

解説



Review

画像検査技術を用いた鉄鋼製品検査の動向

山田龍三*

Trend of Quality Assurance of Steel Products Using Machine Vision Systems

Ryuzo Yamada

Synopsis

Most all rolled steel produces such as wire rods or round bars are inspected its surface and internal quality by inline automatic flaw detector; whereas forged or caste products which rather have complicate shapes are inspected its surface quality by visual inspection. These days, machine vision technology has been made a great progress. Speed, accuracy and environment of developing applications were improved rapidly. Machine vision system became a subject of investment in plant and equipment for the purpose of taking over the visual inspection made by operators. This review summarizes subjects of inspection of steel products, overviews recent technical progress of machine vision system and introduces a state of conditions of application of the machine vision system to factories.

1. 緒 言

品質と価格は、経済活動の基本となる重要な指標であり、その優位性が市場での競争力を左右する。優れた技術力により品質と価格で優位であった先進国は、より安い労働力を求め中国やインドなどの新興国での生産を拡大させてきた。その結果、逆にそれら諸国での経済成長に伴う労務費の高騰を招き、かつて程の価格面での優位性を保てなくなってきた。また、自国での製品の生産においても、安価な外国製品の影響で、今まで以上の製造コストの低減が必要となっている。このような背景から、国内外での生産現場において、製造プロセスを自動化し製造コストを抑え競争力を高めることが必要となっている。

鉄鋼製品は、製造プロセス中で品質が造りこまれ、各種の検査により品質が保証されている。ピレットや丸棒、線材製品などの圧延材の非破壊検査については、1980年代より自動化が進められ、全長にわたる検査が実施されている。一方、鍛造製品や鋳造製品、あるいは、磁石製品やプレス製品のような形状が複雑で製品数量の多いもの

については自動化が難しく、出荷前の外観検査においては人間による目視検査や寸法検査が行われてきた。

昨今、画像検査分野における著しい技術開発により、鉄鋼製品の製造プロセスにおいてもその適用範囲が広がりつつある。カメラおよびデジタル信号処理の高速化・高精度化により、十分な分解能を有する大量のデータを扱えるようになり、生産ラインの自動検査にも適用できるようになってきている¹⁾。本稿では、鉄鋼製品における主に非破壊検査および形状検査の課題を整理し、画像検査技術の動向について概説するとともに、最近の大同特殊鋼(株)（以下、当社という）における画像検査機器の導入状況について紹介する。

2. 鉄鋼製品検査と課題

鉄鋼業においては、自動計測制御技術の発展とともに、各種非破壊検査技術の自動化が旺盛にすすめられてきている^{2)~4)}。鉄鋼製品は、一般的には鋳造前の溶鋼分析にはじまり、圧延、鍛造、鋳造などの製造途中あるいは成形後に実施される化学分析、機械試験、非破壊検査、寸法検査、などの多くの検査工程を経て出荷される。Table 1

に各種製品の非破壊検査および寸法検査に関し、精度と速度、および、課題を整理した結果を示す。丸棒製品や線材、帯鋼などの圧延製品は、形状が単純であり検査面の位置変動が少ない自動搬送が可能ことから、大幅な自動化が既にはかられており⁵⁾、良好な精度と速度で全長検査が実施されている。また、航空機用シャフトやディスクなどの大型鍛造製品は、高精度な検査が施されているが、旺盛な受注に対応するための検査効率のさらなる向上が望まれている。一方、ハテバー鍛造品や自動車用タービンホイールなどの精密鍛造品、および、射出成形やプレスによって製造される磁石やコアなどの製品は、形状の複雑さと個体数の多さに起因するハンドリングの煩雑さにより自動化がすすまず、オペレータによる外観目視検査およびマニュアル寸法検査が実施されており、その自動化が望まれている。

Fig.1 に当社グループにおける製品生産数と検査要員数の関係を示す。製品の品種が多岐にわたるため、生産数と要員数の相関は小さいが、磁石製品のように小型円形で、かつ、高い品質が要求される製品においては、相対的に多くのオペレータによる検査が実施されており、一方、ボルトのように、製造プロセス（転造）起因のきず発生確率が小さい製品においては、少ない要員数で検査が可能であることがわかる。平均的には、生産個数が100倍増えると、8倍弱の検査要員を要していることになる。

3. 画像検査技術の動向

3. 1 画像検査装置の動向

技術革新の著しい画像検査技術を用いて、複雑な形状の部品においても人間の目視検査の代替が可能になってきている。その適用分野は、半導体・電子部品、セキユ

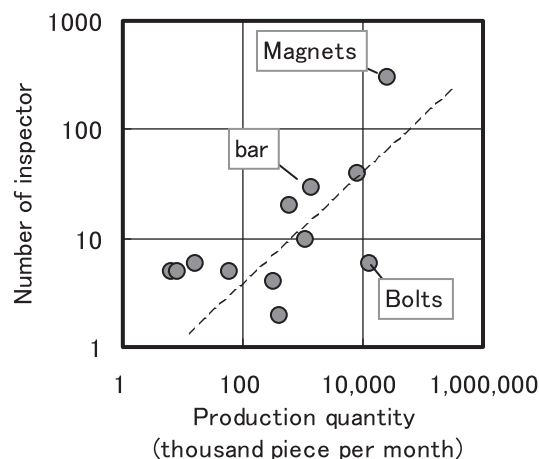


Fig.1. Relationship between the production quantity of each products and number of inspectors.

リティー、自動車の ITS、医療、食品・薬品検査、自動車の検査、シートや印刷物の検査、と幅広い。ハードウェアに関しては、PC(Personal computer)の演算速度の高速化と CCD(Charge coupled device)や CMOS(Complementary Metal-Oxide Semiconductor)などの撮像素子の高精度化、高感度化と共に、スマートカメラなどに代表されるような情報処理機能を備えたカメラの開発もすすめられている。1990年代は、30万画素の工業用カメラが一般的であったが、現在では400万画素の工業用カメラも数十万円の実用的な価格で市販されている。また、高感度化により超高速ビデオカメラの工業活用も可能になってきている⁶⁾。ソフトウェアに関しては、操作が簡単な画像処理アプリケーションソフトウェアが多く市販されてきている。従来は、二値化、圧縮・膨張、粒子解析、などの基本的な画像処理を例えばC言語などの開発言語を用いてテキストエディタで記述していく必要があり、少なからずコンピュータプログラミングに関する専門的な知識が必要であったが、昨今では、各種の処理がライブラリとしてま

Table 1. Quality assurance method and its satisfaction.

Products	Manufacturing process	Nondestructive test	Dimension test	Accuracy	Speed	Subject
Round bar	Rolling	UT,MT,ET, MLFT,VT	Measuring machine	B	A	Precision up
Flat bar			Vernier caliper gauge			
Wire rod	Rolling	UT,MT,ET,VT	Optical gauge Vernier caliper gauge	B	A	Precision up
Strip	Cold rolling	UT,MT,VT	Thickness gauge (X-ray, Displacement sensor)	B	A	Precision up
Disc	Free forging	UT,MT,PT,VT	Measuring machine	A	B	Speed up
Shaft			Vernier caliper gauge			
Hateber Forged products	Die forging	UT,MT,VT	Micrometer Vernier caliper gauge	B	C	Automation
Crossing	Sand mold steel casting	RT,PT,UT,VT	3D dimension layout machine	B	C	Automation
Turbine runner			Vernier caliper gauge			
Wheel	Investment casting	RT,PT,VT	Micrometer	B	C	Automation
Vane			Vernier caliper gauge			
Magnet	Shooting Press	ET,PT,VT	Micrometer	B	C	Automation
Core			Vernier caliper gauge			

A: Excellent, B: Good, C: Improving

UT: Ultrasonic testing, MT: Magnetic testing, ET: Eddy current testing, PT: Paint penetrant testing, MLFT: Magnetic leakage flux testing, RT: Radiographic testing, VT: Visual testing

とめられ簡単に高度な処理を用いたシミュレーションが可能であり、処理アルゴリズムを最適化するための工数を大幅に低減できるようになっている。合わせて、三次元計測や距離計測、ハフ変換などの特徴量計測アルゴリズムなどの新しい研究も活発化している⁷⁾。

Fig.2 に、PC の演算速度と画像検査に関する特許出願件数について、1990 年からの変化をプロットした結果を示すが、双方ともに増加傾向が継続しており、ハードウェアの高性能化と共に画像検査の工業活用が活発化していることがわかる。なお、今後も並列処理技術を用いた PC の高速化やメモリの大容量化などの技術開発が進むと考えられ、画像検査の実用化事例はさらに増加すると予想される。

3. 2 目視検査と画像検査の比較

画像検査技術を用いて外観検査を自動化するにあたっては、従来から実施されているオペレータによる目視検査と比較した場合の特長と短所を理解する必要がある。Table 2 に比較結果を示すが、人による検査の場合、色の識別性能、微少なきずの検出性能、試験材全体からの局部の相違の認識性能、などにおいて優れており、精度と柔軟性という点では現在の画像検査より優位である。一方、再現性については、照明の明るさや試験材の肌状態

などが正しく管理されたシステムにおいては画像検査の方が優れており、また、記録性、定量性などについても画像検査が優れている。

最近では、拡大鏡や複数台のカメラを用いた死角低減システムなど、目視検査を支援するシステムも開発されている。画像検査を適用する場合、人間の識別性能と完全に一致することは不可能であり、目視検査を基準とした場合には必ず過剰検出が発生する。しかし、過剰に検出したものは、きずの形態（種類、大きさ）で分類し、判定しきい値に近い評価指標を示す製品については、人間による再検査を実施することで歩留りを向上することができる。また、判定処理において、知能情報処理などの活用も今後は有効と考えられる。なお、形状検査においては、ノギスやマイクロメータを用いたマニュアル検査に比べ、画像検査の方が精度と速度の点で格段に優れている。

3. 3 濃淡画像の活用

カメラで撮像した濃淡画像を利用した検査が広く実用化されている。濃淡画像とは、照明などの外部光によって創り出される試験材上の輝度の変化を画像として検出したものである。きず検査の場合、標準品の画像との相関値を計算したり（パターンマッチング）、画像中の輝度の変化部位を抽出し、その部位の個数や形状、面積などをしきい値と比較したりして、検査を実施する。円形鍛造品の画像処理例を Fig.3 に示す。本例では、40 万画素の CCD カメラと LED 照明を用いた。まず、撮像した画像は検査部位を切り出し (Fig.3(b))、1 画素あたり 8 ビット (256) の諧調（明るさ）の中で一定のしきい値範囲の諧調にある画素を 1 に、それ以外を 0 に置き換える処理をおこなう（二値化、Fig.3(c)）。続いて、マスク処理により試験材の境界部の信号を取り除くと、試験材の面内での濃淡変化に伴う粒状の点を得ることができる (Fig.3(d))。最後に、各点について面積の大きさに選別することにより（粒子解析）、コーナ部の欠けのみを抽出することができる (Fig.3(e))。なお、Fig.3 で示した処理の他に、パターンマッチング処理を用いて検査対象の位置ずれを補正す

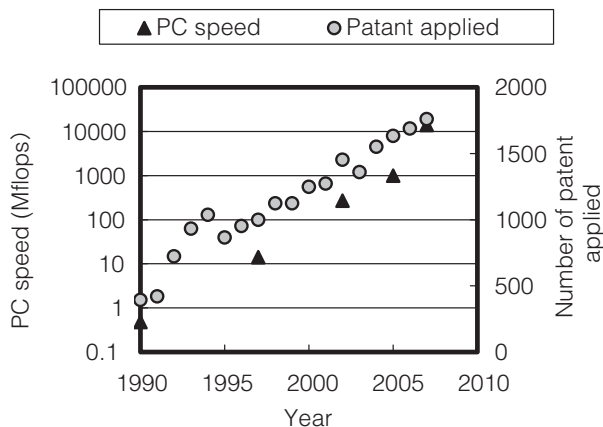


Fig.2. Chang of PC speed and the number of patent applied regarding inspection with image processing. (flops: Number of calculation of floating-point numbers per second)

Table 2. Comparison between visual inspection and image processing.

Characteristics	Visual inspection	Image processing
Discrimination of color	✓	
Discrimination of fine imperfection	✓	
Discrimination of any difference from entire surface	✓	
Repeatability		✓
Recordability		✓
Quantitative analysis		✓
Accuracy of dimension measurement		✓

✓: Superior

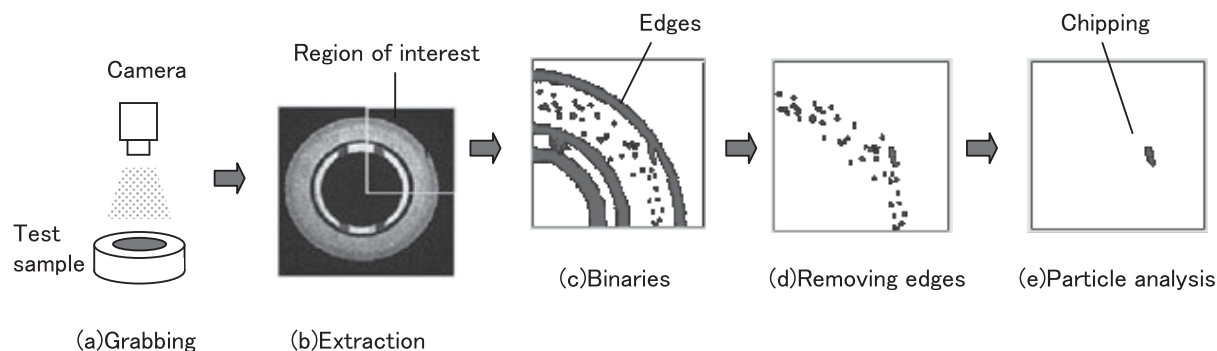


Fig.3. An example of image processing.

る処理や、二値化の前に画像のノイズを取り除くフィルタ処理などの各種の検査アルゴリズムが利用されている。

濃淡画像を利用した形状検査においては、試験材の端部の境界を、濃度の微分処理などを用いて検出し（エッジ検出）、間隔や長さ、角度、真円度などを求めることができる。複数の境界点情報を統計的に処理することにより、より高い精度を得ることができる。なお、この場合は、ピントのずれに対する像の大きさ変化が小さい光学系（テレセントリック光学系）の採用や、レンズの収差の補正、あるいは、照明系の最適化が重要である。

3. 4 距離画像の活用

濃淡画像だけでなく、距離情報をもとにした距離画像を得る手法も実用化がすすめられている。濃淡画像はきずの深さとの相関が低いが、距離画像ではより定量的なきず深さや形状の評価が可能である。Fig.4に距離画像を

取得可能な各種手法の測定精度と検査時間の関係を整理した。光の位相情報を利用するホログラフィー法や干渉を利用するスペックル干渉法は、位相整合処理を適切に施すことにより、数百 μm の広いダイナミックレンジで、サブミクロンオーダーの分解能の距離画像を取得することができる⁸⁾。また、三角測量の原理を利用し、スポットレーザ光を2次元走査して距離画像を得る装置や、ラインレーザ光を1次元走査して距離画像を構成する光切断法を用いた装置も市販されている。光切断法とは、Fig.5に示すように、試験材にレーザライン光を照射し、2次元カメラで撮像したときに得られるライン光のプロファイルデータより、三角測量の原理を利用して距離を計測する方式である。レンズの歪み補正やライン光の境界検出技術などの向上、および、CPUを組み込んだ専用ハードウェア開発などにより、十数 μm の精度、1ライ

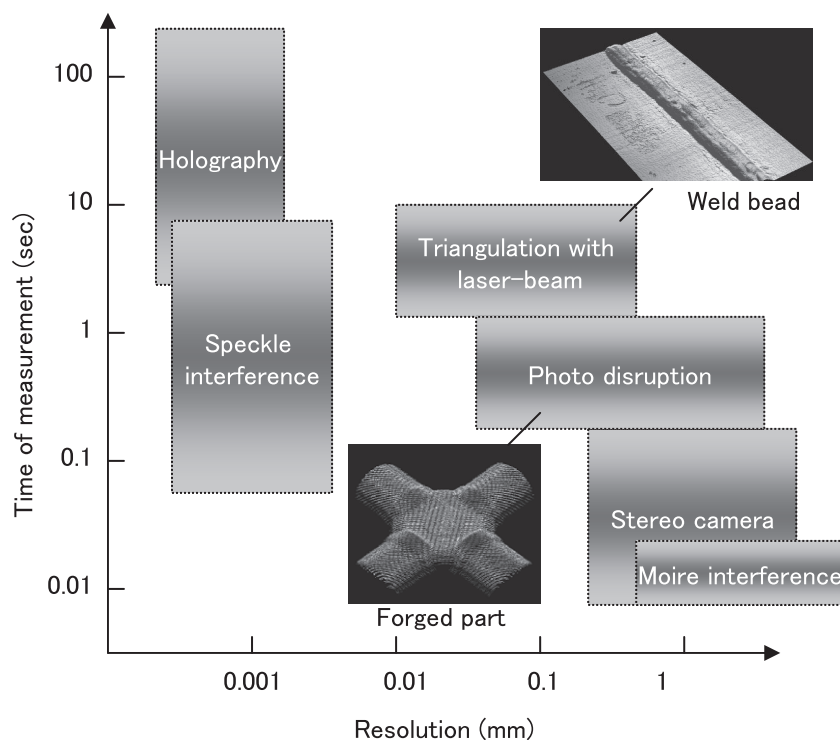


Fig.4. Classification of optical full-field range measurement.

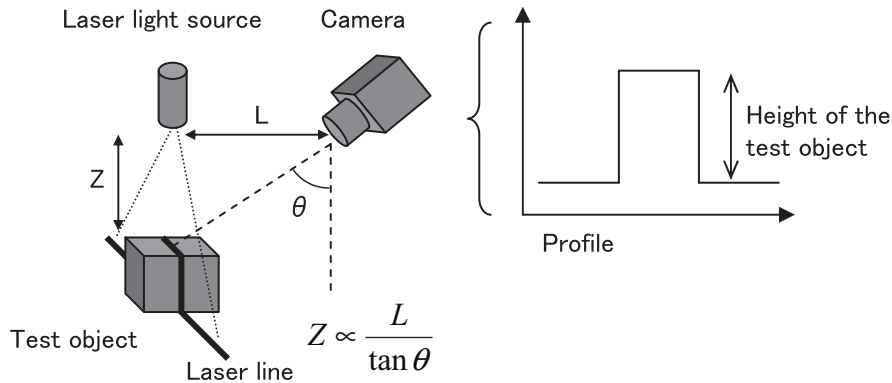


Fig.5. Principle of photo disruption method.

ン 1000 ドットの分解能で、1 秒間に 100 ライン以上のサンプリングが可能な装置も市販されている。本手法では、原理的には深さが 0.1 mm 程度の浅いきずを識別可能である。さらに、複数のカメラを用いたステレオ計測、モアレ干渉計測も実用化されている⁹⁾。

4. 適用事例

従来の画像検査は、ビレットや鋼板などの単純形状の圧延製品検査への適用が中心であったが、現在では、鍛造品、鋳造品、射出成形品、および、プレス成形品など、複雑な形状の製品に対しても、その適用がすすめられている。各々の検査装置の実用化に至っては、照明系、前処理や判定アルゴリズム、材料のハンドリング、製品の肌状態や品質の再現性、現場環境、など、各々の適用先の状況に合わせた検査システムの作り込みが不可欠である。

Fig.6 に、形状検査、および、きず検査について、検査精度を撮像素子 1 画素の大きさとの比として示した。形状検査においては画素サイズの 1/5 から同程度までの精度での検査が可能である。一方、きず検査においては、5 画素程度の分解能となっている。一方、Fig.7 に各製品の

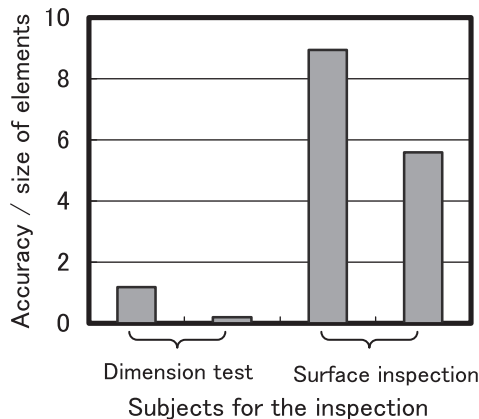


Fig.6. Comparison of accuracy between dimension test and surface inspections.

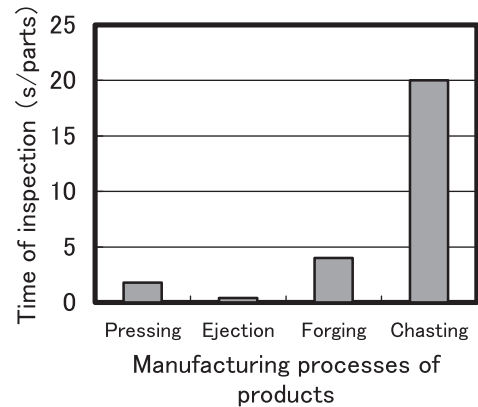


Fig.7. Comparison between the time of inspection and products with different manufacturing processes.

製造プロセスと画像検査速度の関係を示す。鍛造製品や鋳造製品などの形状の複雑さに応じて、カメラの位置あわせを伴う撮像素子が増え、多くの処理時間が必要となっている。

5. まとめ

製品検査の技術動向と画像検査技術の概要、および、当社における昨今の適用事例を概説した。濃淡画像を用いた検査においては、ハードウェアの高速・高精度化やソフトウェアの汎用化により、性能面および投資効果の面においても実用可能なレベルになってきている。特に寸法検査においては、人間による計測に比べ高速・高精度化が可能である。距離画像の活用においては、装置の高速化により、実用化が可能となってきた。製品の凹凸などの形状検査が可能であり、きず深さの定量評価が可能である。ただし、浅いきずや錆、変色などについては距離画像での検出が不可能であり、濃淡画像と距離画像の利点を生かした検査システムの構築が有効である。また、いずれの方法にせよ、各現場での最適化が不可欠である。

日本は今後、高齢化により労働人口が減少し、GDP の

伸びの低下が懸念される状況にある。諸外国に比べ相対的な経済的地位を維持するためには、技術力の向上が不可欠である。今後は、国内外の生産工場における画像検査技術の適用拡大が、製品の品質と価格競争力の向上に貢献すると考えられる。

(文 献)

- 1) HotEye, <http://www.ogtechnologies.com/index.html>, OG Technologies, Inc.
- 2) 遠藤敏夫：電気製鋼, 70 (1990), 97.
- 3) 高田一, 山崎拓也, 戸村寧男, 運崎秀明, 佐々木聡洋, 荒谷誠：鉄と鋼, 90 (2004), 883.
- 4) 唐沢博一, 磯部英夫, 浜島隆之：非破壊検査, 56 (2007), 10, 520.
- 5) 高田健一, 矢野泰三：電気製鋼, 74 (2003), 173.
- 6) 山田龍三：電気製鋼, 78 (2007), 115.
- 7) 興水大和：ふえらむ, 13 (2003), 22.
- 8) ShaPix, http://www.coherix.com/en/welcome_to_coherix, Coherix, Inc.
- 9) 佐藤宏介：計測と制御, 47 (2008), 4.