

画像処理による微小傷の自動検出技術に関する研究

阿野裕司*

A study on the Automatic Detection Technique of Micro-scratches by Image Processing Yuji Ano

1. 緒言

人件費削減や製造時間短縮のため、多くの製造現場において画像処理を用いた検査工程の自動化は行われている^{1,2)}。さらに、製品の品質化のためにこれまで自動化が困難であった微小な傷に対する検査が要求されるようになってきている³⁾。そのため、検査工程の自動化のためにはより高性能な自動検査システムが必要となるが、導入コストが高いという問題が生じている。

一方、カメラの低コスト化、汎用 PC の高性能化、調光および均一照射が可能な LED 照明の普及などにより、市販の自動検査システムを用いなくても、汎用機器を用いて自動検査システムを構築することが可能となってきている。しかしながら、システム構成のためには画像処理に関する知識だけでなく、カメラ、レンズおよび照明の光学特性など幅広い分野の知識が必要となる。そのため、現在でも様々な検査工程において目視検査が行われているのが現状である⁴⁾。

本研究では、金属箔の加工を行っている県内企業の傷検査工程を一例として、汎用機器を用いた自動検査システムの構築および有効性の検証を行った。具体的には市販の汎用カメラ、レンズ、PC および照明を用いて傷検査工程の自動化システムを構築し、実際の製造工程において構築したシステムの有効性を確認したので、その結果を報告する。

2. 実験方法

2・1 検査対象

検査対象となる金属箔は主に電子機器部品や輸送機器部品に利用されており、スプールに巻かれた状態で製造される。製造工程の概略図を図 1 に示す。金属箔は別のスプールに 30m/min の速度で巻き取られ、その際スリッターで両端を切断することで幅が調整される。最終的には長さ 20~4000m、幅 10~530mm のサイズで製造されている。このとき、目視による傷検査も合わせて行われており、検査員 1~2 人で金属箔の表裏を同時に検査している。なお、裏面は鏡を用いて検査される。

対象となる微小傷は大きさ 0.3×0.3mm 程度以上の傷であり、「押し込み状ロール傷」、「押し傷 A」および「押し傷 B」の 3 種類に分類される。また、傷ではないが「汚れ」も検査対象となっているため、以降は「汚れ」も微小傷に含めるものとする。光学顕微鏡で撮影した微小傷の画像を図 2 に示す。「押し込み状ロール傷」はロールに異物が付着し、

その異物が巻き込まれることによって付く傷であり、ロール 1 回転毎に傷が付くため一定の周期を持って連続する傷である。「押し傷 A」と「押し傷 B」は金属箔に異物が付着した際に付く傷である。異物を巻き込んだ直後は「押し傷 A」のように凹凸状の傷が付くが、異物を巻き込んでからある程度金属箔が巻かれた後には、「押し傷 B」のような巻き込んだ異物にこすれたような傷となる。「押し傷 A」は図 2(b) に示す通り画像上からの確認が困難な傷であるが、赤点線で囲まれた部分に傷が存在している。なお、図 2(b) の「押し傷 A」と図 2(c) の「押し傷 B」の大きさが異なるのは、原因となった異物が異なるためである。「汚れ」は金属箔を洗浄する洗浄液を除去しきれていない場合に付くものであり、茶系の色であることが多い。本研究では、上記 4 種類の微小傷検出が可能な自動検査システムの構築を目標とする。

2・2 検査機器

選定したカメラ、レンズ、照明および PC の仕様を表 1 に示す。カメラはより安価なシステムを構築するために、

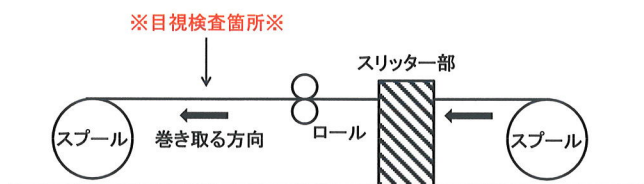
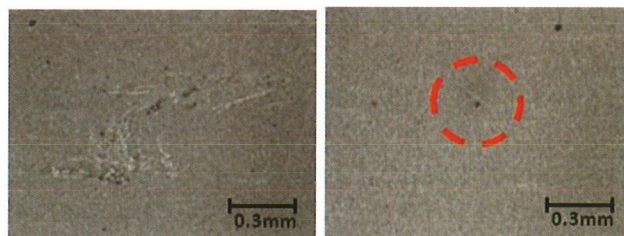
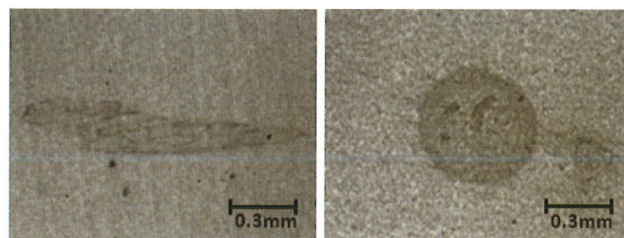


図 1 製造工程の概略図



(a) 押し込み状ロール傷

(b) 押し傷 A



(c) 押し傷 B

(d) 汚れ

図 2 微小傷の種類

*企業支援部電子応用グループ

表 1 検査機器

	機器名	メーカー名	型番	主な仕様
カメラ	CMOSカメラ	XIMEA	MQ042MG-CM	解像度400万画素 (2048×2048pixel) センササイズ 1 inch フレームレート90fps
レンズ	4/3型用レンズ	興和光学(株)	LM16XC2	焦点距離16mm
照明	蛍光灯	(株)アイゼット社	RLX-PZ54202	発光面500×60mm
	LED照明	(株)アイテックシステム	LMD10C500x60-22WD-4	
PC	デスクトップ	DELL(株)	OPTIPLEX7010	Intel Core i7-3770 3.40GHz 16GB SSD: TS512GSSD320 (Transcend社製)

ラインスキャンカメラではなくエリアスキャンカメラを用いることとした。カメラインターフェースは、CameraLink, GigE および USB が主流であり、最も高速データ転送が可能なのは CameraLink(最大 640MB/s)だが、画像入力ボードが別途必要となるため高価となる。GigE(最大 100MB/s) と USB3.0 (最大 400MB/s) は共に安価であるため、より高速データ転送が可能な USB3.0 をカメラインターフェースとして使用した。カメラの画素数については、金属箔の最大幅が 530mm で大きさ 0.3×0.3mm 以上の微小傷を検査対象にしているため、1pixel 当たりの撮影範囲が 0.15×0.15mm 以下となるように考えると、最低でも 1250 万画素以上必要となる。USB3.0 の産業用カメラで 1250 万画素を超える製品は非常に少なく、またシャッター方式がローリングシャッター方式の製品しかないため移動対象物の撮影には適さない。そこで、カメラを金属箔の幅方向に 2 台並べて利用することとした。この場合、カメラ 1 台の撮影幅は 265mm で済むため 311 万画素以上のカメラで対応できる。以上の条件を満たすカメラとして、XIMEA 社の MQ042MG-CM を採用した。

レンズについては、次式より焦点距離 F の算出を行い選定した

$$F = \frac{WD \times L}{V} \dots\dots\dots (1)$$

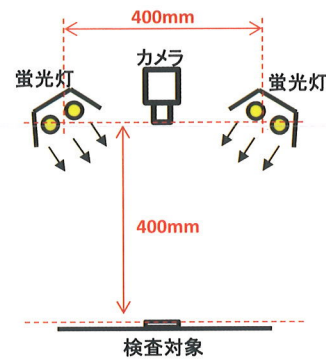
ここで、WD(Working Distance)はカメラと撮影対象の距離、カメラの CCD サイズを L、視野角を V とした。製造工程でのスペースを考慮して WD を 400mm と仮定すると、視野角 V は 265mm 以上、CCD サイズ L は 11.2mm であるので、焦点距離 F は 16.9mm 以下とする必要がある。そこでレンズは、焦点距離 16mm の興和光学(株)社の LM16XC2 を採用した。上述のカメラとレンズを用いた場合、WD が 400mm で視野角 V が 280mm となり、1pixel 当たりの撮影範囲は 0.137×0.137mm となる。

照明は、蛍光灯 (RLX-PZ54202, (株)アイゼット社) と調光可能な LED 照明 (LMD10C500x60-22WD-4, (株)アイテックシステム社) を使用し、画像の取り込みや画像処理には汎用デスクトップ PC を用いた。なお、本研究は微小傷検出が可能かどうかの検証が目的であるので、カメラとレンズは共に 1 台で検討を行った。

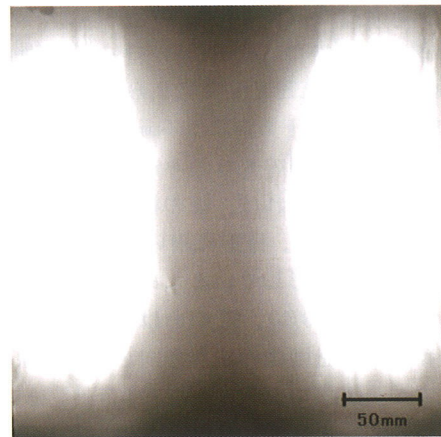
2・3 撮影環境

撮影環境としては、直接光より画像を得る暗視野照明下と散乱光より画像を得る暗視野照明下の 2 種類を検討した。暗視野照明下の撮影環境と金属箔を撮影した画像の一例を

図 3 に示す。また、明視野照明下の撮影環境と金属箔を撮影した画像の一例を図 4 に示す。

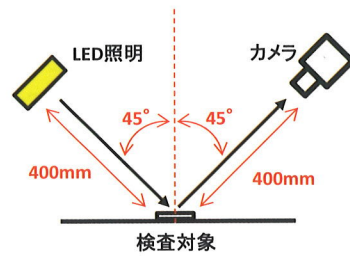


(a) 撮影環境

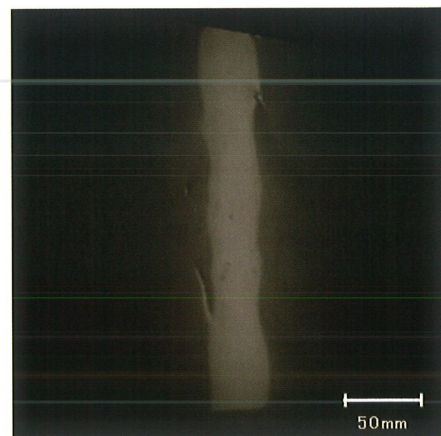


(b) 撮影画像

図 3 暗視野照明下



(a) 撮影環境



(b) 撮影画像

図 4 明視野照明下

最初に、暗視野照明下では2台の蛍光灯を用いてWD、照明の高さおよび照明間距離は400mmとして撮影を行った。図3(b)の画像の中心部の真上にカメラ、白い部分(照明の映り込み部)の真上に蛍光灯があり、撮影対象へ向くように蛍光灯を傾けている。傷の検出可能範囲と考えられるのは、照明の映り込み部に挟まれた左右方向に50mm程度、上下方向に200mm程度の部分で、照明間距離を長くすることでさらに範囲を広げられる可能性もある。

次に、明視野照明下ではWD、LWD(Light Work Distance、照明と撮影対象の距離)はともに400mmとし、カメラと照明はそれぞれ検査対象面から45°の角度を成すように設置し、撮影を行った。明視野照明下の場合、金属箔上で反射する直接光により画像を得るため、照明の映り込み部を利用する。そのため、蛍光灯のように光量が多く調光できない照明では撮影を行うことが困難であった。そこで、調光可能なLED照明を用いた。図4(b)の白い部分(照明の映り込み部)が傷検出可能範囲として考えられる範囲であり、左右方向に35mm程度、上下方向に250mm程度である。この傷の検出可能範囲は、照明の映り込み範囲に依存するため照明の映り込み範囲を広げれば、傷の検出可能範囲も広げられると考えられる。なお、撮影に用いた金属箔は図3(b)と同じだが、斜めから撮影しているため金属箔が台形状に映っている。さらに、図3(b)、図4(b)は共に製造工程における金属箔の移動方向を画像の左右方向とした。よって、画像の上下方向が金属箔の幅方向となる。

上述の2種類の撮影環境をそれぞれ構築し、図2に示した微小傷4種類を静止状態で撮影することでどちらの撮影環境が適しているかを検証し、その結果をもとに実際の製造工程で移動状態の微小傷の撮影を行うこととした。

2・4 傷検出手法

撮影した画像から傷検出を行う手法として、エッジ抽出処理の1つであるCanny法⁵⁾を採用した。Canny法の処理の流れについて図5に示す。なお開発環境としてはVisual C++を用い、画像処理ライブラリにはOpenCVを用いた。

Canny法は、最初に画像上のノイズの影響を抑えるためにガウシアンフィルタによる平滑化を行う。ガウシアンフィルタは、式(1)に示すガウス関数 f より算出される。

$$f = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{(x^2+y^2)}{2\sigma^2}} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 x は画像の水平方向の位置、 y は垂直方向の位置、 σ^2 は分散とした。

次に、Sobelフィルタを用いてエッジ強度と方向を算出する。Sobelフィルタにより求められる x 方向のエッジ強度を E_x 、 y 方向のエッジ強度を E_y とすれば、エッジ強度 E は、

$$E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2} \quad \dots\dots\dots (3)$$

で表わされエッジの方向 θ は、

$$\theta = \tan^{-1} \frac{E_y}{E_x} \quad \dots\dots\dots (4)$$

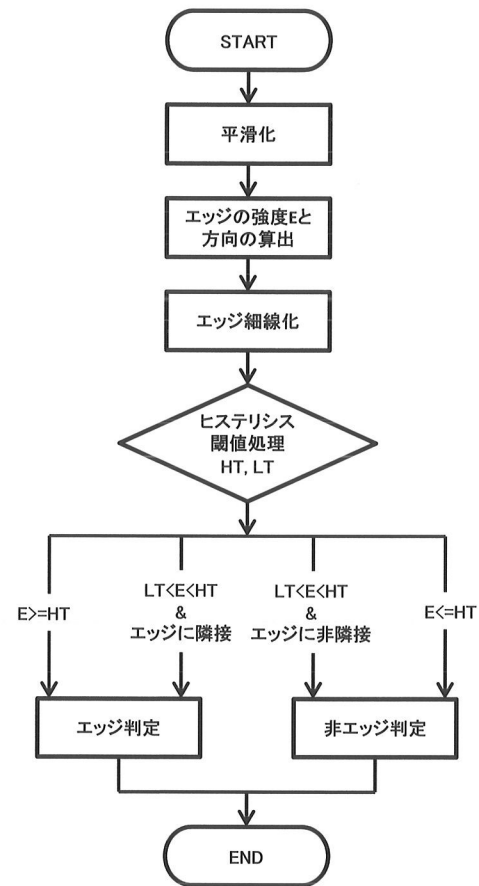


図5 Canny法の処理の流れ

で求めることができる。

続いて、検出したエッジの細線化処理を行う。具体的には、エッジの方向に対して垂直方向の隣接画素2つのエッジ強度と比較を行い、最大でなければ0で置き換える非最大値抑制を行うことで細線化する。

最後に、ヒステリシス閾値処理により最終的なエッジ判定を行う。2つの閾値を設定し大きい閾値をHT、小さい閾値をLTとしたとき、エッジ強度がHTより大きければエッジ、LTより小さければ非エッジとする処理に加え、LT以上HT以下の場合、エッジに隣接していればエッジとする処理を行う。

3. 実験結果

3・1 暗視野照明下

最初に、暗視野照明下において図2に示す4種類の微小傷を静止状態で撮影した。微小傷の部分を拡大した撮影画像とCanny法による処理画像を表2に示す。表2に示す通り、4種類のうち「汚れ」しか検出できなかった。さらに傷の検出可能範囲について、図3(b)に示した画像の中央部分の左右方向に50mm程度、上下方向に200mm程度を考えていたが、実際には左右方向に10mm、上下方向に100mm程度しか検出できないことがわかった。これは、撮影位置がずれることで微小傷に対する照明光の照射角度が変わることが原因と考えられる。また、実際の検査環境の照明設置スペースが狭いため照明間距離を長くして傷の検出可能範囲

表2 撮影画像と処理画像（暗視野照明下）

	撮影画像	処理画像
押し込み状 ロール傷		
押し傷A		
押し傷B		
汚れ		

表3 撮影画像と処理画像（明視野照明下）

	撮影画像	処理画像
押し込み状 ロール傷		
押し傷A		
押し傷B		
汚れ		

を広げることも困難であった。さらに、照明を傾ける角度についても検討したが検出できる傷の種類を増やすことや検出可能範囲を広げることはできなかった。以上のことから傷検査工程の自動化システムのための撮影環境として、暗視野照明下は適していないことが確認できた。

3・2 明視野照明下

次に、明視野照明下での撮影を行った。微小傷の部分を拡大した撮影画像とCanny法による処理画像を表3に示す。明視野照明下では、「押し込み状ロール傷」、「押し傷A」および「汚れ」の3種類の微小傷が検出可能であった。さらに傷の検出可能範囲は、図4(b)に示した画像の照明の映り込み部である左右方向に35mm程度、上下方向に250mm程度の範囲全体となった。前項の結果と合わせて、傷検査工程の自動化システムのための撮影環境としては明視野照明下の方が適していることが確認できた。ここで、表3の撮影画像の背景色が大きく異なるのは金属箔の種類によるものであり、照明やカメラの設定値は統一して撮影を行っている。

なお、暗視野照明下、明視野照明下共に「押し傷B」は検出できなかった。「押し傷B」は、金属箔が異物を巻き込んでからある程度金属箔が巻かれた後にこすれたような傷として付くため、傷の深さが浅く光を反射しにくい。そのため、どちらの照明下においても検出できなかったと考えられる。

3・3 実際の製造工程での検証

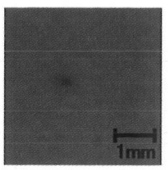
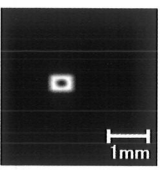
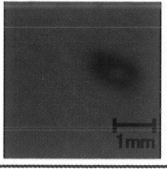
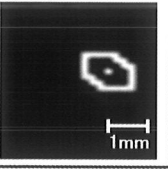
前項の結果から、実際の製造工程において明視野照明下で移動状態の微小傷の撮影を行った。撮影画像の一例を図

6に示す。画像の左下と右下に存在する三角形状の黒い部分は金属箔でなく、背景の部分である。なお、LWDを130mmに変更することで照明の映り込み範囲、すなわち検出可能範囲を広げ、金属箔の移動方向(画像の上下方向)に50mm、金属箔の幅方向(画像の左右方向)に280mmとした。なお、傷検査は本来金属箔の表裏どちらに対しても行う必要があるが、今回は撮影環境の構築が容易である裏面の撮影を行った。さらに、図2に示した4種類すべての微小傷が付いている金属箔を用意することが困難であったため、「押し傷A」、「汚れ」の2種類の微小傷が付いている金属箔の撮影を行った。微小傷の部分を拡大した撮影画像とCanny法による処理画像を表4に示す。結果として、微小傷が移動する実際の製造工程において「押し傷A」、「汚れ」のどちらも検出可能であり、目視検査と同等の検査が可能であることを確認できた。ただし、撮影画像上からは傷として検出されたが実際の製品には傷が見られない例がいくつか存在した。原因として、金属箔に付着していても問題のないホコリやゴミ等を検出したためと考えられる。検査工程の自動化のためには、微小傷とホコリやゴミ等との切り分けを行う必要となる。



図6 撮影画像

表 4 撮影画像と処理画像 (実際の傷検査環境)

	撮影画像	処理画像
押し傷A		
汚れ		

4. 結 言

本研究では、金属箔の加工を行っている県内企業の傷検査工程を一例として、汎用機器を用いた自動検査システムの構築および有効性の検証を行った。

最初に、汎用機器を用いて暗視野照明下と明視野照明下の撮影環境を構築し、それぞれの撮影環境で4種類の微小傷が静止状態で検出可能かどうか評価した。その結果、明視野照明下において3種類の微小傷が検出可能であることを確認した。次に、実際の製造工程において、「押し傷A」、「汚れ」の2種類の微小傷を撮影することで、移動状態で

も「押し傷」、「汚れ」の2種類の微小傷検出が可能であり、に付着していても問題のないホコリやゴミ等と微小傷との目視検査と同等の検査が可能であることを確認した。今後の課題として、明視野照明下でも検出できていない「押し傷B」を検出するための撮影環境の検討や、金属箔切り分け手法の検討が挙げられる。

本研究の遂行に当たり、微小傷のサンプル提供や実際の製造工程における撮影実験でご協力頂いた光メタルセンター(株) 阿部光範代表取締役社長、伊藤尚美工場長に深く感謝致します。

参考文献

- 1) 青木公也：目視検査の自動化技術 画像処理の産業応用について，検査技術，**10**(12)，pp.1-8 (2005)．
- 2) 見浪 護，朱 佳寧，三浦正人，前 泰志：ヘアラインを利用した金属表面上の微細な傷の発見と定量的評価，日本機械学会論文集C編，**72**(719)，pp.236-243 (2006)．
- 3) 辻野和広：画像計測技術を用いた中古自動車車体部品の自動検査に関する研究，博士論文(福岡工業大学)，pp.2-6 (2014)．
- 4) 中谷信幸：知的搬送技術による各種自動外観検査装置の研究，博士論文(高知工科大学)，pp.3-6 (2013)．
- 5) 昌達慶仁：詳細 画像処理プログラミング，ソフトバンククリエイティブ，(2008)．