形状と設置位置を正確に把握してロボットを制御しなければ、ノズルが飲食器に衝突したり、飲食器とノズル先端との距離の変動により、ぼけた絵柄となる可能性がある。また、ハンドル付のカップにおいては、ハンドルとノズルの衝突が生じるため、計測によりハンドル位置を把握することが必要である。なお、対象とする飲食器のサイズから、カップ用システムでは、TDS-0530A(パルステック工業(株)社製)、皿用システムでは、TDS-1500A(パルステック工業(株)社製)の3D計測器を用いた。

### 2.2 キャリブレーション

#### 1) カップ用システムのキャリブレーション

カップ用システムでは、スピンドル台表面とスピンドル回転軸との交点が、グローバル座標原点である。そのため、スピンドル台表面を3D計測し、この平面方程式を求める。また回転軸を求めるため、3個の球が異なった高さに設定された3球キャリブレーションキットを作成した。これをスピンドル回転台上に設置し、120度間隔や90度間隔で回転させながら3D計測し、それぞれの位置での球の方程式を求め、それら球の中心位置から回転軌跡を算出し、回転軸を求める。

回転行列を求める手順は、スピンドルを0度の位置へ回転させた後、正方形キャリブレーションキットのエッジ部分(面と面との間の直線)をノズル方向に合わせ、その後3D計測を行い、エッジ両面の平面方程式から、X軸方向を求める。

#### 2) 皿用システムのキャリブレーション

皿用システムでは、シッタ表面と設置する皿の回転中心軸の交点が座標原点である。しかし、シッタ表面の計測ができないため、シッタ上に設置できる円盤キャリブレーションキットを作成した。この円盤表面は、シッタ表面と平行になっているため、円盤の厚みを考慮する事でシッタ表面の平面方程式は求まる。また円盤表面に設ける仮の座標原点より、シッタ表面にある本当の座標原点を求めることができる。円盤キャリブレーションキット上には、グローバル座標のX軸Y軸を線引きしてあり、この交点を円盤キャリブレーションキット上の仮の座標原点とする。(この仮の座標原点より円盤の厚さ分だけ

Z値が低い点が本当の座標原点である。)このX軸、Y軸に別途作成した3角錐キャリブレーションキットを合わせて軸方向を求める。具体的には、3角錐キャリブレーションキットのエッジをそれぞれX軸、Y軸に合わせて1回づつ計測を行い、それぞれ測定された3面の方程式を求める。その後、この内の2面と円盤表面の交点よりX軸上の2点Y軸上の2点を求め、それぞれの点を結ぶ直線の交点(仮の座標原点)と、各点の方向(X軸・Y軸方向)を求める。Z軸はX軸Y軸の外積により求める。座標原点は仮の座標原点より円盤の厚み分Z値が低い位置にある。

### 2.3 3D計測プログラム

プログラムのフローチャートを図1に示す。測定モード設定では、測定方法(エリア計測・ライン計測)、測定モード(広角・狭角、細かい・荒い測定間隔)、レーザーパワー(1～4)の設定を行う。測定方法は、カップ計測はライン計測、皿計測及びキャリブレーション用計測はエリア計測を用いている。測定モードは、対象飲食器形状にあわせて操作者が変更できるように、操作画面上で設定ができる。3D計測器設定では、計測器電源投入後の最初の計測時のハードウェアリセットや、測定モード変更後のリセット処理を行う。

皿は1回の3D計測(エリア計測)で終了する。一方、カップは、スピンドルを回転・停止させながら3D計測(ライン計測)を角度分割数(360度÷ステップ角度)回行う。スピンドル台の制御は、ロボット制御を行うボードコンピュータSH3で行っているため、SH3とのシリアル通信(RS232C)によるコマンドの送受信により行っている。

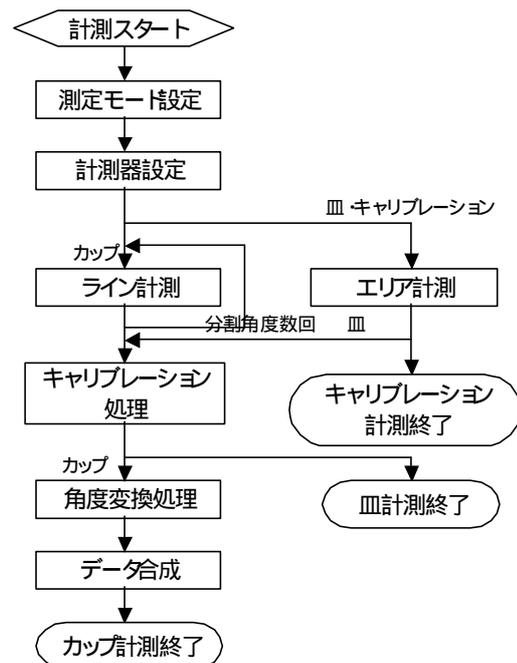


図1 計測プログラムのフローチャート

## 2.4 3D計測結果

ハンドル付カップおよび八角皿を計測した結果を 図2 および図3に示す。なお、測定器の繰り返し精度を評価するため、測定誤差の大きいTDS-1500Aにおいて円盤キャリブレーションキット表面を10回計測した。その結果、平均誤差は、0.32mmとなり、繰り返し精度が良いことがわかった。



(a)カップの概観 (b)計測結果  
図2 ハンドル付カップの計測結果



(a)皿の概観 (b)計測結果  
図3 八角皿の計測結果

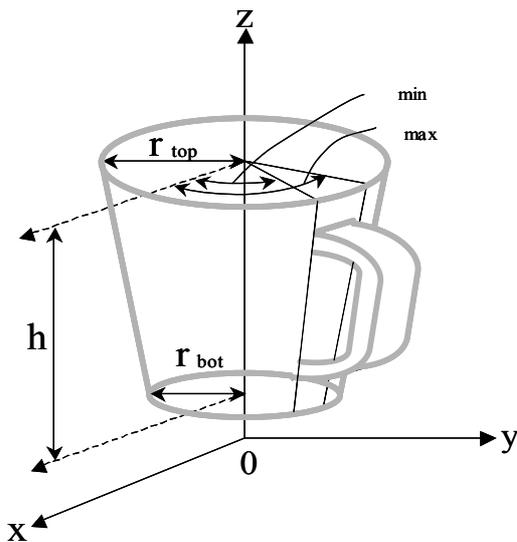


図4 カップ形状の抽出データ

## 3. 製品形状の抽出

### 3.1 形状の抽出方法

#### 1) カップ形状の抽出

3D計測によって得られたカップ側面の3次元計測データ(カップ底面の中心を座標原点とした時の円筒座標系)から、カップの上径( $r_{top}$ )と下径( $r_{bot}$ )、そして高さ( $h$ )を求める。あらかじめ与えるハンドル有無の情報から、ハンドルが存在する場合には、ハンドル角度幅(ハンドル位置開始角度( $\theta_{min}$ )とハンドル位置終了角度( $\theta_{max}$ ))を求める。(図4)

#### 2) 皿形状の抽出

3D計測によって得られる点列データから、皿外形( $r_{shape}$ )、皿中央の高さ( $z_{center}$ )、加飾可能範囲半径( $r_{safe}$ )、リムの内径( $r_{rim}$ )、皿の高さ( $z_{height}$ )の抽出を行う。(図5)

### 3.2 形状抽出結果

#### 1) カップ形状抽出結果

ハンドル付カップを固定して繰り返し測定を行った場合、ハンドル角度は、計測間隔が小さくなる程精度の高い形状抽出が行なわれた。しかし、粗い測定と細かい測定の間には顕著な差は見受けられなかった。同じカップを毎回置き直して測定した場合には、ハンドル角度幅に最大誤差として3°程のばらつきが見られたが、上径・下径や高さには顕著なばらつきは見受けられなかった。ハンドル角度幅に最大誤差として3°程の誤差が生じたのは、計測間隔が1°であることが大きな要因と言える。

#### 2) 皿形状抽出

測定間隔が荒い場合と細かい場合において、丸皿および八角皿を繰り返し10回測定した結果、計測誤差は最大0.39mmとなり、測定器の計測精度が概ね0.3mmであることを考慮すると、測定間隔にはほとんど影響されていないと言える。形状抽出項目の内、加飾可能範囲半径の誤差が最大0.7mmと大きくなった。これは、形状が急激に変化しているために、精度良く計測できないことが原因と考えられる。加飾可能範囲半径は重要なパラメータなので、装置の稼動をとおして加飾可能範囲半径を補正する必要がある。

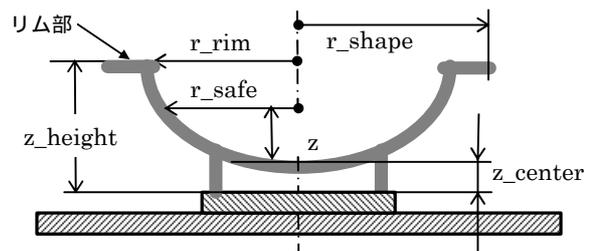


図5 皿形状の抽出データ

## 4. 画像マッピングインターフェース

### 4.1 概要

カップおよび皿に画像を加飾するためには、1)画像ファイルの選択、2)加飾画像サイズの指定、3)画像貼り付け位置の指定、4)加飾データの作成、が必要である。マッピングインターフェースは、これらの加飾に必要な情報をパソコン上で簡潔に入力できるインターフェースであり、上述した加飾情報を簡単なキー操作およびマウス操作によって行なうことができる。なお、用いる画像データは、BMP(24ビットマップ)形式である。

### 4.2 マッピングインターフェース

図6にカップ用のマッピングインターフェースを示す。画像はキー操作により、加飾範囲内で自由に位置および

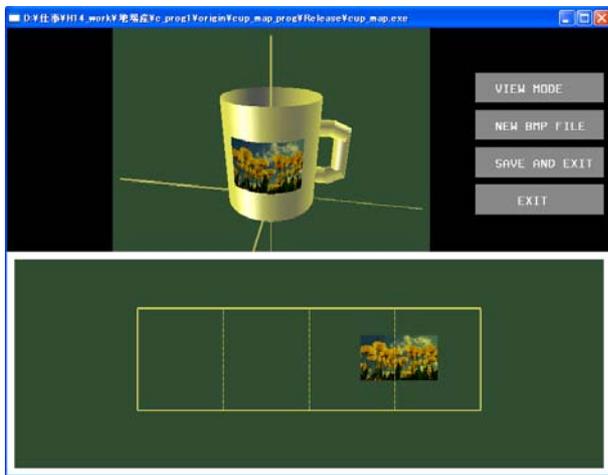


図6 マッピングインターフェース(カップ用)



図7 加飾に用いた画像



図8 加飾後に焼成したカップ

サイズを調整することができる。加飾サイズと位置を決定した後に、加飾データ作成ボタン(SAVE AND EXIT)をマウスによりクリックすることで、加飾データが作成できる。なお、皿用インターフェースは、3D表示ウィンドウは無いが、その他は全て同様な操作ができる。

## 5. カップ用加飾システムによる加飾実験

カップ用および皿用加飾システムは、上記マッピングインターフェースで作成された加飾データを基に、機械駆動およびノズル制御データを作成しているため、実際のカップ用システムを用いて、加飾実験を行った。加飾条件は、解像度:80dpi、階調:各色10階調、画像サイズ:200×75mmである。加飾に用いたデジタル画像を図7、実際に加飾を行い、焼成したカップを図8に示す。

## 6. まとめ

デジタル画像を陶磁器製品に加飾するために必要な

- ・3D計測器を用いた3D計測および、キャリブレーションシステムの開発

- ・形状データを抽出するプログラムの開発

- ・パソコン上で画像を容易に貼り付け、加飾データを作成する、マッピングインターフェースの開発

を行った。その結果、

- 1) 計測システムは、測定誤差や繰り返し精度など良好な値であることがわかった。しかし、3D計測器電源投入時間に対する絶対位置の変化など問題も残されている。より精度を出すためには、測定方法など今後更に工夫する必要がある。

- 2) 3D計測による点列データから、モデリングに必要な形状データを抽出するプログラムを開発した。計測実験の結果、カップ用、皿用共に、計測器の精度とほぼ同等の結果を得ることができた。

- 3) パソコン上で画像を貼り付け、加飾データを作成する、マッピングインターフェースの開発を行った。さらに、実機により加飾試験を行った結果、良好な結果を得た。但し、RGBからYMCKへの変換は、用いるインクや素地によって調整が必要であるため、今後実際の加飾を通して調整を行っていく必要がある。

本研究は、平成14年度即効型地域新生コンソーシアム研究開発事業(テーマ名:陶磁器加飾ロボットの開発)のサブテーマとして行なわれた研究成果の一部である。

## 文献

- [1] デービステンチャップマン, "Visual C++6.0", 日経BP社, 2001.
- [2] OpenGL Architecture Review Board, "OpenGL リファレンスマニュアル(第2版)", (株)アソシエイトエデュケーション, 1999.

# 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)

浅野 良直      棚橋 英樹      山田 俊郎      横山 哲也

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

Yoshinao ASANO    Hideki TANAHASHI    Toshio YAMADA    Tetsuya YOKOYAMA

あらまし 本研究では没入型ディスプレイシステムにおける入力インタフェース(以下インタフェース:IF)の開発を行った。本研究で使用した没入型6面ディスプレイシステム(以下COSMOS)のような装置は、ユーザがスクリーン内を自由に移動できるため可搬性の優れた入力IFが必要となる。従来、COSMOSで使用してきたモデルビューアの入力IFはゲーム機のコントローラだけであったため操作機能が増えるとボタンによる操作が複雑になる問題が生じた。そこで、昨年度は複雑なボタン操作を解消するためスクリーンにメニュー画面を呈示するメニューIF開発を行ったが、目的のメニュー画面を直接開くことができなく、3次元オブジェクトが多数存在すると選択に時間を要するなど、メニュー画面の数や操作機能が増えた場合に作業性が低下する可能性がある。そこで、本年度はCOSMOSのモデルビューアの作業性を向上させるために音声入力IFと指示操作IFの導入を行った。音声入力IFを使用することでメニュー画面が多数存在しても目的のメニュー画面を音声入力指定できる利点がある。また、指示操作IFはユーザの指示操作でオブジェクトの選択及び移動操作を行えるため、オブジェクトを長距離移動させる場合はコントローラよりも作業時間を短縮することができた。

キーワード COSMOS, バーチャルモックアップ, バーチャルリアリティ, ユーザインタフェース

### 1. まえがき

近年、製造業界は消費者ニーズの多様化に対応するため多品種少量生産で短期間に製品を市場に投入できる製品開発工程が必要とされている。一般的に製品開発はデザイン、設計の問題点を試作段階で抽出して設計変更を行い、再度、試作で問題を抽出する方式を用いている。しかし、試作工程は多くの労力と時間を必要とし材料コストも高いため、何度も試作を行うことは開発費用の削減と開発期間の短縮の大きな障害となる。そこで、試作回数を減らす方法としてデザイン、設計工程での3次元ソフトウェアの利用が考えられる。3次元ソフトウェアでモデリングした3次元オブジェクト(以下オブジェクト)は自由な視点で形状等を検証できるため、試作で行っていた問題抽出をデザイン、設計段階で対応する事が可能となる、これにより試作時の問題抽出数が減少し、試作回数を減らす事ができる<sup>[1]</sup>。

没入型6面ディスプレイシステム(以下COSMOS(図1))はユーザをスクリーンで取り囲んで立体視映像を呈示できるため、大型製品でも実物大で全体を表示できる特徴を持っている。COSMOSが設置された当初はゲーム機のコントローラを入力インタフェース(以下インタフェース:IF)としてモデルビューアの開発を行ったが、企業ニーズによって操作機能を追加していくと、それに伴ってボタン操作が複雑化する問題を生じた。昨年度は

複雑化したボタン操作を解消するためにスクリーン内で使用できるメニューIFの開発を行った<sup>[2]</sup>。しかし、開発したメニューIFは目的のメニュー画面を直接開くなどのショートカット機能がなく、オブジェクトが多数表示されると選択に時間を要するなどの作業性に問題が生じた。そこで、本年度はモデルビューアの作業性を向上させるために音声入力IFと指示操作IFの導入を行った。また、指示操作IFについてはコントローラとの作業性を比較したので報告する。



図1 没入型6面ディスプレイシステム(COSMOS)

## 2. モデルビューアの入力IF

COSMOSのようなCAVE型没入ディスプレイは、ユーザがスクリーン内を自由に移動して自由な角度でオブジェクトを検証できるため非常に高い没入感を呈示することができる。このような特徴を活かすため、使用する入力IFとしては以下の点を考慮する必要がある。

- ・可搬性が高い
- ・複雑な操作を必要としない
- ・没入感を阻害しない

このような仕様を満たす入力IFとして、ゲーム機のコントローラやWandのような片手で操作できる小型IF<sup>[3,4]</sup>やデータグローブや装着型力覚ディスプレイのような装着型IF<sup>[5,6]</sup>、音声認識ソフトを利用した音声入力IFなどがある。

モデルビューアで使用する入力IFを考慮した場合、現在使用している小型IFはボタンやジョイスティックにより連続した移動操作やメニュー画面のスイッチとして使用できるが、ボタン数が少ないため作業性を向上させるショートカット機能などを加えることができない問題がある。音声入力IFはメニューIFのショートカット機能などで利用できるが、オブジェクトの移動操作などを音声入力IFだけで行うことは困難である。そこで、オブジェクトの選択及び移動操作をユーザの指先で指示する装着型IFを利用して行い、音声入力IFでオブジェクトの選択や移動先を決定できるようにした。

### 2.1 音声入力IF

モデルビューアでは音声入力IFを目的のメニュー画面を直接表示するためのショートカット機能として利用した。また、後述する指示操作IFはオブジェクト及び移動先の指示を行うだけであるため、指示後の選択及び移動操作の実行スイッチとして利用した。(以下、「」内は音声入力を示す。)

音声入力IFは音声認識エンジンJULIUS<sup>[7-9]</sup>を利用して核融合科学研究所の田村らが開発した音声認識システム<sup>[10]</sup>をCOSMOSに移植して利用することにした。

#### 2.1.1 JULIUSの改良

音声認識システムで使用しているJULIUSをCOSMOSの音声入力IFとして使用する際に以下の問題点が生じた。

- ・全てのスクリーンにオブジェクトが表示されるため、スクリーンにいるユーザは現在の認識処理状態を判断ができない
- ・他者との会話まで音声入力として認識処理されるため、次の入力待機状態までの待ち時間が長くなる。そこで、次のように音声認識システムをカスタマイズして対応した。
- ・認識中は音を同時に出力させる
- ・翻訳ファイルに記載した認識文字列の1文で 사용되는最大単語数以上の音声入力が行われた場合、その時点で処理中の音声認識を終了させ、入力待機状

態までの時間を短くする。

これにより、COSMOS内のユーザは現在の音声認識処理状態を把握できるようになった。また、認識処理する単語数を決めることで会話の音声認識によって生じる長文の認識処理がなくなるため、会話終了後の音声入力の認識処理を開始するまでの時間を短くすることができた。

### 2.2 指示操作IF

3次元姿勢位置計測センサをユーザの指先に装着して指先の位置及び指示方向を測定して指示操作IFとして利用した(図2)。

#### 2.2.1 指示操作IFによるオブジェクト選択

指示操作IFでは以下の処理手順でオブジェクトの選択を行う。

指先の位置を原点にして仮想空間を分割し、指示方向の象限に存在するオブジェクトを指示選択の対象候補とする。

指示方向のベクトルと判別されたオブジェクトのBounding Box間で衝突判定を行い、最初に衝突が検出されたBounding Boxを黄色で表示する。

黄色で表示されたBounding Boxがユーザの指示したオブジェクトであれば「選択」と入力する(Bounding Boxが赤色で表示)。異なるのであれば「その他」と入力することで次候補のオブジェクトのBounding Boxを黄色で表示する。

なお、衝突判定はモデルビューアの開発で使用したIRIS Performer ライブラリのpfHit関数を利用した。

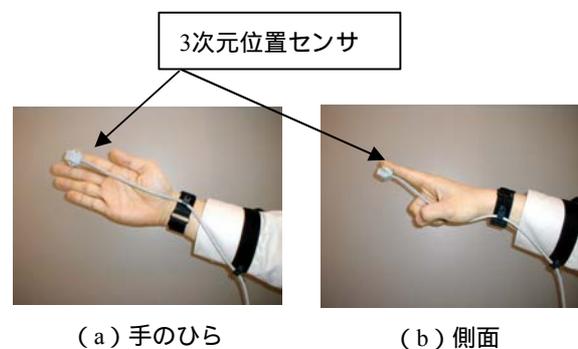


図2 指示操作IF

#### 2.2.2 指示操作IFによるオブジェクト移動

オブジェクトが選択されていた場合、ユーザは以下の手順で表示されるポインタの位置に選択したオブジェクトを移動させることができる。

指示方向に存在する選択されていないオブジェクトのBounding Boxとの交点にポインタを表示する。

による交点がない場合、COSMOSの床面または天井面との交点にポインタを表示する。

ポインタで移動先を指示できたら、「移動」と入力することで選択したオブジェクトが移動する。

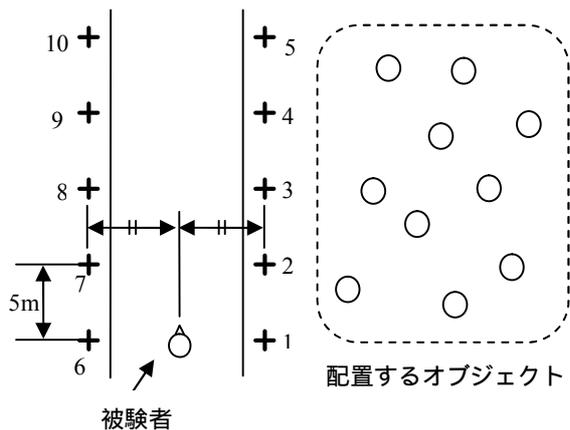


図3 オブジェクトの配置実験

なお、の交点に移動させる場合、ポインタで指示したオブジェクトと選択したオブジェクトが交差しないようにするため、交点の存在するBounding Box面上に選択したオブジェクトは移動する。また、の交点に移動させる場合は、選択したオブジェクトの原点をポインタの位置にあわせるように移動する。

### 3. 指示操作IFの評価実験

指示操作IFを使用することにより、オブジェクトの長距離移動も短時間で行うことができると考えられる。そこで、3.1に示すようなオブジェクトの配置作業実験をコントローラと指示操作IFで行い、配置作業完了までの作業時間と移動精度を測定することにした。

#### 3.1 実験方法

被験者は実験開始位置でコントローラおよび指示操作IFを使用して、ランダムに配置したオブジェクトを任意に選択し、+印で指定された位置(1~10)に配置を行う(図3)。評価対象として配置作業完了までの作業時間及び配置されたオブジェクトの中心から配置先(+印)の中心までの距離(配置精度)を比較する。

#### 3.2 実験結果および考察

コントローラ及び指示操作IFの作業時間を図4(a)に示す。また、各IFを使用したときの設置誤差を図4(b)に示す。これらの結果から本実験のような長距離移動の操作の場合、作業時間は指示操作IFを利用した方が短時間で済むことが分かった。しかし、移動精度を比較するとコントローラの方が誤差を少なく操作できる結果を得られた。

このような結果の原因として、指示操作IFはオブジェクト及び移動先を指先で直接指示できるため短時間で操作できるが、コントローラはオブジェクトを選択する度にメニューを開く必要があり、移動操作はボタン等を押し続ける連続した操作であるため、同じ距離を移動させる場合でもコントローラの方が時間を要することが考え

られる。次に、配置精度の場合、指示操作IFでは指先の傾きを指示方向として利用しているため、操作位置から離れた位置を指示する場合、指先の僅かな傾きで指示位置が大きく移動するため移動精度の誤差が大きくなったと考えられる。しかし、コントローラは連続した移動操作を一様な速度で行うことができるため、誤差の少ない結果を得られたと考えられる。

そこで、指示操作IFにおける移動精度の向上を検討するため、被験者の操作位置を自由に移動できるようにした状態で同様の実験を行った(実験結果:図5)。作業時間は先に行った指示操作IFの結果と同程度の時間であったが、誤差は先に行ったコントローラの結果よりも少ない結果を得られた。

被験者は配置先付近まで移動してからオブジェクトの配置作業を行うため、先の実験よりも作業工数は多くなるが、指示操作IFは配置先付近へ短時間で移動して、オブジェクトの配置先を全て近距離から容易に指示することができるため各オブジェクトの配置作業を短時間で終わることができたため、先の実験よりも作業工数は増えても、結果として同程度の作業時間で行うことができたと考えられる。また、近距離から配置先を指示作業を行ったので、先の実験のコントローラの結果よりも精度を高める事ができたと考えられる。

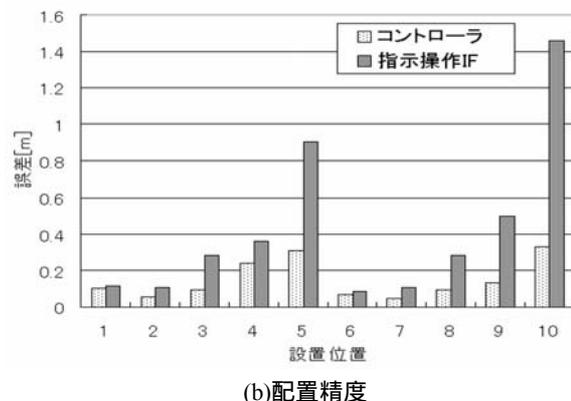
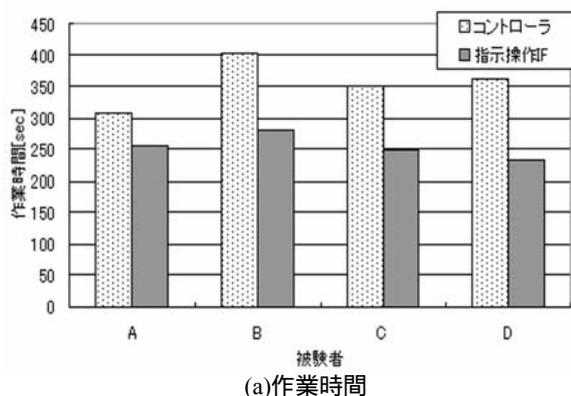


図4 オブジェクトの配置実験(実験結果)

これらのことから、指示操作IFはオブジェクトを長距離移動させる場合において有効であるが、移動精度を高くするには常に操作位置を移動先付近で行う必要がある。また、コントローラでオブジェクトを長距離移動させることは時間を要するため不向きであるが、一定の速度で行うことが可能であるため近距離での微少移動操作に有効であると考えられる。

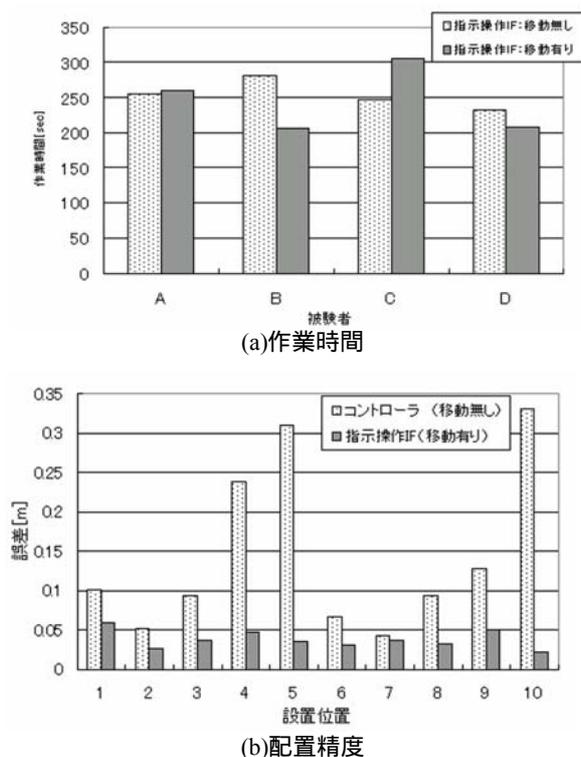


図5 操作位置を移動可能にした実験結果

#### 4. まとめ

COSMOSのモデルビューアで使用する入力IFとして音声入力IFと指示操作IFの導入を行った。

音声入力IFは目的のメニュー画面を直接開く事ができるなどのショートカット機能として利用できるが、COSMOSで使用する場合、スクリーン内では音声入力の認識処理が行われているかどうかをユーザが判断する手段がないため、認識処理中は音を出力して認識処理の状態を呈示した。また、会話のような長文が音声入力に認識処理に時間を要するため、次の入力待機状態までの待ち時間が長くなる。そこで、認識処理はユーザが作成した認識文字列の最大単語数以下で処理するように変更して、入力待機状態までの待ち時間を短くできた。

指示操作IFは短時間でオブジェクトの選択及び長距離移動の操作を行うことができる。しかし、細かい移動操作などは一定の速度で操作できるコントローラを使用し

た方が有効である。

COSMOSは様々な分野で利用できるシステムである。そのため、用途に応じて様々な機能を開発する必要があり、また、開発された機能を効率よく操作できるIFの開発は今後も必要である。

#### 謝 辞

本研究の一部は、遠藤育治郎記念科学技術振興財団研究助成金を受けて行われた。記して感謝します。

#### 文 献

- [1]トヨタ自動車株式会社「3次元ビジュアルエンジニアリング・システム = V-Comm ( ブイコム )」  
<http://www.ctc-g.co.jp/user/users/toyota/main.html>
- [2]浅野、藤井、小川、棚橋、“バーチャルモックアップによる製品評価システムの開発 (第1報)”, 岐阜県生産情報技術研究所研究報告第3号, pp.29-32,2002
- [3]Jerome Grosjean, Sabine Coquillart, "Command & Control Cube : a Shortcut Paradigm for Virtual Environments", Immersive Projection Technology and Virtual Environments, pp.1-12,2001
- [4]久木元伸如, 戸泉協, 橋本卓, 小田隆志, 岩崎勤, “設計支援のための図形思考支援環境の構築”, 日本バーチャルリアリティ学会第4回大会論文集, p323-326, 1999.
- [5]廣瀬通孝, 小木哲朗, 矢野博明, 箕直之, 中垣好之, “ワイヤーテンションを用いたウェアラブルフォースディスプレイの開発”, 日本バーチャルリアリティ学会大会論文集Vol.3, pp.1-4, 1998.
- [6]浅野、藤井、窪田, “多面ディスプレイ内の直感的作業に関する研究”, 岐阜県生産情報技術研究所研究報告No.1, pp.7-10,1999.
- [7]鹿野清宏, 伊藤克巨, 河原達也, 武田一哉, 山本幹雄, “音声認識システム”, オーム社, 2001.
- [8]松本裕治, 北内啓, 山下達雄, 平野善隆, 松田寛, 高岡一馬, 浅原 正幸, “日本語形態素解析システム『茶釜』version2.2.1 使用説明書”,  
<http://chasen.aist-nara.ac.jp/chasen/doc/chasen-2.2.1-j.pdf>
- [9]“大語彙連続音声認識プログラムの開発”,  
<http://winnie.kuis.kyoto-u.ac.jp/dictation/doc/lvcsr.pdf>
- [10]田村祐一, 陰山聡, 佐藤哲也, “音声入力による数値シミュレーション結果操作”, 日本バーチャルリアリティ学会第6回大会論文集, pp.375-376, 2001

# デジタルモックアップのための剛体運動シミュレーションに関する研究

横山 哲也 飯田 佳弘

## Research on Haptic Display of Rigid Body Simulation for Digital Mock-Up

Tetsuya YOKOYAMA Yoshihiro IIDA

あらまし デジタルモックアップを用いた組み立て（分解）検討は、問題の早期発見が可能で開発期間の短縮が期待される。本研究では力覚装置デバイスを用いた部品組み立て検討を想定し、インタラクティブで干渉なく拘束感を提示できるシミュレーション技術の実現を目的とする。人がシステム中に介在し、力覚を通してインタラクティブな操作を行うためには実時間処理が必然である。そして組み立て時の動的状態の部品形状妥当性を検討するには、部品同士が干渉することなく拘束感を提示する必要がある。そこで、幾何交差と最短距離を利用した衝突判定法、物体の非侵入性を利用した多点接触の拘束感提示方法を提案することで、計算量が少なく、干渉なく拘束感提示を実現することができた。また両側拘束が働くケースにおいて、有効に作用していることを実験で確認した。

キーワード デジタルモックアップ、剛体運動シミュレーション、衝突判定、非侵入性、拘束感提示

### 1. はじめに

近年、CAD/CAMの発達によりデジタルモックアップの活用が増えている<sup>[1]</sup>。特に組み立て（分解）検討は不具合発見時の出戻りの影響を小さくすることができ、開発期間の短縮が期待される。

組み立て作業は複数の部品が集まるアセンブリを対象とするため、組み立て順序によっては部品同士が干渉しあい組み立てが出来ないことがある。従って試行錯誤的な検討作業となるため、インタラクティブに組み立て検討できるシステムの実現が望まれる。こうしたシステムでは操作空間が3次元であるため部品の動きを既存のマウス等の装置で行うことは難しく、人が部品を手で持ち、運ぶような直感的操作で部品を動かすデバイスが必要である。更に、力覚装置を用いて拘束感を提示できれば作業効率を向上させることができる。

人がシステムに介在し、インタラクティブな操作を行うためには、応答の遅れは違和感を与え操作性の低下につながる。このため実時間で衝突判定、接触箇所特定を行う必要があるが、従来の衝突判定法では一般的な形状に対して前処理なしで実時間処理を行うことは難しい。最短距離計算手法<sup>[2]</sup>は、凸形状の性質を利用した物体間距離により判定するため、接触箇所を容易に求めることは出来るが、非凸形状に関して凸形状に分解する必要がある。形状の幾何交差を利用して物体間の体積干渉有無を判定する方法<sup>[3]</sup>は形状に依存されることはないが、接触箇所を実時間処理で求めることが難しい。

また、物体間の干渉排除（侵入解除）、反力計算（拘束感提示）も操作性に影響を与える。実装が容易で処理量が少ないペナルティ法<sup>[4,5]</sup>は物体間干渉を許して反力を計算する。神徳ら<sup>[5]</sup>は、はめ合いにおいて、一方の接触点での干渉により実質的な穴の径が膨らみ、他方の接触点で発生するべき接触が見落とされ、現実では不可能なはめ合いが可能になることを指摘しており、組み立て作業への適用は難しい。そのため現実に即した物体操作実現<sup>[6,7]</sup>、つまり物体同士が干渉することなく拘束感を提示する必要がある。足立ら<sup>[8,9]</sup>は干渉することなくインタラクティブな拘束感提示を可能とした。しかし多点接触を複数回の1点接触に分けて取り扱うため、両側拘束が働くケースを想定していない。1点接触は片側拘束となり1方向のみの運動を制限するが、両側拘束は両方向の運動制限であり、当然、多点接触でないと記述できない。組み立て作業中、はめ合いのような両側拘束となるケースがあるため、多点接触を考慮する必要があると考える。

本研究では力覚装置デバイスを用いた組み立て検討作業を想定する。そしてインタラクティブで干渉なく拘束感を提示可能なシミュレーション技術を実現するため、幾何交差と最短距離を利用した衝突判定法  
物体の非侵入性を保証した多点接触の拘束感提示  
を提案する。

### 2. 剛体運動シミュレーション

本研究における剛体運動シミュレーションの概略処理

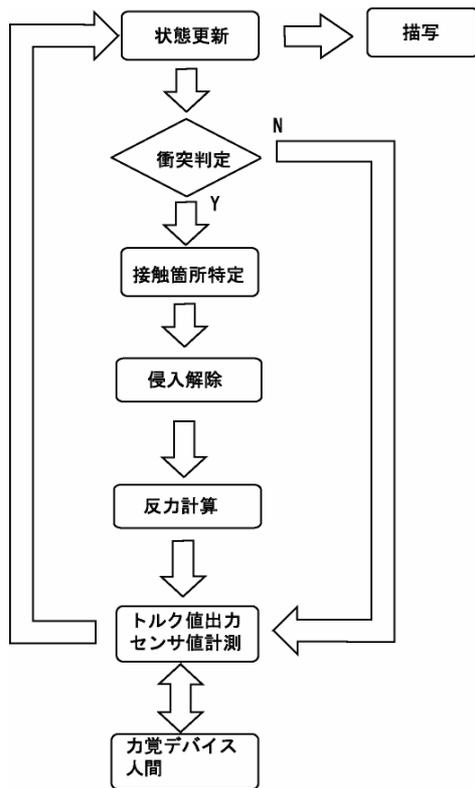


図1 剛体運動シミュレータの処理手順

手順を図1に示す。

物体の状態が更新後、衝突判定で物体間の干渉有無を判定する。衝突判定は複数の物体間で体積共有部分を持つ干渉状態を検出するアルゴリズムである。剛体シミュレーションでは衝突判定だけでは不十分で、力が作用する接触箇所を特定しなければならない。接触箇所より、拘束運動を行うための微小移動距離を求める。それと同時に操作者に拘束感提示するため反力計算を行う。これらの処理ループに掛かる時間を小さくすることで、インタラクティブな操作の実現が可能となる。

なおトルク値出力、センサ値計測は共有メモリを介して、1kHzの独立処理ループで動く。

### 3. 幾何交差と最短距離を利用した衝突判定

衝突判定法を大別すると、物体間の最短距離に着目した最短距離計算手法<sup>[8]</sup>や、形状の幾何交差を利用して物体間の体積干渉有無を判定する方法<sup>[9]</sup>がある。剛体シミュレーションは力が作用する接触箇所を特定するため、幾何交差を利用した判定法のみ適用はできない。その場合は干渉判定の結果を利用し、接触点探索を行う必要がある。この接触点探索は効率的な方法がなく、干渉判定の結果によっては計算量が増加してしまう。最短距離計算手法は、物体間の最短距離がある値より小さくなったときに衝突と判定し、そのときの最近接要素から容易に接触箇所を求めることは出来る。ただし、最短距離計算手法は凸形状の性質を利用しているため、物

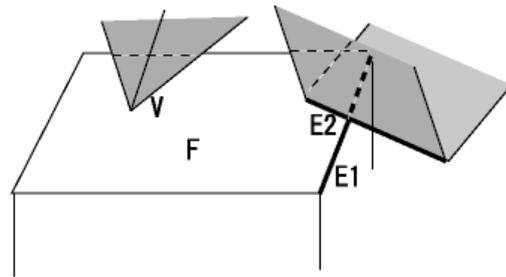


図2 基本接触モデル

体の形状に非凸がある場合、物体形状を凸形状の組み合わせで分解する必要がある。幾何交差を利用した判定法では形状分解する必要はない。

本研究では2種類の衝突判定法を組合せることで、実時間で一般形状の部品間同士の接触箇所を、形状分解の前処理なしで求める。幾何交差を利用した判定ライブラリV-Collide<sup>[10]</sup>を用いて2物体間に交差面を特定し、各々の交差面が凸形状であることを前提に最短距離を求める。最短距離計算手法のみでは、物体形状を凸形状に分解する必要があるが、併用して一般形状に対応したV-Collideを利用しているので、分解する必要がない。V-Collideは衝突時、互いに交差している面のリストを戻り値として返すため、接触箇所を特定することができないが、最短距離計算手法を併用することで、容易に接触箇所を特定できる。

#### 3.1 基本接触モデルの導入

物体間の接触には、多様な形態が考えられる。本研究では基本接触モデルとして、図2に示す面-頂点接触、稜線-稜線接触を定義し、このモデルの組み合わせで一般的な接触を表現する。また1つの接触箇所をみると、そこは凸形状同士の接触同士とみることができる。この基本接触モデルが次節の衝突判定、次章の侵入解除において、対象とする最近接要素対、侵入部位となる。

#### 3.2 提案手法

2物体間(移動物体A, 静止物体B)の衝突判定処理手順を図3、補足説明を下記(A)~(D)に示す。図3の最近接要素対のデータ構造を図4に示す。

- (A) V-Collideを用いて干渉判定を行う。干渉を検知したとき、物体A, Bで交差している面のリストを返す。
- (B) 干渉を解除するため、物体Aの交差面構成頂点の速度反対方向に微小距離 $l_0$ だけ物体Aを移動させる。 $l_0$ はフレーム毎の物体頂点移動距離より小さい。
- (C) 1ステップ前の最近接要素対及びその隣接要素に対して最短距離計算手法を施し、最近接要素対及び最短距離 $l_i$ を更新する。
- (D)  $l_{min}$ 以下の最短距離 $l_i$ が1個以上でも存在する場合、衝突とみなし、侵入解除を行う。

最短距離計算手法は2物体間の最短距離 $l_i$ をフレームごとに追跡することで衝突を判定する。運動シミュレーションでの時間的に前後したフレームでは、最近接要

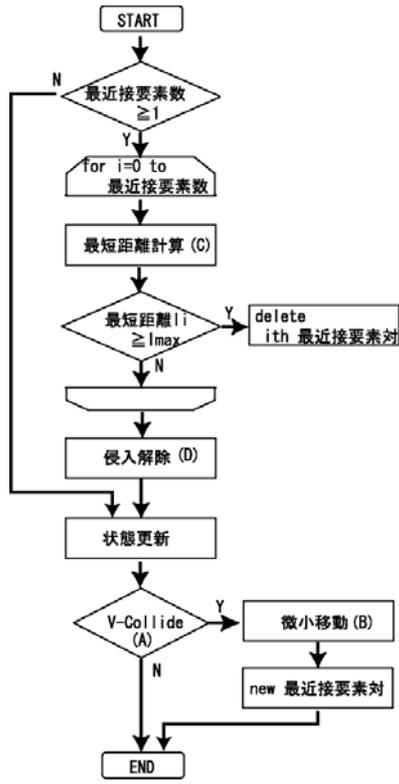


図3 衝突判定処理手順

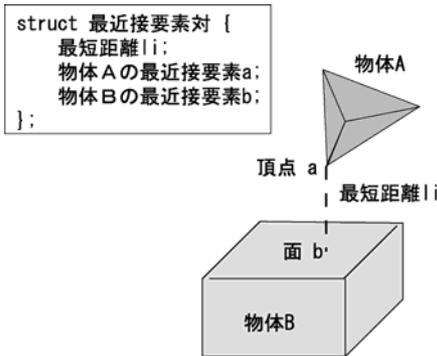


図4 最近接要素対

素対は物体上を大きく移動しない性質を利用している。物体を構成する各要素は隣接する要素が事前に既知であることから、探索候補を隣接する要素に絞込むことで計算量を減らすことができる。接触点が複数存在するような場合、最短距離計算手法は接触点毎に処理を行うため、接触点の数に応じて計算量は変動する。2物体間において、Windows2000, Pentium 866MHz DualのPCにおける1ループあたりの衝突判定、接触箇所特定処理平均時間Tは、

$$T = 0 \sim 2.0 + 0.2N [\text{msec}] \dots(1)$$

となった。右辺の第1項はV-Collide処理時間、第2項は最短距離計算処理時間、Nは接触点数である。V-Collideの計算量は物体の形状、物体間の相対位置に依存し2msec変動するが、インタラクティブな操作には問題ないと思われる。具体的な作業では複数部品の衝突判定を

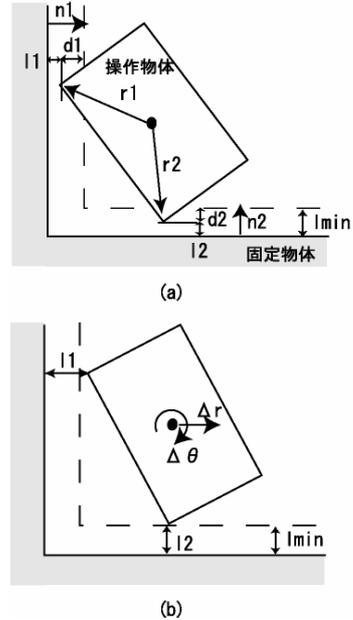


図5 微小移動による侵入解除

行わなければならない。その時は空間中に存在する全ての部品に対して衝突判定を行うのではなく、Bounding Sphereを用いて衝突候補の部品を絞り込み、効率的に行うことができる。

#### 4. 非侵入性を利用した多点接触拘束感提示

現実世界で形あるモノに対しその領域を侵入しようとすると、それを妨げる反力が働く。これを物体の非侵入性という。本研究では非侵入性を、拘束力ベース手法<sup>[11,12]</sup>を参考に実現することで、干渉することなく拘束感を提示する。同様なことは撃力ベース手法<sup>[13,14]</sup>を用いても可能であるが、多点接触を1点接触に振り分けるため、両側拘束への適用が可能であるかは疑問である。拘束力ベース手法は、多点接触の剛体運動を近似的に実現するため、両側拘束への適用が期待できる。

##### 4.1 剛体運動に基づく侵入解除

物体間の最短距離  $l_i$  が  $l_{min}$  以下となった状態を侵入したとみなし、侵入が発生したと同時に微小移動によりその解除を行う(図5参照)。その微小移動ができるだけ自然に見えるよう、剛体運動を利用して微小移動を求める。なお、侵入に至った瞬間は衝突判定法で検出できる。以下では2物体間(移動物体A, 静止物体B)の侵入解除について述べる。

図4のように物体Aが物体Bに侵入した時を考える。 $r_i$ は物体Aの重心から侵入要素までの位置ベクトル、 $d_i$ は侵入量(=  $l_{min} - l_i$ )、 $n_i$ は面の単位法線ベクトルとする。このときの干渉排除のための条件式は

$$\Delta? \times r_i + \Delta r \geq d_i n_i \dots(2)$$

で表される。 $\Delta r$ 、 $\Delta?$ は物体Aに働く侵入解除のための

微小並進量，微小回転量であり，

$$\Delta \mathbf{r} = \frac{1}{m} \sum_i^n f_i \mathbf{n}_i \dots (3)$$

$$\Delta \theta = \sum_i^n f_i I^{-1} (\mathbf{r}_i \times \mathbf{n}_i) \dots (4)$$

で表せる． $f_i$  は接触点に働く侵入解除の作用力の大きさであり  $f_i > 0$  ． $m, I$  は物体 A の質量，慣性モーメント． $\mathbf{n}$  は侵入部位数とする．式(3),(4)を式(2)に代入し，まとめると以下の式になる．

$$\mathbf{A} \mathbf{f} \geq \mathbf{d}, \quad \mathbf{f} \geq 0 \dots (5)$$

ここで  $\mathbf{d} = (d_1, \dots, d_n)^T \in R^n$  ,  $\mathbf{f} = (f_1, \dots, f_n)^T \in R^n$  である．

係数行列  $\mathbf{A} \in R^{n \times n}$  の要素  $a_{ij}$  は

$$a_{ij} = (\mathbf{r}_i \times \mathbf{n}_i)^T \mathbf{I}^{-1} (\mathbf{r}_j \times \mathbf{n}_j) + \frac{1}{m} \mathbf{n}_i^T \cdot \mathbf{n}_j \dots (6)$$

となる．評価関数

$$J = \sum_i^n f_i \dots (7)$$

を最小にするもとで式(5)を満たす，物体 A の微小移動（式(3),(4)）を求めることで侵入解除を行う．以上の計算は線形計画法となるため，効率的な解法としてsimplex法を用いる．

侵入部位の数に応じて式(5)の次数は大きくなるが，simplex法の反復回数は多項式オーダーであるため，実時間で処理できる．また，式(3),(4)は粘性の大きな媒質中の運動<sup>[6]</sup>に相当しており，微小移動  $\Delta \mathbf{r}, \Delta \theta$  は自然な動きとなる．これより現実にも即した剛体運動に基づき，物体同士が干渉することなく，多点接触の剛体運動を実現できる．

#### 4.2 拘束感提示方法

反力の計算には接触時の操作物体重心位置  $\mathbf{X}$  と，デバイスのペン先位置  $\mathbf{Y}$  の偏差  $\mathbf{E}$  を利用する．

$$\mathbf{E} = \mathbf{X} - \mathbf{Y} \dots (7)$$

接触していない状態では  $\mathbf{E} = 0$  とする．操作物体 A が物体 B に接触すると，侵入解除が働き操作物体 A は物体 B の表面から先には侵入しないが，デバイスは移動するため偏差が生じる．このときの反力  $\mathbf{F}$  を

$$\mathbf{F} = k(\mathbf{X} - \mathbf{Y}) + d(\dot{\mathbf{X}} - \dot{\mathbf{Y}}) \dots (8)$$

とする． $k$  は剛性係数， $d$  は減衰係数である．

根本的に，移動距離を利用して力を計算するため，現実の衝突とは少し異なった感覚を受ける．パラメータ調整により剛性を高めることで，現実に近い衝突は得ることができるが，同時に振動を発生する可能性もある．また，今回使用したPHANTOMは提示できる力が弱いこともあり，あえて剛性は高めなかった．

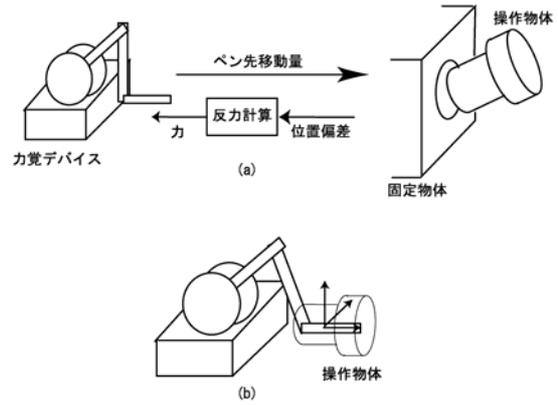


図6 実験システム

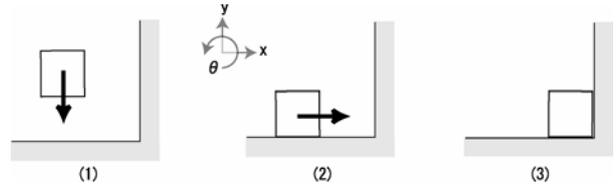


図7 a 実験手順 A

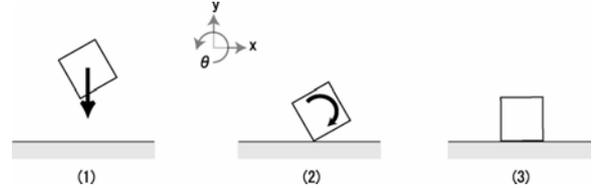


図7 b 実験手順 B

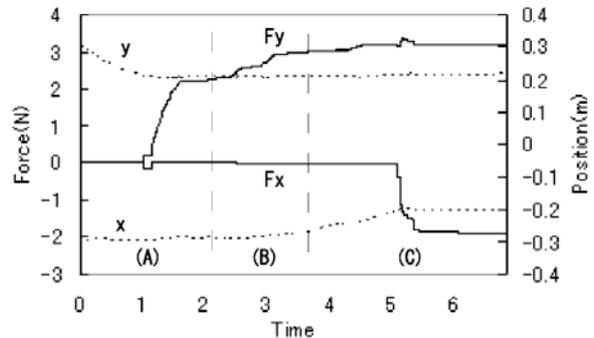


図8 a x y 方向の位置、反力

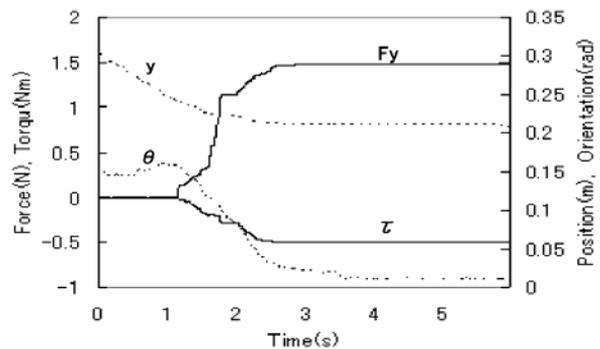


図8 b 方向の回転、反力

## 5. 実験

提案する手法の妥当性を検証するために2つの実験を行った。1つは接触時に、物体の姿勢、状態に応じた反力が出力されているかどうかの検討。もう1つは両側拘束の適用検討である。

### 5.1 システム構成

図6(a)にシステムの構成図を示す。仮想空間内では力覚提示装置の入力に応じて動く操作物体と、空間に固定された物体が存在する。力覚提示装置にはSensAble Technologies社製のPHANTOM 1.5/6DOFを用いる。操作者はPHANTOMのペン型のグリップを自由に動かすことで、位置、回転の6入力を行うことができる。仮想空間内の操作物体位置、姿勢はPHANTOMのペン先の移動量を基に更新している。図6(b)のように物体重心とペン先位置を一致させることで、操作者は仮想物体の重心を持ち操ることになる。本研究は組み立て検討作業を想定しており、組み立て易さの作業性は考慮していない。そのため物体の慣性は無視し、ペン先移動量に応じて物体を動かすようにした。

### 5.2 反力検討

立方体形状の操作物体を使用して、図7 a, bに示す手順に従い、壁への押し付けを行った。そのときの重心位置、姿勢、反力を図8 a, bに示す。

図8 aの(A), (C)において、物体が壁に衝突したタイミングで反力が加わることが確認できる。壁に接触した状態でなお力を加えた場合(B), 重心位置yは変わることはない。図8 bでは、傾きをもって衝突した物体に、床面に平行になるようなトルクが加わることが確認できる。実物体を操作した場合と比べ、妥当な反力と運動が得られることが確認できる。

### 5.3 両側拘束の適用検討

今回提案した手法は多点接触の同時処理を考慮しているため、両側拘束の実現が期待できる。そこで両側拘束となりやすいケースの1つとして、図9で示すはめ合いを取り挙げ、PegをHoleに挿入した時のPegの重心位置を計測した。その結果を図10 aに示す。比較のため、同じ条件で侵入解除を撃力ベース手法に置き換えたときの結果を図10 bに示す。

図10 a, bにおける重心位置yの軌跡の頂点、鞍部はHole側面への衝突が発生した時点である。衝突直後、提案手法の拘束力ベースは滑らかに動くのに対して、撃力ベースはその場で振動し停滞している。また同時に単位時間あたりのx方向移動量も小さい。その理由に関して次のように考えられる。はめ合いはクリアランスを伴う円筒対偶であり、Hole軸に対しPeg軸が傾くと、並進方向の両側拘束が発生する。特に衝突直後はPeg姿勢が変化するため、両側拘束になりやすい。撃力ベース手法は両側接触のような多点接触を同時に扱えないため、衝突の反動で反対側のHole側面に衝突する可能性がある。それが

連続で続くとその場から動かなくなり(振動発生)、人が力を加えることでその状況から脱出することになる。

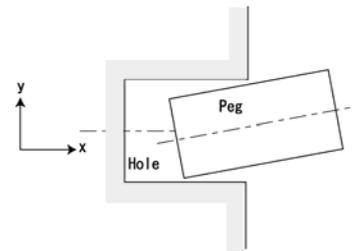


図9 はめ合い

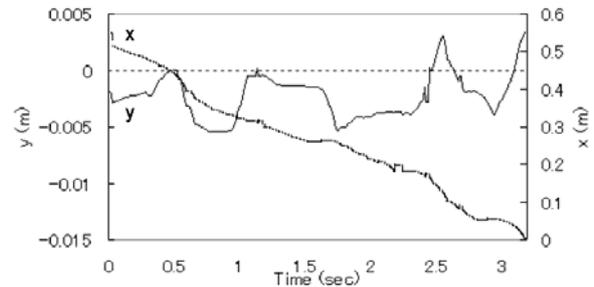


図10 a 拘束力ベース手法における挿入のPeg重心位置

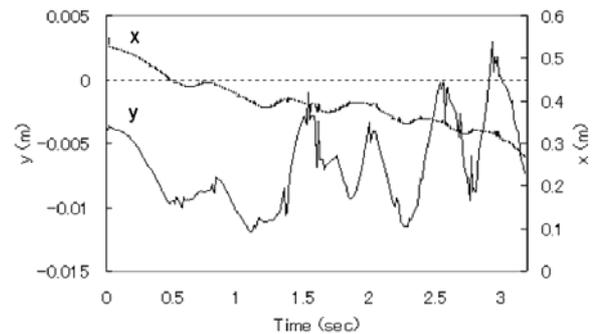


図10 b 撃力ベース手法における挿入のPeg重心位置

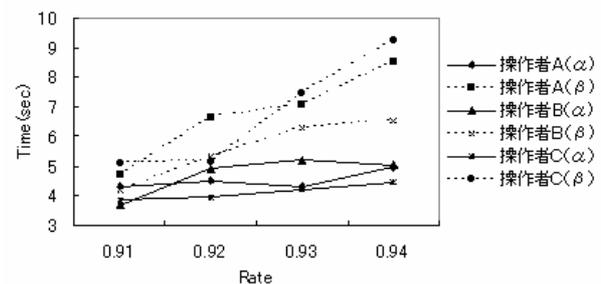


図11 作業時間の比較

両側拘束が操作性に影響があるかを見るため、Peg直径dの変更でクリアランスを操作し、両側拘束の発生確率を変化させたときの作業時間への影響を調べた。時間測定する期間はPeg先端がHole表面に達したときから、Peg重心がHole表面に達するまでとする。実験中はPegの直径dをランダムに変え、Peg/Hole直径比=(0.91, 0.92, 0.93, 0.94)とした。操作者は3名で行った。図11に結果を示す。図中の は拘束力ベース手法、 は撃力ベース手法を示

す。

撃力ベース手法ではクリアランスの減少に伴い、平均作業時間が増加した。両側拘束となるケースが多く発生し、振動による停滞によって時間がかかったと思われる。拘束力ベースでは、撃力ベースほど作業時間は増加していない。これより、両側拘束のような多点接触において有効に作用していると思われる。

今回のシステムでは物体の慣性を無視し、力覚デバイスのペン先移動量に応じて操作物体を動かした。もし慣性も考慮したシステムであれば、今回のような結果とは別になる可能性がある。

## 7. まとめ

本研究では力覚装置デバイスを用いた組み立て検討作業を想定し、剛体運動シミュレーション研究を行った。

幾何交差と最短距離計算手法を併用した衝突判定法、

物体の非侵入性を利用した多点接触の拘束感提示の提案により、計算量が少なく、違和感ない拘束感を提示可能なシステムを構築した。そして両側拘束が働くはめ合いにおいて、有効に作用していることを確認した。これは組み立て検討作業において、操作者にストレスを与えず、インタラクティブな操作が実現可能だと思われる。今後は具体的な組み立て検討作業に適用できるよう、システムの開発を行いたい。

## 文献

- [1] “デジタルモックアップ活用の分かれ道”, 日経デジタル・エンジニアリング, pp.48-49, No.2, 2002.
- [2] 例えば, Ming C.Lin, Dinish Manocha and John Canny, “Fast Contact Determination in Dynamic Environments”, Proc. of International Conference on Robotics and Automation, pp.602-608, 1994.
- [3] 例えば, Stephen Gottschalk, Ming C.Lin and Dinish Manocha, “OBBTree: A Hierarchical Structure for Rapid Interference Detection”, Computer Graphics(Proc. of SIGGRAPH), pp.171-180, 1996.
- [4] Matthew Moore and Jane Wilhelms, “Collision Detection and Response for Computer Animation”, Computer Graphics(Proc. of SIGGRAPH), pp.289-298, 1988.
- [5] 神徳徹雄, 谷江和雄, “仮想環境のための干渉力発生アルゴリズム”, 計測自動制御学会論文誌, pp.347-355, No.3, 1993.
- [6] 北村喜文, “仮想世界の物理法則”, 日本機械学会誌, pp.36-39, No.971, 1999.
- [7] 武田捷一, 丸山稔, “物理法則に基づくシミュレーション手法”, 電子情報通信学会論文誌, pp.860-869, J79-D-II-5, 1996.
- [8] 足立吉隆, 池本明夫, “力覚インターフェースを備えた先進的デジタルモックアップシステムの開発”, 日本VR学会第7回大会, 2002.
- [9] 足立吉隆, 池本明夫, “仮想作業環境における物体の操作と操作感の発生”, 精密工学会誌, pp.800-806, No.6, 2002.
- [10] [http://www.cs.unc.edu/~geom/V\\_COLLIDE/](http://www.cs.unc.edu/~geom/V_COLLIDE/)
- [11] David Baraff, “Analytical methods for dynamic simulation of non-penetrating rigid bodies”, Computer Graphics(Proc. of SIGGRAPH), pp.223-232, 1989.
- [12] David Baraff, “Fast contact force computation for non-penetrating rigid bodies”, Computer Graphics(Proc. of SIGGRAPH), pp.23-34, 1994.
- [13] Brian Mirtich and John Canny, “Impulse-based simulation of rigid bodies”, Symposium on Interactive 3D Graphics, pp.181-188, 1995.
- [14] Beeling Chang and Edward Colgate, “REAL-TIME IMPULSE-BASED SIMULATION OF RIGID BODY SYSTEM FOR HAPTIC DISPLAY”, Proc. of the ASME Dynamic System and Control, pp.145-152, 1997.

# 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(第1報)

藤井 勝敏

## Study on VR & Simulation Visualization for Design Support of Welfare Robots (I)

Katsutoshi FUJII

あらまし 身体的な力作用を伴う福祉機器の設計を支援するために、身体特性に基づいた運動学的な設計評価を仮想空間内で実現することを目的に、仮想的なシミュレーション環境に実装可能な仮想人体モデルの構築を行う。構築する仮想人体モデルは、順運動学、逆運動学による制御が可能で、設計評価用のシミュレーション環境に組み込んで自由にポーズを取らせることができる。仮想空間を使ったシミュレーション提示技術を利用して、介護サービスに伴うユーザの動作・痛み・負担などの検証に利用することができる。

キーワード 介護サービス、仮想人体モデル、順・逆運動学、シミュレーション

### 1. はじめに

急速に進む少子高齢化社会において、高齢者福祉・介護問題への関心や社会的ニーズの高まりを感じられる近年、福祉機器の分野において情報技術(IT)を応用した自動装置が開発され、製品化されている<sup>[1]</sup>。例えば、身体の不自由な高齢者でも容易に電気機器の操作やコミュニケーションを可能にするものや、患者の状態を常時監視することによって、緊急事態が発生した際、本人に代わって異常等を通報する装置などがある。このような装置は、高齢者にとって現代的で便利な生活水準を維持し、同時に家族の負担を軽減する目的で開発され、実際にその目的において有効であると言える。しかし一方で、衣食住に関わるような人間が生きていく上で基本的に必要な、家事等の支援を行う自動装置(ロボット)の製品化は遅れているのが現状である<sup>[2]</sup>。

これは、これまでに開発されてきた福祉目的の自動装置は、高度なセンシング技術やユーザインタフェース技術を基本としており、安全性・安定性に配慮してできる限りユーザである介護対象者との直接的な接触を避けて設計されてきたからである。しかし、肉体的にも精神的にも衰える高齢者の生活を実質的に支援し、その生命や尊厳を守るためには、福祉機器自身が自律的に状況を判断し、能動的にユーザの身体に作用することで、介護サービスを提供することが必要である。

そこで本研究は、最終的には福祉介護の現場で日常的

なニーズのある介護サービスを、自動機械装置(自律判断するロボット)に任せられる未来を目指し、そのような福祉機器の設計を、情報技術により支援することを目的としている。そのための具体的な手段として、近年アミューズメント分野などで非常に発達している人体表現技術を導入し、日常的な介護の場面や緊急的な状況を仮想的に構築することによって、そこで人間に対して行うべき介護サービスを検討することや、設計したロボットの動作検証をすることを提案する。

これによって、被験者を使った実験が不安な場合やプロトタイプ製作の前に、3次元的に人体に作用する機械装置のイメージを具体化しやすくし、設計の段階で危険性を予見可能にし、解決すべき技術的課題を明らかにすることができることを期待している。

本報告では、まず高齢者介護において自動化すべきサービスについて考察し、福祉機器の設計支援において必要不可欠な要素技術である福祉機器ユーザのモデル化(仮想人体モデル)とその制御方法を中心に述べる。また、その仮想人体モデルを利用して試作した仮想介護シミュレーション環境とその利用可能性について考察し、今後の方針について述べる。

### 2. 高齢者介護サービス

厚生労働省の要介護認定の基準に係わる介護行為は、

- 入浴、排泄、食事等の介護

- 洗濯，掃除等の家事援助等
  - 徘徊に対する探索，不潔な行為に対する後始末等
  - 歩行訓練，日常生活訓練等の機能訓練
  - 輸液の管理，褥瘡の処置等の診療の補助等
- となっている<sup>[3]</sup>．これらの介護サービスを機械化，自動化することは，現時点の技術水準では困難な点が多々あるが，サービス品質の管理・改善やプライバシー保護の観点からは，これらのサービスをロボットに任せることには大きな意義があると考えている．本研究では特に一番目の入浴，排泄，食事等の介護について注目する．

心身の健康状態を維持し，清潔で快適な生活を送るためには例え寝たきり状態が中心の生活となっても適度に体を動かすことが重要である．しかし筋力が不足している場合，器具や電動装置の補助を得たとしても，独力で行動すると，転落・転倒の危険を自力で回避できないため事故につながる危険性がある．そのために介護が必要なのであり，介護・看護の専門教育では，人間工学の研究成果に基づき，安全で効率の良い介護技能の普及が図られている<sup>[4]</sup>．

同等なサービスをロボットにさせられれば，介護技能の熟練度に影響しないサービス品質が実現でき，ヒューマノイド型である必然性はないため，設計次第で人間よりも効率の良いメカニズムの導入が期待できる．しかしこの場合，ロボットと人間がうまく組み合わせなければ危険であるから，設計者は人間の身体特性について十分理解しあらゆる条件を想定する必要がある．

### 3．仮想人体モデル

自動車や家具など，人間を搭載することや人間が使用することを目的とする工業製品では，設計時に人体の物理的特性を考慮したモデルが利用されてきた．簡単な例は，体重相当の砂袋やブロックである<sup>[5]</sup>．しかし身体特性を考慮する必要がある場合は，体重に加えて身長，五体の配置，可動範囲の設定されたマネキンが利用されている<sup>[6]</sup>．

前章で述べた介護行為を目的とする福祉機器の設計においても，同様な人体モデルが有効であると考えられる．人体モデルを手軽に製作・運用・調整するには，マネキンよりも仮想人体を使うと便利であるため，本章では，近年のゲーム開発で利用されている手法を参考に，仮想人体を計算機内にモデル化する方法について述べる．

#### 3．1 骨格モデル

一般的に知られているように，人体は多数の骨が軟骨のある関節で接合され，筋肉の作用により活動することができる．スポーツ医学などではこのメカニズムの詳細なモデル化が要求されるが，通常的设计段階にはデッサン人形(図1)のように，固定長のリンクと可動ジョイントで構成された人体モデルが利用される．これを骨格モデル(Skeleton Model)と呼ぶ．

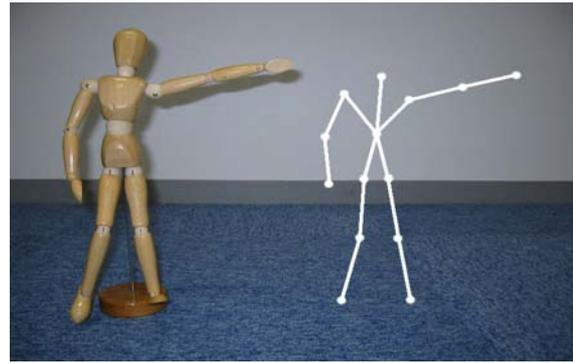


図1 デッサン人形と骨格モデル

骨格モデルのデータ構造による表現は唯一のルート関節を基準とする木構造で示せるため，単一の関節情報は例えば下記のように記憶する．

```
class Joint {
    double x,y,z;
    Quaternion q;
    Joint *p;
};
```

$x,y,z$ は，親関節が存在する場合は親座標系による関節の中心位置移動量で，親関節がない場合はルート関節のワールド座標を表す  $q$ はこの中心位置での座標系の回転を表す四元数(Quaternion)<sup>[7]</sup>である．四元数の使用方法については次節で述べる  $p$ は木構造における直接の親関節を指す．これらにより，任意に枝分かれする多関節構造が定義できる．

またこの表現において，移動量および回転の逆変換が

$$\begin{aligned} Trans(x, y, z)^{-1} &= Trans(-x, -y, -z) \\ Rot(q)^{-1} &= Rot(q^{-1}) \end{aligned} \quad (1)$$

として容易かつ確実に計算できるため，親子関係の逆転が可能である．これにより，任意の関節をルートにすることができる．但し，初期設定の木構造における，同一の親を持つ兄弟関節同士の位置関係は保存されるべきであるため，ルート関節の変更の際は，図2に示すような親子関係の操作も同時に行う必要がある．

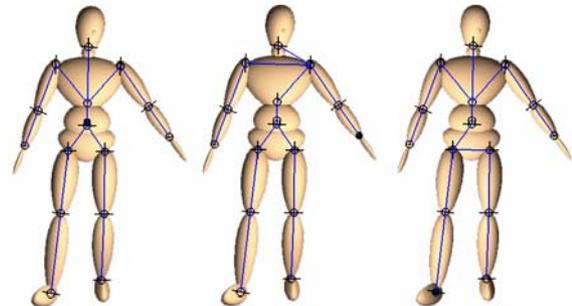


図2 ルート関節の変更  
(左から腰、左手、右足)

### 3.2 関節の位置

産業技術総合研究所より公開されている人体寸法データベース<sup>[8]</sup>や人体計測手法<sup>[9]</sup>により、人体の外形寸法が得られる。骨格モデルでは親関節中心からの相対的な位置により定義しているため、正確な人体モデルを作るには身体各部位の回転中心位置が必要である。この位置については、外形寸法から股関節の中心を推定する手法<sup>[10]</sup>が提案されている。

全身の関節位置を決めるための簡便な方法として、表示用のスキン(人体形状)と標準的な骨格モデル結合し回転させ、最も自然な動作に見える回転中心位置を探す方法もある。スキンを重要視するCGキャラクタ制作ではこの方法が用いられることがある<sup>[11]</sup>。

### 3.3 四元数と関節の回転

前述のように、関節ごとの回転は四元数 $q$ により記憶させている。四元数とは、4つの独立した実数 $(w, i, j, k)$ の組み合わせによって表現された複素数の拡張である。ある右手系3次元座標系において、単位ベクトル $V(x, y, z)$ の回りに右回りに回転する操作 $rot(\theta, V)$ を次の四元数で表現することにする。

$$\begin{pmatrix} w \\ i \\ j \\ k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\theta/2) \\ \sin(\theta/2)x \\ \sin(\theta/2)y \\ \sin(\theta/2)z \end{pmatrix} \quad (2)$$

この表現と、四元数の演算規則により、逆回転(逆元)の計算や、蓄積的な回転(積算)が容易に実装できる。後者の性質は特にCADなどの対話的アプリケーションにおける回転インタフェースとして有効である。また上の式における三角関数は、半角の公式により $\cos$ を含む式に変換できるが、

$$\cos \theta = a \cdot b / (|a| \times |b|) \quad (3)$$

であるため、ベクトル演算との親和性が高い性質があり、後述する逆運動学計算に利用している。

四元数による回転の表現は完全に自由回転であるが、人体モデルでの実装においては、肘・膝のように単一の軸まわりの回転に限定させる場合や、回転範囲を制限したい場合がある。このような場合、

$$\Theta = q \times (V \cdot H) \quad (4)$$

により、 $rot(\theta, V)$ で与えた任意の回転角度 $\theta$ と回転軸ベクトル $V$ から、規定の回転軸 $H$ 周りの角度成分 $\Theta$ を抽出し、関節の回転を保持する四元数に $rot(\theta, H)$ を積算することで回転軸を拘束することができる。また回転軸 $H$ と直行するベクトルについて、回転変換前後になす角を求めれば、現在の絶対的な回転角度を求めることができ、それにより関節の回転範囲を制限することができる。

### 3.4 制御手法

骨格モデルは、関節間の距離を一定にして、回転量のみを変化させてさまざまなポーズを制御する。最も基本的な方法は関節ごとに回転量を設定する方法で、ルート

関節から末端関節に向かって順々に回転が影響することから、順運動学(FK: Forward Kinematics)と呼ばれる。FKをCADのインタフェースとして実装する場合、ユーザの操作によって得られたワールド回転軸を、制御対象関節の親関節の座標系に変換してから、制御対象関節の回転四元数に乗ると良い。

FKインタフェースの使用感は、マネキン人形の関節を折り曲げる手順に似ているが、人間にポーズを指示する場合には、手取り足取りと言うように末端部分の位置を与える方が、扱いやすいことがある。この場合、末端部分が指定の位置に合うように、ルート関節までの各関節角度を自動的に計算させる。このような制御方法は逆運動学(IK: Inverse Kinematics)と呼ばれる。IKの実装方法はいくつかあるが、今回は実装が容易で計算量が少なく、拘束条件が設定でき、比較的収束が早いと言われるCCD法(Cyclic Coordinate Descent Method)<sup>[12]</sup>を導入した。

この方法は図3に示すように、末端の関節からルート関節の順に、作用点が目的の座標の方向を向くよう回転させる計算で実現される。関節ごとの演算は、2つのベクトルを一致させる回転の生成と、関節の拘束条件内での回転だけで構成されており、誤差を直接評価していないが、反復することによって収束する性質がある。

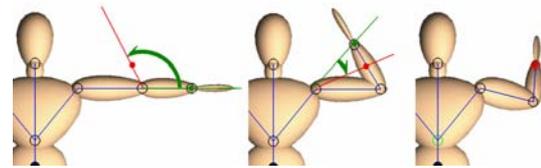


図3 CCD法

より高度な制御方法には、重力、慣性モーメント、摩擦などを反映した物理運動シミュレーションがある。この実装のためには、これまでに定義した骨格モデルだけでなく、身体部位の質量や重心などが必要である。この手法については来年度以降検討する予定である。

## 4. 仮想介護シミュレータ

前章では仮想人体モデルの実装方法について述べたが、仮想環境の体験およびシミュレーションを目的とした独自アプリケーションに、この仮想人体モデルを組み込むことによって、CGソフト等による既定動作のアニメーション生成よりも興味深い応用が考えられる。

図4は没入型6面ディスプレイCOSMOS用アプリケーションに仮想人体モデルを組み込んだ事例である。このアプリケーションは、ベッドに横たわる人体の各部を持って動作させたときの、姿勢の変化を観察するためのシミュレータである。現在のところ、等身大デッサン人形としての機能を実現したに過ぎないが、今後物理運動シミュレーションや接触判定などを盛り込み高度化し、実

用的な仮想介護シミュレータに発展させる予定である。それと同時に、別途設計し、作業手順をプログラムされた仮想介護ロボットに介護をさせるシミュレーションができるようにする予定である。



図4 開発中の仮想介護シミュレータ

このような仮想介護環境のシミュレーションを行う目的および利点は、

- 設計者が身体の動作を理解できる
- 仮想の介護ロボットの設計検証ができる
- 安全である
- 実験環境・条件の設定が容易に可能である
- 反復して実験が可能である
- 見えない力や痛みなどを可視化できる

などであると考えている。図5では、関節の角度が既定の動作範囲の限界に近づいたことを表示することで、痛みや負担の可視化を試みた。このような表現はVRならではの機能であるため、実世界での現象との対応づけを含め、今後充実していきたいと考えている。

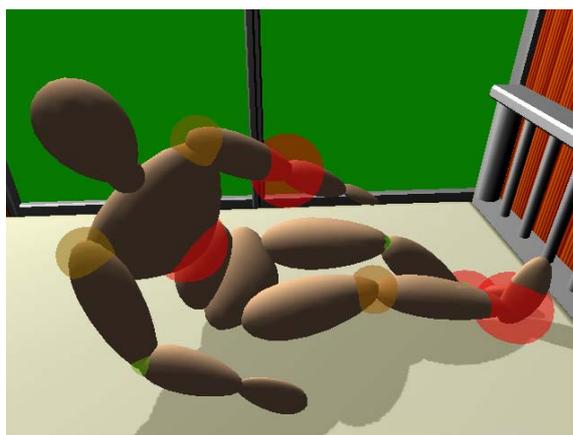


図5 関節動作限界の提示

## 5. まとめ

福祉・介護サービスの中でも移動介護のように、対象者と接触して行う行為に注目し、その安全実施に必要な運動学的な身体特性の理解をしやすいするため、仮想的な人体モデルを導入した。また仮想人体モデルを利用して、仮想空間内で身体の動作シミュレーションができる仮想環境を構築した。

今後は、物理的作用の計算モデルを組み合わせることにより、現実に近い仮想介護シミュレーション環境へと発展させ、福祉機器を使用した介護サービスの最中に発生しうる事故の予見ができるように開発を継続する予定である。

## 文 献

- [1] “福祉用具総覧2001”, テクノエイド協会, 2001.
- [2] 臼井良明, 浅田稔, “身近になるロボット”, 大阪大学出版会, pp.10, 2001.
- [3] “厚生省令第五十八号”, 1999.
- [4] 大河原千鶴子, 酒井一博, “看護の人間工学”, 医歯薬出版, pp.113-120, 2002.
- [5] 日本規格協会, “手動車いす”, JIS T9201, 1998.
- [6] 日本規格協会, “自動車室内寸法測定用三次元座位人体模型”, JIS D4607, 1994.
- [7] Mark Deloura, “Game Programming Gems”, ボーンデジタル, pp.188-192, 2002.
- [8] 河内まき子, 持丸正明, 岩澤洋, 三谷誠二, “日本人人体寸法データベース1997-98”, 通商産業省工業技術院くらしとJISセンター, 2000.
- [9] “設計のための人体計測マニュアル”, 生命工学研究所, 1994.
- [10] 倉林 準, 持丸正明, 河内まき子, “日本人男性の股関節中心推定方法の比較・検討”, デジタルヒューマン基盤技術平成14年度成果報告書, pp.70-77, 2003.
- [11] ジョージ・マエストリ, “デジタルキャラクターアニメーション”, プレンティスホール出版, pp.70-76, 1999.
- [12] 久保裕一郎, “Enter the 3D Programming 第10回”, C MAGAZINE 2001年7月号, pp.110-115, 2001.

# 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

浅井 博次      田村 祐一\*      渡邊 國彦\*\*

## Research on User Interface for Immersive Display System

Hirotsugu ASAI    Yuichi TAMURA\*    Kunihiko WATANABE\*\*

あらまし 没入型ディスプレイシステムは、ユーザの周囲を取り囲む大型のスクリーンにより没入感のある仮想空間および仮想物体を提示することができる装置で、近年の試作・製造工程のコストダウンに一役かっている。本研究では、没入型ディスプレイシステムにおけるユーザインタフェースに着目し、“すぐに、簡単に”使え、仮想環境に没入できるという特徴を活かした“直感的に仮想環境・仮想物体とインタラクションする”ユーザインタフェースについて検討した。具体的には、モデリングシステムの変形操作に手を用いたジェスチャをユーザインタフェースとして実装し、直感的な変形操作の選択・操作量入力を試みた。

キーワード 没入型ディスプレイシステム, ユーザインタフェース, ジェスチャ認識, 自己組織化マップ

### 1. はじめに

没入型ディスプレイシステムとは、ユーザの周囲を取り囲む大型のスクリーンにより広視野を実現し、没入感のある仮想環境を提示する装置である。このシステムを用いたVR技術は試作工程の工期短縮・コストダウンなどで大きな効果を発揮している。しかし、導入コストが非常に高く、広い設置スペースが必要であるため、ごく一部の大学や企業などで導入されているにすぎない。そこで、岐阜県では没入型6面ディスプレイシステム（以下COSMOS）を有料で開放し、中小企業にこのシステムを使用できる機会を提供しており、主に試作品プレゼンテーションや商用アプリケーションのシミュレーション結果の検証として利用されている。

現在COSMOSでは、ゲーム機用コントローラを主なユーザインタフェースとして使用している。コントローラを操作装置としてシステムを設計する場合、ボタンに個別の処理機能呼出を割り当てて実装する。しかし、ボタンと機能との間に直感的な関連性はないため、アプリケーション使用前に操作方法としてボタンと機能との対応関係を学習しなければならない。機能が増加すればするほど複雑なボタンの組み合わせが必要になり操作方法の学習も困難になる。前述のように没入型ディスプレイシステムは希少品であり、他の装置に比べ一般ユーザの使

用頻度は格段に低いため、“すぐに、簡単に使える”ユーザインタフェースが望ましい。

予備学習を減らす方法として、状況に応じた操作リストを仮想空間上に表示するという手法をとることが可能であるが、リストから操作を選択するステップが必要であること、選択するために操作対象から視線をはずさなければいけない、という問題点がある。

これらの問題点を改善する方法として、手を用いたジェスチャ（手の形、手振り動作など）によるユーザインタフェース<sup>[1-3]</sup>がある。ジェスチャは人それぞれ異なるものであるが、機能から連想可能なジェスチャを選択し機能と対応付ければ、たとえユーザにとって最適なジェスチャでなくとも、その対応関係の学習は容易であり理解し易い。ジェスチャを機能選択のためのポスチャとして利用するだけでなく、機能に対する操作量入力にも利用することで、より直感的で“すぐに、簡単に”使えるユーザインタフェースを構築できるものと期待される。

そこで本研究では、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<sup>[4]</sup>として手を使用したジェスチャによるユーザインタフェースをCOSMOSに実装し、ジェスチャによる直感的な機能選択と操作量入力を実現した。また、このユーザインタフェースをモデリングシステムに適用し、その有効性について検討した。

### 2. ジェスチャインタフェース

#### 2.1 ジェスチャインタフェース

本研究では、データグローブ（superglove, 日商エレクト

\* 文部科学省 核融合科学研究所 理論・シミュレーション研究センター

\*\* 文部科学省 核融合科学研究所 計算機センター

トロニクス製)と、手の甲に装着された磁気式3次元位置センサ (polhemus) によりジェスチャインタフェースを構築した。データグローブで指の関節角を、polhemusで手の位置と向きを計測する。図1に構築したインタフェースの処理ブロック図を示す。

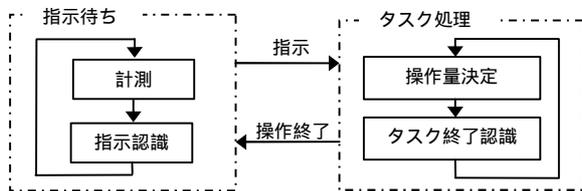


図1 処理ブロック図

各ブロックの処理内容を以下に示す。

#### 指示待ちモード

計測した手の形・位置・向きなどの情報からジェスチャを認識し指示の有無を判断する。指示がある場合は、指示待ちモードからタスク処理モードへと移行する。

#### タスク処理モード

タスク処理が開始された時点での手の状態（指関節角・位置・向きなど）からの変化量をもとに操作量を決定しタスクを実行する。タスク終了認識でタスクの終了を監視し、終了指示がない限りタスクを継続する。タスク処理モードの時は新たなタスク指示を受け付けられないものとする。

#### ● タスク終了認識

手の動き（位置の加速度・向き、指関節角の変化量）に閾値を設け、閾値を越える手の動きをタスク終了指示とした。この他、必要に応じてタスク毎に手の形などの条件を設定し、タスク終了指示として使用する。

#### ● 操作量入力

操作量入力には、2種類の方法を採用した。1つは実際に人がそのタスクを実行する時に行う動作を用いる方法である。もう1つは、大きさなどのパラメータを変更するようなタスクにおいて、パラメータの増減と手の動きを対応させる方法である。例えば、両手間距離とパラメータを対応させ、間隔が広がればパラメータを増加させ、狭まれば減少させる。どちらの場合も、必要に応じて手の動きと操作量との対応を調整することで、微調整などの細かい指示を実現する。

#### モード分割について

モードを切り離し、指示認識とタスク終了認識に別々の認識ユニットを使用することで、3次元位置の検出誤差やジェスチャの変動などによる不安定動作を抑制する。また、ユーザ左前方に配置したモードインジケータ用ボールによりユーザに色で現在のモードを提示する。

## 2.2 ジェスチャ認識

ユーザインタフェースにジェスチャ認識を使用する場合、リアルタイム性と操作者によるジェスチャのばらつきなどに対する適応性の確保が重要である。ジェスチャ認識に使用される手法には隠れマルコフモデル (HMM) やリカレント型ニューラルネット (RNN)、自己組織化マップ (SOM) [5] などがあるが、本システムでは学習時間が短く認識性能が条件 (マップの規模やサンプル数など) に影響されにくい [3] ことから SOM を採用した。図2に本研究で構築したジェスチャインタフェースの構成図を示す。

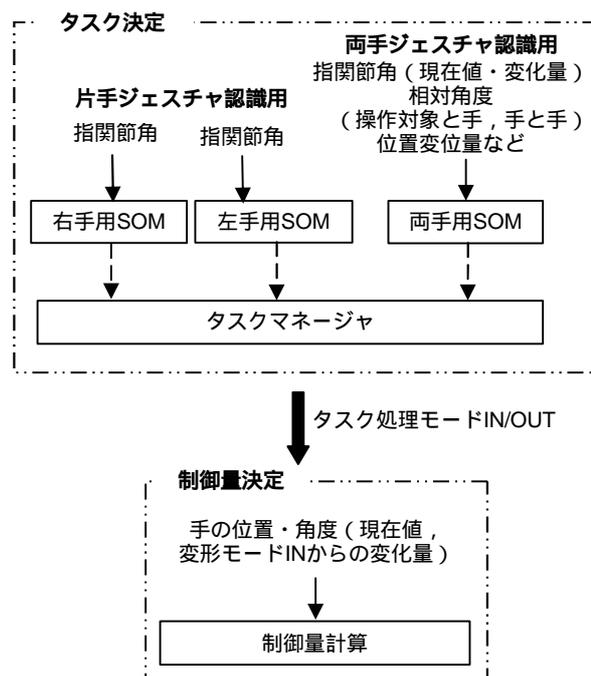


図2 ジェスチャインタフェースの構成図

ジェスチャインタフェースには、それぞれの手の形と両手を用いたジェスチャを利用している。認識には、片手用と両手用併せて3つのSOMを用意した。片手用SOMでは静的な手の形を認識する。入力には指関節角を使用した。一方、両手用SOMでは手と手、手と対象オブジェクトとの位置関係や位置・手の形の変化情報から両手を用いたジェスチャを認識する。入力には指関節角の他、手と手、手と対象オブジェクトとの相対角度、動き情報として指関節角・位置の変化量を使用した。

ジェスチャ認識において、ジェスチャの開始・終了を識別する事は非常に重要であるが、没入環境でのジェスチャは自由度が高いため、その識別が困難である。本インタフェースでは、ジェスチャ開始フラグとして一定時間静止していることを使用し、ジェスチャの開始を明確化している。

タスクマネージャはSOMによるジェスチャ認識結果を状況に応じて判断し、タスクの決定、モード管理を行う。

### 3. 適用アプリケーション

提案するジェスチャインタフェースを適用したアプリケーションとして、COSMOS用モデリングシステムを開発した。本システムでは、一定の変形が可能なプリミティブを複数統合することで複雑な形状を生成することができる<sup>[1,6]</sup>。それぞれの変形処理には対応するパラメータがあり、ジェスチャを用いたユーザインタフェースによりそのパラメータをインタラクティブに調整することで直感的な変形を実現する。操作モード遷移図を図3に示す。

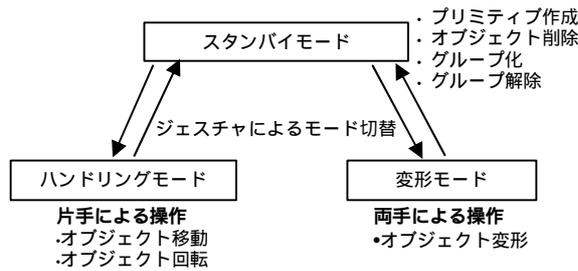


図3 操作モード遷移図

ユーザインタフェースにはジェスチャと音声認識を使用する。主にジェスチャにより指示を行い、音声認識はプリミティブの作成や複数プリミティブのグループ化などジェスチャによる直感的な指示が困難なものに対してのみ使用する。音声認識には音声認識ソフトウェア julius<sup>[7-10]</sup>を使用した。

#### 3.1 形状モデル生成手法

プリミティブの記述には超二次関数<sup>[11]</sup>の一種である超楕円体 $P_e$ と超円環体 $P_t$ の陰関数表現<sup>[12]</sup>を用いた。

$$P_e(x, y, z) = \left[ \left\{ \left( \frac{x}{r_x} \right)^{\frac{2}{e_2}} + \left( \frac{y}{r_y} \right)^{\frac{2}{e_2}} \right\}^{\frac{e_1}{e_2}} + \left( \frac{z}{r_z} \right)^{\frac{2}{e_1}} \right]^{e_1}$$

$$P_t(x, y, z) = \left[ \left[ \left\{ \left( \frac{x}{r_x} \right)^{\frac{2}{e_2}} + \left( \frac{y}{r_y} \right)^{\frac{2}{e_2}} \right\}^{\frac{e_2}{2}} - \frac{r_a}{\sqrt{r_x^2 + r_y^2}} \right]^{\frac{2}{e_1}} + \left( \frac{z}{r_z} \right)^{\frac{2}{e_1}} \right]^{e_1}$$

超二次関数で記述されたモデルはパラメータ $e_1, e_2$ 及び $r_a$ を調整することで柔軟に形状を変形させることが可能であり、それぞれのパラメータが直感的に理解可能な形状変形に連動しているため、指示に対する変形を実現することが容易である。更に以下に示す座標変換により、「Z軸に対する「尖らせる(taper)、ねじる(twist)、曲げる(bend)」という拡張変形が可能となる<sup>[1,2]</sup>。

$$\text{taper} : \begin{cases} x' = (1 - s_z(z))x, \\ y' = (1 - s_z(z))y, \\ z' = z \end{cases}$$

$$\text{twist} : \begin{cases} x' = x \cos s_z(z) - y \sin s_z(z), \\ y' = x \sin s_z(z) + y \cos s_z(z), \\ z' = z \end{cases}$$

$$\text{bend} : \begin{cases} x' = z \sin(s_z(z)) + x \cos(s_z(z)), \\ y' = y, \\ z' = z \cos(s_z(z)) - x \sin(s_z(z)) \end{cases}$$

$$S_x(z) = \frac{k_x}{r_z} z, \quad S_y(z) = \frac{k_y}{r_z} z, \quad S_z(z) = p k_z z$$

$k$  ; 変形の度合を示すパラメータ

拡張変形機能により表現力の向上した複数のプリミティブを組み合わせることで、さまざまな形状を生成することが可能になる。複数プリミティブの統合には次式を使用する<sup>[6]</sup>。

$$F(x, y, z) = \left[ \sum \left( \frac{1}{1 - P_i} \right)^f \right]^{\frac{1}{f}}$$

$f$  ; プリミティブ接合度合い調整パラメータ

モデルはマーチングキューブ法<sup>[13]</sup>を用いて視覚化する。

#### 3.2 ジェスチャインタフェース

図4に使用したジェスチャインタフェースの指示リストを示す。

| 片手タスク ; 手形状のみで決定            |               |    |           |  |
|-----------------------------|---------------|----|-----------|--|
| ジェスチャ                       |               |    |           |  |
| 移動 回転                       | 操作対象オブジェクト付近で |    |           |  |
| 両手タスク ; 手形状 位置関係で絞り込み、動作で決定 |               |    |           |  |
|                             | ジェスチャ         | 動作 | 変形例       |  |
| 変形                          | サイズ           |    | 位置の変化     |  |
|                             | 丸める           |    | 手の握り具合の変化 |  |
|                             | 尖らす           |    | 手の向きの変化   |  |
|                             | ねじる           |    | 手の回転の変化   |  |
|                             |               |    | 手の向きの変化   |  |

図4 指示リスト

片手タスクである移動・回転タスクでは、捜査対象付近で手を握ることでオブジェクトを選択し、手を握ったまま移動・回転させることでオブジェクトを操作する。手を開くと選択が解除され、移動・回転タスクが終了する。

移動・回転を除く両手を用いた変形タスクにおいては、タスクごとの手の形の明確な差異が見られないため、操作対象との位置関係や手の動きが重要となる。そのため、手の形は指示タスクの絞り込みに利用し、位置関係や動き(両手ジェスチャ)によりタスクを決定する。操作量は変形タスク開始時からの手の位置の変化量をもとに決定する。サイズ変更タスクでは、オブジェクト座標系での手の位置の変化量を、その他の変形タスクでは両手間距離の変化量を用いて操作量を決定する。

変形タスクでは微妙な操作量指示が要求される。本シ

システムでは、手の動きに対して小さな操作量が対応するよう設定することで詳細な変形指示を可能にした。

#### 4. まとめ

本研究では、没入型ディスプレイシステムにおいて、“すぐに、簡単に”使え、仮想環境に没入できるという特徴を活かした“直感的に仮想環境・仮想物体とインタラクションする”ユーザインタフェースとして手を使用したジェスチャによるユーザインタフェースを検討し、その設計指針について提案した。

また、開発したCOSMOS用モデリングシステムに提案手法によるユーザインタフェースを適用し、直感的な作業選択と操作量入力を実現した。

#### 文 献

- [1] H. Nishino et al., “A Virtual Environment for Modeling 3D Objects Through Spatial Interactions”, Proc. IEEE SMC'99, Vol.6, pp81-86, 1999
- [2] 西野浩明, 凍田和美, 宇都宮孝一, “両手ジェスチャで変形可能な3次元形状表現法”, 情報処理学会論文誌 Vol.40, No.2, pp.698-701, 1999
- [3] 西野浩明, 凍田和美, 宇都宮孝一, “オンライン学習機能を備えた対話型両手インタフェース”, 電信論 Vol. J81-D- No.5, pp.897-905, 1998
- [4] 橋本直己, 中嶋正之, “CAVEにおける直感的操作手法と動的自由度制御を用いた3次元形状モデラ”, 日本VR学界論文誌, Vol.4, No.3, PP487-494, 1999
- [5] T. Kohonen, “自己組織化マップ”, シュプリンガー・フェアラーク東京, 1996
- [6] 西野浩明, 宇都宮孝一, 吉田和幸, 凍田和美, “陰関数表現を用いた協調型3次元造形システムの一構成法”, 情報処理学会論文誌 Vol.42, No.2, pp.308-317, 2001
- [7] 鹿野清宏, 伊藤克巨, 河原達也, 武田一哉, 山本幹雄, “音声認識システム”, オーム社, 2001.
- [8] 松本裕治, 北内啓, 山下達雄, 平野善隆, 松田寛, 高岡一馬, 浅原 正幸, “日本語形態素解析システム『茶筌』 version2.2.1使用説明書”,  
<http://chasen.aist-nara.ac.jp/chasen/doc/chasen-2.2.1-j.pdf>
- [9] “大語彙連続音声認識プログラムの開発”,  
<http://winnie.kuis.kyoto-u.ac.jp/dictation/doc/lvcsr.pdf>
- [10] 田村祐一, 陰山聡, 佐藤哲也, “音声入力による数値シミュレーション結果操作”, 日本バーチャルリアリティ学会第6回大会論文集, pp.375-376, 2001
- [11] A. H. Barr, “Superquadrics and Angle Preserving Transformations”, IEEE Computer Graphics and Applications, Vol.1, No.1, pp11-23, 1981
- [12] Jules Bloomenthal et al., “Introduction to Implicit Surface”, Morgan Kaufmann Publishers, Inc., 1997
- [13] Jules Bloomenthal, “An Implicit Surface Polygonizer”, Graphics Gems, AP Professional, pp.324-349, 1994

# 進化戦略における選択操作に関する一考察

張 明      今井 智彦      杉山 正晴

## A Two-Step Selection Scheme for Evolutionary Optimization

Ming CHANG      Tomohiko IMAI      Masaharu SUGIYAMA

あらまし 進化計算における選択操作を個体の繁殖力と生存力の視点から見ると、遺伝的アルゴリズムは繁殖力に、進化戦略および進化的プログラミングは生存力にそれぞれ重点を置いていることが分かる。本稿では、まず準種モデルを用いて、選択操作の違いが進化過程に及ぼす影響を示す。次に進化戦略に繁殖力と生存力の両方に選択圧をかける選択操作を提案し、実関数最適化問題および制約付最適化問題においてその性能を検証した。

キーワード 進化計算, 選択操作, 準種モデル, 進化戦略

### 1. はじめに

現実の複雑なシステムを対象とした最適化問題を扱う場合は、最適性の保証がなくとも実用的な実行可能解を求めるための系統的な計算手法が必要となる。そのため、1950年代や1960年代の計算機科学者達は、最適化問題を解くための道具として進化を利用することができると考え、進化システムの研究を始めた。たとえば、生物の進化過程をモデル化する組合せ最適化問題のための遺伝的アルゴリズム(Genetic Algorithms: GA)、実数値変数を持つ関数の最適化に進化戦略(Evolution Strategies: ES)、有限状態機械(Finite State Machine)を進化させるための進化的プログラミング(Evolutionary Programming: EP)など、様々なアルゴリズムが提案された。その後、計算機技術の飛躍的な発展により、それらに関連する研究領域ならびに関連研究領域に研究者が集まり、進化計算(Evolutionary Computation: EC)と呼ばれる分野が形成された。現在では、進化的アルゴリズム(Evolutionary Algorithms: EA)間の境界が曖昧になりつつあるが、以下では、まずESを中心にEP及びGAについて述べ、ECにおける選択操作を繁殖力と生存力の視点から考察する。次に準種モデルに用いて繁殖力選択と生存力選択の違いがエラー閾値に与える影響を示す。ESに繁殖力と生存力の両方に選択圧をかける選択操作を提案し、計算機実験を通じてその有効性を検証する。

### 2. 進化計算手法の概略

進化戦略(ES)<sup>[1]</sup>は、1964年ドイツのTechnical University of Berlinでノズルの設計に際して開発された。翌年には1個体の親が1個体の子を生み、親子の中の適応度の高い個体が次世代の親となる(1+1)-ESが発表され、その後、

$m$  ( $m > 1$ )個体の親から1個体の子を生じ、最劣個体と置き換える( $m+1$ )-ESと、1個体の親から $l$ 個体の子を生じ、 $(1, l)$ -ESを経て、並列計算と自己適応を可能にした( $m, l$ )-ESに到達した( $m < l$ とする)。 $(m, l)$ -ESにおいては、 $m$ 個体からなる親集団から $l$ 個体の突然変異した子を生じ、その中の適応度の最も高い $m$ 個体を次世代の親とする。

$n$ 次元の実関数最適化問題を対象とする場合、 $n$ 次元実数値ベクトル $x_i$ と $h_i$ を、それぞれ変数と変数の変異幅を制御する戦略パラメータとし、CES(Classical Evolution Strategy)<sup>[2]</sup>の計算手続きを以下のように定義する：

$$\begin{aligned} h'_k(j) &= h_i(j) \exp(t'N(0,1) + tN_j(0,1)) \\ x'_k(j) &= x_i(j) + h'_k(j)N_j(0,1) \end{aligned}$$

ただし $t = 1/\sqrt{2\sqrt{n}}$ 、 $t' = 1/\sqrt{2n}$ 。  $x_i(j)$ と $h_i(j)$ は $i$ 番目親個体の変数ベクトルと戦略パラメータベクトルの第 $j$ 成分、 $x'_k(j)$ と $h'_k(j)$ はその親個体から生成される $k$ 番目子個体の相応成分をそれぞれ示す。 $N_j(0,1)$ は $j$ ごとに得られるそれぞれ独立な平均0、標準偏差1の標準正規分布に従う乱数値である。また、本稿では変数ベクトルと戦略パラメータベクトルをまとめてMulti-Parent Discrete Recombination<sup>[2]</sup>を適用したものを以下のように定義し、D-CES<sup>[3]</sup>と呼ぶ。

$$\begin{aligned} h'_k(j) &= h_{c_j}(j) \exp(t'N(0,1) + tN_j(0,1)) \\ x'_k(j) &= x_{c_j}(j) + h'_k(j)N_j(0,1) \end{aligned}$$

$c_j$ は $j$ ごとに得られるそれぞれ独立な $\{1, 2, \dots, m\}$ に一樣分布する整数乱数である。

進化的プログラミング(EP)は、1960年代前半にL.J. Fogelが有限状態機械を進化させる枠組として提案したものを、その息子D.B. Fogelが1990年代に“meta-EP”<sup>[4]</sup>として実関数最適化問題向けに再定式化したものである。

その後多くのベンチマーク問題だけでなく実問題でもその優れた探索能力が検証されている。EPはESとほぼ同じ手続きによって構成されるが、EPには種の進化をモデル化しているため組替え演算を適用しない、確率的選択過程を用いる、などの特徴がある。

遺伝的アルゴリズム(GA)は、集団(個体群)の進化過程をモデル化したアルゴリズムであり、離散システムの最適化のみならず様々な最適化に応用可能な手法である。GAでの多くの概念はJ.H. Holland<sup>[5]</sup>によってはじめて記述されたが、Holland自身はGAを最適化アルゴリズムより、むしろ適応アルゴリズムとして捉えている。GAの最適化問題への適用は、Hollandに学んだK.A. De Jongによって大きく発展された。GA研究の普及に大きく貢献したのは1989年のD.E. Goldbergの著書であり、その中には理論と共に数多くの例題が解説されている。その後のGAの拡張として、不定長な遺伝子表現の木構造を用いる計算機のプログラムを進化させる遺伝的プログラミング(Genetic Programming)が1992年にJ.R. Koza<sup>[6]</sup>によって提案されている。

これまでにEAが様々な問題、分野に適用されてきた。例えば、最適化、自動プログラミング、機械学習、経済学、生態系、集団遺伝学、社会システムなどがある。本稿では実関数最適化問題に焦点を当てている。

### 3. 進化計算における選択操作

EAの設計においては、突然変異と選択が必要最小限の操作である。特に選択操作は中心的な役割を果たす。これは突然変異操作が問題解のコーディングの仕方に依存するのに対して、選択操作はある程度の一般性を備えているためであり、ランダムに突然変異操作を施した個体を評価、選択することで、問題空間における探索に方向性を与えることが可能となるためである。選択なしの進化計算はただのランダム探索となる。これまでに、GAでは多様な選択操作が提案されてきたのに対して、ES及びEPでは、決定論的な選択操作が主流である。たとえば、ESとEPに多用されている $(m+1)$ -Selection<sup>[7]</sup>では、親個体と同じ繁殖力をもつと想定し、 $1$ 親個体あたり平均にして $1/m$ 個の子個体を産み、子集団 $((m+1))$ の場合あるいは子集団と親集団 $((m+1))$ の場合から、適応度の最も高い $m$ 個体が次世代の親個体として選ばれる。しかし、自然界の生物を考えると、個体と同じ繁殖力を持つという仮定は明らかに非現実的である。また孔雀の尾羽のような、生存力と繁殖力に関しては対立している形質が進化してくることもありえる<sup>[8]</sup>。進化計算での選択操作<sup>[9,10,11]</sup>を生存力と繁殖力の視点から見ると、ESとEPは生存力に、GAは繁殖力に、それぞれ重点をおいていることが分かる。このような違いには二つの原因が考えられる。一つは、それぞれの進化的アルゴリズムは生物進化の異なる側面を強調しているためである。たとえば、GAは個体群の進

化、ESは人工育種、EPは種の進化、をそれぞれモデルにしている。もう一つはESとEPでは、変数とその変異幅を制御する戦略パラメータの両方を個体表現に用い、戦略パラメータも突然変異操作の対象となるため、その効果を適切に評価するには1親個体あたり平均にして親個体より適応度の高い子個体をすくなくとも一つ生成する必要がある<sup>[12]</sup>。 $(m+1)$ -Selectionにおいては、それが親個体あたり平均にして $1/m$ 個の子個体を産むということによって保証されている。これがESでの選択操作は生存力にのみ注目していることの原因である。本稿では、繁殖力と生存力の両方に選択圧をかける選択操作をESに導入することを提案し、この新しい選択操作の性能を計算機実験で検証する。

### 4. 準種モデル(The Quasi-Species Model)

準種モデル<sup>[13]</sup>は生命起源にかかわるRNA分子集団の進化を記述するために提案された。それが分子進化を考える場合の重要な概念の一つ：エラー閾値(error threshold)をもたらした。エラー閾値はある長さの遺伝情報を集団の中に保持されるための突然変異率の上限を示すものである。突然変異率がエラー閾値を超えると、分子集団のなかの遺伝情報は蓄積された突然変異に由来するエラーによって破壊されてしまう。Maynard Smithはマスター種及び変種の2種からなる準種モデルを以下のように定式化している<sup>[14]</sup>。

$$\begin{cases} \dot{x}_m = x_m(A_m Q - E) \\ \dot{x}_j = x_j(A_j - E) + x_m A_m(1 - Q) \end{cases}$$

ただし $Q = (1-p)^L$ 。  $L$ と $p$ はRNA分子の長さ塩基あたりの突然変異率を表す。 $E$ は死亡率をいい、 $x_m + x_j = 1$ となるように $E = (A_m x_m + A_j x_j)/(x_m + x_j)$ と設定される。 $x_m, x_j$ 及び $A_m, A_j$ はそれぞれマスター種と変種に属する分子の集団の大きさと再生率である。またマスター種は変種より再生率が高い( $A_m > A_j$ )とする。そのためマスター種に準種集団が獲得した有用な遺伝情報が含まれていることになる。このモデルではマスター種と変種に同じ死亡率 $E$ が仮定されているため、繁殖率 $(A_m, A_j)$ のみに選択をかけることになる。準種集団が平衡状態にある場合、つまり、マスター種と変種の個体数の変動がなくなるときに $(\dot{x}_m = 0, \dot{x}_j = 0)$ 、上の式は次のようになり、

$$\begin{cases} A_m Q = E \\ x_j(E - A_j) = x_m A_m(1 - Q) \end{cases}$$

この時、有用な遺伝情報が集団内に存在することは $x_m > 0$ に相当するため、次の不等式が得られる。

$$Q > A_j / A_m$$

$p \ll 1$ の場合、 $\ln(1-p) \approx -p$ となるので、上の不等式は

次のように書き換えられる．

$$L < \frac{\ln(A_m/A_j)}{p}$$

この不等式は，ある突然変異率のもとで得られる遺伝情報の長さの上限，あるいはある長さの遺伝情報を得るための突然変異率の上限，つまりエラー閾値を示している．Maynard Smithが指摘したように，この結果には次のような「鶏・卵」ジレンマを抱えている：長い遺伝情報を得るためにエラー校正のための酵素が必要となるが，そのような酵素は長い遺伝情報のもとではじめて可能となる．そのジレンマの解決策の一つとしてハイパーサイクル(Hypercycle)モデル<sup>[15]</sup>が提案されたが，Schwefel<sup>[16]</sup>はこの問題を少し違う視点で捉えた．Schwefelはマスター種と変種に同じ再生率  $A$ ，異なる死亡率を割り当て，モデルの再定義した：

$$\begin{cases} \dot{x}_m = x_m(AQ - E_m) \\ \dot{x}_j = x_j(A - E_j) + x_m A(1 - Q) \end{cases}$$

この場合，遺伝情報の長さとの突然変異率の関係を表す不等式は次のようになる．

$$L < \frac{\ln(E_j/E_m)}{p}$$

Schwefelは生命起源の初期においては，死亡率，つまり生存力(RNA分子の構造的な安定性など)にける選択圧は繁殖力にける選択圧よりも大きいこと，言い換えると  $E_j/E_m > A_m/A_j$  が大いにあるので，同じ突然変異率でも，Maynard Smithのモデルより長い遺伝情報が得られることを指摘した．

このように，Maynard SmithとSchwefelのモデルはそれぞれ繁殖力と生存力に選択圧をかけているが，繁殖力と生存力の両方に選択圧をかけるように，モデルを次のように定式すると，

$$\begin{cases} \dot{x}_m = x_m(A_m Q - E_m) \\ \dot{x}_j = x_j(A_j - E_j) + x_m A_m(1 - Q) \end{cases}$$

遺伝情報の長さとの突然変異率の関係は

$$L < \frac{\ln(A_m/A_j) + \ln(E_j/E_m)}{p}$$

のようになる．この場合に得られる遺伝情報の長さの上限は，Maynard Smith と Schwefel のモデルでそれぞれ得られた遺伝情報の長さの上限の和となる．

## 5．実関数最適化問題

実関数最適化問題とは， $n$ 次元の実行可能領域  $S(S \subseteq \mathcal{R}^n)$  を持つ有界な実数値目的関数  $f(x)$  において， $f(x_0)$  が最小となる変数ベクトル  $x_0 \in S$  を見つける問題

である．ESは実数値を個体表現にしているため，実関数最適化問題に特に適している．すでに述べたように，CESでは，個体の繁殖力に選択をかけていない．本稿では従来の生存力に対する ( $m, l$ )-selectionに加えて，個体の繁殖力には以下のような線形ランキング選択をかける．適応度順にランクされた親集団の  $i$  番目個体の親になる確率  $p_i$  を  $i$  の線形関数として

$$p_i = \frac{1}{m} \left( a^+ - (a^+ - a^-) \cdot \frac{i-1}{m-1} \right)$$

のように定義する<sup>[7]</sup>．最良個体と最劣個体の繁殖力はそれぞれ  $a^+$ ， $a^-$  とし，制約条件  $\sum_{i=1}^m p_i = 1$  から， $a^+ + a^- = 2$  が得られるため， $a^+ (0 < a^+ < 2)$  によって繁殖力にける選択圧を調節することができる．計算機実験は11個のテスト関数において実施した<sup>[17,18]</sup>．ここでは，下記の関数に関する実験結果を示す．

$$f_1 = \sum_{i=1}^n x_i^2, \quad -100 \leq x_i \leq 100$$

$$f_5 = \sum_{i=1}^{n-1} [100(x_{i+1} - x_i^2)^2 + (x_i - 1)^2], \quad -30 \leq x_i \leq 30$$

$$f_8 = -20 \exp(-0.2 \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2}) - \exp\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \cos 2\pi x_i\right) + 20 + e, \quad -32 \leq x_i \leq 32$$

$$f_9 = \frac{1}{4000} \sum_{i=1}^n x_i^2 - \prod_{i=1}^n \cos\left(\frac{x_i}{\sqrt{i}}\right) + 1, \quad -600 \leq x_i \leq 600$$

すべての実験において， $m = 30, l = 200$ ，関数次元数  $n = 30$  とし， $a^+$  を0.0から2.0まで0.1刻みで増やし，実験結果に与える影響について調べた．各問題の100試行に関する結果の第1, 2, 3四分位点及び最小値，最大値を図に示した．さらに  $a^+ = 1$  の時， $a^+ + a^- = 2$  から  $a^+ = a^- = 1$  が得られるため，最良個体と最劣個体に同じ繁殖力を割り当てることになり，繁殖力に選択圧をかけることに相当する．また  $0 < a^+ < 1$  の場合では，個体の繁殖力に対する選択圧と生存力に対する選択圧が相反になり，結果的に個体に対する選択圧を弱めることになる．同様な理由から， $1 < a^+ < 2$  の場合は，選択圧を高めることになる．

図1，図2には  $f_1$  に関するCESとD-CESの実験結果を示している．CESに関しては， $a^+$  の増加に伴い，アルゴリズムの性能は緩やかに向上している．D-CESに関しては  $a^+$  の値が1.0から1.1に変わった時，性能の飛躍的な向上が見られるが，0.0～1.0及び1.1～2.0の間の変動は大きくない．この場合，一般的に選択圧の増大が性能の向上につながる．

図3，図4は  $f_5$  に関するCESとD-CESの実験結果を示している． $f_1$  の場合と同じ傾向を示しているが，D-CESの場合，性能の向上がもっとも著しいのは  $a^+ = 0.5 \sim 0.8$  の間に見られる．注意しなければならないのはこの時， $a^+ < 1$  になっていることである．

図5，図6は  $f_8$  に関する実験結果を示している．CESの場合では， $a^+$  の値に関わらず，ほぼ同様な性能を示し

ているのに対して、D-CESでは、 $a^+ = 1.1$ のところで大きな性能向上が見られる。しかし、それ以外のところではCESと同様に性能上の変化はあまりない。

図7、図8の $f_9$ に関する結果では、CESとD-CESが同じような傾向を示す。まず、 $0 < a^+ < 1$ の間、 $a^+$ の増大に伴い、性能の向上が見られるが、 $1.1 < a^+ < 2$ の間では、性能上の変化が見られない。特に、 $1 < a^+ < 1.1$ のところでは性能上の大きな劣化が見られる。

以上の実験では生存力と繁殖力に対する選択は同じ目的関数を通して行われたため、結果的に選択圧の変化になるが、次の章ではそれぞれ制約条件と目的関数によって評価し、制約付実関数最適化問題へ適用した結果を示す。

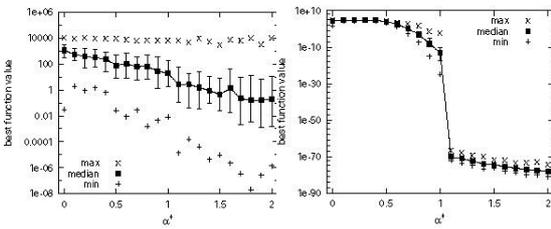


図1: CES on  $f_1$

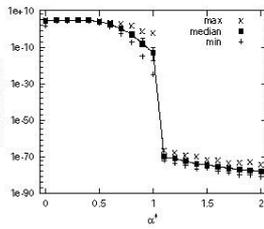


図2: D-CES on  $f_1$

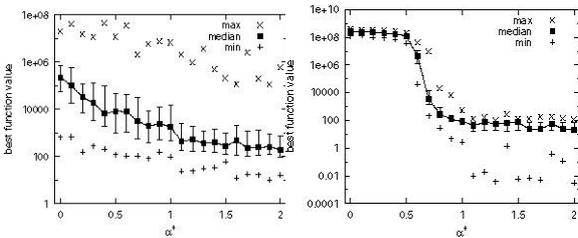


図3: CES on  $f_5$

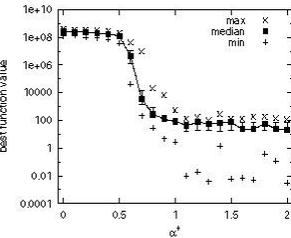


図4: D-CES on  $f_5$

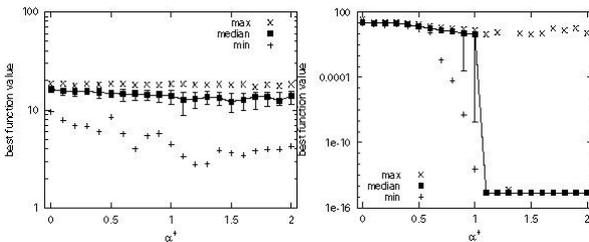


図5: CES on  $f_8$

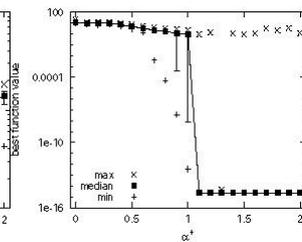


図6: D-CES on  $f_8$

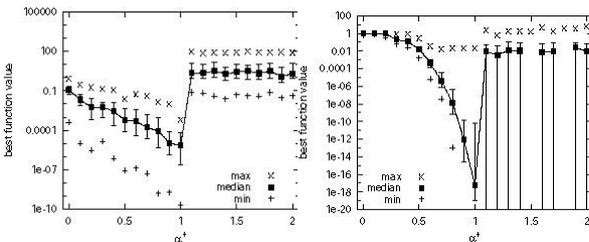


図7: CES on  $f_9$

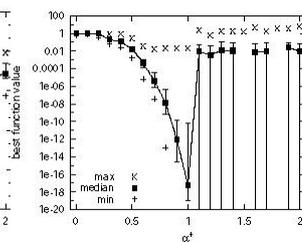


図8: D-CES on  $f_9$

## 6. 制約付実関数最適化問題

一般的に、制約付実関数最適化問題は以下のように定式化できる：

$$\begin{aligned} & \text{Minimize } f(x), \quad x = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in \mathcal{R}^n \\ & \text{subject to } \underline{x}_i \leq x_i \leq \bar{x}_i \quad i = 1, 2, \dots, n \\ & \quad \quad \quad g_j(x) \leq 0 \quad j = 1, 2, \dots, q \\ & \quad \quad \quad h_j(x) = 0 \quad j = q+1, \dots, m. \end{aligned}$$

さらに、計算機上で処理する場合には、 $h_j(x) = 0$  を下記のような不等式制約に書き換えられる。

$$g_j(x) \equiv |h_j(x) - d| \leq 0, \quad j = q+1, \dots, m.$$

$d$  は小さな値であり、誤差の許容範囲を表す。

EAでは、制約条件を扱うには“Penalty Function”<sup>[19]</sup>という手法があり、それは制約条件を満たさない解にはペナルティを課する。本稿では下記のような“Quadratic Loss Function”というペナルティ関数を用いる。

$$f(x) = \sum_{j=1}^m \max\{0, g_j(x)\}^2$$

従来手法の多くはペナルティ関数値と目的関数値を一つの適応度値にまとめるのに対して、本稿では、ペナルティ関数値を解の生存力、目的関数値を解の繁殖力とみなし、それぞれに対して選択圧力をかけることによって問題の解決を試みる。計算手続きは他の手法<sup>[20,21]</sup>と比較するため、文献<sup>[20]</sup>に従い、次のように定義した。

$$h'_k(j) = \frac{1}{2}(h_i(j) + h_{h_j}(j)) \exp(tN(0,1) + tN_j(0,1))$$

$$x'_k(j) = x_i(j) + h'_k(j)N_j(0,1)$$

提案したアルゴリズムと文献<sup>[20]</sup>のアルゴリズムと違いは、選択操作が異なること、戦略パラメータに上限を設けないこと、問題空間を定義する $\underline{x}_i \leq x_i \leq \bar{x}_i$ を、 $x_i \leq \bar{x}_i$ と $-x_i \leq -\underline{x}_i$ のように整理し、他の制約条件とまとめて扱うことにある。

繁殖力選択及び生存力選択をともに“Truncation Selection”として実装した。まず、 $I$ の子個体からペナルティ関数値に従い、上位の $z$ 個体を選び出し、目的関数によって評価し、その中から上位の $m$ 個体を次世代の親個体とする。 $z$ は繁殖力と生存力にそれぞれかける選択圧間のバランスを表し、その値がアルゴリズムの性能に強く影響すると予想される。

計算機実験においては $z$ の値を35から110まで5刻みで増加させ、それが実験結果に与える影響について調べた。提案手法を文献<sup>[20]</sup>の中の13個のベンチマーク問題に適用した<sup>[22]</sup>。各問題に対して最適な $z$ の値は異なるが、13個中11個の問題に対して $z = 55$ の時、問題g06とg10においては $z = 35$ の時、相対的に良い解を見つけた。それらの結果を表1に、また他手法<sup>[20,21]</sup>との比較を表2に示す。

表2から分かるように、“Best Result”項目に関して、

表1 13個のベンチマーク問題に関する実験結果 .

| fcn  | optimal    | fea | best          | median        | worst         | mean          | st. dev.   |
|------|------------|-----|---------------|---------------|---------------|---------------|------------|
| g01  | -15.000    | 14  | -15.00000     | -15.00000     | -13.00000     | -14.857088    | 0.515064   |
| g02  | -0.803619  | 30  | -0.801925     | -0.743880     | -0.644350     | -0.745795     | 0.039788   |
| g03  | -1.000     | 30  | -1.000478     | -0.999783     | -0.969545     | -0.997956     | 0.006124   |
| g04  | -30665.539 | 30  | -30665.538584 | -30665.299304 | -30640.413317 | -30662.783855 | 5.902188   |
| g05  | 5126.498   | 21  | 5126.496721   | 5127.212107   | 5134.712328   | 5128.221492   | 2.358852   |
| g06  | -6961.814  | 2   | -5669.343588  | -5358.511179  | -5047.678770  | -5358.511179  | 310.832409 |
| g06* | -6961.814  | 28  | -6961.805956  | -6960.929617  | -3772.049822  | -6741.525009  | 740.525707 |
| g07  | 24.306     | 30  | 24.330104     | 24.531033     | 26.139391     | 24.663972     | 0.421972   |
| g08  | -0.095825  | 30  | -0.095825     | -0.095825     | -0.095825     | -0.095825     | 0.000000   |
| g09  | 680.630    | 30  | 680.631577    | 680.718828    | 681.649279    | 680.838015    | 0.256505   |
| g10  | 7049.331   | 0   | -             | -             | -             | -             | -          |
| g10* | 7049.331   | 30  | 7069.294325   | 7251.500158   | 8067.262840   | 7334.744715   | 273.519647 |
| g11  | 0.750      | 30  | 0.749900      | 0.749903      | 0.751233      | 0.750002      | 0.000266   |
| g12  | -1.000000  | 30  | -1.000000     | -1.000000     | -0.994375     | -0.999062     | 0.002096   |
| g13  | 0.053950   | 30  | 0.053943      | 0.055190      | 0.448195      | 0.086380      | 0.096520   |

表2 提案手法(V&F: Viability and Fertlityの略語)と文献<sup>[20,21]</sup> (それぞれR&Y, K&Mで表している)の比較 .

| fcn | Best Result   |            |              | Mean Result   |            |              |
|-----|---------------|------------|--------------|---------------|------------|--------------|
|     | V&F           | R&Y        | K&M          | V&F           | R&Y        | K&M          |
| g01 | -15.000       | -15.000    | -14.7864     | -14.857       | -15.000    | -14.7082     |
| g02 | -0.801925     | -0.803515  | -0.79953     | -0.745795     | -0.781975  | -0.79671     |
| g03 | -1.000        | -1.000     | -0.9997      | -0.9979       | -1.000     | -0.9989      |
| g04 | -30665.538584 | -30665.539 | -30664.5     | -30662.783855 | -30665.539 | -30655.3     |
| g05 | 5126.4967     | 5126.497   | -            | 5128.221      | 5128.881   | -            |
| g06 | -6961.806     | -6961.814  | -6952.1      | -6741.525     | -6875.940  | -6342.6      |
| g07 | 24.330        | 24.307     | 24.620       | 24.664        | 24.374     | 24.826       |
| g08 | -0.095825     | -0.095825  | -0.095825    | -0.095825     | -0.095825  | -0.0891568   |
| g09 | 680.631       | 680.630    | 680.91       | 680.838       | 680.656    | 681.16       |
| g10 | 7069.294      | 7054.316   | 7149.9       | 7334.745      | 7559.192   | 8163.6       |
| g11 | 0.7499        | 0.750      | 0.75         | 0.750         | 0.750      | 0.75         |
| g12 | -1.00         | -1.00      | -0.999999857 | -0.999062     | -1.0       | -0.999134613 |
| g13 | 0.053943      | 0.053957   | 0.054        | 0.086380      | 0.057006   | 0.064        |

提案手法は手法<sup>[21]</sup>より良い, またg02とg10を除いて手法<sup>[20]</sup>と同じ最適解を見つけた. g08においては三つの手法がともに最適解を見つけた. 提案手法がg05, g11とg13において最適解より良い解を見つけた原因は等式制約を不等式制約条件に書き換えたことにある. “ Mean Result ” に関して提案手法の性能はg03, g12とg13以外では手法<sup>[20]</sup>と手法<sup>[21]</sup>の間に位置する.

## 7. おわりに

生物の集団遺伝・進化過程を模倣した最適解を探索する計算モデルを総じて進化的アルゴリズム(EA)と呼び, これまでに様々なアルゴリズムが提案されているが, これらのアルゴリズムに共通するのは, 問題の解を個体

(計算機内のデータ)として, その集合(集団)を保持すること, 突然変異, 組替えなどの遺伝演算子を適用し, 新しい個体を生成すること, 選択によって, 良い解を表す個体が保存されること, である. その中, 特に選択操作は中心的な役割を果たす. これは突然変異操作や問題解のコーディングの仕方は具体的な問題に依存するのに対して, 選択操作はある程度の一般性を備えているためである.

本稿では, まず代表的なEAについて簡単な紹介をした. それから, EAにおける選択操作を繁殖力と生存力の視点から考察し, それぞれの特徴を挙げた. 次に準種モデルに用いて繁殖力選択と生存力選択の違いがエラー閾値に与える影響を示した. 進化戦略(Evolution Strategies: ES)における従来の選択操作においては, 個体の生存力に選

択をかけることによって探索に方向性を与えるのが一般的であるが、本稿では、繁殖力にも選択をかける選択操作を提案し、ESの性能が改善されることを実関数最適化問題及び制約付実関数最適化問題を通して示した。計算機実験における提案した選択操作の実装はES及び Truncation Selectionによって行われたが、ほかのEAや既存の選択操作によっても実現できる。

## 文 献

- [1] Schwefel H.-P., *Evolution and Optimun Seeking*, John Wiley & Son, 1995.
- [2] Back T. and Schwefel H.-P. , “ An overview of Evolutionary Algorithms for parameter optimization ” , *Evolutionary Computation* 1(1), pp.1-23, 1993.
- [3] Chang M., Ohkura K. and Ueda K., “Some Experimental Observation of ( $m/m, I$ )-Evolution Strategies”, *Proc. of the 2001 Congress on Evolutionary Computation*, pp.663-670, IEEE Press, 2001.
- [4] Fogel D.B., *Evolutionary Computation Toward a New Philosophy of Machine Intelligence*, IEEE Press, 1995.
- [5] Holland J.H., *Adaptation in Natural and Artificial System*, MIT Press, 1992.
- [6] Koza J.R. , *Genetic Programming*, MIT Press, 1992.
- [7] Back T., *Evolutionary Algorithms in Theory and Practice*, Oxford University Press, 1996.
- [8] Sober E., *Philosophy of Biology*, Westview Press, 2000.
- [9] Goldberg D.E. and Deb K. “A Comparative analysis of selection schemes used in genetic algorithms”, *Foundations of genetic algorithms*, pp.69-93, 1991.
- [10] Blickle T. and Thiele P. “ A comparison of selection schemes used in evolutionary algorithms”, *Evolutionary Computation* 4(4), pp.361-394, 1997.
- [11] Chakraborty U.K. and Deb K., “ Analysis of Selection Algorithms: A Markov Chain Approach”, *Evolutionary Computation* 4(2), pp.133-167, 1997.
- [12] Beyer H.-G., *The Theory of Evolution Strategies*, Springer, 2001.
- [13] Eigen M., “Selforganization of matter and the evolution of biological macromolecules”, *Naturwissenschaften* 58, pp.465-532, 1971.
- [14] Maynard Smith J., “Models of Evolution”, *Proc. R. Soc. Lond. B* 219, pp.315-325, 1983.
- [15] Eigen M. and Schuster P. “ The hypercycle. A principle of natural self-organization. Part A: emergence of the hypercycle”, *Naturwissenschaften* 64, pp.541-565, 1977.
- [16] Schwefel H.-P., “Deep insight from simple models of evolution”, *BioSystems* 64, pp.189-198, 2002.
- [17] Chang M., Ohkura K., Ueda K. and Sugiyama M., “Some Experimental Observation of ( $m, I$ )-ES with Linear Ranking Selection on Fertility”, *Proc. of the 6<sup>th</sup> International Conference on Complex System*, pp.339-346, 2002.
- [18] Chang M., Sugiyama, M., Ohkura K. and Ueda K., “( $m, I$ )-Linear Ranking Selection in Evolution Strategies”, *Proc. of the 4<sup>th</sup> Asia Pacific Conference on Simulated Evolution and Learning*, pp.236-240, 2002.
- [19] Smith A.E. and Coit D.W., “Penalty Functions”, *Handbook on Evolutionary Computation*, pp.C5.2:1-6, Oxford University Press, 1997.
- [20] Runarsson T.P. and Yao X., “Stochastic Ranking for Constrained Evolutionary Optimization”, *IEEE Transaction on Evolutionary Computation*, 4(3), pp.284-294, 2000.
- [21] Koziel S. and Michalewicz Z., “Evolution Algorithms, Homomorphous Mappings, and Constrained Parameter Optimization”, *Evolutionary Computation*, 7(1) pp.19-44, 1999.
- [22] Chang M., Ohkura K., Ueda K. and Sugiyama M., “A Two-Step Selection Scheme for Constrained Evolutionary Optimization”, Submitted to *IEEE International Conference on Neural Network & Signal Processing*.

# ネットワークを介したエンジニアリングデータベース

窪田 直樹      飯田 佳弘      杉山 正晴

## Result Spread of Network Engineering Database

Naoki KUBOTA    Yoshihiro IIDA    Masaharu SUGIYAMA

あらまし 工業製品の製造過程には、仕様書、設計図など多くの書類が生成される。現在、これらの書類はコンピュータで作成され、メールなどでやりとりされる。しかし、製造に携わる担当者が増えるにつれ、書類(データ)の管理が重要になってくる。こうしたデータの管理にはデータベースが適しているが、データベースの多くは非常に高価であり、中小企業には経済的負担となる。そこで、本研究では、平成11年から13年にかけて、中小企業を対象とした安価なデータベースを作成した。本年度は成果普及の一環として実際に企業で利用してもらい、より実用に近いデータベースになるよう改良をした。

キーワード データベース、ネットワーク、エンジニアリングデータベース

### 1. はじめに

#### 1.1 用語

本論中では、データベースソフトウェアをデータベース、データベースソフトウェアが稼働しているコンピュータをサーバ、データベースとサーバを併せてデータベースシステムと呼称する。

#### 1.2 背景

平成11年から平成13年にかけて、産学官連携による共同研究の一部として、ネットワーク分散型エンジニアリングデータベースの開発を行った<sup>[1]</sup>。このデータベースは、複数の中小企業が連携して工業製品を製造する際に生成される様々なデータを格納するデータベースである。

中小企業が連携して一つの工業製品を製造する際、企画書、設計図、製品写真、検査書などが各企業の間を行き交うことになる。コンピュータが普及した現在、これらのデータは電子データとして扱われ、送受は電子メールで行われることが多い。しかし、同時にデータの管理やメールの送受におけるトラブルも絶えない。この問題を解決するため、データベースによるデータの管理が必要となるが、従来のデータベースの多くは、社内にデータベース管理部署を設け、データを一括して管理するといった形態で利用されており、さらに、データベースの管理には専門的な知識が必要であったため、中小企業が導入することは人的、金銭的に困難であった。そこで、本研究所では、中小企業での利用を想定した安価なデータベースを開発した。

### 2. データベース概要

本データベースの特徴は、オブジェクト指向であることと、ネットワーク分散であることの2点である。

#### 2.1 オブジェクト指向

従来のデータベースの多くは、表形式でデータを管理するリレーショナルデータベースが用いられてきた。しかし、リレーショナルデータベースはデータを表形式で格納するため定型データの扱いに優れているが、エンジニアリングデータのように表形式に収まらないデータを格納することが困難である。そこで、本データベースではオブジェクト指向データベースを採用した。オブジェクト指向データベースは様々なデータをそのままの形で保存できるため柔軟性が高く、また、オブジェクト指向プログラミング言語との親和性も高い。

本データベースでは、オブジェクト指向データベースとしてPSE Pro<sup>[2]</sup>というデータベースエンジンを採用した。PSE Proは、データベースの仕様規模に応じて小規模データベース用のPSE、中規模のPSE Pro、大規模データベース用のObject Storeというラインナップがあり、いずれを使う場合にもプログラムの書き換えをすることなく利用することができる。

#### 2.2 ネットワーク分散

従来のデータベースは、1台のデータベースに数多くのクライアントが接続される一極集中型で利用されることが多い。一極集中型を採用した場合、データベース管理者がすべてのデータの管理をする必要があり、管理者の負荷が高い。そこで、本データベースは、ネットワーク上に複数の小型データベースを分散して設置する形態を

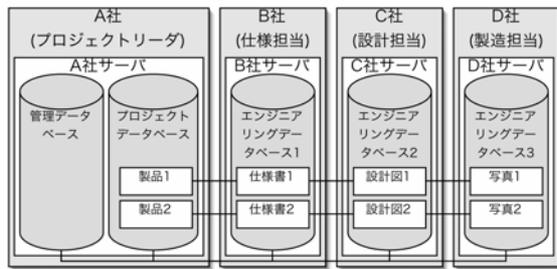


図1 分散データベースの利用例

とった。分散データベースは、エンジニアリングデータベース、プロジェクトデータベースおよび管理データベースから成り立っている。エンジニアリングデータベースは、個々のエンジニアリングデータを管理するデータベースであり、必要に応じて複数設置することができる。プロジェクトデータベースはエンジニアリングデータ同士の関係を製品単位で管理する。管理データベースは、エンジニアリングデータベースやプロジェクトデータベースがどのサーバで稼働しているかを管理している。

図1に、分散データベースの利用例を示す。プロジェクトリーダであるA社には管理データベースが、B? D社にはエンジニアリングデータベースが設置されている。B? D社は、自社のデータベースに自社の担当データだけを格納する。そのため、データの管理は自社のデータのみですむ。また、各データベースはネットワークで接続されているので、他社のデータが必要なおときにはいつでも入手することができる。

ユーザーは、図2に示すクライアントアプリケーションを使ってデータの格納、読み出しを行う。縦方向には製品目、横方向には作業工程が並んでいる。この工程一つ一つにエンジニアリングデータベースが対応しており、図1のB? D社のデータベースはこれに相当する。各工程には順序が規定されており、前工程のデータが格納されない限り後工程のデータは登録できないようになっている。

なお、各データベースは、ネットワークに繋がった複数のサーバに自由に設置できるので、1社に複数のサーバを配置することや、1台のサーバに複数のデータベースを設置することもできる。

本データベースでは、ネットワーク分散技術として、HORB<sup>[3]</sup>を採用した。HORBは、ネットワークアクセスのための特別なコマンドを使うことなくネットワーク分散を行うことができる技術であり、この技術を使うことで

| ID | 名称     | 仕様  | 設計   | 設計図  | 解析   | 計算   | 加工   |
|----|--------|-----|------|------|------|------|------|
| 0  | 開始試験 1 | 完了  | 完了   | 完了   | 完了   | 完了   | 完了   |
| 1  | 開始試験 2 | 作業中 | 着手不可 | 着手不可 | 着手不可 | 着手不可 | 着手不可 |
| 2  | test   | 完了  | 作業中  | 着手不可 | 着手不可 | 着手不可 | 着手不可 |
| 3  | 最終試験   | 完了  | 完了   | 完了   | 完了   | 作業中  | 着手不可 |
| 4  | 工業試験   | 完了  | 完了   | 完了   | 作業中  | 着手不可 | 着手不可 |

図2 クライアントアプリケーション

サーバー、クライアントを意識することなくプログラミングを行うことができる。

### 2.3 その他の特徴

以上の二つの特徴のほかに、プログラム全体がJava言語で作られている、データの送受にHTTPを利用しているといった特徴がある。Java言語は、OSに寄らない実行環境であるため、データベースの導入のために新規にサーバを購入しなくても、既存のコンピュータ上で実行することができる。また、各データベース間のデータ送受には、HTTPを利用している。これは、企業ネットワークの多くが、セキュリティを高めるためHTTP以外のポートを利用不能にしていることがあるためである。

### 3. 実証試験への対応

本データベースを実際に企業で利用してもらうため、岐阜県工業会とその参加企業の協力によって試験運用をしてもらうことにした。平成14年度は、協力企業においてデータベースを試験的に利用してもらい、データベースを利用する上での問題点の抽出と改善を行った。本章では、協力企業の概要と、企業の現状に合わせてデータベースに加えた変更点を述べる。

#### 3.1. 企業概要

データベースを利用してもらった企業は業務用電気機器を製造するメーカーで、国内にある本社で設計を行い、海外にある工場で生産を行っている。現在、国内本社で作成した仕様書、設計図などを海外工場に、海外工場で作成した製品写真や検査結果をメールで送付している。しかし、データの変更が頻繁にあるため、どのデータが最新のデータかわかりにくいという問題を抱えている。そこで、データベースを利用することで、常に最新のデータを提示できるようにする。

#### 3.2 データベース導入の問題点

海外工場は、工場内のLANは完備しているが、地域全体のインターネットの発展が遅れているため、ダイヤルアップ接続を余儀なくされており、電話回線の状態が悪いことから常時接続する事ができない。そのため、データベースは基本的にネットワークを介さず単独で動作し、国内、海外でデータの送受を行うときのみネットワークに接続する形態にする必要がある。

また、ネットワークに接続していないときでも、必要なデータに即座にアクセスしなければならないため、データを分散させず、国内、海外それぞれにすべてのデータを保存する必要がある。

#### 3.3 データベースの変更点

前節で述べた問題点は、協力企業で利用してもらう前

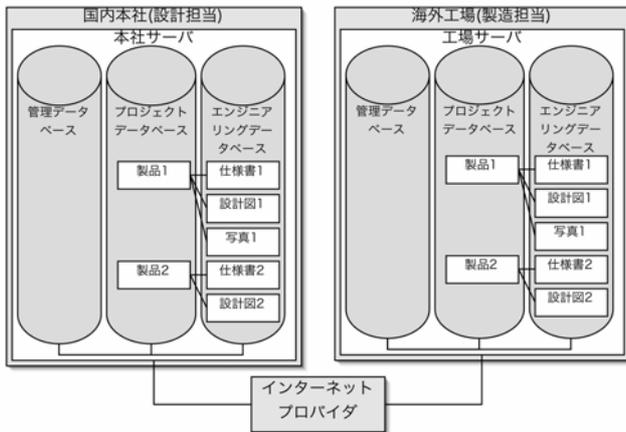


図3 実証試験におけるデータベースイメージ

に解決しなければならない問題であった。そこで、以下のように解決した。

### 3.3.1 データベースの単独運用

データベースは、国内本社と海外工場それぞれ単独で動かす必要がある。そこで、図3に示すように、データベースサーバを国内本社、海外工場それぞれに1台ずつ設置し、それぞれのサーバの中ですべてのデータベースを起動するようにした。これにより、ネットワークに接続していなくても単独にデータベースの運用ができるようになった。

### 3.3.2 負荷の軽減

1台のサーバに複数のデータベースを稼働させると負荷が高くなる。そこで、一つのエンジニアリングデータベースにすべてのエンジニアリングデータを格納するようにした。

### 3.3.3 データの同期処理

データベースを単独運用すると、それぞれのデータベースに差異が生じる。そこで、データの同期処理を加えた、1日に数回ネットワークに接続して同期処理を行うと、双方のデータベースを比較し、新規に登録されたデータや更新されたデータを相手のデータベースにコピーするようにした。

### 3.3.4 データの登録数の増加

図2に示すクライアントアプリケーションでは、工程名や工程数が固定であったが、これを自由に変更できるようにした。

工程名や工程数はXMLファイルに保存することにし、クライアントアプリケーション起動時に読み込むようにした。このXMLファイルには、工程名以外にも、同期をとる相手のサーバのIPアドレスや、エンジニアリングデータを読み書きするためのアプリケーションの情報なども書き込むようにした。

## 4. 模擬実験

前章にあげた変更を加え、まず、国内本社で模擬実験を行ってもらった。国内本社に2台のサーバを設置し、片方はADSL、他方はダイヤルアップでインターネットに接続した。

そして、利用する上での様々な問題点をあげてもらい、データベースの改善を行った。

### 4.1 自由なデータの登録

本データベースは、工程管理機能を持たせるため、前工程のデータが登録されない限り、以降のデータが登録できないようになっていた。企業で利用してもらう際は、一つの製品を作る上で生成されるデータが非常に多く、また、そのうちいくつかのデータは平行して作り上げられるため、常に一定の順序に従うものではない。そこで、順序による規制を廃し、自由な順番でデータを登録できるようにした。

### 4.2 データの自動登録

海外工場では、製品の写真を大量に撮影することがあるが、そのデータを一つ一つデータベースに登録することは手間がかかる。そこで、指定のディレクトリにファイルを保存すると、自動的にファイルをデータベースに登録するようにした。

ただし、データが指定のフォルダにあると新たにプロジェクトを作成し、そこにデータを登録するようにしているため、正しいプロジェクトへの対応がとれていない。

### 4.3 ダイヤルアップへの対応

本データベースは、プロジェクトデータベースやエンジニアリングデータベースのIPアドレスを、管理データベースが一括管理している。そのため、クライアントソフトウェアに管理データベースのIPアドレスを知らせるだけで、すべてのデータベースにアクセスすることができる。

しかし、ネットワークに常時接続していない場合、接続のたびにIPアドレスが変わってしまい、管理データベースのIPアドレスを得ることができない。そのため、IPアドレスを毎回同期相手に通知しなければならない。通知の方法として、電話やメールでサーバのIPアドレスを知らせ、担当者がIPアドレスを入力する方法があげられるが、これを毎回繰り返すことは非効率である。そこで、ネットワークに接続するたびに与えられたIPアドレスをwebサーバにアップロードするようにした。これにより、クライアントアプリケーションは、webサーバからデータベースサーバのIPアドレスを取得することで、データベースサーバに接続することができる。

### 4.4 ローカルアドレスへの対応

今回の模擬実験では、ネットワーク接続の際アドレス

変換が行われることがわかった。アドレス変換が行われると、実際にサーバーに付与されたIPアドレス(ローカルアドレス)と、インターネット側からサーバーを指定するときに用いるIPアドレス(グローバルアドレス)が異なることになる。

2つのデータベースの同期を取る際、海外工場側のクライアントアプリケーションは、国内本社のプロジェクトデータベース、エンジニアリングデータベースのIPアドレスを本社管理データベースに問い合わせるが、得られるIPアドレスは本社サーバに割り当てられたローカルアドレスであるため、海外工場側のクライアントアプリケーションからはアクセスできない。

そこで、今回の模擬試験では、管理データベースとプロジェクトデータベース、エンジニアリングデータベースが同じサーバで動作していることを利用し、管理データベースを通さず直接アクセスするようにした。

#### 4.5 登録処理の高速化

データベースには、複数のクライアントアプリケーションが同時に接続することがある。他のクライアントアプリケーションからデータベースの更新が行われると、自分が使用しているクライアントアプリケーションに表示されている情報とデータベースの内容が異なる事態が発生する。クライアントアプリケーションから常時データベースにアクセスすることで、データベースの更新を監視することもできるが、ネットワークトラフィックの増加、監視に伴う速度の低下などが発生する。そこで、本データベースのクライアントアプリケーションは、「起動時」「データの登録時」「ユーザーから指定のあった時」に最新のデータベースの情報を取得するようにしている。しかし、データの更新には時間がかかるため、データの登録時に最新のデータベース情報の取得を行うと、なかなか次の作業を行うことができない。

そこで、データ登録時のデータベース情報取得を行わないようにした。これにより、データ登録後すぐに次の作業にはいることができる。今回の模擬実験のようにクライアントアプリケーションをデータベース1台につき1台しか起動しない場合支障は無いが、念のため、4.2節で述べた自動登録の際に最新データベース情報の取得を行っている。

#### 4.6 エラー対策の強化

本データベースは研究用に開発されたためエラー処理がほとんどなされておらず、たとえばデータの登録に失敗してもそのまま登録が成功したとして扱うことが多かった。また、基本的なエラーメッセージなどをDOS画面に表示していたため、ユーザーインターフェースも充実しているとは言い難かった。

エラー処理は非常に複雑であり、今後も長期間にわたって対策をとる必要があるが、今年度はとりわけ重要なデータベースアクセスに関するエラー対策を行った。データの登録などは、エラーが発生しても数回再登録作業を繰り返し、それでも登録に失敗した場合のみエラーとしてユーザーにエラーメッセージを表示するようにした。これにより、信頼性の向上を図った。

#### 5. 今後の展望

データベースの模擬試験は現在も継続しており、現在も問題点の抽出などを行っている。平成15年度には実際に国内本社と海外工場の間での実証実験を開始し、実用化する予定である。

#### 謝 辞

本研究の遂行にあたり、共同研究を行っていただいた岐阜県工業会様および実証実験を行っていただいた株式会社レシップ様に感謝の意を表します。

#### 文 献

- [1] 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3報)”, 岐阜県生産情報技術研究所研究報告, pp.19-22, 2001
- [2] <http://www.prgs.co.jp/> プログレスソフトウェア株式会社
- [3] <http://www.horb.org/> 独立行政法人産業総合技術研究所 HORB distribution site

# 力感覚が必要な作業スキル解明に関する研究

久富 茂樹 張 勤 張 明

## Acquire Skillfulness of Force-Sensitive Operations Through Investigating its mechanism

Shigeki KUDOMI Qin ZHANG Ming CHANG

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。しかしながら、このような熟練技術を習得するには一般に多くの時間が必要であるとされており、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、数値化や自動化が可能などところはできるだけ数値化、自動化を行い、技能伝承の効率化を試みるとともに、作業スキルの解明を目指す。本年度は歪み量測定装置を試作し、定性的にはあるが歪みの状態を作業者に提示することができた。また、熟練技能者への聞き取り、作業計測を行い、歪み矯正作業の解析を試みた。

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

岐阜県は多数の製造業が集積している地域である。製造工程の中には作業者の高度な判断と経験（熟練技能）を必要とする作業も数多く存在する。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く、その企業の大きな財産とも言えるものである。このような熟練技能を習得するには一般に多くの時間が必要であるとされている。しかしながら、近年の開発・製造のリードタイム短縮の追求でOJT(On-the-Job Training：職場内訓練)による技能伝達の時間が十分に確保できない等の事情もあり、熟練技能者の育成、技能伝承が大きな課題となっている。

一方で、このような熟練技能を自動化・ロボット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々ある<sup>[1-3]</sup>。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<sup>[4]</sup>。

以上のような背景に鑑み、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、数値化や自動化が比較的容易に低コストで実現できる部分で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。また、同時に作業

者の個人差を排除することができ、技能の本質的な部分だけが残るため、作業スキルの解析が行いやすくなるのではないと思われる。本年度は、平板の曲がりの矯正に焦点をあて、歪み量の検出装置の試作および作業計測を行ったので報告する。

### 2. 歪み矯正作業

本作業は、前工程までに発生した数10～100[ $\mu\text{m}$ ]程度の歪みを研削削り代(20～30[ $\mu\text{m}$ ]程度のことが多い)以内になるように図1に示すようなハンドプレス機を使用して矯正する作業である。作業者はまず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。次に凸になっている面を上にしてワークをハンドプレス機の台にセットする。ハンドプレス機のハンドル操作の強さを加減することでプレス力を調整し歪みを矯正していく。製品の材質、形状、歪みの状態等を総合的に判断し、適切な位置に適切な力を加えることによって歪みを矯正していくところに作業者の高度な判断と経験が必要な作業である。本年度は、問題を簡単にするために、ねじれない一次元的な曲がりの矯正作業を考える。

この作業を理解するために、熟練技能者に作業を行ってもらいながら、その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。その結果から選ばれた歪み矯正作業のフローを図2に示す。作業者は<処理1>において、定盤上でワークを滑らしたり、回転させたりしながら歪みの状態を定性的に捉えているようであっ



図1 ハンドプレス機

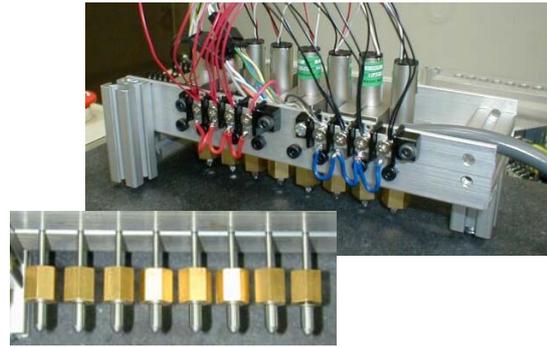


図3 ひずみ量測定装置の外観

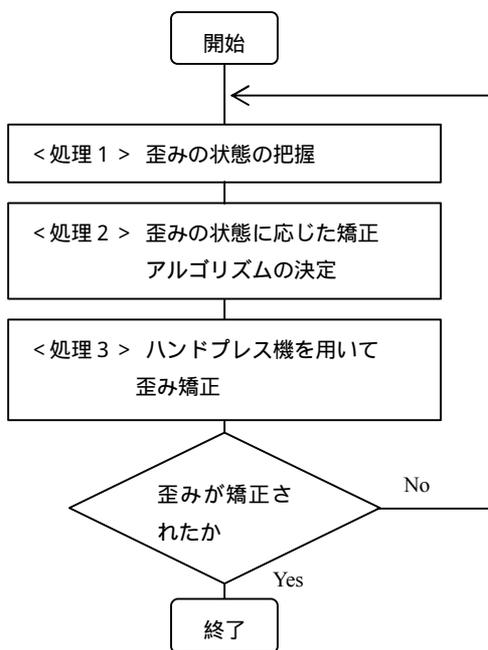


図2 ひずみ矯正作業のフロー

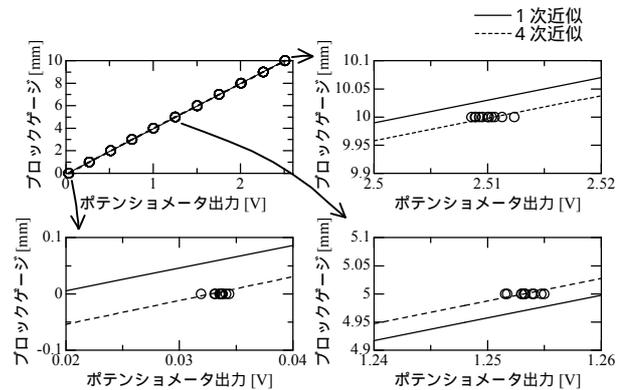


図4 歪み量測定装置の線形性

### 3. 歪み量測定装置

#### 3.1 装置の試作

た．また，ダイヤルゲージを用いて測定を行うことで歪み量を定量的に捉えていた．<処理2>の部分はこの作業の根幹をなす部分で，ワークの状態，環境の状態，過去の経験等を熟練技能者が総合的に判断して決定している．ここでは一つの処理として表しているが，実際にはいくつかの処理や判断が繋がった複雑なフローになると思われる．<処理3>は実際に作業を行う部分で，作業者はこれまでに培われてきた経験によって適切な力でハンドプレス操作を行うテクニックとして熟練を要する部分である．この中で<処理1>について，歪み量測定装置を試作し歪みの状態を数値化して作業者への提示を行う．

歪みの状態を数値データ化するために歪み量の測定装置を試作した．図3に試作した装置の外観を示す．ワークの歪み量すなわち表面形状を測定するセンサとして各種変位センサが市販されているが，本研究ではワークの測定面の反射状態等に影響されない接触式で，比較的安価なりニアポテンシオメータ（以下ポテンシオメータと記述）を用いた．8個のポテンシオメータ（ストローク：20[mm]，印可電圧：5[V]）を直線状にならべて配置し，先端には接触部が球状をした接触子を取り付けた．その上部には重りを取り付け，常に一定荷重で鉛直下向きに押さえつけられるようにしている．隣接するポテンシオメータが接触しないように配置した結果，測定点の間隔は17[mm]となった．定盤（平面度：2.0[ $\mu$ m]）上にワークを置き接触子がワークの上面に接触するように歪み量測定装置を下ろすと，ワークの歪みに応じてポテンシオメータが変位し，変位量に応じた電圧が出力される．その電圧はAD変換器（入力レンジ：0～+5[V]，分解能：12bit）を介してPCに取り込まれる．さらに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ている．

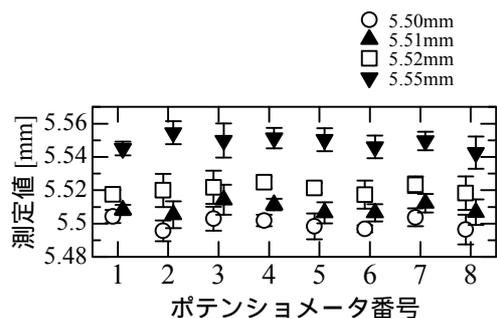


図5 歪み量測定装置の精度確認

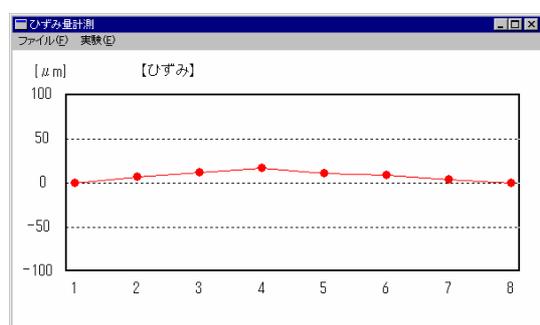


図6 歪み量表示画面

### 3.2 装置の特性評価

装置の特性を明らかにするため、標準試料として1[mm]から10[mm]まで1[mm]おきのブロックゲージを測定し、各ポテンシオメータの出力電圧を計測した。図4に測定結果の一例を示す。実線は全測定点を最小二乗法により1次式で近似した直線、破線は4次式で近似した曲線を示す。1次式で近似した場合は実際の測定データと50[μm]程度差異が生じている箇所もあり、ポテンシオメータ出力から正しい変位量に変換することができない。一方、4次式で近似した場合は、全測定範囲において測定データとほぼ一致している。そこで、ポテンシオメータ出力から変位量への変換式はポテンシオメータ毎に測定データから4次の近似式を求めた。求めた変換式を用い、5.50[mm]、5.51[mm]、5.52[mm]、5.55[mm]のブロックゲージを測定した結果を図5に示す。プロット値は11回測定した値の平均値で、エラーバーは標準偏差を示す。ポテンシオメータの固体差もあるが、±10[μm]程の精度で測定でき、20[μm]程度の差があればその差を検出することがわかった。測定値がばらつくのは、装置及びポテンシオメータの機械的なガタやヒステリシスが原因ではないかと思われる。

### 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6に表示画面を示す。表示の

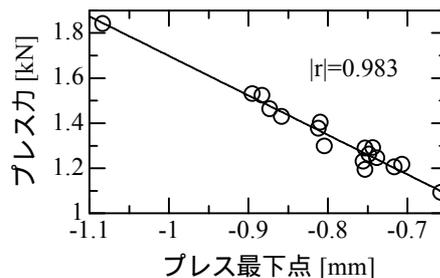


図7 プレス位置最下点とプレス力との関係

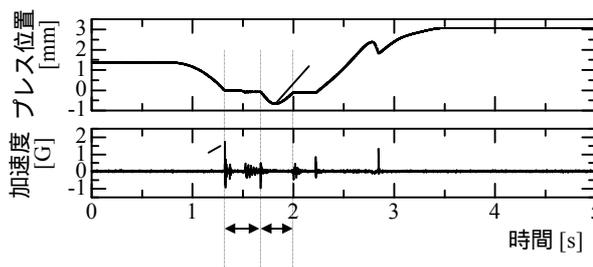


図8 ひずみ矯正作業測定例

際には両端のポテンシオメータの変位を基準としたときのの変位に変換した。本作業では熟練技能者は5~10[μm]単位で歪み量を捉えており、表示画面によって歪みの状態を定性的に捉えることはできるが、定量的に捉えることは難しく、装置の測定精度を向上させる必要がある。また、曲がりだけの一次元的な歪みの状態は作業者にとってイメージしやすく、歪み形状をモニタで表示するメリットはそれほどないように思われた。今後歪み量測定装置の精度向上と共にねじれも含んだ二次元的な歪みを測定、作業者への提示ができるように改良していく予定である。

## 4. 作業計測

歪み矯正作業の計測にあたり、次のセンサを用いて予備測定を行った。

- (1)加速度センサ：プレスハンマ部に固定してプレス時の加速度を計測する。
- (2)歪みゲージ：ワーク裏面に取り付け、プレス時にワークに加わる曲げ歪み量を測定することにより、間接的にプレス力を求める。
- (3)ポテンシオメータ：プレスハンマ部の位置を計測する。プレス時の力は非常に重要な項目であると考えられる。しかしながら、ワーク一つ一つに歪みゲージを貼付するのは煩雑であり、また、歪みゲージ貼付面をプレスできない等の制約が生じることから好ましくない。予備実験の結果、図7に示すように歪みゲージ出力から求めたプ

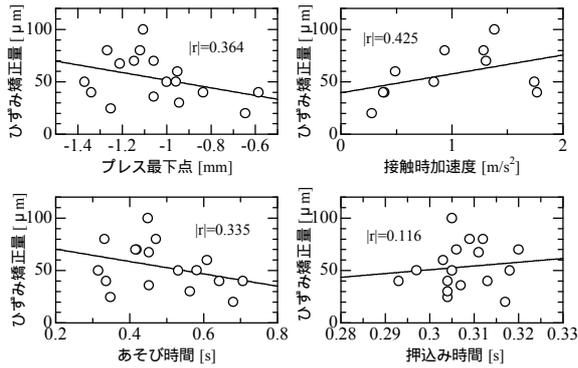


図9 歪み矯正量との相関

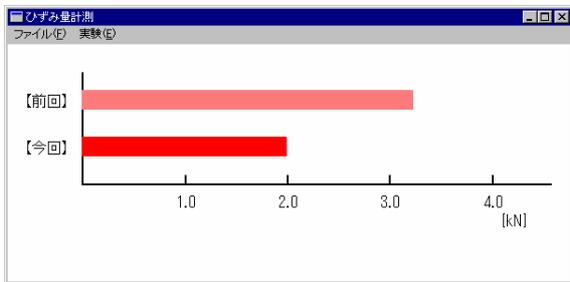


図10 プレス力の表示画面

プレス力とプレス位置最下点との間に高い相関が認められたので、プレス位置最下点からプレス力を求めることにした。

図8に歪み取り作業の計測例を示す。ワークは125×25×5[mm]スチール(S45C)の平板を用いた。作業者がハンドプレスのハンドルを回すとプレス部が下降し、やがてワークに接触する。プレスのネジ部分のあそびがあるためしばらくの間プレス部はほとんど変位せず、その後ワークを強く押し込み歪みを矯正している。計測データから プレス位置最下点、接触時加速度、あそび時間、押込み時間を求め、歪み矯正作業による歪み矯正量との相関をそれぞれ求めた。図9にその結果を示す。これらの因子と歪み矯正量との間には何らかの相関があるのではないかと予想したが、今回の計測データからは特に相関は認められなかった。作業を行ってもらった熟練技能者の方に話を聞いてみると、同じ材質、形状のワークでもそれまでの履歴により一つ一つ歪みの状態は異なっており、同じ力を加えれば同じ量だけ矯正できるというものではないらしい。初めはやや弱めに力を加え、自分の加えた力と矯正された量からそのワークの矯正のしやすさを判断して、残りの歪みを矯正していくとのことであった。しかしながら、歪み矯正作業の技能を伝達

する際、プレス力を非熟練技能者に提示することは有効であると考え、プレス位置最下点から算出したプレス力をグラフとして画面に表示した。図10に表示画面を示す。前回作業時のプレス力も表示し比較できるようにした。ただし、この表示画面を用いることにより技能伝承が効率良く行えるかどうかの評価はまだ行っていない。プレス作業は熟練技能者がイメージした力で正確にプレスできればよく、機械化に適していると思われる。今後、プレス部分は数値入力によって正確な力でプレスできる装置を試作し、歪み矯正作業の本質的な部分のスキル解明を目指す予定である。

## 5. まとめ

金属製品の研削加工前の歪み矯正作業を対象として、歪み量測定装置を試作した。歪みの状態を定性的に作業者に提示することはできたが、まだ作業に必要な精度で作業者に提示することはできていない。精度の向上とねじれを含んだ歪みの測定ができるように改良することが今後の課題である。また、歪み矯正作業を計測しプレス力と歪み矯正量との相関を調べた。今回の計測データからは両者間にはっきりした相関を得ることができなかった。しかしながら、熟練作業者への聞き取り調査を通して、わずかではあるが作業手順、判断のポイントを理解することができた。今後、プレス力等の作業情報を作業者に提示したり、プレス装置を導入したりすることにより技能伝承を支援すると共に作業スキルの解明を進める予定である。

## 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いた(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, “センサベースロボットにおける作業スキルの教示 - バリ取り作業事例 -”, 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.

# 立体紙製品の構造解析に関する研究 (第3報)

川島 義隆      田中 等幸      原田 匡人\*      野口 哲司\*      手塚 明\*\*

## Research on Structural Analysis of Paper Ware ( )

Yoshitaka KAWASHIMA    Tomoyuki TANAKA  
Masahito HARADA\*    Tetsuji NOGUCHI\*    Akira TEZUKA\*\*

あらまし 本報告では、ブロック型段ボール緩衝材の圧縮特性の解析及びその準静的・動的解析手法の検討を目的として、1層段ボールの平面圧縮特性の解析、均質化法プログラムのLS-DYNAへの組み込みに関する検討及び4層段ボール緩衝材の圧縮特性の線形均質化法による試行解析を行った。その結果、段ボール原紙の圧縮ヤング率を用いた1層段ボールシートの平面圧縮特性の弾性解析は、微小変形領域の範囲において実験と概ね一致することがわかった。また、組み込み検討の結果、LS-DYNA Ver.960の仕様の範囲外ではあるが、マクロ要素番号及びその節点変位を参照することにより、均質化解析が可能であることがわかった。また、それを用いた均質化解析は、マクロ要素数が不十分ではあるが、詳細解析における剛体壁反力波形の傾向が均質化解析においても現れていることがわかった。

キーワード 段ボール、緩衝材、均質化法、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。そのため、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への利用も多くなっており、紙系緩衝材の正確な強度設計（緩衝設計）技術が必要とされている。

代表的な紙系包装材料である段ボールは箱や緩衝材など多岐にわたって利用されているが、その実用的な解析を行うためには、材料特性（紙）、構造特性（段構造）の解明およびその有限要素モデル作成の煩雑さの回避が必要となってくる。後者の問題に対して、我々は、段ボール製品は多数の段構造で構成された複合的構造物であり、その段の周期性に着目し、均質化法<sup>[1]</sup>を用いて静的弾性解析を行うことを提案<sup>[2]</sup>している。また、緩衝材の性能評価には、落下衝撃試験等による動的試験で評価されることも多く、そのためには動的解析が必要となってくる。従って、我々は、段ボール製品の均質化法を用いた準静的・動的解析を目的として、商用ソフトLS-DYNA（Livermore Software Technology Corporation）への均質化法のプログラムの組み込みに関する検討<sup>[3]</sup>を行った。本

報告では、ブロック型段ボール緩衝材の圧縮特性の解析及びその準静的・動的解析手法の検討を目的として、緩衝材を構成する1層段ボールの平面圧縮特性の基礎的解析、均質化法プログラムのLS-DYNAへの組み込みに関する検討、そして、その試行解析として、4層段ボール緩衝材圧縮特性の線形均質化解析を行ったので、これらを報告する。

### 2. 1層段ボールの平面圧縮特性

#### 2.1 段ボール平面圧縮試験

1層の段ボールの平面圧縮特性を把握するため、オートグラフ（株）島津製作所AG-20kNI）を用い、平面圧縮強さ試験（JIS Z 0403-1）により圧縮試験を行った。試験に用いた段ボールは表ライナー（公称坪量170 g/m<sup>2</sup>）、中芯（公称坪量120 g/m<sup>2</sup>）及び裏ライナー（公称坪量170 g/m<sup>2</sup>）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、試験は段が完全につぶれるまで行った。得られた応力-歪み曲線のうちの代表的な曲線を図3に示す。

#### 2.2 材料定数の同定

段ボール原紙を代表とする機械抄き紙の引張り時の変形挙動は繊維間や繊維結合部での微細な破壊が多数発生することに対して、圧縮時の挙動は繊維の折損や座屈が局部的に起こるとされている<sup>[4]</sup>。

段ボールの平面圧縮特性は、主に中芯の縦方向の圧縮特性が支配的であることを考え、解析に使用する材料定

\* 株式会社日本総合研究所

\*\* 独立行政法人 産業技術総合研究所 計算科学研究部門

数は、段ボール原紙の圧縮特性試験から同定した。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）により行い、試験片は長さ152.4mm、幅15mm、試験速度は10mm/minとした。測定した原紙（表ライナー）の縦方向（MD）、横方向（CD）のそれぞれ試験10回測定のうちの代表的な曲線を図1に示す。そして、原紙の圧縮特性曲線において、応力0.1MPaの点から最大圧縮応力点までの立ち上がりの直線を圧縮ヤング率とする。原紙3種類のそれぞれの縦方向、横方向の圧縮ヤング率の平均を表1に示す。

表1 段ボール原紙のヤング率

| 原紙    | 方向 | ヤング率 (MPa) |
|-------|----|------------|
| 表ライナー | 縦  | 1213.7     |
|       | 横  | 703.1      |
| 中芯    | 縦  | 730.3      |
|       | 横  | 480.0      |
| 裏ライナー | 縦  | 1163.5     |
|       | 横  | 647.9      |

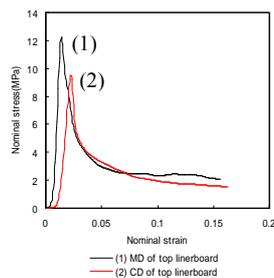


図1 表ライナーの圧縮特性

### 2.3 解析条件

図1より、段ボール原紙は面内異方性を示すことが分かる。しかしながら、本報告では問題を単純化するため、等方性として扱うことにする。そして、段ボール平面圧縮時における中芯原紙は、主に縦方向の圧縮を受けるため縦方向のヤング率を用い、等方弾性体として解析を行う。また、ライナーも同様に扱うことにする。

解析モデルは段の1/2モデルとし、モデル側面に対称境界条件を付与する。要素タイプは8節点ソリッド要素（8点積分）、ポアソン比は石淵ら<sup>[5]</sup>の値を参考に、ライナーは0.07、中芯は0.03とする。力学条件は上部から剛体壁による強制変位、圧縮速度は試験と同じ10mm/minとする。

表2 平面圧縮解析モデル

|          |          |
|----------|----------|
| 要素       | 8節点solid |
| 節点数      | 1,045    |
| 要素数      | 460      |
| 大きさ (mm) | x=4.45   |
|          | y=5.00   |
|          | z=5.35   |
| 材料モデル    | 等方、弾性    |

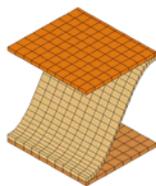


図2 平面圧縮解析モデル

### 2.4 解析結果

比較のため、解析結果の剛体壁反力を、図3の実験による圧縮特性曲線にプロットする。反力を示す直線は、圧縮試験時の試験機の圧縮面と試験片の間の不安定な接触区間を考慮して、プロットしている。

図3より、本解析は等方弾性解析であり、また初期不整等の座屈解析を考慮していないことから、微小変形領域（歪み1%程度の領域）なら、概ね一致していると考えられる。従って、段ボール原紙の材料定数として、原紙

の圧縮試験から同定したヤング率を用いることに問題ないといえる。

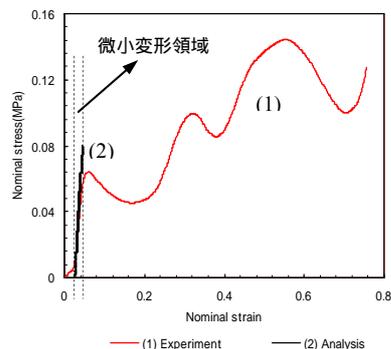


図3 段ボール平面圧縮の解析と実験の比較

## 3. LS-DYNAを用いた均質化解析

### 3.1 ユーザー定義物性材料モデルサブルーチン

LS-DYNAでは、ユーザー独自の定義に基づく物性特性の材料を用いて解析を行う場合、LS-DYNAに用意されているユーザー定義物性材料モデル<sup>[6]</sup>を利用する。具体的には、公開されているユーザー定義物性材料モデル用のサブルーチン（以下、ユーザー定義サブルーチン）に必要とする応力-歪み関係式などのユーザー独自の定義をFortran 90のプログラムで記述し、利用することになる。

我々は、このユーザー定義サブルーチンを利用して、3.2節で述べるアルゴリズムにより均質化解析を行う。そのため、ユーザー定義サブルーチン内に均質化法のプログラム（均質化サブルーチン）の記述を行うことにより、LS-DYNAへの組み込みを行う。しかし、このことを前提として、ユーザー定義サブルーチンの仕様を検討すると、次のような問題点が生じる。そのサブルーチン内では簡単な関数の定義を行うのが目的であり、その中で行列計算を行うことは考慮されていない。また、そのサブルーチンは要素単位での応力更新が目的で作成されており、サブルーチン内での変数の参照は歪み増分等の変数に限定されている。よって、均質化解析では行列計算を必要とし、かつモデル全体の要素、節点情報の参照を行うため、このユーザー定義サブルーチンは均質化サブルーチンの組み込みには対応していないことが分かる。

従って、我々は、前者の問題に対しては、3.3節で述べる方法で均質化サブルーチンの作成を行い、また、後者の問題に対しては3.4節で述べる方法で対処を行うことにより、均質化サブルーチンのLS-DYNA Ver.960 (Windows版)への組み込みを行った。

### 3.2 均質化解析アルゴリズム

均質化サブルーチンはユーザー定義サブルーチン内において、図4に示すようなタイミングで使用される。すなわち、マクロ要素の応力更新は、マクロ要素の歪み増分と均質化サブルーチンで計算した均質化弾性定数により、

マクロ応力増分を求めることにより行う。

そして、解析時の各時間ステップにおいて、均質化サブルーチン内では、次のような計算手順(図5参照)を踏む。前ステップで計算したマイクロ変位を用いて、マイクロ構造を更新する。次に、更新されたマイクロ構造より、現ステップの均質化弾性定数、マイクロ変位を求める。そして、その均質化弾性定数は現ステップのマクロ応力更新のために戻され、また、そのマイクロ変位は次ステップ用に保存される。

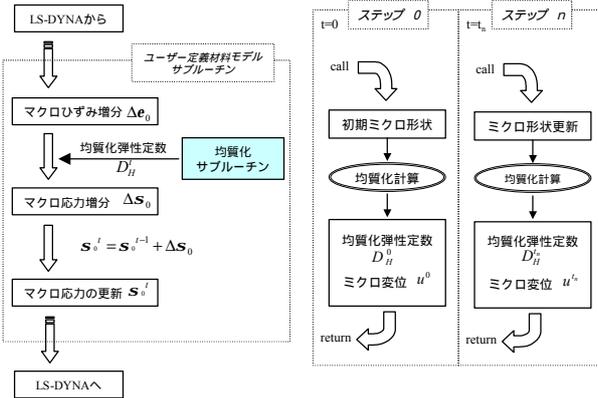


図4 マクロ応力更新

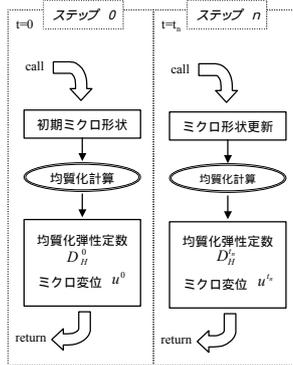


図5 均質化サブルーチン

### 3.3 均質化サブルーチン

均質化サブルーチンは、マイクロモデルの均質化弾性定数の導出<sup>[1]</sup>を行うため、行列計算を行う必要がある。しかし、ユーザー定義サブルーチン内ではLS-DYNAのソルバーの利用ができないため、ユーザーがそのサブルーチン内にソルバープログラムを用意する必要がある。一方、本均質化解析では、マイクロ及びマクロモデルの節点、要素コネクティビティ等やマクロ要素ごとのマイクロ節点変位をcommon変数としてメモリ上に保存するため、大規模解析を行う場合、そのメモリの省力化が必要となる。従って、以上の問題を考慮して、組み込みを行う均質化サブルーチンはElement by Element(EBE)法<sup>[7]</sup>により行列計算を行うソルバー<sup>[8]</sup>を用いた。EBE法は行列計算を行う際、全体行列を作成せず、要素毎の行列の大きさで行列計算を行うため、スカイライン等の解法に比べ、メモリを節約できる利点がある。

### 3.4 LS-DYNAへの組み込み

均質化解析を行うため、ユーザー定義サブルーチンを使用する場合、そのサブルーチンをcallしているマクロ要素の番号、積分点及びそのマクロ要素の節点変位を参照できないといった問題を生じる。本均質化解析では、各時間ステップでマイクロモデルの形状の更新を行うため、それを行うためにはマクロ節点変位からマイクロモデルの節点変位を計算する必要がある。従って、上記の問題に対処するためには、マクロモデルの要素は1要素(1点積分)とし、マクロモデルの境界条件及びユーザー定義サブルーチンの引数である歪み増分から、マクロ要素の

節点変位の計算を行わなければならない。これは1点積分からのマクロ要素の節点変位の計算は精度が十分に出来ないと問題が生じる。従って、LS-DYNAの仕様の範囲内では、十分な精度を持つ均質化解析ができないことが分かる。そこで、LS-DYNAの仕様の範囲外における使い方であるが、次のような対策を行った。

- (1) ユーザー定義サブルーチンをcallしている上位の subroutine urmathnより、マクロ要素番号を参照する。
- (2) LS-DYNA入力データの\*user\_loadingカードを追加し、ユーザー荷重ルーチンloadud に追加した common変数により均質化サブルーチンからマクロ要素節点変位を参照する。

しかしながら、この方法においても、LS-DYNAの仕様上、87を越えるマクロ要素の番号を参照することができない。従って、現段階での均質化解析は、マクロ要素数87以下の制限内で行う必要がある。

## 4. 段ボール緩衝材の圧縮特性解析

### 4.1 解析条件

均質化サブルーチンの組み込みを行ったLS-DYNAを使用し、段ボール緩衝材の圧縮特性の均質化解析を行う。その解析モデルを図6,7,表3に示す。また、その比較として、緩衝材の詳細にメッシュを切ったモデル(表4,図8)による解析(詳細解析)を行う。対象とする緩衝材は、前章で述べたLS-DYNAの仕様における制限を考慮し、4層に積層した段ボール緩衝材とする。すなわち、均質化解析においてはマクロモデルの要素数は64要素となる。また、その均質化解析結果との比較を行うため、8要素、27要素のマクロモデルによる均質化解析も行う。材料モデルは線形弾性。材料定数は原紙の圧縮ヤング率を用い、変形領域は微小変形領域とする。境界条件は、剛体壁により上面圧縮(強制変位)し、その圧縮速度は試験速度の10,000倍(10×10<sup>4</sup>mm/min)とする。また、緩衝材の4つ



図6 ミクロモデル

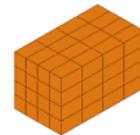


図7 マクロモデル(64要素)

表3 均質化解析モデル

| モデル      | マイクロ     | マクロ         |      |      |      |
|----------|----------|-------------|------|------|------|
| 節点数      | 5,355    | 8           | 27   | 64   |      |
| 要素数      | 2,560    | 27          | 64   | 125  |      |
| 要素タイプ    | 8節点solid |             |      |      |      |
| 積分点数     | 8        | 1           |      |      |      |
| 大きさ (mm) | X        | 8.90        | 17.8 | 26.7 | 35.6 |
|          | Y        | 5.00        | 10.0 | 15.0 | 20.0 |
|          | Z        | 5.35        | 10.7 | 16.1 | 21.4 |
| 材料モデル    | 等方弾性     | ユーザー定義材料モデル |      |      |      |

表4 緩衝材の詳細解析モデル

|             |          |
|-------------|----------|
| 節点数         | 290,385  |
| 要素数         | 163,840  |
| 要素タイプ       | 8節点solid |
| 積分点数        | 8        |
| 大きさ<br>(mm) | x=35.6   |
|             | y=20.0   |
|             | z=21.4   |
| 材料モデル       | 等方, 弾性   |

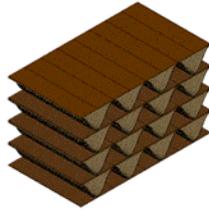


図8 緩衝材の詳細解析モデル

の側面には対称境界条件を付与している。

#### 4.2 解析結果

図9に3種類のマクロモデルによる均質化解析の剛体壁反力波形をそれぞれ示す。マクロモデルの要素数を増やすに従い、剛体壁反力は階段状の波形に漸近していくことが分かる。図10に詳細解析及び64要素のマクロモデルを用いた均質化解析の両者の剛体壁反力波形を示す。詳細解析結果を見ると、歪みの増加に対して反力が出ない区間があり、階段状に反力が出るのがわかる。また、均質化解析は、現段階ではマクロ要素数が少ないため、その反力波形は詳細解析のそれとは合っていないが、詳細解析と同様な傾向は出ているといえる。従って、より多くのマクロ要素数で均質化解析を行えば、詳細解析の結果に近くなると考えられる。

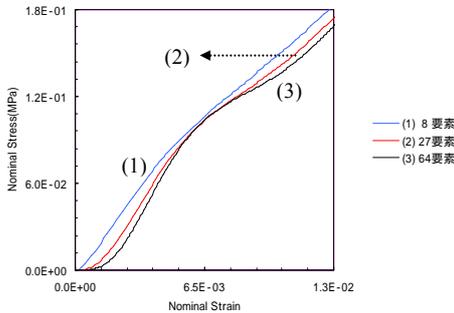


図9 要素数の違いによる剛体壁反力 (均質化解析)

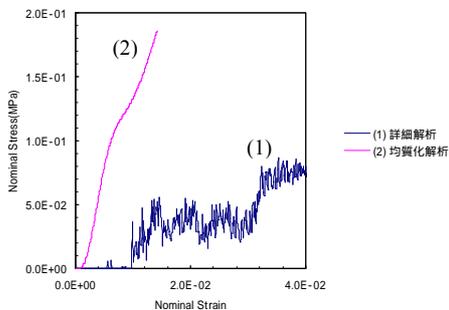


図10 詳細解析と均質化解析における剛体壁反力の比較

## 5. まとめ

段ボールの圧縮特性解析を目的として、段ボール原紙

の圧縮ヤング率を用いた1層段ボールの平面圧縮特性の弾性解析を行った。その結果、微小変形領域の範囲において、実験のそれと概ね一致することがわかった。

また、段ボール緩衝材の準静的・動的均質化解析を目的として、LS-DYNA Ver.960への均質化法のサブルーチンの組み込みに関する検討を行った。その結果、LS-DYNAの仕様の範囲外ではあるが、マクロ要素の番号及び節点変位を参照することにより、均質化解析が可能であることがわかった。そして、組み込みLS-DYNAを用いた段ボール緩衝材の線形均質化解析を試行的に行った。現段階では、マクロ要素数が少ないが、詳細解析における剛体壁反力波形の傾向が、均質化解析において現れており、マクロモデル要素数を増やすに従い、詳細解析のそれに近づくと考えられる。本解析で対象とした緩衝材は小規模であったが、実際の製品はよりサイズが大きく、その解析は大規模となる。すなわち、均質化解析におけるマクロ要素数が非常に多い場合に相当する。そのため、さらに組み込みの検討を行い、大規模均質化解析を行っていく予定である。

## 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] Gudes, J. M., Kikuchi, N., "Preprocessing and postprocessing for materials based on the homogenization method with adaptive finite element methods", Comput. Methods Appl. Mech. Eng., pp.143-198, 1990.
- [2] 川島ら, "均質化法を用いた段ボール緩衝材の解析", 機械学会関東支部茨城講演会講演論文集, pp.241-242, 2001.
- [3] 川島ら, "段ボール緩衝材に関する研究", LS-DYNA User Conference 2002 講演論文集, pp17-1-17-8, 2002.
- [4] 古川ら, "機械抄き紙の塑性変形挙動とその構造的変化", 紙パ技協誌, pp582-590, 1991.
- [5] 石淵ら, "段ボールシートの三次元曲げ応力解析", 機論, 60, 580, A, pp.2774-278, 1994.
- [6] (株)日本総合研究所, "LS-DYNA Version950 使用の手引き", pp.5.73-5.74, 2000.
- [7] Thomas J. R. Hughes, "The finite element method: Linear static and dynamic finite element analysis", Dover Pubns Inc., pp483-487, 2000.
- [8] ソースプログラムはScaled EBE solver (独立行政法人産業技術総合研究所)を使用した。