

# 能動的全方位視覚を用いた環境構造の復元

石黒 浩\* 山本雅史\*\* 辻 三郎\*\*\*

## Reconstructing Structure of an Indoor Environment Using Active Omni-Directional Vision

Hiroshi ISHIGURO Masashi YAMAMOTO Saburo TSUJI

In this paper, we discuss a method which reconstructs a global map of the indoor environment from omni-directional view obtained at several robot locations. The omni-directional view obtained by our method is a kind of environment representation, which has both precise angular information and range estimation from the observation point. The processes to reconstruct the global map are as follows: (1) Obtaining Robot-Centered Representations (omni-directional views) at several robot locations for finding free areas in which the robot can move. (2) Obtaining local maps, represented by Path-Centered coordinates, from omni-directional views taken at two neighbor robot locations. The relations between two neighbor robot locations are determined by active observations using feedbacks of the omni-directional views while the robot moves. (3) Building a global map (Environment-Centered Representation) by fusing those Path-Centered Representations.

**Key Words :** Omni-Directional View, Monocular Omni-Directional Stereo, Binocular Omni-Directional Stereo, Global Map, Visual Feedback

### 1. ま え が き

環境内を移動するロボットの目的は、与えられた目標点に到達したり、与えられた目標物を探索することにある。このような目的を達成するために、移動ロボットは環境構造を理解する能力が必要とされる。移動ロボットの研究は、あらかじめ与えられる知識によって、以下の3つに大別できる。

- (1) 環境の正確な幾何モデルが与えられている場合
- (2) ランドマークの位置関係によって表される地図を持つ場合
- (3) 未知環境を移動する場合

環境モデルが与えられている場合、ロボットは視覚センサーから得られる情報<sup>1)</sup>や、幾何モデルから得られる拘束条件<sup>2)</sup>を用いて、与えられた幾何モデルに対する自

分の位置を発見できる。問題点は、環境の一部が何らかの要因で変化した場合、与えられた幾何モデルを柔軟に更新していかなければならないことである。

ランドマークは幾何モデルよりも抽象的な表現であり、環境はランドマークを基準とした位置関係によって表わされる。幾何モデルを用いる場合に比べ、あらかじめ行う環境計測の手間を大幅に軽減できる<sup>3,4)</sup>。ロボットはランドマークを発見することで環境内での自らの位置を発見するのであるが、このためには、移動可能な自由領域を発見し、ランドマークを探索する機能が必要となる。

未知環境内を移動する場合、ロボットは移動可能な自由領域を発見しながら環境内を移動し、環境地図を作成しなければならない。本論文では、移動ロボットに搭載された視覚センサー (TV カメラ) を用いて、未知環境の全体地図を作成する新たな手法を提案する。

全体地図を作成する研究としては、ロボットの移動経路に沿ってステレオ視を行うための2枚の画像を撮像し、各観測点においてステレオにより得られた局所地図を統

原稿受付 1990年10月25日

\* 山梨大学工学部電子情報工学科

\*\* マツダ株式会社横浜技術研究所

\*\*\* 大阪大学基礎工学部制御工学科

合し全体地図を得る研究<sup>5)</sup>や、移動経路に沿って連続的に撮像された画像列を用いる研究<sup>6)</sup>がある。

しかし、これらの研究の焦点は、局所的な構造をモーションステレオや2眼ステレオによって復元することであり、各観測点で得られた局所地図をどのように全体地図に統合するか、また、その過程でどのような環境表現が必要となるかといった、全体地図作成における本質的な問題についてはあまりふれていない。

そこで、本論文では、全方位画像より得られる情報をもとに全体地図を作成する方法を提案し、特に、(1)能動的視覚を用いた移動方法、(2)局所地図の獲得方法、(3)全体地図の作成方法の3つを考察する。

全方位画像の撮像方法としては、魚眼レンズ<sup>7)</sup>や円錐鏡<sup>8)</sup>を用いる方法が提案されているが、より簡単な方法は、TVカメラを回転させて全方位画像を構成する方法である<sup>9-11)</sup>。カメラを回転させながら、画像中心を通る垂直線上の画像データを横一列に整列させると、その観測点から見える全ての物体を含んだ全方位画像 (Fig. 3 参照) を構成することができる。この全方位画像は環境の全体地図を作成するロボットの視覚に適している。我々の提案する撮像方法<sup>10,11)</sup>では、正確な方位角情報と全方位の距離情報を得ることができる。

全方位画像から得られる距離情報は、その撮像機構上の問題により、あまり精度はよくない。このため、異な

る観測点で撮像された複数の全方位画像を用いて、基線距離の大きなステレオを行い、より正確な環境地図を作成する必要がある。環境の全体地図は、複数の観測点で撮像された全方位画像から、以下の手順で作成する (Fig. 1 参照)。

- (1) ロボットはある地点で全方位画像を撮像する。
- (2) 全方位画像より得られる距離情報をもとに、移動可能な自由領域を発見する。
- (3) ロボットは全方位画像からの視覚フィードバックを用いながら、次の観測点に移動する。
- (4) 2つの観測点で撮像された全方位画像から局所地図を作成する。
- (5) (1) から (4) の処理を繰り返し、得られる局所地図を順次、全体地図に統合していく。

## 2. ロボットと環境に関する仮定

本論文では、ロボットと環境に関して、以下の仮定を設ける。

### ロボット動作に関する仮定

- (1) ロボットは屋内環境の平らな床面上を移動する。このためロボットの運動は、床面上での位置を表す2つのパラメータと1つの回転角度によって表す。
- (2) 移動ロボットの運動は、車輪に取り付けられたエンコーダで測定するため、車輪のスリップ等により正確な制御は難しい。このため、ロボットが長い距離を移動する場合、誤差の累積を防ぐ何らかの方法が必要となる。

- (3) ロボットは停止して全方位画像を撮像し、撮像を終えてから次の地点へ移動する。

### カメラの動作に関する仮定

- (4) 全方位画像を撮像するカメラの回転軸は常に床面と垂直であり、カメラの光軸は常に床面と平行に保たれる。

- (5) カメラは正確に制御できるカメラ回転台によって回転する。

### 環境の表現に関する仮定

- (6) 環境を構成する特徴として垂直線を用いる。屋内環境には多くの垂直線が存在し、ロボットの環境理解に必要十分な情報を含んでいると考える。また、環境は垂直線の床面上での位置を示すことで表現する。

## 3. 全方位画像

我々の方法で得られる全方位画像<sup>10,11)</sup>は全方位の正確な方位角情報を含むと同時に、全方位画像を撮像する過程で全方位の物体への距離情報が得られる。また、この全方位の距離情報からは、ロボット中心の座標系で表わ

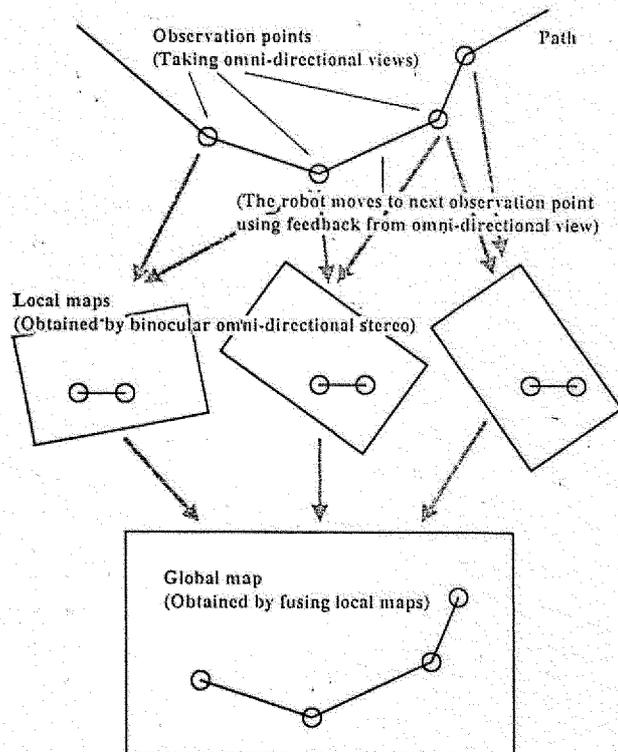


Fig. 1 From omnidirectional views to a Global map

される環境表現を得ることができ、特に、ロボットの移動可能な自由領域の発見に用いる。

3.1 正確な方位角情報

全方位画像の撮像機構を Fig. 2 に示す。Fig. 2 に示すように、カメラの焦点は正確に回転できる回転台の機能により、半径  $R$  の円上を移動する。画面上に設けられた画像中心を通る垂直スリットを通して得られた画像データを横一列に整列させて得られる全方位画像を Fig. 3 に示す。この全方位画像はカメラ回転台の回転分解能に応じた方位角情報を持つ<sup>10)</sup>。Fig. 3 はカメラを  $0.4^\circ$  毎に  $360^\circ$  回転させて得られた全方位画像であるが、画像 1 画素に対応する方位角分解能（我々の実験では約  $0.1$  度）よりも更に細かい角度  $0.01^\circ$  で回転させると、Fig. 4(a) に示す全方位画像が得られる（Fig. 4(a) は全方位画像の一部、 $0 \sim 5^\circ$  の範囲を示す）。Fig. 4(a) に Sobel のエッジオペレータを適用し、エッジ画像を作成し、線分 AB 上のエッジ強度を求めると、Fig. 4(b) のようになる。Fig. 4(b) においてエッジ強度の極大値を検出することで、

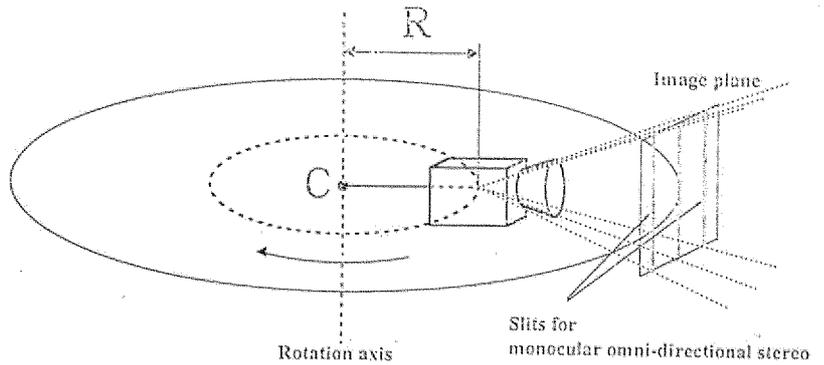


Fig. 2 Imaging mechanism

カメラの回転分解能に等しい分解能でエッジの位置決めができるのである（詳しくは文献 (13) を参照）。

3.2 全方位の距離情報

一方、全方位の距離情報は、画像中心より左右に  $l$  画素離れた位置に設けられた 2 本の垂直スリットを通して得られる、2 つの全方位画像間の視差情報より求める。Sarachik<sup>9)</sup> は回転軸の上下に取り付けた 2 台のカメラを回転させることにより距離情報を獲得したが、我々の方法では 1 台のカメラで距離情報を獲得できる。

全方位画像に投影された物体への距離  $L$  (Fig. 5(a)) と、カメラの光軸からの高さ  $H$  (Fig. 5(b)) は、2 本の

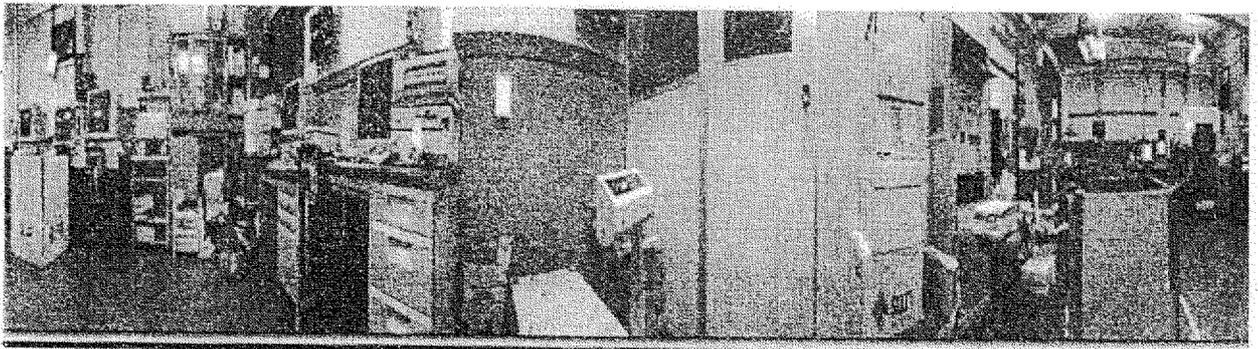


Fig. 3 Omni-directional view

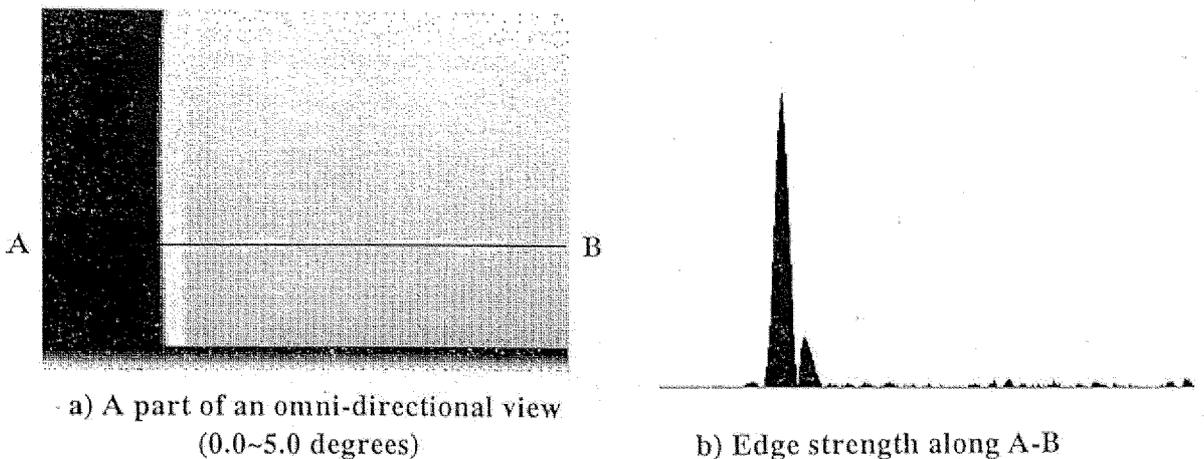
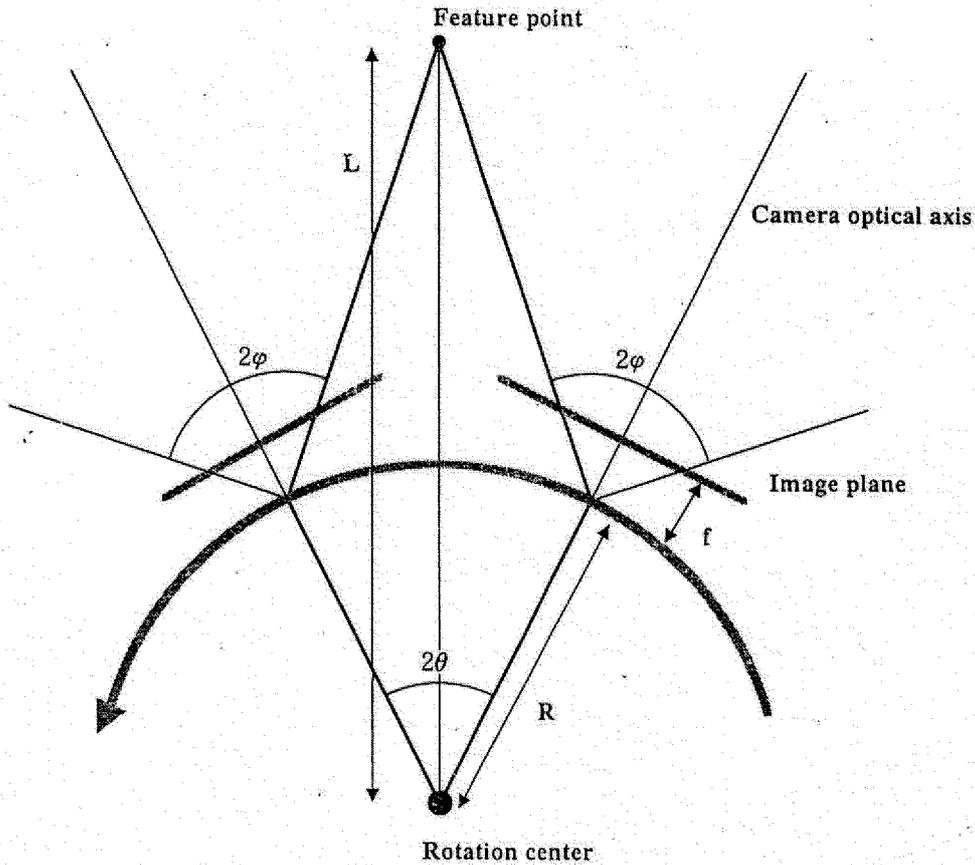
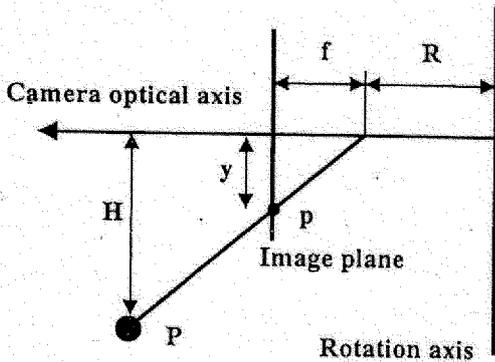


Fig. 4 Precise angular information



(a) Range estimation



(b) Height estimation

Fig. 5 Position estimation of an object point by monocular omni-directional

垂直スリットを通して得られる2つの全方位画像間の対応を求めることにより、式(3.1)、式(3.2)より計算できる。

$$L = \frac{R \sin \theta}{\sin(\varphi - \theta)} \quad (3.1)$$

$$H = (L \cos \theta - R) \frac{y}{f} \quad (3.2)$$

ここで、 $\varphi$ はカメラの光軸と、垂直スリットと焦点を結ぶ直線との角度 ( $= \tan^{-1}(l/f)$ )、 $\theta$ は物体が2本のスリ

ット間を移動する間のカメラ回転台の回転角度である。2つの全方位画像間での対応は、カメラの回転に伴い、物体が2本のスリット間を移動するのを追跡して求められる。この方法は、1台のカメラにより全方位の距離情報を獲得するので、単眼全方位ステレオと呼ぶ。

単眼全方位ステレオの位置決め誤差は、式(3.3)で示される。

$$\Delta L = \frac{\sqrt{1 - (R \sin \phi / L)^2}}{R \sin \phi} L^2 \Delta \theta \quad (3.3)$$

式(3.3)に示されるように、物体までの距離が遠い場合、誤差は距離  $L$  の2乗に比例し、 $R \sin \phi$ に反比例する。すなわち、 $R$ を大きくすれば誤差は小さくなる。しかし、ロボットに搭載できる回転台の大きさは限られるため、 $R$ をあまり大きくできない(実験では  $R=0.2\text{m}$  に設定している)。このため、単眼全方位ステレオで精度を向上させるには  $\Delta \theta$ を小さくする。すなわち、精度の高い回転台を用いてカメラを回転させる必要がある。しかし、我々の実験設備では、方位角分解能の高い全方位画像を撮像するには、撮像時間が長くなりすぎ、実際の実験では  $\Delta \theta$ は  $0.4^\circ$  に設定している。実際の実験における単眼全方位ステレオの距離情報はこのような理由によりあまり精度はよくないが、その距離情報はロボ

ットの移動可能な自由領域の発見に用いるため、さほど精度は要求されない。

距離情報を得る他の手段としては、物体に投光したパターン光をカメラで撮像するレンジファインダー<sup>14)</sup>や、従来の2眼ステレオ<sup>15)</sup>がある。どちらもその精度は基線距離の長さや画像分解能に依存する。基線距離を大きくし易いという点では、これらの方法は単眼全方位ステレオより精度を向上させ易いものであろう(単眼全方位ステレオの場合、 $R \sin \phi$  が従来の2眼ステレオの基線距離に相当する)。しかし、画像の分解能という点では、全方位画像は回転台の角度分解能に応じた高い角度分解能を持つため、十分精度の高い回転台を用いれば、距離測定において従来の2眼ステレオ法に劣らない精度が期待できる。

我々の提案する撮像方法の欠点は、撮像時間が長いことである。この問題を克服するには、ラインセンサーや、高速で正確な制御が可能なモータを用いた特別なハードウェアの開発が必要である。

#### 4. 能動的全方位視覚を用いた移動

ロボットはある地点で全方位画像を得た後、移動可能な自由領域を移動し、次の観測点に到達する。ここでも同様に全方位画像を撮像し、得られた2つの全方位画像を用いて、ステレオ視により局所地図を獲得する。ここでのステレオ視を前章で述べた単眼全方位ステレオと区別するために、2眼全方位ステレオと名付ける。単眼全方位ステレオではロボットの大きさの制約により、正確な距離情報を得ることが難しいが、2眼全方位ステレオではロボットの移動により十分大きな基線距離をとることにより、正確な距離測定ができる。

2眼全方位ステレオを行う際に問題となるのは、2つの観測点間の位置関係を正確に計測しなければならないことである。しかし、2章で仮定したように、我々が用いるロボットは正確に制御できない。そのため全方位画像からの視覚フィードバックを利用した移動方法を提案する。

ロボットが、環境内の2点の特徴点を結ぶ直線上を正確に移動し、その移動経路と全方位画像の角度参照軸との関係がわかれば、2眼全方位ステレオは容易に実現できる。2点の特徴点を結ぶ直線上にロボットが位置することを知らねば、全方位画像上でその2点が $180^\circ$ の角度を隔てて投影されていることを確認すればよい。すなわち、2点の特徴点が全方位画像中で常に $180^\circ$ の角度を隔てて投影されるように、ロボットの運動を制御すれば、ロボットは2点の特徴点間を正確に直線運動できる。

この2点の特徴点を結ぶ直線は、そのまま2眼全方位ステレオの基線となり、2つの全方位画像の角度参照軸と2眼全方位ステレオの基線との角度は、全方位画像の角度分解能(カメラ回転台の精度)の単位で測定できる。2つの観測点の位置関係を表すパラメータの内、残るパラメータは、2つの観測点間の距離であるが、これはロボットの車輪に取り付けられたエンコーダの情報を用いて評価しなければならない。しかし、2章で述べたようにこの情報は正確でないため、2眼全方位ステレオによって得られる局所地図のスケールファクタとして残す。

上述のように、全方位画像からの視覚フィードバックを用いれば、ロボットは正確な直線運動ができる。しかし、環境内を自由に移動し、様々な観測点から局所地図を作成するには、ロボットは自由に移動方向を変えることができなければならない。移動方向を変えた場合、これまで移動してきた直線経路と、新たに移動経路として選択した直線経路の関係を知る必要がある。そのため、ロボットが移動経路を変更する地点は、2点の特徴点を結ぶ直線が交わる点、すなわち、その地点で得られる全方位画像中に $180^\circ$ の間隔をおいて投影される2点の特徴点の組が2つあるような地点を探索し、その地点でロボットの移動方向を変更する。2つの直線経路の関係は、全方位画像上に投影される2組の特徴点間の角度より直接計測できる。

Fig. 6は環境内に存在する特徴点、それらを結ぶ仮想的な直線とロボットの移動経路の例を示す。最初ロボットは環境内のある地点 $O_0$ にいる。次にロボットは全方位画像中より適当な2点、A、Bを選び、この2点が全

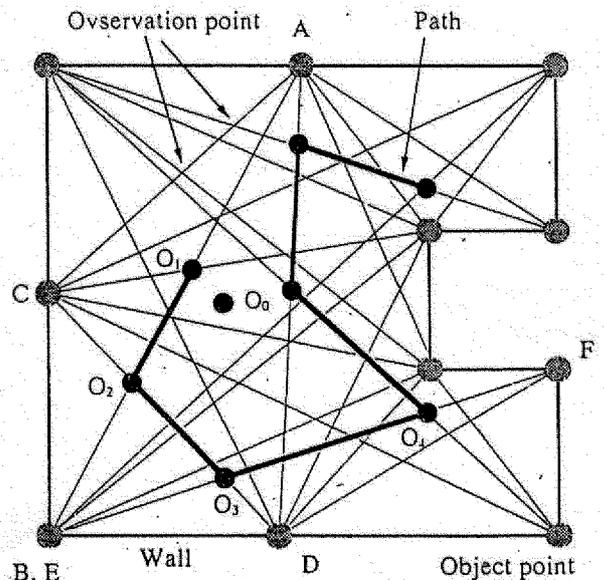


Fig. 6 Robot motion using active omnidirectional vision

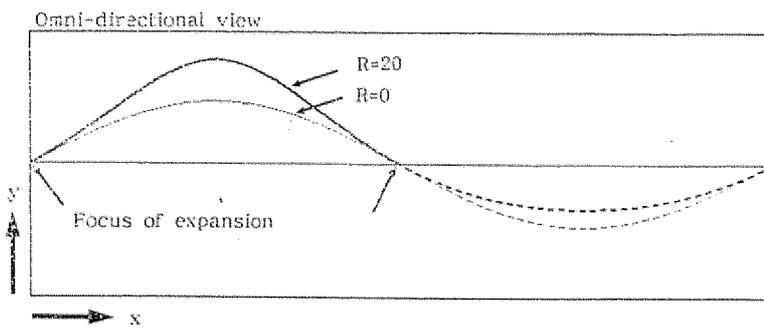


Fig. 7 Epipolar line



Fig. 8 Motion of object points in linear robot motion

方位画像中で  $180^\circ$  の間隔で投影される位置  $O_1$  に移動する。この2点は、(1) ロボットからの距離が小さい(単眼全方位ステレオの結果を利用する)、(2) 2点の間隔があらかじめ  $180^\circ$  に近い等の基準により選択する。 $O_1$  に到達したロボットは2眼全方位ステレオを行うために、第二の観測点  $O_2$  に移動する。このとき、全方位画像の視覚フィードバックにより2点間の角度を  $180^\circ$  に保つことで、線分  $AB$  上を正確に移動する。 $O_2$  に到達したロボットは、 $O_1$  と  $O_2$  で撮影された全方位画像をもとに2眼全方位ステレオを行い、局所地図を得る。 $O_2$  は2点  $A, B$  を  $180^\circ$  の間隔で観測すると同時に、2点  $C, D$  も  $180^\circ$  の間隔で観測する位置である。次にロボットは移動経路を変え、線分  $CD$  上を移動する。 $O_3$  に到達した時点で再び  $O_2, O_3$  間で局所地図を作成するのである。

( $x$  が方位角,  $y$  が縦の座標) で、全方位画像の方位参照軸は2眼全方位ステレオの基線方向にとる。また、 $f$  はカメラの焦点距離、 $R$  はカメラ焦点の回転半径、 $H$  はカメラ光軸から物体までの高さ、 $D$  は2眼全方位ステレオの基線から物体までの距離を表す。Fig. 7は、2眼全方位画像のエピポーラインの例を示している(式(5.1)における  $H, D, f$  のパラメータには適当な値を与えた)。 $R=0$  の場合は、FOE(Focus Of Expansion) を起点とする正弦曲線となるが、 $R$  がある程度の値を持つと図に示すようにいびつな形になる。

式(5.1)は、未知数である  $H$  と  $D$  を一つの変数として扱うことができないため、全方位画像上の一点の座標  $(x, y)$  だけでは、その点に対するエピポーラインを決定できない。そこで、3章で述べた単眼全方位ステレオ

$$X = \frac{\cos \alpha \sin \beta}{\sin(\beta - \alpha)} D, \quad Y = \frac{\sin \alpha \sin \beta}{\sin(\beta - \alpha)} D \quad (5.2)$$

ここで、 $\alpha$ と $\beta$ は基線方向に対する物体の角度であり、 $D$ は基線距離である。車輪に取り付けられたエンコーダによって計測されるロボットの移動パラメータは車輪のスリップ等により必ずしも正確なロボットの運動を表わすものでないため、 $D$ は局所地図のスケールファクタとして残す。

5.3 2眼全方位ステレオの誤差

2眼全方位ステレオの誤差は式(5.3)で表される。

$$\left. \begin{aligned} \Delta X &= \frac{Y^2}{D} \left\{ \frac{\cos \alpha}{\sin \alpha \sin^2 \beta} \Delta \beta_2 + \frac{\cos \beta}{\sin^2 \alpha \sin \beta} \Delta \alpha_1 \right\} \\ \Delta Y &= \frac{Y^2}{D} \left\{ \frac{1}{\sin^2 \alpha} \Delta \alpha + \frac{1}{\sin^2 \beta} \Delta \beta \right\} \end{aligned} \right\} \quad (5.3)$$

ここで、 $\Delta \alpha, \Delta \beta$ は2眼全方位ステレオの基線方向に対する、2つの全方位画像の方位角測定誤差である。基線距離 $D$ の測定誤差は考慮していない。

式(5.3)において、 $\Delta \alpha, \Delta \beta$ をそれぞれ $0.5^\circ, 0.5^\circ$ とすると、観測点の回りの位置決め誤差はFig. 10に示す形になる。Fig. 10に示されるように、経路中心の表現では、基線方向にある物体の位置決め精度はよくない。この問題は、局所地図を統合し全体地図を得る過程において克服する。

ここで行った誤差評価は、基線距離(局所地図のスケールファクタ)の関数で表し、局所地図を構成する各点に関して計算され、全体地図を獲得する際に用いる。

6. 全体地図の獲得

一つの局所地図を得た後、ロボットはさらに移動し、新たな局所地図を得る。得られた2つの局所地図は、一つの全体地図(環境中心の環境表現)に統合される。ロボットが移動する毎にこの処理を繰り返し、全体地図をより正確なものにしていくと同時に、ロボットの移動経路を復元する。

全体地図を得る際に気をつけなければならないのは、1つ1つの局所地図の基線方向が同じにならないように、観測計画をたてることである。前章で述べたように、局所地図の作成で用いる2眼全方位ステレオではその基線方向の位置決め精度がよくない。これを克服するには、複数の局所地図の基線方向が異なるように観測を行う必要があり、例えば、ロボットが正三角形の移動軌跡をとるのが理想である。

局所地図間の位置関係は平行移動、回転、スケールファクタの比の3つによって表される。

平行移動

Fig. 5において、ロボットが観測点 $O_1$ と $O_2$ の間で局所地図を得た後、観測点 $O_2$ と $O_3$ の間で次の局所地図を得たとすると、共通の観測点 $O_2$ を重ね合わせることで、2つの経路中心の環境表現間の平行移動は一意に決定できる。

回転

観測点 $O_1$ と $O_2$ から得られた局所地図と、観測点 $O_2$

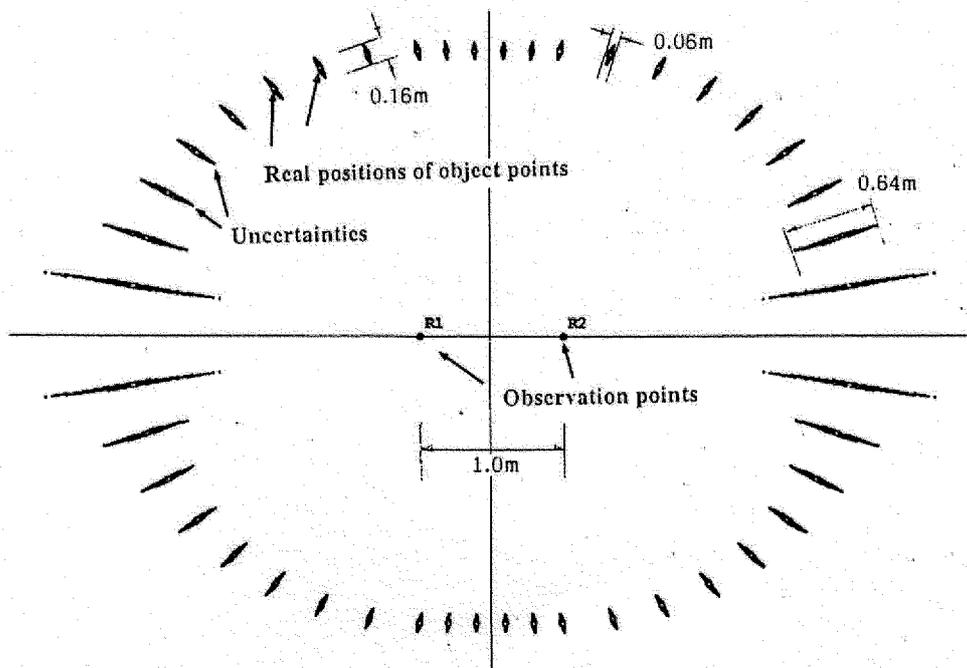


Fig. 10 Error of binocular omni-directional stereo

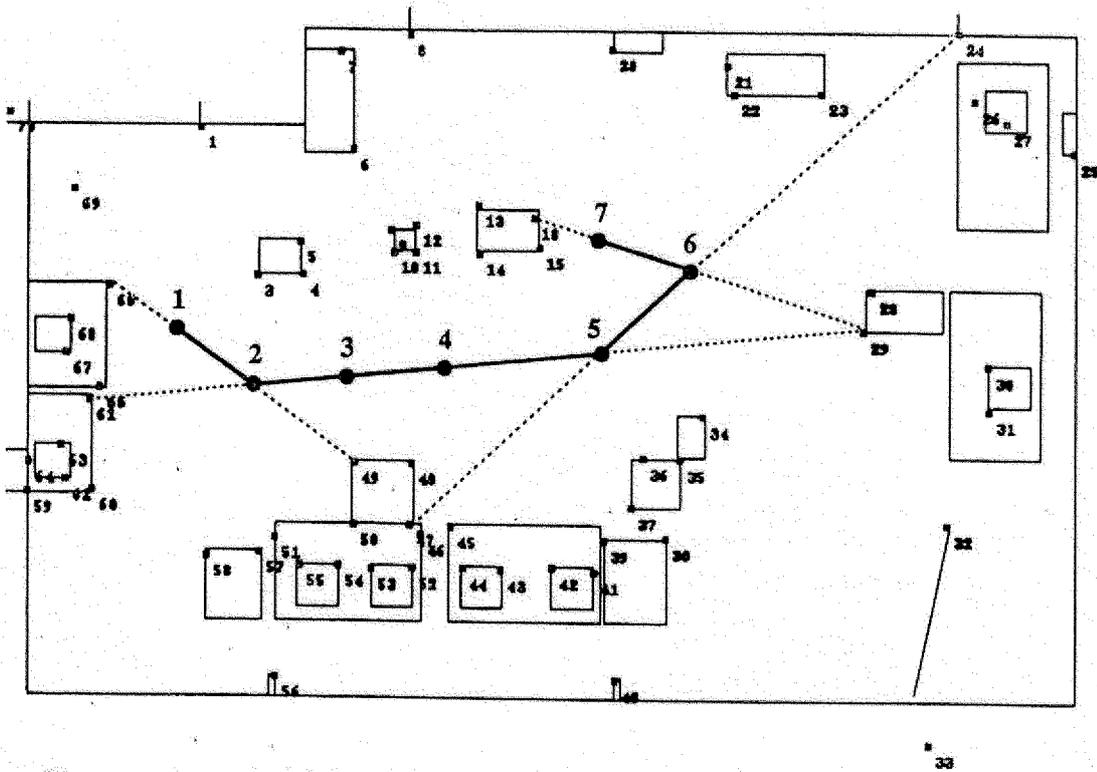


Fig. 11 Obtained global map

—Real structure of an indoor environment

- Computed robot position
- Computed object position

と  $O_3$  から得られた局所地図間の回転成分は、 $O_2$  において、全方位画像上での基線方向を示す特徴点 A と C の角度を計測して求められる (4章参照)。

スケールファクタの比

各局所地図は、スケールファクタを未知数として表現していたため、全体地図に統合するには、局所地図のスケールファクタの比を計算しなければならない。スケールファクタの比  $S$  は、式 (6.1) によって計算する。

$$S = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{E_i E_i'}} \sum_{i=1}^n \frac{1}{E_i E_i'} \frac{\sqrt{X_i^2 + Y_i^2}}{\sqrt{X_i'^2 + Y_i'^2}} \quad (6.1)$$

ここで、 $X_i, Y_i, X_i', Y_i'$  は2つの局所地図のスケールファクタを等しくした場合 (どちらも1とした場合) の局所地図を構成する各点の座標であり、 $E_i, E_i'$  はその点の誤差評価である。

各局所地図間の大きさの比は求めるが、その絶対的な大きさは求めない。もし必要とあらば、ロボットの車輪に取り付けられたエンコーダの情報と、ここで求めたスケールファクタの比より最小自乗法を用いて容易に求めることができる。

局所地図間の関係が求まれば、ロボットの移動経路を

復元することができる。ロボットの移動経路が復元された後、全体地図を構成する各点の位置をカルマンフィルタ<sup>5)</sup>によって再評価する。

7. 実験結果

移動ロボットには、屋内搬送車の Murata 100 をコンピュータから制御できるように改良して用いた。移動ロボット上に搭載されるカメラ回転台は、オプティカルエンコーダ信号によりフィードバック制御され、減速ギアの機構と合わせて  $0.005^\circ$  毎に制御できる。画像処理には Nexus 6800 を、ホストコンピュータには Sun 4 ワークステーションを用いた。

移動ロボットは環境内の複数の観測点間を移動し、各観測点においては静止して全方位画像を撮像する。各全方位画像はカメラ回転台を  $0.4^\circ$  毎に回転させて撮像した。このときのカメラの画角は約  $60^\circ$  で、床面から約 1m の高さに備え付けた。1枚の全方位画像の撮像に要する処理時間は約 10 分である。

移動経路を示す2つの特徴点の選択は、撮像された全方位画像とその距離情報を用いてオペレータが行う。全方位画像からの視覚フィードバックを用いた移動は、ロ

ポットにより撮像された全方位画像を用いて、オペレータが2つの特徴点を追跡するように、ロボットを遠隔操作することで行った。

計算機室内の7つの観測点で全方位画像を撮像した。これらの観測結果をもとに、各観測点間で合計6つの局所地図を作成し、それらを統合して得られた全体地図を Fig. 11 に示す。Fig. 11 で、正方形の点は、得られた全体地図を構成する特徴点の位置を、円形の点は計算されたロボットの位置を、直線は実際の計算機室内の構造を示す。実際の環境では、全体地図を構成する特徴点は、Fig. 11 中の直線上に位置するものであり、この実験結果においても、計算された特徴点は環境構造を示す直線上に位置していることがわかる。

この実験ではカメラを  $0.4^\circ$  毎に回転させて全方位画像を撮像したが、我々の用いたカメラ回転台は  $0.005^\circ$  の精度で回転させることができ、より正確な計測が可能である。

## 8. ま と め

環境内の複数の観測地点で撮像された全方位画像より局所地図を作成し、それらを統合して環境の全体地図を得る方法について述べた。

特に、局所地図と全体地図の獲得では、移動ロボットの運動パラメータを正確に知るために、全方位画像からの視覚フィードバックを用いる方法を提案した。

また、全体地図は、ロボット中心、経路中心、環境中心の3つの環境表現を用いて獲得される。それぞれの環境表現について以下にまとめる。

- (1) 単眼全方位ステレオによって獲得されるロボット中心の環境表現は、ロボットの移動可能な自由領域の発見に用いられる。
  - (2) 2眼全方位ステレオによって獲得される経路中心の環境表現(局所地図)は、経路上を移動するロボットに十分な情報を与える表現方法であり、長い基線距離のステレオによって、より正確に環境の位置決めを行うことができる。
  - (3) 複数の経路中心の表現を融合することによって得られる環境中心の環境表現(全体地図)は、環境の正確な構造と、ロボットの移動経路を再現する最終的な環境表現である。
- 今後の課題として、全方位画像を高速に撮像できるハ

ードウェアを開発することと、それを用いて、より正確な全方位画像を撮像することが考えられる。また、本論文では全体地図を特徴点の位置によって表したが、面情報の復元を行いより完全な全体地図を作成する必要がある。

## 参 考 文 献

- 1) 松本勉他, "経路地図を用いた移動ロボットの自律誘導", 第3回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 1985.
- 2) 小野ロー一則他, "移動ロボットの位置確認システム", 情報処理学会研究報告, CV 57-3, 1988.
- 3) 小森谷清他, "移動ロボットの自律誘導の一方方法", 日本ロボット学会論文誌, Vol.2, No.3, pp.46-55, 1984.
- 4) 森英雄他, "構内道路を走行する自律移動ロボット(移動ロボットの一戦略晴信4号機)", 日本ロボット学会誌, Vol.5, No.5, pp.29-41, 1987.
- 5) N. Ayache and O. D. Faugeras, "Building Registration and Fusing Noisy Visual Maps", Proc. 1st Int. Conf. Computer Vision, pp.73-82, 1987.
- 6) R. C. Bolles, et al., "Epipolar-Plane Image Analysis: An Approach to Determining Structure from Motion", Int. Journal Computer Vision, Vol.1, No.1, pp.7-56, 1987.
- 7) T. Morita, et al., "Measurement in Three Dimensions by Motion Stereo and Spherical Mapping", Proc. Computer Vision & Pattern Recognition, pp.422-428, 1989.
- 8) Y. Yagi and S. Kawato, "Panorama Scene Analysis with Conic Projection", Proc. IEEE Int. Workshop Intell. Robots & Systems, pp.181-190, 1990.
- 9) K. B. Sarachik, "Characterising an Indoor Environment with a Mobile Robot and Uncalibrated Stereo", Proc. 1989 IEEE Int. Conf. Robotics & Automation, pp.984-989, 1989.
- 10) H. Ishiguro, M. Yamamoto and S. Tsuji, "Analysis of Omni-Directional Views at Different Locations", Proc. IEEE Int. Workshop Intell. Robots & Systems, 1990.
- 11) 山本雅史, 石黒 浩, 辻 三郎, "全方位ステレオ", 電子情報通信学会技術研究報告, PRU 90-51, 1990.
- 12) J. Y. Zheng and S. Tsuji, "Panoramic Representation of Scenes for Route Understanding", Proc. 10th Int. Conf. Pattern Recognition, pp.161-167, 1990.
- 13) H. Ishiguro, M. Yamamoto and S. Tsuji, "Acquiring Precise Range Information from Camera Motion", Proc. 1991 IEEE Int. Conf. Robotics & Automation, pp.2300-2305, 1991.
- 14) 浅田 稔, "センサ情報の統合と理解による移動ロボットのための世界モデルの構築", 日本ロボット学会誌, Vol.8, No.2, pp.28-38, 1990.
- 15) 尾崎 暢, 大空真由美, 平塚芳隆, "自律走行車用視覚情報システム", 情報処理学会研究報告, 90-CV-69-8, 1990.