Kobe University Repository : Kernel

PDF issue: 2025-07-01

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

髙橋，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。

(別紙様式 3)

論文内容の要旨

氏　名　高橋　英二

専　攻　機械工学

論文題目

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

指導教員　楢崎　博司　教授

国内市場停滞，グローバル化，技能継承問題等，日本の産業が様々な課題に直面する中，生産上の生産技術分野においても，熟練技能の定量化・標準化に向けた自動化ないしは半自動化による効率化の流れが強まっている．そのような中で，生産技術の一分野である検査・計測技術においても，出荷検査やプロセスモニタリング等での自動化要求が高まっている．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，「光切断法」など基礎的な形状計測技術は確立されたものが多い．一方で実用化場面では，より高精度に，より広範囲の形状計測ニーズが多く，これら高精度化ニーズに応えるための計測システムでは，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ある．そこで形状計測に関する時間軸，実用に適した高速性をいかに実現するかに着目し，従来の限界速度を超えるためのコア技術「FPGA(Field Programmable Gate Array)リアルタイム並列画像処理回路」を開発した．加えて，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等を解決するために，各研究事例に応じた「計測装置化技術」や「高次判定支援技術」を開発した．

物体の三次元形状を高速計測する普及した計測手法として「光切断法」がある．シート状のレーザを測定対象の物体に照射し，別角度のカメラにより物体の断面形状画像を撮像する．取得した画像から光切断線座標を抽出し，物体を移動することで連続した断面形状座標を得る．得られた座標から物体の三次元形状を構築する．この一連の計測手順の中，従来は断面形状画像を撮像して一旦コンピュータ上のメモリに保存し，全画像取得後にコンピュータ上での画像処理によって断面形状座標の計算を行う．より高精度，より広範囲の形状計測ニーズが強まるとともに取得すべき断面形状画像は膨大になり，コンピュータへの画像伝送や画像の一時保存，膨大な画像の画像処理に要する時間の増加等のため，実用化困難な事例が増えていった．

本研究では，実用化を阻害する要因が計測一次情報の画像情報が増大化する点にあると考え，画像情報が増大化する前に情報量を縮約する手法を開発することで解決した．すなわち，撮像手段（カメラ内部の CMOS 撮像素子）と情報処理手段（光切断線座標を計算する FPGA 演算素子）を回路上直接接続させ，情報処理手段が撮像手段を直接動作制御することで，撮像手段から流れてくる画素単位の画像情報に同期して光切断線座標を計算出力する手法により，従来 30fps(毎秒 30 枚)の画像撮像・計測速度を，4,096fps(毎秒 4,096 枚)まで一気に高速化した．この高速化手法を，「FPGA リアルタイム並列画像処理回路」の共通プラットフォームとして実現した．

高速化によって新たな実用上の技術課題も出てくる．トンネル等の大型構造物の形状計測ではより広範囲な視野を実現する技術，タイヤ等の高速回転物では極短時間の露光時間でも感度良く光切断線を撮像する技術，といった各事例・各測定対象物の特徴に応じた技術が必要となる．本研究では，これら実用上の課題を解決するための「計測装置化技術」として捉え，共通した要素技術として「複数光源による高速・高精細な光切断法」を開発した．複数のシート状レーザを測定対象物の概略形状に合わせて配置することにより，広範囲な視野に対応し，加えて短い露光時間であっても十分な光切断線の散乱光強度を確保して高速化要求に対応するものである．

また，屋外計測での環境光ノイズ（蛍光灯や車のヘッドライト）や，赤熱する高温物体からの放射光等，光切断法での高精度形状計測を阻害するノイズへの実用上の対策として，シート状レーザを点滅させて画像間差分により環境ノイズを除去，高温物体の放射光にはカラーカメラにより RGB 成分を分離する等，従来コンピュータ上で実現されてきた画像処理を，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」で実現し，高速性を維持した上で実用的なノイズ除去手法を開発した．

最後に，「実用的な高速形状検査・計測システム」を実現するためには，各研究事例で適用する検査ラインでの検査基準に基づく良否判定についても高度化が必要である．本研究では，実用上適切な良否判定を行うために「高次判定支援技術」を開発した．「タイヤの外形形状検査の自動化」では，タイヤ側面に形成された文字やロゴ等の正常凹凸形状と本来検出したい欠陥凹凸形状を自動弁別するために，「タイヤ金型モデル」による自動計算手法を開発し，加えて，自動認識結果を人間に表示し，人間が適切に修正してティーチングデータを完成させる人間・機械協調型インタフェースを開発した．これら人間の知識を積極的に取り入れ活用することで，実用的にも安定稼働しメンテナンス性の良い自動検査技術を確立した．

本論文の構成を以下にまとめる．

第１章では，本研究の中核となる「情報最縮約のためのシステム設計」を提案し，この考え方に基づき高速性を実現するためのコア技術「FPGA リアルタイム並列画像処理回路」を開発した．さらには，実用化のための「計測装置化技術」「高次判定支援技術」までをも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示した．

第２章では，実用化を実現するための三つの要素技術「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」について，要素技術毎に詳細検証を行った．これら三つの要素技術を組合せ，個別事例に最適化することで，実用的な検査・計測システムを開発した．

第３章では，トンネル等の屋外の大型構造物の形状計測課題に対し，全周シートレーザ光学系を開発し，広範囲な視野に対応するため高精細／多画素カメラによる「FPGA リアルタイム並列画像処理回路」を適用することで，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．屋外特有課題の周辺環境光ノイズ（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，画像フレーム間処理（差分，加算）を「FPGA リアルタイム並列画像処理回路」に搭載する開発を行い，高速性を維持したまま周辺環境ノイズの除去を確認した．

第４章と第５章では，高速回転するタイヤに対する形状計測および正常／欠陥凹凸形状の自動弁別によるタイヤ外形形状検査技術を開発した．CMOS 撮像素子と FPGA 制御回路を直接接続し，FPGA によって CMOS を同期制御することで，毎秒 4,096 枚の形状計測を実現し，タイヤ出荷検査で要求される検査時間（タイヤ１本１秒以下）に対応した．加えて「高次判定支援技術」として，タイヤの形状特徴を利用したタイヤ金型モデルによる正常／欠陥凹凸形状の自動認識技術と，画像処理による自動認識結果を人間が適切に修正して最終のティーチングデータとして完成させる人間・機械協調型インタフェースを開発することにより，実用的な検査装置を実現した．これら超高速形状計測技術と高次の判定支援技術を開発することで，タイヤ最終出荷検査工程の生産性向上と検査品質向上を達成した．

第６章では，高温線状物の異形棒鋼に対する材幅・形状計測課題に対し，共通プラットフォームの「FPGA リアルタイム並列画像処理回路」をカラーカメラへの適用開発することにより，RGB 画像成分毎に独立且つ並列な画像処理を実現し，材幅・形状を同時に個別に計測できるようにした．一方，RGB 画像成分から抽出した材位置や形状高さ座標を，RGB 画像相互に用いることで，材の中心位置補正や振動ブレ補正ができることを確認した．

第７章では，太陽電池ウェハの大面積中の微小凹凸欠陥の形状計測課題に対し，低角度斜入射高学系を開発することで，アスペクト比の大きい測定対象物の検査を実現した．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しなければならないため，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．

（氏名：　高橋　英二　　NO. 4　）

最後に第８章で，本研究の総括を行い本研究分野の今後の展開を述べる．各研究事例を通し，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，共通的に適用できることを確認した．加えて実用化のためには，各研究事例に応じた「計測装置化技術」「高次判定支援技術」の開発も重要である点を確認した．本研究で論じた「高速化」の流れは，今後も，より高速且つ実用化困難な限界計測課題の開発となって進んでいくものと考える．この流れの中，将来的には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が開発され，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走査で，様々な検査・計測ニーズに応えることができるになっていけば，最終的には日本の産業競争力強化・ものづくり力強化の一助になっていくのではないかと考える．

以上

（別紙１）　論文審査の結果の要旨

氏名	高橋英二		
論文題目	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		
審査委員	区　分	職　名	氏　　名
	主　査	教授	槌崎　博司
	副　査	教授	白瀬　敬一
	副　査	教授	阪上　隆英
	副　査	教授（大阪産業大学）	中山　万希志
	副　査	准教授	西田　吉晴

要　　旨

本論文では、生産ラインにおける検査・計測課題の中で人間への依存度の高い形状検査の自動化技術について論じている。

第一章では、まず、研究の背景、ニーズを述べている。形状計測分野では、「光切断法」など様々な技術が既に確立、活用されているが、生産ラインの生産管理、製品検査問題においては、現状技術では限界があることを指摘している。すなわち、実用性の観点からは、生産ラインのスピードや要求品質水準に合致するような高速かつ高精度な計測のみならず、振動や外来ノイズなど耐環境性や導入調整、保守の容易性などの運用課題にも応える必要があり、高速高精度な計測技術のみならず、装置構成、運用支援までを視野にいれた技術体系が必要であると論じている。そして、そのような課題に対し、本論文では、FPGA(Field Programmable Gate Array)を用いて撮像と同時に並行画像処理を行う画像情報処理技術、そして導入・設置調整の簡便さ、安定稼働、メンテナンス容易さをも実現する計測装置化技術、さらに適用対象問題の要求に応じた形状良否判定を実現する高次判定支援技術の三階層から構成される技術プラットフォームを提案している。そのうえで、大量情報のリアルタイム画像処理はFPGAにより実行し、抽出情報をもとに認識判断などの高次情報処理をバックエンドのＣＰＵで行うというシステム構成を示している。そして、第三章以降では、そのプラットフォームにより、従来の限界を超えた形状検査自動化を可能にした事例について示しているが、ここではその概要について論じている。

第二章では、個々の適用事例を述べるに先立って、提案プラットフォームを構成する要素技術について、従来技術のレビューを含め論じている。計測手法としては「光切断法」、すなわちシート状のレーザを測定対象の物体に照射し、別角度のカメラで撮像された物体断面形状画像から光切断線座標を抽出するという方法を基盤としているが、物体の移動にあわせて連続した断面形状座標を取得し三次元形状を構築したり、複数のシート状レーザを測定対象物の概略形状に合わせて配置する複数光源方式により、広範囲な視野と、短い露光時間であっても十分な光切断線の散乱光強度を確保したり、あるいはシート状レーザを点滅させて画像間を差分することにより環境ノイズを除去したり、高温物体の放射光にはカラーカメラによりRGB成分を分離したりするなど、適用対象の特性に応じた光学系、装置構成上工夫を行ったことを述べている。そして、撮像手段（カメラ内部のCMOS撮像素子）と情報処理手段（光切断線座標を計算するFPGA演算素子）を回路上直接接続させることで、撮像手段から流れてくる画素単位の画像情報に同期して光切断線座標を計算出力する方法により、従来30fps(毎秒30枚)の画像撮像・計測速度を、4,096fps(毎秒4,096枚)まで一気に高速化することを可能にし、実際の製造ラインでの適用可能なレベルの精度と高速性を達成可能となったことが示されている。最終的な良否判定についても、判定基準を、人間が精度よくかつ容易に設定できるような人間・機械協調型のインタフェースを実現し、導入調整の点でも多大な効率化ができたことが示されている。

第三章以下では、プラットフォームの具体的内容、適用方法、結果が具体的事例を通して詳細に述べられている。

第三章では、トンネル等の屋外の大型構造物の形状計測問題を対象に、鉄道の保線作業用途の、自走してトンネルの形状を計測する装置の開発について論じている。自走にともなう振動や、蛍光灯や車のヘッドライトなどの外来光ノイズなど環境からくるノイズへの対策や、走行速度と計測精度の両立などの課題がある。光学系としては、トンネル全面の広範囲な視野を確保するために、全周シートレーザ光学系を構成し、環境ノイズ除去に必要な画像フレーム間処理（差分、加算）などの処理をFPGAリアルタイム並列画像処理回路で処理することで、時速15kmで自走し、約30cm間隔、距離精度10mm以下で網羅的にトンネル形状を測定することが可能となり、従来人手で行っていた検査作業の自動化を達成したことが示されている。

氏名	高橋英二

第四、五章では、タイヤ製品形状検査における正常／欠陥凹凸形状自動判別について述べている。

第四章では、CMOS 撮像素子と FPGA 制御回路を直接接続し、FPGA によって CMOS を同期制御することにより、毎秒 4,096 枚の形状計測を実現し、タイヤ出荷検査で要求される検査時間（タイヤ１本１秒以下）を実現し、従来の２倍の高速化を実現したことが示されている。ここでは、乗用車用タイヤに比べて直径が２倍以上、すなわち測定範囲が２倍以上必要なトラック・バス用タイヤを対象としており、乗用車同様の検査スループットと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り、実用化の障害となっていたが、本技術による高速画像処理により、その課題を解決したことを論じている。

第五章では、高速画像処理に加え、最終的なタイヤの製品としての良否判定を行うための「高次判定支援技術」について論じている。タイヤ側面にはロゴなどのデザイン模様による凹凸があり、それと欠陥凹凸と見分けることが必要である。従来、欠陥の無いサンプルタイヤを教師データとして用意する必要があり、実用上、効率上の問題点となっていた。今回、実際ラインで製造されたタイヤの検査画像を人間が修正して「タイヤ金型モデル」を作成し、それを教師データとして良否判定を行うという人間・機械協調型方式により、タイヤ最終出荷検査工程の生産性向上と検査品質向上を達成したことが示されている。

第六章では、棒鋼圧延を対象に、圧延中の高温線状物の異形棒鋼に対する材幅・形状計測について論じている。本例では、FPGA リアルタイム並列画像処理回路をカラーカメラへ適用し、RGB 画像成分毎に独立且つ並列な画像処理を実現することで、製造ライン中で材幅・形状不良を同時に計測できるようになったことが示されている。また、棒鋼圧延中の材の中心位置ズレや振動ブレについても、RGB 画像成分から抽出した材位置や形状高さ座標を、RGB 画像相互に用いることで補正が可能になったことが示されている。

第七章では、太陽電池ウェハ製造ラインにおける、大面積ウェハ中の微小凹凸欠陥の形状計測問題について述べている。低角度斜入射光学系を開発し、アスペクト比の大きい測定対象物の検査を実現しているが、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しなければならないという問題がある。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こと、さらに、FPGA による並行画像処理により、従来レーザ変位計による数本ラインレベルでの計測しかできていなかったところ、本技術により、PV ウェハ全面を一括で毎秒１枚の速度で計測可能にしたことを示している。

第八章では、本研究の総括を行い本研究分野の今後の展開を述べている。「FPGA リアルタイム並列画像処理回路」を基盤に、「計測装置化技術」「高次判定支援技術」までを視野にいれた技術プラットフォームにより、従来困難であった形状計測検査の自動化が実用化できたことを総括している。そのうえで、今後、日本の産業競争力確保のために、より一層の高精度、高速、耐環境性、高度な品質検査判断タスクの支援までを視野にいれた統合的な技術プラットフォーム開発が必要であることを論じている。

以上、本研究は、従来人間に依存していた生産ラインや製品における形状計測検査について、高速かつ高精度な画像処理および検査判定技術を研究したものであり、FPGA による並列画像処理による高速かつ高精度な形状計測技術を中心に、小型化、導入調整支援など保守、運用の容易さなど実用面での効果も視野に入れた技術について重要な知見を得たものとして価値ある集積である。提出された論文は工学研究科学位論文評価基準を満たしており，学位申請者の高橋英二は、博士（工学）の学位を得る資格があると認める。