

# 動画像を用いた移動ロボットの環境認識

## DYNAMIC SCENE ANALYSIS FOR A MOBILE ROBOT IN A MAN-MADE ENVIRONMENT

八木 康史 浅田 稔 谷内田 正彦 辻 三郎

Yasushi YAGI Minoru ASADA Masahiko YACHIDA Saburo TSUJI

大阪大学 基礎工学部

Department of Control Engineering, Osaka University

**ABSTRACT** Analysis of scene viewed continuously from a robot moving in a man-made environment, such as a building or a plant, yields useful information for the navigation. The knowledge on the environment, richness of the scene in vertical edges and the flatness of the floor, is arranged in constraints for the dynamic scene analysis. The rotational component of camera motion is estimated first from image points invariant from translation. After compensating for movements by the rotation between the consecutive images, the foci of expansion of translational motion of both the robot and moving objects are determined.

### 1. はじめに

近年、視覚を有する移動ロボットの研究は盛んに行なわれている<sup>1)2)</sup>。従来の研究においては、移動ロボットは停止して画像を入力し、ロボット自身が持つ世界モデルと照合し、移動のための情報を得た。しかしこれでは能率が悪く連続的にシーンを観測しながら移動することが必要である。

動画像から得られるオプティカル・フローを用いてカメラの位置及び運動情報を得る試みは、Prazdny<sup>3)</sup>やBruss and Horn<sup>4)</sup>などにより理論的には研究されて来た。しかし実際のシーンで時々刻々と入力される画像から正確なオプティカル・フローを抽出するのは困難で、実シーンへの応用はほとんど行なわれていない。また、これらの解析法は静止環境を前提としており、動物体を含むシーンには適用出来ない。そこで本研究では建物についての知識を利用して入力動画像から運動及び位置情報を得る方法を提案する。

連続画像から5つの運動パラメータを同時に計算するのは困難である。そこで本研究では環境を建物内の廊下とし、この前提条件から5つの運動パラメータを、回転成分と並進成分に分割し逐次求めた。

回転成分は消失点、無限遠点などの並進成分の影響を受けない点を利用して求める。並進運動から得られる動きの無限遠点<sup>4)</sup>(以下F.O.E.と略記)と移動距離などの情報から、並進運動を求める。

環境内に動物体を含む場合は、ロボット自身も動いているため背景と動物体を分離することは困難である。しかし環境の背景である廊下の壁のオプティカル・フローのパターンは推定できる。そこで動物体とロボットとの相対速度が大きい

場合は、オプティカル・フローの相対的な大きさを比較することにより動物体を背景から分離し、移動ロボットの行動に必要な情報を得る。本手法は具体的数値で表現された幾何モデルを利用せず、多くの廊下で成立する性質のみを利用してため汎用性がある。

### 2. システム構成

#### 2.1 前提条件

従来の移動ロボットの視覚システムでは、環境内の詳細な構造及び幾何学的位置関係を持った世界モデルを用いて、モデルとイメージを照合して環境認識するものが多かった。しかし、この方法では環境の変化に伴いモデルを作成し直す必要性があった。そこで本方法ではロボットが環境内を行動する上で幾何学的な世界モデルを用いるのではなく、環境内で一般によく見られる情報を用いることで汎用性をもたせた。そのためにロボットの移動空間は、人工の環境、例えば建物内の廊下とし、次の2つのことを画像解析の上での前提条件とした。

- 1) 廊下の壁は平面であり床に垂直である  
床と壁の境界などに現れる水平エッジは、画像中では短く抽出が困難である。垂直エッジは柱が沢山あり容易に検出できる。また環境の背景をなす壁の特徴点のオプティカル・フローのパターンを予め計算することができる。
- 2) 床はほぼ平坦である  
床が平坦なのでカメラの高さは変化しないと仮定できる。カメラの画像は移動の時に生じる振動によって揺れるが、この影響は振動に伴うカメラの回転によるものである。

## 2. 2機器の構成

本システムのハードウェア構成を図2.1に示す。移動ロボットとして、Heath社のHERO1ロボットを使用し、アームの代わりにTVカメラを取り付けている。このロボットは三輪で、前輪が駆動及び操舵の役目をはたしている。MC6808をCPUとし、内部センサとして音、光、距離、Motionの各センサ及び前輪にエンコーダが付いている。ロボット自身での高度な制御は困難である。そこで現在ロボットの制御はCPUがMC6809の8bitパソコンから、OS-9BASICを用いて行なっている。前輪のエンコーダから、ロボットの移動量は計測できる。しかし、前輪を真直ぐにする命令を与えても直進せず、円弧を描くため、正確に移動方向を得ることは出来ない。

ロボットの移動中にTVカメラから得た連続画像は、画像入力装置EDEC1181を介して256×256点、各点8ビットのデジタル画像となり、CPUi8086の16ビットパソコンにより処理される。現在のところ、連続画像として8枚の画像を使っている。画像処理はCP/MをOSとするパスカル言語PASCAL/MT+86及びアセンブラ言語ASMT-86を用いて行ないアイデアの有効性を確かめた。

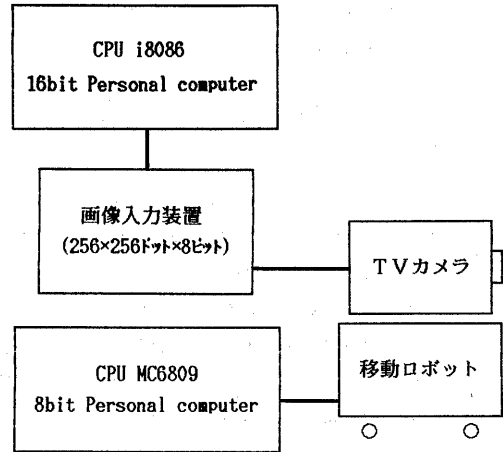


図2.1 ハードウェア構成

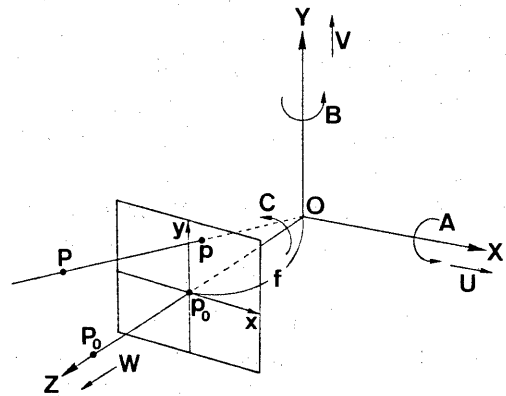


図3.1 運動パラメータ

## 3. カメラ移動と環境の推定

### 3. 1 基本式

基本原理を述べる前に3次元空間を表現するための運動パラメータを図3.1を用いて説明する。

z方向をカメラの光軸方向とするカメラに固定した0-XYZ 3次元座標系を考える。原点0をレンズ中心とし、xy平面に平行で点 $P_0$ を通る面を画像面とした時、各XYZ方向への並進運動速度成分 $T=(U,V,W)^T$ 、各軸回りの回転角速度 $\omega=(A,B,C)^T$ 、焦点距離がカメラ・パラメータである。また各xyz軸回りの回転角をpitch,yaw,rollとする。

移動によって変化するカメラ・パラメータ、即ち運動パラメータは、並進運動の速度成分の比 $(U/W,V/W)$ 、及び回転成分 $\omega=(A,B,C)^T$ とし、焦点距離 $f$ は既知量とする。又、初期状態としてカメラは廊下の無限遠点の方向を向いているので、回転角yaw,pitch,rollは回転変位に等しい。実際には前提条件により、上下方向の移動はないものとするため、 $V=0$ とする。

静止環境内のカメラの動きとオプティカル・フローの間には次式で示す関係がある<sup>3)</sup>。3次元空間内の1点 $P(X,Y,Z)$ を想定すれば、点 $P$ での速度ベクトル $(X',Y',Z')$ は、式(3.1)で表現される。

$$\begin{aligned} X' &= -U - BZ + CY \\ Y' &= -V - CX + AZ \dots\dots\dots (3.1) \\ Z' &= -W - AY + BX \end{aligned}$$

故に、点 $P(x,y)$ でのオプティカルフロー $(u,v)=(x',y')$ は式(3.2)で表現される。

$$\begin{aligned} u &= (-fU/Z) - fB + Cy - x(-W/Z) - (Ay/f) + (Bx/f) \\ v &= (-fV/Z) - Cx + fA - y(-W/Z) - (Ay/f) + (Bx/f) \\ &\dots\dots (3.2) \end{aligned}$$

画像中の5点での正確なフローベクトルが得られれば、5つの運動パラメータ $A,B,C,U/W,V/W$ は(3.2)式より導出できる。BrussとHorn<sup>4)</sup>は $f=1$

としてこれらの方程式を最小二乗法を用いて求める方法を提案した。しかし、実際に測定されたオブティカル・フローは多くの誤差を含むため精度が悪く、運動パラメータを同時に求めることは困難な場合が多い。更にこれらの方法は静止環境を前提としているので、動物体を含む場合には適用できない。

そこで人工の環境内を移動ロボットが動く時、その環境内の一般的特徴及び移動ロボットの内部センサからの情報を利用して、この問題を解決する方法を考えた。

本方法では運動パラメータを回転成分と並進成分に分け別々に求める。回転成分はその影響を受けない点を利用することで、また並進成分は動きの無限遠点(F.O.E.)を利用して求めた。

回転成分が決定されれば、残りは並進成分だけとなり(3.2)式は次式の様に表せる。

$$\begin{aligned} u_t &= (-fU + xW)/Z \dots\dots (3.3) \\ v_t &= (-fV + yW)/Z \end{aligned}$$

またF.O.E.の座標( $X_F, Y_F$ )は式(3.4)によって表現される。

$$\begin{aligned} X_F &= fU/W \dots\dots (3.4) \\ Y_F &= fV/W \end{aligned}$$

### 3.2 オプティカル・フローの算出法

同時に全ての運動パラメータを求めるのは困難である。そこで本研究では、垂直エッジとオブティカル・フローの情報を利用して運動パラメータを回転成分と並進成分に分割して求める。

入力された8枚の連続画像(図3.2)に対し、空間微分を行ない、エッジ強度とエッジ方向を求める。ここでは空間微分として3×3のSobelオペレータ<sup>5)</sup>を用いている。

次に空間微分により得られたエッジ画像からシーン内の垂直エッジを抽出する。初期状態としてカメラ座標系は廊下の座標系とほぼ一致している。ロボットの移動により、回転角が変化したとしても高々数度でありシーン中の垂直エッジは画像中でもほぼ垂直になる。このことを利用し空間微分により得られたエッジ方向画像からy軸に対し±9度以下の方向成分を持ち、しきい値以上の強度を持つ画素を抽出し、x座標に対してヒストグラムをとる。頻度がしきい値以上のクラ



図3.2 連続画像



図3.3 垂直エッジ抽出

スタアに対し、最小二乗法により、垂直エッジを抽出する。図3.3に抽出された垂直エッジを示す。

特徴点抽出方法としては高速化のため改良したMoravecのInterestオペレータ<sup>6)</sup>を用いた。

全画面を領域分割し、各領域内から最も値の大きなものから2点ずつ抽出した。領域分割は垂直方向に4分割し水平方向に対しては垂直エッジによって分割した。

次にInterestオペレータによって得られた特徴点を第8画面まで対応付けてオブティカル・フローを抽出した。即ちBarnea等<sup>7)</sup>によって提案されたS.S.D.A.(残差逐次検定法)を用い、11×11のマス

クサイズのウィンドウをテンプレートとして連続フレーム間で対応付けた。図3-4にこの方法で求められたオプティカル・フローを示す。

### 3. 3カメラ回転角の推定

画像中で並進成分の影響を受けない点として消失点<sup>8)</sup>がある。連続フレーム間で2つの消失点がわかれば、回転角は容易に決まる。そこでこの性質を利用し、回転角を求めることで運動パラメータの決定を簡略化した。

シーン内で最も強く特徴的な情報は垂直エッジである。廊下の画像から得られた垂直エッジの交点、即ちY軸方向の消失点は、並進成分及びyaw角には無関係であり、これらの位置からroll及びpitch角は一意に定まる。

消失点は全ての垂直エッジの組の交点をガウス球面上に射影することで求めた。図3.5に回転角roll, pitchと消失点の関係を示す。レンズ中心に原点Oを持ち画像面に平行な半径1のガウス球を考える。消失点は任意の2本の垂直エッジの交点P(x, y)とレンズ中心Oを結ぶ線分OPとガウス球との交点P'に射影される。画像面のy軸及び画像中心O'と消失点Pを結ぶ線分とO'Pとのなす角がroll角であり、pitch角は線分OPとO'Pのなす角である。

即ち、pitch角及びroll角は式(3.5)によって表現される。

$$\text{pitch angle} = f / (x^2 + y^2) y^{1/2} \dots (3.5)$$

$$\text{roll angle} = x / y$$

但し f(pixel):焦点距離

カメラのroll及びpitch角が0であれば、画像中で垂直エッジはy軸に平行に映り、消失点は無限大となりガウス球の両極Y'に来る。

実際には画像から得られた垂直エッジが誤差を含んでいるので、抽出された全ての垂直エッジは1点で交わらず、クラスターを形成する。このクラスターから誤差の大きな要因となっている垂直エッジを除去し消失点を決定する。図3.6-(a)には全ての垂直エッジから得られた交点から求めたpitch及びroll角の一例を示す。図3.6-(b)は、誤差の要因となった垂直エッジを除去した後の結果を示す。図3.7-(a), (b)は移動ロボットが0.3m/秒の速度で移動した時のpitch及びroll角の変化を示した。

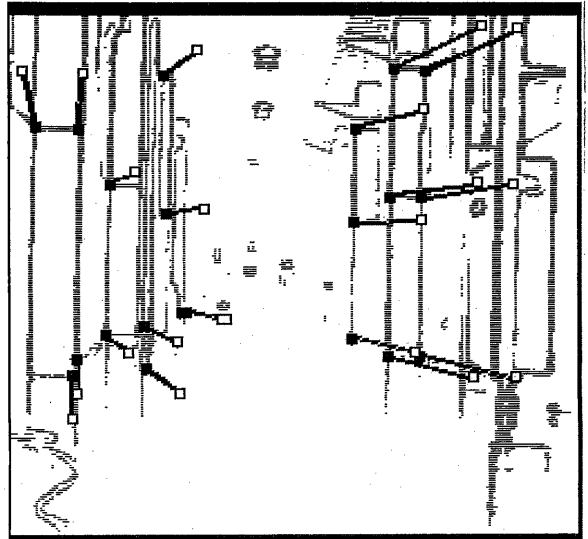


図3.4 オプティカル・フロー

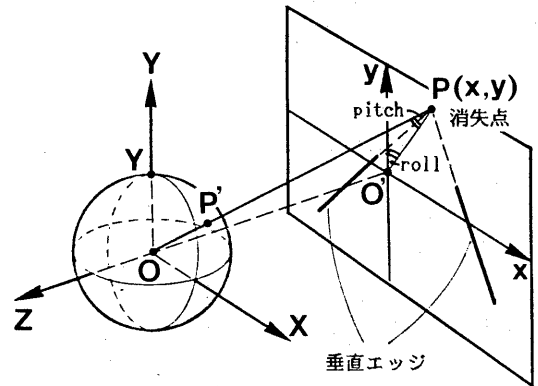


図3.5 roll, pitch角と消失点の関係

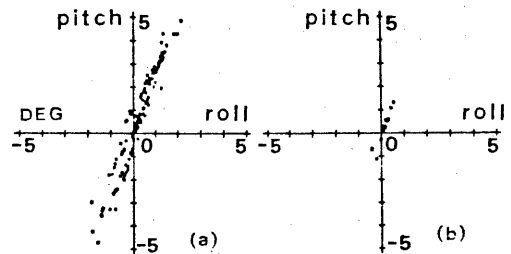


図3.6 roll, pitch平面

次に、シーン中で非常に遠くにある物体が画面中央付近にある場合、移動ロボットの並進成分の影響が少なく、回転成分のうちpitch, yaw角の変化によってこの物体のオプティカル・フローは生じる。シーンの水平エッジの消失点が抽出できればyaw角は決定できる。しかし、前述したように我々の画像では正確に位置決めすることが困難で

あった。そこで、次の方法を用いた。

移動ロボットは最初廊下に対しほぼZ軸方向(進行方向)を向いているため、画面の中央付近に無限遠点がある。もしも、そのような特徴点があると、そのx,yは非常に小さく、また回転角A,B,Cも小さいためu,vにはほぼ影響しない。よって(u,v)は式(3.6)で近似されるので,yaw,pitchが求められる。

$$u \sim -fB \dots\dots (3.6)$$

$$v \sim fA$$

しかし、画面中央付近で無限遠点近傍の特徴領域が発見できなかった場合、yaw角を独立に求めることはできない。そこでオプティカル・フローが並進成分のみから構成されている場合F.O.E.を形成することを利用し、yaw角を決める。即ち、Y軸回りの回転(左右の回転)を変化させて明確にF.O.E.を形成する様な角度をもってyaw角とし、その時の交点をF.O.E.とする。

実際には、ロボットは平坦な廊下を移動するため、ほぼ上下方向の移動はないものと考えられる。即ち、上下方向の並進成分Vはないものと評価でき、F.O.E.の一般式は式(3.7)で表現される。

$$\begin{aligned} X_F &= fU/W \\ Y_F &= fV/W \sim 0 \dots\dots (3.7) \end{aligned}$$

故にF.O.E.はx軸上で一点で交わる。

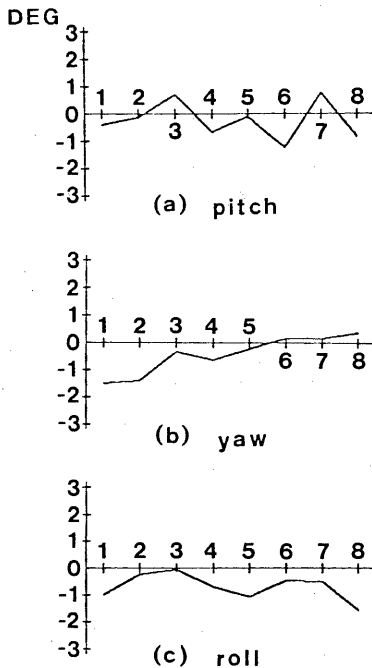


図3.7 連続フレーム間での回転角の変化

しかしオプティカル・フローは誤差を持っており、yaw角を変化させても1点で交わらず、クラスタを形成する。そこで、F.O.E.は各オプティカル・フローとx軸の交点の平均からの偏差を評価基準とし求めた。偏差が最小になる時の回転角をyaw角とし、この時の交点の平均をF.O.E.とした。図3.8-(a)に連続画像から抽出されたオプティカル・フロー、図3.8-(b)にF.O.E.が決まった時のオプティカル・フローを示す。

### 3.4 並進成分と環境の推定

回転成分が決まれば、オプティカル・フローから回転成分を除去することでF.O.E.が形成され並進成分の速度比(U/W,V/W)が決まる。ここでひとつの量(例えば、ロボットの移動量又は廊下の幅など)を与えれば、並進成分(U,V,W)は定まる。前輪のエンコーダからロボットの移動量Lが計算できる。又特徴点の3次元位置も容易に計算できる。

### 4. 動物体と障害物の検出

動物体や障害物が環境内にあらわれた場合、5つの運動パラメータを求めるのは困難である。なぜなら回転角のうちpitch,roll角は垂直エッジの情報から消失点を利用し求められるが、動物体や障害物によってyaw角の決定に必要な無限遠点近傍がしばしば隠される恐れがあるからである。また明確にF.O.E.が形成される様に回転角yawを定める方法も、動物体を含む場合にはそのオプティカル・フローの影響で、正確なF.O.E.を求めることが難しい。そこで動物体と背景のフローベクトルの差に着目して、動物体の検出をする。同じx

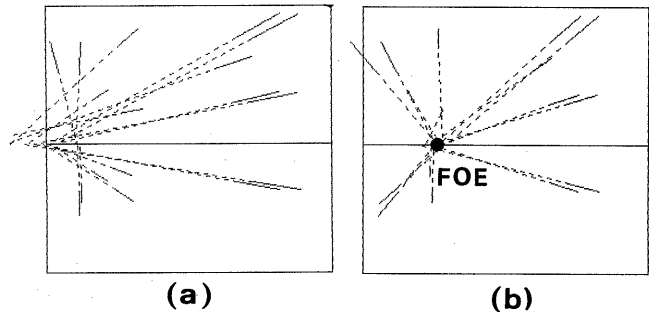


図3.8 オプティカル・フロー

座標を持つ動物体と背景のオプティカル・フローのu成分を考えると、yaw角によるu成分は同じであるが並進成分は異なる。廊下に移動物も障害物もない場合、垂直の壁のオプティカル・フローは、x座標の変化に伴い、uの大きさが突発的に変化することはなく、誤差も含めた帯状領域内にあることが証明できる。このことを利用し、x座標がほとんど等しい特徴点に比べてuが大きく異なる場合は異なった運動をしているものとして分離する。ここで画像内の動物体の特徴点の個数は背景に対し少ない。それ故、分けられた2つのグループに対し、特徴点の数から動物体と背景を区別する。その一例として図4.1に連続画像を示す。また図4.2にx-u平面を、図4.3に検出された結果を示す。

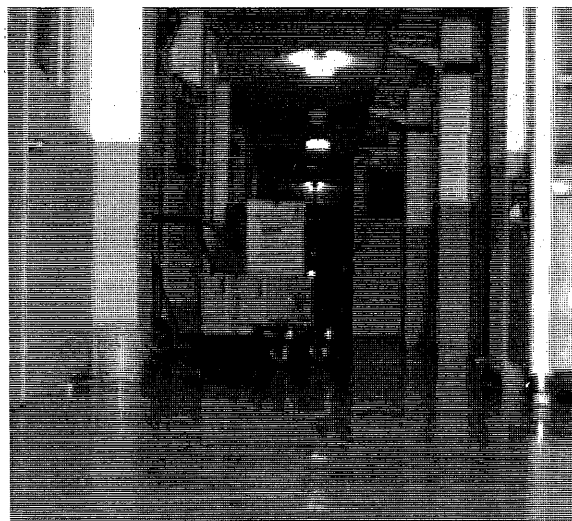


図4.1 連続画像(移動物体を含む)

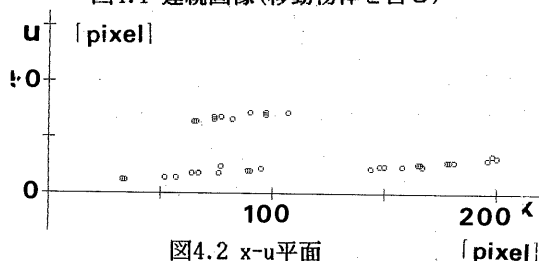


図4.2 x-u平面

参考文献

5. おわりに  
本研究は、移動ロボットのTVカメラから得られる連続画像を解析し、位置・運動情報を得る一手法を提案した。

今まで理論的に行なわれて来たロボット誘導の視覚研究は、実環境では運動パラメータ決定が困難なためおこなわれていなかったが、本システムでは建物の環境を対称として、運動パラメータを分割し算出した。また動物体を含む環境では、ロボットに対して速度ベクトルの大きく異なる物体に対しては動物体の検出を行なえた。

なお本研究は文部省科学研究費58420031の補助を受けた。

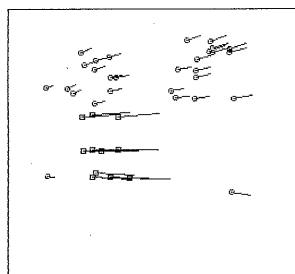


図4.3 動物体の検出

- 1) S.Tsuji, "Monitoring of a building environment by a mobile robot", Proc. of 2nd ISRR, Kyoto, 1984.
- 2) M.Yachida, T.Ichinose and S.Tsuji, "Model-guided monitoring of a building environment by a mobile robot", Proc. of 8th IJCAI, pp.1125-1127, 1983.
- 3) K.Prazdny, "Determining instantaneous direction of motion from optical flow generated by a curvilinearly moving observer", CGIP, Vol.17, pp.238-23, 1981.
- 4) A.R.Bruss and B.K.P.Horn, "Passive navigation", CVGIP, Vol.21, no.1, pp.3-20, 1983.
- 3) K.Prazdny, "Determining instantaneous direction of motion from optical flow generated by a curvilinearly moving observer", CGIP, Vol.17, pp.238-23, 1981.
- 5) R.O.Duda and P.E.Hart, "Pattern Classification and Scene Analysis", Wiley, pp.267-272, 1971.
- 6) H.P.Moravec, "The Stanford Cart and The CMU Rover", Proc. IEEE, Vol.71, no.7, pp.872-884, 1983.
- 7) D.I.Barnea and H.F.Silverman, "A class of algorithms for fast digital image registration", IEEE. Trans., vol.C-21, pp.179-186, Feb. 1972.
- 8) M.J.Magee and J.K.Aggarwal, "Determining vanishing points from perspective images", CVGIP, Vol.26, pp.256-267, 1984.