

Title	自動視覚検査方式における画像処理装置に関する研究
Author(s)	服部, 哲郎
Citation	大阪大学, 1992, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.11501/3089977
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

Osaka University

自動視覚検査方式における
画像処理装置に関する研究

服部 哲郎

1992年 1月

内 容 梗 概

本論文は筆者が大阪大学工学部通信工学科，同志社大学大学院工学研究科，ならびに東芝エンジニアリング（株）技術開発部，及び香川大学教育学部において行った研究のうち「自動視覚検査方式における画像処理装置に関する研究」をまとめたものであり，全文は次の7章より構成されている。

第1章は緒論であり，本研究の背景及び意義について概説し，本研究の位置づけと目的を明らかにする。

第2章では，視覚検査の自動化においてコンピュータを用いた画像処理に要求される事項を述べる．先ず，視覚検査においてニーズの多い検査機能を分類して述べ，現実には種々の項目の同時検査が要求されることから，幾つかの画像処理機能を併せた複合的画像処理が必要であることを示す．更に，視覚検査は工場における生産ラインにおいて最も必要とされ，その目視検査員に代行できるだけの高速性が要求されることから，次々と流れ作業的に連続処理できるパイプライン処理方式に基づいた画像処理機能のハードウェア化が必要なことも示す．

第3章では，パイプライン処理方式に基づいた連結領域抽出のための領域ラベリングについて述べる．領域ラベリングは自動視覚検査において最も基本的で，且つ重要な画像処理機能の1つであると考えられるが，ソフトウェア処理では時間がかかりかかるため，パイプライン処理方式におけるハードウェア化指向のアルゴリズムを述べる．このアルゴリズムでは，ラベルの付与と同時に1つ前の行のラベルを常に書き直し，更に，1次元配列形式のテーブル（L RAM）に書かれているラベル間連結情報の統合処理を各行毎に行う．本アルゴリズムによれば，連結情報のデータ構造はグラフ構造には成り得ず，またL RAMへの上書きのために連結情報が失われることもない．すなわち，ラベル間の連結情報が保存され

たまま最終的には1つの連結パターンは唯一つのラベルが付与される、という意味で正当なアルゴリズムであることが証明される。更に、本アルゴリズムに基づき実現されたラベリング・プロセッサとそのハードウェア・アーキテクチャも示す。

第4章では、視覚検査の要求事項の一つである文字認識の手法を述べる。すなわち、切れ、かすれ、欠けのある印字文字や、柔らかな包装上の日付などの印刷文字のように局所変動を有する文字パターンの認識手法として、距離変換に基づくベクトル場整合法を述べる。距離変換により文字パターンの境界からの距離による等高（距離）線が形成され、その等高線の勾配に相当するベクトルの場が構成される。2つの文字パターン間の類似度は各点（画素）のベクトルの内積に基づいて定義できる。本章では、この類似度におけるパターンの位置ずれや回転の変動の影響を分析し、手書き片仮名・平仮名パターンに対する認識実験結果を示す。更に、かなり変動の大きいパターンに対しては、ベクトル場を利用した伸縮変換整合法を示す。これは、2つのベクトル場においてそれらが最も良く重なるように、文字パターン外周領域から点对応を動的に決定して行き、その点对応（変位ベクトル場）から一方のパターンを伸縮変換し整合させる手法である。このとき重ね合せ過ぎを抑制する変位抑制機能や、文字パターンの変動に対する伸縮変換整合法の吸収能力についても論じる。

第5章では、視覚検査の分野において汎用性を狙ったシステム構築指向の装置化について論じる。すなわち、多種多様なニーズに柔軟に対処でき、しかも処理が高速でシステム構築も容易な装置を目指したシステム・アーキテクチャについて述べる。このアーキテクチャとして、高速処理とシステム構築上の見通しの良さから、先ずハードウェアによるパイプライン処理方式を基本とする。更に、その方式の柔軟性に欠ける点を補うために、画像処理のハードウェア・モジュールを積み木のように積み上げてシステム構築ができるような、ビルディング・ブロック型パイプライン・アーキテクチャを採用する。本章では、このアーキテクチ

ャと、そのシステム構築上支柱となるビデオ信号同期制御方式によるシステム制御機構、及びその制御機構の要となる画像バスの仕様について述べる。また、画像処理機能を多様にし、第2章で述べた複合的画像処理機能を一層進めるためにもルックアップテーブル（LUT）の有効活用を基本方針としており、このような方針に基づいて開発された装置HSIPの装置構成と画像処理機能、及びソフトウェアによるシステム制御法についても述べる。

第6章では、開発装置HSIPの応用例として、自動点検ロボットにおける3次元距離情報（奥行き）抽出のプロセッサ・システムを挙げ、その原理や処理速度、及び距離情報の抽出精度について述べる。更に、検査システム事例としてテープ検査や、ピン検査、及びASTM法に基づく鋼の品質等級判定（または非金属介在物検査）システムについても言及し、その性能を述べることにより装置HSIPの有効性を明らかにする。

第7章は結論であり、本研究で得られた結果をまとめ、残る問題点や今後の課題について述べる。

関 連 発 表 論 文

A. 学会誌及び国際会議論文

- [1] 服部, 渡辺, 真田, 手塚: "チェス盤距離分布に基づくベクトル場整合法を用いた手書き文字認識", 電子通信学会論文誌(D), vol. J64-D, no.12, pp.1097-1104 (1981-12).
- [2] 服部, 渡辺, 真田, 手塚: "ベクトル場を用いた伸縮変換による手書き文字の局所的変動の吸収", 電子通信学会論文誌(D), vol. J66-D, no. 6, pp. 645-652 (1983-06).
- [3] T.Hattori, Y.Hidaka: "An Automatic Visual Inspection Method of Pattern Using a Circular Feature Extraction Filter", Proceedings of IEEE-IECEJ-ASJ International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, pp.1453-1456 (1986-04).
- [4] T.Hattori: "A High-Speed Pipeline Processor for Regional Labelling Based on a New Algorithm", Proceedings of 10th IAPR (国際パターン認識学会) International Conference on Pattern Recognition, IEEE Computer Society Press, pp.494-496 (1990-06).
- [5] T.Hattori, M.Nakada, and K.Kubo: "Real-Time Processor for 3-D Information Extraction from Image Sequences by a Moving Area Sensor", SPIE (光工学会) vol.1349, Applications of Digital Image Processing X III, pp.301-312 (1990-07).
- [6] T.Hattori, M.Nakada, and K.Kubo: "A Real Time Image Processor for the Extraction of 3-D Distance Information from Image Sequence", 情報処理学会, 情報処理学会30周年記念国際会議論文集, pp.211-218 (1990-10).
- [7] T.Hattori and M.Nakada: "A Practical High-Speed Image Processor for Automated Visual Inspection system", Proceedings of 16th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society, pp.570-575 (1990-11).

- [8] T.Yamasaki, T.Hattori, and S.Inokuti: "An Adaptive Real Time Training System for Beautiful Handwriting of Japanese Letters". Proceedings of IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, pp.88-93 (1990-11).
- [9] T.Hattori, T.Yamasaki, Y.Watanabe, H.Sanada, and Y.Tezuka: "Distance Based Vector Field Method for Feature Extraction of Characters and Figures". Proceedings of 1991 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, pp.207-212 (1991-10).
- [10] T.Hattori: "New Regional Labeling Algorithm of Pipeline Image Processor and Proof of the Correctness". Proceedings of 1991 IEEE International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation, pp.2005-2010 (1991-10).

B. 専門研究会及び紀要論文

- [1] 服部, 真田, 手塚: "疑似不動点による文字図形認識の一手法", 信学技報, PRL78-63, pp. 49-57 (1979-01).
- [2] 服部, 渡辺, 真田, 手塚: "ベクトル場を用いた整合法による文字認識", 信学技報, PRL79-112, pp. 21-26 (1980-03).
- [3] 服部, 渡辺, 真田, 手塚: "パターン間に介在する多項式で展開される連続な座標変換解について", 信学技報, PRL80-83, pp. 13-18 (1981-02).
- [4] 服部, 渡辺, 真田, 手塚: "ベクトル場を用いた伸縮変換整合法による文字認識", 信学技報, PRL81-76, pp. 69-76 (1982-01).
- [5] 服部, 渡辺, 真田, 手塚: "ベクトル場のダイバージェンスを用いた特徴抽出による手書き文字の大分類", 信学技報, PRL82-42, pp. 33-38 (1982-11).
- [6] 服部, 日高, 中田, 黒沢: "円形状の局所特徴抽出フィルターを用いたパターンの検査方式", 信学技報, PRL84-90, pp. 69-75 (1985-02).
- [7] 服部: "高速パイプライン・ラベリング・プロセサ (I)", 香川大学教育

学部研究報告, vol. 39-2, pp. 149-154 (1989-11).

- [8] 服部: "高速パイプライン・ラベリング・プロセサ(II)", 香川大学教育学部研究報告, vol. 39-3, pp. 71-80 (1990-06).

C. 学会, 大会等口頭発表論文

- [1] 服部, 真田, 手塚: "不動点定理に基づく文字図形認識のための一手法", 電子通信学会総合全国大会講演論文集, 1327, p. 316 (1979-03).
- [2] 服部, 渡辺, 真田, 手塚: "折れ線近似による文字の連結行列表現のファジィ論的拡張", 電気関係学会関西支部連合大会講演論文集, G8-14, p. G240 (1979-11).
- [3] 服部, 渡辺, 真田, 手塚: "デジタル画像におけるファジィ・クラスタリングの一手法", 電子通信学会総合全国大会講演論文集, 1309, p. 337 (1980-03).
- [4] 服部, 渡辺, 真田, 手塚: "二つの画像間のアフィン変換解について", 電気関係学会関西支部連合大会講演論文集, G8-11, p. G244 (1980-11).
- [5] 服部, 渡辺, 真田, 手塚: "パターン間に介在するアフィン座標変換解について", 電子通信学会総合全国大会講演論文集, 1309, p. 286 (1981-04).
- [6] 服部, 渡辺, 真田, 手塚: "モーメント量の自乗誤差基準を用いた最適アフィン変換解", 電子通信学会情報・システム部門全国大会講演論文集, 1-61, p. 61 (1981-10).
- [7] 服部, 渡辺, 真田, 手塚: "文字認識のためのベクトル場を用いた伸縮変換法について", 電気関係学会関西支部連合大会講演論文集, G8-9, p. G242 (1981-11).
- [8] 服部, 渡辺, 真田, 手塚: "ベクトル場を用いた伸縮変換整合法による文字認識", 情報処理学会第24回全国大会論文集, 1E-1, pp. 669-670 (1982-03).
- [9] 服部, 渡辺, 真田, 手塚: "ベクトル場を用いた伸縮変換整合法", 電子通信学会総合全国大会講演論文集, 1339, p. 324 (1982-03).

- [10] 服部, 渡辺, 真田, 手塚: "ベクトル場のdivergenceを用いた手書き文字の大分類法", 情報処理学会第25回全国大会論文集, 6B-4, pp.937-938 (1982-10).
- [11] 服部, 渡辺, 真田, 手塚: "ベクトル場のダイバージェンスによる文字の特徴抽出と大分類", 電気関係学会関西支部連合大会講演論文集, G8-9, p.G237 (1982-12).
- [12] 服部, 渡辺, 真田, 手塚, 他: "ベクトル場のダイバージェンスと重み付き自己相関行列を用いた手書き文字の大分類法", 電子通信学会総合全国大会講演論文集, 1398, p.269 (1983-04).
- [13] 寺井, 渡辺, 服部: "ベクトル場のダイバージェンスを多段的に用いた手書き文字認識", 電子通信学会情報・システム部門全国大会講演論文集, 81, p.81 (1983-09).
- [14] 服部, 渡辺, 真田, 手塚: "ベクトル場の特徴点に着目した手書き漢字・平仮名文字認識", 第15回画像工学コンファレンス論文集, 13-6, pp.247-250 (1984-11).
- [15] 服部, 日高, 中田, 黒沢: "円形状の局所特徴抽出フィルターを用いたパターン検査法", 電子通信学会総合全国大会講演論文集, 1688, p.272 (1985-03).
- [16] 服部, 日高: "円形状の局所特徴抽出フィルタによるパターン検査法", 第16回画像工学コンファレンス論文集, 9-9, pp.189-192 (1985-12).
- [17] 中田, 黒沢, 服部, 日高: "視覚検査用画像処理装置の開発(1)-装置概要-", 情報処理学会第32回全国大会論文集, 4N-6, pp.1395-1396 (1986-03).
- [18] 黒沢, 中田, 服部, 日高: "視覚検査用画像処理装置の開発(2)-パターン検査装置-", 情報処理学会第32回全国大会論文集, 4N-7, pp.1397-1398 (1986-03).
- [19] 服部, 中田, 黒沢, 日高: "視覚検査用画像処理装置の開発(3)-欠陥パターンの有無とその形状判定-", 情報処理学会第32回全国大会論文集, 4N-8, pp.1399-1400 (1986-03).

- [20] 服部, 中田: "設備部品検査への画像処理技術の応用", 第4回電気設備学会研究発表会講演論文集, C-10, pp.85-86 (1986-09).
- [21] 服部, 中田: "自動外観検査用画像処理アルゴリズムとその装置化", 第17回画像工学コンファレンス論文集, 3-9, pp.71-74 (1986-12).
- [22] 服部, 野々村: "ビデオ・レートで連続画像処理する高速ラベリング・プロセッサ", 情報処理学会第35回全国大会論文集, 3J-4, pp.2011-2012 (1987-09).
- [23] 服部, 野々村: "ビデオ・レートで連続画像処理可能な高速ラベリング・プロセッサ", 第18回画像工学コンファレンス論文集, 15-7, pp.295-298 (1987-12).
- [24] 服部, 中田, 久保: "単眼移動視による3次元情報処理用リアルタイム・プロセッサ", 第19回画像工学コンファレンス論文集, 5-10, pp.157-160 (1988-12), (優秀ポスタ賞授賞).
- [25] 森山, 堀川, 服部, 山崎: "3次元距離情報抽出のためのマルチ・プロセッサ・システム", 平成3年電気関係学会 四国支部連合大会論文集, 13-16, pp.451-452 (1991-11).
- [26] 吉田, 服部, 山崎: "2次元シュミット・トリガ的画像処理に基づく領域抽出", 平成3年電気関係学会 四国支部連合大会論文集, 13-18, pp.455-456 (1991-11).

目 次

第1章 緒 論	1
第2章 自動視覚検査のための画像処理	5
2.1 緒 言	5
2.2 要求検査機能	6
2.2.1 計 測	6
2.2.2 形状判別	7
2.2.3 パターンの欠陥検出	7
2.2.4 異物・キズ・汚れ検出	7
2.2.5 文字認識	9
2.3 実システムにおける画像処理への要請	9
2.3.1 画像入力系・機械系の負担軽減	9
2.3.2 複合的画像処理と画素情報のベクトル化	11
2.3.3 高速性	17
2.4 結 言	17
第3章 パイプライン処理方式に基づく領域ラベリング	19
3.1 緒 言	19
3.2 領域ラベリング・アルゴリズム	21
3.2.1 1次ラベリング	21
3.2.2 2次ラベリング	25
3.2.3 アルゴリズムの特長	25
3.3 アルゴリズムの正当性	25
3.3.1 諸定義	28
3.3.2 正当性の証明	29

3.4	ハードウェア・アーキテクチャとその実現	40
3.5	結 言	42
第4章	自動視覚検査における文字認識	43
4.1	結 言	43
4.2	ベクトル場整合法	45
4.2.1	修正距離変換	45
4.2.2	ベクトル場の作成	46
4.2.3	ベクトルの内積に基づく類似度	47
4.2.4	局所変動の類似度における影響	52
4.2.5	認識実験	58
4.3	伸縮変換整合法	61
4.3.1	変位ベクトル場の決定	61
4.3.2	伸縮変換と類似度計算	64
4.3.3	局所変動に対する吸収能力	68
4.4	結 言	71
第5章	検査システム構築指向の装置開発	73
5.1	結 言	73
5.2	システム・アーキテクチャ	74
5.2.1	ビルディング・ブロック型 パイプライン・アーキテクチャ	74
5.2.2	ビデオ信号同期制御方式	76
	A. 基本構想	76
	B. 画像バスと制御機構	80
5.2.3	LUTの有効利用	82
5.3	開発装置HSIPの構成と機能	83
5.3.1	システム制御部	83

5.3.2	画像入力部	84
5.3.3	画像処理部	86
5.3.4	画像表示部	90
5.4	ソフトウェアによる制御	90
5.4.1	基本方針	90
5.4.2	制御手順	92
5.5	結 言	93
第6章	開発装置HSIPの応用	95
6.1	結 言	95
6.2	自動点検ロボットにおける3次元距離情報抽出	95
6.2.1	距離情報抽出の原理	96
6.2.2	画像系列の処理	97
6.2.3	処理速度と距離情報抽出精度	100
6.3	検査システム事例とその評価	106
6.3.1	医療用テープ検査システム	106
6.3.2	ピン検査システム	106
6.3.3	鋼の品質等級判定システム	108
6.4	結 言	111
第7章	結 論	113
謝 辞		117
参考文献		119

第1章 緒 論

コンピュータによる画像処理及びパターン認識分野などの発展に伴い、それらの産業応用として種々の目視検査工程や外観計測工程を自動化する、自動視覚検査システムへの社会的ニーズが近年とみに高まっている[1]－[4]。その理由としては、

(1) 長時間持続して行う目視検査では眼精疲労や精神的苦痛を伴う場合が多く、目視検査要員の確保が困難となり、一部には既存の検査要員の高齢化現象さえも起き始めている、

(2) 人の場合精神的・肉体的要因が検査結果に大きく影響し、一定の検査水準を保つことが容易でなく、従って出荷製品に対して定水準の品質を保証しかねること、

などが挙げられる。また、これらの理由に加えて最近では、

(3) 自動視覚検査システムに対して、単なる不良品検出機能だけでなく、前段工程における生産システムの不具合を”早期発見・早期治療”する診断機能も有する高度なシステムとして位置づけ、この観点による検査システム導入の期待感が現場に高まりつつあること、

という理由も挙げることができる。これは、生産システムによっては不断に製品の出来映えを監視していないと、ある時点からバースト的に不良品が続出し、かつ製造ラインの装置そのものにも破壊的故障が生じる、というような事故が起り得るからである。検査工程において製造ラインからの製品を自動診断し、その結果を常にフィード・バックしながら機械系等の種々のパラメータ調整、または部品交換などを行い、故障や事故、あるいはバースト的不良品生産を未然に防ぎたい、という要求が製造ラインのコンピュータ化に伴い強まって来ているのである。

一方、マイクロ・プロセッサやデジタル信号処理用のLSI素子などが普及するに連れて、種々の画像処理アルゴリズムを実行する汎用的画像処理装置など

が幾つか開発されて来ている [1] - [5], [35], [40] - [43]. しかしながら, 鉄鋼, 機械, 電気, 食品関係など様々な生産工場から要求される視覚検査システムでの画像処理機能は多種多様であり, しかも殆どの場合が全数検査のため, 高速処理の性能が必須条件となる. これらの汎用性と高速性を同時に満足させることが検査システムを対象とする場合には重要課題である. 汎用性を持たせるにはソフトウェアによる処理が必要となるが, 画像情報は大量の情報量を有するために, 処理時間が大となり, 高速性は得られにくい. また, 各検査システムにおける要求仕様毎にその処理アルゴリズム専用のハードウェア化を行えば高速性は得られるが, 開発コストがかかり採算の合う経済性が得られない. 更に, 要求仕様の変更・修正や改訂に対処できる柔軟性は期待できず, その上製造ラインでは極めて重要な保守の問題が現実問題として生じる.

ここで, 従来の画像処理装置を検査システムへの実用性という観点から見ると, それらの多くは,

- (1) 2値画像処理主体で形状特徴量算出をソフトウェアにより行うもの,
- (2) 空間フィルタリング (積和演算による相関) などの基本的濃淡画像処理機能がハードウェア化 (またはLSI化) されており, 豊富な画像処理ソフトウェアも備えられてはいるが, 検査システム用というよりはむしろ画像解析や画像処理アルゴリズム開発などの研究・開発用と思われるもの,
- (3) 特定検査専用画像処理アルゴリズムがハードウェア化されているもの, のいずれかであると考えられ, 前述の意味での汎用性と高速性を同時に満足しているとは言い難い. ここに全的汎用性は無理だとしても, 少なくともハードウェア資源が有効に利用できて再利用性が高く, その結果として視覚検査分野のかなりの範囲をカバーでき得る機構や機能を備えた画像処理装置が望まれる.

このような背景のもとで本論文では, 検査分野において従来装置に比べてより汎用的で且つ高速処理能力を有し, しかも実システム構築が容易となることを目指した検査システム構築指向の画像処理装置とそれに付随する処理機能などについて述べる.

すなわち第2章では, 視覚検査の自動化において画像処理に要求される機能を

述べ、実用的検査システムにおいては、幾つかの画像処理機能を併用しその結果を総体的に処理する複合的画像処理が必要であること、また高速な連続画像処理機能も要求されることから、パイプライン処理方式に基づくハードウェア化の必要性を述べる。

第3章では、そのパイプライン処理のハードウェアを指向した、連結領域抽出のための領域ラベリング・アルゴリズムについて述べる。更に、このアルゴリズムによれば一つの連結パターンには唯一つのラベルのみが付与される、という意味での正当性の証明を行い、ハードウェア化されたラベリング・プロセッサとそのアーキテクチャを示す。

第4章では、視覚検査の要求事項の一つである文字認識の手法を述べる。すなわち、切れ、かすれ、欠けのある印字文字や、柔らかな包装上の日付などの印刷文字のように局所変動を有する文字パターンの認識手法として、距離変換に基づくベクトル場整合法を述べる。この整合法は一般のパターン整合法としても使用可能であり、ハードウェア化も比較的容易な上に通常の相関による整合法より識別能力が高い。但し、局所変動がかなり大きなパターンに対しては有効性は低下するため、更に、ベクトル場を利用した伸縮変換整合法のアルゴリズムを示す。また、これら整合法の文字パターンにおける局所変動吸収能力を明らかにする。

第5章では、システム構築指向の装置化について論じる。システムの見通しの良さや高速性からパイプライン処理を基本とし、通常の汎用的画像処理装置のように処理結果の画像を画面（フレーム）単位でフレーム・メモリーヘータアクセスすることはしない[35], [41]。このアクセスは主に処理結果の画像を逐一表示するためのものであり、研究開発では重要な要素だが、実システムにおいてはかなり無駄な時間となる。このため基本的にはフレーム・メモリを介さずに画像データを次々とハードウェア・モジュールに通してパイプライン処理するようにし、各モジュールの処理結果の表示には別の画像バスを設けて、パイプライン処理と表示が同時に行えるようにする。更に、この直列的パイプライン処理方式の柔軟性に欠ける点を補うために、画像処理のハードウェア・モジュールを積み木のように積み上げてシステム構築ができる、ビルディング・ブロック型パイプライン

・アーキテクチャ（BBPA）を採用する。これに対し、同じくパイプライン処理を基本としネットワーク型の接続制御機構によりハードウェア・モジュール間の接続形態を可変にする汎用的画像処理システムも発表されているが[42]，システムの構造や形態を可変にした場合各ハードウェア・モジュールでの処理の遅延からタイミング制御（または同期処理）が一般に問題となる。例えば文献[42]のシステムの場合，各処理モジュールでの遅延を計算し，各モジュールのパラメータをタイミング良く設定する必要があるとしているが，連続画像入力・処理を行う実システムにおいてこのような遅延を見計らったタイミング制御やモジュール間の接続制御をリアルタイムに行うことは，煩雑なシステム制御になることが予想され，システム構築の容易性や簡便性という意味で問題があるように思われる。システム構築をより簡便なものにするために，BBPAではビデオ信号同期制御方式によるシステム制御機構を用いてこの遅延によるタイミング制御などの問題に対処する。第5章ではこの同期制御方式やその制御機構の物理的要となる画像バスの仕様，及びこれらの基本方針に基づいて開発された装置HSIPの装置構成と機能やソフトウェア制御について述べる。

第6章では，開発装置HSIPの応用事例を幾つか述べ，それら検査システムの仕様と性能について述べる。更に，開発装置HSIPを用いて作製され稼動している実検査システムが現在100以上，約40種類に上ることを示し，視覚検査分野における汎用性と処理の高速性を狙った本装置の有効性を述べる。

第2章 自動視覚検査のための画像処理

2.1 緒言

視覚検査における要求検査機能は種々多様であり、大まかには表2.1に示されているような典型的な項目に分類されるが、同一検査対象物に対して幾つもの検査項目を同時に要求される場合も多く、そのため何種類かの画像処理結果を一まとめにして総体的に処理する複合的画像処理が必要と考える。例えばキズ（傷）の有無を検出する検査において、正常パターンが画像内の不確定位置に混入する

表2.1 視覚検査項目

項目	内容
位置検出・計測	素材・製品の長さ、幅、径の測定 位置、変位、面積の測定 部品の姿勢検出
形状判別	野菜、果実、魚の選別 工具、部品の判別
パターン検査 (パターンの欠陥検出 ・品質評価)	プリント基板パターン検査 セラミック板パターン検査 ICリードフレーム検査 印刷物図柄・文字検査 ファクシミリ、複写機の画質検査
異物・キズ・汚れ検査	空きビン検査 錠剤・カプセル検査 金属表面キズ検査 ガラス製品異物・キズ検査 シート材異物・汚れ検査
文字認識	刻印文字認識 ラベル文字認識 キーボード文字認識 レーザー印字文字認識
粒子解析	金属結晶粒度測定 鋼の非金属介在物測定 シリコンウエハのビット密度測定 医薬品粉末粒子解析

場合もあり，その場合キズの有無判別だけの処理では良品を不良品と誤判定してしまうので，パターン形状判別を始め幾つかの特徴抽出や判別処理の併用が必要となる．その結果，画素には濃度（輝度）情報以外にも幾つかの属性情報が対応し，画素情報がベクトル化される．この複合的画像処理を行うにはベクトル化された大容量の画像情報を処理しなくてはならず，しかも人の視覚（目視）検査に代行するためには，自動視覚検査システムにおいてかなり高速の画像処理機能が必要となる．本章では，視覚検査の自動化における様々な要請について述べ，複合的画像処理と高速性の必要性を示す．また，視覚検査のニーズは生産工場において大であることから，次々と流れ作業的に連続処理できるパイプライン処理方式のハードウェア化が必要なことも述べる．

2.2 要求検査機能

2.2.1 計測

電気・電子・機械系の部品などにおけるサイズの測長または寸法計測を行う．例えば図2.1に示されているように，セラミック部品の穴の径や外形の寸法が一定許容範囲内であるか否かの判定を行う．このような計測には機械系による接触型の寸法測定法もよく用いられているが，計測時に対象物を固定静止させるた

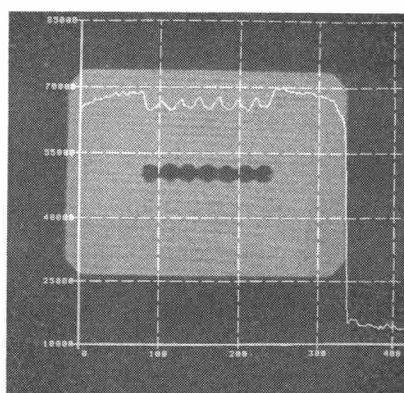


図2.1 セラミック部品における寸法計測

め、製造ラインでは搬送系を間欠送りの機構にせざるを得ず、計測の高速化に限界がある。更に、接触型では対象物の固定静止の失敗と、接触による破損なども起こり得る。これに対してカメラによる非接触型の計測では、比較的簡便かつ高速に測定が可能なため、要求度の高い検査機能となっている。以上のような計測に加えて、表2.1に示されているように、部品装着のための位置決め用の計測（位置検出）もある。

2.2.2 形状判別

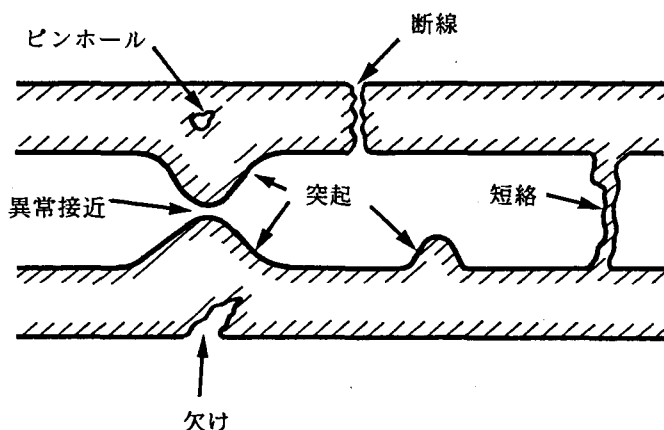
農林水産物の選別、或いは電気・電子・機械部品の判別において要求される機能である。これには前述の計測も伴うが、例えばキュウリやネギなどの選別における曲がり具合（曲率）、或いは対象物の周囲長、最大・最小長、及びそれらの比や、その他2次モーメントなどのモーメント量、穴の数と穴面積の占有率など形状識別に有効な幾何学的・位相的特徴量を幾つか算出し、それらに基づいて類別する手法が一般的に用いられている[1],[2],[4]。

2.2.3 パターンの欠陥検出

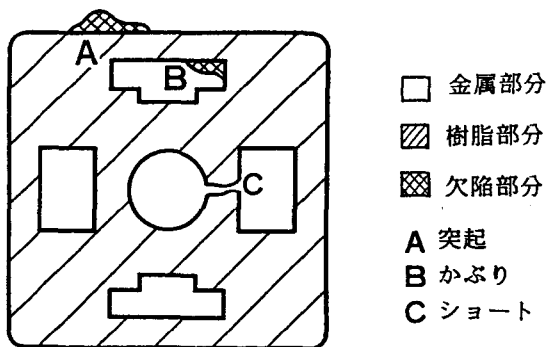
例えばプリント基板上の回路パターンや射出成形品の樹脂パターンなどの欠陥検出（図2.2参照）のように、然るべき位置での検査対象物の有無と形状異常を検出する。プリント基板の回路パターンはアナログ回路基板も含めると多種多様な形状をしており、また多品種生産の傾向が強いので、欠陥検出法として標準の回路パターンとの比較照合や或いはCADによる原回路設計情報との比較参照が必要となる。標準パターンとの照合の必要性は射出成形パターンにおいても同様である。また、印字文字などの印刷状態・品質検査（表2.1参照）においても同様なパターンの欠けや、細まり・太まりなどを検出することが要求される。

2.2.4 異物・キズ・汚れ検出

金属、ガラス、ビン、或いは錠剤、カプセル容器などのひび、キズ（傷）、割れ、欠けの検査や、回収洗浄ビン、または膏葉などのシート状製品における異物。



(a)



(b)

図2.2 パターンの欠陥例 (a)プリント基板回路パターン
(b)射出成形パターン

汚れ等の検査は、筆者の経験では最も要求度の高い検査内容である。図2.3は自動車部品であるシリンダ内面のキズが示されており、画像処理によりキズ部分が浮き彫りにされている。この検査では最小欠陥として最大長 0.5[mm]のキズ検出が要求される。これら異物・キズ・汚れは照明などの工夫によりその欠陥部分に輝度変化や色変化が生じるようにして画像入力し、微分等の画像処理を施して検出する方法が通常用いられる。この場合、如何にしてキズ部分の領域を正確に識別・抽出できるかが重要な問題となる。

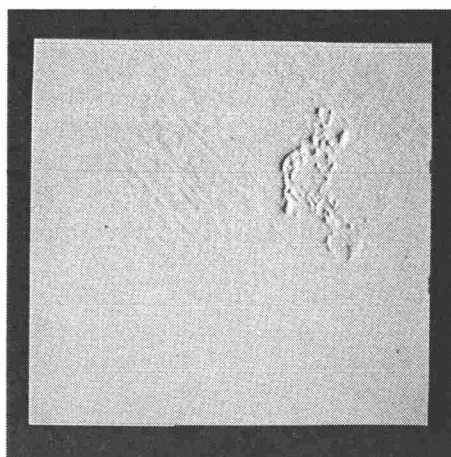


図2.3 金属表面のキズ(傷)

2.2.5 文字認識

コンピュータのキーボードの文字や、自動車のエンジン・フレームの番号、或いは原子炉における燃料制御棒の識別文字の認識など、文字認識は視覚検査の重要な要求事項の一つである。これらの文字認識は、所定の物が所定の位置に設置されているか否かを確認するために行われる。また製品のラベルや容器・包装上の印字文字の認識も要求される。この場合の文字認識は、製品の種類や商品名、或いは製造年月日や賞味期限などが正しく表示されているか否か、または印字文字が明確なものか否かを検査するために行われる。正確かつ明確な表示は製造側の義務として、この文字認識の要求度は比較的高い。

2.3 実システムにおける画像処理への要請

2.3.1 画像入力系・機械系の負担軽減

自動視覚検査システムは、一般的に図2.4に示されているような構成となり、画像入力系、画像処理系、搬送系が3大基本柱である。ここで画像入力系とは、照明系とカメラ（またはセンサ）、及びそれから入力される信号をA/D変換してデジタル化する所までを言い、そのデジタル画像を処理し対象物（被写体）

の品質評価や欠陥の認識を行う所までを画像処理系とする。更に、生産ラインと直結して画像入力のための搬送を提供し、画像処理による認識結果に基づいて良品、不良品を振り分ける所までの機械系の機構を搬送系という。この搬送系の設計は画像入力系の設計と密接に関わっており、その上画像入力系設計は画像処理系設計と補完的關係にある。すなわち、この3つは相互依存する部分がある。この内、特に画像入力系は検査システムにおいて生命線であり、検査目的に適する良質の画像が再現性良く安定して得られるならば、当然のことながら画像処理系の負担は軽くなる。

しかしながら、多くの場合再現性が最も良いのは電気・電子系で実現されている画像処理系の方であり、画像入力系や機械系に、安定した反射光や、高速に移動する検査物体の位置精度などを過度に求めるのはシステム開発コスト及びメンテナンス上問題が大きい。更に、検査物が良品ではあっても製造上その寸法・形状に大きなばらつきがあり、そのため入力画像も大きく変動することが少なくない。結局、画像入力系・機械系の負担を軽減するためにも、画像処理側でこれら入力画像の変動に柔軟に対処せざるを得ない。

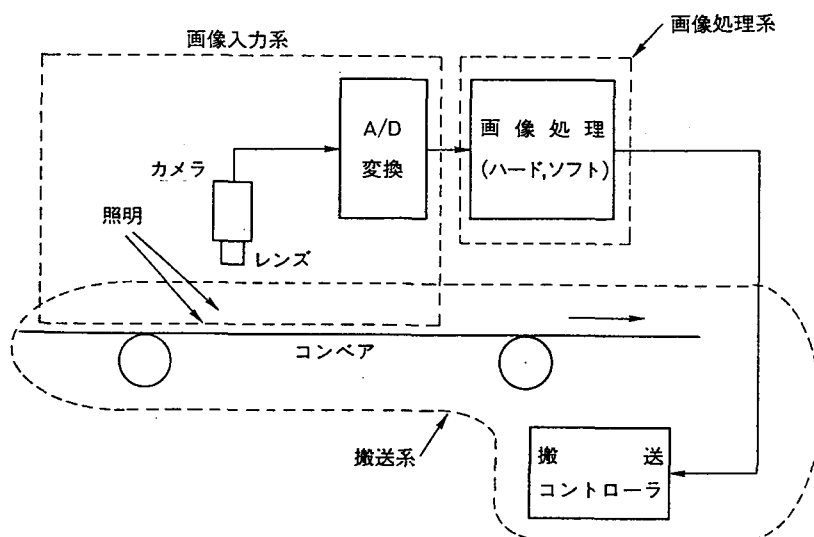


図2. 4 自動視覚検査システムの構成

2. 3. 2 複合的画像処理と画素情報のベクトル化

前述の2. 2で述べた典型的な検査要求に対しては、(I) 画像内の複数個の固定位置に各々特定のウィンドウを設定し、その中での画像2値化と画素数カウント処理を行う(画像計測, パターン検査用), 或いは(II) 参照すべき標準パターン設定を予め行いそれとの比較・マッチング処理を画素レベルで行う(パターン検査用), もしくは(III) 空間フィルタリングにより微分・2値化処理を行う(傷検査用), というような方法が一般的に用いられている[1] - [4]. このため, それらの処理機能がハードウェアとして標準化されている画像処理装置も増えている.

しかしながら様々な項目の同時検査が要求される場合が少なくない. その場合, 前述の処理に加えて, 要求に応じ他のソフトウェア/ハードウェア処理も併用したきめの細かい複合的画像処理が必要となる. 例えば図2. 5に示されているような接着用テープ検査の場合では, 検査項目が複数個あり, 前述の要求検査内容を文字認識を除いて全て含む. 巻面検査において「巻巢」はテープ間の僅かの隙間であり, 「貼り付け不良」もテープと紙管との隙間である. 「紙管破れ」は紙管の内側の紙がはがれたものであり, 「異物」はテープ以外の物がテープ間にはさまったもので, 輝度がかかなり高いものも低いものもある. 巻面と外週面(側面)の双方の欠陥に対して長さ, 幅, 面積など欠陥の大きさ情報を抽出し, それをパラメータとして検査物の等級分けと良品か不良品かの判定を行う. 特に巻巢は接着不良の原因となるので, 大きさが小さくとも個数の多い場合や, その巢がかかなり深いものである場合は不良品と判定しなくてはならない. 更に, 問題として生じるのがテープ領域境界付近に付着する薄い汚れや, 図2. 5(b)の外週面におけるシワ近くのテープ切り出し口の扱いである. どちらもどの位置に現れるかは予測できない上, 汚れはテープ境界と識別されなければならない, 同様に切り出し口は縦のシワやキズと識別されなければならない. このような検査要求に対しては, 結局のところ, 入力画像の濃度情報, その濃度の変化情報, そして被写体の領域や形状情報を抽出する種々の画像処理を併用し, 被写体及び入力画像に関する先験的知識とを駆使した複合的処理を行わざるを得ない[15], [16], [25].

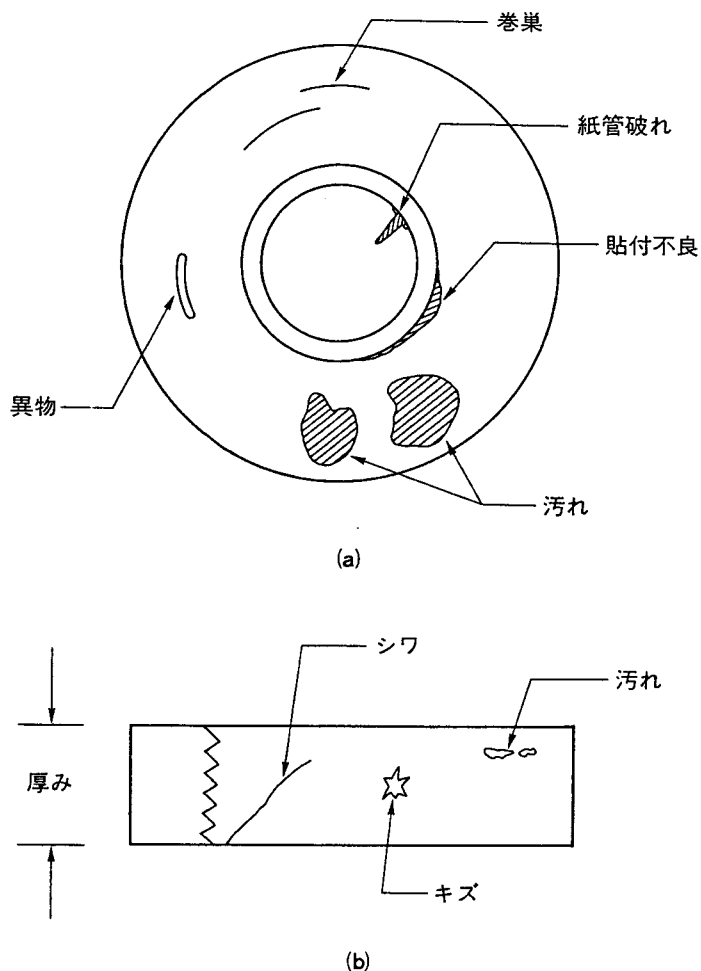
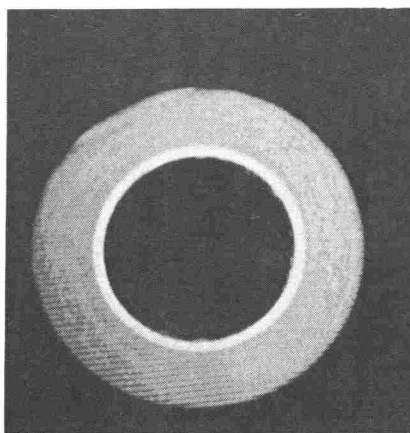
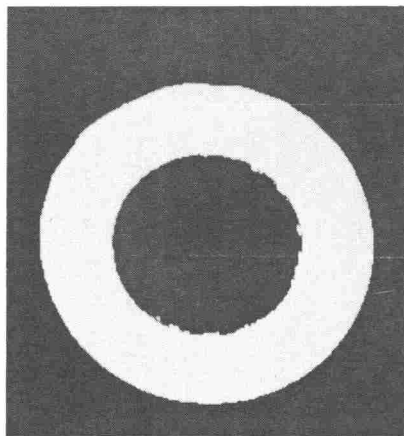


図2.5 種々の項目の同時検査例 (テープ外観検査)
(a) 巻面 (b) 外周面

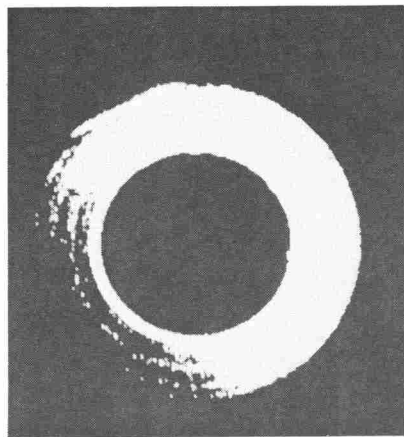
この複合的画像処理の結果、画素には濃度情報以外の情報が対応し、それらがベクトルとして扱われる。この複合処理の比較的簡単な例を図2.6-2.8に示す。図2.6(a)のテープの右上部に欠陥があるが、単純2値化や微分2値化では容易に検出できない。ここで微分2値化とは、画面の右方向(x)，下方向(y)に関する微分演算をして、それらの絶対値の総和をあるしきい値により2値化することを意味する。特に、微分2値化では欠陥がテープのエッジ(境界線)に近



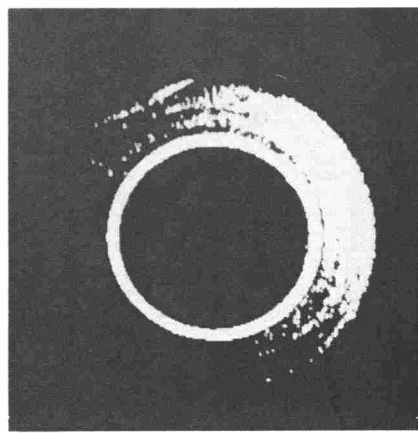
(a)



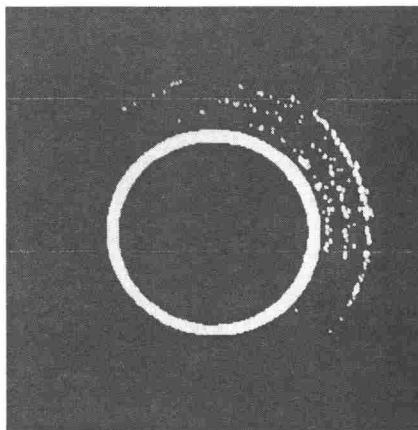
(b)



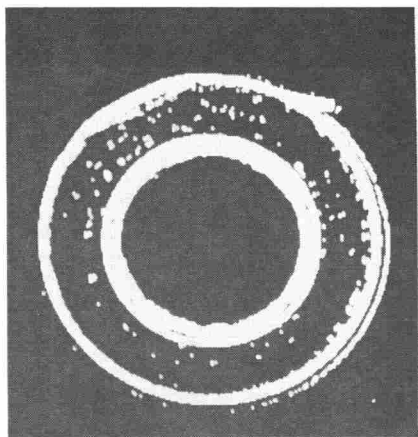
(c)



(d)

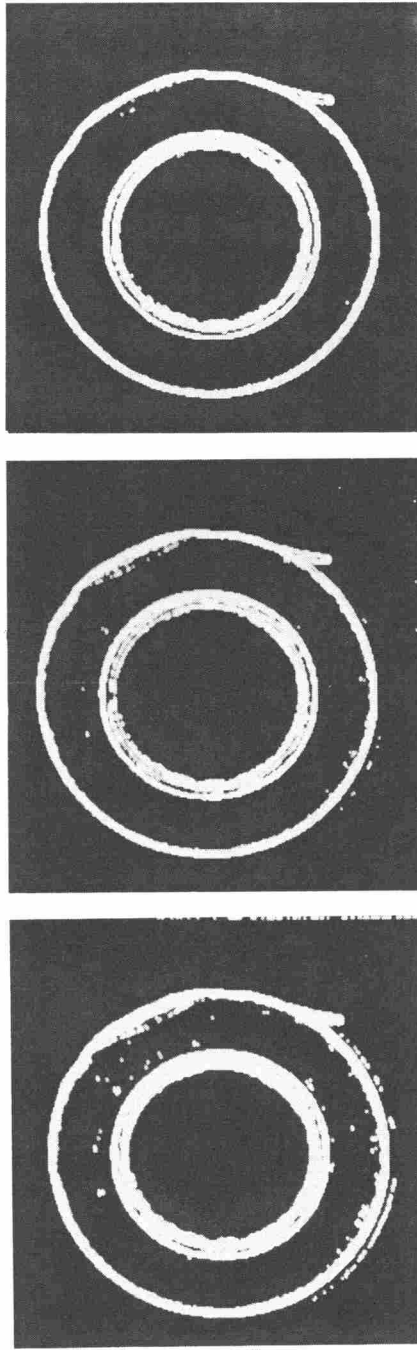


(e)



(f)

(次頁へ続く)



(g) (h) (i)

図2. 6 (a)原画像 (b)~(e) 2値画像 (徐々に2値化のしきい値を上げている)
 (f)~(i) Sobel微分・2値化画像 (x,y)に関する微分の絶対値の和を2
 値化し, 徐々にそのしきい値を上げている)

接していることより、欠陥検出が困難となる（図2.6）。しかしながら濃度からの勾配ベクトルの向きに着目すると（図2.7, 図2.8(a) 参照），図2.8(b)のように領域指定された外輪部の付近では，エッジでの勾配ベクトルは中心から半径方向に外側へ向いているので，その向きと同様な向きを有する点（画素）を除外すれば良いことが分かる．ここで，対象となる勾配ベクトルを有する点は2値化で得られるテープ領域上の点であり，かつ前述の外輪領域部に属するものである．図2.8(a)は2値化と微分2値化の処理でどちらもしきい値以上となる点の勾配ベクトルの向きを表している．この原画像を更にスムージング（平滑化）して同様な2値化を行い，その勾配ベクトル場と図2.8(c)の標準ベクトル場とを指定外輪領域内で整合させてエッジ除去した結果が図2.8(d)に示されている．

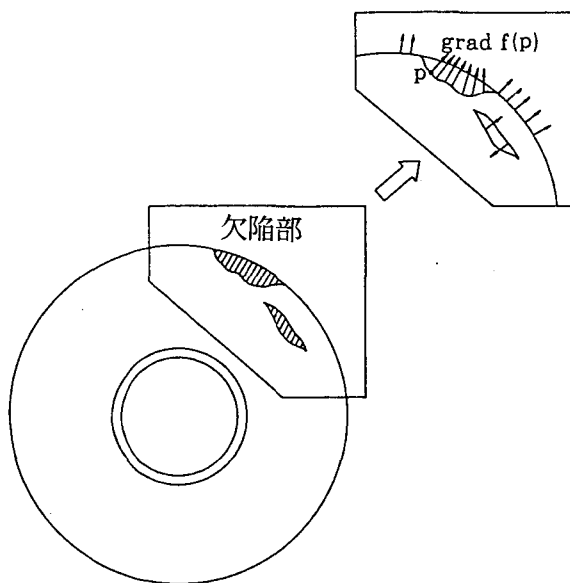
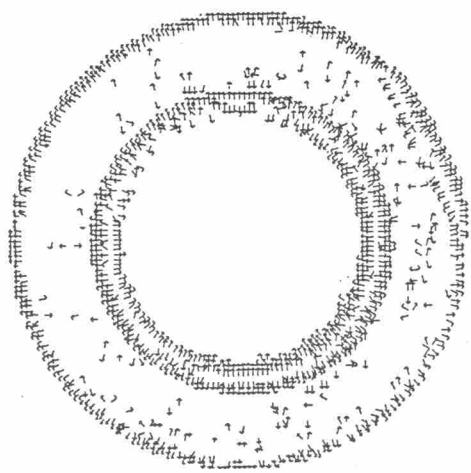
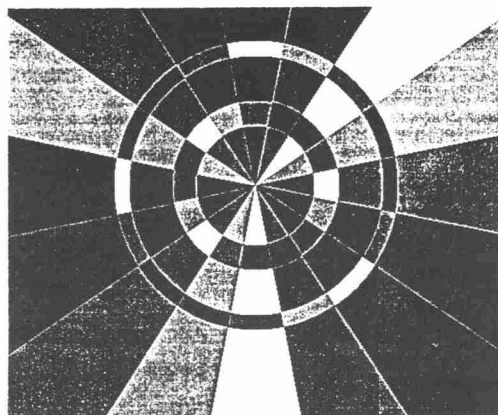


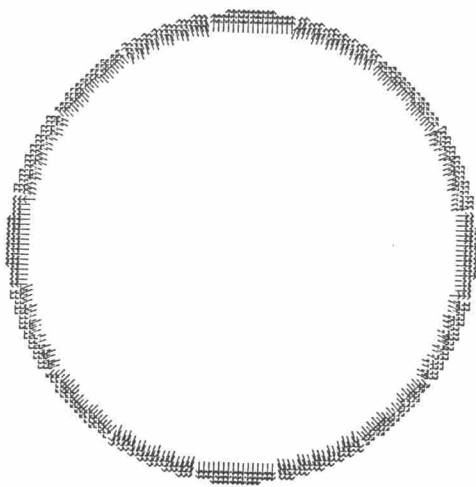
図2.7 濃度によるベクトル場



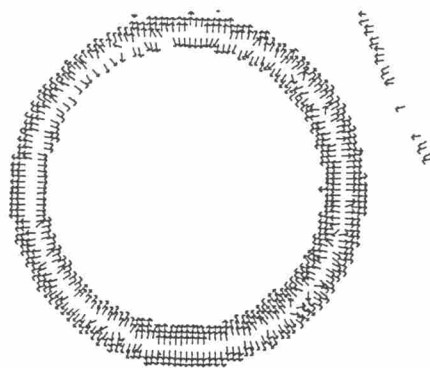
(a)



(b)



(c)



(d)

図2.8 (a)濃度からの勾配ベクトル場 (b)指定領域情報
(c)外輪内の標準ベクトル場 (d)エッジ除去結果

2.3.3 高速性

前述のように、要求仕様毎にきめの細かい複合的画像処理を行わなければ、実用に耐え得る検査システムの達成は多くの場合困難である。この複合的画像処理を行い、しかも人の目視検査に代行するためにはかなりの高速性が要求されるので、処理のハードウェア化が当然必要となる。例えば500 [cc]クラスの空きビン検査の場合、胴の部分では全面（内側を含む）検査を1秒当たり5本～10本の速度で行わなければ目視検査員に代行できない。また、視覚検査のニーズは生産工場の製造ラインにおいて特に大であるため、ハードウェア化に関しては、次々と流れ作業的に連続処理できるようなパイプライン処理方式を基本とする方が自然である。ここでテレビカメラは、NTSC（National Television System Committee）方式に基づくラスタ走査型映像信号を出力し、その速度は30 [フレーム（画面）/秒]である。従ってこの速度（ビデオ・レート）で画像処理できれば、連続画像入力・処理が可能となり、システム構築上見通しも良くなる。それゆえ、処理のハードウェア化においてもこの映像信号に同期した、ビデオ・レートのラスタ走査型パイプライン処理方式を基調とするのが実用的であると考えられる。

しかしながら要求検査システム毎に処理アルゴリズム開発とそのハードウェア化を行うのは、開発コストと保守の点で現実的方策ではない。そこで柔軟性のあるソフトウェア処理も活用でき、きめの細かい複合的画像処理が容易に行え、しかも高速処理が維持できるような画像処理機構と、ハードウェア化のための処理機能の標準化が必要である。

2.4 結 言

本章では、視覚検査の自動化において要求される典型的な検査機能について大まかに分類し、代表例を示した。すなわち、「計測」、「形状判別」、「パターンの欠陥検出」、「異物・キズ・汚れ検出」、「文字認識」の5項目を提示し、その具体例に触れ、ニーズの実状などを明らかにした。この外に「粒子解析」の

項目も考えられ（表2. 1），これには「計測」と「形状判別」に要する画像処理機能に加えて，「テクスチャ（Texture）解析」などの処理機能も必要と思われる．しかしながら「異物・キズ・汚れ検出」において要求される濃淡画像処理機能（ヒストグラミングなど）を併用して処理できる場合も多いため詳細は省略した．本章ではまた，実システムにおける画像処理への要請について述べ，実用に供し得るシステムとしては，画像入力系や搬送機械系への負担を軽減するために入力画像の変動に柔軟に対処可能なこと，ソフトウェア処理も含めて幾つかの画像処理を併用したきめの細かい複合的画像処理が可能なこと，そして目視検査員に代行できるためにも高速処理能力が必要なことを示した．更に，高速処理とシステムの見通しの良さのために，ビデオ・レートのラスタ走査型パイプライン処理を基調とするハードウェア化が実用的であることを述べた．

第3章 パイプライン処理方式に基づく 領域ラベリング

3.1 緒言

連結領域を1つのまとまりとして認識し抽出する領域ラベリングは、画像内における複数個の連結パターン（または連結成分）の各々の大きさや形状、及びそれらの並置（相対的位置）関係などを解析する上で欠かせない処理であり、自動視覚検査の分野に限らず広く画像処理関連全般の分野において重要かつ基本的な処理となっている[17] - [19]。このように領域ラベリングは標準的画像処理機能であるが、局所連結性の検出を画素毎に行い大局的なまとまりを認識する処理であり、ソフトウェア処理ではかなり時間を要するためハードウェア処理の必要性が生じる。このハードウェア処理においては、2章で述べたように、カメラからの映像信号をその伝送速度（ビデオ・レート）でパイプライン的に連続処理できる方がよい。そのためハードウェアの制約条件に合致した領域ラベリング・アルゴリズムの開発が必要となる。

従来のパイプライン処理指向の領域ラベリング・アルゴリズムでは、一般的に、TVの走査法であるラスタ走査に従い画面を上から下へ水平に沿って順次見て行きながら、対象となる2値パターンの局所連結性検出を前述のように画素毎に行う。それに伴い自然数値をラベルとして各画素に付与し、連結する領域には同一のラベルが付与されるように伝搬して行く。このとき”V”または”U”字型パターンのように下方でつながるようなパターンの場合、そのつながる所で異なるラベルが”合流する”。すなわち、既に異なるラベルを付与した領域が同一連結領域であると判明する。その時ラベル間の連結情報を表すテーブルにその合流情報を記録して行き、後の何らかの時点でそれらラベル間連結情報をまとめ上げる統合処理を行う。そして2回目の画面走査時において1つの連結領域には1つのラベルが付与されるようにする。

ここで、ビデオ・レートの速度でラスタ走査型パイプライン処理を行うハード

ウェア化の制約条件として、(1) 1フレームを 512x512 [画素] の画面とした場合、局所連結性検出とラベル付けを1画素毎に通常100 [nano sec] 以内で行わなければならないこと(デジタル画像化の方法によってはこの数字は若干異なる)、(2) 画面走査中に後戻りや停滞は許されないこと、(3) ラベル間連結情報の統合処理は1フレーム分の1/30 [秒] (=33[ms]) 以内で行うこと(もしくは2~3フレーム程度までならバッファ・メモリの利用により実用的なパイプライン処理化が可能)、が挙げられる。このハードウェア化におけるラベル間連結情報テーブルとして、RAM(Random Access Memory)による1次元配列テーブルを用いるのが最も簡単である。

しかしながら1次元配列テーブルは線形リスト構造や単純木(tree)構造のようなデータ構造を表現し処理するには適しているのだが、領域ラベリングの場合、ラベル合流が複雑に生じる2次元パターンのグラフ構造的連結関係を上述のハードウェアの制約条件下で扱うには問題が生じる。例えば、ラベル間連結情報テーブル内のデータ構造を線形リスト構造、または単なる線形リスト構造の拡張である単純木構造(スタック構造ではない)として扱う場合、従来のアルゴリズムでは、画面の走査中2つのラベル合流時点で合流情報の記録とラベル間連結情報の統合処理を行うか、もしくは2つの合流ラベルの線形リストをたどって行き、それらの最小値ラベルが合流したものとして合流情報の記録をし統合処理は1画面の走査終了後に行う。このため、いずれにしても画面の走査が滞ることになり、前述の(1)、(2)の点でビデオ・レートのハードウェア化は殆ど不可能となる。また、この(1)、(2)の条件を満足し、ラベル間連結情報のデータ構造をグラフ構造のまま扱う現実的アルゴリズムとして、画面走査中ラベルの合流した順にそのラベル対をテーブルに記録し(この場合1次元配列の添え字は合流時間順を表す)、1画面の走査終了後で統合処理を行う方法もある。しかしこの統合処理では、テーブルへのアクセス回数が一般に出現ラベル数Nの2乗オーダーとなり、1回のテーブル・アクセス時間を10 [nano sec] と少なく見積もっても、512x512 [画素] の画面で出現し得るラベル数を考慮すれば秒単位の時間がかかり得るため、前述の(3)の点で問題となる。

一方、1次元配列テーブルは通常のメモリー・デバイスそのままの機構で実現できるという利点がある。そのため1次元配列のラベル間連結情報テーブルにおいて、その連結情報が単純トリー構造の形で維持され正確に保存され得るならば、統合処理時間がラベル数 N に比例するため33 [ms] 以内で済み、ハードウェアもシンプルになる、という大きな利点をもたらされる。本章では、2次元平面のトポロジーの性質を考慮することにより、ラベル間連結情報を単純トリー構造として表現したままパイプライン的に処理できるアルゴリズムを述べる [13], [26], [31] – [33]。このアルゴリズムは、常に1つ前の行のラベル書き直し操作を行い、しかも各行毎にラベル間連結情報の統合処理を行う、という点で従来のアルゴリズムと異なる。また本章では、本アルゴリズムの正当性を証明する。ここで正当性とは、任意形状の連結パターンが連結領域として分離されずに確実に認識され、1つの連結パターンには唯1つのラベルのみが結果的に付与される、ことを意味する。更に本章では、ハードウェア化におけるアーキテクチャと実現されたプロセッサを示す。

3. 2 領域ラベリング・アルゴリズム

本アルゴリズムでは、通常のパイプライン・ラベリング処理と同様に、画面を2回ラスタ走査し1次ラベリングと2次ラベリングの処理を行う。ここでラベル間連結情報の統合処理を1次ラベリングに含めると、2次ラベリングは単に、統合処理されたラベル間連結情報テーブルに基づきラベルの書き直しを行うだけであり、本質的にはさ程重要ではない。例えば、連結パターンの個数や各連結パターンの面積算出は1次ラベリングの処理で十分できる。このため自動視覚検査システムにおいて、2次ラベリングを施さない場合もある。

3. 2. 1 1次ラベリング

入力画像は2値化（1画素の値が1または0）されているものとする。図3.1で示されているヘッド・ウィンドウ（Head Window, または論理マスク）により、

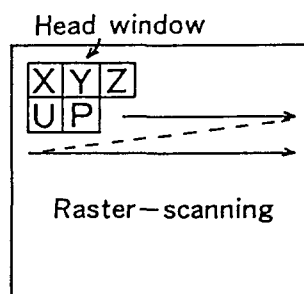


図3. 1 ラスタ走査型ウィンドウ

画面上をラスタ走査しながら連結性判定と、ラベル付け操作を行う。図3. 1のウィンドウ中のX, Y, Z, U, Pは、それらが位置する点(画素)でのラベル値を表す変数とする。但しPの値は、ラベル値を付与していない最初の段階では、2値画像の画素値である。“連結”という用語は、以下、上下左右と斜め方向に隣接する近傍も含めた8連結の意味で用いる。ラベル間連結情報を示すテーブルを1次元配列的にLRAM(・)で表し、ラベルの個数を表すラベル(数)カウンタをLCとする。更に、 $V = \max\{X, U\}$ 、 $Z^* = \text{LRAM}(\text{LRAM}(Z))$ とし、記号“←”は変数への代入を表すものとする。

1次ラベリングのアルゴリズムでは次の2つの処理より成っている。つまり、画素毎の処理と行毎の処理である。画素毎の処理では8つの条件の基でPとZにラベルを付与し、LRAMに連結情報を書き込む。そして、行毎の処理ではウィンドウが行の終わりに達する毎にLRAMにおける連結情報の統合を行う。そのアルゴリズムの詳細は以下の通りである。

[画素毎のラベル付け処理]

- (1) $(P = 0)$
 $Z \leftarrow Z^*$
- (2) $(P = 1, Y \neq 0)$
 $P \leftarrow Y, Z \leftarrow Z^*$
- (3) $(P = 1, Y = 0, Z = 0, V = 0)$

$P \leftarrow LC, Z \leftarrow 0, LRAM(LC) \leftarrow LC$

その後, $LC \leftarrow LC + 1$

(4) $(P = 1, Y = 0, Z = 0, V \neq 0)$

$P \leftarrow V, Z \leftarrow 0$

(5) $(P = 1, Y = 0, Z \neq 0, V \neq 0, Z^* > V)$

$P \leftarrow V, LRAM(Z^*) \leftarrow V, Z \leftarrow V$

(6) $(P = 1, Y = 0, Z \neq 0, V \neq 0, Z^* < V)$

$P \leftarrow Z^*, LRAM(V) \leftarrow Z^*, Z \leftarrow Z^*$

(7) $(P = 1, Y = 0, Z \neq 0, V \neq 0, Z^* = V)$

$P \leftarrow V, Z \leftarrow Z^*$

(8) $(P = 1, Y = 0, Z \neq 0, V = 0)$

$P \leftarrow Z^*, Z \leftarrow Z^*$

[行毎のラベル間連結情報の統合処理]

ラベルの最大値 (画面で出現したラベル数) を N とし, k を $LRAM(\cdot)$ の添え字 (アドレス) とする.

(step 1) $k \leftarrow 1$

(step 2) $LRAM(k) \leftarrow LRAM(LRAM(k))$

(step 3) $k \leftarrow k + 1$

(step 4) if $k \leq N$ then go to (step 2)

else STOP.

ここで N はラベル・カウンタ LC の値によって決まる. この統合処理により, ラベル k と連結している一連のラベルの中で最小ラベル値が $LRAM(k)$ の値となる (後述の 3.3 参照). もしラベル k がどのラベルとも連結しない孤立ラベルならば, $LRAM(k) = k$, さらに, $LRAM(LRAM(k)) = k$ であるので, 結果として変化は起こらない.

1 次ラベリングの処理過程と結果例を図 3.2 に示す.

3. 2. 2 2次ラベリング

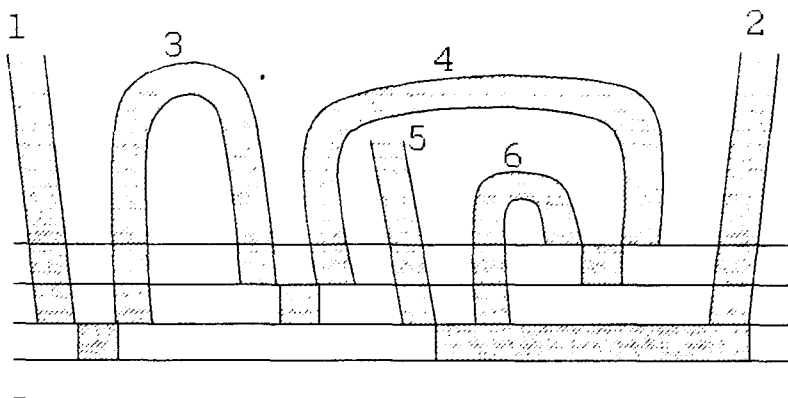
1次ラベリングの後、L RAMの統合された連結情報に基づいて、もう1度画面上をラスト走査しながらラベルの書き直しを行い、1つの連結領域には1つのラベルが付与されるようにする。

3. 2. 3 アルゴリズムの特長

従来のアルゴリズムと違って、本アルゴリズムではウィンドウのZを書き直すことによって前の行のラベルを常に更新している。さらに、行毎の統合処理によってテーブルL RAM上のラベル間連結情報を最新のものとしている。図3. 3に1つの行で次々とラベル合流が生じる場合での、行毎の統合処理の効果が示されている。図3. 3(c)はL RAMの各アドレスにラベル・データが上書きされ更新される状況を示している。また本アルゴリズムではラベル間の連結性（または合流）を検出するときにZをZ*に置き換えており、このZ*としてL RAMを2回アクセスしたL RAM (L RAM (Z)) を用いている。ここでZ*としてL RAM (Z) を用いない理由は、ラスト走査型パイプライン処理では各行において左から右に走査しているので、Z*としてL RAM (Z) を用いた場合右側でのラベル合流情報が左側に伝搬されるのに遅れが生じ、その結果同一行上において、あるラベルがより小さな2つのラベルと左手側と右手側で合流し得るからである。このためL RAMをもう1回アクセスすればその問題は生じない(図3. 4参照)。この詳細な議論は次の3. 3で行う。

3. 3 アルゴリズムの正当性

分離したパターンにはそれぞれ異なるラベルが付与され、同一の連結したパターンには唯1つのラベルが付与されるという意味での正当性を証明する。2次ラベリングでは、統合されたラベルの連結情報に基づいて1次ラベリングでのラベル付けされたラベルを書き直すだけなので、問題は1次ラベリングでの最終的なラベル間連結情報の統合処理結果にある。ここで1次ラベリングにおいて、2つ



(a)

$Z^* = \text{LRAM}(\text{LRAM}(Z))$ の場合

ADDRESS	LABEL
1	1
2	2
3	3
4	4
5	5
6	4

←----- 1
 ←----- 1
 ← 3 ←----- 1
 ←----- 1
 ←----- 3 ←----- 1

(b)

$Z^* = \text{LRAM}(Z)$ の場合

ADDRESS	LABEL
1	1
2	2
3	3
4	4
5	5
6	4

←----- 1 ← 2
 ← 3 ←----- 2
 ←----- 3 ← 2
 ←----- 3 ←----- 2

(c)

図3.4 $Z^* = \text{LRAM}(\text{LRAM}(Z))$ の必要性 (a) 連結パターン (b) $Z^* = \text{LRAM}(\text{LRAM}(Z))$ におけるLRAMの更新過程 (c) $Z^* = \text{LRAM}(Z)$ におけるLRAMの更新過程

の連結していないパターン（または領域）A, Bが各々ラベル α, β ($\alpha \neq \beta$)によって少なくとも1度はラベル付けされたものとする（1次ラベリングでは、画面の最終行の点を除く全点でラベル付けが2度行われることに注意）、それらラベル α, β が”連結している”ものとしてラベル間連結情報テーブルLRAMに記録されることは有り得ない。これは1次ラベリングの「画素毎のラベル付け処理」に基づいて容易に検証できる。従って、最終的なラベル間連結情報の統合処理の結果、2次ラベリングにおいてその連結していない2つのパターンA, Bには異なるラベルが付与されるのは明かである。ここで証明されるべき残る問題は、2次ラベリングの結果として、同一の連結パターンには唯一のラベルが付与されるか否かである。すなわち、1次元配列形式のラベル間連結情報テーブルLRAMを用いた本アルゴリズムにおいて、「画素毎のラベル付け処理」によりパターン（及びラベルの）の局所連結性が検出される都度LRAMへ書き込まれるラベル連結情報が、LRAMへの上書きになどによって欠落することがあるか否かが問題となる。

3. 3. 1 諸定義

ここでLRAM内でのラベルの”連結”など、用語や記法を定義する。

λ をラベルとし、 n を自然数とすると $LRAM^n(\lambda)$ ($n \geq 1$)は以下のように定義される。

n times

1) $LRAM^n(\lambda) = LRAM(LRAM(\dots(LRAM(\lambda))\dots))$

2) ラベル α と β ($\alpha \neq \beta$)が”ラベル間連結情報テーブルLRAMにおいて連結している”というのは、 m, n を自然数とし、 λ を他のラベルとすると、

$(\exists n) [LRAM^n(\alpha) = \beta \text{ または } \alpha = LRAM^n(\beta)]$,

が成立するかまたは

$(\exists \lambda) (\exists m) (\exists n)$

$[LRAM^m(\alpha) = \lambda \text{ または } \alpha = LRAM^n(\lambda)]$

かつ

$$[(L RAM^n (\beta) = \lambda \text{ または } \beta = L RAM^n (\lambda))] ,$$

が成立するときを言う。

3) 2つの異なるラベル α と β が連結し、その連結情報がL RAMに書き込まれるのは、「画素毎の処理」において条件(5)と(6)が成立しているときである(図3.5参照)。その状況を2つのラベルが”合流する”という。

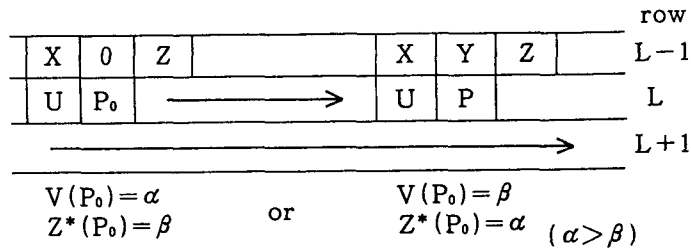


図3.5 点P₀における異なるラベルの合流条件

4) ウィンドウが画面をラスト走査する時間的推移に基づき、“初めて”、“後”、“前”、“現在”などの時間的用語を用いる。更に、ウィンドウが画面の最左上点から開始してラスト走査するときの時間経過を t として、ウィンドウの変数 P が点 P_0 上に位置するときの時間 t を $t(P_0)$ と表し、 $t(P_0)$ の後の時点 t を、 $t > t(P_0)$ (または $t(P) > t(P_0)$) のように表す。

5) ウィンドウの変数 P が点 P_0 上に位置するとき、そのときのウィンドウにおける変数値 P, X, Y, Z, U, V をそれぞれ、 $P(P_0), X(P_0), Y(P_0), Z(P_0), U(P_0), V(P_0)$ とも記す。同様に、 $Z^*(P_0) (= L RAM^2(Z(P_0)))$ という表記も行う。また、変数が位置する点を例えば” $X(P_0)$ の点”などと表す。

3.3.2 正当性の証明

以下に補題1~4を証明し、それらに基づく定理により正当性を証明する。

[補題1]

1) 異なる2つのラベルが点Pで合流するとき、2つのラベルの内値の小さいラベルが点PとZ (P) の点に付与される。

2) 任意のラベル λ において、常に、

$$L RAM (\lambda) \leq \lambda \text{ が成り立つ。}$$

3) 任意の行Lにおいて、行L上の点でラベル β が付与されている連結点集合 (または領域) Bがあるとすると、ラベル β より大きなラベル α と τ_i ($\beta < \alpha \leq \tau_i, i=1 \dots m$) を付与された連結点集合Aが、その行Lとその上方部で領域Bを囲むことはできない (図3. 6 (a), (b)参照)。換言すれば、ある行上の任意のラベルが、その行上においてより小さなラベルの左側と右側の両側に出現する (ラベル付けされる) ことはない。

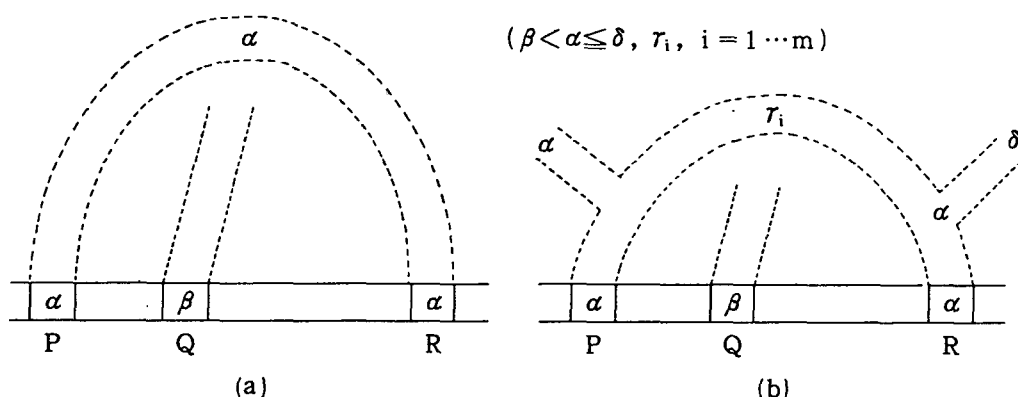


図3. 6 起こり得ないラベリング状況

証明：

- 1) 「画素毎のラベル付け処理」における条件 (5) と (6) より明らかである。
- 2) 「画素毎のラベル付け処理」では条件 (3), (5), (6) の何れかが成立するとき、その条件に応じてL RAMにラベルが書き込まれる。このときのL RAMへの書き込み処理から明らかにL RAM (λ) $\leq \lambda$ という結果になる。さらに各行でのL RAMにおけるラベル間連結情報の統合処理では、L RAM (λ) はL RAM² (λ) に書き換えられるので、L RAM² (λ) = L RAM (L RA

$M(\lambda) \leq LRAM(\lambda) \leq \lambda$, となり成立する.

3) ラベル β の付与されている行L上の点 p が, 行Lとその行の上方部において, ラベル α と γ_i ($i=1 \dots m$) が付与されている連結点集合Aにより完全に囲まれていると仮定する. 「画素毎のラベル付け処理」より連結点集合には, 合流ラベルの内, より小さなラベルが付与されるので, もし行Lの上方の行Kでラベル β の連結点集合Bと連結点集合Aとが合流していたとすると, その時点でラベル β が付与され以後伝搬されようとするので, 少なくともラベル α が行Lでラベル β の両側に出現することはない. これは仮定に反する. また, 行Lの上方で連結点集合AとBとが相互に連結していない(合流がなかった)とすると, 連結点集合Aによりラベル β が囲まれるという上記の仮定は, ラベル β がラベル α や幾つかのラベル γ_i の後に出現することを意味し, ラベル β はラベル α より大きくなければならない. これは仮定に反し, 上記の仮定は結局矛盾を生じる. このことより, 任意行において, 単にラベル α がラベル β の両側で出現するという仮定も成立しない. なぜならば, ラベル α , または α と連結するラベル γ_i ($i=1 \dots m$) の付与された連結点集合がラベル β にまたがって存在することになり, 同様に矛盾する.

Q. E. D.

[補題2]

LRAMにおけるラベル間連結情報の各行毎の統合処理結果は, 以下のようになる.

任意のラベル λ において,

$$LRAM(\lambda) \leftarrow \min \{ LRAM^n(\lambda) \mid n \geq 1 \} .$$

すなわち, ラベル λ とLRAM内で連結するラベルの内, 最小ラベルがLRAM(λ)に書き込まれる.

証明:

任意のラベル λ ($\lambda \neq 0$) に対して $LRAM(\lambda) \geq 1$.

また, $\lambda \geq LRAM(\lambda)$ なので, 任意の回数 n (≥ 1) に対して

$$\lambda \geq \text{LRAM}^n(\lambda) \geq \text{LRAM}^{n+1}(\lambda) \geq 1.$$

それゆえ、ある自然数 m が存在して、 $\text{LRAM}^m(\lambda) = \text{LRAM}^{m+1}(\lambda)$ となり、 $\min \{ \text{LRAM}^n(\lambda) \mid n \geq 1 \} = \text{LRAM}^m(\lambda)$ 、がいえる。ここで、 $\text{MIN}(\lambda) = \min \{ \text{LRAM}^n(\lambda) \mid n \geq 1 \}$ 、と表記する。以下にラベル λ に関する数学的帰納法を用いて証明する。

($\lambda = 1$ のとき) 明らかに $\text{LRAM}(\lambda) = \lambda$ 。統合処理により、 $\text{LRAM}(\lambda) \leftarrow \text{LRAM}(\text{LRAM}(\lambda)) = \lambda = \text{MIN}(\lambda)$ 、となり成立する。

($\lambda = 2$ のとき) $\text{LRAM}(\lambda) = 1$ または 2 。

何れにしても明らかに成立する。

ここで、

($\lambda \leq k$ のとき)、成立すると仮定する。

($\lambda = k+1$ のとき)

$\text{LRAM}(\lambda) = \lambda$ または μ ($\mu < \lambda$)。

$\text{LRAM}(\lambda) = \lambda$ のとき、明らかに成立する。

$\text{LRAM}(\lambda) = \mu$ ($\mu < \lambda (= k+1)$) のとき、

$\mu \leq k$ なので帰納法の仮定より、 $\text{LRAM}(\mu) \leftarrow \text{MIN}(\mu)$ 。

さらに、 $\text{MIN}(\lambda)$

$$\begin{aligned} &= \min \{ \text{LRAM}^n(\lambda) \mid n \geq 1 \} \\ &= \min \{ \text{LRAM}(\lambda), \text{LRAM}^n(\lambda) \ (n \geq 2) \} \\ &= \min \{ \mu, \min \{ \text{LRAM}^n(\mu) \mid n \geq 1 \} \} \\ &= \min \{ \mu, \text{MIN}(\mu) \} \\ &= \text{MIN}(\mu) \end{aligned}$$

以上より、統合処理の結果、

$$\begin{aligned} \text{LRAM}(\lambda) \leftarrow \text{LRAM}(\text{LRAM}(\lambda)) \\ = \text{LRAM}(\mu) = \text{MIN}(\mu) = \text{MIN}(\lambda) \end{aligned}$$

Q.E.D.

ラスト走査におけるラベルの合流状況は、任意のラベル α において次の4つの場合に分類される。

(1) ラベル α が画面終端まで(走査終了まで)他のラベルと全然合流しない。

(2) ラベル α が画面終端まで α より小さなラベルとは合流しないが、 α より大きな幾つかのラベルとは合流する。

(3) ラベル α が α より小さなラベルと初めて合流する前に、他のラベルと合流することはない。

(4) ラベル α が α より小さなラベルと合流する前に、 α より大きな幾つかのラベルと合流する。

ここで(3)と(4)の場合に着目すれば良い。なぜならば、他の(1)と(2)は、各々(3)と(4)の特殊な場合とみなすことができるからである。例えば(3)において、ラベル α が α より小さなラベルと画面終端まで合流しないとすれば、(3)は(1)と同値になる。同様の関係が(4)と(2)の間にも成立する。以下に各々(3)と(4)に相当する2つの補題を証明する。

[補題3]

ラベル α がその出現後に初めてラベル β と合流し、かつそのラベル β がラベル α より小さいならば、その後ラベル α は Z^* (または $Z^*(P)$)として出現しない。それゆえ、その合流後ラベル α は他のラベルと合流することはない。

証明：

前述の「画素毎のラベル付け処理」におけるラベルの合流条件(5)と(6)の場合に場合分けして証明する(図3.5参照)。

(条件(5)の場合)

行L上の点 P_0 でラベル α がラベル β と合流するならば(図3.7), $Z^*(P_0) = \alpha$ なので、アルゴリズムに従い、 $L RAM(\alpha) \leftarrow \beta$, $P(P_0) \leftarrow \beta$, $Z(P_0) \leftarrow \beta$ という代入が実行される。点 P_0 の後、図3.7に示されているようにラベル α が行L上の点Pにおける $Z(P)$ として出現するならば、

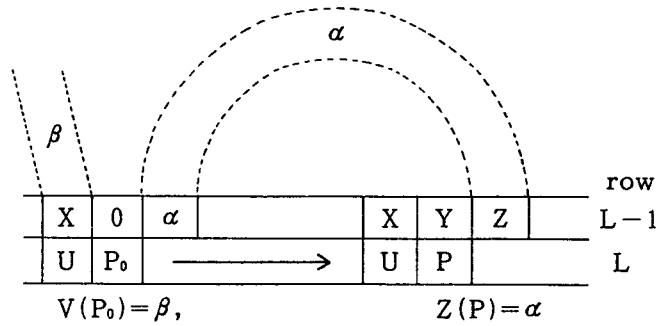


図3. 7 ラベル α が出現後初めてラベル β ($< \alpha$) と条件 (5) において合流する場合

$$Z^*(P) = \text{LRAM}(\text{LRAM}(Z(P))) = \text{LRAM}(\text{LRAM}(\alpha)) = \text{LRAM}(\beta).$$

補題1の2)より, $\text{LRAM}(\beta) \leq \beta < \alpha$. それゆえ, $Z^* \neq \alpha$.

点 P_0 の後, 行 L 上の点 P においてラベル α が $Z(P)$ としてではなく $Z^*(P)$ として出現すると仮定すると, 最初に出現する点が存在するから,

(\exists 最初の点 P_1 ($t(P_0) < t(P_1)$)) (\exists ラベル γ ($> \alpha$))

$[Z(P_1) = \gamma, Z^*(P_1) = \alpha]$ が成立する.

ここで, ラベル γ は点 P_1 以前の点 P_2 ($t(P_0) < t(P_2) < t(P_1)$) でラベル α と合流していなければならず, その時,

$[(V(P_2) = \alpha, Z^*(P_2) = \gamma) \text{ または } (V(P_2) = \gamma, Z^*(P_2) = \alpha)]$

が成立しているはずである. しかし後者に関して, $Z^*(P_2) = \alpha$ は起こり得ない.

それは, $t(P_0)$ の後初めて α が $Z^*(P)$ として出現するのが, $t = t$

(P_1)のときだからである. 更に前者に関して, $V(P_2) = \alpha$ であることは,

「画素毎のラベル付け処理」により, 点 P_2 以前の点でラベル α が出現しており,

(\exists 点 P_3 ($t(P_0) < t(P_3) < t(P_2) < t(P_1)$))

$[V(P_3) = \alpha \text{ または } Z^*(P_3) = \alpha]$ が成立してなければならない. ここで,

点 P_1 が点 P_0 以後最初に $Z^*(P)$ として出現する点であるから, 前述と同様に

$Z^*(P_3) = \alpha$ はあり得ず, 結局 $V(P_3) = \alpha$ である可能性が残る. そこで再

び上述の論理を適用でき、この論理を続けると、結局のところ P_0 と同行上の隣接点 P_4 において $V(P_4) = \alpha$ が成立しなければならない。しかるにラベル付け処理の論理から、 $V(P_4) = \text{点 } P_0 \text{ のラベル} = \beta$ となるため、明らかに矛盾する。ゆえに、ラベル α は行 L 上のどの点にも $Z^*(P)$ として現れることはない。さらに補題 1 の 3) より、行 L 上の点 P_0 の左側の点にラベル α が付与されることはないので、結局行 L 上においてラベル α が $Z^*(P)$ として出現するのはラベル β との合流点 P_0 のときだけであり、補題の仮定とも併せて、行 L の終端までにラベル α はラベル β 以外の他のどのラベルとも合流し得ない。従って、ラベル α は他のラベル δ ($\alpha < \delta$) との LRAM における連結性から Z^* として参照され出現することもなく点 P_0 以降ラベル α が現れることは決してない。

(条件 (6) の場合)

ラベル α と β が条件 (6) の下で合流する場合 (図 3. 8 参照), 補題 1 より明らかなように、ラベル α は点 P_0 の右側に $Z(P)$, または、 $Z^*(P)$ として出現することはない。そのため点 P_0 の後、行 L 上においてラベル α は他のどのラベルとも合流はせず、またどの点もラベル α が付与されることはない。それゆえ、行 L におけるラベル間連結情報の統合処理後、行 $L+1$ 上のどの点においてもラベル α が $Z^*(P)$ として出現することはない (たとえラベル α が $Z(P)$ として点 P_0 の左側で出現するとしても、 $Z^*(P) \leq \beta < \alpha$ となる)。行 $L+2$ 以降も同様に $Z^*(P)$ として出現しない。

Q. E. D.

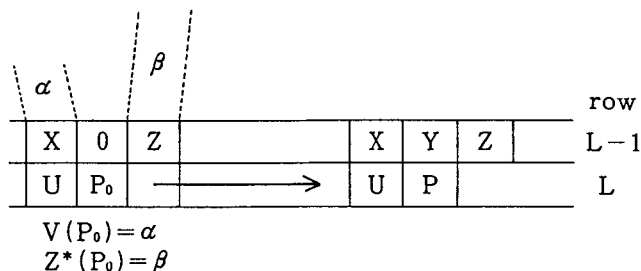


図 3. 8 ラベル α とラベル β ($\alpha < \beta$) が条件 (6) において合流する場合

【補題4】

行 $L-1$ 上で $Z^*(P)$ ，または新ラベルとして出現する任意のラベル λ において，その行上で λ より小さいラベルと高々1回しか合流しない，と仮定する．この仮定の下で，ラベル α が α より大きな幾つかのラベル γ_i ($i=1\cdots m$)と合流した後，行 L 上の点 P_0 で α より小さいラベル β と1度合流すれば，その後ラベル α が $Z^*(P)$ として出現することはない．それゆえ，ラベル α がラベル β と合流した後，他のどのラベルとも合流しない．

証明：

補題3と同様に，前出のラベルの合流条件(5)と(6)の場合に場合分けして証明する．

(条件(5)の場合)

ラベル α とラベル β が条件(5)の下で合流する場合(図3.9参照)，補題1より，ラベル α が行 L 上の任意の点 P_1 ($t(P_1) < t(P_0)$)，ラベル β の左側で $Z^*(P)$ として出現することはない．そのため，ラベル α が点 P_0 まで行 L 上のどのラベルとも合流することはない．ここで，ラベル α が点 P_0 の後初めて行 L 上の点 P_2 ($t(P_0) < t(P_2)$)で $Z^*(P)$ として出現するとする．そのとき，

$$[Z(P_2) = \alpha, Z^*(P_2) = \alpha] \quad (1)$$

もしくは，

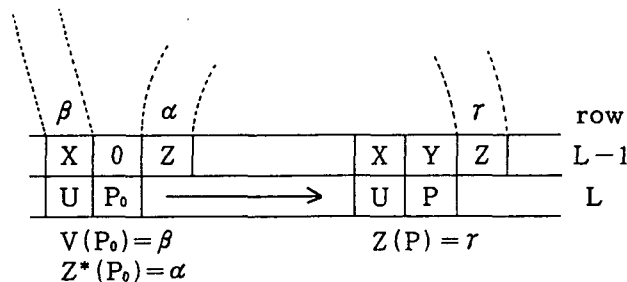


図3.9 ラベル α とラベル β ($\beta < \alpha$) が条件(5)において合流する場合

$$(\exists \text{ラベル } \gamma (> \alpha)) [Z (P_2) = \gamma, Z^* (P_2) = \alpha], \quad (2)$$

と考えることができる。しかし、(1)の $Z (P_2) = \alpha$ のとき、
 $Z^* (P_2) = \text{LRAM} (\text{LRAM} (Z (P_2))) = \text{LRAM} (\text{LRAM} (\alpha))$
 $= \text{LRAM} (\beta) \leq \beta < \alpha$ 。従って(1)は成立しないので、(2)より、点 P_2 の前の
 時点で

$$(\exists \text{ラベル } \delta) [\text{LRAM} (\gamma) = \delta, \text{LRAM} (\delta) = \alpha] \quad (3)$$

が成立している可能性が残る。ここで $\delta \neq \alpha$ であり、それゆえ(3)より $\delta > \alpha$ である。なぜならば、もし $\delta = \alpha$ とすると $Z^* (P_2) = \text{LRAM} (\text{LRAM} (\gamma))$
 $= \text{LRAM} (\alpha) = \beta$ となり、(2)に反するからである。

ここで、 $\text{LRAM} (\delta) = \alpha$ ということは、ラベル δ と α がある点 P_3 ($t (P_0) < t (P_3) < t (P_2)$) で合流するか、または、少なくとも行 $L-1$ に対するラベル間連結情報の統合処理結果において、ラベル δ がラベル α と LRAM 内で連結していることを意味する。しかし、ラベル α が点 P_0 の後初めて $Z^* (P_2)$ として出現するとしているので、ラベル δ は点 P_3 でラベル α と合流することはできない。それゆえ、ラベル δ は既に行 $L-1$ における統合処理の時点でラベル α と LRAM において連結していることになる。

ここで、この補題4の仮定と、補題2の統合処理結果により、ラベル δ と、行 $L-1$ に対するラベル間連結統合処理の結果ラベル δ と LRAM 内で連結している他のラベルが、点 P_0 の後で $Z (P)$ として出現するとき、 $Z^* (P) = \text{LRAM} (\text{LRAM} (Z (P))) = \text{LRAM} (\alpha) = \beta$ となる。従って、行 $L-1$ に対する統合処理の結果ラベル γ がラベル δ と LRAM 内で連結しているならば、 $Z^* (P_2)$ は α ではなく、 β となり、(2)に反する。それゆえ、ラベル γ は行 L 上において点 P_0 の後でラベル δ と合流せざるを得ない。従って、ラベル δ が $Z^* (P) = \text{LRAM} (\text{LRAM} (Z (P_4))) = \delta$ 、 となって出現する、最初の点 P_4 ($t (P_0) < t (P_4) < t (P_2)$) が存在することになる。

ここで、 $\text{LRAM} (Z (P_4)) = \eta (> \delta)$ であるとする、 $\text{LRAM} (\eta) = \delta$ となり、ラベル γ の場合と同様な論理により、ラベル η はラベル δ と合流する点 P_5 ($t (P_0) < t (P_5) < t (P_4) < t (P_2)$) が存在することになる。

一方、ラベル δ は行 L 上の点 P_4 において初めて $Z^*(P)$ として出現するのであるから、それより前の点 P_5 で $Z^*(P)$ として出現することはできない。残る可能性として、 $V(P_5)$ としてラベル δ が出現することになる。この場合、「画素毎のラベル付け処理」より、点 P_5 に隣接する行 L 上の点 P_6 において ($t(P_0) < t(P_6) < t(P_5) < t(P_4) < t(P_2)$)、

[$V(P_6) = \delta$, かつ $V(P_6) < Z^*(P_6)$] という条件が成立するために、
 [$V(P_5) = \delta$] となる、ことが必要である。ここで以下同様な論理を続けると、結局ラベル δ は、点 P_0 の次の隣接点 P_7 ($t(P_0) < t(P_7) < t(P_6)$) で $V(P_7)$ として出現しなければならないことになる。しかしながら、 $V(P_7)$ は δ ではなく、 β と等しい。これは矛盾である。

ゆえに、ラベル α は行 L 上の点 P_0 の後、同じ行 L 上のどの点 P ($t(P_0) < t(P)$) においても、 $Z^*(P)$ として出現せず、他のラベルと合流しない。行 L に対する統合処理の結果、行 $L+1$ 以降においてもラベル α は他のラベルと合流しない。

(条件 (6) の場合)

ラベル α と β が条件 (6) の下で合流する場合 (図 3. 8 参照), 補題 3 で述べたように、ラベル α は行 L 上の点 P_0 の後で (右側で) $Z^*(P)$ として出現しない。また、補題 1 と、この補題 4 の仮定より、行 $L-1$ における統合処理は、その行上で $Z^*(P)$ 、または新ラベルとして出現したラベル間の連結関係を保存する。そして明らかに、行 $L-1$ 上で他のラベルと連結したラベルは行 L 上で $Z^*(P)$ として出現しない。その代わり $Z(P)$ と $LRAM$ 内で連結しているラベルの内 ($t(P)$ の時点において) 最小ラベルがこの $Z^*(P)$ として出現する。

以上のことと、補題 3 より、行 L 上で $Z^*(P)$ かまたは新ラベルとして出現する任意のラベル α は、その行 L 上で α より小さいラベルと高々 1 回しか合流しない。更に、行 L に対する統合処理の後、行 L 上でより小さなラベルと連結したどのラベルも行 $L+1$ で $Z^*(P)$ として出現することはない。

Q.E.D.

補題 1～4 より，連結パターンが存在している行 n の順序に関する数学的帰納法を用いて次の定理が成立する．

[定理]

1 次ラベリングの本アルゴリズムにより，ラスト走査時の任意の時点で任意のラベル α は， α より小さなラベルと高々 1 回しか合流しない．そのため 1 次元配列形式のラベル間連結情報テーブルによりラベルの連結関係が保存され，2 次ラベリングの結果として 1 つの連結パターンには唯 1 つのラベルのみが付与される．

証明：

任意の連結パターンを S とし， S が位置する行の順番（ラスト走査順）を n とする（図 3. 10 参照）．

（ $n = 1$ のとき）（最上行）新ラベルが出現するのみで，2 つのラベルが合流することはない．

（ $n = 2$ のとき）ラベルは補題 3 の場合と同様な状況で合流する．補題 3 より，任意のラベルは，より小さなラベルと高々 1 回しか合流しない．このときラベルの連結情報は正しく L R A M に書き込まれ，上書きのための分離は生じない．更に，このラベル間連結情報は補題 2 に基づいて統合処理の後も保存される．

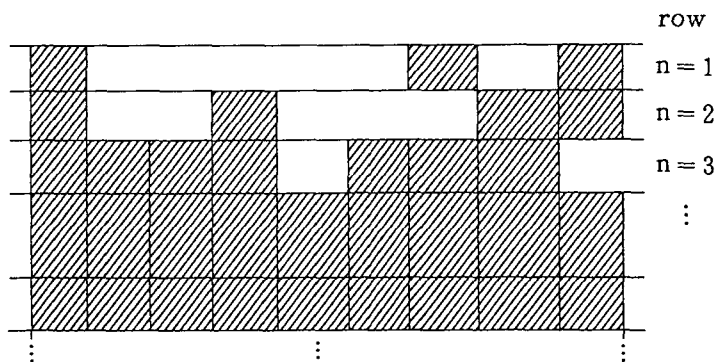


図 3. 10 連結パターン

ここで、

($n = k$ のとき) 任意のラベルは、高々 1 回しかより小さなラベルと合流せず、そのラベル間連結情報は 1 次ラベリングのアルゴリズムより保存される、と仮定する。

($n = k + 1$) のとき、ラベルの合流状況に応じて補題 2, 3, 4 を適用することにより成立する。

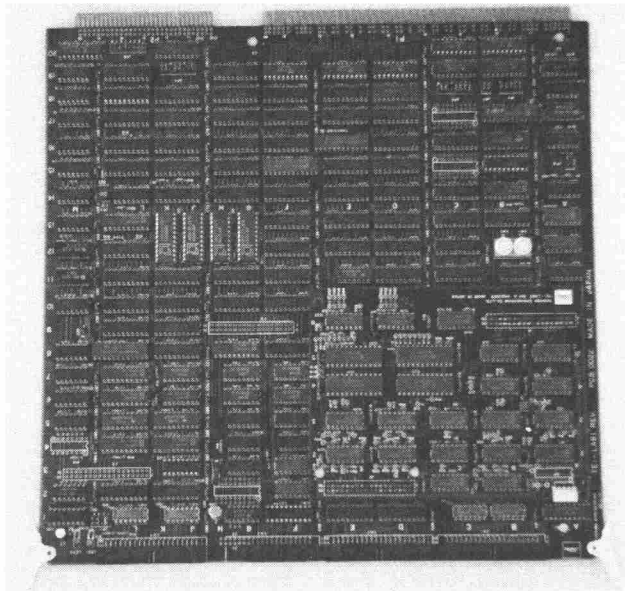
Q. E. D.

3. 4 ハードウェア・アーキテクチャとその実現

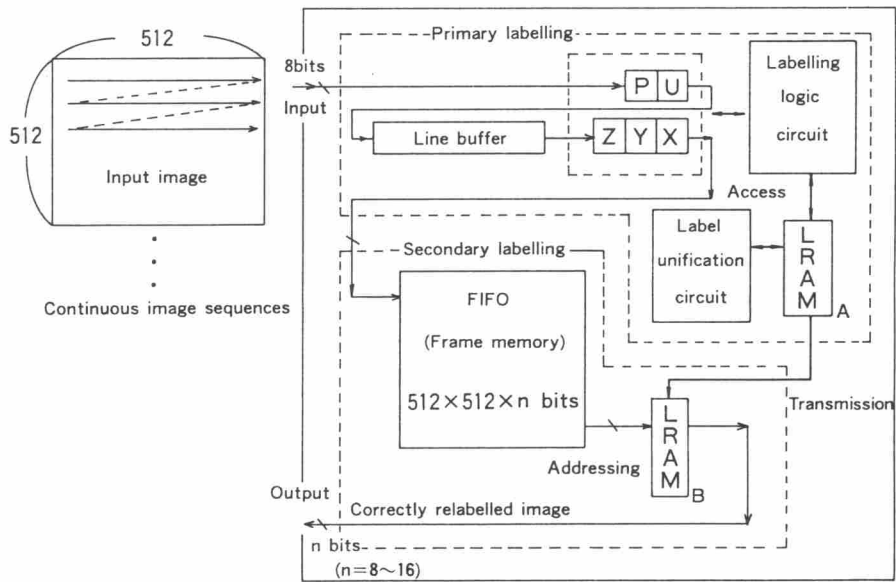
本ラベリング・アルゴリズムに基づくラベリング・プロセッサのアーキテクチャとその実現例としてのボード (1 次ラベリング用) を図 3. 11 に示す。このラベリング・ボードでは、図 3. 11 (b) に示されている画素毎のラベル付け論理回路において、連結性検出とラベル付けを 100 [nano sec/画素] の速度で行い、各行毎のラベル間連結情報の統合処理はラベル統合回路により 256 個までのラベル統合を水平帰線期間 (約 12.3 [μ s]) で行っている。ここで 1 次ラベリングにおいてラベル付けされた画像は画像メモリに蓄えられ、1 画像分遅延される。画像の最終行が 1 次ラベリング部を通過後、その行での LRAM_A 内ラベル間連結情報の統合処理が行われ、同時に、その統合情報は LRAM_B へ伝送される。その後、次の入力画像の 1 次ラベリング処理が行われるとき、画像メモリ内のラベル画像はパイプライン的に押し出される。このとき、1 次ラベリングで既にラベル付けされた画素の値をアドレスとして LRAM_B へアクセスし、そのデータを出力する。すなわち、LRAM_B が一種の濃度変換テーブルとなり、この変換により各連結領域が各々同一のラベル値となるようにする。

以上のようにして、1 次と 2 次のラベリング処理が同時並行して行われ、連続画像入力・処理のビデオ・レートのパイプライン処理を可能としている。

この 2 次ラベリングも 1 枚のボードで実現されており [14], [28], 1 次ラベリングのボードと 2 つのバスを経て結合される。すなわち、1 次ラベリング結果を画



(a)



(b)

図3.11 ラベリング・プロセッサ (a)ラベリング・ボード (1次ラベリング)
(b)ブロック線図

像メモリへ格納するためのバスと、ラベルの統合情報を伝送するためのバスである。2次ラベリングのボードでは面積計算や、連結領域を囲む最小長方形などの検出回路も付加されているが、ここでは省略する。

3.5 結 言

本章では、ハードウェアによるパイプライン処理を目指した、連結領域抽出のための領域ラベリング・アルゴリズムについて述べた。このアルゴリズムでは、ラベル間の連結性検出とラベル付与を行いながら、同時に1つ前の行のラベルを常に書き直す。更に、1次元配列形式のテーブル(LRAM)に書かれているラベル間連結情報の統合処理を各行毎に行う。本アルゴリズムによれば、複雑な位相形状を有する1つの連結パターン(領域)が2つ以上の連結成分から成る、と認識される結果は生じない。これは、任意のラベルにおいて、そのラベルより小さなラベルと合流するのは高々1回しか起きないので、LRAMにおけるラベル間連結情報が単純な木構造のまま保持され、連結情報の欠落を生じないためである。本章ではこのアルゴリズムの性質に着目し、最終的に1つの連結パターンには唯一つのラベルが付与される、という意味でのアルゴリズムの正当性の証明を述べた。また、本アルゴリズムに基づき実現されたラベリング・プロセッサとそのハードウェア・アーキテクチャを示した。本アルゴリズムの特長でもあり、また欠点でもあり得るのが各行毎の統合処理である。この統合処理を現在のハードウェアでは水平帰線期間というかなり短時間で行っており、HDTV(高品位テレビ)などのような画面サイズの拡大に伴い、この時間が相対的に使用できなくなる、という問題が生じる。しかしながら、統合処理の時間さえ確保すればこのアルゴリズムは有効であり、並列処理などの拡張により、大画面にも有効な方式が開発され得ると考える。

第4章 自動視覚検査における文字認識

4.1 緒言

自動視覚検査における文字認識では、2章で述べたように、コンピュータ・キーボードの配列文字や液晶表示文字、あるいは自動車のタイヤやエンジン・フレームの記号・番号、または原子炉内の燃料制御棒の識別文字、更には食品関係の容器・包装上の印字文字の認識など様々な生産現場でのニーズがある。これら産業用の文字認識では対象字種の数多くはないが、通常のオフィス・オートメーション (Office Automation) における印刷文字や手書き文字認識とは異なり、(1) 対象文字は、インク・ジェットによる文字や、刻印文字、或いはレーザ光照射によるドット印字文字、または液晶文字など、種々の印字や表示手段による文字であり、(2) 印字 (または表示) 文字は、紙のような平面的なものには描かれていない場合が多く、文字を視る位置や環境が制約される。

それゆえこれらの文字認識においては、まず対象文字の良質な入力画像を得るために、与えられた環境下での最適照明系を設置するなど画像入力系の工夫が必要となる。しかしながら生産現場での実システムでは、画像入力系にあまり負担をかけるのは一般的に保守の点で問題となりやすい (2.3 参照)。このため、照明によるシェーディングやカメラの視点による画面の歪みなどを画像処理における前処理によって補正し、入力画像からの文字領域部切り出しと2値パターン化を行うのだが、パターンの欠けや切れ、細まり、太まり、或いは文字線の位置ずれを生じ得る。しかも、食品関係で要求の高いビニール包装上の印字文字認識などでは、入力画像内の文字パターンがビニールの伸縮やシワのために変動し、結局のところ通常の手書き文字認識の場合とほぼ類似した状況が生じる。

ここで印刷文字や手書き文字の認識手法を概観すると、それらは構造解析的手法と2次元整合法 (重ね合せ法) とに大別される [44]。構造解析的手法は文字線や、その端点、屈折点、分岐点、ホールなどの基本パターンと特徴を抽出し、それらの相対的位置関係の記述を用いて認識を図るものだが、わずかの切れ、欠け、

ひずみなど位相的特徴の変動に弱く，それに対処するため複雑な認識アルゴリズムとなり易い．一方2次元整合法は重ね合わせて相関を取る手法なので，文字線などの基本パターンの相対的位置関係を構造解析的手法のように陽に記述する必要はない．もっとも表裏的に文字線の位置ずれや変動には弱く，識別能力は下がる．しかしながら認識アルゴリズムは簡単かつ見通しが良いので，この2次元整合法を発展させ文字の変動を吸収するための改良や拡張案が提案されている [21], [22], [45], [46]．

本章においてもこの2次元整合法に着目し，画面の各点（画素）にいわば電界のように2次元ベクトルが対応する，距離変換によるベクトル場を用いた文字認識手法を述べる．この距離変換は文字パターンの形状情報を画面全体に広げる一種の形状拡散処理であり，文字パターンの境界からの距離による等高線が形成される．ベクトル場は，この等高線の勾配ベクトル場に相当するものである．このためこのベクトル場は文字線の切れ，欠けや多少の位置ずれなどの変動には影響を受けにくいものとなっている [23], [30]．本章では4.2で，2つの文字パターン間の類似度が各点のベクトルの内積に基づいて定義されるベクトル場整合法を述べ，パターンの位置ずれや回転の変動の類似度における影響を分析する．また，このベクトル場整合法を用いた手書き片仮名・平仮名に対する認識実験について述べ，同じデータを用いた通常のお重ね合せ法よりも16～17%，また方向性マッチング [46] よりも約4%程認識率が高いことを示し，局所変動に対する有効性を明らかにする．更に，4.3ではかなり変動の大きな文字パターンに対する伸縮変換整合法を述べる [24]．これは2つのベクトル場を比較して，それらが最も良く重なるように文字パターン外周領域から点対応を動的に決定して行き，その点対応（変位ベクトル場）により一方のパターンを伸縮変換し整合させる手法である．このとき重ね合わせ過ぎを抑制する変位抑制機能や，文字パターンの変動に対する吸収能力についても論じる．

4. 2 ベクトル場整合法

2値パターンにおいて画素値が1の点(画素)を黒点, 値が0の点を白点という。また, 2値文字パターンのことを文字図形ともいう。

4. 2. 1 修正距離変換

先ず街区画距離とチェス盤距離の定義を述べ[17] - [19], 2値パターンの形状を入力パターンの定義域である画面全体に拡散するための修正距離変換を定義する。画面は正方格子型画素配列で構成されているものとし, 画面上の任意の点(画素)は, 整数値座標成分を持つとする。

[定義1] (街区画距離, チェス盤距離)

2点 $P(i, j)$, $Q(k, l)$ 間の街区画距離, チェス盤距離をそれぞれ $d_4(P, Q)$, $d_8(P, Q)$ とすると,

$$d_4(P, Q) = |i-k| + |j-l|$$

$$d_8(P, Q) = \max\{|i-k|, |j-l|\}$$

である。

[定義2] (修正距離変換)

2値パターンの黒点集合を B , 白点集合を W とすると, 修正街区画距離変換とは画面内の各点 P に, 次の値 $T_4(P)$ を対応させることを言う。

($P \in B$ のとき)

$$T_4(P) = \min_{S \in W} \{d_4(P, S)\} - 1$$

($P \in W$ のとき)

$$T_4(P) = -\min_{S \in B} \{d_4(P, S)\}$$

従来の距離変換では, 各点 $P(\in B)$ に $\min\{d_4(P, S) \mid S \in W\}$ なる値を対応させた

ものであり，黒点領域のみが対象である。

ここで (d_4, T_4) の記号の組を (d_8, T_8) に置き換えると，修正チェス盤距離変換 T_8 が得られる．また，これらの修正距離変換 T_4, T_8 を用いてその和を表す合成距離変換 T_s など種々の修正距離変換が定義できる．距離変換 T_s は，

$$T_s(P) = T_4(P) + T_8(P) \quad (\text{for all } P \in BUW)$$

で与えられる．

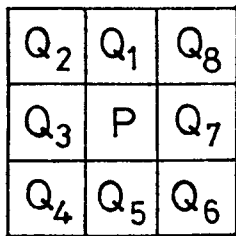
4. 2. 2 ベクトル場の作成

[2次元ベクトルの対応]

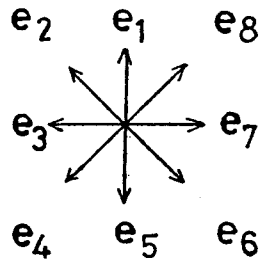
修正距離変換値分布 $T(P)$ に基づき画面内の各点 P に以下のように定義される2次元ベクトル $\mathbf{v}(P)$ を対応させてベクトル場を得る．

$$\mathbf{v}(P) = \sum_{i=1}^8 (T(P) - T(Q_i)) \mathbf{e}_i$$

ただし，点 Q_i と2次元単位長ベクトル \mathbf{e}_i ($1 \leq i \leq 8$) は図4. 1に示される点 P の8近傍 (図4. 1 (a)) と，8方向単位ベクトル (図4. 1 (b)) を表す．



(a)



(b)

図4. 1 点 P の8近傍と8方向単位ベクトル

[平滑化と正規化]

点 P のベクトル $\mathbf{v}(P)$ と点 P の8近傍のベクトル $\mathbf{v}(Q_i)$ ($1 \leq i \leq 8$) を用いて，点 P のベ

クトルを新たに

$$\mathbf{v}(P) \leftarrow W_1 \cdot \mathbf{v}(P) + W_2 \cdot \sum_{i=1}^8 \mathbf{v}(Q_i)$$

と変えることにより、ベクトル場を平滑化する。但し、 W_1, W_2 は重みを表す実数であり、通常 $W_1=8/9, W_2=1/9$ としている。

平滑化されたベクトル場のベクトルは、ユークリッド・ノルムがある値 θv 以上ならば、そのノルムを1に、 θv 未満ならば0のベクトルに正規化される。すなわち、

$$(\|\mathbf{v}(P)\| \leq \theta v \text{ のとき}) \mathbf{v}(P) \leftarrow \frac{\mathbf{v}(P)}{\|\mathbf{v}(P)\|}$$

$$(\|\mathbf{v}(P)\| < \theta v \text{ のとき}) \mathbf{v}(P) \leftarrow \mathbf{0}$$

ここで $\|\cdot\|$ はベクトルのユークリッド・ノルムを表している。 θv の値は通常0.01としている。

入力2値パターンから(修正)距離変換を経てこのベクトル場が得られる例を図4.2~図4.4に示す。但し、距離変換は合成距離変換であり、図4.4では0ベクトルの点は白点となっている。

4.2.3 ベクトルの内積に基づく類似度

2つの2値パターン間の類似度をそれらのベクトル場におけるベクトルの内積に基づいて定義する。

[記法1] 入力2値パターンを f とする。 f から得られるベクトル場 f^* を

$$f^* = [\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \dots, \mathbf{a}_N]$$

のように表す。但し、 N は画素数、 $\mathbf{a}_i (1 \leq i \leq N)$ は2次元ベクトルである。

[記法2] 2つの2次元ベクトルに対して、演算 $\langle \mathbf{a} | \mathbf{b} \rangle^+$ は次式で表される。

$$\langle \mathbf{a} | \mathbf{b} \rangle^+ = \begin{cases} (\langle \mathbf{a} | \mathbf{b} \rangle \text{ が正のとき}) & \langle \mathbf{a} | \mathbf{b} \rangle \\ (\text{Otherwise}) & 0 \end{cases}$$

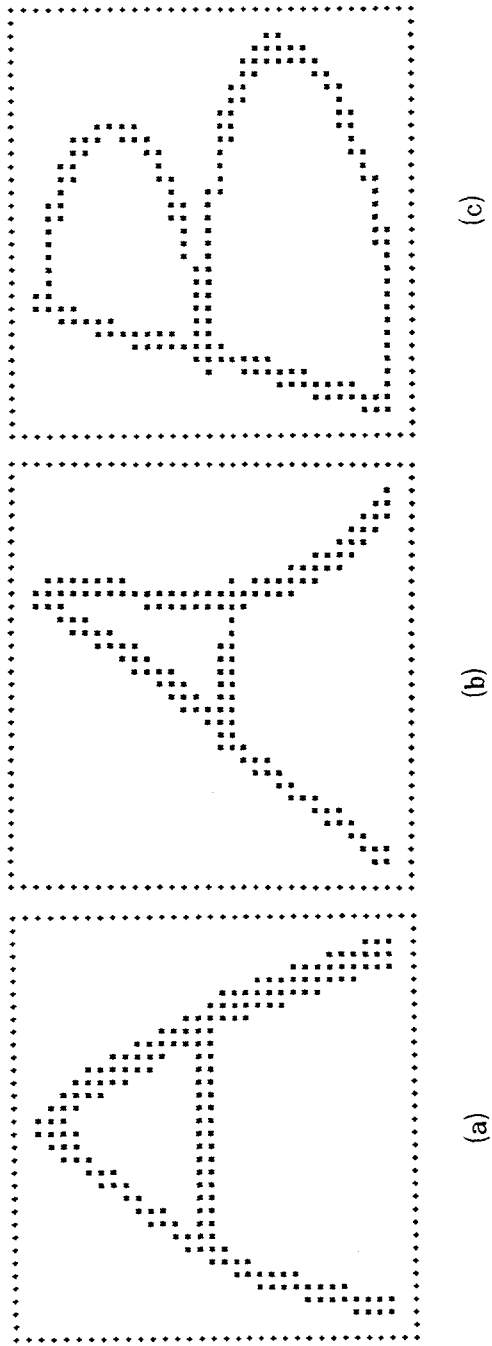
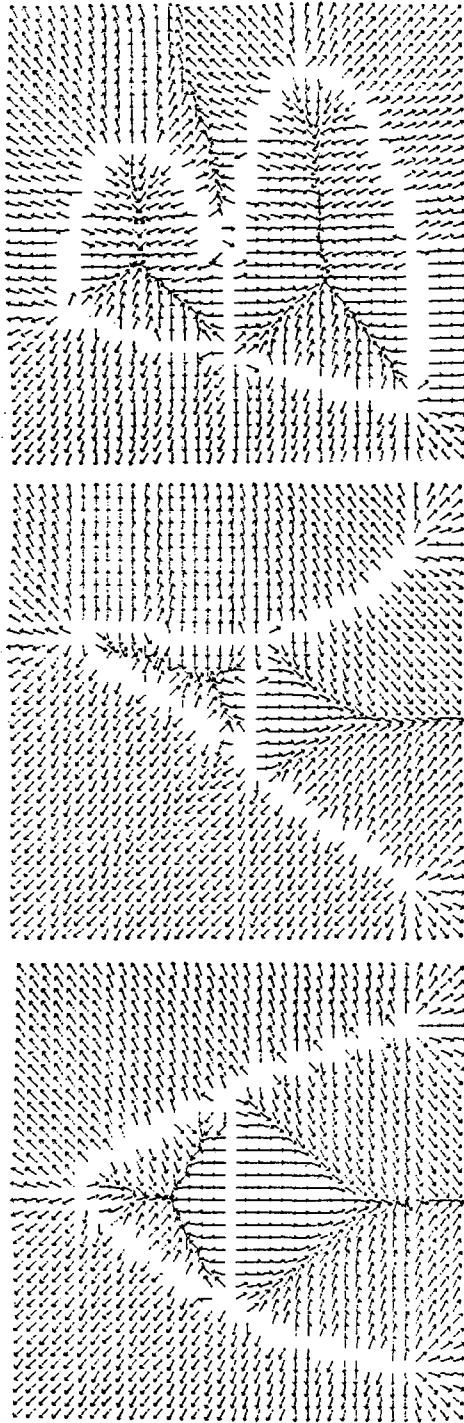


図4.2 入力2値パターン



(a)

(b)

(c)

図4.4 距離に基づくベクトル場 (図4.3 参照)

但し、 $\langle \mathbf{a} | \mathbf{b} \rangle$ は通常の内積である。

[記法3] 2つの入力2値パターン f, g が与えられたとき、それらの黒点集合を各々 B_f, B_g と記す。又、画面全体を X とし、各点(画素)を i ($1 \leq i \leq N$)で示す。

[定義] (類似度) 2つの2値パターン f, g に対する類似度 $S(f, g)$ は、 $f^* = [\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \dots, \mathbf{a}_N]$, $g^* = [\mathbf{b}_1, \mathbf{b}_2, \dots, \mathbf{b}_N]$ とすると、次式で与えられる。

$$S(f, g) = \frac{\sum_{i \in M} |\langle \mathbf{a}_i | \mathbf{b}_i \rangle| + \sum_{i \in X-M} \langle \mathbf{a}_i | \mathbf{b}_i \rangle^+}{\sum_{i=1}^N |\mathbf{a}_i| \cdot |\mathbf{b}_i|}$$

但し、 $|\langle \mathbf{a}_i | \mathbf{b}_i \rangle|$ は通常の内積の絶対値、 M は $B_f \cap B_g$ (黒点の共通部分)、 $X-M$ は M に属さない X の点の集合、 $|\mathbf{a}|$ はベクトル \mathbf{a} の絶対値である。

ここに $0 \leq |\langle \mathbf{a}_i | \mathbf{b}_i \rangle|$, $\langle \mathbf{a}_i | \mathbf{b}_i \rangle^+ \leq |\mathbf{a}_i| \cdot |\mathbf{b}_i|$ であるから、明らかに、 $0 \leq S(f, g) \leq 1$ である。

類似度 $S(f, g)$ は、ベクトル場のベクトルの向きを主体にして考案されたものである。 $S(f, g)$ の定義式において、分子第1項では M における文字線の方向の一致度を見るために通常の内積の絶対値を計算し、分子第2項では $X-M$ における2つのベクトル $\mathbf{a}_i, \mathbf{b}_i$ の向きが 90° 以内のときのみ内積を計算している。これは、同一カテゴリー(字種)に属する2つのパターンの文字線の位置ずれを吸収するためである。分母は正規化因子であり、 $S(f, g)$ は1画素当たりのベクトルの向きの一致度を意味している。

ところで、4.2.2のベクトル場においてこの類似度を用いた文字認識を行う場合、距離変換によるベクトル場では各文字パターンの遠方領域におけるベクトル場の状況が類似してくる。そのため、遠方の領域におけるこの類似度への寄与を小さくする方が望ましい。従って各点のベクトル $\mathbf{v}(P)$ に、次のような距離変換値による重み付けを施した、ベクトル $\mathbf{v}^*(P)$ の場を類似度計算時に用いる。

$$v^*(P) = v(P)/T^*(P), \quad \text{where } T^*(P) = -T_i(P) + \max_{P \in B} [\min_{S \in W} d_i(P, S)].$$

但し、 $i=4, 8$, s (4. 2. 1 参照). このベクトル場は、文字パターンの中央部から離れるに従い、それからの距離 r に反比例してベクトルの絶対値が小さくなるように定義されている. 以下、このベクトル場による類似度を考える.

4. 2. 4 局所変動の類似度における影響

2 次元整合法は位置ずれに大きく影響されるといわれている. そこで線分図形の平行移動回転の場合に限定して、類似度 $S(f, g)$ に対する位置ずれの影響を以下で解析する.

[平行移動の場合]

同じ方向を持つ 2 つの文字線が並んでいるとする. 図 4. 5 (a) に示すように 2 つの文字線とも、幅を W , 文字線長を H , 文字心線間の距離を D とし、2 つの文字線がベクトル場に影響を及ぼす範囲は、縦の長さ L , 横の長さ H の長方形とする.

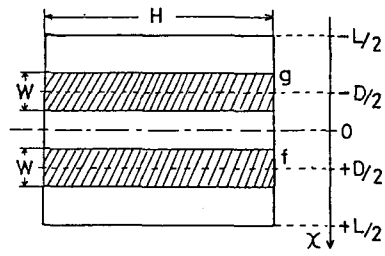
図 4. 5 において、 $X=D/2, X=-D/2$ 上に文字心線を持つ文字線を各々 f, g とし、 f^*, g^* のベクトルは区分的に連続分布していると仮定する. 又、距離変換値の逆数は、 $1/(x+1)$ と仮定できる. これは、距離変換値の逆数は、文字心線から遠ざかるに従って、 $1, 1/2, 1/3, \dots$ となるからである. f^*, g^* の任意の点のベクトルは x のみで決まり、それらを各々 $a(x), b(x)$ とすると、 $a(x), b(x)$ は次のように書ける.

$$a(x) = \begin{cases} K(x-D/2) \cdot C_0 & x > D/2 \text{ のとき} \\ -K(-(x-D/2)) \cdot C_0 & x < D/2 \text{ のとき} \end{cases}$$

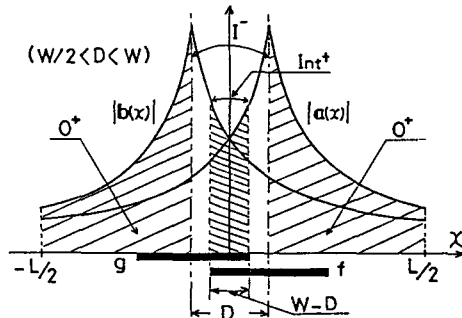
$$b(x) = \begin{cases} K(x+D/2) \cdot C_0 & x > -D/2 \text{ のとき} \\ -K(-(x+D/2)) \cdot C_0 & x < -D/2 \text{ のとき} \end{cases}$$

但し、 $K(x)=1/(x+1)$, C_0 は x の正方向に向きを持つ定ベクトルである.

今 0^+ が、 f^*, g^* のベクトルの向きが同じ区間、すなわち $[-L/2, -D/2] \cup [D/2, L/2]$ を表すとし、 I^- はベクトルの向きが異なる区間 $[-D/2, D/2]$ を、そして Int^+ は区間 $[-D/2, D/2] \cap (B_f \cap B_g)$ を表すとする (図 4. 5 (b)). 又、 $0^+, I^-, Int^+$



(a)



(b)

図4.5 (a) 2つの同方向の文字線
(b) ベクトル $a(x)$, $b(x)$ の絶対値

における

類似度 $S(f, g)$ への寄与を各々 $\widetilde{0}^+$, \widetilde{I}^- , \widetilde{I}_{nt}^+ とすると,

$$S(f, g) = \frac{\widetilde{0}^+ + \widetilde{I}_{nt}^+}{\widetilde{0}^+ + \widetilde{I}^-}$$

但し,

$$\widetilde{0}^+ = 2 \int_{D/2}^{L/2} k(x-D/2) K(x+D/2) dx$$

$$= 2/D \left\{ \ln(D+1) - \ln \frac{(L+D+2)}{(L-D+2)} \right\}$$

$$\widetilde{I}^- = 2 \int_0^{D/2} K(-(x-D/2)) K(x+D/2) dx$$

$$= 2 \ln(D+1) / (D+2)$$

$$\widetilde{Int}^+ = \begin{cases} \widetilde{I}^- & 0 \leq D \leq W/2 \text{ のとき} \\ 2 \int_0^{(W-D/2)} K(-(x-D/2)) K(x+D/2) dx \\ = 2 / (D+2) \{ \ln(W/2+1) - \ln(D+1-W/2) \} & W/2 < D < W \text{ のとき} \\ 0 & W \leq D \leq L \text{ のとき} \end{cases}$$

図4.6でW=3, L=10としたときの類似度S(f, g)と距離Dとの関係を示す。又, 比較のため, 以下で定義される濃淡値を持つパターン間の単純類似度や, 黒点の共通部分の面積に着目する相関も図4.6のグラフで示されている。

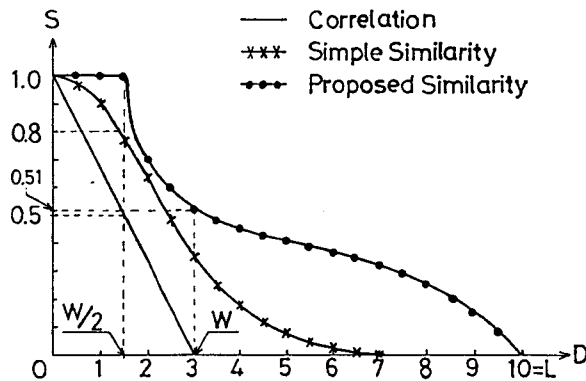


図4.6 類似度Sと距離Dとの関係

[定義] (単純類似度, simple similarity)

x - y 平面内の有界閉領域 R を定義域とする区分的連続関数 $F(x, y), G(x, y)$ を二つのパターンとすると, 単純類似度は

$$SS = \frac{(F, G)}{\|F\| \cdot \|G\|}$$

但し, $(F, G) = \iint_R F(x, y) G(x, y) dx dy$

$\|F\| = \sqrt{(F, F)}, \|G\| = \sqrt{(G, G)}$ である.

上記の定義において, 2つのパターンが2値パターンのとき, 本論文では特にその単純類似度を相関(correlation)という.

単純類似度の計算で用いた文字線 f, g に対応する濃淡値関数は, 図4.7のようにそれぞれ,

$$F(x) = \exp\{-(x-D/2)^2/2\sigma^2\}$$

$$G(x) = \exp\{-(x+D/2)^2/2\sigma^2\}$$

で表されると仮定している. 但し, $2\sigma=W$.

このとき $F(x), G(x)$ は x だけに依存するから, 単純類似度の積分計算では積分変数は x だけとし, 積分区間は $[-L/2, L/2]$ とすればよい.

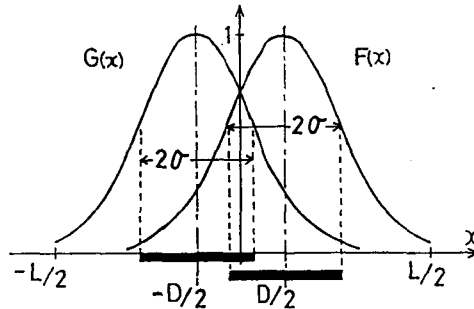


図4.7 文字線の濃淡値を表すガウス型関数 $F(x)$ と $G(x)$

図4. 6より, 2つの文字線が同方向ならば類似度 $S(f, g)$ はある程度の平行移動に強い粘性を持っていることが分かる. すなわち文字線の平行移動が, 文字線幅の $1/2$ までは当類似度の値は1であり, 文字線幅だけずれて重なり合わないときでも値は約0.5となっている. なお単純類似度の場合, $2\sigma < W$ ならば, そのS-D曲線は図4. 6の曲線と比べて, より減衰の度合が大きくなる.

[回転の場合]

図4. 8 (a)に示すように, 2つの文字心線のなす角を θ , 2つの文字線とも幅を W , 対象とするベクトル場の範囲は縦横とも長さ L の正方形とする.

直線 $x=0, -x\sin\theta + y\cos\theta = 0$ を心線に持つ文字線を各々 f, g とし, それらのベクトル場を f^*, g^* とすると, 任意の点 (x, y) における各々のベクトル $\mathbf{a}(x, y), \mathbf{b}(x, y)$ は次のように表すことができる.

$$\mathbf{a}(x, y) = \begin{cases} \mathbf{a}_0/(y+1) & y > 0 \text{ のとき} \\ -\mathbf{a}_0/(-y+1) & y < 0 \text{ のとき} \end{cases}$$

$$\mathbf{b}(x, y) = \begin{cases} \mathbf{b}_0/(d+1) & d > 0 \text{ のとき} \\ -\mathbf{b}_0/(-d+1) & d < 0 \text{ のとき} \end{cases}$$

但し, $d = -x\sin\theta + y\cos\theta$, \mathbf{a}_0 は x 軸に垂直で $y > 0$ の方向に向きを持つ定ベクトル, \mathbf{b}_0 は直線 $-x\sin\theta + y\cos\theta = 0$ に垂直で $d > 0$ の方向に向きを持つ定ベクトルとし, $|\mathbf{a}_0| = |\mathbf{b}_0|$ とする.

平行移動の場合と同様に, $W=3, L=10$ として, 上述の文字線 f, g 間の類似度 $S(f, g)$ を定義に基づいて数値計算した結果を図4. 8 (b)に示す. 比較のため, 単純類似度や相関の数値計算結果も図4. 8 (b)に示す. ここで単純類似度の計算のとき, 文字線 f, g に各々対応する濃淡値関数としてそれぞれ,

$$F(x, y) = \exp\{-y^2/2\sigma^2\}$$

$$G(x, y) = \exp\{-(-x\sin\theta + y\cos\theta)^2/2\sigma^2\}$$

を用いている. 但し, $2\sigma = W$.

図4. 8 (b)より類似度 $S(f, g)$ は $\theta=15^\circ$ まで約1.0の値を持ち, 15° より θ が大きくなるに従い減衰して, $\theta=90^\circ$ で値0になることが分かる. 一方, 相関や単純類似度を用いた場合, $\theta=90^\circ$ のときでも各々0.31や0.53なる値を持つ. これらの結果

より、類似度 $S(f, g)$ は回転に対しても好ましい粘性を持つと考えられる。しかし理想的な曲線は、 θ が 15° から 30° で急激に減衰する曲線であると思われるので、ベクトル場の各ベクトルに対する重み付けにまだ改良の余地がある。なお単純類似度の場合、 $2\sigma < W$ ならば平行移動のときと同様に図4.8(b)の曲線より減衰の度合が大きく、 $\theta=90^\circ$ のときの値も下がる。例えば $3\sigma=W$ ならば、 $\theta=90^\circ$ のとき単純類似度は0.35となる。

上述の解析に用いたモデルは極めて単純であるが、直線上の文字線から成り且つ文字線のベクトル場への影響範囲が広い文字図形の場合には、上述で得た結果に近い類似度の特性が得られると推測できる。

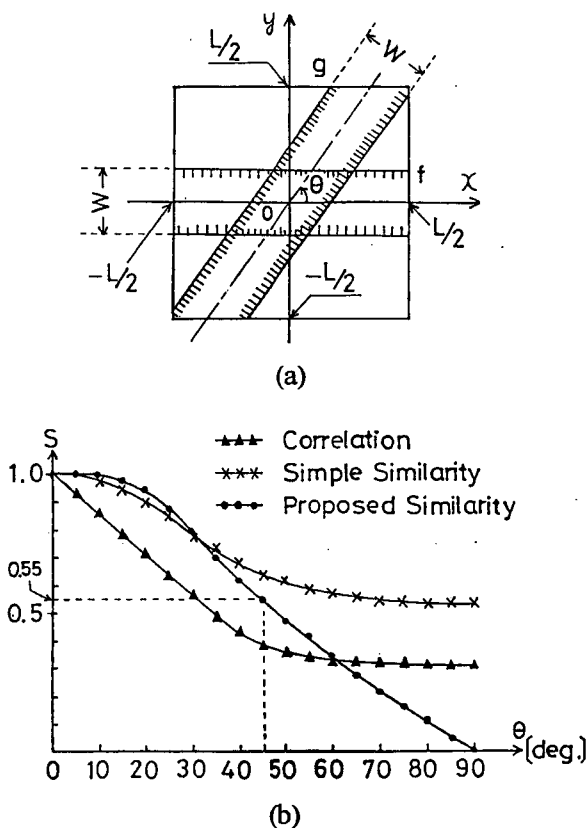


図4.8 類似度 S と回転角度 θ との関係 (a)角度 θ をなす2つの文字線 (b)関係グラフ

4. 2. 5 認識実験

[実験概要]

電総研作成の旧常用手書き文字データベース（片仮名編，平仮名編）を実験データとし，ソフトウェア・シミュレーションにより認識実験を行った．これは，電総研作成のデータベースが文字認識手法の評価手段としてよく用いられ，他の手法と比較が可能だからである．カテゴリー（字種）の数は両仮名ともに「ゝ」（濁点），「。」（半濁点）を含む48カテゴリーである．1カテゴリーにつき200人分の文字があり，両仮名とも延べ9600字に対して実験した．ベクトル場のための（修正）距離変換としてはチェス盤距離変換を用いた．認識は，入力パターンのベクトル場と各カテゴリーの代表ベクトル場間で類似度計算し，その最大値検出を行うことにより行った．最大値を与えるカテゴリーが唯一ならば，そのカテゴリーに入力パターンが属するとし，2つ以上ならば棄却とした．

本実験では，手書き文字という変動の大きなパターンに対してベクトル場整合法を適用するため，文字の大きさと重心位置の正規化を行った（図4. 9）．これは，データ・ベースにある大きさ 32×32 の画面から文字文字図形の重心Gと文字図形を囲む長方形を求めて，その長方形と重心Gが各々大きさ 16×16 の正

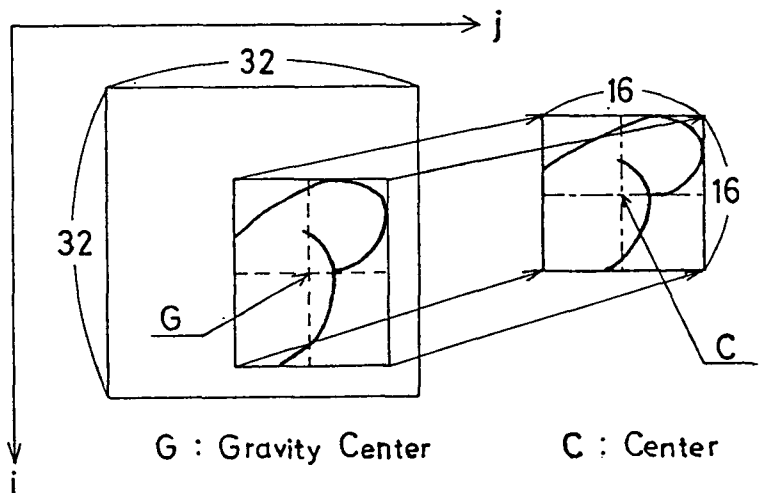


図4. 9 大きさと重心位置の正規化

方形とその中心Cへ写像されるように文字図形を変換して得られる。このためには長方形を重心Gにより四つの部分長方形に分けて、それらの各々を四つの部分正方形へ変換すればよい[46]。この正規化を濁点や半濁点に対してもそのまま適用しており、通常行われるようにそれらの大きさを前処理で抽出して例外処理することは一切行わなかった。又、類似度を計算するとき、認識効果が顕著であるとされている位置ずらし補正処理は施していない。ここで位置ずらし補正処理とは、正規化された入力未知パターンを更に上下・左右などにずらしてその都度類似度計算し、その最大値をとる操作をいう。

標準パターンの作成においては、上記のデータベースの冒頭から50人分/カテゴリーの文字を標準パターン用設計サンプルとして選び、各カテゴリーを代表する2値パターンとベクトル場を作成した。すなわち、本方式における標準パターンは標準2値パターンと標準ベクトル場の組を意味する。標準2値パターンは次のように作成した。まず、設計サンプルの距離変換値の結果を重ね合わせて、各点におけるその平均値を算出する。この値は文字線の心線からの平均チェス盤距離を意味する。次に文字領域の境界点における平均値を算出し、上記の平均チェス盤距離がこの値より大きい点は白点、それ以外の点は黒点とした。標準ベクトル場も同様に、設計サンプルから得られるベクトル場を重ね合わせ、各点で平均ベクトルを求めて作成した。

[実験結果と検討]

表4. 1に設計サンプル50人分を入力パターンとして用いた場合の結果を示す。未知サンプル(150人分/カテゴリー)に対する正読率は、片仮名92.4%,平仮名89.7%であった。表4. 1から、90%に達しない正読率のカテゴリーは片仮名よりも平仮名に多く存在し、平仮名の正読率は低いことが分かる。カテゴリー別に見ると、「め」→「の」や「ぬ」、「も」→「む」、「ら」→「う」や「ろ」、「る」→「ろ」、「ろ」→「る」や「ら」、「わ」→「ね」と誤読されていた。また、「か」は何に誤読されるかが一定していなかった。これは「か」の右肩の文字線の位置変動により、全体の重心位置が大きく変わるためと思われる。片仮名の「シ」が「ツ」や「ラ」に誤読されていたが、その理由として、類似度 $S(f,g)$ が

文字線の回転角度に対して鋭い識別特性を示していないことも考えられる。

しかし「か」を除く以上の文字は、どのカテゴリーに誤読されるかがほぼ決まっているので、再びベクトル場整合を位置ずらし補正処理を伴って行うことにより正読率は更に向上することが予想される。またハードウェアではこのようなことはパイプライン処理により容易にできる。

表4.1 片仮名と平仮名の認識実験結果

(50人分/カテゴリー)の正読率(%)

片 仮 名				平 仮 名			
ア	100	ハ	100	あ	100	は	96
イ	100	ヒ	100	い	94	ひ	100
ウ	100	フ	96	う	94	ふ	100
エ	96	ヘ	100	え	100	へ	98
オ	100	ホ	100	お	98	ほ	96
カ	98	マ	100	か	* 88	ま	90
キ	100	ミ	98	き	90	み	100
ク	92	ム	98	く	100	む	94
ケ	100	メ	94	け	100	め	* 76
コ	98	モ	100	こ	98	も	* 78
サ	90	ヤ	96	さ	92	や	90
シ	* 88	ユ	100	し	92	ゆ	98
ス	100	ヨ	100	す	98	よ	98
セ	96	ラ	94	せ	98	ら	* 84
ソ	90	リ	100	そ	100	り	96
タ	94	ル	100	た	98	る	* 88
チ	90	レ	100	ち	90	れ	94
ツ	94	ロ	100	つ	100	ろ	* 82
テ	90	ワ	98	て	96	わ	* 88
ト	100	ヲ	96	と	100	を	94
ナ	100	ン	94	な	94	ん	96
ニ	100	ヽ	92	に	100	ゝ	* 86
ヌ	92	〇	100	ぬ	94	〇	96
ネ	94	平均	97.0	ね	90	平均	94.2
ノ	100			の	100		

(*印は90%未満の正読率を示す)

表4. 1の結果をハミング距離による通常の重ね合せ法や、重なり合った文字線の方向が一致すれば強くマッチングするようにした方向性マッチング方式と比較すると[46]，前者のよりは片仮名で約16%，平仮名で約17%，後者のよりは両仮名共約4%程向上していた．手書き文字という変動の大きなパターンに対する以上の結果より，本ベクトル場整合法は文字線の位置ずれや変動の吸収に効果があったと考えられ，視覚検査における文字認識においてもその有効性が期待できる．

4. 3 伸縮変換整合法

かなり変動の大きな文字パターンに対して，その局所の変動を吸収する重ね合せ法を述べる．この重ね合せ法は，入力文字パターンのベクトル場と標準パターンのベクトル場とを比較し，標準パターンが入力パターンに重なり合うように伸縮変換を施してから整合をとる方式である．伸縮変換は，ベクトル場の比較に基づいて，文字パターンの外周領域から動的に点（画素）対応（変位ベクトル場）を決定した後に行われる．また，重ね合せ過ぎの対策として変位抑制を示し，2つのパターン共1本の直線の場合において，パターンの平行移動・回転に対する伸縮変換の変動吸収能力と，変位抑制の効果を明かにする．

4. 3. 1 変位ベクトル場の決定

入力文字パターンの大きさは正規化されているものとする．この正規化は，文字領域を長方形枠で囲み，それが正方形になるようにパターンを変換して行われる．また，ベクトル場作成における距離変換は修正チェス盤距離変換を用いている（4. 2. 1参照）．この距離変換から前述の方式により，文字パターンの境界からの距離や形状が反映されたベクトル場が得られる（4. 2. 2-4. 2. 3参照）．いま2つの文字パターンが同一カテゴリーに属するならば，両文字パターンの外周領域におけるベクトル場の状況は似ていると予想される．そこでその2つのベクトル場を照合して，外周領域から適当に点対応させれば，両文字パターンのかかなり良い重ね合わせが行われるであろう．本節では，このような発想

に基づいて標準パターンを入力パターンに重ね合わせるための点変換（変位ベクトル場） $\Phi : R^2 \rightarrow R^2$ (R^2 は平面) の決定法について述べる。

図4. 10に示されているように、標準および入力パターンのベクトル場の定義域を各々 U_1, U_2 とする。 U_1, U_2 は同じサイズの正方形であり、4. 2で示したように2次元ベクトルは U_1, U_2 上の整数値座標点（画素）上に対応しているとする。定義域 U_2 上の正方形の枠を外周から L_1, L_2, \dots, L_M と順に周回してゆき、点 $P \in L_n$ に

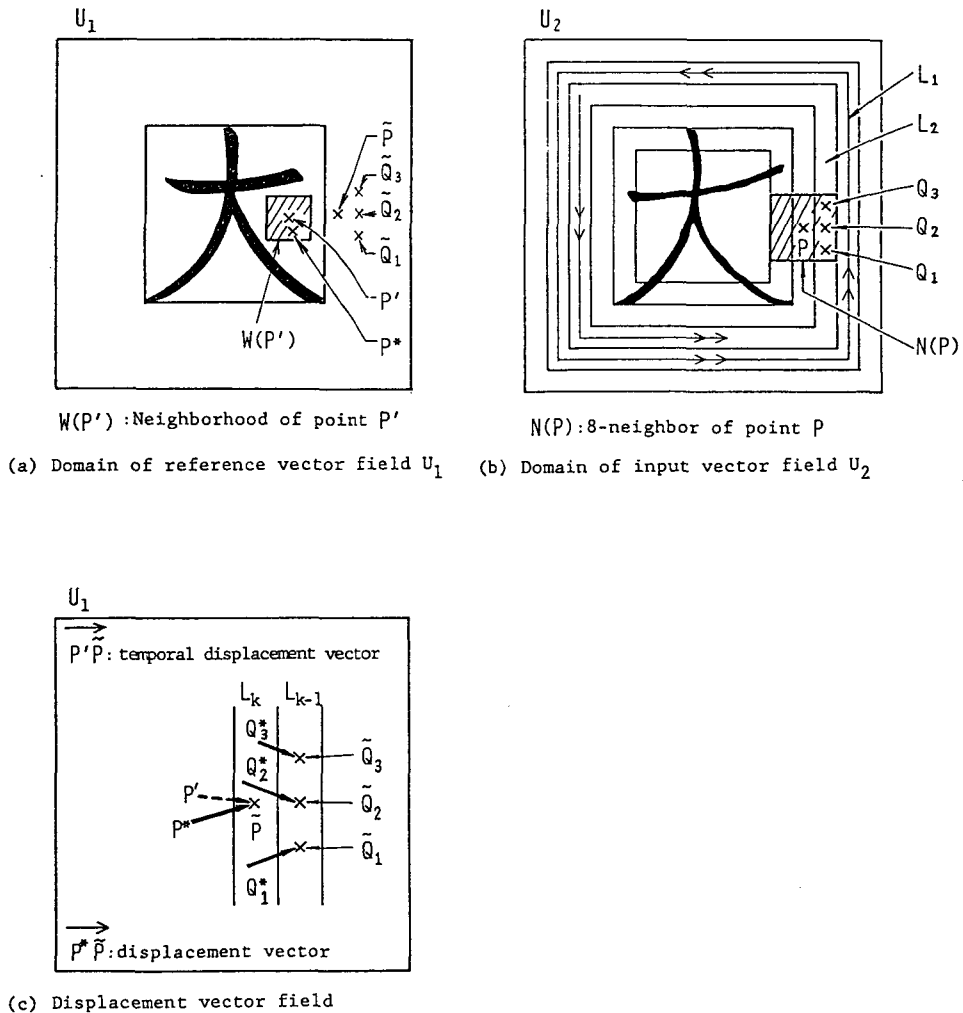


図4. 10 変位ベクトル場の決定

対して仮変位点 $P' \in U_1$ を後述のアルゴリズムにより定める。次にその近傍 $W(P')$ ($\subset U_1$) を探索領域として、次に述べる決定条件 (1) と (2) を満たすという意味で、点 $P \in L_n$ と最も合致する点 $P^* \in W(P')$ を選ぶ。点 P^* を点 P の変位点という。ここで $W(P')$ は、点 P' の座標成分を四捨五入した整数値座標点を中心とする、サイズ $(2m+1) \times (2m+1)$ のマスクである (m は自然数)。点 $P^* (\in W(P'))$ の決定条件は次の 2 つである。(1) 点 P^* および点 P に各々対応するベクトル間の距離 $\|v(P^*) - v(P)\|$ が、 $W(P')$ 内の他の点 R および点 P に各々対応するベクトル間の距離 $\|v(R) - v(P)\|$ より大きくない。すなわち点 P^* は、点集合 $L(P) = \{S \in U_1 \mid S \in W(P')\}$ かつ $\|v(S) - v(P)\| = \min_{R \in W(P')} \|v(R) - v(P)\|$ に属する。(2) 点 P と同位置の U_1 上の点 \tilde{P} と、点 P^* との定義域における距離が、点 \tilde{P} と他の $L(P)$ の点間の距離より大きくない。すなわち、他の $L(P)$ の点間の距離より大きくない。すなわち、

$$\text{dist}_E(\tilde{P}, P^*) = \min_{S \in L(P)} \text{dist}_E(\tilde{P}, S)$$

である。ただし、 $\|\cdot\|$ はベクトルのユークリッド・ノルムであり、 dist_E は定義域 U_1 上のユークリッド距離である。

2次元ベクトル $\overrightarrow{P^*P}$ および $\overrightarrow{P'\tilde{P}}$ を各々変位ベクトル、仮変位ベクトルという。点 P', P^* は次のように点 P の属する枠 L_n の番号 n に対して帰納的に決定される。

($n=1$ のとき) 点 $P' = \tilde{P}$ として (B) に飛ぶ。

($n=k \geq 2$ のとき)

(A) [点 P' の決定] 点 P の 3 個の隣接点 $Q_i \in N(P) \cap L_{k-1}$ ($1 \leq i \leq 3$) の変位ベクトルを、 $(Q_i^*Q_i)$ とすれば (図 4. 10 (b), (c))、点 P' は

$$\overrightarrow{P'P} = (1/3) \cdot \sum_{i=1}^3 \overrightarrow{Q_i^*Q_i}$$

として決定される。但し、 $N(P)$ は点 P の 8 近傍である (4. 2. 2 参照)。点 P が枠 L_k の角の点のときは、 $N(P) \cap L_{k-1}$ の 5 個の点のうち、 L_{k-1} の角の点とその 2 個の隣接点を、点 P の 3 個の隣接点とする。

(B) [点 P^* の決定] 点 P' が決定されると、その近傍 $W(P')$ が決まり、上述の点 P^* の決定条件 (1), (2) を満足する点を 1 つ定める。

[平滑化]

枠 L_k 上の全ての点 P に対して上の点 P^* （従って変位ベクトル $\vec{P^*P}$ ）が決定された後、次の意味での変位ベクトルの平滑化を行い、その結果得られるベクトルを改めて $\vec{P^*P}$ とする。すなわち、点 P の上下または左右に隣接する L_k の2個の点を $P_+, P_- (\in N(P) \cap L_k)$ とすれば、

$$\vec{P^*P} \leftarrow (1/4) \{ \vec{P_+^*P_+} + 2 \cdot \vec{P^*P} + \vec{P_-^*P_-} \}$$

このようにして、枠 $L_n (\subset U_2)$ 上の点 P に対して変位点 P^* が決まり、さらに L_n の内枠 L_{n+1} 上の点 X に対して仮変位点 $X' (\subset U_1)$ が決まる。これを順次繰り返すことにより U_1 と U_2 間の点对応を決定する。尚、 U_2 上の画素配列が偶数次数のときには4個の画素が中央部に残り、奇数次数のときには1個の画素が残る。偶数次数の場合は上述のアルゴリズムをそのまま適用すれば良いが、奇数次数の場合は最後の1個の点 P についてだけ、点 P' を決定する隣接点として $N(P) \cap L_{n-1} (\equiv N(P))$ の8個の全ての点を用い、(B)の[平滑化]は行わない。また、(B)において変位ベクトルの平滑化を行うのは、標準パターンと入力パターンとの点对応をより連続的にするためである。

[変位抑制]

前述のように変位ベクトルを決定すると、過度の変位が起こり重ね合わせ過ぎが起こる可能性がある。そこで外枠より内枠へと順次変位ベクトルを作成しているとき、変位ベクトルのユークリッド・ノルムが或る値 d_M ビット（画素幅）を越えた場合には、その変位ベクトルの向きはそのままにして、ノルムを d_M と等しくするという操作を付加する。この操作を最大変位量 d_M ビットの変位抑制という。

4. 3. 2 伸縮変換と類似度計算

標準パターンの変換パターンは、前述の変位ベクトル場のベクトル $\vec{P^*P}$ より、点 P^* 上の標準パターンの値を整数値座標点 \tilde{P} に対応させて得られる。パターンの値は実際には整数値座標点上でしか与えられてないので、曲面補間を用いて点 P^* 上

の標準パターンの値を求める。

点 P^* の座標を (x, y) とすると、点 $R_1([x], [y]), R_2([x]+1, [y]), R_3([x], [y]+1), R_4([x]+1, [y]+1)$ で囲まれた正方形領域内の任意の点 (u, v) 上の標準パターンの値 $f(u, v)$ は、

$$f(u, v) = c_1 uv + c_2 u + c_3 v + c_4$$

であるとして補間を行う。但し、 $[]$ はガウス記号である。また c_1, c_2, c_3, c_4 は4点 $R_i (1 \leq i \leq 4)$ 上のパターンの値 $f(R_i)$ によって、

$$c_1 = f(R_1) - f(R_2) - f(R_3) + f(R_4)$$

$$c_2 = [y] \times (f(R_3) - f(R_4)) + ([y]+1) \times (f(R_2) - f(R_1))$$

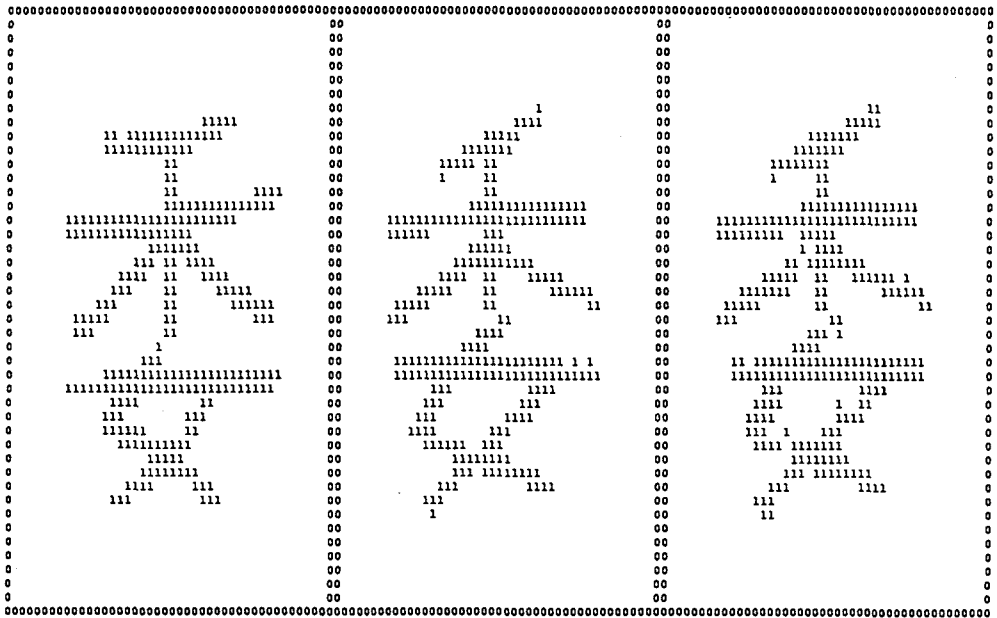
$$c_3 = [x] \times (f(R_2) - f(R_4)) + ([x]+1) \times (f(R_3) - f(R_1))$$

$$c_4 = f(R_1) \times ([x]+1) \times ([y]+1) - f(R_2) \times [x] \times ([y]+1) - f(R_3) \times ([x]+1) \times [y] \\ + f(R_4) \times [x] \times [y]$$

のように与えられる。

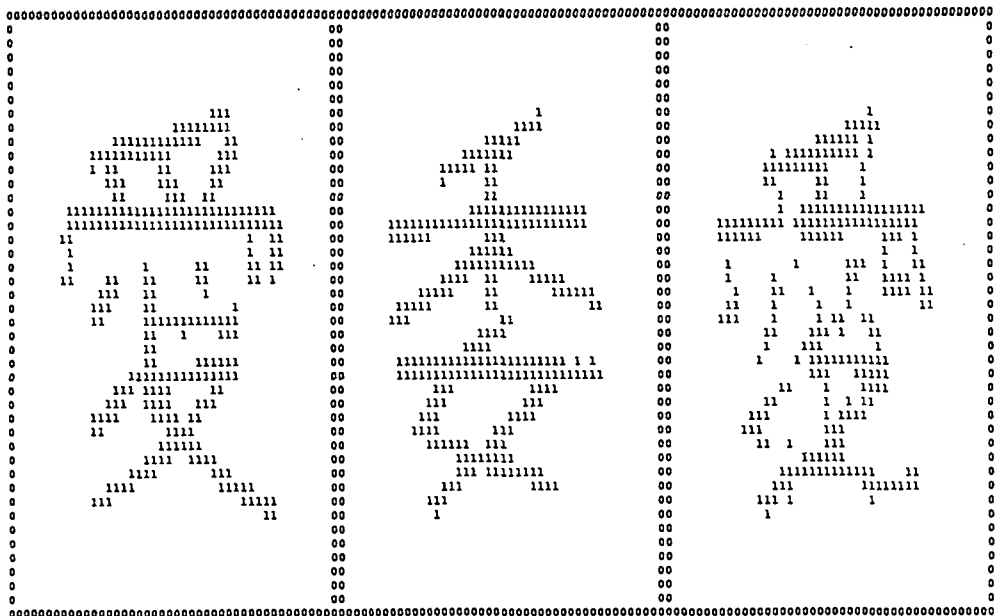
いま標準パターンが2値パターンであり、変換パターンも2値パターンにするときは、しきい値 $t (0 < t < 1)$ を用いて、 $f(P^*) \geq t$ ならば $g(\tilde{P}) = 1$ とし、 $f(P^*) < t$ ならば $g(\tilde{P}) = 0$ とする。但し、 $g(\tilde{P})$ は変換パターンの点 P における値を表す。 t の値は実際には0.3を用いる。

図4. 11, 12に手書き漢字に対する、最大変位置3ビットの変位抑制有りの伸縮変換例を示す。但し、標準および入力2値パターン共、正規化サイズは 32×32 、ベクトル場の定義域のサイズは 40×40 としており、前述の P^* を見出すためのマスク $W(P')$ のサイズは $3 \times 3 (m=1)$ としている。また、図4. 11, 12の(b)の入力パターンは同一であり、図4. 11, 12の(c)に各標準パターンを伸縮変換して得られる2値パターンが示されている。図4. 11における標準パターンの点変換を表す変位ベクトル場を図4. 13に示す。矢印は変位ベクトルを表し、矢印の先へ他端の点が変位することを示すが、図4. 13では見やすくするため、ベクトルのノルムを $1/2$ にしてある。図4. 13により、標準パターンの最上位置



(a) reference pattern (b) input pattern (c) the transformed pattern

図4. 1 1 同一カテゴリ一間の伸縮変換



(a) reference pattern (b) input pattern (c) the transformed pattern

図4. 1 2 異なるカテゴリ一間の伸縮変換

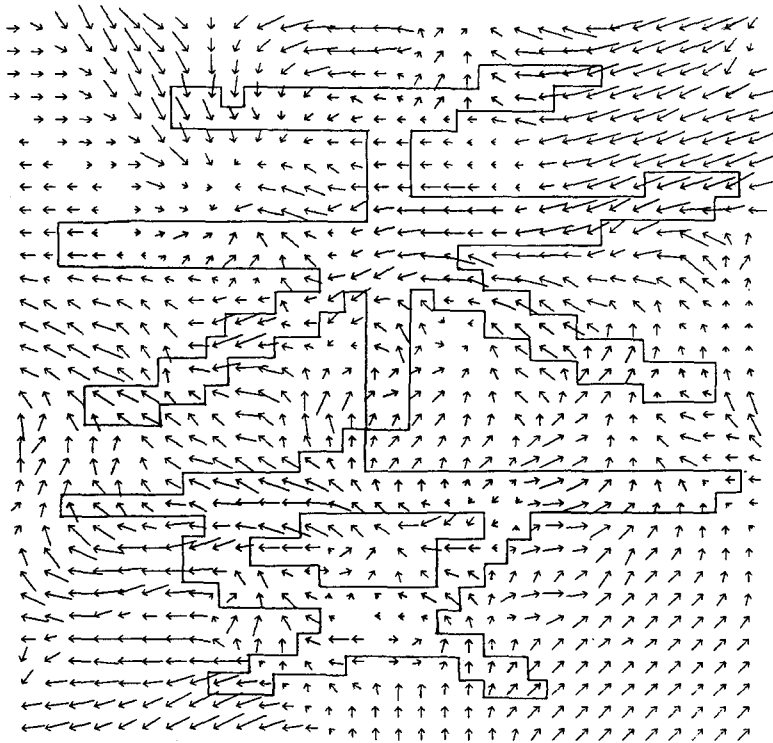


図4. 13 変位ベクトル場

の横線ストロークが左下がりのストロークになる様子が分かる。

[類似度計算]

変換された標準パターンと入力パターンとを重ね合わせ、単純類似度を計算する。ここで単純類似度SSは、4. 2. 4で定義したように、2つのパターンを各々 $f(i, j)$, $g(i, j)$ とすると、

$$SS = \frac{\langle f, g \rangle}{\|f\| \cdot \|g\|}$$

と表され、

$$\langle f, g \rangle = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N f(i, j) \times g(i, j), \|f\| = [\langle f, f \rangle]^{1/2}, \|g\| = [\langle g, g \rangle]^{1/2}, (Nはパターンを表す画素配列の次数) となる。$$

4. 3. 3 局所変動に対する吸収能力

文字パターンにおける文字線の変動に対する伸縮変換の吸収能力を調べるため、標準および入力パターン共1本の直線である最も単純な場合について、変換前後の標準パターンと入力パターン間の単純類似度を求めてみる。また、重ね合わせ過ぎを防ぐために必要な変位抑制を付加した場合の変換前後の単純類似度を示し、変位抑制有りの伸縮変換が手書き文字の局所変動の吸収に有効な特性を持ち得ることを述べる。

[平行移動の場合]

図4. 14 (b)のように幅および横の長さが各々4,30ビットの直線を標準パターンとして、変換前の単純類似度 (Simple Similarity before the Elastic Transformation, SS before ET), 変換後の単純類似度 (Simple Similarity after the Elastic Transformation, SS after ET) と、最大変位量3ビットの変位抑制された変換後の単純類似度 (Simple Similarity after the 3 bits-Controlled Elastic Transformation, SS after 3bits-CET) を計算した結果が図4. 14 (a)に示されている。

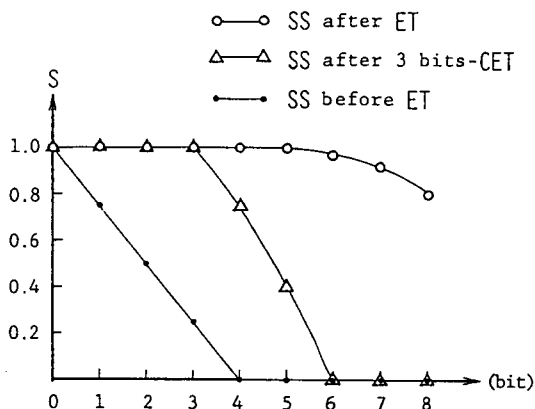
図4. 14 (a)より、変位抑制の無い場合には、ほぼ7ビットまでの位置ずれが吸収され、最大変位量3ビットの変位抑制有りの場合には、その変位量までの位置ずれが吸収されているのが分かる。そして最大変位量を超えると急速に粘性を失っていくことも分かる。

[回転の場合]

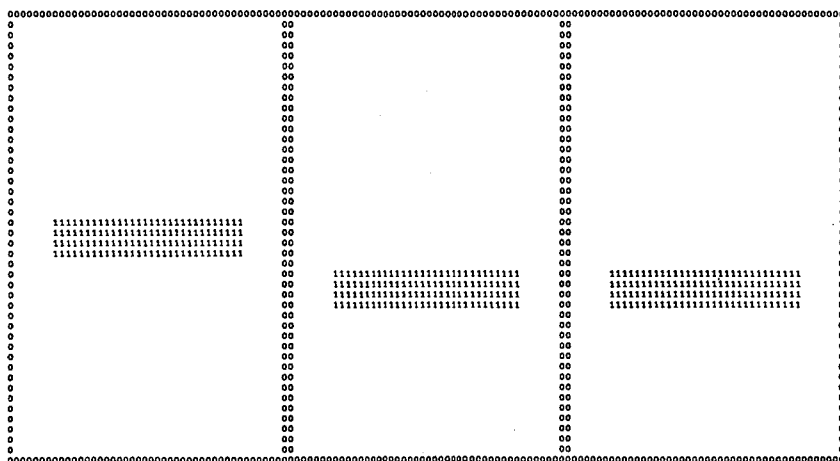
図4. 15 (b)のように回転された直線に対する単純類似度が、平行移動の場合と同様に図4. 15 (a)に示されている。

図4. 15 (b)より、変位抑制の無い場合には、ほぼ35°までの回転が吸収され、変位抑制有りの場合にはほぼ15°~20°までの回転が吸収されていることが分かる。

以上、1本の直線の平行移動と回転の場合について伸縮変換の吸収能力をみた。これを文字パターンとみなすと変位抑制有りの伸縮変換は、文字認識において好ましい吸収性を持つことが分かる。実際には文字パターンにおいては多くの直線



(a)

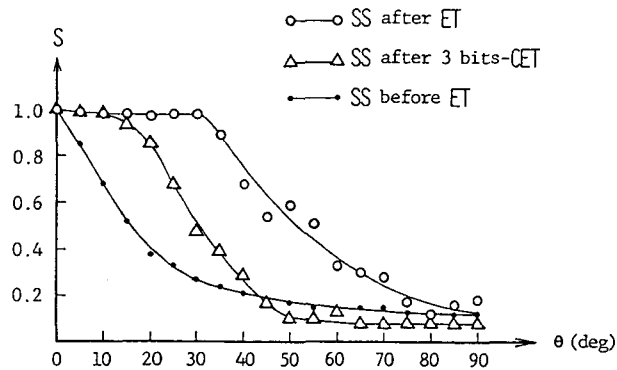


(b)

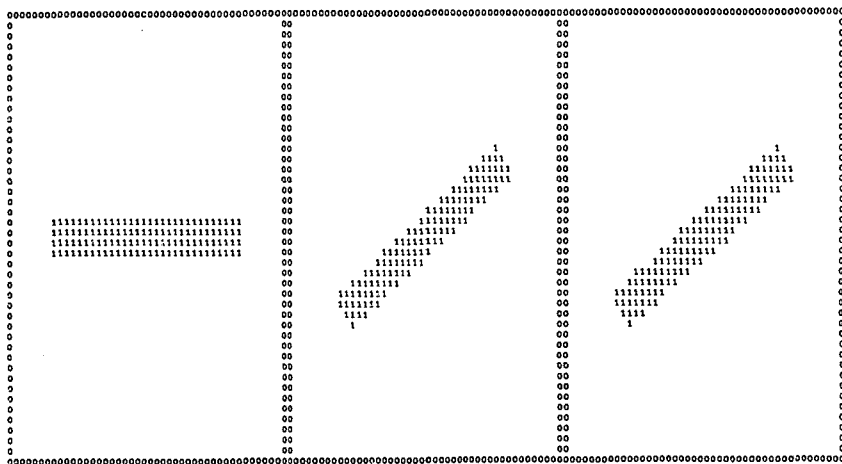
図4. 14 (a) 平行移動による変動に対する吸収能力 (b) 5ビットずらした直線パターンに対する伸縮変換 (左側：標準パターン，中央：入力パターン，右側：変換後の標準パターン)

および曲線状ストロークがあり，唯1本の直線パターンに対する前述性質は一般化できない。だが，2本の直線パターンの平行移動や回転についても前述の結果とほぼ同様の性質があることや，曲線状ストロークを含む場合でも局所の変動に対する吸収能力は大きいことが確かめられている。また特に，伸縮変換により，

変換された標準パターンと入力パターンの外郭の様子はかなり良く似ることも確かめられている。これは外郭の文字線の外周領域におけるベクトル場の影響範囲が広いためと考えられ、ベクトル場に対するストロークの影響範囲が十分広い文字パターンに対しては、前述の性質とほぼ同様な性質が成り立つと推測される。



(a)



(b)

図4. 15 (a)回転による変動に対する吸収能力 (b) 30° 回転された直線に対する伸縮変換 (左側：標準パターン，中央：入力パターン，右側：変換後の標準パターン)

4. 4 結 言

視覚検査の要求事項の1つである文字認識の手法として、ベクトル場を用いた方式を述べた。このベクトル場は距離変換による変換値分布に基づいて作成される。すなわち、距離変換により文字パターンの境界からの距離による等高（距離）線が形成され、その言わば勾配ベクトルの場として得られる。このため、ベクトル場は文字線の欠け、切れなどの変動には影響を受けにくいものとなっている。本章では、このベクトル場のベクトルの内積に基づく類似度を定義し、2次元整合法としてのベクトル場整合法を述べた。また文字線の変動（平行移動や回転など）の類似度における影響を述べ、局所変動に対する吸収能力を示した。変動が大きいとされている手書き文字（片仮名・平仮名）に対して認識実験を行い、その結果が通常用いられる重ね合せ法や、重なり合った文字線の方向が強くマッチングするようにした方向性マッチング方式と比較して、前者より約16～17%程、後者よりは約4%程認識率が向上した。これにより重ね合わせ法の1つであるベクトル場整合法の有効性が明らかにされた、と考える。更に本章では、かなり変動の大きなパターンに対して、ベクトル場に基づく伸縮変換整合法を述べ、文字パターンの変動に対する吸収能力を論じた。この伸縮変換整合法は、カテゴリ数が多いパターンに対して、大分類された後の細分類に有効ではないかと思われる。またベクトル場整合法は、ハードウェアによるパイプライン処理で容易に実現できるものと考えられ、自動視覚検査の実システムにおける有効性が期待される。

第5章 検査システム構築指向の装置開発

5.1 緒言

自動視覚検査を対象にした画像処理装置は、どちらかと言えば研究開発用途が主目的の汎用画像処理装置とは異なり、

- (1) 生産ラインにおける実用システムとして処理速度を満足する高速性、
- (2) 多様な要求仕様に合致するシステム構築のための柔軟性や容易性、
- (3) 生産コスト上採算の合う経済性、

が特に要求される。更に、移動する被検査物（以下ワークと呼ぶ）の画像を瞬時に入力する機能や、ワークの位置検出を高速・高精度に行う機能など生産工場における製造ライン特有の機能も要求される。したがって、自動視覚検査システムを構築しようとした場合、通常の汎用画像処理装置ではこれらの条件を満たすことは難しく、処理速度や経済性を犠牲にして実用化している場合が多いように思われる。

本章では、上記の要求事項が満足されることを狙って開発した高速画像処理装置HSIP（仮称）について述べる[6]－[9], [12], [36]。開発装置HSIPは、2章で述べたように、処理の高速性とシステム構築上の見通しの良さからハードウェアによるパイプライン処理方式を基本にしており、TVカメラからの画像を1秒間に30画面（フレーム）の速度（NTSCビデオ・レート）で連続画像入力・処理することを基本としている。また1章で述べたように、汎用画像処理装置のように一々処理画像をメモリに格納することはせず、可能な限り画像メモリへのアクセスは行わないことも基本方針としている。しかしながら、このようなハードウェアによるパイプライン処理方式では、通常、直列処理型のアーキテクチャとなり柔軟性に欠ける[35], [40]。そのためHSIPでは、画像処理のハードウェア・モジュール間において直列・並列・環状接続が可能となるようにし、積み木（ブロック）のようにそれらモジュールを積み上げてシステム構築ができるようにしたビルディング・ブロック型アーキテクチャを採用している。

このアーキテクチャにおいては、処理モジュールを通る画像バスには画像情報のみならずビデオ同期信号や制御信号も伝送され、これらはモジュール間の接続形態に応じて直列にまたは並列分岐して送られる。更に、その同期信号による「ビデオ信号同期制御方式」をとっており、各モジュールにおいて処理の遅延があってもその分だけ同期信号も遅延され、後段に接続するモジュールではその遅延に応じた処理動作開始が自動的に行われる。そのためソフトウェアによるシステム制御が容易となる。しかもモジュール間の接続を環状接続にし、モジュールにおいて画像情報を単に通過させるだけの機能(NOP:No Operation)を用れば、処理順序を可変にしながらの反復的画像処理システム構築も可能となる。このように本装置はあくまでもシステム構築指向なので、同様にパイプライン処理を基本とする他の汎用画像処理装置とは異なり、画像メモリーや画像処理ハードウェア間の画像データ転送において、バス競合を起こさないよう多数個の画像バスを固定設置[35]することや、処理モジュール間においてネットワーク型の接続・制御機構[42]を設置することはしていない。それゆえシンプルであり、また、連続画像処理の途中でモジュールの処理モードを画像毎にダイナミックに変更するとき、上述のビデオ信号同期制御方式により、各処理モジュールでの遅延を考慮したパラメータ設定をソフトウェアでタイミング良く行う[42]、などのタイミング（または同期）制御の必要性が殆どない。そのためシステム制御が容易となり、視覚検査のためのシステム構築が比較的容易にかつ柔軟に行える。

本章では先ず、開発装置HSIPの基本的なシステム・アーキテクチャとそれを支えるビデオ信号同期制御方式などを述べ、次に装置構成や画像処理機能、及びソフトウェアによるシステム制御方法について述べる。

5.2 システム・アーキテクチャ

5.2.1 ビルディング・ブロック型パイプライン・アーキテクチャ

ハードウェアの直列接続処理であり、ハードウェア・アーキテクチャとしてのパイプライン方式は完全並列処理方式やマルチ・プロセッサ方式と比較して、シ

システム構築上見通しが良く、比較的小規模ながらも高速性を有するため、自動視覚検査システム構築用の画像処理装置には適していると考えられる。しかしながら、直列処理形態に限定されるため、処理の柔軟性に欠ける。そのため装置HSIPでは、画像処理のハードウェア・モジュール間において物理的に直列・並列・環状接続ができるようにし（図5.1）、それらモジュールを積み木のブロックのように

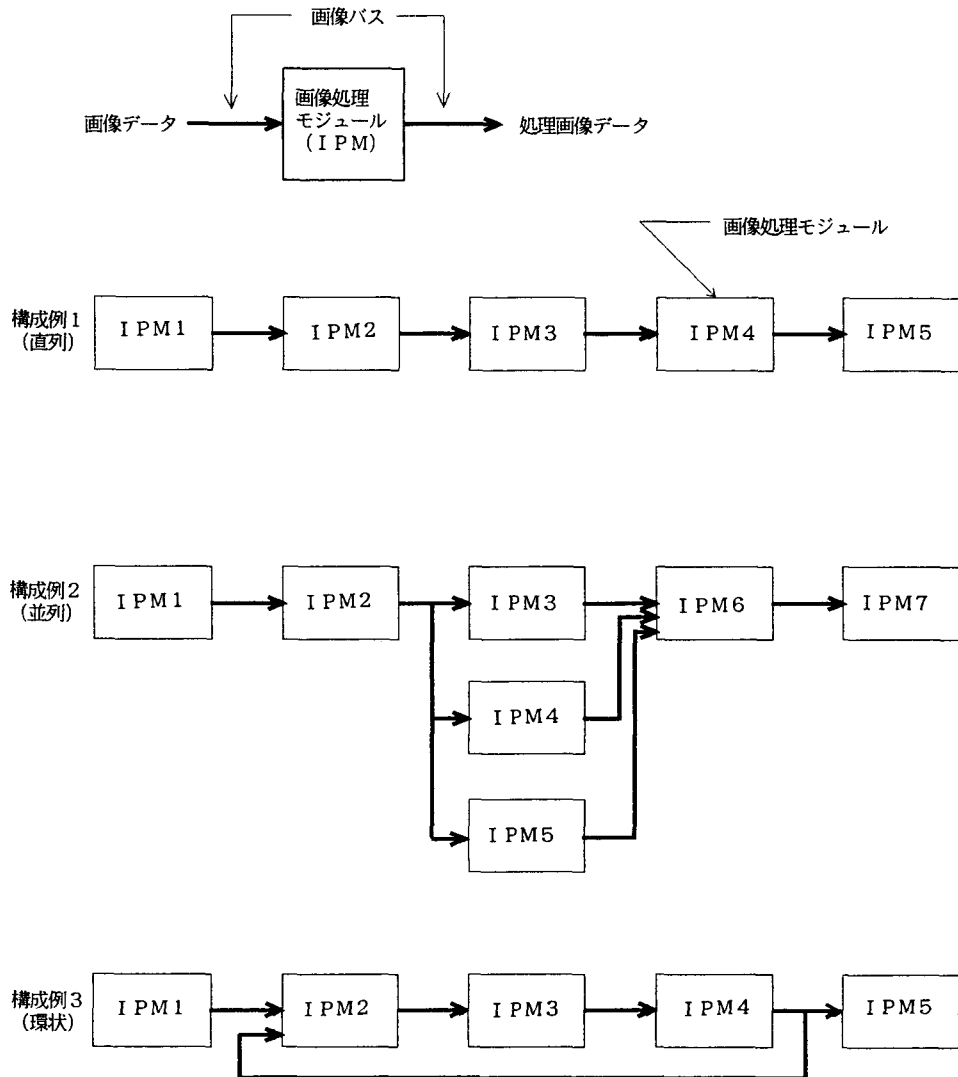


図5.1 ビルディング・ブロック型パイプライン・アーキテクチャにおける画像処理モジュール構成例

積み上げて要求仕様に合致したシステム構築を行う，ビルディング・ブロック型パイプライン・アーキテクチャを採用している．このため各処理モジュールを通る画像データ転送用の画像バスは共通仕様にし，図5. 1に示されている構成を始め，要求仕様毎に種々のモジュール接続構成がとれるようにしている．

各処理モジュールは通常直列接続用とし，並列・環状接続においては，それを可能とする画像バスの分岐・結合用モジュールを用意して物理的に接続する．ただし単純な並列分岐に関しては，そのために処理モジュールを設置しなくとも分岐用の画像バス・ケーブルで代用できる．分岐された画像情報の結合に関しては，装置HSIPでは画像バスに対して3入力1出力形式の画素間演算モジュール（後の5. 3. 3で詳述）を用いている．これは，画像間の画素単位での演算を行うものであり，3つまでの画像バス，或いは画像情報の流れを統合して集束させることができる．また，環状接続に関しても，この画素間演算モジュールと後述のマッピングメモリ・モジュール（5. 3. 3参照）を用いて実現できる．だが各処理モジュールにおいては，当然のことながら処理による遅延があり，様々な接続構成や画像処理形態をとる場合はタイミング（または同期）が重要な問題となる．装置HSIPでは，ビルディング・ブロック型アーキテクチャを支えるタイミング方式としてビデオ信号同期制御方式をとっている．

5. 2. 2 ビデオ信号同期制御方式

A. 基本構想

前述のアーキテクチャにおいてビデオレートの連続画像入力・処理を可能とし，そのシステム構築を容易にするためには，入力画像のビデオ信号に同期して処理モジュールを動作させればよい．また視覚検査システム用に複数個のTVカメラから画像入力する場合も考慮すれば，画像入力のタイミング制御の容易さから，TVカメラへの画像入力用外部同期信号を画像処理装置側で連続生成し，その同じ信号を指揮信号として各画像処理モジュール及び装置全体のタイミングをとる．具体的には，各処理モジュールへの同期信号として，2つのフィールドで1フレームを構成するNTSC方式の垂直同期信号の内，第1フィールドの開始信号を

用い、その「フレーム信号」を画像バスを通して伝送する。

しかしながら画像バスに伝送されている画像データには、前述のように各処理モジュール毎に遅延が起こる。そのため実画像データの開始と終了を表す「フレームデータ有効」なる別の信号を設けて（図5.2）、実画像データと共に、かつ実画像データよりわずかに一定時間早く先行して画像バスに伝送する。この信号はフレーム信号とは異なり、処理による画像データの遅延に応じて遅延される

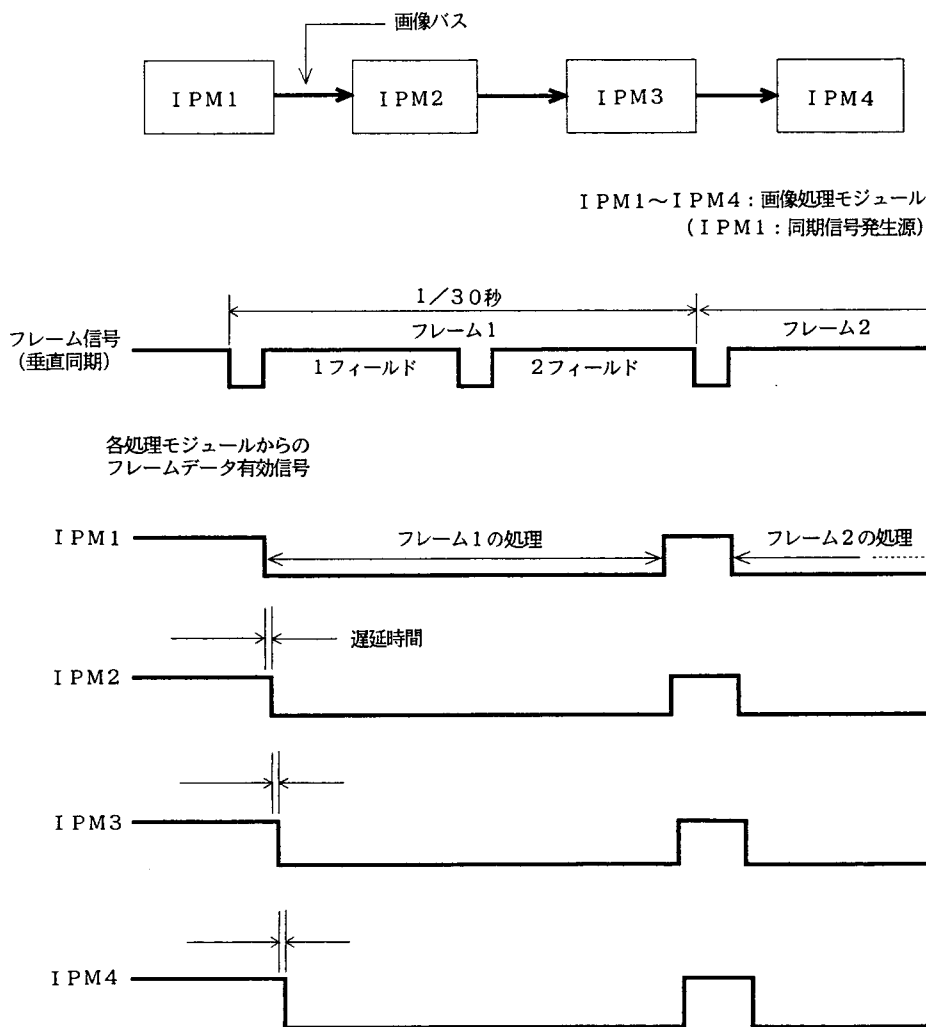


図5.2 画像処理モジュールの処理による遅延

ので、各モジュールでは前段のモジュールからの実画像データの”到来”が前もって分かる。すなわち、各処理モジュールは、装置全体の処理タイミングを知らせるフレームの開始信号と、前段で遅延されたフレームデータ有効信号の2つに基づいてタイミング制御される。また、複数台カメラを用いて連続画像入力しながらカメラ毎に異なる処理を行うか、または1台のカメラからの連続入力画像に対してフレーム毎の処理を行う場合、何れにしても各処理モジュールにおいてフレーム毎の動的可変処理を行う必要があり、CPUによって処理モジュールに対する処理モード変更のためのパラメータ設定を行わねばならない。この場合も考慮して画像バスに、カメラまたは画像識別番号をフレームデータ有効信号と共に（付加的に）伝送する。

来るべきフレームに対する処理モード指定などのパラメータ設定準備は、図5.2に示されているように、フレーム開始信号の立ち下がり時（約190 [μ s]）、またはそれから垂直帰線期間内（約1.1 [ms]）に各処理モジュールに対してCPUにより一斉に行う。そして、それらのパラメータ値を各モジュール内部にある「モード指定用LUT（ルック・アップ・テーブル）」へ書き込む。この場合、パラメータとしてはカメラ（または画像）識別番号と、その番号に対する処理モード指定の2つの自由度を持たせる。すなわち、どのカメラ（または画像）に対してどのような処理を行うかである。このパラメータは、来るべき実データ到来の通知信号が到着時（フレーム・データ有効時）、そのときのカメラ（または画像）識別番号に応じて、モード指定用LUTからハードウェアで「直接制御用レジスタ」に自動的に設置され、直接制御用レジスタに設定されたパラメータに基づく実際の処理は実データ到来時に開始されるようにする。

製造ライン上の自動視覚検査システムでは、複数台のカメラを用いる場合、或いは1台のカメラを用いて1フレーム毎の動的可変処理を行う場合でも、連続的繰り返し処理が殆どである。従って処理モジュール内部のモード指定用LUT内のパラメータは、通常書き直しが不要であり、実画像データ（詳しくはフレームデータ有効信号）と共に画像バスへ伝送するカメラ（または画像）識別番号さえ変えればよい。このようにすればシステム設計上の見通しも良く、また実画像デ

ータ到来を見計らったパラメータ設定を各処理モジュール毎にタイミング良く設定する必要は無いので、煩雑なタイミング制御は殆ど無く、システム運転時におけるソフトウェアの負担は極めて軽くなると考える。また、かなり複雑な動的可変処理を行う場合でも、上述のように2つのパラメータ自由度を持つモード指定用LUTと、画像バスに伝送するカメラ（または画像）識別番号や、処理モジュール毎の遅延に合わせて遅延するフレームデータ有効信号の機構とで柔軟に対処できる、と考えられる。

ところでカメラ（または画像）識別番号は、処理モジュール全体の遅延が1フレーム（1/30[秒]）以内で納まるならば、原理的にはフレーム信号と同時に画像バスへ伝送してもよい。なぜならば、それを各処理モジュールがラッチしておき、「フレームデータ有効」信号到来時にそのラッチしていた「カメラNo.」によるパラメータをモード指定用LUTから直接制御用レジスタに設置すればすむ、からである。しかしながら、前述のような複雑な動的可変処理形態を考慮した場合、1フレーム以上の遅延のために煩雑なシステム制御を招きかねないので、やはり各処理モジュールを通過するとき遅延する「フレームデータ有効」信号と共に伝送するのが妥当であろう。

一方モジュール間の並列接続の場合、2つ以上の画像情報を合流させて同時処理するモジュールでは、流入画像バスの内の1つのフレームデータ有効信号を基準にしてタイミング合わせを行う。これにはモジュール内部のシフトレジスタの利用や、フレーム・メモリの設置により対処する。

また環状接続において処理画像の帰還による反復処理や、或いは処理画像と入力画像の間で画素間演算などのフィードバック的処理を行う場合、例えば図5.1の構成例3を例にとると、IPM2においてその2つの画像の画像データ（またはフレームデータ有効信号）が同時にIPM2に入力することが必要となる。このため処理画像の帰還元のモジュールとして、例えばIPM4では、IPM4への画像データ（またはフレームデータ有効信号）の流入開始タイミングとIPM4からの流出開始タイミングとが独立である必要がある。この理由は、あるモジュールによる（例えばIPM3）処理の後帰還される画像のフレームデータ有

効信号が、その前段のモジュール（例えばIPM1，IPM2）から出るフレームデータ有効信号より一般的に遅延しているからである。それゆえ帰還元のモジュールとして、複数個のフレーム・メモリを内部に有し、モジュールへ流入する画像データをメモリへ書き込むときと、メモリからデータを読み出して流出させるときとが別々のタイミングで行えるようにすれば良い。この読み出しのタイミングとして、装置全体の指揮信号であるフレーム信号を用いるか、または帰還先のモジュール（前述の例としてはIPM2）へ入るフレームデータ有効信号を用いる。これには、画像バスに帰還専用の信号線を物理的に設けて、帰還に関係するモジュールのみが使用できるようにするか、もしくはより単純に、それ専用の信号ケーブルを設けて帰還元と帰還先のモジュールへ接続できるようにする。

以上のようにしてモジュール間の並列・環状接続においては、そのための帰還元用のモジュールなど付加的モジュールをシステム構築時に定型的に設置し、システム運転時には前述の同期制御を行う。

B. 画像バスと制御機構

前述の基本構想に基づき、開発装置HSIPでは画像入力部（5.3.2で詳述）においてTVカメラへの外部同期信号を生成し、同時にフレーム信号を後段の各処理モジュールへ画像バスにより伝送する（図5.2のIPM1参照）。また入力画像を格納するフレーム・メモリも内蔵しており、その画像データを画像バスへ出力する。すなわち、画像バスの先端部としての画像入力部は画像バスの信号発生源でもある。

表5.1に画像バスの仕様を示す。画像バスにおいて各処理モジュールを通過するとき、遅延などの影響を受けずに装置全体へ伝送される信号は「基本クロック」、「フレーム信号」、である。「基本クロック」は1画素単位のクロックであり、これに同期して画素単位の処理が行われる。

処理モジュール毎に遅延の影響がある画像バスの信号は、「ラインデータ有効」信号、前述の「フレームデータ有効」、「画像データ」、及びカメラまたは画像の識別番号である「カメラNo.」の信号である（表5.1）。「ラインデータ

表5. 1 画像バス仕様

信号名	ビット数	内容
基本クロック	1	1クロック/画素, 10MHz
フレーム信号	1	フレームの開始
ラインデータ有効	1	1水平ラインのデータ有効
フレームデータ有効	1	1フレームのデータ有効
画像データ	12	通常8ビット/画素, 残りは拡張または属性情報用
カメラNo.	3	カメラまたは画像の識別番号

有効」信号は水平行毎の処理タイミングを合わせるのに用いられる。画像データには1画素当たり12 [ビット] 分の信号線が用意されている。通常その内の8 [ビット] が使用され、残りは領域ラベリングのラベルや他の特徴情報など8 [ビット] で収まらない場合の拡張用である。また基本構想で述べたように、「カメラNo.」は8台（3ビット分）までのカメラを使用する場合、どのカメラにより入力された画像かを識別するために主として用いられる。但し、1台のカメラの場合は、単に画像の識別番号となる。この情報は、画像入力部のフレーム・メモリから後段の処理モジュールへ、画像データが転送されるときにその属性情報として一緒に画像バスへ伝送される。そして各処理モジュールは、その「カメラNo.」に応じて例えば空間フィルタリングのパラメータ切り換えなどの処理モード変換を自動的に行う。

「カメラNo.」は画像入力部にある制御レジスタを書き換えるだけで容易に修正・変更できるので、カメラ1台のみの使用時にも各処理モジュールに対して8通りまでのモード変換ができる。一方各処理モジュールでは、前述のように、画像バスの「カメラNo.」に応じてどのモードへ自動切り換えするかについての指定がモード指定用LUTに設定できる。すなわち本装置では、各処理モジュールに対する処理モード指定の方法として2通りある。1つは画像バス信号発生源である画像入力部の制御レジスタによる指定と、他の1つは各処理モジュール

内部のモード指定用LUTによるものである。通常の自動視覚検査システムでは多くの場合、各モジュールのパラメータ設定はシステム立ち上げ時の固定設置のまま運転されるので、処理モード指定は主として画像入力部内の制御レジスタを書き換えることにより行われる。両者いずれを書き換えるにしても、前述のようにフレーム信号が立ち下がったときのタイミングで行う。これらの書換えは短時間で行えるため、この時間間隔の利用で十分間に合う。勿論、各モジュールにおいて次の「フレームデータ有効」時までには書換えができればいつでもよい訳だが、基本構想通り「フレーム信号」立ち下がり時を利用するのが最もシンプルな方法であると考える。

5.2.3 LUTの有効利用

本論文第2章の2.3で述べたように、複合的画像処理機能と処理の柔軟性、及び高速性という相反する要請を可能な限り満足するために、LUTに基づく処理形態を開発装置HSIPでは基本設計方針としている[29]。例えば、図5.3に示されているように、2つの画像間の演算の場合、2つの画像データの画素の情報16[ビット]をこのLUTのアドレスとしてアクセスし、LUTのデータを出力する。これにより、加減乗除やその他の演算がLUT内のデータ次第で可能となることは明かである。第2章で述べた画素情報のベクトル化や第4章のベクトル場整合法において、ベクトルの内積などの演算も自由にできる。この場合2つの画像におけるベクトルを符号化しておけば、その復号もLUTで行っていることに

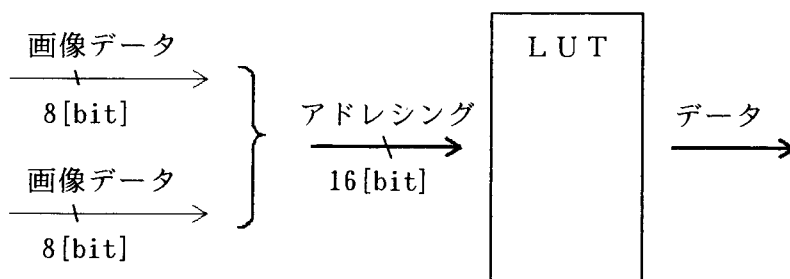


図5.3 ルック・アップ・テーブル (LUT) の利用

なる。この場合のメモリ・アクセスは、100[nano sec]以内という十分短時間で済むのでベクトル演算がビデオ・レートでできることになる。このように、LUTを適所に用いれば処理の柔軟性がかなり増し、しかも高速性も得られる可能性が大きい。

LUTを用いた処理モジュールの例として、セクター濃度加算モジュールを5.3.3で後述する。

5.3 開発装置HSIPの構成と機能

前述の5.2のアーキテクチャを基本として自動視覚検査システム構築用画像処理装置HSIPを開発した(図5.4)。本装置では、制御用のバスとしてマルチバス(IEEE-796)を採用し、画像データ転送専用の画像バスと、各画像処理モジュールからの出力画像表示用「画像表示バス」の2つのバスを設置している。本装置の基本仕様を表5.2に示す。本装置は、以下に述べられるようにシステム制御部、画像入力部、画像処理部、画像表示部より構成されている(図5.5)。自動視覚検査の分野で本装置を有用なものとするために、画像入力部では特に、移動ワークの瞬時画像入力機能とその位置検出機能を付加している。

5.3.1 システム制御部

システム制御部はCPU(マイクロ・プロセッサ)とディスク・コントローラおよび入出力モジュールにより構成される。CPUは画像処理装置内部の各モジュールの制御を行なう。また検査対象ワークの良否判定を最終的に行なう。さらに搬送装置の制御部と信号の入出力を行なう。装置HSIPは単独のシステムとして動作するが、他のコンピュータをホスト・コンピュータとして本装置を起動、または通信することができる。

5.3.2 画像入力部

TVカメラに対して外部同期信号（垂直同期信号，水平同期信号）を出力するとともに，ビデオ信号をA/D変換する．入力画像に対する分解能は 512×480 [画素]（画像メモリのサイズは 512×512 [画素]）であり，1画素は8ビットの濃度値を持つ．ビデオ信号はNTSC方式のため，2つのフィールドでインターレースされている．そこでフレーム・メモリ ($512 \times 512 \times 8$ ビット \times 2面)を用いて1フレームの画像データを一旦格納し，その後ノンインターレース画像として扱う．また，ワーク検出用センサからの信号を直接入力し，即座に適切なタイミングでストロボを発光させるような発光指令信号回路を備えている．さらに，入力画像中のワークの位置を画像入力と同時に高精度に検出するために，画面内の複数個の矩形領域における射影演算を行う機能も備えている．

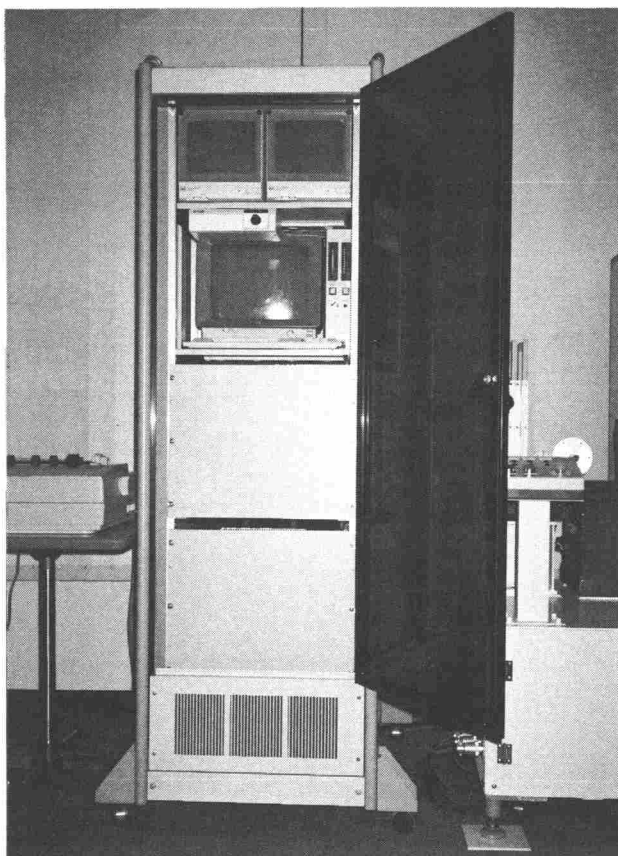


図5.4 装置HSIPの外観

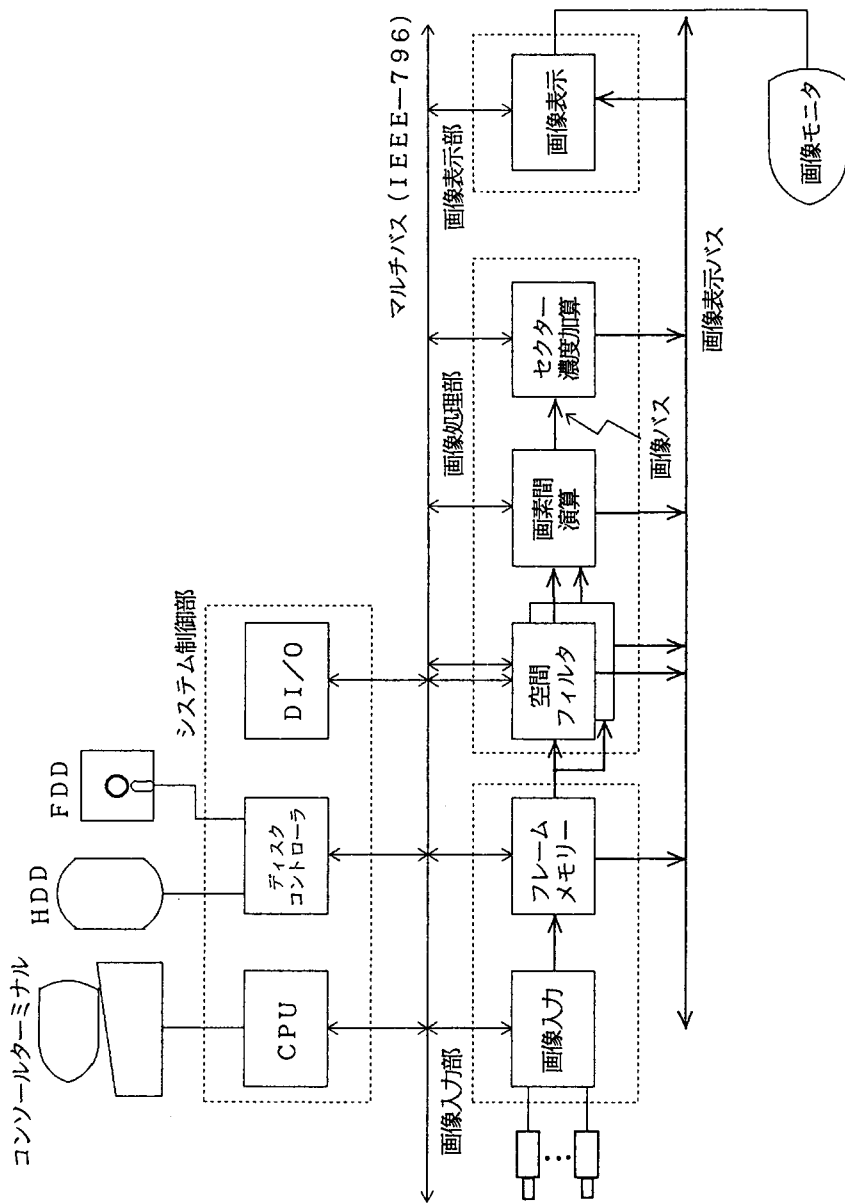


図5.5 ハードウェア構成例

表5.2 基本仕様

画像入力	ビデオ信号	NTSC方式
	A/D変換	8ビット
	接続カメラ	外部同期4台(最大8台) 内部同期1台
表示出力	ビデオ信号	NTSC方式
システム クロック	10MHz	
フレーム・サイズ	512×512 [画素] ×8 [bit] (画像: 512×480 [画素])	
処理速度	30フレーム/秒	
外部インターフェース	DI/O, RS-232C, GP-IB	
操作部	オペレーションパネル, 漢字ターミナル	
システム制御部	intel8086系CPU, DI/O ディスク・コントローラ(HDD, 3.5inch FDD)	

5.3.3 画像処理部

画像処理部は各種の画像処理モジュールを組み合わせるにより構成される。画像処理モジュールは専用のハードウェアであり、開発した画像処理モジュールの例を表5.3に示す。これらのモジュールは全てビデオ・レートで連続的画像処理が可能である。以下に具体例として画素間演算モジュールとセクター濃度加算モジュール、及びマッピング・メモリ・モジュールについて説明する。

(1) 画素間演算モジュール

これは、3入力1出力のモジュールであり、画像と画像の対応する画素において加減算や論理演算を行なう。画素間演算モジュールのブロック図を図5.6に示す。入力段と出力段に濃度変換テーブル(256×8ビット×4チャンネル)を備え、TVカメラ毎に濃度変換のテーブルを換えることが可能である。画素間演算モジュールは水平および垂直方向に空間フィルタで微分し、エッジ抽出した画像の加算や、入力画像のシェーディング補正を行うための画像の減算などに使用する。

表5.3 画像処理モジュール例

画像処理モジュール	機能
空間フィルタ	3×3のマスクによる空間フィルタリング (平滑化, 微分演算など)
2値化/論理フィルタ	2値化 3×3のマスクによる論理フィルタリング (細線化, 孤立点除去, 局所の特徴抽出等)
画素間演算	加減算 論理演算 濃度変換
ラベリング	1次ラベリング
再ラベリング	2次ラベリング 外接長方形座標 面積 ヒストグラム
セクター濃度加算	セクター内の濃度加算 濃度変換
マッピング・メモリ	512×512×8ビット×4 X-Y 座標変換
方向性距離変換	4方向距離画像生成
マッチング	各点ずらしマッチング

(2) セクター濃度加算モジュール

これは、任意形状のセクター（ウィンドウ）内の濃度加算を行なうモジュールであり、図5.7で示されている全体のブロックを4つ内蔵している。セクター情報をLUTに事前に設定しておき、8ビットの入力画像データが一旦濃度変換された後、セクター内の濃度加算が行なわれ、濃度加算結果は結果メモリに格納される。

このときビデオレートでのパイプライン処理を可能とするため、結果メモリは2面設けている。これは2つのメモリがフレーム毎に交互に切り替わるようにするためである（ダブル・バッファ方式）。セクター濃度加算モジュールでは、検査対象ワークの形状に合わせて任意のセクターを設定することが可能であるため、

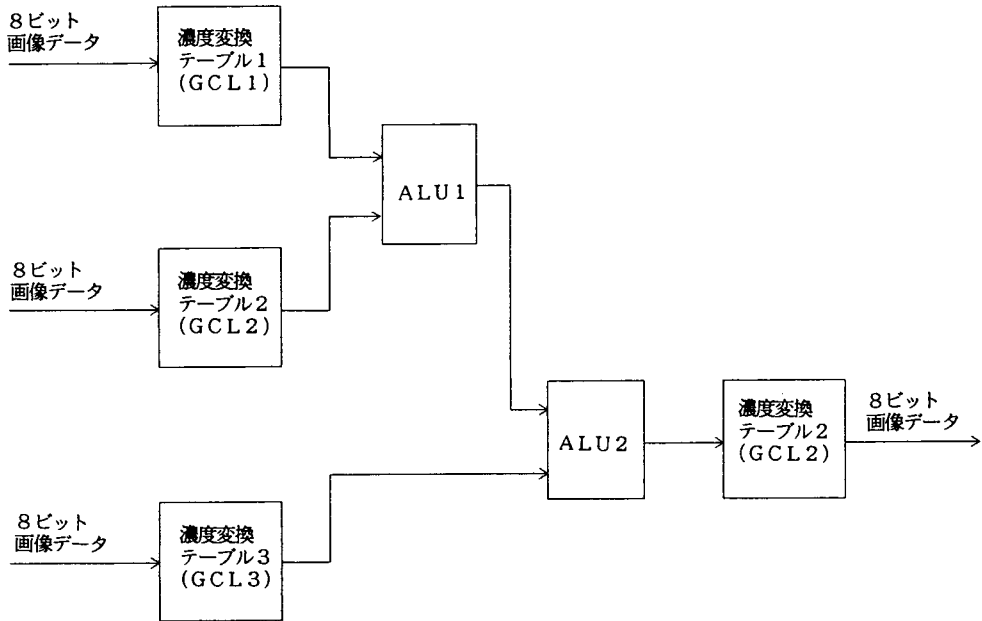


図5.6 画素間演算モジュールのブロック図

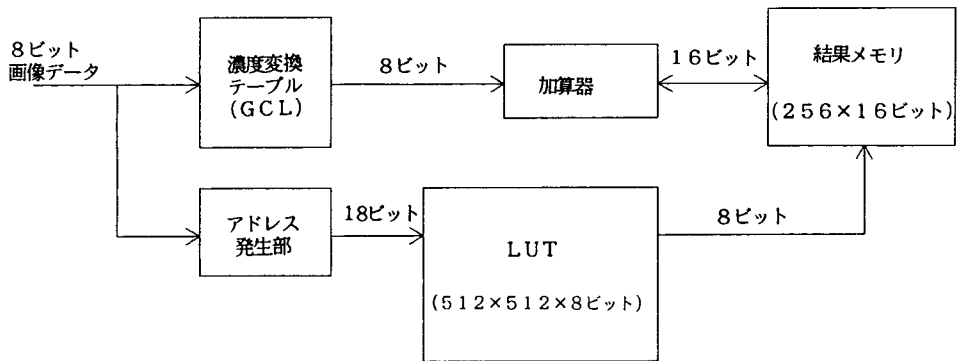


図5.7 セクター濃度加算モジュールのブロック図

(3) マッピング・メモリ・モジュール

フレーム・メモリを4つ内蔵しており(表5.3参照), それらのメモリにおける画像データの格納と読み出しのタイミングは独立して行える. このため, 5.2.2で述べた処理モジュールの環状接続における帰還元として用いるなど, 処理モジュールの接続においてタイミングを合わせるために使用する. このメモリにおいては, 1フレーム毎ダイナミックに標準パターンを平行移動させながら出力できる機能もあるので, 入力パターンとの間の画素間演算などを行うときに標準パターン用のメモリとして用いる. 更に, このモジュールには平行移動以外の機能として $x-y$ 座標変換機能も有する.

以上の処理モジュールの他に, 表5.3に示されているように方向性距離変換モジュール(図5.8)や特徴抽出・各点ずらしマッチング・モジュール(図5.9)などもある. 方向性距離変換モジュールでは, 2値パターンにおいて各点 P から8方向へ”アンテナ”を伸ばして, 点 P から8方向における境界までの距離を算出する. また, 特徴抽出・ずらしマッチング・モジュールでは[10], [11], [20], 標準パターンと検査パターンとの間で境界線の方向性などの局所の特徴を抽出し, 相互に1点对多点(局所領域)を比較して(ずらしマッチング), 検査パターンの欠陥の有無を判定する.

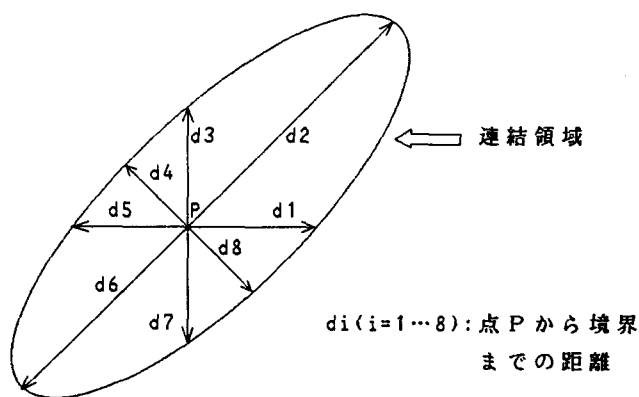


図5.8 方向性距離変換

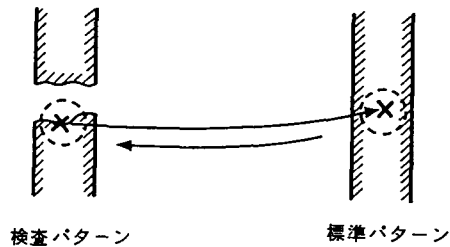


図5. 9 特徴抽出・各点ずらしマッチング

5・3. 4 画像表示部

画像表示部では、画像表示用メモリ(512×512×8ビット)を有し、入力画像や処理中の画像表示を行う。また、射影、濃度ヒストグラム、濃度断面図等のグラフ表示も行う。更に汎用的画像処理装置のように、指定した各処理モジュールの出力画像を表示できる。また自動視覚検査システム運転時にもリアル・タイムの表示が可能である。

5. 4 ソフトウェアによる制御

5. 4. 1 基本方針

ハードウェアの高速性を活かしたソフトウェアによる制御が必要である。そのために以下の3点を基本としている。

(1) 入力・処理・判断の3段パイプライン処理

毎秒30フレームの画像に対して、その全ての画像を連続入力・処理し、フレーム毎に判定結果を出すために、装置HSIPでは図5. 10に示されている入力・処理・判断の3段パイプライン処理を行う。画像入力と画像処理に要する時間はハードウェア処理のため固定となる。しかし判定処理はソフトウェア処理のため、判定アルゴリズムにより要する時間は変わる。そのため本装置では、必要に応じて他のマイクロ・プロセッサなどを設置できるような複数個のフレーム・メモリ付きのモジュールを判定処理専用を用意し、ダブル・バッファ方式でこのフレー

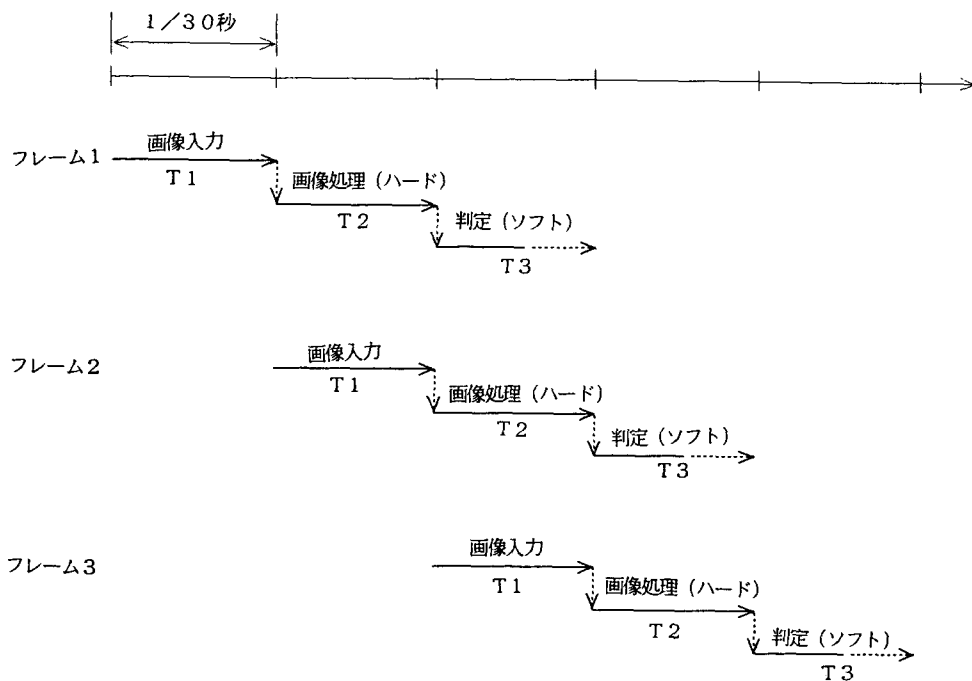


図5. 10 連続画像の入力・処理・判定タイムチャート

ム・メモリをデータ入力用と処理・出力用の交互に使い分けて、1/30秒以内に処理が終了するようにしている。判定処理においてCPUは、画像処理終了時、処理モジュール内の各テーブル（メモリ）に格納されている処理結果データ（判定用特徴量）を読みに行く。この種のテーブルは1対づつ設置されており、やはりダブル・バッファ方式で1フレーム毎自動的に切り換えられ、連続処理が可能になる。また、必要なモジュールからの処理の終了は、そこからの割り込み信号をCPUが受けることにより分かる。

(2) 外部信号からの駆動

画像入力から判定処理までの一連の動作は、検査対象ワークがTVカメラの視野に入った時のワーク検出信号により始まるのが一般的である。したがって装置HS IPにおいては、そのような外部からのトリガ信号を受け付けることにより、瞬時にストロボを発光し一連の動作を行うようにソフトウェア制御を行なっている。

図5. 11にそのタイミングチャートを示す。

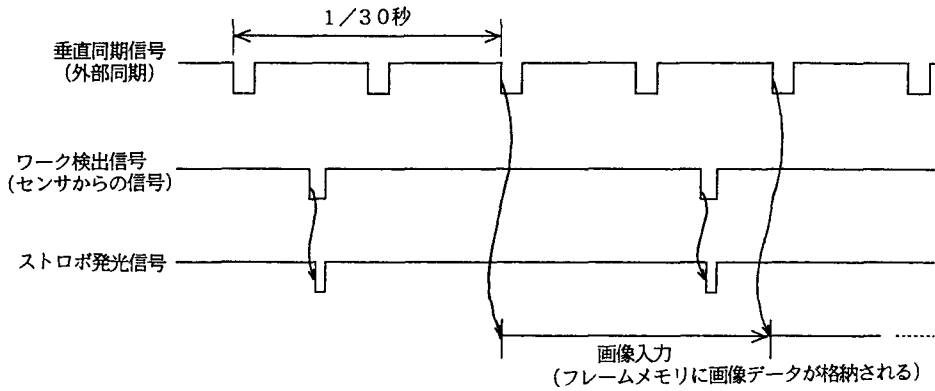


図5. 11 センサ信号からの駆動

5. 4. 2 制御手順

装置HSIPを動作させるにあたって、イニシャライズ後、事前に調整を図った制御パラメータを各モジュールに設定する。設定後は外部からのシステム同期信号や、ワーク検出信号などの信号を待ち、それらの信号によりCPUが各モジュールを制御し、さらに結果データを処理することにより判定を行なう。図5. 5で示されているハードウェア構成を具体例として述べると、この構成においては入力画像に対して水平および垂直方向に微分フィルタをかけ、それぞれの結果を足し算することによりワークのエッジ画像を生成する。更にエッジ画像をセクター濃度加算モジュールで処理することにより、ワーク表面の異物、汚れなどの欠陥を検出する。以下にその概要を述べる。

(1) 制御パラメータの設定

図5. 5のハードウェア構成においては、各モジュールに以下のような制御パラメータを設定する。

画像入力：射影ウインドウ、位置検出用しきい値

空間フィルタ：オペレータ番号

画素間演算：濃度変換テーブル、演算モード

セクター濃度加算：濃度変換テーブル、LUT

制御パラメータはワークの品種毎にハードディスクに格納されている。

(2) オンライン（検査実行時）処理

オンライン処理においては外部からの信号および内部信号の割込み処理が主体となり，リアルタイム性を確保したソフトウェア制御を行う．図5．12に基本的な1フレームのみの制御フローを示す．実際は連続フレーム処理のタイミングで外部からの信号が入力される．オンライン状態での通常のCPUの負荷は判定処理が主体であり，それ以外は割込み処理である．制御パラメータの変更の必要な場合のみ，CPUは割込み処理ルーチン内で変更する．

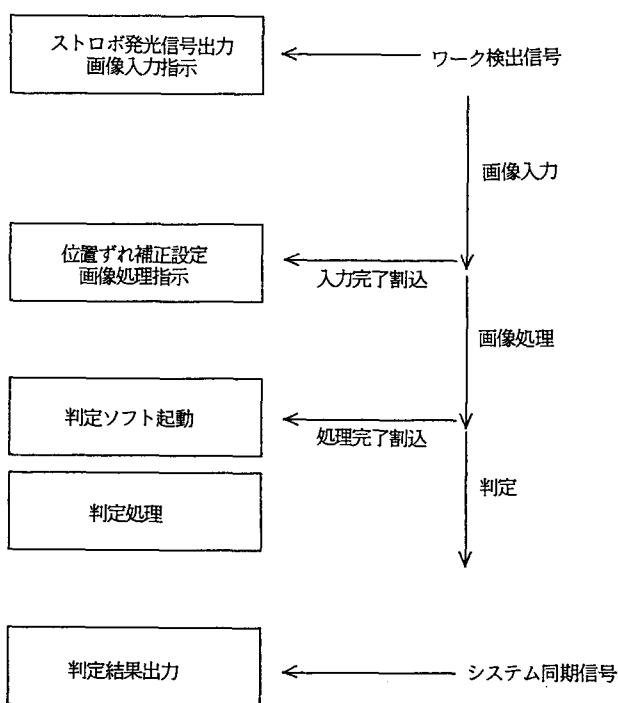


図5．12 制御フロー

5.5 結 言

ビデオレートで連続画像処理が可能な自動視覚検査システム用高速画像処理装置HSIPを開発し，その基本的システム・アーキテクチャについて述べた．自動視覚検査システムなどで使用される画像処理装置には高速性，柔軟性，及び経済性

が特に要求される。高速性を満たすために、要求仕様毎にハードウェア開発による専用処理装置で対処する場合が多いと思われるが、経済性や、仕様変更及び多様な要求仕様に対する柔軟性において難点がある。本章で述べたアーキテクチャはこうした問題点解決を狙ったものである。すなわち、画像処理のハードウェア・モジュールを積み木のように積み上げてシステム構築ができるような、ビルディング・ブロック型パイプライン・アーキテクチャを示し、そのアーキテクチャを支えるビデオ信号同期制御方式について述べた。また製造ラインにおける検査分野特有の機能も付加された装置HSIPの装置構成や画像処理機能なども述べた。

このビデオ信号同期制御方式は、システム制御の容易さを目指したものであり、画像バスにおいて画像データや垂直同期信号であるフレーム信号などの他に、既存の装置には見られなかった制御信号を付加している。すなわち、実画像データの開始と終了を表す「フレームデータ有効」信号と、カメラまたは画像の識別用の「カメラNo.」信号の2つである。この2つの信号は画像データよりわずかに早く先行して画像バスに伝送され、処理モジュールによる遅延に応じて画像データと同様に遅延される。「カメラNo.」は画像入力部の制御レジスタにCPUが書き込むことで簡単に設定でき、画像入力部から後段のモジュールへ画像データが送られるときに付加されて伝送される。一方、各モジュール内部には、「モード指定用LUT（ルック・アップ・テーブル）」が設けられ、パラメータとしてカメラ（または画像）識別番号と、その番号に対する処理モード指定の2つの自由度を持っている。すなわち、どのカメラ（または画像）に対してどのような処理を行うかである。このパラメータによる処理モードは、フレーム・データ有効信号が到来したとき、そのときの「カメラNo.」に応じて自動設定され、すぐ直後に来る画像データ処理をそれに基づいて行う。この機構を採用したために、ハードウェア・モジュール間の種々の接続形態において、連続画像入力・処理を行いながらフレーム毎の動的に変化処理を行う場合でもシステム制御がかなり容易になったと考える。

第6章 開発装置HSIPの応用

6.1 緒言

本章では開発装置HSIPの応用事例として、発電所内の配管やバルブの傷、及び蒸気漏れなどを検査するために試作された自動点検ロボットにおける3次元距離情報（奥行き）抽出用のプロセッサ・システムや[14],[27],[28],[34],[37], 製造ラインで稼働中のテープ検査, ビン検査, ならびに ASTM (American Society for Testing and Material) 法に基づく鋼の品質等級判定 (非金属介在物検査) システムなどの検査システムを上げ, そのシステム仕様と性能について述べる. また, 開発装置HSIPにより作製され現在稼働している実検査システムが100以上, 約40種類に上ることを示し, 自動視覚検査分野における本装置の有効性を明らかにする.

6.2 自動点検ロボットにおける3次元距離情報抽出

開発装置HSIPの応用として, 自ら移動して障害物衝突回避などを行いながら目的の点検場所に行き配管やバルブの傷, 及び蒸気漏れ等の検査を行う, 発電プラント用自動点検ロボット・システム (パイロット・システム) を開発した. このロボット・システムでは, 奥行き (距離) 情報を得るために, 単眼移動視からの画像系列処理方式 [38],[39]を採用している. この理由は, よく知られたステレオ視での対応点検出問題を容易にするためである. すなわち, 移動する1台のカメラから複数個の画像を入力し, その画像内の点の軌跡を抽出して, 両端カメラ位置での2つの画像内の対応点を検出する. それら対応点間の視差により3角測量の原理を用いて3次元距離 (奥行き) 情報を抽出する. ここでは, その画像系列の処理における奥行き情報抽出の原理と画像処理の流れを示し, この処理を実現している画像処理ハードウェアについて述べる.

6. 2. 1 距離情報抽出の原理

原理は上述のように三角測量に基づく。図6. 1に示されているように、1つのカメラを右から左へ移動する場合の画像内における断面 Y_i の軌跡（又は境界点の移動）が描かれている。Z軸はカメラの位置 $P_0 \sim P_n$ と対応している。ここで境界点 P に着目し、カメラ（またはレンズの中心）が光軸に垂直に ΔX だけ平行移動したとすれば、図6. 2より[38]、

$$\begin{aligned} \Delta U = u_2 - u_1 &= \frac{h \cdot (\Delta X + X)}{D} - \frac{h \cdot X}{D} \\ &= \Delta X \cdot h/D \end{aligned}$$

ゆえに、 $D = h \cdot \Delta X / \Delta U$
これにより奥行き情報が得られる。

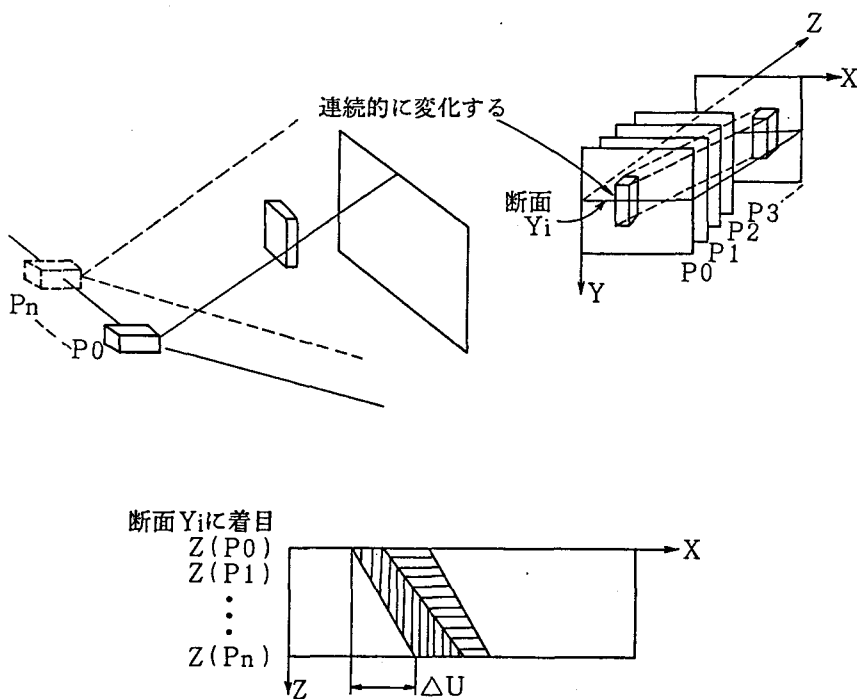


図6. 1 水平断面の軌跡

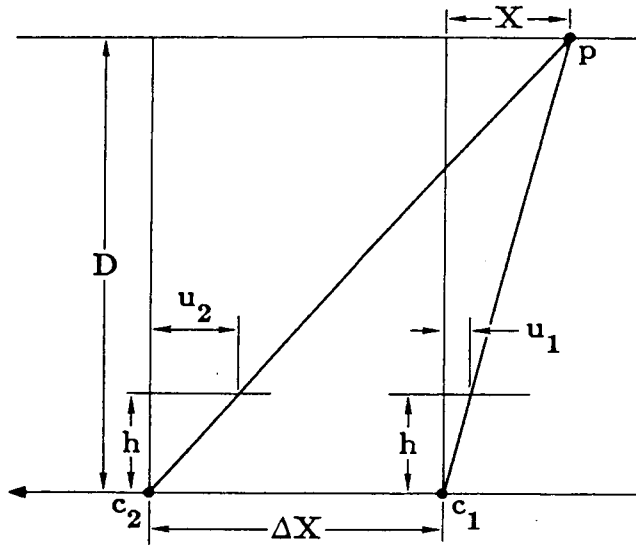


図6. 2 カメラの移動と奥行きとの関係

6. 2. 2 画像系列の処理

[処理の流れ]

図6. 1で示した水平断面に着目した場合の処理を示す. 単一カメラを移動させて, 8枚から最大16枚までの画像(フレーム)を1セットとして入力し, 同時にそれらの画像からエッジ抽出を行う(図6. 3). 更に, 最初と最後の画像に対して領域ラベリングを行う. その次に, 各画像における同位置水平線をシャフルして(この場合順挿入, 図6. 4参照)得られる合成画像にもラベリング処理を施す(図6. 3). これにより, 最初の画像のエッジ領域に対応する, 最後の画像のエッジ領域が見つかり, 前述の ΔU が求まる.

ここで, 距離 D が小さい程 ΔU は大きくなることを利用して, ある距離の範囲内にあるエッジ領域を抽出できる. すなわち, 図6. 5に示されている傾斜変換をシャフル画像内の16行単位毎に行うと, 近距離で斜めにあった軌跡が縦になる. 逆に遠距離のエッジの軌跡が斜めとなり, 連結しない場合も生ずる. そこで傾斜

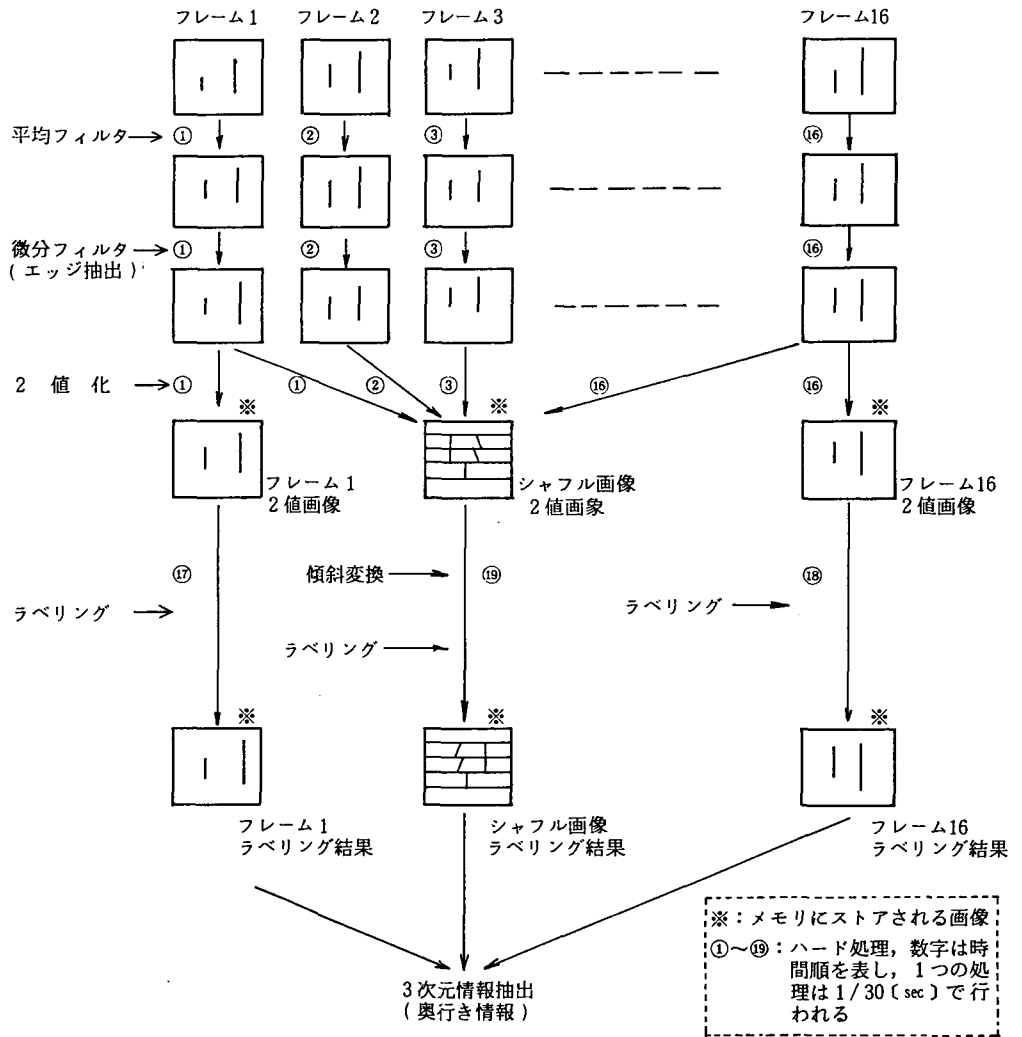


図6.3 処理の流れ

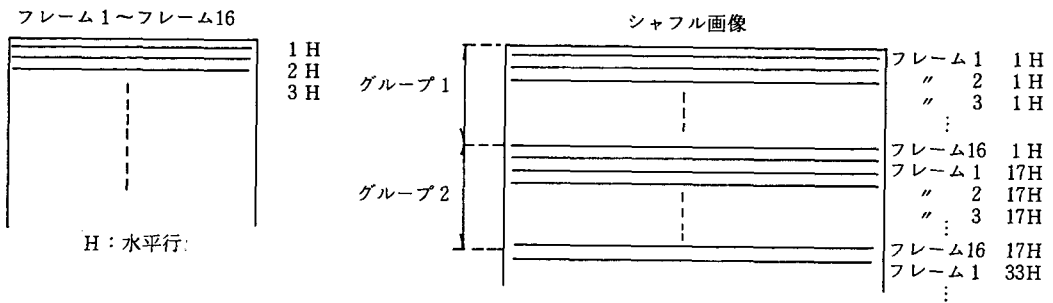


図6. 4 シャフル (画像系列の順挿入)

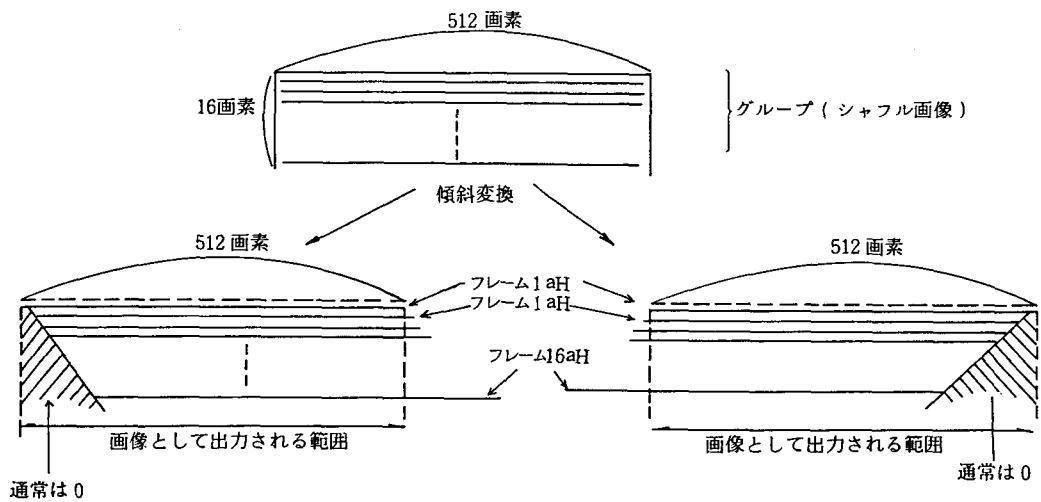


図6. 5 傾斜変換 (グループ単位)

変換した後ラベリング処理をし、連結した軌跡の内縦に近いものを選択すればよい。開発装置HSIPのラベリング機能 (特に2次ラベリング) には、連結領域を囲む最小長方形を検出する機能などが有るので連結している軌跡の傾きが分かる。図6. 6-6. 7に入力画像からのシャフル画像と傾斜変換の例が示されている。

ただし、入力画像は8個であり、カメラが左から右に移動したとき画像入力している。また、図6.8にエッジ抽出後の画像をシャフルした画像を示す。このような画像はエッジの軌跡が複雑に交差しないので比較的良い精度で距離抽出できる。図6.9に本プロセッサ・システムの画像入力系の外観を示す。

[画像処理ハードウェア]

上記の処理を実行する上で特に重要なのは、ラベリング機能（第3章参照）と、シャフルと傾斜変換を行うマッピング・メモリである。マッピング・メモリは、図6.10に示されているように、4つのフレーム（画像）メモリを有し、メモリへの入力時に、Y座標変換する（下向きがY軸方向、右向きがX軸方向）。このとき任意のY座標の行の除去や、他の行との変換ができるのでシャフルが可能となる。また、メモリからの出力時には、各Y座標（行）毎にそのYに依存したX座標変換を施すことができる。このためある行単位毎の傾斜変換が可能となる。これらの処理は全てビデオ・レートで行われる。

6.2.3 処理速度と距離情報抽出精度

[処理時間]

図6.3に示されている様に、16個の入力画像（512x512[画素]）に対するパイプライン的な処理なので、領域ラベリングにおけるラベルのオーバ・フローが無い場合はハードウェア処理（23/30[sec]）とソフトウェア処理（3/30[sec]）で合計 約26/30[sec]程の所要時間ですむ。しかしながらオーバ・フローを考慮し、画面を分割しラベリング処理を行うとすれば、約1.5[sec]の所要時間となる。

[距離情報抽出精度]

現在このプロセッサを用いたシステムでは、カメラを200[mm]水平方向に移動して距離情報を抽出している。その精度は、カメラからの距離4[m]の範囲において複雑光景を測定した場合、単純なエッジ画像ならば（図6.8参照）3[%]の誤差となり、複雑背景下の光景画像の場合、最大誤差10[%]である。

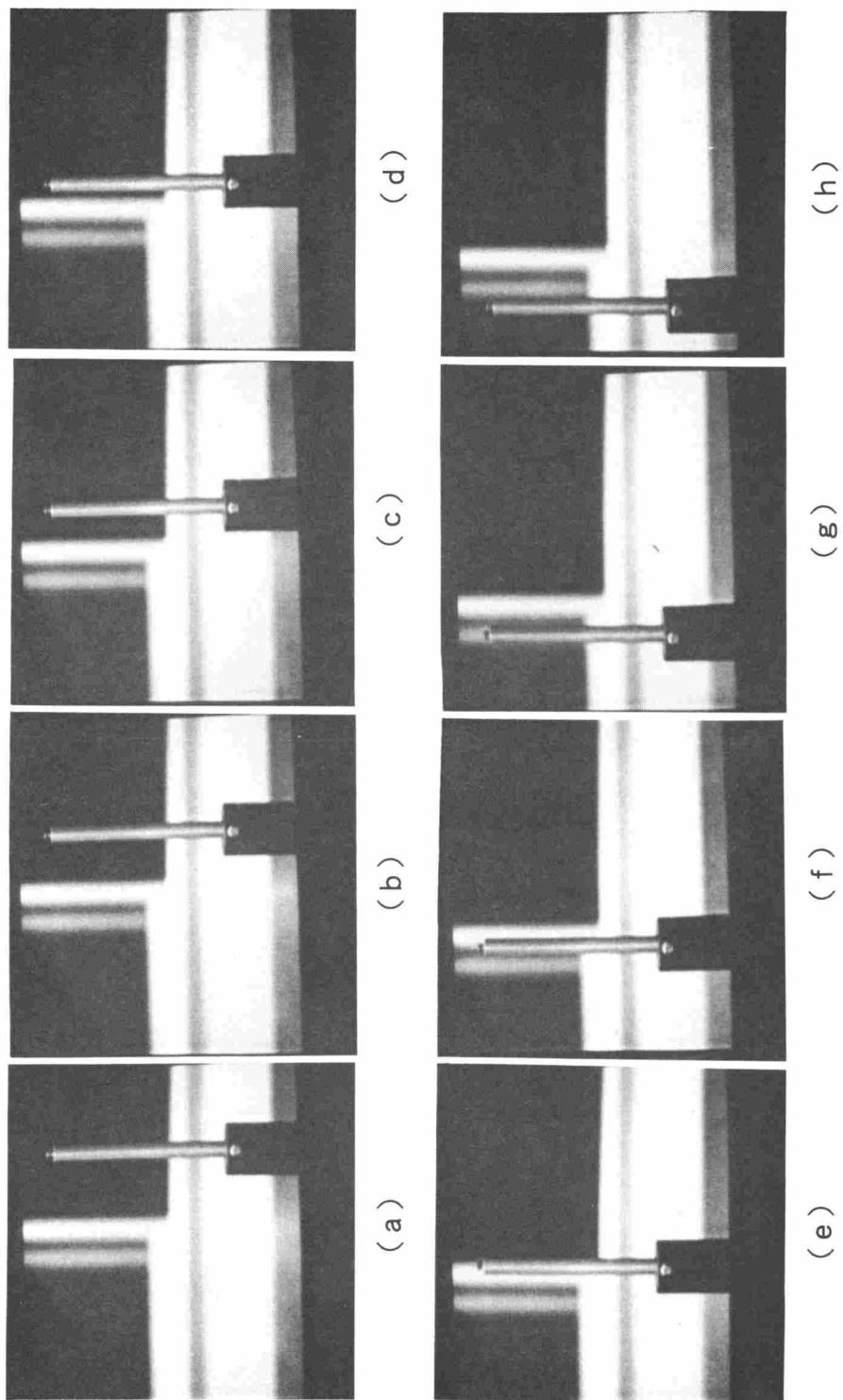
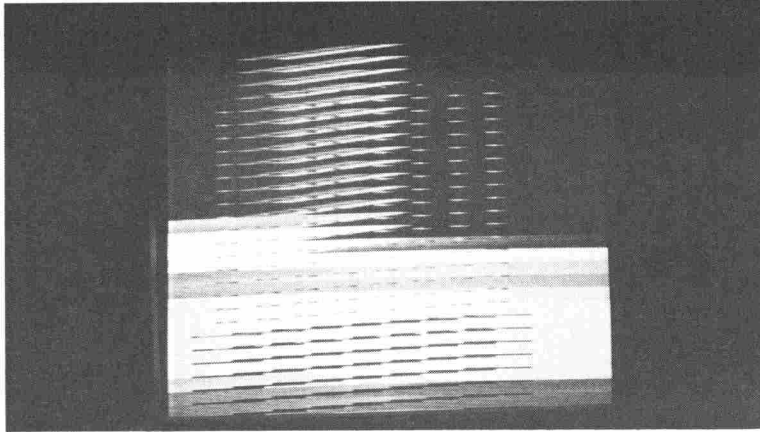
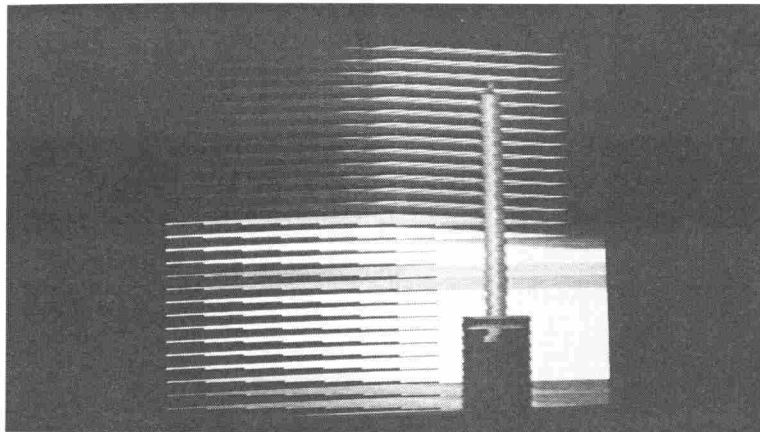


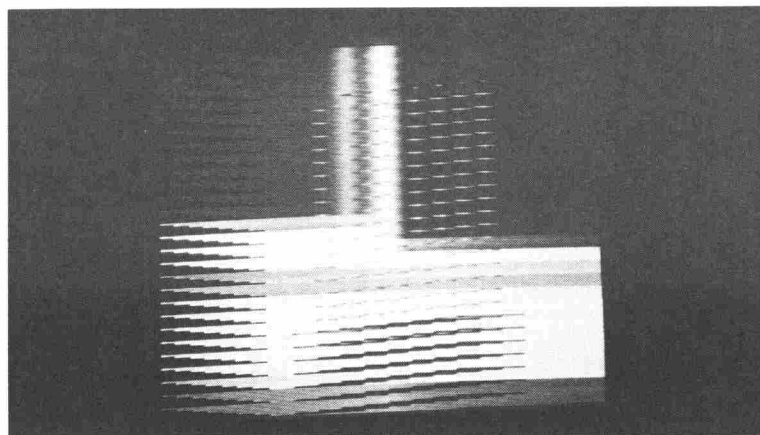
图 6. 6 入力画像系列



(a)

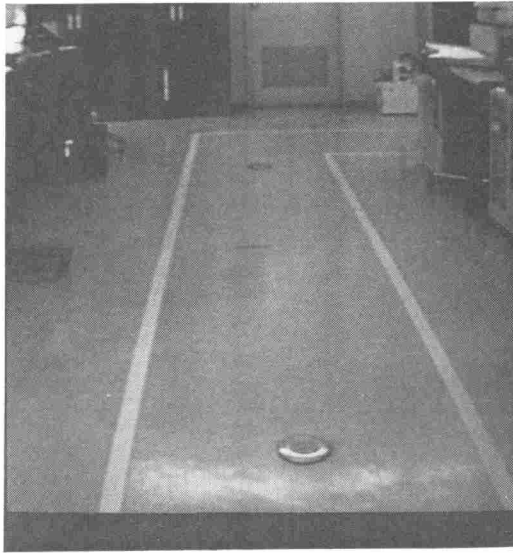


(b)

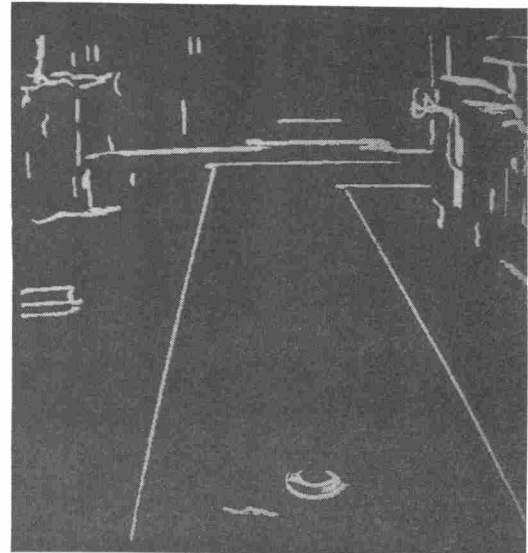


(c)

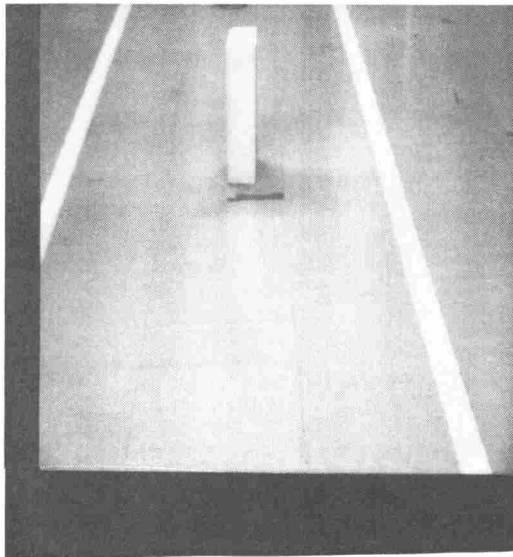
図6.7 (a)シャフル画像 (b), (c)傾斜変換



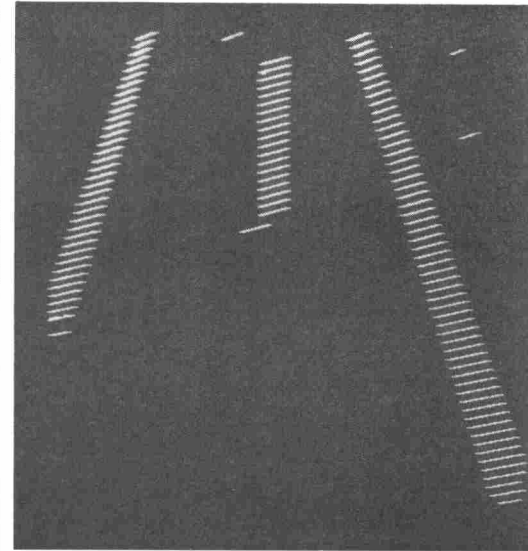
(a)



(b)

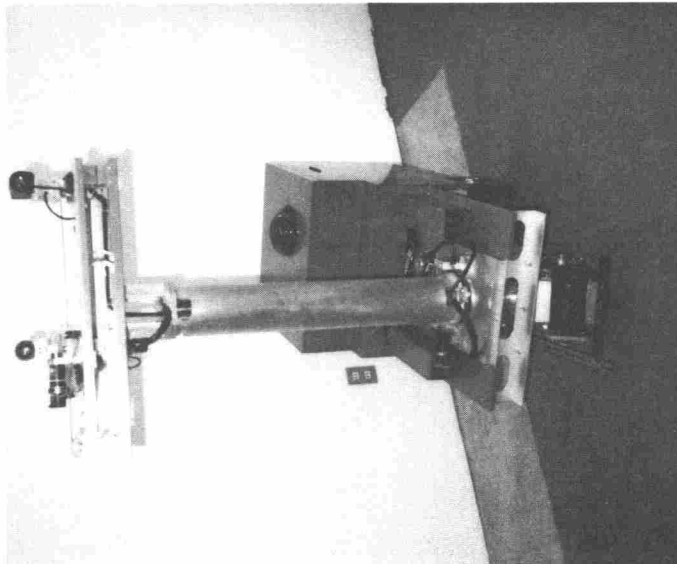


(c)

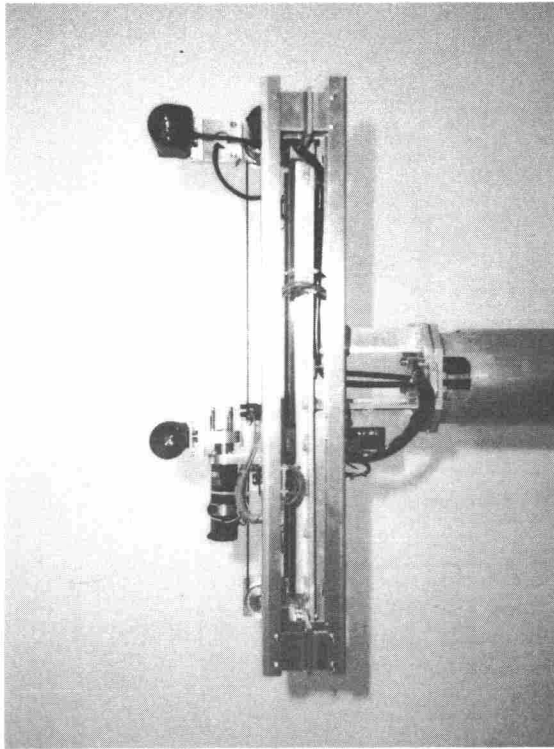


(d)

図6. 8 エッジ抽出とシャフル画像 (a)入力画像 (b)エッジ抽出結果 (c)障害物 (d)エッジのシャフル画像 ((c)が入力画像)

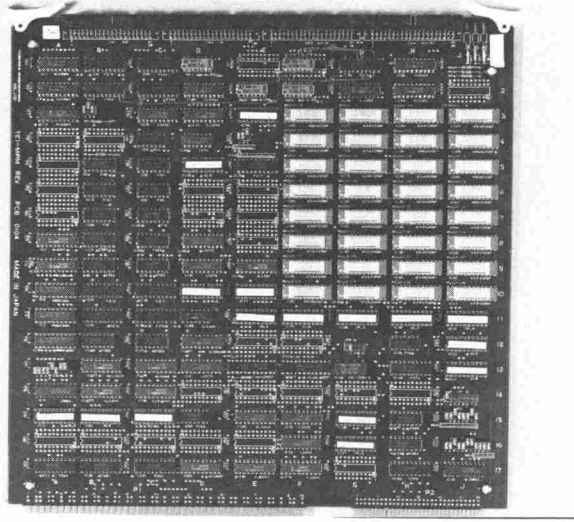


(a)

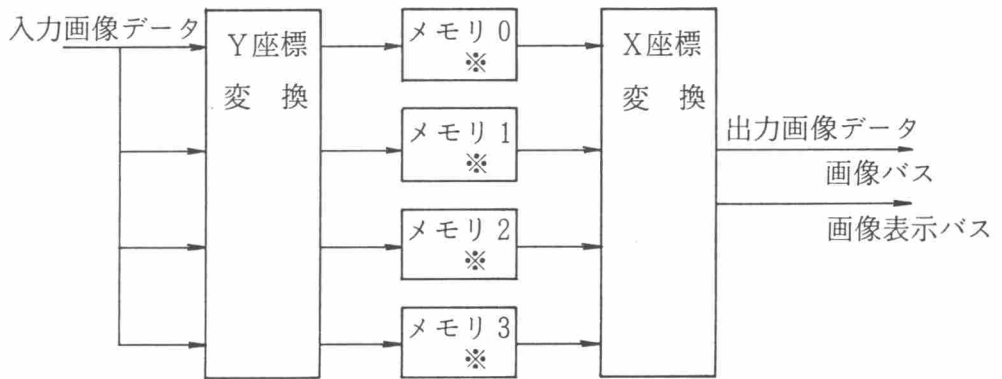


(b)

図6.9 3次元距離情報抽出プロセッサ・システムの画像入力系



(a)



※ 512×512×8 ビット

(b)

図6. 10 マッピング・メモリ (a) 基板の外観 (b) 内部機能のブロック線図

6.3 検査システム事例とその評価

6.3.1 医療用テープ検査システム

医療用テープは、衛生面で特に注意が払われて製造されており、テープを包装する前に1個毎の全面外観検査が必要である。医療用テープ外観検査システムでは、コンベアで搬送されてくるテープをとらえ、機械的に1回転させる間に6つのテープ外周面画像をストロボ発光を用いて入力する。また、同時にテープの2つの巻面画像も入力して全面の外観検査を行なうものである。検査終了後、不良と判定したものを排出し、良品と判定したものは次工程に送る。このシステムにおいては、テープ外周面の画像を入力する場合、連続画像入力・処理をする必要がある。

検査システムの仕様を以下に示す。

(1) 検査範囲：

巻面（表、裏）と外周面（全周）の全面

(2) 検出欠陥： 異物，汚れ，口取り部不良

(3) 検査精度（保証値）：

欠陥部の最大長が360 [μm]

(4) 判定基準：

欠陥部の長さ（最大長），面積，濃度コントラストを算出しそれらをパラメータとして種々の基準設定ができるようにしている。

(5) 検査速度： 150個/分

検査精度は、あくまで欠陥検出精度の保証値であり危険率を考慮した値である。現実にはこの1/3の精度で検出しており、生産ラインの連続運転時では目視検査以上の成績を得ている。

図6.11に、医療用テープ検査システムの外観を示す。

6.3.2 ビン検査システム

ビン検査システムは、空ビンを洗浄した後、ビンの天口、底および胴の全面を検査するシステムである。開発した検査システムでは、天口と底検査用にHSIPを

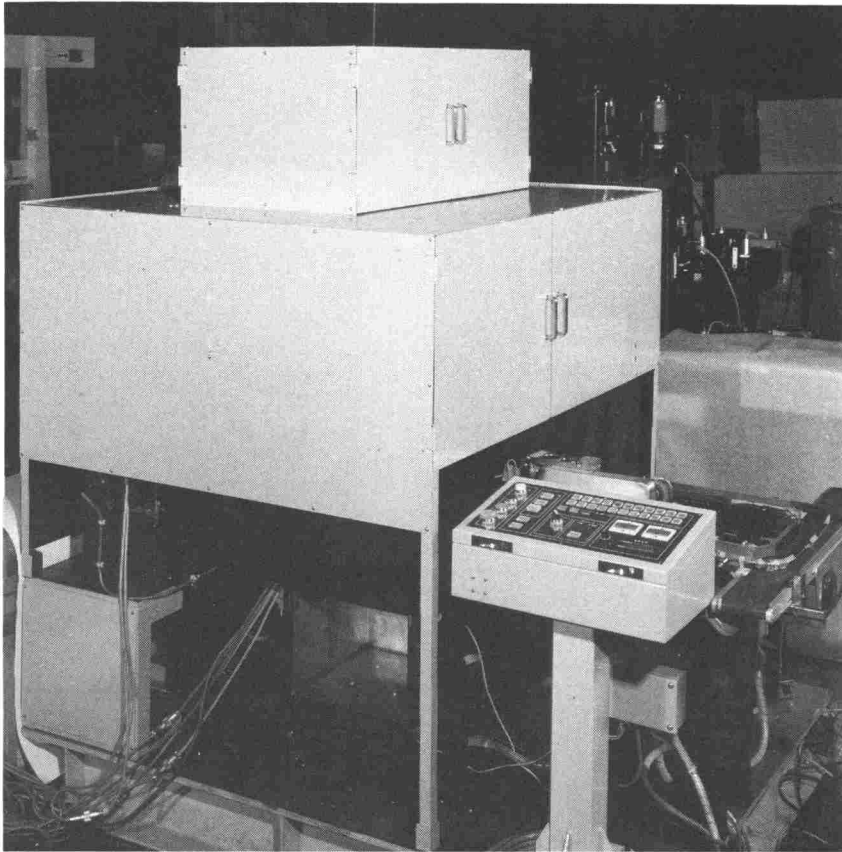


図6. 11 医療用テープ検査システムの外観

1台使用し、胴上部・下部検査用には各々装置HSIPを2台使用している。
以下に検査仕様を示す。

(1)適用ピン：550ccピン

(2)検出欠陥：

異物，欠け，ビリ，キズ，割れ，こすれ，泡

(3)検査精度（保証値）

天口部：0.5 mm平方，

底部：（中央部）0.5 mm平方，

（ナーリング上）1.0 mm平方

胴部：1.0 mm平方

(4)検査速度：450 [本/分]

このシステムでは、ピン胴部に対して6方向から画像入力し、装置HSIP 1台当たり22.5 [フレーム/秒]で処理しており、ビデオレートの連続画像処理という高速性が活かされている。

6.3.3 鋼の品質等級判定システム

鋼の品質等級判定システムでは、計算機制御の溶鉱炉から送られ研磨された鋼の表面を顕微鏡で視ることにより、非金属介在物の検査を行って、鋼の品質を判定する。図6.12に鋼の検査対象パターンの概念図を示す。この中のパターンを先ず的確に抽出しなければならない。各系の特徴は、以下のようである。

- (1) A系：それ程暗くなく、加工（研磨）方向に長い。
- (2) B系：細切れパターンで暗く、加工方向に配置。
- (3) C系：暗く、加工方向に長い。
- (4) D系：暗く、分散している。
- (5) TiB系：中心部が明るく、細切れパターンが加工方向に配置。
- (6) TiD系：中心部が明るく、分散している。

((5), (6)のTi系は、その画像の濃度断面図が図6.12の下の枠内のようにになっている。)

以上の系を確実に抽出し、更に側長、密度計算、個数カウント等を行い、ASTM法に基づく等級判定を行う。

以下に検査システムの仕様を示す。

検査範囲：20×8 [mm²/試料]

検査項目：ASTM法に基づく品質等級判定

A系, B系, C系, D系, TiB系, TiD系

検査時間：8 [分/試料] (300画像)

図6.13に鋼表面の顕微鏡画像を示す。また、開発装置HSIPで実現された鋼の品質等級判定システムの外観を図6.14に示す。

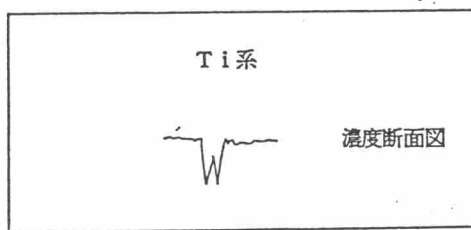
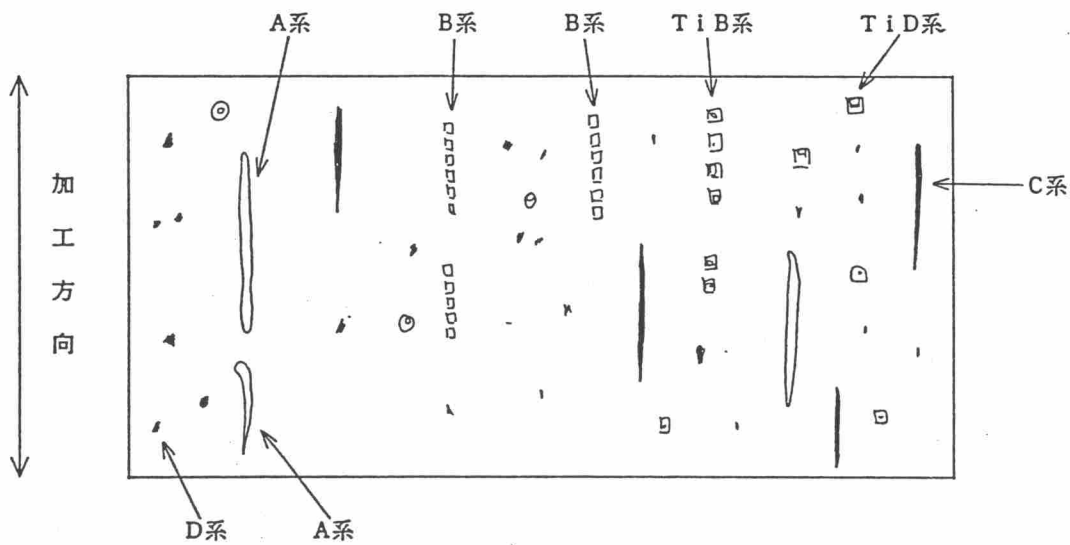


図6.12 鋼の検査対象パターン

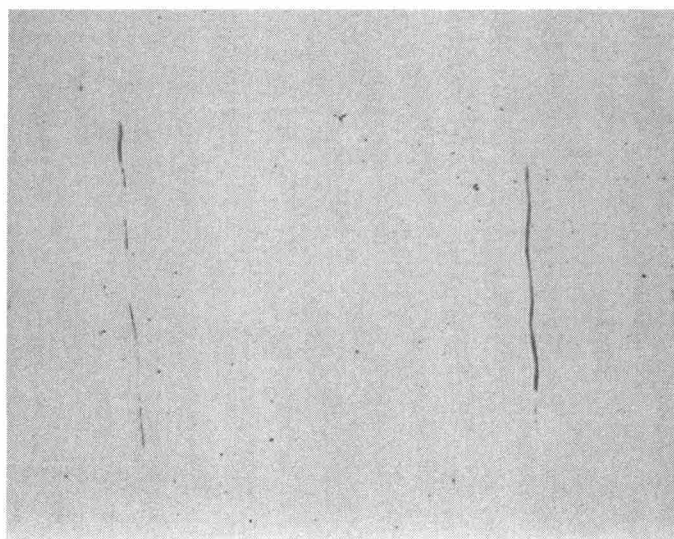
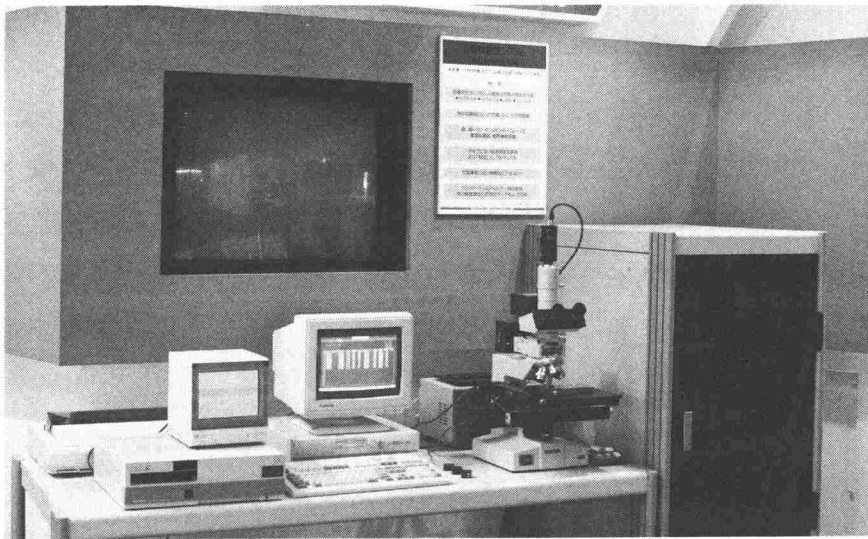
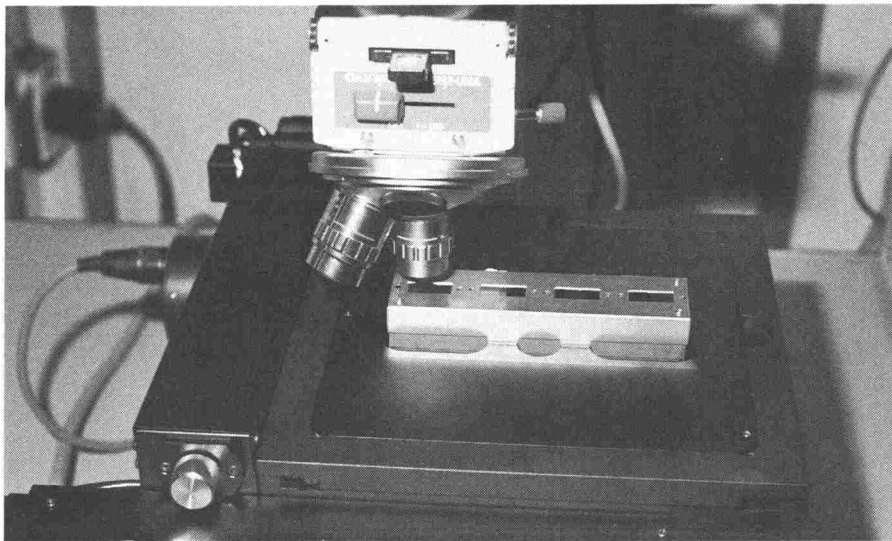


図6.13 鋼表面の顕微鏡画像例



(a)



(b)

図6.14 鋼の品質等級判定システム（非金属介在物検査）の外観

6.4 結 言

開発装置HSIPを用いた応用事例を述べた。ここで述べた3次元距離情報抽出システムや、検査システムでは、特に速度の面で従来の汎用画像処理装置に優っているように考えられる。また、この他にも自動車のクランク・シャフト検査、印刷物のパターン検査システム、PTP錠剤外観検査システム、農作物選別システムなど数多くの実績があり、現在実稼動している検査システムは100以上、約40種に上る。これらの中には、鋼の品質等級判定システムのような、通常のキズ等の欠陥検出システムと比較するとかなり複雑な要求仕様的高速検査システムも含まれる。表6.1にこれらの実現された検査システム例が示されている。

表6.1 実現された検査システム例

項 目	検 査 シ ス テ ム	
計測	アスバラ選別 ネギ選別	ブラウン管SE面検査 パイプ検査
パターン検査	印刷画面検査 文字車検査 セラミック部品検査 バイト検査 コップ検査 GaAsパターン検査	缶底IJP文字検査 アンプル枝先検査 注射針刃先検査 カソード検査(ディスク部) ブラウン管SE面検査 ピン検査(天口部, 底部)
異物・キズ検査	ピン検査(胴部) 錠剤検査 テープ検査 ウィスキーふた検査 燃料画像検査 カムシャフト検査 ナット検査 バイト検査	金属表面検査 アンプル枝先検査 レンズ検査 フィルム検査 巻きたばこ検査 セラミック部品検査 バップ剤検査
粒子解析	鋼の品質等級判定(非金属介在物検査)	
文字認識	燃料バンドル文字認識	
その他	セロテープ検査 カソード検査	ダンボール接着剤検査

これらの多種多様な検査システムを実現した事実により，高速性と処理の柔軟性，またはシステム構築の容易性を狙った本装置の有効性が立証されている，と考える。

第7章 結 論

本研究では、主に生産工場での自動視覚検査分野においてシステム構築の容易性・柔軟性及び処理の高速性を狙った画像処理装置と、それに付随する画像処理アルゴリズムの開発を行った。

自動視覚検査では実システム化において経済性、高速性、検査の高精度・高信頼性、保守の容易性など製造ライン特有の要求や制約条件があるため、その条件に合致したシステム指向の画像処理機構と機能が必要となる。そのため、どちらかと言えば研究開発用途として作製された汎用的画像処理装置では、実システム化に容易に対処できない場合が多い。本研究は、視覚検査における生産工場側の要求と、設計システムの早期実稼動化を必要とするシステム製作現場での要求に沿うことを目的としたものであり、本論文ではこれを全7章にまとめた。

すなわち、第1章の緒論で、本研究の背景及び意義や目的について概説し、第2章では、視覚検査の自動化における画像処理への要請事項を述べた。実用的自動検査システムにおいては、幾つかの画像処理機能を併用しその結果を総体的に処理するきめの細かな複合的画像処理が必要であること、また高速な連続画像処理のためにハードウェアによるパイプライン処理の必要性を述べた。

第3章では、ラスト走査型パイプライン処理方式に基づく連結領域抽出のための領域ラベリング・アルゴリズムについて述べ、アルゴリズムの正当性を証明し、そのハードウェア・アーキテクチャと実現例としてのプロセッサを示した。このアルゴリズムでは、ラベルの付与と同時に1つ前の行のラベル書き直しを常に行い、更に1次元配列形式のテーブルに書かれているラベル間連結情報の統合処理を各行毎に行う。現在ハードウェア化しているプロセッサはシンプルであり、ラベル数が256までであるがビデオ・レートで連続画像の領域ラベリング処理が可能となった。

第4章では、視覚検査の要求事項の一つである文字認識の手法を述べた。切れ、欠け、位置ずれなどの局所変動を有する文字パターンの認識手法として、距離変

換に基づくベクトル場整合法を述べ、パターンの位置ずれや回転の変動の影響を分析した。また、変動のある文字パターンとして用いた電総研作成の旧常用手書き文字データ・ベース（片仮名・平仮名、各50字種）における認識実験では、1字種当たり50人分の文字サンプルに対して、片仮名97.0[%]、平仮名94.2[%]の結果を得た。これは、同じデータを用いた通常の重ね合せ法による認識結果と比べて約16～17[%]程認識率の高いものとなっている。このことから、視覚検査におけるベクトル場整合法の効果が期待できる。更に、一層大きな変動を有するパターンに対してはベクトル場を利用した伸縮変換整合法を示し、その変動吸収能力を明らかにした。

第5章では、開発したシステム構築指向の装置HSIPのパイプライン処理を基本とするアーキテクチャと、ビデオ信号同期制御方式を示し、装置の画像処理機能やソフトウェアによるシステム制御法を述べた。このアーキテクチャにより装置HSIPでは、画像処理のハードウェア・モジュールを積み木のように積み上げて要求仕様に合わせたシステム構築ができる。また、このアーキテクチャの支柱とも言えるビデオ信号同期制御方式の特長として、次の3点が挙げられる。

(1) TVカメラへの外部同期信号を生成し、そのフレーム信号（垂直同期信号）を装置全体の指揮信号として制御を行うこと。このため画像入力部のフレーム・メモリから後段のハードウェア・モジュールへの画像の伝送と各モジュールへの必要なパラメータ設定はフレーム信号（垂直同期信号）に同期して一斉に行う。

(2) 各モジュールには処理モード指定のためのLUTがあり、そのLUT内のパラメータは、カメラ（または画像）識別番号と処理モードの2つの自由度を持つこと。すなわち、どのカメラ番号のとき如何なる処理モードにするかが決められる。

(3) 画像バスには画像データの信号と、それより少し早目にタイミング用のフレームデータ有効信号やカメラ識別番号の信号が伝送され、各モジュールの処理遅延に応じてこれら3つの信号も遅延する。そして各モジュールでは、画像データ到来を示すフレームデータ有効信号に同期して、LUTの設定パラメータとカメラ識別番号による処理モードが自動的に選定され、次に画像データが処理され

ること。

これにより、自動視覚検査システムにおける連続画像入力・処理において各ハードウェア・モジュールの処理遅延がシステム制御上殆ど問題とならなくなり、各モジュールにおける入力画像毎の動的処理モード変更なども容易にできるようになった。

第6章では、開発装置HSIPの応用事例として、自動点検ロボットにおける3次元距離情報（奥行き）抽出のプロセッサ・システムや、テープ検査、ピン検査、及び鋼の品質等級判定システムなどの検査システムを上げ、そのシステム仕様と性能について述べた。現在本装置により稼動している実検査システムは100以上、約40種類に上り、視覚検査分野における本装置の高い有効性を表していると考えられる。

残る問題としては、現在ハードウェア化しているラベリング・プロセッサはラベル数が256までのものであり、ラベル数の拡大が必要なことである。512x512 [画素] の画面の場合出現可能なラベル数は最大 2^{16} 個であるが、1行当たり出現するラベル数は高々256個だから、合流するラベル数も256個以内となる。従って各行毎の統合処理の代わりに、各行毎の出現ラベルの部分統合処理を行っても原理的にラベル間連結情報は保存される。現在、ビデオ信号の水平帰線期間を使って各行毎の統合処理をしているので、部分統合処理の方法を採用しても時間的には十分間に合う。このラベル数拡大は現在開発予定としている。また、HDTVなどの大画面への発展も今後の開発課題である。

なお装置HSIPでは、局所並列処理による積和演算や相関演算の機能など、通常の濃淡画像の処理機能はほぼ装備されており、ソフトウェア処理の併用も加味すれば第2章で述べた要求検査機能はかなりカバーできると考えるが、第4章で述べたベクトル場整合法などは未だ実装化されていない。しかしながら距離変換やベクトル場の作成はパイプライン処理に比較的適しており、ハードウェア化は容易と考えられる。また、ベクトル場間の類似度計算も、同位置の1点对1点のベクトルの内積計算が基本であり、その内積もLUTを用いた画素間の演算で簡単に実現できるため、このハードウェア開発は機会次第となっている。

装置HSIPのシステム全体としての課題は、操作性向上と自動視覚検査システム製作の生産性向上である。このために、

(1) 高レベルのソフトウェア・インターフェイスによる画像処理装置内のLUTデータ自動生成機能、及び

(2) 現地調整における各種パラメータ設定のための学習機能の付加、
が挙げられる。これらは、生産工場におけるユーザも装置を容易に使用できて有効利用ができるようになるために、取り組むべき重要問題であると考えられる。

謝 辞

本研究にあたり，終始懇切なる御指導と御鞭撻を賜った大阪大学手塚慶一教授，真田英彦教授，同志社大学渡辺陽一郎教授に心から感謝する．

本研究に関し，御審査，御教示頂いた大阪大学工学部通信工学教室の森永規彦教授，倉蘭貞夫教授，長谷川晃教授，産業科学研究所の北橋忠宏教授に深く感謝する．

本研究を進めるにあたり，有益な御助言，御支援を頂いた香川大学山崎敏範教授，岡山理科大学塩野充教授，大阪大学馬場口登講師に深く感謝する．また，筆者が大阪大学工学部通信工学科研究生の時以来，手塚研究室の皆様には種々の面で御世話になった，厚く御礼申し上げます．

本研究における画像処理装置の開発に関し，東芝エンジニアリング株式会社の中田誠氏を始め画像処理グループの皆様には有益な御討論を頂き，また開発の労苦を共に分かち合った．ここに記して深く感謝の意を表する．

参 考 文 献

- [1] 検査の自動化専門委員会編： 外観検査の自動化，電気学会（昭61）。
- [2] 丸谷 洋二：目視検査の自動化技術，日刊工業新聞社（昭62）。
- [3] 江尻 正員：工業用画像処理，昭晃堂（昭63）。
- [4] 「FA化のための視覚・画像処理技術」，オートメーション11, vol.31, No. 12 (1986)。
- [5] 丸谷，若林，川本：画像処理装置とその使い方，日刊工業新聞社（1989）。
- [6] 中田，黒沢，服部，日高：「視覚検査用画像処理装置の開発，(1)----装置概要----」 情報処理学会第32回（昭和61年前期）全国大会，4N-6（1986）。
- [7] 黒沢，中田，服部，日高：「視覚検査用画像処理装置の開発，(2)----パターン検査装置----」 情報処理学会第32回（昭和61年前期）全国大会，4N-7（1986）。
- [8] 服部，中田，黒沢，日高：「視覚検査用画像処理装置の開発，(3)----欠陥パターンの有無とその形状判定----」 情報処理学会第32回（昭和61年前期）全国大会，4N-8（1986）。
- [9] 服部，中田：「設備部品検査への画像処理技術の応用」，（昭和61年）電気設備学会研究発表会，C-10（1986）。
- [10] T.Hattori and Y.Hidaka："An Automatic Visual Inspection Method of Pattern Using A Circular Feature Extraction Filter", Proc. IEEE-IECEJ-ASJ International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, PP.1453-1456 (April, 1986)。
- [11] 服部，日高：「円形状の局所的特徴抽出フィルタによるパターン検査法」，第16回画像工学コンファレンス，9-9, PP.189-192（1985）。
- [12] 服部，中田：「自動外観検査用画像処理アルゴリズムとその装置化」，第17回画像工学コンファレンス，3-9, PP. 71-74（1986）。
- [13] 服部，野々村：「ビデオレートで連続画像処理可能な高速ラベリング・プロ

- セサ」, 第18回画像工学コンファレンス, 15-7, PP.295-298 (1987).
- [14] 服部, 中田, 久保: 「単眼移動視による3次元情報処理用リアルタイム・プロセッサ」, 第19回画像工学コンファレンス, 5-10, PP.157-160 (1988).
- [15] 松山, 村山, 伊藤: 「画像解析における戦略の表現」, 情報処理学会論文誌, vol.29, No.2, PP.169-177 (1988).
- [16] 金出, 栗田, 坂井, 高梨, 山口: 光と画像の基礎工学, 電気学会 (1987).
- [17] A.Rosenfeld and A.C.Kak, 長尾 監訳: デジタル画像処理, 近代科学社 (1978).
- [18] D.H.Ballard and C.M.Brown: Computer Vision, Prentice-Hall (1982).
- [19] 鳥脇 純一郎: 画像理解のためのデジタル画像処理 (II), 昭晃堂 (昭63).
- [20] 原, 中川: 「局所的特徴の抽出と比較による回路パターン欠陥検出法」, 信学論 (D), J66-D, 8, PP.970-976 (1983-08).
- [21] 山田, 斉藤, 森: 「類似度法の一改良--ずらし類似度--」, 信学論 (D), J64-D, 10, PP.970-976 (1981-10).
- [22] 斉藤, 山田, 山本, 森: 「手書き漢字の方向パターン・マッチング法による解析」, 信学論 (D), J65-D, 5, PP.550-557 (1982-05).
- [23] 服部, 渡辺, 真田, 手塚: 「チェス盤距離分布にもとづくベクトル場整合法を用いた手書き文字認識」, 信学論 (D), J64-D, 12, PP.1097-1104 (1981-12).
- [24] 服部, 渡辺, 真田, 手塚: 「ベクトル場を用いた伸縮変換による手書き文字の局所の変動の吸収」, 信学論 (D), J66-D, 6, PP. 645-652 (1983-06).
- [25] J.Serra: Image Analysis and Mathematical Morphology, Academic Press (1982).
- [26] T.Hattori: "A High-Speed Pipeline Processor for Regional Labelling Based on a New Algorithm", Proceedings of 10th IAPR (国際パターン認識学会) International Conference on Pattern Recognition, IEEE Computer Society Press, pp.494-496 (1990-06).
- [27] T.Hattori, M.Nakada, and K.Kubo: "Real-Time Processor for 3-D Infor-

- mation Extraction from Image Sequences by a Moving Area Sensor", SPIE (光工学会) vol.1349, Applications of Digital Image Processing X III, pp.301-312 (1990-07).
- [28] T.Hattori, M.Nakada, and K.Kubo: "A Real Time Image Processor for the Extraction of 3-D Distance Information from Image Sequence", 情報処理学会, 情報処理学会30周年記念国際会議論文集, pp.211-218 (1990-10).
- [29] T.Hattori and M.Nakada: "A Practical High-Speed Image Processor for Automated Visual Inspection system", Proceedings of 16th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society, pp.570-575 (1990-11).
- [30] T.Hattori, T.Yamasaki, Y.Watanabe, H.Sanada, and Y.Tezuka: "Distance Based Vector Field Method for Feature Extraction of Characters and Figures", Proceedings of 1991 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, pp.207-212 (1991-10).
- [31] T.Hattori: "New Regional Labeling Algorithm of Pipeline Image Processor and Proof of the Correctness", Proceedings of 1991 IEEE International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation, pp.2005-2010 (1991-10).
- [32] 服部: "高速パイプライン・ラベリング・プロセサ (I)", 香川大学教育学部研究報告, vol.39-2, pp.149-154 (1989-11).
- [33] 服部: "高速パイプライン・ラベリング・プロセサ (II)", 香川大学教育学部研究報告, vol.39-3, pp.71-80 (1990-06).
- [34] 井口, 佐藤: 三次元画像計測, 昭晃堂(1990).
- [35] 前田 明: "画像処理マシン", 情報処理学会誌, Vol.28, No.1, pp.19-26 (Jan., 1987).
- [36] 中田 誠: "FA用画像処理技術の最新動向", MECHATRONICS, pp.14-16 (1990-12).
- [37] 久保, 阿部, 伊藤: "自律ロボットのファジー制御", 東芝レビュー, 43-4, pp.10-14 (1988).

- [38] R.C.Bolles, et al. : 'Epipolar-Plane Image Analysis:An Approach to Determining Structure from Motion' , International Journal of Computer Vision,1,1,pp.7-55 (1987).
- [39] 山本 正信 : ” 直交移動連続ステレオ画像からの3次元情報の抽出” , 昭和61年度電子通信学会全国大会, 講演番号S15-8 (Mar.,1986).
- [40] 木戸出, 坂上 : ” パイプライン方式と完全並列型が増えた最近の画像処理装置” , 日経エレクトロニクス, 295, pp.179-212 (1982-07).
- [41] 木戸出, 田端, 相原 : ” 小型高速画像処理システムT O S P I X” , 東芝レビュー, 37-12, pp.1047-1050 (1982).
- [42] 直井, 古明地, 太田, 尾崎, 佐々木, 後藤, 吉田 : ” 構造可変型ビデオレートカラー画像処理システム「葦駄天」” , 信学論 (D - II) , J73-D-II, No.10, pp.1751-1760 (1990-10).
- [43] 長谷部, 加藤, 伊藤, 菊池 : ” マルチプロセッサ型ビデオ画像処理システムS I P S” , 情報処理学会コンピュータビジョン研究会資料, CV39-5 (1985).
- [44] 中田和男編 : ” パターン認識とその応用” , p.100, コロナ社 (昭53).
- [45] 安田, 藤沢 : ” 文字認識のための相関法の一改良” , 信学論 (D) , J62-D,3, pp.217-224 (昭54-03).
- [46] 塩野, 馬場口, 真田, 手塚 : ” 方向性マッチングによる常用手書き文字の認識” , 信学論 (D) , J63-D,5, pp.402-409 (昭55-05).