中間ゴールを用いた分割探索によるマニピュレータの 衝突回避動作の計画[†]

長谷川 勉*・寺 崎 肇**

Collision Avoidance for Multi-Joint Manipulators: Divide and Conquer Approach
by Determining Intermediate Goals

Tsutomu HASEGAWA* and Hajime TERASAKI**

An efficient method that finds collision-free paths for a manipulator with 6 revolute joints is described. The method first describes a global structure of the free space in the 3-D joint space of the arm. Both the collision-free space of the arm and a large open space in the workspace defined as a space where any orientation of the hand is possible are represented in this description.

Given the initial position and orientation of the hand, a path is searched for to the nearby open space as follows. A local space is described in the real 3-D workspace around the hand at the initial position. Then the description is analyzed, and candidates of the intermediate goal specifying the hand position and orientation are generated. The candidates of the intermediate goal are checked one by one until a path is found from the initial point to the intermediate goal and from the intermediate goal to the nearby open space.

The path planning system has been implemented for the ETA-2 (ETL's Torque Controlled Arm v.2). The system has successfully planned paths in tightly cluttered workspaces.

Key Words: collision avoidance, path planning, manipulator control

1. はじめに

作業環境内で、動作開始位置から障害物を回避しつつ目標に至る経路を自動的に計画する機能はロボットがそなえるべき重要な知能である。本論文ではこれまで実現されていなかった回転関節型6自由度マニピュレータに適用できる動作計画手法について述べる。

障害物回避動作計画に関するこれまでの研究は、

(1) 障害物からの距離に応じた反発力と目標点からの距離に応じた引力を生じるようなポテンシャルを定義して経路を求める方法¹⁾と、

(2) ロボットが衝突せず動きうる空間（自由空間）を陽に記述し、記述された空間の中で動作開始点から目標までの経路をグラフ探索手法などによって求める方法²⁾

に大別できる。前者では現実的な複雑さをもつ3次元環境でのポテンシャル関数の定義と計算の困難さだけでなく、原理的にデッドロックが生じその解決が困難であるため、適用範囲が限定される。局所的な情報のみに基づいているため大局的にみて最適な経路を計画することもできない。後者は、一般的に取り扱おうとすると、多次元空間の記述と探索に要する計算量的爆発の問題³⁾が生じるが、動作自由度に制限を加えたり、動作や構造に着目するなどのヒューリスティクスを併用することにより従来不可能であった経路計画が実現されつつある⁴⁾。本論文で提案する手法もこの後者に分類される。

人間は腕の自由度だけでなく、指先や肩、上半身、さらには足まで含め多数の自由度を駆使できるので狭く複雑にこみいった作業空間で作業できる。6自由度マニピュレータはいわば最低限の自由度のマニピュレータであり、作業環境には十分な広さの空間が必要

[†] 第25回計測自動制御学会学術講演会で一部発表
(昭61・7)

日本ロボット学会第4回学術講演会で発表(昭61・12)

* 電子技術総合研究所 茨城県新治郡桜村梅園 1-1-4

** 三洋電機(株)筑波研究所 茨城県筑波郡谷田町高野台 2-1

* Electrotechnical Laboratory, Niihari-gun, Ibaraki

** Tsukuba Research Center, Sanyo Electric Co., Ltd., Tsukuba-gun, Ibaraki

(Received September 29, 1986)

(Revised April 8, 1987)

である。このような環境での作業動作において、マニピュレータ先端のハンドの動きに着目すると、動作開始位置と動作目標位置近傍が複雑狭隘であるがそれらを結ぶ中間動作は広い空間で行われる場合が多い。そこで、マニピュレータの作業空間を分類し、ハンドがいかなる姿勢をとっても環境内の物体と衝突のないという意味で広い空間を陽に記述しておくことにより、経路探索が容易になると考えられる。この考えに基づき、動作開始位置から近傍の広い空間までハンドの姿勢を一定に保ちつつ移動し、広い空間内で目標姿勢に一致するよう姿勢を変え、ついで広い空間を出て姿勢を一定に保ちつつ目標位置に至る経路を探索する手法が開発されている⁵⁾。しかし動作開始位置および動作目標位置近傍がさらに複雑狭隘になると、ハンドは姿勢変更を含む複雑な動作をしなければならなくなる。

本論文では、狭く複雑な構造をもつ空間内の動作開始点から、周囲が十分広くハンドがいかなる姿勢をとっても衝突のないことが保証されている広い空間に到達するまでの経路を見いだす方法について述べる。動作目標点までの経路探索も動作方向を逆にして考えれば同じ問題に帰着する。広い空間内ではハンドはどのような姿勢でもとりうるので、2点を結ぶ経路の探索は容易である。さて自由空間の記述の効率とその後経路探索の効率をあげるためには、詳細な記述は衝突回避経路の存在確率の高い空間のみに限定できるとよい。また経路存在確率の高い空間を優先して探索できればよい。そこで、動作開始の位置姿勢が与えられたとき、3次元実作業空間で手首を中心とする近傍空間記述を生成する。この近傍空間記述から空間構造を分析し、これに基づいてハンドが目標とすべき位置と姿勢の中間ゴールの候補を決定する。この中間ゴール候補について順次経路探索を行い、動作開始点から中間ゴールに至る経路、および中間ゴールから近傍の広

い空間に至る経路の両者が見つかるまで探索する。これにより問題が分割でき、探索効率をあげることができる。

以下2章でマニピュレータの動作空間の大域構造の記述法の概略について述べたのち、3章でハンドの近傍空間の記述法を提案する。4章では近傍空間記述を用いた中間ゴールの決定法と、経路探索法を提案し、5章で実際の経路計画の例を示す。本手法は現在使用されているマニピュレータの大多数に適用できるが、説明の便宜上、以下の章ではわれわれが使用しているETA-2⁶⁾を例にして議論をすすめる (Fig. 1)。

2. 動作空間の大域構造の記述

2.1 大域空間の記述

6自由度マニピュレータが環境内物体と衝突しない自由空間を6次元空間で記述するのは計算量的に無理である。そこで現実的に記述可能な空間として、以下のように3次元自由空間を定義し分類記述する。

(1) 基本動作空間 (principal function space)

マニピュレータからハンドを除いた3自由度のアームが環境内の物体と衝突することなく安全に動作することのできる空間

(2) 完全自由空間 (full free space)

構造上とりうるどんな姿勢でもハンドが物体と衝突することなく安全に動作することのできる空間

各空間は、アームの関節角度空間で、関節可動全範囲を $64 \times 64 \times 64$ に量子化した空間セルにより記述される。

2.2 空間構造の解析

量子化された角度空間での自由空間の分類記述のもとに、その空間構造を明らかにする。構造上の特徴として特に重要なのは分類されたそれぞれの空間セルの連続性、および距離関係である。

連続性については、空間セルを端から順次チェックし、連続した自由空間セルに同一の値をラベル付けする手法で調べることができる。空間を走査していく過程ですでに別々の値が割り当てられたセルの集合が連続していると判明したら一方の集合の全空間セルのラベルを他方のものと同一の値に割り当てなおす。全空間を調べ終わった段階で、自由空間がいくつかの連続空間に別れているかが明らかになる。

距離関係は、基本動作空間内のすべての空間セルに対し、そこから最も近傍の完全自由空間までの距離を与えるもので、画像処理の分野で用いられる距離変換の手法⁷⁾を3次元空間で適用する。距離は6隣接にもとづいた距離である。これは任意のセルから完全自由

Fig. 1 ETA-2 manipulator

空間に至る経路の探索効率を向上させるのに役立つ。

3. ハンドの近傍空間の記述

前章で述べた基本動作空間の記述には、ハンドのとりうる姿勢範囲は考慮されていない。そこで、3次元の実作業空間で、ハンドの周囲の空間の局所的な広がり様子を記述する近傍空間記述を導入する。これにより、動作開始位置が与えられたとき、経路を探索すべき方向やハンドのとりべき姿勢などのてがかりを得ることができる。

ハンドを線分とみなすことができれば、空間記述や経路探索は容易になる。この目的で、ハンドを両端が半球の円柱によって近似したうえで、その半径だけ環境内の物体を拡大し、ハンドを縮小する (Fig. 2)。

近傍空間記述は、以下のような要件を満たすことが必要である。

(1) ハンドのとりうる姿勢に関する情報を得やすいこと。

(2) ハンドを中心とした3次元空間が、特定の方向性をもたずに記述できること。これは全方向にわたってハンドの移動方向を探索するためである。

(3) 効率よく記述するために、ハンドに近い部分ほど詳細に、また遠い部分はおおまかに記述できること。

(4) より詳細に記述する必要のある部分については、その必要に応じた分解能で記述できること。

これらの条件を満たせるものとして、ハンドの近傍空間を三角錐に分割して記述することにする。三角錐

Fig. 2 Approximation of hand and enlargement of obstacle

(a) Level=0, 20 faces (b) Level=1, 80 faces

Fig. 3 Recursive space division by geodesic domes

Fig. 4 Depth of a radial space cell

は、手首位置を中心とした測地ドーム (geodesic dome)⁹⁾ によって生成する。測地ドームは、Fig. 3 に示すように正 20 面体の各面を 4 個の小三角形に再分割することによって生成できる。これによって空間は手首に頂点を置き、測地ドーム表面の三角形を底面とする三角錐に分割されたことになる。なおこの分割は再帰的に繰返すことによって任意の分解能を実現できる。

つぎに、拡大された周囲物体とすべての三角錐との干渉を調べ、手首を中心とした空間の記述を作成する。実際の計算では、各三角錐について、手首から底面の重心を通るようにのびた半直線 (中心軸) が、周囲物体表面と最初に交わるまでの距離 (depth) を求める (Fig. 4)。頂点からこの長さまでの三角錐の部分が物体に占有されない空間であり、これを空間錐 (radial space cell) と呼ぶことにする。空間錐のうち、基準長以上の長さをもつものを開放放射錐 (open radial space cell) と名づける。ここでは基準長として手首 (wrist) から肘までの前腕の長さ (50 cm) を用いた。

この開放放射錐がどのように分布しているかを調べればハンド近傍の空間構造を知ることができる。この目的のために手首を中心として基準長の半径をもつ測地ドームの表面で距離変換⁹⁾を行う。これによりすべ

△ n Open radial space cell with distance value n

Fig. 5 Distance transformation on the surface of a geodesic dome

Fig. 6 Open radial space cells and obstacles

での開放放射錐について最も近傍の非開放放射錐までの距離が得られる。このとき二つの空間錐間の距離として、それぞれの中心軸のなす角度を用いる。Fig. 5に距離変換を求めた例を示す。ただし図中の距離値は整数で表現するための定数を掛けてある。

一般に開放放射錐は束になって分布するが(Fig. 6)最も大きな距離値をもつ開放放射錐が局所的に最も太い部分の中心になるので、この開放放射錐の中心軸方向の経路探索は成功する可能性が高い。

4. 動作の計画

4.1 中間ゴールの設定

動作開始点を中心とした近傍空間記述をもとにハンドが通過すべき位置と姿勢に関する中間ゴールの候補を求める。周囲が広くハンドのとりうる姿勢範囲が大きいところを候補とすることが望ましい。また、手首にはアームが接続しており、アームが占有し通過する空間を考慮に入れると狭い空間でハンドが侵入できる距離には限界がある。逆に、動作開始点からハンド長に相当する距離だけ広い空間に向かって移動できればハンドの周囲はかなり広くなり以後の経路探索は容易になると考えられる。したがって中間ゴールの候補としては、手首位置は、(1)太い束をなす開放放射錐の中心軸上で、(2)動作開始点からハンド長に相当する

Fig. 7 Radial space cell and the manipulator

距離の点とし、そのときのハンドの姿勢は、(3)その開放放射錐の中心軸と一致する方向またはその逆方向を選ぶ。ただし、太い束をなす開放放射錐であっても、アームを含む開放放射錐と連結していないものは不適当であるので候補とはしない(Fig. 7)。

上記の条件を満たす中間ゴールが多数存在するときは、以下のようにして分散したものを選ぶ。まず開放放射錐の束のうち最も太い束の中心空間錐を候補として選択する。この中心空間錐から最も近傍の非開放放射錐までの距離内の開放放射錐をすべて除外し、残りの中から、つぎに太い束の中心開放放射錐を選ぶ。この操作を繰返して中間ゴールの候補の集合を得る。

選択された中間ゴールの候補のそれぞれについて、対応するアーム角度空間で完全自由空間までの距離を評価し、その小さいものから順に、以下4.2節に示すアルゴリズムで動作開始点から中間ゴールに至る経路を探索し、探索に成功したものについて、さらに4.3節に示すアルゴリズムにより近傍の完全自由空間へ至る経路を探索する。

4.2 動作開始点から中間ゴールへ至る経路の探索

後述する二つのアルゴリズムⅠまたはⅡを用いて中間ゴールに至る経路を探索する。どちらのアルゴリズムも、まずハンドの経路探索動作を直交実空間で計画し、つぎにそれに対応するアームの関節角動作を求め、それが基本動作空間内にあるかどうかを確認することを繰返して中間ゴールに接近する。

はじめにⅠを実行し、失敗したらⅡを実行する。それでも経路を発見できなかったときには、つぎの中間ゴールを選択して再度探索を行う。

(1) 中間ゴールへの接近アルゴリズムⅠ

このアルゴリズムでは、3次元実作業環境内で中間ゴールに近い方向を優先してハンドを並進移動した後、その姿勢を中間ゴール姿勢に近づけるという動作を交互に繰返しながら経路を探索する。並進移動中にハンドが物体に接触するときは、ハンドの姿勢を物体にならって変える。

1. 動作開始位置を原点として3次元実空間を分割して格子点を設定する。この原点を探索開始点として探索リストに入れる(線分で表現されたハンドの長さは約19cmであり、格子間隔は1cmとした)。

2. 探索リストの中から中間ゴールに最も近い点を選び出し、その隣接格子点への移動可能性を調べる。探索リストが空になれば探索は失敗である。

2.1 まず、移動前の姿勢を維持したまま隣接格子点に移動できるかを調べる。ハンドが掃引する平

Fig. 8 Local hand motion with adaptation of orientation

面と周囲物体との干渉をチェックし、干渉するときはその掃引平面内で、移動前後のそれぞれの位置において、ハンドがとりうる姿勢範囲を求め、その共通範囲の中で移動前の姿勢に最も近い姿勢に変化させたのち隣接格子点に並進移動する (Fig. 8)。共通範囲がなければその隣接格子点には移動できないので 2.4 にとふ。

2.2 並進移動後、その点でのハンド姿勢を中間ゴールでのハンド姿勢に一致するよう変化させたとき掃引される平面と周囲の拡大物体との干渉をチェックし、その平面内で最も中間ゴールに近づくように姿勢を変える。

2.3 移動できた隣接格子点がすべての格子点中で中間ゴールに最も近い格子点ならば探索成功で終了する。そうでなければそれを探索リストに入れる。

2.4 隣接格子点が残っていればそれについて 2.1 以下を繰返す。なければ 2. にとふ。

探索の過程で、ハンドの姿勢が少しでも異なっていれば同一格子点を通過できるものとするとき無意味な探索空間が飛躍的に増大する。一方、一度探索した格子点を再度探索しないとすると経路が見いだせないことがある。動作開始点近傍の空間構造によって、中間ゴールに近い方向にはハンドの姿勢変更をするだけの空間余地がなく、一度中間ゴール位置から遠ざかり、姿勢変更をしたのち、あらためて中間ゴール位置に接近しなければならないことがある。しかし再接近しようとするときには、中間ゴールに近い点はすべて探索済みで接近できない。そこで、各格子点で以下のように通過モードを求め、モードが異なれば既探索済みの格子点を再度通過できるようにした。通過モードとして、当該格子点に到達したとき、そのハンドの姿勢を中間ゴールでのハンド姿勢に一致するよう変化させて掃引される平面内で、ハンドが周囲の物体と衝突することなく中間ゴール姿勢まで変更できるか否かで二つのモードを決定している。

(2) 中間ゴールへの接近アルゴリズム II

動作開始点近傍がさらに狭くなると、手首の位置を

Fig. 9 Hand motion planning in the radial space cells

少し動かすのにもハンドの姿勢を大きく複雑に動かさなければならなくなる。この場合には、近傍空間記述を用い、ハンドの動作として、動作開始手首位置（全空間錐の共通頂点であり、近傍空間の記述中心と呼ぶ）回りの回転運動による隣接空間錐間の移動と、空間錐内で放射軸方向の並進運動とを繰返しながら中間ゴールに至る経路探索を行う (Fig. 9)。

1. 運動開始時のハンドを包含する空間錐を求め。ここで用いているハンドは手首を中心として前後にのびているため、それぞれを包含するほぼ点対称の空間錐の対（包含空間錐対）が求まる。包含空間錐対には共有面をもつ三つの隣接空間錐対が定まる (Fig. 10)。
2. 隣接空間錐のうち中間目標姿勢に近いものを優先し、3, 4 を繰返して探索を進め、中間目標を含む開放放射錐に入ったら手首位置についても中間目標に近づけていく。移動可能な隣接空間錐がなくなったら失敗として打ち切る。
3. 空間記述中心まわりの回転のみによってハンドが包含空間錐対から隣接空間錐対へ移動できるかを調べる。ハンドは一般には包含空間錐の対にまたがって包含されているが、その包含されている部分よりもそれぞれの隣接空間錐のほうが長ければ回転のみで隣接空間錐への移動が可能である。
4. 回転のみで隣接空間錐対に移動できないときは、回転移動できる位置に至るまで、ハンドの軸

I: Including cell-pair of the hand
A_i: Adjacent cell-pair

Fig. 10 Including cell-pair and adjacent cell-pairs

にそって前後方向に平行移動したのち回転を行う。隣接空間錐対と包含空間錐対が接している部分の長さがハンドより長ければ移動可能である。

4.3 中間ゴールから近傍の完全自由空間へ至る経路の探索

完全自由空間に至る空間が広ければ探索動作の1ステップで移動できる距離も大きくとれ、姿勢変更の仕方の自由度も大きいため、簡便なアルゴリズムでも経路を探索できる可能性が高い。ここで述べるアルゴリズムは、中間ゴールから近傍の完全自由空間に到達するためのもので、基本動作空間内で、完全自由空間に接近する方向を優先してアームを少しずつ動かし、ハンドが物体に接触したならばその姿勢を接触物体にならって変えていくことにより完全自由空間まで移動しようというものである。

1. 中間ゴールに対応する空間セルを求め、探索リストに入れる。
2. 探索リストからコストの最も小さいセルを選び出す。コストとしては、動作開始セルから当該セルに至るまでの距離（通過したセルの数）と、当該セルから完全自由空間までの最短距離との和⁹⁾を用いる。選び出されたセルにはマークをつけて再度選ばれることのないようにしておく。選ぶべきセルがなければ探索は失敗である。

3. 2. で選び出したセルからその隣接セルのうちまだ探索リストに入れられていないものへの移動可能性をチェックする。ハンドが環境内物体と衝突するときは、移動する前に衝突しないようにハンドの姿勢を変え、その姿勢で平行移動する。変更姿勢の決定法は、中間ゴールへの接近アルゴリズム I の 2.1 で述べたものを用いている。この姿勢でセル間の並進移動中に衝突がないことを確認できたすべてのセルは、探索の経過がわかるように、当該セルへのポイントと、姿勢とをつけて探索リストに加える。探索リストに入れたセルが完全自由空間に属していれば、探索成功で 4. に進む。そうでなければ 2. に戻る。

4. ポインタを逆にたどって経路を得る。

4.4 探索制御と近傍空間記述の再構成 動作開始点の手首を中心とした近傍空間

記述に基づいて得られた中間ゴールの候補のすべてについて、そこに至る経路を探索できなかったときには、手首位置を動かして近傍空間記述を再構成し再探索する。位置としては、4.2 で設定した格子点のうち衝突せずに移動できた点を選ぶ。

また中間ゴールまで到達可能でも、そこから近傍の広い空間に至る経路が探索できないこともある。この場合には、到達できた中間ゴールで近傍空間記述を生成し、あらたな中間ゴール候補を決定し探索を続ける。

このように近傍空間記述、中間ゴール候補の決定、経路探索からなるプロセスを繰り返すのは一般に時間がかかる。しかし目的によっては時間がかかっても経路を得たい場合もある。一方、動作開始点や目標点が不適当で、そのものが点としては存在するが、経路が存在しないこともあるがこれを探索前に知ることにはできない。

5. 経路探索の例

計画された動作例を Fig. 11, 12 に示す。Fig. 11 では、動作開始点が障害物に非常に接近しているため、1度中間ゴール位置から遠ざからないと姿勢変更

Fig. 11 A path found

Fig. 12 Another path found

ができず、アルゴリズム I により経路が発見されている。アルゴリズム II では位置を変えて近傍空間記述を再構成しなければ動きがとれない。Fig. 12 では、動作開始姿勢からも中間ゴール姿勢からも直交した姿勢をとった後でないと中間ゴールに接近できず、アルゴリズム I では経路は発見できない。計算時間は Fig. 11 の環境に対して大域構造の記述とハンド近傍の空間記述に約 7 分、中間ゴールの設定に約 1 分かかった。経路探索に要した時間は、Fig. 11 ①～④ (アルゴリズム I) で 70 秒、④～⑤ (中間ゴールから完全自由空間に至る経路) で 16 秒であった。Fig. 12 ①～④ (アルゴリズム II) で 6 分、④～⑤ (中間ゴールから完全自由空間に至る経路) で 8 秒かかっている。計算機には VAX 11/780, 言語は Fortran を用いた。

6. む す び

6 自由度マニピュレータのための衝突回避動作計画法について述べ、実際に計画された経路の例を示した。

6 自由度のマニピュレータを 3 自由度のアームと 3 自由度のハンドとに分割することによって問題をより低次元空間で解決した。すなわち作業空間の大域構造はアームの関節座標による 3 次元空間で記述する。ハンドについては、動作開始点が与えられたとき、手首を中心として 3 次元直交実作業空間で局所的な近傍空間記述を生成する。その空間構造に基づいてハンドの位置と姿勢に関する中間ゴールを設定することができ、経路探索の問題を分割して解決することができた。

近傍空間記述には測地ドームによる空間分割を用いた。これは再帰的に空間再分割が可能で、必要に応じて関連部分空間のみを必要な分解能で記述することもできる。また局所的に記述された近傍空間内でハンド動作計画が可能であることも示した。

本論文で提案した手法により、従来の方法では解決

できなかった複雑狭隘な環境での 6 自由度回転関節型マニピュレータの衝突回避動作計画が可能になった。

最後に、ご指導いただいた白井制御部長、測地ドームについてご教示くださった坂根主任研究官、有益なご助言をいただいた高瀬主任研究官、佐藤主任研究官ディスプレイ用のシミュレータ¹²⁾を開発された小笠原技官、その他多くの討論と助言をいただいたロボットグループの方々に感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) O. Khatib: Real-Time Obstacle Avoidance for Manipulators and Mobile Robots, Robotics Research, 5-1, 90/98 (1986)
- 2) T. Lozano-Perez: Automatic Planning of Manipulator Transfer Movements, IEEE Trans. System, Man, and Cybernetics, SMC-11-10, 681/698 (1981)
- 3) J. T. Schwartz and M. Sharir: On the Piano Movers Problem III, Robotics Research, 2-3, 46/75 (1983)
- 4) R. A. Brooks: Planning Collision-Free Motions for Pick-and-Place Operations, Robotics Research, 2-4, 19/44 (1983)
- 5) 長谷川勉: 自由空間分類表現法によるマニピュレータの衝突回避動作の計画, 計測自動制御学会論文集, 22-6, 616/622 (1986)
- 6) K. Takase, T. Hasegawa and T. Suehiro: Development of a Novel Manipulator for Critical Use, Proc. '83 ICAR, 253/260, Tokyo (1983)
- 7) 鳥脇, 横井: 3 次元デジタル画像処理アルゴリズムの基礎, 電子通信学会論文誌, J 68-D-4, 426/433 (1985)
- 8) 坂根, 石井, 柿倉: ハンドアイ行動シミュレータの開発 HEAVEN システムに基づく視覚センサのオクルージョン回避, 日本ロボット学会誌, 4-4, 41/54 (1986)
- 9) N. J. Nilsson: Principles of Artificial Intelligence, Springer-Verlag (1982)
- 10) 長谷川, 寺崎: マニピュレータの衝突回避動作の計画—狭い空間からのハンドの離脱と接近, 第 25 回 SICE 学術講演会予稿集, 725/726 (1986)
- 11) 長谷川, 寺崎: マニピュレータの衝突回避動作計画—中間ゴールの決定と探索の分割, 第 4 回日本ロボット学会学術講演会論文集, 223/226 (1986)
- 12) 小笠原, 山本: 幾何モデルを用いたロボットマニピュレータのグラフィックシミュレーション, 電子技術総合研究所彙報, 50-7, 47/65 (1986)