

TR - H - 060

0095

3次元物体投影像における
一撃的交差形状解析法

磯 俊樹
志沢 雅彦

1994. 2. 28

ATR 人間情報通信研究所

〒619-02 京都府相楽郡精華町光台 2-2 ☎07749-5-1011

ATR Human Information Processing Research Laboratories

2-2, Hikaridai, Seika-cho, Soraku-gun, Kyoto 619-02 Japan

Telephone: +81-7749-5-1011

Facsimile: +81-7749-5-1008

3次元物体投影像における一撃的交差形状解析法

正員 磯 俊樹 正員 志沢 雅彦

Junctions Analysis on the projected Image of 3D Objects

Toshiki ISO , Member
and Masahiko SHIZAWA , Member

ATR 人間情報通信研究所、京都府
ATR Human Information Processing Research Laboratories,
Kyoto, 619-02 Japan

謝辞 : あり

著者分冊指定 : D-II

連絡先 : 磯 俊樹

ATR 人間情報通信研究所 第二研究室

〒 619-02 京都府相楽郡精華町光台 2 丁目 2 番地

TEL.07749-5-1065 FAX.07749-5-1008

もくじ

あらまし	3
キーワード	3
1 まえがき	4
2 一撃的交差形状解析理論	6
2.1 三重方向同時検出理論	7
2.1.1 三重エッジの拘束条件とその最適化	7
2.1.2 エネルギー積分領域の決定	14
2.2 Y、arrow、K、 Ψ 交差等を含む一般の交差形状分類理論	16
2.2.1 交差形状分類基準	16
2.2.2 交差形状分類手順	19
3 シミュレーション	21
3.1 交差形状解析アルゴリズム	21
3.2 シミュレーション結果	23
4 むすび	23
謝辞	25
参考文献	26

あらまし

人間は複雑なシーンを瞬時に認識する能力を有している。人間の視覚情報処理モデルを工学的に考えた場合、処理の高速化をはかる上でも特徴抽出部に相当する初期視覚モデルには効率的かつ並列的な処理が求められる。既に、我々は、画像認識・理解における遮蔽問題等で重要な手がかりとなる交差形状検出を、局所微分情報を用いて一撃的に検出するアルゴリズムの提案を行った。今回は、3次元物体投影像に現われる Y、arrow、K、 Ψ 交差といった一般の交差形状についても分類可能になるように理論の拡張を行う。また、本手法で用いるエネルギー積分領域の最適サイズの設定を画像微分情報に基づき行う方法も提案する。さらに、実際にノイズやぼけたエッジを含む実画像に対しても本手法が有効であることを示す。

キーワード

多重方向、交差形状、一撃的アルゴリズム、局所微分情報、3次元物体投影像

Junctions Analysis on the projected Image of 3D Objects

Abstract

It is important to analyze the projected image for interpreting 3D objects. To do this, it is necessary to analyze junctions as Y-junctions and arrow-junctions which are composed of multiple edges. We have already introduced the one-shot algorithm for detecting L-, T- and X-junctions; this algorithm investigates two criteria by using local image derivatives. Now, to analyze junctions on the projected image, we propose a one-shot algorithm able to detect Y-junctions, arrow-, K-, and *Psi*-junctions.

Keyword: multiple orientations, junctions, one-shot algorithm, image derivatives, the projected image of 3D objects

1 まえがき

人間は、瞬時に外界からの情報を処理し、複雑な状況を認識・理解する能力を有している。人間の視覚情報処理モデルは、その処理過程を大別すると初期視覚、中期視覚、高次視覚というモジュールごとに分けることができる。特に、視覚認識・理解を実現する上で、画像から特徴抽出を行う初期視覚の段階では、高次処理を行うために適切な形での特徴抽出を行うことが必要であり、また、処理の高速化の面からも効率的な一撃処理が要求される。例えば、物体間の位置関係を知る上で重要な手がかりとなる交差形状⁽¹⁾の抽出では、交差形状の種類を解析する一撃的処理が望まれる。

従来から行われている濃淡画像での交差検出の研究は、Gauss 曲率を尺度にするなど微分幾何学に基づいた手法が多く、ほとんどは交差位置の検出にとどまり、交差形状を分類するものはなかった^{(2),(3),(4),(5)}。他の交差形状解析法として交差のモデルを用いた方法⁽⁶⁾や緩和計算を用いた方法⁽⁷⁾も提案されているが、計算量が多いという欠点を有していた。また、steerable filter^{(8),(9)}、deformable kernel⁽¹⁰⁾、quadrature pair filter⁽¹¹⁾等からのフィルター応答を調べることで交差検出を行っている例があるが、いずれもフィルター応答の極値を

探索する必要があり、さらには、複雑な交差部分の抽出には、方向パターン間の干渉問題を避けるために指向性の狭い高次微分フィルターを用いなければならないという欠点があった。また、着目点を中心とする同心円状に扇形をした一次微分フィルターを多数配置するファンオペレータと名付けられた交差形状抽出法も提案されている⁽¹²⁾。しかし、これもフィルター応答に基づいて極値探索を必要としていた。また、ファンオペレータの幅が検出精度に影響を与えており、離散化された方向しか検出できなかった。

そこで我々は、低次微分情報のみを用いて、フィルター応答からの極値を探索することなく、2方向のエッジからできるL、T、X交差形状を一撃的に抽出する方法を提案した⁽¹³⁾。この手法は、次の二つの段階からなっていた。

1. 交差形状を構成している二重エッジの方向を同時に検出する段階。
2. 上記で得られた二重エッジの方向と境界判定領域での濃淡形状を調べることで交差形状分類をする段階。

しかし、画像は一般に3次元シーンを2次元上に射影したものであるためにL、T、X交差だけではなく、

Y 交差、arrow 交差、K 交差、そして Ψ 交差といった 3 方向以上の異なるエッジが重なってできる交差形状 (図 1) も含んでいる。従って、遮蔽問題などを解

く上では、このような交差形状も解析する必要がある。そこで今回は、前回提案した一撃的 L、T、X 交差形状解析法をエッジが 3 重になってできる交差形状に対しても解析できるようにアルゴリズムの拡張を行う。また、前回提案した手法では、多重方向検出の際に用いるエネルギー積分領域を、交差形状検出を行う画像のノイズの状況によってヒューリスティックに決めた。今回は、画像の微分情報に基づいて、エネルギー積分領域を設定する方法の提案も行う。そして、本アルゴリズムを用いて実際にシミュレーションを行い、ノイズやぼけたエッジを含む画像に対しても有効であることを示す。

2 一撃的交差形状解析理論

我々の提案する一撃的交差形状解析法には、交差形状を構成している多重エッジの方向を検出する段階と、そこで得られた多重エッジ方向と局所領域ごとの一次微分情報を用いて交差形状を分類する段階がある。ここでは、Y、arrow 交差など 3 次元物体投影像に現れ

る交差形状の解析にも適用可能になるよう拡張した理論を各段階ごとに説明する。さらに、エネルギー積分領域の設定方法についても述べる。

2.1 三重方向同時検出理論

2.1.1 三重エッジの拘束条件とその最適化

3次元投影像に現れる交差形状のほとんど大部分は、3方向までのエッジが交差してできている(図1)。従って、3次元投影像に現れる交差形状解析を行うためには、三重エッジ方向同時検出までを行えばよいことになる。そして、三重エッジ方向を一撃的に検出する理論は、二重エッジ方向同時検出^{(14),(15),(13)}を拡張して得られる。

ここで、三重エッジを含む画像 $f(x, y)$ が3個のエッジ $\vec{p}_1, \vec{p}_2, \vec{p}_3$ をそれぞれ一つだけを含む画像 $f_1(x, y), f_2(x, y), f_3(x, y)$ の加法的重ね合わせ、すなわち、

$$f(x, y) = f_1(x, y) + f_2(x, y) + f_3(x, y) \quad (1)$$

で表現できると仮定する(図2)。このとき、三重エッジの拘束条件は、それぞれ単一エッジの拘束条件に出てくる演算子の積をとることで以下のように表さ

< 図2

れる。

$$\{(\vec{p}_1 \cdot \nabla)(\vec{p}_2 \cdot \nabla)(\vec{p}_3 \cdot \nabla)g(x, y)\} * f(x, y) = 0 \quad (2)$$

ただし、 $A \cdot B$ は、 A と B の内積を表す。また、 $\nabla = \frac{\partial}{\partial x} \vec{e}_x + \frac{\partial}{\partial y} \vec{e}_y$ (\vec{e}_x と \vec{e}_y は、それぞれ x, y 方向の単位ベクトル。) である。そして、 $g(x, y)$ は窓関数を表し、 $A * B$ は、 A と B の畳み込みを表す。

この拘束条件は、式 (2) の左辺を式 (1) を用いて実際に展開すると成立することが容易にわかる。(二重方向の場合の証明は⁽¹³⁾を参照)

次に、この拘束条件を条件 $|\vec{p}_1|^2 |\vec{p}_2|^2 |\vec{p}_3|^2 = 1$ のもとで最適化することを考える。ラグランジュの未定係数法を用いると、

$$\begin{aligned} & E(\vec{p}_1, \vec{p}_2, \vec{p}_3, \lambda) \\ = & \sum_{\epsilon(x, y)} \{ |(\vec{p}_1 \cdot \nabla)(\vec{p}_2 \cdot \nabla)(\vec{p}_3 \cdot \nabla)g(x, y)\} * f(x, y) |^2 \\ & + \lambda(1 - |\vec{p}_1|^2 |\vec{p}_2|^2 |\vec{p}_3|^2) \end{aligned} \quad (3)$$

に停留値を与える $\vec{p}_1, \vec{p}_2, \vec{p}_3$ を求めればよい。ただし、 $\epsilon(x, y)$ はエネルギー積分領域を表す。

このとき、式 (3) の停留条件は、

$$\frac{\partial E}{\partial P_i} = 0 \quad (i = 1, 2, \dots, 8), \quad \frac{\partial E}{\partial \lambda} = 0 \quad (4)$$

である。これは、以下に示すような固有値問題に帰着する。

$$AX = \lambda BX \quad (5)$$

ただし、

$$A = \begin{pmatrix} a_{30,30} & a_{30,03} & a_{30,21} & a_{30,12} \\ a_{30,03} & a_{03,03} & a_{03,21} & a_{03,12} \\ a_{30,21} & a_{03,21} & a_{21,21} & a_{21,12} \\ a_{30,12} & a_{03,12} & a_{21,12} & a_{12,12} \end{pmatrix},$$

$$B = \begin{pmatrix} 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{2}{3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{2}{3} \end{pmatrix},$$

$$X = \begin{pmatrix} P_1 \\ P_2 \\ Q_1 \\ Q_2 \end{pmatrix} \quad (6)$$

である。行列 A の成分は次の様に定義される。

$$a_{ij,kl} = \sum_{\epsilon(x,y)} (W_{ij}W_{kl}^* + W_{kl}W_{ij}^*) \quad (7)$$

$$(i, j, k, l = 0, 1, 2, 3; \quad i + j = 3; \quad k + l = 3)$$

$$W_{30} = \frac{\partial^3 g}{\partial x^3} * f, \quad W_{03} = \frac{\partial^3 g}{\partial y^3} * f$$

$$W_{21} = \frac{\partial^3 g}{\partial x^2 \partial y} * f, \quad W_{12} = \frac{\partial^3 g}{\partial x \partial y^2} * f \quad (8)$$

(A^* は、 A の複素共役である。)

未知ベクトル X の成分は次の様に定義される。

$$P_1 = p_{1x}p_{2x}p_{3x}, \quad P_2 = p_{1y}p_{2y}p_{3y}, \quad P_3 = p_{1x}p_{2x}p_{3y}, \quad P_4 = p_{1x}p_{2y}p_{3x}, \\ P_5 = p_{1y}p_{2x}p_{3x}, \quad P_6 = p_{1x}p_{2y}p_{3y}, \quad P_7 = p_{1y}p_{2x}p_{3y}, \quad P_8 = p_{1y}p_{2y}p_{3x} \quad (9)$$

$$Q_1 = P_3 + P_4 + P_5 \quad (10)$$

$$Q_2 = P_6 + P_7 + P_8 \quad (11)$$

である。

固有値問題 (5) を解くことで P_1, P_2, Q_1, Q_2 の値が求まる。そして、三重エッジの方向 $\vec{p}_1 = (p_{1x}, p_{1y}), \vec{p}_2 = (p_{2x}, p_{2y}), \vec{p}_3 = (p_{3x}, p_{3y})$ を求めるために、連立方程式

$$\left\{ \begin{array}{l} p_{1x}p_{2x}p_{3x} = P_1 \\ p_{1y}p_{2y}p_{3y} = P_2 \\ p_{1x}p_{2x}p_{3y} + p_{1x}p_{2y}p_{3x} + p_{1y}p_{2x}p_{3x} = Q_1 \\ p_{1x}p_{2y}p_{3y} + p_{1y}p_{2x}p_{3y} + p_{1y}p_{2y}p_{3x} = Q_2 \end{array} \right. \quad (12)$$

を $|\vec{p}_1|^2 = 1, |\vec{p}_2|^2 = 1, |\vec{p}_3|^2 = 1$ という条件のもとで以下のように場合分けをして解く。

Case (i): $P_1 = p_{1x}p_{2x}p_{3x} \neq 0$

このとき、式(12)の両辺を P_1 で割ると、

$$\begin{cases} \frac{P_2}{P_1} = k_1 k_2 k_3 \\ \frac{Q_1}{P_1} = k_1 + k_2 + k_3 \\ \frac{Q_2}{P_1} = k_1 k_2 + k_2 k_3 + k_3 k_1 \end{cases} \quad (13)$$

となる。なお、

$$k_1 = \frac{p_{1y}}{p_{1x}}, \quad k_2 = \frac{p_{2y}}{p_{2x}}, \quad k_3 = \frac{p_{3y}}{p_{3x}} \quad (14)$$

である。

式(13)について代数方程式の解と係数との関係を用いると下記のような t に関する三次方程式が得られる。

$$t^3 - \left(\frac{Q_1}{P_1}\right)t^2 + \left(\frac{Q_2}{P_1}\right)t - \left(\frac{P_2}{P_1}\right) = 0 \quad (15)$$

よって、この三次方程式の3実解が、三重エッジ方向の正接になる。三重エッジ方向は以下のように求まる。

$$\vec{p}_1 = \begin{pmatrix} \cos \theta_1 \\ \sin \theta_1 \end{pmatrix}, \quad \vec{p}_2 = \begin{pmatrix} \cos \theta_2 \\ \sin \theta_2 \end{pmatrix}, \quad \vec{p}_3 = \begin{pmatrix} \cos \theta_3 \\ \sin \theta_3 \end{pmatrix} \quad (16)$$

ただし、

$$\theta_1 = \tan^{-1}(k_1), \quad \theta_2 = \tan^{-1}(k_2), \quad \theta_3 = \tan^{-1}(k_3) \quad (17)$$

である。

Case (ii): $P_1 = 0, Q_1 \neq 0$

連立方程式 (12) が p_{1x}, p_{2x}, p_{3x} に関して対称なので、

$$p_{1x} = 0. \quad (18)$$

を仮定しても一般性を失わない。このとき、 $|\vec{p}_1|^2 = 1$ より、

$$p_{1y} = \pm 1. \quad (19)$$

となり、

$$k_1 = \pm \infty \quad (\theta_1 = \pm \frac{\pi}{2}) \quad (20)$$

が得られる。このように、 k_1 の値として2つ得られるが、求めるエッジの方向としてはどちらも同じことを表している。次の交差形状分類の段階でも、得られるエッジ方向の反対符号の方向も考慮することになるので、以下で k_1 は、正の符号の値を取ることにする。このとき、式 (12) の両辺を Q_1 で割ると、下記のようになる。

$$\begin{cases} \frac{P_2}{Q_1} = k_2 k_3 \\ \frac{Q_2}{Q_1} = k_2 + k_3 \end{cases} \quad (21)$$

式(21)に代数方程式の解と係数との関係を用いると、
下記のような t に関する二次方程式が得られる。

$$t^2 - \left(\frac{Q_2}{Q_1}\right)t + \left(\frac{P_2}{Q_1}\right) = 0 \quad (22)$$

よって、この二次方程式の2実解が、残り2つのエッジ方向の正接になる。従って、三重エッジ方向は以下のように求まる。

$$\vec{p}_1 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \vec{p}_2 = \begin{pmatrix} \cos \theta_2 \\ \sin \theta_2 \end{pmatrix}, \vec{p}_3 = \begin{pmatrix} \cos \theta_3 \\ \sin \theta_3 \end{pmatrix} \quad (23)$$

ただし、

$$\theta_1 = \frac{\pi}{2}, \theta_2 = \tan^{-1}(k_2), \theta_3 = \tan^{-1}(k_3) \quad (24)$$

である。

Case (iii): $P_1 = 0, Q_1 = 0, Q_2 \neq 0$

Case (i),(ii)と同様にして、式(12)を $P_1 = 0, Q_1 = 0, |\vec{p}_1|^2 = 1, |\vec{p}_2|^2 = 1$ の条件のもとで解くと次のように三重エッジ方向の正接が求まる。(ここでも、Case(ii)と同様に k_1, k_2 については、正符号の方向を取ることにする。)

$$k_1 = \infty, \quad k_2 = \infty, \quad k_3 = \frac{P_2}{Q_2} \quad (25)$$

従って、三重エッジ方向は以下のように求まる。

$$\vec{p}_1 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \vec{p}_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \vec{p}_3 = \begin{pmatrix} \cos \theta_3 \\ \sin \theta_3 \end{pmatrix} \quad (26)$$

ただし、

$$\theta_1 = \frac{\pi}{2}, \theta_2 = \frac{\pi}{2}, \theta_3 = \tan^{-1}(k_3) \quad (27)$$

である。なお、ここで求めた θ_1, θ_2 は同じ方向であるが、方向数は2つとして考えることとする。

2.1.2 エネルギー積分領域の決定

エネルギー積分領域とは、2.1.1で求めた三重エッジ方向の拘束条件の最適化を行う範囲のことである。この際に行う最適化では、エネルギー積分領域の取り方が検出する方向精度や計算量に影響を与えるので、各点ごとに適応的に領域を決めることが要求される。また、三重エッジ方向同時検出の際に解く最適化問題は局所領域における一種の data fitting 問題である。ここで、扱う画像には細かいテクスチャによってできるエッジが含まれていないとする。このとき、エッジ方向を精度良く検出し、かつ効率的な計算コストで行うためには、濃淡変化がある所とない所でエネルギー積分領域の大きさを変える必要がある。すなわち、濃淡

値の変化（微分量）のバラつきが小さい所ではエネルギー領域を小さく取ることによって計算量を抑え、また、変化のバラつきが大きい所ではエネルギー領域を大きく取ることによって data fitting を容易にし、エッジ方向の精度を上げることができる。

そこで、ある範囲で局所領域を変化させ、その局所領域内における各点の微分量の分散が小さくなるような局所領域をエネルギー積分領域として選ぶこととした（図3）。そして、その評価量として、以下に定義する一次微分エネルギー $ED(x, y)$ を用いた。

< 図3

$$ED(x, y) = \left\{ \frac{\partial}{\partial x} g(x, y) * f(x, y) \right\}^2 + \left\{ \frac{\partial}{\partial y} g(x, y) * f(x, y) \right\}^2 \quad (28)$$

このとき、ある点 (x, y) におけるエネルギー積分領域 $\epsilon(x, y)$ は、次の条件を満たす矩形領域を用いた。

$$\epsilon(x, y) = \{(x, y) \mid |x - x_0| \leq sx_{min}, |y - y_0| \leq sy_{min}\} \quad (29)$$

$((x_0, y_0)$ を中心に $(2sx_{min} + 1) \times (2sy_{min} + 1)$ の矩形領域) ただし、 sx_{min}, sy_{min} は、 ED の分散 V_{ED} に最小を与える値である。

2.2 Y、arrow、K、 Ψ 交差等を含む一般の交差形状分類理論

2.2.1 交差形状分類基準

次に、2.1で得られた三重エッジ方向から、Y、arrow、K、 Ψ 交差等を含む一般の交差形状分類について説明する。ここで分類するための評価基準は、L、T、X 交差解析のときと同様に次にあげる2つである。

基準(1): 境界線、すなわちエッジとして存在するか?

基準(2): 境界線で挟まれた部分とそれ以外の部分での濃淡形状に矛盾がないか?

しかし、今回は各点ごとにエネルギー積分領域が異なるので、前回で定義した局所一次微分情報から得られる評価値では、上記の2つの基準を正しく判断することができない。そこで、各点での境界判定領域での局所一次微分情報を適切に反映させるために、以下に定義するそれぞれの方向微分量の平均値を評価値として用いる。

[境界判定領域における順方向微分量の平均]

$$AD_{\vec{v}} = \frac{1}{N} \sum_{(x,y) \in \delta(\vec{v})} [\{\vec{v} \cdot \nabla g(x,y)\} * f(x,y)] \quad (30)$$

$$(\vec{v} = \pm \vec{p}_1, \pm \vec{p}_2, \dots, \pm \vec{p}_n)$$

[境界判定領域における法線方向微分量の平均]

$$AD_{\vec{v}_\perp} = \frac{1}{N} \sum_{(x,y) \in \delta(\vec{v})} [\{\vec{v}_\perp \cdot \nabla g(x,y)\} * f(x,y)] \quad (31)$$

$$(\vec{v}_\perp = \pm \vec{p}_{1\perp}, \pm \vec{p}_{2\perp}, \dots, \pm \vec{p}_{n\perp})$$

ただし、 $\delta(\vec{v})$ は境界判定領域、 N は境界判定領域内に含まれる点の個数を表す。また、 \vec{v}_\perp とは、 \vec{v} を反時計回りに $\frac{\pi}{2}$ 回転したものである (図4、図5)。

< 図4

< 図5

交差形状分類ための判定基準

境界線として存在するための判定基準 最初に、基準(1)の判定方法について述べる。

前回の手法では、境界判定領域 $\delta(\vec{v})$ において互いに直交している方向微分和が微小である場合、すなわち、

$$\begin{cases} |AD_{\vec{v}}| \simeq 0 \\ |AD_{\vec{v}_\perp}| \simeq 0 \end{cases} \quad (32)$$

が成立する場合を、 \vec{v} が境界線になりえない基準とした。しかし、式(32)をこのままの形で用いると、実際には *threshold* の設定が $AD_{\vec{v}}$, $AD_{\vec{v}_\perp}$ のそれぞれについて必要となってしまふ。従って、今回は、境界線存在のための条件になっていた式(32)を以下に示すよう

な条件に置換えて判定することにした。

$$\begin{cases} \left| \frac{AD_{\vec{v}}}{AD_{\vec{v}_\perp}} \right| < threshold \\ |AD_{\vec{v}_\perp}| \neq 0 \end{cases} \quad (33)$$

これは、 $AD_{\vec{v}}$ の値に比べ $AD_{\vec{v}_\perp}$ の値が大きく、かつ、 $|AD_{\vec{v}_\perp}| \neq 0$ である場合についてのみ、 \vec{v} 方向に境界線が存在すると判断できる。従って、式(33)を用いれば、一つの $threshold$ を決めることで判定に使えることになる。

境界線で挟まれた領域間における濃淡形状の矛盾性の判定基準 次に各境界線で挟まれた領域間での濃淡形状に矛盾があるか否かの判定方法について述べる。境界線で挟まれた部分の濃淡には、大小関係がある。境界線として $\vec{p}_1, \vec{p}_2, \vec{p}_3$ が選ばれた場合の例を考える。このとき、それぞれの境界線によって挟まれてできる領域の濃淡形状に矛盾が生じない全ての場合を図6に示す。これより、各境界線の $AD_{\vec{v}_\perp}$ の符号が全て同じではない場合が各境界線で挟まれた領域の濃淡の大小関係に矛盾を生じさせないことが分かる。境界線の数が増えても同様に考えることができるので、一般に n 本の境界線 $\vec{p}_1, \vec{p}_2, \dots, \vec{p}_n$ で分けられる領域間の濃淡形状に矛盾が生じるのは以下の条件を満たす場合であることが分か

< 図6

る。

$$\begin{aligned} & (AD_{\vec{p}_{1\perp}} > 0 \wedge AD_{\vec{p}_{2\perp}} > 0 \cdots \wedge AD_{\vec{p}_{n\perp}} > 0) \\ \vee & (AD_{\vec{p}_{1\perp}} < 0 \wedge AD_{\vec{p}_{2\perp}} < 0 \cdots \wedge AD_{\vec{p}_{n\perp}} < 0) \end{aligned} \quad (34)$$

2.2.2 交差形状分類手順

2.2.1で述べた2つの分類基準の判定方法を用いれば、以下に示す手順のように一般の交差形状を分類することができる。

1. 多重方向同時検出によって得られた多重エッジ方向が n 本である場合、それぞれの反対方向を含めて $2n$ 本の境界線候補について考える。
2. 式(31)を用いて、 $2n$ 本の境界線候補が境界線エッジとして存在するか否かを式(33)の基準を用いて調べる。
3. 式(31)を用いて、2.2.1の基準、すなわち、式(34)が満たされているか否かを調べる。もし、式(34)が満たされていなければ、交差形状が存在すると判断する。

[例] $n = 3$ の場合を考える。このとき、境界線候補6本 ($\pm\vec{p}_1, \pm\vec{p}_2, \pm\vec{p}_3$) のうち、式(32)を満たす $\vec{p}_1, \vec{p}_3, -\vec{p}_2, -\vec{p}_3$ の4本の境界線候補が残ったとする。このとき、
 $AD_{\vec{p}_{1\perp}} > 0, AD_{\vec{p}_{3\perp}} > 0, AD_{-\vec{p}_{2\perp}} > 0, AD_{-\vec{p}_{3\perp}} < 0$

であれば図 7 に示される K 交差に分類されることになる。

< 図 7

上記の例と同様に行うと、 Y 、 arrow 、 K 、 Ψ 交差は、下記に示す条件に基づいて分類することができる (図 8)。

[Y 交差]

$$AD_{\vec{p}_1} \neq 0, AD_{\vec{p}_2} \neq 0, AD_{\vec{p}_3} \neq 0,$$

$$\pi < \text{angle}(\vec{p}_1, \vec{p}_2) + \text{angle}(\vec{p}_2, \vec{p}_3)$$

[arrow 交差]

$$AD_{-\vec{p}_1} \neq 0, AD_{\vec{p}_3} \neq 0, AD_{-\vec{p}_2} \neq 0,$$

$$0 < \text{angle}(-\vec{p}_1, \vec{p}_3) + \text{angle}(\vec{p}_3, -\vec{p}_2) < \pi$$

[K 交差]

$$AD_{-\vec{p}_3} \neq 0, AD_{\vec{p}_1} \neq 0, AD_{-\vec{p}_2} \neq 0, AD_{\vec{p}_3} \neq 0,$$

$$\text{angle}(-\vec{p}_3, \vec{p}_1) + \text{angle}(\vec{p}_1, -\vec{p}_2) + \text{angle}(-\vec{p}_2, \vec{p}_3) = \pi$$

[Ψ 交差]

$$AD_{\vec{p}_2} \neq 0, AD_{-\vec{p}_3} \neq 0, AD_{\vec{p}_1} \neq 0, AD_{\vec{p}_3} \neq 0,$$

$$0 < \text{angle}(\vec{p}_2, -\vec{p}_3) + \text{angle}(-\vec{p}_3, \vec{p}_1) < \pi$$

ただし、 $\text{angle}(\vec{A}, \vec{B})$ は、 \vec{A}, \vec{B} がなす小さい方の角度を表す。

< 図 8

3 シミュレーション

本アルゴリズムを用いて実際に人工画像と実画像についてシミュレーションを行った。ここでは、現実のシーンで表れる交差形状のほとんどが、三重以下のエッジで構成されていることを踏まえ、本シミュレーションでの解析対象は、三重以下のエッジで構成される交差形状までとした。

3.1 交差形状解析アルゴリズム

交差形状解析アルゴリズムの処理手続きについて説明する。

- (1) 実画像 ($256[\text{pixel}] \times 256[\text{pixel}]$ 、256階調) のコントラストを上げるため濃度階調の線形変換を行う。ただし、人工画像については、この処理は行わない。
- (2) 画像と窓関数 $g(x, y)$ の一次微分、三次微分のそれぞれについて畳み込み演算を行う。なお、ここで用いる窓関数 $g(x, y)$ はガウス関数である。

$$g(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left[-\frac{x^2 + y^2}{2\pi\sigma^2}\right] \quad (35)$$

なお、用いたスケールパラメータは、 $\sigma = 1$ である。

- (3) 各点ごとに、 $4[\text{pixel}] \leq s_x \leq 20[\text{pixel}]$, $4[\text{pixel}] \leq s_y \leq 20[\text{pixel}]$ の範囲で s_x, s_y をそれぞれ独立に変化させ、一次微分エネルギー ED の分散 V_{ED} が最小になるような $s_{x_{min}}, s_{y_{min}}$ を求め、矩形領域 ($\epsilon(x, y) = \{(x, y) \mid |x - x_0| \leq s_{x_{min}}, |y - y_0| \leq s_{y_{min}}\}$) をエネルギー積分領域として用いる。
- (4) 各点ごとに固有値問題を解いて三重方向を算出する。なお、2.1.1における代数方程式は、Jenkins-Traub 法により解いた。なお、シミュレーションで用いたパラメータを以下に示す。
- 交差近傍領域：半径 $r_0 = 2[\text{pixel}]$ の円内
- 境界判定領域 $\delta(\vec{v})$ ：交差点 O から半径 r_0 だけ離れた点から $2L$ (ただし、 L は、 $s_{x_{min}}, s_{y_{min}}$ のうち大きい方の値) までの間にある境界線上の点
- 境界線エッジ判定で用いるしきい値： $threshold = 0.4$
- (図 4、図 5 参照)
- (5) 上記で求めた多重方向と一次微分量を用いて、境界判定領域での各方向微分量の平均値 ($AD_{\vec{v}}, AD_{\vec{v}_\perp}$) を算出し、それを用いて交差形状分類を行う。
- (6) Y、arrow、K、 Ψ 交差形状等を抽出する。

3.2 シミュレーション結果

図9は人工画像におけるエネルギー積分領域の設定結果を矩形で16[*pixel*]ごとに示してある。図10は人工画像の、そして、図11はカメラから取り込んだ実画像の交差形状抽出結果である。特に、図11では、白い矩形で囲まれた部分の1画素を(17[*pixel*] \times 17[*pixel*])に拡大して表示してある。

今回は、人工画像、実画像の両方とも、三重エッジ方向で構成される交差形状を抽出するために、各点とも三重エッジ方向があるとして方向を抽出し、その結果に基づいて交差形状分類を行った。図10、11からも分かる通り、三重エッジによって構成される Y、arrow、K、 Ψ 交差は全て抽出することができた。また、二重エッジで構成される L、T 交差や単方向エッジも、一部の T 交差を除いて正しく抽出することができた。

< 図9

< 図10

< 図11

4 むすび

3次元物体投影像に現れる Y、arrow、K、 Ψ 交差といった複雑な交差形状を低次微分情報を用いて一撃的に抽出できるアルゴリズムの提案を行った。また、

交差形状解析アルゴリズムを用いる際に必要なエネルギー積分領域を画像の一次微分情報だけから決定できる方法を提案した。そして、人工画像だけでなく実際にノイズを含む実画像に対しても適用できることを示した。

本アルゴリズムにより、エネルギー積分領域の設定も含め、すべて画像の3次以下の微分情報だけを用いて交差形状解析を行うことができた。特に、画像の各局所部分の状態に応じて適応的にエネルギー積分領域を設定することで、ノイズを含む実画像に対しての抽出精度が向上し、ロバスト性も増し、さらには、計算コストの低減を実現することができた。

今回のシミュレーションでは、三重エッジで構成される交差形状の解析法のみを用いたが、単一方向エッジや二重エッジで構成される交差形状も一部のT交差を除いて正しく解析することができた。しかし、より高い解析精度を求めるためには、交差形状を構成しているエッジの数（多重度）に応じた処理が必要となる。今後は、多重度の決定のための評価方法や交差形状位置の精度向上等の検討を行い、さらには、物体輪郭抽出や複数物体の分離抽出問題等への適用も考えていく。

謝辞

本研究の機会を与えて下さった ATR 人間情報通信研究所東倉洋一社長、同研究所第二研究室赤松茂室長に感謝致します。また、日頃御討論頂く ATR 人間情報通信研究所の皆様にも感謝致します。

文 献

- (1) D.G. Lowe, *Perceptual Organization and Visual Recognition*, Kluwer Academic Publishers, 1985.
- (2) L. Kitchen and A. Rosenfeld, "Gray-level corner detection", *Pattern Recognition Letters*, Vol. 1, pp. 95-102, 1982.
- (3) C.G. Harris, "Determination of ego-motion from matched points", *Proc. Alvey Vision Conf. Cambridge, UK*, pp. 189-192, 1987.
- (4) J.A. Noble, "Finding corners", *Image and Vision Computing*, Vol. 6, No. 2, pp. 121-128, 1988.
- (5) R. Deriche and G. Giraudon, "A Computational Approach for Corner and Vertex Detection", *International Journal of Computer Vision* Vol. 10, No. 2, pp. 101-124, 1993.
- (6) K. Rohr, "Modelling and identification of characteristic intensity variations", *Image and Vision Computing*, Vol. 10, No. 2, pp. 66-76, 1992.

- (7) J. Matas and J. Kittler, "Junction detection using probabilistic relaxation", *Image and Vision Computing*, Vol. 11, No. 4, pp. 197–202, 1993.
- (8) W.T. Freeman and E.H. Adelson, "The Design and Use of Steerable Filters", *IEEE Trans.on Pattern Anal. and Mach Intell.*, Vol. PAMI-13, No. 9, pp. 891–906, 1991.
- (9) W.T. Freeman, "Steerable Filters and Local Analysis of Image Structure", *Ph.D. Thesis, M.I.T. Media Lab.*, 1992.
- (10) P. Perona, "Steerable-Scalable Kernels for Edge Detection and Junction Analysis", *Image and Vision Computing*, Vol. 10, No. 10, pp. 663–672, 1992.
- (11) L. Rosenthaler, F. Heitger, O.Kubler and R. v. d. Heydt, "Detection of General Edges and Keypoints", *In Computer Vision - ECCV'92*, Springer-Verlag, pp. 78–86, 1992.
- (12) T. Nakamura, G. Xu and S. Tsuji "The Fan Operator for Detection of Junctions and Cor-

ners" *Proc. 1st Korea-Japan Joint Conference on Computer Vision* pp. 480-486, 1991.

- (13) 磯 俊樹、志沢雅彦 “局所微分情報に基づく交差形状解析 ～低次微分フィルタによる L, T, X 交差検出” *信学論 (D-II)* J76-D-II, No.12, pp. 2529 – 2536, 1993
- (14) M. Shizawa and K. Mase, "Principle of Superposition: A Common Computational Framework for Analysis of Multiple Motion", *Proc. IEEE Workshop on Visual Motion*, pp. 164-172, 1991.
- (15) M. Shizawa and T. Iso, "Direct Representation and Detection of Multi-Scale, Multi-Orientation Fields Using Local Differentiation Filters", *Proc. IEEE CVPR'93*, pp. 508-514, 1993.

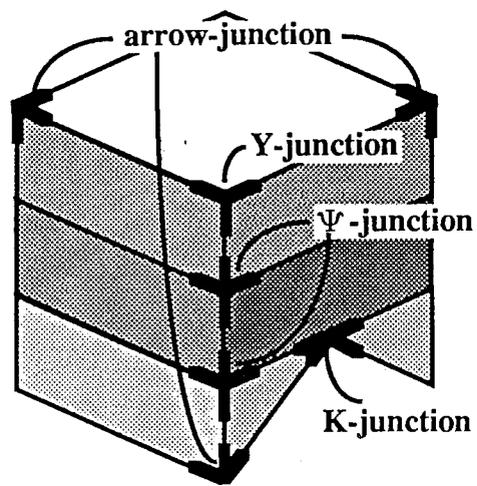


図 1 : 3次元物体投影像に現れる交差形状例
Fig 1 : An example of junction types on the projected image of 3D object

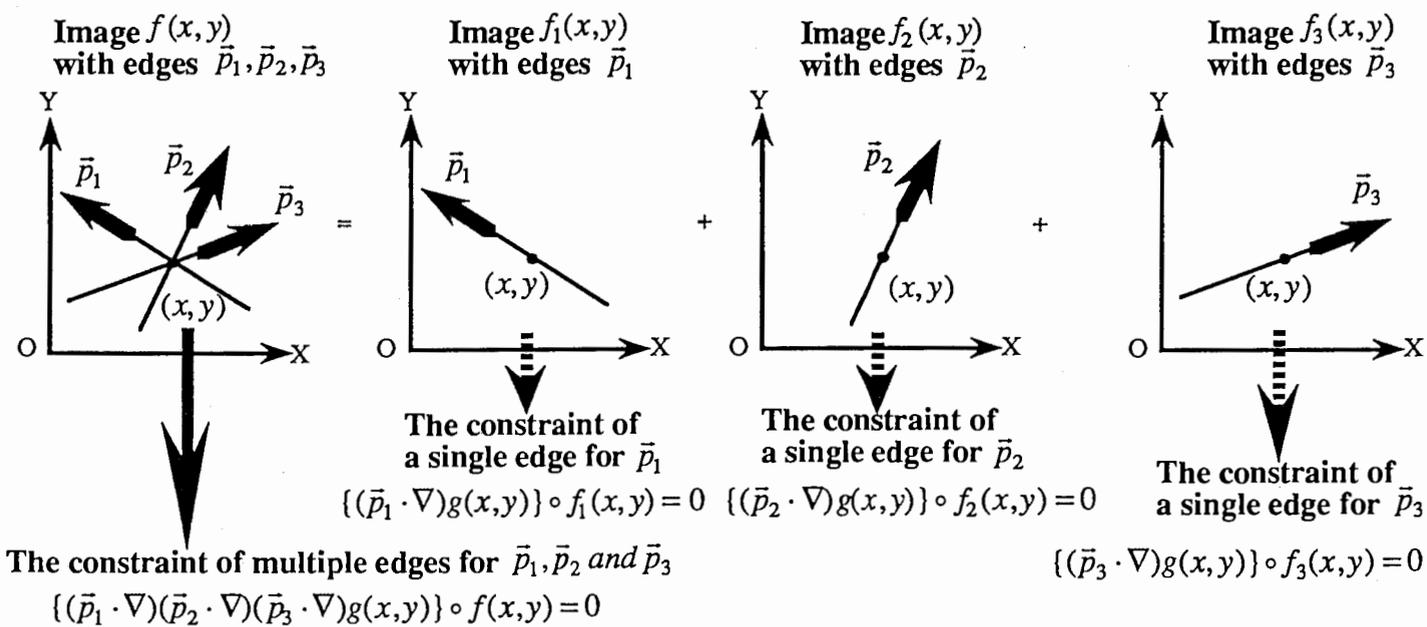


図 2 : 重ね合わせの原理を用いて拡張した 3 重エッジの拘束条件
 Fig 2 : Constraint of triple edges based on the Principle of Superposition

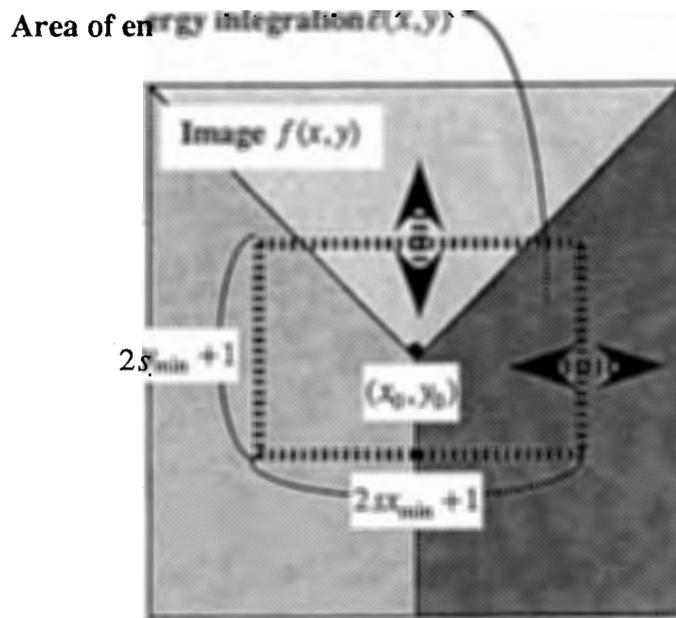


図 3 : エネルギー積分領域
 Fig 3 : Area of energy integration

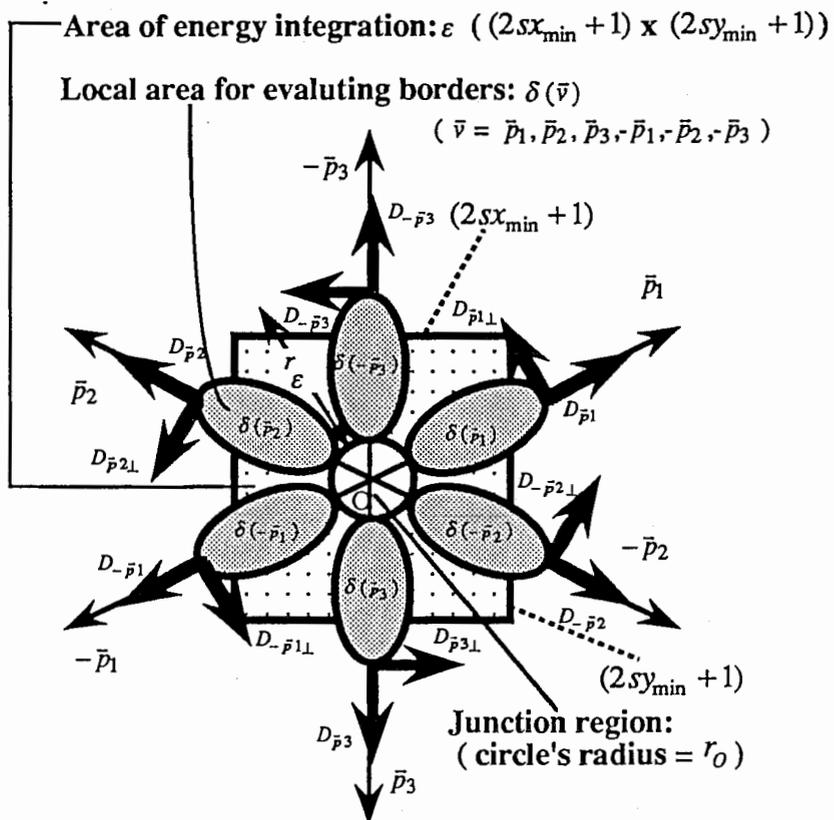


図 4 : 交差形状を決定する局所微分情報

Fig 4 : Local derivative information
for determining the junction

(1) Sum of directional derivatives along border \bar{v} (2) Sum of directional derivatives along border \bar{v}

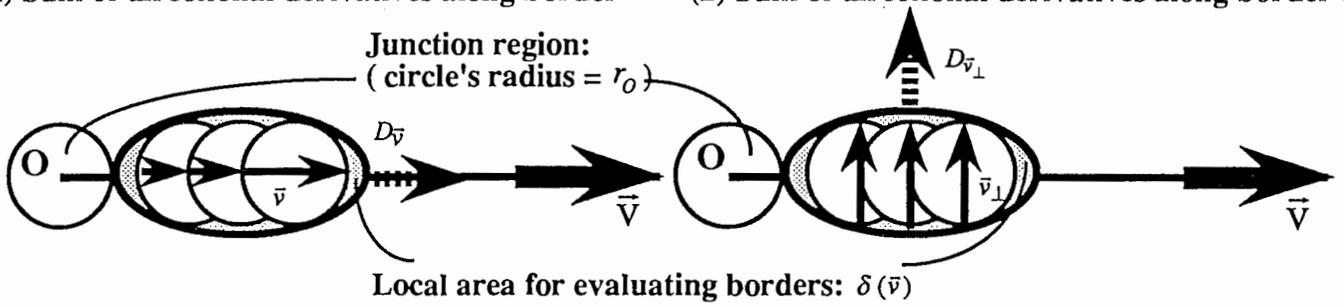
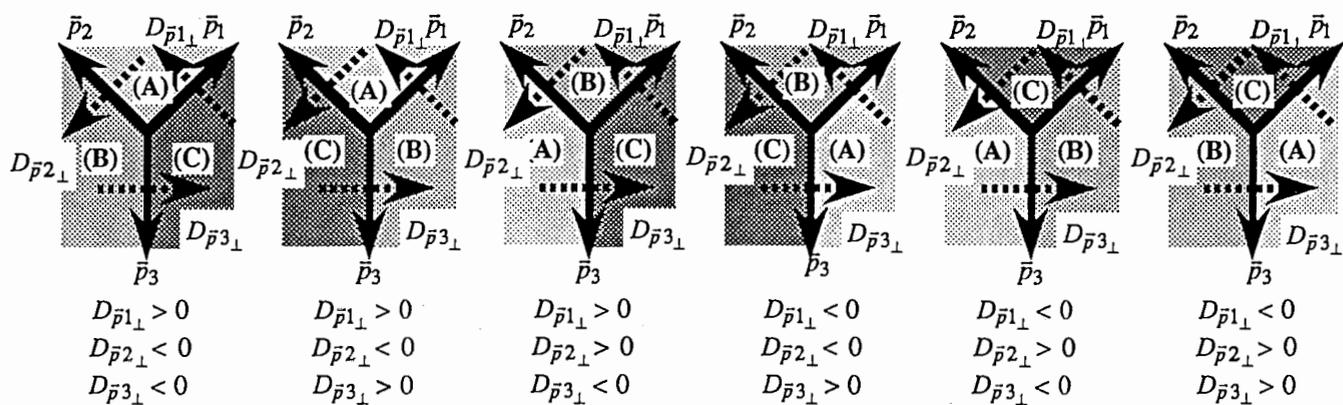


図 5 : 境界判定領域での微分情報
Fig 5 : Derivative information in the local area for evaluating borders



Intensity in area (A) > Intensity in area (B) > Intensity in area (C)

図 6 : 存在し得る Y 交差の濃淡形状

Fig 6 : Shapes of intensity at neighborhoods of Y-junctions

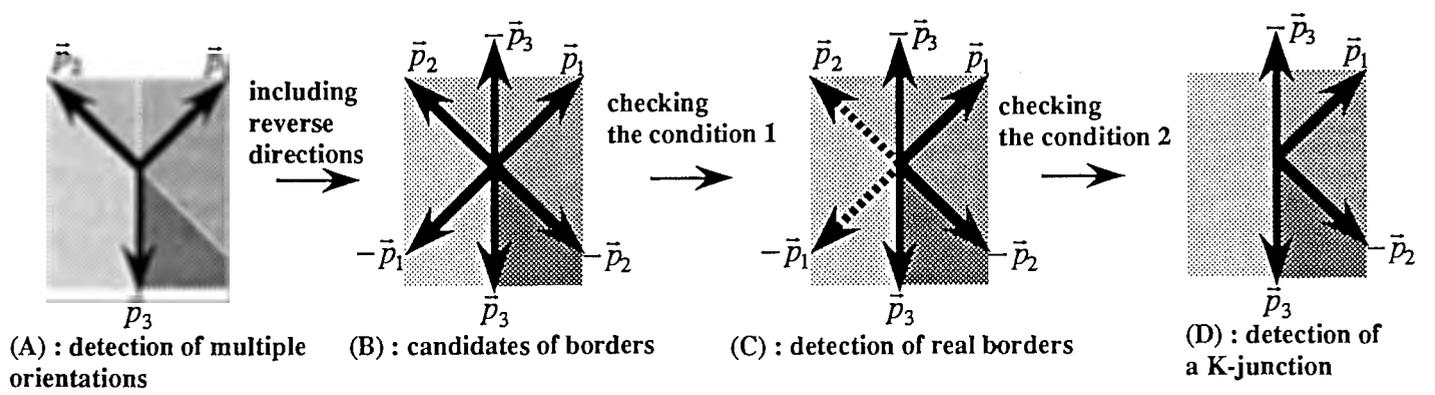
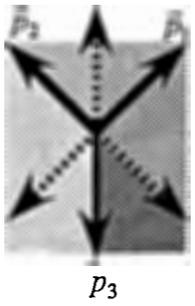
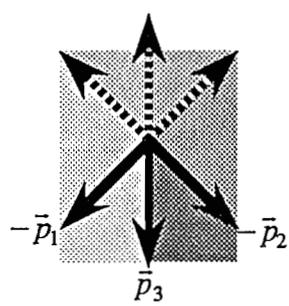


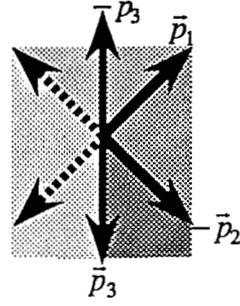
図 7 : K 交差の分類手順例
 Fig 7 : An example for classifying K-junction



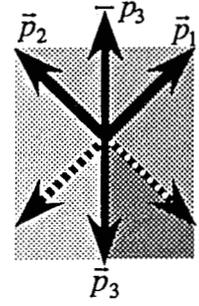
[Y-junction]



[arrow-junction]



[K-junction]



[Ψ -junction]

图 8 : Y, arrow, K, Ψ 交差例
 Fig 8 : An example for Y-, arrow-, K-, and Ψ -junction

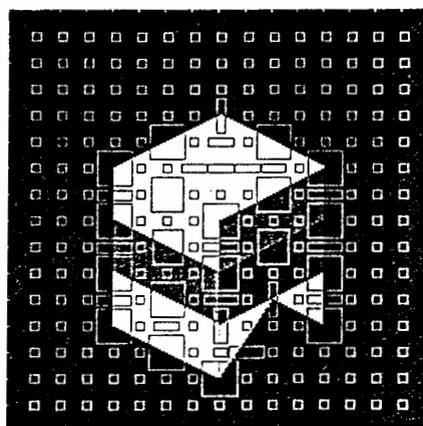
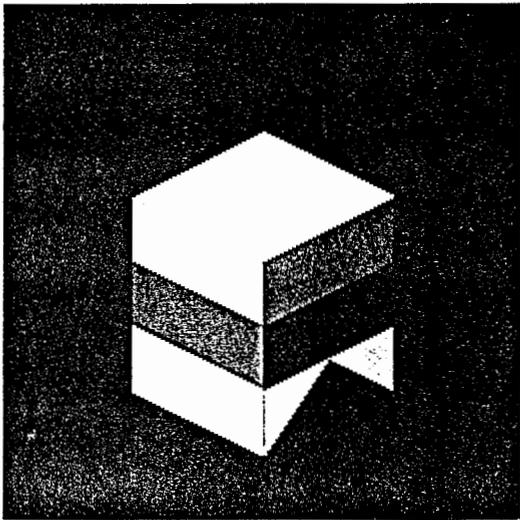
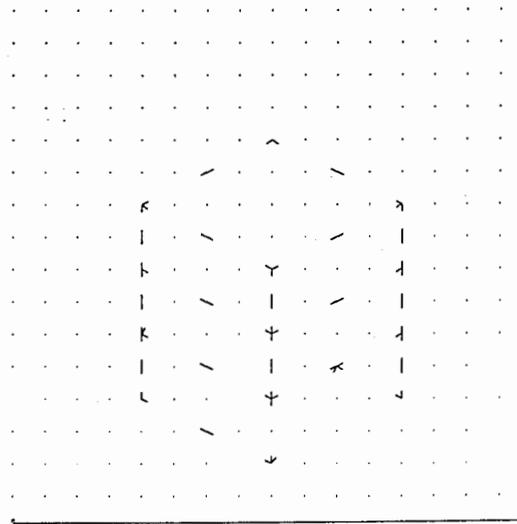


図 9 : 局所微分情報に基づいた
エネルギー積分領域の決定

Fig 9 : Areas of energy integration determined
by using local image derivatives

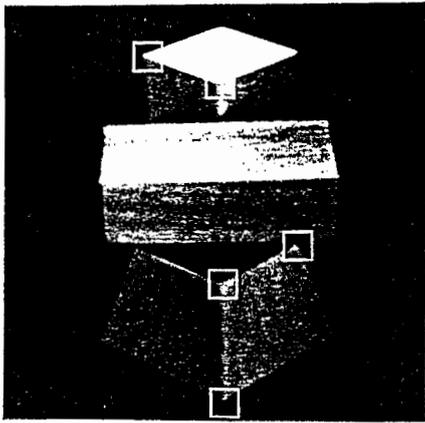


(a) Original image (Artificial image)

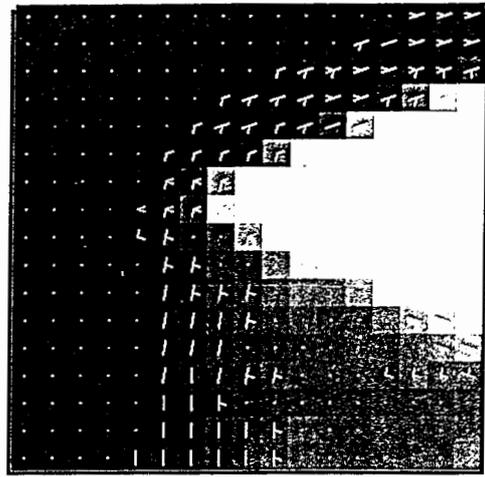


(b) Results

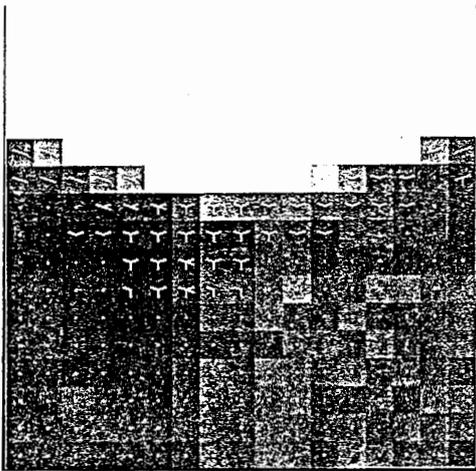
図 10 : 人工画像からのY, arrow, K, Ψ 交差抽出
Fig 10: Detecting Y-, arrow-, K- and Ψ -junctions from artificial images



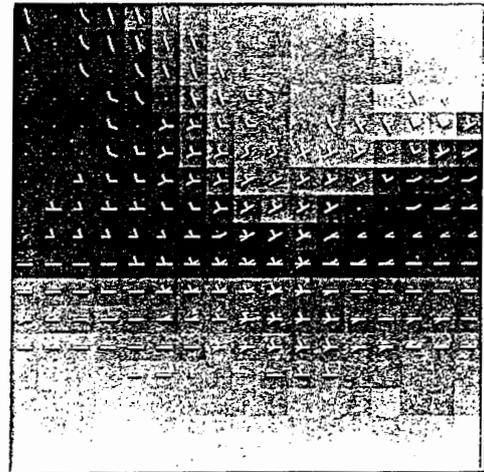
(a) Original image (Real image)



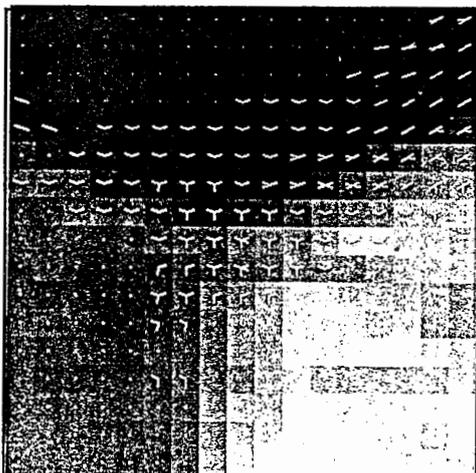
(b) arrow-junctions (1)



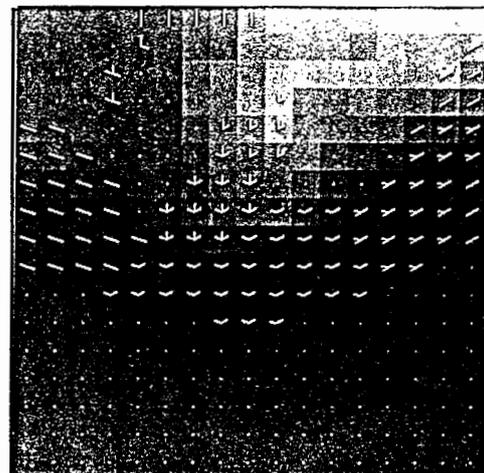
(c) Y-junctions (1)



(d) K-junctions



(e) Y-junctions (2)



(f) arrow-junctions (2)

図 1 1 : 実画像からの Y, arrow, K 交差抽出
 Fig 11: Detecting Y-, arrow- and K-junctions from artificial images