

# 車の姿勢を考慮したハフ変換による車線検出

安達 栄輔<sup>†</sup> 鍋島 彰崇<sup>†</sup> 栗田多喜夫<sup>†</sup>

<sup>†</sup> 産業技術総合研究所 つくば中央第二 〒305-8568 茨城県つくば市梅園 1-1-1 中央第二  
E-mail: †{e-adachi,teru-nabeshima,takio-kurita}@aist.go.jp

あらまし 本論文では、車載カメラで撮影した画像から、車の姿勢を考慮したハフ変換を用いて車線を検出する手法を提案する。本手法では、カメラを載せた車の姿勢が道路平面に対して変化せず、前もって調節されていることを前提とする。走行している車線の方向は車の進行方向に対してほとんど変化しないと仮定し、パラメータ空間を一次元空間に設定する。これにより、安定にかつ少ないコストで車線を検出することができる。

キーワード 車線検出, ハフ変換, 交通, 直線検出, 車載カメラ

## Lane detection with the Hough transform that considers vehicle posture

Eisuke ADACHI<sup>†</sup>, Terutaka NABESHIMA<sup>†</sup>, and Takio KURITA<sup>†</sup>

<sup>†</sup> National Institute of Advanced Industrial Science and Technology Tsukuba Central 2, Umezono 1-1-1  
Tsukuba Central 2, Tsukuba-shi, Ibaraki-ken, 305-8568 Japan  
E-mail: †{e-adachi,teru-nabeshima,takio-kurita}@aist.go.jp

**Abstract** In this paper, we proposed a Hough based lane detection method in which lane boundaries are detected as lines on the road plane. In the proposed method we assume that the posture of the vehicle does not change relative to the road plane and can be adjusted in advance. Moreover, because the direction of a running lane is almost never changed, the parameter space can be reduced to one dimension. Therefore a lane boundary can be detected robustly and at low computation cost.

**Key words** Lane detection, Hough transform, Traffic application, Line detection, Car-mounted camera

### 1. ま え が き

車載カメラで撮影された画像上において車線を検出することは、交通の状況や車の位置を推定するための基本的な処理として重要である。近年、様々な車線検出手法が提案されている[1]~[7]。車線検出は、あるモデルを画像から得られたエッジ点や車線マーカーに当てはめることにより行われる。ここで、もしモデルが複雑な場合計算時間が増大し、検出された車線も不安定になる。また、多くの場合車の前後の近い領域においては、車線境界の形状は直線とみなせる。Parkら[6]は、車線境界の曲がり具合を検出する手法を提案したが、この手法では最初に車の前方近傍領域において車線境界の漸近線を検出する必要があった。McDonald[2]は、車線境界の消失点画像内である特定の領域内に収まるという仮定を用いることにより、直線モデルのパラメータ空間を制限したハフ変換を用いて車線境界を検出する手法を提案した。しかし、この方法ではあくまで二次元パラメータ空間上で行われるため、このままではメモリ資源が無駄になってしまう。

本論文では、ハフ変換を基本とした頑健でかつ低コストで実

現できる車線検出法を提案する。ここで、車載カメラの道路平面に対する姿勢は変化しないものとし、前もって調節されていると仮定する。また、車線は道路平面上の平行な直線として検出する。カメラを載せた車は車線に沿って走行するため、車の進行方向に対する車線の向きはある方向に制限できることから、ハフ変換においてパラメータ空間を分割するセル数を減少させることができる。

### 2. 車線のモデル

図1は、カメラと道路平面との位置・姿勢の関係を示す。カメラの焦点 $O$ を原点とした世界座標系を $(X, Y, Z)$ で表す。最初に、カメラの載った車の姿勢を表す三つの単位ベクトル $p, q, s$ を導入する。但し、ベクトル $p, q, s$ は互いに直交する。ベクトル $q$ は車の進行方向の逆向きであり、ベクトル $s$ は道路平面と直交する。また、道路平面上の座標系を $(x_r, y_r)$ で表す。但し、 $x_r$ 軸と $y_r$ 軸は、それぞれ単位ベクトル $p, q$ に平行とする。

車線は次式でモデル化する。

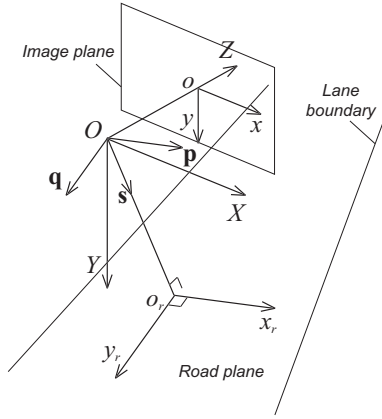


図1 座標系

Fig. 1 Coordinate systems.

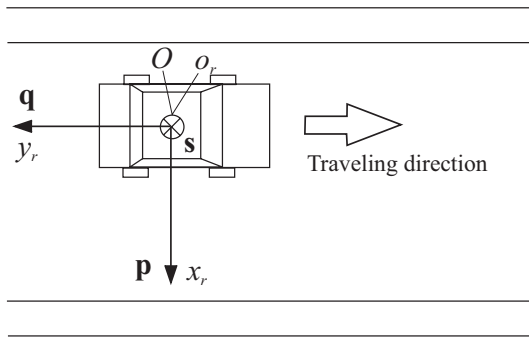


図2 道路平面上的座標系

Fig. 2 Coordinate systems of road plane.

$$\rho_r = x_r \cos \theta_r + y_r \sin \theta_r \quad (1)$$

但し,  $\rho_r$  は道路平面上的の原点  $o_r$  から車線境界までの距離,  $\theta_r$  は車線境界と  $x_r$  軸との間の角度を表す. 道路平面上的の位置  $(x_r, y_r)$  は, 画像上での座標  $(x, y)$  から次式を用いて一対一で対応付けられる.

$$\mathbf{x}_r = \frac{r}{s^T \mathbf{x}} Q^T \mathbf{x} \quad (2)$$

但し,  $\mathbf{x}_r = (x_r, y_r, r)^T$ ,  $\mathbf{x} = (x, y, f)^T$ ,  $r = \overline{Oo_r}$ ,  $f = \overline{Oo}$ ,  $Q = [\mathbf{p} \ \mathbf{q} \ \mathbf{s}]$  である.

### 3. 画像平面上的の直線と道路平面上的の直線の関係

画像平面上的の直線と道路平面上的の直線は, 一対一に対応する. この二つの直線は, ある平面がそれぞれ画像平面と道路平面に交わってできる直線として表現される. 直交座標系  $(X, Y, Z)$  で定義された任意の単位ベクトル  $\mathbf{n}$  は, 次のように表現できる.

$$\mathbf{n} = [\cos \theta \cos \phi, \sin \theta \cos \phi, -\sin \phi]^T \quad (3)$$

ここで, 画像平面上的の直線は,  $\mathbf{x}^T \mathbf{n} = 0$  という拘束式によって表現される. この拘束式は次のように展開できる.

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

但し,  $\rho = f \tan \phi$  である. 同様に, 直交座標系  $(\mathbf{p}, \mathbf{q}, \mathbf{s})$  において定義された任意の単位ベクトル  $\mathbf{n}_r$  も  $\phi_r, \theta_r$  で表現でき

る. 道路平面上的の直線は,  $\mathbf{x}_r^T \mathbf{n}_r = 0$  によって表現される. ここで,  $\rho_r = r \tan \phi_r$  と置くことにより, 式 (1) が導かれる.

単位ベクトル  $\mathbf{n}$ ,  $\mathbf{n}_r$  は, 次のような関係がある.

$$\mathbf{n}_r = Q^T \mathbf{n} \quad (5)$$

式 (5) から次式が導かれる.

$$\tan \theta = \frac{p_y \cos \theta_r + q_y \sin \theta_r - (s_y/r) \rho_r}{p_x \cos \theta_r + q_x \sin \theta_r - (s_x/r) \rho_r} \quad (6)$$

$$\rho = f \frac{(q_x - p_x \tan \theta_r) + (q_y - p_y \tan \theta_r) \tan \theta}{(q_z - p_z \tan \theta_r) \cos^{-1} \theta} \quad (7)$$

ここで, 式 (6), (7) は, 道路平面上的における車線境界のパラメータ  $(\rho_r, \theta_r)$  と画像面上における車線境界のパラメータ  $(\rho, \theta)$  との対応を表している.

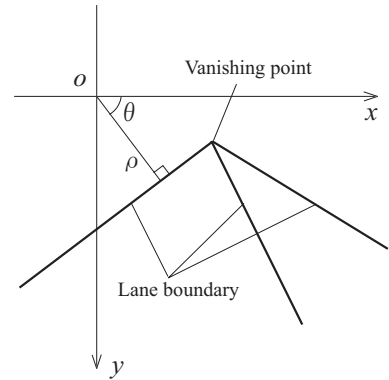


図3 画像面

Fig. 3 Image plane.

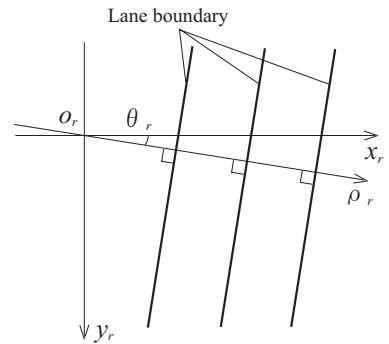


図4 道路平面

Fig. 4 Road plane.

### 4. ハフ変換

エッジ点  $(x_i, y_i)$  とその勾配方向  $\psi_i$  が画像から与えられたとする. 特徴量  $(x_i, y_i, \psi_i)$  からパラメータ  $(\rho_r, \theta_r)$  へのハフ変換は, 次式で表される.

$$H(\rho_r, \theta_r) = \sum_{i=1}^N p(\rho_r, \theta_r | x_i, y_i, \psi_i) \quad (8)$$

但し,  $N$  はエッジ点の数,  $p$  は確率分布密度関数である. ベイズの定理から次式が導かれる.

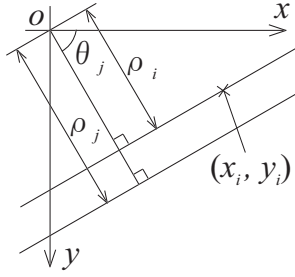


図5 手法 B  
Fig.5 Method B.

$$p(\rho_r, \theta_r | x_i, y_i, \psi_i) = \frac{p(x_i, y_i | \rho_r, \theta_r) p(\psi_i | \rho_r, \theta_r) p(\rho_r) p(\theta_r)}{p(x_i, y_i) p(\psi_i)} \quad (9)$$

但し、エッジ点の位置  $(x_i, y_i)$  と勾配方向  $\psi_i$ 、パラメータ  $\rho_r$  と  $\theta_r$  は、それぞれ独立であると仮定する。更に、 $p(x_i, y_i)$ 、及び  $p(\psi_i)$ 、 $p(\rho_r)$ 、 $p(\theta)$  は一様分布と仮定すると、次式が導かれる。

$$p(\rho_r, \theta_r | x_i, y_i, \psi_i) \propto p(x_i, y_i | \rho_r, \theta_r) p(\psi_i | \rho_r, \theta_r) \quad (10)$$

確率密度分布  $p(\psi_i | \rho_r, \theta_r)$  を平均値  $\theta(\rho_r, \theta_r)$ 、分散  $\sigma_\theta^2$  のガウス関数とみなす [7]。但し、 $\theta$  は式 (6) から計算される。一方、 $p(x_i, y_i | \rho_r, \theta_r)$  に関しては、次の二種類の手法を考える。

#### 4.1 手法 A

通常のハフ変換と同様に対応するセルに 1 を投票する。具体的には、次のようにする。まず、得られたエッジ点  $(x_i, y_i)$  から対応する道路平面上の座標  $(x_r^i, y_r^i)$  を式 (2) により算出する。セル  $j$  に対するエッジ  $i$  の確率密度分布を次式のように設定する。

$$p(x_i, y_i | \rho_r, \theta_r^j) = \begin{cases} 1 & (\rho_r \in \Omega_j) \\ 0 & (\rho_r \notin \Omega_j) \end{cases} \quad (11)$$

但し、 $\Omega_j$  はパラメータ空間中におけるセル  $j$  の存在する  $\rho_r$  の区間であり、 $\rho_r$  は次式により算出する。

$$\rho_r = x_r^i \cos \theta_r^j + y_r^i \sin \theta_r^j \quad (12)$$

但し、 $\theta_r^j$  はセル  $j$  の中心の  $\theta_r$  の値である。

#### 4.2 手法 B

セル  $j$  の中心のパラメータ値  $(\rho_r^j, \theta_r^j)$  に対応する画像平面上的直線から、エッジ点  $(x_i, y_i)$  がどれだけ離れているかによってそのセルに投票する重みを決定する。これにより、ばらつきのある点群に対しては“直線らしさ”が減少することになる。具体的には、エッジ点  $(x_i, y_i)$  における各セル  $j$  に対する重みは、変数  $\rho_i$ 、平均  $\rho_j$ 、分散  $\sigma_\rho^2$  のガウス分布に従って決定する。但し、 $\rho_i$  は次式により算出する。

$$\rho_i = x_i \cos \theta_j + y_i \sin \theta_j \quad (13)$$

また、セル  $j$  に対応する画像面上での直線のパラメータ  $(\rho_j, \theta_j)$  は、 $(\rho_r^j, \theta_r^j)$  から式 (6)、(7) を用いて算出する。分散  $\sigma_\rho^2$  は画像面において一定とする。

## 5. 提案するアルゴリズム

まず、カメラを載せた車の進行方向が車線の方向とほぼ等しいという仮定を置く。すなわち、道路平面上において  $\theta_r = 0$  に制限する。すると、パラメータ空間は  $\rho_r$  のみの一次元となる。

次に、与えられたエッジ点群に対してハフ変換を行う。パラメータ空間をいくつかのセルに分割し、それぞれに対してメモリを割り当てる。以下のように、全てのエッジ点においてパラメータ空間に対する投票を行う。エッジ点  $(x_i, y_i)$  とその勾配方向  $\psi_i$  が得られた時、式 (10) から計算される重みを対応するセルに加算する。ここで、 $p(\rho_r, \theta_r | x_i, y_i, \psi_i)$  はパラメータ空間において局所的に分布するため、もし全てのセルの値を計算すると計算資源が無駄になってしまう。そこで、投票を行う範囲を  $(-\Delta\rho \leq \rho < \Delta\rho)$  のように制限する。但し、 $\Delta\rho = -3\sigma_\rho$  とする。

車線境界は、 $H(\rho_r)$  のピークを探索することで検出する。注目しているセル  $j$  の投票値  $H(\rho_r^j)$  がその近傍セル  $(j - k \leq j < j + k)$  内で最大のとき、 $\rho_r^j$  をピークとみなす。このとき、 $\{\rho_r^j | H(\rho_r^j) > \lambda\}$  を満たさないセルに関しては、探索の領域から除外する。

## 6. 実験

### 6.1 テスト動画

テスト動画は高速道路を走行する車に載せたカメラから前方を撮影したものをを用いた。エッジを検出するために Canny のエッジ検出器を用いた。エッジの検出は前もって設定した“道路領域”に対して行った。図 6 は、幾つかのフレームにおけるエッジの検出結果を示す。但し、画像中の“黒”の領域はエッジ領域を示す。図の上段の画像は画像平面におけるエッジを示し、下段の画像は道路平面を真上から眺めたときのエッジ画像である。また、(a) から (d) までの各列は異なるフレームにおける結果である。

### 6.2 実験条件

提案アルゴリズムを 4. 節で説明した手法 A 及び手法 B の場合で実行した。パラメータ空間  $\rho_r/r \in [-10, 10]$  を 100 個のセルに分割した。パラメータ空間上でのピーク検出のための近傍領域は、 $5[\text{cell}]$  に設定した。また、 $H(\rho_r^j)$  に対する閾値は  $\lambda = 20$  とした。

提案手法に対する比較として、gradient weighted Hough transform (GWHT) [7] を同じ動画に適用した。GWHT は、画像平面において式 (4) のモデルに基づいて直線を検出する手法である。そのため、パラメータ空間の次元数は 2 である。パラメータ空間  $(\rho, \theta) \in [-200, 200] \times [-\pi/2, \pi/2] ([\text{pixel}] \times [\text{rad}])$  を  $100 \times 100$  個のセルに分割した。パラメータ空間上のピーク検出のための近傍領域は、 $5 \times 5 ([\text{cell}] \times [\text{cell}])$  とした。このとき、パラメータ空間において投票数が 20 未満の時、そのセルは探索から除外した。

### 6.3 実験結果

図 7 は、GWHT による直線の検出結果を原画像上に描いたものである。この図の (a) と (b) において、明らかに車線境界

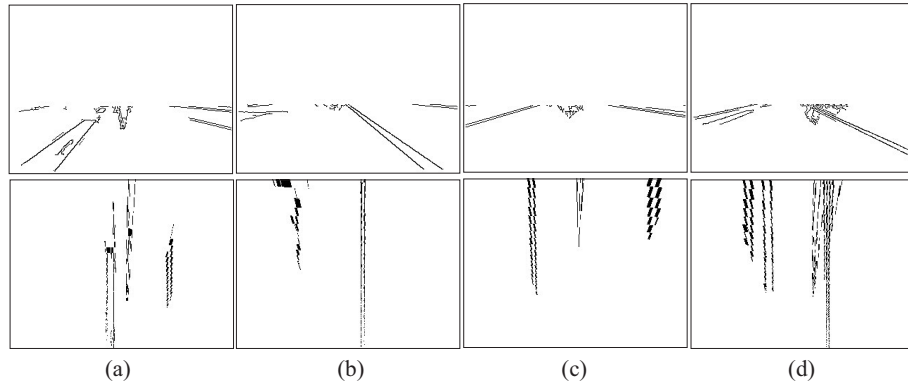


図 6 エッジ点：上段は画像平面におけるエッジ，下段は道路平面上におけるエッジを示す  
 Fig.6 Edge points: upper images show edges on the original image plane, and lower images show the edges on the road plane.

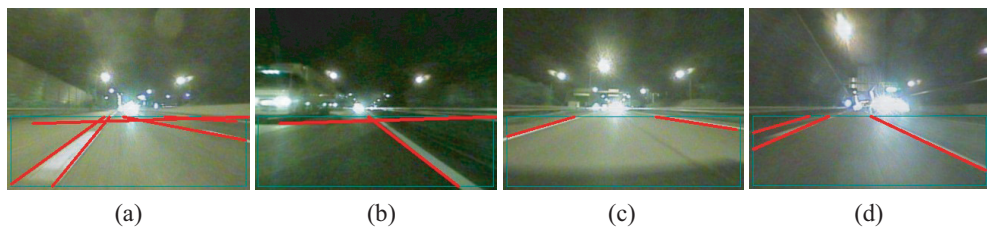


図 7 Gradient weighted Hough transform (GWHT) による直線の検出結果  
 Fig.7 The lines detected using the gradient weighted Hough transform (GWHT).

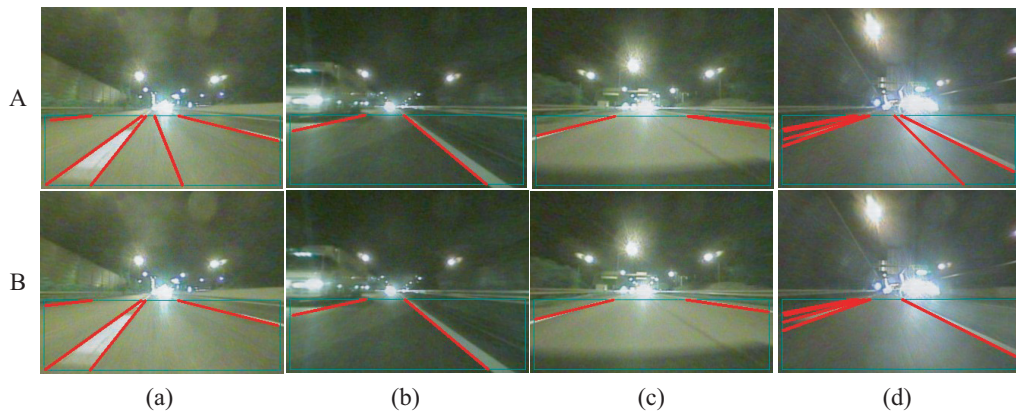


図 8 提案手法の手法 A, B に対する車線の検出結果  
 Fig.8 The lines detected in methods of A and B of proposed method.

とは違うところに直線が検出されているのがわかる．図 8 は，提案手法による車線境界の検出結果である．但し，上段は手法 A の場合，下段は手法 B の場合の結果を示す．図 7 において誤って検出された車線境界が，図 8 では検出されていないのがわかる．これは，提案手法が車の進行方向以外の方向の直線をモデルに含まないためである．

また，図 8 の (a) と (b) を見ると，手法 A の場合で誤った所に車線境界が検出されているのがわかる．これらは，遠くの対向車のヘッドライトからのエッジに対して当てはめられたものである．図 9 は，提案手法におけるパラメータ空間への投票結果  $H(\rho_r^i)$  である．図内の点線は検出された車線境界のパラメー

タを示す．対向車のヘッドライトのエッジに対応するピークは，手法 A の場合に比べて手法 B の場合の方が抑制されているのがわかる．これは，遠くの道路領域においては，パラメータ空間上でのエッジ点の密度がまばらになり，エッジ点一つに対する重みが小さくなっているためと考えられる．

## 7. ま と め

本論文では，車載カメラで撮影した画像から車の姿勢を考慮したハフ変換を用いて，車の進行方向のみの方向を持つ直線を車線境界として検出する手法を提案した．これにより，直線の車線に対しては高速で安定した検出ができた．また，まばらな

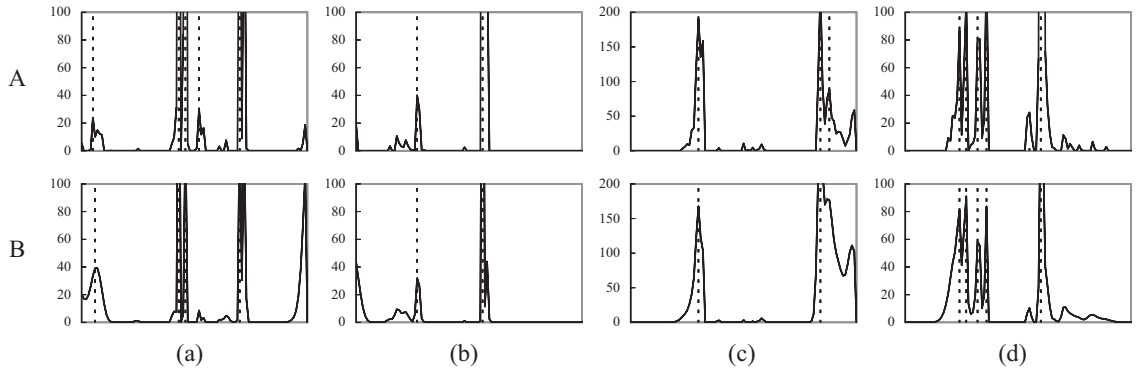


図9 提案手法の手法 A 及び手法 B の場合における投票結果．点線は検出された車線境界のパラメータを示す

Fig.9 Voting results for methods of A and B. Dotted lines represent detected line parameters.

エッジ点群に対する“直線らしさ”を減少させるように，ハフ変換における各セルへの重みを決める方法を提案し，実験によりその有効性を確認した．

#### 文 献

- [1] N. Apostoloff and A. Zelinsky. Vision in and out of vehicles: Integrated driver and road scene monitoring. *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 23, No. 4-5, pp. 513-538, April-May 2004.
- [2] J. B. Mc Donald. Application of the hough transform to lane detection and following on high speed roads. In *Proc. of the Irish Signals and Systems Conference*, 2001.
- [3] V. Kastinaki, M. Zervakis, and K. Kalaitzakis. A survey of video processing techniques for traffic applications. *Image and Vision Computing*, Vol. 21, pp. 359-381, 2003.
- [4] J. W. Lee, U. K. Yi, and K. R. Bark. A cumulative distribution function of edge direction for road-lane detection. *IEICE Trans. Inf. & syst.*, Vol. E84-D, No. 9, pp. 1206-1216, September 2001.
- [5] Q. Li, N. Zhang, and H. Cheng. Springrobot: A prototype autonomous vehicle and its algorithms for lane detection. *IEEE Trans. Transportation systems*, Vol. 5, No. 4, pp. 300-308, December 2004.
- [6] J. W. Park, J. W. Lee, and K. Y. Jhang. A lane-curve detection based on an lcf. *Pattern Recognition Letters*, Vol. 24, pp. 2301-2313, 2003.
- [7] T. M. van Veen and F. C. A. Groen. Discretization errors in the hough transform. *Pattern Recognition*, Vol. 14, No. 1-6, pp. 137-145, 1981.