斜め十字型スリット光を用いたロボット用小型3次元センサ[†]

二宮隆典*・広井高志*・中川泰夫*

Compact 3-D Sensor for Robots Using X-Shaped Slit Light

Takanori NINOMIYA*, Takashi HIROI* and Yasuo NAKAGAWA*

Recently many types of practical robot vision systems have been developed. However, most of them are based on the 2-D image processing technique and can recognize objects only on a known plane. On the other hand, much fundamental research effort on 3-D recognition has been made, but achieved results are still time-consuming and impractical.

In this paper, we describe the compact 3-D sensor for robots. 3-D information about objects can be detected by the light section method. Projecting a slit light onto the object and taking its image from the oblique direction, the distances from a point on the slit light plane to the light stripes, which are intersections of the object and the slit light, can be measured based on the triangulation. The proposed sensor projects two slit lights one by one, which are arranged like X-shape. The light stripes neighboring the intersection of two slit lights in the taken images are guaranteed to be on a continuous surface. Therefore, once the sensor is directed to the desired surface just roughly, the orientation and the distance of the surface in the 3-D space can be detected through the calculation of the distances to the points neighboring the intersection of the slit lights, without moving the sensor.

The developed sensor consists of two slit light sources and a solid state TV camera. Infrared LED chips are used as the light source and Camera Control Unit is separated from the sensor itself. They enable us to realize a light-weight and compact sensor which is suitable for being mounted on a robot

arm. The size of the sensor is $200\text{ mm}^W \times 57\text{ mm}^H \times 75\text{ mm}^L$ and the weight is 400g. According to the experimental results, the repeatability of the detected position of the cylindrical object is $\sigma=0.04\text{ mm}$ for the $x-y$ coordinate, $\sigma=0.09\text{ mm}$ for the distance and $\sigma=0.2^\circ$ for the orientation and the acquisition time is about 0.1 second.

Key Words: 3-D sensing, non-contact sensor, light section method, X-shaped slit light, robot

1. ま え が き

視覚認識機能は、ロボットを広範囲の作業に柔軟に適応させるうえで、きわめて重要である。従来、多くのロボット用視覚認識装置が実用化されてきた^{1)~3)}。しかし、そのほとんどは、対象物の種類、位置、姿勢などを2次元的に認識するものであり、画像の奥行き方向の認識はできない。このため、適用範囲が、ベルトコンベア上の部品ピックアップなど、既知の平面上にある物体を取り扱う作業に限定されている^{4), 5)}。一方、山積状態からの部品ピックアップや接続前のリード付コネクタの把持など、3次元的に位置、姿勢の定まらない物体を取り扱う作業も多い。これらには、3次元的な視覚認識が不可欠である。

3次元的な視覚認識の研究は、3次元画像情報の生成に関する研究^{6), 7)}とそれを認識、理解する研究^{8), 9)}に分類することができる。それぞれの分野で活発に研究が行われているが、現状では、認識精度が不十分であったり計算機処理に多大の時間を要するなど、工業的な実用レベルに達していないものが多い。これらのうち、光切断法によって対象物の距離情報を検出する手法は、唯一工業的に応用可能な方法として、3次元認識^{10), 11)}、検査¹²⁾、溶接ロボットの制御¹³⁾、計測¹⁴⁾などに用いられている。

VanderBrug らは、組立用ロボット視覚を指向して、スリット光源とTVカメラからなる光切断検出器

[†] 第22回計測自動制御学会学術講演会で発表(昭58・7)

* (株)日立製作所生産技術研究所 横浜市戸塚区吉田町292

* Production Engineering Research Laboratory, Hitachi, Ltd., Yokohama
(Received October 9, 1986)
(Revised April 13, 1987)

をロボットアームに取り付け、対象物までの距離を検出した^{15),16)}。また、ロボットアームによって検出器の位置、方向を自由に変えられることを利用して、複数の検出画像から対象物の 3 次元的な姿勢を認識している。

本論文では、形状とおおまかな位置が既知の対象物に対して、その距離および 3 次元的な姿勢を認識する手法を提案する。提案する手法は、光切断法の原理を応用したもので、斜め十字状に配置したスリット光を用いて、検出器を動かすことなく高速に姿勢認識できる点、およびロボットアームに搭載可能な小型軽量の検出器を構成できる点に特徴がある。

2. 光切断法による距離計測

2.1 検出座標と実座標の関係

光切断法で得られる光学像と実座標の関係を定式化する。Fig. 1 に示す系を考える。Fig. 1 において、L は平面状光線（以降、スリット光と呼ぶ）であり、同図左方より照射されているものとする。L と対象物表面の交線を光切断線と呼ぶ。また、I は像検出器の像面である。I における光切断線の光学像を光切断像と呼ぶ。簡単のため、光切断像は像面 I よりの距離 f に設けられたピンホールにより結像されるものとする。

光切断線上の各点の実座標 (x, y, z) とその像面 I 上の座標 (x', y') の関係は、つぎようになる。

$$x = \frac{-(d_0 \sec \theta - f)x' \sin \theta}{f \sin \theta + y' \cos \theta - x' \tan \theta} \quad (1)$$

$$y = x \tan \theta \quad (2)$$

$$z = \frac{(d_0 \sec \theta - f)(x' \cos \theta \tan \theta - y')}{f \sin \theta + y' \cos \theta - x' \tan \theta} + d_0 \quad (3)$$

すなわち、検出系固有のパラメータ d_0, f, θ, φ が既知であれば、画像座標 (x', y') より実座標 (x, y, z) を一意的に求めることができる。

Fig. 1 The light section method

2.2 スリット光の配置

Fig. 1 に示す φ とスリット光の数および配置によって、いくつかの異なった種類の検出法を構成できる。Fig. 2 にこれらを示す。Fig. 2(a) は $\varphi=0$ としたものであり^{14),15)}、Fig. 2(b) は(a)にさらに平行なスリット光を追加したものである¹⁶⁾。また、Fig. 2(c) は本論文で提案する手法であり、 $\varphi=\varphi_0$ および $-\varphi_0$ のスリット光を投射するものである。一般に、直線上にない一平面上の 3 点の座標が与えられると、その法線方向を決定することができる。したがって、Fig. 2(b) および (c) では、対象物表面の法線方向を、検出系を動かすことなく検出できる可能性がある。

しかし、Fig. 2(b) の構成では、2 スリット光が平行であるため、これらが同一平面上に投射されているか否かを光切断像のみから判断できない。このため、光切断像の解析を加えて、均一照明を用いた 2 次元画

(a) With one slit light plane

(b) With two slit light planes

(c) With two cross slit light planes

Fig. 2 Variation of the light section method

像の検出とその解析が必要になる¹⁶⁾。一方, Fig. 2(c)の構成では, 2スリット光による光切断線が交わっている点の近傍は, 同一平面内にあることが保証されるため, 光切断像の解析のみによる法線方向の決定が可能である。したがって, Fig. 2(b)の構成に比べて簡単な処理で対象物の姿勢が認識できる。

3. 斜め十字型スリット光による 距離・姿勢認識

3.1 検出器の構成

提案する検出器の構成は, Fig. 2(c)を基本としている。ただし, スリット光源は画像検出器をはさむ位置に配置した (Fig. 3)。これは, Fig. 2(c)に示す平面 L_l , L_r 上であれば, 光源を任意の位置に移動しても同様の結果が得られることによる。この配置によって, 検出器の一体化, コンパクト化が容易になる。また, 検出器をロボットアームに装着した場合 (Fig. 3), その先端機構または保持物の影響を受けない検出が可能になるという利点がある。

3.2 距離および姿勢の認識法

対象物までの距離および姿勢の認識法は, 概略以下の5ステップからなる。

(ステップ1)

2スリット光の交線 (z 軸) が対象物の検出対象平面を向くように, 検出器または対象物の方向および位置をおおまかに制御する。

(ステップ2)

2スリット光を一つずつ発光させ, それぞれ検出された画像から光切断線を抽出する。

(ステップ3)

抽出された光切断線を折れ線で近似する。

(ステップ4)

スリット光 L_l による折れ点を (x'_l, y'_l) , スリット光 L_r による折れ点を (x'_r, y'_r) としたとき, これらを変換式 F_l , G_l , F_r , G_r を用いて実座標 (x_l, y_l, z_l) ,

Fig. 3 Configuration of the proposed sensor

Fig. 4 Definition of a_1 , a_2 , a_3 , a_4 and n_0

(x_r, y_r, z_r) に変換する。

$$x_l = F_l(x'_l, y'_l), \quad y_l = x_l \tan \varphi_0, \quad z_l = G_l(x'_l, y'_l) \quad (4)$$

$$x_r = F_r(x'_r, y'_r), \quad y_r = -x_r \tan \varphi_0, \quad z_r = G_r(x'_r, y'_r) \quad (5)$$

(ステップ5)

$(x, y, z) = (0, 0, z)$ を横切る線分両端の実座標を位置ベクトル a_1, a_2, a_3, a_4 を用いて表わしたとき (Fig. 4), 以下の連立方程式の近似解を最小2乗法を用いて求め, 法線ベクトル n を決定する。

$$(a_i \cdot n) = -1, \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (6)$$

n より, 単位法線ベクトル n_0 および検出対象平面までの距離 d は以下のように求められる。

$$n_0 = \frac{n}{|n|} \quad (7)$$

$$d = \frac{1}{|n|} \quad (8)$$

(ステップ1)の実現法は, 検出対象物の形状に大きく依存する。リード付コネクタの姿勢認識を例にとると, まず, 光切断像の解析によりリード位置を認識し, 検出器の移動によってリードを追跡していけば実現可能である¹⁷⁾。また, 対象物のおおまかな位置が既知である場合や, 他の検出手段によって検出できる場合も考えられる。

ここでは, 距離, 姿勢の認識精度に直接影響をおよぼす (ステップ2), (ステップ3) および変換式 F_r , G_r , F_l , G_l の決定法について論ずる。

3.2.1 光切断線の抽出

提案する検出法による光切断像は, x' 方向, y' 方向ともに必ずしも一価の関数ではない。しかし, 凸の部分, すなわち z 座標値が小さく, 検出器に近い部分がより検出対象として重要であると仮定すると, スリット光 L_l に対しては x' 座標プラス方向に, L_r に対してはマイナス方向に検出画像の明るさをサーチし

Fig. 5 Extraction of light stripes

Fig. 6 Method of extraction of a light stripe for each y'

て、一番最初に発見されるピーク位置を光切断線位置とすることによって、検出対象に関する情報を失うことなく、一価の関数 $x'_i = f_i(y'_i)$, $x'_r = f_r(y'_r)$ として表わすことができる (Fig. 5)。以降の処理は1次元データに対して行えばよく、これによって処理量を低減できる。

スリット光 L_i に対する光切断抽出法は以下のとおりである。なお、() 内はスリット光 L_r に対するものである。

(ステップ2: 光切断線抽出法)

(ステップ2-1)

各 y' について以下を実行する (Fig. 6)。

明るさ V がしきい値 T_h を越える区間を $[x'_{1s}, x'_{1e}]$ ($i=1, 2, \dots, m, x'_{1s} \leq x'_{1e} < x'_{(i+1)s}$) としたとき、区間 $[x'_{1s}, x'_{1e}]$ [区間 $[x'_{ms}, x'_{me}]$] で最大の V をとる点 x' を出力する。

T_h を越える区間がないとき、これを識別可能な値 x'_* を出力する。

(ステップ2-2)

x'_* が出力された点に関して、前後の x'_* 以外の値が出力された点の x', y' より直線補間し、値を割り当てる。

3.2.2 折れ線近似

点列を折れ線で近似する方法として、すでにいくつかの方法が知られている^{18), 19)}。ここでは、折れ点位置を正確に求めるため、Sklanskyの方法で概略の折れ点位置を求めた後、各折れ点間を最小2乗法で直線近似し、隣接する線分の交点として折れ点を求めた (Fig. 7)。

Fig. 7 Detection of corner points

(ステップ3: 折れ線近似法)

(ステップ3-1)

Sklanskyの方法を用い、仮の折れ点列 (x'_i, y'_i) ($i=1, 2, \dots, y'_i < y'_{i+1}$) を求める。

(ステップ3-2)

区間 $[y'_i, y'_{i+1} - p]$ (p : 正の定数) の点に関して最小2乗近似法で直線近似を行う。ただし、 $y'_i \geq y'_{i+1} - p$ となった場合は、 (x'_{i+1}, y'_{i+1}) を仮の折れ点列から除き、ふたたび (ステップ3-2) を行う。

(ステップ3-3)

隣接する2直線の交点を求め、真の折れ点とする。

3.2.3 変換式 F_i, G_i, F_r, G_r の決定

理想的には、 F_i, G_i は(1), (3)式の右辺の φ を φ_0 としたもので、 F_r, G_r は φ を $-\varphi_0$ としたものに等しい。しかし、検出器の構造上、パラメータ d_0, f, θ を正確に求めることが困難であるうえに、

(1) 検出系結像レンズの収差による画像の歪

(2) 合焦点位置以外の検出画像のぼけ

(3) スリット光の厚みおよび平面よりの誤差

などが事実上誤差要因として加わり、実座標の測定精度に直接影響をおよぼす。この問題を解決するため、 F_i, G_i (F_r, G_r も同様) が次式のような有理式で近似できるものとして、実験的に関数を決定し、変換式として用いる。

$$F_i(x', y') = \frac{\sum_m \sum_n a_{mn} x'^m y'^n}{\sum_m \sum_n c_{mn} x'^m y'^n} \quad (9)$$

$$G_i(x', y') = \frac{\sum_m \sum_n b_{mn} x'^m y'^n}{\sum_m \sum_n c_{mn} x'^m y'^n} \quad (10)$$

ここに、 $m, n=0, 1, 2, \dots$ である。

係数 a_{mn}, b_{mn}, c_{mn} の決定法は以下のとおりである。

(1) 幅 w が既知、すなわち $x = \pm w/2$ に辺をもつ平面を $z=d$ の位置に z 軸に垂直に置き (Fig. 8),

Fig. 8 Setup for determination of camera parameters

3.2.1 (ステップ2-1) に示した方法にしたがって、光切断線を抽出する。

(2) 複数の w および d について (1) を繰り返し、光切断線の端点の検出座標データ (x'_k, y'_k) を N 個得る。

(3) それぞれのデータ (x'_k, y'_k) に対する実座標 $(w/2, y_k, d)$ または $(-w/2, y_k, d)$ を (x_k, y_k, z_k) としたとき、まず m, n の範囲を定め、次式に示す評価値 H を最小にする a_{mn}, b_{mn}, c_{mn} を数値解析的に求めることによって、変換式の係数とする。

$$H = \sum_k [\{x_k - F_i(x'_k, y'_k)\}^2 + \{z_k - G_i(x'_k, y'_k)\}^2] \quad (11)$$

ここに、 $k=1, 2, \dots, N$ である。

4. 物体位置・姿勢の認識実験

4.1 試作した検出器

Photo. 1 に試作した検出器の外観、Table 1 にその諸元を示す。光源には複数の赤外発光ダイオード・

Photo. 1 The compact 3-D sensor mounted on the robot arm

チップをアレイ状に配置し、スリット、シリンドリカル・レンズおよび結像レンズを用いてスリット光を形成している。発光波長は画像検出器の最大感度波長 800 nm とした。画像検出器には、MOS 型 2 次元固体センサを用いたセンサ分離型 TV カメラを用いた。結像レンズの前方に赤外透過フィルタを装着することによって、外乱光の影響を低減した。また、スリット光源および TV カメラのケースにプラスチック (デルリン) を用い、軽量化を図った。

4.2 実験システム

実験では、試作した検出器を 6 自由度ロボットの第 6 軸 (グリップ回転軸) に装着し、円筒形対象物の上面の中心位置と法線方向の検出、およびその結果をもとにしたロボットアームの制御を試みた。検出器は、 z 軸がロボットの第 6 軸に一致するように取り付けている。Fig. 9 に実験システムの構成を示す。

システム全体はミニコンピュータ (DEC, VAX 11/750) で制御される。スリット光制御回路は、ミニコンピュータの命令にしたがって、二つのスリット光源

Table 1 Specifications of the sensor

Item	Specifications	Remarks
Dimension	200 mm ^W × 57 mm ^H × 75 mm ^L	Excluding the attaching bracket
Weight	400 g	Excluding the attaching bracket
Slit light		
Arrangement	X-Shaped, $\varphi_0 = \pm 60^\circ$	from the x axis
Width	0.23 mm	at $z=300$ mm
Length	120 mm	at $z=300$ mm
Light source	7-chip IR LED	
Wavelength	800 nm	
Total energy	420 mW	
Image detector		
Type	MOS type solid state TV camera	
Size of the image plane	320 ^H × 244 ^V pixel	
Size of a pixel	27 μm^2 /pixel	on the image plane
Lenese	$f=25$ mm, $F=1.8$	with IR pass filter
Direction of the optical axis	$\theta=20^\circ$	from the z axis
d_0 in Fig. 1	$d_0=300$ mm

Fig. 9 Experimental system

をそれぞれ ON/OFF 制御するものである。本実験システムでは、3.2.1 (ステップ 2-1) に示した光切断線の抽出をハードウェアで行うことによって、1 TV フレーム当り 16.7 ms の光切断線抽出を可能にしている。ミニコンピュータは、抽出された光切断線をもとに対象物の位置、姿勢を認識し、ロボットアームのつぎの目標位置および姿勢を計算する。この情報はロボット手先に固定された座標系で表現され、ロボット制御装置に伝送される。これをもとに、ロボット制御装置がロボットアームを制御する。

4.3 円筒物体の位置・姿勢の認識

実験では、検出器の z 軸があらかじめ大まかに円筒の上面方向を向いていると仮定した。検出器から上面までの距離 d とその単位法線ベクトル n_0 は、3章(ステップ1)～(ステップ5)および(4)式～(8)式にしたがって求めることができる。一方、上面(円型)の中心位置は、中心の位置ベクトルを o 、光切断線の端点(折れ点)の実座標における位置ベクトルを Fig. 4 と同様に、 a_1, a_2, a_3, a_4 としたとき、次式

(a) A detected image

(b) Extracted light stripes for the left slit light source

Photo. 2 An example of detected light stripes

を解くことによって得られる。

$$(a_1 - a_3 \cdot o - a_3) = (a_3 - a_1 \cdot o - a_1) \quad (12)$$

$$(a_2 - a_4 \cdot o - a_4) = (a_4 - a_2 \cdot o - a_2) \quad (13)$$

$$(n_0 \cdot o + dn_0) = 0$$

ここに、 $(\cdot)$ はベクトルの内積を表わす。

Photo. 2 に光切断線の検出例を示す。実際の検出

Photo. 3 An example of robot control according to the 3-D information detected by the sensor

および処理は、二つのスリット光に対して個別に行っている。

Photo. 3 にロボットの動作の模様を示す。実験では検出を2回行った。すなわち、Photo. 3(a)初期状態で d , n_0 , o を検出し、以下の三つの条件を満足する点へロボットアームを移動させる (Photo. 3(b))。

- (1) 検出器の z 軸が $-n_0$ に平行
- (2) 検出器の z 軸が上面の中心を通過
- (3) 上面から検出実座標系 $x y z$ の原点までの距離が d_0 (試作した検出器の場合 300 mm)

つぎに、ロボットの移動誤差および検出誤差を補正するため、この位置でふたたび同様の検出およびロボットアームの移動を行う (Photo. 3(c))。検出器の z 軸とグリッパの中心軸は一致させてあるので、ロボットアームを z 軸に平行に前進させることによって、円筒を正しくつかむことができる (Photo. 3(d))。

1 回当りの検出時間は約 0.1 秒であった。

4.4 検出精度

実験システムを用いて検出器の繰返し検出精度を

測定した。Fig. 10 に結果を示す。測定項目は、(a) a_1 の x 成分 x_1 , (b) a_1 の z 成分 z_1 , (c) n_0 と x 軸のなす角 α , (d) n_0 と y 軸のなす角 β である。測定対象物は、4.3 節に示した実験と同様、円筒形の物体であり、測定の母数は 400 回とした。また、測定条件は、対象物までの距離 $d=d_0$ ($=300$ mm) である。 x_1 に関して $\sigma_x=0.04$ mm, z_1 に関して $\sigma_z=0.09$ mm, α に関して $\sigma_\alpha=0.1^\circ$, β に関して $\sigma_\beta=0.2^\circ$ の再現性を得た。

5. む す び

斜め十字状に配置したスリット光を用いた距離および3次元的な姿勢の検出法について述べた。本検出法は、検出器を移動させることなく、光切断像のみの解析によって、高速に距離および姿勢を検出できる点に特徴がある。また、提案した検出器構成によれば、ロボットアームに搭載可能な小型、軽量の検出器を容易に実現できる。試作した検出器による実験の結果、検出時間約 0.1 秒、距離に関する繰返し検出精度 σ_x

(a) x

(c) α (angle between the normal and the x axis)

(b) z

(d) β (angle between the normal and the y axis)

Fig. 10 Experimental results of repeatability

$=0.09$ mm, 姿勢に関する繰返し検出精度 $\sigma_\alpha=0.1^\circ$ (法線と x 軸のなす角), $\sigma_\beta=0.2^\circ$ (法線と y 軸のなす角) など, 実用上十分な性能が得られた。

本検出法は, 六つの3次元的な自由度のうち, 三つの自由度(距離, 法線方向)に関して精密な計測を行うものである。本検出法単独で法線まわりの回転, および一般の形状をもつ対象物の法線に対して垂直方向の位置を精度良く検出することはできない。このため, 円筒や穴などの単純な形状の対象物を除き, 他の認識手段の併用が必要になる。たとえば, 一様な照明を用いて法線方向から再度画像を検出し, 光切断線の折れ点を手がかりとした2次元的な画像認識処理を行うことによって, 対象物の3次元的な位置, 姿勢が完全に決定できる。このアプローチによる, 未接続コネクタの認識実験システムを開発している¹⁷⁾。

参 考 文 献

- 1) G. Gleason and G. Agin: A Modular Vision System for Sensor-Controlled Manipulation and Inspection, Proc. of 9th International Symposium on Industrial Robots, 57/70 (1979)
- 2) V. Scheinman: The Autovision System-Computerized Vision for Factory Automation, Proc. of 11th International Symposium on Industrial Robots, 1/4 (1981)
- 3) 小林, はか: 汎用画像認識解析装置 "HIDIC-IP", 日立評論, **67-9**, 63/66 (1985)
- 4) M. Ward, et al.: CONSIGHT: A Practical Vision-Based Robot Guidance System, Proc. of 9th International Symposium on Industrial Robots, 195/211 (1979)
- 5) J. Foith: A TV-Sensor for Top-Lighting and Multiple Part Analysis, Information Control Problem and Manufacturing Technology 1979, 229/234 (1980)
- 6) B. Horn: 濃淡情報から形状を得る, コンピュータビジョンの心理, 125/172, 産業図書 (1979)
- 7) M. Drumheller and T. Poggio: On Parallel Stereo, Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation, **3**, 1439/1448 (1986)
- 8) M. Minsky: 知識を表現するための枠組, コンピュータビジョンの心理, 237/332, 産業図書 (1979)
- 9) T. Matsuyama and V. Hwang: SIGMA: A Framework for Image Understanding—Integration of Bottom-Up and Top-Down Analysis, Proc. of 9th International Joint Conference on Artificial Intelligence, **2**, 908/915 (1985)
- 10) Y. Shirai: Recognition of Polyhedrons with a Range Finder, Pattern Recognition, **4**, 243/250 (1972)
- 11) 小関, はか: 距離画像を用いた3次元物体の認識方式, 信学論, **J 69-D-1**, 111/112 (1986)
- 12) Y. Nakagawa: Automatic Visual Inspection of Solder Joints on Printed Circuit Boards, Proc. of SPIE, **336**, 121/127 (1982)
- 13) H. Toda and I. Masaki: Kawasaki Vision System—MODEL 79A—, Proc. of 10th International Symposium on Industrial Robots, 163/174 (1980)
- 14) 成瀬, はか: スリット光投影法による高精度距離・姿勢計測, 信学論, **J 69-D-12**, 1888/1895 (1986)
- 15) G. VanderBrug, et al.: A Vision System for Real Time Control of Robots, Proc. of 9th International Symposium on Industrial Robots, 213/230 (1979)
- 16) J. Albus, et al.: Six-Dimensional Vision System, Proc. of SPIE, Robot Vision, **336**, 142/153 (1982)
- 17) J. Mochizuki, et al.: Unpositioned Workpieces Handling Robot with Visual and Force Sensors, Proc. of International Conference on Industrial Electronics, Control, and Instrumentation, **1**, 299/302 (1985)
- 18) I. Tomek: Two Algorithms for Piecewise Linear Continuous Approximations of Functions of One Variable, IEEE Trans. Computers, **C-23-4**, 445/448 (1974)
- 19) J. Sklansky and V. Gonzalez: Fast Polygonal Approximation of Digitized Curves, Proc. of Pattern Recognition and Image Processing, 604/609 (1979)