外観検査のための画像処理技術の基礎と光沢計測への応用事例

阿 部 淑 人^a

^a 新潟県工業技術総合研究所 (〒 950-0915 新潟県新潟市中央区鑑西 1 丁目 11-1)

Basics of Image Processing Technology for Visual Inspection and Its Application to Evaluation of Specular Reflection

Yoshito ABE^a

^aIndustrial Research Institute of Niigata Prefecture (11-1, Abumi-nishi 1, Chuo-ku, Niigata-shi, Niigata 950-0915)

Keywords : Visual Inspection, Image Processing, Specular Evaluation

1. はじめに

製造業においても人工知能やロボットの導入あるいはIoTの適用などに注目が集まっている。1980年代から1990年代頃にかけての自動化・合理化の流れのさらに先を行くとされる2000年代からの第4次産業革命の流れは、ロボットに雇用を奪われるという危惧の一方で、労働人口の減少が避けられない日本社会にとって製造現場の担い手として役立つとも期待されている。

仕事のプロセスに「Plan-Do-See」のステージ(サイクル)があるように、製品や役務の提供には「設計(企画)－製造(実施)－検査」のステージがある。外観検査^{1)~3)}は、ヒトや自動検査装置の視覚機能・画像認識機能を利用して製品の品質あるいは構造的や機能的な品質が外観に現れる現象を解析して良否判定を行う、品質管理の手段である。その特徴の中でも、遠隔から非接触・非破壊で検査ができるゆえに全数検査が可能であることと、外観をデジタル画像として取得できれば様々な画像解析・画像処理のテクニックが適用可能であることは特筆に値する。

本稿では、外観検査のための画像処理技術の基礎として照明・撮像から画像認識までの概要を示す。また、光沢計測への応用事例として、金属研磨品の光沢分布測定システムについて概要を紹介する。

2. 外観検査システムにおける画像処理技術の基礎

外観検査システムは図1に示したように大まかに言って、照明や撮像を行う入力部と、前処理や判断を行う処理部、そして表示や制御を行う出力部の3部分に分けることができる。

画像入力部は、光源装置から照射した可視光(もしくは不可視光)が被検査対象の被写体表面に当たり反射や透過などしたものを撮像素子に結像することで、被検査体の外観を画像として取得する手段である。画像処理部は、撮像して得られたデジタル画像を加工したり解析して良品か不良品かの判別や計測・分類などを行う手段である。情報出力部は、前段

図1 外観検査システムの構成

の判断結果に応じてディスプレイに異常表示をしたり排出機構や印字機構などに制御情報を出力する手段である。このように検査システムを含む自動制御システムの動作サイクルは、「入力－処理－出力」(つまり「See-Think-Act」)の繰り返しとなる。

2.1 画像入力部の概要

画像入力部は、照明系⁴⁾と撮像系の二つに大きく分けることができる。自動検査か目視検査かに関わらず照明装置の構成は重要な意味を持つ。また周辺機器として搬送装置が画像入力では重要である。良い検査性能を出すためにはまず良い画像を取得することが肝心である。

照明を選択する際に考慮するポイントは、照度(全光束)、光源種別、光源スペクトル、光源形状、照射方法、偏光状態など様々な要素がある。

ノイズの少ない明るい画像を取得するために被写体の照度を十分に高くする必要がある。経時的な劣化にも注意を払う必要がある。

光源種別も多岐にわたるが近年はLEDやレーザーが多く利用されるようになってきた。白色LEDでは光源スペクトルが太陽光や蛍光灯などと大きく異なり演色性の面で難点があるので注意を要する。ヒトの視感度にあわせて色柄などを検査する場合には平均演色評価数(Ra: JIS Z8726:1990)が80程度以上で色温度が6500 Kの白色光源を利用すべきである。色柄でなく表面性状を計測したいような場合には単一波長の

図2 光源の形状

LED やレーザーが多用される。とくに鏡面の微細なキズ等を検出したいような場合には短波長の LED 光源が適している。

光源形状としては点状、線状、面状、ドーム状、カマボコ状など様々な形態があり検査対象製品の形態や計測したい特徴量によって適切に選択する必要がある。図2には光源形状を例示する。

一般に検査対象の特徴量が色柄などの場合には拡散した光を一樣にムラなく照射する事が必要であり、一方光沢や表面の凹凸などの場合には特定方向からの配光で照射する事が必要である。図3には、反射と透過における光源と被検査体、撮像装置の幾何学的配置の典型を例示する。

また偏光現象を利用することで鏡面反射を抑制したり強調したりということができる。

撮像素子は、その走査形態によって面状センサか線状センサか点状センサかそれ以外かに分かれる。面状センサでは一度の撮像で2次元ないし3次元の物体から画像を取得できるが、線状センサや点状センサでは移動走査という連続動作をしないと画像を取得できない。面状センサでは動画の撮影も可能である反面、照明状態の一樣性や解像度などの点では線状センサに劣る。

撮像にあたってカラー画像が必要な場合があるが、CMOS イメージセンサなど通常の撮像素子は原理的に1画素につき1輝度しかデータ取得できないため分光プリズムやカラーフィルタなどを付与した機構が必要である。近年は可視光(RGB)以外に近紫外光(UV)や近赤外光(NIR)の利用も増えている。

撮像の形態は幾何光学的に、レンズ縮小遠隔型と近接型に分類される。前者は通常のカメラなどの様に遠隔撮像に使われ、後者はファクシミリ装置などの様に接触の等倍率撮像に使われる。さらにレンズ縮小型は対物距離によって撮像倍率が変化する非テレセントリック光学系と、対物距離によらず撮像倍率が一定のテレセントリック光学系がある。

以上説明したような照明装置と撮像装置ならびにそれらの中間に設けられた光学装置の組み合わせで画像入力システムが構成される。

2.2 画像処理部の概要⁵⁾

画像入力部で取得した画像をもとに、良品と不良品を弁別したり計測や分類をおこなうのが画像処理部である。ここで画像情報から良否判別に関する知識情報への変換が行われる。

図3 照明の幾何学配置

撮像素子で取得した画像情報をそのまま特徴抽出や判別に利用できる場合もあるが多くの場合には、階調変換や光源依存性の除去、表色系変換、幾何補正、雑音除去、輪郭検出、2値化などの前処理が施される。

階調変換は取り込んだ画像の階調値が検査対象の現象に対して線形となるように補正する処理である。

表色系変換は撮像装置から得られたRGB値をヒトの知覚を表現するのに適したCIELABやCIELUVなどの均等色空間系などに変換する処理である。

幾何補正とは取り込んだ画像の形状のゆがみを取り除く処理である。光学系の幾何ひずみや射影ひずみあるいは物体の曲面形状などを補正することで、検査対象の形状のゆがみが原因となる判別の誤りを低減することが目的である。補正にあたっては画素の補間や間引きが必要になる。高度で正確な補間方法としてLanczos補間やスプライン補間などが用いられる。

雑音除去とは、撮像の際に感度不足や素子の熱雑音などによって確率的に発生する雑音(Noise:音以外でも雑音という用語を用いる)を取り去って本来の信号であろうという画像を推定する処理である。この処理によって欠陥検出の誤動作を低減するのが目的である。雑音除去技術には一般的に雑音低減と同時に原画像の先鋭度も低下させるという副次作用があるため、手法により雑音除去力能力と先鋭度維持能力のトレードオフが異なる。単純な平滑化方法よりも演算量は増大するが、モルフォロジフィルタやバイラテラルフィルタ、総

変動フィルタなどは高性能な雑音除去フィルタとして知られている。

輪郭検出とは、物体や絵柄の辺境などを見つけ出して曲線状の情報を抽出する処理である。それによって形状の変化や欠陥の発生などを検出するために施される。輪郭検出にはまず Sobel フィルタに代表される高域通過フィルタの適用がなされる。図 4 に低域通過(平滑化)フィルタと高域通過フィルタの適用例を示す。輪郭検出の代表的手法として Canny Edge Detector という手法がよく知られている。

2 値化は、多値の濃淡画像や多色画像を何らかの尺度で弁別し白黒(Black and white) 2 値の画像に変換する処理である。雑音や照明のムラ、撮像素子の感度のムラなど 2 値化の障害となるような現象が多くあり対策が必須である。

前処理の結果、検査対象製品の表面の色柄や光沢などの情報を有する画像が得られる。その後は模様や外形、寸法、記号情報、表面性状、光沢、透過率、曇価などを表現するのに適した特徴量を抽出し、所定の許容範囲に収まれば良品そうでなければ不良品というような判断を行う。特徴量の抽出と判別のプロセスにはそれぞれ様々な画像認識手法が適用可能であるが、近年は深層学習(Deep Learning)によって特徴抽出と判別を一括して高精度に複雑な検出を行うことも可能になりつつある。これまで画像認識の場でよく用いられてきた特徴量としては変形や拡大縮小に対して頑健な HOG や SIFT, SURF, ORB などがあり個人認証や物体検出などに広く適用されている。Haar 特徴と Ada-Boost 機械学習を組み合わせた Viola-Jones 法が顔認識でよく用いられる。

特徴量が決定したら次には良否判別を行ったり、どのような現象であるか認識したりという処理に移る。そのような判別機には赤池情報規範(AIC)、ベイズ情報規範(BIC)、カルバック・ライブラー情報規範(KLIC)、最小記述長原理(MDL)、決定木(DT)、K 平均(K-means)、ニューラルネット(NN)、サポートベクターマシン(SVM)など多様な手法があり課題に適した特徴量と判別機を選択が重要である。

従来から外観検査では、寸法測定などのキャリパー機能、二値化画像の塊を計測するプロブ(BLOB)機能、登録パターンの探索を行うサーチ機能(テンプレートマッチング)、バーコードや文字の認識を行う OCR 機能など⁶⁾が多用されてきたが、計算資源の高速化大容量化にともないより複雑な画像認識技術や 3 次元構造認識技術が適用可能になってきた。機械学習技術の進展によりこれまで曖昧で自動判別がしにくかった外観検査対象であっても撮像をクリアできれば自動化可能になる可能性が広がってきている。

3. 金属研磨品の光沢計測システムの開発

熟練を要する金属製品の研磨作業の技能伝承を支援するために、作業計測や光沢度計測を行うシステムを開発した事例を紹介する。従来より光沢度計測には、「JIS Z8741:1997 鏡面光沢度-測定方法」に準じた光沢度計と呼ばれる反射率計を用いてきたが、光沢の空間分布を一度に取得することが出来なかった。光線空間カメラ(Light Field Camera)というデバイスを用いることで撮像によって一回ないし数回の撮像で光沢度の分布を取得し一様性の評価を行うことができるシステムを開発した。

3. 1 提案システムの概要

提案システムは既存の光沢測定規格との互換性(測定値の一致や線形性など)を考慮した上で、非接触測定機能を実現することとイメージング機能つまり空間分布特性取得機能を付与することを目指して開発した。非接触測定機能と空間分布特性取得機能との延長線上には平面以外の造形物の光沢測定機能がある。

ここで対象としている光沢測定対象は金属研磨品であり高い鏡面反射率を有するため反射光の入射・出射角度はできるだけ狭角とした。投受光部が法線から狭角にセットアップしてあるほうが測定面と結像面の傾斜が少なく縦横のアスペクト変動が無いためまずは同軸光学系による 0° 入射, 0° 出射を基本形とすることにした。

図 4 画像フィルタの適用例

左上より元画像、低域通過画像、高域通過画像

左下より高域強調画像、V-Sobel フィルタ、H-Sobel フィルタ

図5の鏡面光沢度測定光学系は、コリメータレンズによる平行光束が所定の面積内に照射され反射したのちにコンデンサレンズにより1点に集束し受光素子で検出する様にできている。そのため面分布の取得はできない。面分布を取得できるようにするためには少なくとも受光部を単一の集束光学系から結像光学系へ変更することが必要である。そこで、平行光束を結像するレンズとしてテレセントリックレンズを装着した光線空間カメラを用意した。単純なカメラであっても理想的な平行光源と、理想的な平坦物体などの条件が揃えば一様な光沢分布特性が取得できる可能性もあるが、実際にはそれらが保証されないため物体の反射表面の各位置での反射強度や反射方向の乱れ(光軸の乱れ)が発生して満足に測定できないものと推定される。従って光線空間カメラにより結像光線の再散光を取得することで非平行光をも巧く補足することを期待した。

カメラには撮像素子として $2,560 \times 1,920 = 4,915,200$ 画素のCMOSイメージセンサが搭載され、その受光面に約6,000個のマイクロレンズ(フライアイレンズ)がハニカム状に配置されたレンズアレイを搭載している。このマイクロレンズ(以下セルと言う)毎に各微小部分の光線方向と光線強度が約530画素(半径13画素の円状)に分離して取得される。

図6には結像光路の模式図を示す。a点の鏡像が中央の主レンズを介してb点に結像する様子を示している。通常のカメラではb点を含む結像面に撮像素子を搭載するが、ここにマイクロレンズアレイが搭載されているため後方に再度光線を配光し $c_1 \sim c_n$ の多画素として撮像する。その光線群を演算することで光線方向や光線輝度を算出する。約6,000個それぞれに対しての光沢分布を得るのに1分未満を想定した。

また光源としては、結像光学系を有し本来は画像の投影機として用いるDLPプロジェクタ、テレセントリックレンズに内蔵した同軸落射のファイバー導光照明、ハーフミラーを用いた同軸落射平行光照明を用いて比較検討した。実験の結果光源としては同軸落射平行光源が一様性の点で優れていたため採用することとした。

光沢測定の基準として用いるミラー光沢基準板は研磨ガラスにアルミをスパッタリングし表面にコーティングを施したものであり、 20° グロス値が1856である。この光沢度は反射率にすると92.8%である。

図5 鏡面光沢度測定系

測定手順としては、まず照明系、受光系をセッティングし、校正基準となるミラー光沢基準板を撮像して基準値として保存する。次に測定対象を撮像して先ほどの基準値で除算して照明ムラや感度ムラなどの影響を除外する。基準値が92.8%であるため除算後に92.8%を乗算すると求める反射率が得られる。但し、先にも述べたようにこの測定単位は画素そのものではなく、約6,000個のセル単位である。なお、光沢度のダイナミックレンジが広く1回の撮像では白飛びや黒つぶれが起こる場合があるため、それに備えて拡張ダイナミックレンジ画像取得手法を開発し適用することにした⁷⁾。露出時間を3通り変更して撮像した画像を自動的に階調補正して融合することができる。

各セル単位には様々な光線方向の輝度が約530画素に渡って分布しているためここから平均値、標準偏差、最大値、最小値を算出することとした。

3.2 実験結果

取得した光線空間画像の単純濃淡情報から先ほど述べたようにセル単位の計算を行った結果を図7と図8にそれぞれ示す。熟練者はセル単位の平均の全体平均が56.02%でセル間の標準偏差が1.0966%、未熟者はセル単位の平均の全体平均が57.96%でセル間の標準偏差が1.5271%であった。

図の右部分にカラーバーを示し各セル位置の色が鏡面反射率を表している。またカラーバーの左部には頻度分布を示している。熟練者のほうが狭く尖った分布であり一様な研磨結果となっていることが分かる。セルは全体で4270個であった。基準板の撮像から画像処理して反射率グラフを生成するには3分以下であった。

3.3 考察とまとめ

提案した光沢度測定システムにより、小面積かつ平坦板に限られるものの1回の撮像で3分以内に4000サンプル以上の反射率分布を測定できるようになった。現時点では1回の撮像面積が30mm×30mm程度であるため大面積に適用するには移動機構が必要である。また光沢度計と異なり非接触測定であるため将来的には大面積や造形物への適用にも可能性がでてきた。

4. おわりに

外観検査装置に関連する技術要素と光沢計測装置の開発事

図6 結像光路

図7 熟練者の研磨結果

図8 未熟者の研磨結果

例の紹介を行った。外観検査装置は、まず照明～撮像に力を割くべきシステムの一例であるが、深層学習など新たな画像認識技術の登場がより高度で正確な良否判別や不良発生原因究明に寄与するようになりつつある。今後は外観検査装置が、第4次産業革命時代において製造プロセス全体の視覚機能の一つとして統合されていくことを期待している。

(Received January 17, 2018)

文 献

- 1) 尾上守夫(監修); 検査の自動化・システム化ハンドブック(フジテクノシステム, 1990).
- 2) 天神林孝二他; 平成18年度先端的外観検査技術に関する調査研究報告書(日本機械工業連合会・日本オプトメカトロニクス協会,

2007).

- 3) 安部英一, 坂井一文, 野中一洋, 田中清隆, 内野正和, 重森清史, 久保 敦, 尾前 宏, 上 剛; 高精度・高スループット2D-3Dインスペクション技術マニュアル(平成20年度九州産業技術イノベーション創出共同体形成事業, 2009).
- 4) 増村茂樹; マシンビジョンライティング基礎編・応用編・実践編(日本インダストリアルイメージング協会, 2008・2010・2013).
- 5) 阿部淑人; <入門>外観検査実施手順書(情報機構, 2012).
- 6) 丸地三郎; 初歩と実用シリーズ・マシンビジョン入門(日本工業出版, 2009).
- 7) 阿部淑人; “露出ブラケット画像融合による拡張ダイナミックレンジ画像の生成”, 電子情報通信学会 第26回信号処理シンポジウム, A11-3 (2011).