

経路と交差点の観測による環境地図の作成

越智 亮* 李 仕剛** 八木 康史* 谷内田 正彦*

* 大阪大学基礎工学部システム工学科

** 広島市立大学情報科学部情報機械システム工学科

あらまし

本論文は、経路および交差点の観測によって、未知環境の定性的な地図を作成する一手法を提案する。交差点では何本の経路が交わっているかという情報のみを用い、経路ではカメラによる両側の観測情報（パノラマ表現）を用いる。ロボットは経路をたどって移動し、交差点では決まった方向に移動することによって、いくつかの経路で構成される閉ループを検出する。閉ループを検出すると、以前に検出された経路の閉ループの情報と融合することによって、環境地図を形成していく。作成される地図はトポロジカルなものであり、経路のネットワークで記述される。

実環境の画像データを用いて、提案した手法で地図作成の実験を行ない、本手法の有効性とロバスト性を検証した。

和文キーワード 環境地図, 屋外環境, 経路, 閉ループ, 探索戦略, パノラマ表現

Environment Map Generation by Observing Routes and Intersections

Akira Ochi*, Shigang Li**, Yasushi Yagi*, Masahiko Yachida*

*Department of Systems Engineering, Faculty of Engineering Science, Osaka University

**Department of Information Machines and Interfaces, Faculty of Information Sciences,
Hiroshima City University

Abstract

This paper proposes a method for generating a map of a large scaled environment by observing scenes both along routes and at intersections. Panoramic representation is used for describing route scenes, and the number of routes connecting at an intersection is assumed to be known. A robot can obtain a closed loop by taking the same turn (leftmost for example) at each intersections when it moves along routes. By memorizing routes at intersections, the robot can select unmove routes for finding new closed loops. Further, by fusing new closed loops with found ones, the robot can build the map of environments. The effectiveness and robustness of our method are shown by our experiment in a real-world environment.

key words environment map, outdoor environment, route, closed loop, search strategy, panoramic representation

1 まえがき

地図は我々の行動にとって非常に役立つものである。それと同様にロボットにとっても、与えられた作業を遂行するために環境の情報が必要である。環境に関する情報を獲得し、ロボットが利用しやすい形で環境を表現することは、自律移動ロボットの研究において重要なテーマで、これまで数多くの研究が行われてきた。例えば格子モデルやセルモデル、あるいは多角形モデルを用い部屋や廊下などの室内環境を表現する手法が提案されている。また、得られた空間的三次元情報をグラフ構造で表現し、ナビゲーションのプランニングに利用している。これらの研究では、屋内環境並びに局所的な（狭い範囲に限定された）屋外環境での地図獲得を対象としていた。このような、ある程度限定された広さの環境では、環境の2次元地図（配置）を記憶することによりタスクを実行することができる。しかし、一般に屋外実世界を想定した場合、環境の複雑さと広さから、2次元地図のような表現では計算量の面、精度の面でも不十分と言える。例えば、数キロに渡った走行を行う時に従来のように2次元地図などを生成すると、計測誤差も累積し、また莫大な計算機資源と計算量を必要とした。

我々は、連続的な画像を記憶する際のデータ量が比較的少なく、経路シーンを連続的に記憶できるパノラマ表現を提案してきた [1, 2, 3]。具体的にはロボットがある経路に沿ってカメラから連続撮像した動画像列をパノラマ表現に変換し、さらに空間情報に基づいてパノラマ画像を解析し、特徴を持つ物体をその経路のランドマークとして抽出し、経路を記述した。その結果、経路は経路に沿って建ち並ぶランドマークと、経路の幾何情報で表現される。この手法を用いて阪急今津線宝塚駅から南宝塚駅までの1キロ以上のシーンに対して、ランドマークによる経路の記憶と認識を行なった [4]。その結果、経路に沿ったランドマークからなる認知地図を用いることで長いルートの認識が可能となった。即ちパノラマ画像は、環境の簡単な構造を認知するのに有用と言える。またランドマークの記述という環境の本質を表す特徴のみを記憶する方法は、目的地までの正確な三次元情報を必要としない人間の認知機能とも共通する部分がある。

しかし、これまで我々が扱ってきた環境は、1本の経路で表現できるものであり、市街地環境のように

複数の経路が交差する場合には適用できなかった。本報告では、これまでの方法を拡張し、市街地環境などを対象とした経路ネットワークによる環境地図の表現方法と環境地図生成方法を提案する。特にこれまでの方法では、1本の経路を環境表現の単位としていたのに対し、本手法では、交差点を含めた複数の経路からなる閉ループを基準とし、閉ループを融合することで（経路ネットワーク）複数の経路からなる一般実環境を表現することを特徴とする。

以下、本報告で作成する環境地図表現方法並びに、本手法を実環境に適用した結果について報告する。

2 環境地図 Route Based Network

本報告で作成する環境地図 Route Based Network（一例を図1に示す）は以下のような特徴を持つ。

- 環境を経路をノードとするネットワークで記述される。
- 経路はその左右のパノラマ表現をデータとして持ち、さらに経路間のつながりを示すトポロジカルなデータを持つ。
- 環境地図の生成、更新などにおける基本単位はいくつかの経路からなる閉ループとする。

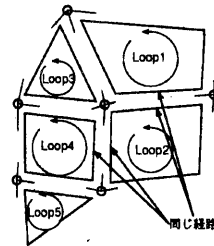


図1: Route Based Network の概念図

2.1 経路の記述

2.1.1 パノラマ表現

滑らかな水平軌道上のカメラ運動を考える。カメラの光軸をロボットの移動方向に対して垂直に保ちながら移動し、幅1画素の垂直スリットを通して連続的に画像を撮像する。そのスリット画像を時間軸に沿って並べたものがパノラマ画像になる（図2）。このパノラマ画像は、画像列を時間軸に沿って並べた時空間画像を画像の時間軸と縦軸に沿って切断したときに得られる画像と同じである [1]。さらに、パノラマ画像を得る際に、スリットを通過する物体



図 2: パノラマ画像サンプル

の画面上での移動速度を測定することによって、カメラから対象までの距離情報を得ることができる。パノラマ画像に距離情報、経路形状、カメラの移動速度を付加して得られた経路シーンの2(1/2)D表現をパノラマ表現と呼ぶ。パノラマ表現は長い経路の情報を比較的少ないデータ量で表現することができる。

2.1.2 ランドマークによる経路の特徴の表現

前節で獲得されたパノラマ表現を用いて、経路の特徴を記述する。

従来、経路から見える全てのパターンを記憶し照合に利用する方法があるが [1]、本報告では、経路パノラマ画像を一定時間の間隔で分割し、分割された各領域内の色情報のヒストグラムをランドマークとする (図 3)。具体的には、ピクセルの RGB 値と、式 1~式 3 で表される、Saturation (彩度), Hue (色相), Y (明るさ), I, Q (色度) の 8 つの値 (それぞれ 0~255 に正規化) のヒストグラムを各領域の特徴量とする。各領域のヒストグラムデータを並べることによって一本の経路が記述される (図 4)。なお、経路パノラマ画像は経路にそった連続的な情報を持っているので、得られた経路パノラマ画像を左右反転させて分割し、ランドマークを抽出して照合することによって、同一経路を逆にたどった場合の認識も出来る。

特徴量ヒストグラムを計算する式

$$Saturation = 1 - \frac{3\min(R, G, B)}{R + G + B} \quad (1)$$

$$Hue = \cos^{-1} \left[\frac{1/2(R - G) + (R - B)}{(R - G)^2 + (R - B)(G - B)} \right] \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} Y \\ I \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.30 & 0.59 & 0.11 \\ 0.60 & -0.28 & -0.32 \\ 0.21 & -0.52 & 0.31 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (3)$$

2.1.3 経路のトポジカルデータの記述

交差点から交差点までを一本の経路とし、前節の表現方法によって、各経路の特徴を表現する。それ

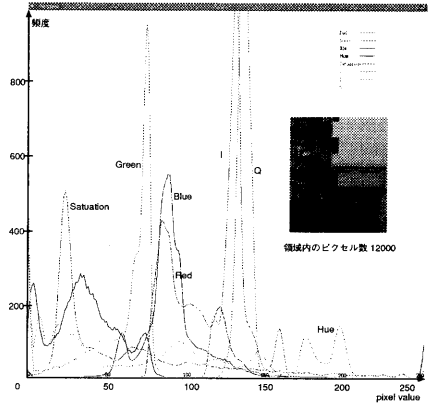


図 3: パノラマ画像の特徴量による表現

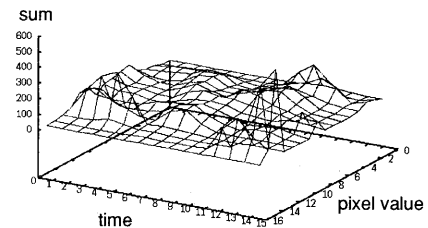


図 4: 特徴量 Blue で表現された経路

に加えて各経路は経路間のトポジカルなデータを持つ。

交差点は、そこで交わる複数の経路で構成される。そこで、本手法では、交差点を構成する経路のトポジカルな関係をネットワーク構造で記述する。

経路データは、交差点に進入してきた経路のラベル、次に移動可能な経路の数とそれらの経路のラベルからなる。なお、これまでに走行した経路に関しては、固有のラベルが与えられるが、走行していないものについては未知とする。例えば、図 5 に示す例では、経路 1 から交差点に進入、残りの経路が 3 つ、その内、左右の経路は以前に走行したことがあるため、固有のラベル 4, 11 を持つ。

2.1.4 経路ネットワークによる閉ループの記述

前節で記述された経路を利用して、閉ループを記述する。閉ループは何本かの経路の集合 (経路ネットワーク) で構成される。図 6 に示すように、閉ループはそれを構成する経路の数とその構成経路のラベルからなる。

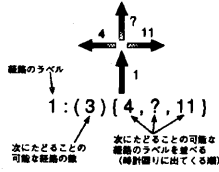


図 5: 経路のトポロジカルデータ

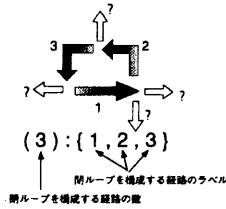


図 6: 閉ループデータ

3 環境地図の作成

ここでは、閉ループを基本とした環境地図の作成を行なう。全体の流れは図 7 に示すように、以下の四つの処理からなる。

1. 閉ループを検出する。
2. 閉ループの融合、地図の更新を行なう。
3. 終了判定をする。
4. 次の閉ループの検出を開始する場所を決め、そこへ移動する。

3.1 前提条件

本報告では環境地図を作成するにあたって以下のことを仮定する。

- 交差点は見落とすことなく必ず発見できる。さらに交差点ではそこで交わる経路の数を間違わずに検出でき、その相対的な位置関係が分かる。
- 経路を走行する時にロボットはほぼ一定の速度で移動し、途中で止まったりすることはない。また両側のパノラマ画像は必ず得ることが出来る。
- 環境は閉じており、存在する経路の数は有限である。

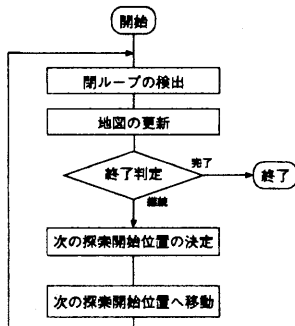


図 7: 環境地図作成の流れ

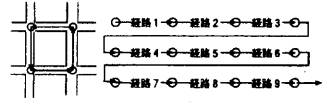


図 8: 閉ループ検出の入力データ

- ロボットの大局的情報（世界座標，世界に対する絶対角度）は使用しない。

3.2 閉ループの検出

本手法では、ある一定の法則にしたがって移動することで、移動に伴い得られた経路列から閉ループの検出を行なう。具体的にはロボットは以下の二つの規則に基づいて行動する。

- 経路の追跡制御を行なう。

- 交差点についたら左に曲がる

即ち経路を前に向かって交差点を検出するまで進み（途中で引き返さない）、交差点についたら、次にはその交差点から出ている経路のうちで、左から見て一番近い経路を選択し走行する、ということである。

上記の規則に基づいて行動すると、必ず出発点に戻り、閉ループを形成する経路列を得ることが出来る。実際にロボットが経路に沿って移動した場合、同一の閉ループの経路データが繰り返し得られる。この入力データには閉ループを一周期とする周期性がある。そこで、本手法ではこの特徴を利用し（図 8）、周期性を検出することによって、閉ループを検出する。

各経路の照合には 2.1.2 で表現された経路のランドマークをもちいる。新たに入ってきた経路のデータと、それまでにためられた経路のデータのランドマークの対応付けを動的計画法を用いて求め（図 9）、相違度が閾値よりも小さければ同じ経路と判断する。

経路の入力データに対し、順次経路認識を行なうことによって、各経路の周期性を判別し（図 10）、全体の周期性を検出する。各経路について照合を行ない、さらに経路出現順序の周期性についての照合を行なうので、ロボストに閉ループが検出できる。



図 9: 動的計画法によるランドマークの対応づけ

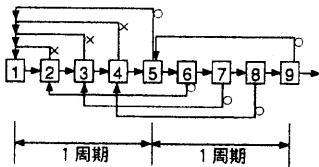


図 10: 経路の周期性

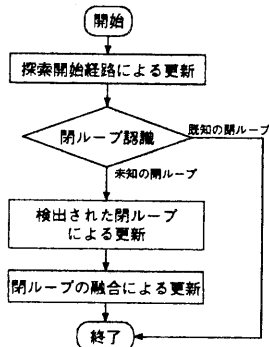


図 11: 環境地図更新の流れ図

3.3 閉ループの融合及び環境地図の更新

検出された閉ループを元に環境地図の作成及び更新を行なう。図 11 に示すように本処理は 4 つのパートに分かれている。

3.3.1 閉ループ検出開始経路の更新

閉ループの検出を開始した経路に関する更新を行なう。閉ループの検出を開始した経路のどの未知経路を選択したかという情報を保持しておき、そこに検出された閉ループの先頭の経路を書き込む。例えば図 12 では、経路 4 から出発し、{2, 3, 1} という閉ループを発見しているため、経路 4 の左から 2 番目の所に閉ループを構成する最初の経路 2 を入れている。

3.3.2 閉ループ間の検証

新しく検出された閉ループが、過去に検出された閉ループと同一のものであるかどうかを判定する。

閉ループは幾本かの経路の列で表現されるので、経路の出現順序で判断する。閉ループの出発地点が違って並び順が同じであればそれは同一ループである。

そこで、閉ループ認識の結果、検出された閉ループが新規の閉ループであれば、環境地図に書き加える。既に発見した閉ループと同じものであると判

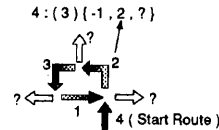


図 12: 閉ループ検出開始経路の更新

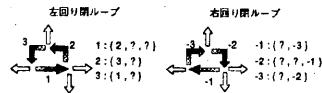


図 13: 検出された閉ループによる環境地図の更新
断した場合には環境地図への書き込みは行なわず、3.3.3, 3.3.4 の環境地図更新も行なわない。

3.3.3 検出された閉ループによる環境地図の更新

検出された閉ループの経路の出現順序を見て、環境地図を更新する。検出された経路は左周りのルールにのっとって作られたものであるため、次にくる経路を経路データの一番左に格納する。

さらに、左周りの閉ループに対して、これを逆向きにたどった閉ループを仮想的に考える。この場合は右周り閉ループとなるので、次にくる経路は経路データの一番右に格納される。図 13 の例では、{1, 2, 3} という閉ループに対して、データの更新を行ない仮想的に右回り閉ループ {-1, -3, -2} を作り、データを更新している。

3.3.4 閉ループの融合による環境地図の更新

新たに検出された閉ループと過去に検出された閉ループの構成経路を調べて、同じ識別番号を持つ経路が含まれている閉ループを用い、地図の更新を行なう。

まず、新たに検出された左周り閉ループの構成経路が、過去に検出された右周り閉ループの中に含まれるかどうかを調べる。もし同一経路があったならば、左回り閉ループからその経路の左隣の経路が、右回り閉ループからその経路の右隣の経路が分かるので、それを利用して環境地図を更新する。同様にして右周り閉ループの構成経路についても調べ、環境地図を更新する。図 14 の例では、経路-1 を中心に経路 11 と経路-3 の更新を行なっている。

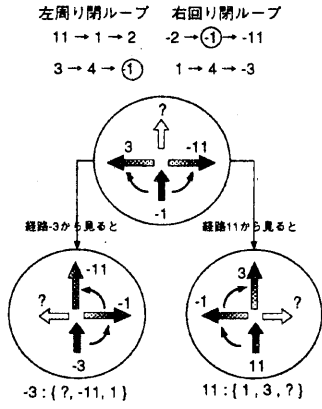


図 14: 閉ループの融合による環境地図の更新

3.4 環境の探索戦略

未知環境の環境地図を作成する際に、経路、閉ループを見落としすることなく完全な（「完全な」とは、未発見の経路や閉ループなどが無い状態を示す）環境地図を作成するためには、適切な探索戦略が必要である。ここではその探索戦略について説明する。

3.4.1 閉ループ検出の開始位置の決定

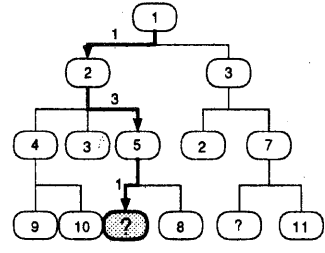
一つの閉ループを検出し、地図の更新を終えると、新たな閉ループを検出しなくてはならない。そのため、現在いる場所から次の閉ループ検出を始める位置を探し、そこへ実際に移動する必要がある。

本手法では、次に閉ループの検出を開始する場所は、現在いる場所から最も少ない経路の移動で到達できる場所とする。そうすることによって、環境地図の作成をはじめた場所の付近からしだいに広がっていく環境地図が作成できる。

3.4.2 移動木の作成

次の閉ループ検出開始位置を決めるために、現在までに作られた環境地図の経路のトポロジカルデータを用いて、現在経路をルートノードとした、現在経路からの到達可能経路を示す木（以下移動木）を作成する。経路のトポロジカルデータは、次にたどることのできる経路のラベルを持っているので、移動木は容易に作成できる。

まず、現在いる経路からたどることのできる経路を移動木に追加する。そこに未探索な経路があれば移動木の作成を終了し、移動シーケンスの抽出へ移る。未探索な経路がなければ、子ノードのデータを



Through Route { 1, 2, 5 }
 Move Sequence { 1, 3, 1 }

図 15: 移動木と移動シーケンスの抽出

用いてさらに移動木を拡張する。これを未探索の経路が出てくるまで続ける。

3.4.3 移動シーケンスの抽出

3.4.2で作成した移動木を使って移動シーケンスを抽出する。子ノードに降りる時に一番左のアーキをたどることは子ノード経路から次に一番左側の経路をたどって移動することを意味する。同様に左から二番目のアーキをたどることは左から二番目の経路をたどることを意味し、以下同様である。したがって、親ノードから未探索経路ノードまでのアーキの選択がそのまま移動シーケンスになる。図 15 に、作成された移動木と、移動シーケンスの抽出の一例を示す。

4 実験

提案した方法に基づいて、大阪大学の吹田キャンパスで実験を行なった。

経路のデータとして、車にカメラを積み屋外を走行して画像を撮像し、その画像データからパノラマ画像を作成したものを利用した。同じ経路を二度走行し、同じ経路のパノラマ画像を二種類作成した。ある経路を通過した時に、その同じ経路の二種類のパノラマ画像のうちのどちらかをランダムに選択し、ロボットに渡すようにした。

まず、最初の閉ループ {1, 2, 3} が検出された（図 18）。その時の経路の対応づけの相違度の変化を表すグラフを図 17に示す。入力経路列が 3 本に達した所から相違度が低く安定し、経路列の数が 8 になった所で閉ループを検出したと判断した。閉ループの検出によって得られたトポロジカルデータを表 1に、次の閉ループ検出のための移動木を図 19

に示す。この場合は、現在経路 3 を通過した交差点にロボットがあり、左から二番目の経路が未探索であるので、そこから次の閉ループ検出をはじめめる。

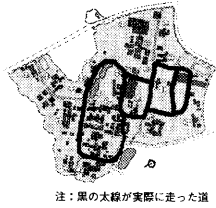


図 16: 吹田キャンパス概観

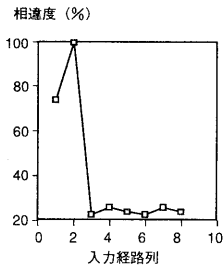


図 17: 閉ループ検出 1

以下同様に閉ループの検出を行ない (図 25, 26, 27 に例示, 移動木は省略), 最終的に図 28 の地図が出来る。トポロジカルデータの最終結果を表 3 に示す。

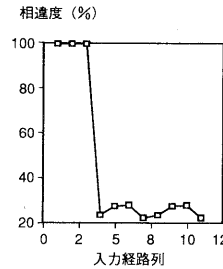


図 20: 閉ループ検出 2

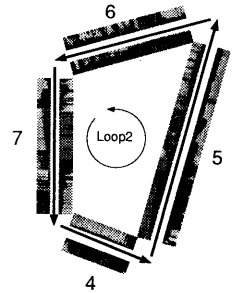


図 21: 閉ループ 2

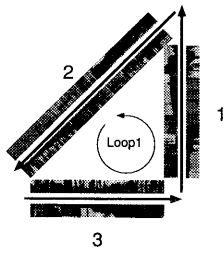


図 18: 閉ループ 1

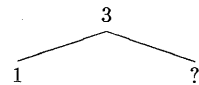


図 19: 移動木その 1

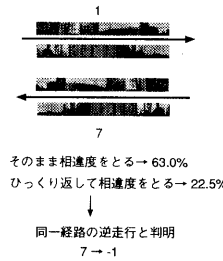


図 22: 同一経路の検証

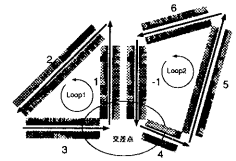


図 23: 閉ループの融合

表 1: トポロジカルデータ

Loop1	3	1, 2, 3	Route 2	2	3, ?
Route 1	2	2, ?	Route -2	2	?, -1
Route -1	2	?, -3	Route 3	2	1, ?
			Route -3	2	?, -3

次に閉ループ {4, 5, 6, 7} を検出した (図 21). その時の経路の対応づけの相違度の変化を表すグラフを図 20 に示す。最初の所の相違度が 100% になっているのは経路の長さがあまりにも違うので、違う経路と判断したためである。ここで閉ループの構成経路について照合をとり、経路 1 と経路 7 が同じ経路の逆走行であることを認識し、経路 7 は経路-1 となった (図 22). 次に閉ループの融合の様子を図 23 に示す。直前に同一経路と判断した経路 1 と経路-1 を基準にして閉ループ 1 と閉ループ 2 の融合をしている。更新されたトポロジカルデータを表 2 に示す。

次の閉ループ検出のための移動木を図 24 に示す。経路 4 の左から二番目の経路が選択される。

表 2: トポロジカルデータ

Loop1	3	1, 2, 3	Route -3	2	?, -2
Loop2	4	4, 5, 6, -1	Route 4	2	5, ?
Route 1	2	2, 6	Route -4	3	1, -3
Route -1	2	4, -3	Route 5	3	6, ?, ?
Route 2	2	3, ?	Route -5	2	?, -4
Route -2	2	-6, -1	Route 6	2	-1, 2
Route 3	2	1, 4	Route -6	3	?, ?, -5

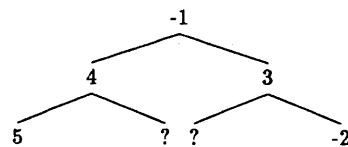


図 24: 移動木その 2

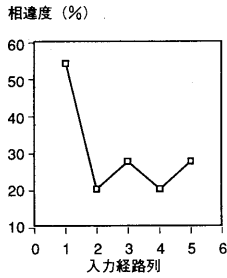


図 25: 閉ループ検出 3

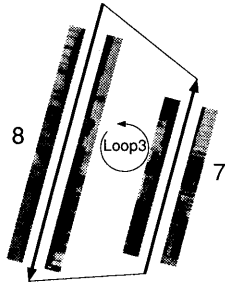


図 26: 閉ループ 3

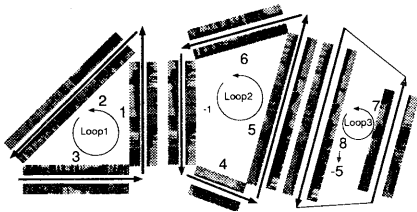


図 27: 閉ループの融合

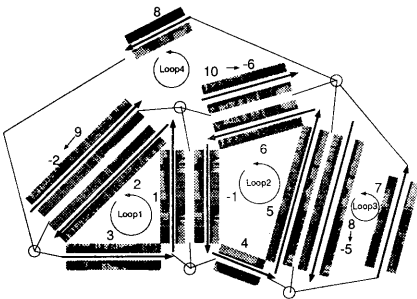


図 28: 出来上がった地図

表 3: 最終トポロジカルデータ

Loop1	3	1, 2, 3	Route 4	2	5, 7
Loop2	4	4, 5, 6, -1	Route -4	3	1, -3
Loop3	2	7, -5	Route 5	3	6, 8, -7
Loop4	3	8, -2, -6	Route -5	2	7, -4
Route 1	2	2, 6	Route 6	2	-1, 2
Route -1	2	4, -3	Route -6	3	8, -7, -5
Route 2	2	3, -8	Route 7	2	-5, 6, 8
Route -2	2	-6, -1	Route -7	2	-4, 5,
Route 3	2	1, 4	Route 8	2	-2, 3,
Route -3	2	-8, -2	Route -8	3	-7, -5, 6

5 むすび

本報告では、交差点と経路の観測による定性的な環境地図を作成する一手法について述べた。

環境地図は複数の基本となる閉ループからなるトポロジカルマップであり、一つの閉ループは幾本かの経路のネットワークから成り立っている。また各経路間もトポロジカルなつながりを持っている。経路のデータとして、移動ロボットの左右両側の画像を連続的にとるパノラマ表現から抽出されるランドマークを利用した。

移動ロボットは、経路の追跡を行ない、交差点では最も左の経路に曲がるというルールにのっとって環境内を移動し、閉ループを検出する。閉ループを検出したならば、検出した閉ループと出発経路との関係、検出した閉ループの経路の並び順、及び検出された閉ループと、以前に既に検出されている閉ループとの融合によって環境地図を更新する。環境地図にまだ未知なところがあれば、次の探索開始の場所を決定し、再び閉ループの検出を行なうというルーチンを繰り返して環境地図を作成した。実環境のデータを用いて実験し、本手法の有効性とロバスト性を検証した。

本報告では、経路の側方に深さ（視差）があまりなかったために、色情報を用いた経路の特徴量を使用した。視差に幅がある場合には構造物体のランドマークを使うなど、経路の特徴量の選択には検討の余地がある。

参考文献

- [1] Zheng J.Y. and Tsuji S., "Panoramic representation of scenes for route recognition", Proc. 10th ICPR, pp.161-167, 1990.
- [2] Saburo Tsuji and Shigang Li, "Making cognitive map of outdoor environment", Proc. IJCAI, pp.1632-1638, 1993.
- [3] Shigang Li and Saburo Tsuji, "Finding landmarks autonomously along a route", Proc. 11th IAPR, 1, pp.316-319, 1992.
- [4] Shigang Li, Akira Ochi and Saburo Tsuji, "Qualitative route description in outdoor environment", Proc. ACCV, pp.3274-3281, 1995.