見比べ KIZKI 処理による 商用印刷機における印刷物検査手法*

青木公也** 白村佑真*** 伊藤大陽****

青柳広太† 三ヶ尻晋† 奈良 互† 鎌田卓治† 石塚 稜†

A Study on Print Inspection Methods for Commercial Printing Presses based on "Comparison KIZKI Processing"

Kimiya AOKI, Yuma HAKUMURA, Taiyo ITO,

Kota AOYAGI, Susumu MIKAJIRI, Wataru NARA, Takuji KAMADA and Ryo ISHIZUKA

In the commercial printing machine envisioned in this study, an electronic document is printed, and its image is captured by a built-in reader to detect defective parts (stains and irregularities) in the printed document. Basically, the inspection is a comparison between the submitted image and the printed image. However, the printed image contains geometric deformations and errors in density and color during reading, and the submitted image and the printed image will not match even if the printing is appropriate. To solve this problem, we proposed a new method of comparative inspection, which we call "Comparison KIZKI Processing". In experiments, we used a test chart and confirmed that we could detect small stains, streaks, and irregularities.

Key words: print inspection, comparative inspection, visual inspection, image processing, "KIZKI" processing

1. 緒 言

1.1 研究背景と目的

本研究では、商用印刷機に搭載される印刷物検査装置の画像処理手法について提案する。本研究で想定する商用印刷機では、電子入稿された原稿を印刷し、それを内蔵の読み取り装置によって撮像し、印刷物中の不良部を検出する。印刷物の不良種類は幾つかあるが、本研究では特に、微小な点状の汚れを対象とする。

印刷物検査手法の研究の歴史は古いが^{1)~3)}、印刷物に求められる品質は年々高くなり、検査手法の研究開発の歩みは続いている⁴⁾。印刷物検査の画像処理では基本的に印刷物マスター画像(参照画像)と、読み取り装置で撮像された印刷物スキャン画像(被検査画像)を比較する。つまり、被検査画像中の参照画像との差異を検出する。まずは、差分処理が考えられるが、被検査画像には読み取り誤差と呼ばれる、不良ではない幾何変形・ブレや濃度変化が含まれることが課題となる。

想定する読み取り装置は、印刷物の搬送系を活かしたラインセンサを用いる。これによって装置の小型化と、印刷動作とシームレスな高速検査が実現される。しかし、読み取り精度の追い込みが、静的な撮像系と比較して困難になる。特に枚葉印刷(1枚ずつにカットされた紙を印刷機に通す方式)の場合、用紙搬送時にローラーへの用紙の引き込み・抜き出しが発生し、紙の位置ズレやバタつき、速度ムラ等の要因となる。従ってスキャン画像には撮像時の位置ズレ、回転、スキュー歪、伸縮が複合的に含まれ、かつそれが紙面の部分部分で異なる。被検査画像の補正は容易ではない。また、印刷された紙面を読み取るので、

Fig.1 Spot the Difference

色分布についても電子入稿画像はもとより、スキャンして良品判定した画像も、被検査画像とは完全には一致しない。比較検査は外観検査手法の代表的な手法の一つであるが、参照画像と被検査画像の間の不良ではない差異の検出抑制と欠陥検出の間の感度設定が多くの場合、課題となる。その中でも、本研究課題における読み取り誤差は、差異の要因が複合的であり対応難度は高いと考えられる。

半導体ウェハやプリント基板パターンの自動外観検査は比較検査の代表例であり、古くから参照画像の良品範囲におけるバラつきや、比較時の位置ズレに対応する手法^{5)~9)}が提案されてきた。しかし、本研究課題における複合的な幾何変形と濃度変化・ノイズに、同時に対応することは困難であると考えられる。

本研究課題である印刷物検査も比較検査の代表例であり、やはり参照画像と被検査画像のズレへの対応が、古くから現在に至るまでの大きな課題の一つとなってる³⁾⁴⁾¹⁰⁾。殆どの印刷物検査手法では参照画像と被検査画像間の差分処理を基本とし、かつ画像間の幾何学的・濃度的なズレによる過検出(虚報)の抑制手法の工夫に注力している。

印刷コンテンツが活字等、局所的な画像特徴が豊富であれば、それらを使って参照画像と被検査画像間で対応点を探索し、幾何学的な読み取り誤差を補正する¹¹⁾ことができる。また、対応

* 原稿受付 令和3年5月13日

掲載決定 令和3年8月2日

** 正 会 員 中京大学(愛知県名古屋市中昭和区八事本町 101-2)

*** 中京大学大学院 工学研究科

**** 中京大学 工学部

† 株式会社リコー(神奈川県海老名市泉 2-7-1)

Fig.2 Checking answers

点探索においてキーポイントがマッチしないことを利用して直接的に不良を検出する手法¹²⁾も提案されている。しかし、本研究で対象とする印刷物のコンテンツは必ずしも局所特徴が安定して設定できない。また、画像の幾何変換時に画素値の内挿が発生し、それへの対応も考えることになる。

印刷物検査の差分処理において、絵柄のエッジ部と非エッジ部で検出感度を変更する手法^{10)13)~16)}が多く採用されている。つまり、差分処理によって参照画像と被検査画像間のズレが過検出されるのは特に絵柄のエッジ部分であるため、その近傍数画素程度においては不良の検出感度を低くする。ただし、この方法の問題は、エッジ近傍の不良の見逃しである。

以上は幾何学的な変動への対応であるが、差分処理においては、被検査画像の濃度の変動への対応も重要である。これについては、参照画像の画素毎に予め濃度変動の許容幅を設定する方法¹³⁾¹⁷⁾が提案されている。また、印刷物中の不良の目立ち方を考慮し、ヒトの視覚特性に基づく判定条件を盛り込んだ検査手法¹³⁾¹⁸⁾も提案されている。

印刷物検査における参照画像の準備については、電子入稿された画像を使う方法と、予め良品判定されたスキャン画像を使う方法がある。後者は、読み取り誤差を含む参照画像となるため、過検出は抑制傾向になると考えられる。ただし、部単位印刷等、毎回違う画像を印刷する場合は良品取得が不可能である。また、前述の参照画像に予め許容値を設定しておく手法の適用も困難となる。これに対してバリエーション印刷に対応した手法¹⁵⁾が提案されている。本研究でも参照画像には電子入稿された印刷物マスター画像を用いる。

比較検査における参照画像の工夫は良品画像のバラツキの統計的モデル化であるが、これを機械学習、近年では特に深層学習によって実現する方法¹⁹⁾²⁰⁾も提案されている。この手法は畳み込みニューラルネットワークをベースに、参照画像と被検査画像の差異を学習し、モデル化する。工業製品の印字検査において、数千枚程度の学習データのみで、学習とは異なる製品の印字検査への対応と高い検出性能を実現している。しかし、本研究で扱う印刷物のコンテンツは無限であり、かつ印刷機内の読み取り装置の個体差や検査環境のバラツキは、工場内に設置される一般的な外観検査装置より大きく、良品画像のモデル化は困難であると考えられる。

ここまでの例は何れも、比較検査における過検出抑制の工夫であるが、本研究で検出対象とする不良は、直径や幅が数画素程度でコントラストも低い微小な点状汚れである。つまり、そ

Fig.3 Conventional KIZKI Processing

もそも不良の検出難度が高く、かつ過検出抑制と不良検出の両立が困難である。

以上を踏まえて本研究では、「見比べ KIZKI 処理」と呼ぶ新たな比較検査手法を提案する。本比較検査手法は、読み取り誤差を事前にモデル化することなく、電子入稿された印刷物マスター画像を参照画像として、画像の 1 対 1 の比較のみによって微小不良を検出することを目的とする。

1.2 本研究における学術的な問い

図 1 に示したイラスト 1 とイラスト 2 は、それぞれ IAIP (精密工学会、画像応用技術専門委員会) の公式キャラクター「れなちゃん」²¹⁾を参考にして、筆者がフリーハンドで描いた線画イラストである。これらのイラストを例に、本研究の課題である比較検査について考える。

イラスト 1 と 2 において、意図的に付与した「違う箇所」は 6 カ所である。ここで今一度、図 1 を観察すると、イラスト 1 とイラスト 2 はそれぞれ別個に描いており、デジタル的にコピーした訳ではないので、両者では線にズレがある。図 2(a) は二つのイラストを重畳した画像であり、そのズレ具合が分かる。また、図 2(b) が間違い探しの答えである。赤丸は、イラスト 1 には「無く」イラスト 2 には「有る」箇所、青丸はイラスト 1 には「有り」イラスト 2 には「無い」箇所を示す。

図 2(c) は本研究で提案する「見比べ KIZKI 処理」と呼ぶ比較検査手法の検出結果の一例であり、イラスト 2 に対して二つのイラストの違いをヒートマップで表現している。イラスト 2 にのみ「有る」箇所は暖色、イラスト 2 にのみ「無い」箇所は寒色、違いがない領域は緑色で表現した。一般的にマシンビジョンは、画像比較による違いの検出に対して敏感であり、僅かな違いを検出することは得意である。その点ヒトは、微小な違い

Fig.4 Detection example by KIZKI processing

を定量的に検出することはマシンビジョンに比べて不得意であるが、この間違い探しの例のように、「ほどほどに感度を落として、違いを検出する」ことは得意である。言い換えれば、ヒューマンビジョンは極端な抽象化と推論機能を持ち²²⁾、二つのイラストの一般化・共通化を達成していると考えられる。こういった機能、つまり、差分・減算処理ではない比較機能のマシンビジョンへの実装は、学術的にも産業応用的にも重要であると考えられる。

2. 本研究のアプローチ

2.1 KIZKI 処理²³⁾

印刷物のコンテンツには様々なテクスチャが想定される。従って、例えば「木目調の背景」や「森の写真」等のテクスチャ上に発生した微小不良の検出アルゴリズムは、背景コンテンツ毎に最適化するのが理想的である。しかし、検査対象は多様であるため、それは困難である。そこで、汎用的な不良部検出を目標として提案された「傷の気付き」処理²³⁾(以降、KIZKI 処理と呼ぶ)に着目した。KIZKI 処理によれば、様々なテクスチャ上に存在する不明瞭な不良部を検出し得る。

KIZKI 処理は、「周辺視」と「固視微動」の視覚生理学的知見を考察し、それらに学びながら実装された様々な検査画像処理の中で、その有効性が実験的に確認されたアルゴリズムである。したがって、開発においてはヒトの視覚生理機構に学んでいる訳ではない。ただし、検査画像処理の開発において目視検査員=ヒトのやり様に学ぶのは方法論の一つであり、本研究のアプローチも同様である。

図 3 に KIZKI 処理の概要を示す。KIZKI 処理は格子による様々なレベルと位相での低解像度化処理と、しきい値処理によ

るポップアウト(相対的異常領域の抽出)から成る。まず、格子による低解像度化処理を実行する。次に、生成された低解像度画像をしきい値処理により 2 値化する。格子の位相を設定された格子の縦・横サイズ分まで順次シフトさせ、同様の処理を繰り返す。また、格子サイズを順次拡大し、同様の処理を繰り返す。それぞれの格子状態で得られた 2 値画像を元の画像サイズにおいて画素毎に加重投票する。気付きマップは、最終的な投票値を正規化してヒートマップ化したもので、相対的に異常度が高いほど赤く表示されている。

図 4 に KIZKI 処理による検出例を示す。左から原画像、気付きマップ、検出結果である。図中の赤丸は不良(微小な点状の汚れ)位置を示したものであり、検出結果は気付きマップをしきい値処理し、検出されたプロブ輪郭を赤色で原画像に重畳表示した。虚報もあるが、それぞれのテクスチャ上の点状汚れを検出できている。

2.2 KIZKI 処理への比較機能の実装

図 4 の検出例において虚報が存在するのは、KIZKI 処理のアルゴリズムにおいては当然である。KIZKI 処理は入力画像中で相対的な異常領域を検出するため、コンテンツに含まれる特徴的な領域、例えば、「ワンポイントのマーク」や「空を飛ぶ一羽の鳥」等も検出する。図 4 で言えば、「木漏れ日のカゲ」や「木目の特異な箇所」等も検出されている。こういったコンテンツの特徴部は、当然参照画像にも存在するため、比較することによって除去し得る。

ただし前述の通り、被検査画像には読み取り誤差が含まれるため、その特徴部の位置や形状は異なり、かつ幾何学的な補正は困難である。一方 KIZKI 処理は、格子による様々なレベルと位相での低解像度化により、様々な異常を濃度異常に置き換えて検出する。つまり、読み取り誤差による幾何学的な違いは比

Fig.5 Comparison KIZKI Processing

較される二つの画像間において抑制される。このことは、深層学習におけるプーリング処理の効果とも共通する。CNN: Convolutional Neural Network を用いて画像識別器を構成する場合、プーリング層は認識対象の位置ズレを一般化し、パラメータ数を大幅に削減する²²⁾。

2.3 比較検査において活用される視知覚の機能:仮説

1.2 で記述したヒューマンビジョンの機能と本研究における実装の関係について考える。図1で示した間違い探しの例では、本研究の課題である読み取り誤差以上に、二つのイラスト間においてそれぞれを構成する線は異なる。しかし、それより先に余分に付与された違いが認識される。ヒトの脳は視覚的な入力を完全に抽象化すると考えられる。つまり、視覚的な入力を高レベルの視覚概念に変換する一方で、無関係な視覚の詳細情報を取り除いていると考えられる²²⁾²⁴⁾²⁵⁾。比較検査においては、この視覚概念の抽象度を連続的な視覚入力において変更し、僅かな違いを察知していると考えられる。一方 KIZKI 処理においては、サイズと位相が連続的に変化する格子による低解像度化処理により、可変的に画像の詳細情報を削除している。つまり、高周波数の情報成分は徐々に削減されていき、比較する画像間において画素値とその空間配置の差は減少していく。このことを画像の抽象化と表現するならば、ヒトの脳の様に入力画像を完全に抽象化している訳ではないが、低解像度化のレベル・位相毎に投票処理を実行する点において、KIZKI 処理は可変的な画像の抽象化によって異常部を検出していると言える。

また、認知心理学においては知覚の恒常性²⁶⁾²⁷⁾が知られている。これは、対象が同じであっても、見る方向や距離、照明等が異なれば、当然、網膜像(画像データ)はそれに合わせて変化するが、脳内においては比較的一定のものとして知覚される機能である。この機能が比較検査に実際に寄与しているかは分からないが、考察には値すると考えられる。提案する見比べ KIZKI 処理においては 2.2 で述べた通り、読み取り誤差による幾何的

な違いは、比較される二つの画像間において抑制される。このことより、恒常性に似た機能を一部有していると考えられる。

繰り返しになるが、提案手法がヒトの視覚生理機構や脳の抽象化の機能を同様の仕組みで実現している訳でない。一方、目視検査のやり様を考察し、それをマシンビジョンの実装に活用する試みは意義深いと考えられる。

3. 提案手法

3.1 見比べ KIZKI 処理

図5に提案する見比べ KIZKI 処理の概要を示す。見比べ KIZKI 処理では、見本となる参照画像と、被検査画像の両方に対して KIZKI 処理が実行される。ただし、参照画像からの投票の重みはマイナスとし、被検査画像における対応画素の投票を抑制する。また、参照画像におけるポップアウト格子位置において被検査画像にポップアウトがなく、かつその近傍格子位置においてポップアウトがある場合、その投票を抑制する。

しきい値処理によるポップアウト、投票処理について図6を用いて説明する。

①画素値参照 まず、KIZKI 処理における低解像度化が実行される。画像 f は、ある格子状態(格子サイズ・位相)における低解像度化後の画像を表す。注目画素の画素値と、注目画素に対して垂直、水平方向の4近傍画素の画素値を参照する。

②コントラスト評価 参照した注目画素の画素値と、水平方向の左右画素値との差を算出し、しきい値 th より大きい場合はフラグ flg_h を立てる。垂直方向のフラグ flg_v も同様である。 flg_v と flg_h の組み合わせにより、注目画素のポップアウトフラグ flg の状態を図中の表の通りに決定する。なお、図では注目画素の輝度値が局所的に低い場合を表すが、その逆も考えられる。つまり、引き算の方向を逆にすることによって、局所的に明るい不良部も検出できる。

③参照画像と被検査画像の比較評価 前述の通り、KIZKI 処

Fig.6 Voting algorithms

Fig.7 Print inspection flow

理は参照画像と被検査画像の両方に適用され、注目画素に対して①②の処理によって、それぞれの画像で対応する注目画素に対して flg の状態が決定される。ここで、参照画像における flg を flg_m 、被検査画像における flg を flg_s と定義する。注目画素における flg_m と flg_s の組み合わせから図中の表の様に、比較後のポップアウトフラグ flg_c の状態を決定する。被検査画像でポップアウトしている場合でも、参照画像でポップアウトしている場合はフラグを下す処理となっている。①②③の処理を全ての画素について完了しておく。

④投票処理 注目画素への投票値を $vote$ とする。 $vote$ は③による各フラグの状態によって変動する。

④-1 popOut 投票 $flg_c > 0$ の場合、注目画素は被検査画像において相対的異常と判断し、プラス値 $vote_+$ で投票する。 flg_c は参照画像におけるポップアウトを反映しているため、 $flg_c = 1$ の場合の投票値 α より $flg_c = 2$ の場合の投票値 β を大きくする。この段階で注目画素の投票値 $vote$ は $vote_+$ となる。最後に注目画素の flg_m を 0 とし、フラグを下す。以上の処理を全ての画素について完

了し、④-2に進む。

④-2 隣接画素フラグに基づく抑制 任意の画素において、④-1の後ににおいても $flg_m > 0$ の場合は、参照画像のポップアウト状態が被検査画像の対応画素における抑制に寄与していないことを表す。これは、現状の格子サイズ・位相においては、抑制すべき参照画像と被検査画像の差異を同一の格子ブロックで捉えきれていないためである。そこで再度、各画素の flg_c と flg_m の状態を参照し、 $flg_c > 0$ でかつ隣接画素において $flg_m > 0$ の場合、注目画素の投票値を抑制する。つまり、マイナス値 $vote_-$ の投票値を決定する。 flg_m は参照画像におけるポップアウト、つまり良品特徴を表すが、その顕著さに応じて、 $flg_m = 1$ の場合の抑制投票値 λ より $flg_m = 2$ の場合の抑制投票値 μ を小さくする(絶対値を大きくする)。ただし、幾何学的なズレの方向は未知であり、本処理での flg_m は現在の注目画素のみに対応する訳ではない。従って、 $vote_-$ の絶対値は $vote_+$ より小さく設定する。

④-3 投票 注目画素の投票値 $vote$ を算出する。この投票値を注目画素に対応する元の解像度の画像の画素群(格子ブロック内

Fig.8 Behavior of Comparison KIZKI Processing

の全画素)に投票する。

以上の処理を格子状態毎に実行する。④-3 の投票値をストアするバッファは同一であり、格子サイズと位相の変化と共に投票状態も変化する。格子サイズと位相を設定した範囲で変化させ、得られた投票値画像を正規化することにより、被検査画像において相対的な異常領域が顕在化するが、KIZKI 処理とは異なり、参照画像に基づき良品特徴の顕在化は抑制される。

ここで、2 枚の画像を比較してその違いに気付くことは、参照画像と被検査画像において相互関係にある。つまり、促進側をポジティブな投票、抑制側をネガティブな投票と考えれば、被検査画像においてあるべき信号が無い場合、その領域のネガティブな投票値が高くなる。最終的に投票の促進と抑制を相互に行った結果を重ねることにより、異常領域がネガ・ポジ何れかの信号として顕在化する。つまり、被検査画像には「有り」参照画像に「無い」箇所と、被検査画像には「無く」参照画像には「有る」箇所が検出される。

3.2 印刷物検査処理

図 7 に見比べ KIZKI 処理を基本に実装した印刷物検査処理の流れを示す。マスター画像(参照画像)とスキャン画像(被検査画像)を入力し、スケーリング後、ブロック分割する。前述の通り、スキャン画像は部分的に異なる幾何変形を有するため、定石として、分割ブロック毎で平行移動に関しては最低限の位置合わせを実行する。その後見比べ KIZKI 処理によって不良部を検出し、ブロックを統合して全体の検査結果とする。また、検出されたプロブ毎で、コントラストやサイズ等の特徴量を計測し、それに基づいて不良であるか OK レベルの異常部あるいはノイズであるかを判定する。

4. 基礎実験と考察

4.1 見比べ KIZKI 処理の振る舞い

図 8 に提案する見比べ KIZKI 処理の処理例を示す。(a)が参照画像であり、背景に○によるテクスチャを有し、前景には矩形と十字が配置されている。つまり、この状態を「正」として、(b)の被検査画像中の異常を検出する。(c)は(a)と(b)を重ね合わせた画像であるが、背景テクスチャを構成する○の位置は一致していない。また、前景の矩形位置にも若干のズレがあることが分かる。つまり、印刷物検査の従来手法の多くが採用する差分法

では、この問題を解くことは困難である。

ここで、(b)の異常箇所の目視による検出を試みる。多くの場合、背景テクスチャの○のズレや個数の違い、前景の矩形の位置ズレについては気に留まらず、二か所の短い線分が付加されていることと、(a)にはある十字が(b)にはないことが、先ず顕在化する。

図 8(d)~(f)は、見比べ KIZKI 処理の処理例である。(d)は、(a)には「有り」(b)には「無い」箇所を顕在化した気付きマップである。一方、(e)は、(a)には「無く」(b)には「有る」箇所を顕在化した気付きマップである。(f)は(d)と(e)を組み合わせた気付きマップであり、被検査画像(b)における異常箇所を示している。この例では、異常がない場合を緑色とし、「有る異常」を赤、「無い異常」を青で表現している。

1.2 及び 2.3 においてヒトの視覚機能と比較検査の関係について考察したが、少なくとも図 2 や図 8 の例では、提案・実装した見比べ KIZKI 処理は期待通りの振る舞いをしていて、図 8(f)の検出結果について、見比べ KIZKI 処理におけるどの部分のアルゴリズムが寄与しているかについて説明する。まず、KIZKI 処理は前述の通り、背景パターンを抑制し入力画像中の相対的な異常箇所を顕在化する機能を有する。従って、見比べ KIZKI 処理内における KIZKI 処理フローによって、(a)と(b)の両方において背景の○は多くの場合抑制される。一方、前景の矩形は KIZKI 処理単体では顕在化するが、見比べ KIZKI 処理では抑制投票によって抑制され、図 8(e)に示す通り、(b)中の二か所の線分のみが顕在化する。同様に(b)を参照画像、(a)を被検査画像と考えれば、図 8(d)に示す通り、(a)中の十字のみが顕在化する。今、実際は(b)が被検査画像であるため、以上の結果を組み合わせれば(b)に対する検査結果として(f)の気付きマップを得ることができる。

また、図 2 のイラストの例では、二つのイラストは同じキャラクターを描いたものであったが、フリーハンドであるため線はずれていた。この線のズレは、見比べ KIZKI 処理内における低解像度化により抽象化(高周波数成分の除去)され、そのことによって二枚の画像間で相殺される。

4.2 見比べ KIZKI 処理の検出感度

本研究課題の比較検査において、参照画像と被検査画像間における良品パターンの幾何学的及び濃度のズレの許容しきい値

Fig.9 Detection sensitivity experiment

Table 1 Parameter

Item	value
Min. block size	3 pixel
Max. block size	5 pixel
popOut threshold: th	3.0 gradation
Positive voting value: α	+1.000 votes
Positive voting value: β	+2.000 votes
Negative voting value: λ	-0.375 votes
Negative voting value: μ	-0.750 votes

と不良部検出のしきい値は、一般的にはトレードオフの関係にある。つまり、不良部検出感度を高くすると読み取り誤差による虚報が頻出する一方、低くすると不良部の見逃しが発生する。そもそも、読み取り誤差と欠陥は何れも参照画像から見れば画像的差異であるため、単純な差分処理では同様に検出され得る。提案する見比べ KIZKI 処理も、従来の差分処理及びその拡張方法^{10)13)~16)}とは異なるが、参照画像との比較検査ではある。そこで、ごく簡単なテストパターンを用いた実験により、微小な点状不良と読み取り誤差について検出感度の関係を確認した。

図 9 に実験に用いた画像の例を示す。図 9(a)は参照画像で、白(輝度値 255)を背景に、良品パターンとして黒(輝度値 0)で 5×5 画素の点が五つ配置されている。参照画像を平行移動して、模擬的に読み取り誤差が付加された被検査画像を作成し、見比べ KIZKI 処理の検出しきい値とズレ量との関係を調べた。なお、ここでは右斜め下方向に平行移動した実験を示す。

図 9(b)は使用した被検査画像の例である。この例では、(a)の参照画像全体を右に 5 画素、下に 5 画素平行移動した後、3 種類の模擬不良を付与している。図中の青矢印は 5×5 画素の点で輝度値を 245~205 で 10 階調ずつ変化させた。つまり、背景輝度値と比較してコントラストが 10, 20, 30, 40, 50 階調のグレーの点状不良であり、コントラストと検出感度の関係を観察できる。図中の赤矢印は、輝度値は 0 として、サイズを 1×1, 3×3, 5×5, 7×7 と変化させた黒点であり、微小不良のサイズと検出感度の関係を観察できる。最後に緑矢印は点状不良と良品パターンの距離と検出感度の関係を観察するために準備した。この例では、読み取り誤差として平行移動を付与した 5×5 画素の良品パターンについて、そこから右斜め上方向に、輝度値 0 で 3×3 画素の黒点を模擬不良として付与している。3×3 画素の模擬点状不良の左下隅画素と 5×5 画素の良品パターン点の右上隅画素が 8 近傍で接する状態からはじめ、右斜め上方向に 1, 2, 3, 4 画素と離している。

Table 2 Summary of sensitivity experiments

(a) Inhibition degree of scan error									
Displacement [pixel]	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Detection limit [votes]	23	41	45	52	63	76	87	93	97
(b) Reinforcement degree of defect contrast									
Contrast [gradation]	10	20	30	40	50				
Detection limit [votes]	63	91	99	99	99				
(c) Reinforcement degree of defect size									
Side length [pixel]	1	3	5	7					
Detection limit [votes]	99	99	99	87					
(d) Reinforcement degree of defect near a good pattern									
Closeness [pixel]	0	1	2	3	4				
Detection limit [votes]	69	84	96	99	99

Fig.10 Graphs of detection sensitivity

図 9(c)は検出結果の例で、検出領域を赤色の輪郭線で示している。この例では、サイズが 5×5 でコントラストが 10 階調の模擬点状不良以外の不良部は検出し、かつ五つの良品パターン点は検出していない。

表 1 に本実験に使用した見比べ KIZKI 処理のパラメータを示す。表 2 に実験結果をまとめる。表中の Detection limit の値は、見比べ KIZKI 処理の投票値をしきい値とした場合、それぞれの条件の点(良品パターン点、点状不良)の検出限界値を表す。例えば、表 2(a)は読み取り誤差として与えた右斜め下方向への平行移動に対して、位置がずれてしまった良品パターン点を「検出してしまう」限界値を示す。この場合は良品パターン点なので検出が抑制される、つまり検出限界値は低いほうがよい。

表 2(a)より、読み取り誤差が大きくなるほど検出限界値が大きくなる。つまり、大きな読み取り誤差は異常と見なすことになる。表 2(b)は模擬点状不良のコントラストと検出限界値との関係を表し、コントラストが高いほど異常度が高くなること

Fig.11 Basic test of scanning error (Mountain)

分かるが、重要なことは読み取り誤差との関係である。表(a)と(b)から、少なくとも本実験においては、良品パターン点が右斜め下方向へ5画素ずれた読み取り誤差とコントラストが10階調の点状不良の異常度が等しいことになる。表2(c)は模擬点状不良のサイズと検出限界値との関係を表す。表(a)と(c)から、1×1画素の微小不良は、良品パターン点が9画素ずれた読み取り誤差より異常度が高い。また表(b)と(c)から、1×1画素と微小ではあるがコントラストは255階調と濃い点状不良は、5×5画素でコントラストが30階調の点状不良と異常度が等しい。表2(d)は模擬点状不良と良品パターン点の距離と検出限界値との関係を表す。やはり表(a)と(d)から、良品パターンと接している点状不良は、読み取り誤差が5画素ズレの場合の良品パターンより異常度が高く、かつ点状不良が孤立して存在する場合よりは異常度が低くなることが分かる。

あらためて図9(a)と(b)を比較すると、やはり多くの場合は、ヒト=ヒューマンビジョンが良品パターンのズレを検知することは困難であると考えられる。一組の参照画像と被検査画像からのみでは、なにが読み取り誤差かという情報がなく、そもそも読み取り誤差も欠陥も参照画像との差異であるため、それらを見分けることは本質的に困難である。一方、このことを逆説的に捉えれば、ヒューマンビジョンはパターンのズレの検知は容易に抑制し、不良部のみを検知すると言える。

図10は、表2から作成した、読み取り誤差と点状不良の検出感度の関係を表したグラフである。横軸は読み取り誤差として与えたズレ量、縦軸は見比べKIZKI処理の投票値である。表2(a)より、良品パターンであっても読み取り誤差が大きくなると、その異常度は高くなる。三本の横線グラフは、模擬点状不良のコントラスト、サイズ、良品パターン点との距離のそれぞれについて、本実験の条件での最小の検出限界値を表す。グラフより、読み取り誤差と不良を分離する検出感度が分かる。検査装

置の運用においては、こういったデータに基づき、読み取り部のハードウェアの位置決め精度と、検出対象とする点状不良のサイズと濃度に応じて検出感度を設定することになる。研究背景で述べたが、印刷物検査におけるコンテンツは無限に存在し、かつ読み取り誤差は印刷機・印刷環境によって異なり、かつ不良の状態も様々である。従って本節の実験及び図10は、あくまで検出感度設定の目安であり、パラメータの自動設定は今後の課題である。ただし、少なくとも次章の印刷物検査では表1のパラメータを基準とした。

5. 印刷物検査実験と考察

5.1 幾何変形を加えたテスト画像による実験

図11～図13に実験結果の例を示す。それぞれ、(a)が参照画像、(b)が被検査画像、(c)が(a)と(b)を画素毎に1:1でブレンドした重量画像であり、参照画像と被検査画像の差異が分かる。

本実験では提案手法の有効性を示すため、単純な差分処理と、1.1で述べた通り、印刷物検査の差分処理において多く採用されている、絵柄やテクスチャのエッジ部と非エッジ部で検出感度を変更する手法¹⁰⁾¹³⁾¹⁶⁾についても合わせて実験した。本実験の実装は参考文献と同一ではないが、虚報抑制の考え方は踏襲している。実装が異なる分、不利にならないように画像毎にパラメータをチューニングした。

(d)が単純な差分画像(差分値を正規化してヒートマップ表示したもの)であり、それをしきい値処理した検出例が(g)である。また、(e)は(a)の参照画像に対してCannyオペレータを使用して輪郭線を検出し、その幅を制御して生成した、差分後のしきい値処理において検出感度を下げるマスク画像である。(d)の差分画像に(e)による感度調整を適用して検出した結果が(h)である。最後に、(f)が提案する見比べKIZKI処理による気付きマップ(投票画像)で、それをしきい値処理した検出例が(i)である。な

Fig.12 Basic test of scanning error (Night scene)

Fig.13 Basic test of scanning error (Map)

Map data©2021 Google

お, (g)~(i)の検出結果では, 検出プロブの輪郭を赤で表示した。

実験ではまず参照画像を準備し, 画像処理にて幾何変換を加えた後, 5×5 画素の黒点を付して模擬的に被検査画像とした。図 11 では縦・横 2 画素の平行移動と横方向に 2 度のスキュー歪を加えた。図 12 では画像中心回りに 1 度の回転と縦方向に 2 度

のスキュー歪を加えた。図 13 では上部を起点に縦方向・全体に 1.01 倍拡大した。それぞれ(c)の重畳画像をより, 幾何変換による画像のズレが分かる。汚れ不良として付した黒点は, 図 11 と図 12 は 0 値, 図 13 は地図中の文字色とした。

表 3 に実験に使用した見比べ KIZKI 処理のパラメータを示す。

Table 3 Parameter

Item	value
Min. block size	3 pixel
Max. block size	7 pixel
popOut threshold: th	3.0 gradation
Positive voting value: α	+1.000 votes
Positive voting value: β	+2.000 votes
Negative voting value: λ	-0.375 votes
Negative voting value: μ	-0.750 votes
Detection threshold for voting values	100 votes

Fig.14 Test chart (A3, 2341×3321 pixel)

Map data ©2021 Google

つまり図 11～図 13 では、参照画像におけるコンテンツの種類や幾何変換は異なるが、パラメータは共通である。また、本実験では参照画像には「無く」スキャン画像には「有る」箇所を顕在化するポジティブ投票のみを駆動している。一方、差分処理の結果については、全ての黒点が検出できるしきい値に、それぞれの図で調整した。加えて、差分値の絶対値でなく、濃度が高く(輝度が低く)なる場合のみを検出している。また、輪郭線マスクによる従来手法に類する工夫を施した差分処理では、Canny オペレータ、輪郭線の近傍範囲等のパラメータについても全ての黒点が検出できている上で、できるだけ虚報が発生しないように、やはり図毎に調整した。

本実験ではカラー画像を入力としているが、見比べ KIZKI 処理と差分処理の何れにおいても、処理の冒頭で画像をグレースケール化している。

(i)より、見比べ KIZKI 処理では全ての黒点を検出し、かつ幾何変換によるズレの検出は抑制されている。ただし、図 12(i)、

Table 4 Summary of test chart experiments

(a) Difference method with edge sensitivity setting

Detection difficulty	Detection	Missed	Detection rate %	Over detection
1	26	2	92.9	5
2	19	9	67.9	2
3	1	27	3.6	3
challenging				

(b) Our method (Comparison KIZKI Processing)

Detection difficulty	Detection	Missed	Detection rate %	Over detection
1	27	1	96.4	3
2	25	3	89.3	2
3	13	15	46.4	3
challenging				

図 13(i)では僅かに過検出(虚報)が見られる。一方、差分処理では幾何変換によるズレの影響から、多量の過検出が見られる。また、輪郭線に基づく感度調整を行った差分処理では、単純な差分処理よりは虚報の検出が軽減されているが、特にズレが大きい箇所やテキストによる輪郭が込み入っている箇所においては多くの虚報が残る結果となった。そもそも、読み取り誤差と欠陥は何れも参照画像から見れば画像的差異であるため、差分を基本とする処理ではどちらも同様に検出され得る。一方、提案する見比べ KIZKI 処理では図 8 の実験で述べた通り、まずは 1 枚の画像中から相対的な異常部を検出する機能を有するため、虚報の原因となるテキスト模様の検出は抑制される。加えて、参照画像と被検査画像のそれぞれでまずはポップアウト処理(検出処理)を実行し、その状態を比較することによって異常部を検出していることも虚報検出の抑制に寄与している。

5.2 テストチャートによる印刷物検査実験

A3 版のテストチャートを実際の商用印刷機で印刷し、試作した読み取り装置でスキャンした画像を被検査画像として実験を行った。参照画像はテストチャートの印刷マスターのデジタル画像である。本実験では図 7 に示した見比べ KIZKI 処理を基本とする印刷物検査処理を適用した。

被検査画像には局所的に変化する読み取り誤差が存在する。また、前述の実験とは異なり、印刷時及び読み取り時において色分布についても誤差が発生している。画像サイズは 2341×3321 画素とした。

図 14 にテストチャートのスキャン画像例を示す。直径が 2～5 画素程度(実寸で 0.2～0.6mm 程度)の黒汚れを、印刷面全面に点在するかたちで 28 個付与した。また、黒汚れの濃さを変化させて、検出難度を変えたスキャン画像を 3 種類準備した。図中の赤丸の中央に点状汚れを付与している。

テストチャートは、「人物・草原・池・建造物等の写真」、「ロゴ・キャラクター・地図等のイラスト」、「仮名漢字・アルファベット等の文字」、「ランダムドット・木目等のテキスト」等のコンテンツが含まれるカラー印刷物である。ただし、本実験では参照画像、被検査画像とも、処理の冒頭でグレースケール化している。また、参照画像には「無く」被検査画像には「有る」箇所を顕在化するポジティブ投票のみを駆動した。なお、見比べ KIZKI 処理のパラメータは、4.2 の検出感度の基礎実験で使用した表 1 と同様である。また、提案手法の有効性を示すため、5.1 の実験で使用した輪郭線に基づいて感度調整を行う差分処理でも実験した。具体的には、図 7 に示した印刷物

Fig.15 Detection result 1

Fig.16 Detection result 2

検査処理中の「Comparison KIZKI Processing」の処理ブロックのみ、この差分処理に置き換えた。差分処理部の各種パラメータは、見比べ KIZKI 処理を使った場合と虚報数が同程度になるレベルにチューニングした。

実験結果を表 4 にまとめる。(a)が差分に基づく手法、(b)が提案手法の結果である。検出難度は付与した点状汚れの印刷面における視認性によって設定した。これは背景コンテンツ・色にも大きく依存するが、視認性が悪いものほど検出難度が高いとしている。被検査画像中における点状汚れの局所コントラストは、Detection difficulty=1 では 40~50 階調程度、3 で 15~30 階調程度であった。Detection difficulty=1, 2 が本研究での検出目標レベルである。Detection difficulty が 1 の場合は、差分処理と提案手法は同程度の性能を示した。一方、それよりも検出難度が高い点状汚れについては、提案手法の性能が大きく上回

っていることが分かる。なお、提案手法における見逃しは、特に読み取り誤差が大きい箇所が発生した。また虚報については、提案手法での虚報は意図的に付与した以外の薄い汚れや、線が少し滲んでいる箇所であったが、差分処理では読み取り誤差に起因する活字部分のエッジのズレによるものであった。

提案手法の処理時間は、2341×3321 画素のテストチャート 1 画像当たり 5 秒程度であった(Intel(R)Core(TM)i7-8750H CPU @2.20GHz)。これは処理パツファのメモリ確保・廃棄や、データの描画や出力等も含まれた時間である。

図 15, 図 16 に検出例を示す。それぞれ、参照画像と被検査画像の難度の異なる点状不良の付近をテストチャートから 128×128 画素のサイズで切り出した。図中で小さな赤矩形がある場合は検出成功、ない場合は未検出であったことを示す。図は全て同じ座標のトリミング画像であるが、4 枚の画像が異なることが分かる。つまり、図 7 に示した見比べ KIZKI 処理をコアとする印刷物検査処理においては、検出成功の場合は、この程度の読み取り誤差による差異の検出は抑制し、かつ微小な点状不良の検出が可能であったことを示す。

6. 結 言

6.1 まとめ

本研究では、商用印刷機に搭載される印刷物検査装置の画像処理手法について提案した。研究開発課題は、比較検査において参照画像と被検査画像の読み取り誤差の影響を受けずに不良部のみを検出することである。この解決方法として「見比べ KIZKI 処理」と呼ぶ新たな比較検査アルゴリズムを提案し、基礎的な実験によってその振る舞いを確認した。また、これを基本として印刷物検査画像処理を実装し、基礎的な実験から有効性を示した。

6.2 今後の課題

印刷不良部は、その背景コンテンツによって視認性が大きく変化する。図 7 に示した印刷物検査処理では、このことを利用したブロブ判定を後処理として組み込んでいるが、この感度設定を見比べ KIZKI におけるしきい値処理に統合することを考えている。また今回の実験では、カラー画像を処理の冒頭でグレースケール化している。現状、グレースケール化には、画像処理で一般的に用いられるヒトの視覚特性に基づく RGB チャンネルの加重平均手法を用いている。印刷物表面の不良の視認性はその色味と背景の色味の関係も大きく影響する³⁾¹⁰⁾¹²⁾。従って、色味情報の活用²⁸⁾についても議論が必要である。

引き続き実用化を目指して、スキャン画像の幾何変形の程度、様々な視認性レベルについて N 増し実験を行い、処理の適用範囲をより明確化する。さらに、本研究で取り扱った点状不良以外にも、比較的大きな汚れや幅広で薄い汚れの検出も課題である。これについては、図 7 に示した印刷物検査処理にある入力画像のスケーリングによって対応する実験を実施している。また、ハードウェアとも連携し、処理の高速化を図る。一方、学術的な観点からは、本研究では画像の低解像度化処理による表現に留まったが、比較における画像の抽象化や知覚の恒常性に関する知見の外観検査への応用について研究を継続する。

参 考 文 献

- 1) 増田俊朗, 三上憲明, 島田仁章: 印刷品質検査装置, 日本印刷学会論文集, 24, 2 (1987) 81.
- 2) 中里正弘, 杉山正孝, 飯田彦彦: 印刷物検査装置, 日本印刷学会誌, 34, 1 (1997) 7.

- 3) 谷水克行：カラー印刷物外観検査，精密工学会誌，**61**, 5(1995) 620.
- 4) 特集 さらなる高速化・高精度化のニーズに応える印刷面検査とマシンビジョンシステム，画像ラボ，**29**, 4(2018) 55.
- 5) 前田俊二：半導体パターン欠陥認識技術の動向，精密工学会中国四国支部(広島地区)講習会「画像処理技術の工学応用」，(2008).
- 6) 渋谷久恵：半導体・FPD 向け外観検査技術，2013 年度精密工学会春季大会学術講演会論文集，(2013)39.
- 7) 原靖彦：検査の概要及び配線パターン上の検査技術，回路実装学会誌，**10**, 6(1995) 424.
- 8) 大西浩之，佐々泰志，永井健太，辰巳昭治：精密な位置合せ不要の濃淡画像比較によるパターン欠陥検査手法，電子情報通信学会論文誌 D-II, **J86-D-II**, 11(2003) 1531.
- 9) 川嶋聡：学習画像との比較検査による画像検査技術，アズビル株式会社技術報告書，**22**, 2(2004) 2.
- 10) 高原亮介：品質検査装置における画像処理技術，日本印刷学会誌，**51**, 2(2014) 7.
- 11) 小松翔梧，畠山直樹，登倉義博：ラベル印字自動検査技術の開発，富士通テン技報，**32**, 1(2015) 39.
- 12) W.Wang, et al.: Color printed image defect detection based on the image feature match, Bio Technology: An Indian Journal, **10**, 20 (2014) 12620.
- 13) 谷水克行，目黒眞一，石井明：インデックス空間を用いた印刷欠陥高速検査法，電子情報通信学会論文誌 D-II, **J75-D-II**, 11(1992) 1818.
- 14) 倉富修，中川和代：過検出を低減する高解像度印刷画像検査法，情報処理学会第 55 回(平成 9 年後期)全国大会，(1997) 2-273.
- 15) 辻谷潤一，武士侯進，宇野慶太：検査にかかえる負担の軽減，過検出を抑えた印刷品質検査装置，画像ラボ，**29**, 4(2018) 67.
- 16) W.Yangping, et al.: Real-time Defect Detection Method for Printed Images Based on Grayscale and Gradient Differences, Journal of Engineering Science and Technology Review, **11**, 1 (2018) 180.
- 17) E.Zhang, et al.: Automatic Defect Detection for Web Offset Printing Base on Machine Vision, Applied sciences, **9**, 17 (2019) 3598.
- 18) M.Vans, et al.: Automatic visual inspection and defect detection on Variable Data Prints, Journal of Electronic Imaging, **20**, 1 (2011) 1.
- 19) 鎌田祥平，堀井俊嗣，山本治美：テンプレート比較型ニューラルネットワークを用いた汎用印字検査の検討，ViEW2018 ビジョン技術の実利用ワークショップ，(2018) 297.
- 20) 鎌田祥平，中塚俊介，山本治美：外観検査に適した新たな深層ニューラルネットワークの提案，Panasonic Technical Journal, **66**, 2(2020) 31.
- 21) 公益社団法人 精密工学会 画像応用技術専門委員会 30 周年記念事業，<http://view.itlab.org/2016/index.html>，2021.05.09 アクセス.
- 22) F.Chollet: Python と Keras によるディープラーニング，マイナビ出版(2018).
- 23) 青木公也，舟橋琢磨，興水大和，三和田靖彦：周辺視と固視微動に学ぶ「傷の気付き」アルゴリズム，精密工学会誌，**79**, 11(2013) 1045.
- 24) 塩入諭：視覚処理のインテリジェンス，日本印刷学会誌，**42**, 1(2005) 2.
- 25) 精密工学会画像応用技術専門委員会感察工学研究会，ちゅうごく産業創造センター：周辺視目視検査法の理解と導入のためのヒント-周辺視目視検査法の導入を検討していただくために-，(2017).
- 26) 下条信輔：視覚の冒険 イリュージョンから認知科学へ，産業図書(1995).
- 27) 横澤一彦：視覚科学，勁草書房(2010).
- 28) 田口亮：視覚システムとその特性に基づく画像処理，Journal of Signal Processing, **19**, 1(2015) 3.