

室内移動ロボットの環境認識システム

鄭 絳宇、辻 三郎
大阪大学 基礎工学部 制御工学科

あらまし：自律的移動ロボットの重要な研究課題として、環境の認識及び移動可能な範囲の探索がある。本論文は、室内移動ロボットのための視覚環境計測システムの研究を報告する。このシステムは、環境内の線分に着目し、ステレオ法及び移動ステレオ法を用いて線分の3次元位置を検出する。ロボットが移動に伴って一連の観測を行い、環境モデルを逐次に完成させ、更新させる能力を持つ。また、信頼できる2次元の画面情報より、移動に必要な局所安全地図が作成でき、後続の探索と目的地への進行が計画できる。移動と観測を協同的に行なって、ロボット室内でのナビゲーションをする。

ENVIRONMENT PERCEPTION IN NAVIGATION OF AN INDOOR MOBILE ROBOT

Jiang Yu Zheng and Saburo Tsuji
Department of Control Engineering, Osaka University
Toyonaka, Osaka 560, Japan

We are developing an environment perception system for navigation of an indoor autonomous mobile robot. Our goals are making robot "walk" in a room without collision with obstacles and take a close look on objects when necessary. Spatial matching is used in 3D information acquisition. Rather than intend to obtain full spatial information exactly at one position, we are more depend on further observations coherent with robot's moving and suppose that the stereo uncertainty, both structural and computational, should be improved by consecutive investigation of robot itself. As an assurance of its safety in the moving and observation, we present an algorithm to find out free space, which is based on reasonable interpretation of the incomplete 3D world model acquired.

1. まえがき

移動ロボットが自律的に、指定された目標を捜したり、与えられた仕事を遂行するためには、環境についての情報を獲得し、移動を計画することが必要になる。環境認識においては、レーザ距離計測器、超音波センサ、テレビカメラなどの様々なセンサを導入し、各々センサ情報を融合して、より正確に環境を認識するシステムが多く研究グループで作られている。その中でステレオの原理を用いて3次元空間を観測し、環境を理解する方法は有効的な手段と挙げられる。

本研究は、室内移動ロボットのナビゲーションのためのステレオ環境認識システムを開発した。このシステムは多数のセンサを利用して、一つの地点の観測で完全な3次元空間モデルを測定するのと異なり、ロボットの移動による多地点、多数回の観測に重点を置く。ロボットは移動しながら一連の計測を行ない、環境モデルを逐次に完成させる。また、現在までに獲得された情報をナビゲーションに使い、自由領域を発見して、新たな計測及び移動を計画する。この様に、ロボットは衝突せずに、室内で“散歩”することができる。

本システムが使っている情報は視覚情報で、センサとして、カメラの他、ロボット自身の姿勢を検出する傾斜センサをも使う。シーンの特徴及び環境モデルを記述するには線分を用い、人工的な環境に適する。さらに、環境に対する測定には不確かさがあり、ロボット自身の移動にも誤差が生じると仮定する。

一つの地点のステレオ観測で必要な情報が完全には得られない。まず、オクルーションが起こる時に、ステレオ対応が困難になる。画面の水平線分が対応できても、その位置は定められないという構造的な不確定性がある。そして、センサの分解能が低いため、ステレオ画像から得た特徴の3次元位置はセンサから遠いほど信頼できないという精度上の不確定性もある。そのほか、環境の複雑さによる間違い対応が起こり、人間の“錯覚”に当たる。それらを次回の観測によって修正する必要がある。時間が制限されない場合、移動の条件を十分利用して、視覚計測に生じる不確定性を合理的に推理して、視覚の再観測によって解決する。

次に探索を行うため、移動の安全性を確認しなければならない。システムがその時点での不完全モデルから安全限度内の移動地図を作る。本研究は2次元の画面特徴に基づく自由領域の発見方法を提案する。ロボットを画面上に投影し、その投影された图形を画面上で動かす。環境中の特徴との接触を画像上で簡単に判断でき、ロボット中心の移動できた領域が得られる。そして、検出された床面線分によって、得た領域は床面上の自由領域であることが推論できる。ロボットの投影图形が画面を辿る方式は画面を領域に分割できな

い不完全線分に対して有効である。

新たな観測を行い、前段階で予想されたシーンと照合して、不確実な線分の位置を移動ステレオ法によって修正する。移動の不確実性を除去するため、垂直線分の画面位置の変化により、ロボット位置を推測する。本研究は、環境条件とロボットモデルに適する簡単な方法を使う。回転に関する拘束条件を用いて、平行移動と回転運動とを別々に定める。ロボットの移動と同時に、3次元モデルが次々に修正され、更新されて、ロボットの進行に情報を与える。

本研究は線分を用いて世界モデルを記述することにしたので、線分で記述する不確実な空間モデルより環境についての解釈をも検討する。

2. 線分の対応と モデルの構築

2.1 システム概要

移動ロボットは室内環境の中で作業するとする。使用する移動ロボットHERO1は、前輪で駆動し、方向を変える、更に、頭も350°回転できる。二台のCCDカメラをロボットHERO1の上に載せる。カメラの光軸は平行で、しかも、水平になっている。カメラの床からの高さは70cmで、中心の間隔距離Bは20cmと設定されている。カメラの焦点距離Fは7.5mmである。3次元空間にある点P(x,y,z)の左右カメラに写された像をP₁(x_r,y_r), P₂(x_l,y_l)とする。

室内環境を仮定したため、以下の条件が利用できる。

1. 床が平坦である(床の凹凸によるカメラ光軸の傾斜は傾斜センサで検出できる)。
2. 室内では、人工的なものが多く、シーンの特徴を直線で表現することは困難ではない。

ロボットの移動に伴ってモデルが頻繁に更新されるので、点より簡潔な形で3次元空間を記述するのは有利である。本研究は画像から線分を求める。それによって、ステレオ対応だけではなく、3次元位置の計算にも信頼性をもたらす。実環境の中で、物体の色とか、シーンの照明状況とか、所在位置の遠近など様々な原因で、検出できないものもあるが、それらは不完全線分として取り扱えばよい。

実際のステレオ画像の一例を図1.に示す。

2.2 線分の抽出

まず、撮影された画像に対してSobelオペレータを用いて、微分画像を計算する。そして、二つの閾値を設定し、それ以上の部分に対して細線化を行なう。得られた二層のエッジ画像を追跡し、線分の様な塊を最小二乗法で調節して、線分を求める。求めた線分の属性として、画面上での方向、長さ、平均微分強さをも計算する。図1.から検出された長さが9点以上の線分

の数はそれぞれ234本と、238本である。(図2.を参照する)

2.3 ステレオ画像の線分対応

ステレオ画像の線分の対応について、多くの研究は線分ペアが複数の制限条件の中のすべてを満足しないと、除去される。実際に異なる位置から画像を撮ると、互いに多少変化があり、結局対応すべきものが取り消されることがあり、これは空間情報が失われることを意味する。ここでは、より柔軟な条件判別の戦略として競争行列を用い、なるべく多くの対応を求める。それに、一方から他方への対応とその逆に他方からの対応と一致させるコントロールも容易になる。

左右画像にはそれぞれn本、m本の線分があるとする。競争行列 $C_{n,m} = \{c_{ij}\}$ を定義する。

c_{ij} は左画像の線分iと右画像の線分jとの類似度を表している。対応可能な範囲(粗いエピポーラベンド)にある左右線分iとjに対して c_{ij} の初期値を次の様に計算する。線分iとjの方向の差、長さの差、平均微分強さの差及び端点のy座標の差のそれぞれに對して、与えられたしきい値より小さければ、一定の点数を c_{ij} に加える。対応できる最小類似度より小さい c_{ij} を零にする。

それと同時に、左右画像それぞれに対して構造的に関連している線分を組み合わせて、構造リストを作る。関連しているとは線分が接続していることや、線分がほぼ同じ濃淡値の領域と接していることなどをいう。

その上に、競争行列の変換によって対応を求める。

(1) 行列の中で、行方向また列方向ともに最大の値を持つ成分 c_{ij} を見つけ、線分i, jを対応ペアとする。

(2) 左右画像から得られた二つの構造リストの中に一部の線分が対応できたとすれば、未対応線分の間の c_{ij} を増加し、類似度を再評価する。

(3) ステップ(2)で、条件の満足する組がなければ、対応過程が終わる。さもなければ、残った線分に対して以上のステップを繰返す。

左右線分の類似性が高いほど優先的に対応ペアに選ばれる。対応候補の多い場合には対応が厳しく、候補の少ない場合には緩くして、より多くの対応をとる。類似度の評価値は対応条件の重要性によって決まり、条件が多いほど対応が信頼できる。対応条件と考えられるものとして、線分自身の性質の他、構造的な情報も用いられる。

図2.に図1.から得られた線分の対応結果を示す。確実に対応された線分は152本あり、その中で、十本位の線分はミス対応である。

2.4 3次元空間モデルの構築

二台のカメラが平行で水平に置かれ、対象の左右画

面の像が対応されると、その3次元位置は視差の計算によって決定できる。しかし、水平線分はエピポーララインと重なるため、対応ができるても、その中の点として対応できるのは端点しかない。さらに、オクルージョンのある場合、端点も正しく対応されない。また、画面上水平に近い線分に對してエピポーララインを引く方法で3次元位置を計算すると、相当な誤差が生じる。それを考えて3次元モデルを構築する際に、画面上で垂直に近い線分は確実に位置が決まり、それらをモデルに書き込む。水平に近い線分は端点の計算により位置付け、信頼できない線分として残す。

画面上垂直線分の3次元位置を検出する時に、エピポーララインと交差しない線分を誤対応とし、対応する時に残った一部のミスを除去する。

画面上水平または水平に近い線分の3次元パラメータを端点の対応によって一時的に定めておく。もし端点の位置が正確に検出されたとすると、図3.に示す様に、この線分は端点で結んだ直線で分けた透視面の半平面にあると限られている。もし両方の端点とも“実交点”であれば(図3.の線分AB)、線分は端点で計算したとおり位置しているが、一方でも“虚交点”(すなわち、物体に隠されることによって現れた交点)になると、線分の位置は実際の位置より前に評価される(例えば図3.の線分CD)。従って、今作られたモデルは少なくとも次の移動と探索には危険を与えない。ここまで、垂直線分と水平及び他の不確実の線分と区別して組み合わせた不完全モデルが得られた。この既知の情報をを利用して新たな視点で探索を行ない、不確かな情報を計測により、モデルを修正する。

3. 移動ステレオによる モデルの修正と更新

3.1 モデルによる予測と対応

移動ステレオ法を使うため、移動前後の画像対応が必要である。移動の指令を出すと共に、次の位置で画面上に現れるシーンが既知のモデルから予測できる。モデルの中で不確実な線分がまだあるが、ロボットはモデル未完成の場合には長い距離移動しないため、画面上の変化は大きくない。図4.には図2.で得られたモデルを用いて予測した一系列の線分画像を示す。

ロボットが移動した場所で改めて画像を撮る。撮った画像から抽出された線分とその予測された線分とを競争行列を利用してマッチングすると、新しい情報と獲得された情報との間に連結ができる。図5.はロボットが示している位置で撮った画像と予測された線分画像との重なりで、それらを対応すると、図6.の様な結果を得た。

3.2 移動の推定

ロボットが移動する時に、実際の到着した位置がス

テアリング角や、車の回転数から計算した位置に正確にはならない。従って、ロボット位置の再評価の必要がある。画面情報の変化よりロボットの移動量の推定について様々な方法が提案されたが、本研究では前述した環境に適応する簡単な計算方法を提案する。条件として、移動前の垂直線分の3次元位置が判り、ロボットのY方向の平行移動及びX、Z軸に対する回転がすべてゼロであると仮定する。（実際のピッチとヨーリ角は変化するが、カメラに取り付けた傾斜センサで計測できる。）手順として、まず、垂直線分の回転に関する拘束条件を用いて平行移動を求める。次に、回転量を算出する。

図7.に示す様に、ロボットが平行移動せずに、Y軸に対してθ度回転すると、各垂直線分 $L_i, i = 1, 2, \dots, n$ の円柱面AB上の変位 D_i は等しい。平行移動が始まると、 D_i の分散は大きくなる。この拘束条件を使えば、平行移動の量が推定できる。 L_i の画面上の位置変動を ΔX_i とすると、 D_i は ΔX_i の補正 α_i によって求められる。

図8.の様に、ロボットの目標位置は $P(x', z')$ であるが、実際に到達した位置は $Q(x_0, z_0)$ で、しかも、Pの方向よりθ度回転したとする。PとQが近いため、Pでの予測された垂直線分と実際にQで見えた垂直線分との対応がとれた。すなわち、移動前後の対応がとれたとする。

垂直線分 L_i のQ点、P点での画面座標を x_{si}, x_{pi} とすれば

$$\begin{aligned} \text{Var}(D_i) &= E(D - ED) = F(D_i) \\ &= F(\alpha_i \Delta X_i) = F'(x_{si} - x_{pi}) \end{aligned}$$

位置PはQと接近すればするほど予想される垂直線分と実際に見えた垂直線分との分散 $\text{Var}(D_i)$ が小さくなり、Qと重なる時に最小値になる。従って、P(x', z')の近所で $\min[\text{Var}(D_i)]$ を満足する x_0, z_0 を見つければ、実際に到達した場所が判る。

$\text{Var}(D_i)$ は x_0, z_0 の近所で簡単な数学性質を持っているので、次の山登り方を使えば、平行移動量が正確に推定でき、回転量θも得られる。

初めに、ロボットに指令した位置をPとする。

1° XZ平面で、Pの周辺位置に対して見える垂直線分を予測し、その所での分散 $\text{Var}(D_i)$ を計算する。

2° もし、その中でP点より分散の小さい点があれば、P点が最小分散値を持っている点に移動して、ステップ1°に戻る。そうでなければ、P点は求める到達点Q(x_0, z_0)であり、計算過程を完了する。

回転は $\theta = ED(x_0, z_0)/f$ によって求まる。

実際にPが位置Qに接近する時、まず大きな歩幅で粗い位置を見つけ、それから、細かい歩幅で正確な位置を求める。

図5.のロボット位置は、最初の位置から移動(-19.7cm, 0cm, -21.8cm, yaw = 0.28°)を移動した位置と推定された。

3.3 移動ステレオによる線分の位置決定

ロボットの正確な移動が判ると、移動ステレオの方法によって、未確定線分の位置が計算できる。端点による線分位置の検出は幾何的にそれなりの不確定性があり、実際に端点の画面位置の不正確な場合、3次元位置はさらに信頼できない。本研究では線分に適応する位置決定法を使う。それは特に端点の画面位置に依存せずに、線分パラメータで位置を推定する。

図9.に示す様に、ロボットは O_1 から、移動[T, R]を経て、 O_2 の位置に達したとする。空間の中で線分Lの二画面に投影した像は l_1, l_2 で、 L, l_1, l_2 の端点はそれぞれ $(A, B), (a_1, b_1), (a_2, b_2)$ である。図9.によって簡単に判る様に、Lの3次元位置は二平面 O_1AB, O_2AB の交線になる。

各座標系のもとで線分端点の座標は次の様に表示する。

$$\begin{aligned} XO_1Y : a_1(x_a, y_a, -f) &\quad X'O_2Y' : a_2(x'_a, y'_a, -f) \\ b_1(x_b, y_b, -f) &\quad b_2(x'_b, y'_b, -f) \\ a_2(x'_a, y'_a, z'_a) & \\ b_2(x'_b, y'_b, z'_b) & \end{aligned}$$

移動 [T, R] によって

$$\begin{aligned} (x_a^*, y_a^*, z_a^*) &= (x'_a, y'_a, -f) R^{-1} + T \\ (x_b^*, y_b^*, z_b^*) &= (x'_b, y'_b, -f) R^{-1} + T \\ \overrightarrow{O_2T} & \end{aligned}$$

という関係がある。

本研究では $T_y = 0$ 、 $T = (T_x, 0, T_z)$ しかも、Yaw角しか変わらない。

$$R^{-1} = \begin{vmatrix} \cos(yaw) & 0 & -\sin(yaw) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(yaw) & 0 & \cos(yaw) \end{vmatrix}$$

(Pitch角, roll角の微小なずれは傾斜センサで検出し、画像の補正により解決する)

それから、面 O_1AB の法線ベクトル \vec{n} は $\overrightarrow{O_1a_1}, \overrightarrow{O_1b_1}$ より得られる。

$$\begin{aligned} XO_1Y : \vec{n} &= \overrightarrow{O_1a_1} \times \overrightarrow{O_1b_1} \\ &= (f(y_b - y_a), f(x_a - x_b), (x_a y_b - y_a x_b)) \end{aligned}$$

従って、A点は次の連立方程式で求まる。

面 O_1AB の方程式 $\vec{n} \cdot \vec{x} = 0$

直線 O_2a_2A 方程式 $\vec{x} = \vec{T} + t(\overrightarrow{O_1a_2} - \vec{T})$

つまり $\vec{n} \cdot \vec{T} + t \vec{n} \cdot \overrightarrow{O_1a_2} = 0$

もし、 $\vec{n} \cdot \overrightarrow{O_2a_2} = \vec{n} \cdot R^{-1}[(x'_a, y'_a, -f)] \neq 0$ であれば

$$t = -\vec{n} \cdot \vec{T} / \vec{n} \cdot (x'_a, y'_a, -f) R^{-1}$$

\vec{A} が唯一に求められる。

$$\vec{A} = \vec{T} + t(\overrightarrow{O_1a_2} - \vec{T})$$

t を t_A で書くと

$$XO_1Y : (x_A, y_A, z_A)$$

$$= (T_x, 0, T_z) + t_A(x'_a, y'_a, -f) R^{-1}$$

$$X'O_2Y' : (x_A, y_A, z_A) = t_A(x'_a, y'_a, -f)$$

B点の位置は同様に求める。

条件 $\vec{n} \cdot \overrightarrow{O_2a_2} = 0$ はカメラが図10.に示す様に線分

L を通した平面 O_1AB と視平面との交線上で移動することで、この交線を線分 L の探索の“不確定軌跡”と名付ける。未完成モデルの中の重要な線分位置を計測するため、ロボットの移動はカメラ現在位置を通した“不確定軌跡”を避けることが望ましい。

面 $\vec{y} \cdot \vec{x} = 0$ に $\vec{x} = (t \cos \psi, 0, t \sin \psi)$ を代入すると

$$\begin{aligned} \psi \text{ (平行移動の避ける yaw 角度)} &= \\ \pi/2, -\pi/2 &\quad y_a = y_b \\ \arctan((x_a y_b - y_a x_b) / (y_a - y_b) f) &\quad y_a \neq y_b \end{aligned}$$

によって求まる。

視平面に近づくにつれて、計算された位置の精度が劣化し、視平面に載っている線分は求められないという問題点が残っている。

4. 自由領域の発見 及び移動計画

4.1 床面上線分の検出

床線分の抽出には、まず、一本の線分を追跡する際、線分上の点が床面にあると仮説を立てる^[6]。そして、視差の計算によって対応点の位置を予測し、その所での微分値、微分方向、また微分値はピークであるかどうかをチェックして仮定の正しさを検証する。もし、一本の線の上に80%以上の点が床面にあると断定されると、線分全体が床面にあると認める。ただし、水平に見える線分に対しては、端点が厳しくチェックされる。端点が床面にあることは判れば、線分は透視半平面と床面との交線にあり、その位置は唯一に決まる(図3のEFを参照する)。

カメラが水平に置かれると、床面は画面の下半分以内に写してあり、しかも、画面上の上方に行けばいくほど床が遠くなり、求めた位置が粗くなる。それゆえ、床線分の発見は画面下1/3の範囲内で行なう。(図12.を参照する)

4.2 自由領域の探索

従来の方法としては、3次元モデルを完全に決め、その得られた2次元マップの上に進行経路を決定することが多いが、3次元モデルが不確実な場合、相当な深度の歪があり、ナビゲーションは困難である。しかし、3次元空間を画面に投影すると、歪はそれほど大きくない。画面上で判断するのはより簡単である。本研究では確実な画面情報を利用してロボットの自由移動領域を発見する。

画面の線分を分類すると、床線分と床以外の線分と二種類ある。図11.に示す様に、ロボットが床面上の占める範囲を正方形(別の图形でもよい。例えば円とか)で囲む。この正方形を中心位置 A' によって画面上に投影する。投影されたロボットの境界 $r_1r_2, r_3r_4, r_5r_6, r_7r_8$ と画面線分と接触するかどうかが簡単にチ

ェックでき、実際に空間特徴とぶつかるかどうかを意味する。画面上で点 A によって位置された图形 $r_1r_2, r_2r_3, r_3r_4, r_4r_1$ を特徴と衝突することなく動かすと、一つの領域が見つかる。この領域が床面であるかどうかは移動中床線分と接触することによって証明される。

自由移動領域の発見方法は次の様に提案する。

1° 画面の下端(前地点で発見された自由領域に含まれる部分)を出発線とする。

2° ロボット中心点 A が出発線からスタートし、投影されたロボットの境界線が画面線分を越えない様に移動する。 A 点の移動によって一つの領域を得る。

3° 移動中床線分とぶつかったことがあれば(それを L_1, L_2, \dots, L_k と記述する。 $k > 0$)、この見つけた領域を自由移動できる領域とする。

4° $k > 0$ の場合、おのののの $L_i, (i \leq k)$ を越えて、以上2°からの過程を再帰的に繰り返す。

ステップ4°でロボットが床面上の模様やマークなどを踏み越える。

この方法は画像情報を2次元マップに変換するについて現れる大きい深度の歪に関する処理を避ける。そのほか、ロボットの图形を用いて領域を塗り潰す方法は、線分欠損のため領域が広がってしまう恐れがなく、不完全の線分に対して有効である。

物体が空中に浮いて、張り出すことはありうる。ロボットがそれと衝突することを防ぐために、床よりロボットの身長までの高さの範囲で、床以外の線分を床面に垂直に降ろして、再び画面に投影すると、以上述べたナビゲーションの方法を利用すれば、ロボットが障害物と空中でぶつかることのない様に保証できる。こういう線分端点の画面位置(x, y')は次の式で容易に計算できる。(図3.の中のC'D', A'B')

$$y' = y d / H$$

図1.の発見された自由領域は図12.に示す。床線分と検出されないため、自由領域と断定できない部分はあるが、近づけば検出できると考えられる。その他、床面の反射が強い場合には、処理が複雑になる。

4.3 移動計画の作成方針

図13.に示す様に自由領域の境界は床線分と接触して引かれたのと床以外の線分と接触して引かれたのと二種類の線で囲まれる。後者の場合に、ロボットがそこから通り抜けることができる可能性もあり、特にロボット图形の画面上での移動中、片側のエッジが垂直のオクルーディング線分と接触しながら3次元空間上遠く伸びていく境界は視野外の探索計画には手掛りになる。図13.に表示された様に、 L_1, L_2 はそれぞれ隠す線分 L_1 と、遠い線分 L_2 と接觸して引かれた境界で、進めそうな方向として選ばれる(図13.の方向1.と方向2.)。

移動計画の方針として、まず、自由領域の中で進め

そうな方向から(例えば図13.に方向1.方向2.)目的地の方向と一致する、または近い方向を選択する。もし選ばれた方向と現在の進行方向とほぼ同じとすれば、その方向にある位置の不確実な線分の"不確定軌跡"を避け、しかも、不確実な線分が次の位置での画像に入る様に移動距離を決める。割合に完全なモデルでは近所に不確実な線分が少なく、大幅前進できる。

最初の時点では3次元構造の未完成の部分があり、それを完成するため、数回の観測を渡るので、ロボットは最初に広い場所に置かなければいけない。

4.4 3次元モデルの解釈

抽出された線分によって面構造を作成する提案があるが、実際に求めるのに手間がかかり、しかも、単位として正確に検出されるものは予想ほど多くない。適応範囲は理想的なモデルに限る。本研究は3次元空間モデルを線分で記述する。従って、ロボットは空間中の線分に対する解釈を検討する必要がある。まず、以下の一般的な事実を述べる。

ロボットが計測する対象に近づくと近いほど対象の細かい部分が観測でき、三角測量で求めた位置も正確になる。

ロボットの進行中、いつでも前方方向に位置を確実に決めた線分があるかどうかを注目している。そういう線分がない場合、すべて周辺の線分に張り付いた"面"が存在すると解釈する。これは、後続の移動に危険を与えない。もし、こういう"壁"に微小な特徴があり、ロボットの近づくにより位置が"壁"と一致することが計測されると、この面の存在は強く証明される。一方、もしこの領域からより遠く広げ(例えば、ドア口、狭い通路)、単にロボットの現在位置より離れるため、細かい特徴が抽出できなかったり、または、対応がとれず、3次元位置が求まらない原因で、モデルのこの方向に空白である場合、ロボットの前進につれて、遠方の特徴が必ず現れ、仮定した面が存在しないと検証できる。近づいて特徴が依然として検出できない場合(画面上ではロボットのパターンが下から画面の中央まで線分と会えない)、前進を中止する。この様にロボットが空間中の線分を理解する。

4.5 世界モデルの逐次更新

システムの処理をまとめて表示すると、図14.の様になる。全体の処理は三つの流れに分けられており、並列処理が可能である。ロボットの完全な室内3次元モデルを構成するのに多くのメモリが必要とするので、現時点の近傍だけ具体的な3次元空間モデルを蓄積され、通り過ぎた所はより高いレベルで抽象的な記述によって表現される。3次元空間モデルはロボット中心座標系で表す。

5. 実験と検討

以上述べた方法について、室内局所位置での画像(図1.図5)を用いて実験した。画像の分析はSUN3ワークステーションの上に行った。画像のサイズは256×256、8ビットで、使ったCCDカメラはNECのTI-22Aである。

検討として、本研究に関する幾つかの考えを述べる。

(1) ロボットの環境認識及び理解は探索による漸次的な過程である。それに基づいてロボットが後続の観測を計画し、対象に関する新しい情報を獲得する。ロボット自身のより正確な移動量が推定でき、同時に環境モデルの構造とパラメータが更新される。この過程で、安全性は保障されているが、自由領域の少ない不完全モデルから、より広い自由領域を発見すべきである。この様に観測と移動と協同に行って、目的地へ進行するには能動的なシステムである。

(2) 画面情報を積極的に使えば、ナビゲーションに関する判断が容易になる。センサの分解能の限度のためユーリッド3次元空間で表現した3次元物体の形状の歪は、もしもそれが遠くにあると著しく現れる。これらの歪は画面上ではそれほど大きく現れず、またもともと画像上の情報は信頼できる。ナビゲーションには、絶対的な位置より相対的な位置関係が重要で、それは画面上で大抵保存されている。本研究では、画面情報によって自由領域を見つける方法を用い、移動後の画面シーンを予測した。

(3) 線分あるいは領域の様な幾何的な単位の画面の間の対応において、対応候補に対してなるべく多くの条件を利用し、しかも、単一の条件に拘らず、総合的に評価して、判断する方がよい。その結果、対応すべき候補が簡単に拒絶されなく、信頼性も高まる。本研究では競争行列を制御戦略として提案した。

問題点として、偽対応について、求めた線分の3次元位置は完全に間違いことがたまに生じる。それをステレオ画像ペアから得た位置と移動ステレオ画像シリーズから得た位置との制約によって発見し、"錯覚"として除去すべきである。それから、画面の中央に近い水平線分の3次元空間内の位置は、その端点の位置で決めるしかない。

6. 結論

本研究は室内シーンに対して、ステレオ法を用いて3次元構造を計測した。移動ロボットが与えられた目的地へ移動しながら次々に3次元空間の観測を行ない、環境を理解するナビゲーションシステムの作成を試みた。すでに完成したことは、

(1) ステレオ画像を線分ベースで対応し、位置の確実な線分を求める。

(2) 不完全モデルに対して、画面の床特徴によって、自由領域が発見できる。

(3) シーンの予測により移動前後の画像対応ができる、ロボット移動後の正確な位置が推測できる。それによって、不確実の線分位置を計算し、モデルを修正して、更新する。

参考文献

- 1) Wallace, R., Stentz, A., Thorpe, C., and Moravec,H.,First results in robot road-following Proc. 9th IJCAI,pp.1089-1095, (1985)
- 2) Shafer, S. A., Stentz, A. and Thorpe, C. E., An architecture for sensor fusion in a mobile robot , Proc. IEEE Conf. Robotics & Automation , pp.2002-2011 (1986)
- 3) de Saint Vincent, A. R., A 3D perception system for the mobile robot HILARE, Proc. IEEE Conf. Robotics & Automation,pp.1105-1111 (1986)

4) Faugeras, O. D., Ayache, N. and Gaverjon,B., Building visual maps by combining noisy stereo measurements, Proc.IEEE Conf. Robotics & Automation , pp.1433-1438 (1986)

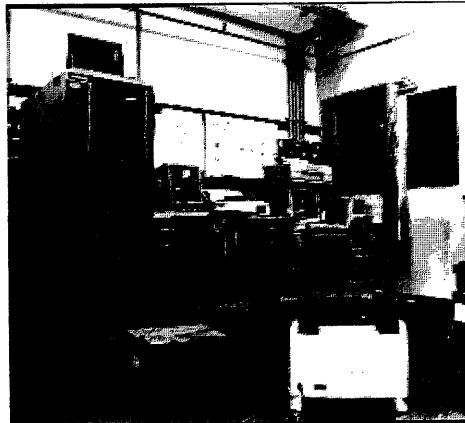
5) Liu,Y.C., Huang, T. S., Estimation of rigid body motion using straight line correspondences: Further Results ,Proc. IEEE Conf. Robotics & Automation , pp.306-309 (1986)

6) Tsuji, S., Zheng, J. Y. and Asada, M.,Stereo vision of a mobile robot:World constraints for image matching and interpretation,Proc. IEEE Conf. Robotics & Automation ,pp.1594-1599 (1986)

7) Brooks,R. A.,Visual map making for a mobile robot,Proc. IEEE Conf. Robotics & Automation, pp.824-829 (1985).

8) Brooks,R.A.,A robust layered control system for a mobile robot, IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol.RA-2,NO.1,pp.14-23 MARCH 1986

9) Lin, Z. C., Lee, H. and Huang, T. S.,Finding 3-D point correspondences in motion estimation , Proc. 8th ICPR,pp.303-305 (1986)

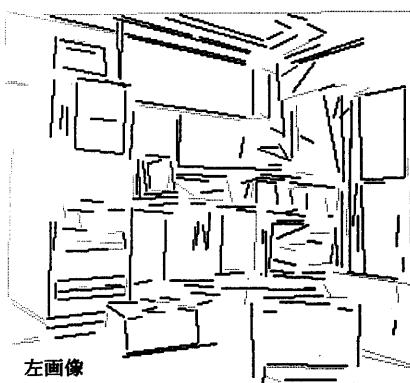


左画像

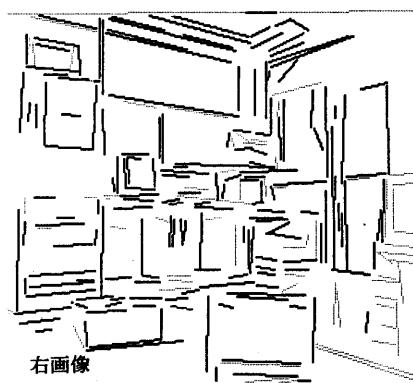


右画像

図1. 入力されたステレオ画像



左画像



右画像

図2. 線分対応の結果
(実線は対応された線分、
点線は対応されない線分
を示す)

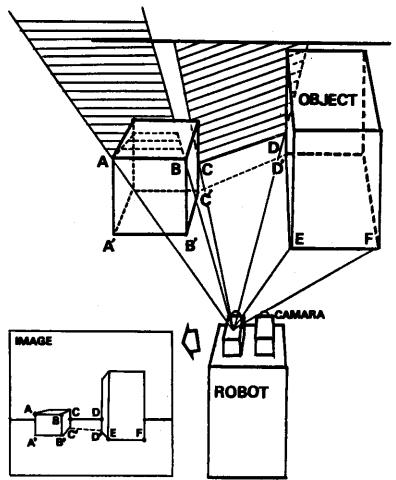
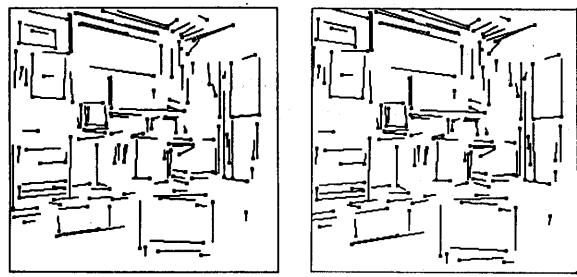


図3. 水平線分位置の不確定性



10cm前進 20cm前進

50cm前進 1m前進

図4. 次の位置で現れるシーンの予測

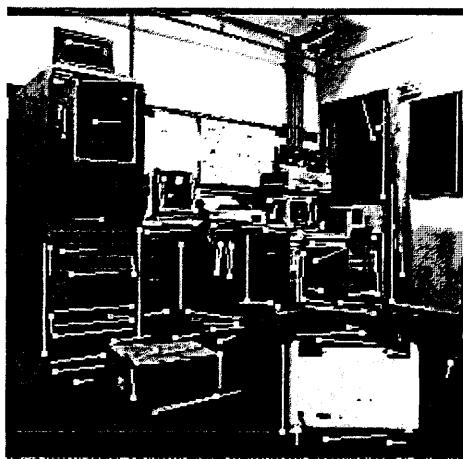


図5. 予想された線分と実際のシーンとの重なる
指令した移動は (-20cm, 0, -20cm, 0°)

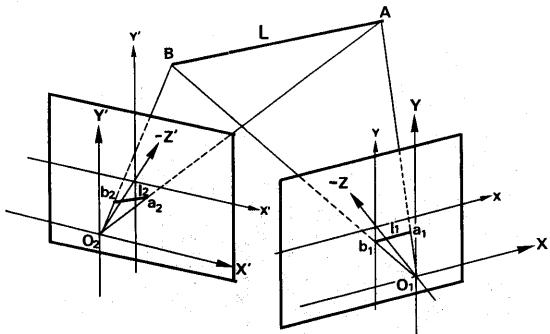


図9. 不確実線分の位置の算出原理



図6. 移動前後の線分対応

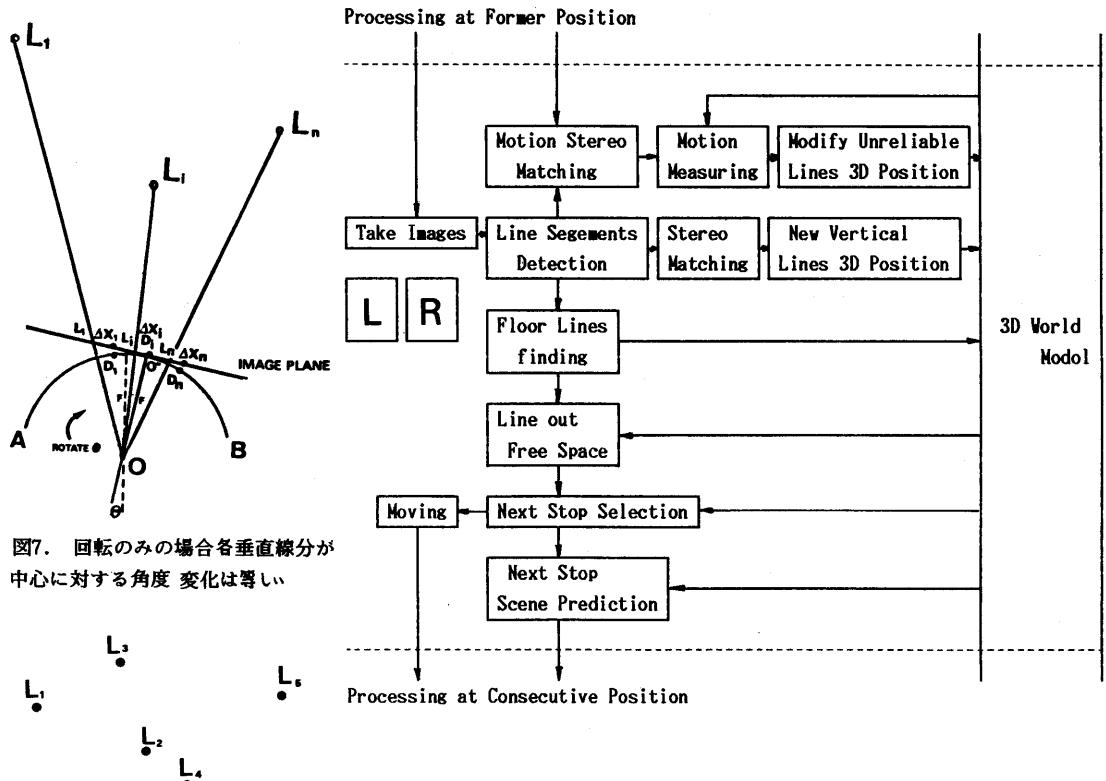


図7. 回転のみの場合各垂直線分が
中心に対する角度変化は等しい

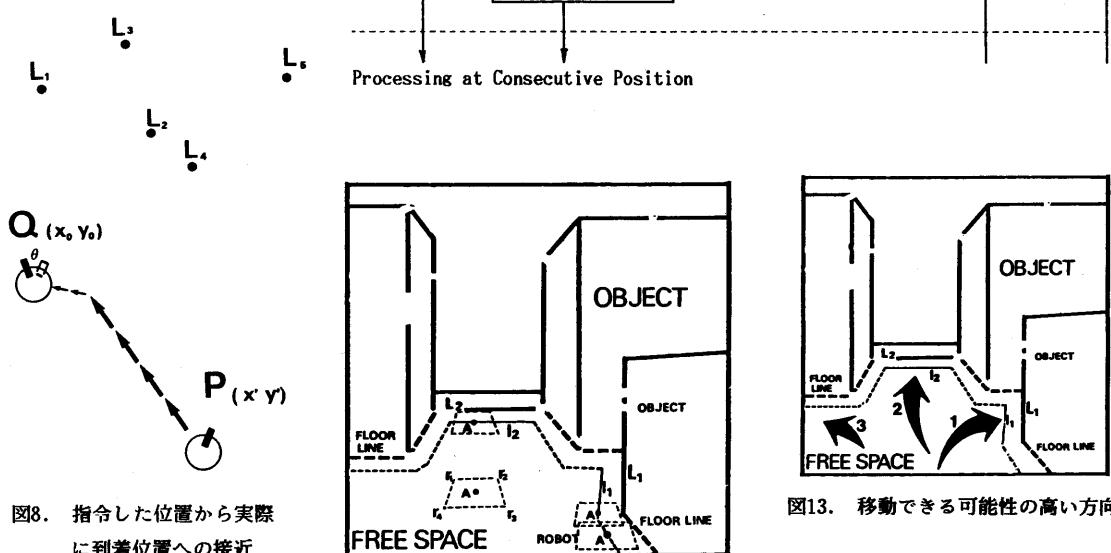


図8. 指令した位置から実際
に到着位置への接近

