

難素材ウェブ検査の最前線 ～透明・光沢・凹凸素材の品質保証技術と将来展望～

株式会社中央電機計器製作所 研究開発部 畑野 昌洋



1. 現代製造業におけるウェブ素材の進化と、画像検査の新たな課題

エレクトロニクス、自動車、医療、パッケージングといった基幹産業において、「ウェブ」と呼ばれる薄いフィルム、シート、紙、繊維、金属箔などの带状素材は、製品の機能性や性能を決定づける重要な役割を担っています。近年、これらのウェブ素材は、リチウムイオンバッテリーのセパレーターフィルムに代表される極薄・高機能化、ディスプレイ用光学フィルムに求められる高度な光学特性、医療用滅菌パッケージに必須の完全無欠性など、かつてないレベルの高品質と多様性が求められるようになってきました。

例えば、EVの普及に伴い需要が急増しているリチウムイオンバッテリー製造では、電極やセパレーターといったウェブ素材の品質がバッテリーの性能や安全性に直結します。わずかな金属異物やピンホール、コーティングムラが、発火や性能低下の原因となりかねません。また、スマートフォンの高精細化を支えるディスプレイ用光学フィルムでは、表面のナノレベルの傷や内部の微細な気泡、異物が製品の外観や機能に致命的な影響を与えます。医療分野では、清潔な環境で製造される医薬・医療機器を包装するフィルムに、製造工程での異物混入やヒートシールの微細な不良がないことが、製品の安全性に不可欠な要件となっています。

このような進化の速いウェブ製造現場では、「製品の高性能化」と同時に、「生産速度の高速化」も絶えず追求されています。かつては数 m/分だったライン速度が、現在では数十 m/分、あるいはそれ以上になることも珍しくありません。このような高速で多様なウェブを扱う中で、全数検査によって品質を保証することは、製造メーカーにとって避けては通れない、しかし極めて困難な課題となっています。

特に、近年のウェブ素材の高機能化に伴ない、以下

のような特性を持つものが増加しており、従来の標準的な画像検査システムでは対応が難しくなっています。

- ・透明素材：PET, PP, PIなどの各種機能性フィルム、医療用透明シートなど。表面や内部の異物、気泡、ピンホール、シワ、濃度ムラなどの検出が課題。透過光や特定の散乱光を捉える高度な光学技術が必要です。
- ・光沢素材：アルミ箔、蒸着フィルム、一部のラミネートフィルムなど。強い正反射光が発生するため、ハレーションを抑えつつ、表面の傷や異物を鮮明に捉える照明・撮像技術が不可欠です。
- ・凹凸・テクスチャ素材：不織布、特殊加工紙、エンボス加工フィルムなど。素材そのものが持つ正規の模様や凹凸が欠陥と誤認されやすく、欠陥とテクスチャを識別する高度な画像処理が求められます。

これらの「難素材」に対する画像検査は、依然として多くの現場で目視検査に頼らざるを得ない状況が続いています。しかし、目視検査は検査員の熟練度に依存し、検査精度にばらつきが生じやすいことに加え、長時間の集中による疲労から見逃しのリスクが高まります。加えて、製造業における人手不足は年々深刻化しており、検査員の確保や育成も大きな負担となっています。

このような背景から、ウェブ製造業界では、素材の種類や表面状態に左右されず、人手に頼ることなく安定的に、かつ高速で欠陥を検出できる自動画像検査システムへのニーズが、2025年、そしてその先に向けて、かつてないほど高まっているのです。

2. 「見たいもの」を「見える」状態にする：最適な光学条件の設計技術

画像検査システムの第一歩は、「見たいもの」、つまり検出したい欠陥を、カメラが「見える」状態にすることです。どんなに高性能なカメラや画像処理アルゴ

リズムを用いても、撮像された画像に欠陥情報が写っていないければ検出は不可能です。特に、透明、光沢、凹凸といった難素材の検査においては、この「光学条件の最適化」が、検査システムの性能を決定づける最も重要な要素となります。

株式会社中央電機計器製作所(以下、弊社)では、長年にわたり培ってきた光学技術と画像処理の深い知見に基づき、お客様のウェブ素材とその特性、そして検出対象とする欠陥の種類(サイズ、形状、色、発生要因など)を綿密にヒアリング・分析することから始めます。そして、素材サンプルをお預かりし、ラボレベルでの詳細な評価を通じて、欠陥が最も際立つ最適な光学条件を追求します。

ここで重要となるのが、「最小検出サイズに応じた分解能の最適化」です。お客様が「これ以上のサイズ、あるいはこのような種類の欠陥は見逃したくない」という最小検出サイズを明確にすることで、それを捉えるために必要な空間分解能が決まります。この分解能要件に基づき、適切なカメラの画素数(解像度)、レンズの選定(倍率、開口数、歪み特性)、そしてカメラとウェブ間の距離などが最適化されます。単に高画素なカメラを使えば良いというわけではなく、ライン速度、視野範囲、データ量、コストといった様々な要素を考慮し、トータルのシステムとして最適な分解能を実現するための光学系を設計します。

また、素材特性や欠陥の種類に合わせて、以下のような多様な照明技術と撮像方法を組み合わせます。

- ・透過照明：透明フィルム内部の気泡や異物、ピンホールなどの検出に有効です。均一な光をウェブの背面から照射し、欠陥による光の散乱や吸収を捉えます。
- ・落射照明：ウェブの表面に光を照射します。光沢面には斜め方向からのローアングル照明(側方照明)を用いて、表面の傷や微細な凹凸による散乱光を捉える方法や、拡散照明を用いて表面の色ムラなどを捉える方法などがあります。
- ・暗視野照明：特殊な角度から光を照射し、正常な平坦面からの正反射光はカメラに入らないようにしつつ、

表面の傷や異物による散乱光だけをカメラに捉える手法です。光沢素材の表面検査に特に有効です。

- ・構造化照明：特定のパターン(ラインやグリッドなど)の光をウェブ表面に照射し、そのパターンが欠陥部でどのように歪むかを解析することで、凹凸や3次元的な欠陥を検出します。凹凸のあるテクスチャ素材の検査にも応用可能です。

- ・分光照明・フィルタリング：特定の色ムラや物質の検出、あるいは特定の波長領域の光をカットすることでノイズを減らすために、特定の波長の照明や光学フィルターを使用します。

- ・偏光照明・フィルタリング：透明フィルムの内部応力や、特定の配向性を持つ素材の検査に有効な場合があります。

弊社は、これらの要素技術を熟知しており、お客様の「この素材のこの欠陥を見たい」という具体的なニーズに対し、膨大な知見と実験に基づいた最適な光学系をカスタムで設計・構築します。これにより、「難素材だから見えない」という課題を根本から解決し、検査に必要な高品質な画像データ取得を実現します。

3. 欠陥を「正しく判断」する：ルールベースとAIの柔軟な画像処理アルゴリズム

光学系によって欠陥情報が適切に捉えられた画像が得られたとしても、次に必要となるのは、その画像の中から目的の欠陥を正確に見つけ出し、正常な部分やノイズと区別する画像処理アルゴリズムです。ウェブは高速で連続的に流れるため、この画像処理もリアルタイムで行われ、かつ高い精度が求められます。

弊社では、多様なウェブ検査のニーズに応えるため、ルールベース画像検査とAI画像検査(深層学習)の両方に対応し、検査対象の特性や求められる精度、発生する欠陥の種類に応じて最適なアプローチを選択・組み合わせます。

ルールベース画像検査は、定義が明確で、形状や輝度、色などに一定の特徴がある欠陥(例：大きな異物、明確なピンホール、基準パターンからの一定のズレなど)の検出に有効です。事前に設定された閾値やフィルター、パターンマッチングなどの画像処理アルゴリズムに基づいて高速に処理を行います。シンプルかつ高速な検査が可能であり、安定した環境下で発生する比較的単純な欠陥の検出には非常に効率的です。また、処理内容が明確であるため、結果の解釈やデバッグも比較的容易です。

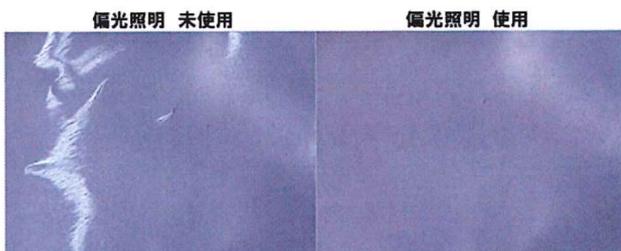


図1 偏光照明撮影例

一方で、近年のウェブ素材の多様化や欠陥の複雑化、あるいは凹凸やテクスチャといった背景の影響により、ルールベースだけでは対応が難しいケースが増えていきます。このような状況で威力を発揮するのが AI画像検査です。

AI(深層学習)画像検査は、人間が視覚的に判断している欠陥の特徴を、大量の画像データから自動的に学習し、複雑な背景パターンや、形状・輝度が一定しない多様な欠陥を高精度に識別・分類することが可能です。

特に、AI画像検査においては、学習に用いるデータによって「教師あり学習」と「教師なし学習」のアプローチがあります。弊社は、これらの教師あり学習、教師なし学習のいずれの AIアプローチにも柔軟に対応可能であるのが大きな強みです。

・教師あり学習：良品画像に加え、様々な種類の不良品画像(欠陥の種類ごとにラベル付けされた画像)を大量に用意して AIモデルを学習させる方法です。これにより、特定の欠陥の種類を高精度に識別・分類することが可能になります。「これは異物」「これは傷」といった明確な分類が必要な場合に有効です。

・教師なし学習：特に不良率が極めて低いウェブ製造ラインにおいて非常に有効です。教師なし学習では、大量の良品画像のみを用いて AIモデルを学習させ、「正常な状態」を定義します。そして、その「正常な状態」から大きく外れたパターンを「異常(欠陥)」として検出します。全ての不良品パターンを網羅的に収集することが難しい場合や、未知の欠陥が発生する可能性も考慮したい場合に適しています。良品画像さえ用意できれば学習モデルを構築できるため、不良発生頻度が低く、不良画像の収集にコストがかかる製造ラインで迅速に検査を導入したい場合に強力な選択肢となります。

弊社は、お客様のウェブ製造ラインの不良発生状況、

データの蓄積状況、求められる検査精度、必要な欠陥分類のレベルなどを総合的に判断し、ルールベース、教師あり AI、教師なし AIの中から最適なアルゴリズム、あるいはこれらの組み合わせを提案・開発します。LabVIEWをプラットフォームとして活用することで、多様な画像処理アルゴリズムを柔軟かつ迅速に開発・実装し、お客様固有の複雑な検査ニーズにもきめ細やかに対応します。これにより、透明、光沢、凹凸といった難素材上の、ルール化できない微妙な欠陥や、テクスチャパターンに隠れた欠陥も、高精度かつ安定的に検出することを可能にします。

4. 検査精度を支える基盤 ：高精度なオーダーメイド搬送装置

ウェブの画像検査システムにおいて、光学系と画像処理アルゴリズムが「目と脳」だとすれば、ウェブを検査エリアで安定した状態に保つ搬送装置は、いわば「背骨」であり、その性能を最大限に引き出すための基盤です。どんなに優れた光学系で欠陥を捉え、高性能なアルゴリズムで処理を行っても、検査中にウェブが振動したり、速度が不安定だったり、蛇行したりしては、鮮明な画像は得られず、誤検出や見逃しに繋がります。

特に、薄いフィルムや柔らかい不織布、あるいは高速で搬送されるウェブの場合、素材自体の特性や空気抵抗、駆動系のわずかなブレなどが搬送状態の不安定化を招きやすくなります。また、ウェブの幅や厚みは製品によって異なり、既存の製造ラインに組み込むためには、そのレイアウトや仕様に合わせた搬送システムが必要です。汎用的な搬送装置では、こうした個別の要件に対応しきれない場合があります。

弊社は、単に画像検査システムを提供するだけでなく、検査対象物の搬送装置の特性を把握したうえで、最適なシステムを提供できることが大きな強みです。

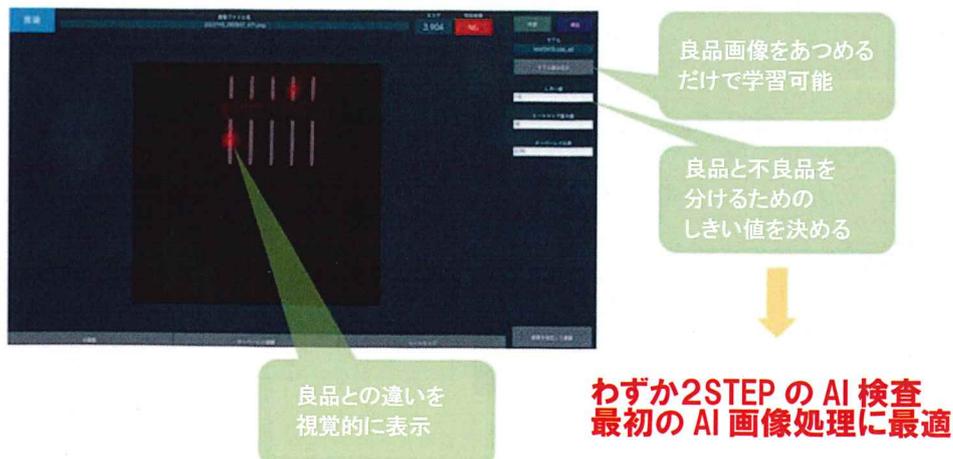


図2 教師なし学習ソフトウェア

ウェブ素材の種類(伸びやすさ、剛性、表面状態など)、ウェブの幅、ライン速度、必要な検査精度、設置スペース、そしてクリーンルーム対応などの環境要件を詳細に伺い、最適な設計を協力会社とともにを行います。弊社が得意とする高精度直交ステージ開発で培われた精密なメカニクス制御技術は、この搬送装置開発において大きな優位性となります。サブミクロンレベルでの位置決め精度が求められる直交ステージ制御技術を応用することで、ウェブの検査エリアでの位置決め精度や安定性を飛躍的に向上させることが可能です。光学系、画像処理、そして高精度な搬送機構が一体となって機能することで、透明、光沢、凹凸といった難素材のウェブ検査において、理論限界に近い高精度かつ安定した検査性能を実現します。

5. 総合力で応える、難素材ウェブ検査ソリューション

弊社が提供する画像検査ソリューションは、単一の要素技術に依存するものではありません。「お客様のウェブ素材と欠陥を正確に『見る』ための最適な光学条件の設計・構築」「ルールベースから教師あり・教師なし AIまで、ウェブ素材と欠陥特性に合わせて最適なアルゴリズムを選択・開発する柔軟な画像処理技術」「検査精度を最大限に引き出すための、お客様のラインに合わせたオーダーメイドの高精度搬送装置開発」という、三位一体の総合力によって、難素材ウェブ検査の課題解決に貢献します。

この総合力により、お客様は以下のような具体的なメリットを享受できます

・検出精度の劇的な向上：目視検査では見逃していた微

細な欠陥や、テクスチャに紛れた欠陥も高精度に検出できます。過検出も抑制し、検査結果の信頼性が向上します。

・歩留まり向上とコスト削減：早期に欠陥を検出することで後工程への流出を防ぎ、製品不良による廃棄ロスや顧客からのクレーム、リコールといったコストを削減し、製造ライン全体の歩留まりを向上させます。

・生産性向上：高速なインライン検査により、生産速度を落とすことなく全数検査が実現します。人手による検査が不要になることで、人員をより付加価値の高い業務に振り分けることが可能です。

・品質の安定化とデータ活用：検査基準が属人化せず、常に安定した品質管理が可能になります。また、収集された定量的な検査データを生産プロセスへのフィードバックや品質改善活動に活用できます。

・将来への対応力：新しい素材や製品が開発された場合でも、光学条件、アルゴリズム、搬送システムを柔軟に再設計・最適化することで、変化するニーズに継続的に対応可能です。

6. おわりに

2025年以降も、ウェブ素材の高機能化・多様化、そして生産速度の高速化はさらに進むと考えられます。それに伴い、従来の検査手法では対応できない難素材検査の重要性はますます高まるでしょう。

弊社は、長年の経験と最新技術(AIを含む)を組み合わせ、お客様固有の「難しさ」に真摯に向き合います。透明・光沢・凹凸といったウェブ素材の検査でお困りの皆様、あるいは現在の検査精度や速度に限界を感じている皆様、ぜひ一度、株式会社中央電機計器製作所にご相談ください。貴社の製造現場とウェブ素材に最適な、まさに「オーダーメイド」の画像検査ソリューションをご提案し、品質保証と生産性向上に貢献することをお約束いたします。貴社の挑戦を技術で強力にサポートいたします。

<問い合わせ先>

株式会社中央電機計器製作所 カスタマーサポート
〒534-0013大阪府都島区内代町2-7-12
TEL: 06-6953-2366 FAX: 06-6953-2414
HPアドレス: <https://www.e-cew.co.jp/>



図3 超大型多軸ステージ