

当社での計測技術開発の歴史と今後の方向性

濱田 徳 亜

The History and Future of Measurement Technology in Sumitomo Electric — by Noritsugu Hamada — This paper looks back on the history of the development of measurement technology that has contributed to the improvement of quality assurance levels of Sumitomo Electric Industries, Ltd. for 50 years. It also includes technical explanations of the measurement and inspection equipment that the company has recently developed as well as crack detection technology on which the company has particularly focused its efforts. Finally, this paper describes the future of image processing technology and other measurement and inspection technologies that Sumitomo Electric is currently working on for further improvement in its quality assurance levels.

Keywords: measurement, inspection, image processing, sensor, camera

1. 緒 言

近年、自動車産業を筆頭に ppm (1/100 万分) オーダーといったより高レベルの品質が求められるようになってきているが、一方で、製品は小型化・微細化が進んでいるため、品質保証をいかにして行うかが大きな課題となり、計測・検査技術に対するニーズも日増しに高まっている。当社では、1960年代から自社製品に対する計測・検査技術の開発に取り組み、それを応用した独自設備を製作・導入することで当社グループの品質保証レベルや品質そのものの向上を進め、モノづくりの基盤を支えてきた。

本稿では、当社グループの品質を支えてきた計測・検査技術について、歴史及び開発事例を紹介するとともに、画像処理を始めとする最新の技術開発について述べる。

2. 計測技術開発の歴史

当社の計測技術開発の歴史は、1960年代の主力製品である電線の品質保証を行うために、渦流探傷^{*1}技術を開発していたことに端を発する。当時、圧延・伸線工程で発生する線材傷をインラインで検出するため、貫通型コイルを用いた渦流探傷技術の開発を行っていた。基本的な原理は、傷部分での渦流の乱れから傷を検出するというものだが、励磁コイルの内側に設置された検出コイルを長手方向に差動接続することで、線材の振動の影響をなくす工夫を行った。これにより、いわゆる「外乱に強い」センサを実用化して社内への横展開を行い、品質保証を実現してきている。

1970年代には、銅線アルミニウム等の非磁性線材に混入した磁性体異物（鉄粉等）と傷を区別して検出するため、励磁コイルで発生させた直流磁界中に検出コイルを配置し、その間に線材を通すことで磁性体異物を検出する方式

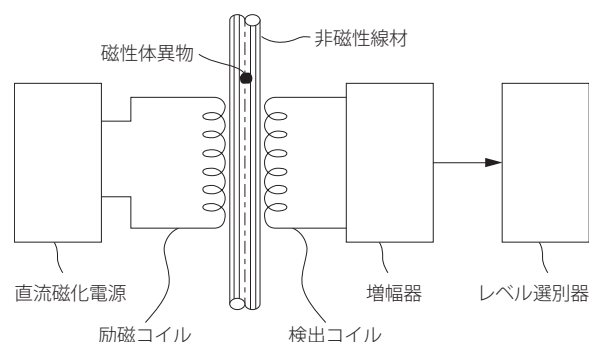


図1 非磁性線材中の磁性体異物検出機構

(図1)を考案⁽¹⁾するなど、磁気探傷技術の開発、実用化を進め、電線の品質保証レベルの向上に貢献した。

1980年代に入り、線材上の付着異物の検出技術として、光を用いる技術の開発に取り組んだ。具体的には、図2のように線材に平行光を当てて線材のシルエットをスリット状光電池^{*2}に投影する。これを線材の長手方向に2組設置し、2つの光電池の受光量差を検出する技術である。本技術により、当社グループの電線の品質は格段に向上した。

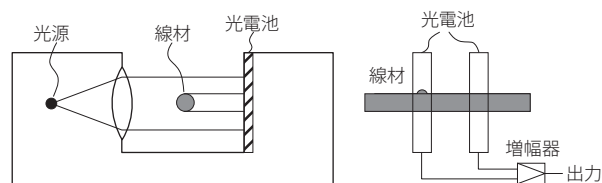


図2 光電池による線材異物検出

こうして取り組んだ光を用いた検出技術からの発展として、さらに、世の中の外観品質に対する要求の高まりという背景もあり、カメラを用いた画像処理による計測・検査技術の開発に1980年代後半より注力し始めた。また、当社グループの製品全体をカバーするために、計測・検査の対象を電線以外の製品へと幅を広げていく中で、超音波やレーザを応用した計測・検査技術の開発も行ってきたが、これらの技術による品質保証や品質そのものの向上事例については次章で詳しく紹介する。

以上のような技術開発は、「世の中にない技術は自らの手で作る」という基本方針に基づく。そして、この方針を現在まで継承することで、世の中にない技術を生み出し続け、また、それを品質保証、品質向上手段として用いることで、当社グループ製品の独自性・優位性に貢献してきた。

3. 開発事例

計測技術を応用する分野としては、品質保証レベルの向上や人件費の低減を狙った「検査の自動化」、品質の造り込みそのものを狙った「加工・組立の自動化」がある。本章ではこれら2分野についての技術を紹介する。

3-1 検査の自動化事例 当社製品は、組立型(Assembly：A型製品)、ピース型(Bulk：B型製品)、長モノ型(Cable：C型製品)の3つの製品形態に分類⁽²⁾される(図3)が、表1に例を挙げるように、製品形態毎に要求される検査項目が異なっている⁽³⁾。本章では、製品形態毎に各々いくつかの事例を紹介する。なお、ピース型製品の表面に発生する欠けの検出は、開発の歴史も長く、技術面でも多岐に亘るため、4章で別途紹介する。

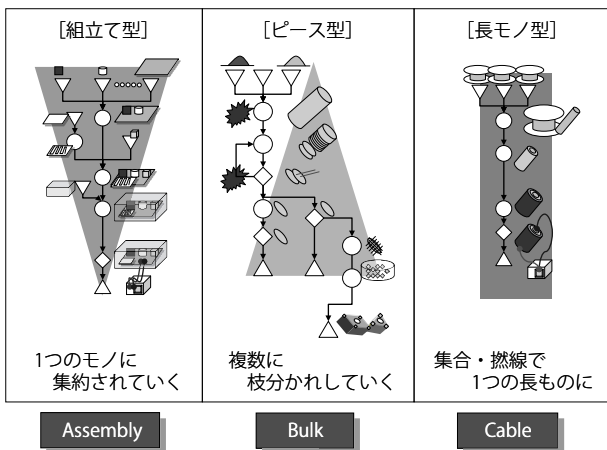


図3 当社の3つの製品形態

(1) 組立型製品の組み付け状態検査装置

品質保証レベルの向上を図るため、我々は図4に示すよ

表1 製品形態毎の検査項目

製品形態	検査項目	技術ポイント
A型製品	部品組み付け忘れ 誤部品の組み付け 組み付け位置ずれ 刻印間違い	多品種対応 型替時間の極小化
B型製品	外形寸法 傷、欠けなどの外観 亀裂などの内部欠陥 異品混入 刻印間違い	多品種対応 上流工程での品質定量化 (自動ハンドリング)
C型製品	外径 被覆厚み、偏肉 傷、異物付着などの外観 長さ	移動体への対応 全長全周への対応

うに、ロボットの先端にカメラを取り付け、部品の組み付け忘れ、誤部品の組み付けを画像処理によって検査する装置を開発した。画像処理アルゴリズムとしては、正しい状態の製品画像を良好モデルとして登録しておき、検査対象製品の画像中にその良好モデルがあるかどうかを探すパターンマッチング処理を用いた。この処理は多数の市販画像処理装置にも採用されているアルゴリズムで、実際に使用されたことのある方も多いと思う。技術的には、

- ・製品の上下左右からの検査を行うための拡散照明
- ・検査の信頼性向上のための色抽出処理

がポイントである。

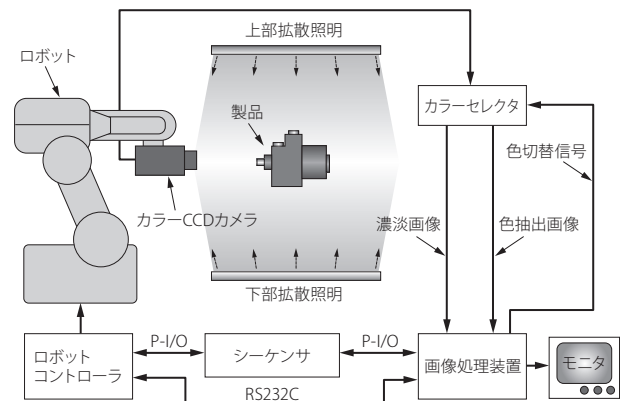


図4 組み付け状態検査装置

(2) ピース型製品の内部欠陥検査装置

目では見えない欠陥を検出して品質保証を実現するため、図5に示すような、超音波を用いて金属体に発生した亀裂等の内部欠陥を検出する装置を開発した。全長にわたって欠陥を検出する必要があるため、水中に入れた丸棒状の製品を回転させながら超音波センサを軸方向に移動させるという方式で螺旋状に検出を行った。その他の技術と

しては、

- ・製品の材質や大きさに合わせた周波数の最適化
- ・超音波の集束による検出感度向上
- ・超音波の妨げとなる水中での気泡の発生防止がポイントである。

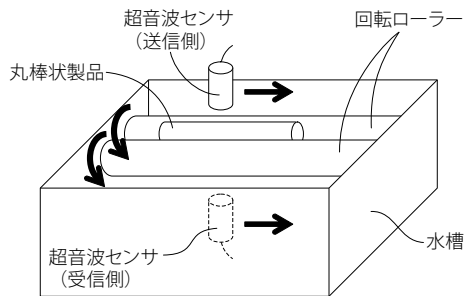


図5 内部欠陥検査装置

(3) 長モノ型製品の被覆厚み測定装置

品質保証及び品質モニタリングのため、図6のように、レーザ外径測定器と渦流式変位計を用いて、電線（撚線）の被覆厚みを測定する装置を開発した。全周、全長にわたって測定する必要があるため、周囲4方向に測定ユニットを配置し、さらに測定部全体を駆動できるようにしてパスラインの変動にも対応した。その他の技術としては、

- ・渦流式変位計の温度補償
 - ・撚線の凹凸影響の除去アルゴリズム
- がポイントである。

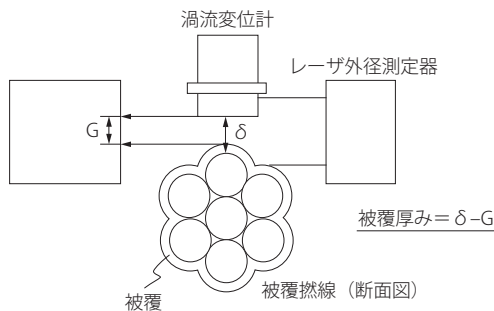


図6 被覆厚み測定装置

(4) 長モノ型製品の外観検査装置

品質保証及び検査人件費の削減のため、図7のように、画像処理を用いて電線（撚線）の表面にある穴や異物を検出する装置を開発した。前項と同じく全周、全長にわたって検出する必要があるため、周囲4方向に検出ユニットを

配置し、線速に対応して抜け漏れなく検出できるよう処理の高速化を図り、リアルタイム処理を実現した。その他の技術としては下記のポイントがある。

- ・撚線全周をムラなく光らせる照明
- ・電線表面の明るさムラの影響を受けない画像処理

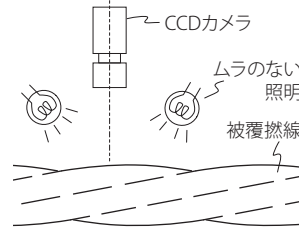


図7 被覆線外観検査装置

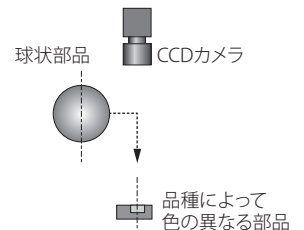


図8 芯合せ組立装置

3-2 加工・組立の自動化事例 計測技術の加工・組立装置への応用事例として、2つの装置を紹介する。

(1) 定方向定位置供給装置

製品の加工精度を上げるため、加工装置に被加工材料を精度良く位置決め・供給する装置を開発した。材料の認識には画像処理を用い、約30mm角の材料の向きと位置を検出してロボットに伝えることで、精度±0.1mm以下での供給を可能にし、加工不良を半減させることに成功した。画像処理アルゴリズムとしては、前述したパターンマッチングを進化させた幾何パターンマッチング^{*3}を用い、また、独自照明によって従来困難であった背景との識別も可能にした。その他の技術としては、

- ・高精度化のための被加工材料の把持時のズレ計測
- ・多品種対応のための自動良好モデル登録

がポイントである。

(2) 芯合せ組立装置

組立精度を上げて歩留りを向上させるため、図8のような、画像処理で2つの部品の位置を認識し、中心が合うように位置合せを行った後、2つの部品を一体化加工する装置を開発した。球状部品は同軸落射照明^{*4}によって球の中心を光らせて認識した。また、他方の部品は、品種によって色が異なるため、多色LED照明を用いて適した色の照明を当てるといった工夫を行った。これにより、従来比5倍の高精度組立を実現し、組立不良の撲滅に繋げた。その他、技術的には下記がポイントである。

- ・球状部品を吸着した状態での画像認識
- ・誤った位置で一体化しないための画像処理異常処置

4. 表面上の欠け検出技術

本章では、重点課題として画像処理を始め様々な技術開発を行ってきた、欠けの検出技術について述べる。

最初の取り組みは1979年に遡る。ある製品に欠けが発生するため、目視検査を行って品質を保証していたが、全数検査には膨大な人員が必要でコストが掛かるという問題があり、自動検査の導入を検討した。その製品には数多くの形状の異なる品種があると同時に、欠けの発生する面に凹凸加工を行っているため、様々な品種で凹凸と欠け(0.1mm程度)とを識別する必要があった。そこで、世の中の技術を調査して評価したが、それを実現可能なものは存在しなかったため、自動検出技術の開発が必須と判断し、開発に着手した。

それから今日まで、世の中のセンシング機器の進歩とともに、画像処理を始めとする様々な方式での技術開発を行ってきた。以下では、各方式の具体的な内容を紹介する。

4-1 光反射方式 目視検査では、欠けとそれ以外の部分での光り方の違いを認識しているため、当然光で欠けを画像として捉えて認識するという方式を考えましたが、1979年当時はようやく白黒CCDカメラが松下電器産業(株)(現 パナソニック(株))より発売されたばかり⁽⁴⁾で、画像処理は今日のように一般的なものではなく、コスト的にも実現不可能であった。そこで、**図9**のように照明光を水平方向から当て、上方に取り付けた差動光センサによって反射光量を検出するという方式を提案した。本方式によって、直線部に発生する0.1mm程度の欠けは検出可能となったが、原理上光を当てる方向に垂直な面に存在する欠けは感度良く検出できるが、垂直でない面では検出困難である。そのため、コーナー部が様々なR寸法の製品に対して光を正確に垂直に当てるのが難しく、コーナー部の欠けの見逃しが発生した。本技術では全数自動検査にまでは至らなかったが、光センサ応用技術としては当時最先端のものであった。

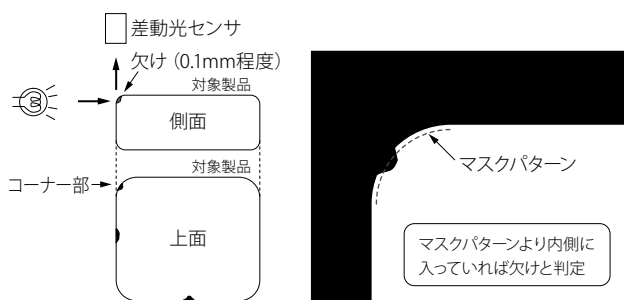


図9 光反射方式

図10 マスクパターン法

4-2 陰影検出方式 1980年代に入り、光センサを多数並べた方式とも言えるCCDカメラを用いた画像処理技術が、FA分野でも盛んに応用され始めた。当社でもCCDカメラ、照明、画像処理装置を用いた自動検査技術開発を進めていたが、画像処理エンジンは、処理時間の関係

で専用装置に頼っていたため、案件に合わせた独自の画像処理アルゴリズムを構築して組み込むことは、コスト的に困難であった。しかし、1990年代に入ると、パソコンの性能が著しく向上し、画像処理をパソコンで行う事例も増え始めた⁽⁵⁾。そこで、欠け検出に最適な画像処理アルゴリズムを開発すべく、照明の陰影を用いた欠け検出技術開発に着手した。

本開発では、カメラを上方向、側面直線部方向、側面コーナー部方向に3台設置し、拡散光の落射照明を当てて欠けを明視野の中の暗い影として捉える方式を採用した。また、画像処理アルゴリズムとして、マスクパターン法(**図10**)を開発し、コーナー部の欠け検出に適用した。しかし、試作機を製作して評価を積み重ねた結果、①極めて多様な「欠け方」に対して照明の陰影だけで見逃しなく検出することは困難、②製品表面のムラや汚れ、異物付着等による誤検出をゼロにはできない、という問題点が残った。ただし、技術としては、独自画像処理アルゴリズムの構築という点で革新的なもので、以後の開発推進に繋がった。

4-3 レーザ変位計方式 前項の方式の問題点を解決すべく、我々は「欠けを照明の陰影として間接的に捉える」という発想から、「欠けのミクロな凹凸を直接変位として捉える」という発想に変え、ミクロンオーダーでの変位測定が可能なレーザ変位計を用いた欠けの検出技術開発に取り組んだ。

これは、製品の輪郭形状を画像処理で認識し、その輪郭から少し内側を変位計で正確にトレースして欠けの凹凸を検出するという方式(**図11**)で、原理的に製品表面の色ムラや汚れといった光学的なノイズの影響を受けないという利点がある。もちろん、それだけで問題が解決できるわけではなく、製品表面のうねりの影響をなくすため、**図12**のように差分処理をかけるという工夫を行った。

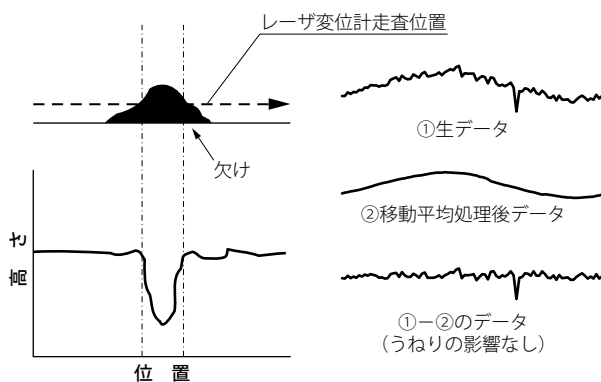


図11 レーザ変位計方式

図12 差分処理

本方式では、凹部はマイナス方向、凸部はプラス方向の波形として検出されるため、欠け(凹)と付着物(凸)の

区別が可能で、光を用いた前述の方式で誤検出となるゴミの付着等を誤検出しないという大きなメリットがあった。しかし、R面取りの大きい製品では変位計でトレースする面の傾きが大きく、わずかなトレース位置のズレで生じる変位の変動（図13）を誤検出するという問題があり、R面取りの少ない一部の品種限定となった。

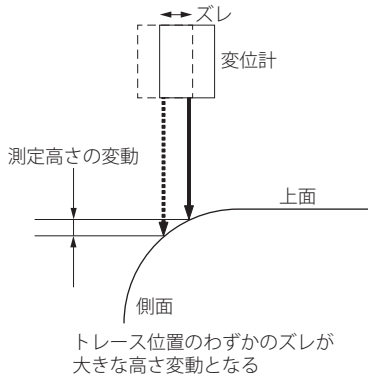


図13 レーザ変位計方式の問題点

4-4 斜方透過照明方式 世の中の技術に目を向けると、当時、ドイツに欠けに特化した検査機を製作するメーカーがあった。これは、透過照明によって稜線部のシルエットをカメラで撮像し、画像処理で検出する方式で、レーザ変位計方式と同じく製品表面の色ムラや汚れといった光学的ノイズの影響を受けないという特徴があった。ただし、この頃には、許容される欠けの検出サイズも数十μmオーダーとなっており、いかにしてわずかな凹凸を製品表面のうねり等と区別して検出するかが課題であった。そこで、微小欠けの検出技術として、我々は(1)円転がし方式、(2)自己比較方式を考案し、この問題を解決した。

(1) 円転がし方式

製品の稜線が直線または数式で近似できるような曲線で構成されていれば、その直線や曲線で表した欠けのない良好な製品の輪郭との差分を取ることで、欠けを認識することが可能である（図14）。しかし実際の製品にはうねりを持ったものや、加工のばらつきがあるため、近似した直線または曲線との差分を取ると、図15のように誤検出が発生

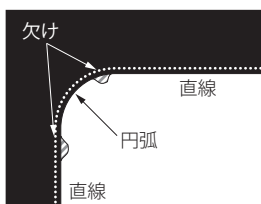


図14 欠けの認識

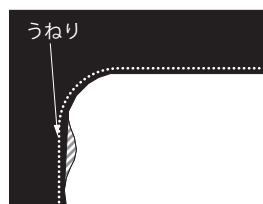


図15 うねりの誤検出

してしまう。そこで、任意の曲線を近似する方法として、円転がし方式を考案した。

これは、任意の曲線上に円を転がしたときの円との接点を直線で結ぶことで、曲線を短直線の集合として近似するもので、図16のようなうねりがあっても元の曲線を復元でき、誤検出を防ぐことができる。この方式を採用することにより、数式で近似できないような複雑な形状の稜線に発生する欠けを検出可能となった。

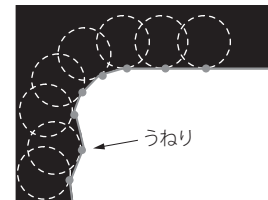


図16 円転がし方式

(2) 自己比較方式

円転がし方式で、任意の曲線状稜線に発生する欠けを検出することができたが、コーナー部が図17のような形状をしている製品もあり、これに適用すると誤検出するという問題があった。欠けのない良好な製品の画像を記憶しておき、それとの差分を取ることで欠けを検出する方法もあるが、製品1つ1つの形状が微妙にばらつくと、誤検出が発生してしまう。そこで、コーナー部は1つの製品中に複数箇所あること、製法上1つの製品中では形状がばらつかないことを利用し、1つの製品中の各コーナー部の画像の差分を取り、欠けを検出することとした（図18）。これにより、特殊形状のコーナー部をもつ製品への対応も可能となった。

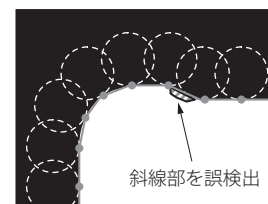


図17 コーナー部の誤検出



図18 自己比較方式

以上で述べた円転がし方式と自己比較方式は、共に技術的な応用範囲が広く、B型製品を始めとする他の当社グループ製品の欠け検査や異物検査装置に多数適用し、実績を上げている。

4-5 画像処理三次元測定方式 レーザ変位計方式では、変位計を一次元にトレースして高さを測定するという、二次元測定であったため、トレース位置ズレの問題があった。この問題の解決方法として、2000年代に入ってFA分野でも広がりを見せつつあった三次元測定に着目し、その適用に向けて技術開発に取り組んだ。

三次元測定の方式には様々なものがあるが、我々はその中から全焦点方式を採用した。この方式は、**図19**のようにカメラの焦点位置を変えながら多数の画像を撮像し、得られた画像の中から画素ごとに焦点の合った画像を見つけ出すことで、その画素位置の高さを測定するものである。こうして得られた各画素の高さを輝度として表した画像（三次元画像）に対して、**図20**のように画像上の1ライン毎に高さプロファイルを算出し、予め得られた欠けのないプロファイルと比較することで欠けを検出する。

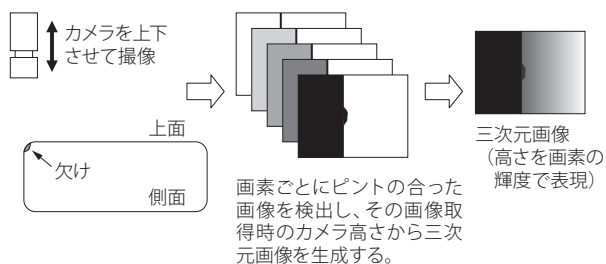


図19 全焦点法を用いた画像処理三次元測定方式

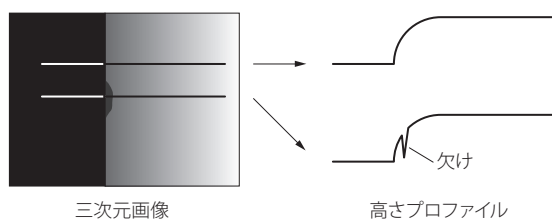


図20 1ライン毎の検出処理

本方式を用いた装置を製作し、欠けの検出能力を評価した結果、当初目標としたレベルの欠けを検出できることが分かった。ただ、現段階で欠けを検出可能なのは、単調な表面形状を持つ対象物上に発生したものに限定されており、更に活用範囲を広げるために、任意の面形状に適用可能な新しい技術開発に取り組んでいる。

5. 結 言

これまでに開発してきた計測技術について紹介したが、今後、当社の品質保証レベルの向上のためには、下記の分野への注力が必要と考えている。

(1) インラインモニタリング技術開発による「見える化」

これまでは「自動化」を念頭に置いて技術開発を進めてきたが、品質改善を進めるために製品の品質（出来映え）をモニタリングしたいというニーズも数多くある。ただし、モニタリングとは言っても、閉空間のため中の状態が見えない、高温のためカメラを入れて観察することができない、速度が速くて見るることができない、などの阻害要因があり、品質改善が進まないという事例が多数存在する。その阻害要因をブレークスルーし、「見える化」を実現する技術の開発を行う必要がある。

(2) アナログ処理技術の開発によるスピードへの対応

C型製品（長モノ型製品）では線速が1000m/分を超えるものもあり、目視での観察はもちろんのこと、通常のカメラでも表面状態等を連続的、かつ、全長に亘って観察することはできない。そのスピードの壁を越えるのは、画像処理のような複雑なデジタル処理では不可能であり、渦流センサのような処理を単純化したアナログ処理技術も必要となってくる。

(3) 三次元計測技術による直接形状測定

高精度化、複雑化が進むB型製品（ピース型製品）の品質保証を行うには、シルエット等の間接的な計測ではなく、三次元的に製品の形状を直接計測することで、正確な寸法等の情報を得なければならない。そこで、4章の欠け検出技術で述べた三次元計測技術を更に発展させ、実用化に結び付ける必要がある。

今後、上記技術を始めた開発を推進し、当社グループの品質保証レベルの更なる向上を図っていく。

用語集

※1 渦流探傷

対象物の表面に渦電流を流して、材料に発生する電磁誘導の変化から傷とその深さを検出する方法。

※2 光電池

光起電力効果を利用し、光エネルギーを直接電力に変換する機器。

※3 幾何パターンマッチング

良好モデルの幾何学的な形状を基に、画像中にその良好モデルがあるかどうかを探す処理。形状のみを基にするため、対象物の明暗の影響を受けにくい。

※4 同軸落射照明

照明をレンズと同軸上から照射する方式。レンズの軸に対して垂直な面が明るく光る。

参 考 文 献

- (1) 住友電気工業(株)、島津製作所、「条体又はパイプ中の磁性体異物検出方法」、特公昭54-020877 (1979-07-26)
- (2) 戸川契、「材料型製品における進化し続けるモノづくり (2006年度関西IE大会資料)」、(財)関西生産性本部関西インダストリアル・エンジニアリング協会、P111-126
- (3) 尾上守夫監修、「検査の自動化・システム化ハンドブック (初版)」フジ・テクノシステム、P1,178 (1990)
- (4) 江尻正員、「日本の画像処理の歴史」
<http://www10.plala.or.jp/ejihome/newpage28.htm>
(参照2010-09-27)
- (5) (財)精密工学会・画像応用技術専門委員会編、「画像処理応用システム (第1版)」、東京電機大学出版局、P261 (2000)

執 筆 者

濱田 徳亜 : 生産技術部 グループ長
計測制御技術を応用した設備開発に従事

