The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	画像処理技術の産業応用に関する研究
Author(s)	目瀬, 道弘
Citation	大阪大学, 1995, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.11501/3100716
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

画像処理技術の産業応用に関する研究

平成７年１月

目　瀬　道　弘

要約

本論文は、画像処理の産業応用の研究に関してまとめたものである。プリント基板検査のための傷抽出、ＬＳＩ組立てのため位置測定、ＡＴＭ(Automatic Teller Machine, 現金自動取扱装置)のための紙幣識別、の三つを具体的な適用例として、画像処理技術をＦＡ、ＯＡという代表的な産業分野に応用するために行ったものである。

第２章から第５章で画像処理技術のＦＡ分野での応用として、プリント基板検査のための傷抽出およびＬＳＩ組立てのための位置測定について述べ、第６章ではＯＡ分野での応用について述べる。各章ごとの梗概は以下の通りである。

第２章では、プリント基板のような、複雑なパターンを持つ対象の目視検査で、従来見落とされ勝ちだった微小傷の抽出アルゴリズムを述べる。いくつか開発したアルゴリズムは、パターンの“粗さ”を利用するものである。各アルゴリズムの傷抽出原理と論理式を導いたあと、計算機シミュレーションによる傷抽出機能の確認を行った。アルゴリズムは標準パターンが不要のため、パターン同士の正確な位置あわせや膨大なメモリも不要で、処理速度も極めて速くできる、などの装置化に適した特徴を持っていることを結論とする。

第３章では、第２章の結論に基づき傷抽出処理を実時間で実現する装置化方式について述べる。まず傷抽出のための基盤技術である浮動２値化技術、２次元局部画像読み出し技術を述べる。浮動２値化技術では微小傷を抽出するための分解能について考察する。２次元局部画像読み出し技術では、ＴＶから得られる２値化信号から、実時間で局部並列画像を取得するための方法を述べる。次いで、これらに基づき、第２章で述べた各アルゴリズムを、２次元局部並列論理で実現するための回路方式について考察する。最後に第２章で開発した傷抽出アルゴリズムの一部を装置化し、プリント基板傷検査工程でフィールドテストを行い、傷抽出性能の評価を行なった結果について述べる。なお第２章で開発したアルゴリズムも含めたいくつかの傷抽出アルゴリズムを回路化した場合の、傷抽出のために利用する対象の情報量、回路規模、処理速度の３項目に関する性能評価を行う。

第４章では、ＬＳＩ組立て自動化でネックになっていた、位置測定ステーションを自動化するための画像入力技術について考察する。ＬＳＩはペレットサイズが大きく、回転ず

れを起こしやすい。そのため、位置を精度良く測定するには最低でもで２視野(２ＴＶカメラ)必要であることを導く。最後に２視野を前提として、視野の大きさ、２視野実現のためのＴＶカメラや光学系の構成方法、照明方式など、画像入力のために必要な技術についての考察を行う。

第５章では、まず、第４章で述べた画像入力装置で得られる画像に基づく、２値化、位置認識アルゴリズムについて述べる。２値化アルゴリズムでは、フィールドにおける環境や対象の様々な変動要因に対しても、安定な２値化方式を考察する。認識アルゴリズムでは、認識対象であるボンディンパッドに必ず存在する、検査針によるパターンの部分的欠損の影響を受けにくく、かつ高い認識精度を得るための方式を考察する。つぎに、２値化アルゴリズムのうちの一つと認識アルゴリズムを、高速に処理する位置認識装置を開発し、認識時間の考察を行う。最後に位置認識装置と第４章の画像入力装置とを組合せ、位置測定ステーションでのフィールドテストを行い、認識率、認識精度の点からの評価結果について述べる。

第６章では、銀行のＡＴＭなど紙幣識別装置に必要とされる紙幣の種類識別アルゴリズムを考察する。紙幣識別装置により読み取られる紙幣は、複数種類が混在し、向きや新旧もまちまちである。また紙質が柔らかいため、左右の位置ずれ、回転ずれなどを伴い、パターンは大きく変動する。そこで紙幣識別アルゴリズムとしては、このような変動要因の影響を受けにくく、マイクロプロセッサで高速処理できるものを考察する。とくに向きに関しては、“等価性”という識別アルゴリズム全体の基盤となる新しい概念を導入する。

以上の通り、本研究は、プリント基板検査のための傷抽出、ＬＳＩ組立てのための位置測定、ＡＴＭにおける紙幣識別という具体的例に対して画像処理技術を応用し、ＦＡ分野、ＯＡ分野の自動化、省力化を大きく前進させた。その結果、物体の持つ質的性状、幾何学的性状、付加的性状の三つの性状の認識に関する基盤技術を確立した。

目次

ページ

1．　序論 …… 1
　1．1　本研究の目的 …… 1
　1．2　本研究の必要性 …… 2
　　1．2．1　ＦＡにおける必要性 …… 2
　　1．2．2　ＯＡにおける必要性 …… 3
　1．3　本研究の位置付け …… 3
　　1．3．1　物体の性状から見た位置付け …… 4
　　1．3．2　画像処理技術の潮流から見た位置付け …… 4
　1．4　本研究の進め方と開発環境 …… 7
　1．5　本論文の構成 …… 8
　参考文献 …… 9

2．　複雑パターンの傷抽出アルゴリズム …… 12
　2．1　緒言 …… 12
　2．2　傷抽出の基本的な考え方 …… 14
　2．3　微小部抽出アルゴリズム …… 18
　　2．3．1　拡大縮小法 …… 19
　　2．3．2　周囲平均法 …… 22
　　2．3．3　間隔判定法 …… 25
　2．4　傷抽出アルゴリズム …… 27
　　2．4．1　境界修正法 …… 28
　　2．4．2　傷復活法 …… 31
　　2．4．3　周囲判定法 …… 33
　2．5　計算機シミュレーション …… 35
　2．6　適用範囲拡大への一考察 …… 40
　2．7　結言 …… 42
　参考文献 …… 43

3．　複雑パターンの傷抽出装置方式 …… 45
　3．1　緒言 …… 45
　3．2　傷認識装置の概要 …… 46
　3．3　各回路の動作原理 …… 48
　　3．3．1　画像２値化 …… 48
　　3．3．2　２次元局部画像読出し …… 50
　　3．3．3　評価指標の提案 …… 52
　　3．3．4　微小部抽出 …… 52
　　3．3．5　傷抽出 …… 60
　3．4　傷抽出アルゴリズムの回路的評価 …… 62
　3．5　傷検査工程におけるフィールドテスト …… 66
　　3．5．1　プリント基板自動検査システム …… 66
　　3．5．2　検査時間の短縮 …… 67
　　3．5．3　フィールドテスト …… 72
　3．6　結言 …… 74

ページ
参考文献 …… 76
4. ＬＳＩ位置測定自動化のための画像入力技術 …… 78
4．1 緒言 …… 78
4．2 ＬＳＩワイヤボンディング …… 80
4．3 自動化の目標指標 …… 86
4．4 位置認識のための画像入力 …… 88
4．4．1 視野の検討 …… 88
4．4．2 ２視野方式 …… 93
4．4．3 照明方式 …… 96
4．4．4 ＬＳＩ位置認識のための画像入力装置 …… 99
4．5 結言 …… 100
参考文献 …… 101

5. ＬＳＩ組立て自動化のための自動位置認識システム …… 104
5．1 緒言 …… 104
5．2 開発アルゴリズムの目標と課題 …… 105
5．3 アルゴリズムの開発方針 …… 108
5．4 ２値化アルゴリズムの開発 …… 108
5．4．1 閾値の標準形式 …… 108
5．4．2 頻度分布法 …… 109
5．4．3 白黒平衡法 …… 112
5．4．4 白黒検出法 …… 116
5．4．5 アルゴリズムの評価 …… 119
5．5 認識アルゴリズムの開発 …… 123
5．5．1 ノイズ除去 …… 125
5．5．2 星座認識 …… 127
5．5．3 方向チェック …… 129
5．5．4 ミクロ認識 …… 130
5．6 位置認識システム …… 131
5．7 認識のフィールドテスト …… 136
5．8 結言 …… 137
参考文献 …… 138

6. 高信頼度紙幣識別のための向き不変型識別アルゴリズム …… 140
6．1 緒言 …… 140
6．2 入力パターンのばらつきと等価性 …… 141
6．2．1 パターンの入力法 …… 142
6．2．2 入力パターンの定式化 …… 144
6．2．3 入力パターンの等価性 …… 145
6．3 特徴量の等価性とばらつき …… 147
6．3．1 アダマール変換 …… 149
6．3．2 識別特徴量の決定と特徴量の等価性 …… 151
6．3．3 サンプリング間隔の決定 …… 152
6．3．4 識別特徴量のばらつき …… 154
6．4 識別アルゴリズムと性能推定 …… 155

ページ

６．４．１　判定領域 …… １５５
６．４．２　相互対判定法 …… １５８
６．４．３　実験結果 …… １６０
６．４．４　識別性能の推定 …… １６０
６．４．５　識別性能向上のための考察 …… １６３
６．５　結言 …… １６４
参考文献 …… １６５

７．　結論 …… １６７
７．１　複雑パターンの傷抽出技術の研究 …… １６７
７．１．１　アルゴリズム開発 …… １６７
７．１．２　装置化方式 …… １６７
７．１．３　フィールドテスト …… １６８
７．１．４　まとめ …… １６８
７．２　ＬＳＩの位置認識技術の研究 …… １６９
７．２．１　目視測定の現状と画像入力技術 …… １６９
７．２．２　アルゴリズム開発 …… １７０
７．２．３　装置化・システム化 …… １７１
７．２．４　フィールドテスト …… １７１
７．２．５　まとめ …… １７１
７．３　高信頼度紙幣識別技術の研究 …… １７２
７．３．１　要求目標 …… １７２
７．３．２　紙幣識別アルゴリズム …… １７２
７．３．３　まとめ …… １７３
７．４　結言 …… １７３

謝辞 …… １７５

筆者業績 …… １７６

図表目次

第２章関係　　ページ

図２．１　傷を含むプリント基板 …… １５
図２．２　プリント基板の正常部と傷 …… １５
図２．３　傷抽出アルゴリズム相互間の機能的関係 …… １５
図２．４　２次元局部画像処理 …… １７
図２．５　拡大縮小法の原理 …… ２０
図２．６　周囲平均法の原理 …… ２３
図２．７　間隔判定法の原理 …… ２６
図２．８　境界修正法の原理 …… ２９
図２．９　傷復活法の原理 …… ３２
図２．１０　周囲判定法の原理 …… ３４
図２．１１　プリント基板に対する拡大縮小法のシミュレーション結果 …… ３６
図２．１２　プリント基板に対する周囲平均法のシミュレーション結果 …… ３７
図２．１３　プリント基板に対する傷抽出のシミュレーション結果 …… ３９
図２．１４　水平、垂直方向の直線のみからなるパターンの傷抽出 …… ４１

第３章関係

図３．１　傷抽出処理装置の構成 …… ４７
図３．２　浮動２値化の原理 …… ４９
図３．３　浮動２値化の回路例 …… ４９
図３．４　ＴＶカメラからの画像信号の分解能 …… ５０
図３．５　２次元局部画像読出し回路 …… ５０
図３．６　傷抽出回路指標の提案 …… ５３
図３．７　拡大縮小法による微小部抽出回路 …… ５５
図３．８　拡大縮小法と等価な回路 …… ５６
図３．９　周囲平均法による微小部抽出回路 …… ５６
図３．１０　間隔判定法による微小部抽出回路 …… ５９
図３．１１　境界抽出・境界修正回路 …… ６１
図３．１２　周囲判定法による微小部抽出回路 …… ６３
表３．１　各回路単体の評価結果 …… ６４
表３．２　各傷抽出回路の評価結果 …… ６４
図３．１３　プリント基板の自動傷検査システム …… ６８
図３．１４　傷抽出過程 …… ６８
図３．１５　プリント基板の傷に対する傷抽出画素数 …… ６９
図３．１６　プリント基板に対する視野の走査方式 …… ７１

ページ

表３．３　プリント基板の検査時間比較 …… ７１
表３．４　検出した実害傷の内訳 …… ７３
図３．１７　傷抽出装置が検出した実害傷のサンプル …… ７３

第４章関係

図４．１　ＬＳＩの製造工程と組立て工程 …… ８１
図４．２　ＬＳＩの組立て構造 …… ８１
図４．３　ＬＳＩペレットの外観 …… ８２
図４．４　ＬＳＩの位置測定・ワイヤボンディングシステム …… ８２
図４．５　リードフレームの外観 …… ８４
図４．６　ワイヤボンディング工程 …… ８４
図４．７　ＬＳＩ周辺部とボンディングパッド関係の状況 …… ８５
図４．８　ＬＳＩペレット付けのずれ測定 …… ８５
図４．９　１視野・２視野入力系 …… ９０
図４．１０　ＬＳＩペレットのずれ要因 …… ９０
図４．１１　２視野入力の構成例(案) …… ９４
図４．１２　照明法の比較 …… ９８
図４．１３　ＬＳＩ位置認識のための画像入力系 …… ９８

第５章関係

図５．１　ＬＳＩペレット画像の２値化 …… １０６
図５．２　種々の要因による信号レベルの変動 …… １０６
図５．３　頻度分布法による２値化 …… １１０
図５．４　２値信号モデルに対する閾値と閾値修正量の関係 …… １１４
図５．５　４値信号モデルに対する閾値と閾値修正量の関係 …… １１４
図５．６　白黒平衡法による閾値修正曲線 …… １１４
図５．７　白黒検出法の原理 …… １１８
図５．８　変動要因に対する認識可能な閾値範囲 …… １１８
図５．１０　白黒平衡法による閾値の追従性 …… １２１
図５．１０　白黒検出法による閾値の追従性 …… １２２
図５．１１　２値化アルゴリズムの評価結果 …… １２４
図５．１２　白黒平衡法と白黒検出法の最適閾値の追従性 …… １２４
図５．１３　ボンディングパッド形状のバリエーション …… １２６
図５．１４　ノイズ除去の原理 …… １２６
図５．１５　星座認識の原理 …… １２８
図５．１６　方向チェックの原理 …… １２８
図５．１７　ミクロ認識の原理 …… １２８
図５．１８　ＬＳＩの自動位置認識システム …… １３３

ページ
図５．１９　ＬＳＩの自動位置認識システムの構成 …… １３３
図５．２０　ＬＳＩ位置認識のための処理タイムチャート …… １３５
図５．２１　ＬＳＩ位置認識装置による画像処理の例 …… １３５

第６章関係

図６．１　対象紙幣の搬送状態とセンサ …… １４３
図６．２　金種、試料の違いによる入力パターンのばらつき …… １４３
図６．３　シフト、スキューによる入力パターンのばらつき …… １４６
図６．４　入力パターンの等価性 …… １４８
図６．５　入力パターンのアダマール変換 …… １５０
図６．６　入力パターンに対するアダマール変換値 …… １５０
表６．１　サンプリング間隔による金種間距離 …… １５３
図６．７　２次元空間における特徴量のばらつき …… １５３
図６．８　特徴量の密度分布 …… １５６
図６．９　特徴量の累積密度分布 …… １５６
図６．１０　判定領域の等価性 …… １５６
図６．１１　紙幣識別処理過程 …… １５９
図６．１２　誤識別率の算出方法 …… １６２
図６．１３　アレイセンサの素子数と複合誤識別率の関係 …… １６２

凡例

（１）　題名における章、節、項の番号は、“１．”，“１．１”，“１．１．１”のように**ゴシック体**で示す。文章中での引用に関しては、章の番号は“第１章”のように章名称で、節、項は“１．１”，“１．１．１”のように、**ゴシック体**の番号のみで表記する。

（２）　数式の番号は、定義式に関しては、該当行の用紙右端に“（２．２）”のように示し、本文中での引用は、“式（２．２）”のように表す。

（３）　英字記号は大文字、変数は小文字を用いる。本文中ではいずれもローマン体で、図表中では英字記号はローマン体、変数はイタリック体で表す。

（４）　図表の番号に関しては、図表自体、引用とも“図３．３”，“表４．４”のように表記し、キャプション位置に関しては、図は下側、表は上側にする。

（５）　参考文献を各章末尾に掲載し、引用はその番号を該当箇所に“参考文献[65]”のように右肩に付ける。

（６）　用語に関しては、例えば「“……”と呼ばれる」、「“……”は」のような括弧記号により文章中で適宜定義、解説、強調などを行う。ただし論理的な真，偽を表す“１”，“０”も同一の括弧記号「“　”」を用いる。

（７）　英字略語に関しては、少なくとも本文中最初に登場する略語の後に（　）を付して正式名称を補足する。

１．　序論

１．１　本研究の目的

本研究は視覚による画像処理技術を、ＦＡ(Factory Automation)、ＯＡ(Office Automation)という代表的な産業分野に応用することを目的とする。視覚による情報処理の能力を機械で実現できれば、広い産業分野で有効に活用できることが期待できる。具体的な研究の目的は、ＦＡでもＯＡでも、何れも従来人間が目で行なっていた作業を自動化することである。

ところで、人間の五感から得られる情報のうち、８割以上が視覚から得られると言われる程、視覚は重要なものである。網膜では$10^4 \times 10^4 = 10^8$画素もの膨大な並列情報が瞬時のうちに画像処理される。[1] このような人間の視覚で行っている画像処理を、そのまま適用するのは現状の技術では到底不可能である。本研究では、現状の作業環境や使用環境を大幅に変えることなく、緩やかな制限を対象そのものや環境に加えることにより対象を認識しやすくし、その作業を自動化することによって大きな効果が期待される実用的な画像処理技術を研究・開発する。特に、本研究で対象とする産業分野としては、ＦＡ分野の検査工程、組立て工程、それに今日のＯＡの基盤となった銀行業務における現金預入業務である。検査では、プリント基板のような複雑なパターンを持つ対象の微小傷抽出工程の自動化である。また、組立てでは、ＬＳＩ(Large Scale Integration；大規模集積回路)の位置測定を自動化することを目指す。預金業務では、ＡＴＭ(Automated tellers Machine：現金自動取扱装置)などに内蔵されている紙幣識別装置に関して、極めて信頼性の高い紙幣自動識別の方式を得ることである。このように、適用分野や扱う対象は異なるものの、画像処理という共通の技術を応用することにより、ＦＡ，ＯＡという産業分野における自動化、省力化に対する厳しい要求に応えられるようにすることを、本研究の目的とする。

１．２　本研究の必要性

１．２．１　ＦＡにおける必要性

生産工程には、加工、組立て、検査、梱包、運搬などの工程がある。これまで種々の生産技術やロボットが導入され、かなりの工程の自動化が進められてきた。しかし、生産工程で最後まで自動化が遅れたのは、検査工程と組み立て工程である。これは、検査や組み立てでは、対象の欠陥を調べたり、機械ではどうしても位置合わせできないような作業が残されており、このような部分は人間の目に頼らざるを得なかったためである。しかし人間の目視による作業は、どうしても見落とし、見誤りが発生し、それに緊張を長時間持続しなければならないため、精神的な苦痛を引き起こし、最終的には製品の品質、信頼性、歩留まり低下につながってしまう恐れがあった。

例えばプリント基板の検査では、前工程の導通検査で見付からなかった欠陥は、通常微小な傷が多いものである。しかしプリント基板は、正常な部分でも複雑なパターンをしており、人間が検査する場合、このような微小な傷を見落とし勝ちであった。それに生産性を確保するため検査時間が限られていたことも見落としの原因になっていたと考えられる。従って、傷検査工程を自動化することは、生産性を向上させるだけではなく、製品品質を向上させるという要求から必須の要件といえる。

いっぽう、ＬＳＩの位置測定では、ＬＳＩペレットの位置ずれや回転ずれを、拡大顕微鏡のスクリーンにペレット全体を投影して測定していた。これは、ペレット像がスクリーン上の基準線位置、角度になるように、目で確認しながら高精度移動テーブルでスクリーン面を、手動式の回転レバーで回わして位置ずれ、回転ずれを測定する方法である。しかし、このような測定方法は、手作業のためどうしても時間が掛かってしまうのと、ペレット全体を投影するため像が暗い上に、複雑なパターンを見続けなければならないため、目が疲れてしまうという問題があった。ＬＳＩは生産量も多く、さらに生産性を向上させるためには、この測定作業を自動化、省力化することが急務の課題であった。

1.2.2　ＯＡにおける必要性

1970年代に入って、コンピュータ技術の進展を背景に、銀行のすべての業務を有機的に結合した総合オンラインシステムとして登場した第２次オンラインシステムは、銀行間ネットワーク、インテリジェント端末の導入などにより、顧客サービスの向上、事務処理の大幅な合理化が達成された。銀行業務におけるこのようなコンピュータネットワークの進展は、今日のＯＡの基盤となるとともに、その後第３次オンラインシステムへと発展し、ファームバンキングやホームショッピングのような社会生活全体におよぶ総合インフラサービスへと発展しつつある。[23][24]

ところで、第２次オンラインが進められていた1970年代当時、ＡＴＭ，ＡＤ(Automated Depositor：現金自動預入装置)、ＣＤ(Cash Despenser：現金自動支払装置)のような顧客が直接操作する端末[23][24]が急速に普及し、銀行各店舗のロビーなどに設置されるようになった。このような端末では、顧客に対するサービスが最も重要であり、ボタンを押すか指タッチだけで預入、支払、記帳などの取引が簡単に進行できる簡単な操作と、できるだけ少ない待ち時間内に取引が完了することが要求される。待ち時間を少なくするために、顧客操作に対応する処理や通帳、キャッシュカード、紙幣等を取り扱うための制御、あるいはホストコンピュータとの通信など、複数の作業が同時に進行できるように、装置内部で複数のマイクロプロセッサが互いに協調しながら処理している。これらの端末のうち、ＡＴＭなど現金で預金できる端末の場合には、トレーに一括投入され、分離された各紙幣を、極めて低い誤識別率で高速に読取ることが要求され、しかも表、裏、正、逆の四つの向きがランダムに搬送される紙幣を、正しく識別するアルゴリズムの技術開発が必要であった。

1.3　本研究の位置付け

1.3.1　物体の性状から見た位置付け

一般に認識の対象となる３次元物体は、

(1)　幾何学的性状(Geometric feature)、

（2） 質的性状(Qualitative feature)、

（3） 付加的性状(Supplemental feature)、

という三つの性状を持っている。[2] 幾何学的性状は物体の形、大きさ、種類、位置、姿勢というような物差しで計測できる量である。幾何学的性状の認識は、形状の認識と位置の認識に大別される。形状の認識は特に選別の工程に重要であり、位置の認識はあらゆる産業応用の局面で必要であるが、とりわけ組立て工程の自動化には不可欠である。これに対して質的性状とは、傷、汚れ、欠陥、色合い、柔らかさというような類のものであって、一般に物差しでは計るのは難しい。とくに生産工程においては、作業者の目による目視検査、官能検査として行われている。このような検査は定量化し難い面があるとはいえ、人間の長年の経験に基づく何らかの基準が存在するものであり、自動化するにはその基準に整合させる必要がある。第３の性状である付加的性状とは、マーク、文字、模様、色など物体表面に付加された情報であって、部品名称や製品番号を読み取ることにより物体を選別する物流システム自動化の際の認識対象として重要なものである。

本研究は、プリント基板の傷抽出、ＬＳＩの位置認識、紙幣の種類識別、と扱う対象は異なるが、産業分野に存在する具体的な対象を適用例として、画像処理技術を共通の基軸にして、質的性状、幾何学的性状、付加的性状という物体が持っている三つの性状の認識という極めて困難な問題を、少しでも解決するための実用化への技術的ブレークスルーを見出す研究として位置付けられる。

１．３．２　画像処理技術の潮流から見た位置付け

画像処理の技術開発は、画像として表現された膨大な情報を対象に、自動的にコンピュータで効率的に扱えるようにしたい、という要求から出発した。1950年代から60年代前半にかけて、計算機へのデータ入力を主目的に、文字認識技術が積極的に研究され、また泡箱写真の解析など、科学分野での画像処理が先駆的に研究された。1970年代になると、工業用画像処理、衛星画像処理、医用画像処理の研究が盛んになり、1980年代ではこれらが高度化されるとともに、図面認識、文書理解の研究や、ファクシミリ、複写機などオフィス機器への応用が活発化した。1990年代は更にこれらが高度化されるとともに、多様なニーズへの対応が積極的に推進されている。

ところで、人間が作りだした文字・記号・図形などを除くと、実世界に存在する対象は、一般に３次元の形状を持っている。このような３次元対象を計算機に認識させようとする研究は、人工知能(Artificial Intelligence)の分野で早くから注目され、人工知能ロボット(Intelligent Robot)の研究の一環として1960年代後半から開始された。この研究は、それまでの文字認識のような純２次元パターンの認識問題と区別するため、特に“物体認識”(Object Recognition)と呼ばれ、また、計算機に視覚を持たせる研究という意味で“コンピュータビジョン”(Computer Vision)と総称され、ＭＩＴ(Massachusetts Institute of Technology)、[3] ＳＲＩ(Stanford Research Institute)、[4] 日立中央研究所、[5][6] 電子技術総合研究所、[7] などの世界の研究機関で研究が行われるようになった。これらの研究では、計算機の中で表現しやすいよう、当初積み木群が認識対象として選ばれたが、次第に、より複雑な机上の情景、室内情景、屋外情景などが解析されるようになり、多くの方法論(Methodology)が生み出されてきた。また３次元情報を取得するために、２台のＴＶ(テレビ)カメラによる立体視[8][9] や、スリット光の投影を用いたレンジファインダ[10] などの基礎研究が行われた。このような研究を受けて、工業製品の組立てや物流システムの自動化を想定したロボットの視覚機能の研究が行われ始めた。例えば、ロボットの腕の中にＴＶカメラを装着し、ＴＶカメラの視野を制御しつつ直方体の位置や姿勢を認識するシステム[11]、ベルトコンベア上に流れてくる多種類の物体、位置、姿勢を認識した上、所定の場所に分類配置するシステム[12][13] などがある。その後、クリーナの組立てを想定して、視覚フィードバックによる位置検出精度の向上に関する研究[14] なども行われ、高度な画像処理技術へと発展してきた。しかし、これらの研究は、３次元物体を認識するための原理的なものであり、処理時間、信頼性の面ではまだ実用的なレベルには達していなかった。

いっぽう、1970年代において、特にわが国においては、認識技術の工業応用がいち早く開始され、従来にない概念の新しい視覚装置が次々と開発され、世界に先駆けて画像処理技術が実用化された。[15]～[22] この研究は、ほぼ時を同じくして開発が進んだ工業用ロボットと共に、1970年代半ばに“ロボティックス”(Robotics)という大きな研究分野を形成し、その後のマイクロコンピュータとメモリで代表される半導体デバイスの進歩と相まって、生産技術の分野で大きな革新をもたらした。特に半導体の組立てに対する視覚技術の寄与は極めて大きく、その結果、生産工程の自動化・省力化・効率化や、生産される製品の品

質が大きく向上した。最近では、このような視覚技術の産業応用をさらに発展させるための研究が盛んに行われており、従来の方法論を主体としたコンピュータビジョンと区別して、より応用の意味を込めた“マシーンビジョン”(Machine Vision)という呼び方が一般的になってきている。[2]

前述のマシーンビジョンの基礎研究で得られた知見、および応用研究における検討の結果、実時間で画像処理できる工業用視覚装置が実現されるようになった。これにはいくつかの理由がある。先ず、取り扱う対象や照明条件などの環境に何らかの制約を加えることにより、対象が３次元であっても２次元的に扱えるようになり、更にＴＶカメラからの濃淡映像が２値化しやすくなったことである。それに、当時普及しはじめたＭＳＩ(Middle Scale Integration)、ＳＳＩ(Small Scale Integration)と呼ばれる遅延時間10ns程度の高速ＩＣ(Integrated Circuit；集積回路)が低価格で入手できるようになり、その論理を組み合わせることにより、画像処理を高速に実行できる回路が簡単に組めるようになったことである。特に“２次元局部画像メモリ”と呼ばれるハードウェア・アーキテクチャにより、実時間処理が可能となった。

このような背景により、プリント基板の傷抽出検査装置、[15)～(17)] ボルト締緩のための視覚認識装置、[18)(19)] トランジスタの自動組立て装置、[20)(21)] ＬＳＩの自動組立て装置[2] というような工業用視覚装置が相次いで実用化された。本論文の複雑パターンの傷抽出[15)～(17)] とＬＳＩの位置認識[22] の研究は、このような工業用視覚装置に関する先駆的な研究に位置付けられる。

いっぽう、ＡＴＭ，ＡＤのような銀行端末[23)(24)] における心臓部ともいえる紙幣識別装置は、他にも両替装置、券売装置、自動販売機などで最近広く実用されている。このような紙幣識別装置は極めて高い信頼性と、高速性が要求される。ところが、各社とも古くから研究・開発を行っていたと思われるが、扱う対象が紙幣という機密上の特殊性から、その識別アルゴリズムはベールに包まれていて、ほとんど研究成果の発表がなされていなかった。最近になって、少しずつではあるが、ようやく成果の一部が発表されるようになってきた。[25)～(27)] 紙幣識別では、トレーに一括投入された紙幣は１枚ずつ分離されたあと、紙幣搬送路に送られ、その途中に配置された識別装置で各紙幣の種類を、５枚/ｓ以上の高速でかつ極めて高い信頼性で識別する必要がある。本論文で述べる紙幣識別アルゴリズムは、画像処理技術を活用した紙幣のパターンの識別に関する研究に位置付けられる。

１．４　本研究の進め方と開発環境

本研究で採った基本的な進め方は、抽出すべき対象の特徴を“画像処理”という共通の切り口で分析し、それに基づきアルゴリズムの開発を行い、視覚装置の試作、フィールドテストを経て実用化する、というプロセスである。

本研究における初期のアルゴリズム開発の段階は、認識率等の基本性能を確保するアルゴリズムを、早期に開発をする必要性から、この段階から典型的な実対象サンプルの濃淡画像を、２次元64階調のディジタル画像として計算機(HIDIC500)に取り込み、シミュレーションソフトを開発するという方法論を採った。ある程度シミュレーションして初期の目標が達成できそうなアルゴリズムについては装置化の検討を行った。ＴＶカメラからの画像処理を利用する傷抽出、ＬＳＩの位置認識の研究では、いきなり装置化するのが難しいため、２値化、認識の各種アルゴリズムについて計算機シミュレーションでその基本性能を確認し、評価、選択した上、応用研究の段階で最も有望なアルゴリズムを装置化するようにした。

プリント基板の傷抽出、ＬＳＩの位置認識のアルゴリズム開発では、画像入力装置として、標準的な画面走査方式のモノクロビジコン撮像管付ＴＶカメラを使用し、カメラからの１次元アナログ信号を６ビット(64階調)、320画素×240画素(今でいう１/４ＶＧＡと呼ばれる標準方式)でディジタル(離散)化した２次元画像データを収集できるようにした。画面走査としては機械が処理しやすいように、ノンインターレース方式にした。商用ＴＶなどで通常使われるインターレース走査は、人間の目にちらつきを少なくするためであって、機械にとっては処理しにくいためである。従って、１画面走査周期は約16.7msであり、１画素当り167nsである。

開発効率のことを考え、本研究の画像処理アルゴリズム開発の計算機言語としては、高速処理を必要とする部分はアセンブラを用いたが、それ以外は科学技術計算に適した“FORTRAN”を主として使用した。また画像処理関係の基本処理は各種ライブラリーが整備されていた。これにより、初期のアルゴリズム開発はもとより、フィールドからのフィードバックが取りやすくなっていた。

一方、紙幣識別のアルゴリズム開発では、紙幣の長手方向全体が撮像できるアレイセンサで、短手方向に移動される紙幣パターンを、１mm毎に読み取ることにより、対象紙幣の

２次元画像データを計算機へ取り込めるようにした。これは、ＡＴＭでは紙幣を短手に機械送りしながらパターンを読み取る方式が単位時間の取扱い枚数の点で有利だったため、計算機の中でも実際の製品に近い様式でもデータを扱えるようにしたためである。なお信号レベルとしては上記のＴＶカメラからの画像と同じ６ビット(64階調)である。

いっぽう、応用研究の段階には、フィールドにおける苛酷な環境でも、開発したアルゴリズムが安定に動作し、所期の識別性能を確保するため、大量の実対象を実時間で高速処理することが必須であった。そのため電子回路による専用ハードウェアあるいはマイクロコンピュータによる視覚処理装置を試作・開発するようにした。それとともに、対象を移動するための機構部を試作あるいは借用して、大量のサンプル実験ができるようにした。フィールドから得られた問題点や課題は、必要に応じて開発アルゴリズムにフィードバックし、改良を行った。

１．５　本論文の構成

本論文の第２章から第６章で述べる視覚による画像処理技術の論旨の構成は以下のようになっている。

まず、第２章から第５章で画像処理技術のＦＡ分野での応用について述べ、第６章ではＯＡ分野での応用について述べる。より具体的には、第２章、第３章では、質的性状の認識技術のＦＡへの応用例としてプリント基板の傷抽出を、第４章、第５章では、幾何学的性状の認識技術のＦＡへの応用例としてＬＳＩの位置認識を、そして第６章では、付加的性状認識技術のＯＡへの応用例として、ＡＴＭにおける紙幣識別の問題を扱う。第２章では傷抽出の基本原理に基づいて、いくつか開発した傷抽出アルゴリズムと計算機シミュレーション結果を述べる。第３章では、まず、第２章で開発した傷抽出アルゴリズムを回路化した場合の入力情報量、回路規模、処理速度などの比較、評価を行うとともに、第２章のアルゴリズムに基づく装置化方式と、そのフィールドテスト結果について報告し、微小傷の抽出能力は人間以上であり、実用性が高いことを述べる。第４章ではＬＳＩ組立ての状況と、自動化のために必要な２台のＴＶカメラによる画像入力技術を述べる。第５章では、第４章で開発した画像入力装置による画像を利用して、ＬＳＩの位置を高性能に認識できる自動位置認識システムについて述べる。２値化アルゴリズム、認識アルゴリズム、

装置化方式を述べた上、フィールドテストにより自動位置認識システムを適用した結果、所期の目標を達成できることを述べる。最後に第６章では、ＡＴＭのように現金で預金できる銀行端末などに内蔵されている紙幣識別装置の、極めて高信頼性を要求される識別アルゴリズムについて述べる。対象紙幣が表裏正逆何れの向きでも対応できる紙幣の識別アルゴリズムと、その識別性能向上のための検討結果について述べる。

参考文献

（１） 江尻監修："画像処理産業応用総覧"，（上巻）－基礎・システム技術編，フジテクノシステム，pp.4-11(1994-1)

（２） 江尻，太田，池内："マシンビジョン"，昭晃堂，第１章(1990-5)

（３） Guzman A. : "Decomposition of visual scene into three-dimensional bodies" , AFIPS Proc. of the Fall Joint Computer Conference, Vol.33, pp.291-304 (1968)

（４） Forsen G. E.:"Processing visual data with an automation eye", Cheng G. C. et al(ed.), Pictorial Pattern Recognition, Thompson(1968)

（５） Ejiri M., Uno T., Yoda H., Goto, T. and Takeyasu T.:"An Intelligent Robot with Cognition and Decision-Making Ability", Poc. of 2nd IJCAI, pp.350-358(1971)

（６） Ejiri M., Uno T. and Yoda H. : "A Prototype Intelligent Robot That Assembles Objects from Plan Drawings", IEEE Trans. Computer Vol.C-21, No.2, pp.161-170(1972-2)

（７） Shirai Y., Tsuji S. : "Extraction of line drawing of 3-dimensional Objects by Sequential Illumination from several directions", Pattern Recognition, Vol.4, pp.343-351(1972)

（８） 目瀬，鳥野，江尻："両眼視による距離認識"，昭47信学全大，p114(1972)

（９） 安江，白井："物体認識のための両眼立体視"，電総研彙報，Vol.37, No.12, pp. 1101-1119(1973-12)

(10) Shirai Y. : "Recognition of polyhedra wih a range finder", Pattern Recognition", Vol.4, No.2, pp.243-250(1972)

(11) 壷井他："視覚ロボットにおける位置決め", 信学論, Vol.56-D, 9, P.499(1973-9)

(12) 依田, 池田, 江尻："回転形パターンマッチングによる形状選別の試み", 計測自動制御学論, Vol.10, No.3, pp.284-289(1974-9)

(13) Yoda H., Ikeda S., Ejiri M.:"A New Attempt of Selecting Objects Using a Hand-Eye System", Hitachi Review, Vol.22, No.9, pp.362-365(1973)

(14) Kashioka S., Takeda S, Shima Y, Uno T. Hamada T. : "An Approach to the Integrated Intelligent Robot with Multiple Sensory Feedback : Visual Recognition Techniques", Proc. of 7th Int. Symp. on Industrial Robots, pp.531-538(1977-10)

(15) Ejiri M., Uno T., Mese M. and Ikeda S. : "A Process for Detecting Defects in Complicated Patterns", Computer Graphics and Image Processing, Vol.2, pp.326-339(1973)

(16) 目瀬, 烏野, 池田, 江尻："複雑パターンを対象とした傷抽出装置方式", 電学論C, Vol.94-C, No.5, pp.89-96(1974-5)

(17) 烏野, 目瀬, 江尻："複雑パターンの傷認識", 電学論C, Vol.95-C, No.3, pp.53-60(1975-3)

(18) 烏野, 江尻, 徳永："移動物体の実時間視覚認識方式とその応用", 電学論(C), Vol.51-C7, pp.49-55(1976-3)

(19) Uno T., Ejiri M. and Tokunaga T. : "A Method of Real-time Recognition of Moving Objects and Its Application", Pattern Recognition, Vol.8, pp.201-208(1976)

(20) 柏岡, 江尻, 坂本："時分割パターン認識技術による郡制御トランジスタ組立システム", 電学論(C), Vol.96-C, No.1, pp.9-16(1976-1)

(21) Kashioka S., Ejiri M. and Sakamoto Y. : "A Transistor Wire-bonding System Utilizing Multiple Local Pattern Matching Technique", IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, Vol.SMC-6, No.8, pp.562-570(1977-10)

(22) Mese M., Miyatake T., Kashioka S., Ejiri M., Yamazaki I.and Hamada T. "Automatic Position Recognition Technique for LSI Assembly", Proc. 5th IJCAI, pp.685-693(1977-8)

(23) 島田："日本的ＯＡの構想と展開"，白桃書房，pp.162-174(1983-9)

(24) 信学会編："データ通信ハンドブック"，オーム社，pp.35-39(1984-10)

(25) 竹田，大松，井上，尾波，小西："ニューラルネットワークを用いた高速搬送紙幣の識別"，電学論(C)，Vol.112-C，No.4，(1992)

(26) 竹田，大松，井上："紙幣識別の識別式決定のためのエキスパートシステム"，情処学論，Vol.33，No.7，pp.980-991(1992.7)

(27) 目瀬，酒匂，上田，宮武，江尻："紙幣パターンの向き不変型識別手法"，信学論ＤⅡ，Vol.78，No.5(1995-5)掲載予定

２．　複雑パターンの傷抽出アルゴリズム

２．１　緒言

序論で述べたように、物体は質的性状、幾何学的性状、付加的性状の三つの基本的性状を持っている。[1] 本章および次章では、第１番目の質的性状の認識の問題として、プリント基板などのような複雑パターンを持っている対象の中から、微小傷を抽出する技術について研究を行った。[2)～(6]

さて生産工程において、プリント基板やＩＣマスクのように、複雑なパターンを持つ対象の傷を検査する場合、パターンの部分的欠損、余剰などの傷は、電気的な導通検査では検出不可能であり、検査員の目視による検査が行われていた。しかし、対象パターンは複雑であり、一般に傷は肉眼でようやく見分けられる程度の微小なものが多い。そのため目視検査を行う場合、持続的な緊張による疲労が影響し、安定した検査精度が得られないという問題があった。

このような複雑なパターン中の傷を検出するために、プリント基板を適用例として、1970年代初頭からいち早く研究・開発に着手し、世界に先駆け、パターン認識を用いた傷抽出装置を実用化した。[2)～(4] このような動きが契機となり、世の中では複雑なパターンを持った工業製品あるいは半製品の、傷・欠陥検査に関する研究・開発が活発に行われるようになった。[9] 例えばエナメル線の外観検査装置、[10] ブラウン管用シャドウマスク乾板の外観検査装置、[11] 電話交換機用スイッチ接点の外観検査装置、[12] ダイオードペレットの自動外観検査装置、[13] 電子部品表面に捺印された文字・記号の欠陥検査装置[14] [15] となどの検査装置が、相次いで開発･実用化されて行った。これらの装置で採用されている画像入力方法や認識アルゴリズムは、個々の対象によって異なっており、対象オリエントなものになっている。このような研究では、まず第１ステップとして、個々の対象が固有に持っているパターンの法則性を見出すことにより、傷や欠陥を抽出するアルゴリズムを開発し、次にその法則性が他へ適用できないかを検討して汎用化を図る、というようなアプローチを取るべきと考える。そういう意味では、上記研究例はまだ第１ステップに位置付けられるものであり、対象オリエントにならざるを得ないという面を持っている。

ところで、フォトマスク、レチクル、プリント基板のような複雑パターンの傷や欠陥を抽出する方法で、これまでの代表的な研究例として、(1)コヒーレント光学系のフィルタリングする方法、[16)~(19)] (2)隣接パターン等二つのパターンを同士を比較する方法、[20)~(22)] (3)欠陥パターンに特徴的に出現する部分的なパターンの有無に基づいて欠陥を検出する方法[23)]がある。いずれの方法も正常パターンを一切記憶する必要がなく、そのための膨大なメモリを持たなくて済む。(1)は本研究以前のものであり、ＩＣフォトマスクの検査を試みたものである。この方法は光学的なパターンの規則性、方向性を利用するため融通性があまりなく、光学系固有の厳密な精度が要求され、装置として大規模になってしまう欠点がある。また、(2)としては、対象パターンと参照パターンを光学的あるいは電気的に比較する方法などがあるが、両者を正確に位置合わせしないと、パターンの境界がすべて傷になってしまうという問題点を持っている。この点が(2)の一番大きな技術課題である。(3)の方法は欠陥の微小部の特徴に注目するもので、着想としては本研究に最も近いものである。

このような状況に鑑み、上記のような方法のメリットを活かしつつ、それらの欠点を克服するために、本研究ではプリント基板を具体的な対象として検討を重ねた結果、正しいパターンが持っている“粗さ”に法則性があることを見出した。そこで本研究では、この特徴を利用することにより、それらの欠点をすべて解消できる見通しが得られた。これにより装置化に適した特徴をもつ傷抽出アルゴリズムの開発と、それを高速に実行できる傷抽出装置の開発に成功することできた。[2)~(6)]

さて、プリント基板のような表面に複雑なパターンを持つ部品の正常パターンに着目すると、電気的制約などから一定以上の粗さを持っているが、傷などの異常部は、この粗さに比べて微小な成分を含むのが普通である。本研究で開発した傷抽出アルゴリズムは、このようなパターンそのものが持つ“粗さ”を利用して、検査対象パターンだけから傷を検出するものである。これにより、上で述べた方法のような正確な位置合わせや、光学的に厳密な精度も不要である。また正常パターンを記憶するための膨大なメモリも、もちろん不要である。この特徴は装置化するうえでも極めて有利な条件となる。本研究で開発したアルゴリズムは、このように粗さによる選別という基本原理に基づくため、プリント基板以外の複雑なパターンを有する対象(例えばＩＣやＬＳＩのフォトマスク検査など)にも適用可能である。

具体的な装置化方式などは次章で述べることにし、本章では、本研究で開発したアルゴリズムの原理と、それを具体的に実現するための論理式を導いた後、その有効性確認のための計算機シミュレーション結果について述べる。最後に本章で得られた結果に基づき装置化のための指針を結論する。

２．２　傷抽出の基本的な考え方

本論文で扱う傷抽出の対象は、明暗が黒と白の二つの状態に２値化できる２次元パターンである。エッチング直後のプリント基板、ＩＣやＬＳＩのマスクなどがこれに該当する。

図２．１は銅箔エッチング後のプリント基板の一部であり、パターン中央部に黒のパターンが切断した傷が存在する。全体が複雑なパターンをしていても、人間は一瞥しただけで、中央部のパターンが他の部分と何か異なっていると感じる。人間は何を手がりにして、このような傷の部分を他の部分と区別できるのかを考えてみる。明らかに、人間は正常部や異常部のパターンをすべて記憶しているとは考えられない。そこで、傷と正常部の両者を比べて見ると、傷の部分は正常な部分に比べて細かいパターンを含んでいることが分かる。このように、人間は、正常パターンはある“粗さ”より粗い成分からなっているが、傷はその粗さ以下の成分を含んでいる、ということを手掛かりにして何かまわりと違うように感じると考えた方が、より自然である。このような人間の能力は、パターン認識とよばれる優れた知能の一つである。

そこで本研究では、対象とする傷には必ず微小部が含まれているという仮説を設け、上記のような人間のパターン認識力を機械で実現するために、アルゴリズム化することにした。傷は“ささくれ”、“ぎざぎざ”、“ピンホール”などと形容されるように、細いとか細かいという概念と結び付いている。もちろん大きな傷も現実には存在するが、大きな傷でも部分的には微小な部分が存在するし、また傷と正常部の境界付近でも必ず微小な部分が存在するのが普通である。逆に正常なパターンと同じような大きな傷は、正しいパターンを教えてもらわない限り人間でも分からない。本研究で開発したアルゴリズムは、このようなパターンの粗さに注目して傷を抽出するようにする。

さて、図２．２は図２．１の中央部を拡大したものである。図に示すように、パターンの

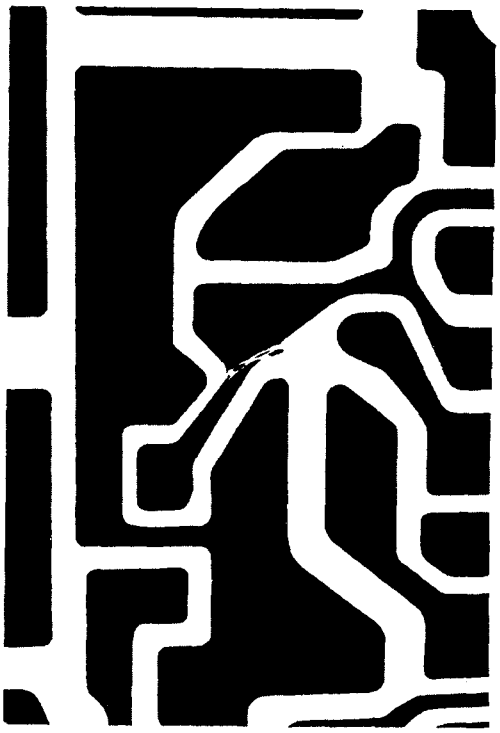


図２．１　傷を含むプリント基板

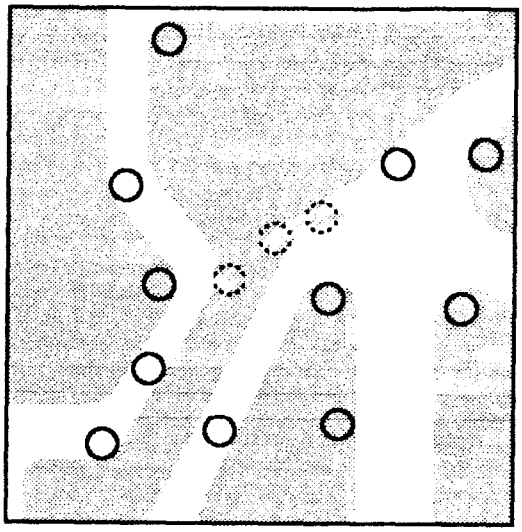


図２．２　プリント基板の正常部と傷

（○　；正常部
◌　；傷）

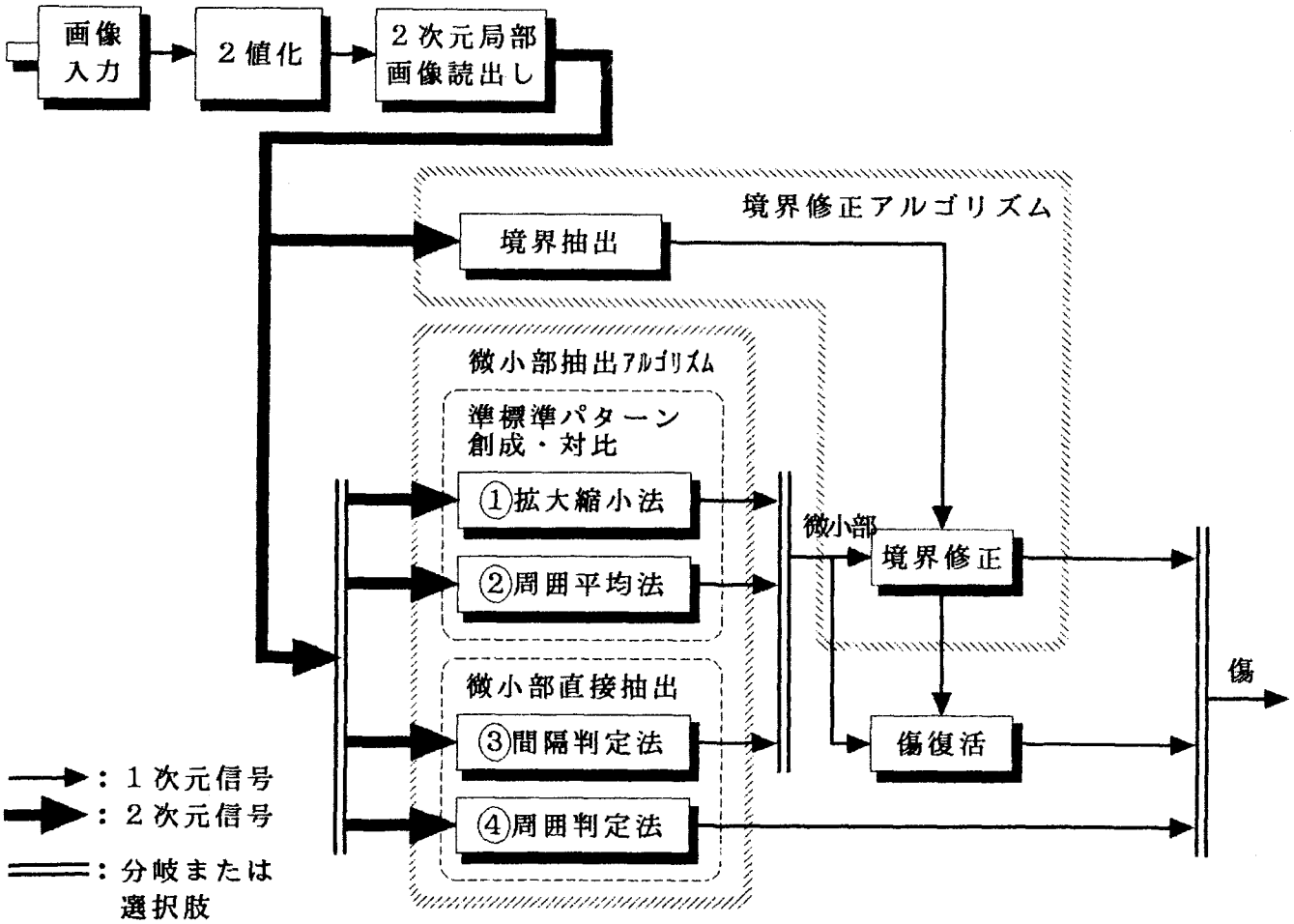


図２．３　傷処理抽出アルゴリズム相互間の機能的関係

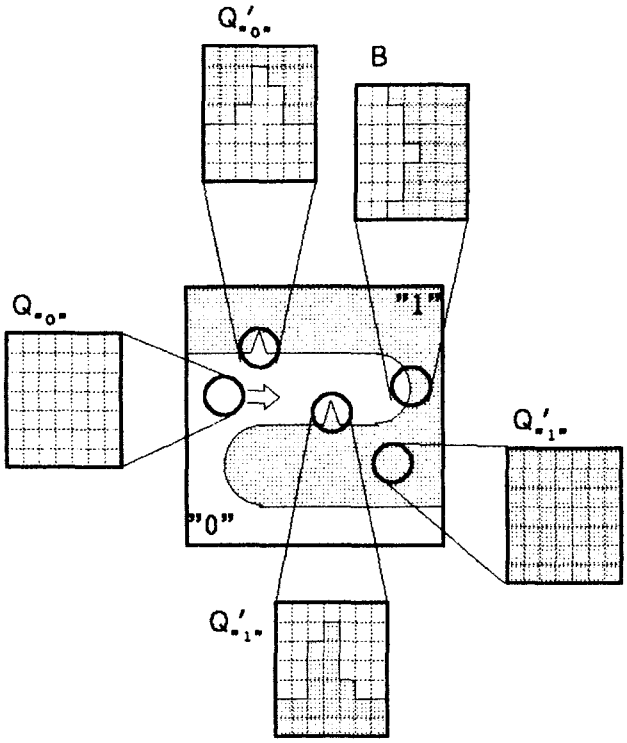
正常部では、通常、電気的制約などにより、黒の部分も白の部分もある一定以上の幅を持ち、端部や分岐部などのコーナ部は、電流密度が集中しないよう適当な丸味がつけられている。すなわち、すべての正常な部分は、ある粗さより粗い成分で構成されている。これは見方を変えれば次のようにも解釈できる。すなわち、正常部では黒、白いずれもある一定半径円(図の実線)の軌跡として表現できるが、傷の部分(図の破線)ではその半径未満の円を含んでいる。従って、対象パターンの各点が、このような一定半径の円の軌跡の部分になっているか否かを判定することにより、正常部と傷を分離することが可能である。
このような一定半径の円Rは、粗さの下限に対応するもので閾円[5]とよぶことにする。

このような円軌跡の判定は、パターン全体を調べなくても局部的な画像だけで判定できるという特徴があり、本研究における傷抽出アルゴリズムは、局部画像処理技術をベースにしている。とくに離散的な局部画像処理は、次章で述べる装置化に極めて有効である。

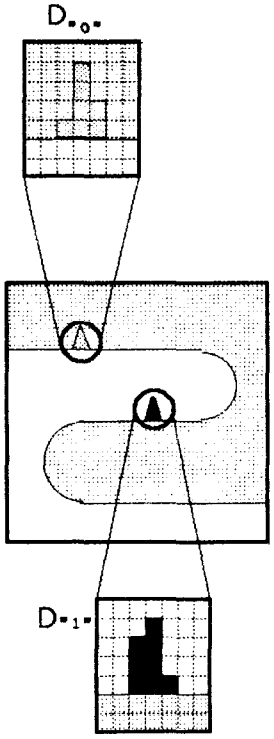
本研究では前記した基本原理に基づくいくつかの傷抽出アルゴリズムを開発した。それらの機能的関係を図2.3に示す。まず、TVカメラで入力されたプリント基板などの対象の画像は、2値化を経由して2次元局部画像読み出し部へ送られ、この部分で2次元の離散的な窓枠パターンが読み出される。窓枠パターンは"微小部抽出"と"境界抽出処理"というアルゴリズム処理が施される。微小部抽出では、上記基本原理であるパターンの粗さにより微小部が抽出される。微小部抽出は、(1)準標準パターンを創生・対比する方法と、(2)直接微小部を抽出する方法に大別され、(1)の方法として①拡大縮小法、②周囲平均法を、(2)の方法として③間隔判定法、④周囲判定法を開発した。

ところで、周知の通り、正常な部分でも離散化すると白と黒のパターンの境界には"量子化誤差"とよばれる微小な凹凸が生じる。微小部抽出の拡大縮小法、周囲平均法、間隔判定法の三つのアルゴリズムは、このような量子化誤差を微小部として抽出してしまう欠点がある。境界修正法、傷復活法あるいは周囲判定法は、このような欠点を、カバーするために開発したアルゴリズムである。境界修正法は、境界抽出処理と境界修正処理を組合わせて、境界の量子化誤差をマスクするアルゴリズムである。ただし、境界修正法は傷の一部を過剰に削り取ってしまう欠点があり、傷復活法はこの弱点を解消するために開発したものである。これに対して、周囲判定法は、量子化誤差の除去と傷抽出を一つのアルゴリズムで同時にできるものである。

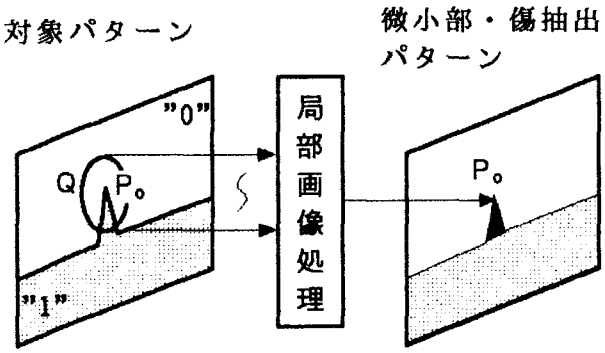
ところで本研究の傷抽出アルゴリズムを実現するためには、図2.3に示すように、2



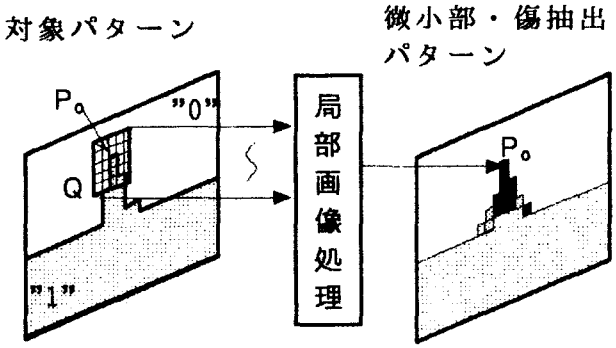
(a)対象パターン



(b)微小部・傷パターン
(■は"1"の微小部,
▨は"0"の微小部)



(c)局部画像処理
(連続空間)



(d)局部画像処理
(離散空間)

図2．4　2次元局部画像処理

次元局部画像読み出し部から読み出される２次元局部画像を用いる。図２．４にこの局部画像の様子を示す。図における“０”、“１”は白、黒のパターンに対応する。離散空間の場合、パターンを構成する各点は一般に“画素”といわれ、図で７×７画素の例で示したような局部画像の領域のことを以降では“窓枠”とも呼ぶ。同図（ａ）の$Q_{\cdot 0 \cdot}$，$Q_{\cdot 1 \cdot}$は正常部、$Q_{\cdot 0 \cdot}'$，$Q_{\cdot 1 \cdot}'$は傷のような微小部、Ｂは境界部の窓枠パターンを表す。同図（ｂ）はパターン全体から傷または微小部のみが抽出された窓枠パターンである。同図（ｃ），（ｄ）は対象パターンの各点あるいは各画素の周りの局部Ｑに対して、処理結果をその着目点P_0に対応付ける局部画像処理の概念を表す。（ｃ）は連続空間、（ｄ）は離散空間の局部画像処理である。ただし本研究では、（ｄ）の離散空間が主役で（ｃ）は参考のために示した。両図において、P_0、すなわち（ｃ）の円の中心点あるいは（ｄ）の窓枠の中心画素のことを、今後“着目点”あるいは“着目画素”と呼ぶことにする。ただしP_0は対象パターン、傷・微小部パターンなどに係わりなく、複数のパターン空間同士間の対応を、取りやすくするため便宜上使用する。

本研究では、このような離散局部画像処理をベースとするいくつかの傷抽出アルゴリズムを開発した。次章で拡大縮小法、周囲平均法、間隔判定法の三つの基本的なアルゴリズムを述べた上、２．４で応用アルゴリズムとして、量子化誤差の欠点をカバーする境界修正法、傷復活法および量子化誤差フリーで直接微小部を求めることができる周囲判定法の三つのアルゴリズムを述べることにする。

２．３　微小部抽出アルゴリズム

本節では、対象パターン中に存在する微小部を抽出する拡大縮小法、周囲平均法、間隔判定法という三つの基本アルゴリズムの原理について述べ、各アルゴリズムを具体的に実現する論理式を導く。前節で述べたように、これらの基本アルゴリズムには、離散化に伴う量子化誤差を抽出するという欠点がある。しかし、本節は基本原理を説明することが目的であり、この点には言及せず、次節で述べることにする。扱う対象パターンの空間としては、２次元２値化の形態であるが、一般に何次元であっても良く、また連続的なものでも離散的なものでも構わない。しかも２値なので明暗を“０”、“１”に対応させることによ

り論理処理が行え、装置化が容易になるという利点がある。

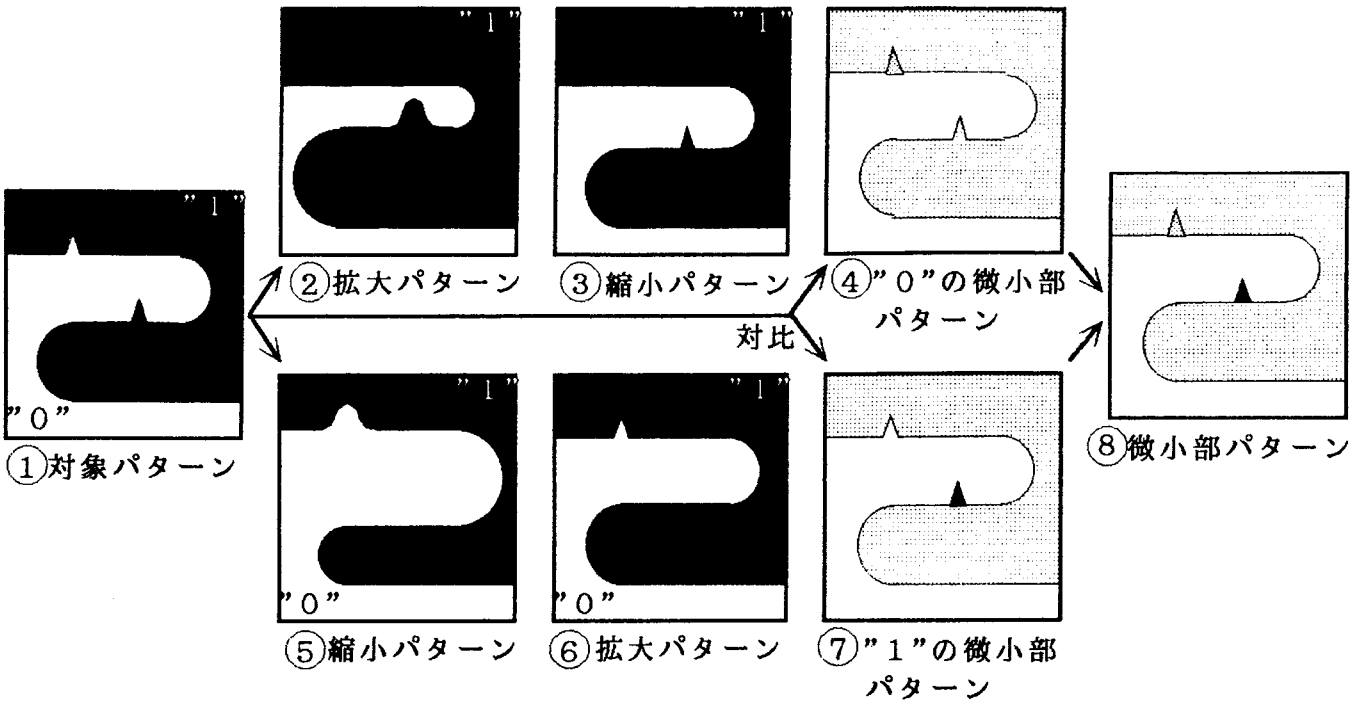
2.3.1　拡大縮小法

このアルゴリズムは前節で分類した(1)の方法の一つであり、その正常部を表現する粗さ分だけ対象パターンを拡大・縮小、あるいは縮小・拡大することにより、準標準パターンを創成するものである。

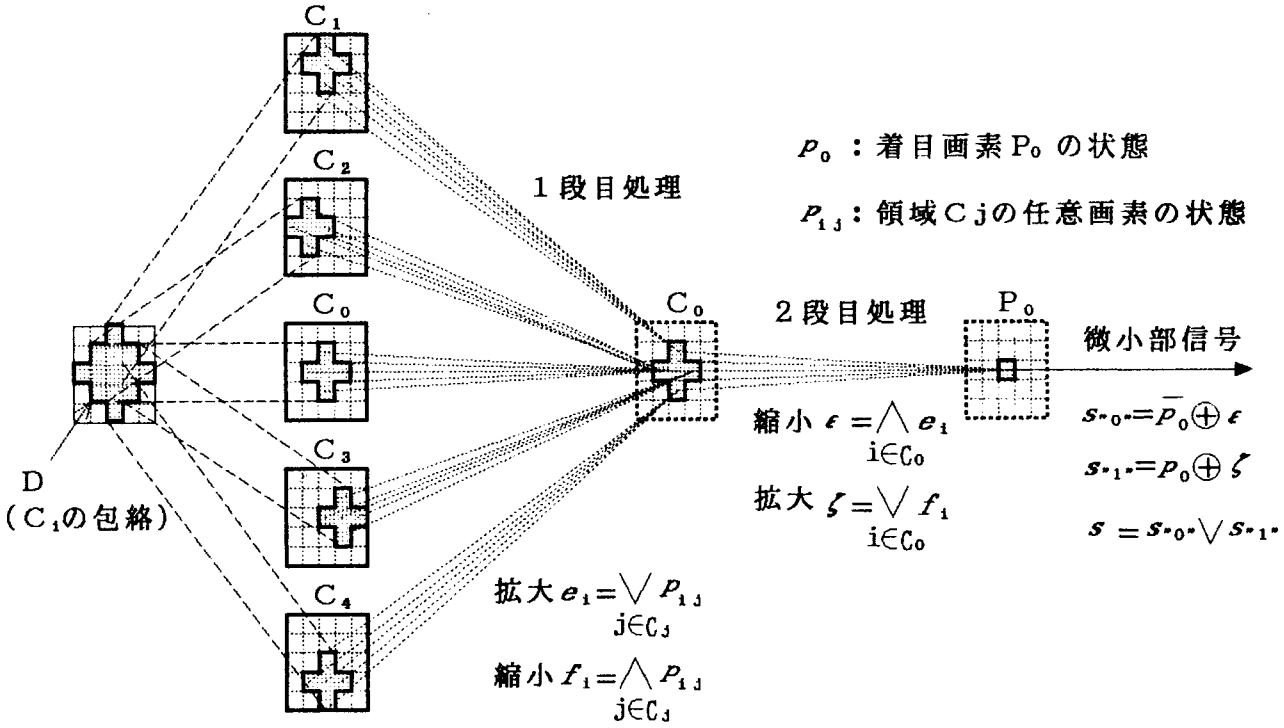
まず模式的な連続パターンに関する拡大縮小法の原理を図2.5(a)に示す。図において対象パターン①は2値なので、便宜上黒く塗り潰した部分を論理的な“1”、白の部分を“0”に対応させる。対象パターン①において、$s_{\cdot 0 \cdot}$、$s_{\cdot 1 \cdot}$はそれぞれ“0”、“1”の規定の粗さ未満の微小部を表す。まず$s_{\cdot 0 \cdot}$を抽出するために次のようにする。すなわち、対象パターン①の“1”の部分をすべての方向に均等に拡大する。その結果が②である。この場合、拡大する量としては、図2.2で述べたような正常パターンを表現するための円の大きさに選ぶ必要がある。そうすると、②から分かるように、“1”の部分は拡大するが、$s_{\cdot 0 \cdot}$は押し潰されて消滅する。つぎに②の“1”の部分をすべての方向に均等に縮小する。この場合、縮小量は①→②の拡大量と同じ量に選ぶ必要がある。その結果が③であり、$s_{\cdot 1 \cdot}$や“1”の正常部は①と同じものが再現するが、$s_{\cdot 0 \cdot}$は消滅してしまっているためもはや再現しない。このように、③のパターンは“0”の細かな部分が存在しないため、「“0”の準標準パターン」と呼ぶことにする。従って、対象パターン①と“0”の準標準パターン③の各点を対比することにより、④のように両者の不一致部として“0”の微小部$s_{\cdot 0 \cdot}$を抽出することができる。

次に“1”の微小部$s_{\cdot 1 \cdot}$は、上記手順の拡大、縮小の順序を逆にするだけで同様にして抽出できる。すなわち、同図の①→⑤→⑥→⑦のようにすればよい。この場合、パターン⑥を「“1”の準標準パターン」と呼ぶことにする。以上の微小部抽出結果を合成したものが⑧である。ここで述べた拡大縮小法の原理は、微小部$s_{\cdot 0 \cdot}$と微小部$s_{\cdot 1 \cdot}$の抽出を並列に行うことから、“並列処理”と呼ぶことにする。

一方、図示はしないが、図2.5(a)の③(または⑥)を更に上記と同じ量だけ、すべての方向に均等に縮小後拡大(または拡大後縮小)することにより、まったく微小部を含まない準標準パターンを創成することができる。このようにして得られた準標準パターンと対



（a）拡大縮小法の基本原理



（b）拡大縮小処理の画素の処理対応関係（ $r_L = 1$ ）

図２．５　拡大縮小法の原理

象パターン①を照合することにより⑧が得られる。この処理は、拡大、縮小、縮小、拡大の四つの処理を順に繰り返すことから、“直列処理”と呼ぶことにする。

以上のような拡大縮小法において、拡大量や縮小量を与えるための円の半径のことを、以降では“拡大縮小半径”と呼ぶことにする。この場合、微小部$s_{\cdot 0 \cdot}$，$s_{\cdot 1 \cdot}$を抽出するために用いる円の拡大縮小半径は必ずしも同一である必要はなく、目的に応じて最適値に設定できるというメリットがある。

上記の並列処理と直列処理を比較すると、拡大、縮小の処理量は同じであるが、明らかに並列処理は直列処理の半分の処理時間で済み、装置化するには有利であることが分かる。従って、本研究は装置化を目的としているため、以降では直列処理の説明は省略し、並列処理についてのみ考察する。

上述した拡大あるいは縮小の処理は次のようにも解釈できる。拡大処理は“1”パターンの各点を周囲に均一に伝播させることである。逆に縮小処理は“0”パターンの各点を周囲に向かって均一に伝播させることである。このことは、以下で述べるパターンの各点に対して、局部処理だけで拡大縮小の処理が実現できることを意味している。以降では、離散的空間における局部処理で、並列処理の拡大縮小法を実現するための論理式を導くことにする。

拡大縮小処理の説明を行う前に、窓枠内画素の処理の対応付けについて説明する。図2.5(b)は、並列処理による拡大縮小法による窓枠内画素の処理対応関係を表す。図は拡大縮小半径を単位画素に選んだ場合である。1段目の5×5の窓枠内の各画素領域中の5つの領域C_i($i=1,\cdots,4$)は離散空間における単位円、DはすべてのC_iの包絡領域である。図のようにC_iはC_0から1画素ずつ上下左右にずれている。2段目の単位円はC_0と同じ位置に対応するので、ここでは同じ記法とする。まず、C_i内のすべての画素を用いて1段目の処理を行い、その結果をC_iの中心と同じ位置にあるC_0内の画素に対応付ける。次に、C_0内のすべての画素を用いて2段目の処理を行い、その結果を着目画素P_0に対応付ける。P_0はC_0の中心画素にも対応している。このような対応付けにより、局部処理による着目画素に対する拡大縮小処理が実現できる。

そこで拡大後縮小処理の論理式について説明する。C_i内の対象パターンを表す各画素の状態変数をp_{ij}($j=0,\cdots,4$)とすると、1段目の拡大処理は$e_i=\bigvee_{j\in C_i} p_{ij}$のように$p_{ij}$の論理和で表される。次に2段目で1段目の拡大結果$E_j$に対して縮小処理を行なう。

これは$\bigwedge_{i \in C_0} e_i$と表される。従って、拡大後縮小処理は$(\bigwedge_{i \in C_0} \bigvee_{j \in C_i} p_{ij})$と表される。同様にして縮小後拡大処理は$\bigvee_{i \in C_0} (\bigwedge_{j \in C_i} p_{ij})$とあらわされる。従って上記原理から“0”の微小部を$s_{\cdot 0 \cdot}$，“1”の微小部を$s_{\cdot 1 \cdot}$，sを$s_{\cdot 0 \cdot}$，$s_{\cdot 1 \cdot}$の合成とすると、

$$s_{\cdot 0 \cdot} = \overline{p}_0 \oplus \bigwedge_{i \in C_0} (\bigvee_{j \in C_i} p_{ij}),$$

$$s_{\cdot 1 \cdot} = p_0 \oplus \bigvee_{i \in C_0} (\bigwedge_{j \in C_i} p_{ij}), \qquad (2.1)$$

$$s = s_{\cdot 0 \cdot} \vee s_{\cdot 1 \cdot}$$

となる。ここに⊕は排他的論理和を表す。

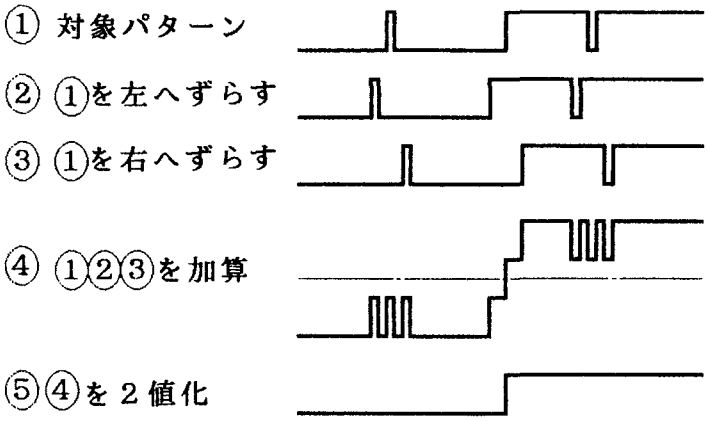
上記では式(2.1)の関係は、便宜上拡大縮小半径が1の単位円について導いたが、それ以上の大きい円についても同様に成り立つ。またsの関係式は何れの微小部抽出アルゴリズムでも同一になるため、以降ではとくに断らない限り省略する。

ところで、拡大縮小法の論理処理の対象円領域の半径をr_Lとおくと、拡大縮小法には、閾円の半径Rをもつ対象に対して、対象のすべての粗さ成分のうち、$r_L < R$の成分を微小部として抽出し、$r_L \geqq R$の成分を抽出しないという“切れの良い”抽出特性がある。[5] ここでr_Lは、図2.5(b)の例では、拡大縮小半径1の円が1画素ずつ重畳した包絡円であるから、$r_L = 2$である。

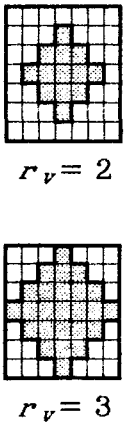
2.3.2 周囲平均法

周囲平均法は前節で分類した(1)の準標準パターンを創成するもう一つの方法である。このアルゴリズムの基本的な考え方は、対象パターンを濃度的に“ぼかす”ことにより微小部のない準標準パターンを創成する、というものである。

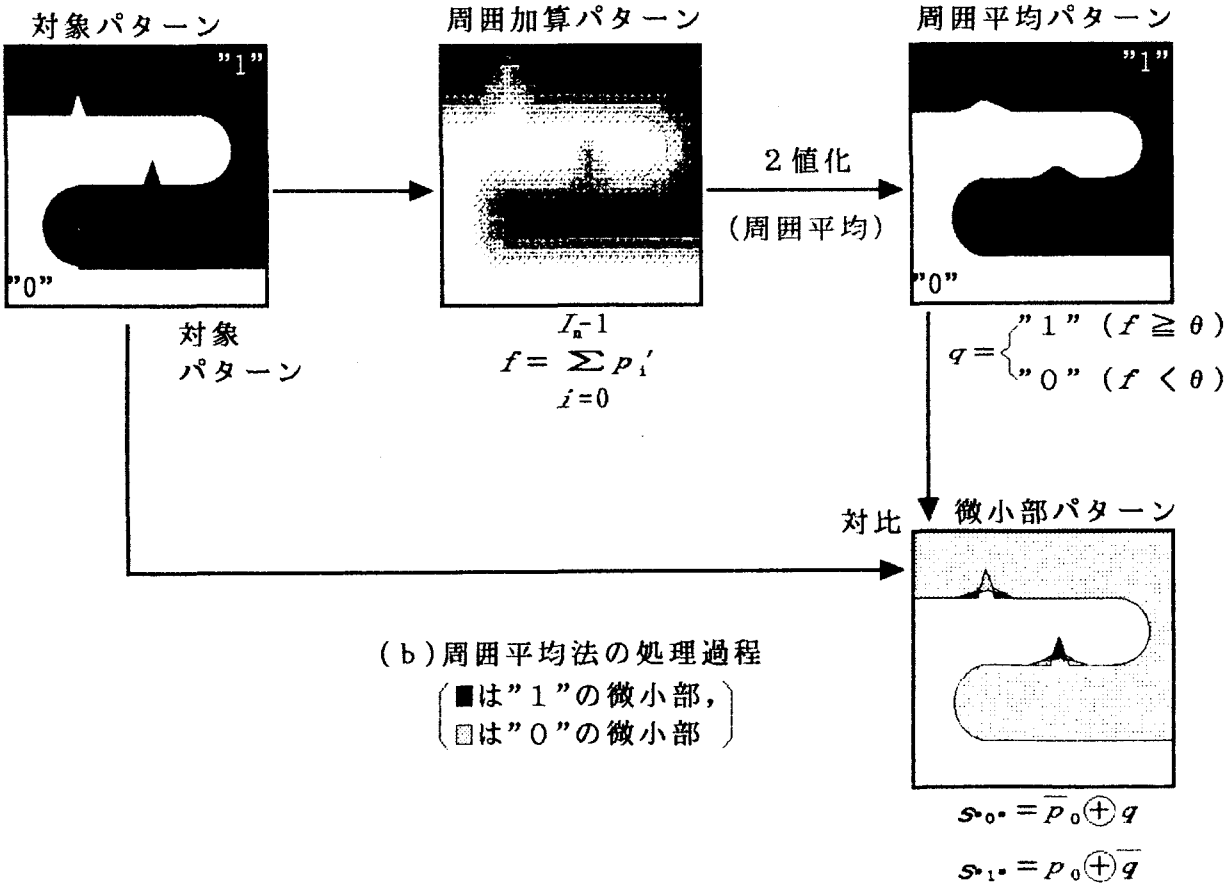
図2.6は周囲平均法の原理を表す。同図(a)は1次元パターンの周囲平均処理の例である。①のような微小部を含む2値対象パターンを、②③のように少しずつ左右にずらし、これらを数値的に加算すると、④のようなパターンが得られる。この例では三つの対象パターンが加算されるから、“0”の正常部は0、“1”の正常部は3という値になるが、“1”



（ａ）１次元パターンの周囲平均処理



（ｃ）周囲平均円Ｖの例



（ｂ）周囲平均法の処理過程
（■は"１"の微小部，
□は"０"の微小部）

図２．６ 周囲平均法の原理

の微小部は１、“０”の微小部は２という値を取る。そこで図のように閾値として$\theta=3/2=1.5$という値で④を２値化すると、⑤のような２値化パターンが得られる。⑤には微小部が含まれておらず、①のパターンに対する準標準パターンが創成されたといえる。

図２．６(ｂ)は２次元の連続パターンに対する周囲平均処理の原理図である。図の周囲加算パターンは一種の“ぼかし”に相当するものであり、対象パターンの各点に着目し、その点を中心とする円領域内のすべての点“０”，“１”の論理状態を０，１という数値と見なし、それらを加算することにより得られる。この円のことを“周囲平均円”、その半径のことを“周囲平均半径”と呼ぶ。この周囲加算パターンを上記周囲平均円の面積の半分の値を閾値として２値化することにより、周囲平均パターンがえられる。このパターンには微小部が含まれておらず、準標準パターンに相当する。このようにして、拡大縮小法と同様、周囲平均パターンの準標準パターンと対象パターンの各点を対比することにより、不一致部として微小部を求めることができる。ただし、この場合、拡大縮小法と違って準標準パターンは一つしか創成されないため、“０”の微小部と“１”の微小部抽出半径を独立に変えられない。また、周囲平均パターンは円内の平均的な濃度から決定されるため、周囲平均パターンの“０”と“１”の境界は滑らかな曲線になる。そのため、微小部周辺の角張った部分が微小部として過剰に抽出される特徴がある。

次に、離散パターンについて定式化を行なう。図２．６(ｃ)は周囲平均法による処理対象となる画素領域すなわち周囲平均円Ｖの例を示す。図は周囲平均半径$r_V=3$，　２の例を示す。離散の場合、円の面積に相当するのは円内の画素数I_nであるから、閾値θとしては$\theta=[I_n/2]$と設定する。ただし[ａ]はａ以下の最大の自然数である。そこで対象パターンに関する着目画素P_0を中心にもつ円内の各画素の状態変数を数値変数と見なしたものをp_0'，p_1'，…，p_{I_n-1}'とし、周囲加算パターンのP_0に対応する画素の値をｆ、周囲平均パターンを表す状態変数をｑとおくと、

$$f=\sum_{i=0}^{I_n-1} p_i', \qquad (2.2)$$

$$q=\begin{cases}\text{“1”} & (f\geqq\theta\text{の時})\\ \text{“0”} & (f<\theta\text{の時}),\end{cases} \qquad (2.3)$$

となり、微小部を表す状態変数を$s_{\cdot 0 \cdot}$，$s_{\cdot 1 \cdot}$とおくと、

$$s_{\cdot 0 \cdot} = \overline{p_o} \oplus q$$
$$s_{\cdot 1 \cdot} = p_o \oplus \overline{q} \qquad (2.4)$$

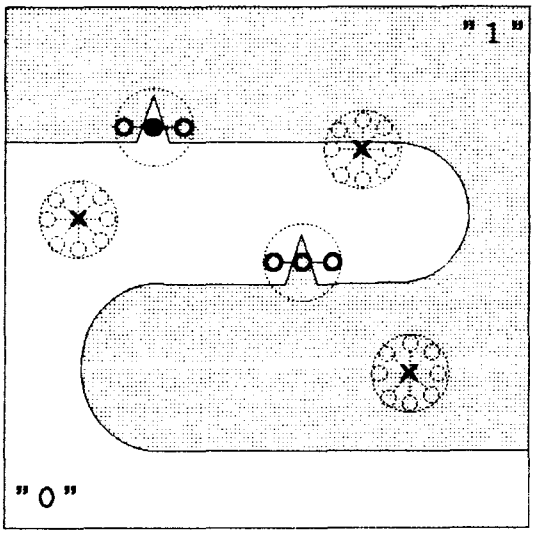
となる。ここに ⊕ は排他的論理和を表す。

ところで、周囲平均半径をr_vとおくと、周囲平均法には、閾円の半径Rをもつ対象に対して、対象のすべての粗さ成分のうち、$r_v < R/\sqrt{2}$の成分を微小部として抽出し、$r_v \geqq R/\sqrt{2}$の成分も一部抽出するするという若干“切れの悪い”抽出特性がある。[5] ここでr_vは、図2.6(a)の例では、拡大縮小半径1の円が1画素ずつ重畳した包絡円であるから、$r_v = 2$である。

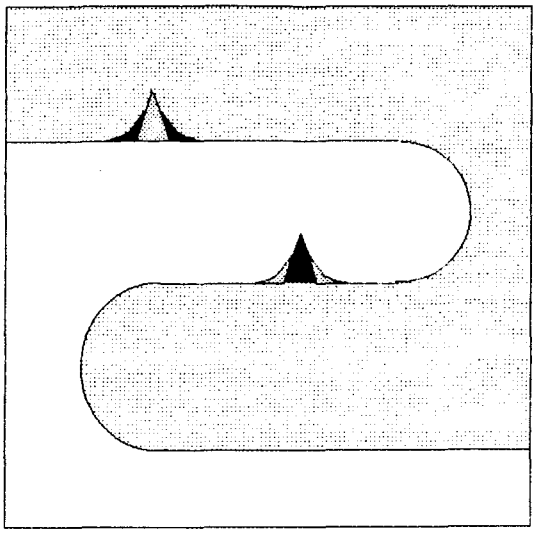
2.3.3 間隔判定法

このアルゴリズムは前節で述べた(2)の対象パターンから直接抽出するアルゴリズムの一つである。これは、対象パターンの各点の“0”または“1”の1次元的な幅をいくつかの方向に調べ、それが所定値より短い場合に微小部として抽出するものである。このアルゴリズムの特徴は、拡大縮小法、周囲平均法と異なり、準標準パターンの創成というような過程を経ずに直接微小部が求められることである。

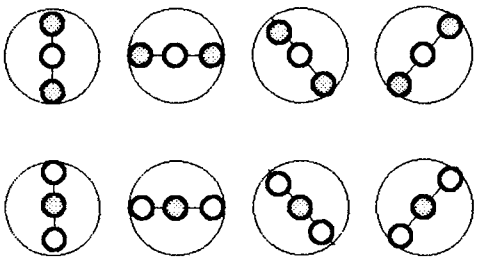
このアルゴリズムの連続パターンを対象としたときの原理を図2.7に模式的に示す。同図(a)は微小部とみなすパターンの例を示す。上段は“0”の微小部、下段は“1”の微小部抽出用のパターンである。図のように何れかの方向で着目画素の状態と反対の状態の画素に挟まれておれば、着目画素は微小部と見なされる。調べる方向としては、図のような水平、垂直それに斜の45°と135°の4方向で実用上十分である。同図(b)は対象パターン中での微小部抽出の状況を示す。図のように正常部では(a)の何れのパターンにも合致しないが、微小部では(a)の例えば水平方向のパターンに合致する。このようにして抽出された微小部を同図(c)に示す。図のように間隔判定法は、微小部に付随する角張った部分を微小部として抽出する特徴がある。



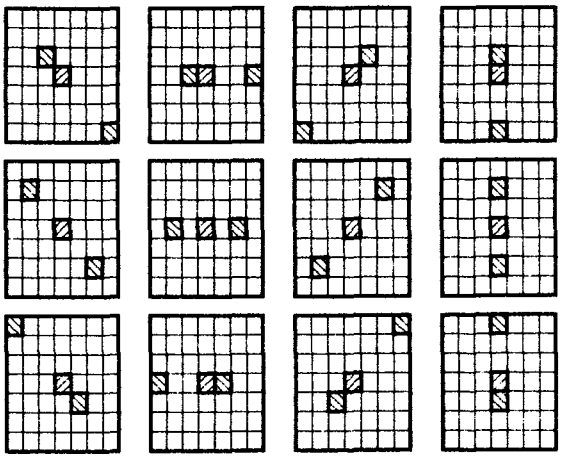
(b)対象パターンに対する間隔判定
(○は微小部,×は微小部でない)



(c)微小部抽出結果
(■は"1"の微小部,
□は"0"の微小部)



(a)微小部と見なされるパターン
(上段は"0"の微小部,下段
は"1"の微小部判定用)



(d)処理対象画素の例
(▨ :着目画素Po
▧,▧ :処理対象画素Gi, Gi')

$$S_{"0"} = \bigvee_i g_i \wedge \overline{p_0} \wedge g_i' \qquad S_{"1"} = \bigvee_i \overline{g_i} \wedge p_0 \wedge \overline{g_i}'$$

p_0: 着目画素Poの状態
g_i, g_i' :処理対象画素Gi, Giの状態

図2.7 間隔判定法の原理

次に離散パターンの場合の論理式を導く。図２．７(ｄ)は間隔判定法による処理において、対象となる画素の例を示したものである。図はパターンの間隔が４画素未満の微小部を抽出する場合である。図のように、着目画素P_0を挟む画素G_i，G_i'（$i=1,2,\cdots,12$）としては、各方向で同じ間隔で１画素ずつずれたパターンを用意する。そこで、上記の微小部の判定を具体的には次のように行う。すなわち、画素P_0，G_i，G_i'の対象パターンに関する状態変数をp_0，g_i，g_i'とすると、$i=1,2,\cdots,I_g$に対して、$g_i \wedge \overline{p_0} \wedge g_i'$＝“１”なる$i$が少なくとも１個存在すれば、$P_0$を“０”の微小部と見なす。但し、$I_g$は間隔判定のための画素構成の数で、例えば図２．６(ｄ)では、位置ずらし３ケース、それに４方向の合計$I_g=12$である。同様に、$\overline{g_i} \wedge p_0 \wedge \overline{g_i'}$＝“１”なる$i$が少なくとも１個存在すれば、$P_0$を“１”の微小部とみなす。逆に何れの$i$に対しても、$\overline{g_i} \wedge p_0 \wedge \overline{g_i'} = g_i \wedge \overline{p_0} \wedge g_i'$＝“０”であれば、着目画素を正常部と見なす。

以上のことを式で表すと次のようになる。今までと同様、微小部を表す状態変数を$s_{\cdot 0 \cdot}$，$s_{\cdot 1 \cdot}$とおくと、

$$s_{\cdot 0 \cdot} = \bigvee_{i=1}^{I_g} (g_i \wedge \overline{p_0} \wedge g_i'),$$

$$s_{\cdot 1 \cdot} = \bigvee_{i=1}^{I_g} (\overline{g_i} \wedge p_0 \wedge \overline{g_i'}) \qquad (2.5)$$

となる。

ところで、間隔判定法の論理処理対象領域の半径（“間隔判定半径”という）をr_Gとおくと、間隔判定法には、閾円の半径Ｒの対象に対して、対象のすべての粗さ成分のうち、$r_G < R$の成分を微小部として抽出し、$r_G \geqq R$の成分も一部抽出するするという、拡大縮小法よりやや“切れの悪い”抽出特性がある。[5] ここでr_Gは、図２．５(ｄ)の例では、斜め方向の判定画素から決まり$r_G=3$である。

２．４　傷抽出アルゴリズム

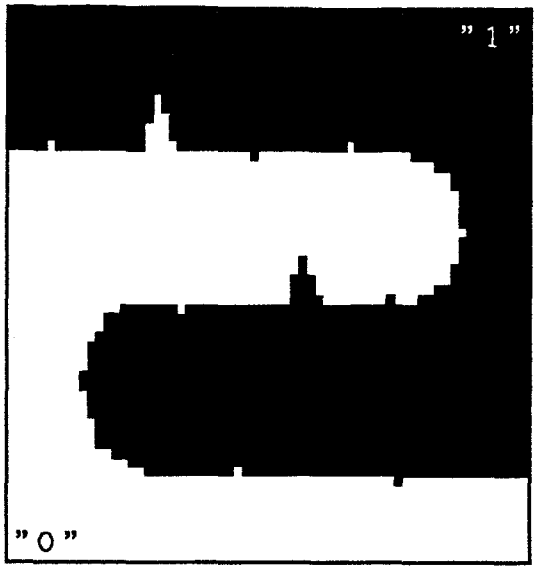
前節で述べた三つの微小部抽出法は、対象パターン中の微小傷を見落としなくすべて抽

出できる。対象パターンが連続的な場合、傷は微小部に等しいから特にこれで問題ない。しかし、対象パターンが離散的の場合、“0”と“1”の正常な境界部付近でも微小な凹凸すなわち量子化誤差が生じ、これらの三つのアルゴリズムは、原理的にそのような量子化誤差を微小部として抽出してしまう欠点がある。本節ではこのような量子化誤差の影響を除去するあるいは影響を受けない傷抽出を述べる。各項で傷抽出アルゴリズムについてその原理を述べ、更にその原理を具体的に実現するための論理式を導く。

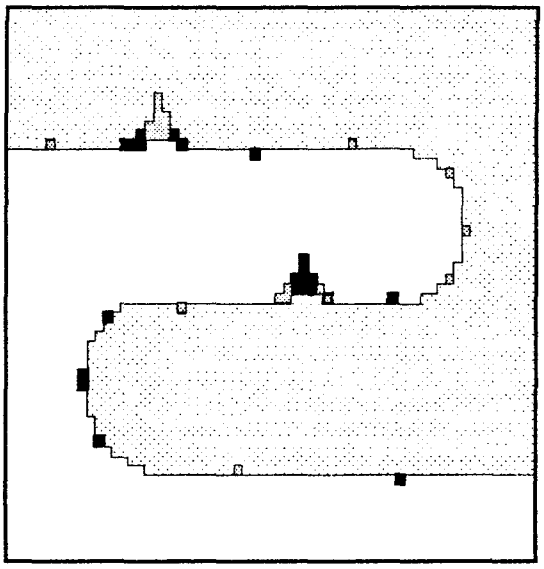
2.4.1 境界修正法

図2.8に離散的な対象パターンに対する微小部の修正の状況を示す。対象パターンが離散的な場合、同図(a)のように“0”のパターンと“1”のパターンの境界に量子化誤差が生じる。このような量子化誤差はパターンを離散化した場合には不可避なものである。同図(b)は例えば間隔判定法で抽出した微小部パターンであり、傷以外のこのような量子化誤差を抽出してしまう。前節で述べた拡大縮小法や周囲平均法も同様に抽出してしまう。傷抽出の目的からは、このような量子化誤差は望ましいものではないため、無視する機能が必須である。境界修正法は、この機能を実現する一つのアルゴリズムである。すなわち、同図(c)のように量子化誤差を含む境界に帯状のパターンを抽出し、(b)の微小部パターンをこの境界パターンでマスクすることにより、(d)のように量子化誤差を除去するものである。このようにして傷だけが抽出できるわけである。ところで、この場合量子化誤差の部分は、境界の帯状パターンに含まれてしまうが、傷は含まれないようにすることが肝要である。

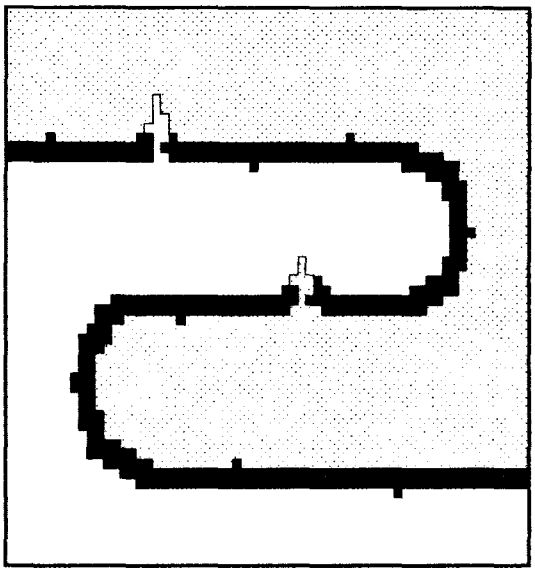
まず境界抽出を以下のような方法で行う。それに先立ち、傷と量子化誤差の特徴の違いを調べる。まず、傷も量子化誤差も細かい成分を持っている、という共通の特徴がある。しかし、傷の形状、大きさ、位置は不確定である。これに対して、量子化誤差は正常な境界に沿って1画素未満の幅しかなく、しかも連続して発生しない点が傷と異なっている。この相違点に着目して考案したのが、同図(e)のような画素領域に対する空間論理である。図のように、例えばB_i, B_i'のように、着目画素P_0を含まないような相対向する画素領域を考え、何れかの方向で、領域内のすべての画素の状態が同一であって、各領域全体で反対の状態であれば、着目画素P_0を境界として抽出する。このようにして求めた境界抽



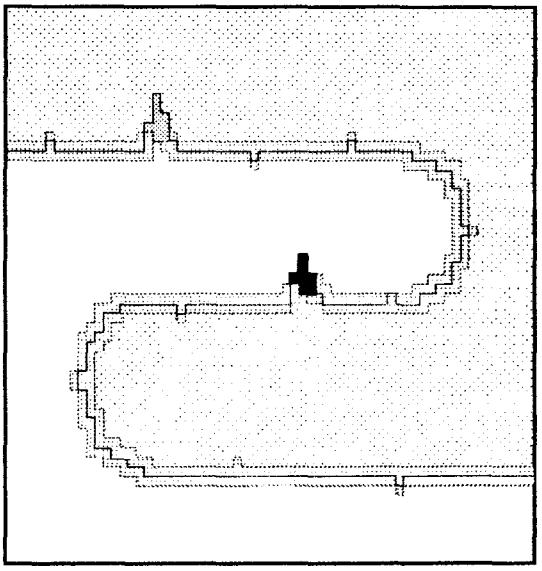
(a)離散対象パターン



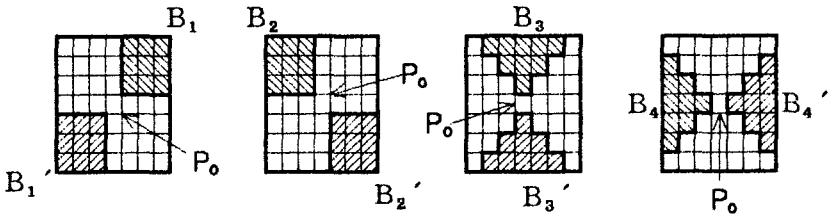
(b)微小部パターン(間隔判定法)
(■は"1"の微小部,□は"0"の微小部)



(c)境界抽出パターン
(■は抽出された境界)



(d)境界マスクされた微小部パターン
(■は"1"の微小部,□は"0"の微小部
▒は境界マスクされる部分)



(e)境界抽出のための画素領域
(▧と▨は反対の状態)

図2.8 境界修正法の原理

出パターンで境界の量子化誤差をすべてマスクできるわけである。傷の場合には、まとまった画素領域が対になる可能性は低い筈である。以上のような原理により、傷の部分は残して量子化誤差のみ除去できるわけである。

ところで、同図(b)、(d)を比較しても分かるように、境界に存在する傷は、パターン内部に入り込んだ部分は除去されないが、境界付近の一部が除去されてしまう。2.2の仮説から必ず傷の微小部は残るためこれは致命的な欠点ではないが、傷の大きさを判定するような更に高度な目的などのためには望ましいことではない。次項でこの欠点をカバーするアルゴリズムを考察する。また、対向領域としては、理想的には前節の微小部抽出の円領域とすべきであるが、窓枠が大きくなってしまい装置規模上問題であるため、実用的な観点から(e)のようなパターンにした。

つぎに上記の境界修正の原理を論理式で表す。図2.8のような窓枠内で、相対向する領域B_i, B_i' ($i=1,\cdots,I_b$) の各画素に対応する対象パターンの状態変数をそれぞれp_{ij}, q_{ij} ($j=1,\cdots,J_b$)、着目画素P_0が境界であることを表す状態変数をb、微小部を表す状態変数を$s_{\cdot 0\cdot}$, $s_{\cdot 1\cdot}$, s、境界マスクによる境界修正結果すなわち傷を表す状態変数を$d_{\cdot 0\cdot}$, $d_{\cdot 1\cdot}$, dとすると、

$$b=\bigvee_{i=1}^{I_b}[\{(\bigwedge_{j=1}^{J_b}p_{ij})\wedge(\bigwedge_{j=1}^{J_b}\overline{q_{ij}})\}\vee\{(\bigwedge_{j=1}^{J_b}\overline{p_{ij}})\wedge(\bigwedge_{j=1}^{J_b}q_{ij})\}],\qquad(2.6)$$

$$d_{\cdot 0\cdot}=s_{\cdot 0\cdot}\wedge\overline{b},$$

$$d_{\cdot 1\cdot}=s_{\cdot 1\cdot}\wedge\overline{b},\qquad(2.7)$$

$$d=s\wedge\overline{b}=s_{\cdot 0\cdot}\vee s_{\cdot 1\cdot}$$

となる。但し、I_bは窓枠の大きさから定まるもので、図2.8(e)の例では$I_b=4$である。また、領域対の方向により、論理を取るための参照画素数が偏らぬよう、(e)の例では$J_b=9$とした。

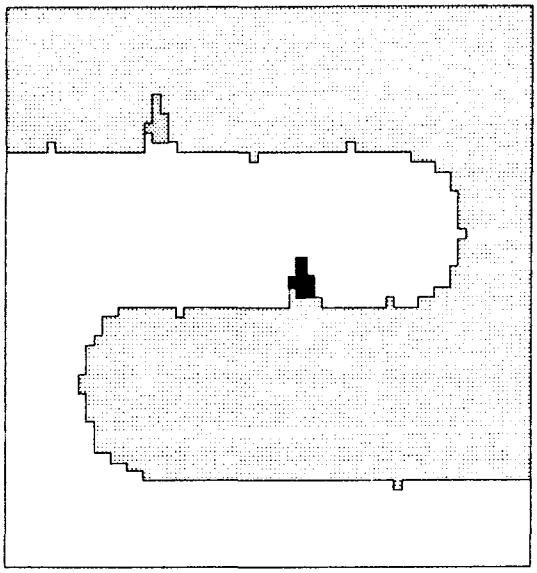
2.4.2 傷復活法

前項で指摘したように、境界修正により微小部マスクすることにより、傷を抽出できるが、境界付近の傷の一部分が除去されるという欠点があった。本項ではこのような欠点をカバーする傷復活法アルゴリズムを提案する。

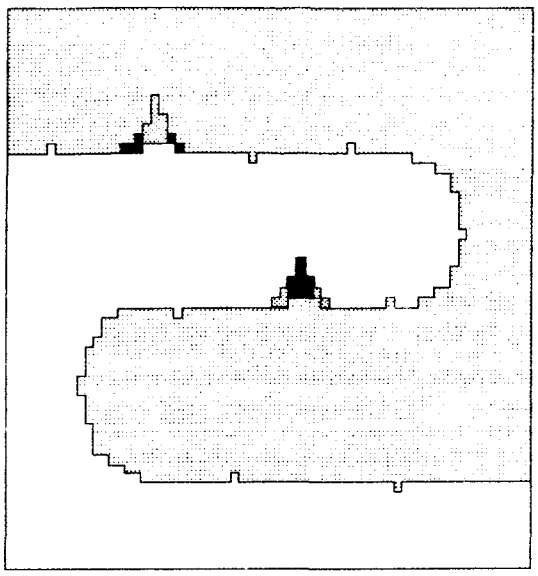
図2.9は傷復活法の原理を説明する図である。同図(a)は境界マスクされた微小部パターンである。(b)は傷復活パターンであり、除去された部分を復活させた状況を示す。同図(c)は傷復活法の原理を表すものである。図において、着目画素P_0は微小部として抽出されたが、境界修正で除去された画素である。微小部抽出アルゴリズムが微小部と判定した画素をP_0とし、P_0を中心とする小さな領域Fの中に、境界修正後に傷として残った画素があるかどうかを調べ、あればP_0も傷として判定するようにする。このようにすると、図のように傷の部分は元の微小部抽出の結果が復活するが、量子化誤差$Q_{\cdot 0 \cdot}$, $Q_{\cdot 1 \cdot}$は周りに傷がないため、復活しないことが分かる。これは、2.2の仮説から、傷の成分は境界マスクされた後でも必ず残っているが、量子化誤差は除去されてしまうということを前提にしている。

ここで注意しなければならないのは、量子化誤差が多数あり傷に連結している場合である。傷復活法で、それらはすべて傷として抽出される可能性があるが、連続的なパターンを離散化した場合、量子化誤差はランダムに発生するものであるため、それが連結する現象はむしろ稀で、そのような心配はまずないといって良い。同じように、復活のための窓枠の大きさをあまり大きく取ると、傷から離れた位置にある正常部の量子化誤差も、傷として復活する可能性があるので注意を要する。また、傷復活法は装置化する際、微小部抽出結果と境界修正結果の空間論理を実現するために、微小部抽出パターンを記憶するためのかなりのメモリが必要で、装置化する上では不利である。

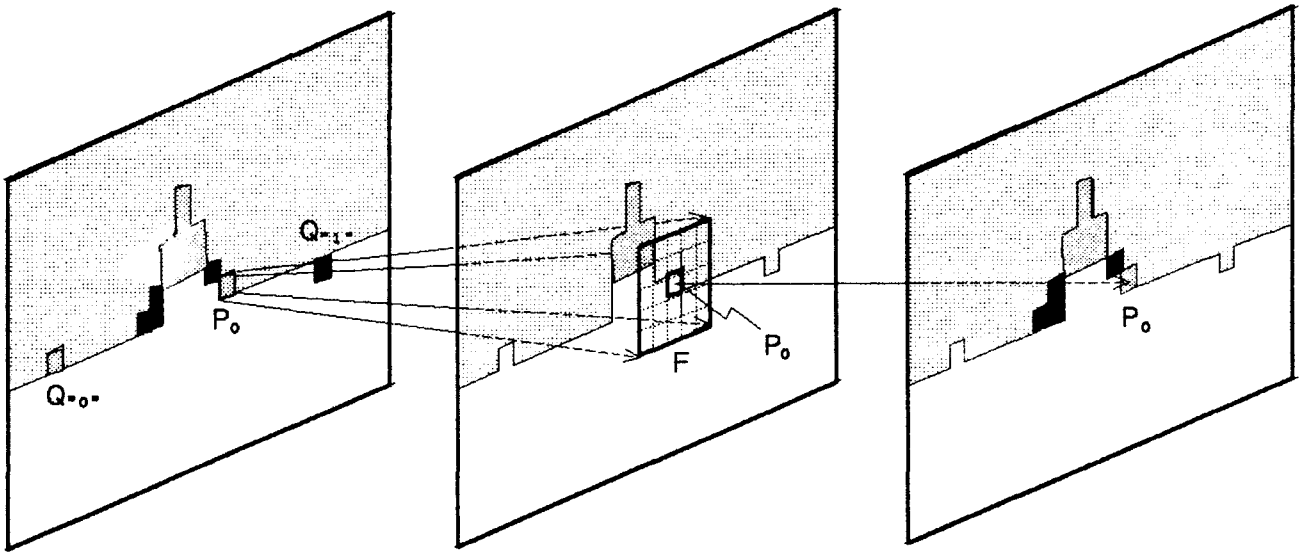
つぎに上記の傷復活法の原理を論理式で表す。図2.9(c)の着目画素P_0に対応する微小部抽出結果を表す状態変数を$s_{\cdot 0 \cdot}$, $s_{\cdot 1 \cdot}$, P_0を中心とする傷復活用の窓枠内画素の境界修正結果を表す状態変数を$d_{\cdot 0 \cdot i}$, $d_{\cdot 1 \cdot i}$, d_i ($i = 1, \cdots, I_r$)、傷復活結果を表す状態変数を$c_{\cdot 0 \cdot}$, $c_{\cdot 1 \cdot}$とすると、



(a)境界マスクされた微小部パターン
(■は"1"の微小部，□は"0"の微小部)



(b)傷復活パターン



微小部パターン

境界マスクされた
微小部パターン

傷復活パターン

(c)局部画像処理による傷復活

$$c_{*0*} = s_{*0*} \wedge \bigvee_{i=1}^{Ir} d_{*0*i}$$

$$c_{*1*} = s_{*1*} \wedge \bigvee_{i=1}^{Ir} d_{*1*i}$$

$$c = c_{*0} \vee c_{*1*}$$

図２．９ 傷復活法の原理

$$c_{\cdot 0 \cdot} = s_{\cdot 0 \cdot} \wedge \left(\bigvee_{i=1}^{I_r} d_{\cdot 0 \cdot i} \right),$$

$$c_{\cdot 1 \cdot} = s_{\cdot 1 \cdot} \wedge \left(\bigvee_{i=1}^{I_r} d_{\cdot 1 \cdot i} \right) \qquad (2.8)$$

$$c = c_{\cdot 0 \cdot} \vee c_{\cdot 1 \cdot} = s \wedge \left(\bigvee_{i=1}^{I_r} d_i \right)$$

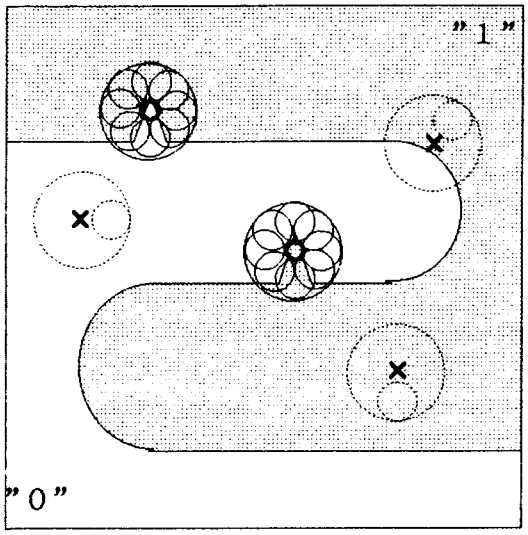
となる。但し、I_rは傷復活用の窓枠の画素数であり、図２．９（ｃ）の例では$I_r=25$である。

２．４．３　周囲判定法

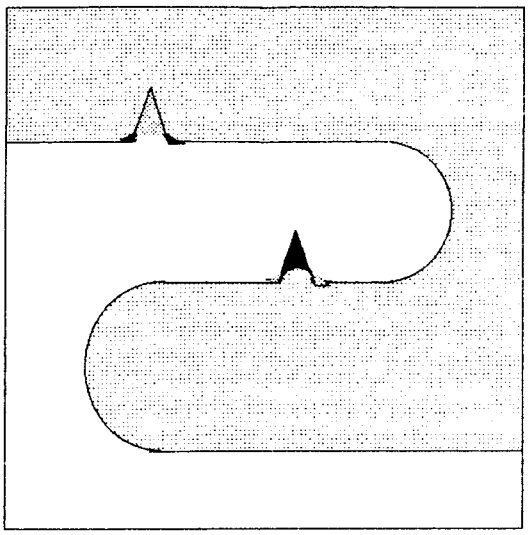
前項までに述べた境界修正法、傷復活法は、微小部抽出アルゴリズムが過剰抽出してしまう境界の量子化誤差の影響をカバーする、というバックアップ的な役割を果たしている。これに対し、量子化誤差は無視しながら傷のみを直接抽出するという更に能動的なアルゴリズムを提案する。これは前節で分類した（２）のアルゴリズムの一種である。

このアルゴリズムの原理を図２．１０に示す。例えば（ａ）のように対象パターン中の着目画素P_0の周辺にP_0と同じ状態の領域が一つでも存在すれば、微小部とみなさない、すなわち正常部と判定する。逆にP_0の周辺の何れの領域にも必ずP_0と反対の画素が存在すれば、P_0を微小部と判定する。（ｂ）は微小部抽出の状況を、（ｃ）は微小部抽出結果を示す。（ｂ）のように、正常部や境界部では必ず着目画素と同じ状態の領域が存在するが、微小部では着目画素の周囲のどの領域にも、必ず反対の状態の画素が存在することが分かる。（ｄ）は（ａ）を離散パターンで表現したものである。この論理を図２．８（ａ）のような離散対象パターンに適用すると、前節の三つの基本的な微小部抽出アルゴリズムで抽出された量子化誤差の部分は微小部として抽出されず、傷の部分のみ微小部として抽出されることが分かる。

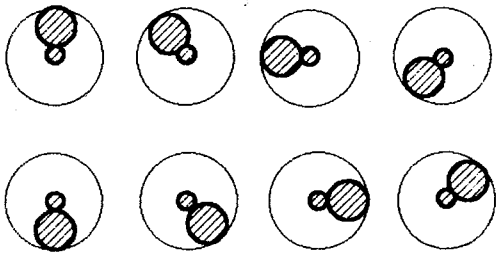
つぎに周囲判定法の原理を論理式で表す。図２．１０（ｅ）の着目画素P_0の対象パターンの状態変数をp_0，P_0周辺の画素領域D_i（$i=1,\cdots,I_d$）内の各画素の対象パターンの状態変数をp_{ij}（$j=1,\cdots,J_d$）、微小部を表す状態変数を$s_{\cdot 0 \cdot}$，$s_{\cdot 1 \cdot}$，sとおくと、



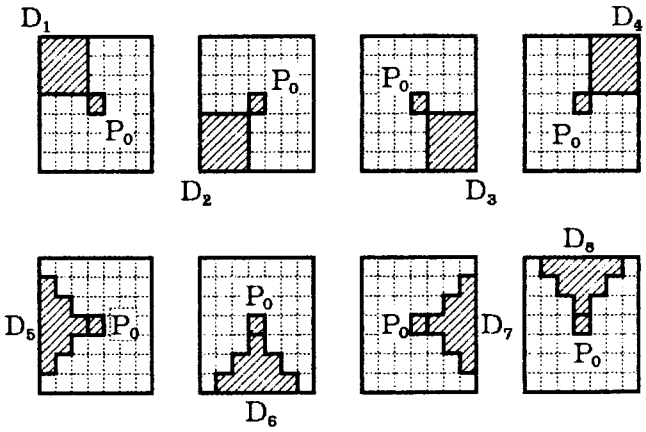
(b)対象パターンと微小部抽出
(○は微小部，×は微小部でない)



(c)微小部抽出結果
(■は"1"の微小部，▨は"0"の微小部)



(a)微小部とみなされないパターン
(◎は処理対象画素)



(d)処理の対象画素領域
(▨は処理対象画素)

$$s_{*0*}=\overline{p}_0\wedge\left(\bigwedge_{i=1}^{I_d}\bigvee_{j=1}^{J_d}p_{ij}\right)$$

$$s_{*1}=p_0\wedge\left(\bigwedge_{i=1}^{I_d}\bigvee_{j=1}^{J_d}\overline{p}_{ij}\right)$$

p_0 ：着目画素 P_0 の状態

p_{ij} ：領域Diの任意画素の状態

図2．10　周囲判定法の原理

$$s_{\cdot 0 \cdot} = \overline{p}_0 \wedge \left(\bigwedge_{i=1}^{I_d} \bigvee_{j=1}^{J_d} p_{ij} \right),$$

$$s_{\cdot 1 \cdot} = p_0 \wedge \left(\bigwedge_{i=1}^{I_d} \bigvee_{j=1}^{J_d} \overline{p}_{ij} \right), \qquad (2.9)$$

となる。但し、I_dは着目画素周辺の領域数、J_dは各領域中の画素数で、図２．１０(ｄ)の例では$I_d = 8$，$J_d = 9$である。

２．５　計算機シミュレーション

本研究で開発した傷抽出アルゴリズムの有効性を確認するために、プリント基板による計算機シミュレーションを行った。シミュレーションで用いた対象は図２．１のプリント基板である。ＴＶカメラからのアナログ画像をハードウェアで64×64画素、64階調の濃淡画像に変換した後、計算機(HIDIC500)に入力し、２値化および各傷抽出処理はアルゴリズム開発、改良がしやすいよう計算機のソフトウェアで実現した。２値化の閾値は32、窓枠の大きさは７×７画素を用いた。

図２．１１は並列処理による拡大縮小法のシミュレーション結果である。上段は拡大後縮小、下段は縮小後拡大の過程である。何れの場合も拡大縮小半径は図２．５(ｂ)と同じ１画素とした。図のように傷の部分は忠実に抽出されているが、“０”パターン、“１”パターンとも１画素ずつ、量子化誤差を微小部として抽出していることが分かる。量子化誤差として抽出された場所は、対象パターンの直角コーナ部であり、各準標準パターンにおけるこのコーナ部の先端画素が、対象パターンに復元できなかったからである

図２．１２は周囲平均法のシミュレーション結果である。この場合周囲平均半径は図２．６(ｃ)の$r_v = 2$とした。従って周囲平均円の画素数は13になる。図のように傷の部分は忠実に抽出されているが、量子化誤差は拡大縮小法に比べて多少多めに抽出されていることが分かる。これは準標準パターンに相当する周囲平均パターン(ｃ)が、傷や量子化誤差の細かい部分を平滑化してしまっているからである。

図２．１３は本研究で開発した各アルゴリズムのシミュレーション結果を処理の流れと

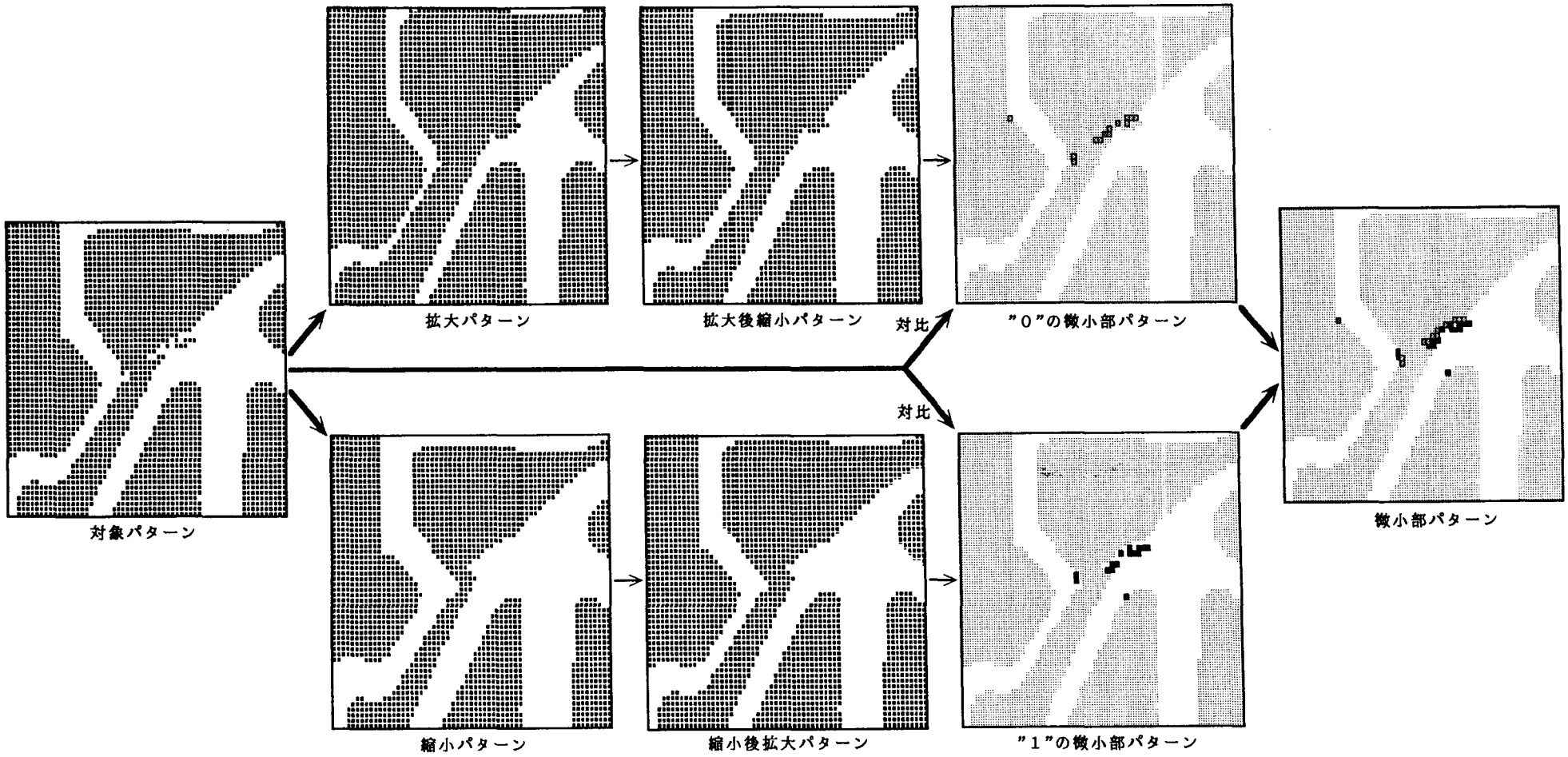
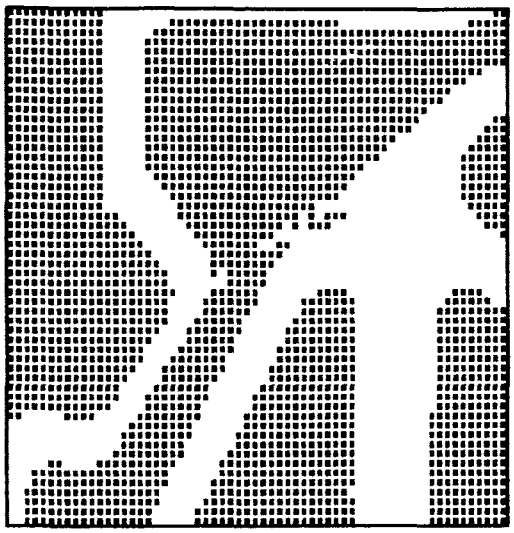
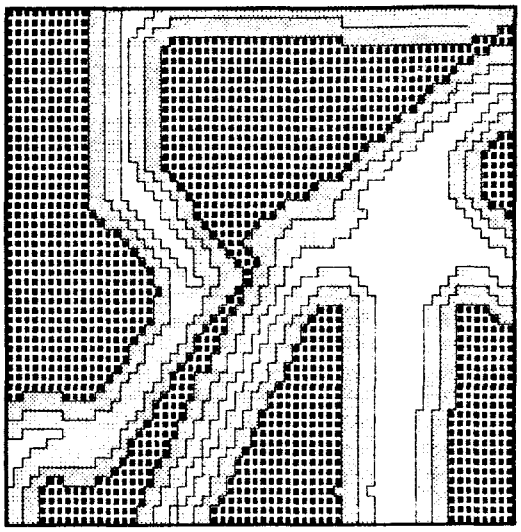


図2.11　プリント基板に対する拡大縮小法のシミュレーション結果

（▨ ;"0"の微小部
■ ;"1"の微小部）



(a)対象パターン



(b)周囲加算パターン

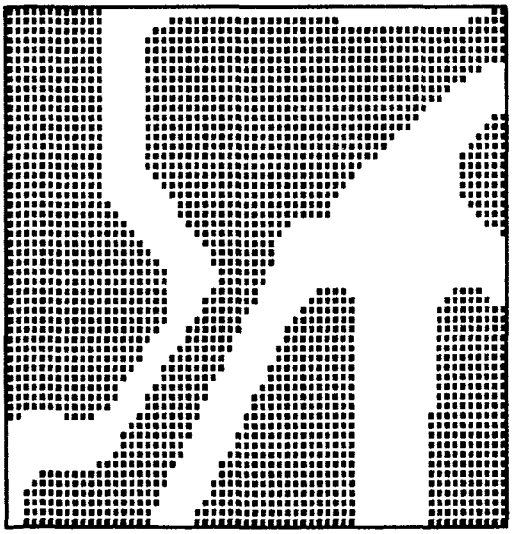
(周囲加算半径＝2 画素)

▦ ；周囲加算値＝13

▒ ； 同 上 ＝7～12

▒ ； 同 上 ＝1～6

□ ； 同 上 ＝0



(c)周囲平均パターン

(d)微小部パターン

■ ；"1"の微小部

▨ ；"0"の微小部

図2.12 プリント基板に対する周囲平均法のシュミレーション結果

対比させて比較したものである。拡大縮小法、周囲平均法のパラメータは上記と同じ値で、間隔判定法は図２．７(ｄ)、境界修正法は図２．８(ｃ)、傷復活法は図２．９(ｃ)、周囲判定法は図２．１０(ｄ)と同じパターンを用いた。図を見て分かるように、各アルゴリズムとも傷の部分は忠実に抽出されており、所期の目標を達したと云える。得られた結果を整理すると以下のようになる。

（１） 拡大縮小法、周囲平均法、間隔判定法という微小部抽出の三つの微小部抽出アルゴリズムは、境界修正法と組み合わせることにより、すべての量子化誤差を除去して傷のみを抽出し、所期の目標通り、有効に機能していることが分かる。これに対して、確かに傷復活法で、より忠実に傷パターンは若干復元されるが、上記の微小部抽出アルゴリズムと境界修正の組合せで、機能的には十分効果があることが分かった。

（２） 最終的に抽出された傷パターンを比較すると、周囲判定法、周囲平均法、拡大縮小法、境界間隔法結果による結果の順に、傷の部分の抽出画素が多くなるが、顕著な差ではない。

（３） 微小部抽出結果を比較すると、傷の部分に比べて量子化誤差のパターンに多少アルゴリズムによる違いが見られる。

（２），（３）の三つの微小部抽出特性の差は、間隔判定法の対象領域が他の二つよりやや大きめである点と、一定の閾円の対象に対して、拡大縮小法、周囲平均法、間隔判定法の順に、抽出特性の切れが悪い、という特性の違いによるものである。

以上、プリント基板を用いた計算機シミュレーション結果、本研究で開発した傷抽出アルゴリズムの有効性を確認できた。とくに(１)の結果および回路規模を考慮した結果、微小部抽出、境界修正の両アルゴリズムの組み合わせで傷抽出装置を開発し、プリント基板のパターン検査工程でのフィールド実験で実用性テストを行った。その装置化方式や実験結果については、次章で述べることにする。

２．６　適用範囲拡大への一考察

前節までに述べた傷抽出アルゴリズムは、プリント基板のように対象パターンの粗さが

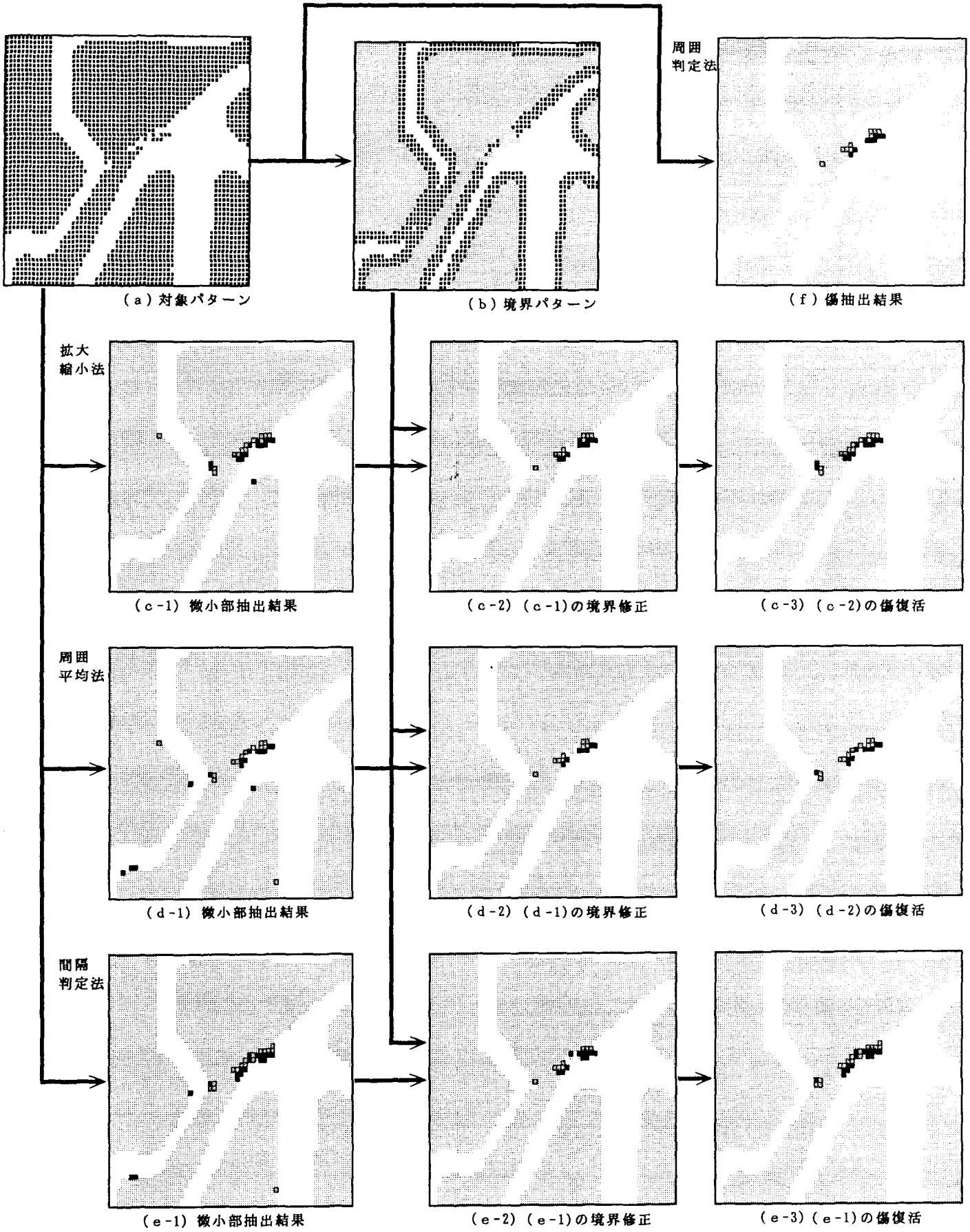


図2.13 プリント基板に対する傷抽出のシミュレーション結果

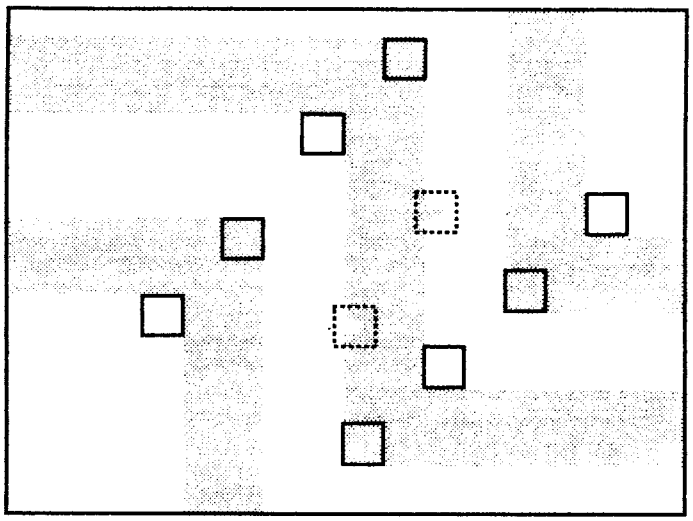
(▨;"0"の微小部/傷　■;"1"の微小部/傷)

円軌跡として表現できるものを主対象にしてきた。しかし、最近、ＬＳＩマスクのような微細なパターンを持つ対象などでは必ずしも円軌跡だけでは表し切れないものが現実には存在する。これは、ＬＳＩマスクの場合、パターンは計算機で設計され、ＸＹプロッタ、レーザカッタ、電子線描画装置などで作図や描画されるが、これらの機械での取り扱いの都合上、すべてのパターンは直線を主体に記述されるためである。

本節では、このような対象に対する傷抽出アルゴリズムの適用可能性について若干考察する。

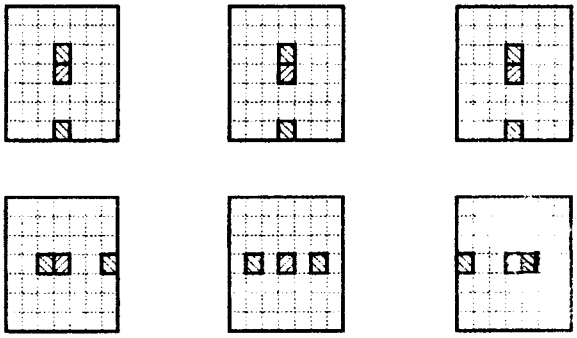
図２．１４はＬＳＩマスクパターンの一部を模式的に表した例である。同図(ａ)のようにパターンは水平方向、垂直方向の直線のみで構成される。図の中央のパターンの境界部には凹凸の傷が存在する。このような傷は電気的なテストでは検出できず、製品出荷された後、経年変化や腐食で誤動作を起こす可能性がある潜在的な傷である。このようなパターンから傷を抽出する場合、円軌跡で抽出しようとすると、凹凸傷は抽出できるが直角コーナ部も傷と見なされてしまい、後処理の負担が重くなり望ましくない。

そこで図のように円軌跡の代わりに４角形の軌跡を考えると、直角コーナは抽出されなくなる。例えば間隔判定法では、同図(ｂ)のように水平垂直の画素構成だけを考えれば良い。また、周囲平均法では同図(ｃ)に示すように画素領域の形状を十字状に取ることにより、直角を保存した準標準パターンを創成できる。周囲平均法のこの性質を利用して、第５章で述べるＬＳＩ位置認識のノイズ除去に活用する。また、幸いにもこのような斜め成分がない水平垂直成分だけのパターンでは、量子化誤差が発生しにくいため、境界修正法の負担も円軌跡パターンに比べて軽くなる。更に、４角形の縦と横のサイズは独立に設定できるため、必要に応じて水平方向と垂直方向の抽出特性を制御できる利点がある。

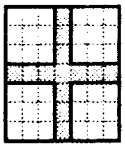


(a4 角形軌跡による傷抽出

(□ ；傷
□ ；正常)



(a)間隔判定法の処理対象画素の例



(a)周囲平均法の処理対象画素の例

図2.14　水平、垂直方向の直線のみからなるパターンの傷抽出

2.7 結言

プリント基板などの複雑パターンを持った対象の傷抽出アルゴリズムを開発し、以下のような結果を得た。

（1） 開発した傷抽出アルゴリズムは、人間のパターン認識能力に類似した対象パターンの“粗さ”を利用するものである。これにより、正常なパターンを記憶するための膨大なメモリや、パターン同士の正確な位置合わせなどが一切不要のため、極めて実用的な価値が高い傷抽出アルゴリズムを開発できた。

（2） 傷抽出アルゴリズムの核である微小部抽出アルゴリズムは、（i）準標準パターンを創成する方法と、（ii）直接微小部を抽出する方法に大別される。（i）のアルゴリズムとして、拡大縮小法、周囲平均法、（ii）のアルゴリズムとして、間隔判定法、周囲判定法を開発した。各アルゴリズムの原理を提案し、具体的な処理内容を論理式で表現した。

（3） 傷抽出アルゴリズムとして、（a）拡大縮小法、周囲平均法、間隔判定法の三つと境界修正法、傷復活法を組み合わせる方法、（b）周囲判定法により直接傷を抽出する方法、を開発し、プリント基板を適用例とした計算機シミュレーションで、その有効性を確認した。また開発アルゴリズムのうち、傷復活法は装置規模が複雑になるという欠点がある。そこで、シミュレーションした結果、傷復活を行わなくても微小部抽出アルゴリズムに境界修正法を組み合わせた方法で十分実用性があり、装置化に適することが分かった。

本章で述べた傷抽出アルゴリズムは、“粗さ”による識別という人間のパターン認識能力にヒントを得て開発した画像処理技術である。このような“粗さ”という汎用性のある物差しは、単にプリント基板に留まらず、原理的にはＩＣやＬＳＩのフォトマスクのような２値で表される対象の傷検査へも適用できる。この意味で、本研究で開発した傷抽出アルゴリズムは、今まで技術的困難さゆえに未開拓だった、複雑なパターンを持つ対象物の質的な性状を、自動的に認識するための一つの突破口となったと考える。

なお本章で得られた結果に基づいて、回路方式を検討しその評価を行った。また傷抽出装置を開発し、プリント基板の傷検査工程でのフィールド実験を行った。これについては次章で述べることにする。

参考文献

(1) 江尻，太田，池内："マシンビジョン"，昭晃堂，第１章(1990-5)

(2) 目瀬，池田，鳥野，江尻："プリント基板の傷認識"，昭４８電学全大，pp.1823-1824(1973)

(3) 目瀬，鳥野，池田，江尻："複雑パターンを対象とした傷抽出装置方式"，電学論Ｃ，Vol.94-C，No.5，pp.89-96(1974-5)

(4) Ejiri M., Uno T., Mese M. and Ikeda S. : "A Process for Detecting Defects in Complicated Patterns", Computer Graphics and Image Processing, Vol.2, p.326-339(1973)

(5) 鳥野，目瀬，江尻："複雑パターンの傷認識"，電学論Ｃ，Vol.95-C，No.3，pp.53-60(1975-3)

(6) 鳥野，目瀬，池田，江尻："複雑パターンの異常認識"，昭４８電学全大1347 ,pp.1821-1822(1973)

(9) 秋山，磯田，鳥野："パターン認識技術の検査への応用"，日立評論，Vol.59，No.11，pp.908-912(1977-11)

(10) 秋山他４名："エナメル線自動欠陥検査装置"，1977計測自動制御学予稿集，No.2701(1977-8)

(11) Nakagawa Y. et al. : "Study on Automatic Visual Inspection of Shadow-Mask Master Patterns", IFAC Symp. on Information-Control Problems in Manufacturing Technology(1977-10)

(12) Kuni A. et al. : "Study on Automatic Inspection Defects on Contact Parts" IFAC Symp. on Information-Control Problems in Manufacturing Technology (1977-10)

(13) 岡本他２名："円形部品の高速自動外観検査法の開発"，1975計測自動制御学予稿集，No.3606(1975-8)

(14) 嶋，柏岡，安江："部分画像の並列切り出し照合方式に基づく捺印パターンの欠陥検出"，信学論(Ｄ)，Vol.J69-D，No.3(1986-3)

(15) 嶋，柏岡，加藤，江尻："画像分割型頻度分布に基づくプラスチック部品表面の欠陥検出手法"，信学論(D)，Vol.J68-D, No.7, pp.1384-1391(1986-3)

(16) Watkins L. S. : "Integrated Circuit Photomask Inspection by Spatial Filtering, Solid State Technology", (1969-9)

(17) Watkins L. S. : "Inspection of Integrated Circuit Photomasks with Intensity Spatial Filters", Poc. IEEE, Vol.57, No.9, p.1634(1969-9)

(18) Damman H. and Kock M. : "Removal of Nonperiodic Structures from a Periodic by Means of Spatial Filters", Optics Communications, Vol.3, No. 4, p.251(1972)

(19) Axelrod N. : "Intensity Spatial Filters Applied to Defect Detection in Integrated Circuit Photomasks", Proc. IEEE, Vol.60, No.4, (1972-4)

(20) Brunning J. H., Feldman M., Sitting E. K. and Tousend R. L : "An AutomatedMask Inspection System-AIMS", IEEE Trans. Electron Devices, Vol.ED-22, No.7, pp.487 (1975)

(21) 栗村，中嶋："ＬＳＩウェハ欠陥検査技術"，Semiconductor World, P112(1984-4)

(22) Hara H., Akiyama N. and Kawasaki K. : "Automatic Inspection System for Printed Circuit Board", IEEE Trans. on Pattern Analysys and Machine Intelligence, Vol.PAMI-5, No.6, pp.623-630(1983-12)

(23) Jervis, J. F. : "A Method for Automating the Visual Inspection of Printed Wiring Boards", IEEE Trns. on Pattern Analysys and Machine Intelligence, Vol.PAMI-2, pp.77-82(1980)

３．　複雑パターンの傷抽出装置方式

３．１　緒言

プリント基板やＩＣ･ＬＳＩマスクなどのように、それ自体が複雑なパターンをもつ対象の傷などの異常検査は、従来ほとんど人間の目に頼らざるを得なかった。この種の検査は、視覚による物体認識のうちでも質的な性状認識[(1)]の分野に属するものであり、従来の幾何学的な性状の認識アルゴリズムでは、容易に認識しえないものでった。そのため、本研究で研究・開発を行った、複雑なパターン中の傷というような質的な異常性認識技術[(2)～(6)]は、従来から自動化･省力化のネックになっていた目視検査に対して、一つのブレークスルーになったと考える。

前章では、本研究で開発したパターンの“粗さ”を利用した傷抽出アルゴリズムについて述べた。各アルゴリズムは、正常パターンを標準パターンとして持つ必要がないため、それを記憶するメモリが不要で、位置合わせのようなわずらわしい問題も生じない。したがって、装置化が比較的簡単で、しかも処理速度も極めて速くできるという利点があり、実用の可能性が大きいとの結論を得た。

本章では前章の結論に基づき、開発した傷抽出の各アルゴリズムを回路方式を述べるとともに、傷抽出アルゴリズムを回路的な側面から評価を行う。評価する項目は、(ｉ)参照する窓枠中の画素数、(ii)２入力NAND, NORゲート換算の総ゲート数、(iii)同じ換算の最大ゲート段数の三つである。(ｉ)は傷抽出を行うために対象から利用する情報量、(ii)は回路規模、(iii)は処理速度の目安になるからである。また、本研究では、これらのアルゴリズムの有効性を確認するため、拡大縮小法、周囲平均法、間隔判定法という微小部抽出アルゴリズムと、境界修正法を組み合わせた傷抽出装置を開発した。[(2)(4)(5)(7)～(9)]　前章で述べた局部画像処理は、ハードウェア化するためのポイントとなる技術で、本章では、局部画像処理技術に基づく前章の各アルゴリズム(除傷復活法)のハードウェア実現方式を考察し、開発した傷抽出装置を用いた傷検査工程におけるフィールドテストの結果[(2)]などについて述べる。

３．２　傷認識装置の概要

本装置の傷抽出の基本は並列情報処理である。これを実現する一つの方法として、空間回路網によるフィルタリングがあるが、装置規模の点から実用的ではない。これに対し、ここでは局部並列処理を順次画面全体に施す方式を採用した。これにより、比較的簡単な回路で、しかも画像入力とほぼ同時に出力が得られるいわゆる実時間処理が可能となった。本章では局部並列処理をベースとする傷抽出装置の全体構成について述べる。

図３．１は傷抽出装置の構成である。この装置の基本動作を説明する。まずＴＶカメラで対象の画像が入力され、アナログ電気信号に変換される。次にこの信号は直流再生回路を経由して２値化され、２次元局部画像読出し回路で画面(320×240画素)中の７×７画素の２次元窓枠情報が画像の入力と同期して逐次(６ＭHz)読出され、微小部抽出回路および境界修正回路へ送られる。境界修正回路において、微小部抽出回路で抽出された微小部は、境界抽出回路で抽出された境界信号でマスクされ、傷抽出信号が出力される。この信号は抽出結果ディスプレイ上にその種類(黒の傷か、白の傷か)が色分けして表示される。それと同時に、傷判定回路で１画面あたりの傷の総面積が求められ、それがあらかじめ設定した値より大きい場合には、不良表示ランプが点灯され、リジェクト信号が出力される。

この傷抽出装置を以下の方針で開発した。

（１）　画像入力用のＴＶカメラはビジコンを用いる。ＴＶカメラの撮像走査は、インターレースを除いた以外は水平走査約15.75ＫＨZ、垂直走査60Hzの標準走査方式を採用する。

（２）　同期信号発生回路により、ＴＶカメラ、カメラ用モニタ、抽出結果ディスプレイを外部同期にし、装置に実装した各回路と同期が取れるようにタイミングを制御する。また傷信号の着目画素は、ＴＶカメラの画像走査から水平、垂直方向ともに遅れているため、表示制御回路で両者の空間対応が付くように制御する。

（３）　２値化回路は、傷抽出の分解能を向上させる目的から、浮動閾値式のものを開発する。なお比較実験できるよう、固定閾値式と切替えられるようにした。

（４）　２次元局部情報が読み出されてから、傷抽出を行うまでの時間は、局部画像読み出し回路の情報を更新する周期(≒167ns)より短くなるようにした。

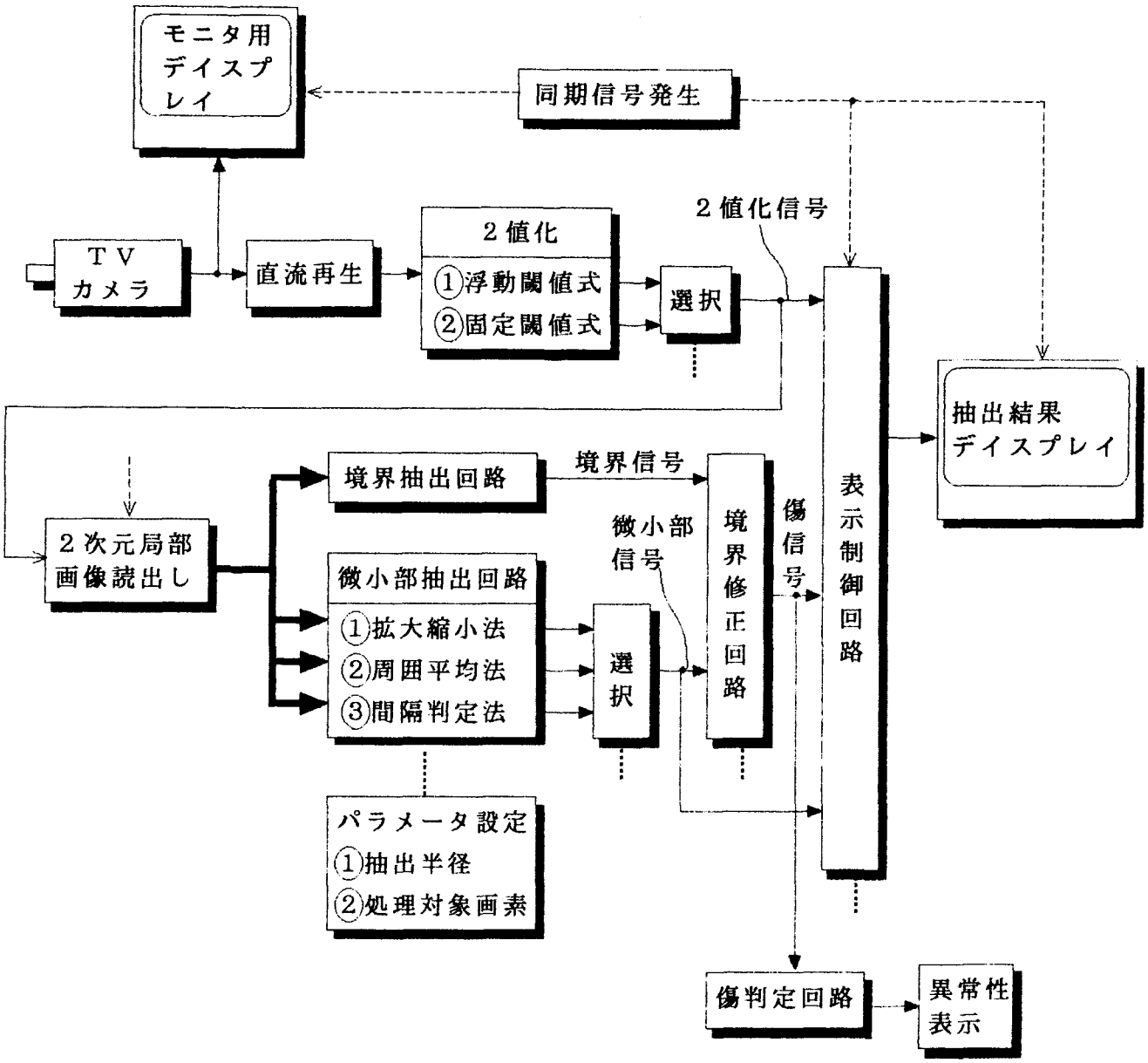
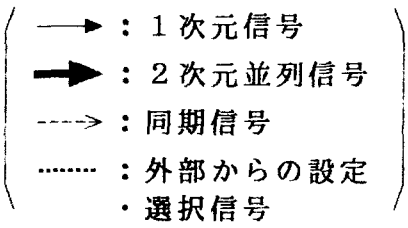


図３．１　傷処理抽出装置の構成



（5） 窓枠の大きさを７×７画素にしたのは回路規模を抑えるためと、微小部抽出性能上十分と判断したからである。

（6） 微小部抽出回路は、前章の拡大縮小法、周囲平均法、間隔判定法を採用した。各アルゴリズムの傷抽出性能の比較ができるように、いずれか一つが選択できるようにした。また傷抽出用半径のパラメータや、対象画素領域を外部から指定できるようにした。

（7） 実験に便利なように、表示制御部で微小部抽出結果や傷抽出結果と対象パターンを重ねて表示したり、単独でも表示できるようにした。また１画面あたりの傷の総面積を表示させるようにした。

３．３　各回路の動作原理

３．３．１　画像２値化

傷を抽出するためにアナログ画像信号を２値化する場合、２値化回路としては分解能が高いこと、シェーディング（ＴＶカメラの周辺部の感度が中央部より低いこと）などに対して安定に動作することが望ましい。本装置ではこれを実現するために、“浮動２値化回路”を開発した。

これは図３．２に示すように、２値化のための閾値を画像の濃淡変化に応じて変化させるものである。すなわち、図の①のように、対象パターン中に粗大部と極端に小さな傷が含まれる場合を考える。②のように粗大部の画像信号は十分なレベルに達するが、微小傷の信号レベルは、ＴＶカメラの分解能の制限から、少ししか変化しない。これを、たとえば閾値を画像信号の最高レベル（＝V_{max}）と最低レベル（＝０）の中央（＝$V_{max}/2$）に固定した場合、③のように２値化信号には、このような傷の情報は含まれてこない。この情報が含まれるようにするには、画像信号が低レベル付近では閾値を下げ、高レベル付近では上げるようにし、もとの信号を若干遅延させた信号を閾値とすれば良い。この閾値で２値化した結果が④である。図のように、固定式の閾値では抽出できなかった小さな傷でも、

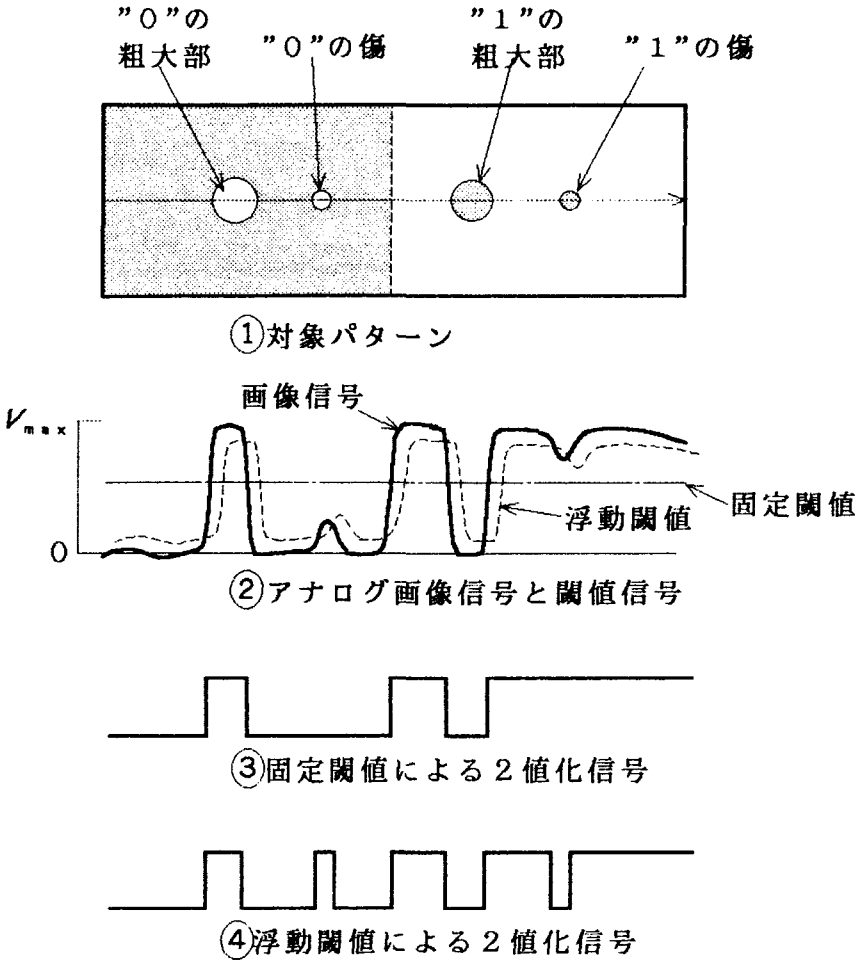


図3．2　浮動2値化の原理

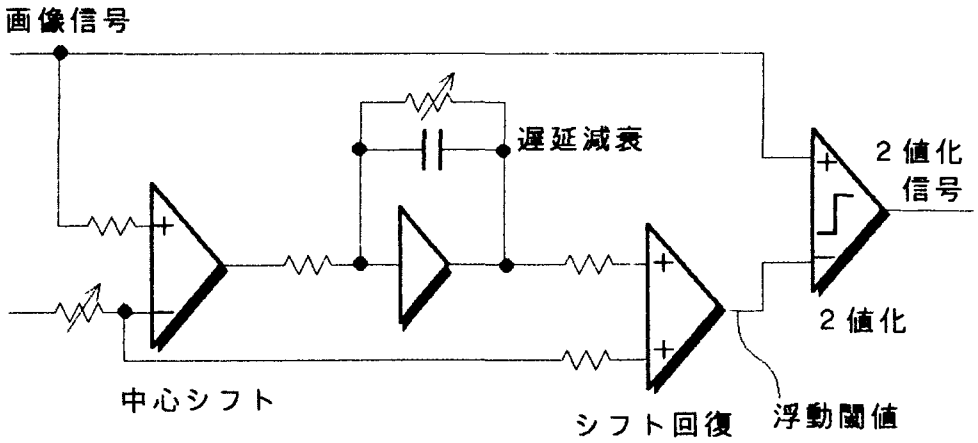


図3．3　浮動2値化の回路例

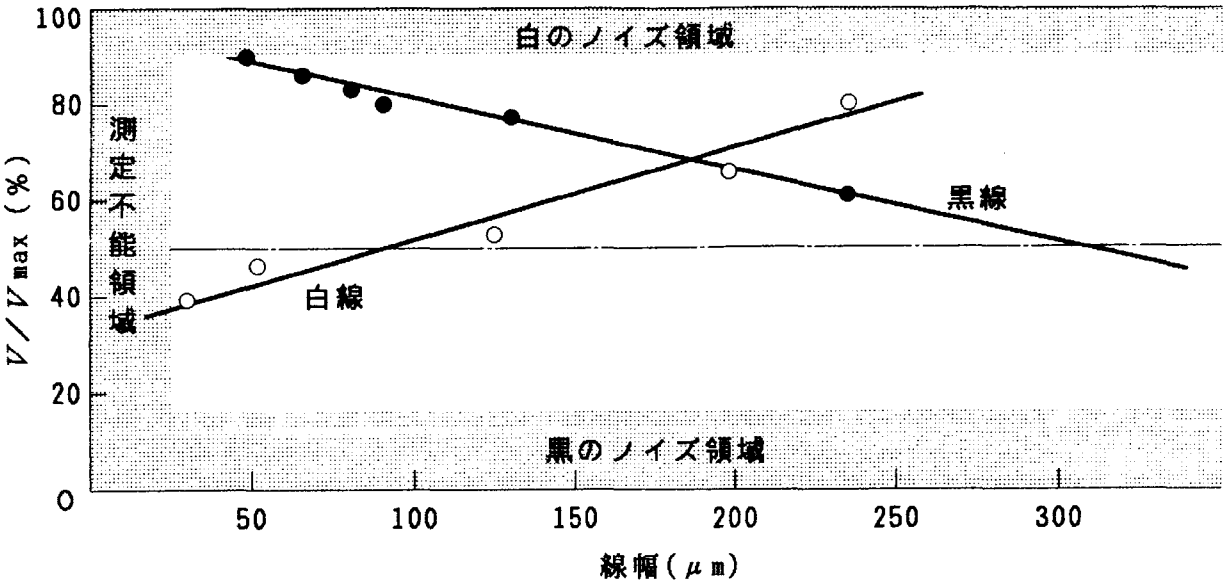


図３．４　ＴＶカメラからの画像信号の分解能

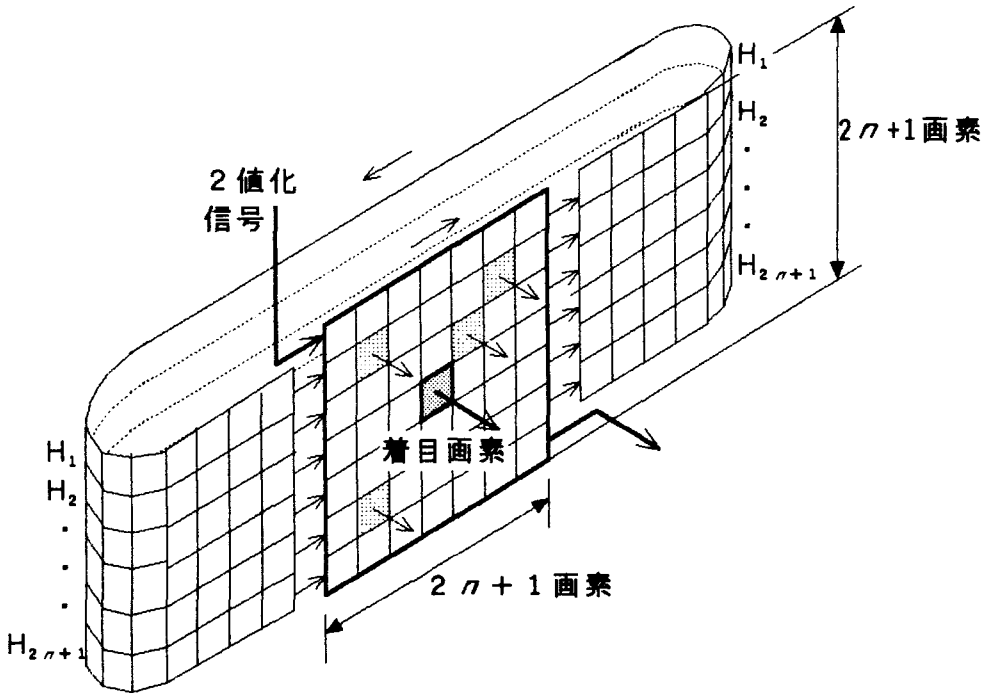


図３．５　２次元局部画像読出し回路

閾値を浮動式にすることにより、抽出できるようになる。

図３．３は浮動２値化回路の一例を示す。図において入力されたアナログ画像信号は、まず第１段目の演算増幅器で最高レベルと最低レベルの中央が０レベルになるように中心シフトされる。その出力を第２段目の演算増幅器で遅延減衰し、続いて第３段目の演算増幅器でシフトされたレベルを元に戻す。この出力が浮動閾値信号である。従って、浮動閾値信号で元の画像信号を４段目のコンパレータで２値化すれば、図３．２の④ような２値化信号が得られる。ここで第２段目の演算増幅器の減衰量は１よりやや小さく設定し、遅延時間は300ｎｓ（２画素弱）程度とした。

次に、浮動２値化の抽出限界を求めるため、ＴＶカメラからのアナログ画像信号の分解能を調べた。図３．４はＴＶカメラからの画像信号の分解能であり、視野の垂直方向に平行に黒線、白線をＴＶカメラで提示し、その画像信号のレベルをＶとした時、各線幅とV/V_{max}の関係を示すものである。ただし、V_{max}は図３．２の①の最大値であり、視野を36×48mm²とした。図から次のことがいえる。

（１）　同じ線幅に対しては、分解能は黒（＝“１”）よりも白（＝“０”）のほうが高い。それゆえ、閾値を50％と固定にした場合、黒は300μｍ、白は90μｍ以上の線幅が抽出できる。

（２）　閾値を固定して黒、白を均等に求めるためには、閾値は70％が適当であり、その場合、190μｍ以上の線幅が抽出できる。

（３）　雑音を抽出しない程度に閾値を浮動にした場合、黒線は70μｍ、白線は50μｍ以下まで抽出できる。

これにより、（２）の固定閾値の２値化に比べて、３倍近く分解能が向上できることが分かった。従って、ある種のプリント基板では分解能が70μｍ程度要求されるので、視野として少なくとも36×48mm²以下に定め、浮動２値化を行う必要があると結論できる。

３．３．２　２次元局部画像読出し

前項のようにして２値化された画像信号は、局部画像切り出し回路でサンプリングされ、７×７画素の並列窓枠情報が読みだされる。これは図３．５に示されるように、H_1，H_2，

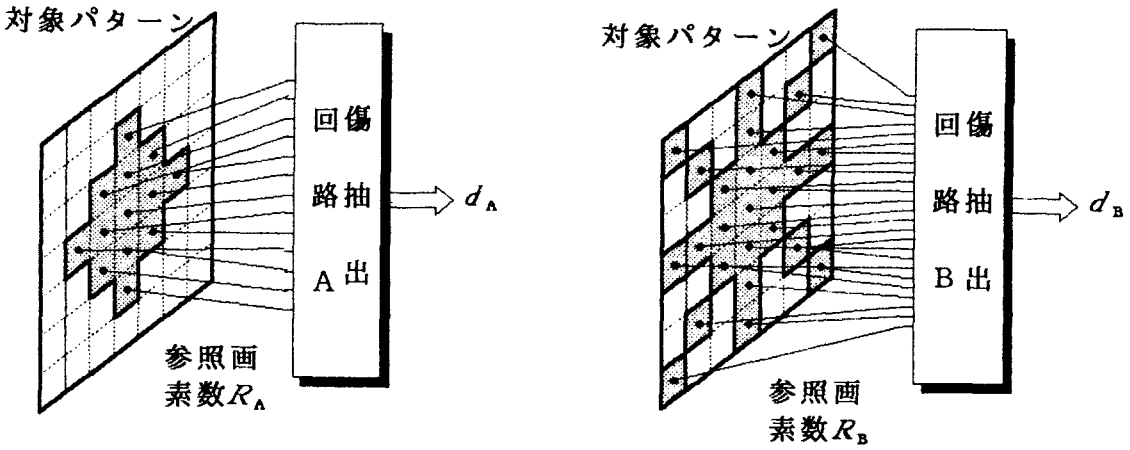
…，H_7のシフトレジスタ(シフトバッファ)からなり、それぞれら線状に結合されていて、情報は６MHzの周期で図の矢印の方向へシフトされる。H_1，H_2，…，H_6の長さは320＋62ビットで、これは画面の水平方向の１ラスタ分に相当する(ただし、６２ビットは水平の帰線期間の時間長に対応する)。H_1，H_2，…，H_6の前７ビットとＨ７の全ビットは読み出し部となっており、画像入力と同期して情報がシフトされるので、この部分からはあたかも画面中を２次元領域が走査するような情報が得られる。

この読出し部の中心に対応する画素は前章で定義した着目画素である。７×７画素の並列情報から傷を抽出する場合、その結果を７×７のいずれの画素に対応させるかにより処理方式は変わるが、ここでは装置規模を簡単にするため、着目画素を中央の１画素に対応出力させる方式を採用した。

３．３．３　評価指標の提案

開発した傷抽出処理装置は、主として、研究当時容易に入手でき、かつ高速処理に適したＴＴＬ(Transistor Transistor Logic)レベルのＳＳＩ(Small Scale Integration)またはＭＳＩ(Middle Scale Integration)と呼ばれるＩＣで組み立てた。しかし、このような半導体部品は日進月歩で変化し、ますます、低価格、高機能、高性能、高集積なＩＣ、ＬＳＩが入手できるようになって行くため、単にＩＣの数だけでは、例えば回路規模の目安にならない。そこで、傷抽出回路をより一般的・普遍的に見積もれるよう、図３．６に示すような傷抽出回路に関する新たな評価指標を提案した。

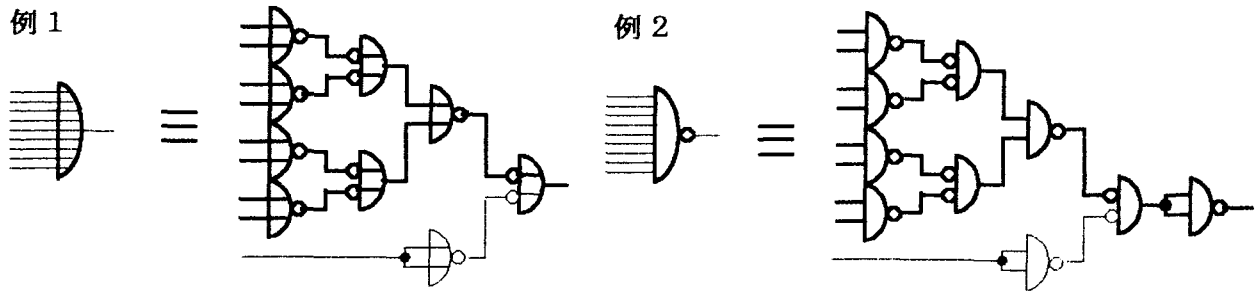
さて、この指標は、各回路の傷抽出特性が同じ、すなわち同一対象の傷を傷として抽出する画素数が同じだと仮定して、(１)傷抽出回路が２次元局部画像を参照する画素の数、(２)アルゴリズムを実現するための回路規模、(３)回路が傷抽出を完了するまでの処理時間の三つである。(１)の参照画素数をＲで表す。これは、傷抽出回路がどれだけ対象に関する情報量を利用して、傷抽出というパターン認識に関する共通の目標が実現できるかを比較するための目安である。例えば、図３．６(ａ)のように、二つの傷抽出回路Ａ，Ｂを比較した場合、対象パターンの参照画素が少ないＡの方がＢより傷を効率良く抽出できる、といえる。ただし、あくまで情報量であるから、同一の画素を何度利用しても１画素と数



(a)参照画素数

基本ゲート

	2入力 NAND	2入力 NOR
正論理入力		
負論理入力		



9ゲート4段　　10ゲート5段

——クリティカルパス

(b)総ゲート数・最大ゲート段数

図3．6 傷抽出回路指標の提案

える。従って、例えば、本研究の微小部抽出、境界修正の両アルゴリズムを組み合わせて傷抽出を行なうような場合は、各回路の参照領域の包絡領域の画素数になる。例えば本研究で開発した傷抽出装置の場合、窓枠は７×７画素であるから、参照画素数は窓枠全部の画素を利用する場合が最大で49画素である。

いっぽう、(２)および(３)は、同図(ｂ)のように、ＬＳＩの回路規模の目安として広く使われている２入力NANDゲート、NORゲートで換算した総ゲート数Ｇおよびクリティカルパスにおける最大ゲート段数Ｄで見積ることにした。(３)はＴＴＬ、ＣＭＯＳ(Complementary Metal Oxide Semiconductor)などの半導体デバイスに依存するため、ここでは、より一般的な最大ゲート段数を採用した。本研究での目的は、傷抽出装置の１画素あたり167nsの時間に対して、ＴＴＬのＳＳＩやＭＳＩで組んだ各回路が、実際には試作しなかった回路も含めてどの程度の余裕で処理できたのかを推定することである。

３．３．４　微小部抽出

図３．１で述べたように、開発した傷抽出装置では、２次元局部画像読み出し回路で得られた並列情報は二つに分けられ、一つは微小部抽出回路へ送られる。微小部抽出回路には、拡大縮小法、周囲平均法、間隔判定法の三つを実装した。

各回路の説明を行なうにあたり、その準備として、７×７画素の窓枠内の各画素P_i ($i=1,\cdots,$)の状態をp_iとおくと、p_iの並列論理処理として、例えば、論理和を$\bigvee_i p_i$、論理積を$\bigwedge_i p_i$、論理否定を$\overline{p_i}$のように表記することにする。

（１）　拡大縮小法：

図３．７は並列処理の拡大縮小法の回路で、拡大縮小半径が１画素の場合である。図の上段１段目の論理和ゲートで“１”パターンの拡大、２段目の論理積ゲートで拡大されたパターンの縮小、最後の３段目の排他的論理和ゲートで拡大縮小後の結果と着目画素の対比が行われ“０”の微小部を決定する。同様に下段の論理積、論理和、排他的論理和の各ゲートの処理により“１”の微小部の状態を決定する。最後に“０”,“１”の微小部状態変数の論理和により微小部の状態が確定する。

次に上で定義したこの回路に関する各指標を求める。まずＲは13画素である。次にＧは、５入力論理積が５ゲート、５入力論理和が５ゲート、１否定入力付排他的論理和が５ゲー

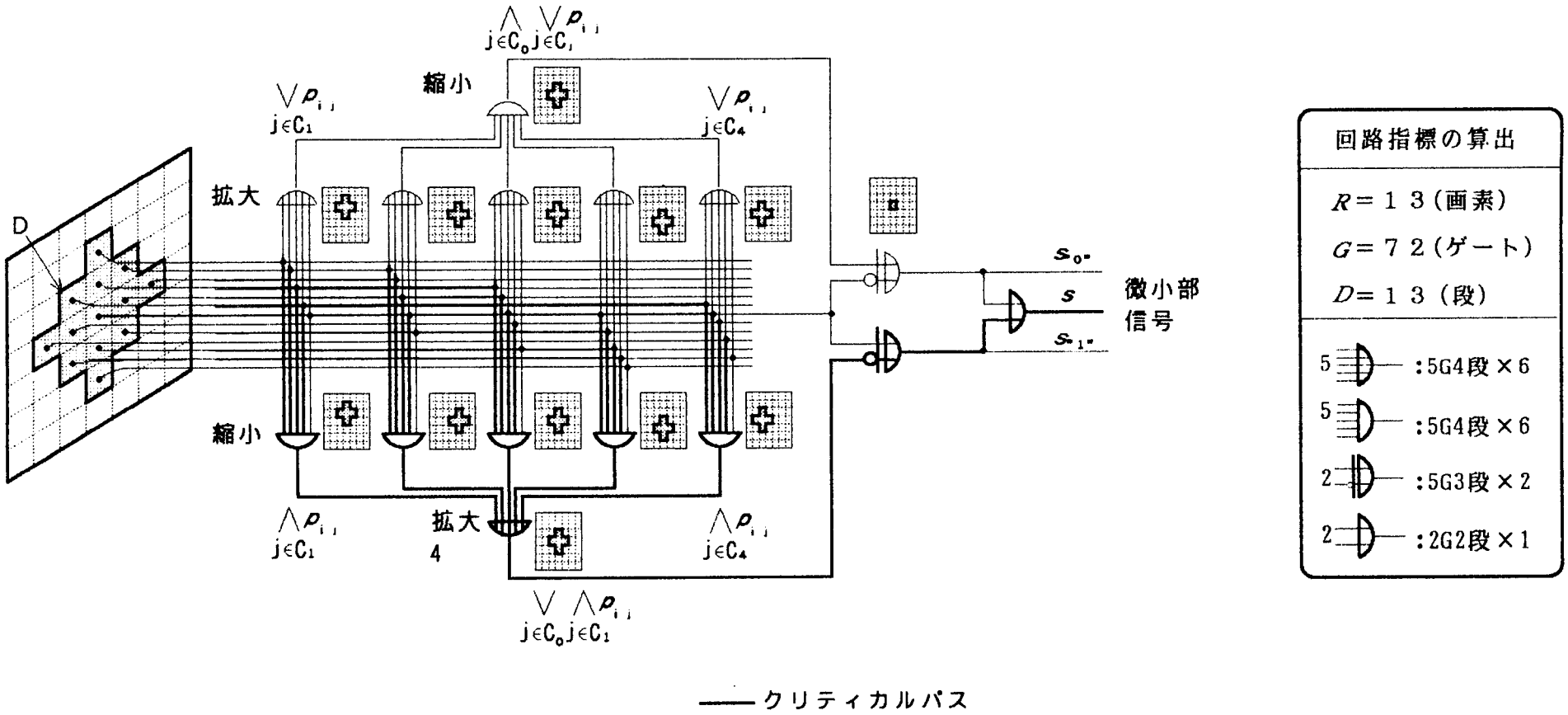


図３．７　拡大縮小法による微小部抽出回路

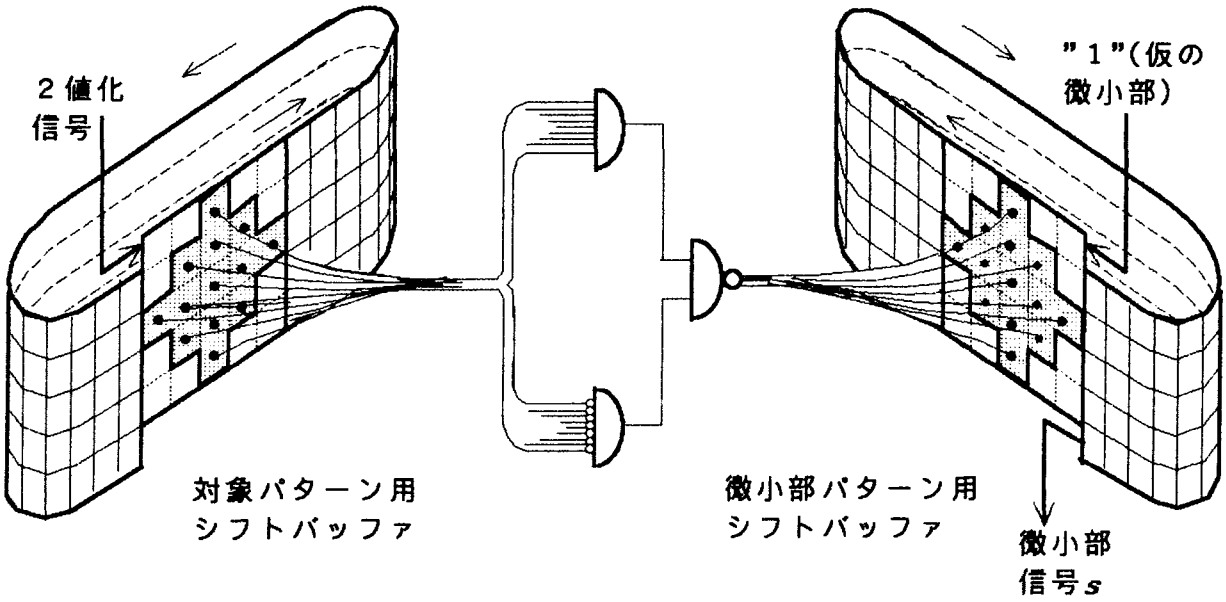


図3．8　拡大縮小法と等価な回路

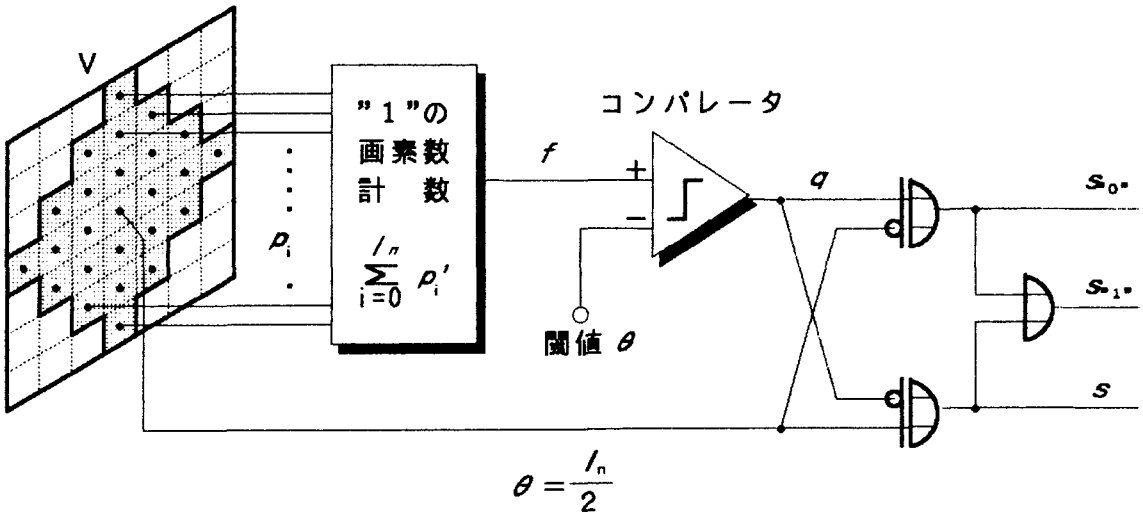


図3．9　周囲平均法による微小部抽出回路

ト、２入力論理和が２ゲートであるから、図の回路全体では72ゲートとなる。Ｄは下側の縮小後拡大の処理がクリテカルパスになり、２入力NAND，NORゲート換算で５入力論理積で４段、５入力論理和で４段、１否定入力付排他的論理和が３段、２入力論理和が２段であるから、クリティカルパス全体で13段となる。

ところで、本装置とアーキテクチャは異なるが、拡大縮小法を実現するための明快な方式を考案したのでここで紹介する。[10] これは“円軌跡でパターンを塗りつぶす”という本傷抽出原理をそのまま実現したものである。図３．８にその回路を示す。図のように、入力は本装置と同じ２次元局部画像読み出し回路の対象パターン用シフトバッファを用いるが、出力に微小部を一時記憶するための微小部パターン用シフトバッファを用いる方式である。このシフバッファは、局部画像読み出し用のシフトバッファと鏡面対称なものであるが、入力の７×７画素の窓枠部が並列書き込み専用エリアになっていることが、回路構成上異なる点である。ただし図のように書き込みエリアの形状は、読み出しエリアと同じ形状にしておく必要がある。この回路は次のように動作する。微小部パターン用シフトバッファには、図のように入口から“１”すなわち仮の微小部という意味の信号を常に供給しておく。そこで、対象パターン用シフトバッファの局部画像読み出し部から読み出された対象画素が、すべて“０”またはすべて“１”(すなわち対象が粗大パターン)であれば、微小部用シフトレジスタの書き込み部に“０”(すなわち粗大部という意味の状態)を書き込む。微小部用シフトバッファから見れば、書き込みが行われるのは微小部を取り消すという意味になる。そうすると微小部用シフトバッファの出力から、“０”を書き込まれなかった(すなわち微小部という意味の)画素として微小部信号が得られる訳である。

以上のような回路構成と動作原理により、“円軌跡でパターンを塗りつぶす”という基本原理が実現できる。なお読出しエリア、書込みエリアの形を変更することにより、例えば２．６で述べたような４角形軌跡で塗りつぶすことも容易に実現できる。上の説明では“０”の微小部と“１”の微小部を合成した。両者を分離したい場合は、回路規模が大きくなるが、微小部パターン用シフトバッファを２個設け、各微小部抽出回路を２系統設ければ良い。“０”，“１”の微小部を合成した微小部抽出回路を別途試作し、考案した通りの動作を確認することができた。

（２） 周囲平均法：

図３．９は周囲平均法の回路である。図は周囲平均半径が３の場合である。図の“１”の

画素数計数の部分は前章の式(2.2)に相当する。式(2.2)のfを求める方法としてアナログ方式とディジタル方式がある。アナログ方式は"1"の信号を並列的にアナログ加算すれば良い。ディジタル方式はカウンタで"1"の数を計数すれば良い。しかしアナログ方式は線形性の課題はあるものの並列的に瞬時に処理されるが、ディジタル方式は最大49画素を直列的に計数する処理になってしまい、1画素167ns内に処理を完了しない恐れがある。そこで試作では線形性を確認した上、アナログ方式を採用することにした。

ところで、上記のようにfの計数の部分はアナログ方式にしたため、上で定義した最大ゲート段数や回路規模の論理的な指標は出せないが、回路としては比較的簡単で基板1枚以下に抑えられた。参照画素数は**2.3.2**で定義したI_nに等しい。この図の周囲平均半径3の場合、Rは25画素である。また前章のシミュレーションで用いた半径2の場合、Rは13画素である。なお試作では傷抽出特性の評価がしやすいように、周囲平均半径r_vを最大3まで外部から設定できるようにした。

(3) 間隔判定法：

図 3.10に間隔判定法の回路を示す。この図は**2.3.3**の式(2.5)の$I_g=12$の場合である。この回路の特徴は、式(2.5)の$g_i \wedge \overline{p_0} \wedge g_i'$, $\overline{g_i} \wedge p_0 \wedge \overline{g_i}'$という各間隔判定処理を最初のゲートで並列に処理することである。

次に上で定義したこの回路に関する各指標を求める。まずRは、着目画素P_0が合計図の24ゲートから参照されるが、上の定義からこれを1画素と数えて、25となる。次にGは、入力に論理否定が1個付いた3入力論理積が2ゲート、第1段目の論理否定が2個付いた3入力論理積が3ゲート、第2段目の12入力論理和が12ゲート、第3段目の2入力論理和が2ゲートであるから、図の回路全体で86ゲートとなる。Dは、論理否定が2個付いた3入力論理積からのパスがクリテカルパスになり、2入力NAND, NORゲート換算で第1段目の論理否定が2個付いた3入力論理積が3段、第2段目の12入力論理和が4段、2入力論理和が2段であるから、合計9段となる。

なお試作では傷抽出特性の評価がしやすいように、間隔判定用の半径r_Gを最大3まで外部から設定できるようにした。

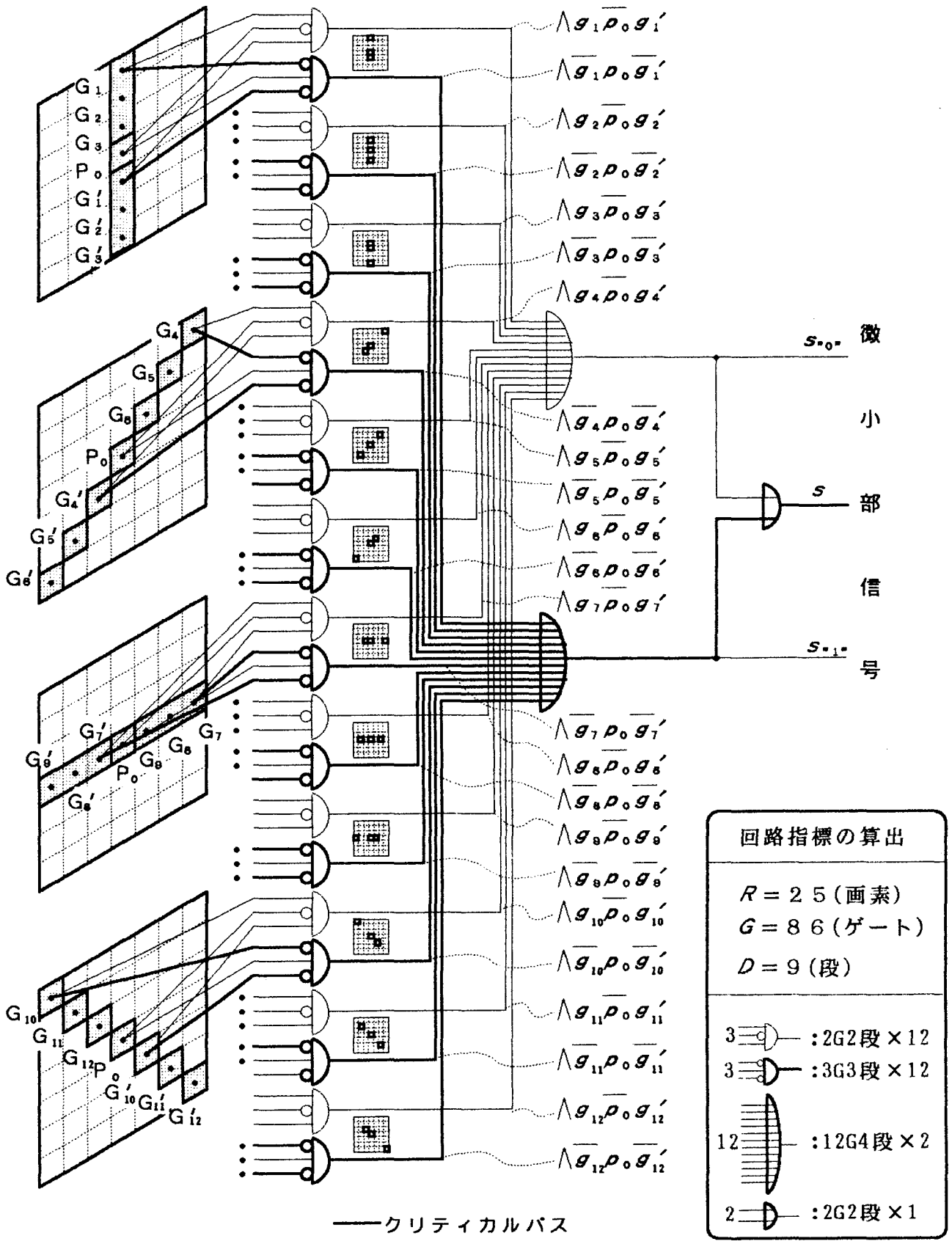


図３．１０　間隔判定法による微小部抽出回路

3.3.5 傷抽出

(1)境界修正:

以上説明した微小部抽出処理では、傷以外に正常なパターンの境界の一部や量子化誤差(離散化に起因する境界部の凹凸)を抽出してしまう。境界部修正処理はこれを修正するためのもので、これにより傷だけを抽出することができる。計算機シミュレーションの結果、処理対象を7×7画素にとる限り、いずれの微小部抽出処理によっても抽出される量子化誤差は、たかだか1画素の幅であることを確認してあるので、境界部抽出回路としては次のように構成した。

図3.11は境界修正法の回路である。画素領域B_i, B'_i $(i=1,\cdots,8)$の間の不感帯は量子化誤差を無視するためのものである。まず1段目の9入力ゲートで領域B_iまたはB'_iの画素がすべて"1"または"0"かを調べる。2段目の論理積で相対向する対領域B_i, B'_iのすべての画素が反対の状態かを調べる。3段目の論理和ゲートでこのような対領域の関係が、$i=1,\cdots,8$のうちの何れかの組合せで成り立っているかを調べ、4段目の4入力NORゲートで境界部の否定$\overline{b}$を出力する。最後の5段目の処理は式(2.7)に相当する境界修正回路で、微小部抽出結果$s_{\cdot 0 \cdot}$, $s_{\cdot 1 \cdot}$, sをマスクし、傷信号$d_{\cdot 0 \cdot}$, $d_{\cdot 1 \cdot}$, dを生成する。

次に上で定義したこの回路に関する指標を見積もる。Rは、すべての領域の包絡を取ると着目画素以外のすべての画素が参照されるから、48画素になる。Gは、4入力論理和が4ゲート、9入力NORが10ゲート、2入力論理積が2ゲート、2入力論理和が2ゲート、4入力NORが4ゲートであるから、回路全体では186ゲートになる。Dは、1段目の9入力NORゲートを通るパスがクリティカルパスになり、9入力NORゲートが5段、2入力論理積が2段、2入力論理和が2段、4入力NORが3段、最後の2入力論理積が2段であるから、合計14段になる。

なお境界判定用の対象画素のパターンは外部から設定できるようにした。

(2) 傷復活・周囲判定:

傷復活法と周囲判定法の回路は、傷抽出装置の開発対象にしなかった。前章で述べたように、傷復活法はアーキテクチャが傷抽出装置と異なり、装置規模が複雑になることと、周囲判定法は開発後にアルゴリズムを着想したためである。しかし、前章で述べたように、

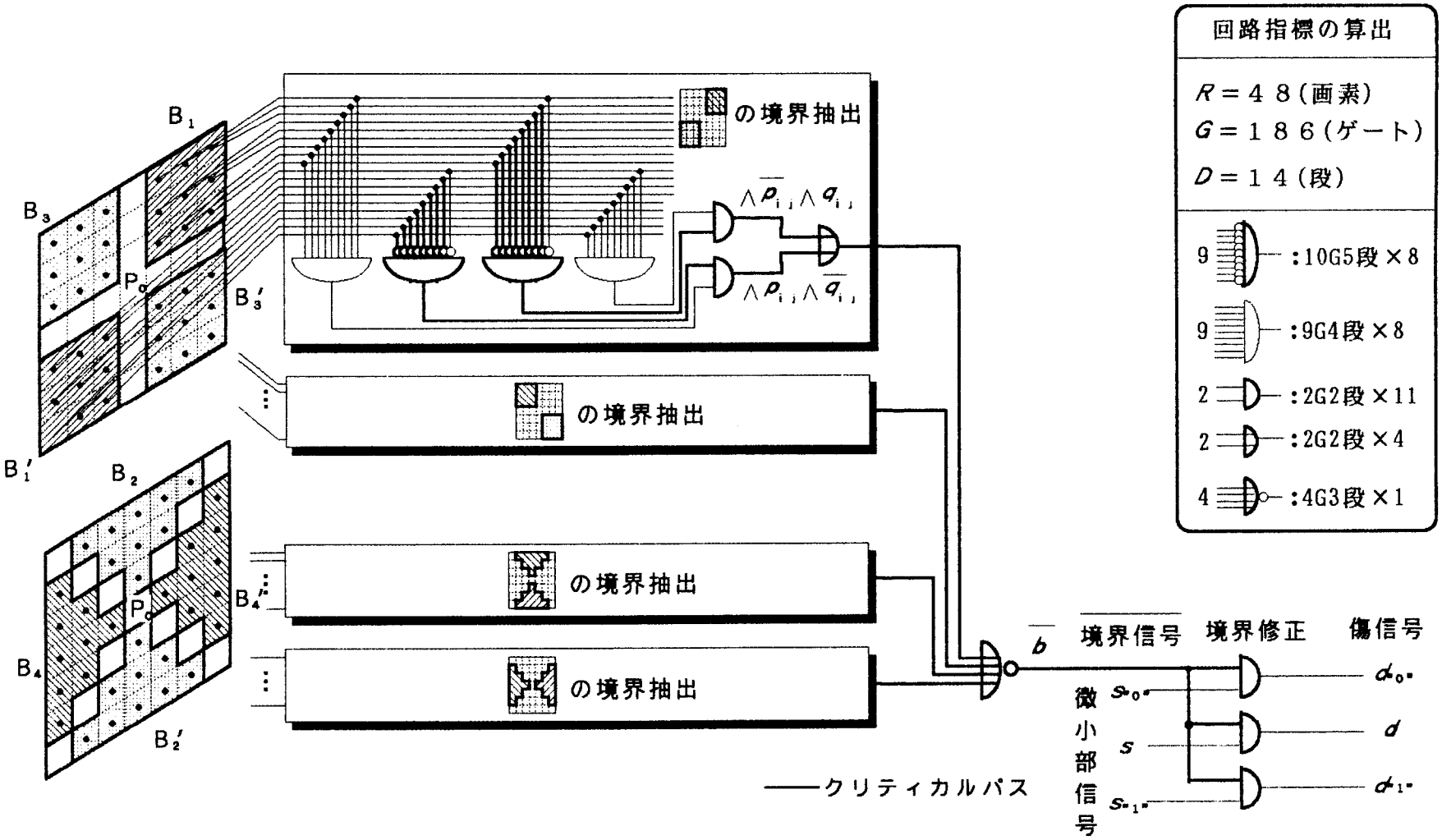


図３．１１　境界抽出・境界修正回路

周囲判定法は、量子化誤差の除去、傷抽出を同時に行なうという興味ある機能を持っていることと、アーキテクチャが傷抽出装置と同じであるため、ここではその回路方式と指標の見積りについてのべる。

図３．１２に周囲判定法の回路を示す。例えば着目画素がp_0＝“１”のとき、図の１段目の９入力NANDゲートで領域D_4に“０”の画素があるかどうかを調べる。あれば、２段目の９入力論理積で、D_4と同じ状況が他のすべての領域で成り立つかを調べ、成り立てば微小部抽出信号$s_{\cdot 0 \cdot}$が出力される。他のパスも同様である。

次に上で定義したこの回路に関する指標を見積もる。Ｒは７×７画素の窓枠のすべての画素を参照するので49画素である。Ｇは、９入力NANDが10ゲート、９入力論理和が９ゲート、９入力論理積が９ゲート、８入力論理積が８ゲート、２入力論理和が２ゲートであるから回路全体では170ゲートになる。Ｄは、１段目の９入力NANDゲートを通るパスがクリティカルパスになり、９入力NANDゲートが５段、８入力論理積が４段、最後の２入力論理和が２段であるから、合計11段になる。

３．４　傷抽出アルゴリズムの回路的評価

前項まで微少部抽出回路、境界抽出・修正回路などの傷抽出回路の基本動作および(ｉ)傷抽出のために利用する対象パターンに関する情報量の目安として参照画素数Ｒ、(ii)回路規模の目安を与える２入力AND，NORゲート換算の総ゲート数Ｇ、(iii)処理時間の目安である最大ゲート段数Ｄという三つの回路指標の算出を行なった。本節では、そのまとめとして、傷抽出アルゴリズムをこの三つの指標で回路的に評価した結果を述べる。

表３．１、表３．２は各回路に関する評価結果を比較したものである。表３．１は各回路単体、表３．２は傷抽出機能を実現するための総合的な比較である。周囲平均法は前述の理由で参照画素数のみにした。また周囲判定法は装置開発後に考案したアルゴリズムで、装置には実装されなかったが、傷抽出装置と同じアーキテクチャであり、量子化誤差対策フリーで傷を直接に求めるという特性上の興味から、ここでは、評価対象とした。表３．２で、参照画素数は各回路の参照画素の包絡を、総ゲート数は各回路の総ゲート数同士の単純加算を、最大ゲート段数は、各微小部抽出回路と境界修正回路が並列動作するため大きい方を、それぞれ取った。なお各アルゴリズムのパラメータや対象画素領域は、表の脚

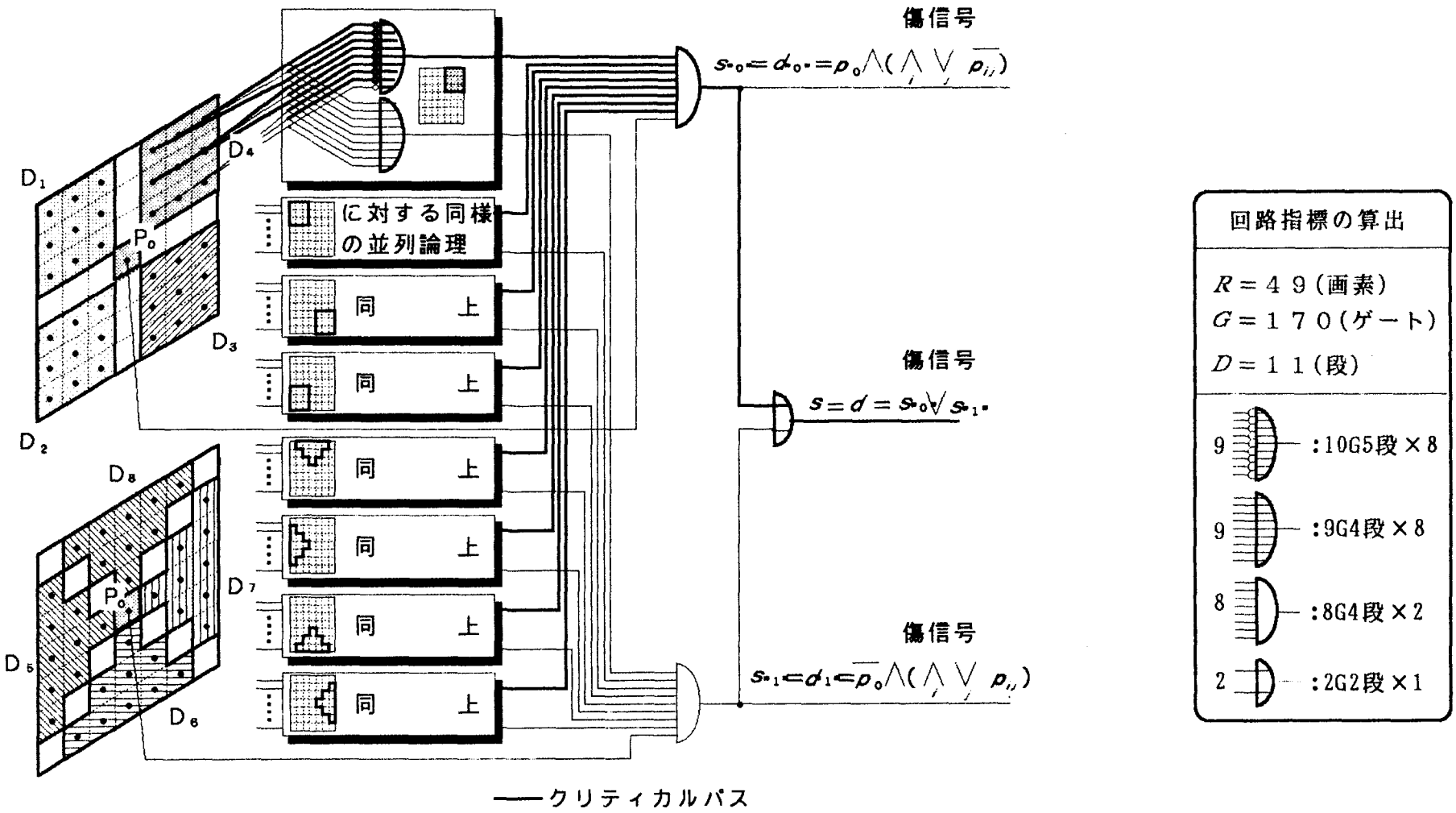


図３．１２　周囲判定法による傷抽出回路

表３．１　各回路単体の評価結果

回路名称 ＼ 比較指標		参照画素数 R(画素)	総ゲート数 G(ゲート)	最大ゲート段数 D (ゲート)
微小部抽出回路	① 拡大縮小法	１３	７２	１３
	② 周囲平均法	１３*/２５#	—	—
	③ 間隔判定法	２５	８６	９
	④ 周囲判定法	４９	１７０	１１
	⑤ 境界修正法	４９	１８６	１４

①拡大縮小半径は $r_L = 1$
②周囲平均半径は $r_V = 2$*, $r_V = 3$#
③間隔判定半径は $r_G = 3$
④周囲判定法および⑤境界修正法は
図３．１１および図３．１２の画素領域使用

表３．２　各傷抽出回路の評価結果

傷抽出回路の組合せ ＼ 指標	参照画素数 R(画素)	総ゲート数 G(ゲート)	最大ゲート段数 D (ゲート)
①'拡大縮小法＋境界修正法	４９	２５８	１４
②'周囲平均法＋境界修正法	４９	—	—
③'間隔判定法＋境界修正法	４９	２７２	１４
④ 周囲判定法	４９	１７１	１１

注に示した通りである。これらから以下のことが考察される。

（1） 参照画素数Ｒを比較した場合、①の拡大縮小法は微小部抽出機能だけから見れば、最も少ない参照画素数で済むが、傷抽出機能という点で見れば、７×７画素の窓枠すべての画素を参照し同じになる。これは⑤の境界修正法だけで参照画素数が決まってしまうからである。また④の周囲判定法も７×７画素の窓枠すべての画素を参照する。従って、傷抽出機能実現のために参照する対象の特徴量、情報量は、すべてのアルゴリズムで同じだといえる。

（2） 総ゲート数Ｇに関しては、微小部抽出機能だけから見れば、①の拡大縮小法、③の間隔判定法は少なくて済むが、④の周囲判定法はその倍以上になる。しかし、傷抽出機能という点で見れば、逆に④の周囲判定法が最も少なくて済む。これは①の拡大縮小法、③の間隔判定法のゲート数に、ゲート数が多い⑤の境界修正法のゲート数が加算されたためである。したがって、④の周囲判定法の回路規模は最も有利だといえる。

（3） 最大ゲート段数Ｄについては、微小部抽出機能単体で見れば、③の間隔判定法が最も少なく、①の拡大縮小法が最も多くなる。しかし、傷抽出機能という点で見れば、④の周囲判定法が最も少ない。

表３．２から各傷抽出回路とも高々数百ゲートという極めて小規模な回路で実現することができることがわかった。この規模は、現状のＬＳＩの回路規模と比べて見ると数桁以上少なく、極めて小規模に実現できたことが分かる。

ところで、以上のように比較した各回路は、フリップフロップを持つ順序回路構成ではなく、比較的単純な組合せ回路で構成できた。このような構成の場合、一般に処理時間は最大ゲート段数Ｄから決めることができる。すなわちＤに、１ゲート当りの遅延時間を掛ければ処理時間が算出できる。傷抽出装置はほとんどＴＴＬ(Transistor Transistor Logic)という遅延時間約10nsのデバイスを使って開発した。従って、表３．２から①′の拡大縮小法＋境界修正法、③′の間隔判定法＋境界修正法、④の周囲判定法の処理時間はそれぞれ約140ns，140ns，110nsということになる。この値は、すべてのアルゴリズムが１画素当りの所要時間167ns以内に処理できることを意味している。このようにして、何れの傷抽出処理も実時間処理が可能であることを確認できた。

なお、この評価結果から、傷抽出特性が若干劣るとはいえ、開発しなかった周囲判定法

が、皮肉にも回路規模、処理時間の二つの点でやや有利であることが判明した。本研究では個々の微小部抽出回路の評価結果が良くとも、たかが１画素のみの量子化誤差を除去するために、７×７のほとんどの画素を総動員し、回路規模、処置時間的にも不利な境界修正法と組み合わせざるを得なかった。アイデア発想とシステム構築のタイミングの大切さを改めて痛感した次第である。

３．５　傷検査工程におけるフィールドテスト

３．５．１　プリント基板自動検査システム

（１）　傷抽出装置のシステム構成：

以上述べてきた試作傷抽出装置を核とした、プリント基板の自動傷検査システムを、図３．１３に示す。図において左下はＸＹ移動台で、その可動部に固定された非検査対象のプリント基板をＸＹ方向に移動することにより、プリント基板全面が検査される。左上は白黒ＴＶカメラ、上中央は傷抽出装置、右上は傷抽出結果を表示するためのカラーディスプレイである。ＴＶカメラはプリント基板の一部を視野として常時撮像しており、ディスプレイ上にそのパターンが表示されている。

（２）　傷抽出過程：

図３．１４に本装置による基本的な傷抽出過程をディスプレイ(カラー)に表示した例を示す。(ａ)は前章の図２．１に対応するプリント基板の一部分の２値化パターンである。淡いパターン部分は絶縁部、黒パターン部分は導体部に対応する。図から分かるように、画面中央部には導体が断線した傷が見られる。画面は320×240画素で構成されており、画面全体はプリント基板中の48mm×36mmの視野に相当する。したがってディスプレイの画面は対角線15inch(横×縦は12inch×９inch)であるから、拡大率は25.4×12/48＝6.35倍で、１画素はプリント基板上の150μｍ×150μｍの正方形領域に相当する。図から分かるように、２値パターンは離散化されているので、断線の異常部以外に明暗の境界上に微小な量子化誤差が見られる。(ｂ)は周囲平均法による準標準パターンで、図のように傷や量子化誤差による微小部が除去されていることが分かる。(ｃ)は微小部抽出パターンである。図

中の明るい部分が微小部であり、数多く抽出されていることが分かる。(d)は境界修正処理した傷抽出パターンで、断線の傷に関与する部分だけが抽出されていることが分かる。

(3) 傷抽出特性の比較：

つぎに境界間隔法、周囲平均法、拡大縮小法による微小部抽出処理に境界修正処理を施した場合の傷抽出特性の比較を行う。これは同じパターンを何度も提示し、その傷抽出画素数の頻度を測定することにより統計的な傾向を調べる方法を採った。図3.15はこの結果を示すものであり、対象パターンは図3.14の画面中央に傷が存在するパターンを用いた。前章で定義した各アルゴリズムのパラメータをr_G(境界間隔半径)、r_V(周囲平均半径)、r_L(拡大縮小半径)とおくと、図から、間隔判定法の$r_G=3$、周囲平均法の$r_V=3$、それに間隔判定法の$r_G=2$、周囲平均法の$r_V=2$、拡大縮小法の$r_L=1$の分布は概ね対応しており、間隔判定法、周囲平均法、拡大縮小法の順にやや多めの画素を抽出することが分かる。このことから、境界修正という非線形要素が入っているとはいうものの、同じ対象に対する微小部抽出特性の傾向[5]とほぼ一致していることが実験的にも確認された。

3.5.2 検査時間の短縮

ところで検査員によるプリント基板の検査時間を実測したところ、基板1枚当たり2～3分であった。当時この時間を短縮するために何人もの検査員が同時に検査していた。この検査工程を省力化・自動化するために、自動検査システムとしては基板1枚当たり20秒以下が要求された。

そこでこの検査時間の目標を達成するために、以下のことを検討した。

ところで、TVカメラの撮像管はビジコンで、電荷蓄積の時定数が長いため、連続照明の状態で対象を高速移動した場合、いわゆる“残像”が生じる。そのため画像が不安定になり、傷を誤抽出する可能性がある。これを免れる手段として、

(i) 対象を間欠的に移動し、停止後画像が安定した時点で傷抽出処理を行う方法(“間欠移動・連続照明法”と呼ぶ)、

(ii) 対象を連続的に移動しながら間欠照明を行い、画像を光学的に瞬間停止させる方法(“連続移動・間欠照明”と呼ぶ)

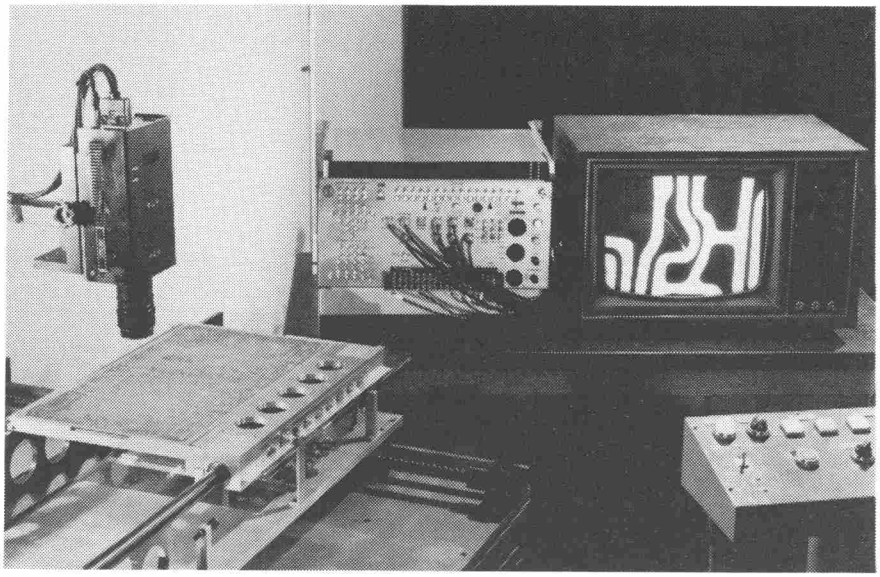
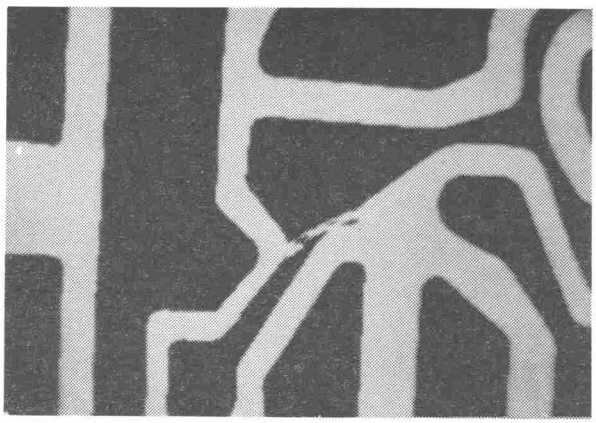
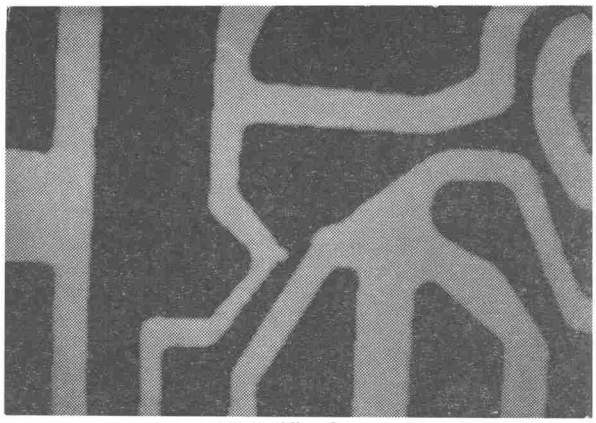


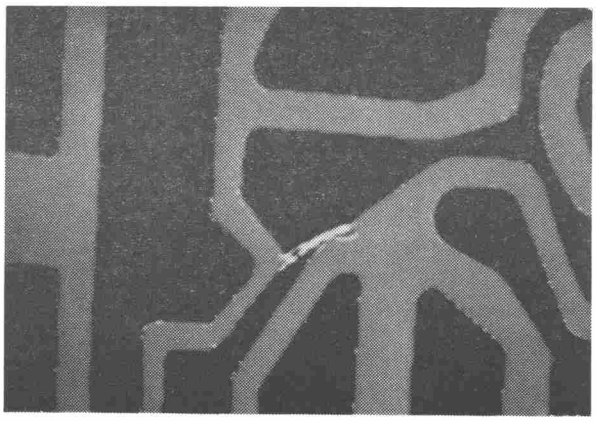
図３．１３　プリント基板の自動傷検査システム



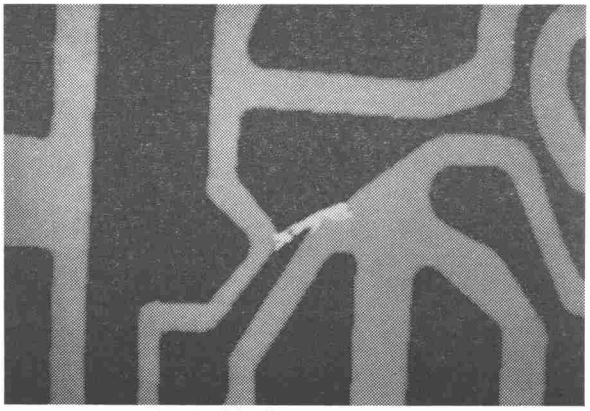
（ａ）対象パターン



（ｂ）準標準パターン
（周囲平均法，半径＝３）

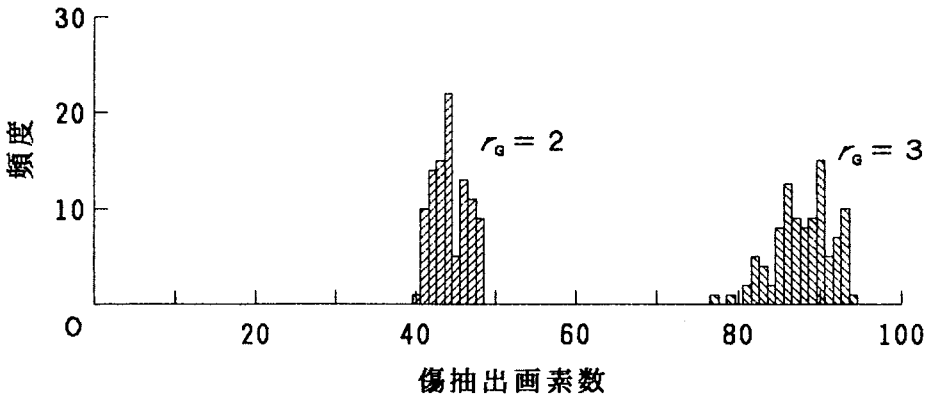


（ｃ）微小部パターン
（（ｂ）と同じ）

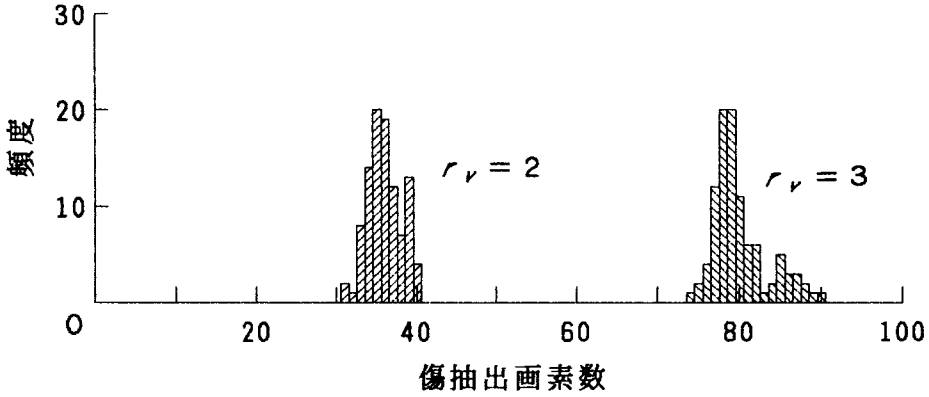


（ｄ）傷パターン
（境界修正法の処理対象領域は図３.11のパターン）

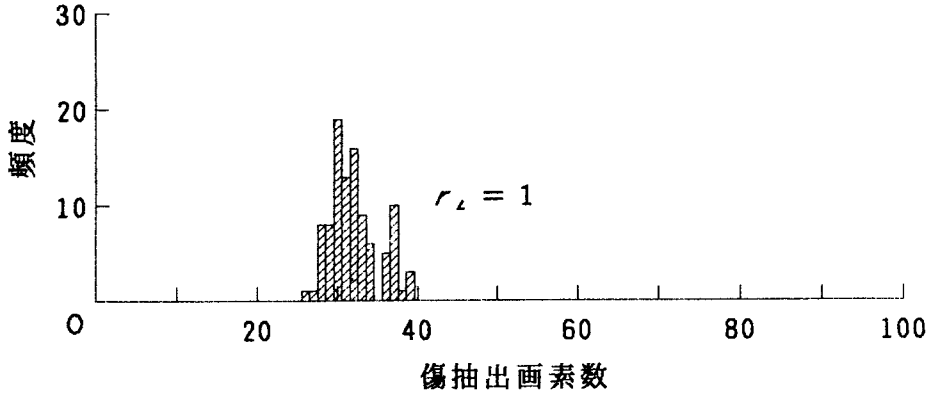
図３．１４　傷抽出過程



(a)間隔判定法



(b)周囲平均法



(c)拡大縮小法

図３．１５　プリント基板の傷に対する傷抽出画素数

などがある。そこでこの二つの方法の検討を行った。

まず(ｉ)の方法では、対象が停止後ＴＶカメラの残像の影響が消えるまでに50ms程度必要とすることと、短い移動ピッチを高速に移動することが技術的に困難であったことから、プリント基板１枚当たりの検査時間が１分半以上になり実用的に問題であった。次に(ii)の方法の間欠照明には、市販のストロボ・フラッシュ照明装置を用いることにした。ＴＶカメラに使用されるビジコンのような真空管式撮像管は、蓄積型の特性を持っており、照明直後の走査に限り画面全体にわたり良好な画像が得られる。従って画像走査の垂直帰線期間に同期して閃光を与え、その直後の画像を利用すれば、対象が移動していても瞬間的に静止したような画像が得られるからである。検討の結果、前回の照明の残像が10％以下になるのは４画面を周期として閃光を与え、その間に隣接する視野が少しずつ適切に重なるように、移動速度を300mm/ｓと決めた。閃光のパルス幅が30μｍであるから、この高速移動による対象の像振れはわずか18μｍに過ぎず、傷抽出の目的からは無視できる値である。

次に視野が基板全面を移動するパスで検査時間を検討した。検討に用いたプリント基板の大きさは506mm×300mm、連続移動による視野の主走査速度は300mm/ｓ、間欠移動による副走査速度は100mm/ｓである。傷抽出の分解能を上記より高くしたいという要求があったため、ここでは視野の大きさは32mm×24mmに設定した。なお(ｉ)による残像待ち時間は66.7ms(＝４画面分)とした。図３．１６に示すように、視野も基板も長方形であることから、長手・短手の組合せ２通りと視野が移動する主走査・副走査の２通りにより、視野が基板上を移動するパスとしては４通り考えられる。図のように、視野の水平方向をＨ、垂直方向をＶ、基板の長手方向をＸ、短手方向をＹとおき、４通りのパスをそれぞれＸＨ方式、ＹＶ方式、ＸＶ方式、ＹＨ方式と表記する。例えばＸＨ方式とは基板の長手に沿って視野の長手を主走査(すなわち基板の短手に沿って視野の短手を副走査)することを意味する。その結果を表３．３に示す。表から(ｉ)の間欠移動・連続照明法は基板１枚あたりの検査時間が約80ｓかかるのに対して、(ii)の連続移動・間欠照明法はその１/４の約20ｓで済み、目標検査時間を満足していることが分かった。

なお、傷抽出装置の処理時間は１画面あたり1/60ｓと短いので、更に時間を短縮したい場合、例えば(ｉ)残像の少ない半導体カメラを用いるとか、(ii)対象移動を主走査のみにし、１台の傷抽出装置に複数個のカメラをつないで装置に時分割動作をさせるようにすれ

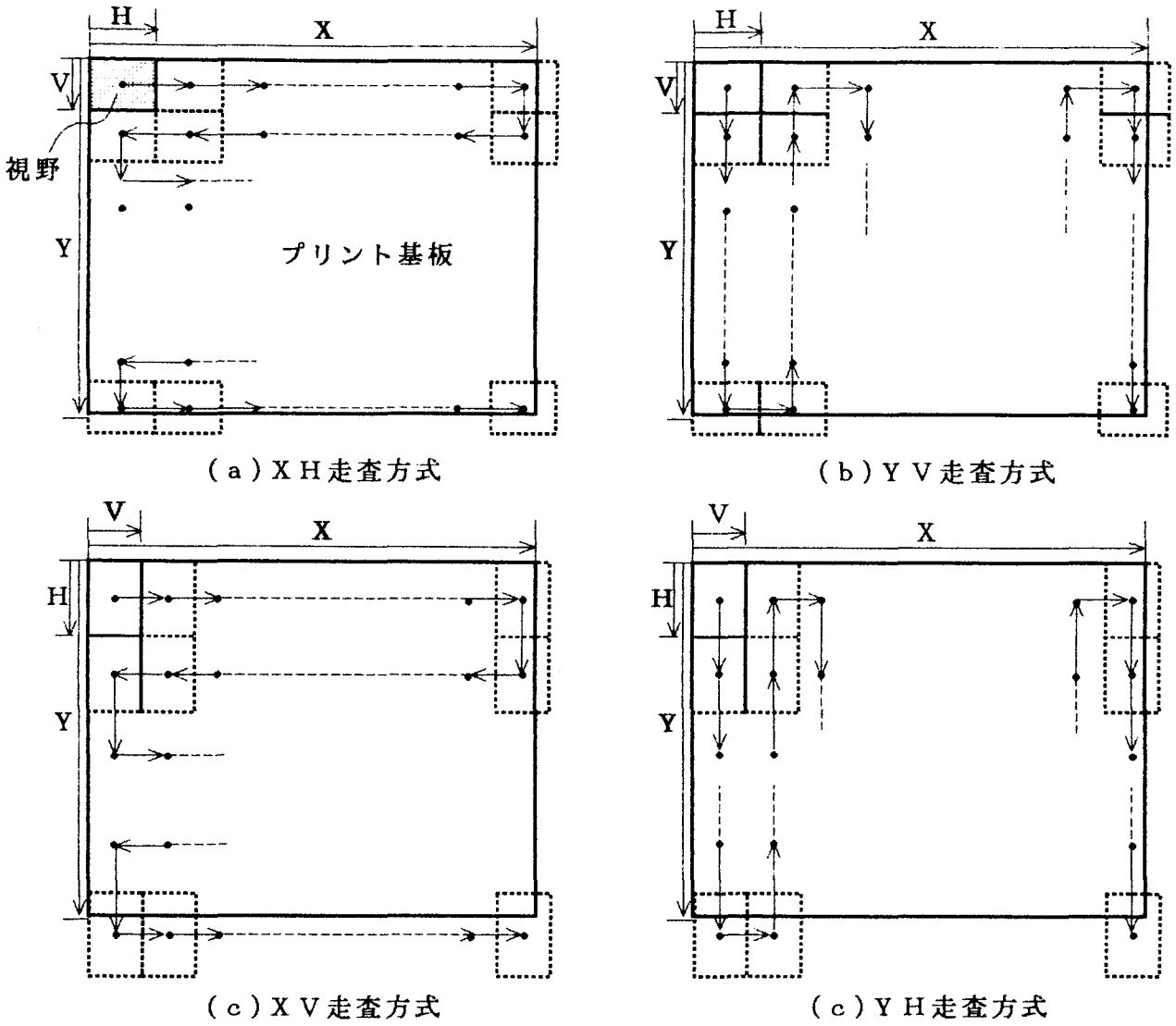


図３．１６　プリント基板に対する視野の走査方式

表３．３　プリント基板の検査時間比較

視野の走査方式 / 対象移動・照明方法	XH方式	YV方式	XV方式	YH方式
間欠移動・連続照明法	８６．１	７１．７	７５．３	９０．４
連続移動・間欠照明法	２３．７	２０．２	１９．７	２６．２

単位　；　s/枚
プリント基板の大きさ；506mm×300mm
視野の大きさ；32mm×24mm
主走査速度　；300mm/s
副走査速度　；100mm/s

ばよい。

3.5.3 フィールドテスト

傷抽出装置の実用化への可能性を検討するために、プリント基板の傷検査工程でフィールドテストを行った。ただし、本テストでは微小部抽出法として間隔判定法(抽出すべき幅は2画素以下)を採用した。対象としたプリント基板は506mm×300mmの大きさの片面単層板で、一枚の基板中に長手方向に4面の単体パターンが描かれている。この基板はエッチング直後のものであり、透過光の照明により比較的コントラストの高い画像が得られる。その結果、基板4120枚を検査したところ、713件の実害傷を検出した。その内訳を表3.3に示す。検出した実害傷のサンプルを図3.17に示す。このうち特に(a)は表3.4のBランク(見落とし勝ち)ではあるが、熟練検査員が実際に見落とした傷である。このフィールドテストの結果をまとめると以下のようになる。

(i) 人間が検出できる傷はすべて検出することができた。

(ii) 正常な部分を傷として誤抽出をすることは一回もなかった。

(iii) 本装置で検査した基板を人間に検査させたところ、すべての傷の約1/7しか検出できなかった。

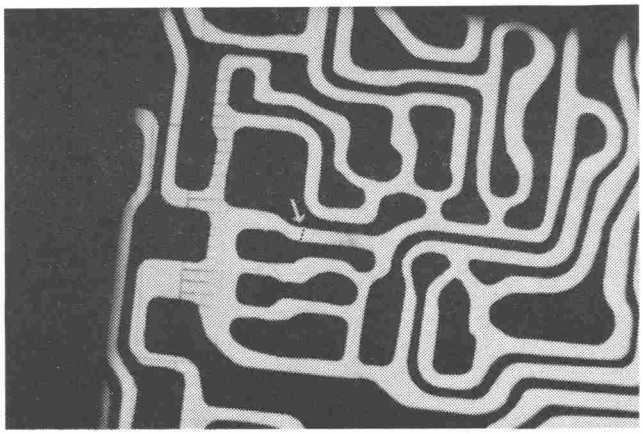
(iv) 正常と判定された基板と傷を手直しした基板全部に電子部品を実装して電気的な動作試験を行った結果、通常タクトでは少なくとも0.1%程度の動作不良が発生するにもかかわらず、すべての基板は正常に動作した。

以上のフィールドテストの結果、傷抽出装置は検査員をしのぐ優れた検出能力があることを確認した。その結果、その後プリント基板傷検査工程で実稼働することができた。

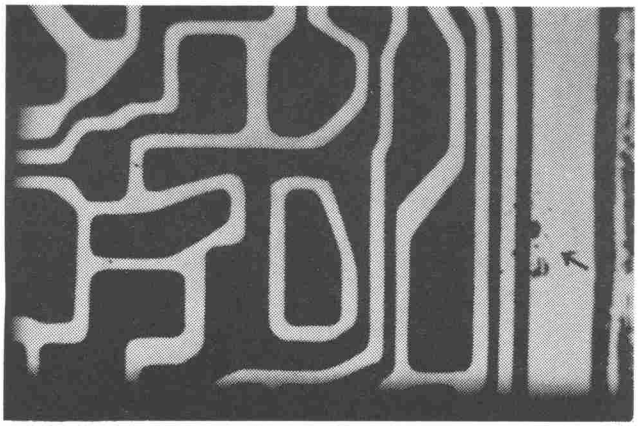
表３．４　検出した実害傷の内訳

傷の形態	目視による検出難易度*（件）			合計（件）
	A	B	C	
ひげ	0	7	0	7
パターン境界凸	330	0	0	330
切れ	44	1	4	49
タッチ	1	0	0	1
欠損	0	32	5	37
エッチング不足	289	0	0	289
合計（件）	664	40	9	713

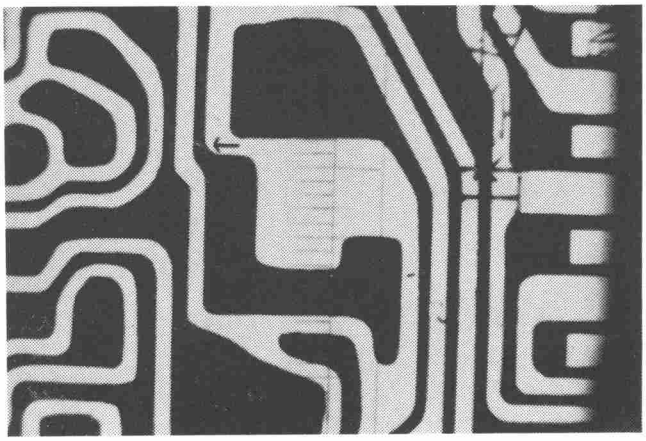
*目視による検出難易度　A：容易に検出可能
B：見落とし勝ち
C：検出困難



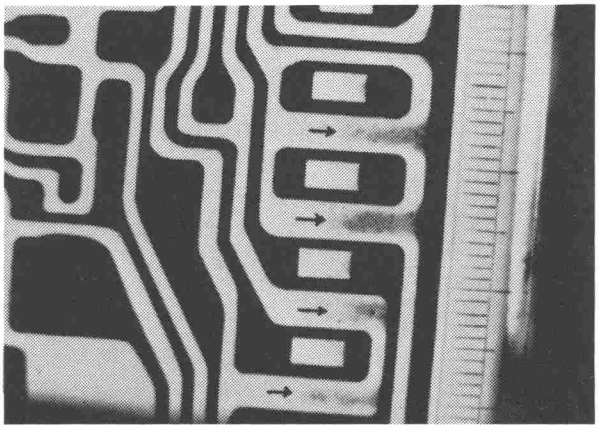
（a）ひげ（0.06mm×0.71mm）



（b）パターン境界凸（0.94mm×1.4mm）



（c）切れ（0.24mm×1.18mm）



（d）エッチング不足（10.0mm×4.0mm）

図３．１７　傷抽出装置が検出した実害傷のサンプル
（括弧内は傷の実測値）

3.6 結言

プリント基板やＩＣ･ＬＳＩマスクなど複雑なパターンをもった物体の表面に存在する傷を抽出する装置を開発した。本章で得られた結果を以下に要約する。

（1） 拡大縮小法、周囲平均法、間隔判定法の三つの微小部抽出アルゴリズムに、境界修正法を組み合わせた傷抽出アルゴリズムを、高ハードウェアで速処理する傷抽出装置を開発した。

（2） ＴＶカメラの画素走査と同期する２次元局部画像処理技術により、比較的安価でかつコンパクトな規模で、傷抽出の画像処理を実時間で処理可能なハードウェアのアーキテクチャを確立した。また本研究で開発した傷抽出アルゴリズム全体を、回路的に評価するため、(ｉ)傷抽出のために参照する対象パターンに関する情報量である局部画像の参照画素数、(ii)回路規模の目安を与える総ゲート数、(iii)処理時間の目安である最大ゲート段数という三つの指標を導入した。評価の結果、(ｉ)は各アルゴリズムとも同じ画素数を参照する、(ii)は２入力NAND, NORゲート換算で300ゲート未満と極めて小規模な回路規模になる、(iii)すべて１画素以下の時間で処理できることが分かった。

（3） ２値化に関しては、閾値を浮動式にすることにより、70μｍの微小傷を抽出できた。これにより、固定式のものに比べて分解能を約３倍向上できた。

（4） ＴＶカメラの視野の垂直方向に、検査対象のプリント基板が主走査されるように、基板を短手方向に連続送りしながら、ストロボフラッシュ照明することにより、基板１枚あたり20ｓという目標検査速度を実現した。

（5） プリント基板の傷検査工程でフィールド実験を行った結果、(ｉ)人間が検出できる傷はすべて検出できた、(ii)正常な部分を傷として虚報することは１件もなかった、(iii)本装置で検出した傷を人間に検査させたところ、すべての傷の約１/７しか検出できなかった、(iv)傷抽出された部分をすべて手直しし、正常と判定された基板を含めてテストした基板全部に電子部品を実装して電気的な動作を試験した結果、人間が検査した場合は、通常0.1％の動作不良が発生するのに

対して、本装置で検査した場合、すべての基板は正常に動作した。この結果、本装置は熟練検査員を凌ぐ傷検出能力のあることが判明した。

以上の結果、本装置は十分実用性があるとの見通しを得た。その後この傷抽出装置をプリント基板の検査工程において実稼働させ、生産性と信頼性向上に貢献してきた。

本研究で開発した傷抽出技術は、対象パターンの複雑さの粗さが定まっている限り、どんな複雑なパターンでも、また連続、離散を問わず、さらにまた次元も何次元でも原理的には適用できる筈である。したがってプリント基板のみならず、ＩＣ･ＬＳＩマスクなどの異常検査、罫線や模様入りの紙の上に描かれた線図の抽出、あるいは円や球形の径の測定など応用範囲が広いものと思われる。

本章並びに前章で述べた、複雑パターンの傷抽出アルゴリズムの開発、実時間型の装置の実現、それに目視検査への応用は、本研究の大きな成果である。人間が持っている優れたパターン認識能力の一部を機械によって実現し、傷抽出という点で世界に先駆け人間を凌ぐレベルのものを実現できたということは、生産技術分野ひいては産業分野全体に大きなインパクトを与えたといえよう。

それに、これまで技術的困難さゆえに未開拓だった質的性状の認識という分野に、一つの突破口を開いたと考える。本研究以降、ＩＣのパターン傷に対する致命性の判断[(11)～(15)]や電子部品表面に捺印された文字パターンの欠陥検査[(16)～(17)]など、更に高度な質的性状認識に間する研究成果が得られてきた。しかし、全体的にはまだ緒に着いたばかりであり、質的性状の認識には解決しなければならない幾多の課題が山積している。今後は、このような更に高度で知的な質的性状認識の課題に関する研究･開発の発展を期待したい。

参考文献

(1) 江尻，太田，池内："マシンビジョン"，昭晃堂，第1章(1990-5)

(2) 目瀬，烏野，池田，江尻："複雑パターンを対象とした傷抽出装置方式"，電学論C，Vol.94-C，No.5，pp.89-96(1974-5)

(3) 烏野，目瀬，江尻："複雑パターンの傷認識"，電学論C，Vol.95-C，No.3，pp.53-60(1975-3)

(4) Ejiri M., Uno T., Mese M. and Ikeda S. : "A Process for Detecting Defects in Complicated Patterns", Computer Graphics and Image Processing, Vol.2, pp.326-339(1973)

(5) 目瀬，池田，烏野，江尻："プリント基板の傷認識"，昭48電学全大，pp.1823-1824(1973)

(6) 烏野，目瀬，池田，江尻："複雑パターンの異常認識"，昭48電学全大1347，pp.1821-1822(1973)

(7) 烏野，目瀬："プリント回路板の検査－特に傷認識装置について－"，電子材料(1973-12)

(8) Uno T., Mese M. and Ejiri M. : "Defect Detecting Device for Printed Circuit Boards", Japan Electric Engineering, No.86, pp52-57(1974-1)

(9) 河村，中谷，目瀬，烏野："傷抽出パターン認識とそのディスプレイについて"，信学会研資，ＩＥ73-33，pp.1-8(1973)

(10) 目瀬，烏野，江尻："傷抽出装置"，公告特許第1364055号，特公昭61-22254(1986-5-30公告)

(11) 酒匂，依田，江尻："実時間半導体外観検査アルゴリズム"，信学論(D)，Vol.J69-D，No.11(1986)

(12) 酒匂，依田，江尻："配線パターン外観検査における致命性判定アルゴリズム"，昭58信学総全大，1436

(13) 酒匂，依田，江尻，村松："自動ＩＣウェハ外観検査装置(WIZE)の開発－検査手

法－”,昭59信学総全大，1583

(14) 依田，酒匂，江尻，村松：“自動ＩＣウェハ外観検査装置(WIZE)の開発－システム－”,昭59信学総全大，1582

(15) 酒匂，依田，江尻：“半導体ウェハパターンのための実時間半導体外観検査アルゴリズム”，情処学コンピュータビジョン研資41-2(1981)

(16) 嶋，柏岡，安江：“部分画像の並列切り出し照合方式に基づく捺印パターンの欠陥検出”，信学論(D)，Vol.J69-D，No.3(1986-3)

(17) 嶋，柏岡，加藤，江尻：“画像分割型頻度分布に基づくプラスチック部品表面の欠陥検出手法”，信学論(D)，Vol.J68-D，No.7，pp.1384-1391(1986-3)

4．　ＬＳＩ位置認識のための画像入力技術

4.1　緒言

前章および前々章では、プリント基板のような、表面に複雑なパターンを持つ対象物の傷を自動抽出する技術[(2)～(6)]について述べた。これは物体の幾何学的性状、付加的性状、質的性状という三つの性状[(1)]のうちの質的性状に関する認識技術の一つである。本章および次章では、残る幾何学的性状、付加的性状のうち、幾何学的性状の認識技術として、ＬＳＩ(大規模集積回路)の位置認識技術[(7)]について述べる。

さて、周知の通り、エレクトロニクス産業の急速な発展に伴い、電子計算機で代表される制御、通信、情報処理用の各種電子機器のみならず、事務用、家庭用の機器などほとんどの製品に、トランジスタ、ＩＣ、ＬＳＩなどに代表される半導体が広範に利用されるようになってきた。とりわけＬＳＩは、小型電卓の普及が端緒となって急速に発展し、将来きわめて多機能･高性能なＬＳＩが開発されることは間違いない。

ところで、ＬＳＩのような半導体の製造は、複雑な工程を経て製造される。大きくは次の三つに分類される。(1)“ウェハ”と呼ばれるシリコン基板を作る結晶工程、(2)ウェハの上にパターンを形成する前工程、(3)ウェハから“ペレット”または“チップ”と呼ばれる個々の機能デバイスを分離し、配線やパッケージングなどの組立てを経て最終製品にする後工程の三つである。このような半導体生産工程では、高い生産性と品質を確保するため、各工程で高度な生産技術の導入が積極的に進められている。このうち、結晶工程と前工程の二つは比較的自動化･省力化されて来たが、後工程とりわけ組立工程では、数多くの熟練作業者が必要でった。当時ＬＳＩ組立て工程での作業者数を例に取ると、製造工程中の約1/3を占め、組立て工程中では、ペレット内にある各内部電極と外部端子を配線する“ワイヤボンディング”と呼ばれる作業は、2/3以上にも及んでいた。このワイヤボンディング工程には、ペレットの位置を測定する作業があるが、細密な人間の目視作業に頼らざるを得なかったからである。しかし、この作業は拡大像を使うとはいえ像が暗い上に、ミクロンのオーダでの測定精度が要求され、その上長時間にわたる単純な目視作業のため、作業者にとって精神的な苦痛となり、ひいては作業意欲の低下をもたらすという問題があ

った。また個人差によるばらつきは、品質や歩留まりに大きな影響を与える恐れがあり、自動化・省力化が急務であった。

本研究の目的は、このような作業者の目視によるペレットの位置測定作業を自動化することである。本研究では人間の目の代りにＴＶカメラを用い、ＬＳＩの位置をパターン認識により自動的に検出する方式を検討した。[7] 本研究に先駆け、社内ではペレットサイズが小さい小信号用トランジスタのワイヤボンディング工程に、視覚位置認識技術を用いた自動組立てシステムがすでに導入されていた。[8][9] これに対してＬＳＩの場合、ペレットが大きすぎるため、ペレットの回転の影響が無視できず、ペレット付けの工程で、自動的にワイヤボンディングを行える精度が得られなかったため、いったんＬＳＩペレットの位置ずれ量を作業者が目視で測定するシステムを採用していた。

半導体位置検出の自動化の研究の歴史は古く、1960年代の末期に遡る。その頃、トランジスタペレットの位置検出のために、ペレットに２～３条のスリット状の光を照射し、その反射光をとらえてペレット位置を検出する試みがなされた。[10] しかし、ＳＮ比の不足によって実用までには至らなかった。この分野で最も著しい発展を遂げたのは、1970年代中半に開発された、上述の小信号トランジスタの自動ワイヤボンディングシステムである。これは、パターン認識技術の導入により、世界で初めて実用化に成功した本格的なシステムである。[8][9] このシステムは、１台のＴＶカメラからトランジスタの画像を取得し、その中から“部分パターンマッチング”というパターン認識技術を使って、ベースとエミッタ電極の位置を、実時間で認識するものである。同じ頃ＩＣペレットの認識に関する報告[11]があったが、これは実験段階のものであった。その後1970年中半から1980年初頭にかけて、各所でトランジスタ、[15] パワートランジスタ、[12][20] ＩＣ、[14][21] ハイブリッドＩＣ、[19] ＬＳＩ[7][17][18] のような、半導体組立てのための位置認識アルゴリズムや、視覚装置の研究・開発が活発に行われるようになった。本研究もその頃の研究として位置付けられる。

本章では、目視によるＬＳＩ位置測定の当時の状況と、自動位置認識に必要な画像入力技術について述べ、次章では安定な認識性能確保と装置の低価格化のために必須であるＬＳＩ画像の２値化技術、高精度にＬＳＩの位置を求めるための認識アルゴリズムおよびその装置化とフィールドテスト結果について述べる。

4.2 ＬＳＩワイヤボンディング

本節ではＬＳＩ製造工程のどの分野でどのような画像処理技術を必要としているかを説明する。図４．１はＬＳＩの全体の製造工程を示す。図のように製造工程は沢山の工程からなり、大きくは前工程と後工程に分けられる。このうち本研究に関係するのは、後工程の中の組立て工程である。各工程を説明する前に、組み立てられた状態のＬＳＩペレットについて説明しておく。図４．２はＬＳＩの組立て構造を表し、図４．３はペレットの部分を真上から眺めたものである。組立て工程でペレットは、“リードフレーム”と呼ばれる部分の中央の“タブ”という部分に貼り付けられ(図４．２参照)、リードフレームの各リードとペレット周辺部の各ボンディングパッドが１対１で配線される。図４．３からペレットを４方向から取り巻く櫛歯状のリードと、中央のペレット周辺部(のボンディングパッド)が、細糸のような線で放射状に配線接続されていることが分かる。

さて上記のようなＬＳＩを組み立てるための後工程には次の工程がある。

（１） ペレット分離工程：ウェハをペレット１個ずつに分離し、外観検査、電気的特性検査を行い良品のみを取り出す。

（２） 組立て工程：(ｉ)ペレットをリードフレーム中央部のタブの上に金箔を介して溶着させる。次に(ii)ペレットの周辺部にある沢山のボンディングパッドとリードとの間を金線で配線接続する。

（３） 封止、メッキ工程：ワイヤボンディングしたところを保護することにより機械的強度を持たせ、ＬＳＩ完成品の端子部をメッキする。

（４） 選別マーク工程：製品としての最終選別を行い、品質レベルをチェックし不良品にマーク打ちする。

以上の各工程のうち、(１)の外観検査と(２)の一部の工程は、ペレット１個ずつの個別作業である。これは顕微鏡を見ながらの目視細密作業であり、特にこの二つの工程では多数の熟練作業者を必要としていた。このうち本研究に関係するのは、(２)である。その工程の中で、上記(ｉ)から(ii)へのつなぎの部分で作業者の目視作業が行われており、本研究の目的は、この作業を自動化することである。この目視作業の状況と視覚による画像処理技術の導入の関係を以降で述べる。

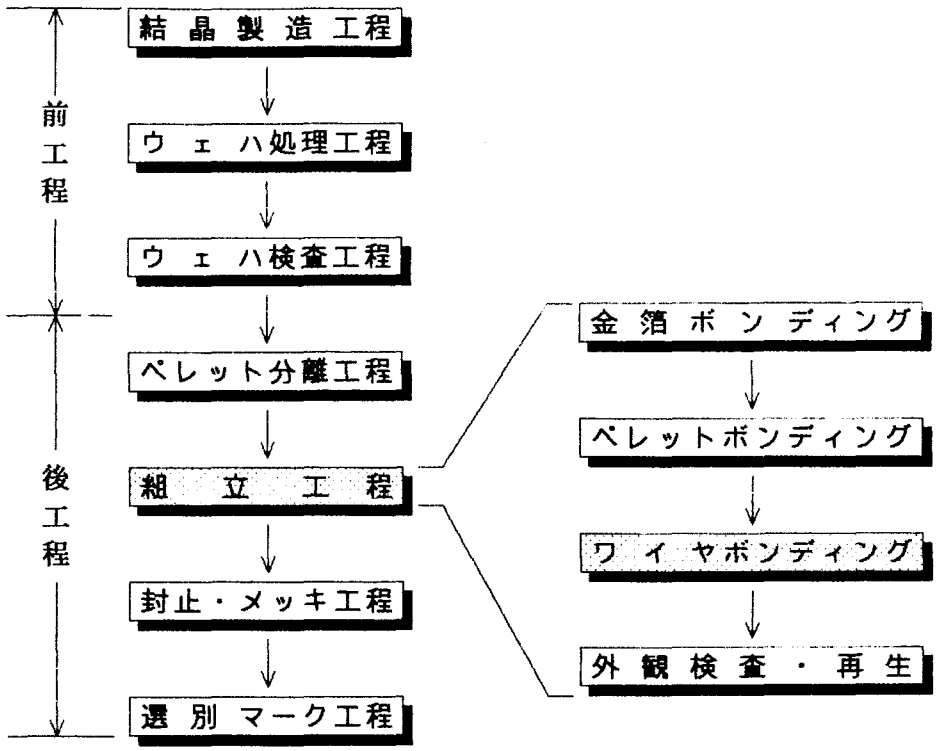


図４．１　ＬＳＩの製造工程と組立工程

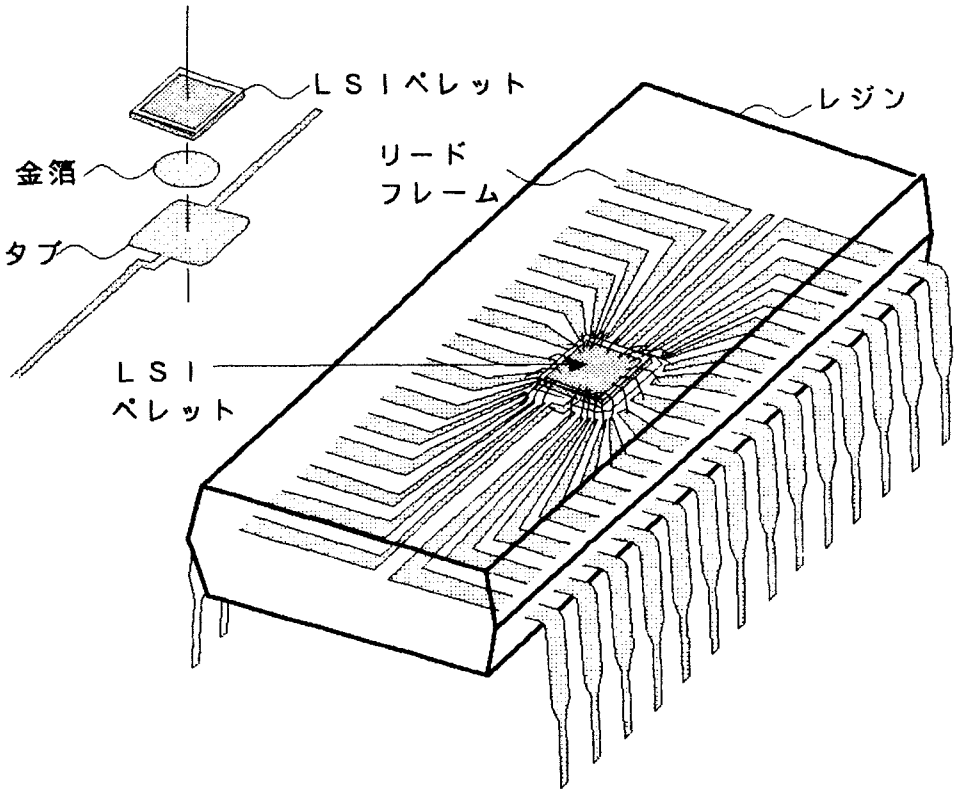


図４．２　ＬＳＩの組立て構造

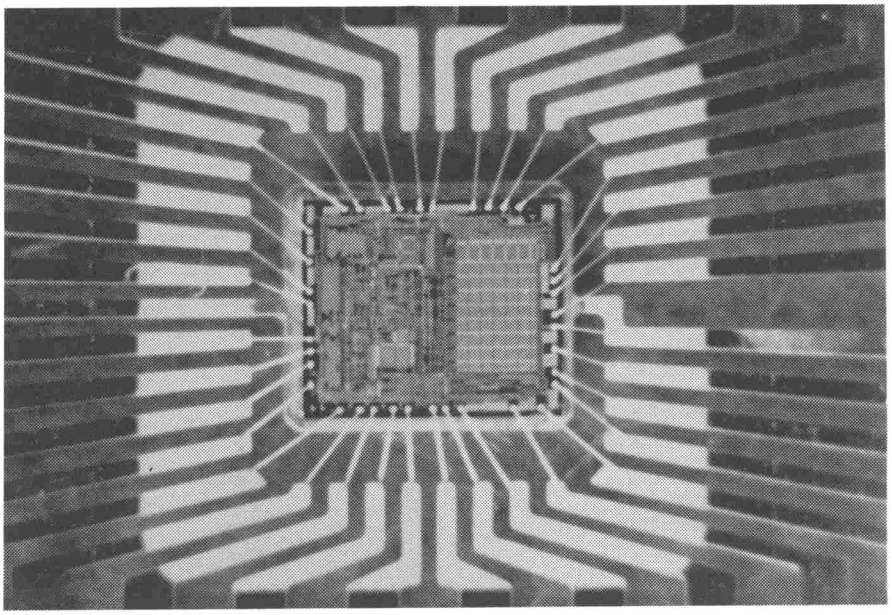
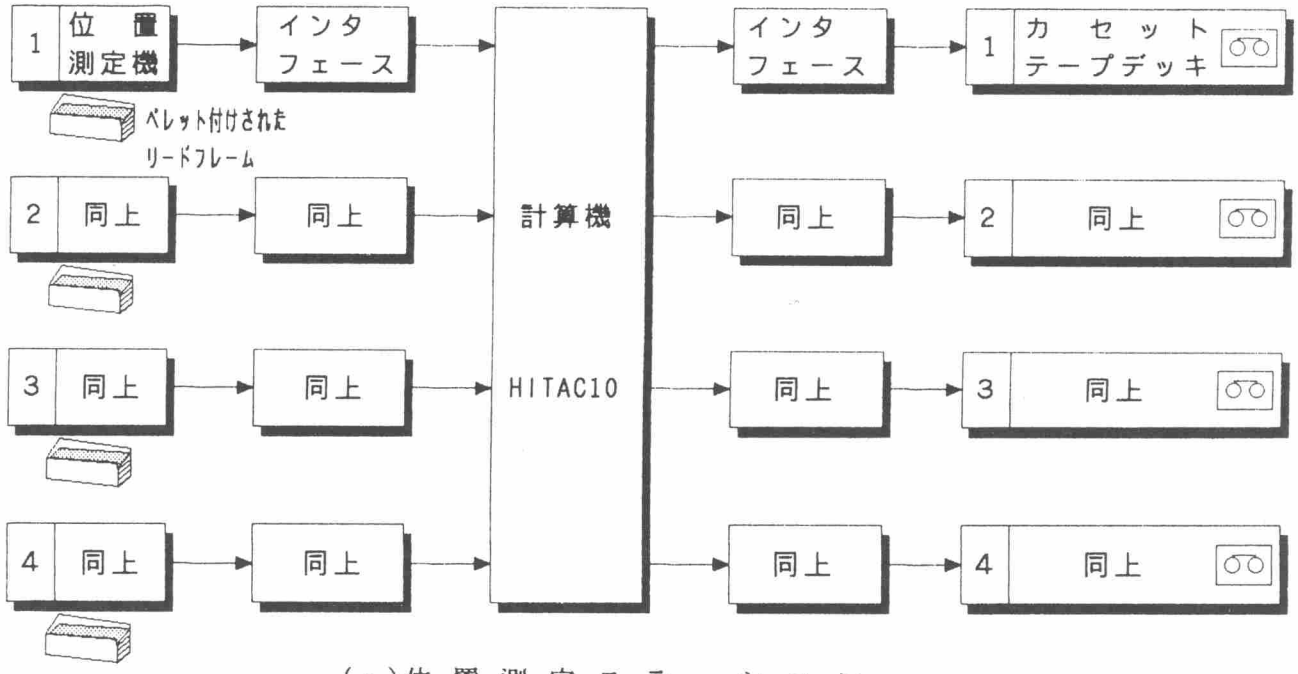
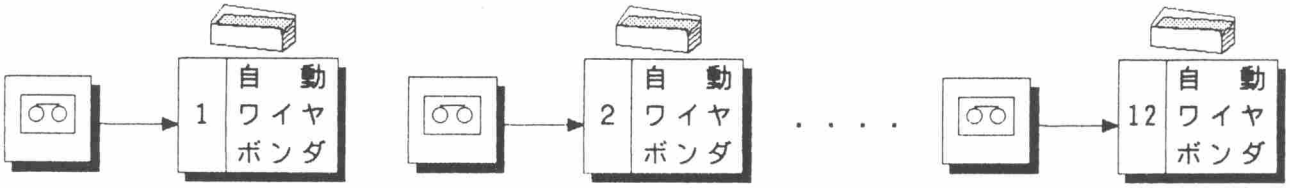


図４．３　ＬＳＩペレットの外観



(ａ)位置測定ステーション



(ｂ)ワイヤボンディングステーション

図４．４　ＬＳＩの位置測定・ワイヤボンディングシステム

ところで組立て工程をさらに細別すると、図４．１右側のような工程からなっている。各工程の作業内容は以下のようになっている。

（１）　金箔ボンディング：金箔をタブへ熱圧着する。

（２）　ペレットボンディング：ＬＳＩペレットを“コレット”と呼ばれる治具によって位置決めし、タブ上にAu･Si(金･シリコン)の共晶を形成して溶着させる。

（３）　ワイヤボンディング(図４．４参照)：まず作業者の目視でペレット付けによる位置、回転のずれを読み取り、計算機(HITAC10)を使って各ボンディングパッドの位置をカセットテープに書き込む(“位置測定ステーション”と呼ばれる)。次にカセットテープのデータをもとに、自動ワイヤボンダによってボンディングパッドとリードを金線でワイヤボンディングする(“ワイヤボンディングステーション”と呼ばれる)。なお前述の図４．３はこの段階でのＬＳＩペレットである。

（４）　外観検査・再生：ペレット付け結果およびワイヤボンディング結果を外観検査し、可能な限り不良品を再生する。

ところで(３)のシステム構成を図４．４に示す。図のように位置測定ステーションとワイヤボンディングステーションは、カセットテープを介してオフライン的に結合されていた。その理由を次に説明する。(２)のペレット付けの位置決め精度は高々平行成分±100μｍ、回転成分±30′である。それに対して、(３)の自動ワイヤボンディングに要する位置決め精度は約±10μｍ程度である。ペレット付けの精度は、ペレットサイズが大きいことに起因するコレットの機構的制約から決まるものであり、いっぽうのワイヤボンディングの精度は、パターンの高密度化に起因する要求から決まるものである。ペレットサイズ拡大とパターン高密度化というＬＳＩが宿命的に歩むべき道とは裏腹に、両者の位置決め精度の差はさらに大きくなって行く傾向であった。そのため、位置測定の負担がますます重くなって来るものと予想された。このような精度差を吸収するために、二つのステーションが分離され、目視による細密な位置測定が行われていた訳である。

このように分離された二つのステーションは、空間的・時間的に離れているため、その間の取扱いがしやすいように、図４．５のように５個ずつペレットが搭載されたリードフレームが用いられてきた。なお図４．６はワイヤボンディング工程でのパッドとリードが金線で接続される過程を表す。同図(ｂ)の位置合せや(ｃ)のボンディングされるＬＳＩペレットの該当部分付近を模式的に示したのが図４．７である。ボンディングパッドは120

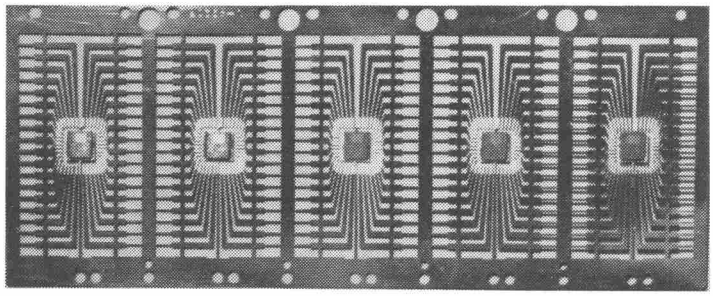
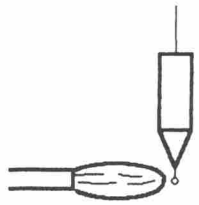
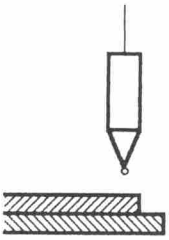


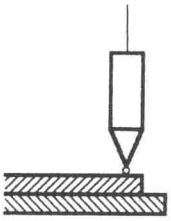
図４．５　リードフレームの外観



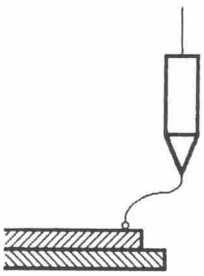
（ａ）金ボール作り



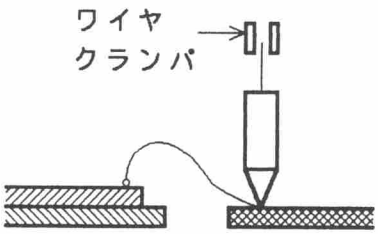
（ｂ）精密位置合せ



（ｃ）ボンディング



（ｄ）ワイヤ引き出し



（ｅ）リード側ボンディング
この後（ａ）へ戻る

図４．６　ワイヤボンディング工程

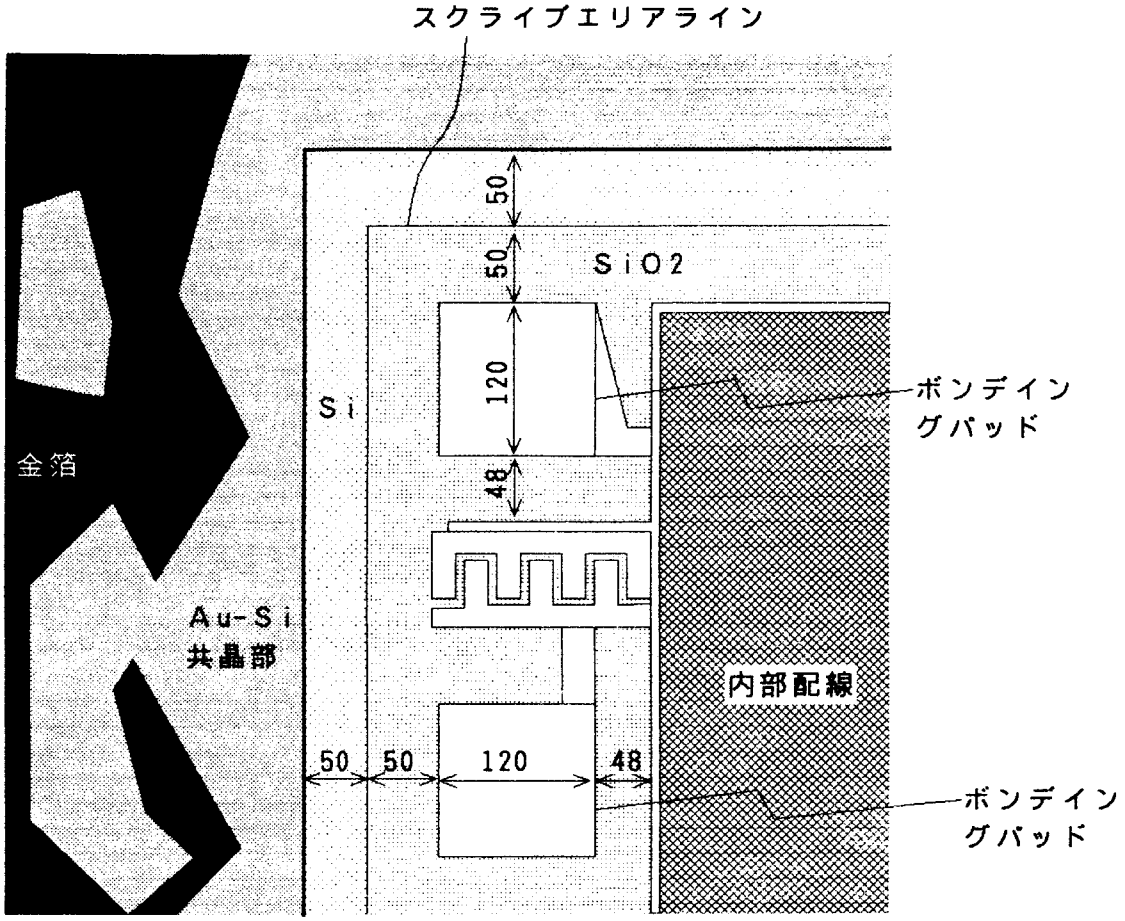


図４．７　ＬＳＩ周辺部とボンディングパッド関係の状況
（単位μｍ）

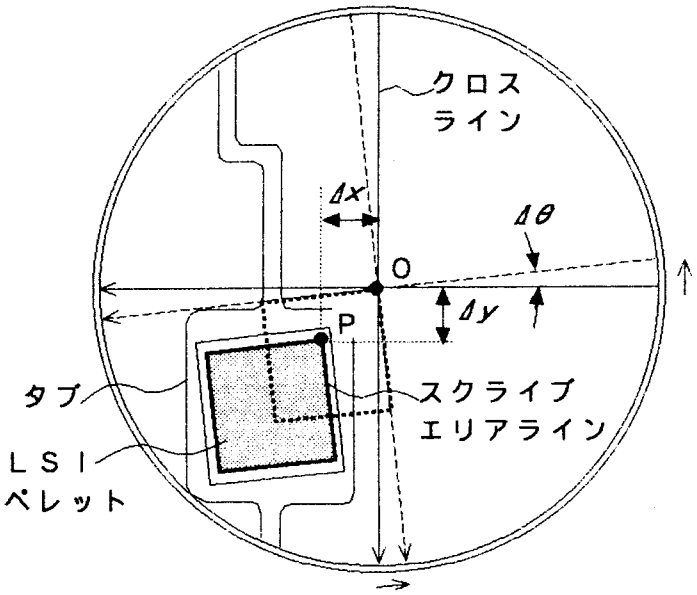


図４．８　ＬＳＩペレット付けのずれ測定

μm×120μmの正方形であり、内部配線までは48μm、“スクライブエリアライン”と呼ばれるパターン最外線までは50μmで、図4.6のワイヤ先端の金ボールが、このハッチしたエリアからはみ出している場合、前記(4)の選別マーク工程で不良と判定される。

ところで本研究の目的は、上記目視位置測定作業を自動化することである。そのためにまず当時の目視位置測定の作業を説明しておく。測定対象であるＬＳＩペレットは、図4.5のようなリードフレームのタブに付けられた状態で、“フレームフィーダ”と呼ばれる供給装置で１個ずつ順次、間欠的に送られ、拡大用顕微鏡投影機の対物レンズの真下で停止する。図4.8は拡大顕微鏡投影機で20倍の倍率で、スクリーン上に拡大されたペレットを表す。目視による位置測定では、ペレット拡大像のＰ点が、クロスラインカーソルの原点Ｏに合致するとともに、ペレットのスクライブエリアラインと、スクリーン上のクロスラインカーソルが合致するまで、対物レンズの平行移動と、スクリーンの平面回転が何回か繰り返される。これらの操作はすべて手動によりレバーを回転する方法であるため、かなりの時間を要していた。そして両者の原点合わせと平行合わせが終了した時点で、基準位置、角度からの移動量として、平行成分Δｘ，Δｙ、回転成分Δθが測定される。スクライブエリアラインはペレット内のパターン全体を囲む最も長い直線部であり、このような測定には最適のパターンである。測定されたΔｘ，Δｙ，Δθは計算機へ転送される。計算機では送られてきたデータをもとに、ペレットのすべてのボンディングパッドの位置を計算し、その結果をカセットテープに書き込んでいた。

4.3　自動化の目標指標

前節で述べたようにかなり厳しい作業環境の位置測定ステーションを自動化するにあたり、与えられた目標として、(1)認識率、(2)認識精度、(3)認識時間、(4)その他がある。

(1)　認識率：

認識率は99.9%以上を目指した。このように高い認識率を必要とするのは、第1にＬＳＩペレット自体ＩＣ、トランジスタに比べて相当高価なものであり、ワイヤボンディング不良による歩留まりの低下はかなりの損失に結び付くからである。第2に認識不能が起こ

った場合、手動によるワイヤボンディングを行わなければならず、配線数が多いこともあって非常に煩雑な作業となってしまうからである。そして第３に将来ワイヤボンディング結果の外観検査や再生の工程が廃止される方向にあり、認識結果を人間がチェックできなくなるからである。

（２） 認識精度：

認識精度は前節で述べたように±10μｍ以下を目標とする。組立て工程における位置決め誤差としては、ペレット付けのずれ、位置測定ステーションにおける上述のフレームフィーダでの位置決め誤差、作業者がクロスラインカーソルで位置合わせする際の検出器(マグスケールやエンコーダ)の量子化誤差、ワイヤボンディングステーションにおけるフレームフィーダでの位置決め誤差、自動ワイヤボンダでの金線位置決め治具の誤差など種々あるが、金線をボンディングパッドに熱圧着する際、ボンディングパッドと内部配線パターンを短絡させたり、金線をボンディングパッドから外したりしないようにするために、認識精度としては上記の値を必要とする。

（３） 認識時間：

一つのＬＳＩペレットの位置認識のための処理時間は0.3ｓを目標とする。当時１台の測定機で作業者が位置合わせする時間は、フレームフィーダへのロード、アンロードやリードフレームの送りの移動時間などを含めて平均４ｓ費やしていた。したがって、４台の測定機を全部稼働したとして、平均１ｓ必要である。しかしフレームフィーダの上記のような時間を差引き、さらには将来のタクト時間短縮のことを勘案すれば、0.3ｓを目標とする必要があるからである。

（４） その他：

上の三つの性能指標に加え、もう一つの目標として、ＬＳＩペレットの位置を認識するための特定のターゲットマークを用いないようにすることである。その最も大きな理由は、将来ワイヤレスボンディングに移行する場合、ペレット表面上にボンディングパッド以外は露出させたくないからである。ワイヤレスボンディングにすることによる利点は、配線を容易にするだけでなく。ボンディングパッド以外のすべての内部配線を、たとえば樹脂コーティングすることにより信頼性が上げられることである。その他の理由としては、パターンを新たに設計するための修正費用が掛かること、パターンが高密度化して行く状況で位置認識だけの目的で特定エリアを確保できる余裕がないこと、などがあった。本研究

では、このような事情により、認識のための特定マークを一切用いず、すでに生産されているＬＳＩ製品のボンディングパッドそのものを認識することにした。

４．４　位置認識のための画像入力

ＬＳＩペレットのボンディングパッドの位置を自動的に認識するために検討しなければならない基本的な課題として、次のようなものが上げられる。

（１）　視野や照明法などの光学系をどのようなものにするか。

（２）　視野の濃淡像をどのような画像入力装置で撮像して電気的な画像に変換するか。

（３）　２値化方式を含めて画像信号の前処理をどうするか。

（４）　ボンディングパッドの位置認識アルゴリズムをどのようなものにするか。

本研究では上記の順に検討を進め、(１)を本章で、(３)，(４)を次章で検討する。(２)に関しては、研究当時、真空管式の撮像管(ビジコン、カルニコン、プランビコンなど)が主流であり、ＣＣＤなど半導体撮像素子は世の中に製品が出はじめたばかりであった。素子数としては100×50画素(実際は100×100素子であるが、インターレースしているため垂直方向は解像度は50本しかない)程度であったため、本研究では工業用撮像管として実績のあったビジコンを採用した。なお真空管式の撮像管には本質的に、残像、図形歪、シェーディング、焼け付きなど工業用視覚装置としては望ましくない現象がある。しかし当時としては、低価格で、かつ画素数も沢山取れる代替製品がなかったため、このような問題を少しでも解消できるよう、応用する際にさまざまな補正や工夫をした。

４．４．１　視野の検討

研究当時、ＬＳＩペレットの大きさは、最小３㎜□から最大６㎜□のものまで多品種あった。このように大きなペレットの像を一つの視野でとらえるのは、一般に画像入力装置では不可能である。その最大の理由は入力装置の分解能が足りないことである。従って認識精度を確保するために、視野の大きさはペレットに比べて小さくする必要がある。また検出すべきボンディングパッドはすべてペレット周辺部に存在するので、視野の位置とし

ては周辺部に設定すべきである。

ところで図4.9を用いて、仮に一つの視野をペレット周辺部に設定した場合、その中から検出したボンディングパッドの位置に基づき、他のすべてのボンディングパッドの位置を計算した場合の誤差がどの程度になるかを調べて見る。前述のようにペレット付けの位置決め目標精度は平行成分±100μmm、回転成分±30′であり、目標検出精度は±10μmmである。もし視野Vを図のようにペレットの一つのコーナAに設定し、他のすべてのボンディングパッドの位置を計算により求めた場合、コーナAに対して最も遠いコーナCでの回転成分を平行成分に換算したずれ量は、最大$6000\times\sqrt{2}\times30'\fallingdotseq74$(μm)となり、要求精度の±10μmを満たさない。従って1視野だけでは全パッド位置を計算する方式では、要求の±10μmの精度は得られないことが分かる。よって回転成分によるずれを精度良く求めるためには、二つ以上の複数の視野を設定する必要がある。

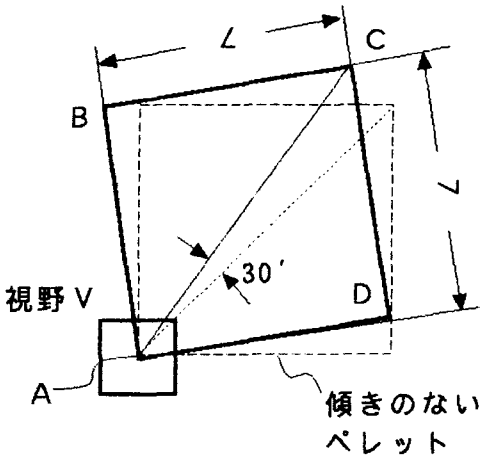
二つ以上の視野を設定する場合、各視野の位置をできるだけ離した方が良いことは明らかである。ここで注意しなければならないのは、ペレットの大きさは3mm□～6mm□と多種あるため、ペレットの品種変更に応じて視野の位置を容易に変更できるようにしなければならないことである。

そこで、上記のような要求を満足するための視野の大きさを決めることにする。視野の大きさを決める場合注意しなければならないのは、(1)高い認識精度を確保するためには、視野の大きさは極力小さくしたい、(2)ペレット供給ばらつきをカバーすると同時に認識ターゲットを視野外に外さないためには大きくしたい、という二つの相反する要求があることである。(1)は後で考察することにし、まず(2)の要求から視野の大きさを決めることにする。

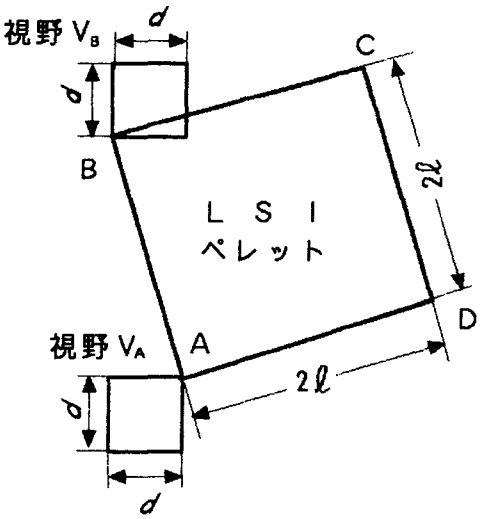
そこで2視野入力系として図4.9(b)のようなモデルを考え、図のようにLSIペレット(大きさ2ℓ×2ℓ)のずれは平行成分がなく、点Aを中心とした回転成分のみと仮定する。二つのコーナA，B上に視野V_A，V_Bを設定する。いま視野を便宜上図のようにd×dの正方形と仮定する。上記(2)の要求から視野の大きさdを決める要因として、(i)ペレット付けばらつき、(ii)測定系のばらつき、(iii)認識ターゲットのボンディングパッドの大きさ、の三つがある。以下これらの要因から視野の大きさを決めることにする。

(i) ペレット付けのばらつき：

前述のように、ペレット付け工程ではコレットで位置決めしたLSIペレットをタブ上

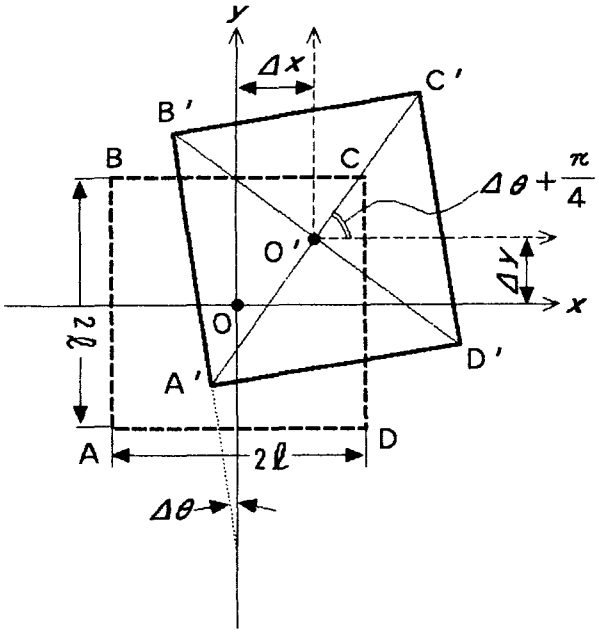


(a)1視野による位置検出誤差

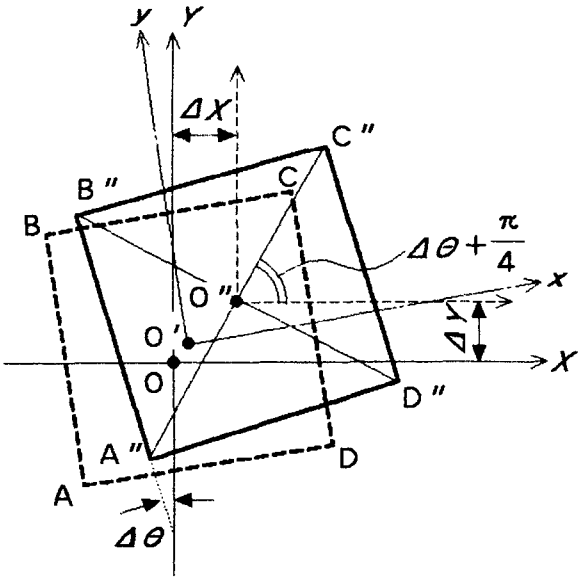


(b)2視野入力系

図4．9　1視野・2視野入力系



(a)ペレット付けによるずれ



(b)測定系によるずれ

図4．10　LSIペレットのずれ要因

に熱溶着する。その際コレットやフレームフィーダの機械的な位置決めのばらつきのためにペレットの位置がばらつく。このばらつきは、コレットやフレームフィーダの機械的な初期設定のずれによる位置を中心としてばらつくと考えられる。今図4.10(a)において(x, y)はペレット付け座標系であり、本来ABCDにペレット付けすべきペレットが、上記の原因で実際にはA′B′C′D′のように中心がΔx, Δy, $\Delta\theta$だけずれてペレット付けされるものとする。dを決める場合、四つのコーナA′, B′, C′, D′の位置ずれのうち最大のものを考えれば十分である。それを$\Delta x'$とすると、$\Delta\theta$は十分小さいから、

$$\Delta x' = \Delta x + \sqrt{2}\,\ell\cos(\Delta\theta + \pi/4) - \ell \fallingdotseq \Delta x + \ell\,\Delta\theta \qquad (4.1)$$

従って、Δx, $\Delta\theta$が正規分布に従うとすれば、平均値$\overline{\Delta x'}$と標準偏差$\sigma_{\Delta\theta'}$は、

$$\overline{\Delta x'} = \overline{\Delta x} + \ell\,\overline{\Delta\theta} \quad , \quad \sigma_{\Delta\theta'} = \sqrt{\sigma_{\Delta x}^2 + \ell^2\sigma_{\Delta\theta}^2} \qquad (4.2)$$

となる。式(4.2)で$\overline{\Delta x}$, $\ell\,\overline{\Delta\theta}$はコレットやフレームフィーダの初期設定ずれによる四つのコーナのx方向の最大位置ずれの平行成分と回転成分であり、$\sigma_{\Delta x}$, $\ell\,\sigma_{\Delta\theta}$は同じく最大位置ずれの標準偏差(ばらつき)の平行成分と回転成分である。

(ii) 測定系のばらつき：

測定系のばらつきを与える要因としては、(a)ペレット付け系と測定系との機械的な初期設定ずれ、(b)フレームフィーダの位置決めによるばらつき、(c)絶対位置測定のばらつきなどがあげられる。これらは(a)の初期設定のずれによる位置を中心として、(b), (c)などの原因でばらつくと考えられる。図4.10(b)は測定座標(X, Y)から見たペレット中心のずれΔx, Δy, $\Delta\theta$を表す。図においてABCDはペレット付けでずれがない場合のペレット、A′B′C′D′は上記の原因でずれたペレットであり、これは測定系にばらつきがなければABCDに一致するものとする。ペレット付け座標系(x, y)と測定座標系(X, Y)がずれるのは、上記の(a)に起因するためである。(i)と同様四つのコーナA′, B′, C, ′D′のうちの最大のずれを$\Delta X'$とすれば、$\Delta\theta$は小さいから

$$\Delta X' = \Delta X + \sqrt{2}\,\ell\cos(\Delta\Theta + \pi/4) - \ell \fallingdotseq \Delta X + \ell\,\Delta\Theta \qquad (4.3)$$

従って、ΔX，ΔΘが正規分布に従うとすれば、平均値$\overline{\Delta X'}$と標準偏差$\sigma_{\Delta\theta'}$は、

$$\overline{\Delta X'} = \overline{\Delta X} + \ell\,\overline{\Delta\Theta} \quad , \quad \sigma_{\Delta\theta'} = \sqrt{\sigma_{\Delta x}^2 + \ell^2\sigma_{\Delta\theta}^2} \qquad (4.4)$$

となる。式(4.4)で$\overline{\Delta X}$，$\ell\,\overline{\Delta\Theta}$は(a)のペレット付け系と測定系との各座標系の初期設定ずれによる4コーナの最大位置ずれの平行成分、回転成分であり、$\sigma_{\Delta x}$，$\ell\,\sigma_{\Delta\theta}$は最大位置ずれの標準偏差(ばらつき)の平行成分、回転成分である。

(iii) パッドの大きさ：

認識ターゲットであるパッドは一部でも視野外に出いれば、正確な認識ができず、パッド全体が完全に視野内に収まるようにしなければならない。ＬＳＩの場合、パッドの形状は一般に正方形が多いので、これをｐ×ｐとする。

以上により、ペレットのばらつきを考慮して、ターゲットであるパッドを視野内に収めるための条件は、

$$d \geqq 2(\overline{\Delta x'} + \sigma_{\Delta\theta'} + \overline{\Delta X} + \sigma_{\Delta\theta}) + p$$

$$= 2(\overline{\Delta x} + \overline{\Delta X} + \ell\,\overline{\Delta\theta} + \ell\,\overline{\Delta\Theta} + \sqrt{\sigma_{\Delta x}^2 + \ell^2\sigma_{\Delta\theta}^2} + \sqrt{\sigma_{\Delta x}^2 + \ell^2\sigma_{\Delta\theta}^2}) + p \qquad (4.5)$$

となる。式(4.5)に具体的数値を代入する。$\overline{\Delta x} + \overline{\Delta X} = 50(\mu m)$(目標)、$\overline{\Delta\theta} = \overline{\Delta\Theta} = 30' \fallingdotseq 0.00873(rad)$(目標)、$\sigma_{\Delta x} = 100(\mu m)$(目標)、$p = 120(\mu m)$、$2\ell = 6000(\mu m)$(最大)とおき、$\ell\Delta\Theta$，$\sqrt{\sigma_{\Delta x}^2 + \ell^2\sigma_{\Delta\theta}^2}$は測定系の組立て時に無視できる程度になるように調整すると、$d \geqq 479(\mu m)$となる。従って、上記の(1)，(2)の要求を満足するために、視野の大きさを$d = 480(\mu m)$と決める。

4.4.2　2視野方式

ＬＳＩの位置を検出するには、二つ以上の視野を設定する必要があるが、３視野以上にするのは、(1)光学系が複雑になる。(2)コストが高くつく、(3)品種変更が頻繁にあり視野の変更がかなり煩雑である、などの理由によりあまり実用的ではない。従って、前項で検討したように２視野方式が妥当である。

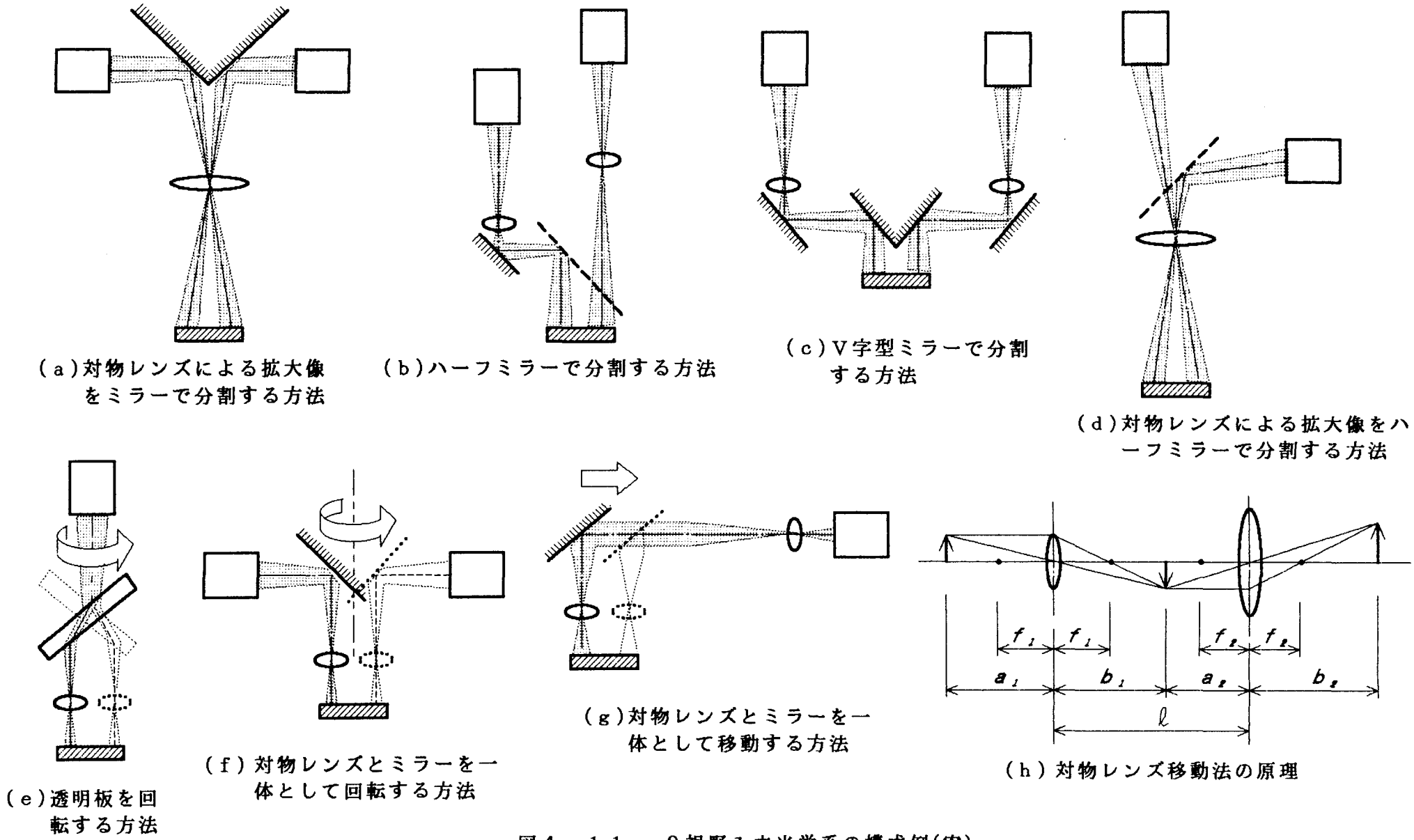
例えば真空管式の撮像管を使ったＴＶカメラの場合、受光面の大きさは12.7×9.5㎜で、前述のように視野の大きさｄは480μｍなので、拡大率は約20倍である。２視野の画像入力方式を検討する場合、最も重要な要素は検出精度である。その他に考慮しなければならないポイントは、以下で述べる(1)光学系の構成方法、(2)位置変更容易性、の二つである。　(1)　光学系の構成方法：

２視野を実現する方法としては、被写体に対する光学系やＴＶカメラの構成方法により種々の方法が考えられる。フレームフィーダから間欠送りされるペレットが停止していることを前提にすれば、２視野光学系の構成方法は、次の３種類に大別される。(ｉ)二つの拡大像を空間的に別々の位置に結像させ、２台の画像入力装置で同時並列入力する、(ii)(ｉ)の構成のＴＶカメラ２台を１台にし、それを移動することにより二つの拡大像を順次入力する、(iii)二つの拡大像を同一の位置に結像するように途中の光路を光学系で切り替え、１台のＴＶカメラに順次入力する、である。ただし(ii)，(iii)の場合、光学的あるいは機械的な切り替え動作が必要なため、画像入力装置の残像[24]が大きい場合、ペレットの移送停止直後の残像のほかに、視野切り替えによる残像にも特に留意する必要がある。

(2)　位置変更容易性：

前述のように対象とするＬＳＩペレットは３～６㎜□と多品種あり、しかも形状は正方形に限らず長方形のものもある。従って品種切り替えにともない、二つの視野の位置決定作業を容易かつ迅速に行えるようにしなければならない。その他、機械的、光学的な組立て精度を確保し、装置規模としてはコンパクトな方が望ましいことはいうまでもない。

本研究では、上記(1)の２視野を実現するためのいくつかの構成・動作方法を検討した。図４．１１はその例である。図において、(a)，(b)，(c)，(d)は上記(1)で述べた(ｉ)の方法であり、これらの方法で１台のカメラを順次移動または回転すれば(ii)が実現できる。(ｆ)は(ii)の方法である，(ｅ)，(ｇ)は(iii)の方法である。各方法の詳細な説明は省



(a)対物レンズによる拡大像をミラーで分割する方法

(b)ハーフミラーで分割する方法

(c)V字型ミラーで分割する方法

(d)対物レンズによる拡大像をハーフミラーで分割する方法

(e)透明板を回転する方法

(f)対物レンズとミラーを一体として回転する方法

(g)対物レンズとミラーを一体として移動する方法

(h)対物レンズ移動法の原理

図4．11　2視野入力光学系の構成例(案)

略するが、ここでは、装置化に際して最後まで検討対象にした(a), (g)の二つの方法を説明する。

(a)は最も単純な方法であり、原理的には、4.2の位置測定ステーションで用いた、投影機のスクリーン上に、二つのＴＶカメラの受光面を配置するのと等価である。本方式は移動体がないため、高い検出精度が得られるということと、２台のＴＶカメラから同時に画像が得られるため、高速処理が可能という特長を持っている。しかしＬＳＩペレット全面を照明せざるを得ず、20倍の拡大像が暗くなることと、長い光路が２系統必要なため、装置全体が大きくなってしまうことが欠点である。２台のＴＶカメラは常に２視野の画像を撮像しているため、各視野の切り替えは各画像信号を電気的に切り替えるだけで良い。この場合、上記(2)の視野の位置変更は、ＴＶカメラを光軸と垂直な面内で移動することにより簡単に実現できる。

いっぽう、(g)は後述のような原理に基づき、被写体上の２視野切り替えと、視野位置の変更が比較的簡単に実現できる方法である。この方法は光路が１系統で済むため、装置全体がコンパクトにまとめられるという利点がある反面、可動部を持つため、精度劣化の可能性があることが難点である。

ところで(g)の原理とは、被写体(ペレット)が対物レンズの焦点距離上に来るように対物レンズを配置すると、対物レンズと接眼レンズとの距離とは無関係に光軸上に一定の大きさの実像が得られるというものである。この原理を図4.11(h)と式を用いて説明する。図から明らかに

$$\frac{1}{a_1}+\frac{1}{b_1}=\frac{1}{f_1},\quad \frac{1}{a_2}+\frac{1}{b_2}=\frac{1}{f_2},\quad \ell=b_1+a_2 \qquad (4.6)$$

の関係が成り立つ。そこで総合倍率をmとおくと、

$$m\equiv\frac{b_1}{a_1}\cdot\frac{b_2}{a_2}$$

であるから、式(4.6)を使ってmからa_2, b_2を消去すると、

$$m=\frac{f_1 f_2}{\ell(a_1-f_1)-a_1 f_1-f_2(a_1-f_1)} \qquad (4.7)$$

となる。仮定から式(4.7)で$a_1 = f_1$とおけるから、

$$m = -\frac{f_2}{a_1} = -\frac{f_2}{f_1} \qquad (4.8)$$

が得られる。式(4.8)からmはf_1, f_2の比だけから決まりℓに依存しないことがわかる。これは、上で述べた原理が成り立つことを意味している。この原理を利用して、図のように対物レンズとミラーを一体にして被写体と平行に移動することにより、被写体上の2視野切り替えおよび視野位置の変更が容易に実現できる訳である。

本研究では上記(a), (g)を比較評価した。その結果(a)の方式を採用することにした。これは、(a)にはコスト、装置が大きくなる難点があるものの、測定時に移動するものがなく、しかも拡大像の段階で視野変更が行えるため、高い精度を常に安定に確保できるのに対して、(b)はコンパクトにまとめられるが、レンズとミラーを一体にした光学重量部品を、極めて高精度が要求される拡大前の段階で移動しなければならないため、(a)に比べて精度的に不利だったからである。

4.4.3 照明方式[22][23]

4.2で述べたように、LSIペレットの全体像を、顕微鏡拡大スクリーン上で20倍に拡大表示すると、暗くなり人間でも見づらくなるという問題があった。従って、このような暗い像をTVカメラで撮像した場合、認識処理のための十分な信号が得られるか否かは、極めて重要な検討課題であった。そこで本研究では、サンプルペレットを使って拡大率を実倍率に合わせ、照明方法とTVカメラの検出感度に関するフィージビリティスタディを実験的に行った。本節ではその検討結果について述べる。

さて、認識処理にとって、画像入力装置から良好な画像信号を得るための照明条件として、次の点が満たされなければならない。

(1) 少なくともボンディングパッドを抽出できる程度のコントラストと明るさが必要である。

(2) ボンディングパッドの位置が精度良く検出できるような照明でなければならない。

とくにボンディングパッドの縁は直線で形成されており、この部分を明確に抽出できるものでなければならない。

図４．１２はＬＳＩペレットの周辺部の拡大図であり、（１）落射（明視野）、（２）斜向（暗視野）照明を行った場合である。これらの二つの照明法を比較した結果、次のことがいえることが分かった。但し下記説明で使用するＬＳＩペレットを構成するパターン名称や材料名称と図４．１２の対応付けは、既出の図４．７を参照されたい。

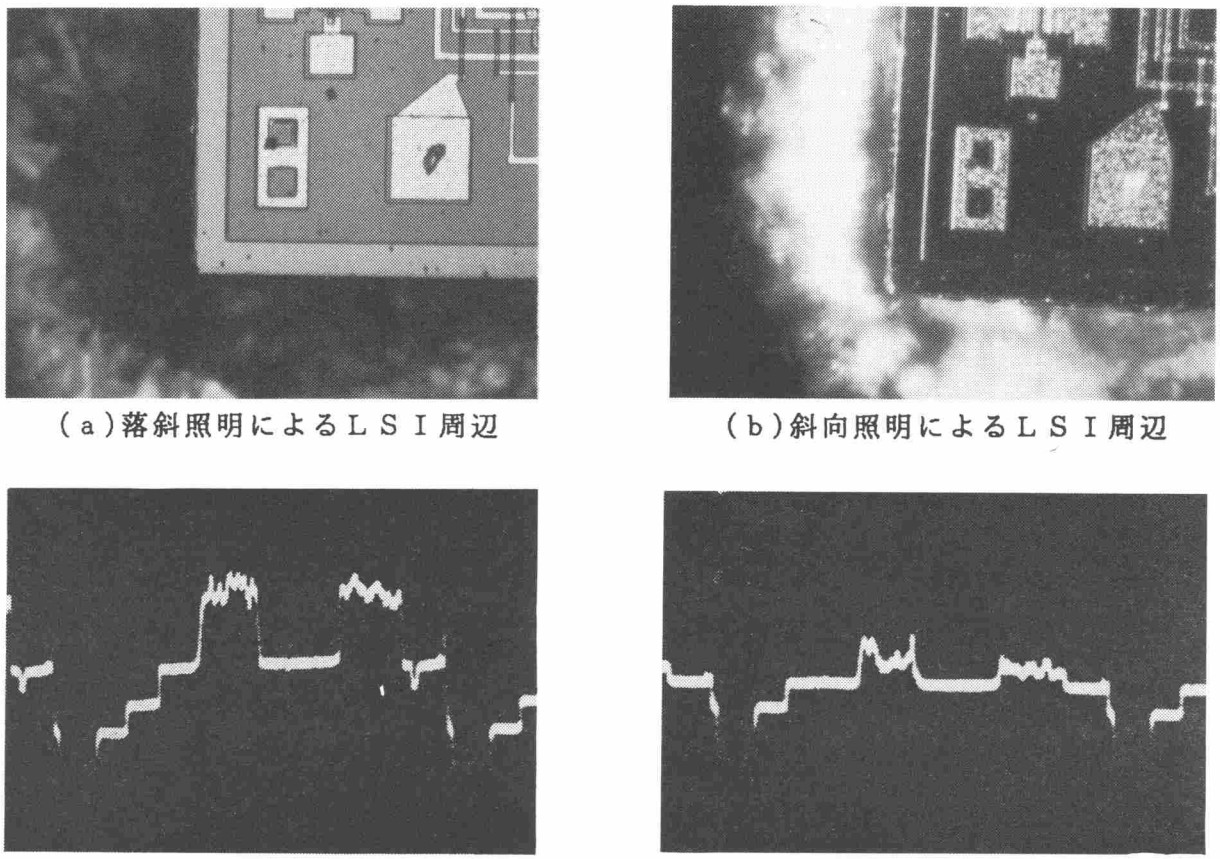
（１）　落射照明：

ボンディングパッドや内部配線などのＡℓ部が最も明るく、次いでS_i部（ペレット最外部の額縁のような部分）、S_iO_2部（ペレット内部のパッドや配線部でない部分）の順に暗くなる。またA_u-S_i共晶部（ペレットからやや離れた最外部分）やペレット周辺の金箔部分は概ね暗いが、表面の凹凸が激しく、明るさが一定しないため、鏡面反射成分はＡℓ部より明るくなることがある。その他前工程の電気検査で付けられたプローブの傷跡（パッド内部の黒点）は窪んでいるため暗くなる。このように落射照明では、明るさは多段階になるが、トランジスタなどに比べて蒸着状態が安定しており、Ａℓ部やS_iO_2部などの明るさは比較的安定しているといえる。信号レベルで見ると、Ａℓ部とS_iO_2部のコントラストは比較的大きい。従ってパッドと他の部分を比較的安定に分離できることが分かった。またパッドの表面の凹凸により、細かい黒の斑点状パターンが現れるが、縁の直線部は明確に得られることが分かった。

（２）　斜向照明：

落射照明と同一ペレットを使い同一の明るさの光源で照明を行ったところ、プローバ検査の傷跡、パッドの縁、A_u-S_i共晶部などの鏡面反射成分だけが明るく、他のS_iO_2部、金箔の部分は安定した暗さを呈する。これらの部分では光軸方向の鏡面反射成分がないからである。ところが、ボンディングパッドなどのＡℓ部は、表面の凹凸で明るさが落射照明に比べて不安定である。落射照明に比べて全体的に受光量が不足しており、パッドと他の部分のコントラストも低い。また上述のA_u-S_i共晶部の明るい部分の面積が広いため、パッドを認識する場合、誤認識などの不都合が生じる可能性がある。

上記の考察から、落射照明を行うことにより現行のＴＶカメラの感度でも認識処理を安定に行える信号が得られる見通しが得られた。



(a)落斜照明によるＬＳＩ周辺　(b)斜向照明によるＬＳＩ周辺

(c)落斜照明による画像信号　(d)斜向照明による画像信号

図４．１２　照明法の比較

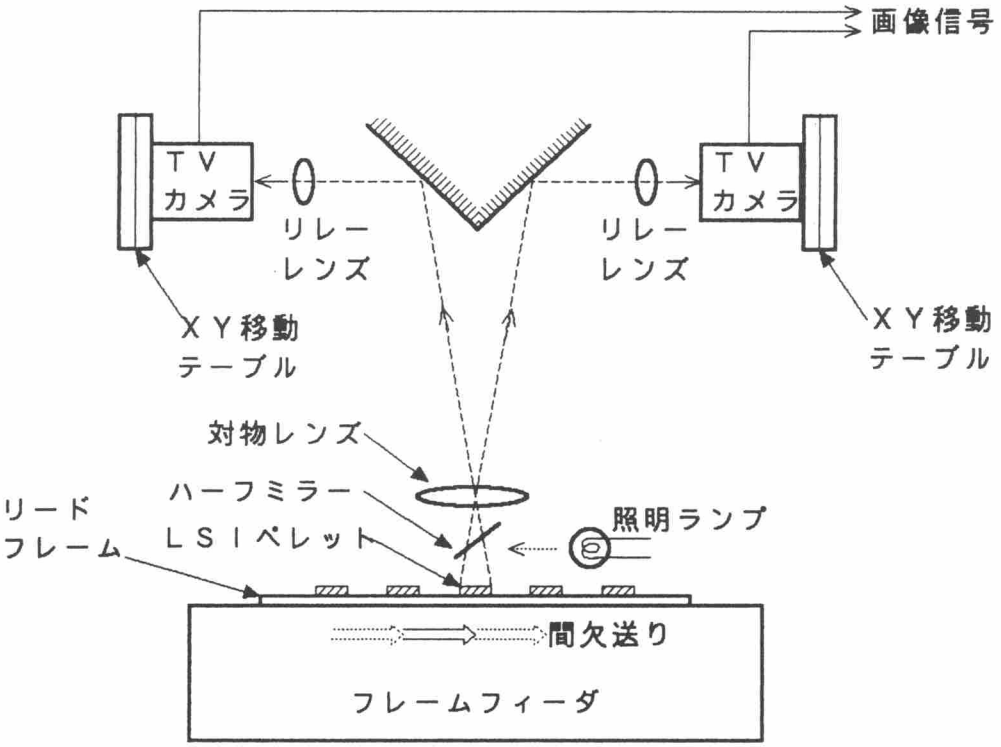


図４．１３　ＬＳＩ位置認識のための画像入力系

4.4.4　ＬＳＩ位置認識のための画像入力装置

前項までの検討に基づき、ＬＳＩの位置を認識するための画像入力装置を開発した。図４．１３はこの画像入力装置の構成を表す。基本的には、従来位置測定ステーションで行なわれていた目視による位置測定作業を、そっくり機械に置き換えるため、ペレット送り機構としては、従来から使われていたフレームフィーダをそのまま活用するようにした。具体的には以下のような画像入力装置を開発した。

（１）　視野：

４．４．２の考察から２視野方式としては、対物レンズとして顕微鏡レンズを使用し、２台のＴＶカメラ(ビジコン)でペレットの周辺部を同時に２箇所撮像できるようにした。視野の大きさは、**４．４．１**の検討から垂直方向480μｍ、水平方向640μｍとした。また認識対象であるペレットは、３㎜□～６㎜□の大きさで、正方形、長方形何れの形状もあるため、品種の変更時にも容易にＴＶカメラの視野の位置が調整できるように、Ｘ方向にもＹ方向にも独立に移動できる移動テーブルにＴＶカメラを搭載するようにした。

（２）　ＴＶカメラ：

商用ＴＶ放送では、標準のＮＴＳＣのＴＶ信号を得るために、ＴＶカメラの画像信号は水平方向15.75ＫＨz,垂直方向６ＭHzで走査される。本研究で用いたＴＶカメラでは、商用のＴＶモニタを使用できるよう、標準の走査方式に準拠させた。ただし通常ちらつき防止をなくすためにインターレース(飛越走査)が採用されるが、本研究にとっては望ましくないため、ノンインターレースにした。その結果、カメラの解像度は320×240画素である。従って１画素の大きさは２μｍとなる。この値は目標精度±10μｍの１/５であり、後述のＴＶカメラの図形歪、位置認識アルゴリズムによるばらつきなどを考慮したとしても、目標精度を十分確保できる値である。但しここでは述べなかったが、一般にＴＶカメラからの信号はシェーディングや図形歪などの欠点を持っているために、本研究では補償回路を設け、これらの影響をほとんど無視できるように工夫した。

（３）　ペレット送り機構との関係：

フレームフィーダはペレットが図の光学系の真下に入るように、順次間欠的にリードフレームを移送する。停止位置には２台のカメラが設置されていて、各視野の中に認識すべきボンディングパッドが撮像され、アナログ画像信号として認識装置へ送られる。ただし

ＴＶカメラには残像があるため、ペレット停止後残像が無視できるまで画像処理を待たせなければならない。これは次章で述べる位置認識装置側で対応するようにした。

（４）　照明方式：

４．４．３の検討結果から、低電力(12W以下)でも認識処理のために十分な信号が得られる落射照明を採用した。

以上のようなＬＳＩ位置認識のための画像入力装置の開発を通じて、高精度な位置認識を行なうためのＴＶカメラの視野の大きさの決め方、２視野実現のための光学系の構成法、および安定な認識を行なうための照明方式など、ＬＳＩ位置認識に最適な画像入力技術を確立できたと考える。

４．５　結言

ＬＳＩの組立て工程における位置測定ステーションの自動化の必要性を説明した上、自動化実現のために開発した、位置認識システムにおける画像入力技術について述べた。本章で得られた結果を、以下に要約する。

（１）　ＬＳＩペレットの位置を認識する場合、目標精度を満足するために視野数としては最低２台のＴＶカメラによる２視野以上が必要であることが分かった。

（２）　２視野の場合、ペレット付け、測定系のばらつきをカバーし、かつ認識対象のボンディングパッドを視野内にとらえること、という観点から視野の大きさを決めることができた。

（３）　２視野を実現する方法として、ＴＶカメラと光学系の構成・動作方法および視野の位置変更容易性の観点から、種々の実現方式を検討した結果、二つの拡大像を空間的に別々の位置に結像させ、２台のＴＶカメラで同時並列入力する方式が最も高い精度を確保できることが分かった。

（４）　真空管式の撮像管を用いた標準解像度のＴＶカメラでも、目標の検出精度が十分得られる見通しを得た。

（５）　照明方式として落射(明視野)照明と斜向(暗視野)照明によるＴＶカメラ感度のフィージビリティ実験をおこなった結果、落射照明により認識処理のために十分な

信号が得られる見通しを得た。

以上の結果に基づきＬＳＩ画像入力装置を開発した。この開発を通じて、ＬＳＩ位置測定ステーションを自動化するための画像入力技術を確立できた。

本章で得られた成果に基づき、次章ではＬＳＩペレットの２値化方式、位置認識アルゴリズム、装置化方式を検討、考察し、それに基づき開発した位置認識装置と画像入力装置の結合システムを構成した上、そのシステムをＬＳＩ測定ステーションに適用したフィールドテストの結果について述べる。

参考文献

（１） 江尻，太田，池内："マシンビジョン"，昭晃堂，第１章(1990-5)

（２） 目瀬，池田，烏野，江尻："プリント基板の傷認識"，昭４８電学全大，pp.1823-1824(1973)

（３） 目瀬，烏野，池田，江尻："複雑パターンを対象とした傷抽出装置方式"，電学論Ｃ，Vol.94-C, No.5, pp.89-96(1974-5)

（４） Ejiri M., Uno T., Mese M. and Ikeda S. : "A Process for Detecting Defects in Complicated Patterns", Computer Graphics and Image Processing, Vol.2, pp.326-339(1973)

（５） 烏野，目瀬，江尻："複雑パターンの傷認識"，電学論Ｃ，Vol.95-C, No.3, pp.53-60(1975-3)

（６） 烏野，目瀬，池田，江尻："複雑パターンの異常認識"，昭４８電学全大1347, pp.1821-1822(1973)

（７） Mese M., Miyatake T., Kashioka S., Ejiri M., Yamazaki I. and Hamada T. : "Automatic Position Recognition Technique for LSI Assembly", Proc. 5th IJCAI, pp.685-693(1977-8)

（８） 柏岡，江尻，坂本："時分割パターン認識技術による郡制御トランジスタ組立システム"，電学論(Ｃ), Vol.96-C, No.1, pp.9-16(1976-1)

（９） Kashioka S., Ejiri M. and Sakamoto Y. : "A Transistor Wire-bonding System

Utilizing Multiple Local Pattern Matching Technique", IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, Vol.SMC-6, No.8, pp.562-570(1977-10)

(10) 沼倉："トランジスタの自動組立て", 機械学誌, Vol.72, No.604, pp.657-663 (1969-5)

(11) Baird, M.L. : "An Application of Computer Vision to Automated IC Chip Manufacture", Proc. of 3rd IJCPR, pp.3-7(1976-12)

(12) 安江, 河合："パワートランジスタのボンディング工程の全自動化", ロボット, No.13(1976-12)

(13) 若宮, 小坂, 稲荷："半導体素子の表面パターン位置認識", 第16回SICE学術講演会予稿集, pp.623-624(1977-8)

(14) Baird, M.L. : "An Application of Computer Vision to Automated IC Chip Manufacture", IEEE Trans. On Sys., Man and Cebern., Vol.SMC-8, No.2 ,pp. 133-139(1978-2)

(15) 成瀬, 山田,酒川,五十嵐,山崎,時崎："トランジスタペレットの電極認識アルゴリズム", 昭和53年信会総全大, 1026(1978-3)

(16) 石原他："パターン認識技術を導入した全自動ボンディングシステム", 信学総全大, 昭53, Vol.15, 1027(1978-3)

(17) 成瀬他："ＬＳＩペレット位置検出装置の開発(Ⅰ)-システム", 信学総全大, 昭53, Vol.15, 1028(1978-3)

(18) 成瀬他："ＬＳＩペレット位置検出装置の開発(Ⅱ)-位置検出の方法", 信学総全大, 昭53, Vol.15, 1029(1978-3)

(19) 宮武, 柏岡, 目瀬, 烏野, 阿藤："ハイブリッドＩＣ自動組立て用の自動焦点調節装置", 昭５４電学東支大, 322, pp.439-440(1979-11)

(20) 嶋, 柏岡, 烏野："半田電極系パワートランジスタの自動位置認識", 昭５４電学東支大, 321(1979-11)

(21) 山田他："汎用位置検出ユニットを適用したＩＣボンダ", 昭53精機学総全大, ９, 779(1980)

(22) 烏野："自動組立てにおけるパターン認識の応用", 情報処理, Vol.22, No.4, pp. 286-291(1981-4)

(23) 久保田，浮田,會田："光学技術ハンドブック"，朝倉書店，pp.847-853(昭和43年10月)

(24) Uno T. et al："An Industrial Eye that Recognizes Hole Position in a Water Pump Testing Process", Computer Vision and Sensor-based Robot edited by Dodd G. and Rossol L., Plenum Pub. Co.(1979)

5．　ＬＳＩ組立て自動化のための位置認識システム

5.1　緒言

前章において、ＬＳＩ組立て工程における、位置測定ステーションを自動化する必要性を説明した上、そのために必要な画像入力技術を確立し、その応用として画像入力装置を開発した。[7] これに基づき本研究では、この画像入力装置の２台のＴＶカメラから得られる画像を利用する自動位置認識システムを開発した。[7] 本章では、この自動位置認識システムにおける心臓部ともいえる、位置認識技術の２値化アルゴリズム、認識アルゴリズム、それに自動認識システムによるフィールドテストの結果について述べる。

さて、位置認識装置で画像入力装置からの信号を処理する場合、その前処理として２値化技術はきわめて重要な技術である。フィールドにおける環境や対象の様々な変動要因に対しても、対象の濃淡画像を安定に２値化できれば、(１)装置の処理速度を高速にできる、(２)装置規模が簡単になる、など実用的に大きな利点が生じる。第３章ですでに述べた傷抽出装置[2)～(4)]を初め、その後のトランジスタの全自動組立てシステム、[8)(9)] ボルト締緩装置、[10)(11)] ポンプの給排水孔認識、[12)] などの開発はすべてこの２値化処理を前提にしており、２値化できるかどうかが、本研究の大きな鍵を握っていると言っても過言ではない。本研究ではこのような変動要因の影響を軽減するため、２値化アルゴリズムとして、“白黒平衡法”など三つのアルゴリズを開発した。[7] これはフィールドにおける様々な変動要因に対しても、安定に２値化動作をすることを目的としたものである。

また前章の緒言でも述べたように、位置認識システムとして、認識精度±10μｍ以下、認識率99.9％以上という目標性能が要求された。このうち認識精度に関しては、前章の画像入力技術により±２μｍ/画素という値を設定したが、上記変動要因あるいは認識装置の２値化、認識の両アルゴリズムの誤差などにより、上記目標精度を確保できるかが課題として残されていた。また上記のような高い認識率を確保するために、認識対象のパターン変形などの認識阻害要因があっても、安定かつ高精度に認識できるアルゴリズム開発が

必要であった。認識アルゴリズムは、“星座認識”と“ミクロ認識”などを組み合わせ、星座認識で阻害要因に対して柔軟に対応させ、ミクロ認識で高精度化を計れるよう、多段型のアルゴリズムを開発した。[7] ただし星座認識というのは部分パターンマッチング[8]の一種であり、ミクロ認識とは窓枠の白面積を計測する方法[12]の一種である。本研究では、開発した２値化、認識の両アルゴリズムが、課題を解決し目標性能を満たしているかを実際に確認するために、高速画像処理装置と小型計算機のハードウェア処理、ソフトウェア処理を組み合わせた位置認識装置を開発した。そして、前章で述べた画像入力装置を接続することにより自動位置認識システムを構築し、ＬＳＩ位置認識のフィールドテストを行った。

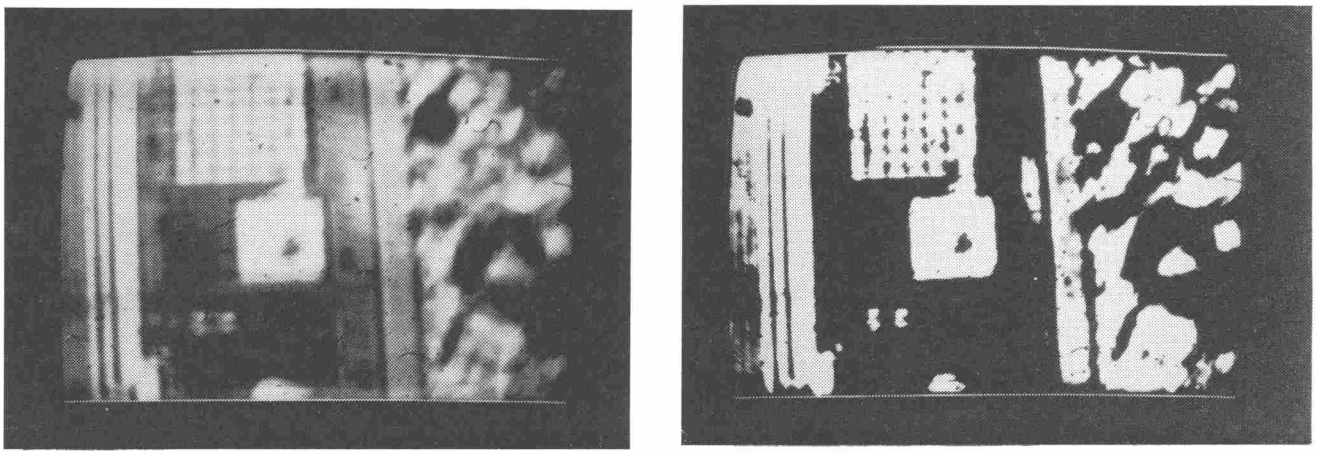
本章では、各開発アルゴリズムの検討内容と、装置化方式および自動位置認識システムによるフィールドテスト結果について述べる。

５．２　開発アルゴリズムの目標と課題

位置認識システムの認識率の目標は99.9％以上である。この目標達成のためにアルゴリズムが解決しなければならない課題を以下に説明する。

（１）　対象に関する課題：

４．４．３で述べたように、ＬＳＩペレットを落射照明した場合、比較的安定な濃淡画像が得られることが分かった。図５．１はペレットを落射照明しＴＶカメラで撮像したときのアナログ画像と、後述の“白黒平衡法”という２値化アルゴリズムで２値化した例である。（ａ）のようにペレットの画像はAl（アルミニューム）部が最も明るく、続いてS_iO_2（酸化シリコン）部、S_i（シリコン）部、A_u-S_i（金-シリコン）共晶部、または金箔部の順に暗くなる。但しA_u-S_i共晶部は表面の凹凸で鏡面反射する成分があり、かなりの明るさを呈する可能性がある。ＴＶカメラで撮像した場合、一般的には各部分の信号レベルは多階調になる。また反射むら、汚れ、蒸着条件などにより、ペレット毎の反射量の絶対値はばらつく。また、（ｂ）の２値化画像中央部の白い正方形状のパターンは、本研究の認識ターゲットであるボンディングパッド（以下パッドと略記）である。パッド内部にある黒点は前工程での電気的検査で“プローブ”（検査針）によって付けられた傷跡である。パッドには必ずこのようなプローブの傷跡が１個以上付けられており、パッド内での位置はランダムであ



（a）アナログ画像　　（b）２値化画像
（白黒平衡法）

図５．１　ＬＳＩペレット画像の２値化

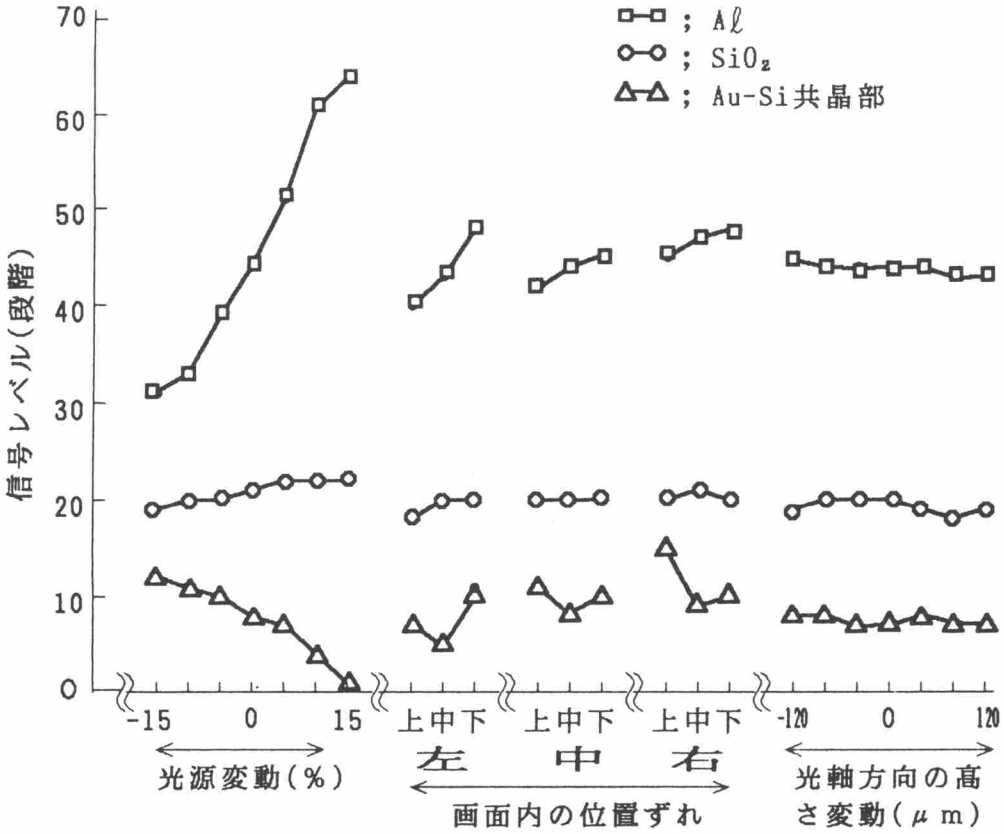


図５．２　種々の要因による信号レベルの変動

る。Aℓで形成されたパッドパターンは正反射成分が多いため、ＴＶカメラには白く写るのに対して、プローブの傷跡はＶ字方にえぐられているため、反射光は拡散し黒く写る。

２値化アルゴリズムとしては、このようにばらつきのある多階調画像から、パッドとその周辺部を確実に分離しなければならない。また認識アルゴリズムとしては、プローブ傷跡がどこに存在しようとも、常に安定に所定のパッドを認識しなければならない。　（２）

環境に関する課題：

ＴＶカメラの画像信号は、フィールドでの様々な環境からの要因の影響を受けて変動する。アルゴリズムとしては、こうような変動に対しても安定に動作する必要がある。本研究では、フィールドで発生すると考えられる様々な環境からの変動要因を想定し、図５．２のように、(ｉ)照明光源の電圧変動、(ii)パッド像の画面内での位置ずれ、(iii)ペレットの光軸方向のずれ、という三つの要因で代表させ、各変動要因による影響をＴＶカメラからの信号レベル(64階調にディジタル化)でとらえるようにし、ペレットパターンを構成する各材料毎に調べた。その結果を次に述べる。ただし各プロット点は多数のペレットの平均値である。

(ｉ)は画面全体に均一な変動を及ぼす環境要因を想定したもので、実際には光源電圧変動以外にも、Aℓ蒸着条件の変化による反射率の変化、光源輝度の径時変化、ＴＶカメラの感度劣化など様々な要因が考えられる。本研究では、試料入手が困難だったため、照明光源の電圧を実際よりかなり大き目の±15%と与えることにより、上記のような様々な要因をトータルとして代行させた。(ii)はペレット付けのばらつきで画面内のパッドの位置がばらつくことを想定し、条件としてペレットを視野中心から±150μｍ上下左右に移動した。これはＴＶカメラのシェーディングによる撮像位置での影響を調べるためである。(iii)は変動条件として、ペレットを合焦点位置から光軸の高さ方向に±120μｍの範囲で移動させた。これはリードフレーム機構のばらつきなどにより起こる、“ピントずれ”の影響を調べるためである。

図から、光軸方向の変動に対して、信号レベルはほとんど変化しないが、光源変動では倍半分以上影響を受け、画面内の位置ずれで若干影響を受けることが分かる。特に光源の電圧変動の影響により、Aℓ部、A_u-S_i部の信号レベルは著しく変動する。２値化アルゴリズムとしては、このような変動要因に対して、Aℓ部とS_iO_2部を安定に分離するようにしなければならない。また電圧が上昇すると光源輝度が増加し、Aℓ部の信号レベルが

高くなるのは当然だが、S_iO_2部はあまり変化せず、A_u-S_i共晶部は逆に低下するという点は、アルゴリズムとして留意しなければならないことである。

なお、画面内での位置ずれに関して、Aℓ部とA_u-S_i共晶部の感度傾向が異なっている点は注意を要する。

5.3 アルゴリズムの開発方針

本研究では、アルゴリズムを開発するにあたり、次のような方針に従って開発するようにした。

（1） 開発方針：

自動位置認識装置は画像処理を高速処理するためのハードウェアと、複雑な計算や処理を行うための小型計算機のシステムで構成する。2値化、認識の両アルゴリズムをシステムとしてインプリメントする場合、目標性能はもちろん、ハードウェア処理と計算機処理がバランス良く機能分割するとともに、処理時間と装置規模が実用的なレベルのものにしなければならない。

（2） インターフェースのタイミング：

ＬＳＩ位置認識では、上述のような変動要因は、時間的に比較的緩やかに変化するという特徴があることと、（1）の理由から、計算機とハードウェアがインタフェースするタイミングが画面単位になるような2値化アルゴリズムにする。

いっぽう認識アルゴリズムは、処理の高速化と装置規模の兼ね合いで、インタフェースのタイミングを決める。

5.4 2値化アルゴリズムの開発

5.4.1 閾値の標準形式

本研究では、“頻度分布法”、“白黒平衡法”、“白黒検出法”という2値化アルゴリズムを

開発した。何れのアルゴリズムでも閾値θを以下のような形式にする方針で開発した。すなわちβを$0 \leqq \beta \leqq 1$なるパラメータとして、

$$\theta = \beta \theta_W + (1-\beta)\theta_B \qquad (5.1)$$

のように、閾値θが後述のθ_Wとθ_Bの加重和として表現できるようにした。本論文では、今後このような形式のことを、“標準形式”、θ_Wを“(閾値θの)白要素”、θ_Bを“(閾値θの)黒要素”と呼ぶことにする。本研究においては、閾値の白要素としては認識のターゲットであるAℓパッド、閾値の黒要素としてはターゲット周辺のS_iO_2、をそれぞれ極力反映する信号レベルになるような方針でアルゴリズムを開発するようにした。このような形式にすることにより、対象とアルゴリズムが求めた結果の物理的な対応が取りやすくなり、不都合が起きた場合、原因究明の見通しが付けやすいと判断したからである。

5.4.2 頻度分布法

このアルゴリズムは、対象の明るさすなわち画面全体の信号レベル毎の頻度分布を求め、その頻度分布を非線形変換して閾値を決める方法である。

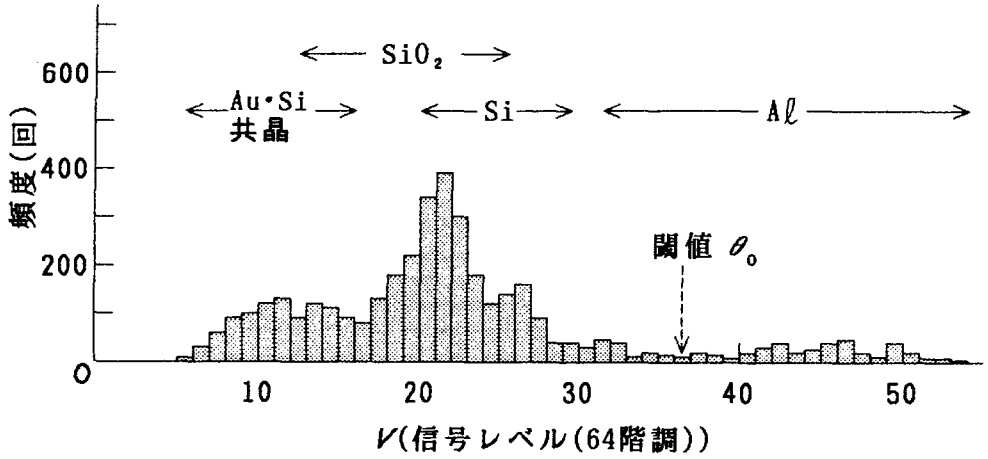
図5.3(a)は一つのペレットの明るさ、すなわち画像の信号レベルに関する頻度分布である。図のように緩やかではあるが、Aℓの部分にピークが見られる。検出すべき閾値をθ_0とすると、θ_0はAℓ部とS_iO_2部の中間レベルに求まるべきであるが、分布には至る所に小さな凹凸が存在するため、容易にはθ_0を求められない。このような凹凸を除去する何らかの補正処理が必要である。

そこで補正処理として次の二つを考えた。

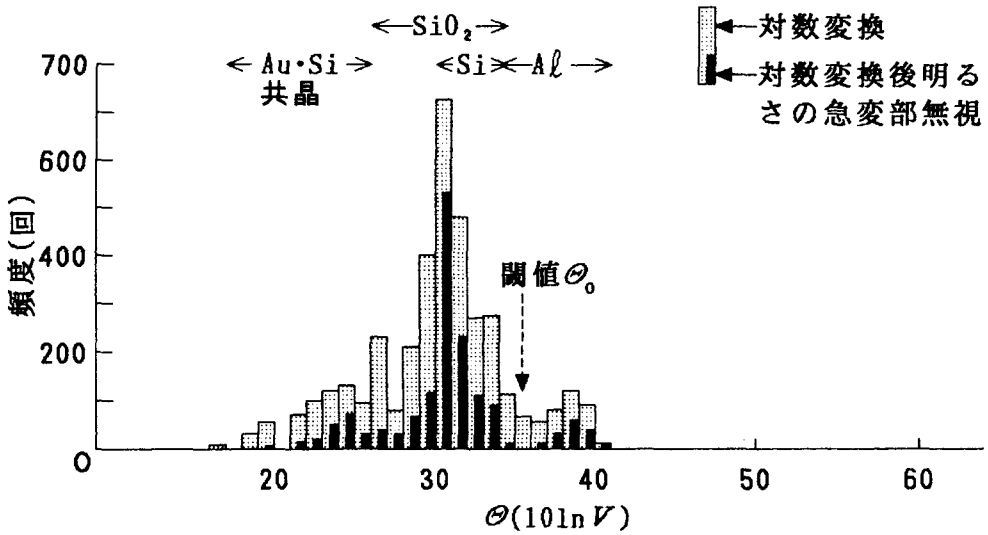
(1) 信号レベルの圧縮処理：

この処理は、人間の目で映像をモニタする限り、各成分内の明るさのばらつきは検出しにくいということに着眼したものである。一般に人間の感覚には、“Weber-Fechnerの法則(対数法則)”あるいは“Stevenceの法則(指数法則)”と呼ばれる精神物理学の法則があることが知られている。本研究では画像の圧縮にこれらの法則の適用を考えた。

図5.3(a)から凹凸は特に信号レベルが高い部分に多いことが分かる。これはAℓ部の表面がフラットではないため、場所により反射率がばらつくからである。このばらつきを



(a)信号レベルの頻度分布



(b)(a)の階調を対数変換した場合の頻度分布

図5．3　頻度分布法による2値化

平滑化するため、高い部分を抑止できるWeber-Fechnerの法則を適用し、信号レベルf(u,v)に対してklog|f(u,v)|を作用させた。ここで k は定数である。図5.3(b)のハッチした方の頻度分布は k=10 とし、図5.3(a)に上記の対数処理を施したものである。図のように、(a)に比べて、信号レベルの高い部分の凹凸が平滑化されていることが分かる。

(2) 明るさ急変部除去：

(1)の処理でも一応閾値を求めることはできるが、S_i部の部分にわずかな凹凸が残っている。そこで処理をより安定化させるため次のようにする。分布のバレーすなわち頻度が少ない部分は、対象の明るさが異なる成分の境界に対応し、その部分で画像の信号レベルは急変すると考えられる。そこで対象画像から信号レベルが急変する画素を上記頻度分布から除去する処理を行った。この処理は画像のパターンの濃淡が緩やかな部分のみ頻度をカウントするため、ピークとバレーの特徴をより強調する効果があると考えられる。図5.3(b)の黒く塗りつぶした方の頻度分布は、この処理を施した結果である。図からS_i部の凹凸は除去されていることが分かる。

(3) 閾値の決定：

(1),(2)の対数変換処理が施された頻度分布のピークの内、例えば一番信号レベルの高い値を白要素Θ_L、2番目を黒要素Θ_Bとみなして対数変換後の閾値Θ_0を

$$\Theta_0 = \beta\,\Theta_L + (1-\beta)\,\Theta_B \qquad (5.2)$$

とする。そこで、元の画像信号に対して求めるべき閾値θ_0は、

$$\theta_0 = \exp(\Theta_0/k) \qquad (5.2)'$$

のようにΘ_0を逆変換すれば求まる。上のようにして決めた対数変換後の白要素Θ_WはAℓ部、黒要素Θ_BはおおむねS_iO_2部に対応している。これにより所定の閾値を求めることができ、所期の目標は満たされているといえる。

しかしこれを実現するためには、対数変換、Θ_0の計算、逆変換などは計算機でできるが、頻度分布を求める部分はハードウェアによる実時間(167ns)処理になるため、信号レベルごとの64個のカウンタが必要で、規模が大きくなってしまい実用的ではないため、このアルゴリズムはあくまで原理検討ということに留めた。

5.4.3 白黒平衡法

後述のように、このアルゴリズムは実用化され方法であり、本研究ではかなり詳細な検討を行った。従って本論文においてかなりの頁数を占めことになるが、まずはその研究過程を順を追って説明する。

（1） 基本原理：

このアルゴリズムは対象全体の濃淡画像の平均的な信号レベルの分布から閾値を求める方法で、その原理は次のようになる。

まず最初に対象の明暗信号に対し任意の仮の閾値を与える。次いで仮の閾値より高いレベルと低いレベルの信号成分の各平均値を求める。そしてこれらの平均値の加重和を元の仮の閾値に補正することにより、新たな仮の閾値を生成する。以下この操作を同一画像について繰返し、仮の閾値がほぼ一定値に落ち着くまで、あるいは所定回数まで続ける。この一定値を以降では“平衡閾値”と呼ぶことにしする。このように白と黒がバランス(平衡)するように閾値を決めるため、このアルゴリズムのことを“白黒平衡法”と呼ぶことにする。

（2） 処理手順：

以上の繰返し操作を式で表せば次のようになる。すなわち、$n=0,1,\cdots,N$に対して、$\theta(n)$を仮の閾値、$\Delta f_w(n)$を$\theta(n)$以上の平均値、$\Delta f_B(n)$を$\theta(n)$以下の平均値とすれば、新たな閾値$\theta(n+1)$は、

$$\theta(n+1)=\theta(n)+\beta\,\Delta f_w(n)+(1-\beta)\,\Delta f_B(n) \qquad (5.3)$$

と表される。ここに、

$$\Delta f_w(n)\equiv \int_{t\in T_w(n)} (f(t)-\theta(n))dt \Big/ \int_{t\in T_w(n)} dt \qquad (5.4)$$

$$\Delta f_B(n)\equiv \int_{t\in T_B(n)} (f(t)-\theta(n))dt \Big/ \int_{t\in T_B(n)} dt \qquad (5.5)$$

である。$f(t)$は対象の画像信号(この場合はアナログ)、$T_W(n)$，$T_B(n)$は、それぞれ$\theta(n)$以上、$\theta(n)$以下の時間区間である。式(5.4)の$\Delta f_w(n)$は$\theta(n)$から見た白側の信号レベルの平均的なずれを表す。$\Delta f_w(n)$は白部分の面積で正規化されているため、原理

的には一定となる筈である。式(5.5)の黒側の信号レベルの平均的なずれ$\Delta f_B(n)$にも同様なことがいえる。

(3) 2値信号モデル

このアルゴリズムをより明確にするために、簡単な信号モデルを使って説明することにする。

図5.4(a)はレベルがf_w, f_Bの二つからなる2値信号モデルである。図中T_W, T_Bはそれぞれレベルがf_w, f_Bの部分の時間長である。図において仮の閾値$\theta(n)$が$f_B \leqq \theta(n) \leqq f_w$ならば、式(5.3)の右辺第2項+第3項を

$$\Delta\theta(n) \equiv \beta\Delta f_w + (1-\beta)\Delta f_B \tag{5.6}$$

とおき、式(5.4),(5.5)を代入すれば、

$$\Delta\theta(n) = \beta f_w + (1-\beta) f_B - \theta(n) \tag{5.7}$$

となる。式(5.7)において、$\Delta\theta(n) \to 0$となるときの$\theta(n)$をθ_*とおけば、

$$\theta_* = \beta f_w + (1-\beta) f_B \tag{5.8}$$

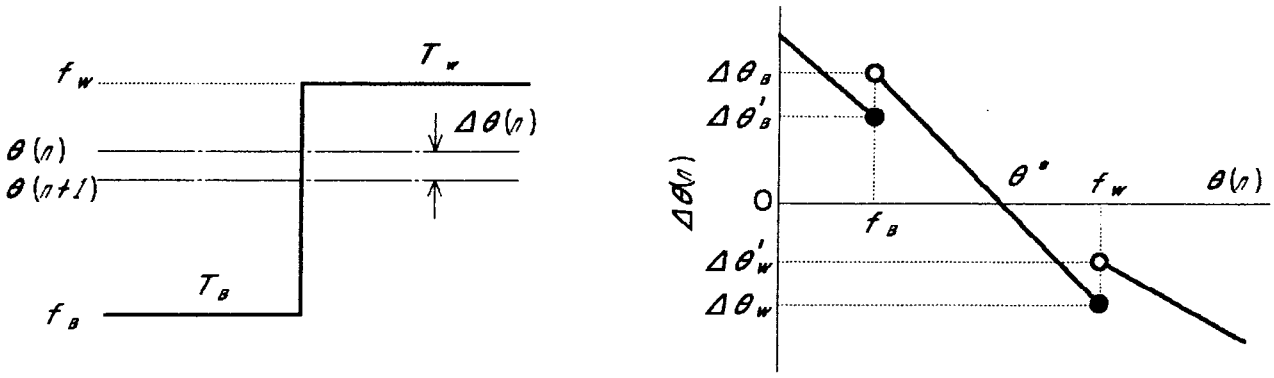
となる。この式からθ_*はT_w, T_Bに依存しないことがわかる。θ_*は平衡閾値に相当する。2値信号モデルでは1回で$\Delta\theta(n)=0$となるが、一般にN回の繰返しののち$\Delta\theta(n)$が十分小さな値になれば、$\theta(n)$をθ_*平衡閾値に近似することができる。図5.5(b)は2値信号モデルに対する$\theta(n)$と$\Delta\theta(n)$の関係を示すものである。図のように$\theta(n)$がf_Bとf_wの部分で不連続点が表れる。いま、仮に不連続になる$\Delta\theta(n)$を図のように$\Delta\theta_w$, $\Delta\theta_w'$, $\Delta\theta_B$, $\Delta\theta_B'$とおけば、

$$\Delta\theta_w = (f_B - f_w)\beta \tag{5.9}$$

$$\Delta\theta_B = (f_w - f_B)\beta \tag{5.10}$$

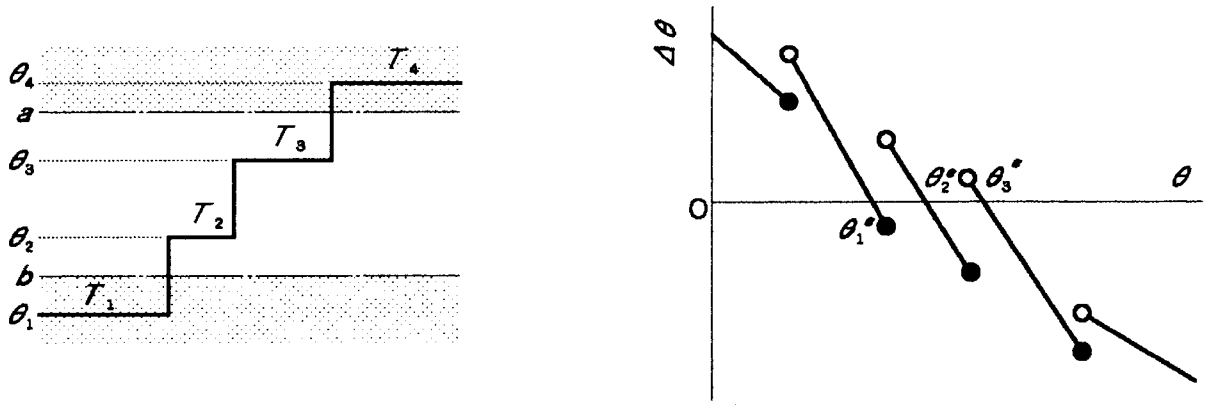
$$\Delta\theta_w' = \frac{T_B}{T_W + T_B}(f_B - f_w)\beta \tag{5.11}$$

$$\Delta\theta_B' = \frac{T_B}{T_W + T_B}(f_w - f_B)\beta \tag{5.12}$$



(a)2値信号モデル　　(b)(a)に対する $\theta(n)$ と $\Delta\theta(n)$ の関係

図5．4　2値信号モデルに対する仮の閾値と閾値修正量の関係



(a)4値信号モデル　　(b)(a)に対する θ と $\Delta\theta$ の関係

図5．5　4値信号モデルに対する仮の閾値と閾値修正量の関係

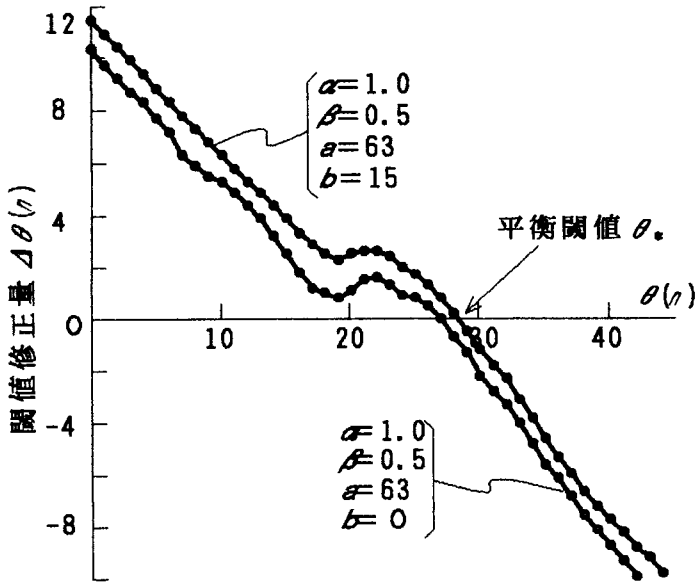


図5．6　白黒平衡法による閾値修正曲線

$$\Delta\theta_W < \Delta\theta_W' < 0 < \Delta\theta_B' < \Delta\theta_B \qquad (5.13)$$

なる関係式が得られる。従って、仮の閾値の初期値のいかんに関わらず、θ_*は唯一の平衡閾値であるといえる。

（4） 多値信号モデル：

前項の図５．３（ａ）の頻度分布からも分かるように、現実のペレットの画像は、このように単純なものではなく、多段階の信号レベル成分を含んだ複雑なものである。図５．５（ａ）は４値の信号モデルである。この場合上記と同様にして、（ｂ）のように三つの平衡閾値θ_{*1}, θ_{*2}, θ_{*3}が存在することがいえる。同様にして、一般にｍ（ｍ＝２，３，…）値の画像信号の場合、高々ｍ－１個の平衡閾値をもつことが容易に証明できる。

（5） 阻害要因の除去：

しかし多値だと処理が複雑なので、極力対象の信号を図５．４（ａ）のような２値信号モデルに帰着できるよう、２値化の阻害要因を除去するためのパラメータａ，ｂを導入した。ａはＴＶカメラの画像信号が飽和する部分を無視するためであり、ｂはA_u-S_i共晶部のように面積が広い暗部分の影響を無視するためである。すなわち上記時間長$T_W(n)$, $T_B(n)$を、$T_{Wa}(n)$, $T_{Bb}(n)$のようにパラメータａ，ｂ，ｎを含んだ形に置換した。ここに$T_{Wa}(n)$, $T_{Bb}(n)$は、画像信号ｆ（ｔ）がそれぞれ$a \geqq f(t) \geqq \theta(n)$, $b \leqq f(t) \leqq \theta(n)$になる総時間長である.このようにすれば、実際のペレットの画像信号は、図５．４（ａ）のような２値信号モデルに、より近似されることが期待できる。

（6） 標準形式：

ところで式（５．３）の$\theta(n+1)$は、式（５．４）,式（５．５）の積分を展開することにより、

$$\theta(n+1) = \beta \int_{t \in T_{Wa}(n)} f(t)dt \Big/ \int_{t \in T_{Wb}(n)} dt + (1-\beta) \int_{t \in T_{Bb}(n)} f(t)dt \Big/ \int_{t \in T_{Bb}(n)} dt \qquad (5.14)$$

と変形できる。式（５．１４）の右辺は**５．４．１**で述べた標準形になっており、有限回数の打切りで求まる平衡閾値θ_*も標準形になっているといえる。各要素の物理的な意味としては、式（５．１４）から白要素は平衡閾値より高い信号レベルの平均値の絶対値、黒要素は平衡閾値より低い信号レベルの平均値の絶対値、と解釈できる。

（7） 有効性確認実験：

以上のような白黒平衡法に関する（５）で導入したパラメータａ，ｂの有効性を確認する

実験を行った。

図５．６は実際のペレットに対する仮の閾値$\theta(n)$と閾値修正量$\Delta\theta(n)$の関係を示すものである。各パラメータは図に示すような値を与えた。ｂ＝０の曲線は全レベルを処理対象とした場合、ｂ＝15の曲線は$A_u S_i$共晶部を除去したものである。ここに画像信号、閾値ともに64階調にディジタル化されている。図から二つのグラフは全体的には、ほぼ平行移動の関係である。この現象はｂ＝15にした効果が表れていると考えられる。そのため、ｂ＝０の曲線は、ｂ＝15の曲線に比べて、極小値で$\Delta\theta(n)$軸に接近し、平衡閾値以外の閾値が求まる可能性が高い。従ってｂ＝15の曲線は、任意の初期値に対しても平衡閾値θ_*が安定に求まるといえる。なおａに関しては、S_iO_2部，Aℓ部何れも２値化の対象であるため、ａ＝63として上限を設けなかった。

（８）　システム化の検討：

式（５．１４）を装置や計算機で実現する場合、

$$\theta(n+1)=\beta\sum_{t\in T_{wa}(n)} f(t)/\sum_{t\in T_{wb}(n)} +(1-\beta)\sum_{t\in T_{Bb}(n)} f(t)/\sum_{t\in T_{Bb}(n)} \qquad (5.15)$$

のような時間方向もレベル方向もディジタルで表現できる。式（５．１５）の分子、分母は、画像走査と周期しながら該当の画素をハードウェアで計数するようにすれば簡単にその結果が得られる。また、乗除算演算は、ＴＶカメラの垂直帰線期間（約１．４ms）中に計算機ソフトウェアで計算するようにすればよい。このように処理することにより、式（５．１５）の繰返し計算は画面単位の処理で容易に実現できる。

５．４．４　白黒検出法

一般にペレットをＴＶカメラで撮像した場合、ペレットのAℓ部が最も明るくなるが、Aℓ部のうちでは必ずしもパッドの部分が明るくなるとは限らない。この原因は（１）ペレットの製造工程において蒸着条件が変化することにより、パッド部の反射率が低くなったり、（２）視野の中にAℓ部の反射率より高い反射率の部分（たとえばペレット付けに用いる金箔部）が入ったり、（３）製造工程中にパッドが汚れたり、（４）ＴＶカメラのシェーディングにより、視野の周辺部が暗くなったりすること、などであると考えられる。このように、パッド以外の最も明るい面積が大きくなると、白黒平衡法では白要素すなわち白側の

平均的なずれが大きくなり、閾値が本来より高くなる可能性がある。このようなことを防ぐために、“白黒検出法”と呼ぶ２値化アルゴリズムを開発した。その概要を以下に述べる。

白黒平衡法は画面全体の濃淡分布から閾値を決める方法であるのに対して、上記のような問題に対応するために、白黒検出法では局部情報を利用するようにした。すなわちパッド形状という局部的な情報を考慮し、その形状と同じ形状の最も信号レベルの高いパターンを求め、その位置とその周辺の信号レベルから閾値を求める方法であり、直接標準形で閾値を求められる特徴がある。

図５．７にその概要を示した。図において処理手順を以下のようにする。

（１） パッドＰと同じ大きさの正方形の領域Ｄを考え、画面全体からその平均的な信号レベル $f_D(u,v)$ が最も高い点 (u_0, v_0) を探す。

（２） 点 (u_0, v_0) に対応するＤの周りに、Ｄより若干大きい正方形を生成し、その辺 L_1, L_2, L_3, L_4 での平均的な信号レベル $f_{L1}, f_{L2}, f_{L3}, f_{L4}$ の最低値を求める。

（３） 求まった $\max f_D(u_0, v_0)$ を白要素、$f_{L0} = \min f_{Li}$ を黒要素として、閾値 θ を、

$$\theta = \beta \max_{(u,v)} f_D(u,v) + (1-\beta) \min_{i=1,\cdots,4} f_{Li}$$

$$= \beta f_D(u_0, v_0) + (1-\beta) f_{L0} \qquad (5.16)$$

と求める。

一般に信号レベルの最大値を与える点 (u_0, v_0) は、パッドの中心に一致する可能性が高い。というのは、ＬＳＩの場合、いまのような視野においては、パッドと同面積の明るいパターンが発生する確率が少ないからである。パッド以外で明るい部分は、Ａℓの内部配線パターン、金箔の一部分などがあるが、これらはほとんどすべてパッドに比べて細長いパターンである。従って、パッドの周囲は S_iO_2 部なので、上記のようにして求めた最小値は S_iO_2 部の値と考えて差し支えない。

なお(現実にはほとんどありえないが)仮に信号レベルが高くパッドより広いパターンが存在した場合、その部分の信号レベルを誤って閾値の白要素としてしまう可能性がある。この場合黒要素も高い値になってしまい、閾値としてはパッドより高い値になってしまう可能性がある。その場合には例えば白要素と黒要素の差が所定の値より大きいかどうかを判定するようにすれば、このような不都合を防ぐことが可能である。

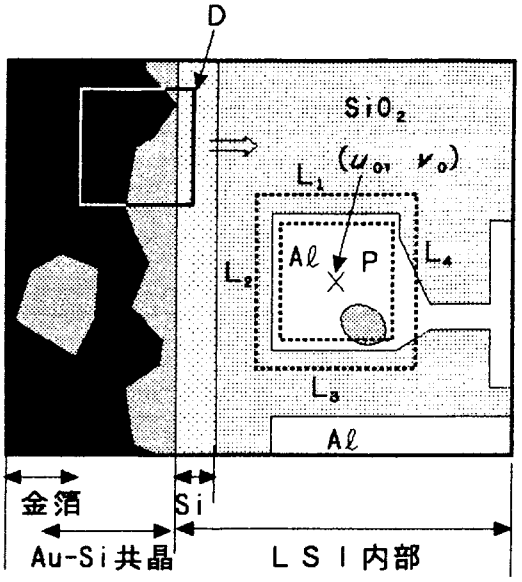


図５．７　白黒検出法の原理

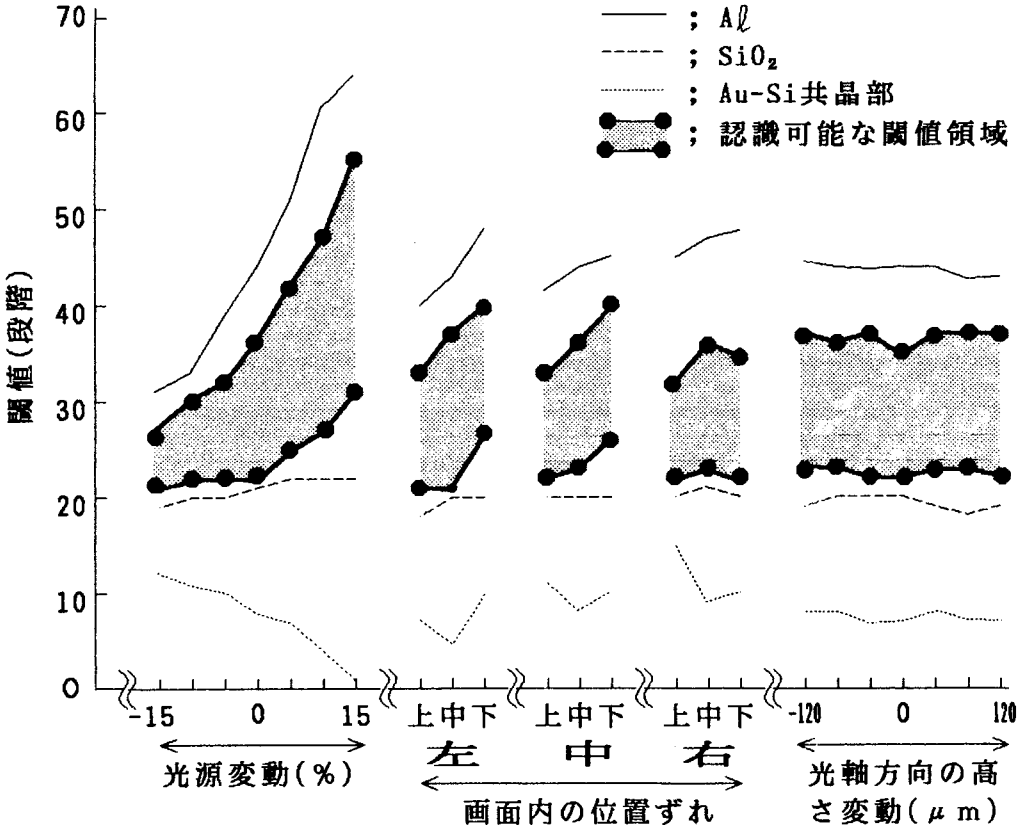


図５．８　　変動要因に対する認識可能な閾値領域

このように、このアルゴリズムは、パッド形状を考慮した局部処理により、本項冒頭のような原因にも、安定に動作させることを狙ったものである。

なお、本研究では1画素2μmとしたから、120μmのパッド全体で60×60画素とかなり膨大な多値情報を扱わねばならないため、ここでは画面の縦横とも4画素ごとにサンプリングし、15×15画素で実験を行なった。しかし、実時間で$f_D(u_0, v_0)$，f_{L0}を求めるためには、多値(6ビット)の2次元局部画像処理回路を持たねばならず、装置規模が大きくなるという欠点を持っていた。

5.4.5 アルゴリズムの評価

前項まで述べてきた2値化アルゴリズムの中で、何れを認識システムに採用するかを決めるため評価を行った。評価項目として、(1)装置規模、(2)閾値決定までの時間、(3)認識アルゴリズムから見た閾値の追従性、の三つを採り上げた。(1)については、各アルゴリズムの説明でも述べたように、比較的簡単なハードウェア、ソフトウェアで実現できる点で、白黒平衡法が他のアルゴリズムより有利である。(2)については、頻度分布法、白黒検出法は1画面内での処理で閾値が求まるのに対して、白黒平衡法は実験的に調べた結果、3画面でほぼ平衡閾値が求まることが分かった。従ってこの点では頻度分布法、白黒検出法が有利である。(3)は分かりにくいので、以下にその評価の方法と結果を述べる。ただし、頻度分布法は、頻度を実時間で求めるハードウェアが大規模になるため、あくまでも原理検討ということに留め、(3)の評価対象から外すことにした。

評価に先立ち、与えられた対象の濃淡画像からアルゴリズムを評価するための指標として、図5.8のハッチされた領域を用いた。この領域は、各変動要因の条件ごとに閾値を変化させた場合、認識アルゴリズムが正しく認識できる閾値の範囲を意味している。この閾値に関する領域のことを、ここでは(閾値の)“認識領域”と呼ぶことにする。2値化アルゴリズムから見れば、閾値がこの領域の中心に求まるほど、認識アルゴリズムが正認識する確率が大きいといえる。そこで本研究では、この領域の中心を指標にし、2値化アルゴリズムの閾値の追従性を評価することにした。

図5.9は、白黒平衡法に関する加重βをパラメータにした閾値の追従性を表す。(a)は黒レベルを無視しない場合(すなわちb＝0)、(b)は無視した場合(すなわちb＝15)で

ある。図から次のことがいえる。

（1） 全般的にいって、黒レベルを無視しないより無視した方が認識領域によく追従する。

（2） 黒レベルを無視するか否かにかかわらず、画面内の位置ずれに対する追従性がよくない。しかし黒レベルを無視した場合、光源変動や、光軸の高さ方向の変動に対して、閾値が認識領域の中に入り改善されることが分かる。このことから、A_u-S_iO_2の信号レベルを無視した効果があることを実験的にも確認できた。

（3） 追従性が良い黒レベルを無視する方の$\beta=0.4$, $\beta=0.5$, $\beta=0.6$に対応する閾値のうち、$\beta=0.5$の閾値が認識領域の中心付近を追従している。ところが、黒レベルを無視するか否かにかかわらず、$\beta=0.4$の閾値は認識領域から外れている。これはＴＶカメラのシェーディングが悪い場合、正しく認識できなくなる可能性があることを示唆している。

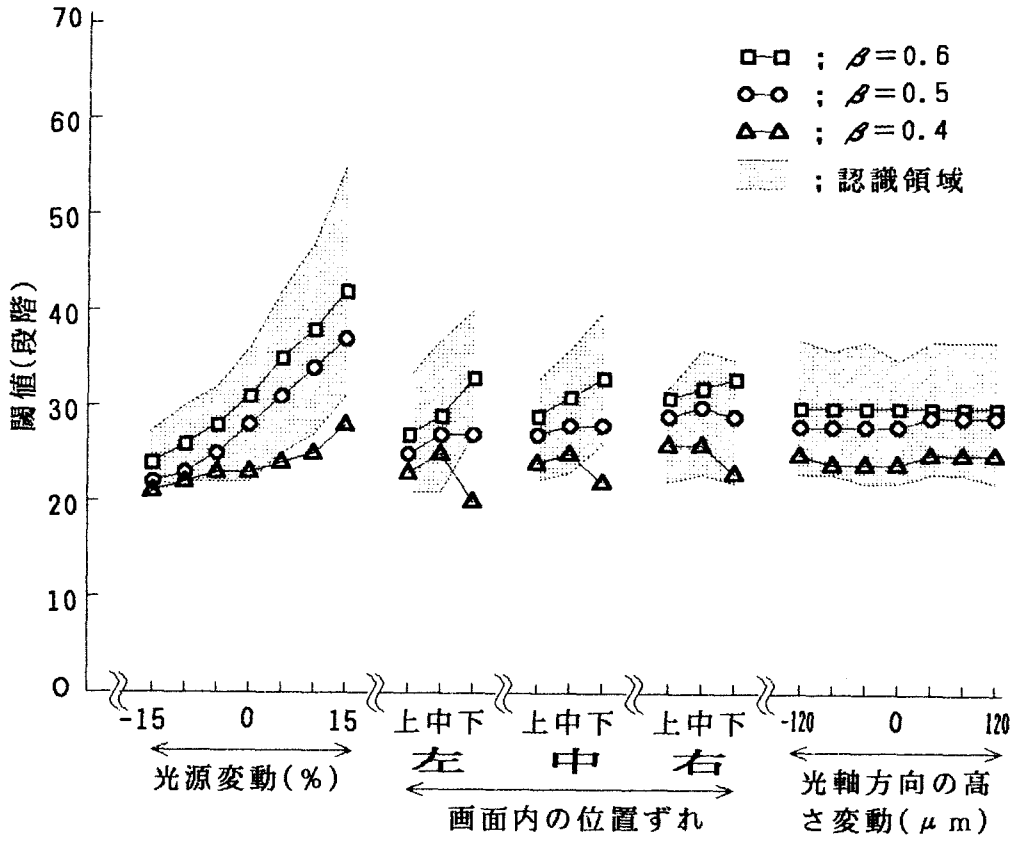
いっぽう図５．１０は、白黒検出法による閾値の追従性を表す。この場合、βを白黒平衡法と同じ値で変化さても閾値は、全般的に認識領域の中に入っており、白黒平衡法より閾値の追従性は良いといえる。

そこで、両者の閾値追従性を定量的に比較するため、認識領域の中心からのずれを表す評価指標を導入した。N_Dをある変動要因Ｄの中の条件の数、i_Dを要因Ｄの変動条件番号、ℓ_{Di}を条件ｉにおけるアルゴリズムで求められた閾値と認識閾値領域の最小値からのずれ量、m_{Di}を条件i_Dにおける認識領域のレベル幅とおき、評価指標σ_Dを

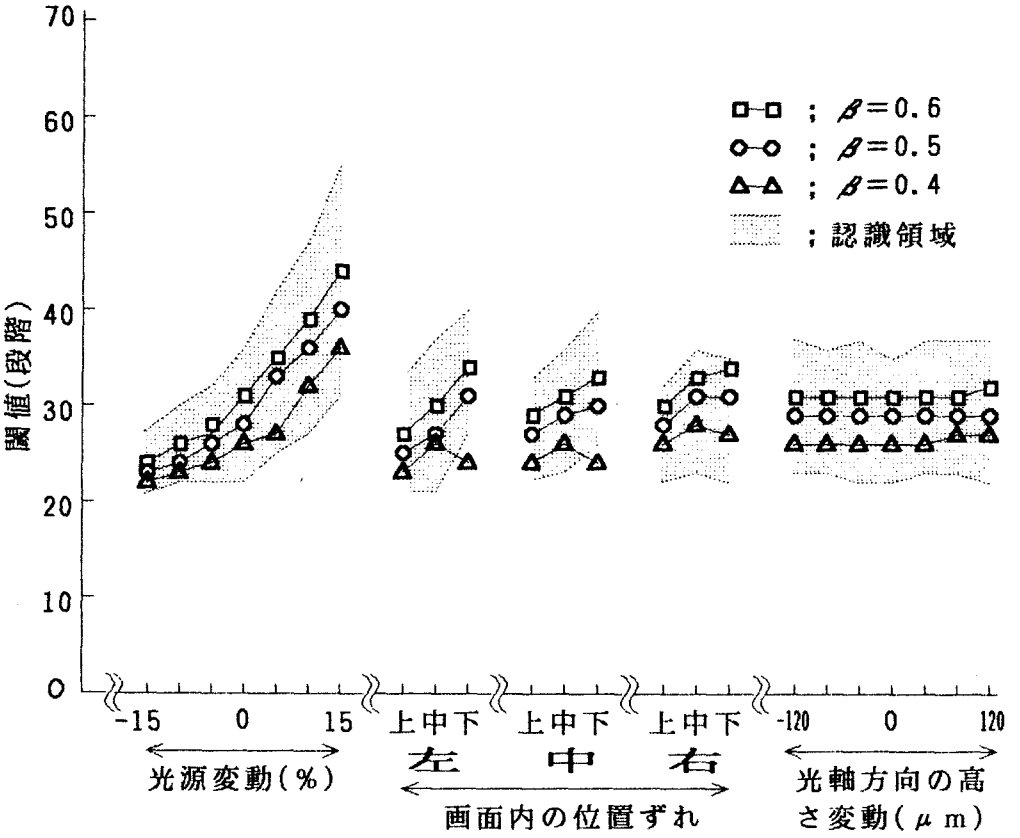
$$\sigma_D=\sqrt{\frac{1}{N_D}\sum_{i\in D}\left[\frac{\ell_{Di}}{m_{Di}}-\frac{1}{2}\right]^2} \qquad (5.17)$$

と定義する。$\sqrt{\ }$の中の各２乗項[　]の内容は、閾値と認識領域の中心値からのずれを正規化したもので、ℓ_{Di}/m_{Di}で条件毎の認識領域のレベル幅の違いを吸収している。また$\sum$の結果をN_Dで割ることにより、変動要因毎の条件数を正規化する。σ_Dは認識領域の中心からの標準偏差に相当し、このσ_Dを評価規範として各アルゴリズムを比較した。

図５．１１はその結果を示すものである。図から白黒平衡法、白黒検出法は何れも固定閾値法に比べて標準偏差が小さい、すなわち追従性が良いといえる。両者の総合的な標準偏差σの最小値は、白黒平衡法が$\beta=0.55$で$\sigma=10\%$、白黒検出法$\beta=0.6$で$\sigma=9\%$で



(a)黒レベルを無視しない場合($a=63$, $b=0$)



(a)黒レベルを無視した場合($a=63$, $b=15$)

図5．9　白黒平衡法による閾値の追従性

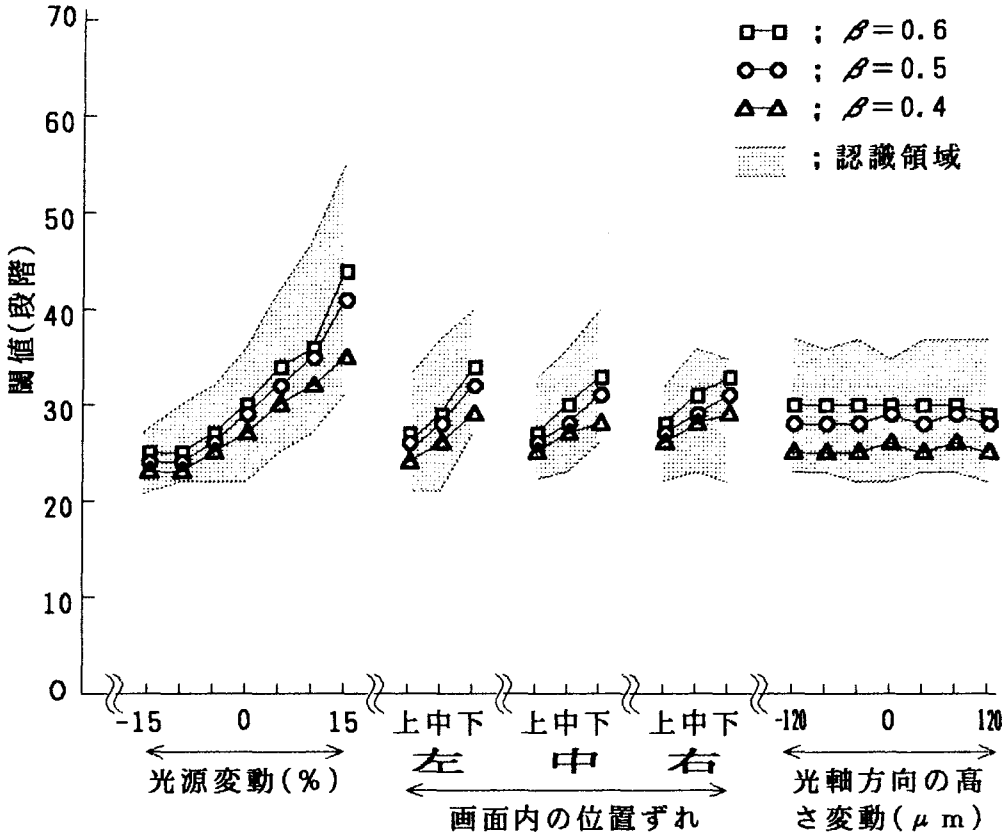


図５．１０　白黒検出法による閾値の追従性

ありほぼ同じ値であった。図５．１２は各σの最小値に対応する閾値の追従性を表す。図５．１１、図５．１２から次のことが考察される。

（１）　標準偏差σの最小値に対応するβによる閾値は、図５．１２のように、両者共ほぼ認識領域の中心を追従するが、上記のようにＴＶカメラのシェーディングが原因で、画面内の位置ずれの場合の閾値が、領域の中心より若干上にずれる。本研究で開発する自動認識システムでは、この点に留意し、シェーディング補正回路を設けることにした。

（２）　βを変化させた場合、図５．１１の(ｂ)，(ｃ)を比較すると、白黒検出法の方が標準偏差σの値が全体的に若干小さい。これは白黒検出法は局部情報から閾値を決めているため、画面全体の分布から決める白黒平衡法に比べて、求まる閾値の白要素、黒要素が、パッド部、パッド周辺部を、より純粋に反映しているからであると推察される。

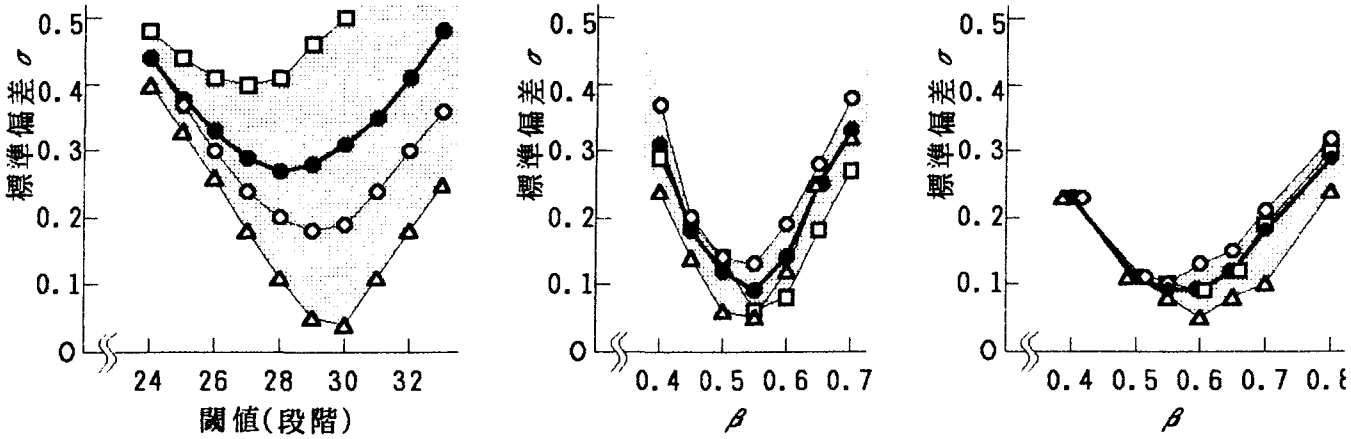
（３）　白黒検出法のβ≧0.6の要因ごとのばらつきに比べて、β＝0.4，0.5のσのばらつきは少ない。これは、(2)から更に推察して、パッド周辺部の信号レベルはパッド内部に比べて安定しているため、βが変化しても、求まる白要素、黒要素があまり変化しないからであると考えられる。

（４）　固定閾値法のσがばらつく要因は光源変動であるが、焦点ずれ、すなわち光軸方向の高さ変動によるσの最適値は、むしろ白黒平衡法、白黒検出法より少ない。これは、図５．８からも分かるように、焦点ずれによって認識領域や信号レベルの範囲が変化しないからである。

以上、装置規模、閾値決定までの時間、認識アルゴリズムから見た閾値の整合性、という３項目を総合的に評価した結果、本研究で開発する自動認識システムでは、閾値決定までの時間は多少かかるが、装置規模、認識アルゴリズムから見た閾値の追従性の２点で有利な白黒平衡法を採用することにした。

５．５　認識アルゴリズムの開発

組立ての対象であるＬＳＩペレットの大きさは品種によって異なる。しかし認識対象であるパッドは、どの品種でも120μｍという共通の大きさで、これは視野を640×480μｍに



(a)固定閾値法　(b)白黒平衡法(黒無視)　(c)白黒検出法

図５．１１　２値化アルゴリズムの評価結果

□ 光源変動　△ 焦点ずれ
○ 位置ずれ　● 総合評価

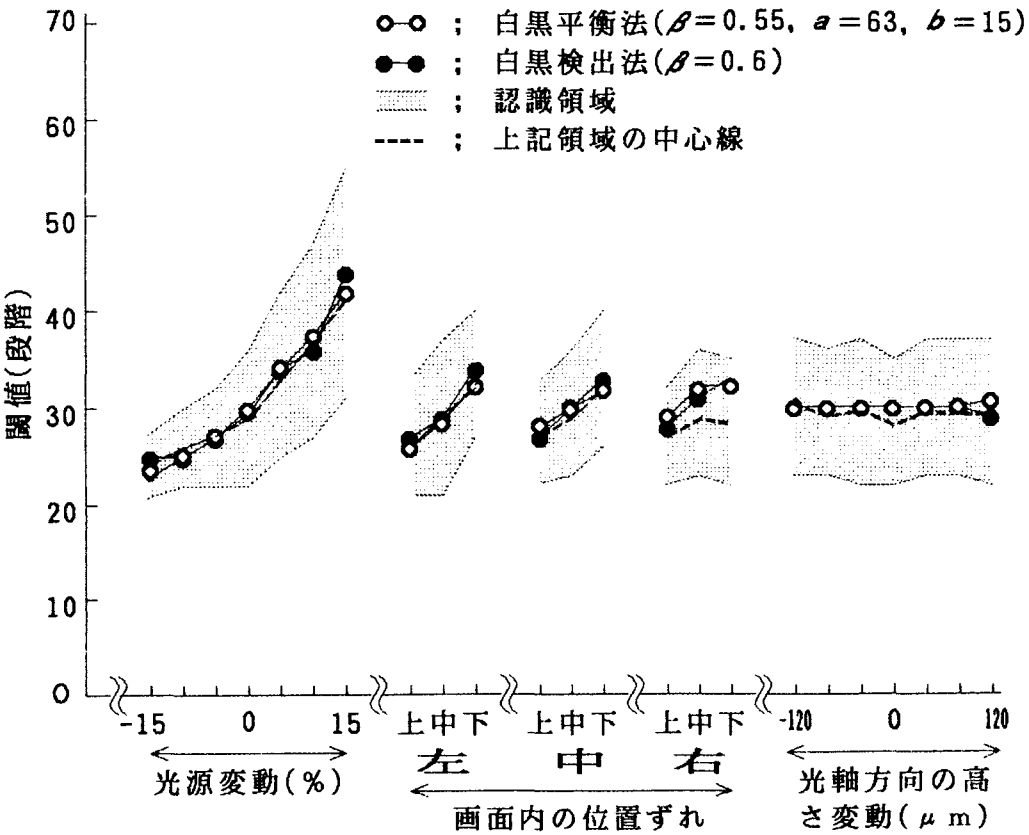


図５．１２　白黒平衡法と白黒検出法の最適閾値の追従性

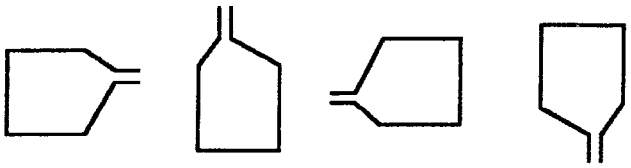
設定した場合、約60×60画素に対応する。いっぽうパッドの形状には、認識アルゴリズムを開発するに当り留意しなければならない次のような特徴がある。図５．１３のように、パッドには正方形の部分以外に内部配線パターンへの信号引出部が一本出ている。その形状は品種により種々あるが、三角形、四角形程度の単純なものが多い。またパッド内部には前工程のウェーハの検査工程でつけられたプローブの傷跡が残っている。

本研究で開発した位置認識アルゴリズムは、上記のようなパッドの特徴を考慮して、その位置を認識するものであり、ノイズ除去、星座認識、方向チェック、ミクロ認識の４段階の処理から構成される。このうちノイズ除去、星座認識が処理対象とする２値画像は、装置の処理負担を軽くするため、４画素毎の粗いサンプリングを行う。星座認識では、パッドの位置を検出するために、一種の部分パターンマッチング[(8)(9)]のアルゴリズムを用いる。方向チェックはパッド引出部の方向が所定の方向かをチェックするためのものである。ミクロ認識はより精密にパッドの位置を補正するためのものである。方向チェック、ミクロ認識は、星座認識で粗に検出されたパッド近辺にいくつかの長方形領域を発生し、その中の白面積を計数する[(12)]ことを基本にする。各処理について、以下で説明することにする。

５．５．１　ノイズ除去

対象の２値画像には、図５．１４(ａ)のように、プローバ傷跡以外に、パッドパターンと周囲パターンの境界の量子化誤差(凹凸)や、至る所に孤立ノイズが発生する。それ以外にも、図４．７で述べたような設計ルールに基づき、パッドからやや離れているとはいえ、細かい内部配線パターンが沢山存在する。これらはすべて認識アルゴリズムに取っては望ましいものではなく、アルゴリズムとしてはこれらのパターンの影響を受けにくいようにする必要がある。

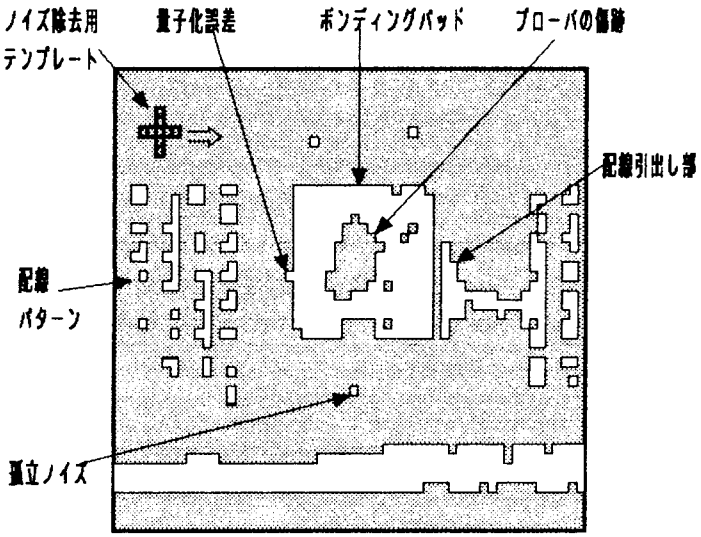
この問題に対応するためノイズ除去の処理を行う。図５．１４(ｂ)はこの処理を行うための５×５画素のテンプレート例を示す。テンプレートは図のように十字形状にし、このテンプレート内の全９画素中、白画素の数が４未満であれば着目画素Ｐ。を白，その他では黒と変換する。この処理は、第２章の２．６の周囲平均法[(3)(5)]に対する考察を適用したものである。ここではコーナが直角になるよう、２．６で述べた通り、十字形状にするとともに、白出力優先になるよう閾値は９/２=4.5の小数点以下を切捨てるようにした。こ



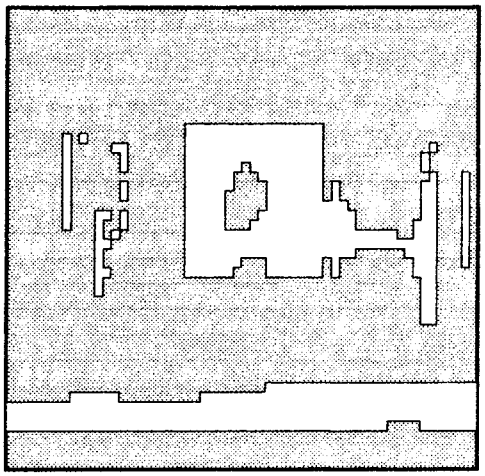
(ａ)配線引出し部の方向による違い

(ｂ)配線引出し部の形状による違い

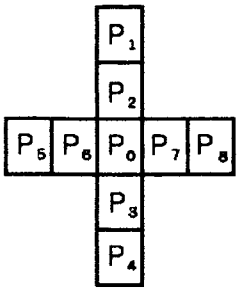
図５．１３　ボンディングパッド形状のバリエーション



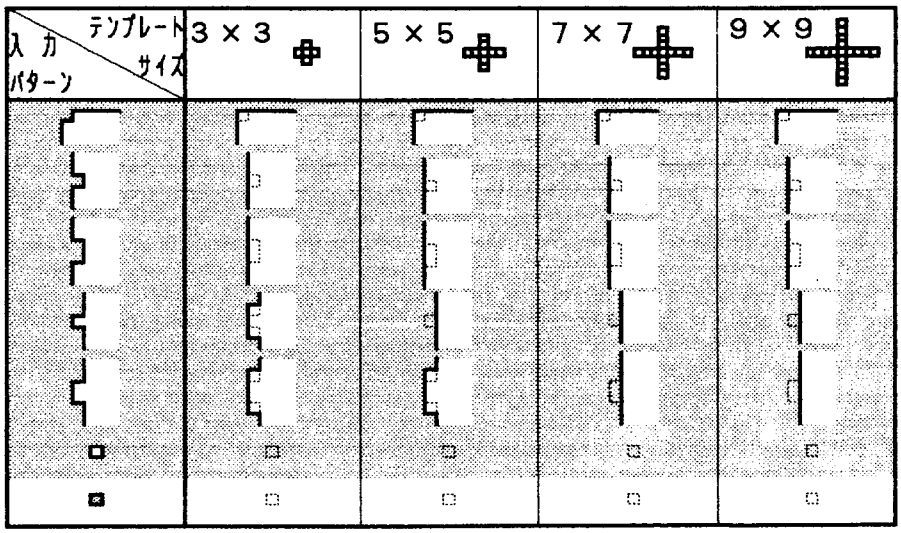
(ａ)対象パターン



(ｃ)ノイズ除去後のパターン



(ｂ)ノイズ除去用
テンプレート例



(ｄ)テンプレートサイズ毎のノイズ除去特性

図５．１４　ノイズ除去の原理

のような処理を画面全体に施すようにすることにより、白黒パターンの境界部の凹凸や、孤立ノイズなどが除去でき、図５．１４(ｃ)のように比較的整形された画像が得られる。

上の例ではテンプレートの大きさを５×５画素としたが、それ以外の大きさＬ×Ｌ(Ｌは奇数)によるノイズ除去特性を図５．１４(ｄ)に示す。何れも直角コーナの１画素の量子化誤差、境界の長さ２画素未満の黒の量子化誤差、孤立ノイズは同じ除去特性であるが、境界の白の量子化誤差に特性の違いが見られる。本研究では、長さ１画素の白の量子化誤差を除去したかったことと装置規模を小さくするため、５×５画素を採用することにした。一般にＬ×Ｌ画素の場合、画素数判定の閾値θ_Lは、

$$\theta_L = \left[L - \frac{1}{2} \right] \qquad (5.18)$$

と設定すれば良い。ここに［ａ］はａに満たない最大整数のことである。

このノイズ除去アルゴリズムは、３．３．２で述べた図３．５のような２次元局部読出し回路を使って実時間処理で簡単に実現できる。

５．５．２　星座認識

認識対象のパッドには、プローバブによる不定形状の傷跡が不定位置に確実に付けられ、正方形のパターンの一部が欠損している。位置認識アルゴリズムはこの点に留意しなければならない。本研究では、“星座認識”というアルゴリズムを開発した。本項では星座認識による位置認識について述べる。

このアルゴリズムは一種の部分パターンマッチング法[(8)(9)]である。すなわち、図５．１５に示すように、四つのテンプレートA_1，A_2，A_3，A_4を、それぞれの相対位置関係を保ったまま画面内を走査し、入力パターンの各部分が図に示された部分パターンに合致するかどうかの判定を行う。ただしパッドの大きさのばらつきや、大きな量子化誤差の影響を吸収するため、各パターンマッチングには、図のようにテンプレート内部に“Don't Care”(不感)領域を持たせた。各テンプレートの大きさは５×５画素で、標準パターンは検出すべきパッドの四隅に等しく設定しておく。そこでテンプレートA_k(ｋ＝１，…，４)に対する標準パターンをS_{ij}，“Don't Care”パターンをD_{ij}，入力パターンをI_{ij}とおく

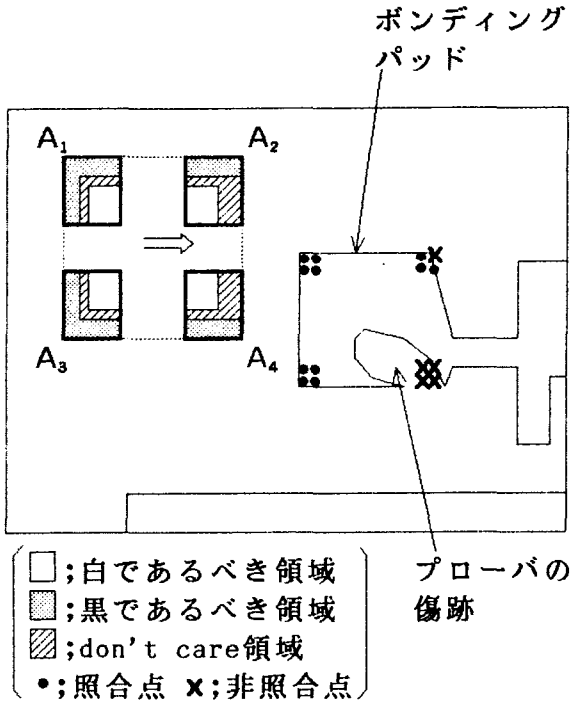


図５．１５　星座認識の原理

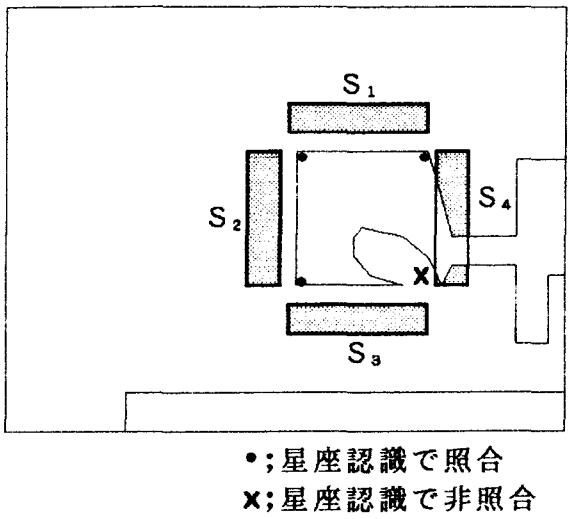
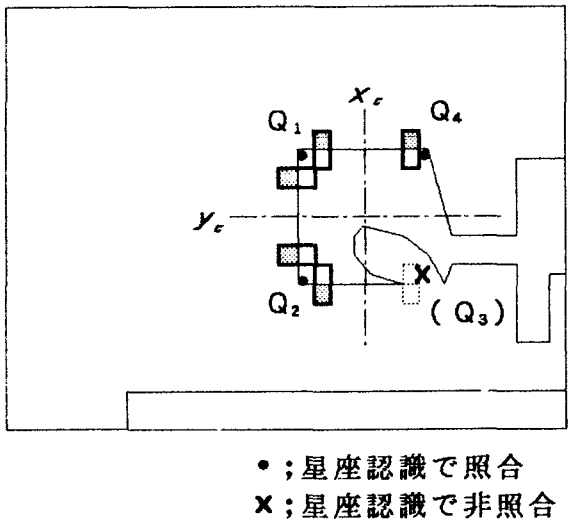
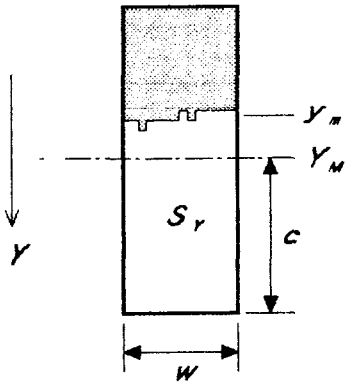


図５．１６　方向チェックの原理



(ａ)各コーナの位置補正



(ｂ)白面積計数による位置補正

図５．１７　ミクロ認識の原理

と、それぞれのマッチング結果M_kは、

$$M_k = \bigwedge_{(i,j)\in A_k} (S_{ij} \oplus I_{ij} \vee D_{ij}) \qquad (5.19)$$

のような論理式で表現できる。この式は、テンプレートA_kに対して、D_{ij}＝“1”なる部分を除いてすべてのS_{ij}とI_{ij}とが合致すれば“1”、そうでなければ“0”と判定する。しかし、前述のように、前工程の検査工程において、すべてのパッドにはプローブ傷が存在する。従って、式(5.19)のパターンマッチングの論理判定は、必ずしも四つのテンプレートA_kすべてについて成立するとは限らない。しかし、プローブの太さはパッドの大きさに比べて高々数分の1に過ぎないため、二つのコーナを同時に欠損してしまうような大きな傷は皆無に近いことが判明した。そこで、論理変数M_kを数値変数とみなし、数値和Mを、

$$M = \sum_{k=1}^{4} M_k \qquad (5.20)$$

のように計算し、もし$M \geqq 3$であれば、検出したパターンをパッドとみなすようにした。ただし何れのコーナにプローブ傷が存在するかを表す論理変数M_kの状態は、後の処理で使用するので記憶しておく。

このようにすれば、たとえパッドの四つのコーナのうち、一つのコーナが欠如していたとしても、そのパッドを容易に検出することができる。

このアルゴリズムは、配線パターのような背景やノイズの中から、特定形状のコーナの相対位置関係から判断してパッドを認識するものである。これは、人間がある星座を見付け出す場合、沢山の星の中からその星座をパターン認識することに似ていたため、このアルゴリズムのことを、“星座認識”と呼ぶことにした。

またこのアルゴリズムも、第3章で述べた図3.5の2次元局部読出し回路で実時間処理が実現できる。パッドの大きさは15×15画素であるから、その上下左右の外側に2×2画素広げた19×19画素の2次元局部読み出し回路を用意して、それを画素走査と同期しながら式(3.19),(3.20)の星座認識を行なうようにすればよい。

5.5.3 方向チェック

厳密に言えば、前記の星座認識で検出されたパッドはパッドの候補にすぎない。ＬＳＩが高集積化してきているため、視野の中に、認識対象でない別のパッドや、たまたま認識ターゲットのパッドに類似した正方形パターンが存在することがあるからである。

そこで、図５．１３に示したように、認識ターゲットであるパッドでは、その配線引出部の形状と方向が既知であることに注目し、パッドの候補の引出部の方向をチェックすることにより、所定のパッドであるかどうかの確認を行うようにした。すなわち、図５．１６に示すように、パッド候補の周囲の４方向に長方形領域を生成し、各長方形内の白面積S_1，S_2，
S_3，S_4を計測する。そして、例えば図のような例の場合、

$$S_1,\ S_2,\ S_3 \leqq S_B,\ S_4 \geqq S_W \qquad (5.21)$$

の条件が成り立つかどうかを調べる。ここに、S_B，S_Wは白面積用の閾値で、明らかに$S_B < S_W$でなければならない。その結果、もし式(５．２１)が成り立てば、そのパッドの候補は検出すべき所定のものであるとする。従ってこの段階で所定以外の方向のパッドや正方形パターンは除去される。

画面内の複数個所の白面積を計数する処理は、簡単なハードウェアで画素単位の実時間処理によって行ない、ＴＶカメラの垂直帰線期間で各白面積S_1，S_2，S_3，S_4の値を計算機へ転送し、計算機のソフトウェアで式(５．２１)を判定すれば良い。

５．５．４　ミクロ認識

ミクロ認識の目的はパッドの正確な位置を検出することである。この目的のために、まず、図５．１７(ａ)に示すように、四コーナのうち前段階の星座認識と方向チェックで検出されたコーナの近辺に、いくつかの微小な長方形領域を生成する。そして、各領域内の白面積を１画素単位で測定し、その値に基づいて該当コーナの位置を補正する。例えば、図５．１７(ｂ)に示すように、Ｙ方向に位置を補正する場合、補正後のＹ座標は、

$$y_m = Y_M + c - S_Y/w \qquad (5.22)$$

となる。ここにY_M，y_mは補正前，後のＹ座標，ｗ，ｃは微小長方形の短手の長さ，長手の半分の長さ，S_yは長方形内の白面積である。ここで図５．１７(ａ)のコーナQ_1，Q_2はＸ，Ｙ方向に１個ずつ、Q_4のような配線引出部のあるコーナではたとえばＹ方向のみに長方形を生成する。また星座認識の処理で判定・記憶されたM_kのうちでｋ番目のM_kに“０”(そのコーナに傷あり)の場合、たとえばQ_3のように長方形は１個も生成されない。かくして、パッド内の欠如したコーナ以外の位置を正確に補正することができる。

最後に検出されたパッドの中心位置を、次のようにして計算する。計算に際しては引出部の方向、およびパッド内のプローブの傷跡のことを考慮に入れなければならない。例えば、図５．１６(ａ)の例では、パッドの中心座標を(x_c，y_c)と置くと、

$$x_c = \frac{x_1 + x_2}{2} + \Delta x_0$$
$$y_c = \frac{1}{2}\left(y_2 + \frac{y_1 + y_4}{2}\right) \qquad (5.23)$$

のようになる。ここに、(x_1，y_1)，(x_2，y_2)は各コーナQ_1，Q_2の(Ｘ，Ｙ)座標，y_4はコーナのＹ座標である。また、x_cの右辺第２項の$+\Delta x_0$は、引出部に対応するコーナQ_3，Q_4からはｘ座標が求まらないため、パッドサイズの半分の値(＝60/2=30)を加えることを意味する。このミクロ認識における領域内の白面積の計数は前項の方向チェックと同じハードウェアを使えば良い。他の座標計算等の処理はソフトウェアに分担させるようにすればよい。

５．６　位置認識システム

これまで述べてきたアルゴリズムに基づいて、ＬＳＩペレットの自動位置認識装置システムを開発した。図５．１８はこのシステムである。右端は画像入力装置であり、中央の筐体は小型計算機およびＴＶカメラからの信号を補正するための前処理回路である。左端は位置認識装置である。本研究では画像入力装置は１台開発したが、生産性を上げるため認識装置は４台の画像入力装置を接続できるようにした。認識システムは、現状の位置測

定ステーションにおける作業員の目視測定作業を機械に置換したもので、ＴＶカメラを含む画像入力装置、認識装置、小型計算機HITAC10(16ビット，16ＫＷ)、それにカセットテープレコーダから構成されている(前章図４．４参照)。この画像入力装置、認識装置の部分のハードウェアのブロック構成を図５．１９に示す。最大四つの画像入力装置を１台の認識装置，一台の小型計算機で制御できるよう時分割処理にした。認識システム全体のアーキテクチャおよび動作制御は、後述のように、処理時間の効率を上げるように工夫した。測定ステーション中の前処理部では、前項の２値化の評価での留意事項だったＴＶカメラのシェージングや、認識精度を確保するための図形歪などの補正を行った。

なお図５．１９の認識装置における２値化アルゴリズムは、白黒平衡法を採用した。閾値計算用の積分回路は、式(５．１５)における四つの積分値を求めるための回路であり、一つのＡＤ変換器(６ビット)および積分計算用の四つのカウンタから成っている。ノイズ除去回路、星座認識回路の系統では、白黒平衡法で２値化された画像を水平、垂直とも４画素毎にサンプリングされる。白面積計測回路では１画素毎にサンプリングされる。ノイズ除去回路では５×５画素、星座認識回路では19×19画素の２次元局部並列処理による上記の処理がなされる。白面積計測回路は８個あり、方向チェックおよびミクロ認識両方で同時に使用できるようにした。なお計算機とハードウェア間のデータの授受は、インターフェース回路による転送制御によりすべてレジスタを介して行われる。そのためにインターフェース回路はＤＭＡ(Direct Memory Access)および多重割込機能を持っている。セレクタは画像処理のシーケンスに従い、測定ステーション、ＴＶカメラと各画像処理回路との組合せを適宜選ぶためのものである。この組合せのうちいくつかは並列的に選択され、いくつかの画像処理が同時に行えるようにした。計算機のオペレーティングシステムはハードウェアとの連携がスムーズに実行できるよう、マルチタスクの多重割込システムを採用した。

次に、この回路の動作の概略を図５．２０のタイムチャートを使って説明する。但し図中の番号①②は、図５．１９の画像入力装置の２台のＴＶカメラに対応する各処理を表す。

（１）　１画面目：①の画像に関する白黒平衡法の２値化アルゴリズムを３画面かけて動かし(平衡)閾値を求める。これは各画面毎に積分回路の結果を転送しながら、計算機で繰返し計算により閾値を求めるようにする。

（２）　４画面目：確定した閾値を使って①の画像を２値化し、星座認識を起動する。そ

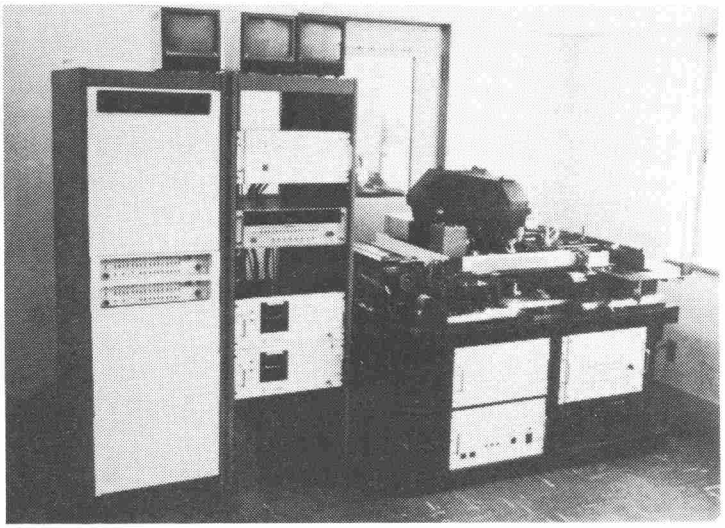


図５．１８　ＬＳＩの自動位置認識システム

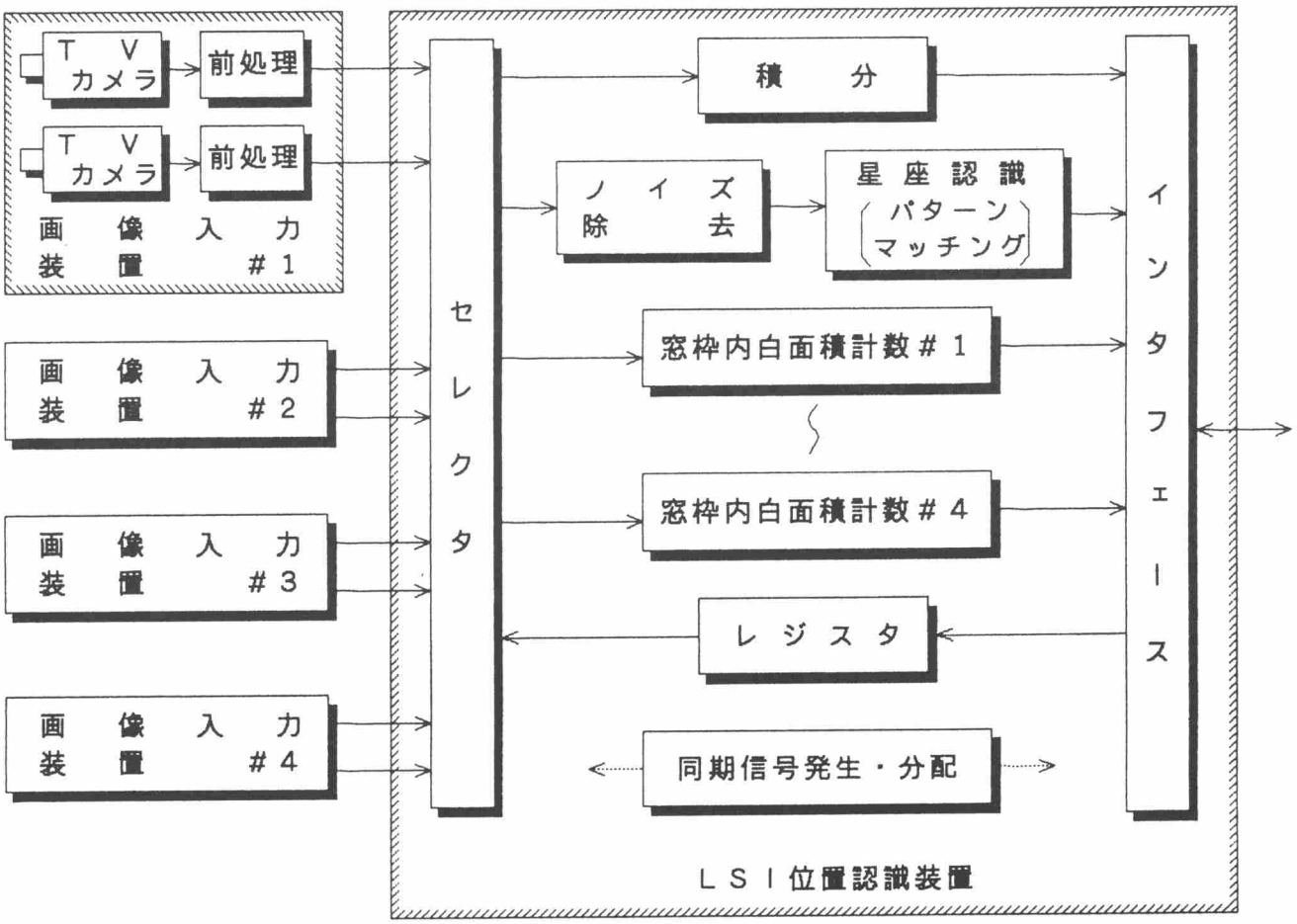


図５．１９ ＬＳＩの自動位置認識システムの構成

れと同時に②に対する２値化を起動する。星座認識回路はノイズ除去後の画像に対してパターマッチングを実行する。

（３）　５画面目：星座認識による座標に基づき、方向チェックおよびミクロ認識が極力１画面以内にすべて終了するよう、各白面積計測の動作を１画面内で複数長方形の白面積計数ができるように切り替えるようにした。すなわち、白面積計数回路は８個しかないのに、白面積方向チェックで４個、ミクロ認識で最大６個の合計10個の長方形の白面積が必要であり、そのままだと２画面分の処理時間が必要となるが、ミクロ認識のコーナ位置が垂直方向に離れている点を利用して、同一の計測回路を、上側の長方形の計数と下側の長方形の計数を同一画面内で時分割処理できるようにした。ただしパッドが２個以上認識されればこの限りではない。

（４）　６画面目：以上で①に対するパッド位置が確定する。計算機は②の２値化の閾値が確定するのを待つ。

（５）　７～８画面目：②に対する上記(３)，(４)の処理を実行する。

（６）　９画面目：計算機は①，②の各パッド位置を基に、ペレット内のすべてのパッド位置を計算する。その際①または②からそれぞれ二つ以上のパッドが認識された場合、“２視野合理性チェック”と呼ばれる処理で何れの組合せが妥当かチェックする。

以上のようにして一つのペレットに対する処理が終了する。

これにより、認識処理に関して以下のことがいえる。認識システムによる認識は８画面即ち約133msですべての画像処理は完了する。但し１画面は16.7msである。従って、実際にはフレーム送りが停止する際のＴＶカメラの残像待ち時間の４画面分、それに２視野合理性チェック、全パッドの位置計算などのソフトウェア処理を加えたとしても高々200msに処理を終了することができる。これにより、処理時間として所期の目標の300ms以下を十分満足しているといえる。

また例えば測定ステーションをさらに増設するような場合、処理時間をさらに高速化するのためには以下のような方策が可能である。

（１）　本システムを開発したころは、高い解像度が得られるＴＶカメラは真空管式の撮像管しかなかったが、固体カメラを使えば、残像は無視できるようになる

（２）　製造工程が安定しペレット毎の反射率が一定化すれば、照明の輝度やＴＶカメラ

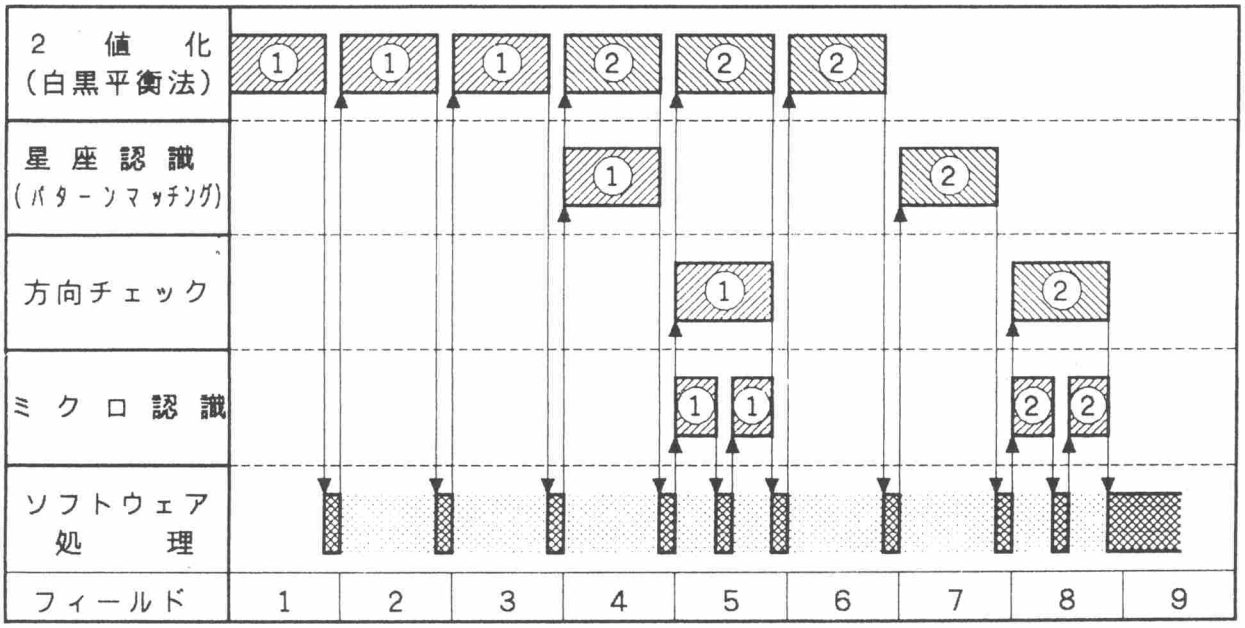
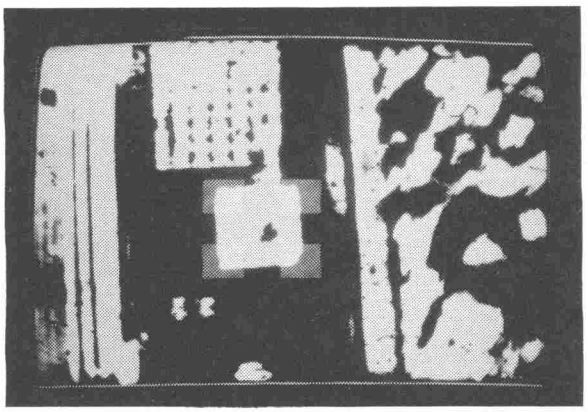
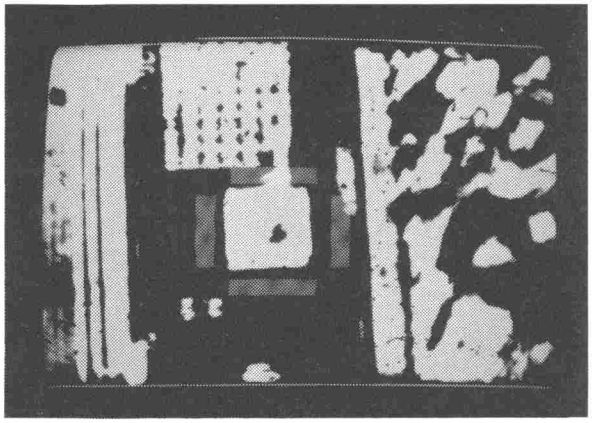


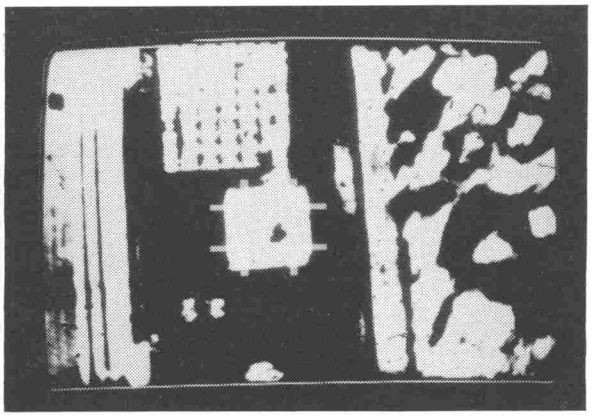
図５．２０　ＬＳＩ位置認識のための処理タイムチャート



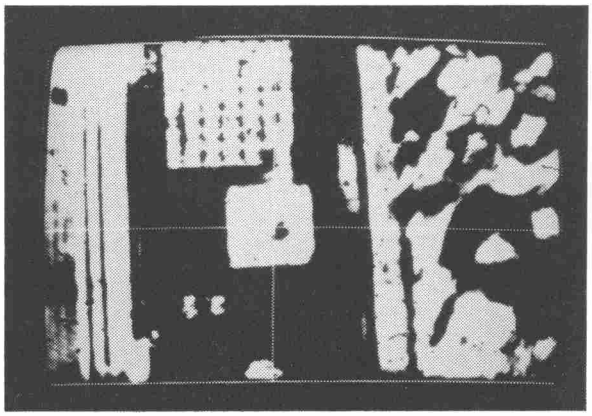
(ａ)星座認識



(ｂ)方向チェック



(ｃ)ミクロ認識



(ｄ)パッド中心検出

図５．２１　ＬＳＩ位置認識装置による画像処理の例

の感度だけが問題になってくる。そうなるとこれらの変動は比較的緩やかなため、本システムのようにペレット毎に２値化を３＋３＝６画面も費やす必要はなくなる筈である。例えば、直前のペレットから生成した閾値で２値化すれば１画面目から認識アルゴリズムを走らすことが可能となる。それと同時に次のペレットに対する閾値を、現在撮像しているペレットから先取り的に演算しておけばよい。

（３）　２値化方式として、本研究では装置規模が大きくなるという理由で採用を見合わせた白黒検出法を採用すれば、１画面で閾値計算を終了できる。

以上をすべて組み合わせると、１ペレットあたりあたり４＋１＝５(画面)すなわち約84 msまで高速化が可能である。

５．７　認識のフィールドテスト

本研究で課された性能目標(１)認識率99.9％以上、(２)認識精度±10μｍが、開発した位置認識システムに達成されているかを確認するため、フィールドテストを行った。

（１）　認識率：

白黒平衡法の各パラメータの値を前節のように決定した上で、９品種のＬＳＩのサンプルについて認識率を測定した。その結果、895ペレット中、894ペレットが正認識、リジェクト０はペレット、誤認識は１ペレットであった。認識率としては概ね所期の目標99.9％を達成している。１件の誤認識は、ペレット周辺のA_u－S_i部をパッドと見誤ったものであった。しかしこの誤認識は、２視野合理性チェックでペレット全体としてはリジェクトされた。後からこのペレットを観察した結果、所定のパッド全体が欠如した欠陥ペレットであることが判明した。

（２）　認識精度：

認識精度の実験に際し上記９品種のうち代表的な３品種を選択した。その結果、r.m.sで±２．５μｍ，最大値で±５．９μｍであり、所期の目標の±10μｍを十分満たしていることが分かった。ただしサンプルペレットは引出部４方向のパッドすべてを網羅している。

5.8 結言

物体の幾何学的性状に関する画像処理技術の一つの応用として、ＬＳＩ組立用の自動位置認識について検討･考察した。本研究では認識率99.9％以上、位置認識精度±10μｍ以下という高い目標性能を達成すべく、位置認識システムを開発した。開発システムは２値化、認識の両アルゴリズムを、小型計算機のソフトウェアと専用ハードウェアを組み合わせて処理するようなシステム構成とした。本研究で得られた結果を以下に要約する。

（１） ２値化に関しては、種々の変動要因に対しても安定に動作する“頻度分布法”、“白黒平衡法”、“白黒検出法”の三つのアルゴリズムを開発できた。

（２） 三つのアルゴリズムのうち、“白黒平衡法”、“白黒検出法”を比較評価した結果、２値化性能はほぼ同じであった。そこで装置化に有利な“白黒平衡法”を認識システムで採用することにした。

（３） 認識アルゴリズムに関しては、“星座認識”という一種の部分パターンマッチング法と、“ミクロ認識”という一種の窓枠法などのアルゴリズムを、パイプラインで処理する多段型アルゴリズムを開発した。これにより、プローブの傷跡のような認識対象パターンを大きく変形させる要因に対しても、柔軟な対応ができ、位置認識精度を向上させることができた。

（４） 実際に認識率、認識精度が確保されていることを確認するため、ＬＳＩ位置認識システムによる認識性能のフィールドテストを行なった。所期の目標を達成したことが確認できた。

以上、高速、高性能のＬＳＩ位置認識システムを開発することができた。その後本システムをＬＳＩ組立て工程で本稼働させ、人間介在による種々の不完全さを極小化して、高い生産性とＬＳＩ製品の信頼性を確保できるようになった。

本研究を通じて、ＬＳＩの位置を認識するための応用技術として、２値化技術、認識技術を確立できたと考える。これによりＬＳＩ自動組立てをビークルとした物体の幾何学的性状[(1)]に関する画像処理技術の有効性が明らになった。また第２章、第３章で研究した複雑パターンでの傷抽出[(2)～(6)]という質的性状[(1)]の認識とともに、ＦＡという産業分野へ画像処理技術を応用できる突破口が開けた。ところで本研究の画像処理技術の産業応用の研究において、付加的性状(1)の認識の問題がまだ残されている。次章ではこの問題につい

て述べる。

参考文献

(1) 江尻，太田，池内："マシンビジョン"，昭晃堂，第1章(1990-5)

(2) 目瀬，池田，烏野，江尻："プリント基板の傷認識"，昭48電学全大，pp.1823-1824(1973)

(3) 目瀬，烏野，池田，江尻："複雑パターンを対象とした傷抽出装置方式"，電学論C，Vol.94-C, No.5, pp.89-96(1974-5)

(4) Ejiri M., Uno T., Mese M. and Ikeda S. : "A Process for Detecting Defects in Complicated Patterns", Computer Graphics and Image Processing, Vol.2, pp.326-339(1973)

(5) 烏野，目瀬，江尻："複雑パターンの傷認識"，電学論C，Vol.95-C, No.3, pp.53-60(1975-3)

(6) 烏野，目瀬，池田，江尻："複雑パターンの異常認識"，昭48電学全大1347，pp.1821-1822(1973)

(7) Mese M., Miyatake T., Kashioka S., Ejiri M., Yamazaki I. and Hamada T. : "Automatic Position Recognition Technique for LSI Assembly", Proc. 5th IJCAI, pp.685-693(1977-8)

(8) 柏岡，江尻，坂本："時分割パターン認識技術による郡制御トランジスタ組立システム"，電学論(C)，Vol.96-C, No.1, pp.9-16(1976-1)

(9) Kashioka S., Ejiri M. and Sakamoto Y. : "A Transistor Wire-bonding System Utilizing Multiple Local Pattern Matching Technique", IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, Vol.SMC-6, No.8, pp.562-570(1977-10)

(10) 烏野，江尻，徳永："移動物体の実時間視覚認識方式とその応用"，電学論(C)，Vol.51-C7, pp.49-55(1976-3)

(11) Uno T., Ejiri M. and Tokunaga T. : "A Method of Real-time Recognition of Moving Objects and Its Application", Pattern Recognition, Vol.8, pp.201-

208(1976)

(12) Uno T. et al : "An Industrial Eye that Recognizes Hole Position in a Water Pump Testing Process", Computer Vision and Sensor-based Robot edited by Dodd G. and Rossol L., Plenum Pub. Co.(1979)

６．　高信頼度紙幣識別のための向き不変型識別アルゴリズム

６．１　緒言

本論文の前章までは物体の持つ三つの性状[1]のうち、質的性状の認識の問題としてプリント基板のような複雑パターン中の傷抽出、[2]～[7]幾何学的性状の認識の問題としてＬＳＩの位置認識[8]という二つの問題を扱ってきた。本章では３番目の性状である付加的性状の認識の問題として紙幣の金種識別[9]を扱い、本画像処理技術の産業応用の研究の締めくくりとする。

物体の付加的性状とは、マーク、文字、模様、色など、物体の表面に付加された情報である。例えば部品名称や製品番号などを読み取ることによって物体を選別分類するような、物流システム自動化などの際の認識対象として重要なものである。[1]このような付加的性状認識に関する研究として、複雑な表面情報を有する箱状物体の輪郭構造を認識するものがある。[10][11]これは、対象の面が３次元的に傾いていても、方向コードによりあたかも正面から見たような２次元画像へと変換するため、番号やマークなどの表面情報を読み取る場合に有効である。またベルトコンベア上に流れてくる荷箱に付加された特定マークを認識対象とし、物流システムで実用化された研究もある。[12]～[14]このような研究で認識の対象としている物体は主として直方体形状である。それに対して本研究では、紙幣というシート状印刷物を認識対象とする。そのため画像の入力方法や認識アルゴリズムも、紙幣の特質にあわせたものでなければならないのは当然である。本章では紙幣の金種識別という付加的性状の認識の問題について考える。

さて、銀行のロビーや店頭に設置されている現金自動取扱装置[15][16]（Automatic Tellers Machine，以下ＡＴＭと略）などを利用して現金を預入れる場合、利用者にとって紙幣を１枚ずつ投入するのはわずらわしいため、現状のＡＴＭでは、トレーの中に紙幣を一括投入できるようにしている。投入されたすべての紙幣は高い信頼度で識別され、最後に利用者に対し預け入れ額が正しいか否かを確認できるようになっている。

トレーに投入される紙幣は、通常、１万円札、５千円札、千円札のうちの複数種類(以降“金種”と呼ぶ)が順不同で複数枚重なっていて、トレーから１枚ずつ分離され、高速搬送路へと送り込まれる。搬送路の途中には金種を識別したり、異常な紙幣をリジェクトするためのセンサが設けられている。ところが、紙幣には、それらの表正立、表倒立、裏正立、裏倒立という４種類の向きがランダムに混在する。また、紙幣は紙質が柔らかいため、トレーから分離される際、左右方向に位置ずれしたり、回転したり、複数枚の紙幣が重なったり、紙幣同士の間隔異常あるいは新旧によって、センサから得られるパターンは大きく変動する。

現在製品化されている紙幣識別装置では、このような多様な変動状況を踏まえ、高信頼度の識別性能と高速処理を実現している。しかし、これらの装置で使われている技術は、対象が紙幣であるという機密上の特殊性から、従来体系付けられた報告がほとんどなされていなかった。最近になってようやくニューラルネットワークを利用した紙幣識別[17]、あるいは識別式決定のためのエキスパートシステム[18][19]等の研究成果が少しずつ報告され始めている。

このような状況で、本研究では、紙幣の識別のみならず、他のシート状印刷物の種類識別にも適用可能と考えられる新しいパターン識別アルゴリズムを提案した。これは、対象の向きに依存しないアルゴリズムであり、特別なハードウェアを必要とせず、通常のマイクロプロセッサで高速処理できるアルゴリズムである。

本章では、初めにセンサから得られる紙幣の入力パターンのばらつきと等価性を調べ、対象の各集団(金種)のサンプルを用いて、直交変換の一種であるアダマール変換により特徴抽出する。その際、対象の母集団がお互いに空間的に十分離れるような特徴量を選んだ上、特徴量の等価性を利用した対象の向きに不変な識別アルゴリズムを提案し、その識別性能の評価、推定を行う。

６．２　入力パターンのばらつきと等価性

前述の紙幣パターンのばらつき要因を整理すると、以下のようになる。

（１）　紙幣の経年変化によるしわ、汚れ、縮み、あるいはインクかすれなど、

（2） 紙幣の向き、

（3） 搬送方向に直角な方向の位置ずれ、

（4） 回転ずれ、

（5） 複数紙幣同士の重なり、

（6） 紙幣間の間隔異常や読み取り途中で発生する動的な回転等。

ここで、(1)は紙幣が識別装置で読み取られる前から紙幣自身が元来持っている先天的な要因である。(2)，…，(6)は、紙幣がトレーから分離されてから搬送路を経由して識別装置でパターンが読み取られるまでの搬送機構に起因する後天的な要因である。(5)，(6)は専用の検出方法が開発されているが、本論文で提案する識別アルゴリズムとは直接関係しないため、検討対象から外す。(2)に関して、以降では、対象の印刷パターンをセンサが表の上側から読み取る場合を“向き１”、表の下側から読み取る場合を“向き２”、裏の上側から読み取る場合を“向き３”、裏の下側から読み取る場合を“向き４”と定義する。また、(3)の位置ずれを“シフト”、(4)の回転ずれを“スキュー”と呼ぶことにする。

６．２．１ パターンの入力法

ＡＴＭ等における紙幣識別装置では、装置の低コスト化や小型化の要求から、通常、マイクロプロセッサが使用される。また、特殊なセンサを多種類用いて、極めて高信頼かつ高速(５～10枚／秒程度)に金種識別や真偽鑑別が行われる。

図６．１は、搬送路中心ｃを基準にシフトξ(mm)、スキューθ(°)なる状態で矢印の方向に一定速度で短手方向に搬送される対象紙幣Ｏのパターンが、１次元アレイセンサＳにより入力される様子を表す。短手方向に搬送するのは、対象パターンの読み取り時間が少なくて済み、高速処理に有利だからである。Ｓは搬送方向と直角に配置され、その中心はｃに一致する。Ｓは紙幣の任意位置のパターンを収集できるよう長手方向全体を素子S_0、S_1、…、S_{n-1}でカバーし、各素子から得られるアナログ時系列信号は、一定間隔でサンプリングおよびＡＤ変換され、ディジタル信号(以降“入力パターン”)に変換される。前章までに述べてきたＴＶカメラによる画像処理技術とのアナロジーから、以降では、このサンプリング間隔として“画素”という単位を使用する。本研究では、１画素を約１mmに設定する。

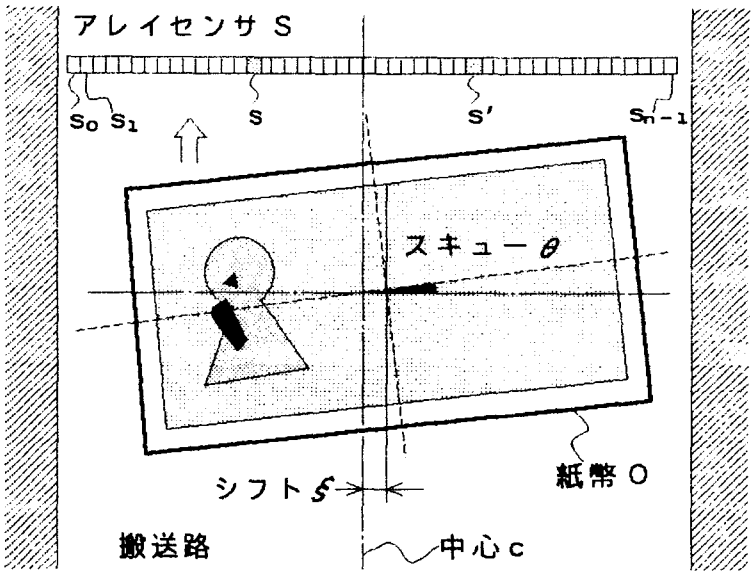


図６．１　対象紙幣の搬送状態とセンサ

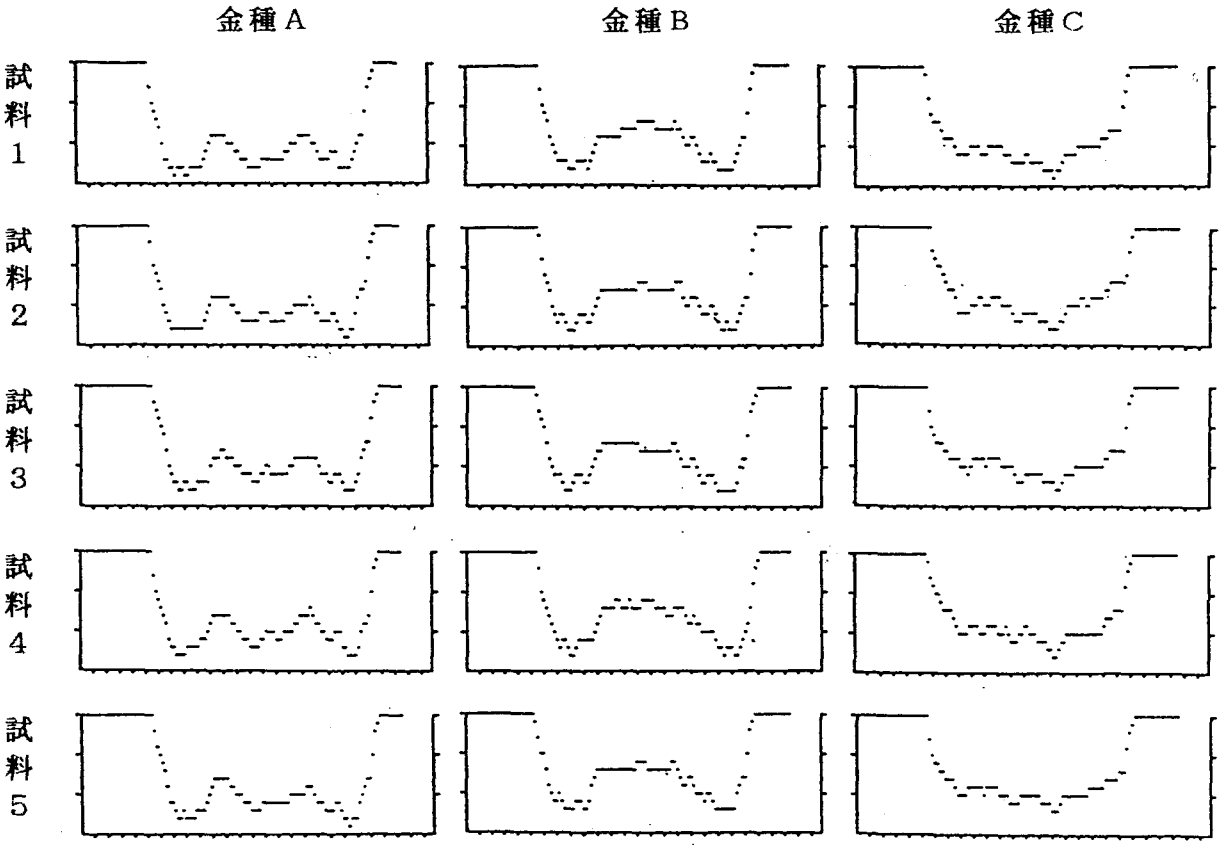


図６．２　金種、試料の違いによる入力パターンのばらつき
（入力パターンはｓ′，向き１の $w'(t;1,0,0)$ を表す）

6.2.2 入力パターンの定式化

本研究では、アレイセンサSの各素子s_0，s_1，…，s_{n-1}に対応する入力パターンを複数組合せることにより金種識別するアルゴリズムを考察する。ただし、すべての素子を使用するのは冗長度が多くマイクロプロセッサの処理負担が重過ぎるため、ここでは以下のように一部の素子によるパターンを利用することにする。

前記のように対象紙幣は四つの向きをランダムに取り得るため、収集されるパターンとしては空間的(左右)・時間的(上下)に転置する。そこで本研究では、向きによるパターンの転置に対して不変な識別アルゴリズムを開発した。空間的転置を吸収するためにSの中心cに関して対称な素子を選択し、また時間的転置を吸収するために、後述のように、時間方向に対称な特徴量を採用する。

上記対称素子を選択する基本的な考え方は次のようにする。紙幣には肖像、記号あるいは透しというような金種固有の特徴を表す図柄が印刷されている。そこで、中心cに関して任意の対称な素子のうち、何れか一方の素子によるパターンがこのような金種固有の図柄を極力含むように複数の対称素子の組合せを選択する。ただし、得られるパターンが互いに独立になるように、各素子間の距離はシフト量、スキュー量に比べて十分離すこととした。本論文では、先ず最も単純な組合せである一対の対称素子からの入力パターンに基づく識別アルゴリズムを考察した上、複数素子を組み合わせた場合の性能を推定することにする。

そこで、上記のようにして選んだ中心cに関して対称な一対の素子をs，s′とし、前節で述べた後天的要因をパラメータとして、各素子から得られる入力パターンを定式化する。

1万円札、5千円札、千円札のような識別すべき金種を表す3集団の名称をA，B，Cと表記し、未知対象紙幣に関する(2)、…、(5)のある搬送状態において、s，s′で得られる入力パターンを$w(t;d,\xi,\theta)$，$w'(t;d,\xi,\theta)$と表記する。但し、dは向きの番号(1,…,4)，ξ，θはシフト量、スキュー量であり、それぞれ専用センサ(図示せず)で別途検出される。ξの絶対値の最大値は、機構上の制約や対象金種の大きさに依存し、金種A，B，Cでそれぞれ3㎜，5㎜，7㎜程度、またθの絶対値の最大値は6°程

度考えておけば、それぞれ実用上十分である。

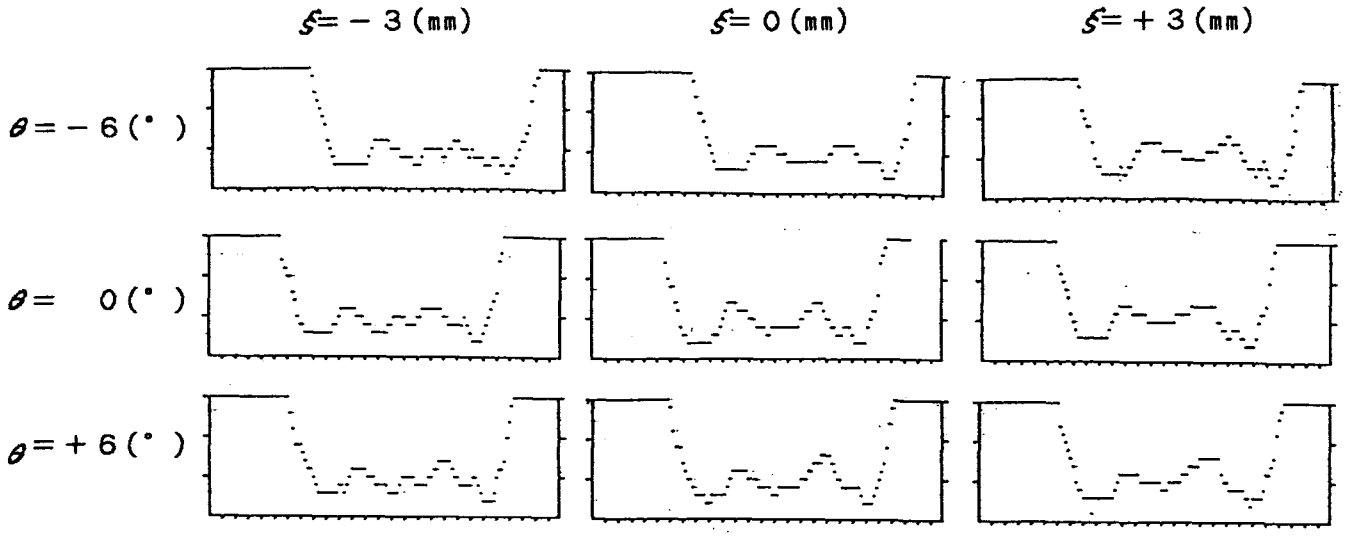
前記のように、対象紙幣の入力パターンは様々な要因でばらつく。例えば、図6.2は各金種、試料毎の入力パターンw′(t;1,ξ,θ)の例を、図6.3は各金種のシフト、スキューによる入力パターンw(t;2,ξ,θ), w′(t;1,ξ,θ)の例を示す。これらの図から、金種によるマクロな山谷の特徴が異なっているが、紙幣の試料の違いや同一紙幣でもシフト、スキューの影響で入力パターンは大きくばらついていることが分かる。試料の違いは前記(1)の先天的な要因であり、シフト、スキューは(3)、(4)の後天的要因である。紙幣識別アルゴリズムとしては、このような先天的あるいは後天的なばらつき要因に対しても、高速、高信頼度に識別処理できるアルゴリズムが要求される。

6.2.3 入力パターンの等価性

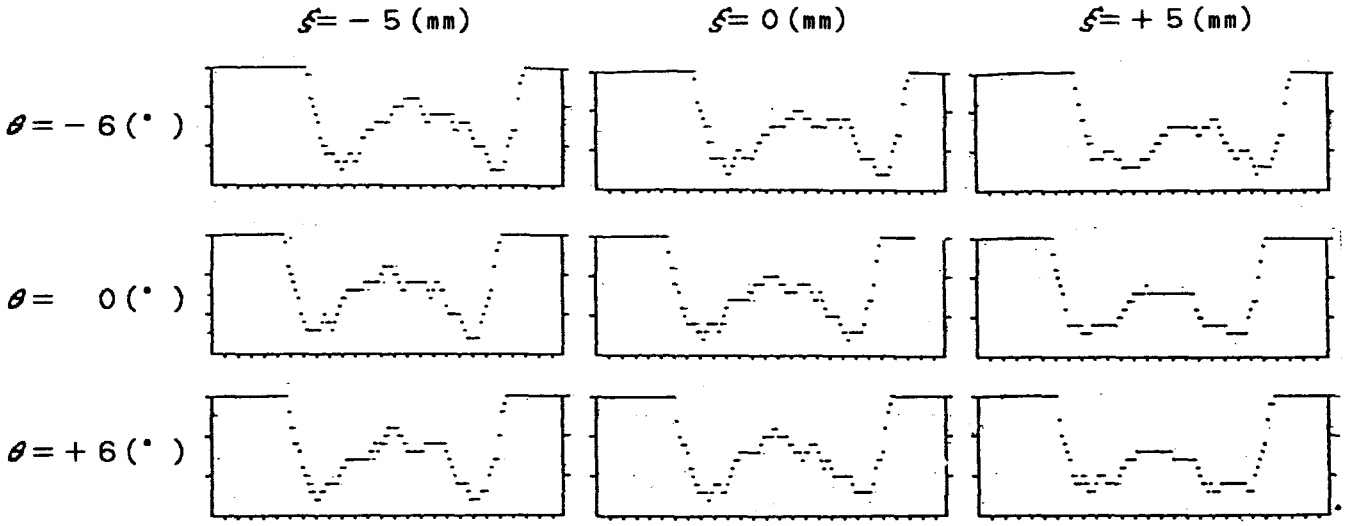
本節では、識別部にある搬送状態で供給される紙幣の入力パターンに対して、同一紙幣が異なる向きで搬送された場合、入力パターンが等価になる搬送状態が存在し、上記のばらつきを抑制する効果があることを述べる。なお、今後簡単化のために、特に断らない限り$-\xi$をξ', $-\theta$をθ'と表記する。

素子s, s′はcに関して対称であるから、各入力パターンの時間遅れが無視できるとすれば、例えば向き1の紙幣の素子sに対応する入力パターンと、向き2で素子s′に対応する入力パターンは、近似的に時間を逆転した関係になる。また、向き1の素子s′に対応する入力パターンに対しても同様の関係が成り立つ。このような関係を、“向き1と向き2の入力パターンは互いに等価である”ということにする。同様にして、向き3と向き4の入力パターン同士は互いに等価であるといえる。このような表同士あるいは裏同士の入力パターンの等価性は、アレイセンサSが反射型、透過型何れの場合でも、一対の素子が対称な関係にある限り一般的に成り立つ。

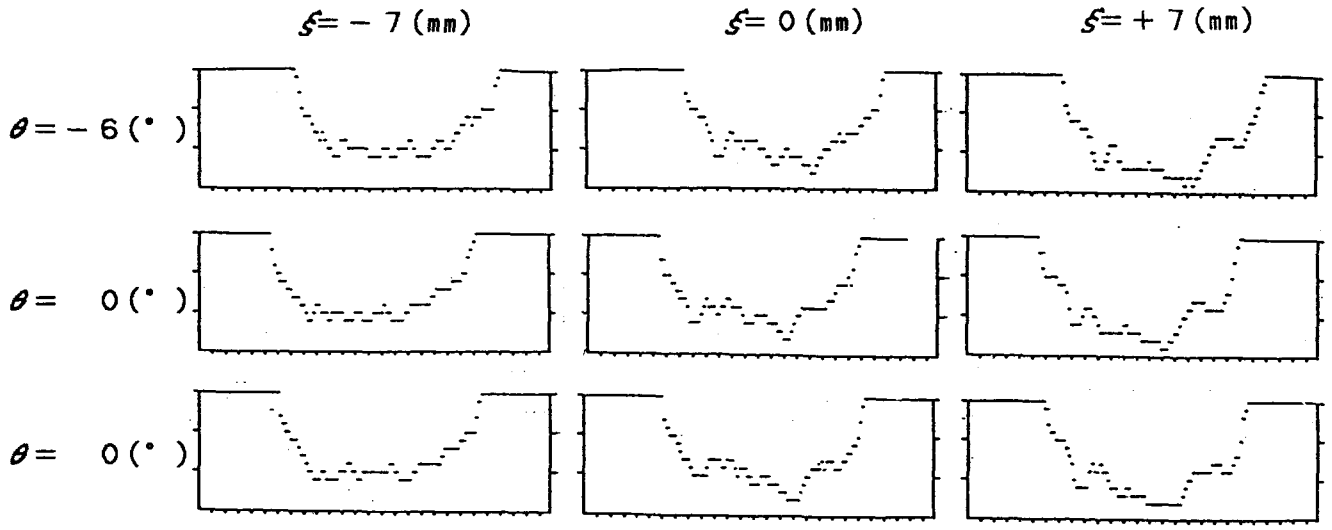
更に、とくにアレイセンサSが透過型の場合、印刷や透しの透過率が表裏何れの方向からでも等しいとすれば、向き1、…、4に関する素子s, s′に対応する入力パターンは互いに等価になる。これを式で表せば、



(a)金種A



(b) 金種B



(c) 金種C

図6．3　シフト、スキューによる入力パターンのばらつき

$$w(t;1,\xi,\theta) \fallingdotseq w'(t';2,\xi',\theta) \fallingdotseq w'(t;3,\xi',\theta') \fallingdotseq w(t';4,\xi,\theta'),$$
$$w'(t;1,\xi,\theta) \fallingdotseq w(t';2,\xi',\theta) \fallingdotseq w(t;3,\xi',\theta') \fallingdotseq w'(t';4,\xi,\theta') \quad (6.1)$$

となる。ここにt'は時間の逆転を意味する。図6.4(a)は四つの向きに関する等価なシフト、スキューの関係を、同図(b)は向き1と向き2で互いに等価な入力パターンの例を表す。同図(a)において、例えば向き2では、向き1のセンサ、時間、スキューを反転すれば向き1と等価になることが分かる。向き3、向き4も同様である。また同図(b)の例えば、①のシフト－5㎜、スキュー－6°の入力パターン$w'(t;1,-5,-6)$と、①'のシフト＋5㎜、スキュー－6°の入力パターン$w(t;2,+5,-6)$は、時間を逆転すれば確かにほぼ同じパターンになることが分かる。同様に、同じ数字が付けられた一対の入力パターン同士は互いに等価になっていることが分かる。このことは、シフト、スキューの変動があっても各向きで式(6.1)のように等価なパターンが必ず存在し、向きによるばらつきを抑制できる効果があることを意味している。

なお、本節で述べた事項は、紙幣に限らず、一般のシート状印刷物についても成り立つことである。本研究は、このように入力パターンが四つの向きで等価になる性質に注目し、今後、特に透過型センサの場合を検討の対象とすることにする。

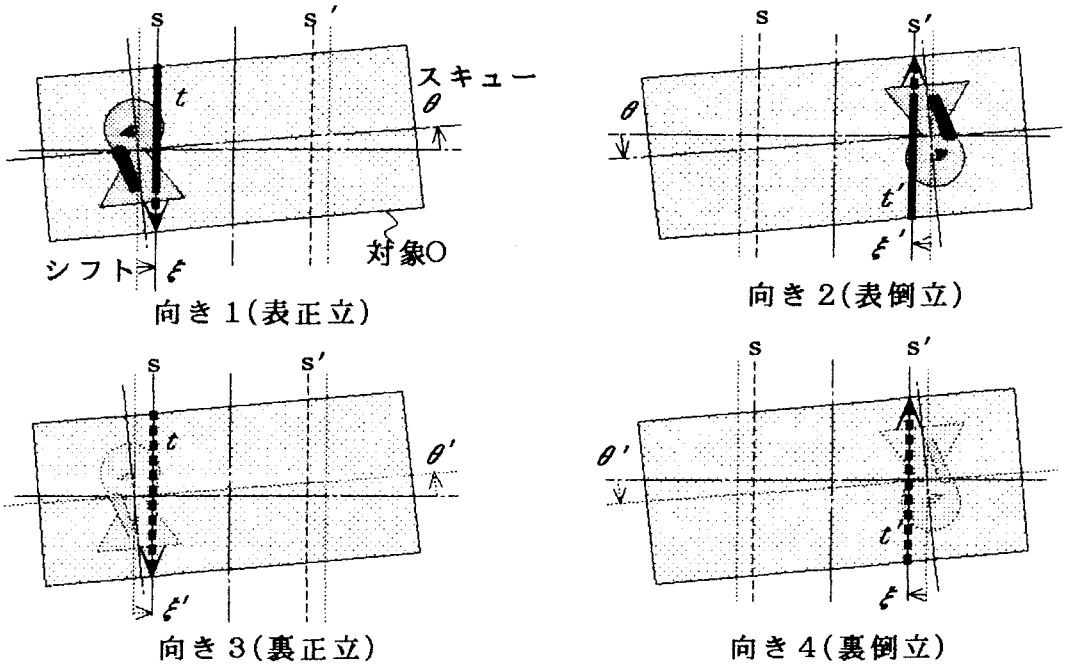
6.3 特徴量の等価性とばらつき

本節では、対象のパターン識別のための特徴量を決めた上、その等価性とばらつきを調べる。まず特徴量を決めるために、以下の二つの方針で検討する。

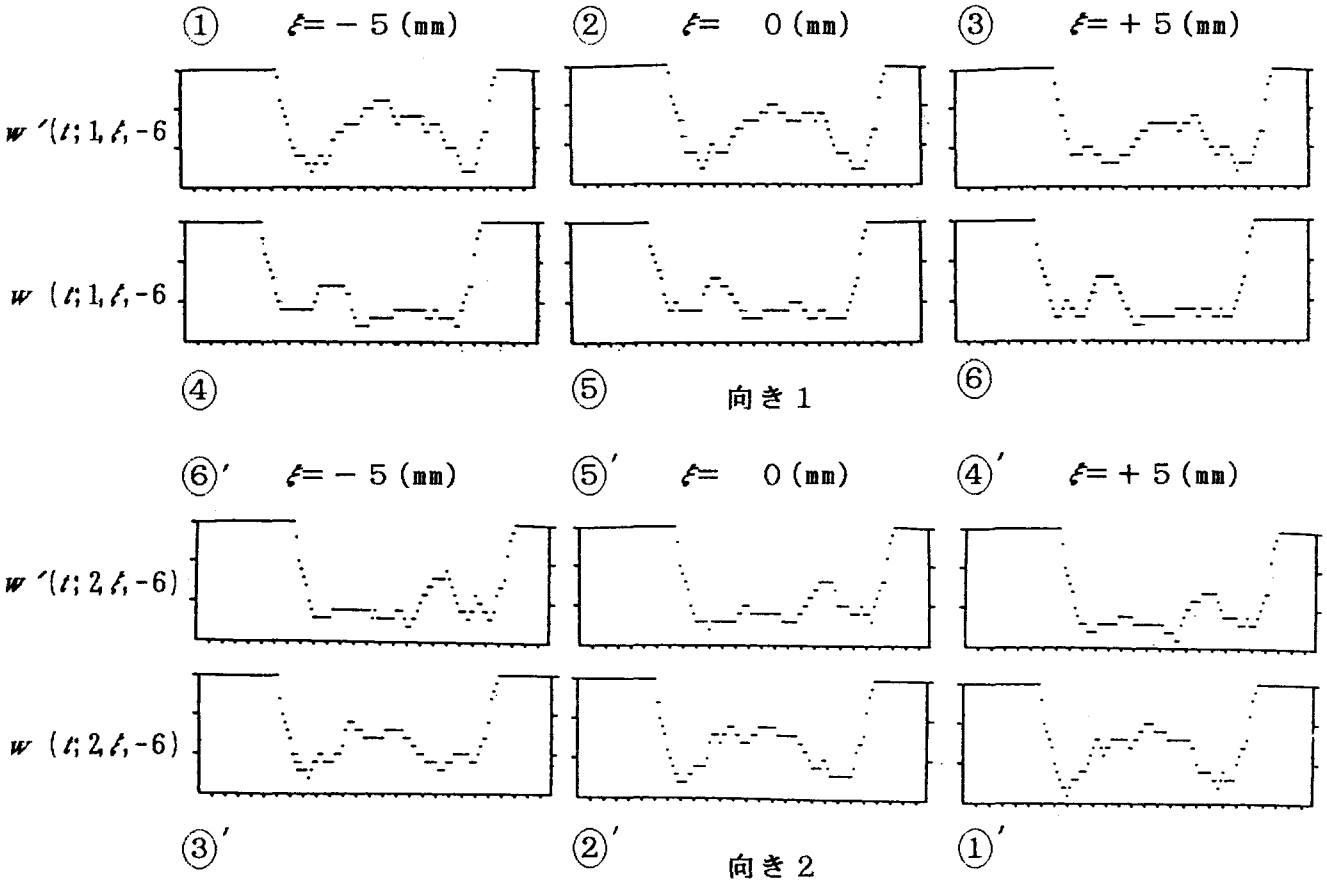
(1) 信頼性の高い金種識別を行うためには、当然のことながら、特徴空間上の各集団間の距離(ノルム)が十分離れており、しかも、前節で述べたような入力パターンの多様性から生じる各集団の広がりが極力小さい特徴量にする。

(2) 入力パターンの特徴量を求める際、特別な専用演算回路ではなく汎用のマイクロプロセッサを使用するため、単純かつ高速に処理できるアルゴリズムを用いる。

(1)は各対象紙幣を高い識別率で識別し、誤識別率を十分小さく抑えると共に、前節で述べた搬送状態が異常なものや、識別対象外のものを排除するためにも必須の要件である。また、上記(2)の要求を満足する特徴量として、直交変換の一種であるアダマール変換を



(a)向きによる等価性



(b)等価な入力パターン例

図6．4　入力パターンの等価性

選び、前節で述べた入力パターンの等価性を利用するアルゴリズムを提案する。

6.3.1 アダマール変換[20]

信号処理や画像処理の分野で広く活用されているアダマール行列は、すべての要素が＋1か－1で任意の異なった二つの行または列ベクトルがすべて直交する正方行列として定義される。通常、処理が便利なように、2のべき乗の次数のものが用いられる。また、時系列信号の変換では、行または列の番号が大きいほど高周波成分に対応するようシーケンシー(交番数)が増加する順序的アダマール行列が使用される。特に日本紙幣を識別するために、上記(2)から次数としては8次程度を考えることにした。この場合の順序的アダマール行列H_8は、

$$H_8=\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 & -1 & 1 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 & -1 & 1 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 \end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix} h_0 \\ h_1 \\ h_2 \\ h_3 \\ h_4 \\ h_5 \\ h_6 \\ h_7 \end{bmatrix} \qquad (6.2)$$

のように表せる。ここで、右辺の行ベクトルh_0, h_1, …, h_7をアダマールベクトルと呼ぶことにする。

次に、対象紙幣の入力パターンに対するアダマール変換を定義する。図6.5のように入力パターン$w(t;d,\xi,\theta)$または$w'(t;d,\xi,\theta)$に対して、8種のマスクパターン$\lambda_0(t)$, $\lambda_1(t)$, …, $\lambda_7(t)$をあてはめ、

$$\begin{aligned} W_i(d,\xi,\theta) &= \sum_{t=1}^{m} \lambda_i(t)\,w(t;d,\xi,\theta) \quad , \\ W_i'(d,\xi,\theta) &= \sum_{t=1}^{m} \lambda_i(t)\,w'(t;d,\xi,\theta) \end{aligned} \qquad (6.3)$$

を求める。但し、$i=0,1,\cdots,7$である。式(6.3)の$\lambda_0(t)$, $\lambda_1(t)$, …, $\lambda_7(t)$は

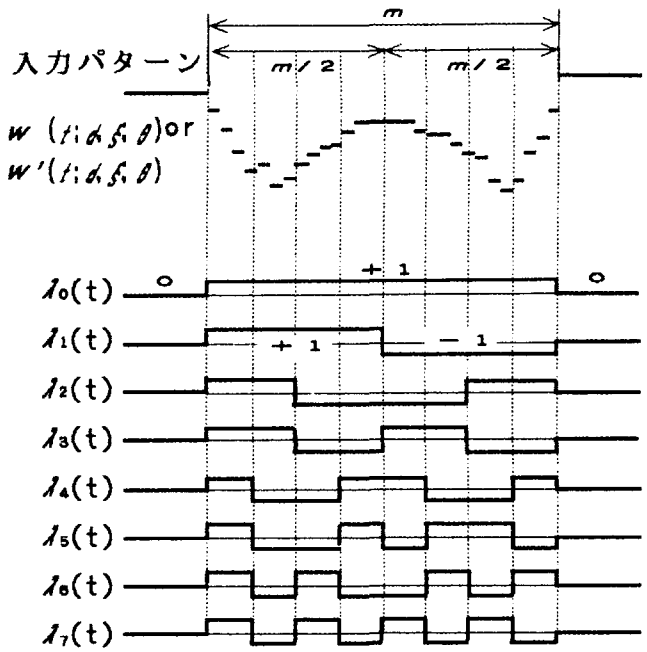


図６．５ 入力パターンのアダマール変換

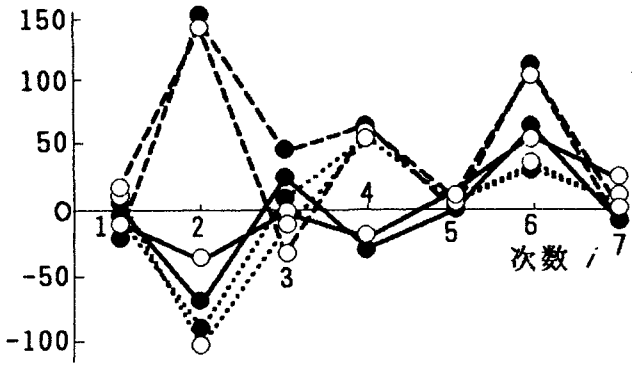


図６．６ 入力パターンに対するアダマール変換値

上記アダマールベクトルh_0，h_1，…，h_7に相当し、図のように$w(t;d,\xi,\theta)$，$w'(t;d,\xi,\theta)$の時間方向の中心を基準に、前後に$m/2$(画素)の長さがあり、$t=1$からmでは1または-1の値を、それ以外では0の値を取る。また$\mathbf{W}=(W_0,W_1,\cdots,W_7)$とすると、$\mathbf{W}$は$w(t;d,\xi,\theta)$または$w'(t;d,\xi,\theta)$の8次のアダマール変換に相当し、一種の周波数領域への変換である。紙幣を対象とする本研究では$m=80$(画素)とした。式(6.2)、(6.3)からも分かるように、アダマール変換は入力パターンの各要素を加算または減算するだけで済み、マイクロプロセッサ処理に適しているといえる。

6.3.2 識別特徴量の決定と特徴量の等価性

本研究では、処理負担を更に軽減するため、金種識別のための特徴量としてW_0，W_1，…，W_7のすべてを利用するのではなく、これらのうちの高々2個に減らすようにした。

まずW_0は$\lambda_0(t)$がすべて$+1$であるため、入力パターンのばらつきを直接反映してしまい、特徴量としては適切ではないと判断し、対象外とした。更に、入力パターンの等価性を利用することにより、入力パターンの向きによるばらつきを抑制できるため、そのアダマール変換による特徴量を減らせる可能性が期待できる。そのため、どの程度特徴量がばらつくのかを調べることにする。

そこでシフト、スキューの変動要因がない互いに等価な入力パターンに対する特徴量の特性を調べる。$i=1,\cdots,7$に対して、各金種ごとの互いに等価な入力パターン$w'(t;1,0,0)$と$w(t;2,0,0)$に関するアダマール変換値$W_i'(1,0,0)$と$W_i(2,0,0)$を図6.6に示す。図6.6から以下のことが言える。

(1) W_2，W_4，W_6は金種による特徴を良く反映しており、向きによる違いがほとんどない。

(2) W_1，W_3，W_5，W_7は金種の特徴が余り反映されない。

(2)からW_1，W_3，W_5，W_7は金種識別には不適と判断し、対象から除外する。一方、(1)からW_2，W_4，W_6は向きによらずほぼ等価であり、図6.6から、金種AとBの区別にはW_4が、CとA、CとBの区別にはW_2が有効であると期待できる。そこで、紙幣の金種を識別するための特徴量としてW_2，W_4を採用することにする。

ところで、一般のシート状印刷物に対して、その入力パターンに対するアダマール変換

値のうち、上記の特徴量W_2，W_4のような偶数次の変換値に対して、6.2.3の入力パターンと同様、次式のような等価性が成り立つと考えられる。すなわち$i=2k$（$k=0,1,2,\cdots$）に対して、

$$\begin{aligned} &W_i(1,\xi,\theta)\fallingdotseq W_i'(2,\xi',\theta)\fallingdotseq W_i'(3,\xi',\theta')\fallingdotseq W_i(4,\xi,\theta'),\\ &W_i'(1,\xi,\theta)\fallingdotseq W_i(2,\xi',\theta)\fallingdotseq W_i(3,\xi',\theta')\fallingdotseq W_i'(4,\xi,\theta') \end{aligned} \tag{6.4}$$

となる。このように、偶数次のアダマール変換値に対して式(6.4)の等価性が成り立つのは、図6.5、図6.6からも分かるように、偶数次のアダマール変換値は時間方向に関して対称な変換になっているからである。

6.3.3 サンプリング間隔の決定

ここまでは、紙幣の識別特徴量を決定するために入力パターン全体を用いてW_2とW_4を決めたが、ここでは処理負担を更に軽減するために、サンプリング間隔を粗くしてアダマール変換を行った場合のW_2とW_4の識別性能、すなわち金種を分離する能力について調べる。

今$T(\Delta)$を離散時刻$\{t \mid t=1,2,\cdots\}$の中から一定間隔Δでサンプリングされた部分集合とすると、$i=2,4$に対して式(6.3)に対応するアダマール変換は、

$$\begin{aligned} W_i(d,\xi,\theta;\Delta)&=\sum_{\tau\in T(\Delta)}\lambda_i(\tau)w(\tau;d,\xi,\theta),\\ W_i'(d,\xi,\theta;\Delta)&=\sum_{\tau\in T(\Delta)}\lambda_i(\tau)w'(\tau;d,\xi,\theta) \end{aligned} \tag{6.5}$$

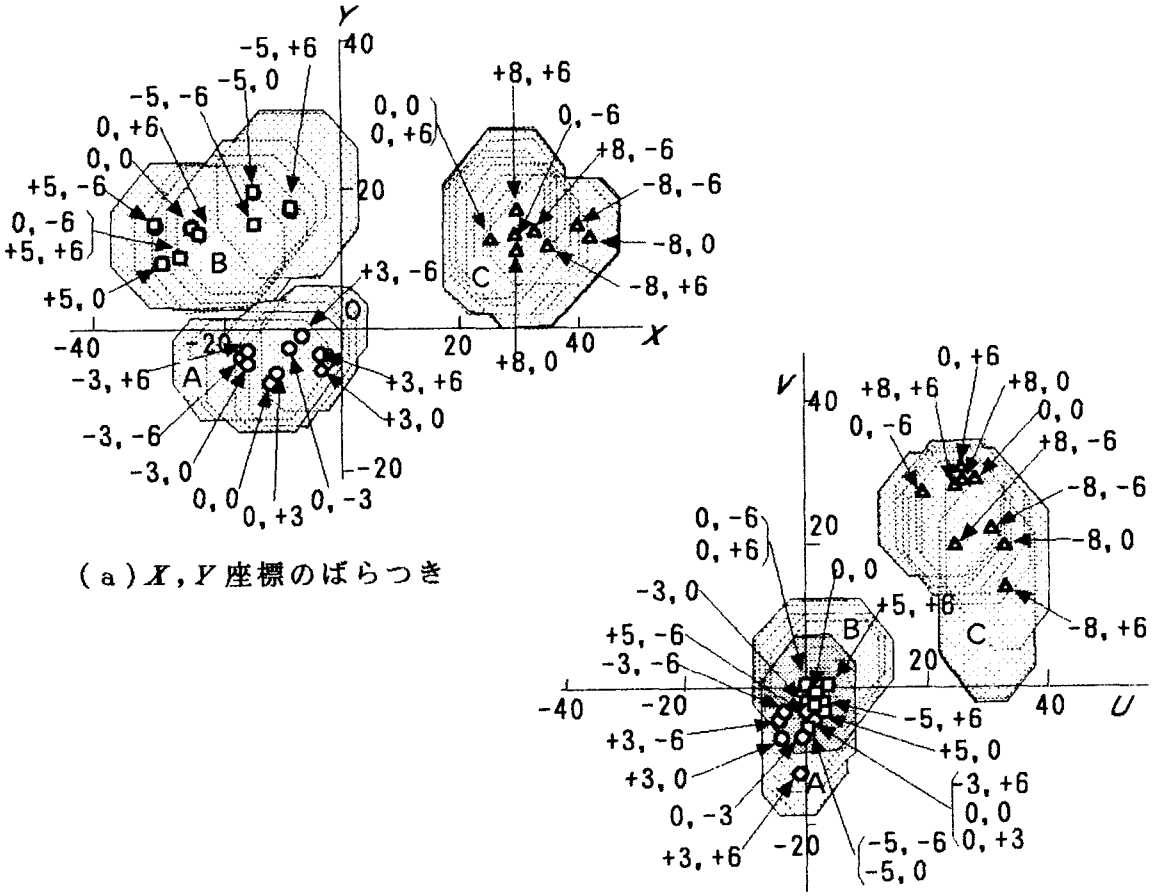
のようになる。表6.1に各集団のサンプルの入力パターン$w'(t;1,0,0)$を使用して、サンプリング間隔Δが1、2、5画素の場合のW_2とW_4の値、および分離能力として2次元空間(W_2,W_4)のA、B間のノルムを1とする正規化ノルムを示す。

この表から分かるように、変換値W_2、W_4の絶対値はサンプリング間隔にほぼ逆比例、すなわちサンプリング周波数に比例の関係にあり、識別性能はサンプリング間隔に依存しないと言える。このことは、この程度のサンプリング間隔では、金種を分離するという観点から見て入力パターンには冗長性があり、5画素間隔でも分離能力に影響が出ないと考えられる。なお、それ以上の粗いサンプリング間隔は、サンプリングの定理から図6.5

表６．１　サンプリング間隔による金種間距離

（Ａ～Ｂ間ノルムを1.0として他を正規化）

サンプリング間隔（画素）	金種	特徴量		正規化ノルム		
		X	Y	Ａ～Ｂ	Ｂ～Ｃ	Ｃ～Ａ
1	C	131	62	1.0	2.1	1.8
	B	-96	71			
	A	-39	-21			
2	C	65	30	1.0	2.0	1.7
	B	-46	37			
	A	-20	-11			
5	C	26	13	1.0	2.1	1.7
	B	-22	13			
	A	-8	-5			



（ａ）X，Y 座標のばらつき

（ｂ）U，V 座標のばらつき

図６．７　２次元空間における特徴量のばらつき

のマスクパターン$\lambda_i(t)$($i=1,\cdots,7$)の最小幅より大きくなり、不都合が生じる恐れがあるため対象外とした。従って、紙幣識別のためのサンプリング間隔として、式(6.5)の計算回数が少ない5画素を採用することにする。

6.3.4 識別特徴量のばらつき

簡単化のため、前項の式(6.5)で与えられる5画素間隔による特徴量$W_2(d,\xi,\theta;5)$, $W_4(d,\xi,\theta;5)$, $W_2'(d,\xi,\theta;5)$, $W_4'(d,\xi,\theta;5)$を、以降ではそれぞれX, Y, U, Vと略記する。本項では、特徴量のばらつきを、(X, Y)および(U, V)で張られる二つの2次元空間で検討する。初めにシフト、スキューに起因する特徴量のばらつきを統計的に分析し、各金種間の識別に関する見通しを明らかにする。

同一サンプルに対して、シフト3通り(0および$\pm\xi$max)、スキュー3通り(0および$\pm\theta$max)の合計9通りの変動を与えた場合の(X, Y)の実測値を図6.7(a)に、(U, V)の実測値を同図(b)に示す。図中○はA、□はB、△はCの実測値であり、各実測値に対応する左側の数値はシフト量(mm)、右側の数値はスキュー量(°)を表す。図からシフト、スキューにより、BはX方向に大きく変動し、CはX、UおよびV方向に若干変動を受けることが分かる。また、同図のハッチした領域は、金種あたり60枚(新券および流通券を各30枚づつ)の各試料に、4通りの向きに対して上記と同じくシフト、スキューの合計9通りの組合せの変動を与えた場合の標本のばらつき範囲を表す。図から、Cは比較的他の金種と離れているが、A, Bは(U, V)空間で重なりがある。

このばらつき領域を具体的には以下の手順で求める。

(1) シフト、スキューの組合せ毎にパラメータX, Y, U, Vを求め、Y−X, Y+X, V−U, V+Uを計算する。

(2) 式(6.4)が成り立つセンサ、シフト、スキューの組合せ毎に、(1)の各パラメータをまとめる。

(3) (1)の各パラメータの標本分布を求めて確率関数を定め、その平均値μと標準偏差σを求める。

(4) 各パラメータのμ, σから$\mu+3\sigma$, $\mu-3\sigma$を(X, Y), (U, V)の各空間内の四つの軸の上限値、下限値として、8角形の閉領域を求める。

ところで、上記(4)を行う前に、各パラメータの分布が正規分布と言えるか否かの適合性を検定しておく必要がある。これを実際の紙幣を例にあげて具体的に説明する。図6.8は金種Bの紙幣サンプルから得られたX，Yに関する密度分布、図6.9は累積密度分布を示す。図6.9の直線は正規分布を仮定してデータから求めた平均値μと標準偏差σから求めた理論線であり、プロット点は累積分布から得られる実測データである。

この標本の確率密度関数を正規分布と仮定し、そのパラメータからχ_0^2検定による適合性の検定を行う。その結果、Xに関しては$\chi_0^2=3.799$、Yに関しては$\chi_0^2=2.096$となり、今回の場合は$\chi_0^2(0.01,4)=13.28$以下となるので、X，Yいずれの分布も正規分布とみなしても良い。但し、Xの標本に関しては$\mu=11.889$、$\sigma=3.224$である。同様にしてU，Vあるいは他金種の(X,Y)，(U,V)の分布は正規分布とみなすことができる。従って、Y－X，Y＋X，V－U，V＋Uも正規分布とみなすことができる。

ところで、図6.7のばらつき領域の位置関係に関して以下のことが言える。

(1)　(X,Y)，(U,V)何れの空間においても、CとB、CとAの領域は3σの意味で十分離れている。

(2)　(U,V)の空間においてAとBの領域に重なった領域が存在する。

上記(1)、(2)を踏まえ、次節において各集合間の識別性能の定量的な評価を行う。

6.4　識別アルゴリズムと性能推定

本節では、前項で得られたばらつき範囲を判定領域として、未知対象から得られる特徴量が何れの判定領域に属するかを判定するアルゴリズムを提案し、その識別実験を行い、誤識別率を推定する。

提案する識別アルゴリズムの特徴は、等価性を活用することにより判定領域の容量を大幅に削減でき、高速処理を実現できる点である。

6.4.1　判定領域

6.3.4で述べたように、識別特徴量にはシフト、スキューに影響を受けて変動するも

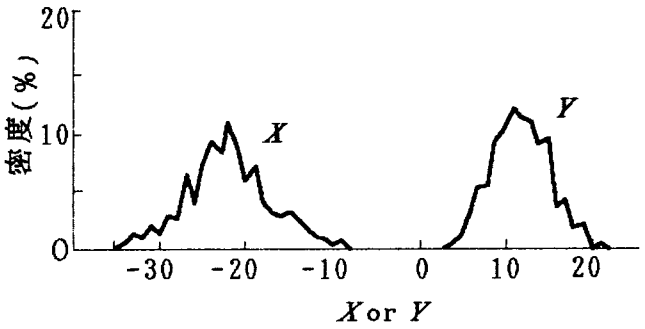


図６．８　特徴量の密度分布

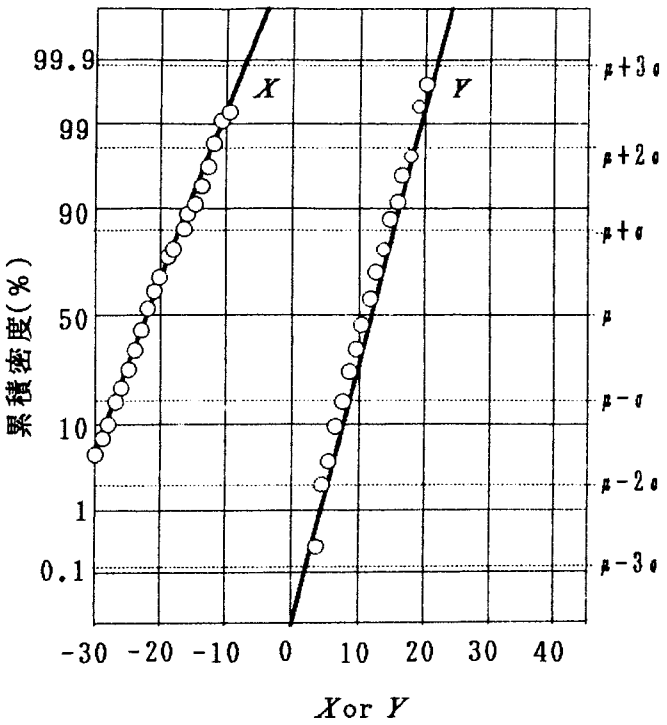


図６．９　特徴量の累積密度分布

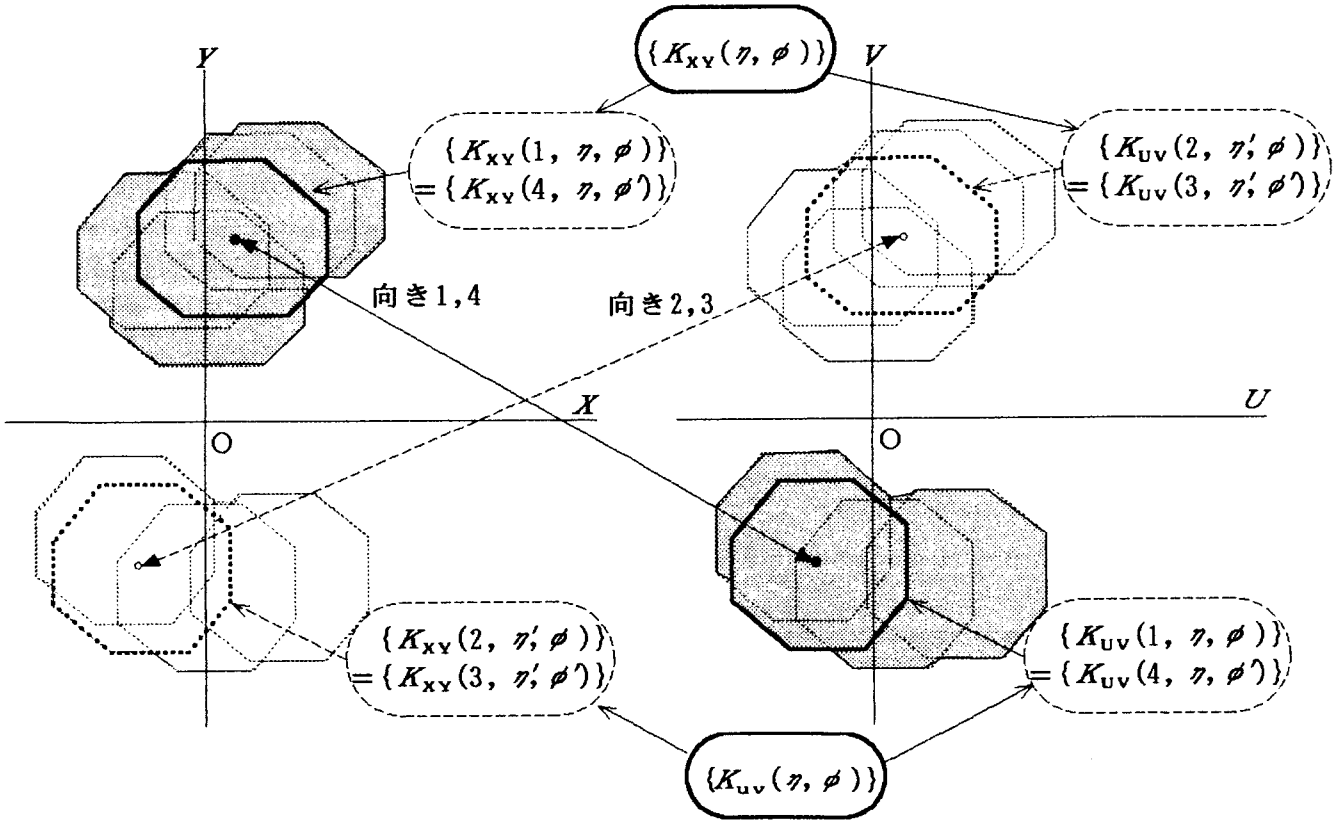


図６．１０　判定領域の等価性

のがある。そこで、このような変動の影響を軽減するために、シフト、スキューに応じて識別のための判定領域を切り替えるようにする。シフト量の変動範囲は金種に依存して異なるが、識別特徴量のばらつきの状況および処理のしやすさから判断して、金種とは無関係にシフト量ξ、スキュー量θに対して、

$$\eta=\begin{cases}-1\ (\xi<-5\,\mathrm{mm}),\\ 0\ (-5\,\mathrm{mm}\leqq\xi\leqq5\,\mathrm{mm}),\\ 1\ (\xi>5\,\mathrm{mm}),\end{cases}\qquad \phi=\begin{cases}-1\ (\theta<-2^\circ),\\ 0\ (-2^\circ\leqq\theta\leqq2^\circ),\\ 1\ (\theta>2^\circ)\end{cases}$$

のような3値の符号化関数η、ϕを導入する。このようにシフト、スキューを符号化することにより、何れの金種でも判定領域の記憶容量を同一にでき、マイクロプロセッサによる処理が簡単になる。

ところで、η，ϕの反転符号がされたもの(例えばη，ϕが－1なら1、1なら－1、0なら0)をη'，ϕ'と定義し、金種K、向きd、シフト符号η、スキュー符号ϕに対応する判定領域を$\{K_{XY}(d,\eta,\phi)\}$，$\{K_{UV}(d,\eta,\phi)\}$とすれば、式(6.4)の等価性から向き1，…，4に対応する判定領域の間で、

$$\begin{aligned}&\{K_{XY}(1,\eta,\phi)\}\fallingdotseq\{K_{UV}(2,\eta',\phi)\}\fallingdotseq\{K_{UV}(3,\eta',\phi')\}\fallingdotseq\{K_{XY}(4,\eta,\phi')\},\\&\{K_{UV}(1,\eta,\phi)\}\fallingdotseq\{K_{XY}(2,\eta',\phi)\}\fallingdotseq\{K_{XY}(3,\eta',\phi')\}\fallingdotseq\{K_{UV}(4,\eta,\phi')\}\end{aligned}\qquad(6.6)$$

のような等価性が成り立つ。式(6.6)は判定領域を四つの向きとは無関係に統合できることを意味しており、シフト、スキューの符号が式(6.6)のような関係であれば、向き1、4の対領域と向き2、3の対領域を互いに入れ替えた関係になる。図6．10は、このように、(X，Y)および(U，V)の二つの空間に、互いに等価な対領域が存在する様子を表す。そこで、以降では簡単化のために、式(6.6)の関係にある対領域を、向き1を基準にして単に$\{K_{XY}(\eta,\phi)\}$，$\{K_{UV}(\eta,\phi)\}$と表記することにする。このような等価性を利用することにより、判定領域をすべての向きに共通化でき、非等価な場合に比べて判定領域の記憶容量を1/4に削減できることが分かる。1金種当り二つの特徴空間(X,Y)，(U,V)に対応して、シフト3通り×スキュー3通り＝9通りの組合せの判定領域を登録しておくだけで良い。ここで、判定領域$\{K_{XY}(\eta,\phi)\}$，$\{K_{UV}(\eta,\phi)\}$としては、**6.3.4**の図6.7で得られたシフト量、スキュー量の絶対値が最大または0に対応する8角形

領域とする。

なお、本項で述べた判定領域に関する等価性の性質および記憶容量の削減効果は、特徴量として偶数次のアダマール変換値を用いる限り、一般のシート印刷物に対してもいえることである。

6.4.2 相互対判定法

提案する識別アルゴリズムは、向き、シフト、スキューに応じて(X, Y), (U, V)の各判定領域を適宜切り替えることにより、未知対象から得られる特徴量が、何れの領域に入るかを照合するものである。

基本的な識別過程は図6.11に示す通りのため、ここでは補足説明を行う。

対象金種および向きは未知であるため、すべての金種と向きについて、何れの領域に入るかを調べる必要がある。そのため各要素が金種に対応する金種フラグK=(A, B, C)および向きカウンタdを用意する。但し、Kの各要素は0または1の値を取り、dは1、…、4の値を取るものとする。

また、図6.11における①の入れ替え、および②の判定は、式(6.6)の等価性の関係に基づく。すなわち、①の入れ替えにより、②において、$d=2$で$Q_0 \in \{K_{XY}(\eta', \phi)\}$かつ$P_0 \in \{K_{UV}(\eta', \phi)\}$が、$d=3$で$Q_0 \in \{K_{XY}(\eta', \phi')\}$かつ$P_0 \in \{K_{UV}(\eta', \phi')\}$が、$d=4$で$P_0 \in \{K_{XY}(\eta, \phi')\}$かつ$Q_0 \in \{K_{UV}(\eta, \phi')\}$がそれぞれ成り立つか否か判定されることを意味する。

次に、③の該当金種ビットは、向きのループ中の各処理毎に前回の該当ビットとの論理和が取られる。更に、④のフラグチェックでは、図6.7の(X, Y)空間において判定領域間には重なりがないため、P_0またはQ_0が(U, V)空間の金種A、Bの重なった領域に入ったとしても、金種フラグとしては2ビット以上セットされることはない。従って、1ビットのみセットされておれば、そのビットに対応する該当金種が出力され、すべてのビットが0ならば、リジェクトされる。リジェクトされるのは、P_0またはQ_0の少なくとも一方がどの領域にも属さないか、またはP_0、Q_0が異なる金種に対応する判定領域に入る二通りの場合の可能性がある。

以上のように、本項で提案した識別アルゴリズムは一対の特徴点を相互に入替えて二つ

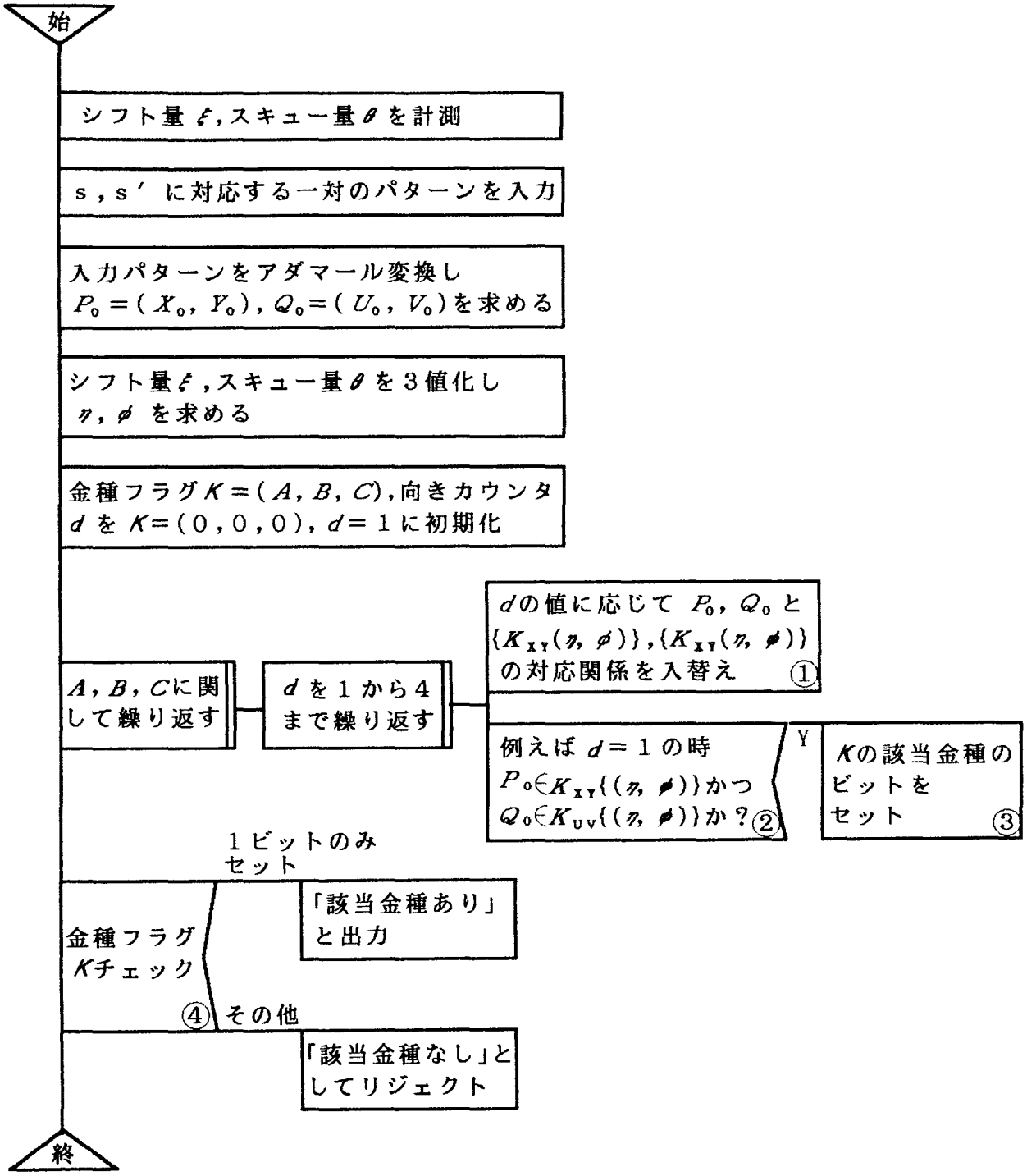


図６．１１　紙幣識別処理過程

の特徴空間で領域判定することから、“相互対判定法”と呼ぶことにする。このアルゴリズムは、図６．７のように二つの空間での判定領域の何れか一方に重複がない限り、一般のシート印刷物の種類識別にも適用できる。

６．４．３　実験結果

前項で提案した相互対判定法による識別性能を紙幣で実験的に確認するために、これをマイクロプロセッサのソフトウェアで試作し、各金種320枚ずつ計960枚の実サンプル紙幣で識別実験を行った。　実験の結果、７枚はシフトまたはスキューが許容値より大きく、金種識別の対象外であった。シフト、スキューが許容範囲内だった960－７＝953枚に対して、リジェクト(該当金種なし)と判定された枚数はＡが４枚、Ｂが４枚、Ｃが２枚の合計10枚であり、残りはすべて正識別で誤識別は１枚もなかった。すなわち、識別対象になった953枚に対する正識別の枚数比を正識別率、リジェクトの枚数比をリジェクト率、誤識別の枚数比を誤識別率と定義すれば、全体での正識別率は0.990、リジェクト率は0.011、誤識別率は０という結果であった。

６．４．４　識別性能の推定

前項の実験では誤識別は１件もなかったが、この誤識別率の目標値は、実用的には少なくとも10^{-10}以下にする必要がある。そこで本項では、相互対判定法で用いた判定領域から見た誤識別率の推定を行う。

入力された紙幣の金種をＫとし、これを相互対判定法でＫでない金種Ｌに誤識別したとする。但し、Ｋは未知である。判定領域が２次元分布であることから、厳密な誤識別率を求めるには複雑な計算を必要とするが、ここでは以下のような仮定を設けて簡略化する。

（１）　二つの空間におけるＫとＬの各判定領域に対して、四つの方向の軸のうち各判定領域間の識別能力が最も高い軸を選び、その軸上へＫの分布とＬの判定領域を投影し、Ｋの１次元確率変数がＬの投影判定領域に入る確率をＫの誤識別率とする。

（２）　金種間の誤識別率を求める際、シフト、スキューの発生分布を一様分布と仮定し、各シフトにおける誤識別率の平均値をもって領域間の誤識別率とする。

ところで、実際には、特徴空間の直交する二つの軸上にKの分布とLの判定領域を投影し、各軸から求まる二つの確率の積にしなければならないが、仮定(1)は一方の確率を1とする。また、図6.7(b)に示すように、(U,V)空間の領域には重なりがあるが、ここでは、(X,Y)空間の各判定領域から誤識別率を求める。以上のような、簡単化により、実際の誤識別率より高く見積ることになる。

これらの仮定に基づき、以下で誤識別率を定式化する。図6.12にKをLに誤識別する率の算出方法を示す。KとLの判定領域$\{K_{XY}(\eta,\phi)\}$, $\{L_{XY}(\eta,\phi)\}$の間で最も識別能力が高い軸をZとし、領域$\{L_{XY}(\eta,\phi)\}$の軸Zへの投影区間を$\{L_{XY}(\eta,\phi)\}_Z$, Kの軸Z方向の密度関数を$f_K(z)$、未知対象KをLと誤識別する確率を$\varepsilon_{K\to L}$とすると、これは、

$$\varepsilon_{K\to L} \fallingdotseq \frac{1}{9} \sum_{\eta} \sum_{\phi} \Pr[Z \in \{L_{XY}(\eta,\phi)\}_Z] \qquad (6.7)$$

となる。ここに、

$$\Pr[Z \in \{L_{XY}(\eta,\phi)\}_Z] = \Pr[z_{Lmin} \leqq Z \leqq z_{Lmax}] = \int_{z_{Lmin}}^{z_{Lmax}} f_K(z)\,dz$$

であり、式(6.7)の1/9 ΣΣの操作は、仮定(2)によるη, ϕ(=−1,0,1)の9通りの組合せすべてに対する誤識別率の相加平均を表す。また、$z_{Lmin}=\mu_L-3\sigma_L$, $z_{Lmax}=\mu_L+3\sigma_L$である。但し、Zの密度分布は正規分布を仮定し、

$$f_K(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_K}} \exp\left[-\frac{(z-\mu_K)^2}{2\sigma_K^2}\right]$$

として与えられる。ここに、μ_KはZの平均値、σ_Kは標準偏差である。

以上のようにして各金種間の誤識別率を求めたところ、$\varepsilon_{A\to B}=1.350\times10^{-3}$、$\varepsilon_{B\to C}=1.270\times10^{-13}$、$\varepsilon_{C\to A}=1.984\times10^{-18}$、$\varepsilon_{B\to A}=1.339\times10^{-3}$、$\varepsilon_{C\to B}=1.716\times10^{-13}$、$\varepsilon_{A\to C}=1.984\times10^{-18}$となった。

この結果、金種B，C間とC，A間の誤識別率は目標値以下となるが、A，B間は目標値に達しないことが分かった。

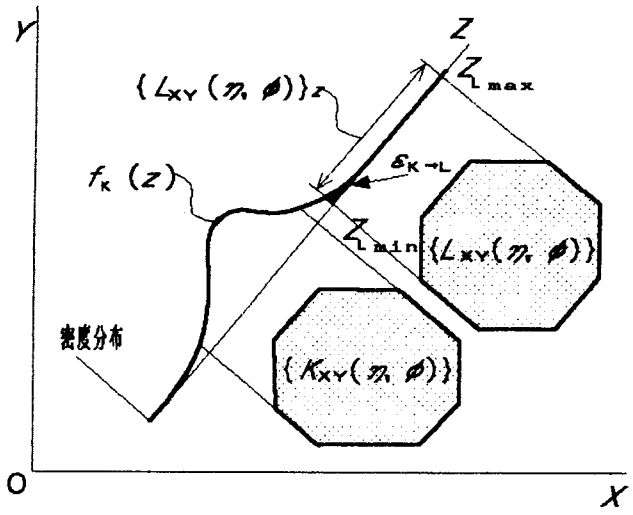


図６．１２ 誤識別率の算出方法

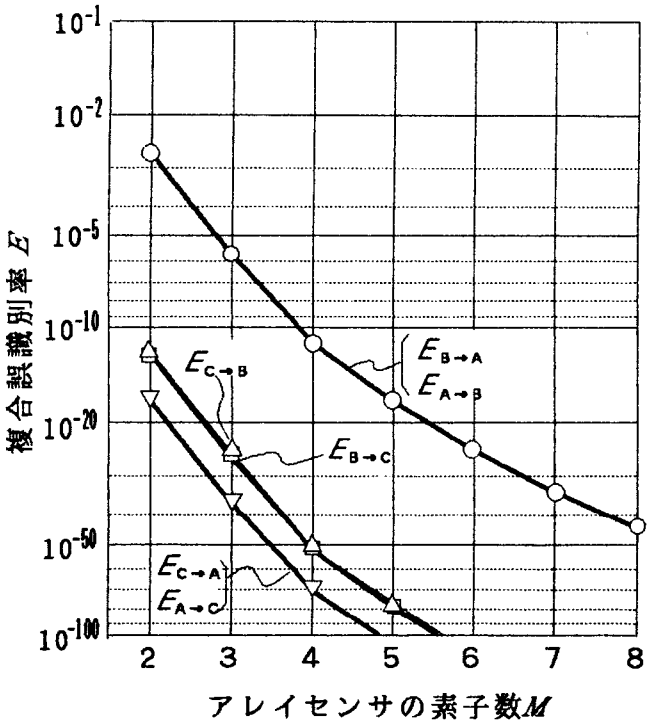


図６．１３ アレイセンサの素子数と
複合誤識別率の関係

6.4.5 識別性能向上のための考察

前項で誤識別率の最大値は10^{-3}程度で目標値に未達のため、本項では、アレイセンサSの素子数を増加することにより得られる複数の識別アルゴリズムを組み合わせることにより、どの程度の素子数で誤識別率の目標値を達成できるかを調べる。

簡単化のため、ここでは上記相互対判定法で得られた誤識別率を同一と仮定する。但し、実際にはセンサの種類や識別アルゴリズムの選び方等により、誤識別率は、このような仮定を設ける場合に比べて小さくできるが、ここでは上記のような仮定を置くことにより、実際より控えめに見積ることになる。

複数の識別アルゴリズムを組み合わせる場合、各識別アルゴリズムの識別結果を反映するそれぞれの金種フラグのビット毎に論理積を取ったものとして複合金種フラグを定義すると、次のことが言える。

（1） 複合金種フラグが1ビットのみセットされておれば、そのビットに対応する金種と判定される。

（2） その他の場合すべてリジェクトと判定される。

(1)において識別結果が正しかった場合に限り正識別、すべての識別結果が同一金種に誤った場合に限り誤識別になる。また(2)のリジェクトは全てのビットが0または2ビットが1またはすべてのビットが1の場合である。

アレイセンサSの中心cに関して対称な素子の数をM個とすると、M個中から2個を選ぶ組合せの数${}_MC_2$の中で、互いに等価な関係にある対称な組合せの数を一つと計数した場合の数をTとすると、M≧2なる条件下でTはMが偶数か奇数によって異なり、

$$T=\begin{cases}\dfrac{M^2}{4} & (M=2,4,\cdots)\\[2ex] \dfrac{(M+1)(M-1)}{4} & (M=3,5,\cdots)\end{cases} \qquad (6.8)$$

のようになる。ただし、Mが奇数の場合、中心cに関して対称なアレイセンサSの素子対および中心c上の素子を取るものとする。

対象KのT個の識別アルゴリズムの識別結果がすべてLに誤識別する確率を複合誤識別

率と定義し、$E_{K\to L}$と表記すると、各識別アルゴリズムが独立だと仮定したとき、$E_{K\to L}$は上記の二つの仮定から各誤識別率$\varepsilon_{K\to L}$を乗算したものとなり、

$$E_{K\to L}=\prod^{T}\varepsilon_{K\to L}=\varepsilon^{T}_{K\to L} \qquad (6.9)$$

のように表される。

図６．１３はMと式(６．８)、式(６．９)から求めた複合誤識別率$E_{K\to L}$の関係を示す。式(６．８)、式(６．９)からM＝４のとき、各金種間の$E_{K\to L}$はそれぞれ$E_{A\to B}=3.321\times10^{-12}$、$E_{B\to C}=2.684\times10^{-52}$、$E_{C\to A}=1.600\times10^{-71}$、$E_{B\to A}=3.321\times10^{-12}$、$E_{C\to B}=8.957\times10^{-52}$、$E_{A\to C}=1.600\times10^{-71}$となり、誤識別率の目標$10^{-10}$以下を達成できることが分かった。

本項で述べた考察により、シート状印刷物の識別に関して与えられた複合誤識別率の目標値を満たすために、一対の対称なセンサ素子による誤識別率と、対称なセンサ素子数をどの程度に設定すべきかの指針が得られたものと考える。

６．５　結言

以上の研究により紙幣を識別するための新しい実用的なパターン識別アルゴリズム[(2)]を提案した。本研究で得られた成果をまとめると、以下のように要約される。

まず、紙幣に限らず、一般のシート状印刷物に対して以下の事項が結論できる。

（１）　１次元アレイセンサの中心に関して任意の対称素子に対応する入力パターン、その偶数次のアダマール変換値およびその任意の二つから定まる判定領域に対して、等価性が成り立つことを明らかにし、その性質を向き、シフト、スキューの関係で定式化した。

（２）　相互対判定法という新しい識別アルゴリズムを提案し、その判定領域は向きと無関係に一元化でき、メモリ容量を大幅に節約できることを明らかにするとともに、複合誤識別率の目標を満たすための一対のセンサ素子による誤識別率とセンサ素子数を決めるための指針を得ることができた。

更に、上記の知見を日本紙幣の識別に適用することにより以下の結果を得た。

（３）　特徴量として識別性能の高い２次および４次のアダマール変換値を選択し、サン

プリング間隔を５画素と粗くすることにより、処理負担が少ない相互対判定法をマイクロプロセッサのソフトウェアで実現することができた。

（４） アレイセンサの中心対称な素子を４個以上を２個づつ対にして組合せることにより、複合誤識別率の目標値10^{-10}以下を達成できることが分かった。

本章で述べたアルゴリズムは、等価性という汎用的な性質を利用するため、読み取り方向が短手方向のみならず長手方向にも容易に適用できる。また対象として日本紙幣のみならず、外国紙幣や商品券等、一般のシート状印刷物の自動識別などの用途に対しても、容易に適用できるものと考えられる。

以上、本章で得られた紙幣識別の問題に対する成果により、物体の持つ三つの基本的性状のうち、３番目の性状である付加的性状の認識の問題に対する一つのブレイクスルーが得られた。本研究によって開発した方法は、ＡＴＭの紙幣識別装置として実用され、銀行業務の自動化、サービス向上、高度化に大きく貢献した。これにより本技術は今日のＯＡ発展の基盤となる技術となったと考える。

参考文献

（１） 江尻，太田，池内："マシーンビジョン"，昭晃堂，第１章(1990-10)

（２） 目瀬，酒匂，上田，宮武，江尻："紙幣パターンの向き不変型識別手法"，(信学論ＤⅡ寄稿中)

（３） 目瀬，池田，烏野，江尻："プリント基板の傷認識"，昭４８電学全大，pp.1823-1824(1973)

（４） 目瀬，烏野，池田，江尻："複雑パターンを対象とした傷抽出装置方式"，電学論Ｃ，Vol.94-C, No.5, pp.89-96(1974-5)

（５） 烏野，目瀬，池田，江尻："複雑パターンの異常認識"，昭４８電学全大1347.pp.1821-1822(1973)

（６） 烏野，目瀬，江尻："複雑パターンの傷認識"，電学論Ｃ，Vol.95-C, No.3, pp.53-60(1975-3)

（７） Ejiri M., Uno T., Mese M., Ikeda S. : "A Process for Detecting Defects in

Complicated Patterns", Computer Graphics and Image Processing, Vol.2, p. 326-339(1973)

(8) Mese M., Miyatake T., Kashioka S., Ejiri M., Yamazaki I.and Hamada T. : "Automatic Position Recognition Technique for LSI Assembly", Proc. 5th IJCAI, pp.685-693(1977-8)

(9) 目瀬，酒匂，上田，宮武，江尻："紙幣パターンの向き不変型識別手法"，信学論 DⅡ, Vol.78, No.5(1995-5)掲載予定

(10) 依田，本池，江尻：方向コード法による物体認識の提案"，信学全大 No.1621 (1974)

(11) Yoda H., Motoike J., Ejiri M.:"A direction coding method and its application to scene analisys", Poc. of 4th Int. Joint Conf. on Artificial Intelligence, Tbilisi, USSR(1975)

(12) 鳥野，上田，江尻，松岡："物流システム用マーク読取方式"，テレビ全大，11-5, pp.225-226(1977)

(13) 上田，鳥野，江尻，中村："物流システム用マーク読取装置"，テレビ全大，11-6, pp.227-228(1977)

(14) 鳥野，上田，江尻，松岡："マーク読取装置のための特徴追跡型形状認識方式の開発"，昭52信学全大，1165，5-223(1977)

(15) 島田："日本的ＯＡの構想と展開"，白桃書房pp.162-174(1983-9)

(16) 信学会編："データ通信ハンドブック"，オーム社，pp.35-39(1984-10)

(17) 竹田，大松，井上，尾波，小西："ニューラルネットワークを用いた高速搬送紙幣の識別"，電学論(C)，Vol.112-C, No.4, (1992)

(18) 竹田，大松，井上："紙幣識別の識別式決定のためのエキスパートシステム"，情処学論，Vol.33, No.7, pp.980-991(1992-7)

(19) 手島嘉数："ニューラルネットワークを用いた紙幣識別に関する研究"，平５前期情処学全大，2C-2, pp.125-126(1993-3)

(20) 辻井，鎌田："信号処理の基礎(ディジタル信号処理シリーズ)"，昭晃堂，(1994-4)

７．　結論

本研究は、プリント基板検査の傷抽出、ＬＳＩ組立てのため位置測定、ＡＴＭの預金業務自動化のための紙幣識別、の三つを具体的な適用例として、画像処理技術を産業分野に応用するために行ったものである。本章では、本研究で得られた成果を、本論文の流れに沿って要約する。

７．１　複雑パターンの傷抽出技術の研究

７．１．１　アルゴリズム開発

プリント基板のような、複雑なパターンを持つ対象の目視検査では、一般に傷は肉眼でようやく見分けられる程度の微小なものが多い。そのため目視検査を行う場合、持続的な緊張による疲労が影響し、安定した検査精度が得られないという問題があった。本研究では、人間のパターン認識能力に類似した、対象パターンの“粗さ”を利用した傷抽出アルゴリズムを開発した。開発アルゴリズムにはいくつかあり、(ｉ)準標準パターンを創成する方法、(ii)直接微小部を抽出する方法に大別できる。これはパターン同士の正確な位置あわせが不要、膨大なメモリが不要、処理速度も極めて速くできる、という装置化に適した特徴を持っている。プリント基板を例に計算機シミュレーションで開発アルゴリズムの有効性を確認した。

７．１．２　装置化方式

プリント基板の傷検査工程への適用を計るべく、拡大縮小法、周囲平均法、間隔判定法という微小部抽出アルゴリズムと、パターンの境界を修正するためのアルゴリズムを組み合わせたものを装置化した。開発した装置では、２次元局部画像処理技術を活用して、傷を実時間で抽出できるものが実現できた。また閾値を浮動式にすることにより、70μｍ

(髪の毛の太さ)の微小な傷が抽出できる浮動２値化技術を開発できた。これにより、比較的安価で、かつコンパクトな傷抽出のための装置化方式を確立することができた。基板を連続送りしながらストロボフラッシュ照明することにより、基板１枚あたり20ｓという目標検査速度を実現することができた。

なお、開発した傷抽出アルゴリズムをハードウェア的な見地から、(ｉ)傷抽出を行なうために対象パターンから利用する情報量、(ii)回路規模の目安となる２入力NAND，NORゲートで実現したと仮定した総ゲート数、(iii)処理速度の目安となる(ii)と同じゲート構成での最大ゲート段数、を見積もった結果、何れのアルゴリズムも極めて小規模で、実時間処理が可能であることを確認した。

７．１．３　フィールドテスト

プリント基板の傷検査工程でフィールド実験を行った結果、(ｉ)人間が検出できる傷はすべて検出できた、(ii)正常な部分を傷として虚報することは１件もなかった、(iii)本装置で検出した傷を人間に検査させたところ、すべての傷の約１/７しか検出できなかった、(iv)傷抽出された部分をすべて手直しし、正常と判定された基板を含めてテストした基板全部に電子部品を実装して電気的な動作試験を行った結果、人間が検査した場合は、通常0.1％の動作不良が発生するのに対して、本装置で検査した場合、すべての基板は正常に動作した。この結果、本装置は熟練検査員を凌ぐ傷検出能力があることが判明した。これにより、世界に先駆け、パターン認識を利用した、人間を凌ぐレベルの本格的な視覚装置を実用化できた。

７．１．４　まとめ

画像処理を応用して、複雑パターンの微小傷の抽出技術を確立した。本研究で開発した傷抽出技術は、原理的には対象パターンの複雑さの粗さが定まっている限り、どんな複雑なパターンでも、また連続、離散を問わず、さらにまた次元も何次元でも適用できる筈である。したがってプリント基板のみならず、ＩＣ･ＬＳＩマスクなどの異常検査、罫線や模様入りの紙の上に描かれた線図の抽出、あるいは円や球形の径の測定など応用範囲が広

いものと思われる。

複雑パターンの傷抽出アルゴリズム開発、実時間型の装置の実現、それに目視検査への応用は、本研究の大きな成果である。人間が持っている優れたパターン認識能力の一部を機械によって実現し、傷抽出という点で世界に先駆け、人間を凌ぐレベルのものを実用化できたことは、ＦＡ分野ひいては産業分野全体に大きなインパクトを与えたといえよう。これまで技術的困難さゆえに未開拓だった、質的性状の認識というジャンルに、大きな突破口を開いたと考える。

７．２　ＬＳＩの位置認識技術の研究

７．２．１　目視測定の状況と画像入力技術

ＬＳＩの生産工程の中で、組立工程のペレット内にある各内部電極と外部端子を配線するワイヤボンディング工程の自動化･省力化が遅れていた、ワイヤボンディング工程におけるペレットの位置ずれ、回転ずれを測定する作業は、人間の目視作業に頼らざるを得なかった。しかし、この作業は長時間にわたる単純な目視作業のため、作業者にとって精神的苦痛、作業意欲の低下をもたらし、最終的に品質や歩留まりに大きな影響を与える可能性があった。本研究では、この目視による位置測定作業を自動化すべく、目に代ってＴＶカメラを使い、ＬＳＩの位置をパターン認識により、自動的に検出することを目的とした。

目視によるＬＳＩ位置測定を機械で置換するために、自動位置認識に必要な画像入力方法を検討した結果、回転ずれが大きいＬＳＩペレットの位置を認識するためには、ＴＶカメラの視野は最低２視野必要であることを導いた。そこで、２視野を前提として画像入力技術を検討し、以下の結果を得た。(ｉ)ペレット付け、測定系のばらつきをカバーし、認識対象であるボンディングパッドを視野内にとらえること、という条件から視野の大きさを決めた。(ii)２視野実現のための方法を検討の結果、ＴＶカメラと光学系の構成・動作方法および視野位置変更容易性の点で、拡大像を２台のＴＶカメラで同時並列入力する方式が最も高い精度を確保できることが分かった。(iii)真空管式撮像管、標準解像度のＴＶカメラで、目標の検出精度が十分得られる見通しが得られた。(iv)照明方式を決めるため、

ＴＶカメラ感度によるフィージビリティ実験を行った結果、照明方式としては落射(明視野)が適しており、認識処理のために十分な信号が得られる見通しを得た。これにより、ＬＳＩ位置測定を自動化の画像入力技術を確立することができた。

７．２．２　アルゴリズム開発

２台のＴＶカメラからの入力画像に基づいて、自動位置認識システムの機能、性能の鍵を握る、２値化、認識の各アルゴリズムを開発した。

本研究当時、２値化技術は開発システムを実用化するために、極めて重要な技術だった。対象の濃淡画像を安定に２値化できれば、(ｉ)装置の処理速度を高速にできる、(ii)装置規模が簡単になる、など実用的に大きな利点が生じるからである。２値化アルゴリズムの開発には、フィールドにおける環境や対象の様々な変動要因に対しても、安定に２値化できることが最大の課題だった。そのため、フィールドで発生すると考えられる変動要因に対しても、安定に動作する三つのアルゴリズムを開発した。そのうち二つのアルゴリズムに関して、変動要因に対する閾値追従性能を評価した結果、両者とも追従性が良く有意差はないことが判明した。そこで装置化に有利な“白黒平衡法”というアルゴリズムを、認識システムで採用することにした。

ところで、位置認識システムでは、認識精度±10μｍ以下、認識率99.9％以上、認識時間300ms/ペレット以下、という高い性能目標を設定した。とくに認識対象であるボンディングパッドには、前工程での電気検査針によるパターンの部分的欠損が必ず存在した。他にも各種のノイズなど、認識の妨害要因が多くあった。認識アルゴリズムとしては、このような目標を達成し、課題を解決する必要があった。開発した認識アルゴリズムは、このようなパターンの部分的欠損のような妨害要因があっても、“星座認識”と呼ぶ一種のパターンマッチング法で、安定に対象の位置を認識させ、“ミクロ認識”と呼ぶ一種の窓枠法で対象の位置を高精度に検出することで、複数アルゴリズムを多段型組み合わせる構成とした。

7．2．3　装置化・システム化

大量サンプルによる自動位置認識のフィールドテストを行うべく、ハードウェア化に適した白黒平衡法の２値化アルゴリズムと、上記多段型認識アルゴリズムを位置認識装置として開発した。位置認識装置は小型計算機と機能分散する構成とした。星座認識のためのパターンマッチングや、白黒平衡法、ミクロ認識などで必要な白面積計数など、高速処理が必要な共通部分をハードウェア化し、２値化、認識の各アルゴリズムにおいて必要となる高度な処理と座標計算をソフトウェアでインプリメントした。各アルゴリズムは画面単位で処理が進行するようにシステム制御を行った。その結果、１ペレットあたりの認識時間は約200msとなった。これにより、目標300msを十分満たすことができた。

7．2．4　フィールドテスト

実際に認識率、認識精度が確保されているかを確認すべく、上記画像入力装置、位置認識装置、小型計算機を組み合わせたＬＳＩ自動位置認識システムを構築し、大量ＬＳＩサンプルによる、位置認識のフィールドテストを行った。その結果は、895サンプルに対して、正認識894ペレット、誤認識１ペレット、リジェクト率０ペレットであった。ただし、誤認識したペレットは、２視野合理性チェックでの各視野のパッド位置が不合理と判定され、ペレット全体としてはリジェクトされた。後で誤認識したペレットを調べた結果、認識すべきパッドが剥離した不良サンプルであることが判明した。この結果、開発システムは所期の目標を満たしており、十分実用性があるとの結論を得て、実生産ラインで本稼働させた。

7．2．5　まとめ

以上により、ＬＳＩ位置認識のための画像入力技術、２値化技術、認識技術を確立できた。その結果、複雑パターンの傷抽出という質的性状認識とともに、物体の幾何学的性状認識への突破口が開けた。またこの技術により、ＬＳＩ位置測定作業での人間介在による種々の不完全さは極小化でき、高い生産性とＬＳＩ製品の信頼性、品質を確保できるよう

になった。このことは、ＦＡ分野のみならず、産業分野全体においても大きなインパクトとなり、わが国の生産技術を一段と前進させる原動力となった。

７．３　高信頼度紙幣識別技術の研究

７．３．１　要求目標

銀行のＡＴＭなどのような現金で預金できる端末には、紙幣識別装置が内蔵されている。利用者から一括投入される紙幣は、複数種類が混在し、向き(表正立、表倒立、裏正立、裏倒立)、新旧もまちまちである。それに紙質が柔らかいため、トレーから分離される際、紙幣は左右の位置ずれ、回転ずれが起こり、ときには複数枚の紙幣の重なり、紙幣同士の間隔異常などが起こることになる。このような要因の影響で、紙幣識別装置で収集されるパターンは大きく変動する。ところが紙幣識別装置では、このような多様な変動状況を踏まえ、誤認識率10^{-10}以下という極めて高い信頼性が要求されている。

７．３．２　紙幣識別アルゴリズム

このような目標の達成のため、新しい識別アルゴリズムを提案した。これは、対象の向きに依存しないアルゴリズムであり、特別なハードウェアを必要とせず、通常のマイクロプロセッサで高速処理できるものである。

本研究では、１次元アレイセンサから得られる紙幣の入力パターンのばらつきと等価性を調べ、アダマール変換により、対象の母集団がお互いに空間的に十分離れ、処理負担が少ない特徴量を決めた。その結果、(ｉ)特徴量として識別性能の高い２次および４次のアダマール変換値を選ぶことにより、５画素という粗いサンプリング間隔における特徴量でも、金種間の分離性能を劣化させないことが分かった。また、(ii)アレイセンサの中心に関して対称な任意の素子に対応する入力パターン、その偶数次のアダマール変換値、およびその任意の二つから定まる判定領域に対して、等価性が成り立つことを明らかにし、その性質を向き、シフト、スキューの関係で定式化した。(iii)“相互対判定法”という新しい

識別アルゴリズムを提案し、その判定領域は向きと無関係に一元化でき、識別のための標準特徴記憶しておくためのメモリ容量を大幅に節約できることを明らかにした。(iv)複合誤識別率の目標を満たすため、一対のセンサ素子による誤識別率と、センサ素子数を決めるための指針を得た。以上のような成果を、日本紙幣の識別に適用した結果、(v)アレイセンサの中心対称な素子４個以上を２個づつ対にして組合せることにより、特徴量の等価性を利用した対象の向きに不変な識別アルゴリズムをマイクロプロセッサのコンソフトウェアで実現することができ、複合誤識別率の目標値10^{-10}以下を達成できることが判明した。なお、(ii)～(iv)は一般のシート状印刷物に対してもいえることである。

本研究で得られたアルゴリズムは、等価性という汎用的な性質を利用するため、読み取り方向が短手方向、長手方向何れにも容易に適用できる。また対象として日本紙幣のみならず、外国紙幣や商品券等、一般のシート状印刷物の自動識別などの用途に対しても、容易に適用できるものと考えられる。

７．３．３　まとめ

以上のような紙幣識別に関する成果は、ＡＴＭの中心的な技術として広汎に応用され、その後の銀行業務の自動化、サービス向上、高度化に大きく貢献することができた。また、本研究により、物体の持つ三つの基本的性状のうち、３番目の性状である付加的性状の認識の問題に対する一つのブレイクスルーが得られた。

７．４　結言

本研究は、プリント基板検査のための傷抽出、ＬＳＩ組立てのための位置測定、ＡＴＭの預金業務自動化のための紙幣識別、の三つを具体的な適用例として、画像処理技術を産業分野に応用するために行ったものである。ＦＡにおける検査工程、組立て工程およびＯＡにおけるＡＴＭの自動化、省力化を大きく推進できた。また技術的には、一般の３次元物体がもっている質的性状、幾何学的性状、付加的性状という三つの性状に関する認識という困難な課題に対して、画像処理によるパターン認識技術を適用することにより、解決

への大きな突破口を切り拓いたものである。

今から約４半世紀前に、ロボットに視覚を付与する積み木の世界から端を発し、さまざまなプロトタイプや視覚認識装置が登場し実用化された。今日では画像理解を中心とするコンピュータビジョンもしくはマシーンビジョンという大きな研究ジャンルが形成されている。筆者も本研究を通じて、とくにこの分野の立上り期に、今日で言うマシーンビジョンの基盤となった実用化研究を遂行できたことは、至上の喜びであるとともに、大きな技術的財産にもなっている。研究が大きく進展したとはいえ、まだまだ今日の画像処理、画像理解の技術では解決のつかない難題が山積しているのも事実である。今後、このマシーンビジョンの研究が益々発展し、広く産業、社会の発展に寄与するよう願って止まない。

謝辞

本研究は、筆者が主として昭和45年から昭和54年まで㈱日立製作所中央研究所において行った、画像処理技術の産業応用に関するものである。

本論文をまとめるに当り、長年にわたりご指導とご助力を賜った大阪大学基礎工学部システム工学科辻三郎教授を初め、同学科井口征士教授、谷内田正彦教授に深く感謝致します。

社内においては、沼倉俊郎博士、川崎淳博士、猪瀬文之博士、春名公一博士、遠藤武之博士、神内俊郎氏、遠藤裕英氏、渡部篤美博士、柴田晃博士、福井幸夫氏には筆者の上司として、研究者育成という立場からご指導ご薫陶を賜った。江尻正員博士には長年にわたり、筆者の直属上司として、画像処理技術、パターン認識技術に関する研究全般から本論文まとめに至るまで、終始懇切にご指導ご鞭撻を賜った。岸本清治博士、桑原禎司氏を初め、職場の回りの方々には、本論文をまとめるにあたり多大なご便宜を賜った。これらの方々に深く感謝致します。

本研究に関する企画、実験、開発は、㈱日立製作所の多数の方々のご協力を得て行われた。烏野武博士、池田貞弘氏、依田晴夫博士、柏岡誠治博士、上田博唯博士、嶋好博博士、酒匂裕博士、安江利一氏、宮武孝文氏、浜田利満博士、秋山伸幸博士、嶋田茂氏、麻殖生健二氏、堀田正生博士、川口久光氏、有賀誠氏、町田哲夫氏などには、本研究の企画、アイデア討論、実験、検討、試作などを共同して当って頂いた。また視覚画像処理装置などの応用システムの開発は、亀山正義氏、浜本信夫氏、大竹正利氏、堀口浩氏、鈴木勲氏、山口純夫氏ほか多数の方々のご協力によって完成したものである。工場の立場から目標仕様の設定、サンプル提供、試作機のフィールドテスト、評価、実験協力など本研究の視覚画像処理装置の実用化にご協力賜った小沼慶一氏、佐竹勘二氏、片山方三氏、星光栄氏、鈴木純氏、谷本道夫氏、山崎勇氏、鈴村芳昭氏、藤岡敏則氏、松田茂晴氏、大久保勉氏、牛島氏、加納光成氏、日立電子(株)河村貞和氏ほか多数の方々との協力によって完成したものである。これらの方々に感謝致します。

家庭においては、本論文の執筆に当たり、妻　恵にワープロによる文章入力などを支援してもらった。また、妻を初め、子供たち　いづみ、圭介、悠子、それに両親　目瀬喜美江、坪井清、春子などから温かい励ましをいただいた。ここに感謝します。

筆者業績

本研究は画像処理技術の産業応用システムの開発で高い評価を受けた。以下に本研究を中心とする筆者の業績を挙げる。

(I) 表彰

(1) “視覚を用いたＬＳＩ自動組立システム”は、わが国産業技術革新における寄与が大なるものと認められ、1978年４月日刊工業新聞社主催の第７回日本産業技術大賞を、内閣総理大臣および日刊工業新聞社から受賞した。

(2) 半導体生産技術の発明として、“位置検出装置”(特許第1514275号)他１件は、わが国科学技術の向上と、'82～'90における産業の振興に大きく貢献した業績(日立製作所のＩＣ、ＬＳＩの生産に関し、従来比で生産費200倍、省力化15倍)で、1992年10月28日平成４年度関東地方発明表彰において発明奨励賞を授与され、その功績をたたえられた。

(II) フルペーパー論文寄稿・国際会議発表

(1) 目瀬，烏野，池田，江尻：“複雑パターンを対象とした傷抽出装置方式”，電学論Ｃ，Vol.94-C, No.5, pp.89-96(1974-5)

(2) Mese M., Miyatake T., Kashioka S., Ejiri M., Yamazaki I.and Hamada T. : “Automatic Position Recognition Technique for LSI Assembly”, Proc. of 5th IJCAI, Boston, pp.685-693(1977-8)

(3) 目瀬，酒匂，上田，宮武，江尻：“紙幣パターンの向き不変型識別手法”，信学論ＤII，Vol.78, No.5(1995-5)掲載予定

(4) 烏野，目瀬，江尻：“複雑パターンの傷認識”，電学論Ｃ，Vol.95-C, No.3, pp. 53-60(1975-3)

(5) Ejiri M., Uno T., Mese M. and Ikeda S. : “A Process for Detecting Defects

in Complicated Patterns", Computer Graphics and Image Processing, Vol.2, p.326-339(1973)

（６） 川崎，山内，岩本，目瀬："文書清書システムにおける行組版の考察"，情処学論，Vol.34, No.8, pp.1741-1751(1993-8)

（Ⅲ） 研究会・講演会発表

（７） 目瀬，鳥野，江尻："両眼視による距離認識"，昭４７信学全大，p114(1972)

（８） 目瀬，池田，鳥野，江尻："プリント基板の傷認識"，昭４８電学全大，pp.1823-1824(1973)

（９） 鳥野，目瀬，池田，江尻："複雑パターンの異常認識"，昭４８電学全大1347，pp.1821-1822(1973)

(10) 河村，中谷，目瀬，鳥野："傷抽出パターン認識とそのディスプレイについて"，信学会研資，ＩＥ73-33，pp.1-8(1973)

(11) 宮武，柏岡，目瀬，鳥野，阿藤："ハイブリッドＩＣ自動組立て用の自動焦点調節装置"，昭５４電学東支大，322，pp.439-440(1979-11)

(12) 岩本，目瀬，鈴木，高橋，宗圓，岡本："図形入り文書作成ソフト"Ｂ－ＤＲＡＷ"昭６２信学総全大(1987)

(13) 岩本，山内，目瀬，川崎，松田，近藤："パソコンＤＴＰにおける高品位文書処理"，情処学「マイクロコンピュータとワークステーションによる卓上出版とネットワーク」シンポジューム，pp.21-28(1988-11)

(14) 川崎，岩本，山内，目瀬，松田，近藤："電子編集システムの組版処理における行組の考察"、平１信学全大，Ｄ-72(1989)

(15) 市川，小松，浅川，松坂，目瀬："連続音韻認識"，昭５６音響学会予稿集，2-1-14，pp.103-104(1981-10)

(16) 北爪，目瀬，安江，大平，市川："連続音声認識装置認識論理部の構成と機能"，昭５６音響学会予稿集，2-1-15，pp.105-106(1981-10)

(17) 上村，目瀬，大條：""指カーソル"式ポインティング操作の性能評価"，平６情処学全大，４Ｊ－２(1994-3)

(Ⅳ) その他(解説等)

(18) 烏野，目瀬："プリント回路板の検査ー特に傷認識装置についてー"，電子材料 (1973-12)

(19) Uno T., Mese M. and Ejiri M. : "Defect Detecting Device for Printed Circuit Boards", Japan Electric Engineering, No.86, pp52-57(1974-1)

(20) 日立中央研究所・日立電子："辞書なし方式"によるプリント基板の傷認識装置を開発"，映像情報，pp.43-45(1974-10)