部分ランダム探索と適応型探索による半導体チップ 画像テンプレートマッチング*

齊 藤 文 彦**

Template Searching in a Semiconductor Chip Image using Partial Random Search and Adaptable Search

Fumihiko SAITOH

Image template matching using the normalized correlation algorithm is useful for some industrial applications. However, matching needs many searching points to find the template image. The present paper describes to apply the algorithm for searching the template in the image of a semiconductor chip efficiently. In the algorithm, searching is repeated until the near position of the template is found. Template matching are executed based on provided searching points in an image and matching rates are calculated and evaluated relatively. Only points with higher matching rates are survived for next search. The new searching points are generated at nearby locations of survived points and they are used for next search. Random locations are given to some searching points selected at a constant probability for random search. Template searching using this algorithm resulted in superior efficient search to whole sequential search or random search when parameters meet the condition of the low survival rate and the high random rate.

Key words: template matching, normalized correlation, image processing, semiconductor chip, positioning

1. は じ め に

製造ラインにおける各種工業用画像処理アプリケーションに有効な画像処理手法の一つに濃淡画像における正規化相関テンプレートマッチングがある。入力画像の中から登録されているテンプレート画像を探し出す基本的な手法であるが、汎用性に優れているため、各種の位置決め、計測、検査等の工程に適用可能である。しかし、画像のマッチングに多量の計算コストを必要とするため、テンプレートの探索効率を上げ、実用的な処理時間を実現するためには各種の工夫が必要となる。

本論文では、半導体チップ画像における位置抽出に正規化相関テンプレートマッチングを用いる際に問題となる、探索対象画像内におけるテンプレートの探索効率を、ランダム探索と正規化相関度から探索点の存続と消滅及び生成を行う適応型探索を組み合わせることによって改善する手法について提案する。

2. 正規化相関画像テンプレートマッチング

正規化相関による画像テンプレートマッチングは、事前に登録されているテンプレートと探索すべき画像間の一致度を評価しながら、画像内におけるテンプレートの位置を求めるための手法である¹⁾。図1に示すように、探索対象画像 $W(i, j)$ を大きさ $L \times L$ 画素、テンプレート画像 $S(i, j)$ を大きさ $M \times M$ 画素とし、まず、両者の間の正規化相関度 $R(m, n)$ を $0 \leq m \leq L-M$, $0 \leq n \leq L-M$ の範囲にて、次の式によって計算する。

$$R(m, n) = \frac{\sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{M-1} S(i, j) \cdot W(i+m, j+n)}{\{\sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{M-1} S^2(i, j)\}^{1/2} \cdot \{\sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{M-1} W^2(i+m, j+n)\}^{1/2}} \quad (1)$$

次に、 $R(m, n)$ の最大値を与える座標 (m, n) を求める²⁾。

正規化相関テンプレートマッチングの特徴は、二値化画像の

Fig.1 Image template matching

テンプレートマッチングと比較して、照明の変動等による入力画像の輝度レベルの変化への追従性が高いことである³⁾。そのため、変化する環境の中で高い信頼性が要求される産業用の画像認識には有効な手法であり、工業分野における人間の視覚に頼る各種工程の自動化もしくは省力化に適用されつつある³⁾⁴⁾。

一方、正規化相関テンプレートマッチングの問題は、図1で $(L-M+1)^2$ 画素について正規化相関度の計算が必要のために、計算コストが大きいことである。特に工業用画像処理においては、信頼性と同時に高速処理が要求されることが多い。そこで、テンプレートの探索効率を改善するために、マッチング時に累積される誤差の値の増加傾向によって計算を途中で打ち切る残差逐次検定法⁵⁾や、高い解像度の画像上でマッチングを行う前に、あらかじめ解像度の低い画像を用意して探索効率を改善する階層構造型の処理手法⁶⁾、あるいはランレングス表現を利用して計算コストを削減する手法⁷⁾等が提案されている。

3. 処 理 対 象 画 像

図2に本論文にて正規化相関テンプレートマッチング処理の対象となる半導体チップ画像のテンプレートと探索画像空間を示す。各画素は8ビットの濃淡値を持つ。テンプレートは 60×60 画素のウィンドウに囲まれた半導体チップの左下角部分の画像である。テンプレートの探索空間は 300×300 画素のウィンドウ

*原稿受付 平成7年4月14日

**正 会 員 立命館大学理工学研究科(草津市野路町1916)

Fig. 2 An image of a semiconductor chip

ウの内部であり、半導体チップ位置決め装置の搬送機構の機械的精度から、半導体チップの左下角部分はこのウィンドウの範囲内に $\pm 2^\circ$ 以内の傾きで存在することが保証されている。処理の目的はウィンドウ内に存在する半導体チップの左下角部分の位置抽出である。なお、1画素の大きさは $10.7 \mu\text{m}$ 角である。

4. 部分ランダム探索と適応型探索によるテンプレート探索

テンプレートの探索においては、最終的には探索空間内に存在する半導体チップの左下角部分の正確な位置を最適解として求める必要があるが、本探索手法では、まず、テンプレートの画像空間内におけるおおよその位置を近似解として求め、その後、その近傍を順次探索して最適解を求める。

4. 1 探索点情報

近似解探索のために、一定数 N 個の探索点を準備する。テンプレートの探索空間は二次元の画像領域であり、求めるべき解も二次元の座標となる。そのため、今回提案する探索手法においては、各探索点 P_k の情報を次のように定義する。

$$P_k = (x_k, y_k, M_k) \quad (2)$$

ここで、 x_k 及び y_k は、テンプレートマッチングの基準点となる探索点 P_k の画像内における二次元座標である。また、 M_k は座標 (x_k, y_k) を基準点とする式(1)にて計算される正規化相関度である。

4. 2 探索処理の流れ

図3に、テンプレート探索のための処理過程を示す。ここでは、遺伝的なパターンマッチング手法⁹⁾を簡略化して用いている。最初に、すべての探索点には初期値としてランダムな座標情報が与えられる。探索処理は N 個の探索点による探索を1回の探索ループとし、探索ループ回数が設定された最大探索ループ回数を越えるか、又は条件値を越える高い正規化相関度を持つ探索点が現れるまで続けられる。各探索点を基準として正規化相関テンプレートマッチングが実行され、その結果得られた正規化相関度の順にすべての探索点を並べ、上位の正規化相関度を持つ探索点のみを選択し、次の探索ループに用いる。つまり、ある探索点を持つ正規化相関度と他の探索点の正規化相関度との相対的な関係によって、その探索点が次の探索処理に用いられるか否かが決定される。また、探索ループの度に、ある確率によって探索点を無作為に選択し、これらにランダムな座標情報を与える。正規化相関度の低い探索点は消滅させ、代わりに先程選択した正規化相関度の高い探索点の情報をを用いて、次の探索ループに用いる新しい探索点を生成する。

Fig.3 Flow-chart of the proposed method for template searching

Fig.4 A distribution of matching rates

4. 2. 1 探索点存続と消滅及び生成の規則

探索の初期の段階では、各探索点は各々ランダムに設定された二次元座標情報を持つが、探索ループが進むにつれて正規化相関度がより高い探索点が存続し、かつ存続した探索点の情報を色濃く持つ、新たな探索点を生成させる。今回適用した探索点の存続と消滅及び生成の規則としては、すべての探索点の内、正規化相関度が上位 $S\%$ の探索点を探索への有効度が高いと見なし、次の探索ループへの存続を許可する。つまり、探索点の総数を N とした場合、 $N \cdot S/100$ 個の探索点が次の探索ループに存続する。また、全体の $R\%$ 、すなわち $N \cdot R/100$ 個の探索点が後述するランダム探索の対象となる。残る $100 - S - R\%$ 、すなわち $N(1 - S/100 - R/100)$ 個の探索点は存続の資格が無いとして消滅させる。次に、存続を許可した上位 $S\%$ の探索点の中からランダムに1個の探索点を選び、この探索点を持つ情報を用いて、新たに1個の探索点を生成させる。この操作を繰り返し、消滅させた探索点と同数、すなわち $N(1 - S/100 - R/100)$ 個の探索点を次の探索ループのために新たに生成させる。このように、探索点の総数は、探索処理が完了するまで一定数 N を維持する。つまり、探索点数 N の条件のもとで、正規化相関度の低い探索点は探索に有効ではないとして消滅させ、一方で正規化相関度の高い探索点の情報をを用いて新たな探索点を生成させる。この規則により、正規化相関度の低い探索点は、探索ループを繰り返さない内に消滅し、逆に正規化相関度の高い探索

Fig. 5 A sample of template searching using the proposed method

点は、長い探索ループ期間にわたって存在し続け、正規化相関度のより高い探索点を生成しようと試みる。

4. 2. 2 探索点情報の伝達

正規化相関度の高い探索点の情報を用いて次の探索ループのための新たな探索点を生成する際、基となる探索点の二次元座標値にわずかな変位を加えた情報を与えるようにした。新たに生成させる探索点 P_n に与える情報として、次の規則を適用した。

$$P_n = (x_k + \delta x, y_k + \delta y, M_n) \quad (3)$$

ここで、 (x_k, y_k) は基となる探索点 P_k が持つ二次元座標である。 δx 及び δy はランダムに設定される整数値であり、各々数画素程度の範囲に設定する。つまり、高い正規化相関度を持つ探索点の近傍に求めるべき解が存在する可能性が高いと考え、基となる探索点とはわずかに異なる座標を持つ探索点を生成する。また、 M_n は探索点 P_n における正規化相関度を表す。

4. 2. 3 ランダム探索

基となる探索点から新しい探索点への単純な情報伝達による生成と消滅のみによる規則を用いると、基となる探索点の情報を色濃く持つ探索点だけが蔓延し、その探索点の付近に正しい解が存在していれば、理想的な探索過程が実現される。しかし、逆にたまたま最適解とは異なる局所的な解の付近にすべての探索点が収束してしまうと、その局所解の近傍から離脱することが困難となり、誤った解を求めるか、あるいは永遠に条件を満たす解に到達しないという結果に陥る。このような状態を避けるために、探索ループの度にすべての探索点の中から $R\%$ の探索点を無作為に選び、これらに探索画像空間内のランダムな座標を与える。これらの探索点は、次の探索ループにおけるランダム探索のために用いられる。すなわち、ランダム探索に用

いる探索点 P_r には次の情報を与える。

$$P_r = (x_r, y_r, M_r) \quad (4)$$

ここで、 x_r 及び y_r は、各々図 1 において、 $0 \leq x_r \leq L-M$ 、 $0 \leq y_r \leq L-M$ を満たすランダムな整数とする。また、 M_r は探索点 P_r における正規化相関度を表す。

5. 実験と考察

5. 1 実験条件

以上に述べた探索手法を適用して、半導体チップ画像における正規化相関テンプレートマッチングの実験を行った。画像処理プロセッサにはインテル 80486DX2-66MHz を使用し、探索点の総数 N は実験の結果適当と判断された 200 個に設定した。

探索終了条件は、式 (1) によって計算される正規化相関度の値が 0.97 以上の探索点が 1 個でも出現するか、あるいは探索ループ回数が最大探索ループ回数を越えた時点とした。探索画像空間内において、半導体チップの左下角部分付近以外には、正規化相関度が 0.97 以上となる部分は存在しないことが実験的に確認されている。従って、探索が完了した場合、唯一の近似解が得られる。また、各種の探索実験において、探索を途中で打ち切ることを極力避けるために最大探索ループ回数は 2000 と多めに設定した。

式 (3) における δx と δy の値は各々 ± 5 の範囲内のランダムに生成された整数値とした。これは、今回対象となっている半導体チップ画像においては、図 4 に示すように最大正規化相関度を持つピークの位置を中心とする半径 5 画素程度の範囲に周辺と比較して正規化相関度の高い値が分布しているためで

Fig.6 Relationship between the survival rate, the random rate and the averaged searching points

ある。つまり、相対的に高い正規化相関度を持つ探索点の±5画素の範囲内に求めるべき解、すなわち正規化相関度の最大値が存在する可能性が高いと考えた。

5.2 探索の経過

図5に半導体チップ画像における本探索手法によるテンプレート探索の経過例を示す。探索空間内に存在する白点は各探索点を示している。テンプレートマッチングは各探索点を左上の基準点として実行される。この例の場合、探索に用いるパラメータとして、次の探索ループへの探索点の存続率 S を1%、ランダム探索に用いる探索点数の割合を意味するランダム探索率 R を60%に設定している。従って、残る39%の探索点が探索ループの度に消滅し、消滅した探索点と同数の探索点が4.2.2にて述べた規則に従って生成される。1回目の探索ループでは、すべての探索点はランダムな位置を示しているが、2回目の探索ループでは正規化相関度の高い探索点に引かれて主に2箇所付近に探索点が集中し、3回目の探索ループでは多くの探索点がテンプレートの基準点位置付近に集中し、4回目の探索ループで条件を満たす探索点が現れ、探索が完了している。

5.3 存続率とランダム探索率の設定

次に、テンプレートの探索に本手法を適用する際に重要なパラメータである、探索点の存続率 S とランダム探索率 R の適正な値を実験的に求めることを試みた。1%から9%までの1%おきの9種類の存続率 S 及び10%から90%までの10%おきの9種類のランダム探索率 R との各組合せにおいて、各々100回本手法による探索を実行し、近似解発見までに要した探索点数の平均を求めた。なお、今回の実験において、計8100回の探索を異なる入力画像に対して実行したが、すべての探索においてテンプレートである半導体チップの左下角部分を発見した。すなわち、すべての処理において唯一の全域的な近似解を発見し、局所的な近似解に収束することによって最大探索ループ回数を越え、途中で打ち切られた処理は存在しなかった。

図6に、存続率 S とランダム探索率 R を変化させた場合の平均探索点数を示す。平均探索点数が最小となるのは存続率 S が1%かつランダム探索率 R が60%の場合であり、最小値は843であった。なお、この時の標準偏差は129、探索に要する平均処理時間は1165msであった。存続率 S の変化に対する平均探索点数への影響度は小さいが、一方、ランダム探索率 R を変化させた場合は結果への影響度が比較的大きい。特に、ランダム探索率 R が30%未満の場合は平均探索点数がかなり多くなっている。

Table 1 Comparison of experimental data by searching methods

Searching methods	Sequential search	Random search	Proposed method
Averaged searching points for finding the near answer	—	21910	843
Averaged searching points for finding the actual answer	58081	22031	964
Averaged searching time for finding the near answer ms	—	17750	1165
Averaged searching time for finding the actual answer ms	52460	17860	1275

また、存続率 S を数%と小さな値とし、ランダム探索率 R を50%から80%と比較的大きな値に設定した場合に平均探索点数が少なくなり、効率的な探索が行われる傾向にあることが分かる。

5.4 探索効率の比較

表1に平均探索点数と探索に要した平均処理時間に関して全空間の順次探索、ランダム探索及び本手法による探索の実験結果の比較を示す。ここで、ランダム探索とは、すべての探索点の情報を各探索ループの度に常にランダムに与えた場合、すなわち、存続率 S を0%かつランダム探索率 R を100%に設定した場合を意味する。なお、全空間順次探索の場合、今回の実験ではテンプレートと探索画像空間の大きさの関係から、常に $(300-60+1)^2=58081$ 個の探索点を必要とする。

全空間順次探索では最適解、すなわち半導体チップの左下角部分の正確な位置を直接求めることができるが、ランダム探索と本手法による探索においては、得られた解は最適解ではなく、探索画像空間内に存在する全域的な近似解、すなわち半導体チップの左下角部分のおおよその位置にすぎない。そこで、近似解付近に存在する最適解を求めるために、得られた解を中心として近傍±5画素の範囲にて順次探索を行い、正規化相関度が最大となる位置を求めている。これによって、半導体チップの左下角部分の正確な位置、すなわち最適解を求めている。この最適解を求める処理のために、表1に示したように、平均探索点数で±5画素の範囲を順次探索するための121点、平均処理時間でこれら121点の順次探索処理に必要な110msを加えた値を最終的な比較のための評価基準とする必要がある。従って、本探索手法による最適解を求めるための平均探索点数は964、平均処理時間は1275msとなっている。

ここで、全空間順次探索による探索点数を S_A 、ランダム探索による最適解を求めるための平均探索点数を S_R 、本探索手法による最適解を求めるための平均探索点数を S_G とすると、本探索手法の全空間順次探索に対する探索効率は $S_A/S_G=60.3$ 、ランダム探索に対する探索効率は $S_R/S_G=22.9$ となる。

5.5 他の画像における実験

本手法の有効性を確認するために、他の4種類の画像について平均探索点数に関する全空間順次探索とランダム探索との比較実験を行った。図7に各画像におけるテンプレート探索の結果例を示す。図7(c)及び(d)の例に示すように、探索空間内にテンプレートと類似した別のパターンが存在する場合、結果としてその付近にも多くの探索点が集中する傾向が見られる。

これら4種類の画像における実験結果を表2に示す。存続率とランダム探索率の組合せ等、探索に用いるすべてのパラメータは半導体チップ画像の探索の場合と同じ条件にて実験を行った。ここで、最適存続率及び最適ランダム探索率とは、各々平

Fig.7 Sample images of template searching using the proposed method

Table 2 Comparison of experimental results by sample images

Sample Images	(a) Printed characters	(b) Semiconduc- tor module	(c) Numbers	(d) Chessmen
The best survival rate %	1	2	7	4
The best random rate %	80	60	70	90
Searching points by sequential search S_A	58081	58081	58081	58081
Averaged searching points by random search S_R	26540	23941	23352	27191
Averaged searching points by the proposed method S_G	1141	561	841	1234
Searching efficiency S_A/S_G	50.9	103.5	69.1	47.1
Searching efficiency S_R/S_G	23.3	42.7	27.8	22.0

均探索点数が最小値を記録した場合の存続率及びランダム探索率を意味する。各々の画像において、存続率が1%から7%、ランダム探索率が60%から90%の範囲内で平均探索点数が最小となった。また、全空間順次探索に対する探索効率47倍から100倍程度、ランダム探索に対する探索効率は22倍から42倍程度という結果となり、これらの画像における本手法によるテンプレート探索が有効に働いていることが実験的に分かった。

6. ま と め

(1) 半導体チップの位置抽出を正規化相関画像テンプレートマッチングにて行う際、テンプレートの探索効率を改善するために、ランダム探索と探索点の存続、消滅及び生成の規則による適応型探索を組み合わせた手法を試みた。

(2) 探索点の次の探索ループへの存続率とランダム探索に用いる探索点数の割合であるランダム探索率の各々を変化させながら最適な探索パラメータを評価する実験を行った。その結果、存続率が1%かつランダム探索率が60%の場合、平均探索点数が最小となった。処理時間に関しては、1画面あたり平均1275msとなった。また、全空間順次探索と比較して60.3倍、ランダム探索と比較して22.9倍の探索効率を得られた。

(3) 本探索手法の有効性を確認するために、他の4種類の画像について実験を行った結果、各画像について全空間順次探索と比較して40倍以上、ランダム探索と比較して20倍以上の探索効率を得た。また、探索点の存続率を数%と小さく設定し、ランダム探索率を60%から90%の範囲の高い値に設定することによって効率的な探索が行われることが分かった。

参 考 文 献

- 1) W. M. Silver: Normalized Correlation Search in Alignment, Gauging, and Inspection, SPIE Vol. 755 Image Pattern Recognition: Algorithm Implementations, Techniques and Technology, (1987) 23.
- 2) 尾上守夫: 画像処理ハンドブック, 昭晃堂 (1987) 303.
- 3) 加藤彦彦: グレースケール画像処理の動向とその応用, 電子技術, 1990-12 (1990) 72.
- 4) 水谷栄二: グレースケールパターンマッチングを用いたF A用画像処理装置とその応用例, 0 plus E, No. 141 (1991) 141.
- 5) D. I. Barnea and H. F. Silverman: A Class of Algorithms for Fast Digital Image Registration, IEEE Trans., C-21, 2, (1972) 179.
- 6) R. Y. Wong and E. L. Hall: Sequential Hierarchical Scene Matching, IEEE Trans., C-27, 4, (1978) 359.
- 7) A. Margalit and A. Rosenfeld: Reducing the Expected Computational Cost of Template Matching using Run Length Representation, Pattern Recognition Letters, 11, 4, (1990) 255.
- 8) 安居院 猛, 長尾智晴: ジェネティックアルゴリズム, 昭晃堂 (1993) 53.