
光切断法による3次元画像を用いた外観検査技術

Three Dimensional Visual Inspection Technology Based on Light-Section Method

中川 啓二* 松尾 啓史*
Keiji NAKAGAWA Hirofumi MATSUO

要 旨

光切断法による3次元計測の理論は古くから知られているが、エリアカメラのフレームレートの限界や、撮像画像を高さに演算する処理に時間が掛かるなどの理由で、産業用の外観検査装置に応用するには、高価なカメラやコンピュータが必要となり、検査装置としての実用化が困難であった。しかしながら近年のカメラやコンピュータなどのデバイスの進歩に伴い、実用化されてきている。

これからは、従来の2次元画像による外観検査に加えて、3次元画像での外観検査の市場が大きくなることが予想され、より難易度の高いワークの3次元検査技術が求められる。我々は、3次元画像を用いた外観検査アルゴリズム設計に必要な技術を開発した。その特徴は、3次元画像から得られた形状を平滑化し、平滑化前の高さとの差分から表面に存在する微小な凹凸を抽出する技術と、3次元画像におけるマスター画像と検査品画像の平面座標を精度良く高速に一致させる技術から成る。これらの技術により、高速、高精度な外観検査を実現した。

ABSTRACT

Theory of the three-dimensional measurement by using light-section method was well known, but it was difficult to apply as the inspection system for industrial use due to the cost of high performance camera and PC. But in the recent years, these kind of the measurement systems become realized according to the evolution of camera and computer technology.

In the visual inspection market, needs of three-dimensional measurement will improve in addition to the two-dimensional measurement. We developed the technologies which needs to design the visual inspection algorithm for three-dimensional images. They consists of the technology to extract the small defect on the surface by compensating the smoothed surface structure of target, and the technology to realize high speed and high accuracy surface matching between reference and target images.

* リコーエレメックス株式会社 技術統括センター
Technical unification, RicohElemex Corporation

1. 背景と目的

金属部品や樹脂成型品、ゴム部品など（以下、「ワーク」と呼ぶ）の外観検査は、一般的に検査員による目視や触診によって行われているが、各検査員による良否判定のばらつきや、疲労などによる検査漏れが発生すると考えられており、検査装置による自動化が求められている。

外観検査装置は、ワークの表面凹凸を、照射する光源によって発生する陰影の変化として検出する方法を一般的に用いているが、凹凸が微小であるなど陰影が変化しにくいワークも数多く存在し、今後の外観検査技術の方向性として、ワークの表面形状をそのまま3次元画像として測定し、検査する技術が拡大すると予想される。

3次元画像での検査技術を獲得することを目的として、本論文では、主に3次元画像での表面の微小凹凸を検出する技術や、立体形状マッチングを行うためのマスター画像と検査品画像の平面座標を精度良く高速に一致させる技術について説明する。

2. 装置構成と測定原理

2-1 装置構成

3次元画像の取得方法としては、光切断法や位相シフト法、ステレオマッチング法等、様々な方法があるが、我々は光切断法を採用した¹⁾。

光切断法を選択した理由は、装置構成がライン光源とエリアカメラと搬送機構のみで構築可能なこと、さらに光切断用の3Dカメラが商品化されており、容易に検証環境が構築できるためである。

Fig.1に我々の検証用の装置構成例を示す。主要要素としては、搬送部としての搬送ステージ、撮像部として、ステージの水平面など基準面に対して垂直に配置したライン状の光（以下、「輝線」と呼

ぶ）を照射するライン光源、およびエリアカメラによって構成される。

撮像部は、ライン光源の照射方向とエリアカメラの視野方向との間にある角度（頂角 θ ）を持たせて配置され、搬送部は、ワークを保持しモータなどの回転機構によってワークを移動させる。

一定間隔の長さを同期しながら撮像するために、搬送部に取り付けたエンコーダからのパルス信号をシャッター信号として入力することで、ワーク全体を連続撮像することを可能にしている。

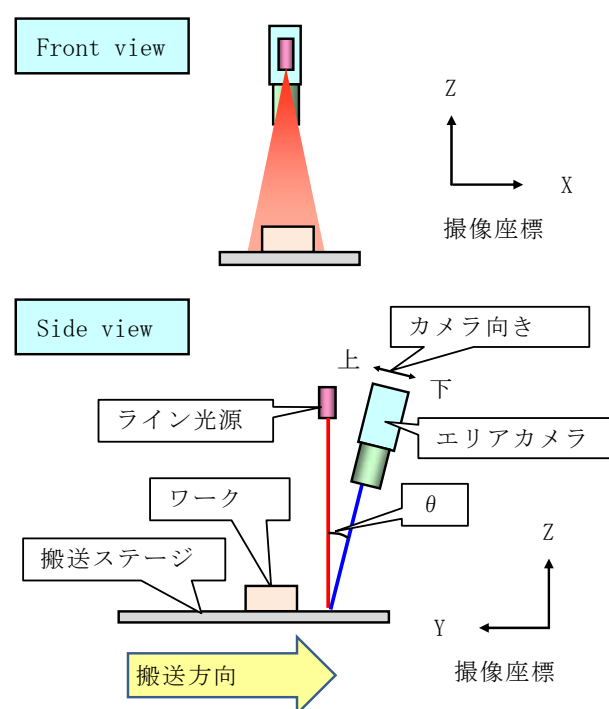


Fig.1 Structure of the inspection system.

ここで、ライン光源の照射方向に対するエリアカメラの視野方向との角度（頂角 θ ）は、高さ演算において重要なパラメータとなる。 θ が大きいくほど、表面の凹凸形状変化による、輝線位置の変化が視野範囲座標上（Fig.1ではY方向）で大きくなり、高さ演算値の分解能が向上するが、一方で輝線がワーク表面の凹凸によって、視野範囲の死角となり、輝線位置を取得できなくなるためである。

よって θ は、ワークの凹凸形状と、カメラの視野範囲を詳細に観察して決定する必要がある。

2-2 3次元画像の生成

光切断法による3次元画像の生成方法は、ライン光源から輝線を照射されたワークをエリアカメラで撮像した画像（以下、「輝線画像」と呼ぶ）を撮像することから始まる。

Fig.2は、かまぼこ型の湾曲形状を持ったワークの輝線画像だが、ライン光源による輝線がワークの表面形状に添って湾曲しており、輝線画像上に写る輝線の縦方向（Y方向）の位置が高いほど、ワークの高さ寸法が高いことを表している。

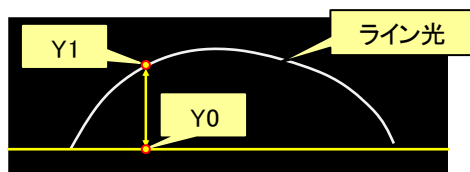


Fig.2 Laser line image.

撮像した輝線画像から3次元画像を生成するには、輝線画像の縦方向（Y方向）の基準座標（Y0）と輝線の位置座標（Y1）との距離（ ΔY ）と θ から、式(1)を演算することで、高さ量（Z）を求めことができる。

$$z = (y1 - y0) / \sin(\theta) \quad (1)$$

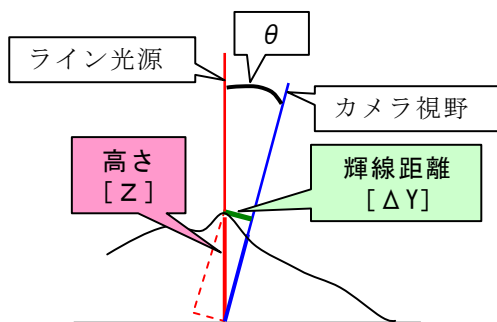


Fig.3 Principle of Light-section method.

式(1)の演算を輝線画像の横方向（X方向）の全座標に行うことで、1フレームで撮像した輝線画像に対する、1ライン分の3次元データが生成される。

Fig.4に示すように、各フレームの輝線画像にこの演算を行い、3次元データをワーク搬送方向に全

フレーム分つなげることで、ワーク全体の3次元画像が生成できる。

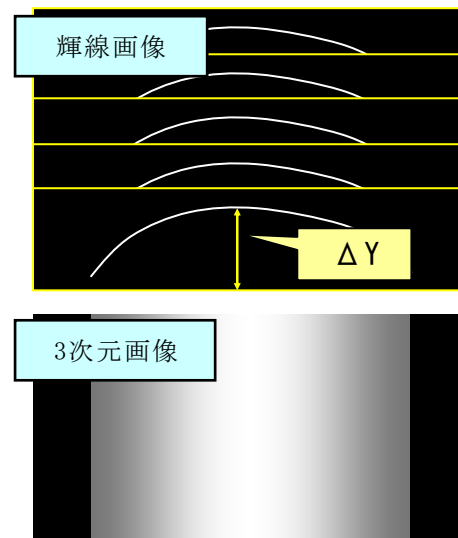


Fig.4 Three-dimensional image Converted from Laser Line Image.

3. 不良凹凸の検査技術

3-1 不良凹凸の検査フロー

生成した3次元画像には、ワークの湾曲形状、ロゴマークやデザイン上の模様や製造国表示の文字（Made in JAPANなど）が含まれている。これら湾曲形状やデザイン上の凹凸は良品範囲内の情報であり、不良としての凹凸情報とは区別する必要がある。

Fig.5とFig.6に、ワーク固有の湾曲形状と、文字ロゴ（良品凹凸）の例を示す。

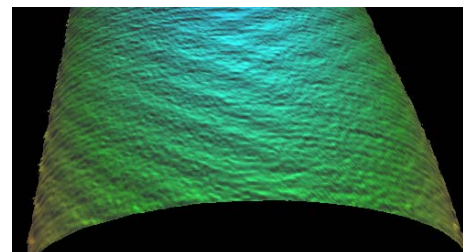


Fig.5 An example of curved three-dimensional image.



Fig.6 Examples of correct patterned indented surface.

Fig.7に、概要として不良凹凸の検査フローを示す。

- (1) マスターと検査品を光切断法で撮像し、3次元画像を生成する。
- (2) 両方の3次元画像に対して湾曲補正処理を行い、ワークの湾曲形状を除去し、表面凹凸のみに変換した画像（以下、「オフセット画像」と呼ぶ）を生成する。

このオフセット画像に存在する表面凹凸には、良品凹凸と不良凹凸が混在しているため、マッチング処理を行い、不良凹凸を検出する。

- (3) 高速マッチング処理において、マスター画像と検査品画像の基準点を取得し、場合によっては補助基準点を生成し、ブロック単位でのズレ量算出を行う。

その後、近傍の範囲をより精密に一致させるためのズラシ量を探索して求める。

最後に、求めたズレ量とズラシ量による、マスターと検査品のオフセット画像での対応座標において差分処理を行い、閾値によって不良凹凸候補を検出する。

- (4) 不良凹凸候補のノイズ除去を行い、不良凹凸を判別した、検査結果画像を出力する。

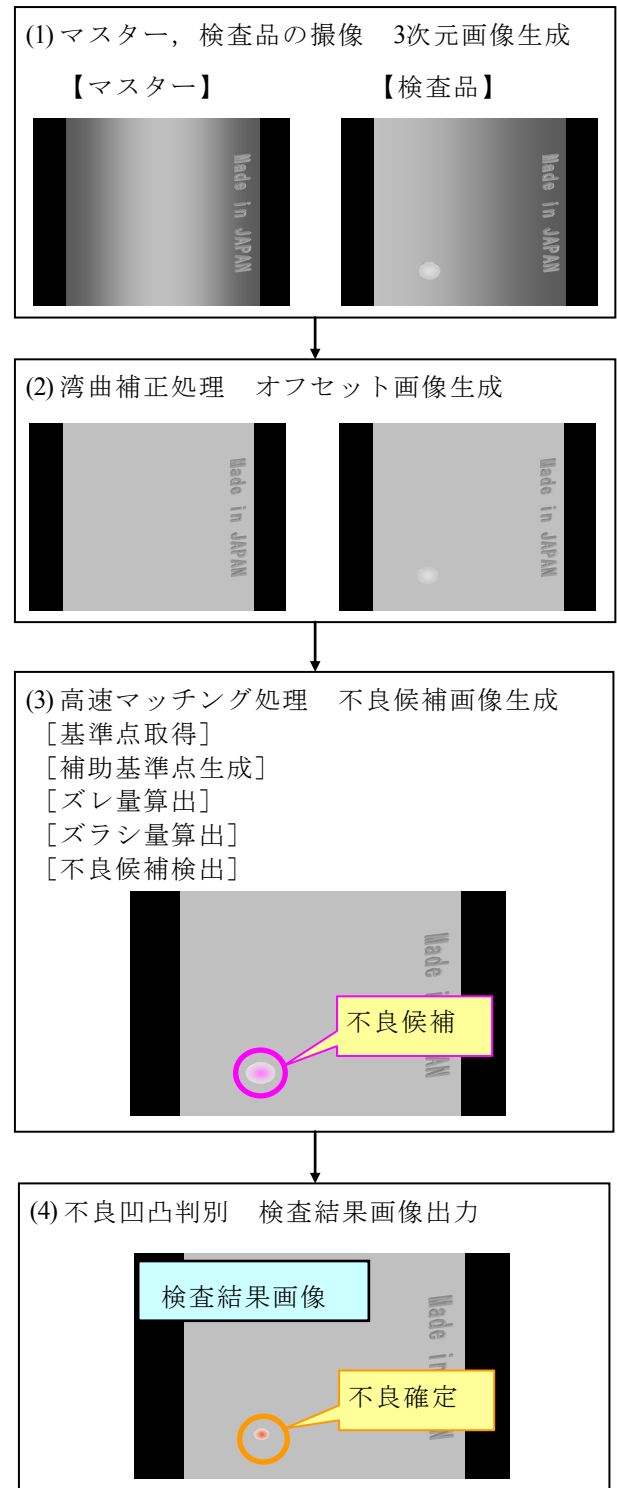


Fig.7 Inspection flow.

3-2 湾曲補正処理

生成した3次元画像から、湾曲成分のみの平滑化画像を用意した後、差分してオフセット画像を生成することで、表面凹凸のみに変換することが可能となる。

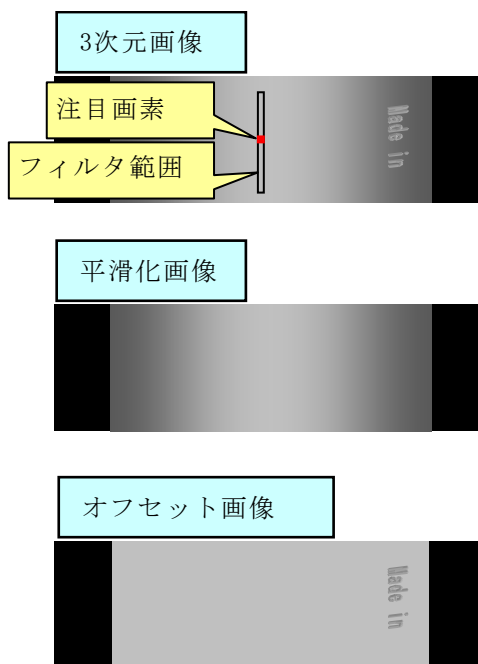


Fig.8 Processing of curvature offset.

Fig.8は、湾曲補正処理の具体的な例であり、その手順を示す。

- (1) 3次元画像に対して、縦方向（Y方向）に長い範囲の平均値フィルタなどを適用し、ワークの湾曲成分のみに変換した平滑化画像を用意する。
- (2) この平滑化画像と、元の3次元画像の差分処理を行い、表面凹凸成分のみに変換したオフセット画像を生成する。

この平滑化処理でのフィルタの縦方向（Y方向）の長さは、ワークの搬送時に発生する振動やうねりによる高さ方向（Z方向）の変化と、検出すべき凹凸不良の縦方向（Y方向）の大きさによって決定する必要がある。

3-3 高速マッチング処理

生成したオフセット画像に存在する表面凹凸から不良凹凸候補を検出する方法として、マスター画像と検査品画像の比較によるマッチング方式を採用するが、そのためにはワークの搬送時に発生する振動やうねりによる平面方向（X, Y方向）の変動量を補正し、両画像に写るワークの位置を一致させる必要がある。

3-3-1 基準点取得

マスター画像と検査品画像の両方に存在する特徴的な凹凸形状（文字ロゴや模様の一部など）の座標を基準点として複数取得する（Fig.9参照）。

Table 1は取得した基準点の座標データであり、以後の補助基準点の生成用に保存しておく。

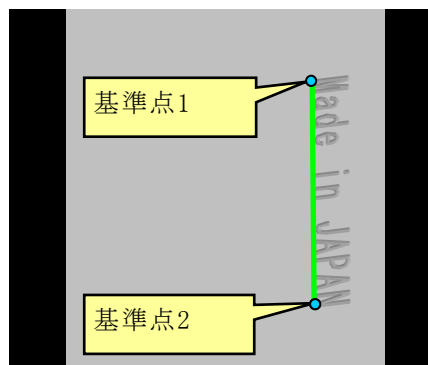


Fig.9 Examples of reference point.

Table 1 Reference points of a master image and a target image.

| 座標値 | マスター画像 | | 検査品画像 | |
|------|--------|-----|-------|-----|
| | X | Y | X | Y |
| 基準点1 | mx1 | my1 | tx1 | ty1 |
| 基準点2 | mx2 | my2 | tx2 | ty2 |
| ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ |
| 基準点n | mxn | myn | txn | tyn |

3-3-2 補助基準点生成

基準点は、画像上に多く散らばっている方が、マスター画像と検査品画像の一致精度が上がるが、数が少ない場合は、取得できている基準点から補助基準点を生成する必要がある。

Fig.10は、基準点が右側に偏って取得された時の補助基準点生成の具体的な例であるが、基準点1と2を通る直線上から、中点などのY座標の点を右点1として生成し、右点1から基準点1と2を通る直線に対する垂線の、左方向に一定距離を離れた点を左点1として生成し、右点1と左点1の中点を中点1として生成する。

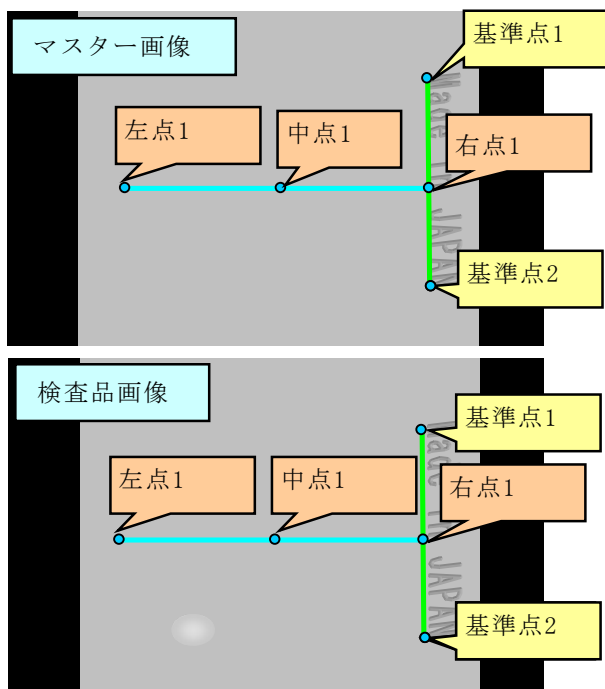


Fig.10 Examples of auxiliary reference point.

この補助基準点の生成での右点nは、画像に写るワークの長さ (Y座標距離) に対し、等間隔になる値が望ましく、また左点nは、画像上に写るワークの幅 (X座標) に対し、右点側に対して線対称となるような点が望ましい。

Table 2は、マスター画像と検査品画像の各補助基準点の座標データを、以降のズレ量算出用に保存しておく。

Table 2 Auxiliary reference points of a master image and a target image.

| 座標値 | マスター画像 | | 検査品画像 | |
|-----|------------------|------------------|------------------|------------------|
| | X | Y | X | Y |
| 右点1 | mr _{x1} | mr _{y1} | tr _{x1} | tr _{y1} |
| 中点1 | mc _{x1} | mc _{y1} | tc _{x1} | tc _{y1} |
| 左点1 | ml _{x1} | ml _{y1} | tl _{x1} | tl _{y1} |
| ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ |
| ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ |
| 右点n | mr _{xn} | mr _{yn} | tr _{xn} | tr _{yn} |
| 中点n | mc _{xn} | mc _{yn} | tc _{xn} | tc _{yn} |
| 左点n | ml _{xn} | ml _{yn} | tl _{xn} | tl _{yn} |

3-3-3 ズレ量算出

保存しておいたマスター画像と検査品画像の基準点および補助基準点についてX, Y座標の差分を、基準点のズレ量として算出する。

次に、算出した基準点のズレ量を利用して、検査品画像をマスター画像の座標に一致させるための、ズレ量を算出するが、検査品画像を1画素単位で処理してしまうと演算数が膨大になるため、ブロックごとに分割して処理することで、演算数を削減した。

高速化処理の工夫のために、各ブロックのズレ量算出は、独立に演算が可能になるようにプログラミングすることで、並列演算を可能にしている。

Fig.11は、ズレ量算出の具体的な例でありその手順を示す。

- (1) マスター画像, 検査品画像をブロックに分割し、各ブロックの中心座標を求める。
- (2) 各ブロックの中心座標の位置に応じたズレ量を、周辺にある基準点間のズレ量 (X方向, Y方向) から線形変換することで算出する。

また、このズレ量算出でのブロックの大きさは、ワークの搬送時に発生する振動やうねりによる平面方向 (X, Y方向) の変動量によって、大小や縦横比を決定する必要がある。

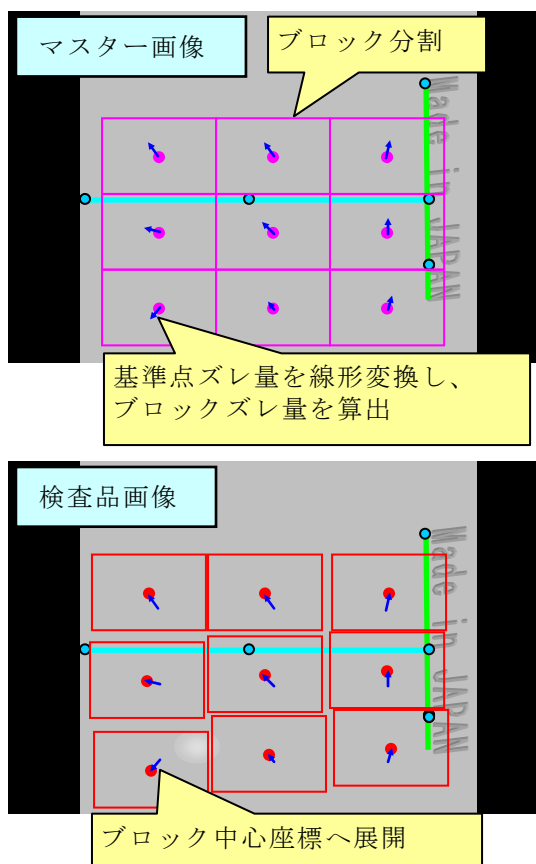


Fig.11 Shift calculation of blocks.

3-3-4 ズラシ量探索, 不良凹凸候補検出

ズラシ量は、ズレ量を反映したブロックを細かいブロックに分割し（小ブロックと呼ぶ）、その小ブロック単位にて探索をすることで求める。

求めたズラシ量が反映された座標において両画像の差分を行い、閾値以上の凹凸を不良候補として検出する。

Fig.12は、ズラシ量算出と不良候補検出処理の具体的な例であり、その手順を示す。

- (1) 検査品画像の演算対象となる小ブロックの座標を固定し、マスター画像側の小ブロックの中心座標と、絶対差分合計値の初期値を代入する。
- (2) マスター画像側のある探索座標において、小ブロック内の各画素同士を絶対差分した合計を求め、1つ前に求めた絶対差分合計値より小さい場合は、今回求めた絶対差分合計値が次の比較対象となるように更新し、同時に探索座標から

マスター画像側の中心座標を差分した移動量（ズラシ量）を更新する。

- (3) 次の探索座標に移動する。
- (4) 上記(2)～(3)の処理を繰り返し、探索が終了した時の絶対差分合計値を最小絶対差分合計値とし、その時のズラシ量を保存する。
- (5) 同様に、マスター画像側の小ブロック座標を固定し、検査品画像側の探索範囲を移動させながら、最小絶対差分合計値を求め、ズラシ量を保存する。
- (6) 上記の(4)と(5)で求めた、最小絶対差分合計値が大きい方のズラシ量を、最終ズラシ量として確定する。
- (7) 最終ズラシ量を用いた検査品画像の画素値と、マスター画像の画素値を差分して閾値と比較し、閾値以上の差分を持つ画素を不良凹凸候補領域として検出する。

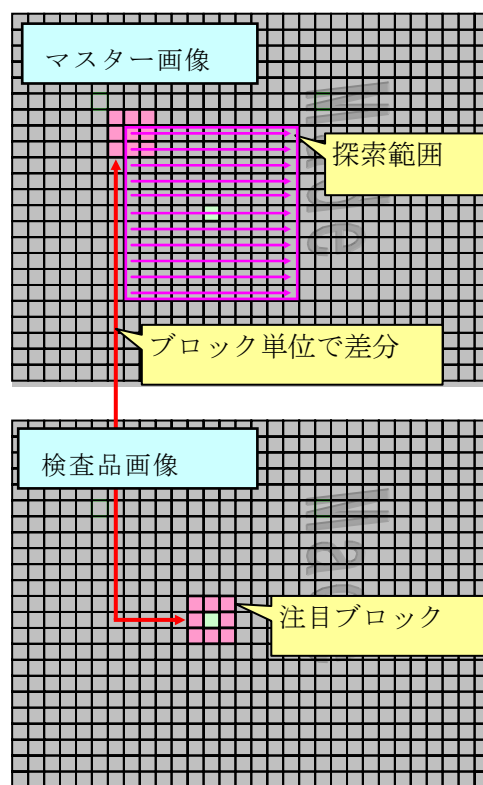


Fig.12 An example of the search and the subtraction by a pair of small blocks.

このブラシ量算出での小ブロックの大きさや探索範囲は、ズレ量算出時のブロックの大きさや、算出したズレ量の大きさによって決める必要がある。

また、高速化処理の工夫のために、小ブロック単位で独立に演算が可能になるようにプログラミングすることで、並列演算を可能にしている。

3-4 不良凹凸判別処理

マッチング処理で検出した不良凹凸候補領域には、孤立した微小な領域などノイズが含まれており、また不良凹凸形状が不均一であるため部分的、不連続にしか検出できていない領域も存在する。

これらの領域から不良凹凸を確定するために、膨張・収縮処理や面積などの特徴量を用いた判別処理を行い、検査結果画像を出力する。

4. 成果

上記に説明した一連の不良凹凸の検査フローでの検査方法を用いることで、湾曲形状あるワークの3次元画像を用いた立体マッチング検査が可能となった。

我々が検証した装置の凹凸検出能力は、高さ方向（Z方向）に最大25mm程度湾曲したワーク表面にある、高さ0.5mm～1.0mm程度の良品凹凸と高さ閾値が0.3mmでの不良凹凸の判別が可能であり、その際の高さ分解能は0.02mm程度であった。

また、高速マッチング処理におけるアルゴリズムの工夫点として、あらかじめズレ量算出での座標一致を行うことにより、ブラシ量算出での小ブロックの探索範囲を小さくし、演算数を減らすことができた。さらに、CPUマルチスレッドおよびGPUによって並列演算処理を可能にした。その結果、マッチング処理をCPUシングルスレッドで実行した処理時間が約33秒であったのに対し、約2.0秒に短縮することができた。Table 3に、処理速度比較時の動作環境を示す。

Table 3 Test environment.

| | |
|------|-----------------------------------|
| 検査画像 | 1536×16380×16bit×2枚 (マスター/検査品) |
| OS | Windows7 ultimate |
| CPU | Intel core i7 x990 3.46GHz |
| メモリ | 6GB |
| GPU | nVIDIA GTX690×2枚 |

5. 今後の展開

今まで外観検査が困難であったワークに対して、本テーマで開発した技術をさらに磨いて、高速、高精度な3次元検査技術を発展させたい。

参考文献

- 1) 大池裕輔ほか: 光切断法による高精細・実時間3次元撮像システム, 映像情報メディア学会誌 Vol.57, No.9, pp.1149-1151, 映像情報メディア学会 (2003).