



高速形状検査・計測システムのためのFPGAリアルタイム並列画像処理回路プラットフォームの研究

高橋, 英二

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2015-03-25

(Date of Publication)

2017-03-25

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲第6439号

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1006439>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



博 士 論 文

高速形状検査・計測システムのための
FPGA リアルタイム並列画像処理回路
プラットフォームの研究

平成 27 年 1 月

神戸大学大学院工学研究科

高 橋 英 二

目次

1. 緒論	1
1.1. 本研究の背景	2
1.2. 本研究のコンセプト	3
1.2.1. 全体フレームワークと主要要素技術	3
1.2.2. 情報量縮約のためのシステム設計	5
1.2.3. FPGA リアルタイム並列画像処理回路	6
1.2.4. 実用化のための技術課題	8
1.3. 従来技術の進展と本研究との比較	9
1.3.1. 計算機技術の進展	9
1.3.2. 光学系技術の進展	10
1.3.3. 検査・計測システム高速化の研究動向	10
1.3.4. 従来研究との比較	11
1.4. 本論文の構成	11
参考文献	14
2. 高速形状検査・計測プラットフォームを構成する主要要素技術	17
2.1. 緒言	18
2.2. 計測装置化技術：計測環境に応じた光学系構築技術	18
2.2.1. 様々な光学系形状計測手法	18
2.2.2. 複数光源による高速・高精細な光切断手法	20
2.3. 高速画像処理技術：FPGA によるリアルタイム並列画像処理技術	22
2.3.1. FPGA 回路技術	22
2.3.2. 検査課題に応じた FPGA 回路の最適化技術	25
2.4. 高次判定支援技術：検査課題に応じた計測結果の判定技術	25
2.5. 結言	27
参考文献	28
3. 高精細高速画像処理カメラによるトンネル等大型構造物の形状自動計測	29
3.1. 緒言	30
3.2. 技術課題	31
3.3. 計測手法（光学系技術）	32
3.3.1. 光切断法	32
3.3.2. 全周照射シートレーザ	32
3.3.3. 測定範囲と空間分解能	34
3.4. 高速化手法（回路・ソフトウェア技術）	35
3.4.1. 測定時間と距離分解能	35
3.4.2. 周辺環境光ノイズ除去手法	35
3.4.3. 高速画像処理カメラシステム	36
3.5. 装置構成	39
3.5.1. 自走式カート台車部	39
3.5.2. センシング部	39
3.6. 実験結果	40
3.6.1. キャリブレーション手法	40
3.6.2. 揺動補正処理と建築限界判定	41
3.6.3. 実空間での測定精度検証	41

3.6.4.	実用性検証	44
3.7.	結言	45
	参考文献.....	47
4.	超高速画像処理カメラによるタイヤ等高速回転物の高速三次元形状計測	49
4.1.	緒言	50
4.2.	計測手法.....	50
4.2.1.	光切断法	50
4.2.2.	正反射条件による光切断法.....	51
4.2.3.	複数光源による光切断法.....	52
4.3.	高速化手法	53
4.3.1.	高速化要求仕様	53
4.3.2.	回路構成	53
4.3.3.	パイプライン処理.....	54
4.3.4.	サブピクセル処理.....	54
4.4.	装置構成.....	55
4.5.	実験結果.....	57
4.5.1.	タイヤ1回転分の凹凸形状測定	57
4.5.2.	測定再現性	57
4.5.3.	測定視野範囲	58
4.6.	結言	58
	参考文献.....	60
5.	タイヤ金型情報を用いたタイヤ外形形状検査の自動化	61
5.1.	緒言	62
5.2.	技術課題.....	62
5.3.	提案手法.....	64
5.3.1.	人間・機械協調型インタフェース	64
5.3.2.	タイヤ金型モデル.....	65
5.3.3.	画像処理ロジック	67
5.4.	装置構成.....	68
5.5.	実験結果.....	69
5.5.1.	タイヤ金型モデルの自動形状認識結果.....	69
5.5.2.	欠陥凹凸形状を付加した時の自動形状認識結果	70
5.5.3.	人間・機械協調型インタフェースでの修正機能	71
5.6.	結言	73
	参考文献.....	74
6.	高速カラー画像処理カメラによる異形棒鋼の圧延中リアルタイム形状計測	75
6.1.	緒言	76
6.2.	圧延中リアルタイム形状計測における技術課題.....	77
6.3.	計測手法.....	78
6.3.1.	自発光受光による材幅計測	78
6.3.2.	光切断法による形状計測.....	78
6.3.3.	複合光学系による材幅・形状同時計測.....	79
6.4.	FPGA リアルタイム並列画像処理回路による高速化手法.....	80
6.5.	実験装置の構成.....	82
6.6.	実験結果および考察.....	83

6.6.1.	蛇行する材先端部の材中心位置補正機能	83
6.6.2.	等価時間サンプリング手法による異形棒鋼のリアルタイム形状計測	86
6.6.3.	材断面（凹凸高さ）方向の振動除去機能	87
6.6.4.	形状値の絶対値精度	88
6.7.	結言	89
	参考文献	91
7.	太陽電池ウエハ等大面積平面中の微小凹凸欠陥表面形状検査	93
7.1.	緒言	94
7.2.	計測手法と装置構成	94
7.3.	実験結果	96
7.4.	考察	98
7.5.	太陽電池セル製造プロセスへの応用	98
7.6.	結言	101
	参考文献	102
8.	結論	103
8.1.	本研究の総括	104
8.2.	高速形状検査・計測システムの実用性	106
8.3.	本研究の今後の展開	107
	研究論文	109
	謝辞	111

1. 緒論

1.1. 本研究の背景

かつて「世界の工場」と称された日本産業¹⁻¹⁾ではあるが、近年、様々な課題に直面している。国内市場の停滞下、海外の成長市場を取り込むべくグローバル化が進む中で、国内製造業の空洞化懸念や、「擦り合わせ技術」と呼ばれる日本流ものづくりも海外の「モジュール化、パッケージ化、ブラックボックス化」といった標準化戦略の前に厳しい価格競争に晒されている。その一方、熟練技術者が一線を退く中、若年技術者の育成や技能継承も問題となっている。

このような背景の下、産業上の生産技術分野においては、熟練技術や技能など、これまで人間の繊細な感覚や臨機応変な判断に依存していた作業・工程をも定量化・標準化し、産業機械や生産設備に組み入れることで、より高度な自動化ないしは半自動化による効率化された生産ラインを構築し、品質とコストにおいて海外メーカーとの競争力を強化する努力がなされている。

そのような流れの中で、生産技術の一分野である検査・計測技術の重要性は言うまでもなく、**Fig.1-1**に示す通り検査・計測技術は、製品の最終出荷可否判定のみならず、部品の受入検査や生産ラインの中間工程においても、異常検知や品質評価など生産性向上や歩留り改善における重要な役割を担っている。これら検査工程やプロセス・モニタリングにおいて、従前から様々な自動化の取組みがなされてきたが、品質厳格化要求の中、従来熟練技術や技能により対応してきた（対応せざるをえなかった）ものも含め、精度向上、ばらつき低減、高速化・効率化の観点での自動化が強く要求されるようになってきた。

そのようなニーズの例として、下記のようなものが挙げられる。

- ・ 製造ラインにおける寸法・形状等の連続繰返し測定や超精密測定¹⁻²⁾
- ・ 悪環境下（高温、粉塵、屋外等）での高速高精度計測¹⁻³⁾
- ・ 熟練検査員による目視検査の自動化¹⁻⁴⁾

これらは計測技術の観点からは、分解能・視野・測定速度等の点で一般的には自動化困難とされているものが多く、加えて実用性の観点からも、コストやメンテナンスの容易さ、耐環境性等の課題が多く、生産技術上の重要な技術開発課題となっている。

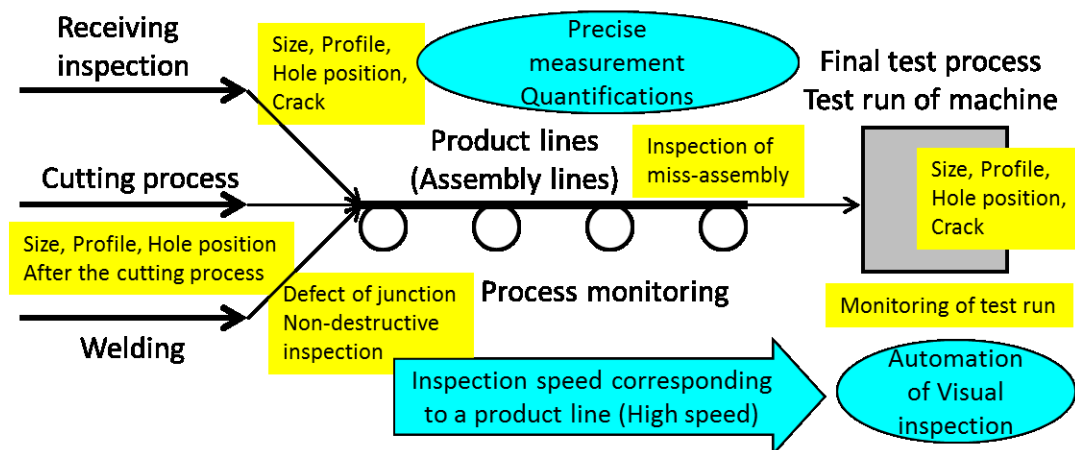


Fig. 1-1 Various inspection and measurement technologies in the industrial field

工業製品の最終出荷検査においては、通常、検査員の目視による最終的な出荷可否判定が行われているが、その前提として製品の種々の計測情報を取得することは重要である。例えば、素材や加工部品の場合、表面上のキズ有無や、寸法・形状精度が公差範囲内かどうかを高精度に計測しなければならない。機械装置類については、装置の動作試験・試運転など最終的な出荷検査の前提として、部品の装着位置や寸法などの装置形状に関わる計測が必要である。

このように見ていくと、検査・計測技術の中、基本的な物理量である寸法や形状計測に対する要求は普遍的に存在している。「形状計測」においては人間の目視検査あるいは触診を超える精度を出すことが課題となる場合が多いが、それに加え、品質確保および生産性向上のために、オフラインでの抜取検査ではなく、生産ラインの中で、様々な環境的外乱の下、リアルタイムで高速に、連続的かつ自動的に計測を行いたいというニーズ¹⁻⁵⁾も強く、ますます難易度の高い課題になってきている。

本研究では、検査・計測技術の中、基本的な物理量計測でありながら、依然、実用化困難な課題が多く存在している「形状」に関わる検査・計測技術について論じる。様々な形状計測手法は古くから研究開発されており、基礎的な形状計測技術は確立されたものが多い。しかしながら実用化の場面においては、より高精度に、より広範囲を形状計測するニーズが多く、これら高精度化ニーズに応えるために計測システムを構築すると、高精度故に大量の計測一次情報から必要な形状情報を抽出せざるを得なくなり、画像処理・信号処理に多大な時間がかかり実用に適さないといった事例も多くみられる。

そこで、本研究では、形状計測における実用に適するための高速性をいかに実現していくかに着目し、高速形状計測フレームワーク実現のためのコアの要素技術「FPGA(Field Programmable Gate Array)リアルタイム並列画像処理回路」を開発した。各研究事例に適用する中で検証していくとともに、実用上重要な観点として、導入・設置調整の簡便さ、安定稼働、メンテナンスの容易さなどについても、必要な要素技術である「計測装置化技術」や「高次判定支援技術」について検証を行う。

1.2. 本研究のコンセプト

1.2.1. 全体フレームワークと主要要素技術

本研究では、近年難易度が一層高まりつつある産業分野の検査・計測課題を対象に、計測精度や速度は当然として、さらには実運用面での導入のし易さ、メンテナンスのし易さをも含めて同時に課題を解決するために、特に「高速形状計測技術」について全体フレームワークを検討し、これを実現するための主な三つの要素技術、およびそれらを実用化するためのシステム設計指針と実装の基盤技術となる共通プラットフォームについて論じる。

「高速形状計測技術」について、特に「高速性」をいかに実現するか、その実現のための全体フレームワークを **Fig.1-2** に示す。測定対象物の寸法や形状を高速に計測するためには、図中左に示すように光切断法といった光学的な手法を用い、非接触で形状計測することが一般的である。**Fig.1-2** では、光切断法を例に形状計測システム内での情報の流れを要素技術群毎に記載している。全体フレームワークとしては、こういった計測一次情報がいかに「情報量縮約」され、最終的に検査工程に必要な良否判断情報になっていくかを全体としての枠組みの中で捉えることが重要である。

次に、**Fig.1-2** 中の各要素技術について、光切断法による形状計測手法を例にして個別の技術課題を以下に述べる。

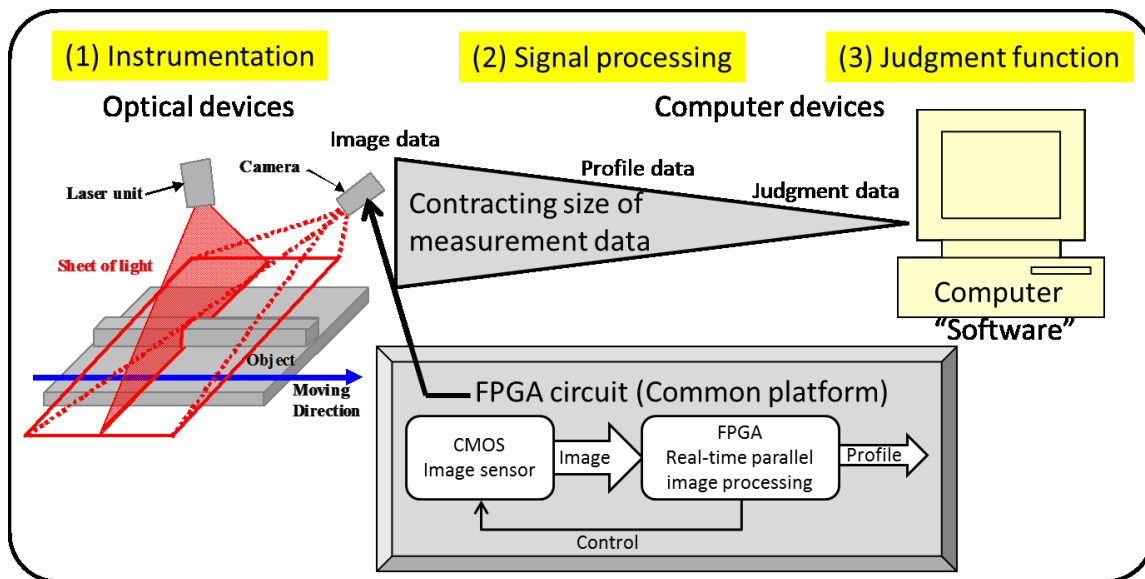


Fig. 1-2 A proposed framework of inspection and measurement systems

(1) 計測装置化技術

測定対象物の寸法・形状等を含んだ画像情報を取得する手段として、カメラ等の撮像デバイス、レーザや照明等の投光系やレンズ類など、光学系機構は必須である。これらの計測デバイスについては、コストおよび耐環境性、計測条件制約など、実機適用上の課題への対策が必要となる。例えば、計測時の空間分解能等についても、実環境での計測装置システムとしての空間分解能は、計測デバイス単体での空間分解能とは必ずしも一致せず、測定対象物や周囲環境にあわせた様々な最適化技術が必要となる。高温、粉塵、振動、外乱光ノイズなどへの対応には、技術課題・事例毎に最適化開発しなければならない。また計測性能を長期安定化するための耐久性やメンテナンス性は、実運用上の重要な課題の一つである。

(2) 高速画像処理技術

前記計測デバイスにより得た計測情報は、検査・計測システムの目的とする良否判断のために情報量を縮約していかなければならない。形状計測手法の一つ「光切断法」では、画像情報から形状情報に、さらに良否情報にと情報量を縮約していく中で、検査・計測システムとして必要な最終良否判断を出力する。これら情報量縮約の中、オンライン・リアルタイムでの検査・計測システムの実現のためには、測定対象物が流れる生産ラインのスピードに対応可能な高速性、高速信号処理が必要である。

(3) 高次判定支援技術

高速に信号処理された形状情報は、最終的には良否判定といった検査・計測システムとして必要な最終良否判断結果として出力しなければならない。この判断処理のためには、計測された信号情報のみからの計算処理では実現が難しく、良品の寸法・形状情報といった測定対象物の「品質管理モデル」に照合した上で、その「意味」(正常や異常・不要など)を判定する機能が必要である。そこでは、良否判定のための評価関数をどのように最適・適正化し、検査・計測システムにどのように実装するかが技術課題となる。

本研究では、実用的な検査・計測システム実現のために、計測対象物や測定環境に応じた「(1) 計測装置化技術」に対する高度化開発と、生産ラインのスピードなど検査・計測

ニーズに合致した高速性、高速信号処理を実現する「(2) 高速画像処理技術」の開発と実現、さらに最終的な検査・計測ニーズに合致した「(3) 高次判定支援技術」を実現するための判断処理手法の開発を、全体フレームワークの設計指針となる「情報量の縮約」に基づき提案し、実用性を含めた検証を行うことにある。そのために、**Fig.1-2** 下図に示す共通プラットフォーム「FPGA リアルタイム並列画像処理回路」を試作し、本フレームワークの有用性を個別の研究事例を通して検証した。

1.2.2. 情報量縮約のためのシステム設計

Fig.1-2 (1) Instrumentation (計測装置化技術) に示す光切断法は、普及した形状計測手法の一つである。光切断法による形状計測では、計測の一次情報として画像情報を扱うため、データ量や計算量が膨大なものとなりやすく、最終的な良否判定処理をオンライン・リアルタイムで行うことが困難な事例も多い。そのために、

- ・ 計測デバイス (カメラ, 光学系) に埋め込まれた FPGA による高速画像処理回路 (**Fig.1-2** 下図の FPGA 回路参照)
- ・ 前記画像処理により縮約された情報に基づく良否判定処理ソフトウェア

といった計測情報を機能分散して情報処理する配置設計にすることで、データ通信や CPU 計算負荷を最小化してオンライン・リアルタイム信号処理を可能にすることが必要である。

情報量縮約のメカニズムを、光切断法の光切断線抽出の画像処理を例に説明する (**Fig.1-2, Fig.1-3**)。一般的な光切断法では、シート状のレーザを測定対象物に照射し、この断面形状を別角度のカメラで撮像後、画像処理により断面形状を求める。さらに光切断法で得た断面形状から各種寸法の計算を行い、出荷検査工程であれば良否判定する。これら一連の形状計測から良否判定までのフローを情報量の観点からは下記のように整理できる。

- ・ シートレーザから対象物表面での光散乱、レンズを通しカメラ撮像素子で受光するまでは光学的アナログ情報として大量の情報を含んでいる。カメラ内部の A/D(Analog to Digital)変換によりデジタル化された画像情報では、光学的アナログ情報が欠落するが、それでも断面形状計算に不要な画素情報も多数含んでいる。
- ・ それらの膨大な情報は、パソコン等のコンピュータにデータ伝送され、画像処理されて断面形状を示す位置座標配列情報に縮約される。
- ・ 最終的には、得られた断面形状情報と設計情報を差分し閾値判定することで、良否 (OK or NG) を表す 1bit 情報に縮約される。

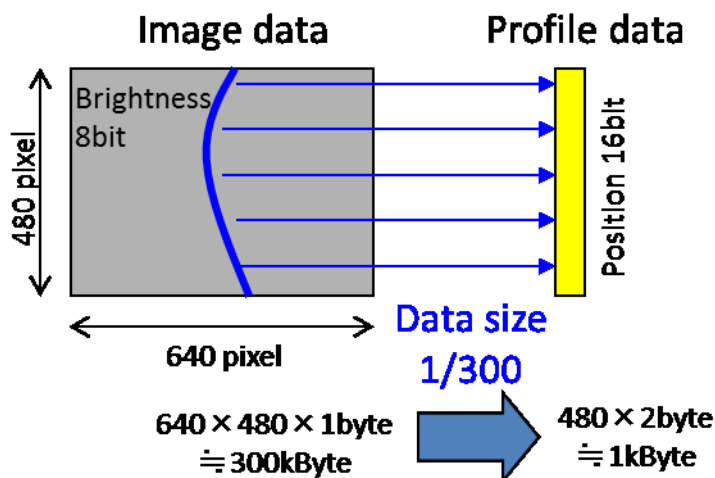


Fig. 1-3 A mechanism of contracting the measurement data

このようにして、測定対象物の情報は、物理量からデジタル情報に、さらに各種画像処理・良否判定処理を通して情報量の縮約が進み、最終的には検査結果として必要な 1bit の良否情報まで縮約されると考えられる。

一方本研究では、各段階での計測デバイスや電子部品は、コスト、処理性能などに制約があり、その制約条件の中、コストと高速性を最適化するように配置することが、実用的なシステム的设计において必要と考える。その観点から、**Fig.1-2** 下図に示す CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) Image sensor と FPGA (Field Programmable Gate Array)リアルタイム並列画像処理回路の直結回路により、

- ・ カメラ内に、カメラ撮像と同期して必要な断面形状の位置座標まで計算する FPGA 処理回路を実現することで、後段のコンピュータへのデータ (断面形状) 伝送量を大幅に縮約すると同時に、
- ・ コンピュータの CPU での良否判定のための画像処理計算負荷が大幅に削減するといった縮約・情報処理機能の最適配置により、各段階で扱う情報量および計算処理負荷が適正に配分され、実用的な高速性とコストを両立して実現することができる。

Fig.1-3 は、情報量縮約の具体的なメカニズムを示している。CMOS に FPGA を回路上で直結することにより、取得した画像情報を 1 ライン毎にリアルタイムに位置情報に変換し、例えば情報量は 1/300 まで縮約することが可能となる。このように、画像から形状への大幅な「情報量縮約」の計算処理を画像情報の発生個所 (カメラ) の直後で行うことは、光切断法の高高速化および実装コストの観点から極めて有用である。

1.2.3. FPGA リアルタイム並列画像処理回路

Fig.1-2, Fig.1-3 で示す通り、計算量の多い画像処理や信号処理をカメラ内で行うことで、後段の計算処理へのデータ伝送や計算負荷を大幅に削減できる。そのためには、カメラ内に高速画像処理機能を実現する仕掛けが必要になる。本研究では、カメラ内で高速画像処理を行うことができる「FPGA リアルタイム並列画像処理回路」を開発した。光切断法による形状計測において、カメラ撮像画像から断面形状への大幅な情報量縮約の処理を、画像情報発生個所 (カメラ) の直後で撮像タイミングに同期してリアルタイムに並列画像処理する回路である(**Fig.1-4**)。

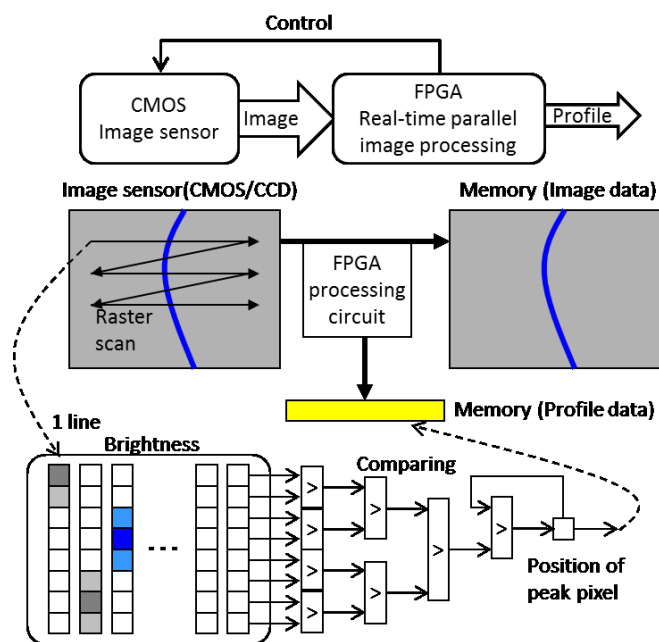


Fig. 1-4 An outline of FPGA real-time parallel image processing circuit

Fig.1-4 上図では、高速撮像可能な CMOS 撮像素子の後段に回路プログラミングが可能な FPGA 回路素子を配置し、FPGA から CMOS 撮像タイミングを制御した上で、CMOS から画像情報を取得する。**Fig.1-4** 中図では、ラスタースキャン動作する CMOS からの 1 ライン毎の画像情報を、FPGA 処理回路がリアルタイムに逐次処理し、光切断線の位置情報を出力する回路である。このとき **Fig.1-4** 下図で示すように FPGA 処理回路内では、1 ラインの画像情報を転送される 1 ブロック毎 (**Fig.1-4** 下図の例では 8 画素単位) に、比較演算回路に入力し、1 ブロック毎の画像情報が入力される度に 1 クロックずつ右方向に比較演算されていき、1 ラインの画像情報が全て入力された後の数クロック後には光切断線の頂点のピーク座標位置がリアルタイムに取得できている回路となっている。

この FPGA 処理回路の詳細な動作を **Fig.1-5** にて説明する。**Fig.1-5** では、1 クロック毎に入力された画像情報が、時間を追って FPGA 処理回路内で処理される様子を示している。Clock=1 で入力された画像情報は、Clock=2, 3, 4 と時間が進むにつれて FPGA 処理回路内の比較演算回路を 1 ステップずつ進んでいき、最終的には Clock=1 で入力された画像情報中の最大輝度の画素位置および輝度値が記憶される仕組みである。また Clock=2 で入力された画像情報も、Clock=1 の画像情報と同じく、1 ステップ遅れで並列に最大輝度の画素が求まる仕組みとなっている。光切断法では、画像 1 ライン中の最大輝度の画素位置を求めなければならないため、**Fig.1-5** の右端部に設けたループ回路によって、違うクロックタイミングで入力された画像情報間の比較演算を行う。画像 1 ラインの終端を示す垂直同期信号を検知した段階で、ループ回路に記憶し逐次更新していた最大輝度の画素位置と輝度値を最終の画像 1 ラインのピーク画素として出力する。

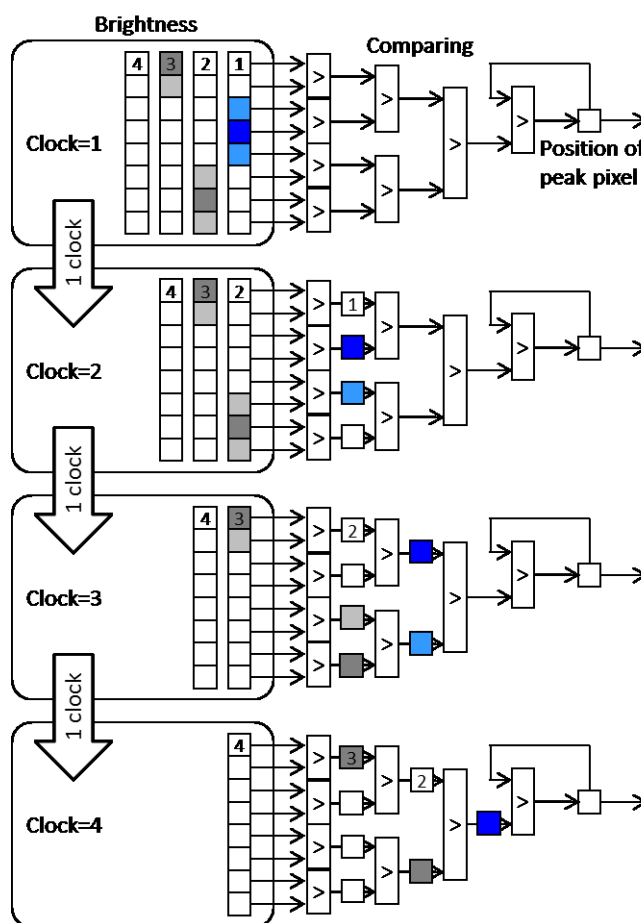


Fig. 1-5 A sequence of the circuit operation sequence

このようなリアルタイム並列画像処理回路を開発し、実際に FPGA に回路を実装することで本回路の有効性を確認した。本回路を共通基盤的なプラットフォーム回路として実現した後、後述する個別事例には個別課題を解決するよう改造して適用し、実用性を検証していった。

以上のような回路・情報処理技術を CMOS と直結した FPGA 内部回路に実現することで、従来 1 ライン全体の入力まで輝度ピークを探索できなかったところを、本研究では、ほぼリアルタイムに並列で光切断線抽出処理が可能となった。本研究では、この「FPGA リアルタイム並列画像処理回路」をコアの要素技術として個別事例への適用研究を行った。

1.2.4. 実用化のための技術課題

高速形状検査・計測システムを実現するためには、前節で述べた(2)高速画像処理技術である「FPGA リアルタイム並列画像処理回路」による情報処理や計算技術のみならず、**Fig.1-2**で示した(1) Instrumentation (計測装置化技術)や(3) Judgment function (高次判定支援技術)についても、実用に適した具体的な技術課題を解決しなければならない。

(1) 計測装置化技術

外乱光ノイズや振動などの耐環境性能、安定稼働のためのメンテナンスのし易さなど、「装置」としての高い実用性を実現するための技術については、

- ・ 応用において要求される空間分解能と視野を実現するための光学系設計
- ・ 測定対象物の形状情報取得の際のバックグラウンドにある各種ノイズ等の除去

などに対応するため、光学系機構上でのアナログ信号処理面での開発や、FPGA 信号処理回路によるデジタル信号処理での S/N 改善技術などが必要になる。これら実用上の課題への対応では、測定対象毎の固有の技術開発が必要であり、詳細は第3章以降の個別の研究事例で検証する。

(2) 高速画像処理技術

前節で述べた高速性を実現するコアの要素技術「FPGA リアルタイム並列画像処理回路」を共通プラットフォームとして試作・実現した上で、実用化に向けては、個別の研究事例に最適化していくことも重要である。個別事例に合わせた回路構成の変更や信号処理ロジックの改造等について、第3章以降の個別の研究事例で検証する。

(3) 高次判定支援技術

最終的な良否判断を行うための「判定モデル」の構築については、単純には良否判定のための「閾値」設定の問題ではあるが、形状検査の場合、単純なスカラー値比較ではなく、多次元特徴空間の中での判別問題になる場合も多い。また判別手法を論じる以前に、良否の境界をどう定義するかという実用上の問題もある。形状判別においては、許容範囲内外の判断を、製品の特性に応じて品質管理部門が目視で判別する場合も多く、そのような場合、目視検査員が判定しやすいように、あるいは良否判定基準を登録・調整しやすいような対話機能(ユーザインタフェース)を検査・計測システムに搭載することも、実用化の成功可否を決めることも多い。特に、第5章のタイヤ外形形状の認識技術では、正常凹凸形状と欠陥凹凸形状を弁別するための自動形状認識技術について研究を行い、複雑な形状認識処理による実用的な良否判断機能の実現性について検証する。

1.3. 従来技術の進展と本研究との比較

1.3.1. 計算機技術の進展

本節及び次節では、本研究の「高速形状検査・計測技術」に関する技術動向を述べる。検査・計測システムを構成するデバイスは、光学系技術と計算機技術に大別できる(**Fig.1-6**)。高速形状計測技術が近年急速に発展してきた一因として、これらデバイス部品の発展に起因するところも大きい。

はじめに、高速化技術を全面的にバックアップする道具として、様々な画像処理ロジックをソフトウェアとして具現化し計算処理する汎用コンピュータ、パソコンが、近年非常に速いペースで高速化されていったことによる効果は大きい。ムーアの法則¹⁻⁶⁾に従ってCPUの動作クロックは順調に高速化された。1990年代10~100MHzのCPU動作クロックは、2010年代の今や3GHzを超え、マルチコア並列処理可能なCPUが次々と登場し続けている。本研究で注目する高速形状検査・計測技術においては、計測した一次情報として情報量の大きい画像を扱うため、コンピュータ・CPUの計算処理速度が速くなることは好ましい。近年では、この汎用コンピュータ・パソコンレベルのCPUや、グラフィックス処理専用プロセッサのGPGPU(General-purpose computing on graphics processing units)を用いて産業用途の高速画像処理に適用する研究開発¹⁻⁷⁾も盛んに行われており、パターンマッチングやフーリエ変換処理などの繰り返しの積和演算や浮動小数点処理において、CPUの数十倍から数百倍の高速画像処理を実現している。

また、カメラとパソコンのCPU間を接続し、膨大な画像情報をデータ転送する通信インタフェースの高速化も、計測デバイス・部品レベルでの技術発展としては効果が大きい。昔画像伝送はNTSC(National Television System Committeeによるアナログカラーテレビ放送方式)等のアナログ通信インタフェースであったものが、1990年代にIEEE1394(Institute of Electrical and Electronic Engineers 1394と呼ばれるコンピュータと周辺機器をケーブル接続する通信規格)等にデジタル化され、さらにデジタルデータの多重化等の技術進展を経て、USB2.0(Universal Serial Bus version 2.0)やUSB3.0, Gigabit Ethernet等の高速な画像データ通信が実現されてきた。パソコン内でのCPUと内部メモリや通信インタフェースを接続するデータバスも、ISA(Industry Standard Bus)(~160Mbps), PCI(Peripheral Component Interconnect)(~1Gbps), PCI-Express(~5Gbps)と高速化されていき、膨大な情報量の画像データのハンドリングも容易になった。

これら計算機技術の進展により、大量な画像情報を取り扱う高速形状計測システムの研究開発において、実現可能なシステム構成の選択肢が広がり、より実用的なシステムを構築することが可能になった。

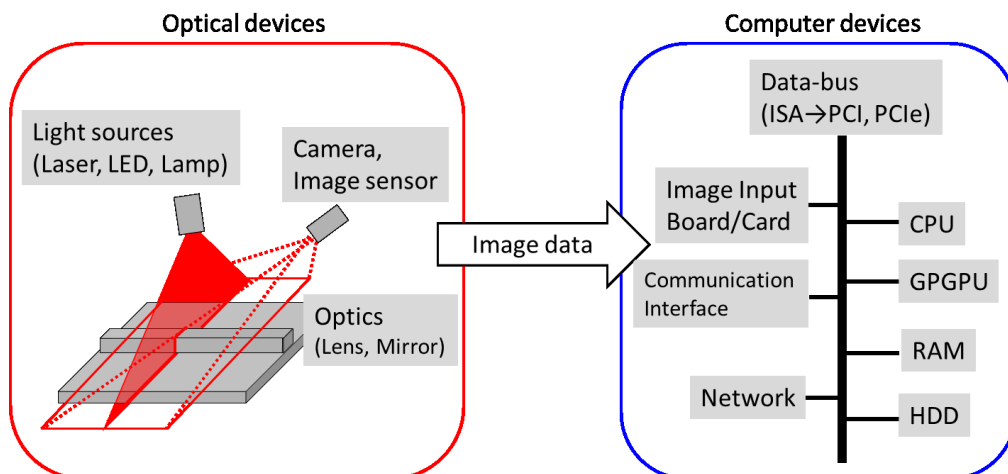


Fig. 1-6 Devices for inspections

1.3.2. 光学系技術の進展

次に、形状計測の計測一次情報の取得に必須の光学系技術(**Fig.1-6** 左図)についても、2000年代に入り急速に技術進展、普及化した動向について述べる。

形状計測・画像処理装置に必須の入力インタフェースとなる計測デバイス「産業用カメラ」については、コンシューマ向けデジタルカメラ(デジカメ)が携帯電話やスマートフォンに搭載され爆発的な普及を遂げたことに呼応して、多画素化・高速化・高精細化が進んでいった。現在では、 $2,000 \times 2,000$ 画素(4百万画素)レベルの産業用カメラや、標準撮像速度30fps(Frame per second)を超える100fpsレベルの高速カメラが安価に入手できるようになり、形状計測・検査システムを設計検討する上でも選択肢が増えた点の効果は大きい。

また非接触の形状計測技術の主役であり欠かすことのできない計測デバイスとして、光学部品(レーザやLED等の照明、レンズ・ミラー等)の高性能化が上げられる。光切断法などの形状計測技術の基礎となる古典幾何光学は中世ヨーロッパでの光学原理確立以来普遍であるが、一方で半導体技術の急速な発展は量子光学の世界を変え、特に21世紀に入り実用不可能と思われてきた青色LED¹⁻⁸⁾の実現や大出力の可視光レーザ光源、取扱い性が良い半導体固体レーザの実用化が進んだ点は、画像の入力段階での選択肢を広げた。

これら光学系技術の進展により、従来実現困難であった分解能や視野を実現し、実機適用時に問題となっていた環境光ノイズ等の対応や高感度化等を解決することができるようになった点は、光学系デバイス技術の進展の寄与は大きい。

1.3.3. 検査・計測システム高速化の研究動向

次に本研究で着目する「高速形状検査・計測技術」を、具体的に「装置化」「システム化」する取組みについて研究動向を述べる。前述の計測デバイスや計算機ハードウェア等の進展した技術を活用した上で、総合的な検査・計測システムの実用化を研究することは重要である。

石川、渡辺らは¹⁻⁹⁾、視覚センサと触覚センサによるセンサフィードバックに基づく高速知能ロボットの開発などのセンサフュージョン、高速画像処理並びに新しいアクティブ光学デバイス・システムを用いて高速撮像制御を実現するダイナミックイメージコントロール、並列処理に基づく高速画像処理技術などの研究を行っている。「多関節マニピュレータを用いた高速打撃動作」の研究では、1,000fpsの高速撮像ステレオカメラとその後段の並列画像処理により、1[msec.]単位での視覚フィードバックを実現し、人間が投げたボールを確実にロボットが打ち返すシステムを開発した。「1-kHz高速可変焦点レンズ」の研究では、1[msec.]の応答性でフォーカシングする技術を開発した。並列画像処理のベースとなるビジョンアーキテクチャでは、「画像モーメントセンサ」と呼ぶ 128×128 画素の撮像素子チップとセンサボードを試作開発し、リアルタイム画像処理を実現している。

藤垣らは¹⁻¹⁰⁾、高速かつ高精度な三次元形状計測技術の研究を行っている。「全空間テーブル化手法」と名付けた形状計測手法では、格子投影による三次元形状計測の際に全方位のキャリブレーション変換係数をLUT(Look Up Table)パラメータとして保持することで演算時間を削減し、リアルタイム計測を実現している。「サンプリングモアレカメラのリアルタイム変位分布計測・三次元計測」では、モアレ干渉縞の位相解析計算処理を並列計算処理可能な市販のFPGA処理ボード上で実現してリアルタイム計測可能なことを示している。

他にも、実吉ら¹⁻¹¹⁾のFPGAを用いたステレオカメラ法の高速化の研究や、村瀬ら¹⁻¹²⁾のGPGPUによる高速画像処理の研究等、最新の光学系や信号処理回路技術を用いた、高速化への研究開発が進められている。

1.3.4. 従来研究との比較

以上、計測デバイスの技術進歩と、これら計測デバイスを活用した高速画像処理に関する総合的な検査・計測システムの研究動向について述べた。これら従来研究では、周辺環境の高速現象を高い時間分解能で捉えるための計測システムの追及がなされており、特にロボティクス分野への応用では、高速現象を捉えた後のロボットのリアルタイム制御の実現に重点が置かれている。いわば、計測・制御システムの高速化の研究と言える。

一方、本研究は、産業上の応用を目的に、実際の生産ライン上での高速性を実現することで、従来実用化が困難であった検査工程を具現化することにある。すなわち、計測・検査システムの高速化の研究である。実用的な検査工程の実現のためには、要求される高速性を満足することはもちろん、実用可能な検査品質確保のためにも、周辺環境への対応や最適な良否判定を実現しなければならない。加えて経済性の観点での「実用コスト」の実現や、単に計測精度の実現のみではなく、導入・設置調整の簡便さ、安定稼働、メンテナンスの容易さ、といった計測装置の機器構成上の問題や、オンラインないし製品出荷検査における良否判定や早期異常検知などの生産ラインにおける品質保証・操業支援についての高次な判定支援技術の実現が必要である。

本研究では、高速性を実現するため FPGA によるリアルタイム並列画像処理技術の進展を踏まえ、さらに、計測装置化技術、高次判定支援技術までを統合的に実現する検査・計測システムを構築するためのプラットフォームを実現することに特徴がある。

1.4. 本論文の構成

第1章では、前節までに本研究の背景と目的、研究の中核となる「情報量縮約のためのシステム設計」、この設計指針に基づき高速画像処理を具現化するためのコアの要素技術「FPGA リアルタイム並列画像処理回路」の概要、加えて実用化に向けた技術課題への対応のための「計測装置化技術」「高次判定支援技術」の必要性について説明した。本研究では、難易度の高い計測技術課題を実現した上で、実運用面での有用性、先進性をも同時に実現するために、これら設計指針と三つの要素技術は重要であり、以降の章において三つの要素技術研究と各研究事例を通し、これら技術の有用性と適用限界を検証していく。

Fig.1-7 に、本研究の概要と各研究事例における実用上の技術課題・着眼点と相関を纏めた。設計指針「情報量縮約のためのシステム設計」を全体フレームワークの指針とし、実用的な高速形状計測技術を支えるコアの要素技術「FPGA リアルタイム並列画像処理回路」を共通プラットフォームとして試作し具現化した。各研究事例では実用上の技術課題は各々有り、例えば、

- ・ 第3章トンネル形状計測では、広範囲な視野
- ・ 第4章タイヤ形状計測では、超高速な形状計測
- ・ 第5章タイヤ形状認識では、高次の良否判定支援
- ・ 第6章異形棒鋼形状計測では、高速カラー画像処理
- ・ 第7章太陽電池ウェハ形状計測では、高アスペクト比

といった技術課題、キーワードで代表される実用上の課題に対し、「計測装置の高度化技術」や、「高速画像処理」「高次の良否判断支援機能」の最適化開発によって実用的な形状検査・計測システムを実現した。

本論文の構成を以下に示す。

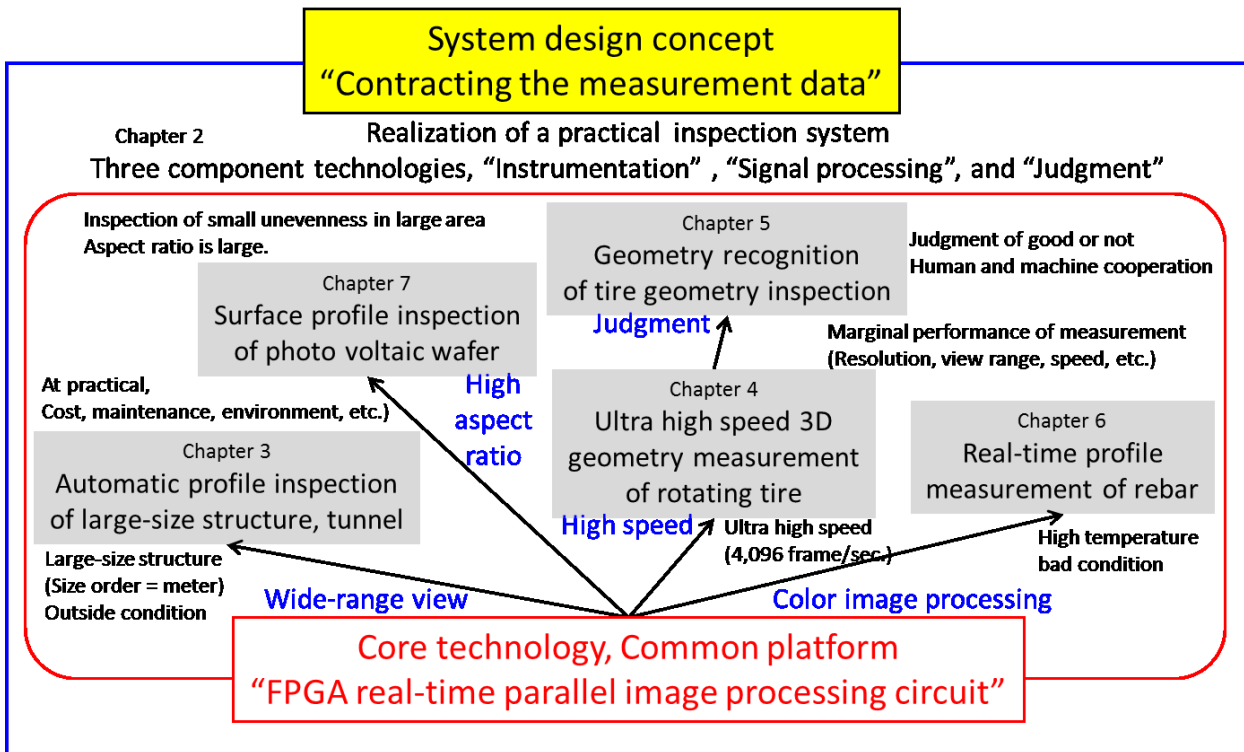


Fig. 1-7 Outline of this research

第2章では、前節までに挙げた高速形状検査・計測システムの全体フレームワークを構成する以下の三つの主要要素技術(Fig.1-7 上段)について、さらに詳細に技術面を論じる。

- (1) 計測装置化技術：計測環境に応じた光学系構築技術
- (2) 高速画像処理技術：FPGAによるリアルタイム並列画像処理技術
- (3) 高次判定支援技術：検査課題に応じた計測結果の判定技術

これら三つの要素技術は、本研究の目的となる「実用的な高速形状検査・計測システム」を実現するための基本的な構成要素であり、光学系、高速回路、ソフトウェアでの画像処理技術、といった情報量縮約のための各段階で主要な要素技術となる。

第3章では、「高精細高速画像処理カメラによるトンネル等大型構造物の形状自動計測¹⁻¹³⁾」の実用化事例の研究を通し、トンネルやプラットフォーム等の屋外の大型構造物に対する形状計測課題を論ずる。Fig.1-7に示すように、本研究中、最も大きな計測対象物を取り扱っており、また唯一の屋外計測事例である。数 m オーダの大型構造物に対して 1~10mm オーダの高分解能な形状計測が実用上要求される中、大型構造物に適した光学系(撮像機構)の開発と、高精細/多画素カメラに FPGA リアルタイム並列画像処理回路を適用することで情報量縮約のためのシステム設計を行った研究である。また屋外環境での高精度形状計測を実現する上での特有課題として、周辺の環境光ノイズに対する画像処理・情報量縮約技術を実用化した研究である。

第4章では、「超高速画像処理カメラによるタイヤ等高速回転物の高速三次元形状計測¹⁻¹⁴⁾」の実用化事例の研究を通し、高速回転するタイヤに対する形状計測課題を論じる。Fig.1-7に示すように、本研究中、4,096fps といった最も高速な計測速度が要求される事例である。タイヤ製造での最終出荷検査工程で要求される検査時間(タイヤ1本1秒以下)に対応するため、毎秒4,096フレームでの高速画像撮像および後段での画像処理を FPGA

リアルタイム並列画像処理回路で実現した。また超高速画像撮像を実現するには露光時間も極小となるため、極小露光時間に対応するための複数シートレーザ光学系（撮像機構）を開発し実用化した。超高速な形状計測技術に対する情報量縮約のシステム設計を行った研究である。

第5章では、第4章の研究事例に続き、「タイヤ金型情報を用いたタイヤ外形形状検査の自動化¹⁻¹⁵⁾」の実用化事例の研究を通し、出荷検査に必要な製品の良否判断に関する形状認識技術を論じる。Fig.1-7 に示すように、本研究中、実用的な自動検査工程の実現に向け、計測後の形状データに対し、高次の認識技術や良否判定支援等、上位の認識技術に取り組んだ事例である。タイヤ製造での最終出荷検査工程では、測定したタイヤ表面の凹凸形状データから本来正常な凹凸形状（ロゴや模様等）と不良となる欠陥凹凸形状を正確に弁別認識する必要がある。タイヤ金型モデルに基づく正常な凹凸形状の自動計算手法を確立し、更に人間・機械協調型の自動検査システムを構築することにより、自動化の難しい目視検査の良否判定等を実用化した。高次の情報処理を詳細に分析することで、目的とする情報量縮約を実用化した研究である。

第6章では、「高速カラー画像処理カメラによる異形棒鋼の圧延中リアルタイム形状計測¹⁻¹⁶⁾」の実用化事例の研究を通し、鉄鋼生産工程の中、高温線状物に対する形状計測課題を論ずる。Fig.1-7 に示すように、本研究中、高温・悪環境下の計測対象物に対応すべく、高速カラー画像処理技術を開発した事例である。製造途中の棒鋼は温度 900°C以上のため赤外線を中心とした自発光成分が強く、一般的なモノクロ単一波長のレーザ光源を用いた光切断法では高精度な形状計測は難しい。高温線状物に適したカラー多波長の光学系（撮像機構）の開発と、波長別に画像処理が可能な FPGA リアルタイム並列画像処理回路を適用することで情報量縮約のシステム設計を行った研究である。波長軸による多重化は計測装置の小型化にも有利であり、高温や粉塵等過酷な鉄鋼生産現場にも適した冷却筐体等の計測デバイスを構築した研究である。

第7章では、「太陽電池ウェハ等大面積平面中の微小凹凸欠陥表面形状検査¹⁻¹⁷⁾」の実用化事例の研究を通し、極めて高い平面度が要求される太陽電池ウェハに対し、微小な表面凹凸欠陥の形状計測課題を論ずる。Fig.1-7 に示すように、本研究中、大面積視野中の微小な凹凸形状の計測といった最も高アスペクト比が要求される事例である。 μm オーダの凹凸欠陥に対し、100mm オーダのウェハは相対的に大面積になる。大面積視野に対する微小な凹凸形状計測を実現するため、そのアスペクト比を大きく変化させることのできる光学系（撮像機構）の開発と、FPGA リアルタイム並列画像処理回路の組合せによりコストダウンされた実用的な高速形状検査・計測技術を実現した研究である。

最後に第8章で、各事例の研究成果を纏めるとともに、本研究の総括した結論と考察を述べる。また本研究を通して見えてきた新たな課題、残された課題について述べる。

参考文献

- 1-1) 経済産業省：産業構造ビジョン 2010（産業構造審議会産業競争力部会報告書）；
<http://www.meti.go.jp/committee/summary/0004660/vision2010a.pdf>
- 1-2) 大澤尊光，高辻利之，佐藤理：ものづくり産業を支える高精度三次元形状測定；産
総研 Synthesiology, Vol.2, No.2, pp.101-112, (2009)
- 1-3) 今井孝：製鉄・製鋼プロセスを対象としたマイクロ波レベル計の計測技術；R&D 神
戸製鋼技報, Vol.57, No.3, pp.16-20, (2007)
- 1-4) 北川克一：画像処理による目視検査自動化の 30 年；検査技術，
Vo.17, No.10, pp.19-26, (2012)
- 1-5) 小室孝，石川正俊：ビジョンチップを用いたオンライン計測；計測技術，
Vol.30, No.9, pp.1-4, (2002)
- 1-6) Moore, G.E.: Cramming More Components onto Integrated Circuits; Electronics,
Vol.38, No.8, pp.114-117, (1965)
- 1-7) 高野英美代，森吉達治：GPU を用いた動画像符号化の高速化；映像情報メディア学
会誌, Vol.66, No.10, pp.823-826, (2012)
- 1-8) 中村修二：GaN 系発光素子の現状と将来；応用物理, Vol.65, No.7, pp.676-686, (1996)
- 1-9) 石川正俊：ビジュアルサーボイングの現状と将来；計測と制御, Vol.40, No.9,
pp.615-617, (2001)
- 1-10) 藤垣元治，森本吉春：全空間テーブル化手法による格子投影三次元形状計測；実験
力学, Vol.8, No.4, pp.92-98, (2008)
- 1-11) 加賀美光二，實吉敬二：自律移動ロボットのための FPGA を用いたオプティカルフ
ローのリアルタイム計算；第 32 回日本ロボット学会学術講演会予稿
集, PS-3J1-02, (2014)
- 1-12) 出口大輔，井出一郎，村瀬洋：画像認識と GPU；日本ロボット学会誌, Vol.28, No.3,
pp.268-271, (2010)
- 1-13) 高橋英二，迫田尚和，朝日賢一，福本陽三：超高速画像処理カメラによるトンネル
形状自動計測装置；計測自動制御学会論文集, Vol.48, No.12, pp.863-871, (2012)
- 1-14) 高橋英二，迫田尚和，森本勉，野中俊克，堀口史郎，松下康弘：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；R&D 神戸製鋼技報，
Vol.58, No.2, pp.62-66, (2008)
- 1-15) 高橋英二，荒木要，迫田尚和，武田玄，村上将雄，松原義明：タイヤ金型情報を用
いたタイヤ外形形状検査装置；自動車技術会論文集, Vol.46, No.1, pp.213-218, (2015)
- 1-16) 高橋英二，片山亮，迫田尚和：高速カラー画像処理カメラによる異形棒鋼の圧延中
リアルタイム形状計測；鉄と鋼, Vol.101, No.3, (2015)；2015 年 3 月掲載予定

- 1-17) E.Takahashi, M.Kajita, K.Hayashi, Y.Fukumoto, S.Sumie, H.Hashizume: In-line geometrical characterization system for PV-wafer and cell process; The 4th international workshop on science and technology for Crystalline Si Solar Cells (CSSC4),PS-22,(2010)

2. 高速形状検査・計測プラットフォーム を構成する主要要素技術

2.1. 緒言

第1章では、実用的な高速形状検査・計測システムの実現のためには、その計測システムの設計指針において「情報量縮約の最適配置」に基づき、コアの要素技術「FPGA (Field Programmable Gate Array) リアルタイム並列画像処理回路」の実現や、実用面での技術課題への対応として「計測装置化技術」や「高次の良否判定支援技術」での最適化開発が重要であることを述べた。

第2章では、実用化のために重要な以下の三つの要素技術について、更に詳細に、技術面について論じる。

- (1) 計測装置化技術：計測環境に応じた光学系構築技術
- (2) 高速画像処理技術：FPGAによるリアルタイム並列画像処理技術
- (3) 高次判定支援技術：検査課題に応じた計測結果の判定技術

これら三つの要素技術は、本研究の目的となる「実用的な高速形状検査・計測システム」を実現するための基本的な構成要素であり、光学系技術、高速回路技術、ソフトウェアでの画像処理技術と、情報量縮約の各段階で主要な要素技術(**Table 2-1**)となる。

2.2. 計測装置化技術：計測環境に応じた光学系構築技術

2.2.1. 様々な光学系形状計測手法

高速形状計測技術の基礎となる要素技術に光学系技術がある。形状計測手法の内、特に高速性が必要な場合、非接触で形状計測が可能な光学系を用いた形状計測手法が選択される場合が多い。本研究では、三角測量の応用で、二次元平面で形状計測が可能なより高速な光学的形状計測手法である光切断法を中心技術として取り上げる。光切断法以外の光学的な形状計測技術についても種々あり、これら手法についても個別の研究事例の一つとして、後述する本研究のコアの要素技術である「FPGA リアルタイム並列画像処理回路」と組み合わせることも可能であるが、ここでは光切断法との組合せについて詳述する。

まず、光学的な形状計測手法について、特に光学的な観点から下記に解説する。

Table 2-1 Main component technologies

Component technology	Approach of this research	Development examples
(1) Instrumentation	Light section method with high speed and high resolution using multi light sources	Large-sized structure of tunnel High speed rotation tire High temperature wire rod Large area and small unevenness wafer
(2) Signal processing	FPGA special circuit Image processing in a pixel unit synchronizing with CMOS clock.	FPGA real-time parallel image processing circuit Ultra high speed camera at 4KHz Mega pixel real-time image processing RGB color image processing
(3) Judgment function	User interface Dialog with operator	Human and machine cooperative interface Tire inspection teaching

(1) 三角測量法²⁻¹⁾

土木工事や地図作成などで古くから用いられてきた手法であり、近年の産業応用での形状計測する際にも、レーザ変位計の測定原理に用いられている普及した手法である。レーザ変位計では、測定対象物の表面にポイントレーザを照射し、これを別角度のフォトアレイで観測し、フォトアレイ上のポイントレーザの位置から散乱角度を割り出すことで、レーザ変位計から測定対象物の表面までの距離を計測するものである。

従来接触式（タッチセンサ＋ステージ移動機構）のポイント距離計測に比べて、移動機構が不要な分、光の速さで距離計測が可能である。

(2) 光切断法²⁻²⁾

三角測量法を多点に応用した距離・形状計測手法。シートレーザ光を測定対象物に照射し、測定対象物表面の断面形状を、別角度から二次元エリアカメラで撮像する。カメラで撮像した画像上の画素位置は、測定対象物の断面形状を示しており、画素を凹凸高さ（距離）に変換して断面形状を一回の撮像時間で瞬時に求めるものである。

三角測量法に比べ、多点の距離・形状を同時計測するため、さらに高速に形状計測が可能な手法である。近年、シートレーザ光とカメラを組合せたセンサヘッドを、汎用的な 3D 形状センサとして市販されている。

カメラの 1 画像中から多点の画素位置＝形状を同時に計算出力するためには、撮像と同時に高速な画像処理が必要であったため、21 世紀に入ってから高速カメラ技術の発展を待つ必要があった。最近では、安価な高速カメラやパイプライン並列画像処理回路技術の進展により、様々な汎用的な 3D 形状センサが実用化されている。

(3) ステレオカメラ法²⁻³⁾

前記(1)(2)の三角測量法をベースにした距離・形状計測手法は、点や線のレーザを測定対象物に照射するアクティブな形状計測手法である。これに対し、ステレオカメラ法は、人の二眼視をモデル化した左右 2 つのカメラにより測定対象物を、視差をつけて画像撮像し、両カメラ中の画像の対応点の変化量から距離・形状計測を行うものである。

レーザ等の照明光学系が不要なパッシブな形状計測手法のため、装置構成が簡単になり実適用が容易な反面、高精度な形状計測には不向きな一面がある。もっとも、画像中の対応点の割り出しをより厳密に行うため、十字等のパターンを測定対象物に投影する方法や、そもそも測定対象物にマーカシール等を貼り付ける方法により、高精度化を図るといった手法もある。

(4) Time of Flight (TOF)法²⁻⁴⁾

ここまで光の幾何光学的な性質（直進性や反射の法則）を用いた形状計測手法を説明したが、光は、振幅・強度、波長や位相等の波の性質も併せ持っており、これら光の波の性質を利用した距離計測手法の一つに、Time of Flight (TOF)法がある。

TOF 法は文字通り、光が測定対象物まで直進し反射して戻ってくるまでの光の飛行時間を測定し、光速に時間をかけて距離を計測するものである。ポイント式の距離計測のため、測定対象物の三次元形状を求めるためには、ポリゴンミラー等を用いて走査する。光速($3 \times 10^8 \text{m/s}$)のため光の飛行時間は極短時間となり、例えば、距離 3m では光の飛行時間は 10nsec である。高精度な距離・形状計測のためには高精度な飛行時間計測が必須であり、投光側レーザをパルス変調し、受光側は変調された位相差を高精度に検知する回路を用いて飛行時間を高精度に計測する手法である。

(5) 干渉縞²⁻⁵⁾・モアレ²⁻⁶⁾等の利用

他にも、光路差をつけた 2 つの光を重ねて干渉縞を発生させ、これを測定対象物に照射することで、測定対象物の形状に応じた微小な光路差が干渉縞の模様パターンが変化する

ことを、カメラ等で画像撮像し画像処理することで微小な形状変化を検出する手法や、幾何光学的に格子パターン等を作った光を照射することでモアレパターンを生成して同様に形状計測する手法などもある。干渉縞やモアレによる形状計測は、一般的には、高精度な平面形状に対する微小な凹凸や変形など微小な形状変化を検出する事例に適用されることが多い。

2.2.2. 複数光源による高速・高精細な光切断手法

以上紹介した光学系形状計測技術の中、本研究では、特に実用的な高速性を実現することに適した光切断法を用い、具体的な実用化事例を通して最適化の検証を行った。

三角測量の原理を面的に拡張した光切断法(**Fig.2-1**)は、スリット状のシートレーザ光を測定対象物の表面に照射し、これを別の角度からカメラにより撮像すると、撮像画像上にはシートレーザ光の輝線（以下、光切断線）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撮像することで、物体の三次元表面形状が得られる。

しかしながら実際の形状計測では、要求仕様を満足する形状計測性能と高速測定性能の実現のために、個別事例の技術課題毎に光切断法の光学系を最適化する必要がある。個別の技術課題に応じて、

- ・ シートレーザとカメラの挟み角等の光切断法の光学系配置
- ・ シートレーザの幾何光学的な投光形状
- ・ シートレーザの光波長や強度
- ・ カメラの視野範囲、カメラの使用台数や分割測定

といった光学条件を最適化することで、実用上の要求仕様を満足する測定対象物の形状情報の取得と、さらに光学的な形状計測におけるバックグラウンドの各種ノイズ等の情報量の縮約を実現する。実用的な高速形状計測を実現する上で、光学系での初期段階での情報量の縮約は重要な要素技術の一つである。特に、高速性や高精細化のための光切断法の光切断法では、短時間露光に対応すべくシートレーザの強度を高めたり、シートレーザのスリット幅を絞り高精細化したりしなければならない。この一つのやり方として、複数のシートレーザ光源を同時に用いる手法を開発した(**Fig.2-2**)。

(1) 大型構造物に対する光切断法(**Fig.2-2(1)**)

第3章で論じる「高精細高速画像処理カメラによるトンネル等大型構造物の形状自動計測」の研究では、トンネル等の大型構造物の断面形状を全周輪切りで同時測定する必要があるため、「全周照射シートレーザ」を開発した。また広い測定範囲と高精細な空間分解能を両立させるため、カメラ6台で測定範囲を分割測定した上で、サブピクセル処理を用いて空間分解能を高める光学系配置とした。

(2) 高速回転物に対する光切断法(**Fig.2-2(2)**)

第4章で論じる「超高速画像処理カメラによるタイヤ等高速回転物の高速三次元形状計測」の研究では、高速回転するタイヤ表面形状を高分解能で形状計測する必要があり、露光時間1/4,096秒以下の極短時間でも計測を可能にするために、正反射条件を利用した光切断法の配置とシートレーザの複数光源化の開発を行った。

(3) 高温・高速線材に対する光切断法(**Fig.2-2(3)**)

第6章で論じる「高速カラー画像処理カメラによる異形棒鋼の圧延中リアルタイム形状

計測」の研究では、赤熱し高速に生産ラインを流れる棒鋼に対して材幅値および形状計測を実現するため、受光側カメラに RGB (Red, Green, Blue) 三波長のカラーカメラを用い、計測項目 (材幅, 形状) や振動除去のためにそれぞれの波長を用いた光学系を構築し、多重化した波長方向でのリアルタイムな光切断画像処理を開発した。

(4) 大面積中の微小凹凸形状に対する光切断法(Fig.2-2(4))

第7章で論じる「太陽電池ウェハ等大面積平面中の微小凹凸欠陥表面形状検査」の研究では、極めて高い平面度が要求される太陽電池ウェハに対して微小な表面凹凸欠陥を形状計測するため、大面積視野に対する微小凹凸形状計測のためのアスペクト比を大きく変化することのできる「低角度斜入射光学系」を開発した。

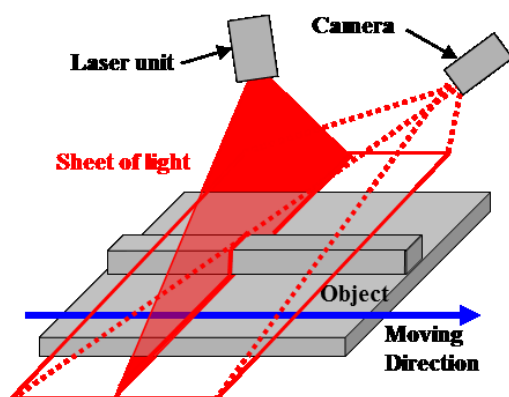


Fig. 2-1 Light section method

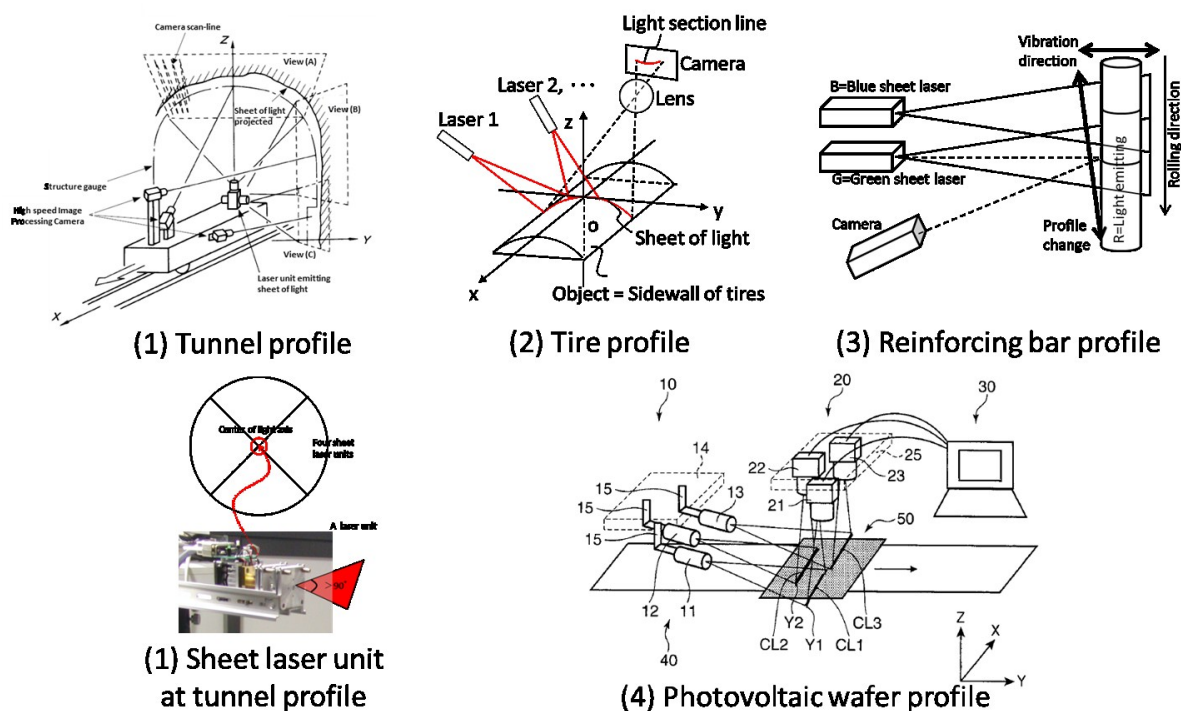


Fig. 2-2 Various types of light section method

2.3. 高速画像処理技術：FPGAによるリアルタイム並列画像処理技術

2.3.1. FPGA 回路技術

次に、本研究のコア技術となる要素技術の「FPGA リアルタイム並列画像処理回路」について述べる。

実用的な高速形状計測システムの実現のためには、前節で述べた「複数光源による高速・高精細計測に適用可能な光切断法」に加えて、その後段処理の高速画像処理を如何に実現するかは実用化の鍵となる。特に光切断法では、撮像素子で取得した計測一次情報は、光切断線を含む画像情報となっており、この冗長な画像情報の中から光切断線情報を如何に高速に抽出するか、言い換えれば、情報量縮約を如何に実用的な範囲で実現するかがポイントである。

画像処理を実現する一般的な手法としては、PC（パーソナルコンピュータ）上でのプログラム言語によるソフトウェア処理が考えられる。また組込機器ではリアルタイム OS 等を搭載したマイコン（マイクロコンピュータ）上でのソフトウェア処理もある。これらソフトウェアによる処理は、プログラミングにより複雑な画像処理や自由度の高い開発が可能な反面、コンピュータ上でのシーケンシャルな処理が必須となるため、画像をメモリに一旦蓄積しなければならず、リアルタイムな画像処理には不向きである。

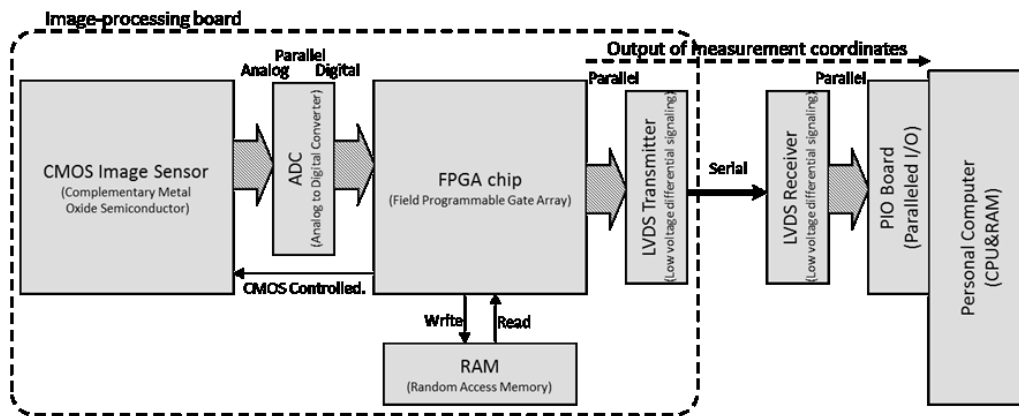
リアルタイムな画像処理を実現するためには、撮像素子と直接連動したハードウェア回路による画像処理が必要となる。撮像素子に直接接続する後段のハードウェア回路として、映像信号のアナログレベルでの画像処理など専用回路を設計・製作するアプローチ²⁷⁾も、従来からとられているが、専用のハードウェア回路を作る場合、実用的には開発コストやリスクが大きくなり、中々実用的な高速形状計測システムの実現が難しかった。本研究では、このハードウェア制約を取り除く一つの方法として、通信制御機器²⁸⁾などに専ら使用されてきたプログラミング可能なハードウェア回路素子 FPGA(=Field programmable gate array)に着目し、これを光切断線抽出のリアルタイム画像処理回路に適用する手法を新たに開発した。さらに、各研究事例を通して様々な個別の技術課題に適用すべく、その基礎となる「FPGA リアルタイム並列画像処理回路」を共通プラットフォームとして試作実現した。

共通プラットフォームとしての「FPGA リアルタイム並列画像処理回路」の回路構成および画像処理について説明する(Fig.2-3(1))。

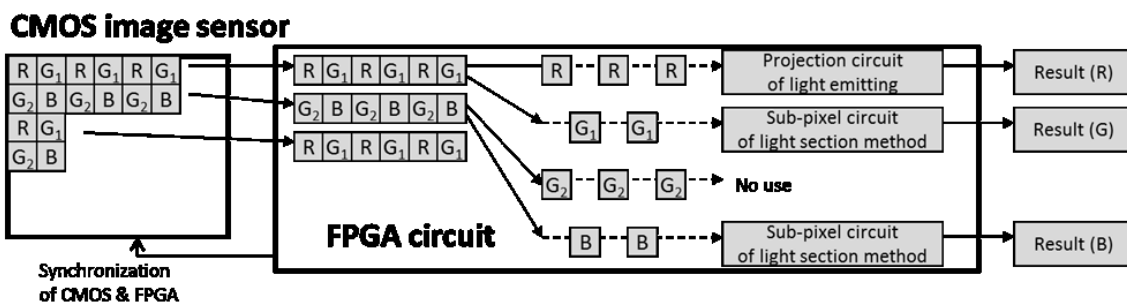
撮像素子には、部分撮像処理可能な CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) イメージセンサを使用した。撮像素子には他に、CCD (Charge Coupled Device) イメージセンサがあるが、高精細な撮像は可能だが部品単価が高く、また 1 ライン毎の撮像制御しかできないため高速画像処理に不向きである。

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。高速化のために、各種画像処理は全てパイプライン回路により並列化して処理される。具体的には、FPGA チップで生成する内部クロックにより CMOS 撮像タイミングを制御し、CMOS 撮像タイミングおよび CMOS からの画像情報入力タイミングに同期して画素単位で画像処理を行う。光切断線からの位置情報抽出では、1 ライン毎に光切断線の中心位置座標をサブピクセル処理で計算する回路を用意し、1 ライン中 1 画素毎の入力タイミングにて輝度判定回路を動作させ、光切断線のピーク輝度画素近傍の画像情報のみを一時的に保持し、1 ライン終了時の水平同期信号入力時に、一時的に保持したピーク輝度画素近傍の画像情報からサブピクセルを計算して光切断線の中心位置座標のみをメモリに保持するものである。このようにして 1 ライン毎に光切断線の中心位置座標のみを固定小数点でメモリ保持することで、1 画像全ての取得が完了した時点で、光切断線の中心位置座標のみの情報量までリアルタイムに情報量縮約ができています。

Fig.2-3(2)では、カラーの CMOS イメージセンサに「FPGA リアルタイム並列画像処理



(1) Monochrome FPGA basic circuit



(2) Color FPGA circuit

Fig. 2-3 Configurations of FPGA real-time parallel image processing circuit

回路」を適用した場合の回路構成および画像処理を示している。CMOS イメージセンサから出力される RGB 三成分の画像情報を、FPGA 回路内で逐次振分け、各カラー成分に応じた画像処理回路に画像情報を流し込む構成である。

次に、「FPGA リアルタイム並列画像処理回路」が如何に並列で画像処理しているかについて、技術的な主な仕掛けを説明する(Fig.2-4)。CMOS からの画素単位の輝度情報出力は、図中左側の D00~D0f の各端子から FPGA 回路に入力される。“>”で示される回路は、大小比較を行う回路であり、CLK 端子からのクロック信号に基づき、1 クロック毎に入力された輝度情報は大小比較されて右側に輝度が大きいものが選択されて出力される。図中、中心にある“max_reg”、“addr_reg”は、5 クロック進んできた最大輝度の画素情報（輝度と画素位置）を一時的に保存しておくレジスタであり、1 ラインの終了を示す“END-LINE”端子からの信号が来るまで最大輝度の画素情報を更新しながら保持しておく。1 ラインの終了時に、図中右側の SDRAM (Synchronous Dynamic Random Access Memory) メモリの所定位置に 1 ライン上で最大輝度となる画素情報が出力される。このようにして、1 ライン毎の最大輝度の画素情報、すなわち光切断線のピーク位置を、画素ブロック単位で逐次処理しながらリアルタイムに位置抽出する回路を開発し実現した。

Fig.2-5(1)では、クロックに同期して画素単位にパイプライン処理が進んでいく様子をタイミングチャートに示している。加えて、Fig.2-5(2)では、画像フレーム単位でも差分処理や積算処理を行うパイプライン処理を実現するためのタイミングチャートを示している。

画像フレーム単位でのパイプライン処理を行うことで、環境ノイズ光の除去をリアルタイムで画像処理することができる。

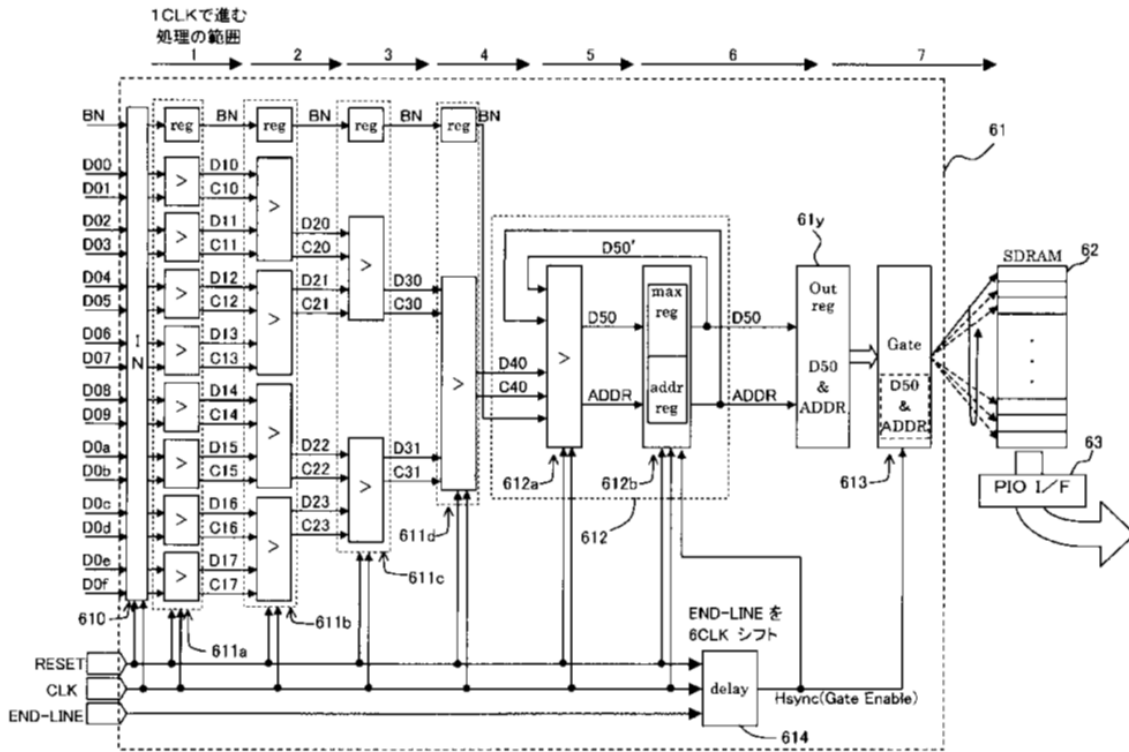


Fig. 2-4 Main circuit of FPGA real-time parallel image processing circuit

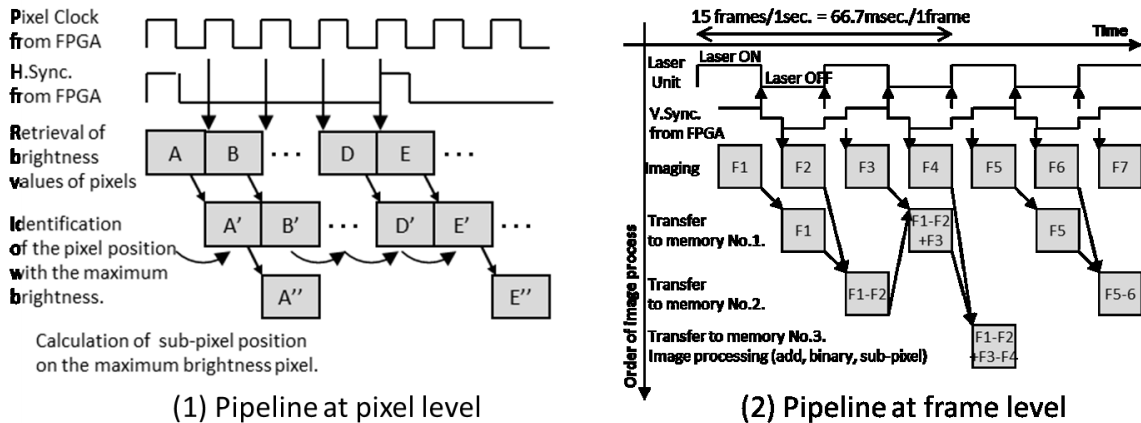


Fig. 2-5 Examples of FPGA real-time parallel image processing circuit

2.3.2. 検査課題に応じた FPGA 回路の最適化技術

以上で述べた「FPGA リアルタイム並列画像処理回路」を共通プラットフォームとして、具体的に個別事例への適用を行い、本回路の実用性・有用性を検証した。

(1) 基本的な高速画像処理回路への適用(Fig.2-3(1), Fig.2-4, Fig.2-5(1))

第4章で論じる「超高速画像処理カメラによるタイヤ等高速回転物の高速三次元形状計測」や第7章で論じる「太陽電池ウェハ等大面積平面中の微小凹凸欠陥表面形状検査」の研究では、高速回転するタイヤや高い平面度が要求される太陽電池ウェハに対し、基本となる共通プラットフォームとしての「FPGA リアルタイム並列画像処理回路」の適用研究を行った。特に「タイヤ等高速回転物の高速三次元形状計測」では、計測速度 4,096fps の超高速な計測および画像処理を実現するため、前節で述べた FPGA 回路による CMOS イメージセンサおよび A/D 変換回路の同期制御を実現し、パイプライン並列画像処理回路の正常動作を確認した。これら各研究事例を通じて、コアの要素技術となる「FPGA リアルタイム並列画像処理回路」を実現した。

(2) ノイズ除去を組合せた高速画像処理回路への応用(Fig.2-5(2))

第3章で論じる「高精細高速画像処理カメラによるトンネル等大型構造物の形状自動計測」の研究では、前記(1)と概ね同じハードウェア構成ながら、本事例特有の屋外環境下での計測課題に対応すべく、周辺環境ノイズ光をリアルタイムに除去(情報量縮約)が可能なアルゴリズムを開発し、これを「FPGA リアルタイム並列画像処理回路」に搭載して実用性能を検証した。具体的には、光切断法で用いるシートレーザを点滅制御し、点灯時と消灯時の画像を撮像してフレーム間で差分および積算することで、周辺環境ノイズ光が除去できることを検証した。

(3) カラー画像処理回路への応用(Fig.2-3(2))

第6章で論じる「高速カラー画像処理カメラによる異形棒鋼の圧延中リアルタイム形状計測」の研究では、カラーの CMOS イメージセンサを用い、RGB 三波長のカラー画像情報を、FPGAによってRGBそれぞれに分解して、リアルタイム並列処理する回路を構築し、棒鋼の形状や材幅値を同時計測できることを検証した。

2.4. 高次判定支援技術：検査課題に応じた計測結果の判定技術

本研究の目指す「実用的な高速形状検査・計測システム」では、その実用性を最終的に実現するため、形状計測結果を自動で認識・判別・検査するための要素技術が必要不可欠である。

情報量縮約の観点からは、リアルタイムに得られた形状情報から、検査結果となる良否判定情報(究極的には 1bit 情報)まで一気に情報量縮約するためには、形状情報に対する様々な知的画像処理を実現しなければならない。この完全な自動検査を実用的に実現するためのポイントとしては、むしろ検査基準が明確であったり、検査・計測対象物の形状が比較的単純な物体であったりすることが重要である。

第3章で論じる「高精細高速画像処理カメラによるトンネル等大型構造物の形状自動計測(Fig.2-6(A))」では、建築限界といった明確な検査基準に基づき良否判定を行えばよく、計測したトンネル形状データの各点が建築限界の内か外かを閾値判定するといった比較的シンプルな検査ロジックとなる。第6章で論じる「高速カラー画像処理カメラによる異形棒鋼の圧延中リアルタイム形状計測」の材幅値の良否も閾値判定によるシンプルな検査ロジックで実現できるし、第7章で論じる「太陽電池ウェハ等大面積平面中の微小凹凸欠陥表面形状検査」では検査対象物が高精度な平面度を持つウェハ表面からの微小変位量によ

り閾値判定することで対応できる。

一方、第4章および第5章で論じる「超高速画像処理カメラによるタイヤ等高速回転物の高速三次元形状計測」および「タイヤ金型情報を用いたタイヤ外形形状検査の自動化」では、タイヤのサイドウォールにデザインされた各種文字やロゴ・図形など様々な正常凹凸形状が存在する中、局所的な凹凸欠陥を形状面で弁別して認識・良否判断しなければならず、シンプルな検査ロジックのみでの実用化は難しい。タイヤ形状の良否判定など従来人手による目視検査が行われている事例では、目視検査員といった人間の知恵・知識を活用可能な情報に加工して人間に表示する「ユーザインタフェース技術」も重要な要素技術となる。

具体的には、第5章で論じる「タイヤ金型情報を用いたタイヤ外形形状検査の自動化」では、自動検査に用いるためのレシピ、マスク画像データを、ティーチング・段取り時に、人間の目視確認を経て登録する。ティーチング時のマスク画像データは、一次処理として自動で画像処理・形状認識(Fig.2-6(C))を行い、その結果を、境界線マスク領域、正常凹凸部オフセット領域としてPCモニタ上に表示する(Fig.2-6(B))。人間は表示された自動計算結果を確認し、人間の知識を用いて自動計算結果を修正して登録することで、検査判定に用いるレシピデータを完成させる。人間の知識と機械の自動計算を統合し、適切に情報量が縮約された画像処理を実現することができる。

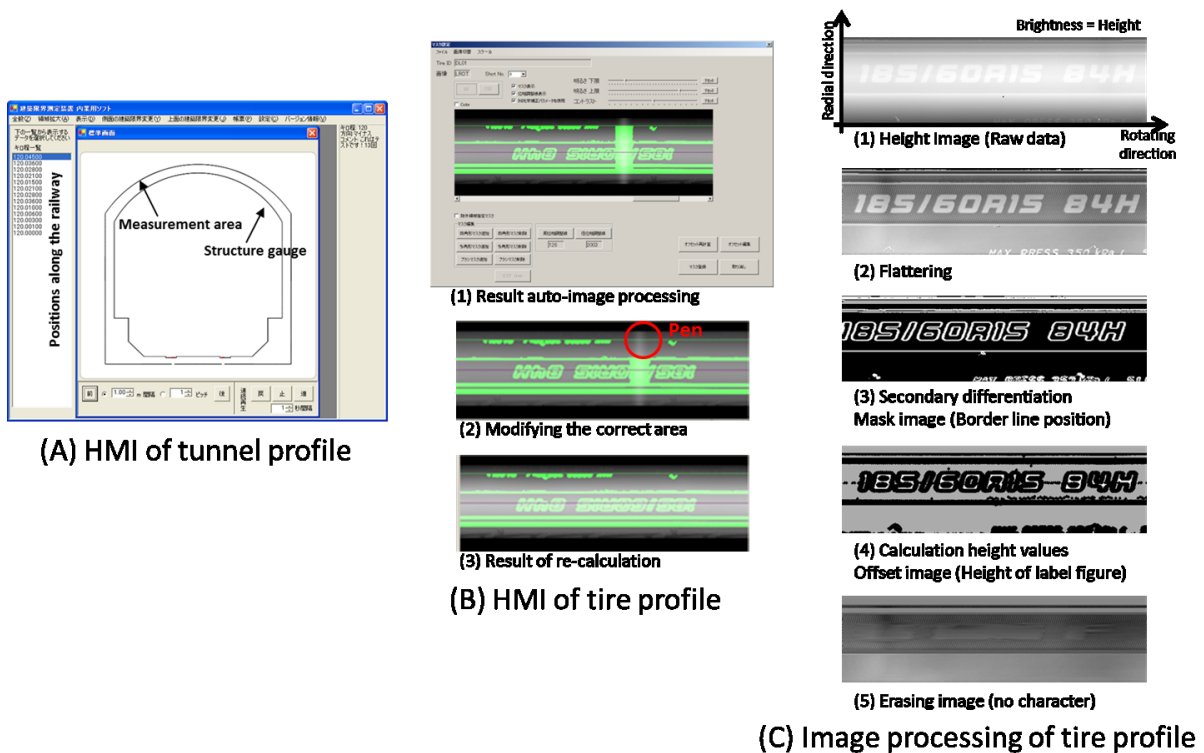


Fig. 2-6 Human and machine interface (HMI)

2.5. 結言

本章では、実用的な高速形状検査・計測システムを実現するための主要な三つの要素技術の技術面について、詳細に技術課題を説明し、技術課題に対する本研究での開発ポイントを示した。

「(1) 計測装置化技術」では、個別課題に適し実用化を達成するための技術として、「複数光源によるシートレーザ照射」にある。各個別課題に最適化した種々の複数光源光学系の例を説明した。「(2) 高速画像処理技術」では、コア技術となる「FPGA リアルタイム並列画像処理回路」について、開発した構造を説明した。基本となる本回路を拡張することで、各個別課題へ最適化できることを示した。「(3) 高次判定支援技術定」では、特にタイヤ外形凹凸形状の正常・欠陥の自動判定する画像処理ロジックを示し、実用的な装置とするためには人間・機械協調型のユーザインタフェースの構築が重要である点を示した。

これら三つの要素技術を用いた個別事例について、次章以降で詳細に検証する。

参考文献

- 2-1) 森忠次, 星仰: ダムの精密三角測量における誤差の検討; 土木学会論文集, No.141, pp.56-65, (1967)
- 2-2) 中川啓二, 松尾啓史: 光切断法による 3 次元画像を用いた外観検査技術; Ricoh technical report, No.39, pp.195-202, (2013)
- 2-3) 吉田睦, 山崎章弘: 人を検知するステレオ画像認識システム; Yamaha motor technical review, No.48, pp.81-86, (2012)
- 2-4) 村田記一: 未来の非接触 UI のカギを握る距離画像カメラ; 映像情報 Industrial, 2月号, pp.21-26, (2013)
- 2-5) 北川克一: 3 波長干渉計測のためのクロストーク補正; 計測自動制御学会産業論文集, Vol.8, No.14, pp.113-116, (2009)
- 2-6) 足利裕人: モアレ干渉パターンを用いた距離計の試作; 物理教育, Vol.54, No.2, pp.79-82, (2006)
- 2-7) 浅田邦博, 大池裕輔: 光切断法による高精細・実時間 3 次元撮像システム; 画像ラボ, 7月号, pp.40-44, (2004)
- 2-8) 阪口啓, 水谷慶, 高田潤一, 荒木純道: 5GHz 帯 MIMO ソフトウェア無線機の開発; 電子情報通信学会技術研究報告 .SR, ソフトウェア無線, Vo.105, No.36, pp.51-58, (2005)

3. 高精細高速画像処理カメラによるトンネル等大型構造物の形状自動計測

3.1. 緒言

鉄道保線分野におけるトンネルやプラットフォーム等の屋外の大型構造物に対する形状計測課題は、未だ十分には計測自動化が達成されていない。数 m オーダの大型構造物（トンネルやプラットフォーム）に対して 1~10mm オーダの高分解能な形状計測が実用上要求される中、大型構造物の精密形状計測に適した光学系（撮像機構）の開発と、高精細／多画素カメラに「FPGA リアルタイム並列画像処理回路」を適用することで、情報量の縮約を実現し、大型構造物であっても要求される計測分解能と実用的な計測時間を実現した研究事例³⁻¹⁾である。また屋外環境での高精度形状計測を実現する上での特有課題として、トンネル内の蛍光灯やプラットフォーム遠方の車のヘッドライト等、周辺環境光ノイズに対する画像処理についても、FPGA リアルタイム並列画像処理回路により実現することで実用化を達成した。

産業分野において、大型構造物や精密部品の形状計測、産業ロボットや自動走行システムの位置計測や自動制御等、物体の三次元形状や位置の自動計測へのニーズは高い。特に近年では、レーザやカメラ、コンピュータの著しい技術発展に伴い、物体の形状や位置を、高速・高精細に自動計測する様々なシステムが提案・実用化されはじめている。後述する次章でも、毎秒 4,096 枚で撮像するとともに同時並列処理によりリアルタイムで画像処理が可能な超高速画像処理カメラ³⁻²⁾を開発し、タイヤの三次元形状検査等の従来自動化が困難であった高速性を要求される様々な形状計測・検査装置への適用に取り組んできた。

本章では、鉄道の保線作業を対象に、移動しつつ周囲の大型構造物の三次元形状を高速に計測する技術について述べる。

鉄道の保線作業では、トンネルやプラットフォーム等の線路周辺の大型構造物の損傷や寸法異常などを、保線作業員が人手によって検査しているが、作業負荷軽減や効率化、ヒューマンエラーによる誤測定防止のためにも、三次元形状計測技術の活用が期待されている。しかしながら、測定時の振動やブレ、周辺環境からくるノイズ光等、屋外空間を移動しながら計測するにあたっての様々な技術的課題があり、汎用的な三次元形状計測技術だけでは対応できていない。一方、実用装置開発にあたっては、コスト面での配慮も必要である。

線路上の障害物を自動検査する自走式の「軌道障害物検査装置」については、「レーザ利用による軌道上建築限界測定装置」³⁻³⁾「高精度光切断法を用いた軌道障害物検出装置」³⁻⁴⁾があるが、高精度の連続走行測定を実現するために特殊な縦横不等倍光学系を採用しており、精密な光学系調整が必要で、装置が大型化する等の実用面での課題が残っていた。

一方、「位置測定車両」³⁻⁵⁾や「手押し型軌道障害物検査装置」³⁻⁶⁾では、レーザ距離計を用いた一点走査式の測定装置によって光学系の複雑化や装置の大型化を回避しているが、一点走査式ゆえに移動速度を上げると測定点に抜けが生じるため、今回要求される高速測定には適していない。また近年では、道路トンネル内面検査向けに高速一点走査式の「道路トンネル内面検査装置」³⁻⁷⁾も開発されているが、コストや使いやすさを含めた鉄道保線分野での実用化はこれからと考える。

なお、普及したステレオカメラでの立体視を用いてトンネル断面形状を静止して一括測定する試み³⁻⁸⁾や、測定範囲を架線や軌道に絞って移動しながら連続形状計測する試み^{3-9),3-10)}もあるが、汎用的なステレオカメラで移動しながら立体視測定するのは難しく、架線や軌道に絞った連続形状計測は測定範囲が限定されるなど、本課題の要件にはそぐわない。

以上のように、鉄道保線作業に実用上適した装置として、高精細や高速性といった自動化の要件を満足するとともに、コストパフォーマンスに優れた装置の実現には、さらなる開発が必要である。本研究では、本課題に適したキャリブレーション手法を開発することで、光切断法の光学系全体サイズを規定する基線長（レーザとカメラ間の距離）を「軌道障害物検査装置」³⁻⁴⁾の 4m に対して 2m に半減し、部品点数ではセンシングの主要な部品

となるカメラ台数も 14 台から 6 台に削減することで、重量では 7.5t から 200kg と約 1/40 に軽減し、装置体積も約 1/12 にコンパクト化した。これらの結果により、技術面では「軌道障害物検査装置」³⁻⁴⁾と同等程度を達成しながら、コスト面では大幅なコストダウンと扱いやすさを実現した。これにより、鉄道の保線作業での三次元形状計測技術の活用が大きく進展するものと期待される。

以下では、技術的な課題と解決策について述べる。

3.2. 技術課題

列車の安全運行において、トンネルやプラットフォーム等の大型構造物が、列車の安全通過範囲（以下、建築限界³⁻¹¹⁾という）の外に存在することを定期的に確認することは重要である。従来の保線作業では、作業員が「建築限界測定器」などの専用の寸法測定器具を用いて検査してきたが、手作業ゆえに 1 箇所 1 断面の測定に数分かかる上、作業員の技量・熟練度により測定誤差が生じる可能性もあり、保線作業の効率化と検査精度の高品質化が強く望まれてきた。一方、トンネルやプラットフォーム等のメートルオーダーの大型構造物であっても、建築限界の検査判定にはミリメートル単位の空間分解能が必要である。このように高精度に二次元断面形状測定を行い、さらに数キロメートルに及ぶ長大な線路上を数十センチメートル間隔で網羅的に計測・検査するための連続高速計測システムを実現する必要がある。過去の開発事例^{3-3),3-4),3-5)}においては、装置の大規模化や高速測定性能が不十分など、実用面での技術課題が多く残っていた。

本研究では、広い測定範囲を高空間分解能での高精細形状計測する高精細さと、長大な線路上を狭間隔で連続測定する高速性といった、相反する自動化の要件に対し、メガピクセル規模の撮像素子を複数個同期制御して撮像するとともに、同時並列でリアルタイムに画像処理して座標位置を取得する高速画像処理カメラシステムを開発することで、軽量コンパクトで、高分解能と高速測定性能を両立させた「軌道障害物検査装置」を開発した。これら諸要件を **Table 3-1** に纏める。

次に本研究の開発ポイントを、計測手法と高速化手法の観点から説明する。特に後述する高速化手法では、トンネルやプラットフォーム等の屋外での形状計測に特有の課題を解決するための周辺環境光ノイズ除去手法の開発と、それを専用の高速画像処理カメラシステムで実現することで、汎用のコンピュータと画像処理ソフトウェアの組合せでは実現困難であったリアルタイム画像処理技術を実用化した。

Table 3-1 Summary of requirements

	Conventional manual measurement	Requirements for automatic measurement
Spatial resolution	Manual measurement of every one point with Resolution<1mm	Resolution<1mm
Rate of measurement	A few minutes for 1 profile of tunnel.	15 frames/1sec.
Accuracy of measurement	Dependent on operator's skills	Accuracy<10mm There is traceability.
Repeatability of measurement		Repeatability<10mm

3.3. 計測手法（光学系技術）

3.3.1. 光切断法

物体の三次元形状を計測する手法として、三角測量の原理を面的に拡張した「光切断法」³⁻¹²⁾がよく知られている。Fig.3-1 にその測定原理を示す。

スリット状のシートレーザ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、撮像画像上にはシートレーザ光の輝線（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撮像することで、物体の三次元表面形状が得られる。

しかしながら、トンネル等の大型構造物といった測定対象では断面形状を全周輪切りで同時に測定する必要があるため、以下に述べる測定光学系側を自走移動する光切断法を用いる。

3.3.2. 全周照射シートレーザ

Fig.3-2 にトンネル形状測定を行う際の概略の光学系配置を示す。トンネル全周を光切断法により形状計測するためには、トンネルの概略中心より 360° 全周方向に向けてシートレーザ光を照射する必要がある。またトンネル表面には煤・苔・漏水などレーザ光を散乱させる様々な要因がある。それらに対応するため、シートレーザ光の照射光強度（密度）はできるだけ大きくして、カメラに受光される光切断線の輝度を確保しなければならない。これら課題を解決し、全周照射可能なシートレーザ光を実現するため、現在実用的に入手可能な大出力のレーザダイオード（連続出力 1W、発光波長 650nm）4 個を用い、それぞれシリンドリカルレンズによって拡がり角 $>90^\circ$ のシートレーザ光を形成し、これら 4 個のシートレーザを組み合わせることで 360° の全周照射シートレーザ光の投光器を実現した (Fig.3-3)。全周 360° を 90° 毎に 4 分割することで、シートレーザ光の両端が重なる部分においては、特に建築限界検査に重要となる測定範囲近傍にて両端がズレないように精密に光学系を調整した。たとえ重複部分にズレなどのトラブルがあっても建築限界に近い点を検知するような検出ロジックにすることで、障害物の見落しを防いでいる。

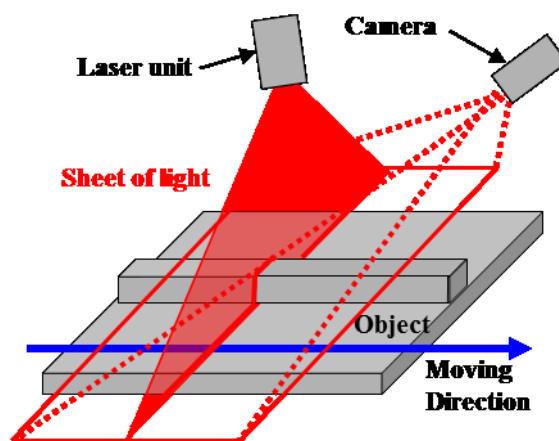


Fig. 3-1 Outline of light section method

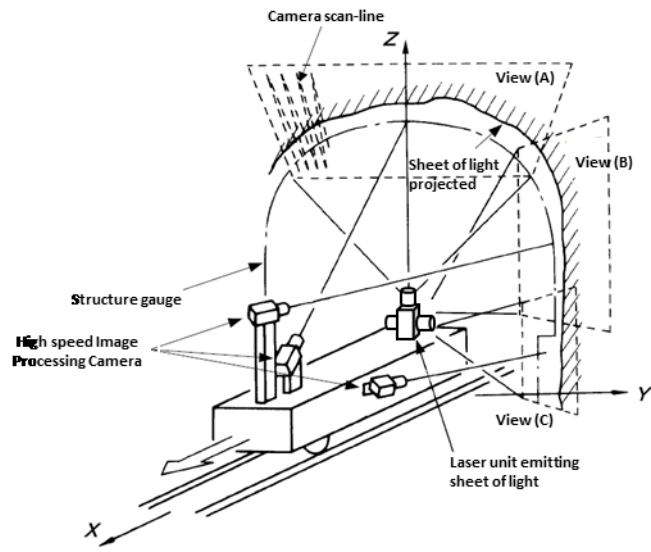


Fig. 3-2 Optical layout

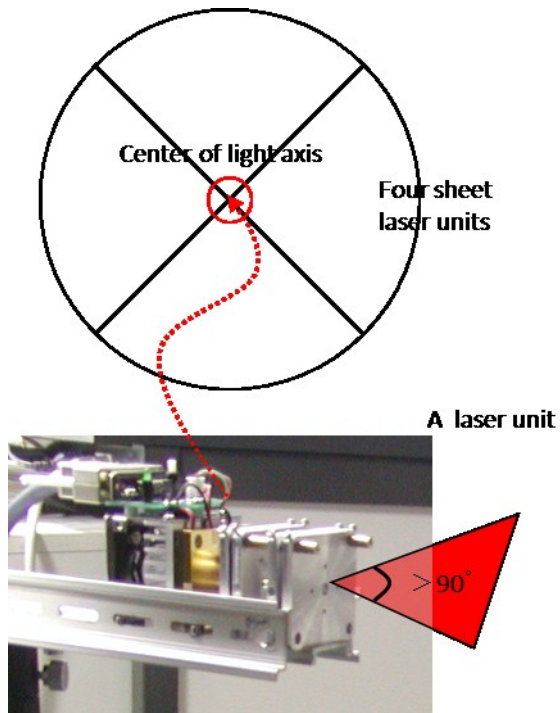


Fig. 3-3 A sheet laser unit

3.3.3. 測定範囲と空間分解能

Fig.3-4 に開発した「軌道障害物検査装置」のトンネル断面形状における測定範囲（視野）を示す。シートレーザ光はトンネルの概略中心位置より全周方向に照射し、トンネル天井部（領域 A）、トンネル左右側面部（領域 B）、プラットフォーム左右側面部（領域 C）、レール部（領域 D）のカメラ合計 6 台により光切断線を撮像する。プラットフォーム形状はトンネルよりも精密に検査する必要があるため、プラットフォーム専用測定範囲を狭め（領域 C）、離れ方向および高さ方向の空間分解能を高めたカメラ 2 台を設けた。レール専用カメラ 1 台は、後述する揺動補正処理用である。レール中心を基準点にして建築限界の判定を行うため、レール形状を精密に計測する。

建築限界判定のためには、レール中心から最遠部となるトンネル天井の頂点部（レール面から高さ 6600mm）の位置で、高さ方向における測定精度および再現性を 10mm 以下にする必要がある。一方、**Fig.3-4** に示した各領域に対してカメラ割付けした結果、トンネル天井頂点部では高さ方向の空間分解能が約 10mm/pixel となった。測定精度および再現性 10mm 以下を実現するためには、基線長を延ばす等の光学配置の変更や、更なる多画素カメラやカメラ台数の増加等を検討したが、カート台車の装置制約やコスト面から変更は難しく、後述するサブピクセル処理を用いて高さ方向の空間分解能を高めることとした。領域 A、D は高さ方向に、領域 B、C は離れ方向に、それぞれサブピクセル処理を適用した。

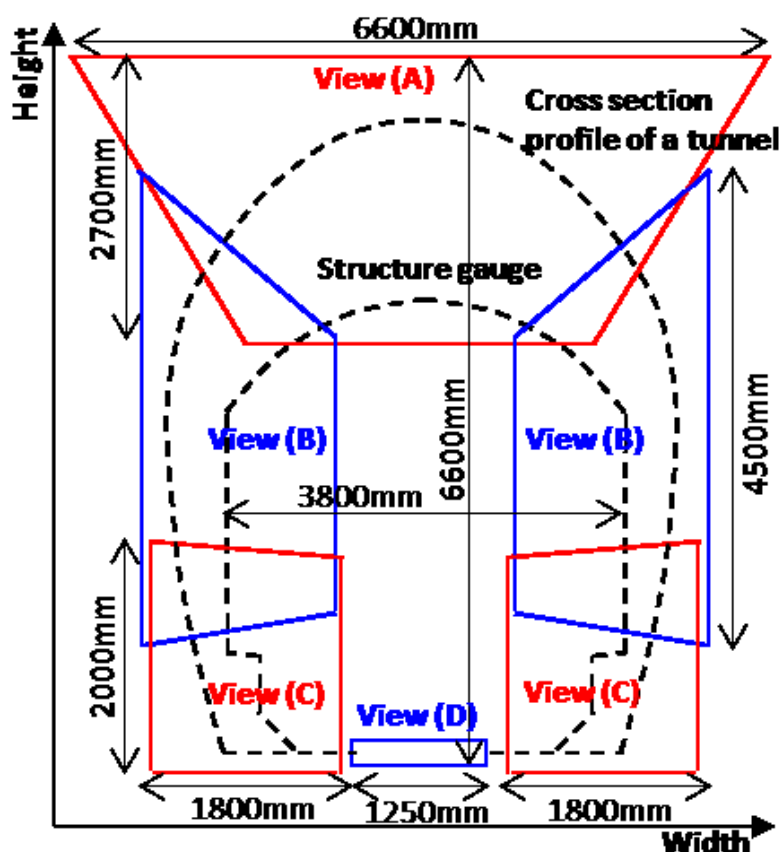


Fig. 3-4 Measurement area

3.4. 高速化手法（回路・ソフトウェア技術）

3.4.1. 測定時間と距離分解能

測定光学系（レーザとカメラ）を線路に沿って移動させながらトンネル等の形状測定をする場合、移動方向の距離分解能（測定間隔）は、測定光学系の移動速度と 1 断面形状の測定時間から決まる。鉄道保線作業の自動化要求ニーズから測定光学系の移動速度は時速 15km（秒速 4.2m）に設定し、これを本装置では毎秒 15 断面の形状計測をすることとした。この設定条件の場合、移動方向の距離分解能は 277mm/1 断面となる。概ね 30cm 毎の測定間隔は、従来の人手検査に比べて十分に狭い間隔での自動測定となる。ここでは、そのような計測を可能にするための高速画像処理手法について述べる。

3.4.2. 周辺環境光ノイズ除去手法

本測定装置は、夜間の鉄道保線作業時に屋外で使用されるため、蛍光灯や自動車のヘッドライトなどの周辺環境光がカメラに入りノイズ光となるため、それを除去する必要がある。

Fig.3-5 にノイズ光除去手法を示す。本来計測すべき光切断線 L_c の周辺に、ノイズ光 $Ns1$ と $Ns2$ が存在する場合を考える。 $Ns1$ は測定対象物の近傍に存在し、本装置の移動に伴って画像上を移動していく特性を持つ。例えば、トンネル内の蛍光灯などが該当する。 $Ns2$ は測定対象物から遠方に存在し、本装置が移動しても画像上では固定位置に撮像される。例えば、プラットフォーム測定時に遠方にある自動車のヘッドライトなどが該当する。

Fig.3-5 右図に示すように、レーザ(L_c)を一定周期で点滅させながら撮像した各フレームの差分と加算を繰り返すことでノイズ光 $Ns1$, $Ns2$ を除去し、光切断線のみを抽出する。フレーム $F1$ では、 L_c , $Ns1$, $Ns2$ ともに一定の輝度がある。 $F2$ はレーザ消灯時の画像であり、 $F1$ から $F2$ を差分することで画像上固定位置に撮像される $Ns2$ を除去できる。 $Ns1$ は画像上移動するため差分では除去されず、ずれた位置に負の輝度値として差分画像が合成される。次に $F3$ を、 $F1 - F2$ に対して加算する。 L_c はトンネル等走行方向に対して比較的高さ変化が少ないため概ね 2 倍の輝度になるのに対し、 $Ns1$ は蛍光灯等高さ変化が大きく画像上を移動しているため加算効果は無く輝度値は大きくならない。従って、 $F4$ において、 $Ns1$ を超える輝度閾値によって L_c のみを抽出することができる。これら差分と加算を、撮像と同時にリアルタイム画像処理することで、シグナルである光切断線の輝度のみを検出し、周辺環境光ノイズの影響を受けないトンネル形状を算出することができる。

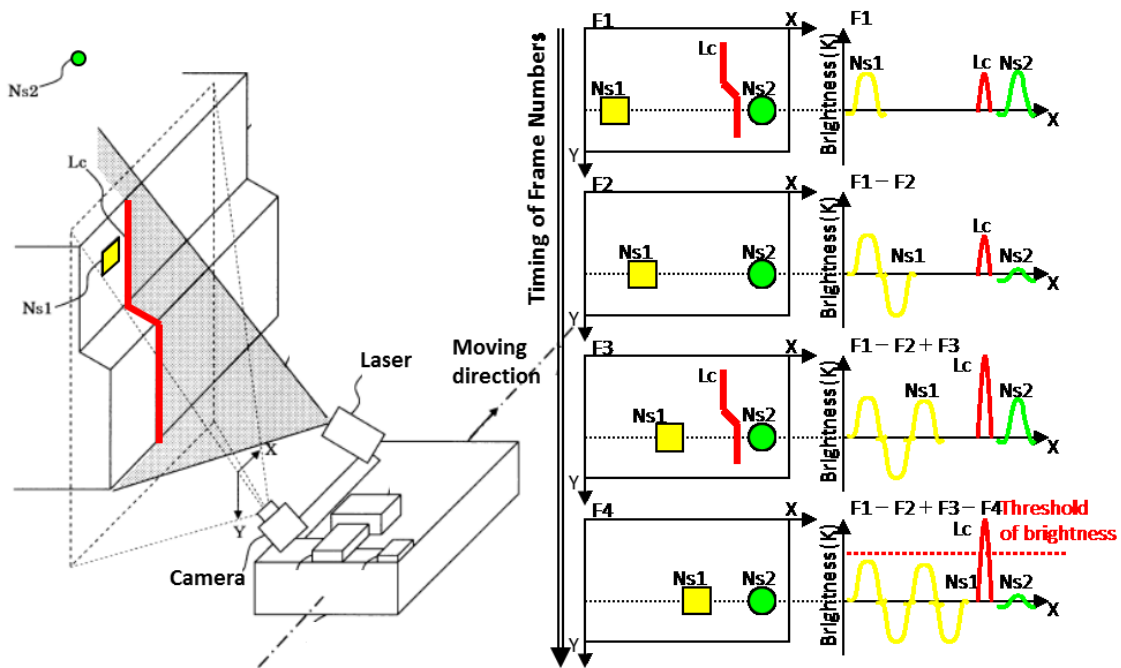


Fig. 3-5 Reduction of noise from environmental lights

3.4.3. 高速画像処理カメラシステム

以上、広い測定範囲を高空間分解能で形状計測するための光学系技術、長大な線路上を狭間隔で連続測定するための高速性要件、さらには実用上必須となる周辺環境光ノイズ除去に対する画像処理手順について述べた。これら諸要件を実用化するために、メガピクセル規模の撮像素子を複数個同期制御して撮像するとともに、同時並列でリアルタイムに画像処理して座標位置を取得する高速画像処理カメラシステムを開発した。

一般的なカメラシステムでは、光切断線を含む輝度画像を、毎秒 10~30 枚で撮像してコンピュータ上のメモリ等に一旦蓄積する。ノイズ除去や光切断線の位置検知などの画像処理は一旦蓄積されたメモリ上の輝度画像を用いて、オフラインで計算処理される。今回のように大型構造物を高分解能で計測する場合、100 万画素といった多画素のカメラが必要になるが、画像情報が大きくなる程、カメラからコンピュータへの転送通信時間やコンピュータ上での画像処理に時間がかかることになり、高速測定を阻害する。

そこで、広い測定範囲を高空間分解能で画像撮像すべく 130 万画素の高精細撮像素子を用いることを念頭に、130 万画素の膨大な画像情報であっても、差分と加算、および光切断線の座標位置検出を含め、Fig.3-6 に示すように毎秒 15 枚でリアルタイムに画像処理して最終結果を出力すべく、カメラからコンピュータには輝度画像を転送せず、最終的な形状計測結果のみをコンピュータに出力すること、すなわちカメラ内部で全ての画像処理を行うこととした。

画像処理ロジックをソフトウェアで実現する場合、カメラに内蔵する CPU(Central Process Unit)としては、マイコン(Micro Computer)や DSP(Digital Signal Processor)が考えられるが、撮像素子を制御して撮像素子からの画素単位の情報をクロック遅延無く制御可能な回路素子として FPGA(Field Programmable Gate Array) チップがある。まず撮像と同時に周辺環境光ノイズ除去をリアルタイムに処理すべく、FPGA チップで生成したフレーム制御信号に同期したフレーム単位での画像処理を Fig.3-6 に示す。FPGA 生成のフレーム制御信号に同期してシートレーザの点滅が行われる。更にシートレーザの点滅に同期

して画像撮像(露光)し、次フレームの露光の間に並行して種々の転送・差分・加算処理を行う。最終的に得るフレーム $F1-F2+F3-F4$ に対しては、所定の輝度閾値以上の画素に対するサブピクセル処理を行い、ノイズ除去され抽出した光切断線の重心位置をリアルタイムで取得する。

Fig.3-7 では、1 フレーム内での複数の画素ブロック毎に行われるパイプライン処理を示す。FPGA チップで生成したクロック信号および水平同期信号に同期して下記処理を行う。

- ・ 撮像素子に蓄積された画像メモリから、複数の画素ブロック単位 (本装置は 16 画素ブロック単位) で輝度情報を取得する (A, B, ..., D, E, ...).
- ・ 同時並列で、光切断線位置を示す最大輝度値の画素位置を抽出する (A', B', ..., D', E', ...). この時、直前の画素ブロックで抽出した最大輝度値と比較して、輝度の高い画素位置を FPGA 内メモリに記憶する。
- ・ FPGA 生成の水平同期信号が付加された画素ブロックの時 (A, E) は、抽出した画素位置周辺に対して、後述するサブピクセル処理により光切断線位置を小数点以下の画素分解能で出力する (A'', E'').

以上の 3 種類の処理を、同時並列でパイプライン処理することとした。これにより、画像 1 枚分全体に対する画像処理総時間は、画素情報の取込みタイミングから数クロック分の遅延のみとなり、ほぼリアルタイムでの画像撮像および画像処理が可能となった。

サブピクセル処理は、空間分解能を高めるため、最大輝度を持つ画素位置周辺の画素情報を用いて、カメラの 1 画素以下の小数点付画素座標 (実用的には小数点第一位まで) を計算する手法である。前段処理で抽出した最大輝度座標の周辺 $\pm N$ 画素 (N は光切断線の裾を含む画素数) について、座標 X_i と輝度 K_i を用い、

$$X_{sub} = \frac{\sum (\alpha_i K_i \times X_i)}{\sum (\alpha_i K_i)} \quad (3-1)$$

α_i は光切断線の輝度形状により調整する係数配列

の式(3-1)により、最大輝度の重心座標を求め、サブピクセル処理を含めた光切断線の座標抽出により、本装置に求められる空間分解能 1mm を達成した。

以上から、撮像素子およびシートレーザ ON/OFF を FPGA チップで制御し、フレーム単位および 1 フレーム内の画素ブロック単位でのパイプライン処理を駆使することで、130 万画素の画像情報であってもカメラ内部で全ての画像処理をリアルタイム処理して、最終的な形状計測結果のみをコンピュータに出力する方法を実現した。高速画像処理カメラシステムのカメラ 1 台の外観を **Fig.3-8** に示す。

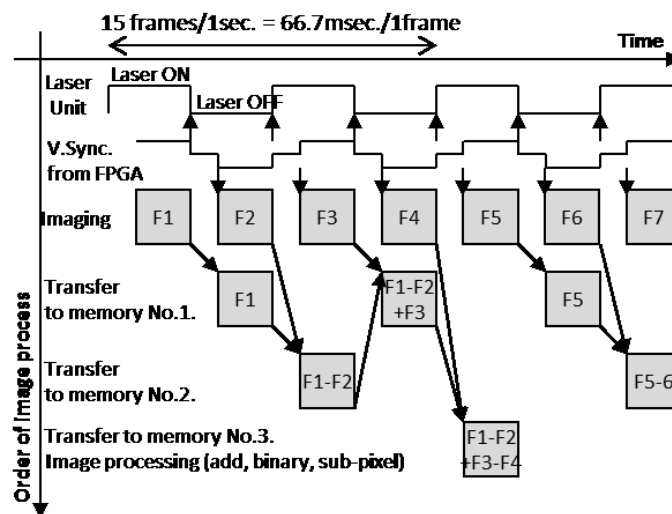


Fig. 3-6 Image processing neighboring frames

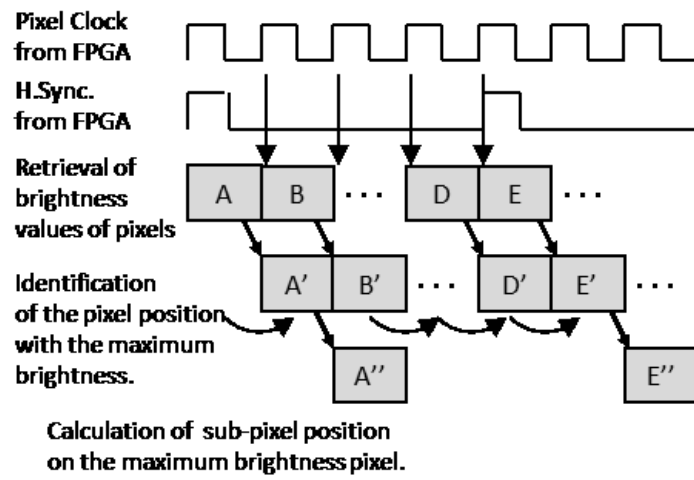


Fig. 3-7 Pipelined image process in a frame unit



Fig. 3-8 High speed image processing camera

3.5. 装置構成

3.5.1. 自走式カート台車部

今回開発した「軌道障害物検査装置」の実機外観を **Fig.3-9** に示す。本装置は、線路上をエンジンにより自走するカート台車部と、カート台車上に測定光学系を搭載したセンシング部とから構成されている。カート台車部の車輪にはエンコーダが付加されており、エンコーダ信号をセンシング部のコンピュータに取込むことによって、測定した断面形状の線路上の位置を正確にトレースすることができる。

3.5.2. センシング部

センシング部は、全周照射シートレーザ 1 台と高速画像処理カメラ 6 台からなる測定光学系と、カメラからの断面形状データおよび車輪からのエンコーダ出力を取込み、測定対象物の三次元形状データを演算しデータベースに保存するコンピュータから構成されている。

自走式装置のため、実用的には、自走に伴う振動や衝撃などに対してもレーザとカメラの相対位置関係が変化して測定誤差を生じないように基線長間への機械的な補強対策を行い、また発電機とともに無停電安定化電源(UPS)を備えることで計測機器への電源安定供給などを可能とした。

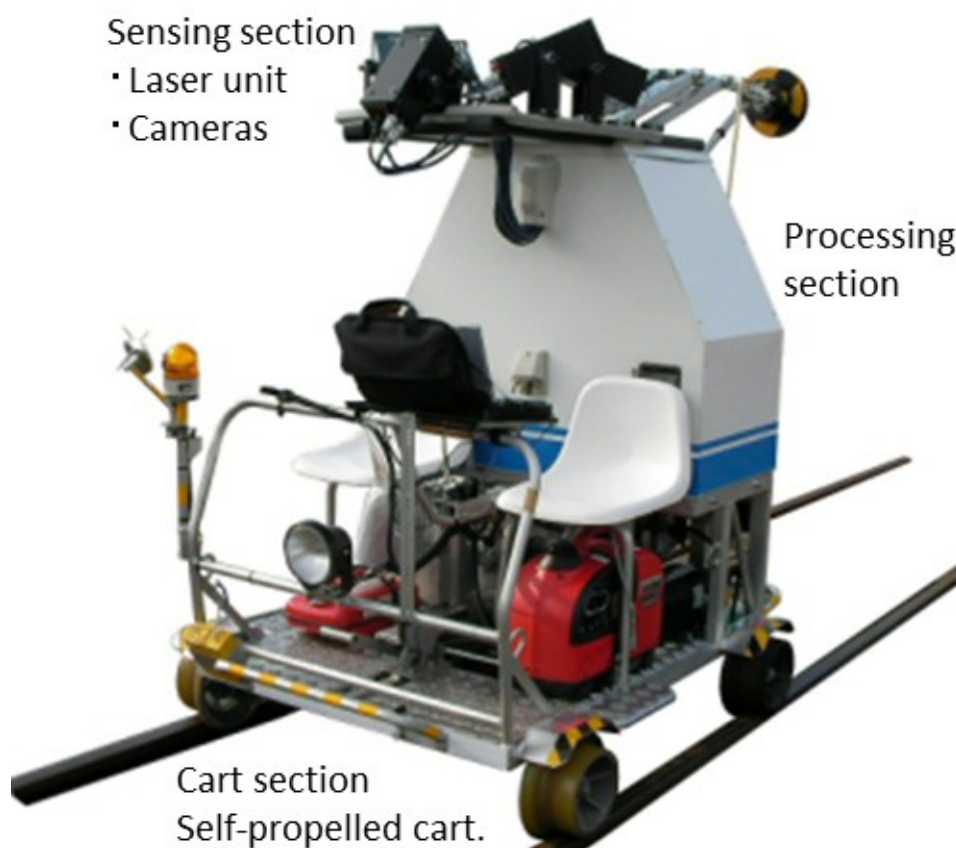


Fig. 3-9 Dynamic obstacle-detecting system for railway surroundings

3.6. 実験結果

3.6.1. キャリブレーション手法

実際の鉄道保線における建築限界の計測・検査への適用のためには、各カメラで検出した光切断線の画像上での画素位置[pixel]から、実空間上での距離座標[mm]に変換し、実空間で定義された距離での建築限界への侵入の有無を判定する必要がある。

三角測量を応用した光切断法では、**Fig.3-10** に示す幾何光学モデルを基に、二次元断面形状における幅方向と高さ方向の光学パラメータを決定することで、画素座標(u, v)から距離座標(y, z)への座標変換を行う。カメラの焦点距離を f, 撮像倍率を m, カメラ光軸とシートレーザ面のなす角度を θ とすると、座標変換式は以下となる。

$$y = [\{ (m+1)f - m z \cos \theta \} / m(m+1)f] v \quad (3-2)$$

$$z = (m+1)f u / \{ m(m+1)f \sin \theta + m u \cos \theta \} \quad (3-3)$$

従って、各カメラの光学パラメータ f, m, θ をキャリブレーションにより決定する必要がある。

光学パラメータの決定手法としては、予め距離座標が判明している測定対象物を本装置で測定することで、対応する画像上の画素座標を求め、位置の異なる複数の測定対象物に対して順次この処理を行うことで、誤差を最小化した光学パラメータを求める。本装置の場合、トンネルやプラットフォーム等の大型構造物を測定対象としているため、**Fig.3-11** に示す大型のキャリブレーションターゲットを用いて光学パラメータを決定した。キャリブレーションターゲットには、直径 5mm のピンを立てた複数枚のパネルを組上げた後、トレーサビリティが保証されているレーザ距離計 (Leica DISTO D3) により各ピンの距離座標 (離れ方向, 高さ方向) を測定してデータ化し、本装置で測定した各ピンとの紐付けを手動で行った上で、最小二乗誤差となる光学パラメータを計算した。

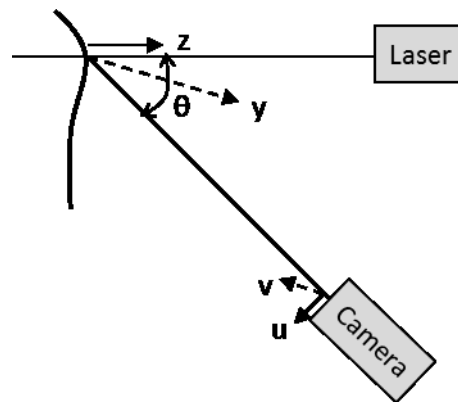


Fig. 3-10 Model of geometrical optics

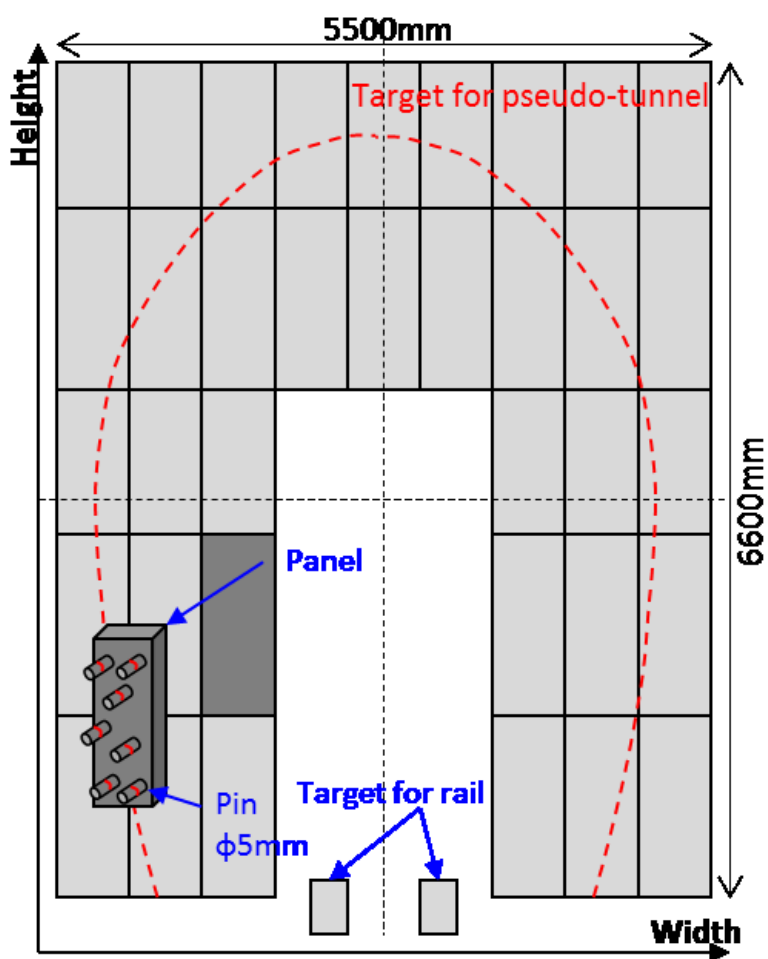


Fig. 3-11 Targets for calibration

3.6.2. 揺動補正処理と建築限界判定

計測したトンネル等の二次元断面形状から建築限界への侵入の有無を判断するためには、実空間での距離座標の基準点が必要となる。本装置では、レール部（領域 D）用にカメラ 1 台を割当て、2 つのレールの高さや位置を計測し、レール間の中心点を距離座標の基準点とした。

実際のレールでは、曲線部でカント（レール間で高低差をつけた傾き）があり、車輪とレール間のスラック（隙間）による平行移動や振動等様々な揺動要因があるため、レール間の中心点を精度良く測定した上で、他カメラの測定結果をレール間の中心点を原点とする座標に変換（揺動補正処理）している。

3.6.3. 実空間での測定精度検証

本装置の実空間座標における測定精度を、Fig.3-12、Fig.3-14 に示す 2 種類の方法によって検証した。

まず、最初に精密な精度検証として、キャリブレーションターゲット(Fig.3-11)中の建築限界の境界線付近の 9 個のピン(Fig.3-12)についてレーザ距離計の測定値と比較を行った。Fig.3-13 に、離れ方向と高さ方向のそれぞれの測定結果の絶対値に対し、本装置の測定結

果からレーザ距離計の測定結果を差し引きした差異分を表示したグラフを示す。各 Pin の測定結果はグラフ中の枠内に示している。本結果より、Pin7を除き、±2mm 以内で両測定結果が合致した。Pin7 の合致度が低くなった原因としては、ピンの曲りによるレーザ距離計の測定誤差等が考えられる。

次に、実用上の精度検証のため、Fig.3-11 に赤点線で示したトンネルの評価用の模型である「擬似トンネル」を対象に、本装置を静止させ、二次元断面形状計測を行った。Fig.3-14 に測定結果（緑線）の一例を示す。Table 3-2 では、レール間の中心点から擬似トンネルの頂点までの距離（頂点部距離）を、実運用を挟んで 1 年毎の経時変化として纏めた。本結果より、両者の測定結果の差異は最大 6mm であり、4 回分の平均では差異 4.5mm となった。前述の 9 ピン測定結果に比べ約 2 倍の差異が生じているが、擬似トンネルの測定では滑らかな測定表面に対して頂点部位置を厳密に特定することが難しく、そのため本装置とレーザ距離計では 1~2mm オーダの位置ズレが生じている可能性が考えられる。

以上、2 種類の方法により、精密な精度は±2mm 以内、実用上の精度は平均 4.5mm の差異で、レーザ距離計の測定結果と合致することを確認した。実運用を挟んだ年単位での経時変化も少なく、自動化の要件である精度 10mm 以下を本装置が満足していることがわかる。

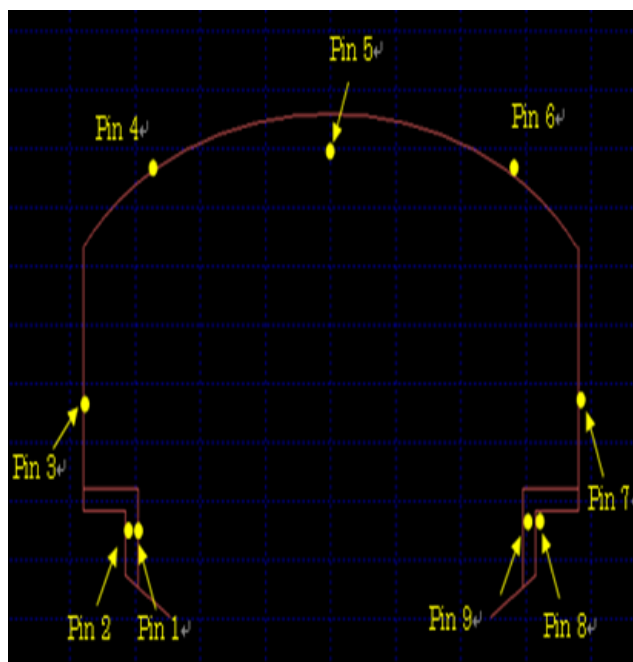


Fig. 3-12 Measurement results for 9 pins

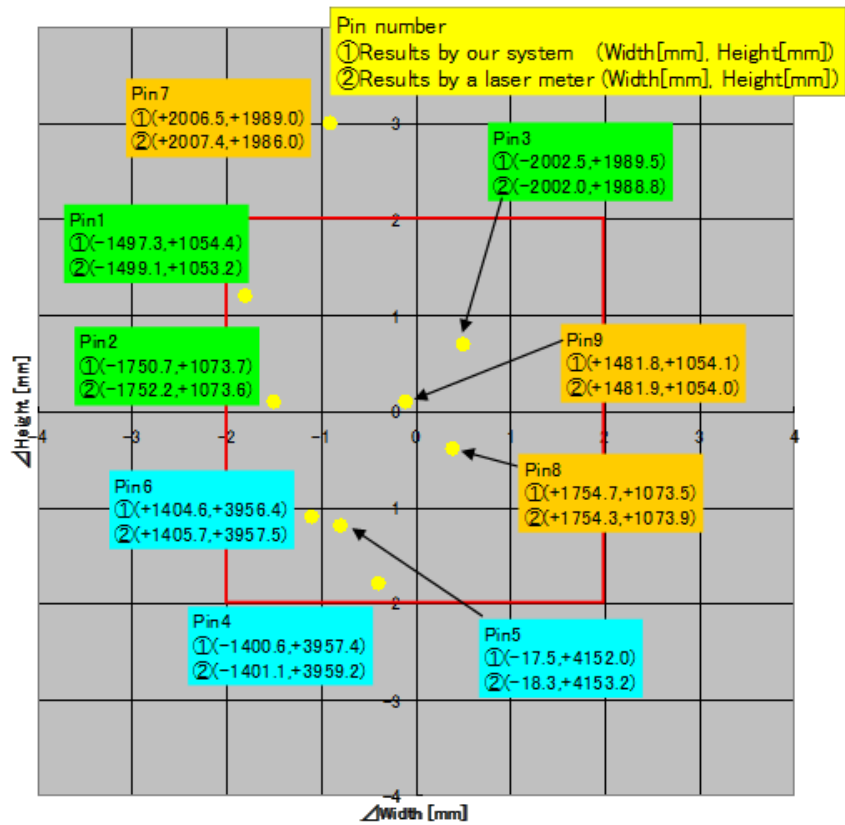


Fig. 3-13 Comparisons of two measuring methods

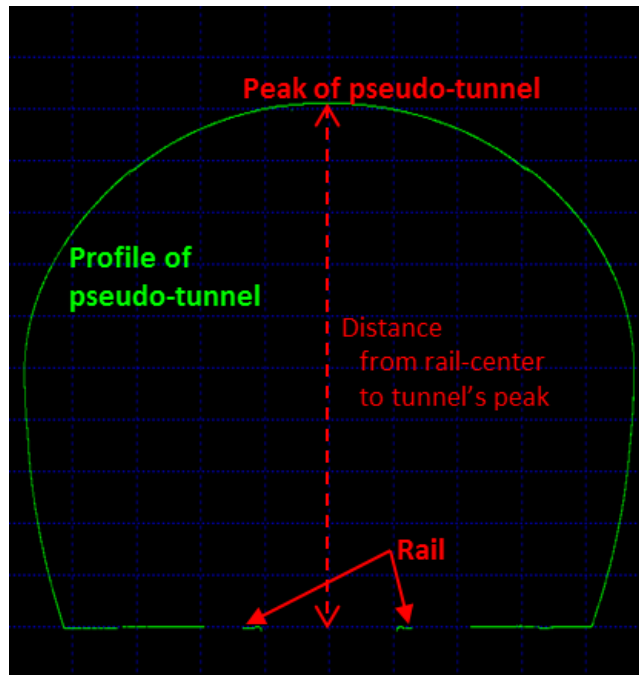


Fig. 3-14 Result of measuring pseudo-tunnel

Table 3-2 Result of measuring pseudo-tunnel

	Unit [mm]		
	This system	Laser meter	Difference
1 st measurement	5060	5056	+4
1 year after deployment	5053	5050	+3
2 year after deployment	5055	5050	+5
3 year after deployment	5056	5050	+6
Average of 4 times	5056.0	5051.5	+4.5

3.6.4. 実用性検証

実際のトンネルとプラットフォームの測定を通し、実用性の検証を行った。

(1) 移動測定時の測定精度検証

- ・ 実際の鉄道保線作業時、トンネルやプラットフォームを 10mm 以下の精度で他の計測手法で測定することは難しいため、トンネルやプラットフォームの建築設計値を用い、実装結果が建築設計値から大きく乖離していないことを確認した。
- ・ また前述の揺動補正の有無を切替えて解析した結果、レール曲線部のカントやスラックが補正されていることを確認した。

(2) プラットフォーム

- ・ 測定表面はコンクリート状であり、レーザ光の散乱も高いため、光切断線位置の検知に十分な輝度が得られ、良好な建築限界検査が行えた。

(3) トンネル

- ・ 測定表面が煤・苔・漏水などで覆われている場合に、レーザ光の散乱が低くなり、測定範囲中の一部で光切断線位置の検知ができない場合が発生した。
- ・ そこで、本装置の走行速度を 1/4 に落した上で測定速度も 1/4 にし、カメラの露光時間を長くとり光切断線の輝度を確保する「高感度測定モード」によって、検知不能領域を解消し、良好な建築限界検査が行えた。

(4) 操作性

- ・ **Fig.3-15** に示す測定結果表示ソフトウェア等、GUI(Graphical User Interface)をベースにした測定操作や結果表示ソフトウェアにより容易な操作性を確認した。
- ・ 実用的にも、鉄道保線の作業員が容易に操作でき、本装置操作においては、技量・熟練は不要である。
- ・ また、本装置測定前の段取り作業（装置を線路上に運搬する等）に数分オーダーで時間がかかるが、本番測定では時速 15km で自走するのみであり、例えば、500m のトンネルでは約 2 分で全長を測定することができた。

以上のように、**Table 3-1** で示した要件を全て満足する実用的な装置を実現することができた。

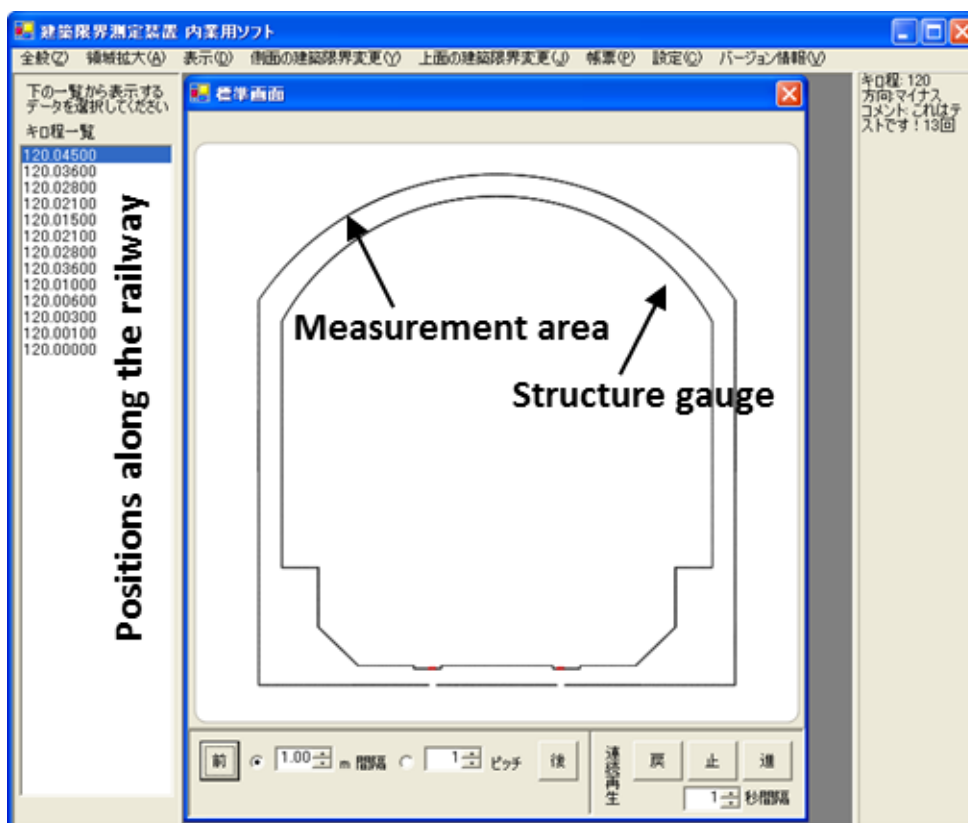


Fig. 3-15 Display of the measurement result

3.7. 結言

鉄道の保線作業に注目し、特にトンネルやプラットフォーム等の大型構造物を対象とした高速・高精細な三次元形状計測技術の自動化を実現し、線路上の障害物を自動検査する自走式の「軌道障害物検査装置」について述べた。

130万画素のメガピクセル規模の撮像素子を複数個同期制御して撮像するとともに、クロック遅延無く制御可能なFPGAチップをコアにして撮像と同時にリアルタイム画像処理して座標位置を取得する高速画像処理カメラシステムを開発した。それにより、広い測定範囲を高空間分解能で形状計測する高精細さと、長大な線路上を狭間隔で連続測定する高速性といった、相反する自動化の要件を両立させた。また屋外での移動しながらの形状計測に固有の課題に対しては、全周照射シートレーザ、周辺環境光ノイズ除去、揺動補正などの新しい手法により、距離精度10mm以下を達成し、時速15kmで自走して約30cm間隔で網羅的にトンネル形状を測定することができた。

「軌道障害物検査装置」³⁻⁴⁾と比較しても、計測精度を維持したまま基線長4mを半分にし、装置全体体積も約1/12の軽量コンパクトなカート台車搭載可能な装置を実現することができ、大幅なコストダウンを達成した。

今回の実用性検証を通して運用上問題ないレベルを確認しているが、保線作業の更なる効率化を目指すべく、測定感度閾値の自動切換や測定結果に対する建築限界良否判定の自動化等について今後検討していく。また今回開発した画像処理アルゴリズムを改良し、より高精度且つ高速な光切断線検知ロジックを見出すことにより、高精細と高速性の相反する産業上の様々な自動化のニーズに対応していく。

鉄道保線分野におけるトンネルやプラットフォーム等の屋外の大型構造物に対する形状

計測課題に対する研究を行い、数 m オーダの大型構造物に対して 1~10mm オーダの高分解能な形状計測を実現するための実用化技術として全周シートレーザ光学系の開発と、さらには共通プラットフォームのコア技術を応用した高精細／多画素カメラによる「FPGA リアルタイム並列画像処理回路」の適用により、実用的にも「情報量の縮約」のシステム設計指針が有用であることを検証した。また屋外環境での高精度形状計測を実現する上での特有課題である周辺の環境光ノイズ（蛍光灯や車のヘッドライト）を除去する画像処理技術として、前記「FPGA リアルタイム並列画像処理回路」による画像フレーム間処理（差分，加算）を搭載し、画像撮像とともに本画像処理によりリアルタイムに情報量縮約を行い、高精細且つ高速な形状計測技術を確立した。以上の設計指針および実用化開発によって、従来人手で保守点検を行っていた保線作業の自動化を達成した。自動計測装置により、ヒューマンエラー的な計測誤差の排除が可能となり、定量的な形状計測や保線作業の標準化が可能となった。

実用面では、従来、大型（トラックサイズ）で高価な計測装置しか提供されておらず、導入やメンテナンスが困難であったが、多画素カメラ、FPGA 回路といった一般的な計測デバイス・部品を使いながらも、環境光ノイズ除去などのリアルタイム並列画像処理技術を開発することで、計測精度を維持したまま、大幅なコストダウン、小型化（トロッコサイズ）を実現することができた。

以上のように、コアの要素技術である「FPGA リアルタイム並列画像処理回路」を、数 m オーダの大型構造物（トンネルやプラットフォーム）の精密形状計測に適用するために、高精細／多画素カメラに最適化し、加えて周辺の環境光ノイズに対する画像処理も本回路に取り込んだ実装開発を行うことで、大型構造物を実用的な計測時間で要求される測定分解能で計測が可能であることを実証した。本研究で着目する「FPGA リアルタイム並列画像処理回路」の有用性の検証とともに、実用化のための「計測装置化技術の高度化（全周シートレーザ光学系や周辺環境光ノイズ除去処理）」により、従来実用化できていなかった本課題に対する有用性を確認することができた。

参考文献

- 3-1) 高橋英二, 迫田尚和, 朝日賢一, 福本陽三: 超高速画像処理カメラによるトンネル形状自動計測装置; 計測自動制御学会論文集, Vol.48, No.12, pp.863-871, (2012)
- 3-2) 高橋英二, 迫田尚和, 森本勉, 野中俊克, 堀口史郎, 松下康弘: 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; R&D 神戸製鋼技報, Vol.58, No.2, pp.62-66, (2008)
- 3-3) 神康晴, 西元善郎, 内藤広幸, 福本陽三, 山村武, 井分昭夫: レーザ利用による軌道上建築限界測定装置; R&D 神戸製鋼技報, Vol.42, No.3, pp.44-47, (1992)
- 3-4) 後藤有一郎, 神康晴, 西元善郎, 内藤広幸, 山村武, 井分昭夫: 高精度光切断法を用いた軌道障害物検出装置; 計測自動制御学会論文集, Vol.29, No.4, pp.377-384, (1993)
- 3-5) 志賀忠勝, 遠藤嘉一, 戸倉克己, 天野良秋, 今井照泰, 奥村利明, 竹之内真也: 位置測定車両; 特許公報, 特許第 3619061 号, (1999)
- 3-6) Amberg technologies 社: 手押し型軌道障害物検査装置; <http://www.ambergtechnologies.ch/en/home/>, (参照 2015-1-7)
- 3-7) 計測検査株式会社: 道路トンネル内面検査装置; <http://www.keisokukensa.co.jp/MIMM.pdf>, (参照 2015-1-7)
- 3-8) 秋本圭一, 服部進, 大西有三, 三浦悟: 画像計測法のトンネル内空形状計測への応用; 土木学会論文集, No.687, pp.289-301, (2001)
- 3-9) 渡部勇介, 庭川誠, 藤原伸行, 木下信夫: 画像解析型架線検測システム CATENARY EYE; 第 17 回画像センシングシンポジウム, SP1-01, (2011)
- 3-10) 相本忍, 岩田実, 巻口和彦: 京王電鉄軌道架線総合高速検測車クヤ 900 形; 鉄道車両と技術, Vol.15, No.1, pp.23-28, (2009)
- 3-11) 機械工学便覧(γ 6 交通機械), 日本機械学会, p. γ 6-67, (2006)
- 3-12) 井口征士, 佐藤宏介; 三次元画像計測, 昭晃堂, p.36, (1990)

4.超高速画像処理カメラによるタイヤ 等高速回転物の高速三次元形状計測

4.1. 緒言

タイヤ製造工程におけるタイヤ最終工程での検査出荷工程では、タイヤ反発力や荷重バランスを測定するユニフォミティやバランスでの検査に加え、タイヤの安全性を最終確認するためのタイヤ外観検査や凹凸形状欠陥検査を行っている。しかしながら、生産性を担保しつつより高精細なタイヤ外形形状検査を行うために、毎秒 4,000 枚以上の画像撮像・形状計測が要求される中、従来は毎秒 1,000 枚、又は 2,000 枚程度までの形状計測しか実現できていなかった。本章では、毎秒 4,096 枚の高速な形状計測を実現するために「FPGA リアルタイム並列画像処理回路」を新たに開発し、試作・実用化を通してその有用性を検証した。タイヤ等の高速回転物に対する実用的な超高速形状計測技術を研究した研究事例⁴⁾¹⁾である。また超高速画像撮像を実現するために、極短時間となる露光時間の中でシートレーザ光の S/N 感度向上のための計測装置化技術の高度化として、正反射の幾何光学条件を満たす複数シートレーザ光源を開発し、実用上の有用性を確認した研究事例である。

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ひとつである。

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ミティマシンに、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）の形状測定を部分的に自動測定すると共に、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等の目視検査によって、微妙な凹凸形状の異常有無を検査してきた。

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おり、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り組み⁴⁾²⁾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・高速画像処理等、種々の研究開発と工場への実機適用がなされている。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等の環境変化から、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下、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、強いユーザニーズがあるにも関わらず未だ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。本章では、このようなユーザ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」について述べる。

4.2. 計測手法

4.2.1. 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」⁴⁾³⁾がある。Fig.4-1 に測定原理図を示す。

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、光切断線と略す）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、即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。

Fig.4-2 に示すとおり、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おり、タイヤ中心を軸にタイヤを回転移動することとした。

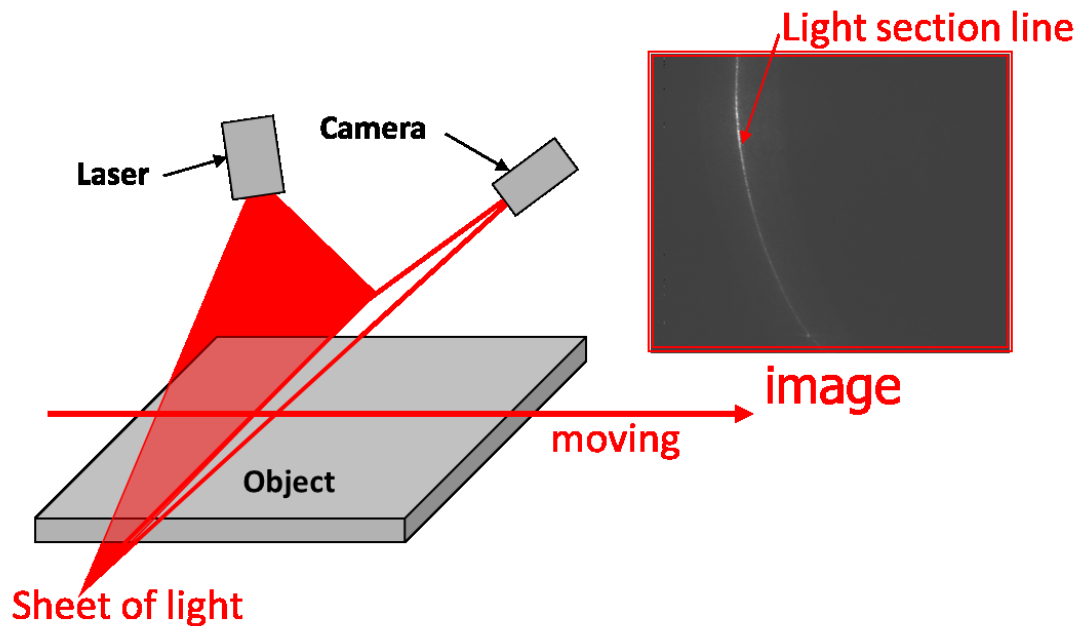


Fig. 4-1 Principle of light section method

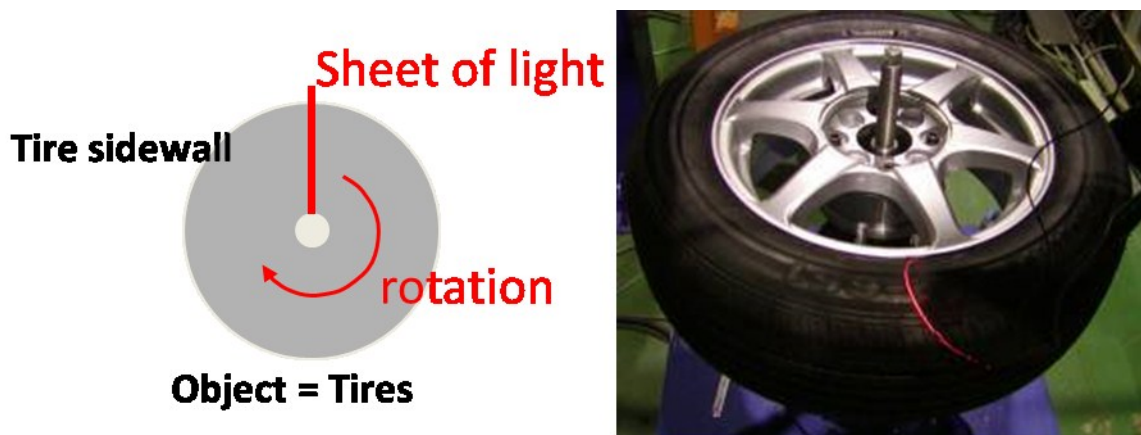


Fig. 4-2 Am example of tire measurement task

4.2.2. 正反射条件による光切断法

Fig.4-2 のタイヤ測定例を見てわかる通り、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、光切断線が大きく曲がるとと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 枚撮像）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 250nsec.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、**Fig.4-3** 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、Y 軸方向斜め下からカメラで撮像する、通常の光切断法

の配置である。Layout(A) は正反射条件を満たしておらず、カメラで受光する光切断線は全て散乱光となり、タイヤ表面が鏡面に近い特性（散乱光成分の少ない反射面）であることも影響し、撮像される光切断線の S/N は非常に悪い。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り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、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る。

4.2.3. 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させた光学配置とした(Fig.4-4)。タイヤ表面の形状測定実験では、単一レーザ光学系(Fig.4-4 左, Laser 2 のみ照射)を用いた形状測定では、タイヤ直径方向下部(Fig.4-4 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(Fig.4-4 左, Laser 1, 2, ...を照射)では、撮像視野範囲全域(Fig.4-4 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。

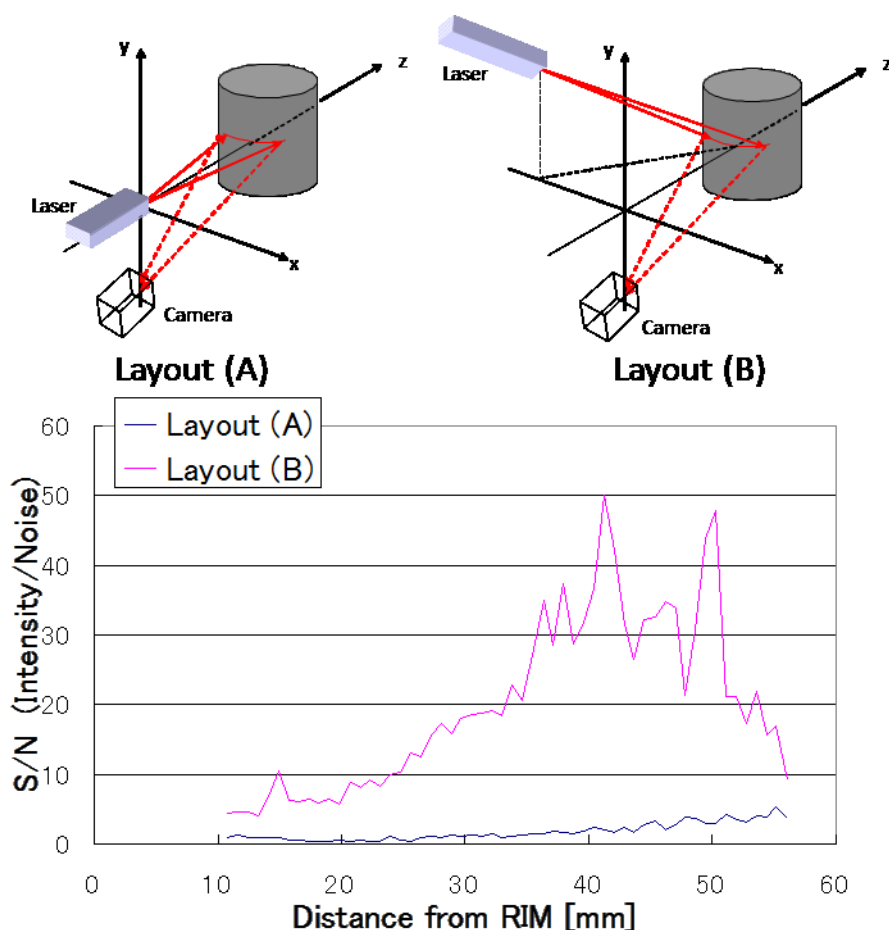


Fig. 4-3 Optical arrangement of regular reflectance by light section method

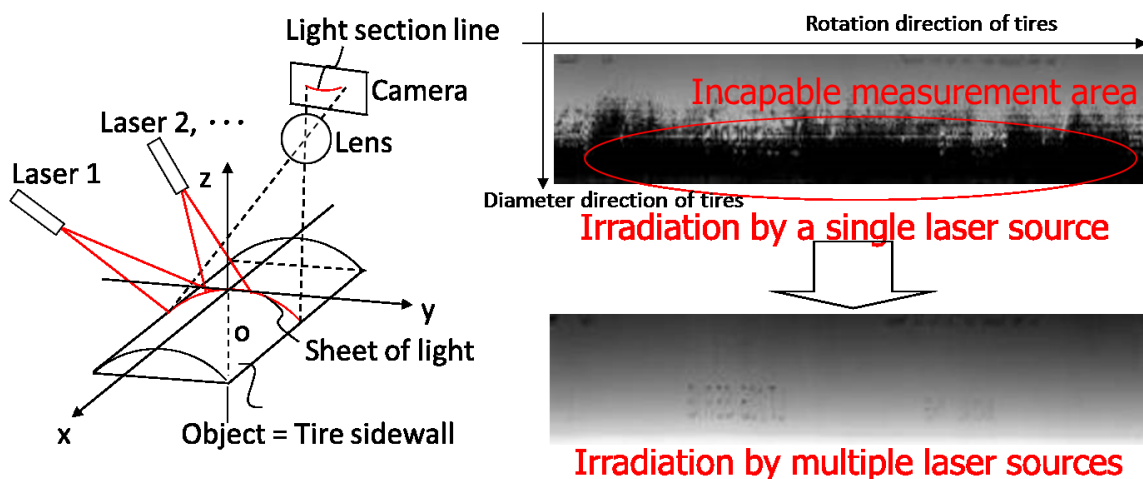


Fig. 4-4 Optical arrangement of multiple light sources for light section method

4.3. 高速化手法

4.3.1. 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さず検査するためには、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 枚の画像撮像を行い、次の 1 秒程度の間光切断線画像を画像処理してタイヤの表面形状として出力する。一方、トラック・バス用タイヤ向け検査には 2 倍以上の高速撮像と高速画像処理が必要のため、本装置では、毎秒 4,096 枚の高速撮像と、撮像と同時並列で光切断線の座標抽出を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。

4.3.2. 回路構成

本装置の超高速画像カメラの回路ブロック図を Fig.4-5 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等では、タイヤ 1 回転分の形状を基に、本来存在する正常な凹凸(刻印文字やトレッド面パターン)除去を行った後、最終的なタイヤ表面凹凸について最大凹凸量を求めタイヤの良否判定を行う。

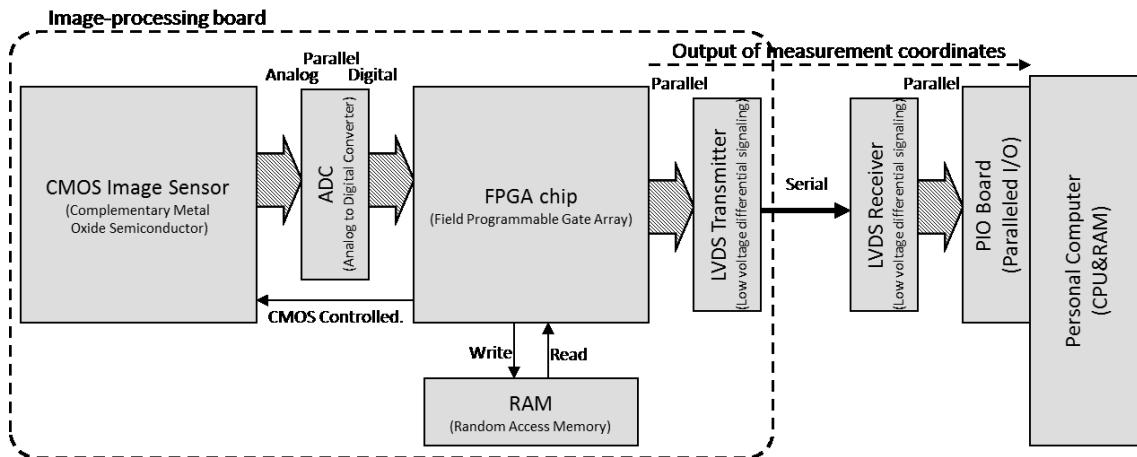


Fig. 4-5 Block diagram of image processing circuit

4.3.3. パイプライン処理

高速化手法のポイントとして、コンピュータ等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、複数の処理が並列で独立して動作することで、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。Fig.4-5 中、CMOS イメージセンサから FPGA チップに画像情報を取り込むと同時に、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 枚の高速撮像及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 Fig.4-6 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共に、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、画像取込みの三種類の処理が、Clock に同期して並列で実施される。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。

4.3.4. 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。サブピクセル処理について Fig.4-7 に示す。最大輝度座標周辺の $\pm N$ 画素について、座標 X_i と輝度 K_i を用い、

$$X_{sub} = \frac{\sum (\alpha_i K_i \times X_i)}{\sum (\alpha_i K_i)} \quad (4-1)$$

の式(4-1)により、最大輝度の正確な重心座標を求める。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、ユーザーニーズに合致する高さ分解能 $20 \mu m$ 以下を実現した。

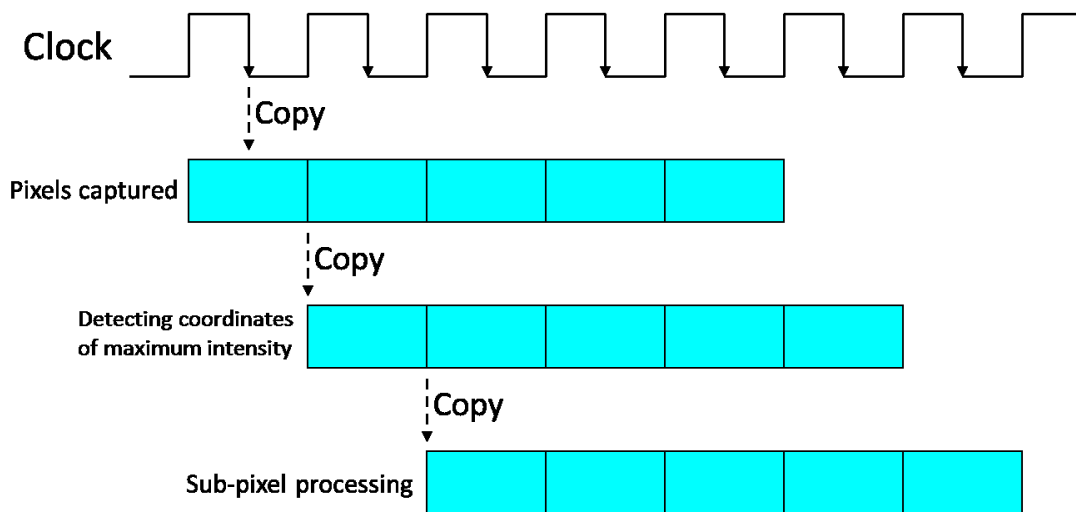


Fig. 4-6 Pipeline processing

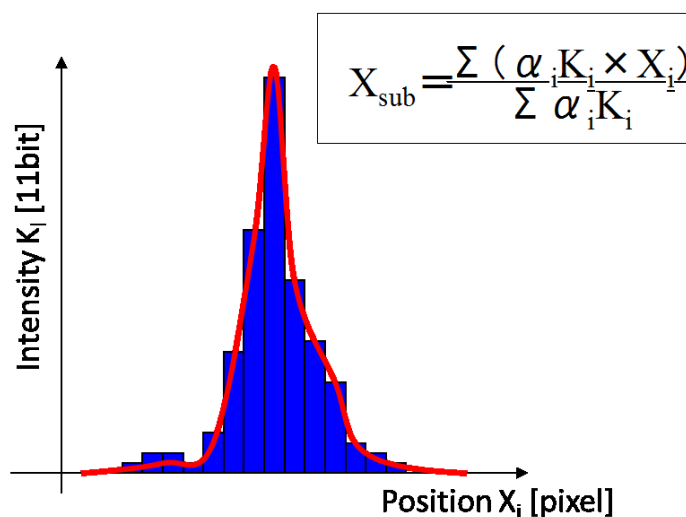


Fig. 4-7 Sub-pixel processing

4.4. 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外観を **Fig.4-8** に示す。複数のレーザー光源を用いて 1 本の光切断線としてタイヤ表面に照射した例を **Fig.4-9** に示す。複数のレーザー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トの良い光切断線画像が撮像できる。**Fig.4-9** 右では、タイヤ表面に擬似的な凸欠陥を設けてあり、また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。

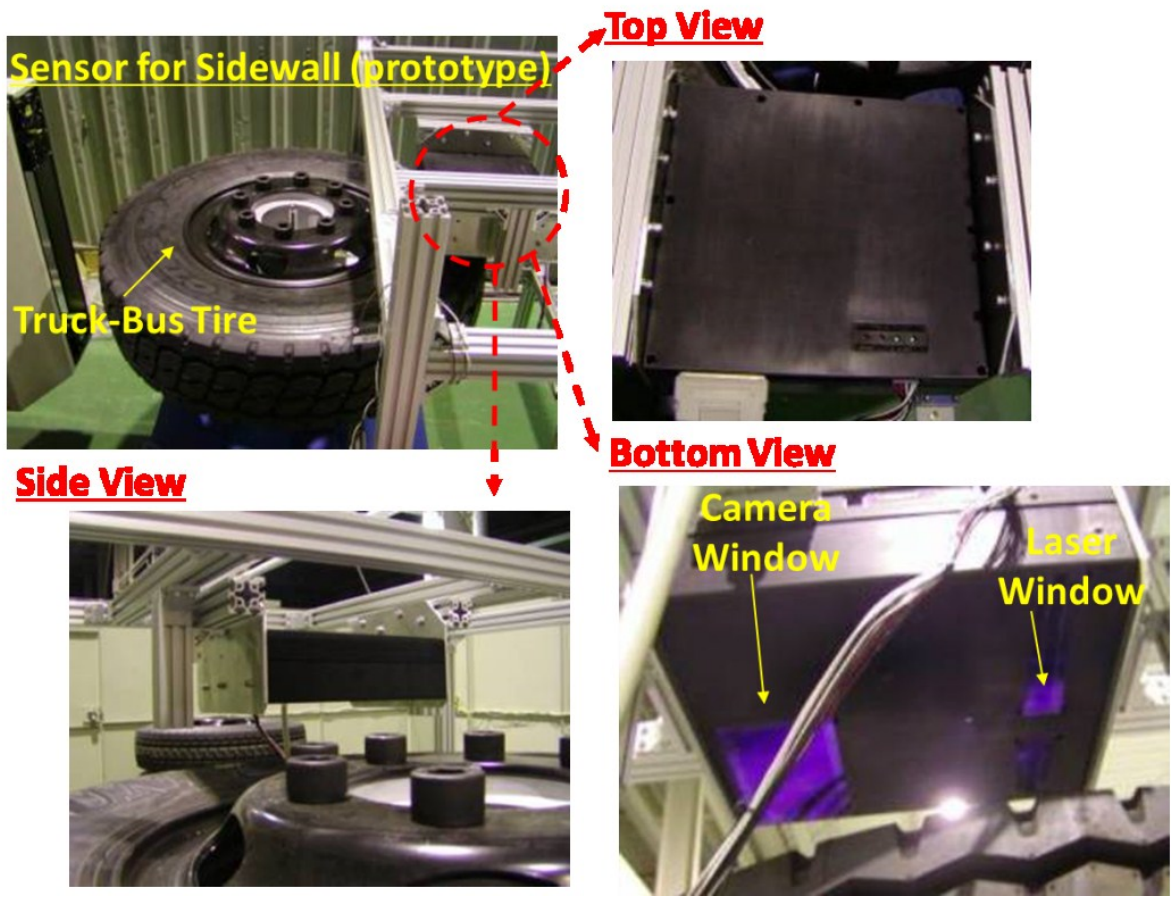


Fig. 4-8 Prototype sensors

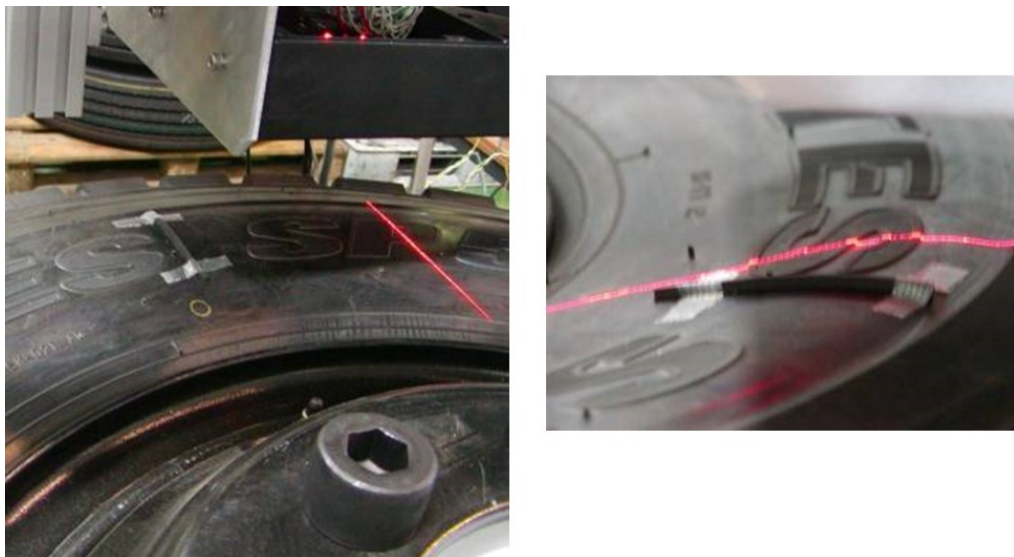


Fig. 4-9 Example of sheet of light

4.5. 実験結果

4.5.1. 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 Fig.4-10 に示す. Fig.4-8 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. Fig.4-10 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.

Fig.4-10 上の画像中に引いた水平 1 ラインについて高さ座標を抽出すると, Fig.4-10 下のグラフに示す高さ方向凹凸形状が得られる. 途中高さ座標の変化が大きいところは, 刻印文字による急激な高さ変動である. 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見られる. またタイヤ側面にある凹欠陥部に関しては, 三次元立体形状表示からもわかるとおり, リアルな立体形状を測定できていることがわかる.

4.5.2. 測定再現性

Fig.4-10 に示すタイヤ 1 回転分の測定を 10 回繰り返して, 凹欠陥部周辺の高さ変化を重ね書きしたグラフを Fig.4-11 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ので, 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 回繰り返して測定した. Fig.4-11 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,

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

の結果を得た.

実機では, センサ移動や周辺環境の振動等の影響も懸念されるため, 前記 1σ 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.

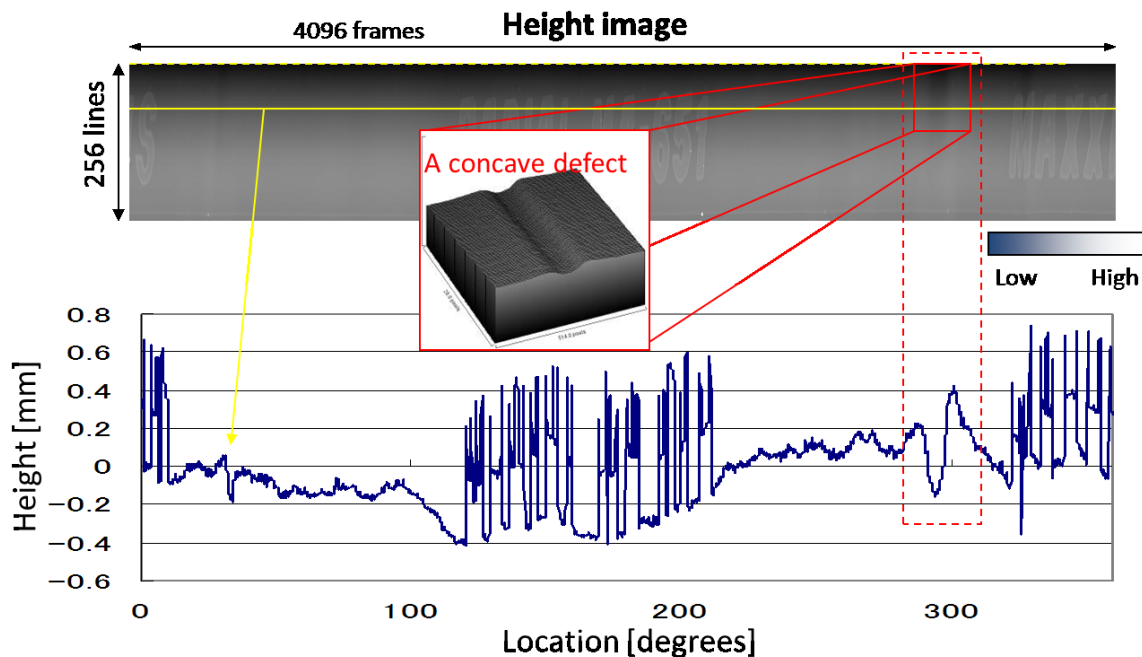


Fig. 4-10 A measurement result of a tire over one rotation

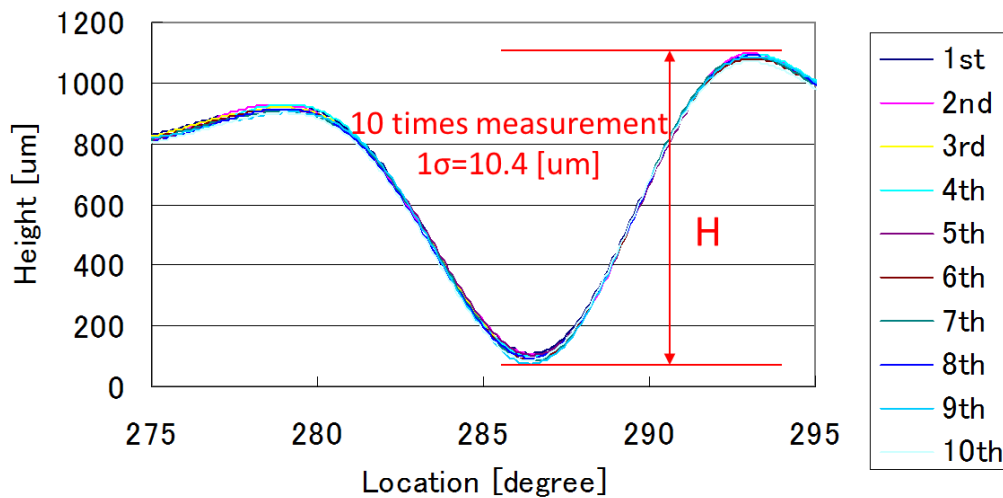


Fig. 4-11 Measurement repeatability of a concave defect profile

4.5.3. 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以上を確認した．従来のレーザ1本のみ用いる光切断法では概ね40～60mmの測定視野範囲に対し，約4倍の測定視野範囲を確保できる．

4.6. 結言

本章では，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」について述べた．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する回路構成により，従来測定不可能であった大口径のトラック・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した．加えて，「乗用車用タイヤ向け三次元形状計測装置(Fig.4-12)」についても開発を行い，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した．今後，タイヤ工場でのフィールド実験等の実機化開発を進めていく．

また開発した超高速画像処理カメラは，タイヤ以外的高速形状計測ニーズにも対応できるので，産業用途向けに横展開を検討していく．

以上のように，コアの要素技術である「FPGAリアルタイム並列画像処理回路」を，高速回転物（タイヤ）の超高速形状計測に対応するために，複数シートレーザ光学系による光量S/N感度向上と，FPGA回路内における撮像タイミングと同期したサブピクセル計算のパイプライン処理により，毎秒4,096枚撮像と同時の形状計測を実証することができた．本研究で着目する「FPGAリアルタイム並列画像処理回路」の超高速な画像処理性能が有効に機能し，また「情報量の縮約」のためのシステム設計指針としてCMOS撮像と同時にFPGAで画像処理する仕組みが有用性あることを検証した．

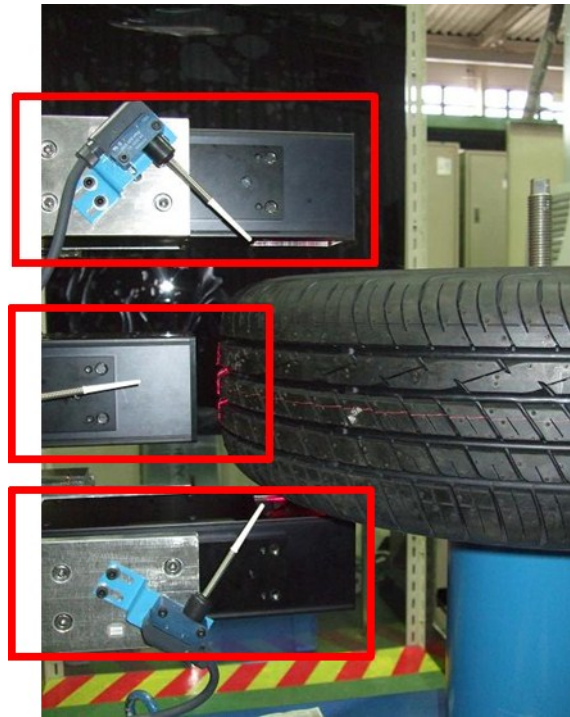


Fig. 4-12 Prototype sensors for passenger car tires

参考文献

- 4-1) 高橋英二, 迫田尚和, 森本勉, 野中俊克, 堀口史郎, 松下康弘: 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; R&D 神戸製鋼技報, Vol.58, No.2, pp.62-66, (2008)
- 4-2) A.Jobst, G.Kostka, U.Hassler, P.Schmitt: Reifenprüfung mit dem Lichtschnittverfahren (Tire test with the light section method); Abstract, v32, DACH-Jahrestagung 2004 Salzburg, (2004)
- 4-3) 井口征士, 佐藤宏介; 三次元画像計測, 昭晃堂, p.36, (1990)

5. タイヤ金型情報を用いたタイヤ外形 形状検査の自動化

5.1. 緒言

前章「超高速画像処理カメラによるタイヤ等高速回転物の高速三次元形状計測」の研究事例に続き、出荷検査に必要な製品の良否判断に関する形状認識技術について研究を行った。タイヤ製造での最終出荷検査工程では、測定したタイヤ表面の凹凸形状データから本来正常な凹凸形状（ロゴや模様等）と不良となる欠陥凹凸形状を正確に弁別認識する必要がある。一方で、正常と欠陥の凹凸形状を正確に弁別する技術は実用上難しく、現状では人間の多大な介入が必要な検査工程の一つとなっている。本章では、タイヤ金型モデルに基づく正常な凹凸形状の自動計算手法を開発し、更に人間・機械協調型の自動検査システムを構築することにより、自動化の難しい目視検査の良否判定等を実用化した研究事例⁵⁻¹⁾である。高次の情報処理を詳細に分析することで、情報量を適切に縮約した実用システムを開発した。

自動車の安全性確保のため、路面と直接接地するタイヤへの品質要求も年々厳しくなっている。タイヤの生産品質確保に向けてタイヤメーカーや自動車メーカーは様々な出荷検査や受入検査を行っており、タイヤ外形形状の凹凸欠陥検査も重要な検査項目の一つである。

従来、タイヤの外形や外観検査は、熟練した検査員による目視および触診検査⁵⁻²⁾などで対応してきた。近年、熟練検査員の確保が困難になるとともに、機械化や自動化による生産品質の安定化への要求から、非接触で高速に形状計測を行い良否判定する検査装置の開発や実用化が顕在化している。欧米での検査装置の実用化事例^{5-3),5-4)}に続き、日本のタイヤメーカーでも高速形状計測技術⁵⁻⁵⁾や外観検査自動化⁵⁻⁶⁾に関する取組みが報告されている。欧米の実用化事例^{5-3),5-4)}では、検査の完全自動化を目指したために計算量増大や装置価格アップ等の実用上の課題が出てきている。日本での取組みでは、現状オフラインでの解析用途⁵⁻⁵⁾や、タイヤ1本数十秒の検査時間が許容される目視外観検査の自動化⁵⁻⁶⁾に留まっており、今後タイヤ1本1秒以内でインライン検査するための実用的な高速化技術の開発が必要である。

前章にて、毎秒4,096枚で高速形状計測するタイヤ三次元形状計測装置⁵⁻⁷⁾を開発し、形状検査の自動化に取組んできた。これまでに、生産タイヤの全数検査実現のための高速形状計測技術を確立し、更なる実用的なインライン検査に向け、見落とし・過検出の無い正確な自動検査手法の確立と、新規デザインのタイヤに対するより効率的なティーチング作業の実現等の生産性向上に取り組んでいる。特にタイヤのサイドウォールでは、近年複雑さを増す各種デザイン（文字、数字、ロゴ、模様等）された正常凹凸形状が存在する中、タイヤのプライ異常に起因する欠陥凹凸形状を正確に弁別して良否判定しなければならない課題がある。

本章では、タイヤのサイドウォールの外形形状検査に関し、複雑な正常凹凸形状から本来検査したい欠陥凹凸形状を正確に弁別するための画像処理による形状認識技術と、その形状認識結果に基づき従来検査員の判断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により、ティーチング作業等の生産性向上も含めた上での正確な自動検査技術について述べる。

5.2. 技術課題

タイヤの最終出荷検査の要件を **Table 5-1** に示す。出荷検査では、不良流出につながる「見落とし」はあってはならない。形状認識技術においても、欠陥凹凸形状を正常凹凸形状に誤認識しない安全サイドの検査論理を構築する必要がある。従来の検査完全自動化を目指す取組みの中、凹凸部位の形状に着目した良否判断では、正常凹凸形状に酷似した欠陥凹凸形状が存在しないとは言い切れないため、「見落とし」の危険性は必ず存在する。また、正常凹凸形状を欠陥凹凸形状として誤認識する「過検出」も極力低減する必要がある。過検出は、歩留り低下や検査員の再検査による生産性低下を招き、自動検査装置導入のメリット

を低下させる。

以上の出荷検査の必須要件に対応した上で、出荷検査の自動化を実用的なものにするためには、新規デザインのタイヤに対する段取り・セッティング時のティーチング作業も、容易に短時間でできることも重要である。タイヤ製造工程は一般的には多品種混合の生産ラインが多く、自動検査装置においても多品種のタイヤを検査しなければならない。Fig.5-1では、インライン検査時の直接生産性に加え、新規デザインのタイヤ種類が増える程に段取り・セッティング時の間接生産性も重要になることを示している。従来の検査完全自動化を目指す取組みでは、段取り・セッティング時に使用する完全な正常マスタタイヤの準備は難しく、ティーチング作業にも時間がかかる等の課題があった。

本章では、自動検査装置として必須性能である「見落とし無」「過検出低減」を実現することはもちろん、実用的な検査装置とするために段取り・セッティング時の操作性向上も考慮した形状認識技術を実現することを狙いとした。

Table 5-1 Requirements for the final inspection

Judgment \ Tire	Good tire	Defective tire
OK	Good	Mistake Oversight
NG	Mistake Over detection	Good

Teaching and Setting Process

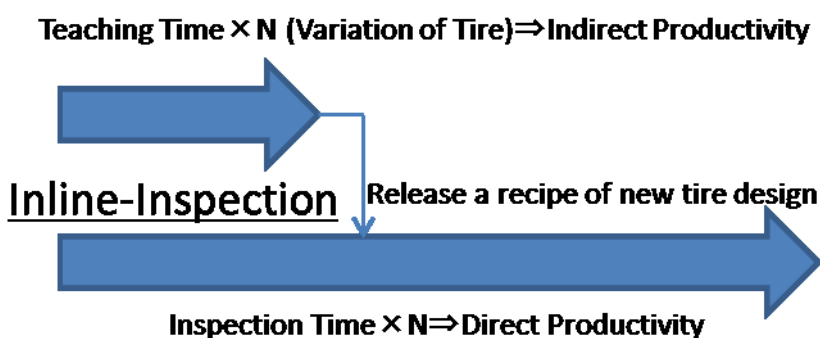


Fig. 5-1 Productivity of final inspection

5.3. 提案手法

5.3.1. 人間・機械協調型インタフェース

「見落とし」の無い出荷検査の実現と、その上で段取り・セッティング時の生産性向上に向け、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自動化可能な「人間・機械協調型インタフェース」のフレームワークを開発し、そのコアとなる自動形状認識技術では生産タイヤの特徴を利用した「タイヤ金型モデル」による画像処理を実現することで、従来取組みの課題を解決した。

従来、検査の完全自動化を目指し、熟練検査員の判断ルールをできる限りソフトウェアで記述して画像処理プログラムで実現する取組み⁵⁻³⁾がある。例えば、『文字等の正常凹凸形状はその境界線部で急峻な高さ変化がある一方、欠陥凹凸形状は明確な境界線部はなく緩やかな高さ変化を示す。』といった判断ルールから、凹凸形状の空間微分値を閾値判定して形状を弁別するものである。しかしながら、欠陥凹凸形状の中には正常凹凸形状と同程度の急峻な高さ変化を持ったものも論理的には存在し得るし、正常凹凸形状の中にも様々な形状の高さ変化を持つデザインが考えられるため、次の判断ルールの追加が必要になる。

Fig.5-2では、ベースラインが傾いた正常凹凸形状（文字）が、典型的な欠陥凹凸形状に類似して誤認識する可能性を示している。仮にある特定のタイヤで完全な判断ルールが記述できたとしても、次の未知なる新規デザインのタイヤに対して対応可能かどうかは保証できない。さらに検査の完全自動化は、どのような形状認識や判別処理を行っているかの詳細内容が可視化されず、各タイヤの最終的な検査結果のみから検査性能を確認するしかない点は大きな課題が残る。

これら課題の「見落とし」の無い出荷検査を実現するために、**Fig.5-3**に示す枠組み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」のフレームワークを開発した。インライン検査時に凹凸形状を自動弁別することは正常凹凸形状に酷似した欠陥凹凸形状を見落とすことになるため、最終出荷検査の自動化技術として適当ではない。インライン検査時に自動化できる点は、タイヤ設計データに基づく計算除外領域の設定処理（マスク処理）のみであると考え、このマスク処理に用いるタイヤ種類毎のマスク画像は、後述するタイヤ金型モデルによる形状認識の画像処理により段取り・セッティング時にオフラインで自動計算し取得する。オフラインでの形状認識結果は本装置を運用する製造スタッフに表示され、処理結果の最終確認を人間が目視確認するとともに必要ならば修正作業を行い、出荷検査基準の最終性能を担保する。このような人間・機械協調型インタフェースを設計することで、「見落とし無し」を担保し、「過検出低減」と段取り・セッティング時の生産性向上を実現した。

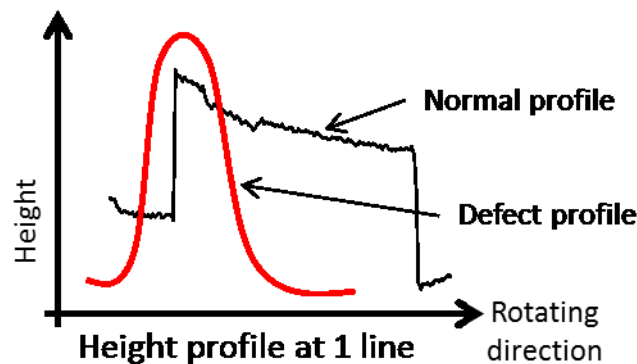


Fig. 5-2 Example of normal and defect profiles

Teaching and Setting Process Inline-Inspection

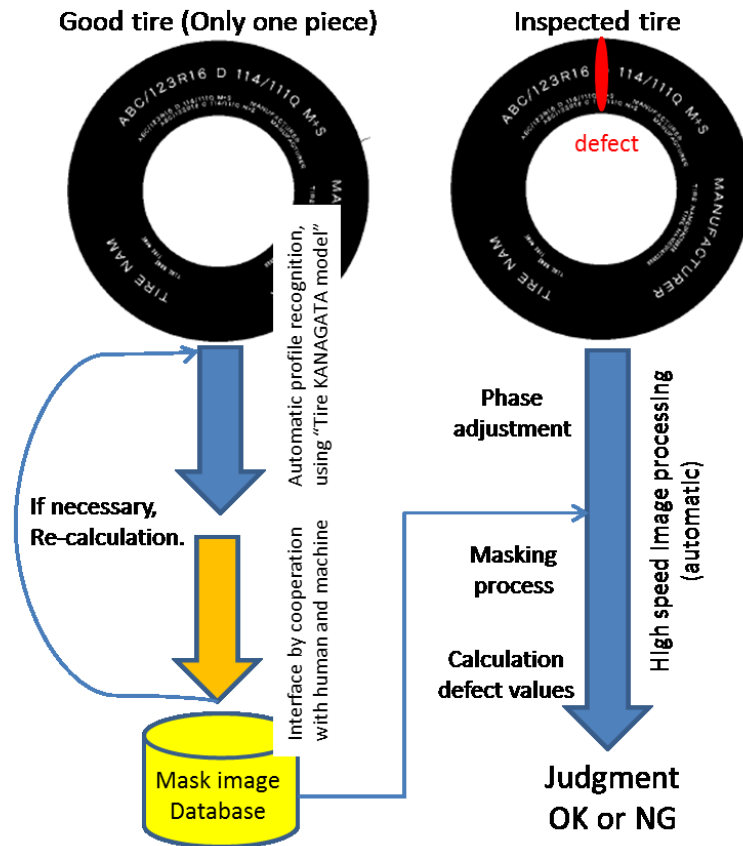


Fig. 5-3 Cooperative judgment with human and machine

5.3.2. タイヤ金型モデル

従来、タイヤ設計データに基づく計算除外領域を厳密に設定するならば、例えばタイヤの加硫前工程で用いるタイヤ金型設計図を本検査装置の画像処理座標系に変換して設定すれば正確なマスク画像が作成できる⁵⁻⁸⁾。しかしながら、測定対象物はゴムでありタイヤ金型を正確に反映しているわけではないため、検査装置の画像処理座標系に高精度に合致させるのは難しい。そこで次の手立てとして、検査対象のタイヤ現物を用い、タイヤ現物を一度形状計測することで検査装置の画像処理座標系そのもので直接的にマスク画像を取得する方法が考えられる。欠陥凹凸形状が存在しない完全正常なマスタタイヤを製作し、これを現物合わせ的に形状計測する手法⁵⁻⁴⁾である。しかし、完全に正常なマスタタイヤを製作することは製造上難しく、もしマスタタイヤに微小な欠陥凹凸形状が存在すれば、インライン検査時にその凹凸形状が全ての検査対象タイヤに転写されてしまう課題があった。

これら課題の正確なマスク画像を容易に取得するために、Fig.5-4 に示す「タイヤ金型モデル」に基づく自動形状認識技術を開発した。Fig.5-4 (1)は、タイヤ三次元形状計測装置で取得したタイヤサイドウォールの「高さ画像」を模式的に示している。横軸はタイヤ回転方向、縦軸はタイヤ半径方向を示し、明暗輝度値で各位置の凹凸高さを表す。この画像中1ラインの高さ形状をグラフ化したものが Fig.5-4 (2)である。低周波数で湾曲しているベースライン上に、文字等の正常凹凸形状の高さ変化が重畳していることがわかる。Fig.5-4 (3)では、FFT 処理後に低周波数成分を除去し(ハイパスフィルタ処理)、正常凹凸形状のみの高さデータにした結果、タイヤ金型設計に基づく2種類の高さグループが存在しているこ

とを示す。Fig.5-4 (3)の各高さグループのそれぞれの文字高さは微小にばらついているが、「タイヤ金型モデル」では『タイヤ設計上数種類の高さしか存在しない』と定義し、これら高さグループ毎に平均高さを求め、これを各グループの代表高さとして正常凹凸形状の高さとして取得する。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くが、重畳する正常凹凸形状の高さはタイヤ金型設計に基づき概ね安定している点は、複数の実タイヤで確認した。

以上のようなタイヤ金型の設計コンセプトを反映した統計計算処理を行うことで、マスタタイヤに微小な欠陥凹凸形状があってもその影響を最小限に抑えて、所望のマスク画像を自動作成することができる。加えて、タイヤ金型モデルでのマスク画像自動作成後に、人間の目視確認と必要な個所を修正可能な人間・機械協調型インタフェースを用意することで、検査員の感覚に一致したタイヤ外形形状検査装置を実現した。

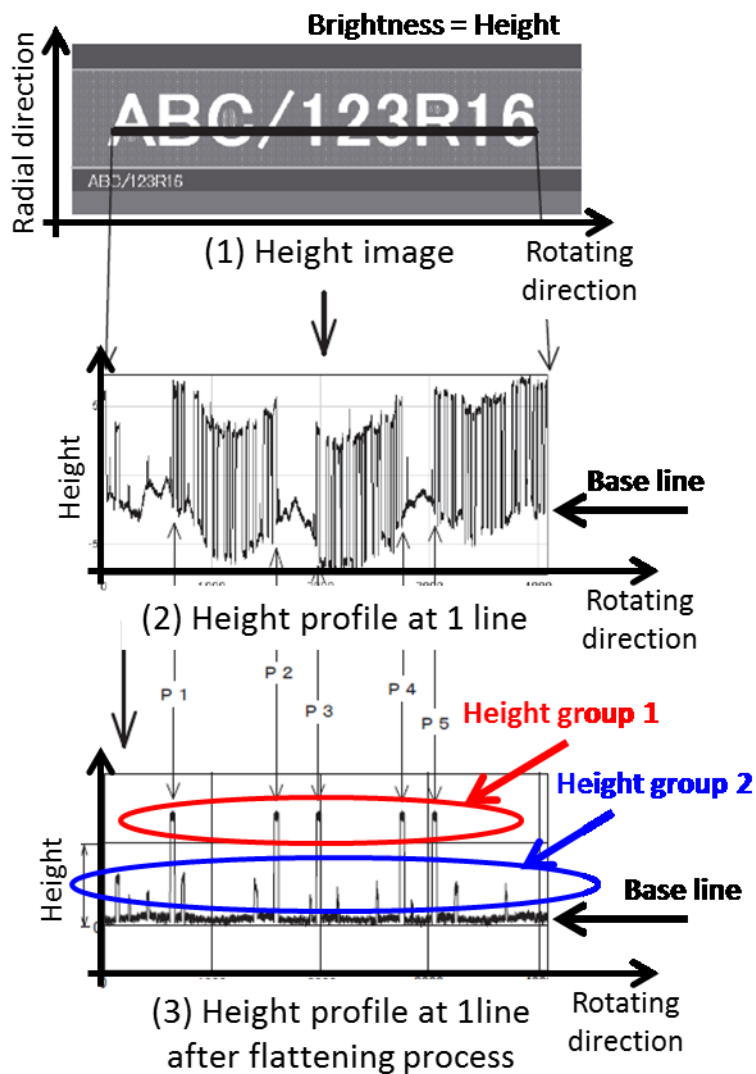


Fig. 5-4 Outline of “Tire KANAGATA model”

5.3.3. 画像処理ロジック

「タイヤ金型モデル」に基づいた具体的な「画像処理ロジック」について Fig.5-5, Fig.5-6 に示す。

Fig.5-5 に示すティーチング作業では、大きな欠陥凹凸形状の無い正常なマスタタイヤ1本のみを使用する。マスタタイヤのサイドウォール外形形状を計測後、この形状画像に対してまず文字等の正常凹凸形状の境界線部分の位置・領域を抽出する。これには、サイドウォール湾曲形状を除去するための平面化处理と、平面化後の急峻な高さ変化を抽出するための二次元の一次微分フィルタ処理(**Fig.5-5** 右図, Sobel Filter)を適用し、閾値以上の微分値を境界線領域とする。次に、境界線領域に囲まれた図形毎にラベリングを行った上で、各ラベル図形の平均高さを計算する。実タイヤから取得した各ラベル図形の平均高さは微妙にばらついているが、タイヤ金型モデルでは『タイヤ設計上数種類の高さしか存在しない』と定義しており、平均高さを数種類の高さにまとめグルーピングを行う。各グループでさらに平均高さを求め、この高さをそのグループの代表高さとして正常凹凸形状の高さとして取得する。もしマスタタイヤに微小な欠陥凹凸形状があっても、このグルーピングによる平均高さ計算処理により統計的に除去され、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、マスタタイヤから正常凹凸形状の境界線領域(位置)とその正常凹凸図形のオフセット高さを取得してティーチングデータとして登録する。

Fig.5-6 に示すインライン検査時の画像処理では、登録された正常凹凸形状の境界線領域とそのオフセット高さをを用いて、実タイヤの形状画像に適用して検査を行う。タイヤ回転方向の位置(位相)はティーチング時のタイヤとずれているため、両タイヤのパターンマッチングによる位相調整をまず行う。次に、境界線領域は計算除外領域としてマスク設定(周辺の計算有効領域からの直線補間による穴埋め)を行い、各ラベル図形の代表高さを検査対象画像から差分することで、正常な凹凸形状のみ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定義に従って検査を行う。

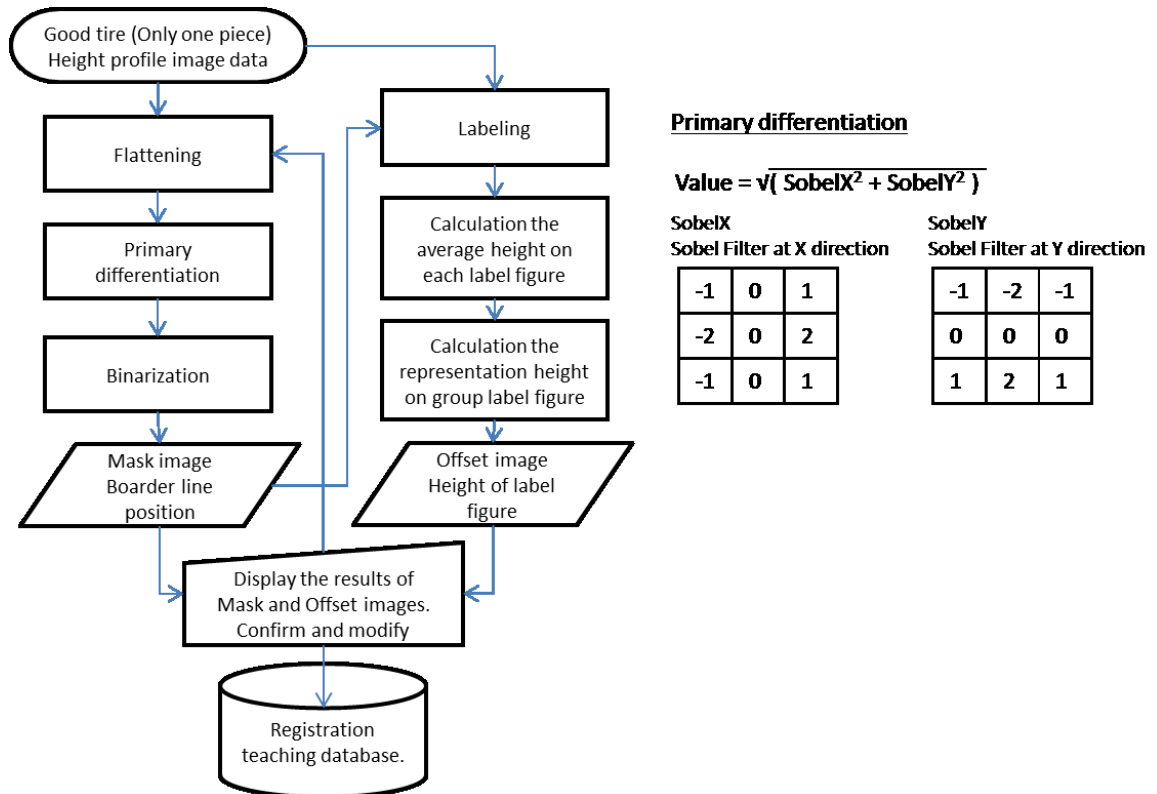


Fig. 5-5 A flowchart of teaching and setting process

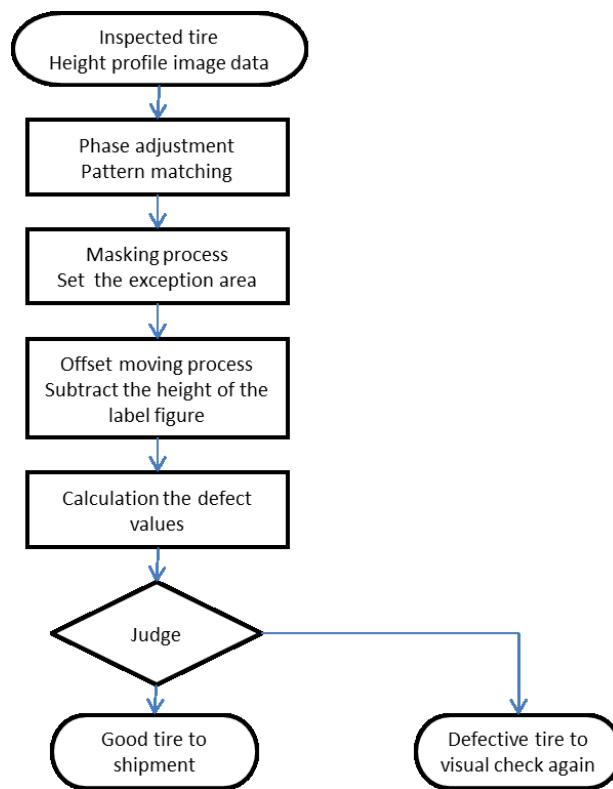


Fig. 5-6 A flowchart of inline-inspection

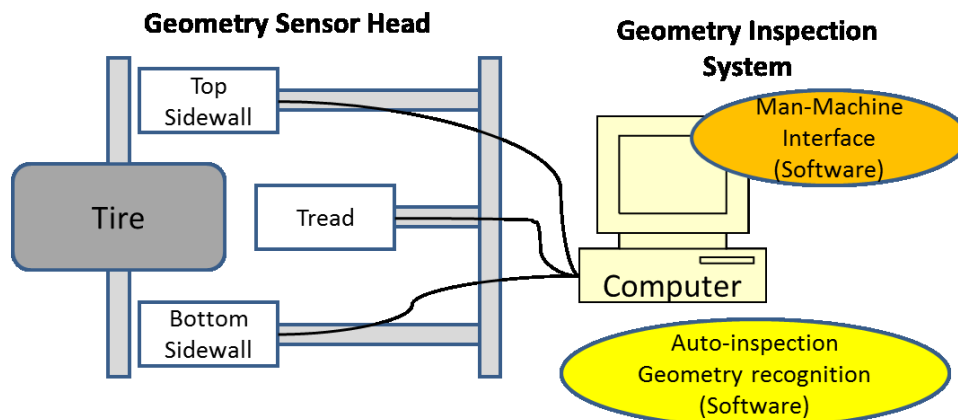


Fig. 5-7 Outline of the development inspection system

5.4. 装置構成

今回開発したタイヤ外形形状検査装置の装置構成を Fig.5-7 に示す。開発済みの毎秒 4,096 枚で高速形状計測するタイヤ三次元形状計測装置⁵⁻⁷⁾のメインコンピュータ上に搭載されるソフトウェアの構成で実現した。段取り・セッティング時のマスタタイヤのテーチング作業では、人間・機械協調型インタフェースによりマスク画像の自動作成結果を確認し、必要に応じて修正する。マスク画像自動作成処理では、タイヤ金型モデルに基づいた自動形状認識処理エンジンを搭載している。インライン検査時は、テーチング時登録したマスク画像を用いた位相調整と差分処理のみの高速画像処理を実現した。インライン検査時は自動形状認識を行わないため、「見落とし」無しの完全な自動検査が行える。

5.5. 実験結果

5.5.1. タイヤ金型モデルの自動形状認識結果

タイヤ金型モデルによる自動形状認識画像処理を、市販タイヤのサイドウォールを用いて性能検証した(Fig.5-8).

Fig.5-8 (1)にて、タイヤ三次元形状計測装置で取得した「高さ画像 (生データ)」を示す。横軸はタイヤ回転方向、縦軸はタイヤ半径方向を示し、明暗輝度値で各位置の凹凸高さを表す。次の微分処理での影響を除くため、サイドウォール湾曲形状を除去した平面化を行う(Fig.5-8 (2))。文字等の正常凹凸形状の境界線部での急峻な高さ変化を抽出するため、一次微分フィルタ(Sobel)処理により境界線領域(白塗部)を得て(Fig.5-8 (3))、これを二値化することでマスク画像を取得する。ラベリング後、各ラベル図形をグルーピングして代表高さを求め(Fig.5-8 (4))、これをオフセット画像として取得する。正常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取得できていることを確認するため、これら計算結果を元の画像に適用した結果が Fig.5-8 (5)である。欠陥凹凸形状の無い正常マスタタイヤを用いれば、本処理により正確な自動形状認識ができていくことがわかる。

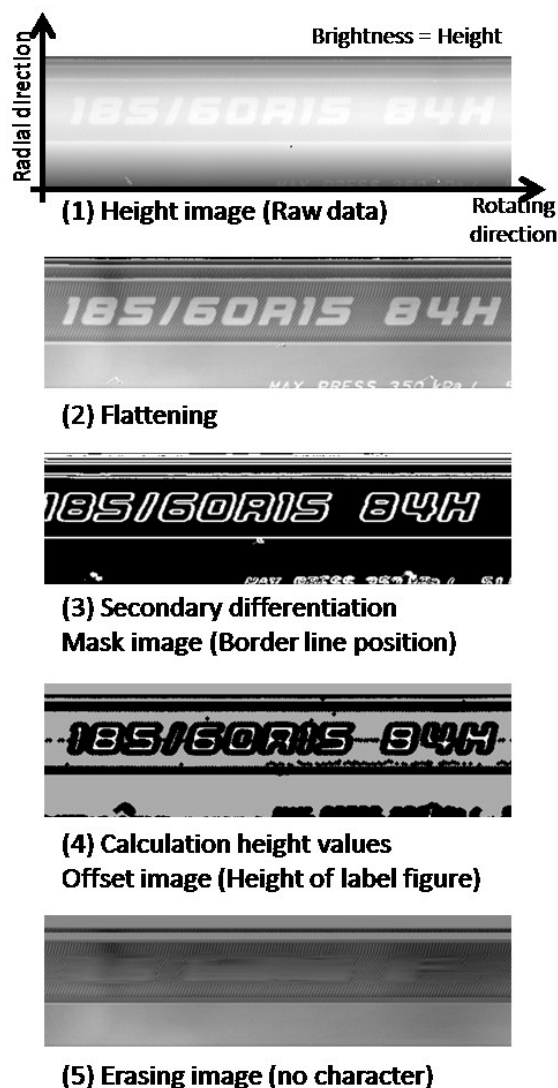


Fig. 5-8 A normal image processing result at teaching

5.5.2. 欠陥凹凸形状を付加した時の自動形状認識結果

市販タイヤを測定した高さ画像データに対し、典型的な欠陥凹凸形状をデータ上で付加後、タイヤ金型モデルによる自動形状認識性能を確認した結果を、**Fig.5-9**, **Fig.5-10** に示す。

頂点高さ 0.3mm の微小な欠陥凹凸形状(**Fig.5-9 (1)**)を付加した平面化後の高さ画像(**Fig.5-9 (2)**)に対し、自動形状認識処理を適用後の境界線領域(**Fig.5-9 (3)**)は、微小な欠陥凹凸形状を誤認識することなく正確に抽出できている。これら計算結果を元の画像に適用した結果(**Fig.5-9 (4)**)では、平面化されずに微小な欠陥凹凸形状 (**Fig.5-9 (4)**丸囲み部)が確かに残存しており、マスタイヤに微小な欠陥凹凸形状があってもその影響を最小限に抑えて、所望のマスク画像を自動作成できていることがわかる。

一方、頂点高さ 1.0mm の明らかに不良検知すべき欠陥凹凸形状(**Fig.5-10 (1)**)を付加した平面化後の高さ画像(**Fig.5-10 (2)**)では、自動形状認識処理を適用後の境界線領域(**Fig.5-10 (3)**)において欠陥凹凸形状を誤認識し境界線を抽出している。これら計算結果を元の画像に適用した結果(**Fig.5-10 (4)**)では、本来マスクする領域では無い欠陥凹凸形状部 (**Fig.5-10 (4)**丸囲み部)も一部マスクされており、本計算結果がティーチング画像データとして使用できないことがわかる。

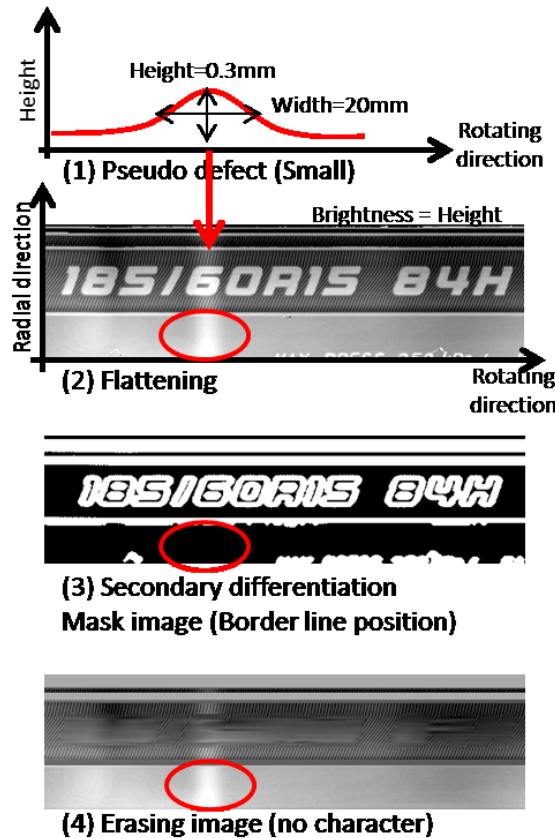


Fig. 5-9 A image processing result for a small defect

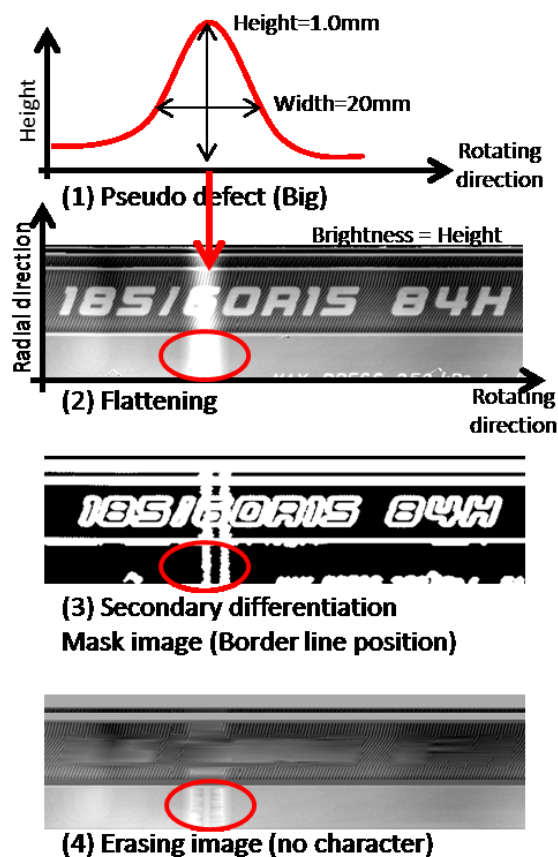
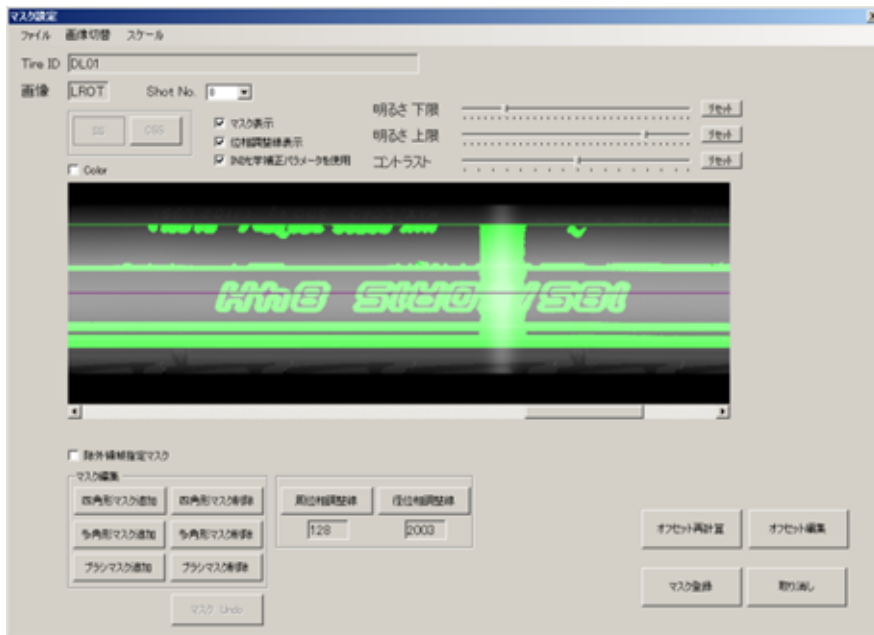


Fig. 5-10 A image processing result for a big defect

5.5.3. 人間・機械協調型インタフェースでの修正機能

前節 Fig.5-10 のような大きな欠陥凹凸形状が存在するタイヤはティーチング時マスタタイヤとして本来使用できないが、正常マスタタイヤの準備が難しい場合、ティーチング作業効率のためにも、マスク画像自動作成後に人間の目視確認と必要な個所を修正可能な人間・機械協調型インタフェースを開発した(Fig.5-11)。自動形状認識処理後の結果(Fig.5-11 (1))に対し、画面上のペン (Fig.5-11 (2)丸囲み部) を使って塗潰し、誤認識している境界線領域の追加や削除を行う (Fig.5-11 (2))。適切な境界線領域に修正後、自動形状認識の再計算を行うことで、欠陥凹凸形状に影響されないティーチング画像データを容易に取得することができる(Fig.5-11 (3))。

生産現場での運用確認においても、一部のタイヤデザインに対しては自動形状認識処理で認識間違いが発生したが、本インタフェースを用いることで、他の正常マスタタイヤの再測定のための煩雑なタイヤ交換をすることなく、コンピュータ上での修正操作で対応できたことを確認している。



(1) Result auto-image processing



(2) Modifying the correct area



(3) Result of re-calculation

Fig. 5-11 Procedure of human and machine interface

5.6. 結言

タイヤのサイドウォール外形形状検査装置を開発した。文字等の正常凹凸形状を自動で形状認識するタイヤ金型モデルによる画像処理手法を開発し、新規デザインのタイヤへも柔軟に対応が可能な人間・機械協調型インタフェースを用意することで、自動検査装置として必須性能である「見落とし無」「過検出低減」を実現した。加えて、実用面では段取り・セッティング時の操作性向上も行った。

本技術は、開発済みの毎秒 4,096 枚で高速形状計測するタイヤ三次元形状計測装置⁵⁷⁾と組合せたタイヤ外形形状検査装置として、各タイヤ工場で実機稼働中である。実機運用の中、タイヤ金型モデルによる自動形状認識処理と人間・機械協調型インタフェースを用いることで、新規デザインのタイヤへの対応も円滑に行われている。

今後もタイヤ生産品質に関わる計測・検査ニーズに応じていくとともに、目視検査の自動化等の同種の技術課題に対して本章で検証したコンセプトの横展開を検討していく。

以上のように、まずタイヤ製造プロセスに着目し、正常な凹凸形状はタイヤ金型によりプレスされて形成されるため概ね金型設計通りの凹凸形状および高さを持つ。一方で、ゴム製品のタイヤでは 0.1mm 以下程度の形状ばらつきも発生することから、タイヤ金型形状に加えて統計的な手法により概ねの正常な凹凸形状を計算し、これをマスタ形状データとして登録する手法を確立した。加えて自動化の難しい目視検査の良否判定工程のため、タイヤ金型モデルでの自動計算手法により完全自動化は行わず、自動計算した結果を人間に情報提示して最終的に人間の確認や修正を行うことで検査工程の最終品質確保を狙った「人間・機械協調型の自動検査システム」の構築を行った。この2つの手法を組み合わせることで、「情報量縮約のシステム設計」を行い、タイヤ凹凸形状の検査工程の自動化に成功した。

「超高速画像処理カメラによるタイヤ等高速回転物の高速三次元形状計測」および「タイヤ金型情報を用いたタイヤ外形形状検査の自動化」に関する研究では、従来正常凹凸形状の無いスムーズライン1ラインでの凹凸形状検査であったものが、正常凹凸形状範囲を含むタイヤ側面を面的に凹凸形状検査することができるようになり、タイヤ製造における最終出荷検査工程の検査品質の大幅向上に寄与することができた。またタイヤ金型モデルによる自動計算手法や人間・機械協調型の自動検査システムの構築により、従来人間の作業を支援し負荷軽減することにも成功した。実用的にも、従来マスターデータ登録には正常タイヤ 10 本以上が必要で、10 本の作り込みが難しかったが、正常タイヤ 1 本からでもマスターデータ作成が可能な人間・機械協調型インタフェースにより、実用性（特にメンテナンス性）を高めた。とりわけ、タイヤのうねりを補正する凹凸高さ計算手法により、人手によるマスターデータの作成作業が半自動化／簡便化され、実用性（特に操作性）を高めることができた。

コアの要素技術である「FPGA リアルタイム並列画像処理回路」を、高速回転物（タイヤ）の超高速形状計測に適用するための、複数シートレーザ光学系や FPGA 回路内での撮像タイミングと同期したサブピクセル計算のパイプライン処理等、毎秒 4,096 枚撮像と同時に形状計測を実証した上で、タイヤ金型モデルと人間・機械協調型インタフェースの開発などによって正常と欠陥の凹凸形状を正確に弁別する技術を実現し、総合的にはタイヤ最終工程でのタイヤ外形形状検査システムを実現することができた。

参考文献

- 5-1) 高橋英二, 荒木要, 迫田尚和, 武田玄, 村上将雄, 松原義明: タイヤ金型情報を用いたタイヤ外形形状検査装置; 自動車技術会論文集, Vol.46, No.1, pp.213-218, (2015)
- 5-2) 奥野敏: タイヤ外観検査装置; 公開特許公報, 特開 2014-55912, (2014)
- 5-3) O.Sholz, G.Kostka, A.Jobst, P.Schimit: Laser sheet of light measurement in tire manufacturing and vehicle assembly; Society of automotive engineers technical paper series, p.8, (2008)
- 5-4) Micro-Poise Measurement Systems: Tire geometry inspection system with sheet of light; <http://www.micropoise.com/tire-industry/tgis-sl>, (参照 2015-1-7)
- 5-5) 花田亮治, 瀬戸秀樹, 藤垣元治, 志茂公亮, 森本吉春: 高速回転タイヤの表面歪測定技術開発; 自動車技術会論文集, Vol.42, No.1, pp.119-124, (2011)
- 5-6) 輿水大和, 水草裕勝: 東洋ゴム工業 新・タイヤ外観自動検査システムを確立; 月刊タイヤ, Vol.43, No.8, pp.40-42, (2011)
- 5-7) 高橋英二, 迫田尚和, 森本勉, 野中俊克, 堀口史郎, 松下康弘: 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; R&D 神戸製鋼技報, Vol.58, No.2, pp.62-66, (2008)
- 5-8) 藤沢佳孝, 金子智之: タイヤ凹凸図形の検査方法およびタイヤ凹凸図形検査装置; 特許公報, 特許第 4679073 号, (2005)

6. 高速カラー画像処理カメラによる異形棒鋼の圧延中リアルタイム形状計測

6.1. 緒言

鉄鋼生産工程の中、高温線状物に対する形状計測技術は、計測ニーズは高いものの、測定対象材の高温且つ高速移動のため実用的な検査・計測装置が実現されていない。製造途中の棒鋼は温度 900℃以上のため赤外線を中心とした自発光成分が強く、一般的なモノクロ単一波長のレーザ光源を用いた光切断法では高精度な形状計測は難しい。本課題特有の高温線状物に対応するため、カラー多波長の光学系（撮像機構）を開発し、波長別に画像処理が可能な「FPGA リアルタイム並列画像処理回路」を適用することで、情報量を縮約した実用システム的设计開発を行った研究事例⁶⁻¹⁾である。波長軸による多重化は計測装置の小型化にも有用であり、高温や粉塵等過酷な鉄鋼生産現場にも適した実用的な研究である。

近年、国際的な価格競争の激化や国内電気料金高騰等のため、日本の鉄鋼業には大幅なコストダウン要求がつけつけられている。一方、建築・構造物の安全性担保のため、異形棒鋼の材幅・形状等の寸法は JIS⁶⁻²⁾規格等で定められており、高精度な寸法を確保しつつコストダウンのための生産性向上を実現するための生産技術が必要である。

異形棒鋼の形状を Fig.6-1 に示す。丸棒上に凸形状のリブ・節があり、丸棒直径の材幅値 (Fig.6-1 一重下線) の寸法管理に加え、節の高さや間隔、リブ高さや丸棒の真円度等の形状値 (Fig.6-1 二重下線) も規定値内に収めて圧延する必要がある。例えば JIS 規格で定められた異形棒鋼 D32 では、公称直径 31.8mm、節の高さ 1.6~3.2mm、節の平均間隔の最大値 22.3mm となる。加えて、圧延ロールに非接触の自由面であるリブの形状をリアルタイムに監視することは、単重異常や上下ロールの隙間調整不良、カリバ位置ズレなどの圧延不具合 (Fig.6-2) を早期発見し、圧延条件の迅速な変更等を行って生産歩留りの向上につなげるため、材幅値とともに材の形状も重要な計測値である。

生産歩留り向上のためには、例えば、異形棒鋼の単重許容値の中でばらつきを最小限に抑える必要があるが、現状単重測定は圧延後の抜取検査となるため、迅速な圧延機調整ができない等の課題がある。圧延途中の材の寸法をリアルタイム計測することで単重ばらつきをタイムリーに抑えることができれば生産性向上につながるが、これを実現するための高価な計測装置⁶⁻³⁾の導入はコスト面から難しく、また計測速度 100Hz を超える計測装置も実用化されていないため、人手作業による材幅値計測や外観目視検査に頼る現状である。さらに、圧延途中の材の寸法が自動計測できれば、これまでの熟練技術による圧延機調整技能に頼らなくとも、圧延の安定化や材の寸法精度向上が期待され、昨今の技能継承問題解決の一助になる。

本章では、熱間圧延中の異形棒鋼の材幅および形状をリアルタイム計測するための手法を検討し、且つ実用性を考慮した高速形状計測技術について述べる。

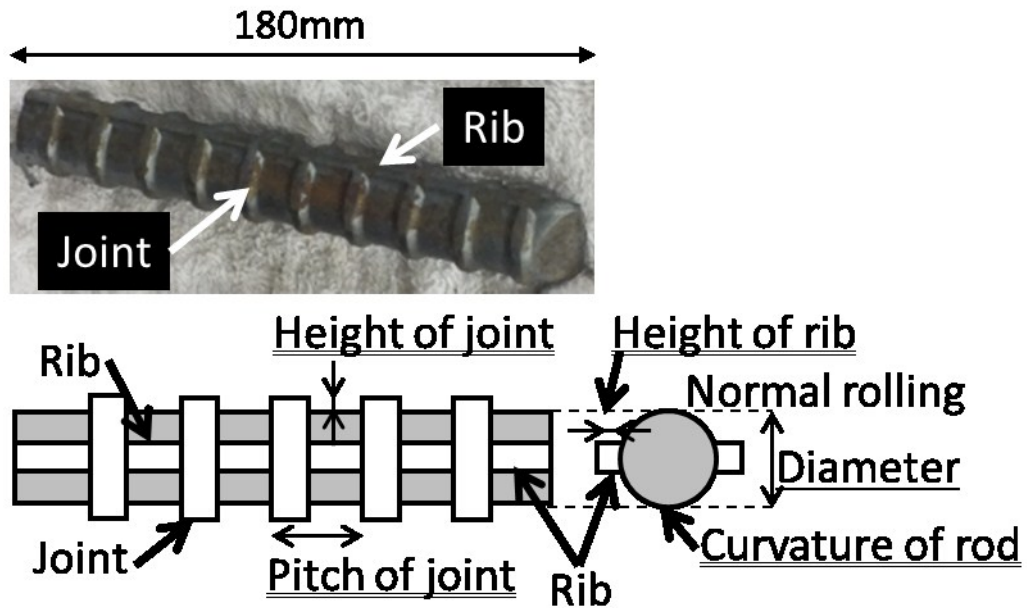


Fig. 6-1 Reinforcing bar

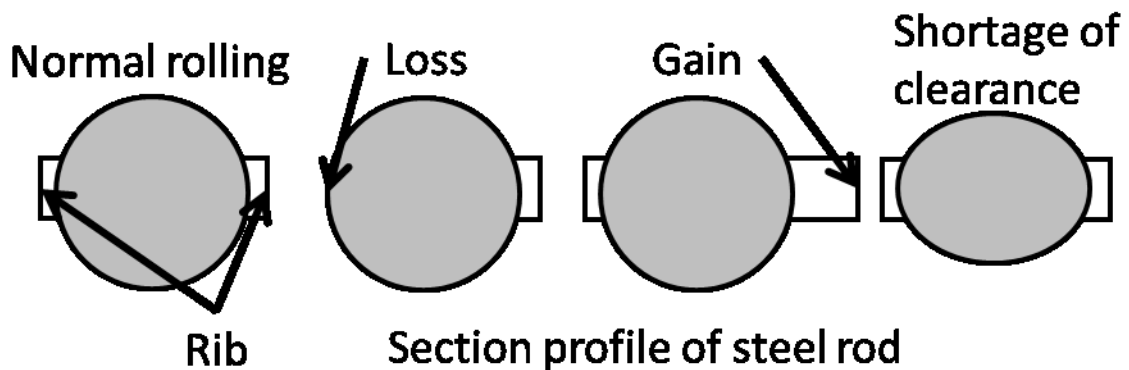


Fig. 6-2 Variation cases of rolling failure

6.2. 圧延中リアルタイム形状計測における技術課題

圧延工程での異形棒鋼の材幅・形状のリアルタイム計測実現のためには、JIS⁶⁻²⁾で規定された製品単重に対応する寸法公差を検査可能な空間分解能等の計測性能面での要求仕様 (**Table 6-1**)達成は必須だが、加えて圧延速度に対応した高速計測や、高温・粉塵や材の振動ブレなど実機適用可能な計測装置にしなければならない。

計測精度面では、異形棒鋼の最終製品の直径や節の高さは 0.1mm 分解能で管理されており、材料使用量を過不足無く使い圧延して生産歩留りを向上させるためには、圧延途中でも同程度の 0.1mm 分解能による工程管理が必要である。例えば圧延上流工程での材幅値 100mm の中間材料に対し、光学計測手法で測定再現性良く 0.1mm の空間分解能を実現するためには一桁小さい画素分解能が必要であり、市販カメラ (1,000pixel オーダ) の画素分解能では不十分であり、サブピクセル処理⁶⁻⁴⁾等の画像処理手法を適用する必要がある。

Table 6-1 Requirements specification

	Measurement Object	Measurement condition	Requirements specification	Solution
Measurement Resolution	Width of rebar 100mm	Width resolution 0.1mm	Camera resolution 1,000pixels	Sub-pixel processing Resolution 0.01mm
Measurement Rate	Pitch at D32 22.3mm	Line speed 3.4m/sec.	Imaging speed 6.6msec.(150Hz)	High-speed image camera

計測速度面では、例えば異形棒鋼 D32（節の平均間隔の最大値 22.3mm）で仕上圧延工程での材料速度 3.4m/sec.の場合、材の流れ方向には 6.6msec.毎(150Hz)に節が通過することになるため、節を含めた異形棒鋼の全形状の計測には少なくとも 1kHz 以上の高速撮像カメラが必要である。また D10 や D16 など直径の小さい異形棒鋼では、節の間隔も更に短くなり、材料速度も速くなるため、より高速な撮像が必要となってくる。従来技術の一つにストロボ照明を用い像ブレ無く高速撮像する事例^{6.5)}があるが、抜けなく連続形状計測を実現するものではなく、高速撮像のための高速化手法を検討する必要がある。

実機適用にあたっては、少なくとも 800℃以上の高温で強く自発光している棒鋼に対し、赤から赤外の自発光成分の光を回避した光学系の設計も必要である。計測精度を達成するための材の振動ブレへの対応も必要であり、振動ブレをリアルタイムに補正する手法についても必要になる。

以上の個別の技術課題に加え、計測精度を上げるために画素数を増やすと計測速度が低下するといった装置全体での技術課題もあり、トレードオフを考慮した光学系、画像処理系の最適設計も必要である。

6.3. 計測手法

6.3.1. 自発光受光による材幅計測

異形棒鋼の寸法関連の計測・検査項目中、材幅値は最も基本的な計測値として重要である。棒鋼に平行光を照射してその陰影をカメラで撮像し画像処理する投影法^{6.6)}や、赤熱する棒鋼を倍率変化の無いテレセントリックレンズにより自発光画像として撮像し画像処理する受動型画像処理^{6.7)}等、従来から様々な取組みがなされているが、高価なテレセントリックレンズ等を使わず容易に設置可能な実用的な計測装置に対する要求も大きい。

本報では、普及した固定焦点レンズによる自発光受動型での材幅計測により、テレセントリックレンズ等の平行光学系を不要とした。また、材の振動ブレによる材幅値変動補正では、後述する形状計測との同時測定により距離補正を可能とした。形状計測によりカメラに対する材の遠近距離の絶対値がわかるため、レーザ距離計等を別途付加することなく、この情報を利用して材幅値の距離補正を行うことができる。

6.3.2. 光切断法による形状計測

次に、材幅値とともに材の形状も重要な計測値である。従来技術では、材幅計測の投影法を拡張し、センサ部を機械的に回転させることで全周形状を測定する方法^{6.3)}や、複数センサを全周全体に配置する方法^{6.8)}がある。しかしながら材幅計測を拡張したこれら方法では、回転式ならば材の断面形状を同時刻で測定できない問題や、複数センサならばそもそも多数のセンサが設置できず、離散的な形状計測しかできない問題がある。

本課題に対しては、材の断面形状を同時一括測定可能な光切断法を用いることで、同時

刻での測定と連続的な形状計測を実現した。高温自発光する対象に対して光切断法を適用するために、光切断法のシートレーザは大出力の緑（波長 532nm,出力 35mW）および青（波長 405nm,出力 15mW）を用い、自発光成分の赤から赤外の波長の光を遮断するための赤外カットフィルタ（700nm 以下を透過）を二枚重ねることで S/N を向上した。

6.3.3. 複合光学系による材幅・形状同時計測

固定焦点レンズによる自発光受動型での材幅計測と、緑および青のシートレーザを用いた光切断法による材の断面形状計測を、同時計測するための複合光学系を Fig.6-3 に示す。圧延ラインの流れ方向垂直にシートレーザ光源二種類（緑、青）を配置し、2本の光切断線および自発光画像を異なる方向からカラーの高速画像処理カメラにより撮像する。従来、材幅・形状をそれぞれ測定するためには二種類の計測装置が必要であったが、この複合光学系を用いることで一つの装置で計測が可能となる。空間的には同一箇所の材幅と形状の情報を波長軸で情報多重化して装置に取込み、後述する FPGA リアルタイム並列画像処理回路で波長毎の個別の画像処理によって情報を分離するものである。

材の振動ブレは、二種の波長の光切断線情報（緑、青）を同時に取込むことで、材断面方向の振動成分除去が可能となる。Fig.6-3 に示す材の振動方向において、長尺物の棒鋼では振動による位置変化はほぼ平行移動になるため、二種の光切断法での振動による位置変化は同距離になる。一方、材の形状が変化する際は、材の通過とともに徐々に形状変化していくため、二種の光切断法で検出する位置には差異が出る。従い、二種の光切断法で同時計測した位置座標を差分することで、振動成分（=平行移動成分）は除去され、材の形状変化に起因する位置変化成分のみを求めることができる。

この複合光学系を構築する上で、S/N 確保の光量バランスを最適設計することは重要である。温度 800°C の材の自発光の発光スペクトルは、波長 2.7 μm の赤外をピークに可視光領域にも広がっている。カラーカメラの RGB 成分での材の発光輝度比は概ね R:G:B=60,000:300:1 となっており、赤外カットフィルタ（700nm 以下透過）を 2 枚、赤色カットフィルタ（550nm 以下透過）を 1 枚、合計 3 枚のカットフィルタを重ねてカラーカメラ受光側に搭載し、RGB の光量バランスを調整した。この複合光学系で撮像した画像例を Fig.6-4 に示す。光切断法の G,B 画像で多少のコンタミネーションがあるが、それぞれの画像で目的とする光切断線の輝度が明るく撮像できており、G と B で独立した光切断線のピーク検出が可能である。

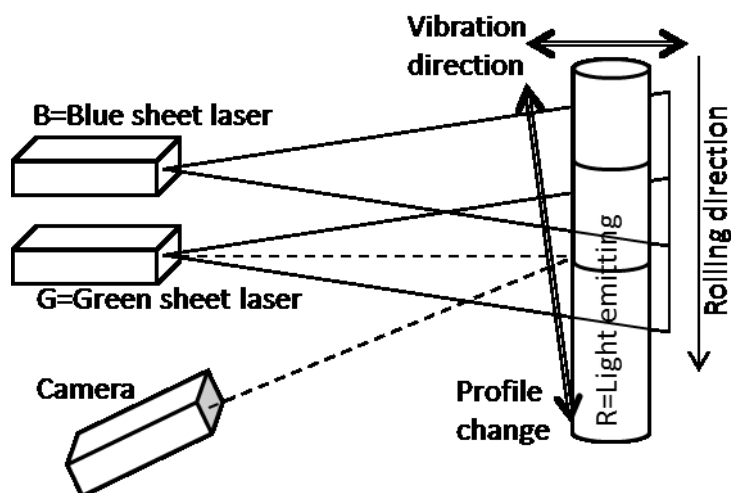


Fig. 6-3 Multiplexing optics

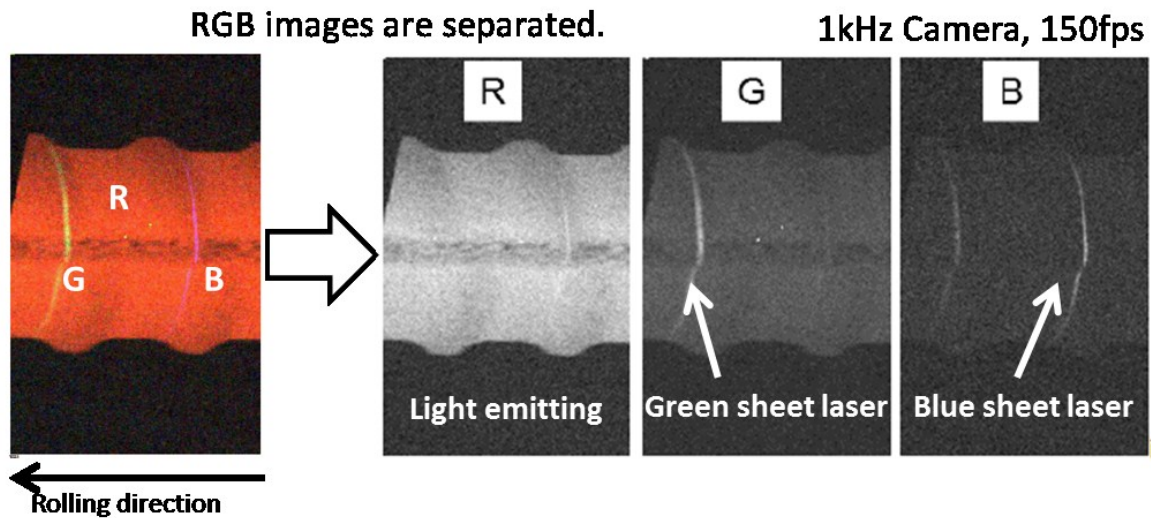


Fig. 6-4 Real color images by multiplexing optics

6.4. FPGA リアルタイム並列画像処理回路による高速化手法

節を含めた異形棒鋼の全形状の計測に向け、1kHz の高速撮像カメラを実現した。加えて、1kHz の画像撮像は膨大な画像情報を発生させるため、生の輝度画像をそのままパソコンに転送してパソコン上で各種画像処理を行う一般的な方法は、実用的ではない。更に、複合光学系によるカラー画像はモノクロ画像の 3 倍情報量が多いため、撮像直後にリアルタイムで何らかの高速画像処理を行って情報量を縮約する仕掛けが必要である。前章までに述べたタイヤ形状⁶⁻⁹⁾やトンネル形状⁶⁻¹⁰⁾をリアルタイムに高速画像処理するカメラシステムをベースにして、高速撮像と光切断線の座標抽出等の画像処理を同時並列で行うこれら共通的なプラットフォーム基盤技術を、今回カラー画像に適用することで要求される高速化を実現した。

FPGA(Field-Programmable Gate Array)リアルタイム並列画像処理回路のコンセプトを、Fig.6-5 に示す。複合光学系の構成に基づき、1 台の高速カラー画像処理カメラで画像撮像する。本カメラの CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor) 撮像素子は、隣り合う 2×2 画素の領域で各 RGB 成分の画素情報を取得できるものを用いた。FPGA 制御回路により、CMOS から FPGA への各画素の輝度情報の取込みを同期制御する。FPGA 制御回路内では、RGB それぞれをパイプラインで並列処理可能な回路を用意しておき、各色個別の画像処理を行う。処理結果はカメラ内メモリに一時保存した後にパソコンに転送される。パソコンでは、一次計算処理されたデータを最終的な情報に加工して出力する。材幅値であれば棒鋼 1 本毎のトレンドグラフ表示、形状値では一定閾値を超えた際のアラーム出力などである。

各色個別の画像処理の内、R 成分の自発光プロジェクトン回路(Fig.6-6)では、画像中の水平 1 ライン毎に輝度平均値を FPGA でリアルタイムに計算する。パソコンでの後処理にて、画像 1 枚分の輝度平均値のデータ配列から隣り合うラインで微分値を計算し、材の両端部に相当する最大微分値の両端 2 点を求め、その間の距離を材幅値として出力する。G,B 成分の光切断法サブピクセル回路(Fig.6-7)では、画像中の水平 1 ライン毎にピーク位置を探索し、ピーク位置の±N(pixel)の範囲でサブピクセル処理(輝度重み付の重心計算)を FPGA でリアルタイムに計算する。パソコンでの後処理にて、光切断法のキャリブレーション補正值を用いて実座標(mm)変換して材の形状データとする。

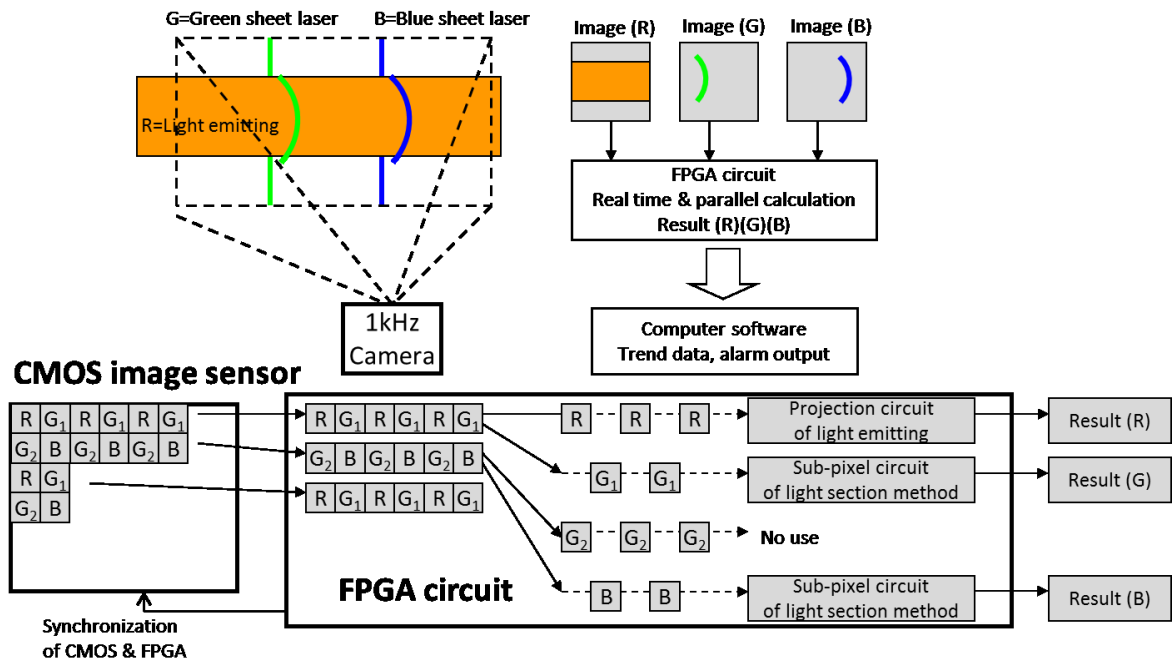


Fig. 6-5 FPGA real-time parallel image processing circuit

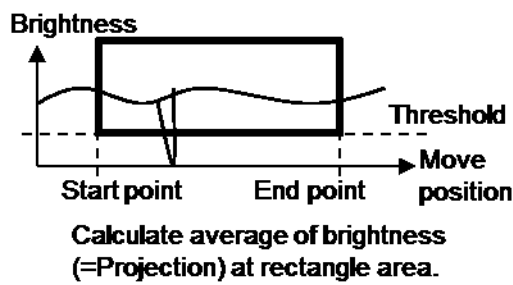


Fig. 6-6 Projection circuit of light emission

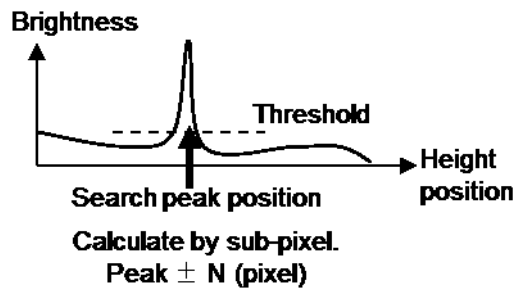


Fig. 6-7 Sub-pixel circuit for light section method

6.5. 実験装置の構成

今回開発した装置を用いた圧延ラインでの現場実験を **Fig.6-8** に、今回開発使用した 2 種類のカメラの主な仕様を **Table 6-2** に示す. **Table 6-2** のカメラの撮像速度は、CMOS 撮像領域を部分領域に限定することで、1kHz カメラでは最大 1,300fps を、市販カメラでは最大 200fps を実現した.

Fig.6-8 に示す本実験では、実機で必要となる耐熱筐体や圧延ラインへの恒久的な固定治具は製作せず、本報の基本的アイデアの検証と動作原理確認のため、複合光学系の構成部品であるシートレーザ 2 種類（緑、青）と、自作開発した FPGA リアルタイム並列画像処理回路を搭載した 1kHz の高速カラー画像処理カメラ、および振動除去等の各種画像処理ロジック検証用に市販の高速モノクロカメラ (**Fig.6-8** 中の 1kHz カメラ位置に取替えて設置) を、それぞれ三脚で暫定的に固定する方法をとった. 圧延ラインの圧延機出側直後の第一トラフ間の隙間空間に合わせて複合光学系を設置し、実験測定では材の通過タイミングに合わせて手で測定開始操作を行った.

現場実験では、事前にシートレーザ間の面平行度を調整したレーザベース板(**Fig.6-8**)を圧延ラインのパスラインに垂直になるようパスラインからの距離 500mm の位置に設置し、シートレーザ面から 22.3 度の角度をつけてカメラをパスラインからの距離 1,150mm の位置に設置した. 自発光による材幅値のカメラ分解能の校正および光切断法による形状値の高さ分解能の校正は、サイズが既知の丸棒ターゲットを測定範囲内に設置し、これを撮像することで画素・距離換算した.

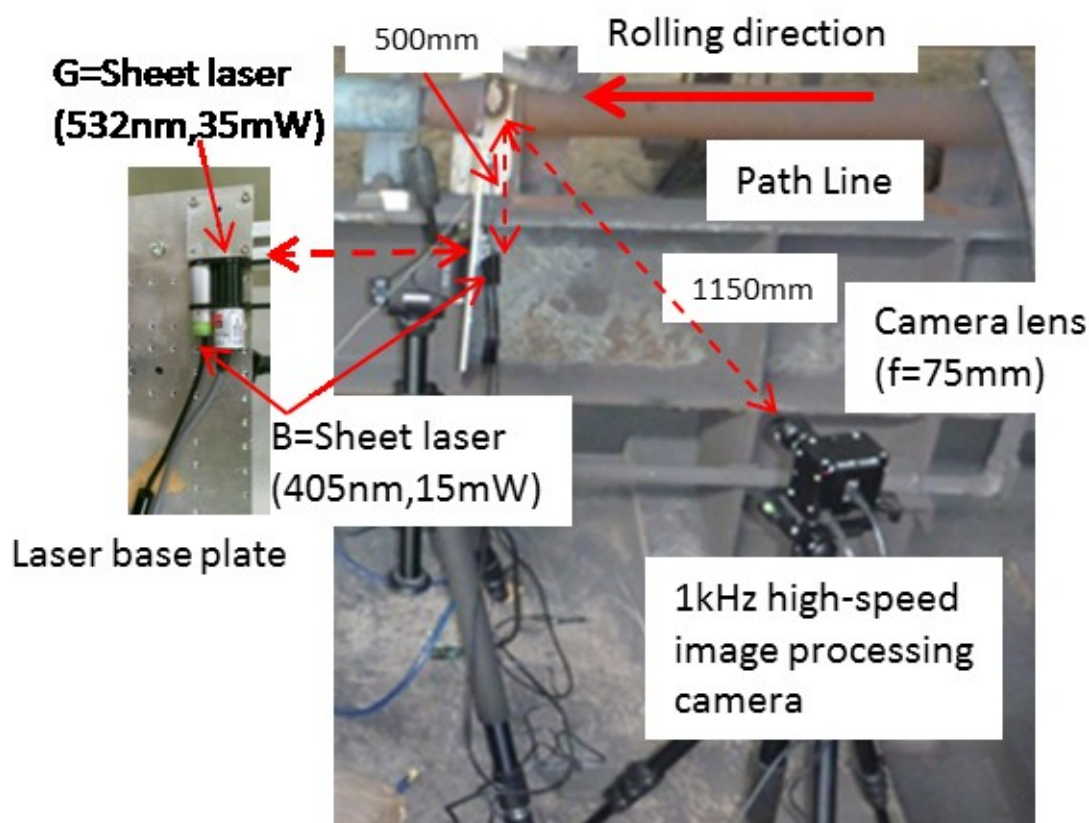


Fig. 6-8 Experimental set-up

Table 6-2 Camera specification

	1kHz high-speed image processing camera	Commercial camera
Image sensor	CMOS (Color, 1/2 inch)	CMOS (Mono, 1/1.8 inch)
Active pixels	1280×1024	1280×1024
Frame rate at full resolution	150fps	50fps
Data transfer interface	USB 2.0	GigE

6.6. 実験結果および考察

6.6.1. 蛇行する材先端部の材中心位置補正機能

まず初めに、圧延途中の材で、圧延機間の張力がかかっていない先端部の材幅と形状の蛇行の様子を **Fig.6-9** に示す。横軸は経過時間、縦軸は材の断面方向位置、R 画像の輝度明暗は各ラインでの自発光の輝度平均値（プロジェクション）、G 画像の輝度明暗は材の凹凸形状の高低を示している。1kHz カラー画像処理カメラは 1,000fps(frame/sec.)で撮像し、リアルタイム画像処理を行った。

次に、自発光 R 画像の両端部位置から材の中心位置を求め、先端部の材の蛇行を補正した結果を **Fig.6-10** に示す。本測定は、撮像速度 300fps に設定し、視野を広めて計測した。**Fig.6-10** 中の自発光 R 画像では、周囲と温度が若干違うため輝度が低く撮像されている圧延自由面（上下圧延ロールの隙間を通過した圧延されていない自由面）が、圧延の時間経過とともに回転している様子がわかる。材幅と形状を同一カメラで同時計測することにより、材のカメラ画像面上での上下方向の振動を除去した形状計測が可能であることを確認した。

Fig.6-10 より 1 断面を抜き出し、材幅と形状を **Fig.6-11** に示す。横軸は材の断面方向位置、縦軸は、自発光 R 画像（破線）では輝度平均値を、光切断 G 画像（実線）では材の凹凸形状の高低を、グラフ表示している。**Fig.6-11** 中、特に左端部では、自発光の材幅プロファイルに比べ、光切断法の形状プロファイルが端部末端まで測定できていない。これは **Fig.6-11** 右図に示すように、棒鋼が丸棒状のため、その端部ではシートレーザの光散乱強度が極端に弱くなり、カメラでの光切断線検出ができなくなっているためである。従って、両端部位置を正確に計測する必要のある材幅計測では自発光 R 画像を用いる必要があり、一方で材の中心部の凹凸形状は光切断法でしか計測できないことになる。故に、計測項目に応じた最適な光学系を構築し、これらを同時計測することは重要である。

また、**Fig.6-11** の光切断 G 画像（実線）に対してハイパスフィルタ処理を行い、材の形状値に対する評価を行った一例を **Fig.6-12** に示す。**Fig.6-12** 右下図の 1 断面画像では、右端部に約 1.5mm の凸形状が有ることがわかった。本測定例は、**Fig.6-2** の圧延不具合例の「はみだし」に相当する事例と考えられる。

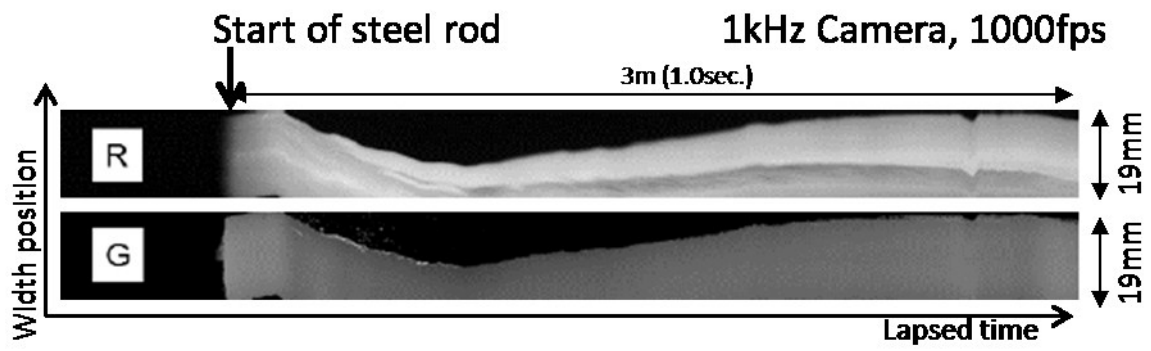


Fig. 6-9 Measured images at top part of steel rod

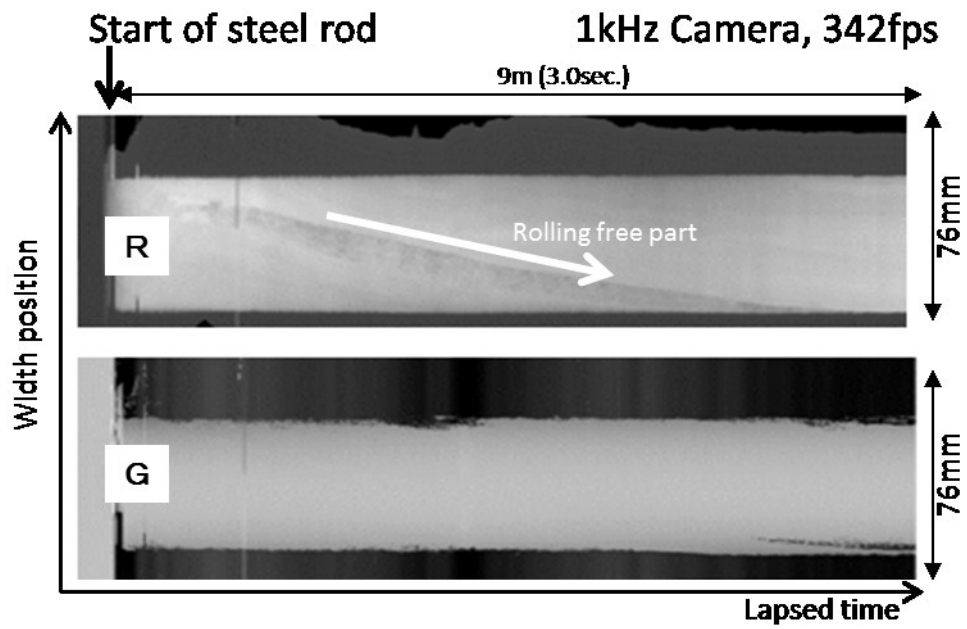


Fig. 6-10 Measured images after center adjustment

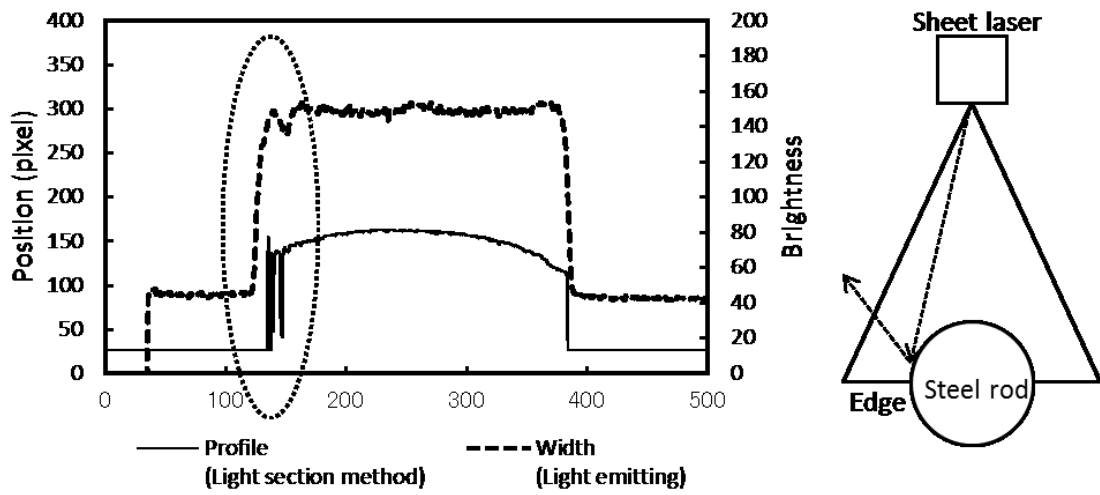


Fig. 6-11 A measurement result of width and profile in section

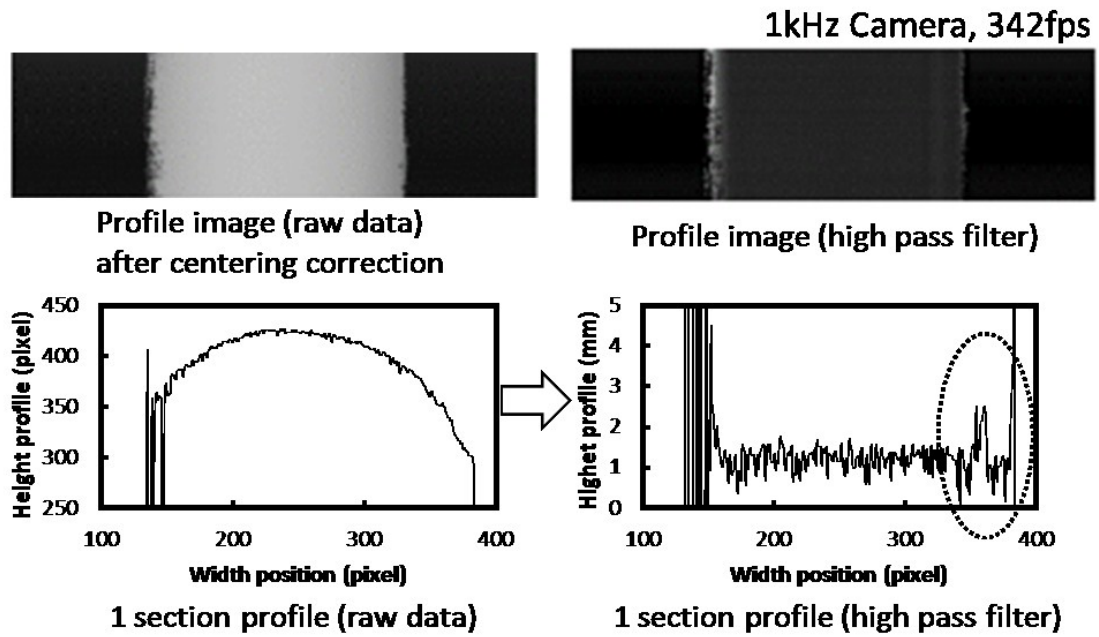


Fig. 6-12 Analysis of profile at middle part of steel rod

6.6.2. 等価時間サンプリング手法による異形棒鋼のリアルタイム形状計測

前節まで、圧延途中工程での材の材幅・形状計測結果を説明した。しかしながら、異形棒鋼故の形状計測の困難さは、その形状が作り込まれる最終圧延後での高速形状計測の実現にある。

Fig.6-13 に示す節と撮像速度の関係から、オシロスコープのパルス波形観測時に用いられる「等価時間サンプリング手法 6-11)」と類似の方法で、最終圧延後の形状計測を実現した。

Fig.6-13 において、一定の圧延速度に対して節は時間 T の周期で通過する。一方、カメラ撮像周期を $T + \Delta T$ に設定して撮像すると、節に合致するタイミングが ΔT ずつずれていき、 $N = T / \Delta T$ 回後に再び節に合致して撮像する。これら ΔT ずつずれて撮像した材の断面形状を、**Fig.6-13** 右図のように合成することで、材の形状を模擬した形状画像を得ることができる。

この $T + \Delta T$ を変更しながら、最終圧延後の形状を測定した結果を **Fig.6-14** に示す。本測定では、材速度より節の周期は約 $393\text{Hz}(=T)$ であり、カメラ撮像の各周期によって節を測定するピッチが変化していることがわかる。市販カメラで撮像した $100\text{fps}(4T + \Delta T')$ 、 $196\text{fps}(2T + \Delta T'')$ では、撮像速度が遅く、節に合致するタイミングが少なくなるため、材の形状を明確に模擬することはできていない。一方、 1kHz カメラにより節の周期にほぼ合致する $393\text{fps}(T + \Delta T)$ で撮像した場合、節に合致するタイミングが増えて、繰り返し流れてくる節の形状を模擬的に捉えることに成功した。なお本測定の 100fps と 196fps では市販の高速モノクロカメラを使用し、光切断線抽出などの画像処理は画像取得後オフラインでパソコンにて行った。

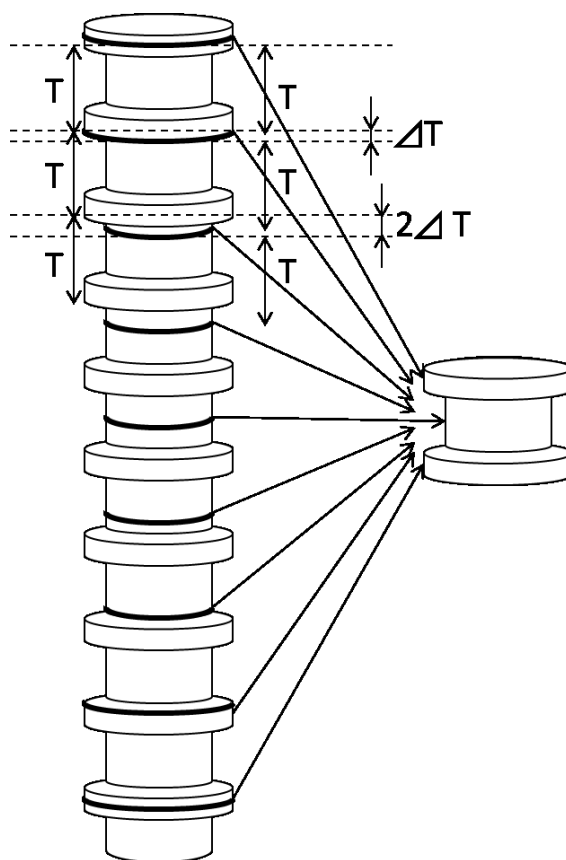


Fig. 6-13 Method of equivalent time sampling

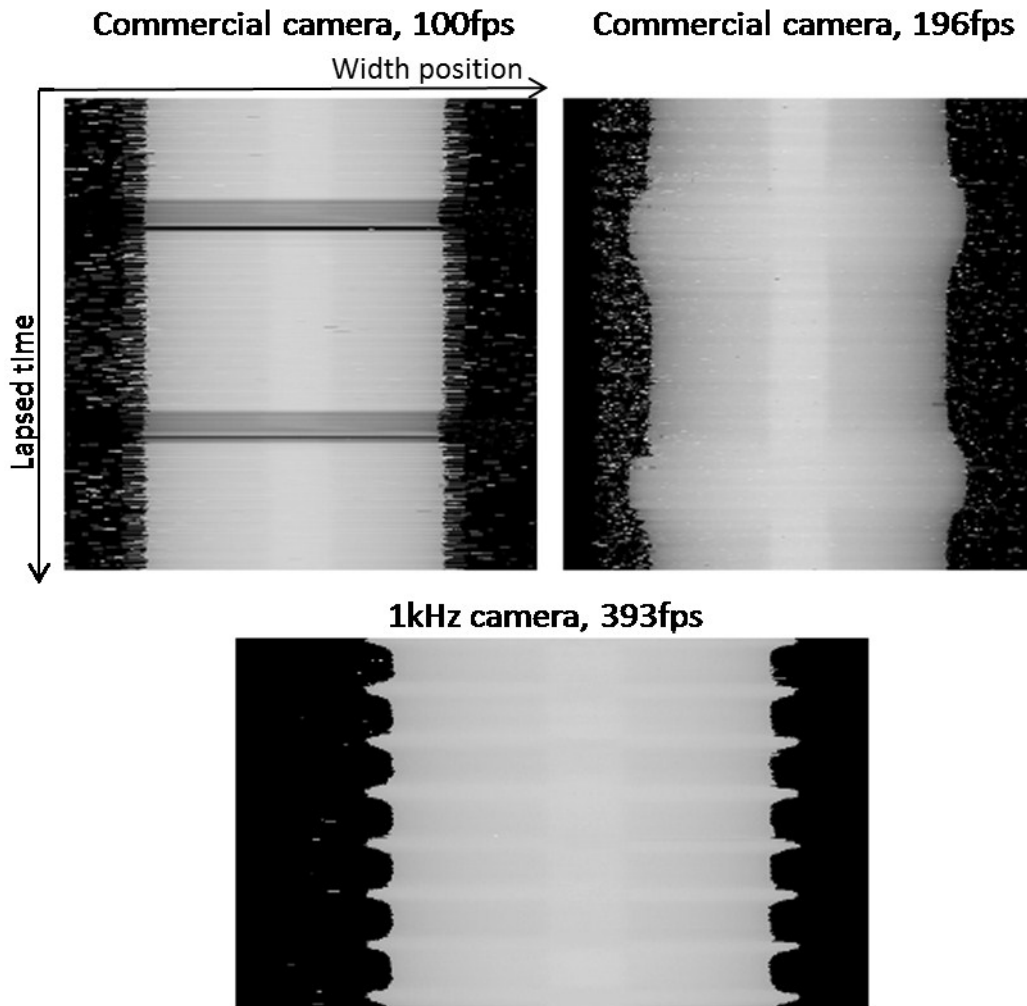


Fig. 6-14 Measurement images by equivalent time sampling

6.6.3. 材断面（凹凸高さ）方向の振動除去機能

材断面方向の振動ブレを、二種の光切断法（緑、青）により振動除去する機能について確認した。異形棒鋼 D32（節の平均間隔の最大値 22.3mm）、材料速度 3.4m/sec.に対し、1kHz の高速撮像カメラおよび FPGA リアルタイム並列画像処理回路により取得した光切断法の 2 種の G 画像と B 画像を Fig.6-15 に示す。DIF 画像は G 画像から B 画像を差分したものであり、原理的には振動成分は除去されており、形状変化成分のみが残る。しかしながら、Fig.6-15 の DIF 画像では材の両端部を中心に細かなノイズが残っており、両端部において光切断線の輝度不足による未検出点の発生や、G 画像に多く観測された火花を拾った輝度ノイズに起因した局所ノイズと考えられる。

Fig.6-15 の DIF 画像中のリブ中央部の高さ変化を Fig.6-16 に示す。Fig.6-16 の高さ変動は $3\sigma = \pm 0.36\text{mm}$ となった。大局的な数 mm オーダの振動成分はほぼ除去できているが、局所的なノイズは残る結果となった。

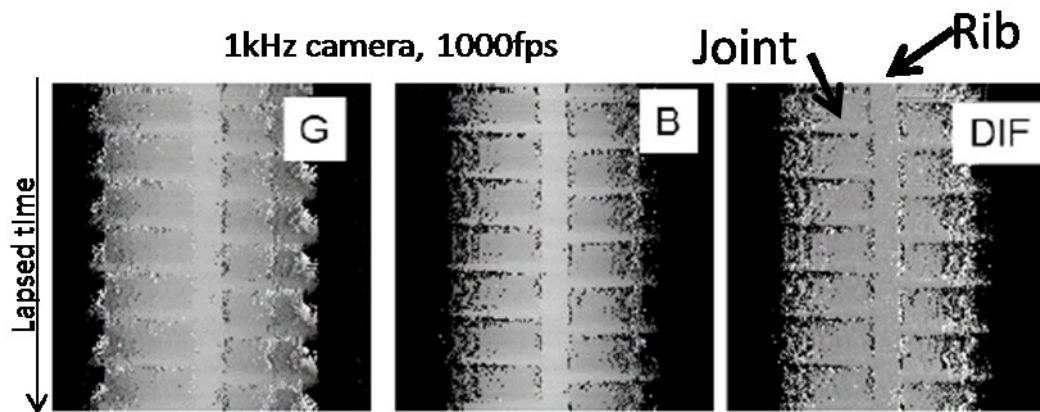


Fig. 6-15 Difference seen in images by removing vibration

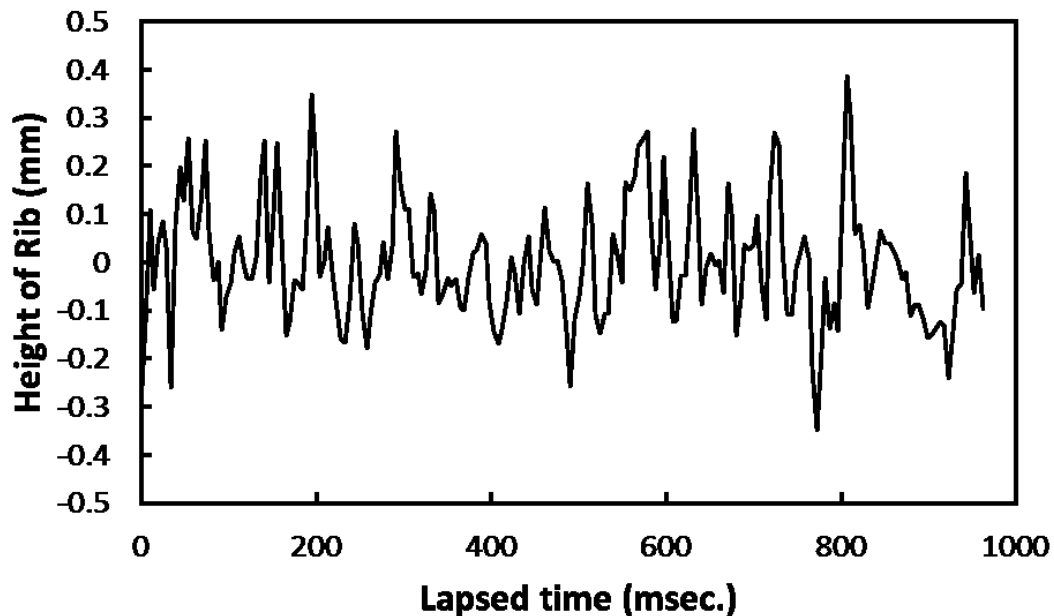


Fig. 6-16 A measured height of a rib after removing vibration noises

6.6.4. 形状値の絶対値精度

最後に、本手法による形状計測値の静止時の絶対値精度について確認した(Fig.6-17)。現場実験で得た最終圧延工程でのリブ付形状データに対し、四角で囲う範囲にて平均的な断面プロファイル形状(Fig.6-17 下の Raw Profile)を計算した。現場実験で設置した光切断法光学系の距離校正のため、JIS 規格に基づいたリブ無しの丸棒マスターピースを用意しておき、実際の現場実験で光切断法光学系を設置した状態のまま、圧延ライン上にこのマスターピースを設置して、距離校正のための静止時形状データ(Fig.6-17 下の Master Profile)を取得した。Raw Profile から Master Profile を差し引くことで、リブ部分のみの形状(Fig.6-17 下の Difference Profile)を算出した結果、リブ幅 3.8mm、リブ高さ 1.6mm を得た。現場実験

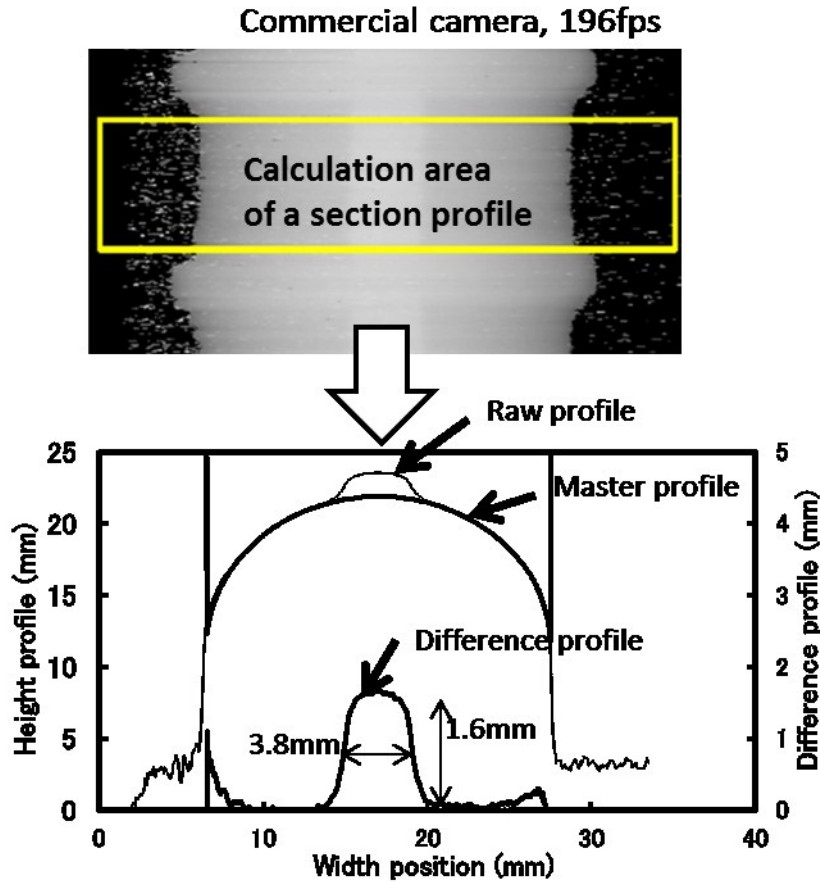


Fig. 6-17 Accuracy evaluation of a rib profile

で持帰った異形棒鋼の実サンプルのリブ部分を、別途ノギスで測定した結果、前述のリブ幅およびリブ高さは0.1mm以内で合致した。

6.7. 結言

熱間圧延中の異形棒鋼の材幅および形状の圧延中リアルタイム形状計測技術を開発した。

棒鋼形状計測の分野では従来計測速度 100Hz を超える計測技術は無かったが、今回自発光による材幅計測と光切断法による形状計測を同時計測する複合光学系を開発し、最速 1kHz の高速カラー画像処理カメラを開発することで現場実験可能なシステムを構築した。実際の現場実験においても、狙い通り、材幅・形状の同時計測を実現し、材先端部の蛇行の様子や振動ズレ補正などが機能することを確認できた。しかしながら、実用装置にするためには、耐熱筐体の製作や実ラインへの常設置、連続測定時の計測安定性など、実用面での確認は今後の課題である。

また本章で検証した要素技術として、高速カラー画像処理については、産業上の他分野への展開も検討していく。

以上のように、コアの要素技術である「FPGA リアルタイム並列画像処理回路」を、高温で高速移動する異形棒鋼材へ適用するために、高速カラー画像処理回路を開発し、試作実験を通してその有用性を確認した。高温線状物に適したカラー多波長の光学系を用いる

ことで、波長別に画像処理が可能なカラーCMOS撮像素子とFPGA制御回路による「FPGAリアルタイム並列画像処理回路」を構築し、情報量縮約のためのシステム設計を行った。更に本研究の実用上の課題である棒鋼圧延ライン上での振動影響の除去のため、R画像（自発光）から求めた材幅中心位置をG画像（光切断法）での形状データの中心位置補正に用いるといった画像処理補正手法を開発し、高精度な形状計測を実証した。また波長軸による多重化は計測装置の小型化にも有利であり、高温や粉塵等過酷な鉄鋼生産現場にも適した冷却筐体等の実用化技術も実現した。従来人手で材幅値のみを確認していたが、以上の設計検討および実用化開発によって、インラインで材幅と形状の同時計測の実現可能性を見出した。本手法の自動計測装置により、計測誤差の排除や定量的な形状計測が可能となる上、高温危険作業の排除の期待も見えてきた。

従来人手作業か、又は大掛りな計測装置（材幅、形状、疵、それぞれにカメラ・センサ）が必要だったが、カラー高速カメラを用い、RGB成分それぞれに並列でリアルタイム画像処理することにより、計測性能は維持したまま、実用的（コストダウン）な簡便な計測装置（カラーカメラ1台に統合）を検証した。

参考文献

- 6-1) 高橋英二, 片山亮, 迫田尚和: 高速カラー画像処理カメラによる異形棒鋼の圧延中リアルタイム形状計測; 鉄と鋼, Vol.101, No.3, (2015): 2015年3月掲載予定
- 6-2) JIS G 3112, 鉄筋コンクリート用棒鋼, (2010)
- 6-3) 藤沢淳一, 阿閉信雄, 畠山昇次, 岡敏博: 回転式寸法測定方法及び装置; 公開特許公報, 特開昭 62-52404, (1987)
- 6-4) 井口征士, 佐藤宏介; 三次元画像計測, 昭晃堂, p.36, (1990)
- 6-5) 石井宏幸, 松田忠明, 谷川義則: ネジ付棒鋼の寸法測定装置; 公開特許公報, 特開平 9-61124, (1997)
- 6-6) 和佐泰宏, 山口証, 小川岳夫, 住江伸吾: 高精度2次元形状計測装置の開発; 計測自動制御学会第32回講演大会予稿集, p.471, (1993)
- 6-7) 和佐泰宏: 圧延中にも容易に設置可能な線材・棒鋼用寸法計測装置; R&D 神戸製鋼技報, Vol.57, No.3, pp.25-28, (2007)
- 6-8) 西野淳二, 長谷川光一, 倉地三喜男, 佐藤達也: 3ロール圧延材のプロファイル測定方法; 特許公報, 特許第 3845255 号, (2006)
- 6-9) 高橋英二, 迫田尚和, 森本勉, 野中俊克, 堀口史郎, 松下康弘: 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; R&D 神戸製鋼技報, Vol.58, No.2, pp.62-66, (2008)
- 6-10) 高橋英二, 迫田尚和, 朝日賢一, 福本陽三: 超高速画像処理カメラによるトンネル形状自動計測装置; 計測自動制御学会論文集, Vol.48, No.12, pp.863-871, (2012)
- 6-11) 小林謙介: 高速波形計測のための等価時間サンプリング技術; 計測と制御, Vol.41, No.4, pp.256-261, (2002)

7.太陽電池ウェハ等大面積平面中の微小凹凸欠陥表面形状検査

7.1. 緒言

極めて高い平面度が要求される太陽電池ウェハに対し、微小な表面凹凸欠陥形状の検査・計測ニーズは高いが、一方従来は高精細な検査・計測装置は高価であったり、計測時間がかかったり、といった問題点があった。 μm オーダの凹凸欠陥に対し、 100mm オーダのウェハは相対的に大面積であり、大面積視野に対する微小な凹凸形状計測を実現するためには、そのアスペクト比を大きく変化させることのできる光学系（撮像機構）の開発と、「FPGA リアルタイム並列画像処理回路」での高速化への対応が必要である。これら計測デバイスの高度化開発と FPGA 回路の最適化開発により、実用的な高速形状検査・計測技術を検証した研究事例⁷⁻¹⁾である。

太陽電池ウェハの製造ラインにおいて、製品仕様を満たさない不良ウェハを下工程に流さず、できる限り上流工程で不良検知して高い生産性を維持するために、インラインでのウェハ外形形状の検査が必要である。例えば、ソーマークと呼ばれる切削痕スジや表面荒れがあると、下工程のパターン電極生成時にウェハの割れや配線未接続不良などの重大欠陥が生じる可能性がある。しかしながら、実用化された従来のウェハ表面形状検査装置では、ウェハ中の限定的な測定範囲（たとえば最大3ラインの線上の検査範囲）でしかインライン検査を実現できておらず、ウェハ全面をインラインで検査可能な検査装置の実用化のニーズは強い。

本章では、ウェハ全面をインラインで検査可能なウェハ表面形状検査装置を開発した。大口径の太陽電池ウェハ($156 \times 156\text{mm}^2$)の表面形状を、ウェハ製造ラインスピードと同等の1時間にウェハ3,600枚の検査速度で検査し、不良ウェハを検知・弁別する。本装置は、太陽電池ウェハの形状検査のみならず、下工程で生産される太陽電池セルプロセスにも適用可能である。

7.2. 計測手法と装置構成

太陽電池ウェハの表面形状の計測には、物体の断面形状を計測する普及した手法の光切断法⁷⁻²⁾を用いた。測定対象物表面にシートレーザを照射し、物体表面の凹凸断面形状に沿って示された光切断線を別角度のカメラにより撮像し、光切断線の画素位置から高さ凹凸形状に変換する手法である。

本装置外観全体を Fig.7-1 に示す。本装置(Fig.7-1, KSM-100)は、レーザ光源と高速画像処理カメラから構成されており、ウェハ搬送機構を本装置に付加することで、製造ライン中でのインライン検査が可能となる。形状検査は、ウェハを連続的に移動させながら行う。ウェハは、ソーマーク形状と平行な方向に移動させる。本装置は、ソーマークに垂直な方向には 0.125mm 、ソーマークに平行な方向には 0.8mm の空間分解能を持っている。今回開発した装置は、最大 156mm 口のウェハが検査可能であり、さらに大面積のウェハであっても、装置をスケールアップ改造することで対応可能な構成である。

Fig.7-2 には、本課題を実用化する上で必須となる「低角度斜入射光学系」の構成図を示す。極めて高い平面度が要求される太陽電池ウェハに対し、その平面状の微小な凹凸欠陥形状を計測するため、代表的な非接触形状計測手法である光切断法をベースにし、シートレーザとカメラの挟角を大きくすることで、 μm オーダの形状計測を実現した。一方で、太陽電池ウェハ全面($\sim 150\text{mm}$)を計測範囲としてカバーするため、複数光源によるシートレーザ光照射を行った。このようにして、アスペクト比が大きい、大面積視野に対する微小凹凸形状計測を実現した。



Fig. 7-1 On-line surface profile measurement system

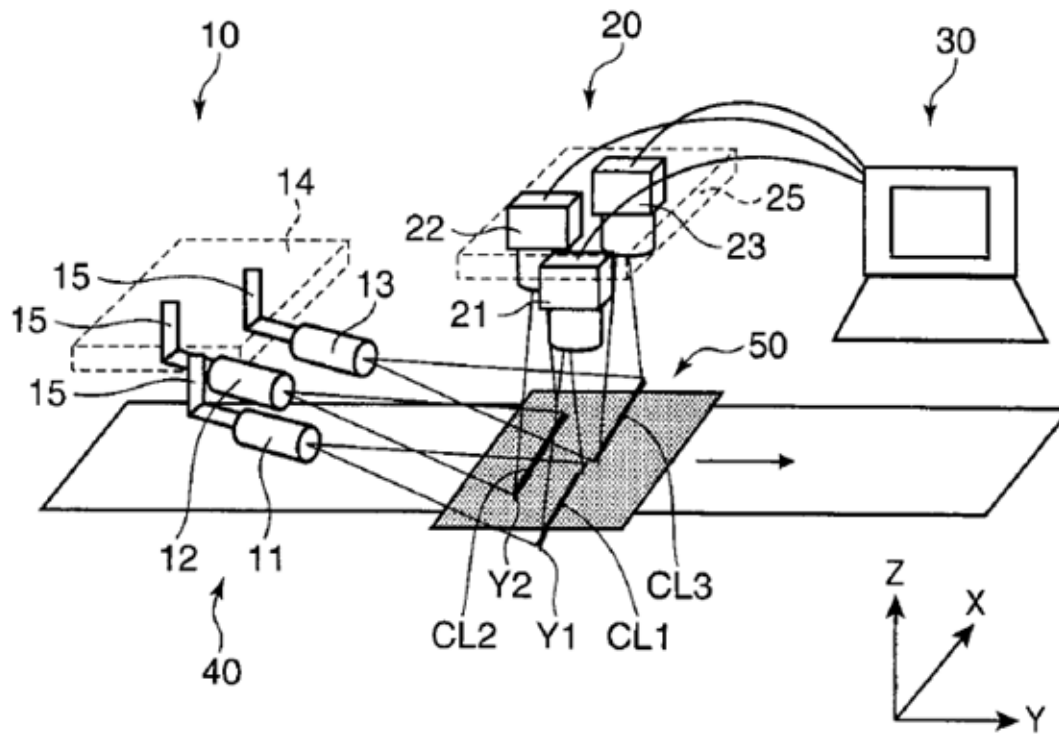


Fig. 7-2 Optics of sheet laser at a low tilt angle

7.3. 実験結果

太陽電池ウェハ表面(125×125mm²)の全体形状を計測した例を、**Fig.7-3**に示す。数本が平行になっているソーマーク形状が存在していることが明確にわかる。本装置により、ウェハ1枚を1秒で連続して計測が可能である。このことは、ウェハ1枚1秒で製造する太陽電池ウェハの標準的な製造ラインに適用可能なシステムであることを意味する。太陽電池ウェハ表面を三次元形状表示したものを、**Fig.7-4**に示す。三次元形状計測の測定再現性は3μm以内であり、本装置により、製造ライン中のウェハ割れやパターン電極の未接続不良を引き起こすかもしれないウェハ表面の形状欠陥を検知することができる。**Table 7-1**に示すように、数ラインの凹凸形状を計測・検査する従来装置では、測定範囲が限定的なため、ウェハ上の表面形状欠陥を認識することは不可能であった。

また、本装置はウェハ表面粗さを画像表示することができる。**Fig.7-5**では、大口径の太陽電池ウェハ(156×156mm²)に対し、表面粗さ(Ra)⁷⁻³⁾の測定結果を示している。Raは、以下の式(7-1)で定義される。参照距離以内の表面粗さ形状の偏差に関連する絶対値の算術平均である。

$$Ra = \frac{1}{L} \int_a^b |Z(x)| dx \quad (7-1)$$

: reference length (=2.5 mm in **Fig.7-5**)

本装置では、Raの最大値とその座標位置を計算して表示出力することができる。ワイヤーソーでウェハを切断するため、ウェハの表面と裏面の形状差が**Fig.7-5**で示すウェハ表面粗さの分布に対応していると考えられる。

本装置では、他の粗さパラメータ(例えば、RzやRmax)についても、太陽電池ウェハ標準書⁷⁻⁴⁾に記載されたソーマークパラメータと同様に表示することができる。

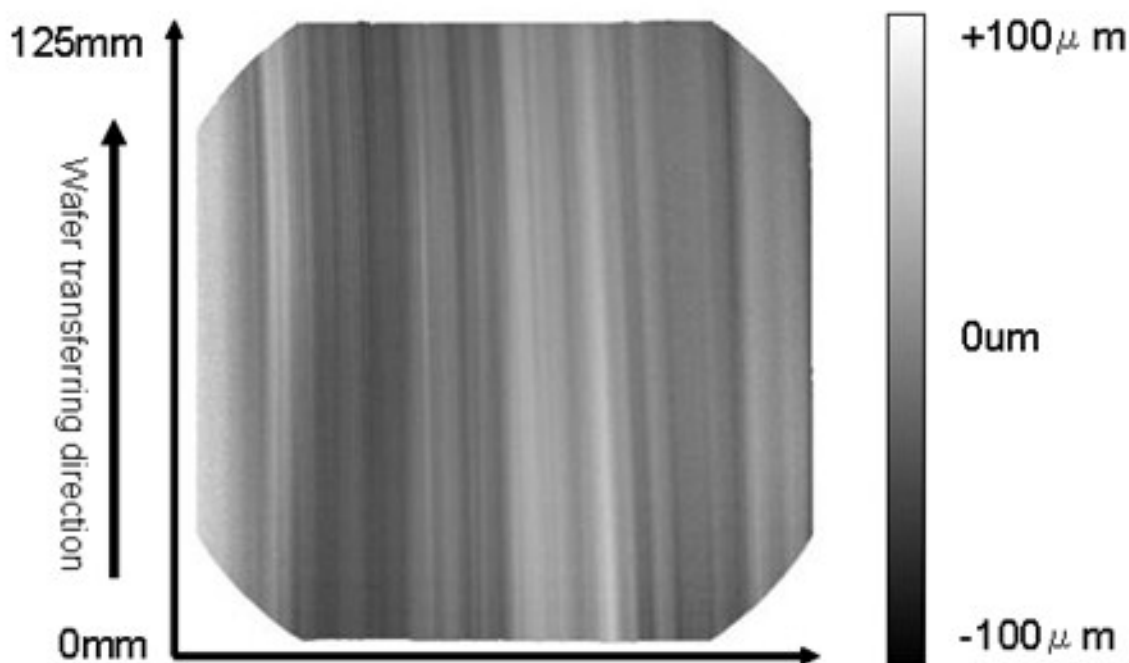


Fig. 7-3 Surface profile of an entire wafer of 125mm

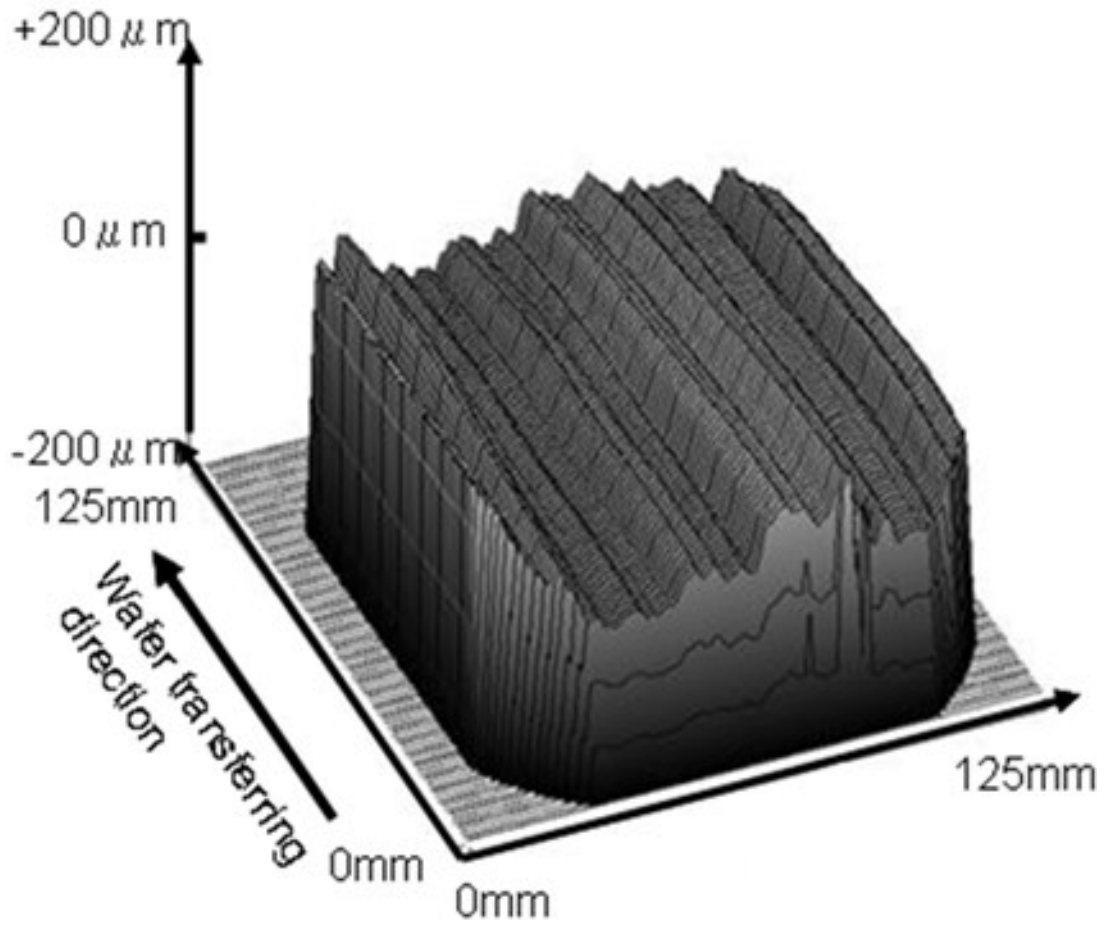


Fig. 7-4 3D plot of the wafer shown in Fig.7-2

Table 7-1 Comparison with conventional systems

	In-line surface profiler (present work)	Laser displacement meter (conventional)	Contact surface profiler
In-line	○ (1sec./entire wafer)	○ (1sec./3 lines)	× (more than 5min./3 lines)
X-range	○(160mm)	○(160mm)	△(0.1mm~50mm)
X-resolution	○	○	◎
Y-range	◎(160mm)	-	-
Y-resolution	○	-	-
Z-resolution	○	○	◎

◎:excellent, ○:good, △:poor, ×:not applicable
 X: perpendicular to the saw-mark direction
 Y: parallel to the saw-mark direction

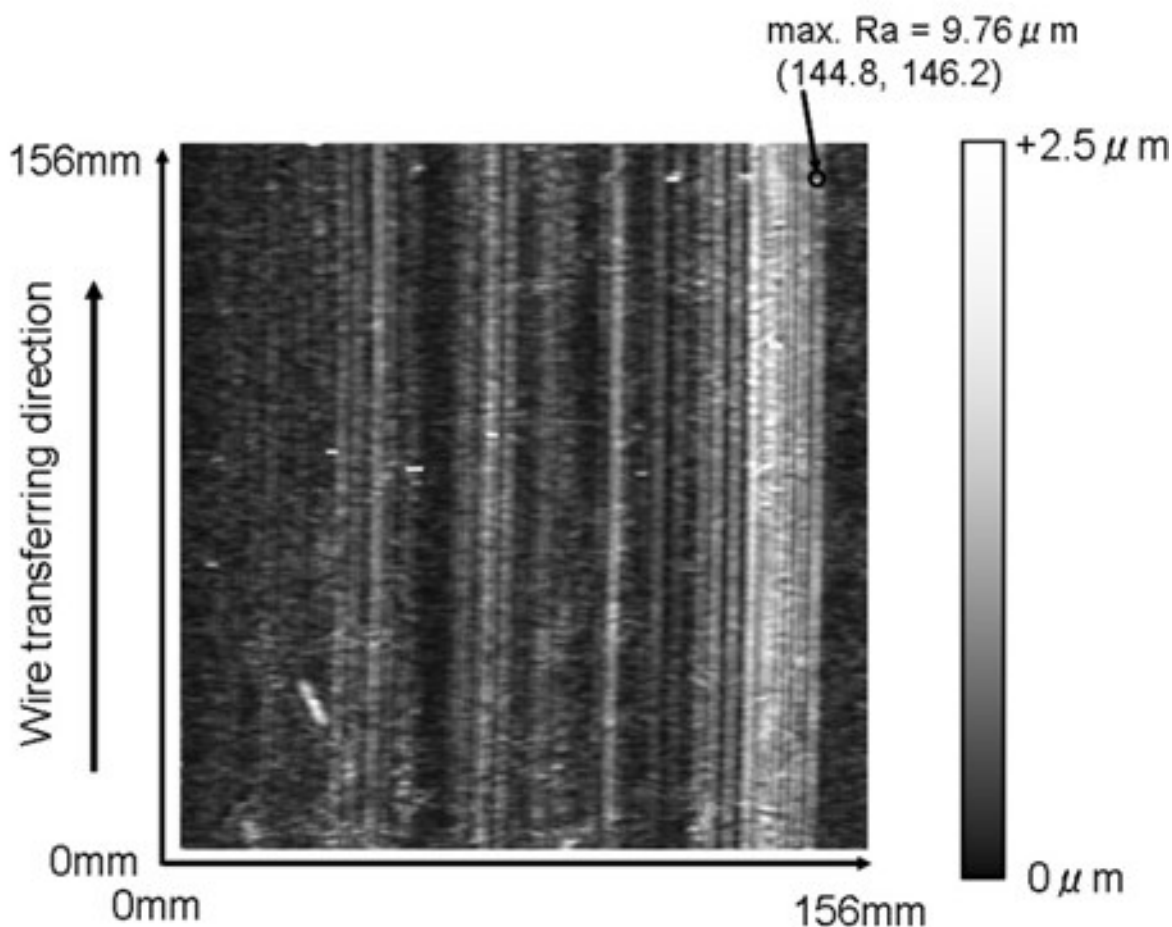


Fig. 7-5 Surface roughness parameter Ra over the entire wafer of 156mm square

7.4. 考察

本装置と従来装置との比較を、Table 7-1 に示す。接触式表面形状装置は、他装置に比べて高い空間分解能を持つが、測定時間が長く、製造ライン中のインライン計測には不適である。従来装置のレーザ変位計方式は、測定範囲が限定されるため、ウェハ上の形状欠陥を見落としなく検知することは難しい。一方、本装置は、ウェハ上のどこに形状欠陥があっても見落としなく検知できるため、不良ウェハの流出防止に寄与できる。

インラインモニタ可能な本装置をウェハの表裏両面に設置することで、ボウ・ワープ、ソリ、厚さなどの様々な形状欠陥⁷⁻⁵⁾を検知することができる。本装置により得たこれらの計測・検査データは、ウェハの切断工程や研磨工程へフィードバックすることで、より有用に活用できる。太陽電池のセル製造プロセスの生産性向上に寄与する。

7.5. 太陽電池セル製造プロセスへの応用

太陽電池のペアウェハ表面を全面検査する本計測技術は、セル製造工程のプロセスコントロールにも活用できる。例えば、パターン電極の形状検査は、太陽電池セル製造工程でのプロセス制御や品質確保、また歩留り向上にも有用である。そこで、本装置を改良し、ウェハ上のパターン電極の形状を計測してみた。Fig.7-6 は、パターン電極の幅方向の形状計測結果である。Fig.7-7 は、左側電極に交差する高さ形状を、さらに高い空間分解能で計

測した結果である。電極に垂直方向で 0.008mm，電極に平行方向で 0.1mm の空間分解能にした。電極方向に沿って 5 点移動平均した形状である。本測定結果は，別途測定した接触式形状計とよく合致している。本装置はウェハ上の電極の三次元形状を正確に計測することができるため，電極の高さと幅の両方の変化を同時に観察することができる。Fig.7-7 の(a)から(d)に示す 4 種類の高さ形状プロファイルは，同じ電極に対し，正常，幅広，高い，低い，といった 4 状態を示している。これら結果から，パターン電極中の異常欠陥を検知できている。本装置をセル製造プロセスのインラインモニタとして適用する場合，現状装置を改造することで，1 秒以内でのパターン電極の形状検査装置を実現することができる。

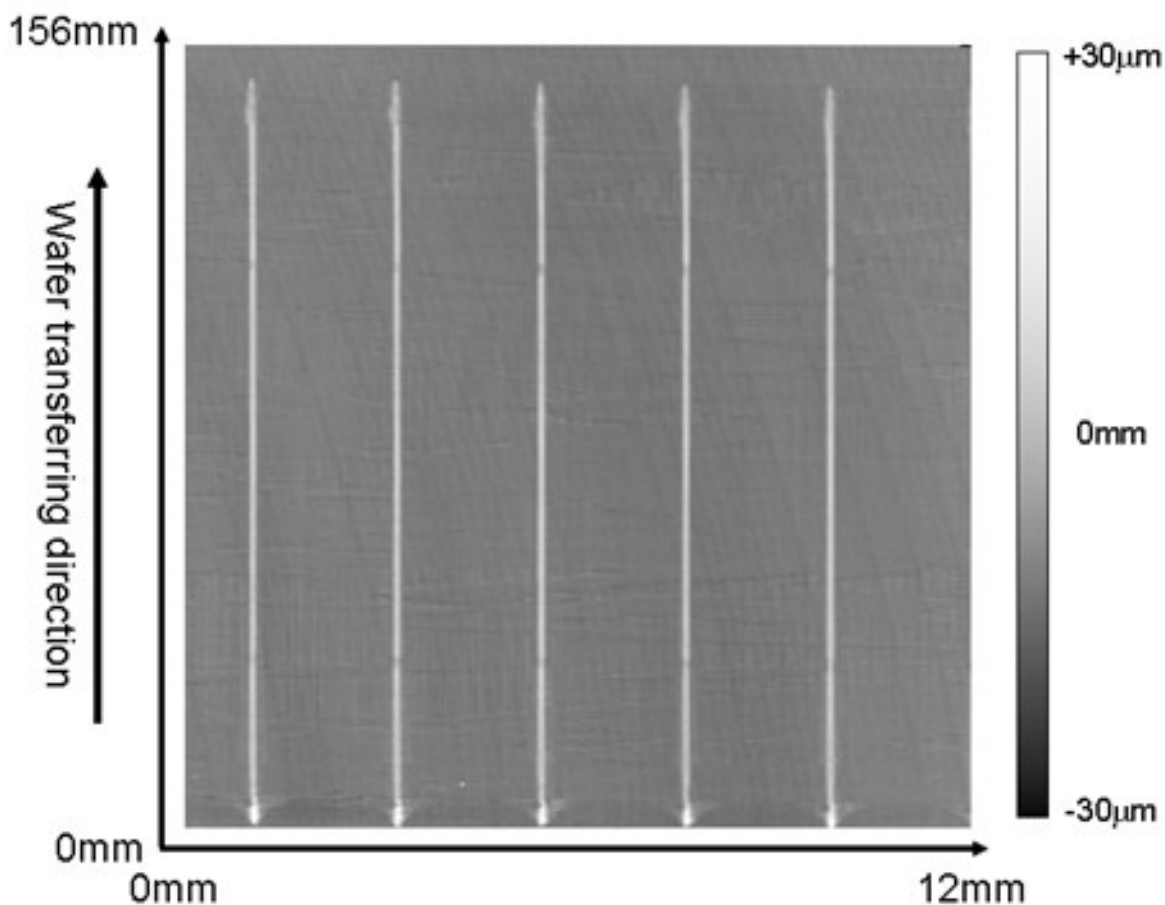


Fig. 7-6 Patterned electrode profile of 12 x 156mm²

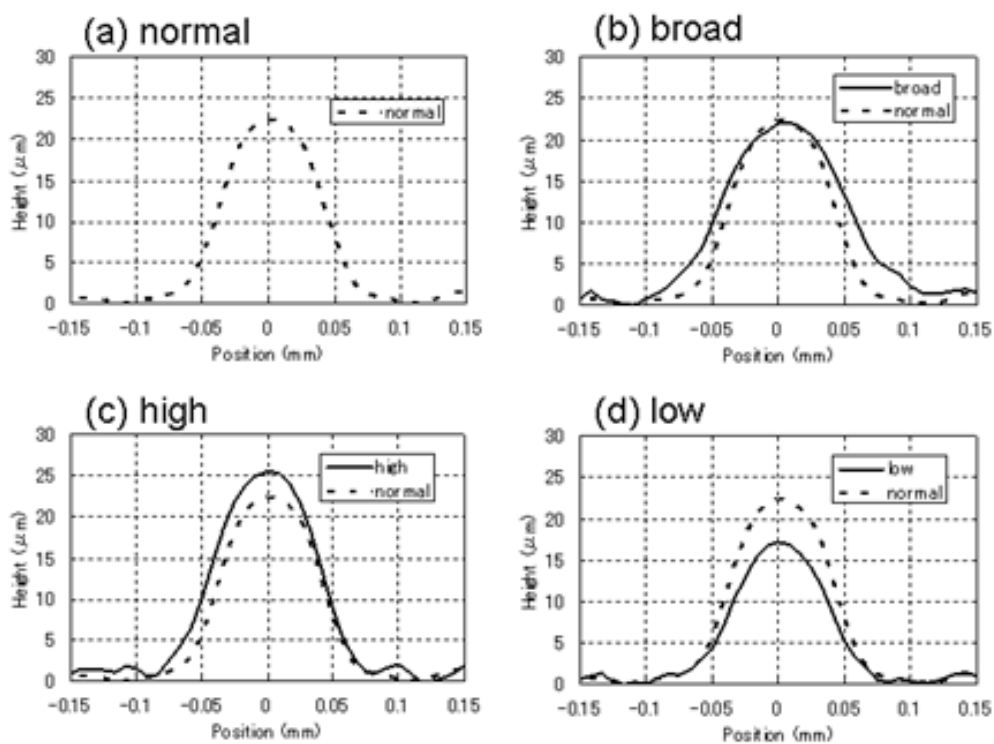
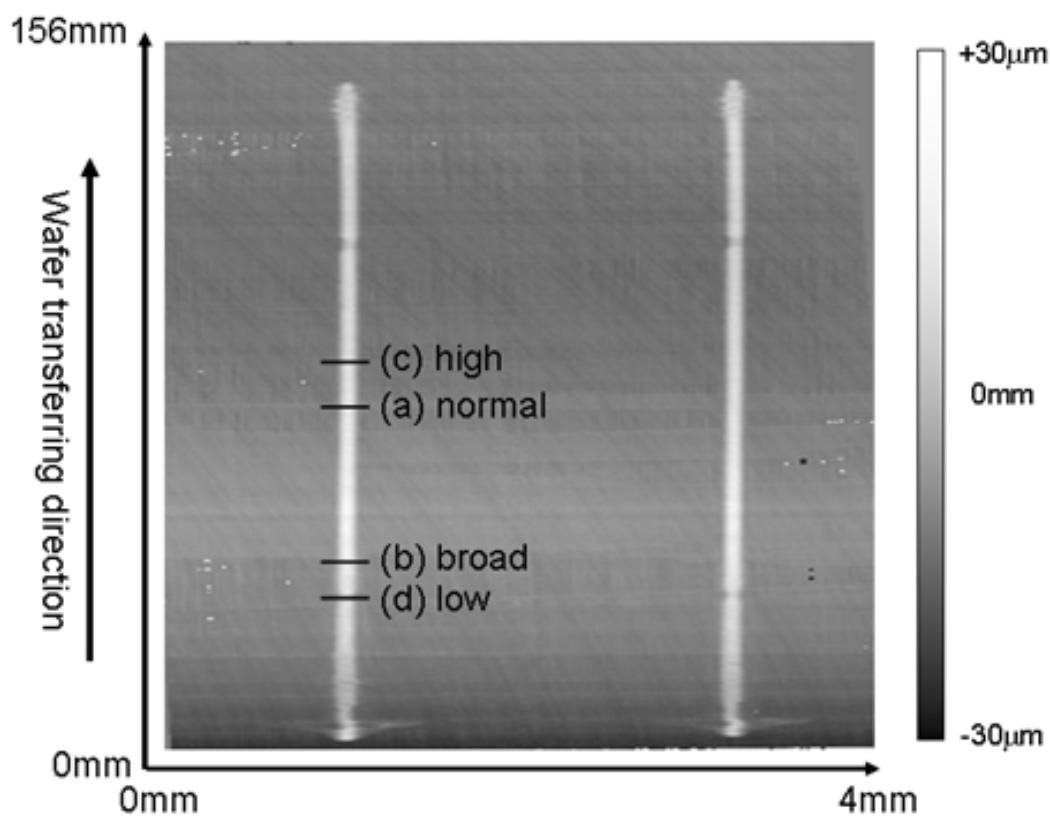


Fig. 7-7 Patterned electrodes profile of 4x156mm² area on the wafer shown Fig.7-5

7.6. 結言

本章では、太陽電池ウェハの全面形状検査を製造中インラインで計測可能な検査装置を実現した。本装置は、ウェハ表面形状をサブミリメートルの範囲で計測した上で、計測速度もウェハ1枚1秒で全面検査が可能なものである。加えて、ソーマークや表面粗さ不良のウェハを識別して次工程に流さないことにより、太陽電池セル製造の歩留り向上にも役立つシステムである。高空間分解能にカスタマイズすることで、パターン電極の形状も計測することが可能であることを確認した。パターン電極の高さと幅を同時に観察可能なものである。本装置は、太陽電池セル製造プロセスにおいても、有用な検査装置になる。

Fig.7-1の装置写真にあるように、太陽電池ウェハのライフタイムや抵抗計などのインラインモニタツール(**Fig.7-1, KLT-100**)と組み合わせることで、より効果的なインライン検査システムになりえると考えられる。今後、太陽電池ウェハは更に薄く大面積化していくと考えられ、そのような流れの中、本装置は、ウェハの受入検査やセル製造のプロセスコントロールのツールとして更に有用になっていくと考える。

以上のように、コアの要素技術である「FPGA リアルタイム並列画像処理回路」を、極めて高い平面度が要求される太陽電池ウェハ生産工程での微小な表面凹凸欠陥の形状検査・計測のために、大面積視野に対する微小凹凸形状計測のためのアスペクト比を大きく変化することのできる「低角度斜入射光学系(**Fig.7-2**)」を開発し、FPGA 回路と組み合わせることで、実用的な高速形状計測システムを実現した。

アスペクト比の大きい形状計測では、測定幅方向には広い範囲を適切な画素分解能で計測する一方、凹凸高さ方向には狭い範囲を高密度な画素数で計測する必要がある。高さ方向の空間分解能に合わせて画素数を多くとるために多画素カメラ又は複数台カメラを用いると、計測一次情報の画像情報が膨大になるとともに高速処理性能も失われる。そこで、幅方向視野に合わせた画素設計のカメラおよびレンズを用い、高さ方向分解能はシートレーザを斜めにすることとサブピクセル処理の範囲を広くとることで高分解能化を実現した。情報量縮約の面でも、計測一次情報で情報量を抑えつつサブピクセル処理により位置情報をリアルタイムに取得することで高速性を確保することができた。

参考文献

- 7-1) E.Takahashi, M.Kajita, K.Hayashi, Y.Fukumoto, S.Sumie, H.Hashizume: In-line geometrical characterization system for PV-wafer and cell process; The 4th international workshop on science and technology for Crystalline Si Solar Cells (CSSC4),PS-22,(2010)
- 7-2) 高橋英二, 迫田尚和, 森本勉, 野中俊克, 堀口史郎, 松下康弘: 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; R&D 神戸製鋼技報, Vol.58,No.2,pp.62-66,(2008)
- 7-3) JIS B 0601:2013 (ISO 4287:1997): 製品の幾何特性仕様(GPS)―表面性状:輪郭曲線方式―用語, 定義及び表面性状パラメータ; (1997)
- 7-4) EN50513:2009: Solar wafers - Data sheet and product information for crystalline silicon wafers for solar cell manufacturing; (2009)
- 7-5) T.L.Schmitz, A.Davies, C.J.Evans, R.E.Parks: Silicon wafer thickness variation measurements using the National Institute of Standards and Technology infrared interferometer; Opt. Eng.,Vol.42,p.2281,(2003)

8. 結論

8.1. 本研究の総括

最後に本章で各個別事例の研究成果を纏めるとともに、本研究を総括した結論を述べる。また、本研究を通して見えてきた新たな課題、残された課題について述べる。

本研究では、実用性（コスト、メンテ性、耐環境性等）を満足する中で、いかに高い計測性能（分解能、視野、測定速度等）を達成するかが主課題である。実用性を実現する上で重要な要素である「高速性」に着目し、その実現のための設計指針「情報量縮約の最適配置」と具体的な方法論「FPGA (Field Programmable Gate Array) リアルタイム並列画像処理回路」、および実用化のための「計測装置化技術の高度化」と「高次判定支援技術」に関して、各研究事例を通してその有用性を論じた。Table 8-1 に、各研究事例の技術課題と開発した要素技術、および研究成果を纏める。第3章から第7章の各研究事例（縦軸）に対し、第2章で論じた三つの要素技術（横軸）の具体的な研究結果を示している。高速形状検査・計測の各課題に対し、本研究で論じた三つの要素技術によって実用的な検査・計測システムを実現することができた。

第1章では、本研究の背景と目的、研究の中核となる「情報量縮約のためのシステム設計」、この設計指針に基づき高速信号処理を具現化するためのコア技術「FPGA リアルタイム並列画像処理回路」、加えて実用化のための技術課題への対応のための「計測装置化技術の高度化技術」と「高次判定支援技術」について述べた。第3章～第7章の各研究事例を通し、個別課題毎の固有の問題はあるものの、実用性を考慮した高速化の実現のためには、計測システムを設計する段階で情報量を縮約するポイントを最適設計していくことが重要であり、共通的な設計指針になることを見出した。また、この設計指針に基づき設計した高速形状検査・計測システムの内、実用的な高速化に大きく寄与し、共通プラットフォームとして様々な個別課題に展開できるコア技術として「FPGA リアルタイム並列画像処理回路」を開発し、その有用性を確認した。さらに難易度の高い計測課題に対しては、実用面においても有用性を確保すべく、「計測装置化技術の高度化開発」や「高次の判定支援のためのユーザインタフェース開発」による情報量縮約や最終的な良否判断支援を実現することで、トータルとして的高速形状検査・計測システムの実用化を達成した。

Table 8-1 Summary

	Challenge main issue	(1) Optics and instrumentation	(2) High-speed signal processing	(3) Algorithm of judgment	Result of research
Chapter 3, Automatic profile inspection of tunnel	Large-size structure, Wide-range measurement area, Outside condition.	A sheet laser of 360° circumference	Erasing noise lights from outside circumferences	(Threshold judgment)	Success in automation of maintenance work of tunnel, etc.
Chapter 4 and 5, Tire geometry inspection & recognition	High speed measurement of rotating tire, 1 tire/sec. inspection	Numerous light sources, Mirror reflection optics, Light power up.	4KHz ultra high speed image processing camera	Tire die model, Interactive I/F for human and inspectors.	Success in automation of final inspection of tire geometry.
Chapter 6, Real-time profile measurement of rebar	High temperature, Bad condition, High speed production line.	Cancelling vibration by multi-wavelength laser sources.	High speed color image processing camera	Equivalent-time sampling method	Success in measurement of rebar profile quantitatively.
Chapter 7, Surface profile inspection of photo voltaic wafer	Inspection of small unevenness in large area. Aspect ratio is large.	Oblique incidence optics with low angle	Synchronized image processing by multi-cameras	(Threshold judgment)	Success in high speed inline inspection of PV-wafer.

第2章では、実用化を実現するための三つの重要な要素技術について論じた。「計測装置化技術における光学系形状計測技術」「FPGA リアルタイム並列画像処理回路技術」「高次判定支援のためのPC画像処理ソフトウェア技術」は、それぞれ高速形状検査・計測システムを構成する主要な要素技術であり、これら三つの要素技術を各研究事例に応じて適切に組み合わせることで、実用的な高速形状検査・計測システムが実現できた。特にコア技術となる「FPGA リアルタイム並列画像処理回路」では、共通プラットフォームとしての基板回路開発も行い、各事例に応じた個別の画像処理ロジックをFPGA共通プラットフォーム上の改造により実現した。

第3章では、トンネルやプラットフォーム等の屋外の大型構造物に対する形状計測課題に対し、「高精細高速画像処理カメラによるトンネル等大型構造物の形状自動計測」の研究を行った。数mオーダの大型構造物に対して1~10mmオーダの高分解能な形状計測を実現するため、実用化課題の解決策として全周シートレーザの光学系を開発し、さらにはFPGA共通プラットフォームを高精細/多画素カメラ向けに改造することで、実用的な情報量の縮約が可能であることを確認した。また屋外環境での高精度形状計測を実現する上での特有課題として周辺の環境光ノイズ（蛍光灯や車のヘッドライト）を除去する画像処理技術として、前記「FPGA リアルタイム並列画像処理回路」の画像処理として画像フレーム間処理（差分、加算）を搭載し、画像撮像とともに本画像処理によりリアルタイムに情報量縮約を行い、高精細且つ高速な形状計測技術を確立した。以上の設計検討および実用化開発によって、従来人手で保守点検を行っていた保線作業の自動化を達成した。自動計測装置により、ヒューマンエラーのような計測誤差の排除が可能となり、定量的な形状計測や保線作業の標準化が可能となった。

第4章では、高速回転するタイヤに対する形状計測課題に対し、「超高速画像処理カメラによるタイヤ等高速回転物の高速三次元形状計測」の研究を行った。タイヤ製造での最終出荷検査工程で要求される検査時間（タイヤ1本1秒以下）に対応するため、毎秒4,096フレームで動作可能なCMOS撮像素子をFPGA制御回路により画素レベルで同期制御し、高速画像撮像および後段でのサブピクセル画像処理を「FPGA リアルタイム並列画像処理回路」を適用することで、「情報量縮約のシステム設計」を行った。また超高速撮像を実現するには露光時間も極小となるため、実用化技術として極小露光時間に対応するための複数シートレーザ光学系を開発し実用化した。特にタイヤ側面の湾曲部では光切断線の散乱光量も弱くなるため、複数シートレーザ光学系によって湾曲部に沿ったシートレーザ照射を行うことで実用範囲に入る光切断線光量を実現した。

さらに第5章では、第4章「超高速画像処理カメラによるタイヤ等高速回転物の高速三次元形状計測」の研究に続き、出荷検査に必要な製品の良否判断に関する形状認識技術に対する「タイヤ金型情報を用いたタイヤ外形形状検査の自動化」の研究を行った。タイヤ製造での最終出荷検査工程では、測定したタイヤ表面の凹凸形状データから本来正常な凹凸形状（ロゴや模様等）と不良となる欠陥凹凸形状を正確に弁別認識する必要がある。まずタイヤ製造プロセスに着目し、正常な凹凸形状はタイヤ金型によりプレスされて形成されるため概ね金型設計通りの凹凸形状および高さを持つ。一方で、ゴム製品のタイヤでは0.1mm以下程度の形状ばらつきも発生することから、タイヤ金型形状に加えて統計的な手法により概ねの正常な凹凸形状を計算し、これをマスタ形状データとして登録する手法を確立した。加えて自動化の難しい目視検査の良否判定工程のため、タイヤ金型モデルでの自動計算手法により完全自動化は行わず、自動計算した結果を人間に情報提示して最終的に人間の確認や修正を行うことで検査工程の最終品質確保を狙った「人間・機械協調型の自動検査システム」の構築を行った。この2つの手法を組み合わせることで、「情報量縮約のシステム設計」を行い、初めてタイヤ凹凸形状の検査工程の自動化に成功した。

「超高速画像処理カメラによるタイヤ等高速回転物の高速三次元形状計測」および「タイヤ金型情報を用いたタイヤ外形形状検査の自動化」の研究にて、従来正常凹凸形状の無いスムーズライン1ラインでの凹凸形状検査であったものが、正常凹凸形状範囲を含むタイヤ側面を面的に凹凸形状検査することができるようになり、タイヤ製造における最終出荷検査工程の検査品質の大幅向上に寄与することができた。またタイヤ金型モデルによる自動計算手法や人間・機械協調型の自動検査システムの構築により、従来人間の作業を支援し負荷軽減することにも成功した。

第6章では、鉄鋼生産工程中、高温線状物の形状計測課題に対し、「高速カラー画像処理カメラによる異形棒鋼の圧延中リアルタイム形状計測」の研究を行った。製造途中の棒鋼は温度900°C以上のため赤外線を中心とした自発光成分が強く、一般的なモノクロ単一波長のレーザ光源を用いた光切断法では高精度な形状計測は難しい。高温線状物に適したカラー多波長の光学系を開発し、波長別に画像処理が可能なカラーCMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor)撮像素子とFPGA制御回路による「FPGAリアルタイム並列画像処理回路」を適用することで「情報量縮約のシステム設計」を行った。更に棒鋼圧延ライン上での振動影響を除去するためにR (Red) 画像 (自発光) から求めた材幅中心位置をG (Green) 画像 (光切断法) での形状データの中心位置補正に用いるといった画像処理補正手法を実現することで、高精度な形状計測を実現した。また波長軸による多重化は計測装置の小型化にも有利であり、高温や粉塵等過酷な鉄鋼生産現場にも適した実用上の冷却筐体等も構築した。従来人手で材幅値のみを確認していたが、以上の設計検討および実用化開発によって、インラインで材幅と形状の同時計測の実現可能性を見出した。本手法の自動計測装置により、計測誤差の排除や定量的な形状計測が可能となる上、高温危険作業の排除の可能性も確認した。

第7章の「太陽電池ウェハ等大面積平面中の微小凹凸欠陥表面形状検査」の研究では、極めて高い平面度が要求される太陽電池ウェハに対し、微小な表面凹凸欠陥の形状計測するため、大面積視野に対する微小凹凸形状計測のためのアスペクト比を大きく変化することのできる「低角度斜入射光学系」を開発し、コア技術の「FPGAリアルタイム並列画像処理回路」と組み合わせることで、実用的な高速形状検査・計測システムを実現した。アスペクト比の大きい形状計測では、測定幅方向には広い範囲を適切な画素分解能で計測する一方、凹凸高さ方向には狭い範囲を高密度な画素数で計測する必要がある。高さ方向の空間分解能に合わせて画素数を多くとるために多画素カメラ又は複数台カメラを用いると、計測一次情報の画像情報が膨大になるとともに高速処理性能も失われる。そこで、幅方向視野に合わせた画素設計のカメラおよびレンズを用い、高さ方向分解能はシートレーザを斜めにするこことサブピクセル処理の範囲を広くとることで高分解能化を実現した。情報量縮約の面でも、計測一次情報で情報量を抑えつつサブピクセル処理により位置情報をリアルタイムに取得することで高速性も確保した。

8.2. 高速形状検査・計測システムの実用性

本研究の中核である設計指針「情報量縮約のためのシステム設計」について、各研究事例を通して、その有効性を検証した。特に重要となる光切断線を抽出する画像処理は、CMOS撮像素子と結合した「FPGAリアルタイム並列画像処理回路」を実際に試作して適用することで情報量縮約を具体的に実用化し、各研究事例における各要求仕様を満足する実用性と高速性を実現した。また実用化のための種々の技術課題解決では、計測入力段階での光学系形状計測技術の高度化開発と、高速形状検査・計測システムの最終段階での検査・計測結果の出力の仕方であるユーザインタフェース技術「PC画像処理ソフトウェア」について、それぞれ事例の個別仕様に応じた最適化を行うことで、実用性と高速性を確保

することができることを確認した。

また本研究の目的の一つである実用性（コスト、メンテ性、耐環境性等）を満足する中で難易度の高い計測技術課題（分解能、視野、測定速度等）を如何に達成するかについては、FPGA によるリアルタイム並列画像処理技術、計測環境に応じた光学系構築・計測装置化技術、検査課題に応じた計測結果の高次判定支援技術、といった階層的な機能構成とそれに伴ったハードウェア構成により、検査・計測の高速性を高めることで実用的な性能を実現した。加えて、高速形状検査・計測システムの具体的な実現のため、共通プラットフォームである「FPGA リアルタイム並列画像処理回路」が有用であることを確認した。画像情報、形状情報、特徴量情報、良否情報と、情報量縮約の流れにおいて、特に画像情報から形状情報に情報量を縮約するための手段として、「FPGA リアルタイム並列画像処理回路」は必要不可欠の構成要素となる。

8.3. 本研究の今後の展開

本研究において、高速形状検査・計測技術の実用化のための設計指針と三つの要素技術を開発し、各研究事例を通してその有用性を確認した。コアの要素技術「FPGA リアルタイム並列画像処理回路」を活用し、本設計指針に基づけば、現在も残存している計測限界の実用課題の解決に向けた基盤技術になると考える。一方で、要求仕様が更に高く、または要求仕様が曖昧な計測技術課題も依然ありつづけると思われる。例えば、産業用途に限っていても、形状計測の高速性では数 μm オーダの超精密且つ大型の加工部品の寸法検査などは依然技術難易度が高い課題であり、実用性の面では高温や粉塵などの悪環境下での光学計測は困難な技術課題として残存している。加えて、自動化技術に対しては、目視検査など人間の柔軟な良否判定をいかに自動化していくか、より複雑な人間的な判断が求められる産業上の実用化課題も多数存在している。

形状計測における高速性の追求では、今回本研究で示した従来通信制御用に用いられていた FPGA 回路素子を CMOS 撮像素子に直結して高速画像処理技術に適用したように、光学系部品や電子部品などの計測デバイスの最新動向を逐次検討しながら、産業用途向けに適用可能な部品を組合せた装置化技術や高速回路技術の検討は重要である。例えば、コンシューマ向けに近年顕著な技術革新のあるスマートフォンなどでは、超小型化するための電池技術やタッチパネル液晶技術が著しく進展しており、これら汎用製品の新デバイス技術を産業用途に活用することで、従来極狭空間のため計測困難であった産業機械の装置内部の計測の実現や、小型端末化した多数のセンサによる生産ラインや大型プラントの設備診断モニタリング技術等は、残存する計測限界課題を解決するための一方策になりうるのではないかと考える。

実用装置や生産ライン実現のために必須となる計測結果の良否判定技術では、より高次の判定ロジックの開発に、今後重点が置かれていくのではないかと考える。今回本研究で示したタイヤ形状認識技術では、自動で良否判定する技術とともに人間が介在して機械とともに良否判定を行うモデルを示した。今後は、検査対象物の変動要因はもとより、計測環境そのものが変動する場合や、ルール化が難しい検査判定基準の変化にも対応しなければならない検査・計測課題に対しても、適応能力に優れた人間の判断と機械での高速高精度な計測結果が高いレベルで協調して検査判定処理ができるようなマンマシンインタフェースの研究が重要になってくると考える。

最後に、本研究では高速性の実現のための共通プラットフォームを研究し、具体的に実用性のあるプラットフォームを示したが、将来的には、本研究で示した個別課題に各々適用していった計測装置化技術や高次判定支援技術をも含めて、検査・計測のための共通プラットフォームを実現していくことが重要と考える。様々な計測環境や検査基準に対し、ある種パラメータの設定変更程度の操作で、広範囲の検査・計測ニーズに応えることので

きる共通プラットフォームが実現できれば、日本の産業競争力強化の一助になるのではないかと考える。

研究論文

第3章は、次の論文を基に再構成したものである。

- 1) 高橋英二, 迫田尚和, 朝日賢一, 福本陽三: 超高速画像処理カメラによるトンネル形状自動計測装置; 計測自動制御学会論文集, Vol.48, No.12, pp.863-871, (2012)

第4章は、次の論文を基に再構成したものである。

- 2) 高橋英二, 迫田尚和, 森本勉, 野中俊克, 堀口史郎, 松下康弘: 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; R&D 神戸製鋼技報, Vol.58, No.2, pp.62-66, (2008)

第5章は、次の論文を基に再構成したものである。

- 3) 高橋英二, 荒木要, 迫田尚和, 武田玄, 村上将雄, 松原義明: タイヤ金型情報を用いたタイヤ外形形状検査装置; 自動車技術会論文集, Vol.46, No.1, pp.213-218, (2015)

第6章は、次の論文を基に再構成したものである。

- 4) 高橋英二, 片山亮, 迫田尚和: 高速カラー画像処理カメラによる異形棒鋼の圧延中リアルタイム形状計測; 鉄と鋼, Vol.101, No.3, (2015)

2015年3月掲載予定

第7章は、次の論文を基に再構成したものである。

- 5) E.Takahashi, M.Kajita, K.Hayashi, Y.Fukumoto, S.Sumie, H.Hashizume: In-line geometrical characterization system for PV-wafer and cell process; The 4th international workshop on science and technology for Crystalline Si Solar Cells (CSSC4), PS-22, (2010)

謝辞

本研究をまとめるにあたり、終始御高見と懇切なご指導を賜りました神戸大学大学院工学研究科教授 檜崎博司様に深く感謝致します。檜崎先生には、以前から研究指導頂きました高速信号処理技術が本研究の基礎技術として結びつき、本論文の完成に至りました。先見したご指導により本研究に導いて頂きましたことを、大変感謝しております。

本論文を完成するにあたり、御高見と数々のご指導を賜りました神戸大学大学院工学研究科教授 白瀬敬一様、神戸大学大学院工学研究科教授 阪上隆英様、神戸大学大学院工学研究科准教授 西田吉晴様に謹んで感謝の意を表します。産業応用向けの本研究について、学術面、工学面での価値の考察といった数々のご指導を頂き大変感謝しておりますとともに、神戸大学大学院博士課程への入学が貴重な勉強の機会であったことをあらためて深く感謝しております。

本研究をまとめるにあたり、御高見と懇切なご指導を賜りました大阪産業大学工学部教授 中山万希志様に深く感謝致します。中山先生には、以前より画像処理技術を研究指導頂きましたことが、本研究の要素技術の一つとして完成に至ったことを、大変感謝しております。

著者に神戸大学大学院工学研究科博士課程への入学と研究の機会をあたえて頂きました株式会社神戸製鋼所に深く感謝いたします。本研究は主に(株)神戸製鋼所生産システム研究所で実施したものであり、本研究の遂行と博士課程への入学にご尽力を頂きました(株)神戸製鋼所生産システム研究所元所長 高橋哲也様（現神鋼リサーチ株式会社取締役産業戦略情報本部長）、計測技術研究室元室長 福本吉人様（現ジャパンスーパーコンダクタテクノロジー株式会社営業部長）、生産システム研究所長 後藤有一郎様、計測技術研究室長 森本勉様に、厚く御礼申し上げます。

本研究の推進にご尽力頂き、数々のご助言と励ましを頂きました(株)神戸製鋼所 都市システム部技術室元主任部員 福本陽三様、産業機械技術部産機技術室元主任部員 堀口史郎様（現神鋼テクノ株式会社企画管理本部）、産業機械技術部制御技術室主任部員 松原義明様、重機械部主任部員 早川満様、株式会社コベルコ科研取締役 LEO 事業本部長 住江伸吾様に厚く御礼申し上げます。本研究の推進にあたりご協力と励ましを頂きました(株)神戸製鋼所都市システム部技術室の皆様、産業機械技術部産機技術室・制御技術室の皆様、重機械部技術室の皆様、(株)コベルコ科研 LEO 事業本部の皆様に厚く御礼申し上げます。

本研究の遂行にあたりご協力と多大なご支援を頂きました(株)神戸製鋼所生産システム研究所の皆様、計測技術研究室の皆様には厚く御礼申し上げます。

最後に、著者の仕事を支えてくれた妻、郁子と声援してくれた美帆、健人の二人の子供、そして私の両親に、心から感謝致します。

2015年 高橋 英二

神戸大学博士論文「高速形状検査・計測システムのための FPGA リアルタイム並列画像処理回路プラットフォームの研究」全111頁

提出日 2015年1月20日

本博士論文が神戸大学機関リポジトリ **Kernel** にて掲載される場合、掲載登録日（公開日）はリポジトリの該当ページ上に掲載されます。

© 高橋英二

本論文の内容の一部あるいは全部を無断で複製・転載・翻訳することを禁じます。