

サインパターンによる移動ロボットの誘導法

山梨大学工学部 西川和弘 石黒浩 森英雄

概要

視覚移動ロボットの誘導方法として、サインパターンの概念と、サインパターンを環境中から検出するための画像処理手法について提案する。サインパターンは、環境を特徴付ける視覚的パターンである。ロボットはサインパターンを認識して、それと対応する定型行動を実行することで移動する。このようにロボットはサインパターンの探索や選択、追跡を繰り返すことで、屋外環境を移動することができる。サインパターンの機能としては(1)道路追跡、(2)カメラ姿勢の制御、(3)目標物への移動、の3つがある。本論では(1)、(2)の機能について述べる。

MOBILE ROBOT NAVIGATION BY VISUAL SIGN PATTERNS

Kazuhiro NISHIKAWA, Hiroshi ISHIGURO and Hideo MORI

Department of Electrical Engineering and Computer Science

Yamanashi University

Abstract

This paper presents a new concept of *sign pattern* which is visual pattern characterizing the environment and resulting stereotyped robot action. In other words, the sign pattern is a key activating the robot reactive action. The robot moves on the road by detecting and following the sign patterns. The sign patterns are used in three functions for the mobile robot navigation. (1) Road following. (2) Controlling the camera position and (3) Approaching targets. In this paper, we describe the new concept of the sign pattern and image processing for detecting and following the sign pattern.

1. はじめに

視覚移動ロボットの研究¹⁾²⁾³⁾は、ロボットを取り巻く環境によって以下の3つに分類できる。

- (A) 良く整備された環境 (室内など)
- (B) 整備された環境 (高速道路, 自動車道路など)
- (C) 自然環境 (荒野など)

(A)の環境下での研究は、ステレオ視や⁴⁾その他のセンサで環境構造を探索し、距離情報や環境に存在する拘束条件によって、環境の全体地図を生成することが主な目的である⁵⁾。これらの研究で、多くの場合は、床面が水平であること等の仮定を用いている。

(B)の環境下での主な研究の目的は道路追跡である。道路には白線や道路領域と非道路領域のエッジが存在し、ロボットは、それらをカメラ画像から、検出する事で車体を制御し、道路に沿って移動する²⁾。一般的に、これらの研究では、ロボットが明白な道路モデルを持っており、道路はカメラ画像に投影されるともとの、仮定している。つまり、ロボットは道路を探す必要はなく、道路モデルを使って追跡している間は、道路を見失わないことにさえ注意を払えば良いのである。

(C)の環境下では、環境構造の解析のために、いかなる拘束条件も使うことができない。そのため、例えば高さ地図 (Height map) を生成し、ロボットが動作可能な経路を探さなければならない⁶⁾。

我々が対象としている環境は、(B)(C)の中間に位置する環境である (例 大学構内や街の歩道 (図1 (a))。このような環境をロボットが移動するには、ロボット自身が道路の探索、選択、追跡を繰り返して移動しなければならない。この環境下で、ロボットを自律的に移動させる戦略を確立することが研究の目標である。

我々は環境を特徴付けるものとしてサインパターン⁷⁾を提案する。サインパターンは環境中に存在する視覚的なパターンであり、これを探索、選択、追跡することによって、ロボットを制御することが可能である。サインパターンは、直接ロボットの定型行動と結びついている。ロボットが、サインパターンを検出すると、そのサインパターンに対応する定型行動が起動される。つまり、サインパターンはロボットの行動を引き起こす視覚的な誘因である。サインパターンはロボットの行動により以下の3つに分類できる。

- (A) 道路追跡
- (B) カメラ姿勢の制御
- (C) 目標物に向かっての移動

(A)の場合、道路に沿って存在する道路境界や直線などがサインパターンとなる。ロボットは、それらを追跡することで、道路に沿って走行することができる。サインパターンは自動車が行く道路とは、常に一致するものではない。サインパターンとなる直線は、環境内で、いたる所に存在するので、ロボットはサインパターンを切り替えたり、選択することによって自由に環境内を走行することができる。つまり、サインパターンは自動車のための道路ではなく、ロボットのための道路を示すものである。

(B)の機能は視覚移動ロボットにとって非常に重要である。ロボットが環境を的確に観察するためには、カメラを環境に対して適切な姿勢に保つことが必要である。もし、この機能が無いならば、ロボットは移動するために十分な視覚情報を得られないであろう。カメラ姿勢を検出するためのサインパターンは、環境中に存在する消失点と垂直直線である。消失点を検出することで、ロボットはカメラの光軸を道路環境と一定の角度に保つ事ができる (道路環境には、少なくとも2本以上の平行線が存在すると仮定する)。また、環境中の垂直直線を検出することで、カメラの光軸回りの回転角度が決定できる。この2つのパラメータでカメラの姿勢が決定できる。さらに消失点の画像中の水平方向の位置により、道路が延びている方位も検出できる。

(C)の場合にはロボットが目標物に向かって接近するとき、目標物の特徴がサインパターンとなる。例えば、色、輪郭、形状などである。これらの特徴を追跡することで、ロボットは移動することができる。

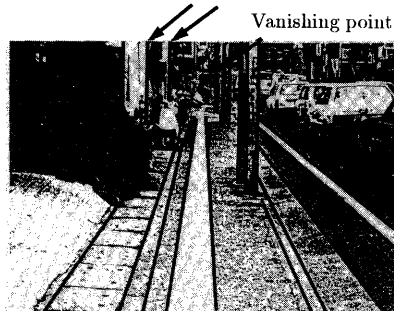
サインパターンの概念は、能動的視覚⁸⁾⁹⁾ (Active Vision) における注視のメカニズムに対する一つの答であると考えられる。能動的視覚の研究では、どのようにして注視点を決定するかという問題が、非常に重要ではあるが、この問題は未だ明白にされていない。本研究では、ロボットの注視をもたらず誘因としてサインパターンを提案する。

本論ではロボットが道路を探索し、追跡する場合のサインパターンの探索と選択の手法、消失点と垂直直線を利用したカメラ姿勢の検出の手法について述べる。

(a) Sidewalk



(b) Sign patterns Vertical lines



Straight lines on the ground

Fig. 1 Sign patterns in outdoor environment

2. 屋外環境のサインパターン

サインパターンは環境中に存在する視覚的なパターンでロボットの定型行動に直接に関係している。視覚情報に基づいて移動するロボットは、道路追跡、カメラ姿勢の制御、目標物への移動の定型行動が必要である。次節では道路追跡、カメラ姿勢の制御のサインパターンについて述べる。

2.1 道路追跡のためのサインパターン

道路追跡の場合、図1(b)のように道路に沿って存在する道路境界のエッジや直線がサインパターンとなる。これらは道路だけを示しているのではなく、ロボットが動くことができる全ての経路を示している。

自律運転システムの研究⁴⁾では、道路に沿って存在する道路境界のエッジや白線を追跡することで、道路追跡を行う。道路境界や白線は道路の一部であり、それらは道路自身ではない。ここで述べるサインパターンは、道路全体を示すものではなく、ロボットのための道路を特徴づけるものである。もし、直線が地面に存在するならば、自動車のための道路がなくても、ロボットはそれを探索、選択、追跡することによって移動できる。

ロボットが移動を始めるときには、TVカメラを水平方向に回転させて、サインパターンを探索する。TVカメラより得られた画像から、いくつかの直線を検出した後、ロボットは直線の位置と両側の色を参照し、1つ直線をサインパターンとして選択する。そして、そのサインパターンを追跡し、画像処理の結果を車体制御にフィードバックする。

移動ロボットのための道路は、サインパターンの組み合わせによって表現できる。2つのサインパターンの組み合わせは、以下の4つに分類できる(図10参照)。

- (1) 新たなサインパターンが発見できない
- (2) 直線

(3) カーブ

(4) コーナ

ロボットが追跡していたサインパターンの終端に到達したとき、移動を続けるために、他の新しいサインパターンを探索する必要がある。終端から新しいサインパターンが続いている場合には、サインパターンを切り換えて追跡していく。この場合、2つのサインパターンの組み合わせは、その間の角度により(2)、(3)、(4)の3つに分られる。

2.2 カメラ姿勢検出のサインパターン

視覚移動ロボットにとって、環境から必要十分な視覚情報を安定に得るためには、カメラ姿勢の制御は重要な機能である。カメラ姿勢の検出には、傾斜計やジャイロスコープなどのセンサが使用される。一方、TVカメラを通して得られる画像から直接にカメラ姿勢を検出する事もできる。この方法のメリットは、傾斜計などの重力座標系の測定値に対して、道路座標系に対するカメラ姿勢が検出できることである。カメラ姿勢は、次の α 、 β 、 γ の3つのパラメータで表される(図2参照)。

(1) カメラの光軸の垂直方向の傾き角度 α

(2) 道路が延びている方位 β

(3) カメラ光軸回りの回転角度 γ

一般的に、道路を含む画像の中には直線や複数の平行な直線が存在し、それらは消失点を持つ。図1(b)は環境中に存在する消失点の例を表している。画像中の消失点の位置を参照すれば、ロボットは道路に対してカメラ姿勢のパラメータ α 、 β を検出できる。

カメラ光軸回りの回転角度 γ を検出するためには、重力方向と同じ向きを持つ画像中の直線を参照する。一般的に、環境中には重力方向と同じ向きを持つ直線が多数存在する(図1(b)参照)。画像処理によって画像中からそれらを検出

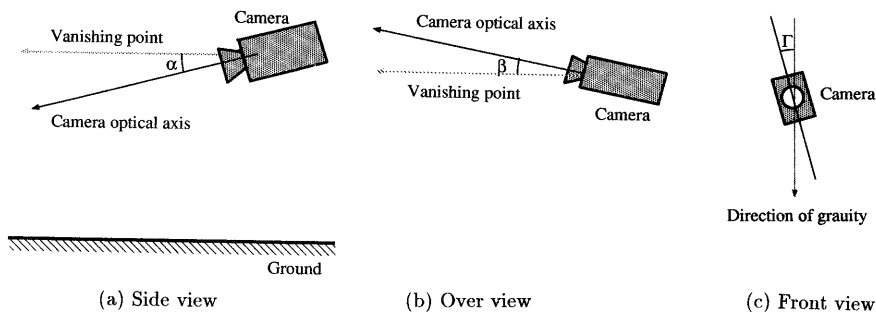


Fig. 2 Camera position

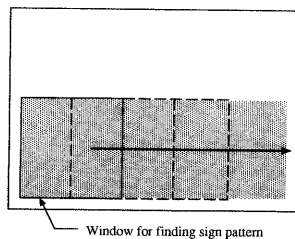


Fig. 3 Window action for detecting sign patterns

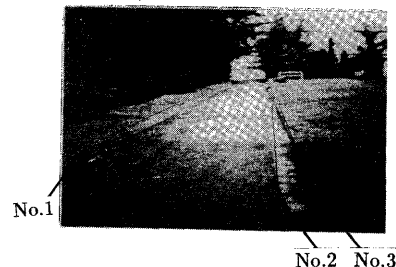


Fig. 4 Detected sign patterns

するのは容易である。また、角度 γ の制御には、傾斜計を用いることもできる。

画像から得られたカメラ姿勢のパラメータを参照することで、ロボットは道路に対してのカメラ姿勢を知ることができる。道路情報を得る適切なカメラ姿勢は、以下の式で表される

$$\alpha = K \quad (K : \text{constant value}) \quad (1)$$

$$\beta = 0 \quad (2)$$

$$\gamma = 0 \quad (3)$$

3. サインパターンの探索、追跡の画像処理

3.1 道路追跡のためのサインパターンの探索

ロボットは、動き始める前にサインパターンを探索する必

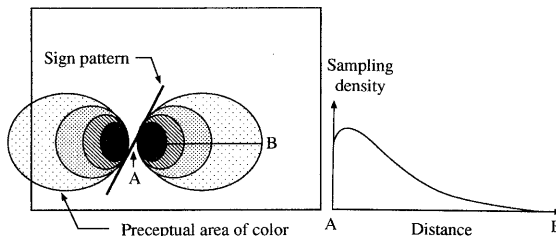


Fig. 5 Sampling method of color information

要がある。道路追跡のためのサインパターンは地面に横たわっている道路境界などの直線である。この直線は Hough 変換 (Hough transform) によって画像から検出する。Sobel エッジ検出オペレーター (Sobel operator) でエッジ点を得て、それぞれのエッジ点を、Hough パラメータ空間に変換する。Hough 変換で、画面座標系 (x, y) は以下のように表現される。

$$\rho = x \cos \theta + y \sin \theta \quad (4)$$

Hough 変換を安定に行うために以下の2つの点について工夫を施した。

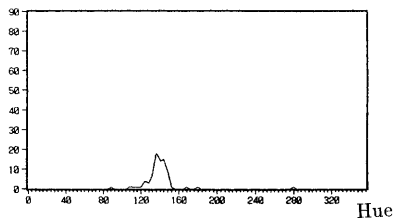
(1) Hough 変換を施すウィンドウの形

(2) パラメータ空間における粗密探索 (Coarse to fine)

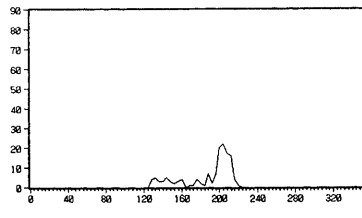
直線探索時の Hough 変換を施すウィンドウの形は画面上で図3のように正方形である。このウィンドウ内で直線を検出した後、ウィンドウを右方向にずらし、同様な処理を行う。これを画面右端まで繰り返す。この処理を施す領域は図3の網掛け領域である。このようにして直線を検出する理由は、網掛けの領域に一度に Hough 変換を施すと、水平方向に指向性が発生し、適切な直線の検出が難しくなるためである。

ウィンドウ内の微分画像に Hough 変換を施す際には、2通りの解像度を持つパラメータ空間を用いる。すなわち、最初に解像度が粗いパラメータ空間で直線を検出し、そのデータを基に解像度が細かいパラメータ空間で、正確に直線の位置を検出する。実験では粗いパラメータ空間の解像度は、角度 5 度、長さ 5 画素、密なパラメータ空間の解像度は、角度 1

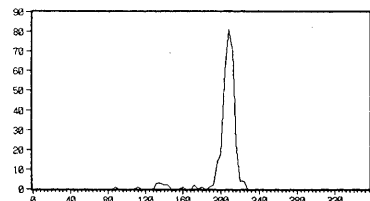
Number of pixel



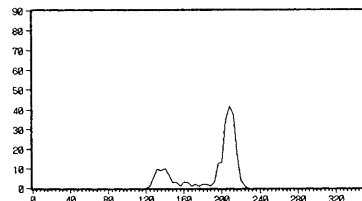
Left side of No.1



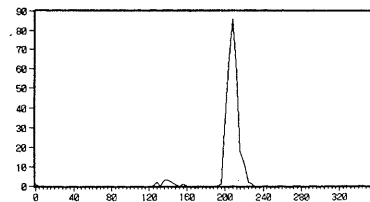
Right side of No.1



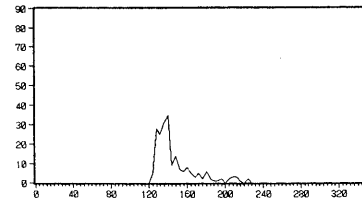
Left side of No.2



Right side of No.2



Left side of No.3



Right side of No.3

Fig. 6 Color information of sign patterns

度、長さ1画素である。図4は検出した直線を示している。サインパターンは以下の基準で選択する。

- (1) ロボットからのサインパターンの位置
- (2) サインパターンの両側の色

(1)については、サインパターンが地面に横たわっているとすれば、逆透視変換¹⁰⁾により容易に計算できる。(2)の両側の色を識別するために、画面上で図5(a)のようなデータ採取点の分布をとった。(網掛けの領域の色が濃いところほど密度が大きい)。密度とサインパターンからの距離の関係は図5(b)のグラフのようにサインパターンに近いほど密に、離れるほど粗にとっている。このようなデータ採取点を設定したのは、不安定な色情報による領域分割を嫌ったためである。図6では図4の検出された直線の両側の色のヒストグラムを示している。このヒストグラムを比較することで、サインパターン選択の基準とすることができる。

3.2 サインパターンの追跡

サインパターン選択の後、ロボットはサインパターンを追跡しながら移動する。追跡には、探索の時と同様にHough変換を使用する。探索時との相違点は、Hough変換を施す範囲である。追跡時の1シーンに要する処理時間は短くなるので、画面上のサインパターンの動きは微小になる。この仮定の基で、前のシーンで検出されたサインパターンの位置情報から、画面上での出現予測位置を設定すると、図7に示す台形の網掛け領域となる。この領域をいくつかの小さな矩形のウィンドウで近似し、直線を検出する。これらのウィンドウ内のエッジ点は、同一のHough変換のパラメータ空間に変換される。

図8は道路の右端にあるサインパターン追跡の画像である。この処理には1シーン、約1秒を要する。

3.3 道路追跡のためのサインパターンの切り替え

次に、ロボットがサインパターンの終端に至った際の、サインパターンの切り替えについて述べる。

終端を検出するために、サインパターンを追跡している処

理と同時に、上部5枚のウィンドウだけを用いた直線検出を行っている(図9参照)。この処理結果と全てのウィンドウを用いた処理結果を比較する。もし、これらの処理結果間で異なる直線が検出されたり、上部5枚のウィンドウで直線が検出されなかったならば、サインパターンの終端であると判断する。終端が検出できたならば、上部5枚のウィンドウの形を変えて、新しいサインパターンを探索する。もし、新しいサインパターンが発見できなければ、サインパターンが続いていないと判断し、3.1章で述べた手法で新しいサインパターンを探索する。サインパターンが検出された場合には、直線、カーブ、コーナの3つに分けられる(図10参照)。

先に定義したカーブを探索するためには、図11の網掛けの領域を上部5枚のウィンドウの配置を変えながら探索する。もし、上部5枚のウィンドウでサインパターンが発見されたならば、カーブであると判断する。図12では、カーブにおいて、新しいサインパターンを検出するための、処理過程を示している。

コーナを検出するためには、図13に示すように、サインパターンの終端の先に2つの矩形のウィンドウを配置し、サインパターンの終端から、画面上水平方向に延びる直線を探索する。図14は、コーナにおいて水平方向の直線を、探索した処理結果である。

3.4 カメラ姿勢安定のためのサインパターンの検出

カメラ姿勢を環境に対して一定に保つためには、カメラ姿勢を検出しなければならない。このために図1(b)に示す環境中に存在する消失点と、垂直直線を用いる。

消失点はHough変換を用いて検出する。まず最初に図15(a)に示す正方形のウィンドウ内にSobelオペレーターを施し、微分画像を得る。次にエッジ点をHoughパラメータ空間に変換する。Houghパラメータ空間から極大値がある閾値以上の全ての直線を取り出す。この処理をウィンドウを上下左右に移動しながら全画面の領域について行う。このような手法をとるのは、画面上で多数の直線セグメントを安定に検出する

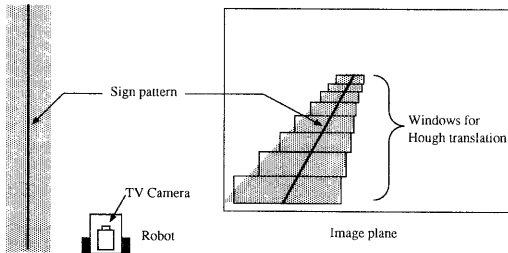


Fig. 7 Windows for following a sign pattern



Fig. 8 Image plane in following

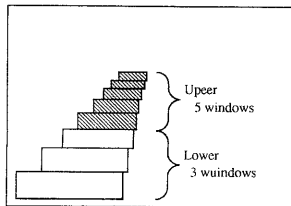


Fig. 9 Windows for finding end of the sign pattern

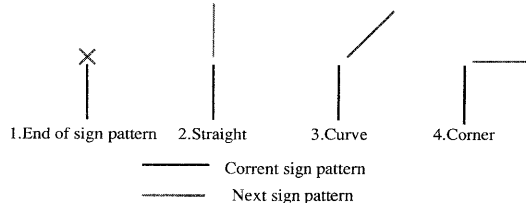


Fig. 10 Several kinds of the combinations

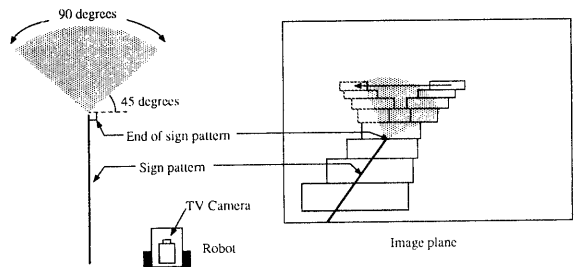


Fig. 11 Windows for finding new sign pattern at curve

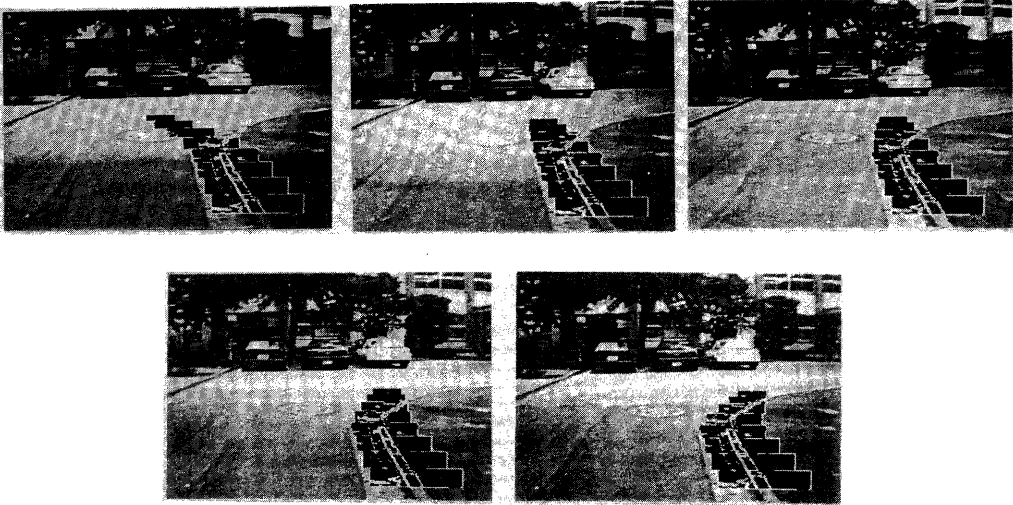


Fig. 12 Image sequence in finding new sign pattern

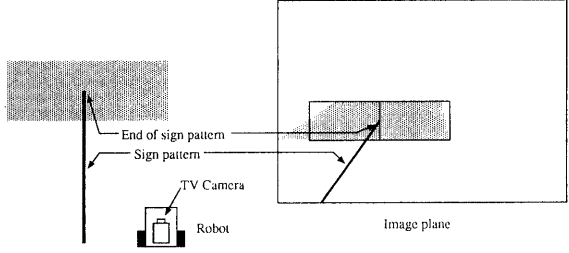
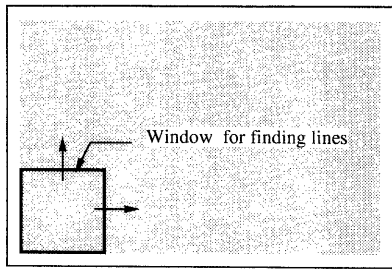


Fig. 13 Windows for finding new sign pattern at corner

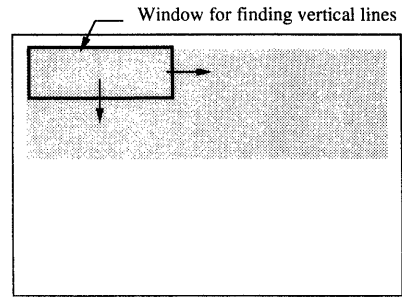


Fig. 14 Image sequence in finding new sign pattern



Area of image processing

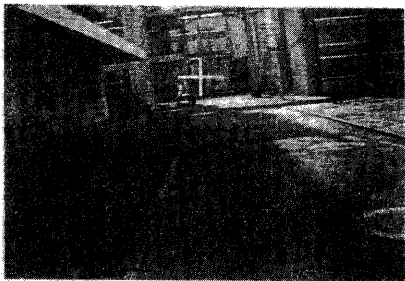
(a) Window action for detecting vanishing point



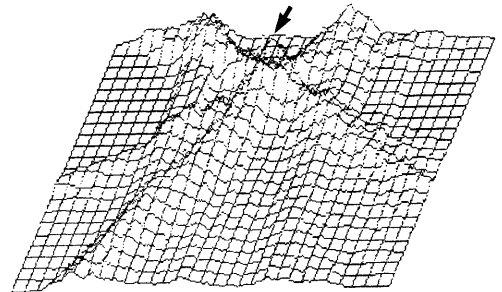
Area of image processing

(b) Window action for detecting vertical line segment

Fig. 15 Window for detecting sign pattern

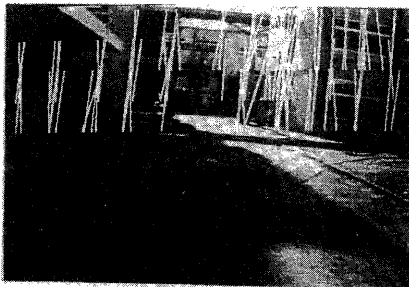


(a) Detected vertical lines

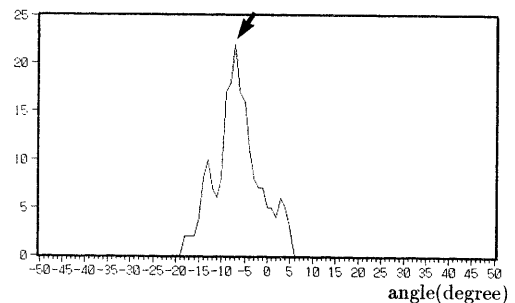


(b) Voting line segments onto the original image coordinate system

Fig. 16 Finding a vanishing point



(a) Detected vanishing point



(b) Angles of the vertical lines

Fig. 17 Finding vertical lines

ためである。次に、得られた全ての直線セグメントを、原画像と同一な画像座標空間に、直線として投影していく。この空間で、最も多くの直線が通過した点が、消失点となる。この消失点を検出するアルゴリズムは道路や通路が存在する環境では正確な結果を得ることができる。

図16(b)は、Hough変換で得られた直線セグメントを画像座標空間に投影した3次元グラフである。図9(a)の極大値の最大値は原画像(図16(b))に存在する複数の直線セグメントから生成された消失点の位置を表している。この場合、原画像の画素単位の精度で、消失点の位置が計算できる。

垂直直線の検出にもHough変換を用いる。図15(b)の

ような形のウィンドウを用いる。ウィンドウの垂直方向の幅を短くすることで、垂直方向の直線セグメントを正確に、多数検出できる。ウィンドウ内を微分した後、エッジ点にHough変換を施し、垂直線分を検出する。この処理をウィンドウを上下左右にずらしながら画面上部の領域に施す。検出された直線セグメントの傾きを参照することで、カメラ光軸回りの傾きが検出できる。図17(a)は得られた直線セグメントを示し、図17(b)は画像中の直線セグメントの傾きを表すヒストグラムである。このヒストグラムの極大値を検出することにより、カメラの光軸回りの回転角が決定できる。

4. まとめ

屋外環境下で走行する視覚移動ロボットのためのサインパターンの概念について述べた。サインパターンを用いることで、ロボットは道路の発見や、それに沿って移動、カメラ姿勢の制御が可能となる。

各々のサインパターンは移動ロボットの定型行動(対象に沿う移動や、向かう移動)に対応しており、ロボットは、サインパターンを発見、追跡することで動作する。

また、Hough変換に基づくこの手法は、直線によって構成されるサインパターンの探索、追跡に非常に頑強である。道路に沿って明白な白線が存在する、屋外環境下だけではなく、白線がない環境下でも適用できる。

現在、ロボットのシステムの構築を行っている。完成後は、サインパターンの概念に基づく戦略を用いて、実験を行う予定である。

参考文献

- 1): C. Thrope, et al.: "Vision and Navigation for the Carnegie-Mellon Navilab", IEEE Trans. Pattern Anal. and Mach. Intell., **PAMI-10**, No. 3, pp. 362-373 (1988).
- 2): E. D. Dickmanns and V. Grafte: "Applications of Dynamic Monocular Machine vision", Int. J. Machine Vision and Application, **1**, pp. 241-261 (1988).
- 3): A. Elfes: "Sonar-Based Real-World Mapping and Navigation", IEEE J. Robotics and Automation, **RA-3**, **3**, pp. 249-265 (1987).
- 4): N. Ayache and O. D. Faugers: "Building, Registrating and Fusing Non-sy Visual Maps", Proc. 1st Int. Conf. Computer Vision, pp. 73-82 (1987).
- 5): K. B. Sarachik: "Characterizing an Indoor Environment with a Mobile Robot and Uncalibrated Stereo", Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp. 984-989 (1989).
- 6): I. S. Kweon and T. Kanade: "High Resolution Terrain Map from Multiple Sensor Data", IEEE Int. Workshop Intell. Robots and Systems, pp. 127-134 (1990).
- 7): H. Mori, et al.: "A Mobile Robot Strategy Applied to Harunobu-4", Proc. 9th Int. Conf. Pattern Recognition, pp. 525-530 (1988).
- 8): J. Aloimonos, I. Weiss and A. Bandyopadhyay: "Active Vision", Proc. Image Understanding Workshop, pp. 522-573 (1987).
- 9): D. H. Ballard: "Reference Frames for Animate Vision", Proc. 11th Int. Joint Conf. Artif. Intell., pp. 1635-1641 (1989).
- 10): K. Storjohann, et al.: "Visual Obstacle Detection for Automatically Guided Vehicles", Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp. 761-766(1990).