

(解説)

## タイヤ金型情報を用いたタイヤ外形形状認識技術

### Tire-Surface-Profile Inspection System Using Information of "Tire KANAGATA (Tire Mold) Design"



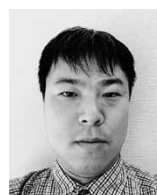
荒木 要\*1  
Kaname ARAKI



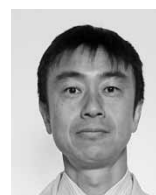
迫田尚和\*1  
Naokazu SAKODA



高橋英二\*2 (博士(工学))  
Dr. Eiji TAKAHASHI



武田 玄\*3  
Hajime TAKEDA



村上将雄\*4  
Masao MURAKAMI



松原義明\*4  
Yoshiaki MATSUBARA

Kobe Steel has developed an inspection system based on a new concept for inspecting tire surface-profile. This system has two features: the first is its data processing method based on a "Tire KANAGATA (Tire Mold) Model" to statistically reduce variations in shape inspection data, and the second is its human-machine cooperative interface which enables the construction of "Tire KANAGATA (Tire Mold) Model" efficiently and flexibly even for newly designed tires. Being provided with these features, the inspection system has realized no oversight of defects, minimum over-detection and high-efficiency of teaching work, which has enhanced the convenience of the automatic inspection system.

まえがき = 自動車のタイヤは走行安定性や静粛性に大きな影響を及ぼす。このため、タイヤメーカーや自動車メーカーは目視や自動検査装置により、バランスや均一性(ユニフォミティ)の検査、異物混入確認を行っている。さらに、近年ではその品質に対する要求は厳しくなっており、タイヤ外形形状検査も重要な項目の一つになっている。

タイヤの外形形状検査では、ゴムや化学繊維、スチールコードなど各種材料の積層状態の不均一性に起因する凹凸形状を高速かつ高精度に検出する必要があることから、自動検査装置の開発や実用化が広まっている。例えば、欧米での検査装置の実用化事例<sup>1), 2)</sup>、日本での高速形状計測技術<sup>3)</sup> および外観検査自動化<sup>4)</sup> などの取り組みが報告されている。

そうしたなか、世界のタイヤ生産量(ゴム重量)は着実に伸びており、自動車を中心としたタイヤ生産量は2020年には2015年度比で15%程度増加すると当社では推定している。生産量が増大するなかで、タイヤメーカー工場の生産性向上に貢献するためには、出荷検査装置のさらなる高速化が必要である。そこで当社では、毎秒4,096回的高速形状計測が可能なタイヤ三次元形状計測装置<sup>5)</sup>を開発し、タイヤの高速形状検査を実現するための技術開発に取り組んできた。

いっぽう近年では、とくにタイヤのサイドウォールに表記されるタイヤサイズやメーカー名、内部構造などを示す文字やロゴ、模様などのデザインが複雑化し、表面の凹凸形状が多様化している。このように、タイヤの外形形状の複雑さが増大するなか、その形状を検査して欠陥凹凸形状のみを正確に検出し、良否判定しなければならない点が新たな課題となっている。

本稿では、タイヤの外形形状検査において高精度化と高速化を両立させるため、画像処理による形状認識技術、および検査員と同等の検査を実現するための「人間・機械協調型インタフェース」を取り入れた自動検査フレームワークについて報告する。

#### 1. 出荷検査に求められる仕様と課題

タイヤの最終出荷検査では、見落としによって不良品を顧客に流出させる事態は許されない。いっぽうで、検査での過検出の多発は生産性低下に直結することから、検査の見落としをなくした上で過検出を低減できる検査技術が求められている。このため自動形状認識技術に対しては、欠陥凹凸形状と文字などに起因する凹凸形状とを誤認識することなく弁別できる性能が求められる。しかしながら、形状情報のみから間違いなく弁別する形状認識技術の確立には多くの困難が予測される。例えば図1に示すように、文字などの凹凸形状が欠陥凹凸形状に類似する場合は予測されるからである。さらによりま

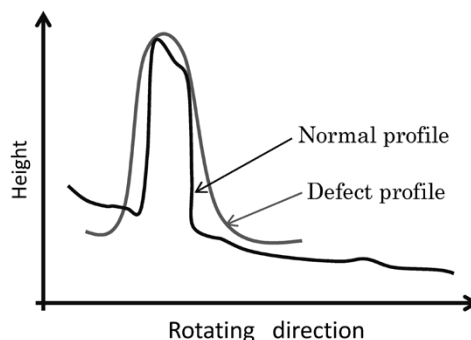


図1 文字等に起因する形状に類似した欠陥形状の例  
Fig.1 Example of defect profile similar to normal one

\*1 技術開発本部 生産システム研究所 \*2 技術開発本部 開発企画部 \*3 機械事業部門 企画管理部 \*4 機械事業部門 産業機械事業部 産業機械部

れな場合ではあるが、文字などの凹凸形状が欠陥凹凸形状とほぼ同等になることも考えられ、形状情報のみでは両者の弁別が困難であることが容易に予想できる。

本課題に対しては以下の手法が提案されている。まず、事前に準備した欠陥のない正常な基準タイヤ（マスタタイヤ）の形状を測定して装置に記憶させておく（ティーチング作業）。そして実作業時の検査では、記憶させた形状と被検査タイヤの形状とを比較することにより、文字などの凹凸形状の影響を除外して欠陥凹凸のみを検出する手法である。本手法を用いることで見落としのない検査が可能であるが、ティーチング作業に使用する欠陥のない正常なマスタタイヤの準備は難しい。また、タイヤの種類やデザインごとにその正常なマスタタイヤを準備する必要が生じるため、実用性の面で課題がある。さらに、万が一マスタタイヤに微小な欠陥凹凸形状が存在すれば、基準データに誤った凹凸形状が記憶され、インライン検査時に正常な形状認識ができなくなる点も解決すべき課題である。

## 2. 開発コンセプト

前章で述べた課題に鑑み、本開発ではマスタタイヤの準備の負荷を大幅に低減させると同時に、「見落としなし」と「過検出の低減」を両立させることを目的に、生産タイヤの特徴を利用した「タイヤ金型モデル<sup>6)</sup>」による自動形状認識技術と画像処理技術を開発した。さらに、熟練検査員の目視および触診検査のノウハウを取り入れた「人間・機械協調型インタフェース」を開発し、形状認識・画像処理技術と組み合わせた自動検査フレームワークを構築した。

### 2.1 タイヤ金型モデル

開発した「タイヤ金型モデル」に基づく自動形状認識技術のコンセプトを図2に示す。「タイヤ金型モデル」とは『タイヤの文字などに起因する凹凸部の高さは数種類に分類可能』というタイヤ金型の設計コンセプトを反映した考え方である。図2(a)は、タイヤサイドウォールの高さを表す画像を示す。横軸は周方向、縦軸は半

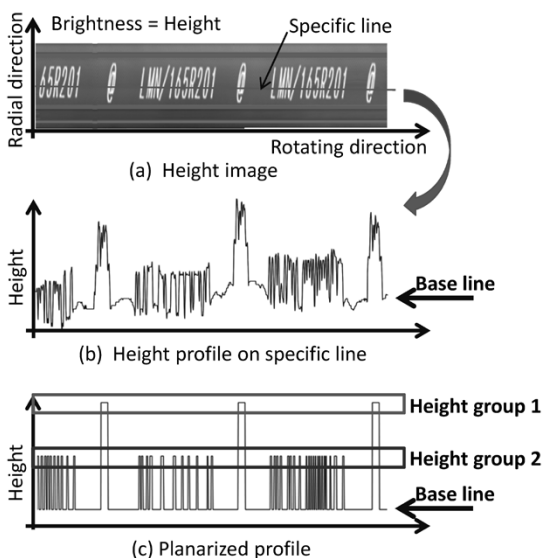


図2 タイヤ金型モデルのコンセプト  
Fig. 2 Concept of "Tire KANAGATA model"

径方向を示し、輝度値で各位置の高さを表している。この画像中に1本の横方向ラインを設定し、その線上の高さ（形状）をグラフ化したのが図2(b)である。ゆるやかに湾曲しているベースライン上に、文字などに起因する凹凸形状が重畳している。この高さデータに対して、周波数フィルタによってゆるやかな湾曲成分を除去した結果を図2(c)に示す。文字などに起因する凹凸形状の高さは離散的な数種類のグループ（この場合は2種類）に分かれている様子が確認できる。このような文字などに起因する凹凸形状の高さを離散的な数種類のグループに分類可能である特徴を利用し、文字等に起因する凹凸形状の認識方法を開発した。

なお、生産タイヤのベースラインの高さは生産状態によってばらつきが生じるが、上記分類が可能であることを複数の市販タイヤで確認しており、本「タイヤ金型モデル」の実用性を検証している。

### 2.2 画像処理方法

「タイヤ金型モデルに」基づいた画像処理方法を図3～図5に示す。図3に示すティーチング作業では、大きな欠陥凹凸形状のないマスタタイヤを使用する。サイドウォール外形形状データを取得後、文字などに起因する凹凸形状領域を抽出する処理を行う。抽出の前処理としてサイドウォールに存在する幅方向の湾曲形状を除去するための平面化処理を行う。その後、急峻（きゅうしゅん）な高さ変化を抽出するための空間一次微分フィルタ処理を適用して閾値（いきち）以上の微分値を境界線領域とし、それに囲まれた部分を文字などに起因する凹凸形状部と判断する。

つぎに、「タイヤ金型モデル」に基づいて高さの分類処理を行う（図4）。文字などに起因する凹凸形状と認識された箇所に対してラベリング処理を行い、各ラベル図形の平均高さを計算する。さらに各平均高さによって数種類のグループに分類し、各グループ内の平均高さを求める。この高さを当該グループの代表高さとして文字

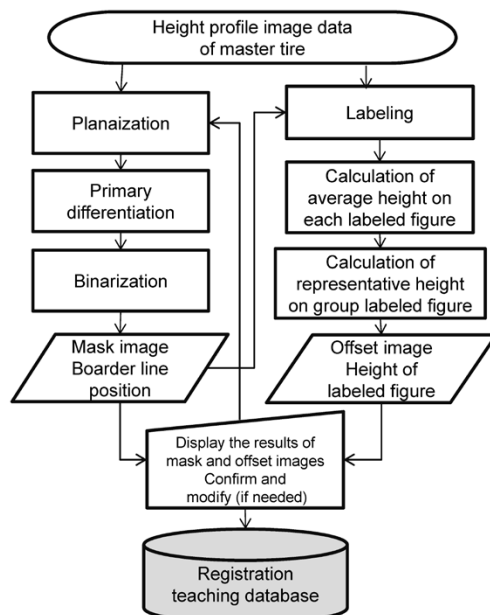


図3 ティーチング作業フロー  
Fig. 3 Flow of teaching and setting process

などに起因する凹凸形状の高さとして取得する。このとき、マスタタイヤに微小な欠陥に伴う凹凸形状があっても、平均高さの計算処理によって統計的に除去され、ほぼ正しい代表高さを求めることができる。以上の処理により、文字などに起因する凹凸形状の領域とそのオフセット高さをマスタタイヤから取得してティーチングデータとして登録する。

図5にインライン検査時の画像処理フローを示す。タイヤ回転方向の位置（位相）はタイヤごとに一定ではないため、最初にマスタタイヤおよび実タイヤの画像にパターンマッチング法を適用し、位相調整を行う。つぎに、文字などに起因する凹凸領域は計算除外領域として設定し、各ラベル図形の代表高さを検査対象画像から減算することで、文字などに起因する凹凸形状を除去した平面形状画像を取得する。この画像を用いて欠陥凹凸形状の検査基準に従った検査を実施する。

### 2.3 「人間・機械協調型インタフェース」

2.1節および2.2節で述べた技術により高精度な自動形状認識が可能であるが、欠陥の見落としなしと過検出低減はトレードオフの関係にあり、自動形状認識技術のみではその両立は困難である。そこで当社では、人間の判断を取り入れた「人間・機械協調型インタフェース」を開発した。

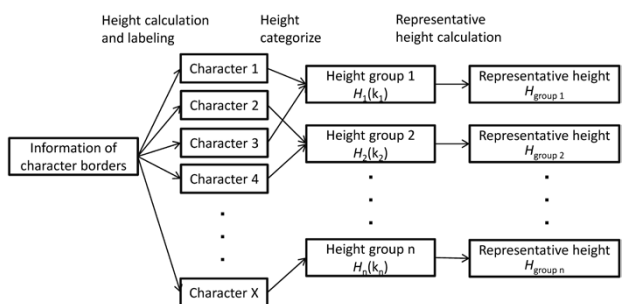


図4 タイヤ金型モデルに基づく高さ分類方法

Fig. 4 Categorization method based on "Tire KANAGATA model"

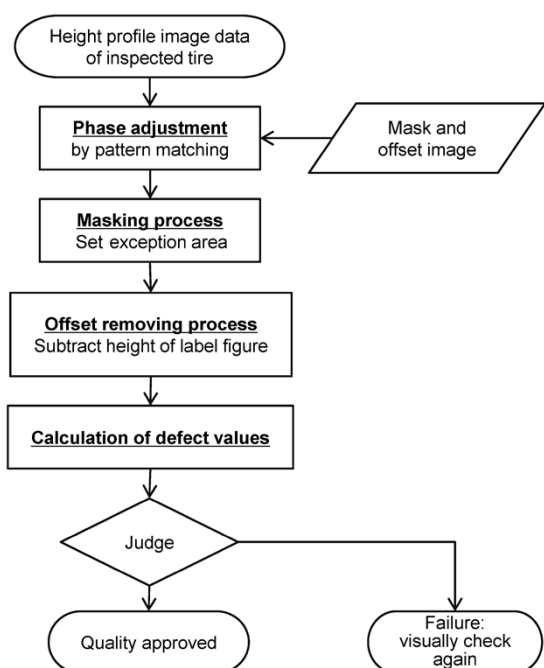


図5 インライン検査フロー

Fig. 5 Flow of inline-inspection

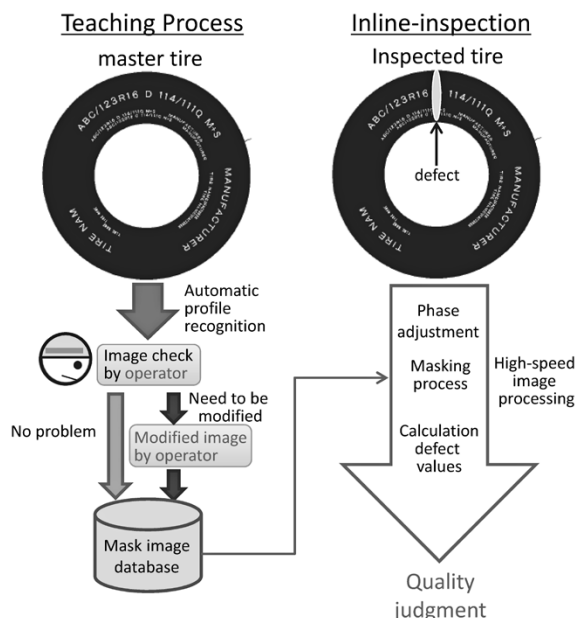


図6 人間・機械協調型インタフェース  
Fig. 6 Man-machine cooperative interface

開発した。このインタフェースと高精度な形状認識技術とを組み合わせることにより、マスタタイヤ準備の負荷を低減させると同時に、見落としなしと過検出の低減を両立させることができた。

「人間・機械協調型インタフェース」のコンセプトを図6に示す。インライン検査で得られた形状情報のみから欠陥凹凸の有無を判断することは難しいため、タイヤの文字などに起因する凹凸形状をオフラインで設定するティーチング作業を取り入れた。このティーチング作業に用いるタイヤごとの形状認識画像は、2.1節で述べた「タイヤ金型モデル」に基づく画像処理によって自動取得する。この形状認識結果をスタッフが目視で確認し、間違った形状認識となっている場合にはスタッフの判断によって修正作業を行う。スタッフによるこの作業によって文字などに起因する凹凸形状認識結果を示す「マスク画像」を得る。インライン検査では、このマスク画像に各凹凸形状部の高さ情報を付与した「オフセット画像」を用いて文字などに起因する凹凸部の影響を除外することにより、欠陥凹凸部のみを正確に検出・評価することを可能としている。

### 3. 装置構成

タイヤ外形形状を高速で計測可能なタイヤ三次元形状計測装置<sup>5)</sup>の構成を図7に示す。本装置は、タイヤの両サイドウォールおよびトレッドを計測する3台のセンサヘッドとコンピュータから構成され、これに今回開発したソフトウェアを搭載した。検査にあたっては、センサをタイヤに近づけ、タイヤを回転させながら各センサで形状を計測し、計測完了後にセンサを退避させてタイヤの入れ替えを行う。開発したソフトウェアによる画像処理はリアルタイムで遂行されるため、検査工程を遅延させることはない。

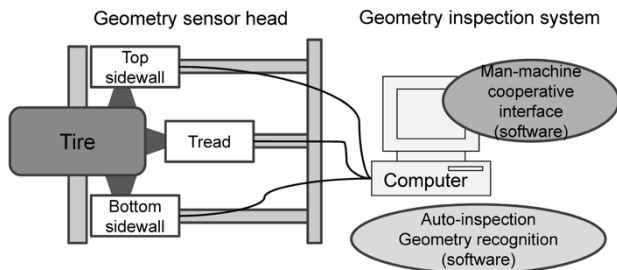


図7 タイヤ外形形状検査装置  
Fig.7 Machine for inspecting profile of tire surface

## 4. 実験結果

### 4.1 「タイヤ金型モデル」に基づく自動形状認識

開発した自動形状認識技術を市販タイヤに適用して性能を検証した。その結果を図8に示す。

図8(a)は取得した「高さ画像(生データ)」を示す。横軸は周方向、縦軸は半径方向を示し、輝度値で各位置の高さを表している。図8(b)~図8(d)は各処理後の画像例を示しており、図8(b)は平面化画像、図8(c)は境界線抽出結果、そして図8(d)は各凹凸領域の高さ計算結果である。

これらの計算結果を基に図8(a)の高さ画像の文字などに起因する凹凸形状を消去した結果が図8(e)である。この処理は、文字などに起因する凹凸形状の境界線領域および各図形のオフセット高さが正常に取得できていることを確認する目的で行っている。図8(e)では文字などに起因する凹凸形状が除去できていることがわかる。

本検証により、開発した自動形状認識技術が期待どおりに動作することが確認できた。

### 4.2 欠陥凹凸形状存在時の自動形状認識

開発した自動形状認識技術の設計コンセプトでは、マスタイヤに微小な欠陥があっても大きな影響はなく、正常なマスク画像の取得が可能である。しかしながら、大きな欠陥がある場合にはマスク画像にその影響が生じる。

そこで、本コンセプトが実現できているかを検証するため、ガウス分布に基づく典型的な欠陥凹凸形状をデータ上で疑似的に付加した高さデータに対して、自動形状認識を適用した。

頂点高さ0.5mmの微小な凸形状(図9(a))を付加し、平面化処理を行った後の高さ画像(図9(b))に対して自動形状認識処理を適用した。得られたマスク画像(図9(c))では、微小な凸形状を誤認識することなく、文字などに起因する凹凸部の境界領域を正確に抽出できている。本マスク画像を基にオフセット画像を作成し、元の画像に適用した結果(図9(d))では、微小な凸形状(同図中のだ円部)のみが平面化されずに残存している。このことから、マスタイヤに微小な凸形状があってもその影響を受けることなく正確なマスク画像を自動作成することが可能であることがわかった。

いっぽう、頂点の高さを2.0mmとした凸形状(図10(a))を付加した場合、平面化処理(図10(b))および

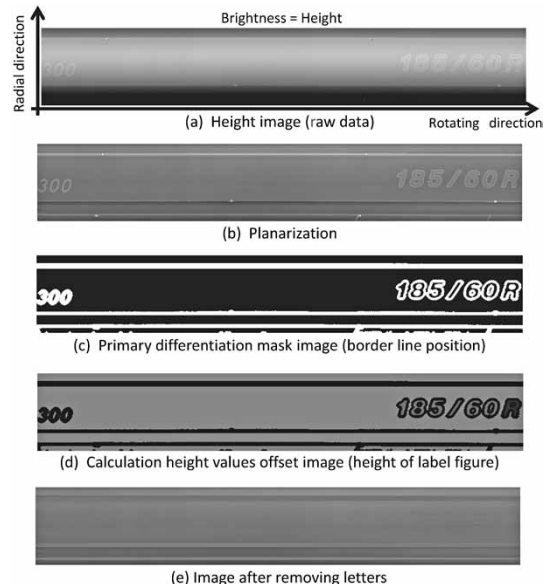


図8 ティーチング時の画像処理  
Fig.8 Image processing at teaching

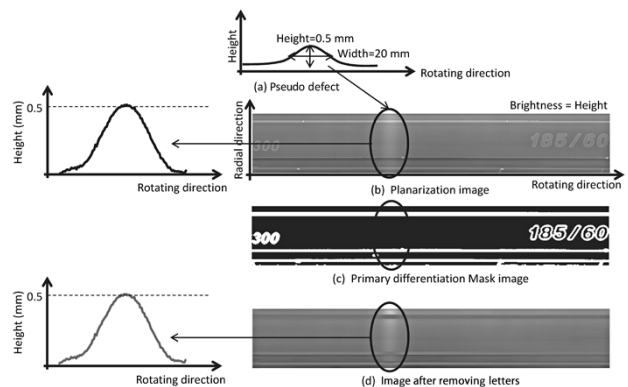


図9 微小な欠陥が存在する場合の画像処理結果  
Fig.9 Results of image processing with small defects

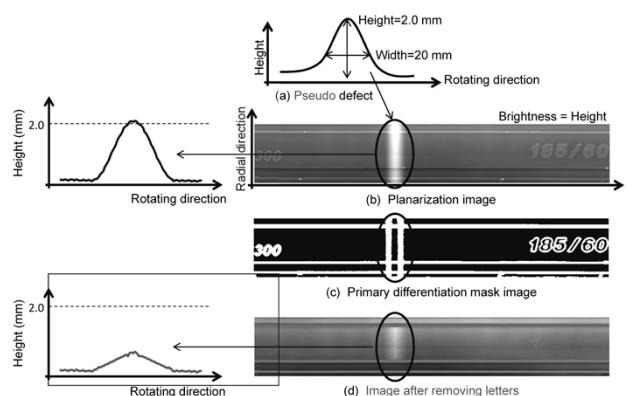


図10 大きな欠陥が存在する場合の画像処理結果  
Fig.10 Results of image processing with big defects

自動形状認識処理(図10(c))において、凸形状に対応した境界領域が得られている。しかしながら、本マスク画像を基にオフセット画像を作成し、元の画像に適用した結果(図10(d))では、本来マスクする領域ではない凸形状部(同図中のだ円部)も一部マスクされ、結果として本来の凸形状が過小評価される結果となった。このようなマスク画像をインライン検査で使用した場合、欠陥のないタイヤではオフセット高さの減算によって正常部を凹部と判断する可能性がある。また欠陥があるタイ

ヤでは、上述のとおり欠陥を過小評価して異常なタイヤを正常と判断する可能性がある。このため、自動形状認識処理のみによる本計算結果はティーチング画像データとして使用することができない。

#### 4.3 「人間・機械協調型インターフェース」での修正機能

上述したように、欠陥凹凸が存在しない正常マスタタイヤの準備は難しい。すなわち、図10で示したような大きな凸形状が存在するタイヤをマスタタイヤとして使用した場合には、正常なマスク画像が生成できない不具合を引き起こすことになる。

そこで、マスク画像自動作成後に人間による目視確認を行い、必要に応じて人間の手で修正できる「人間・機械協調型インターフェース」を開発した(図11)。本インターフェースでは、コンピュータの画面上に表示された自動形状認識処理後のマスク画像を人間(運用スタッフ)が確認する。修正が必要と判断された場合には、誤認識している文字などに起因する凹凸形状領域の追加や削除をGUI上で行う。こうして適切な領域に修正した後、自

動形状認識計算をあらためて行うことにより、マスタタイヤに欠陥が存在していた場合でも正常なマスク画像の生成が可能である(図11(c))。

むすび=タイヤのサイドウォール外形形状検査装置を開発した。「タイヤ金型モデル」による画像処理手法と、「人間・機械協調型インターフェース」を組み合わせたフレームワークにより、「見落としなし」「過検出低減」の両立を実現させた。

本装置を使用することにより、生産性を落とすことなく高精度なタイヤ形状検査が可能となる。

本技術を当社で開発済みのタイヤ三次元形状計測装置<sup>5)</sup>と組み合わせたタイヤ外形形状検査装置は、世界中のタイヤ工場稼働中である。

近年では、ディープラーニングなどを活用したAI技術が広まっており、当社においても形状検査の自動化や形状認識技術への応用に取り組んでいる。その一方で、今回開発した「人間・機械協調型インターフェース」を取り入れた自動検査フレームワークは、品質や安全に関わる出荷前最終検査の機能を担保するために非常に有用なものである。AI技術による自動化が今後さらに普及するとしても、完全自動化が難しい機械や工程では、本フレームワークが一つのソリューションになり得ると考えている。

今後とも当社は、高速かつ高精度な計測に必要なハードウェア開発と形状認識/判別技術の開発を並行して進めることによって、タイヤ形状検査装置の競争力強化に貢献する所存である。



(a) Result of auto-image processing



(b) Modifying incorrect area



(c) Result of re-calculation

図11 人間・機械協調型インターフェースの処理  
Fig.11 Procedures of human and machine interface

#### 参考文献

- 1) Sholz O et al. Society of Automotive Engineers Technical Paper Serise. 2008, p.8.
- 2) Micro-Poise Measurement Systems. "TGIS-SL® (Tire Geometry Inspection System with Sheet of Light)", <http://www.micropoise.com/tire-industry/tgis-sl>, (参照 2017-06-02).
- 3) 花田亮治ほか.自動車技術会論文集. 2011, Vol.42, No.1, p.119-124.
- 4) 輿水大和ほか.月刊タイヤ. 2011, 第43巻, 8号, p.40-42.
- 5) 高橋英二ほか. R&D神戸製鋼技報. 2008, Vol.58, No.2, p.62-66.
- 6) 高橋英二ほか.自動車技術会論文集. 2015. Vol.46, No.1, p.213-218.