Vol.2020-GN-109 No.17
Vol.2020-CDS-27 No.17
Vol.2020-DCC-24 No.17
2020/1/24

画像処理による鍛造部品の外観不良検査手法における誤判定の抑制に関する検討

西山龍貴[1]　山﨑達也[1]

概要：鍛造とは金属を叩いて成形する加工法であり，鍛造部品の品質管理のため欠陥の有無の検査は，欠かすことのできない重要な工程の一つである．目視によって行われている欠陥検出は作業者にとって大きな負担であるため，画像処理による作業の省力化が進められている．本研究では，自動車に用いられるコネクティングロッドの曲面部分を対象に，打痕や傷などの欠陥を検出する手法を提案する．提案手法では，光学カメラによる撮像画像から曲面部分を自動検出し，その領域内の欠陥の検出を行う．実際に工場で生産されるコネクティングロッドを検体として検証実験を行った結果，最終的な良否判定としての不良部品の見逃しがなく，良品の誤判定を抑制することも実現した．

キーワード：鍛造部品，欠陥検出，良否判定，画像処理

Study on Decision Error Suppression in Defect Detection for Forging Parts by Image Processing

RYUKI NISHIYAMA[†1]　TATSUYA YAMAZAKI[†1]

Abstract: Forging is the process of forming and shaping metals by making use of hammering or pressing. Defect detection is one of the necessary and important processes to keep quality of forging parts high. Since all of forging parts have to be checked by human worker eyes, it imposes a lot of loads to the workers. Therefore, defect detection by image processing is expected to mitigate the worker loads. In this study, a defect detection method is proposed for connecting rods which are used in automobile engines. Especially, curved surface areas in the connecting rod are targeted as inspection. In the proposed method, the curved surface areas are automatically extracted from the images captured by optical cameras. Then defects are detected in the extracted curved surface areas. The proposed method is evaluated by experiments in which real connecting rods are used. As the results, we have succeeded in good or bad judgment and in suppressing decision errors in good specimens.

Keywords: Forging parts, Defect detection, Good or bad judgment, Image processing

1. はじめに

鍛造は，金属にたたくなどして力を加えて成形するとともに金属組織を強くする加工法で，自動車部品の製造等に用いられている技術である．鍛造は様々な観点から類別することができるが，その一つに材料の加工温度による分類があり，温度によって熱間鍛造，冷間鍛造，温間鍛造などの種類がある．本稿では最も材料を高温に加熱する熱間鍛造を対象とする．熱間鍛造の工程では，熱処理のため製品の表面に酸化スケールと呼ばれる被膜が生じるため，細かな鉄球を高速でぶつけることにより，酸化スケールを除去するが，その際に製品表面にショットブラスト痕と呼ばれる，直径 0.1mm ほどのクレータ状の細かい凹凸ができるのが特徴である．

鍛造部品は機械や乗り物などの部品として使われることが多いため，製造現場での目視による全数検査がほぼ必須となっている．目視検査にはいくつかの課題が存在し，特に長時間作業による検出力低下，検査員間のばらつきや人材不足など，人に関わる課題が占める割合が大きい[1]．そのため，画像による計測及び処理を用いて人間の行う目視検査を代替し，鍛造，鋳造，プレス加工などで成型される部材検査における誤判定を抑制することが求められている[2][3]．外観検査で検出すべき鍛造部品の欠陥の種類には，打痕，肌荒れ，欠肉，加肉，傷などがあるが，本稿では部品表面の三次元形状の変化が周囲とは異なることにより発見可能な打痕と傷を対象とする．

部品表面の三次元形状の計測方法としては，主にレーザ測定と CCD カメラによる画像計測が用いられている．前者は高精度な分解能を得ることができるが，一般に装置が高額となる．そのため安価な光学カメラにより測定した画像に，種々の処理技術を施すことにより欠陥を検出することが提案されてきている．我々は，鍛造部品の欠陥検出にレーザ測定による手法と画像処理による手法を適用し，比較検討した結果，両者の性能がほぼ同等であることを示した[4]．また，人間が目視で周囲とは異なる領域に気付くメカニズムを研究した結果，青木ら[5]は視覚生理機構の知見を参考にした傷の検出処理を提案している．さらに武藤ら[6]は，検査員が部品を照明に対していろいろな角度にかざ

1 新潟大学
Niigata University

ⓒ 2020 Information Processing Society of Japan

Vol.2020-GN-109 No.17
Vol.2020-CDS-27 No.17
Vol.2020-DCC-24 No.17
2020/1/24

して見る動作に着目し，複数の角度からの撮像画像を重ね合わせて用いることで，周囲と異なる部分を検出する手法を提案している．

本研究では，鍛造部品の中でも自動車に使用されているコネクティングロッド（以下，コンロッド）を研究対象とする．コンロッドは，エンジンのピストン運動によって生み出されたパワーを中継するための部品で，傷などによる破断などに対する品質管理が厳しく，かつ生産量が多いため，人に代わる外観検査処理が強く求められている対象の一つである．図 1 にコンロッドの外観のイラストを示す．

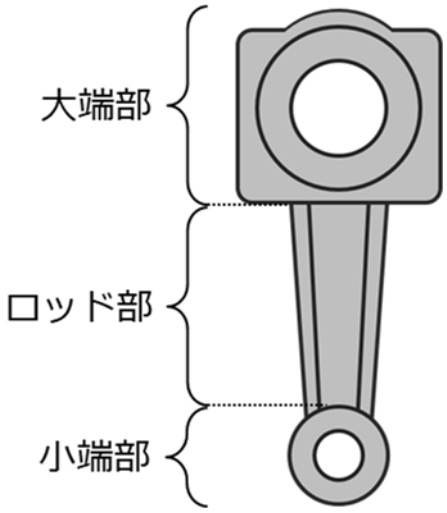

図 1　コンロッドの外観イラスト
Figure 1　Overview of a Connecting Rod.

図 1 に示すように，コンロッドは大端部，ロッド部，小端部に分けられ，特に大端部とロッド部，及びロッド部と小端部の間には段差がある上に曲面的な形状となっている．前者を大端ロッド接合部，後者を小端ロッド接合部と本稿では呼ぶこととし，区別の必要がない場合は接合部という名称のみを用いる．接合部は成形用の金型に異物が付着しやすく，鍛造時に不良が多発するが，その形状が曲面的になっていることから，画像処理による外観検査において最も困難な課題の一つとなっている．本研究では，安価な光学カメラで画像を取得し，画像処理による欠陥検出を目的とした上で，接合部における誤判定を抑制する手法を提案する．提案手法に用いる画像特徴量として，山本ら[7]が用いた，ブロック間の相対的な非類似性を数値化した指標（以下，非類似度）を用いる．ここでブロックとは，画像中の格子状に分割した局所領域のことである．非類似度を用いる理由は，曲面形状をしている接合部は光の反射が集中しやすい構造になっているため，照明を当てたときに他の部分と比較して異なる反射特性を示すことに着目したからである．

2. 提案手法の概要

提案手法は大きく三つのステップから構成される．第一ステップで，非類似度を用いて接合部の曲面部分を検査領域として自動検出する．第二ステップでは，検出された検査領域内において欠陥候補となる画素集合を検出する．そして，第三ステップで後処理により欠陥候補から欠陥として推定される部分をさらに絞り込む．各ステップにおける詳細な処理内容を，以下に示す．

第一ステップでは，検査対象となるコンロッドの画像をブロック単位に分割し，各ブロックにおける輝度値のヒストグラムを基に非類似度を計算する．非類似度はブロックの大きさ（ブロックサイズ）に依存するため，ブロックサイズを何段階かに変更させた上で対応する非類似度を計算し，全ての非類似度を累積したものを最終的な非類似度とする．ブロックサイズを変更することで，画像を局所的に見たときと大局的に見た時の非類似度が計算できるため，それらの結果を累積することで，画像中で常に高い非類似性を示す領域を強調することができる．さらに，最終的な非類似度に対して，代表的な画像の二値化手法である大津の二値化[8]を適用し，接合部を検査対象領域として動的に検出する．なお，隣接するブロックは重複させた方が非類似度算出に適しており，隣接するブロック間の重なりはブロックサイズに応じてヒューリスティックに決定している．

第二ステップでは，検査対象領域において前処理としてヒストグラム平坦化を施した後，ガウシアンフィルタによる画像の平滑化を行う．前者の処理は画素の濃淡強調の役割があり，後者の処理は欠陥と間違いやすいショットブラスト痕を軽減させる役割がある．その後，検査対象領域の各画素に対し 33×33 のサイズのブロックを用いて近傍画素を含めた平均値を求め，あらかじめ設定した閾値を下回ったとき，欠陥が原因で周辺よりも明度が低いと考え，欠陥候補とする．そして第三ステップで，検出された連続する欠陥候補がある一定の大きさ以上の領域を構成した場合に，欠陥として判定する．

3. 撮像システムの開発

欠陥検出の検証実験を実施するに当たって，一定条件で撮影ができるように図 2 に示す撮像システムを構築した．撮像システムにはカメラ 1 台と照明 4 台，部品を載せるターンテーブルが備え付けられている．カメラには FLIR 社製の CMOS カメラ BFS-U3-51S5 に computar 社製の 5 メガピクセルレンズ M3520-MPW2 を取り付けたものを使用している．照明には CCS 社製のバー照明 LDL2-119X16SW を使用しており，同社製の照明用電源 PD3-10024-8-PI を用いて点灯，消灯を制御している．また，ターンテーブルの駆動にはオリエンタルモータ社製のステッピングモータ AZM46AK-HP5F とそのドライバである AZD-KD を用いている．これらの装置は外部に接続した PC から制御するこ

ⓒ 2020 Information Processing Society of Japan

Vol.2020-GN-109 No.17
Vol.2020-CDS-27 No.17
Vol.2020-DCC-24 No.17
2020/1/24

とが可能で，照明条件を変化させながら任意の向きの部品を撮像することができる．表 1 に，備え付けられたカメラの性能や撮像システムの仕様を示す．

図 2　撮像システム
Figure 2　Imaging System.

表 1　撮像条件
Table 1　Imaging Conditions.

部品とカメラの距離	300 [mm]
画像サイズ	2248 x 2048 [pixels]
焦点距離	35 [mm]
カメラ角度	45°
照明角度	15°, 30°, 60°, 75°

4. 欠陥検出検証実験

4.1 実験設定

実際に工場で生産されるコンロッドを用いて，提案手法の評価を行うために検証実験を行った．実験に用いたコンロッドは 17 本であり，明らかに欠陥があるものを不良検体，全く欠陥が認められないものを良品検体とする．これらの 2 種類に加えて，現実的には欠陥とまではいかないが目視によって違和感を覚える部品も存在し，今回はそれを良品限度検体と位置付けた．17 本の部品を種類分けし，欠陥が大端ロッド接合部，または小端ロッド接合部にある部品数を示したものが表 2 となる．ただし，良品限度検体に関しては，欠陥ではなく違和感を覚える部分である．

表 2　検体の分類
Table 2　Specimen Classification.

種類	部品数	欠陥が大端ロッド接合部にある部品数	欠陥が小端ロッド接合部にある部品数
不良検体	8	2	6
良品限度検体	4	1	3
良品検体	5	0	0

これらの検体を前述の撮像システムで撮影した画像に対し，提案手法を適用し，欠陥検出の精度検証を行った．提案手法中で用いている画像処理の各パラメータを表 3 に示す．

表 3　画像処理パラメータ
Table 3　Image Processing Parameters.

パラメータ名	設定値
ブロックサイズ	17 - 33, 4 刻み [pixel]
隣接ブロックとの重なり量	9 - 17, 2 刻み [pixel]
特徴量ヒストグラムの階級数	8
ガウシアンフィルタのフィルタサイズ	33 [pixel]
ガウシアンフィルタの標準偏差	5.45
局所的な閾値処理時の近傍サイズ	33 [pixel]
局所的な閾値処理で使用する閾値	14
不良として検出する大きさ	33 [pixel]

4.2 実験結果

各検体に対して提案手法によって欠陥を検出し，良否判定を行った結果を表 4 に示しており，表中の良，不良の判定結果は,最終的に欠陥が検出されたかどうかに対応する．表 4 に示すように，実験結果として不良検体は全て不良と判定できたが，良品検体は一つだけ欠陥の誤検出があり，不良判定となってしまった．良品限度検体は，前述したように良品と判定してよい部品であるが，欠陥に近い違和感を覚える部分があるため，部品により良否判定が分かれるという結果となり，まさにボーダーライン上にある部品であることが分かる．

表 4　良否判定結果
Table 4　Test Results.

	良と判定された数	不良と判定された数
不良検体	0	8
良品限度検体	2	2
良品検体	4	1

不良検体と良品限度検体には，欠陥若しくは違和感を覚える部分が複数含まれているものもあり，より詳細な検出結果を表 5 に示す．ここで，欠陥数は各部品の欠陥（良品限度検体では違和感を覚える部分で，以下同じ）の数，成功数は欠陥を欠陥として検出した数，失敗数は欠陥を欠陥として検出できなかった，すなわち見逃した数，誤検出数は欠陥でない部分を欠陥として誤検出した数を表す．表 5 に示すように，不良検体に関して欠陥が複数ある場合に全ての欠陥が検出できたわけではない．良品限度検体に示しているのは実際には欠陥でなく，失敗の方に分類されていても実際には問題ではない．逆に，成功に分類されている方を過検出とみなすべきかもしれない．この境界領域の判定は人によっても異なっており，現場の実状に合わせた判定をするように調整が必要である．また，欠陥ではない部分の欠陥としての誤検出が，不良検体と良品限度検体の両方で 3 か所あり，誤検出の軽減は今後の課題である．図 3

ⓒ 2020 Information Processing Society of Japan

Vol.2020-GN-109 No.17
Vol.2020-CDS-27 No.17
Vol.2020-DCC-24 No.17
2020/1/24

に実際に提案手法で検出された欠陥の一例を示す.

表 5　欠陥検出結果

Table 5　Defect Detection Results.

		欠陥数	成功数	失敗数	誤検出数
不良検体	部品 A	1	1	0	0
	部品 B	1	1	0	0
	部品 C	1	1	0	0
	部品 D	1	1	0	0
	部品 E	1	1	0	0
	部品 F	2	1	1	0
	部品 G	3	1	2	1
	部品 H	4	2	2	1
良品限度検体	部品 I	1	1	0	0
	部品 J	1	0	1	0
	部品 K	2	1	1	1
	部品 L	2	0	2	0

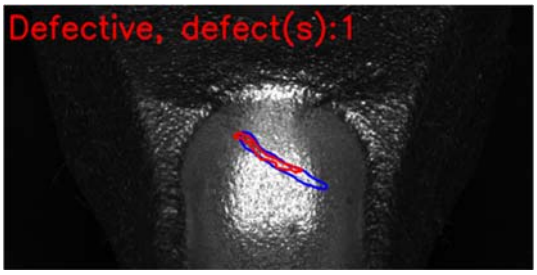

図 3　欠陥検出結果の例

Figure 3　An Example of Defect Detection.

5. 考察

提案手法により検出することができた欠陥は，深さが約 0.2mm 以上の打痕や傷であったが，深さが 0.1mm 程度のケースは見逃しの対象になってしまっている．このような欠陥も検出するためには，第二ステップで用いている閾値を調整することが一つの解決方法になるが，欠陥でない部分を欠陥としてしまう過検出が多発することにもなる．今回見逃しの対象になった欠陥は，目視による判定でも困難とされるものであるが，他の計測手法の併用なども考慮する必要があると考えられる．また，非類似度の計算に用いるブロックサイズが大きすぎる場合，接合部の周辺部分も検査対象領域として過剰に検出されることで，その余剰部が不良として誤検出されることが分かっている．今回はブロックサイズをヒューリスティックに決定しているため，検体が変わった場合に同様の結果が得られるとは限らない．そのため，あらゆる検体に対し適用可能な欠陥検出を実現するためには，検体ごとに適したブロックサイズの決定方法に関して検討を進めていく必要があると考えている．

6. おわりに

鍛造部品における欠陥検出は製品の性能や品質，安全性を確保するために重要であるが，現在は目視で行われることが多く，作業者の大きな負担となっている．

本稿では，外観検査において最も困難な課題の一つである，自動車の部品であるコンロッドの曲面形状の接合部を対象に，接合部を自動抽出し，欠陥を検出することを目的とした．接合部に欠陥が存在する場合には，曲面形状の特性により撮像した画像において，反射の強い領域内に低明度の欠陥部分が存在する状態となる．従って，検査画像中から反射の強い曲面領域を検査領域として抽出した後で，その領域内で周囲よりも輝度値が低い領域を欠陥として検出する手法を提案した．実際に工場で生産されたコンロッドを対象に，提案手法の検証実験を行った結果，不良検体は 100%の精度で不良と判定でき，良品検体は 80%の精度で良品と判定することができた．

しかしながら，全ての欠陥を検出するまでは至らず，また欠陥の誤検出もまだ存在するため，他の撮像手法の併用なども含めた改良が必要である．

参考文献

[1] 吉田知宏 .冷間／熱間鍛造部品の目視を自動化する外観検査技術－欠陥品見逃しを防ぎ、安定した検査基準で全数検査を実現－. 型技術. 2017, pp.40-43.
[2] 渡邊裕之. 自動車用部材向け外観検査技術. 電気製鋼. 2014, vol. 85, no. 2, p. 139-148.
[3] 渡邊裕之. 自動車用部材向け外観検査技術. 画像ラボ. 2015, pp.67-73.
[4] 山﨑達也, 福井暉斗. 画像処理による鍛造部品欠陥検出の検討. 情報処理学会コンシューマ・デバイス＆システム研究会 (IPSJ-CDS). 2018.
[5] 青木公也, 根来秀多, 吉村裕一郎, 舟橋琢磨, 輿水大和, 三和田靖彦. 傷【のみ】に気付く、時空間【傷の気付き】処理. 画像ラボ. 2015, pp.39-46.
[6] 武藤功樹, 伊藤尚起, 柴田実頼, 吉村裕一郎, 青木公也, 輿水大和, 石井博行. 検査員の【かざして見る】動作に基づく不良部位の見え方の“特異性”による外観検査. 動的画像処理実利用化ワークショップ 2017 (DIA2017). 2017, no. OS4-5.
[7] 山本明史, 藤原孝幸, 橋本学, 船橋琢磨, 輿水大和. 画素ブロックの相対的独自性指標と領域抽出への応用. 電気学会論文誌 D. 2011, vol. 131, no. 4, pp. 539-547.
[8] Otsu, N. A Threshold Selection Method from Gray-level Histograms. IEEE Transactions Syst. Man Cybern.. 1979, vol. 9, no. 1, pp. 62–66.

ⓒ 2020 Information Processing Society of Japan