

(論文)

超高速画像処理カメラによるタイヤ三次元形状計測装置

Three Dimensional Profile Measurement System for Tire Surface using Ultra High Speed Image Processing Camera



高橋英二*
Eiji TAKAHASHI



迫田尚和*
Naokazu SAKODA



森本 勉**
Tsutomu MORIMOTO



野中俊克***
Toshikatsu NONAKA



堀口史郎***
Shiro HORIGUCHI



松下康広****
Yasuhiro MATSUSHITA

We have developed a new three dimensional “ geometry system ” for tires that measures the height profile on a tire surface. So far, geometry systems for tires of trucks and buses have been difficult to develop, since it requires twice as large view-size and twice as high capture speed compared with that for passenger car tires. We have developed an ultra high speed image processing camera incorporating a CMOS image sensor and an FPGA chip, which has been applied for use with commercial tires of trucks and buses. Using a prototype sensor (camera and laser light source), view-size of 160mm, capture speed of 4,096 frame/second, and measurement reproducibility of 20 micrometers or less are experimentally confirmed, which match the specifications required for the system.

まえばき = 自動車の安全性確保のため、路面と直接接地するタイヤに対する品質確保は重要である。タイヤの生産品質確保のため、タイヤメーカーや自動車メーカーは種々の出荷検査、受入検査を行っており、タイヤ表面の凹凸三次元形状の検査も重要な検査項目の一つである。

日本のタイヤメーカーでは、タイヤの均一性を測定するユニフォームティマシに、ランナウトセンサと呼ばれる、主としてポイント式レーザ距離センサを搭載し、タイヤのサイドウォール(タイヤ接地面に垂直な側面)の形状を部分的に自動測定している。また、外観や他の箇所を含め、熟練した検査員がタイヤ表面の手触りや光沢具合など、微妙な凹凸形状の異常の有無を目視によって検査してきた。

一方、欧米のタイヤメーカーでも従来は日本と同様の検査を行っていたが、近年、熟練検査員の確保が困難になってきている。このため、早い時期よりポイント式での部分的な検査からタイヤのサイドウォール全面自動検査への取組み¹⁾が行われてきており、レーザ利用による光切断法・三次元形状計測技術の適用、高速カメラやコンピュータによる高速撮像・高速画像処理など、種々の研究開発と工場への実機適用がなされている。こうした欧米での自動化・機械化の影響を受け、さらには熟練検査員不足などの環境変化から、日本のタイヤメーカーにおいてもタイヤ三次元形状計測装置導入への動きが顕在化してきた。

以上のような背景のもと、乗用車用タイヤに比べて直径が2倍以上のトラック・バス用タイヤ向け三次元形状計測装置は、強いユーザーニーズがあるにもかかわらずいまだに実用化されていない。それは、測定範囲が2倍以上必要であり、検査スループットを落さず、タイヤ外周

において乗用車用タイヤと同等の空間分解能を得るためには撮像処理時間を1/2以下にする必要があるためである。本稿では、このようなユーザーニーズに応えるべく開発した「トラック・バス用タイヤ向け三次元形状計測装置」について報告する。

1. 計測手法

1.1 光切断法

物体の三次元形状を計測する普及した手法に、三角測量の原理を面的に拡張した「光切断法²⁾」がある。図1に

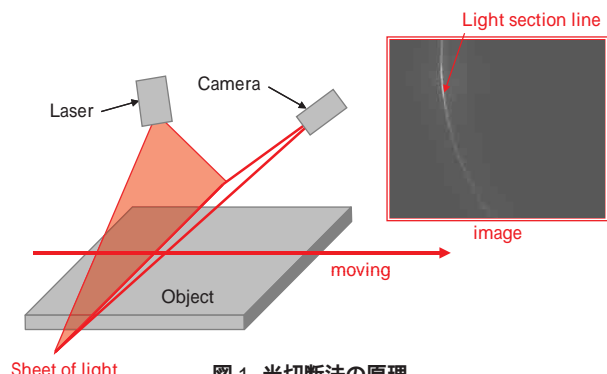


図1 光切断法の原理
Fig. 1 Principle of light section method

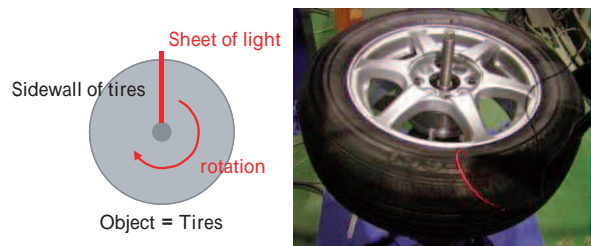


図2 タイヤ測定例
Fig. 2 Example of tire measuring

*技術開発本部 電子技術研究所 **技術開発本部 電子技術研究所(現在、同本部 開発企画部) ***機械エンジニアリングカンパニー 産業機械事業部 産業機械技術部
****機械エンジニアリングカンパニー 産業機械事業部 産業機械技術部(現在、KOBELCO STEWART BOLLING, INC.)

その測定原理図を示す。

スリット状のレーザシート光を測定対象物に照射し、これを別の角度からカメラにより撮像すると、撮像画像上にはレーザシート光の輝線（以下、光切断線という）が現れる。この光切断線は測定対象物の断面形状を示しており、撮像画像中の光切断線の座標を画像処理により抽出することで測定対象物の断面形状、すなわち二次元形状が得られる。さらに、測定対象物または測定光学系（レーザとカメラ）を光切断線の直交方向に移動させ、移動に同期して撮像することで、物体の三次元表面形状が得られる。

本装置はタイヤ（回転物）表面の三次元形状を計測することを目的としていることから、タイヤ中心を軸にタイヤを回転移動することとした（図2）。

1.2 正反射条件による光切断法

図2のタイヤ測定例を見てわかるとおり、実際のタイヤ側面は湾曲しており、リム（タイヤ内側、タイヤを固定する鉄製環状部分）側とトレッド（タイヤ外側、接地面）側の両端において、光切断線が大きく屈曲すると

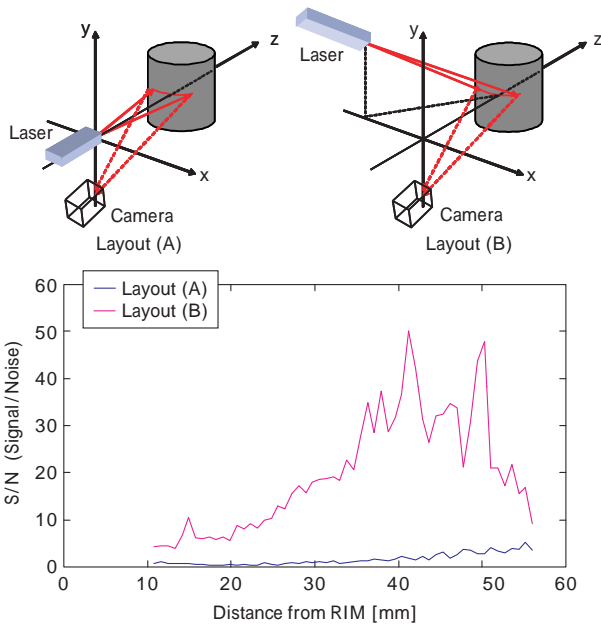


図3 正反射条件による光切断法

Fig. 3 Optical arrangement of regular reflectance by light section method

もに光切断線の輝度が低くなっている。本状態のままの光切断線を用い、タイヤを回転させ高速撮像（毎秒 4,096 枚）すると、高速化に伴って画像 1 枚あたりの露光時間（1 枚当り 25[ns]以下）が短くなるため、輝度の低い光切断線の両端では画像が不鮮明になり、測定範囲を狭めることになる。

そこで、タイヤ側面の両端まで輝度が高く S/N の良い光切断線を得るため、レーザとカメラの光学系の最適配置について、図3に示す実験を行った。Layout(A)は、レーザシート光をタイヤに対して垂直照射し、カメラを Y 軸方向斜め下から撮像する通常の光切断法の配置である。Layout(B)は、Layout(A)の光学配置からレーザを Y 軸方向斜め上に移動させ、さらに X 軸方向に移動させた位置からレーザシート光を照射しており、タイヤ表面上の多くのポイントで正反射条件が成立つようにレーザとカメラを配置している。実験結果では、Layout(A)に比べて S/N が格段に改善されており、測定表面が鏡面で湾曲した形状の測定対象物には Layout(B)の光学配置が有効であることがわかった。

1.3 複数光源による光切断法

前記正反射条件の実験結果から、本装置の光学系は複数のレーザ光源をタイヤ表面の湾曲形状に適合させた光学配置とした（図4）。タイヤ表面の形状測定実験では、単一レーザ光学系（図4左、レーザ2のみ照射）を用いた形状測定では、タイヤ直径方向下部（図4右上画像、黒色領域は測定不能箇所を示す）で光切断線の輝度が低く測定不能となる範囲が多いのに対し、複数レーザ光学系（図4左、レーザ1, 2, ...を照射）では、撮像視野範囲全域（図4右下画像）で光切断線を安定検出することができ、タイヤ表面形状を正常測定できた。

2. 高速化手法

2.1 高速化要求仕様

乗用車用タイヤに比べてトラック・バス用タイヤは直径が2倍以上ある。一方、タイヤ外周においても乗用車

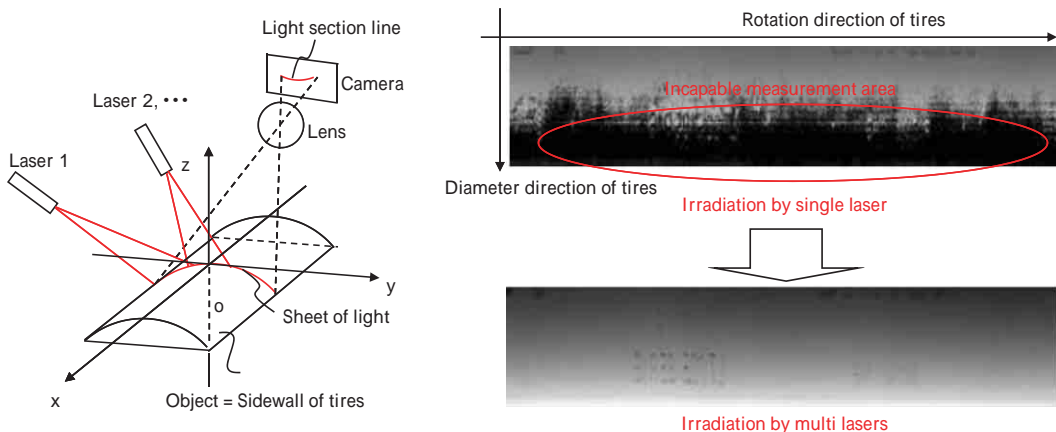


図4 複数光源による光切断法の構成

Fig. 4 Optical arrangement of multiple light sources by light section method

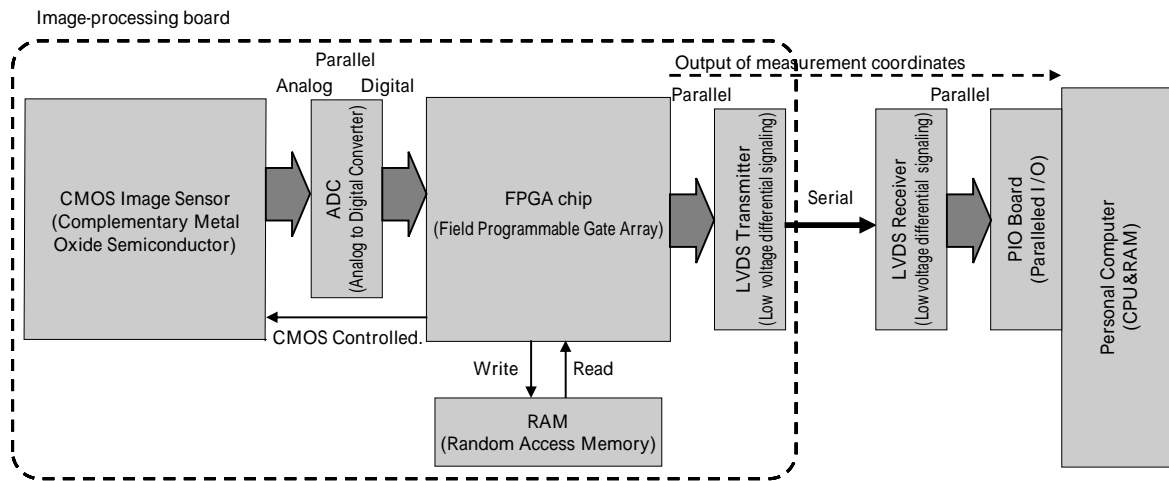


図5 画像処理ボード構成

Fig. 5 Block diagram of image-processing board

用タイヤと同等の空間分解能で検査する必要があり、検査スループットを落とすことなく検査するためには、トラック・バス用タイヤ向け検査装置は、乗用車用タイヤ向け検査装置に比べて2倍以上の高速撮像および高速画像処理性能が必要となる。

現状の乗用車用タイヤ向け検査装置では、最初の1秒間でタイヤが1回転する中、毎秒1,000~2,000枚の撮像を行い、次の1秒程度の間光切断線画像を処理してタイヤの表面形状として出力する。トラック・バス用タイヤ向け検査では2倍以上の高速撮像と高速画像処理が必要となるため、本装置では、毎秒4,096枚の高速撮像と光切断線の座標抽出とを同時並列で行う画像処理機能を搭載した「超高速画像処理カメラ」として前記要求仕様を満足するシステムを構築した。

2.2 回路構成

本装置の超高速画像処理カメラの回路ブロック図を図5に示す。

撮像素子には、部分撮像処理可能なCMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) イメージセンサを採用した。高速撮像を実現するため、撮像素子の一部エリアの画像のみを取込む部分撮像処理を用い、トラック・バス用タイヤ向け検査に必要な撮像範囲256ラインにて毎秒4,096枚の撮像速度を実現している。

撮像素子の後段には、ソフトウェアにて回路構成が変更可能なFPGA (Field Programmable Gate Array) チップを接続し、CMOSイメージセンサから出力される画像情報(各画素の輝度値)をA/D (Analog to Digital) 変換した後にFPGAチップに取込み、取込みと同時に各種画像処理によって光切断線の位置座標をリアルタイムに算出する。

演算結果は逐次RAM (Random Access Memory) に蓄積され、タイヤ1回転分の光切断線の高さ座標を求めた後、高速シリアル通信可能なLVDS (Low Voltage Differential Signaling) 回路を経由して画像処理ボードの外部に出力する。出力先のパーソナルコンピュータなどでは、タイヤ1回転分の形状を基に刻印文字やトレッド面パターンの凹凸除去を行った後、最大凹凸量を求めてタイヤの良否判定を行う。

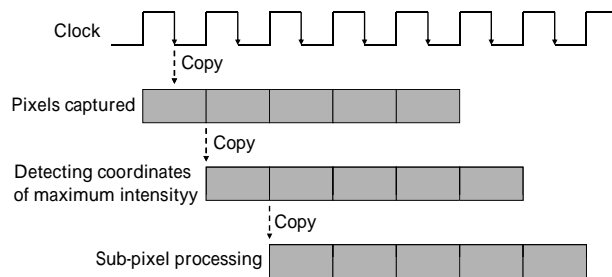


図6 パイプライン処理

Fig. 6 Pipeline processing

2.3 パイプライン処理

高速化手法のポイントとして、コンピュータなどの高速化技術の一つであるパイプライン処理を採用した。パイプライン処理とは、複数の処理を並列で独立して動作させることで、前の処理が終了する前に次の処理を開始できることが特徴である。図5中、CMOSイメージセンサからFPGAチップに画像情報を取込むと同時に、FPGAチップの内部回路にて最大輝度座標抽出処理やサブピクセル処理(2.4節に詳述:1画素以下の画素分解能で位置座標を計算する)を並列で行う。パイプライン処理により、毎秒4,096枚の高速撮像および高速画像処理が可能となった。

パイプライン処理の概念的シーケンスを図6に示す。FPGAチップ内部で生成したClockに同期して複数画素の画像情報を並列で取込み、1Clock進むと取込んだ画像情報に対して最大輝度を持つ画素の抽出処理を行うとともに、並列で次の画像情報を取込む。さらに1Clock進むと、サブピクセル処理、最大輝度座標の抽出処理、および画像取込みの3種類の処理がClockに同期して並列で実行される。1枚の画像全体に対する画像処理時間は、画像情報の取込みタイミングから数Clockの遅延だけで完了する。

2.4 サブピクセル処理

タイヤ表面形状の凹凸方向、すなわち高さ方向の空間分解能を高めるため、前段の最大輝度座標抽出処理で得た最大輝度座標周辺の画素情報を用いて、サブピクセル法により1画素以下の小数点付き画素座標(実用的には小数点第一位まで)を計算する。最大輝度座標周辺の±

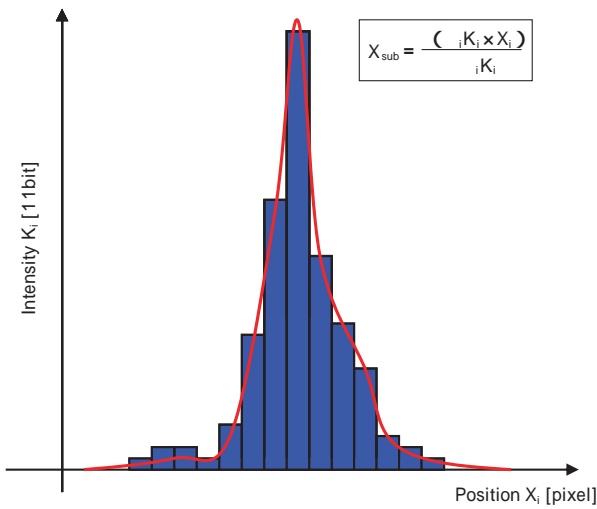


図7 サブピクセル処理
Fig. 7 Sub-pixel processing

N 画素について、座標 X_i と輝度 K_i を用い、

$$X_{sub} = \left(\sum_i K_i \times X_i \right) / \left(\sum_i K_i \right)$$

の式により、最大輝度の正確な重心座標を求める(図7)。サブピクセル処理を含めた光切断線の座標抽出処理により、ユーザニーズに合致する高さ分解能 $20 \mu\text{m}$ 以下を実現した。

3. 装置構成

トラック・バス用タイヤ向け三次元形状計測装置の試作センサを図8に示す。複数のレーザ光源を用いて1本の光切断線としてタイヤ表面に照射した例を図9に示す。複数のレーザから出射されるシート光は測定表面上で1本のシート光として合成される。タイヤ側面の湾曲に沿ってシート光の照射角度が調整されており、シート光の両端においても輝度が低下することなくコントラス

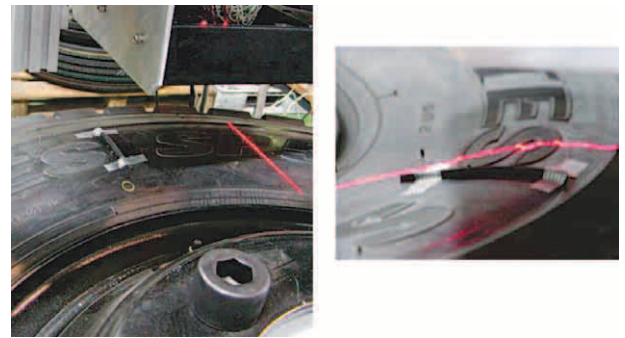


図9 光切断線例
Fig. 9 Example of sheet of light

トの良い光切断線画像が撮像できる。図9右では、タイヤ表面に貼付した擬似的な凸欠陥や、刻印文字部分において光切断線が高さ方向に変動している様子がわかる。

4. 実験結果

4.1 タイヤ1回転分の凹凸形状測定

タイヤ1回転分の形状測定結果を図10に示す。図8左上のように試作センサをアルミフレームに固定して測定した。図10上の画像は、タイヤを1秒間に1回転させ、回転に同期してタイヤ側面の画像を4,096枚撮像し、各画像中の光切断線の高さ座標を計算した後、高さ座標を輝度値に変換し、タイヤ1回転分の計測結果を画像合成したものである。

図10上図の黄線で示す1ラインについて高さ座標を抽出すると、図10下の高さ方向凹凸形状が得られる。高さ座標の変化が大きい箇所は、刻印文字による急激な高さ変動を示している。刻印文字の高さ変動を除いても、タイヤ側面の高さが微妙に変動している様子がわかる。またタイヤ側面にある凹欠陥部に関しては、三次元立体

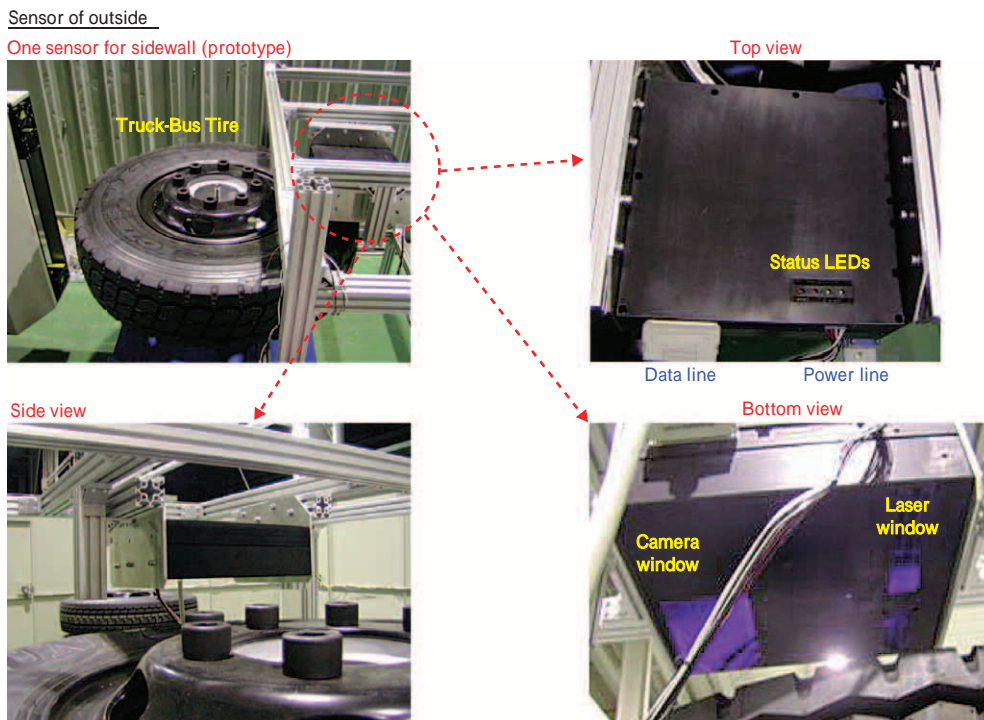


図8 試作センサ
Fig. 8 Prototype sensors

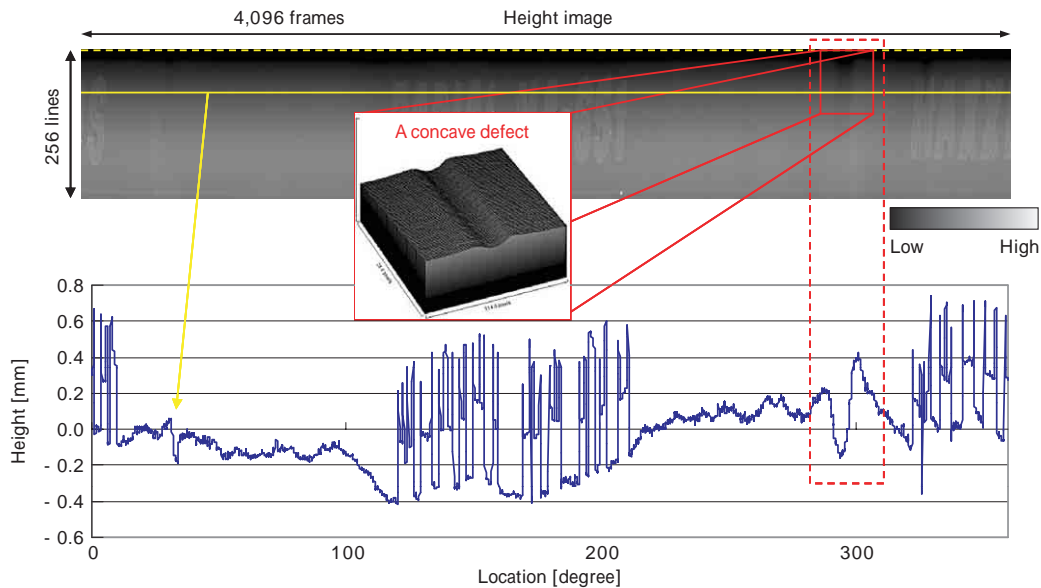


図10 タイヤ1回転測定結果
Fig.10 Result of measuring tire in one rotation

形状表示からもわかるとおり、リアルな立体形状が測定できていることがわかる。

4.2 測定再現性

図10に示すタイヤ1回転分の測定を10回繰返し、凹欠陥部周辺の高さ変化を重ね書きしたグラフを図11に示す。本装置はセンサ位置の駆動機構やタイヤ自動交換機能は無いため、タイヤを回転させて任意のタイミングでタイヤ1回転分の測定を行い、これを10回繰返して測定した。図11中、高さ変化の最大最小差を H とし、 H の10回分の高さ変化を評価した結果、

$$1 = 10.4 [\mu\text{m}]$$

の結果を得た。

実機では、センサ移動や周辺環境の振動などの影響も懸念されるため、前記1よりも悪化する可能性はあるが、試作センサ単体では、ユーザニーズに合致する測定再現性 $20 \mu\text{m}$ 以下を確認した。

4.3 測定視野範囲

複数光源方式の光切断法により、トラック・バス用タイヤでの測定可能な視野範囲は160mm以上であることを確認した。従来のレーザー1本のみ用いる光切断法ではおおむね40~60mmの測定視野範囲に対し、約4倍の測定視野範囲が確保できた。

むすび=今回開発した「トラック・バス用タイヤ向け三

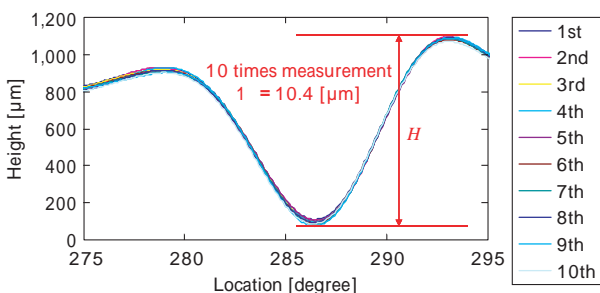


図11 凹欠陥部の測定再現性

Fig.11 Measurement repeatability of concave defect profile

次元形状計測装置」について報告した。複数光源方式による光学系と、CMOSイメージセンサとFPGAチップによるデジタル画像処理回路を直結した回路系により、従来測定不可能であった大外径のトラック・バス用タイヤに対しても測定可能な三次元形状計測装置を完成させた。現在「乗用車用タイヤ向け三次元形状計測装置」(図12)についても開発を行っており、トラック・バス用タイヤ向け試作センサと同様、撮像速度毎秒4,096枚で動作する試作センサを完成させている。今後、タイヤ工場でのフィールド実験などの実機化開発を進めていく。

また今回開発した超高速画像処理カメラは、タイヤ以外の高速形状計測ニーズにも対応できるため、産業用途向けに横展開を行っていきたい。



図12 乗用車用タイヤ向け試作センサ
Fig.12 Prototype sensor for passenger car tires

参考文献

- 1) A. Jobst, et al. : Reliable testing of automobile tires by the laser light section method, TireChecker, Abstract, DGZfP-JAHRESTAGUNG 200.
- 2) 井口征士ほか：三次元画像計測, (1990) p.36, 昭晃堂.