自律形配管メンテナンスロボットに関する基礎的研究*

(第5報, 配管診断ロボットのためのパスプランニング用エキスパートシステム)

福田 敏男^{*1}, 細貝 英実^{*1}, 大塚 雅司^{*2}

A Study on an Autonomous Pipeline Maintenance Robot (5th Report, Path Planning Expert System for Mark III)

Toshio FUKUDA, Hidemi HOSOKAI, and Masashi OTSUKA

The path planning is very important for the pipeline maintenance robot because there are many obstacles on pipeline such as flanges and T-joints and others, and because pipelines are constructed as a connected network in a very complicated way. Furthermore, the maintenance robot Mark III previously reported has the ability to transit from one pipe to another the path planner should consider. The expert system especially aimed for path planning, named PPES (Path Planning Expert System), is described in this paper. A human-operator has only to give some tasks to this system. This system automatically replies with the optimal path, which is based on the calculation of the task levels and list of some control commands. Task level is a criterion to determine one optimal path. It consists of the difference of potential energies, the static joint torques, velocity of the robot, step numbers of the grippers' or body's movement, which the robot requires. This system also has graphic illustrations, so that the operator can easily check and understand the plant map and the result of the path planning.

Key Words: Application of Control, Pipeline Maintenance Robot, Expert System, Path Planning, Task Level

1. はじめに

石油・化学プラントや原子力発電所などに多数用いられている配管群(パイプライン)の検査・メンテナンス作業は, 配管の腐食や漏えいなどによる事故を未然に防ぐために必要不可欠であるが, 人間にとっては危険かつ困難な作業である⁽¹⁾。そこで著者らは人間に代わってこれらの作業を自律的に行うロボットについて研究を行い, これまでに3種のロボットを設計・試作し, その性能評価, 運動制御法, 配管の異常診断システムなどについて報告を行ってきた^{(2)~(6)}。特に前報⁽⁵⁾では3号機の運動制御方法について, 本ロボットの特徴であるデュアルモード制御を明らかにした後, 障害物発見から低トルク姿勢で移動するための関節軌道を生成させる方法まで示し, 個々の障害物に対する通過方法について述べた。

ロボットが立体的な迷路のようにになっている配管の上を自動的に移動して行くためには, 移動経路の自動的な探索(Path planning)が必要である。移動ロボッ

トの経路探索に関する研究は, その多くが平面内における移動に関するものであり, 配管群のような三次元的なものに対する研究は見当たらない。本報では, 立体的な配管上を移動するロボットを対象として, 作業計画立案時に移動経路および制御命令を自動生成するエキスパートシステムを構築したので, これについて報告する。

2. 構造および基本動作

2.1 構造 3号機の概観を図1に示す。このロボットは二組のグリップ状アームとこれらを結ぶ本体, 環境認識と配管診断を行うセンサユニットから成っている。本体は進行方向の直動関節と配管表面に沿って周方向に横にねじれる関節を持ち, 配管の長手方向と周方向への間欠移動が可能である。また本体とアームユニットは回転関節で連結されており, 片方のアームで配管をつかみ, 反対側のアームを含めたロボット全体を持ち上げることができる。本ロボットはアームの開閉とセンサユニットを除き, 5リンク4関節で構成されている。

2.2 基本動作 直進動作を行う場合は, 前後アームの持ち換えと本体の伸縮により尺取虫のように間欠的に移動する。フランジなどの通過の際は, 片方の

* 昭和63年10月19日 第66期全国大会講演会において講演, 原稿受付 昭和63年2月23日。

^{*1} 正員, 東京理科大学工学部 (〒162 東京都新宿区神楽坂1-3)。

^{*2} 学生員, 元東京理科大学大学院 (現在(株)東芝)。

アームを土台として本体を180°回転させ、もう一方のアームを土台とし直して再び本体を180°回転させて通過する。その様子を図2に示す。このほか同様の動きによってT, L字管の通過や隣接する別の配管への乗り移りが可能である。

各回の持ち換え動作は、ロボット全体を、パイプ側のアームを土台とし、もう一方のアームをエンドエフェクタとする1本のマニピュレータとして制御することができる。そして前アームを土台にした状態と後ろアームを土台にした状態の二つのモードが存在し、両モードを繰返して進むために、これをデュアルモード制御と称し、それぞれのモード内で関節制御を行うという方法を用いている。

3. パスプランニング エキスパートシステム

3.1 PPES (Path Planning Expert System)
の概要 本システムは、環境が既知なプラント内に

図1 3号機の概観

図2 フランジ通過モード

おけるロボットの移動経路の自動生成を主な目的とする。オペレータは細かい指示をする必要はなく、例えば「A地点に行って異常を点検せよ」といった形でタスクを与える。システム側ではこれを、

- ① A地点まで行く
- ② A地点で点検作業を行う
- ③ 元の点に戻る

というサブタスクに分解しそれぞれのサブタスク・プランニングを行う。なお、本報では、①と③の移動タスク、すなわちパスプランニングについて考える。

本エキスパートシステムの構成を図3に示す。パスプランニングの対象となるプラントマップの登録、修正などを行うマップ操作部、マップおよびパスの確認を行うグラフィック部、およびパスプランニング実行部から成っている。本システムはPC 9801上でProlog-KABAによって記述されている。

3.2 配管メンテナンスに要する情報 プラント内の配管群は複雑に入り組んでおり、また管だけではなくさまざまな付属物が存在する。メンテナンスロボットが配管上を自律的に移動し、作業を行っていくためには、さまざまな情報が必要となるため、それらを分類・整理した。実際にはそれぞれの項目の内部に詳細なデータを付け加えることが必要になる。

① 配管系に関する情報

- ・配管経路【直管の方向、各種ジョイントの位置・方向、配管以外（壁・タンク等）との接続関係】
- ・付属物の情報【直管、フランジ、バルブ、支持具、各種弁、計器類、ポンプ、タンク、etc.】
- ・外部環境【室温、湿度、照度、騒音レベル、etc.】

② ロボットシステムに関する情報

- ・位置情報【現在位置、走行距離・時間、通過軌道】
- ・ロボットの性能【全長・全高・全幅・重量、関節可動範囲・速度範囲、アームの可到達範囲、センサ・診断用器具の性能】

図3 PPESの構成

③ 作業実行に関する情報

- ・作業内容【ロボットの移動, 検査・診断 (検査箇所, 検査項目), 修理】
- ・作業実行の難易度【実行時間, タスクレベル】

これらの情報をデータベースに持ち, 活用することによって, 自律的な移動や, メンテナンス作業が可能となる。

3.3 プラントマップ操作部 パスプランニング

を行う前に, オペレータは配管接続図を見ながらプラントマップをデータとして入力する必要がある。プラントマップ操作部は, 配管の接続関係などを容易に入力できる登録部を主体とし, 入力ミスを修正する修正部, 表示部, 部分抹消部, またデータの内容を調べられる検索部から構成される。プラントマップでは, Lジョイント・フランジ・バルブ等といった特徴的な箇所を節点 (node), 二つの節点にはさまれたパイプを枝 (arc) として考える⁽⁷⁾。例えば, 図4 (a) のような配管系を想定すると, 図4 (b) が抽象化されたプラントマップ, 図4 (c) がデータ (一部) である。

3.4 グラフィックス表示部

前節で作成したデータは人間にとっては理解しにくい形態であるため, グラフィックス表示により視覚的に確認することは非常に有効である。本システムでは, 三面図グラフィックスと, 斜めから見た三次元グラフィックスの両方を備えており, 場合に応じて両方を用いることにより効果的な確認ができる。図5にグラフィックス画面の様子を示す。カラーディスプレイを用いているので, パイプと節点の色を変えて見やすくしている。またこのグラフィックスは後述のパスプランニングの結果を見る際にも用いることができる。結果はパスが赤線でパイプの上に重ね描きされる。

3.5 パスプランニング

(1) 一筆書き可能な場合

まず最初に図4 (b) において『スタート地点からゴールまでの経路を示せ』という問題を考えてみる。ただし第一段階として同じ道は二度通ってはいけないことにする。これは一般によく知られているグラフ探索問題と同じ手法によって解決できる。Prologではパターンマッチングを行い条件を満たす答えを返してくる。先の質問とその解答は次のようになる。

```

?-go(start,goal,Way).
Way = [start,jT1,v1,jL1,jT3,jT2,jL2,f,jT4,goal];
Way = [start,jT1,v1,jL1,jT3,jT4,goal];
Way = [start,jT1,jT2,jT3,jT4,goal];
Way = [start,jT1,jT2,jL2,f,jT4,goal];
no
?-

```

検査ロボットが配管上を移動して行くときには人

間, またはより上位にあるシステムが検査箇所を指示する必要がある。一般的な方法としては検査箇所を副次的なゴールとし, そこから最終ゴールへ行くという方法が考えられるが, この方法は, 全体として見た場合に同じ箇所を二度通ってしまう恐れや, 生成される

(a) 配管系の例

(b) プラントマップ

```

jdata(jT1,'T-joint',[position(0,0,500)]).
jdata(v1,'Valve',[position(0,0,1000)]).
jdata(jT2,'T-joint',[position(300,0,500)]).
jdata(jL1,'L-joint',[position(0,0,1500)]).
:
:
pdata(p1,'Pipe',[join(start,jT1),long(300),diameter(90)]).
pdata(p2,'Pipe',[join(jT1,v1),long(500),diameter(90)]).
pdata(p3,'Pipe',[join(v1,jL1),long(500),diameter(90)]).
:
:

```

(c) データ

図 4

(a) 三次元マップ

(b) 三面図マップ

図 5 グラフィックス画面の様子

経路が指示した検査箇所の順序に制約を受けるという不都合がある。

そこで Prolog の特徴であるバックトラックの機能を利用して、「スタートからゴールまでのルートを示せ」かつ「ルートの中に検査ポイントが含まれていること」というようにいくつかの述語を連ねて質問することによって順序の制約を受けずに経路が生成される。

(2) 一筆書きが可能な場合 図4の例では、いわゆる一筆書きを原則としたが、検査したいポイントが行き止まりの先にある場合には上の方法では成功しない。そこで「検査ポイント(以下 Mt と称す)に行くためにはどうしても通らねばならない経由節点(以下 Mx)」を発見し、スタートからゴールまで Mx 経由で一筆書きの経路を描き、Mx から Mt へは単純に往復する経路を付け加えればよい。その様子を図6に示す。Mt を与えたときに Mx が得られるよう、Prolog 上で Mx を定義することによって、例えば図7において、7と8を Mt としたとき、6と4がそれぞれの Mx であることがわかり、次のようにルートを得ることができる。

```

? - findx(1,5,[7,8],Mx).
Mx = [4,6]
yes
? - possibly_gox(1,5,WAY,[7,8]).
WAY = [1,2,6,8,6,9,4,7,4,3,10,5];
no

```

(3) タスクレベル 前項で述べた方法によって、複数の検査ポイントを考慮した経路の生成が可能となった。しかし、複雑な配管系の場合や、隣接配管への乗り移りを行った場合には経路の候補が複数存在することも考えられるため、それらの中からなんらかの評価基準によって最適な経路を選定する必要がある。ここではその評価基準として『タスクレベル』という

概念を用いて各々の経路に対するタスクレベルの総和を計算し、レベルの低い経路を選択する。タスクレベルとは、ロボットと配管の姿勢を考慮に入れた、フランジ・T字管などの通過や、配管の乗り移り、直進などのロボットのすべての動作に対する難易度のことであり、次式によって定義される。

$$L_{\text{task}} = w_1 E + w_2 T + w_3 V + w_4 S \quad \cdots \cdots (1)$$

L_{task} : タスクレベル

E : ロボットが上昇・下降する際の位置エネルギー変化

T : ロボット自身の自重による静的な関節負荷トルク

V : ロボットの移動速度

S : グリッパの持ち換え、本体の伸縮などの動作ステップ数

w_{1-4} : 各要素に対する重み

このように、タスクレベルは通過すべき障害物に対して関節負荷トルクや位置エネルギーの変化、移動速度、移動の際の動作のステップ数などからあらかじめ設定することができる。そこで図8に示すように八つの基本パターンを想定し、 $\theta=0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ について計18通り(重複分は除く)のタスクレベルを設定した。ただし、①各図において重力は垂直方向とする、②ロボットは管の上側を走行し障害物通過後も上側に戻り、垂直管ではその前の管から移動してきた姿勢を保持する、③L・T字管の分岐において、いずれかの管は水平とする、などの原則を設ける。この設定では、エネルギー(消費電力・距離)、速度(時間)、ステップ数(時間・距離)など、ロボットの移動に関して考えられる因子が含まれており、実際のロボット制御上からも妥当なものと考えられる。またロボットの特性に応じて重み w_{1-4} を調節することで、最小エネルギー問題や

図6 経由節点 Mx

図7 行き止まりのあるマップ

図8 タスクレベルの基本パターン

最短時間問題など特徴あるタスクにも対応することができる。図9のような仮想的なプラントモデルに対する表示結果を次に示し、これを図示したものを図10に示す。

```

----スタートを指定して下さい  :point_A
----ゴールを指定して下さい      :point_B
----障害箇所は？(障了はCOP?) :meter1
----障害箇所は？(障了はCOP?) :

****計画中です****

****経路の候補は次の3通りです****
Way= [point_A,j11,j12,j13,flange1,sub2,flange2,j16,j17,j18,j19,goal] Task level= 2685
Way= [point_A,j11,j12,j13,flange1,sub2,flange2,j16,j17,j18,j19,j20,j21,goal] Task level= 2686
Way= [point_A,j11,j12,j13,flange1,sub2,flange2,j16,j17,j18,j19,j20,j21,j22,goal] Task level= 2687
****タスクレベルが最小の経路は****
Way= [point_A,j11,j12,j13,flange1,sub2,flange2,j16,j17,j18,j19,goal] Task level= 1554
**** ルート 指定を終了します ****
    
```

出力された経路の候補にそれぞれパイプに印がつけて表されている。図9の場合では3通りの経路候補が存在するが、タスクレベルが最小の候補3に決定される。ただしここでは乗り移りは考慮にいれていない。

このように、タスクレベルを用いることによって、設定した各々の重みに対する最適なパスの自動生成が可能となった。

(4) 乗り移りを考慮した経路生成 これまではジョイントによって接続された管をたどる方法でプランニングを行ってきたが、管から管への乗り移りを考えるとこの方法は使えない、そこで従来の方法に加え、ロボットがパイプ上にいるときは、そこから他の管への乗り移りが可能か否かをチェックしつつ進行することにする。ただし常時チェックを行っていると平行な管の場合などはあらゆるところで乗り移り可能なため経路の候補数は膨大なものになり「組合せ爆発」が起きてしまう。よってパイプ上の数箇所を選んでチェックを行う(本報では両端近くと中央の3箇所)。乗り移りチェックは、次の3条件を満足するとき乗り移りが可能であるものとする。

- ① 現在ロボットがいる管から 300~500 mm (3号機の場合)の距離に別の管が存在すること。
- ② その2本の管は平行であること。
- ③ その2本の管の間に障害物が存在しないこと。

この考え方に基いて作成したプログラムを用いて、図11のような配管で、s1からgoalまで行くすべての経路を示せ、という質問に対しては次のようになる。

```

1 ?-test(s1,goal).
Way= [s1,xp1(s2),xp2(s4),xp2(1/2),xp2(s3),xp3(s5),j11,goal]
Task level= 224
Way= [s1,xp1(s2),xp2(s4),xp2(1/2),xp3(1/2),j11,goal]
Task level= 204
Way= [s1,xp1(s2),xp2(s4),xp3(j11),j11,goal]
Task level= 183
Way= [s1,xp1(1/2),xp2(1/2),xp2(s3),xp3(s5),j11,goal]
Task level= 204
Way= [s1,xp1(1/2),xp2(1/2),xp2(s4),xp3(j11),j11,goal]
Task level= 183
Way= [s1,xp1(s1),xp2(s3),xp2(s4),xp3(j11),j11,goal]
Task level= 183
Way= [s1,xp1(s1),xp2(s3),xp2(1/2),xp3(1/2),j11,goal]
Task level= 183
Way= [s1,xp1(s1),xp2(s3),xp3(s5),j11,goal]
Task level= 183
no
1 ?-
    
```

このうち6通りはタスクレベルが同一であり、動きの順番が異なるだけで、難易度は変わらないため、どれを選んでも良い。本システムではこの場合、最初の経路が選択される。

3.6 基本制御命令 これまでに述べてきたパスプランニングによってプラント内におけるロボットの移動経路が確定したが、このような節点の羅列だけではロボットを制御することはできないため、ロボットの制御に適した命令(言語)に変換する必要がある。3号機は移動に関しては次の六つの命令ですべての動きを制御することができる。

FWD(L) : 前進動作(L:前進距離[mm])
 BWD(L) : 後進動作(L:後進距離[mm])
 SLD(θ) : 横スライド動作(θ :スライド角)
 FLG() : フランジ, T(L)字管直進動作
 LJP() : T(L)字管屈曲動作
 TRS(L) : パイプ間乗り移り動作
 (L:パイプ間距離[mm])

L, θ などはプラントマップとの照合によって自動的に代入される。本システムによって、図12に示す経路は次のように制御命令群に変換される。

```

1 ?-cmd_mch([start,'xp1(j11)', 'xp3(j12)',goal],Command).
Command= [FWD(900),TRS(350),SLD(+180),FWD(900)]
yes
1 ?-
    
```

実際の関節制御に必要なマトリックスはこの制御命令群から自動変換される。例えば 38 mm 前進する動作は、

図9 仮想プラントモデル

(a) 経路候補1

(b) 経路候補2

(c) 経路候補3 (最適経路)

図10 パスプランニング実行結果

$$FWD(38) \rightarrow T_A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 38 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

となる。これにより単に経路を生成するだけでなく、その制御命令の生成までが一括して行われるので、実際の制御に有効であると考えられる。

図11 乗り移りの必要な配管系

図12 乗り移り経路の一例

4. おわりに

配管上を移動するメンテナンスロボットのために、オペレータからの簡単な指示によって、タスクレベルを評価基準とする経路の自動生成から基本制御命令の生成までを行うエキスパートシステム PPES を構築した。本システムは、プラントマップを変更することによって本論文の範囲内でどのような配管系にも対応できる。また試作した3号機だけでなく、タスクレベルの基本パターンと基本制御命令を修正することで他のロボットにも応用できる。なお本システムは作業計画を行うものでありロボットのリアルタイムコントロールはその後に行われる。

本報ではロボットに要求されるタスクのうち、移動について考えたが、今後はロボットの本来の機能であるメンテナンス作業に対するタスク・プランニング機能を付加する必要があると思われる。

終わりに、3章のメンテナンスに要する情報に関して、日本石油(株)の岩崎慎之助氏をはじめ関係各位のご協力をいただいた。ここに感謝の意を表する。

文 献

- (1) 福田, 極限作業用知能ロボット, (昭61), 1 マグロウヒル社.
- (2) 細貝・福田, 機論, 51-467, C(昭60), 1655.
- (3) 細貝・福田, 機論, 53-486, C(昭62), 399.
- (4) 福田・細貝・大塚, 機論, 53-492, C(昭62), 1788.
- (5) 福田・細貝・大塚, 機論, 53-495, C(昭62), 2235.
- (6) 福田・細貝・大塚, 日本ロボット学会学術講演会予稿集, (昭60), 437, (昭61), 211.
- (7) Clocksin, W. F., ほか1名著, 中村訳, 『Programming in Prolog』, マイクロソフトウェア, (1983), 44.