平成 29 年度中小企業経営支援等対策費補助金

# (戦略的基盤技術高度化支援事業)

「次世代8K 高精細フラットパネルの高歩留まり製造を実現する

# 欠陥検査システムの実用化開発」

# 研究開発成果等報告書

# 平成30年3月

# 担当局 中国経済産業局

# 補助事業者 公益財団法人 ひろしま産業振興機構

目 次

第1章	研究開発の概要 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	1
1 - 1	研究開発の概要 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	1
1 - 2	研究の背景 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	2
1 - 3	研究開発目的および目標 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	6
1 - 4	研究体制 ••••••	7
1 - 5	成果概要 ••••••••••••••••••••••••••••••••••••	8
1 - 6	当該研究開発の連絡窓口 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	10
第2章	高解像度かつ高感度の高性能非接触センサヘッドの実現 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	11
2 - 1	高機能非接触検査ヘッドの開発 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	11
2 - 2	振幅信号と位相信号を組み合せたアルゴリズム開発 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	12
2 - 3	高ノイズ除去のデジタル信号処理技術の開発 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	13
2 - 4	高機能非接触検査ヘッドの開発による実証試験 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	14
第3章	フラットパネル基板と非接触検査ヘッド間のギャップ高精度制御技術実現 ・・・・・・・・・	17
3 - 1	非接触ヘッド用ギャップセンサの開発 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	17
3 - 2	表面うねり抽出アルゴリズムを適用した実機試験 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	17
3 - 3	リアルタイムな関数近似による表面うねり抽出アルゴリズムの研究開発 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	19
3 - 4	計算知能技術による表面うねり抽出アルゴリズムの高度化 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	22
3 - 5	組み込み GPU クラスタによる表面うねり抽出アルゴリズムの高速化 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	26
第4章	データクラウドシステムの開発とスマートタブレットによる情報可視化 ・・・・・・・・・・・・	31
4 - 1	データクラウドシステムの開発及び構築 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	31
4 - 2	データ分析手法のデータクラウドシステムへの組込み ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	32
4 - 3	スマートタブレットによる情報可視化 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	33
第5章	全体総括 ••••••••••••••••••••••••••••••••••••	36
5 - 1	高度化目標と技術的目標値 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	36
5 - 2	今後の追加試験の内容 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	37
5 - 3	事業化計画 ••••••••••••••••••••••••••••••••••••	37
第6章	専門用語の説明 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	38

## 第1章 研究開発の概要

## 1-1 研究開発の概要

8Kテレビ等の超高精細フラットパネルの配線ピッチと配線幅は極めて狭くなり、従来のFHD(フルハイ ビジョンディスプレイ)対応で非接触検査システムを使うと、欠陥検出率は97%から60%まで低下すると 予測され、欠陥見逃しによる、大幅な歩留まり低下が川下製造業者では早急に解決を要する課題となっている。

	フルハイビジョンディスプレイ	8K パネル
	(FHD)パネル	
配線ピッチ	<b>90~280</b> μ m	18~56 μ m
配線幅	2.5 μ m	1.5 μ m
従来システムでの欠陥検出率	97%	60%(予測)

表1-1-1 FHD(フルハイビジョンディズプレイ)と8K パネルの配線ピッチ、配線幅、欠陥検出率

川下製造業者からは、8Kパネルでの欠陥検出能力を60%から97%以上へ引き上げるため新し い非接触検査システム開発を要請されている。従来の非接触欠陥システムのセンサ・検出回路のS/ N比及びデジタル信号処理によるノイズ除去率向上とセンサの高感度化により実現する。加えて、欠 陥検査データをクラウドシステムに集積、分析、学習させ、自動的にプロセスへフィードバックし、パネ ル製造工程の異常分析を自動化する機能を付加する。これにより、工程歩留まりを飛躍的に向上 させ製造コストを削減し、パネルメーカーが安価かつ安定した製品供給ができることを目指す。

従来技術と問題点	新技術と特徴
100µm     #接触     #       100µm     100µm     100µm       110µm     10µm     10µm       110µm <td< td=""><td><sup>107</sup> phan #接触 検査ヘッド 50µm 8Kバネル 8Kバネル 高周波信号の指向性を 30%以下に狭める</td></td<>	<sup>107</sup> phan #接触 検査ヘッド 50µm 8Kバネル 8Kバネル 高周波信号の指向性を 30%以下に狭める
問題点     100µm     25m       ・非接触検査ヘッドとフラットバネル基板のギャップは 100µmが限界。       ・フラットパネル基板の凹凸に沿ってスキャンすることができない。	<u> 特徴</u> ギャップを 50μm まで近づけ、フラットパネル基板の凹凸に沿ってスキャンする。
知見のある技術者が、集積した欠陥検査データ に基づき、特徴を抽出してプロセス依存性欠陥 を予測している。 問題点 ・自動化が困難 ・技術者個人のノウハウとなり共有化されない ◇8Kパネルの欠陥検出率=60%(予測)	<ul> <li>欠陥検査データをクラウドシステムに集積、分析、</li> <li>学習させ、自動的にプロセスへフィードバックが行える。</li> <li>特徴</li> <li>・技術者のスキルに依存しない。</li> </ul>
◇人智による工程の異常分析_	◇工程の異常分析の自動化

表1-1-2 従来技術と新技術の比較

新技術を実現するために解決すべき研究課題は以下の3点である。

- 【1】 高解像度かつ高感度の高機能非接触検査ヘッドの実現
- 【2】 フラットパネル基板と非接触検査ヘッド間のギャップ高精度制御技術実現
- 【3】 データクラウドシステムの開発とスマートタブレットによる情報可視化

### 1-2 研究の背景

フラットパネル電極配線の電気的欠陥を検出する検査手法として、以前は、電極ピンをすべての配線 に直接コンタクトさせるピンプローブ式検査であった。ピンプローブ式検査は接触式の検査手法であり、 1)低速である、2)配線の仕様変更に柔軟に対応できない、3)電極配線が異なる品種ごとに配線に対応するピンプロービング治具の交換が必要である、4)配線ピッチが狭い場合は、電極ピンが複数の配線に同時に接触するため検査が困難であるという問題があった。当社では電極ピンを用いない非接触 式の電気検査手法を開発し、実用化に成功している。非接触式電気検査の方法は、配線の一端に非接触検査ヘッド(給電ヘッド)から給電を行い、配線のもう一方の端から配線を伝わって出力される信号 を別の非接触検査ヘッド(受電ヘッド)で受信し(図1-2-1)、その信号の波形の変化から欠陥を検出 する(図1-2-2)方式である。給電と受電の2組の非接触検査ヘッドを一体化して、フラットパネル基 板の端から端へ高速で移動しながら検査を行う非接触検査システムの概要を図1-2-4に示す。配線 幅や配線ピッチが細く複雑化するにつれ、図1-2-3に示すように欠陥判定の根拠となる信号の波形 変化が小さくなり欠陥検出が困難になった。そのため、受信する非接触式検査ヘッドの高機能化および その給電側の非接触検査ヘッドの指向性を高める方式を開発する必要がでてきた。

### (1)非接触検査方式について

当社はフラットパネルの欠陥を検出する非接触式検査技術を世界で初めて開発し、その装置を製造・ 販売しており、現在世界市場で90%以上のトップシェアを有し、約500台の装置を納入した。今では、 非接触式検査がフラットパネル基板の欠陥検出の主流となっている。最先端の液晶や有機ELディスプ レイパネルでは8K等の高精細画像を実現するパネル開発への要求が強まっている。これら高解像度 パネルを製造するためには、フラットパネル基板上に形成する電極配線は高密度になる。図1-2-10 に示すように、8Kの場合はFHDに比べて配線ピッチは1/5の18~56µm、配線幅は2.5µmから1.5µm と極めて細くなる。配線ピッチおよび配線幅の高精細化により、2m×2mを超えるマザーガラス上に安定 して形成することは容易でなく、配線間短絡や断線が多く発生し製造工程における歩留まりは悪化の一 途をたどっている。このような状況下において、電極配線の欠陥箇所を検出して、次の工程で修復(リペ ア)して歩留まりを向上させるプロセスはフラットパネル製造において特に重要であり、修復すべき欠陥 を検出する工程は極めて重要な技術課題である。 非接触検査方式の原理を図1-2-1に示す。実際には、電極配線パターンは複雑な形状であるが、 ここでは、直線で示した。非接触検査ヘッドは、一方の電極間におかれた給電側ヘッドともう一方の電 極他端の受電側ヘッドの2組で構成し、一体化してフラットパネル基板をスキャンして欠陥を検出する。 非接触検査ヘッドは緑色で示す給電ヘッド(C1)と受電ヘッド(C2)で構成し、電極配線(黄色)と容量結 合する。パネルの配線抵抗をR1とすると等価回路を図1-2-1に示す。両ヘッドはフラットパネル基板 に沿ってスキャンして配線の欠陥を検査する(図1-2-4)。現在のスキャン速度は、標準で100mm/s 最大で300mm/sである。



図1-2-1 非接触検査方式原理図と基本等価回路

給電ヘッドと受電ヘッドを検査対象配線の端部にそれぞれ配置した状態で、破線矢印方向に走査を 行う。非接触検査ヘッドはフラットパネルの電極と容量結合し、図1-2-5、図1-2-6に示すように配 線に欠陥(オープン欠陥:電極配線の断線 ショート欠陥:隣の配線や層間に接触する短絡)が存在す ると、受電信号には図1-2-2に示す欠陥検出波形が現れる。



図1-2-2 給電ヘッドと受電ヘッドを検査対象配線の端部 にそれぞれ配置した状態で、破線矢印方向に走査を行う と、受電ヘッドが受信した信号は下部のようになる。欠陥(図 1-2-5、図1-2-6)が存在すると、A 点のようにデータ波 形に変化が表れ、この位置に欠陥があるとして検出する。欠 陥が検出されたパネルは、次の工程で欠陥部を修復する。 (図1-2-7~図1-2-9)

図1-2-2 配線パターンと欠陥検出波形

配線間ピッチが狭くなると、欠陥検出波形は図1-2-3に示すように小さくなり、現状のシステムでは欠



図1-2-3 配線ピッチと従来技術による検出感

非接触検査システムを上から見た図と非接触検査ヘッドを横から見た断面図を図1-2-4に示す。表面に凹凸があるフラットパネル基板とヘッドの衝突を防止するためにヘッドはレーザー変位計でギャップ を測定して、100μm以上離してスキャンする。



図1-2-4 非接触検査システム概要

電極配線の欠陥が検出されると、その種類と位置情報は、次のリペア工程に転送され、欠陥の種類 に対応してリペアを行う。

本計画に使用する特許と使用する論文は以下の通りである。

・使用する特許

特許番号	出願日	登録日	発明の名称	特許権者	発明者
第 5417651 号	2013.1.8	2013.11.29	回路パターン検査装置	オー・エイチ・ティー(株)	羽森寛
第 4417858 号	2005.1.19	2009.12.4	回路パターン検査装置お	オー・エイチ・ティー(株)	羽森寛、山岡秀
			よびその方法		嗣、石岡聖悟

・使用する論文

羽森寛、片桐英樹、加藤浩介、"フェーズドアレイシステムを用いた高精細フラットパネル配線の非 接触検査手法"、映像情報メディア学会技術報告 37(16)、1-6、2013.03.08

羽森寛、坂和正敏、片桐英樹、松井猛、"フラットパネル製造工程におけるデュアルチャネルシス テムに基づく高速非接触検査手法"、エレクトニクス実装学会誌 Vol.13 No.7, 2010

## (2)川下ニーズの「高精細フラットパネル製造における歩留まり向上」について

川下製造業者である各パネルメーカーにおいては今後益々強くなる高精細化への市場ニーズに対 し、歩留まり悪化の対策が急務となっている。現在、歩留まり改善のための欠陥リペアを目的とした検査 工程では、ほぼすべてのパネルメーカーにおいて非接触式電気検査手法が用いられている。一般的に、 一辺 2m を超えるガラスサイズから製造されるパネルのライン安定稼働後の欠陥検出率は 97%程度に なるとされており、残りの数%が欠陥検出後にリペアされて最終的に 99.8%を超える歩留まりを実現して いる。

しかし、特に、FHDと比べて配線密度が高い4Kパネルはその難易度から歩留まりが5%~7%悪化 し、さらに次世代高精細8Kパネルでは4K配線の倍の超高密度配線となり、大幅な歩留まりの悪化に より製造コストが高くなることが川下製造業者にとって解決せねばならない重要な課題となっている。し かし、現在当社が持つ非接触技術を用いても8Kにおける欠陥検出能力は約60%程度と、FHD配線 の97%に比べて大きく劣っており、その歩留まり改善の研究開発は、高解像度パネルの量産に向けた 川下製造業者の大きな課題の解決策として位置づけられ期待されている。

さらに川下製造業者では歩留まりを向上させるため、知見のある技術者が検査結果を基に、パネル製造工程の異常を分析し、検査前の製造工程にフィードバックし改善するというサイクルを繰り返し実践しているが、この自動化も求められている。表1-2-1に解像度別の検出率と歩留まり率を示す。

		高速駆動	高速駆動型	高速駆動型
	FHD 配称	FHD 配線	4K 配線	8K 配線
現行の非接触検査装置検出率	97%	97%	90%(予測)	60%(予測)
リペア後歩留まり率	99.8%	99.8%	97%(予測)	80%(予測)
欠陥見逃しによりリペアできず、廃	2 #	2 #	20 步(圣卿)	200 步(圣卿)
棄されるパネル(1000枚生産時)	2 12	2 12	30 仪(丁'侧)	200 权(丁'侧)
新技術検査装置検出率(目標値)			97%	97%

表1-2-1 解像度別検出率と歩留まり率



低

図1-2-10 解像度別配線間隔

## 1-3 研究開発目的および目標

国内のフラットパネル製造業者は、今後の4K/8K配線のパネル製造に際しても、現在のFHD配線 製造並の「リペア後歩留まり率」を確保したいと言う強いニーズがあり、次の高度化目標を設定する。 ①:8Kパネルの欠陥検出率を川下製造業者の要請である97%以上にする ②:異常工程に対するアラームの自動フィードバックを可能にする 更に、これを実現させるために、以下の技術的目標値を掲げる。

- 【1】高解像度かつ高感度の高機能非接触検査ヘッドの実現
- 【1-1】高機能非接触検査ヘッド開発
- 目標値:感度(S/N比)2.5 倍 解像度2倍(いずれも現状比) 給電ヘッドを5電極で構成し、各電極の位相を制御し指向性を高める。また、受電ヘッドの電 極ピッチを狭め、電極幅を細くして高解像度を実現する。併せて、ノイズキャンセリング電極を 配置して、高S/N比を実現する。
- 【1-2】振幅信号と位相信号を組合せたアルゴリズム開発 目標値:感度(S/N比) 現在比2倍 振幅検波から高速ロックインアンプへ検波回路を変更することでS/N比を改善すると同時に、 振幅検波信号に加え位相検波信号を組合せて検出確率を向上させる。
- 【1-3】高感度の信号検出のための高ノイズ除去のデジタル信号処理技術開発 目標値:感度(S/N比)現在比3.5dB 現在の技術ではノイズの除去を行うと必要な信号も減衰されることが確認されている。よって、 不要な信号のみを除去するデジタル信号処理技術を使用することでS/N比を改善する。

【2】フラットパネル基板と非接触検査ヘッド間のギャップ高精度制御技術実現

【2-1】非接触検査ヘッド用ギャップセンサの開発

ムの適用によって、75um±5um程度まで改善する。

目標値:ギャップ検出距離 250µm ギャップ検出精度 0.1µm

新規開発のギャップセンサを用いて高精度のギャップ検出を実現する。

- 【2-2】リアルタイムな関数近似による表面うねり抽出アルゴリズムの研究開発
- 目標値:ギャップ制御(現在 100µm)を 75µm±5µm に狭小化する。 フラットパネル基板との距離(ギャップ)を狭くすると信号レベルが向上し欠陥検出に関する検査 特性が改善されることは確認されている。現在 100µm 程度であるギャップを、開発するアルゴリズ
- 【2-3】計算知能技術による表面うねり抽出アルゴリズムの高度化 目標値:ギャップ制御(現在 100µm)を 50µm±5µm に狭小化する。 フラットパネル基板との距離(ギャップ)を狭くすると信号レベルが向上し欠陥検出に関する検査 特性が改善されることは確認されている。現在 100µm 程度であるギャップを、【2-2】の成果をふ まえて、さらに開発するアルゴリズムの適用によって、50µm±5µm 程度まで改善する。
- 【2-4】組み込み GPU クラスタによる表面うねり抽出アルゴリズムの高速化 ギャップセンサではデータ取得速度を変更することで多数のデータを得ることができ、より緻密 な解析を可能とする反面、データ数の多さにより計算処理に長時間を要してしまい、検査ヘッ ドをタイミングよく適切に制御することができなくなる。したがって、ギャップセンサにおけるデー タ取得速度等のパフォーマンスを最大限に活かしつつ、かつ【2-2】および【2-3】で開発さ れる表面うねり抽出アルゴリズムを実用できるだけの計算速度を実現するよう設計する。

【3】データクラウドシステムの開発とスマートタブレットによる情報可視化

- 【3-1】データクラウドシステムの開発及び構築
- 現在取得されているデータ、新たに取得されるデータ、ならびに【1】および【2】の研究開発を通じて新たに取得される各種のデータを収集・蓄積するデータクラウドシステムを開発する。
- 【3-2】データ分析手法のデータクラウドシステムへの組込み プロセス改善に関する知識を抽出するための分析手法を開発し、データクラウドシステムに組 み込む。さらに、収集された各種データに対して開発されるデータ分析を適用し、プロセス改 善に関する知識を 50~100 個抽出する。
- 【3-3】スマートタブレットによる情報可視化
- データクラウドシステムにおいて収集・蓄積されたデータ、データに対する分析結果及び抽出さ れたプロセス改善のための知識を、暗号化を通じて各地のスマートタブレット上に安全に配信 できるシステムを設計する。さらに、工場の作業者が事前の予備知識や特段の操作マニュアル を必要とせず理解できるようなスマートタブレット上に表示するデータの可視化の方法を確立す る。

## 1-4 研究体制



## 1-5 成果概要

- 1-5-1 開発の概要
- 【1】高解像度かつ高感度の高性能非接触センサヘッドの実現本研究開発は【1-1】高機能非接触検査ヘッドの開発、【1-2】振幅信号と位相信号を組み合わせたアルゴリズムの開発、【1-3】高感度の信号検出のためのノイズ除去のデジタル信号処理技術開発の3つの開発項目で構成される。また、【2】フラットパネル基板と非接触検査ヘッド間のギャップ高精度制御技術実現開発を組み合わせて8K検査システムを実現する。また、この8K検査システムで得られる各種のデータ収集・蓄積をするデータクラウドシステムの開発を行う。これらの開発項目の概念をブロックで図1-5-1~図1-5-2に示す。
- 【1-1】 高機能非接触検査ヘッドの開発

検査ヘッドは給電ヘッドと受電ヘッドで構成し、フラットパネル基板の配線の端部に非接触で交流信 号を給電し、フラットパネルの配線の一方の端部からの信号を非接触で受電する。非接触で給電のた め信号が拡散するので多数の配線に同じように給電され、欠陥が検出しにくくなる。そのため、指向性 を高めて給電される配線数を少なくする必要がある。また、受電信号はフラットパネル基板の配線に給 電された信号を検出すると同時に信号に多くのノイズが重なる。このノイズを除去して給電信号のみを 取り出すため、ノイズキャンセリング機能が必要である。

- 【1-2】 振幅信号と位相信号を組み合わせたアルゴリズムの開発 検査ヘッドからの信号は交流信号のため、振幅と位相情報をもっている。従来は振幅信号のみで欠 陥を検出していたが、振幅と位相を組み合わせて検出した方が欠陥検出は向上する。そのため位相 情報を取り出す振幅位相検波回路と組合せの検出アルゴリズムを開発する。
- 【1-3】 高感度の信号検出のためのノイズ除去のデジタル信号処理技術開発 欠陥検出を確実なものにするには信号部分を伸長しノイズ部分を圧縮する必要がある。これをソフトウ ェアのデジタル信号処理で行う。
- 【2】フラットパネル基板と非接触検査ヘッド間のギャップ高精度制御技術実現開発

フラットパネル基板は検査時 50um 程度うねっており、検査ヘッドはフラットパネル基板との衝突防止 のため、約 100um 程度のギャップを設けている。このギャップを小さくすれば感度は向上する。そのた め、検査ヘッドにギャップ制御を組み合わせて、検査ヘッドとフラットパネル基板のギャップを狭くする 必要がある。



図1-5-1 欠陥検出部の開発項目の概念



1-5-2 高度化および技術目標と成果

(1)高度化目標 欠陥検立 97%以上

欠陥検出率は従来技術では 65.9%であったが新技術を導入すると 97.1%に向上し、高度化目標 97%を達成した。

パネル種類	パネル種類毎の検出率		総合検出率		
	従来技術	新技術	従来技術	新技術	高度化目標
ゲート基板	71.8%	97.5%	GE 00/	07.1%	07.0%
データ基板	60.0%	96.6%	05.9%	97.1%	97.0%

総合検出率 = (ゲート基板の欠陥検出率+データ基板の欠陥検出率) / 2

各基板の欠陥検出率=(欠陥の種類×欠陥発生率)の合計



(2)技術目標値と成果

サブテーマ毎の技術目標値		目標	成果	結果
【1-1】高機能非接触検査	感度(SN比)	2.5 倍	6.03 倍	0
ヘッドの開発	解像度	2.0 倍	4.38 倍	0
【1-2】振幅信号と位相信号を維	日み合せた	2.0 倍	14. 9倍	Ô
アルゴリズム開発				
【1-3】高ノイズ除去のデジタルの開発	信号処理技術	3.5dB	51dB	$\bigcirc$
【2】フラットパネル基板と非接触		50um±5um	50um±1.0um	0
ヘッド間のギャップ高精度制御	技術実現			
【2-1】非接触検査ヘッド用	検出距離	250µm	250~500um	0
ギャップセンサの開発	検出精度	0.1µm	0.1µm	0
【2-2】リアルタイムな関数近似	による	75µm	50µm	0
表面うねり抽出アルゴリズムの研	F究開発			
【2-3】計算知能技術による		50µm	50µm	0
表面うねり抽出アルゴリス	ズムの高度化			
【2-4】組み込み GPU クラスタ	による	表面うねり抽出アルゴ	実用可能な計算	0
表面うねり抽出アルゴリン	ズムの高速化	リズムを実用できる	速度を実現した	
		計算速度の実現		
【3-1】データクラウドシステム	の開発及び構	データクラウド	クラウドシステム	0
築		システムを開発	とデータ収集装	
			置を開発した	
【3-2】データ分析手法の		プロセス改善の	知識を抽出した	0
データクラウドシステム〜	の組込み	知識の抽出		
【3-3】スマートタブレットによる	情報可視化	データ可視化の確立	可視化ツールを	0
			開発した	

# 1-6 当該研究開発の連絡窓口

(公財)公益財団法人 ひろしま産業振興機構 研究開発支援センター 参事 神田 敏和
電話:(082)240-7712 FAX:(082)242-7709

## 第2章 高解像度かつ高感度の高性能非接触センサヘッドの実現

## 2-1 高機能非接触検査ヘッドの開発

平成 27 年度は高解像度かつ高感度の高性能非接触センサヘッドの実現するために、各テーマを検証および評価する試験装置を製作した。また給電ヘッドの給電電極を5電極の構成として給電指向性の改良を行い解像度が 2.38 倍になった。



図2-1-1 給電指向性改良結果



高機能非接触検査ヘッドのノイズキャンセリング電極を追加することでSN比(感度)が3.78倍となった。

図2-1-2 ノイズキャンセリング機能による感度向上

平成 28 年度は非接触検査ヘッドの感度を上げるために、多チャンネル電極の改良を実施した。受給電の 電極長を長くすることで給受電側とも従来から感度が 1.5 倍上昇した。給受電あわせた総合感度は 1.5× 1.5 の 2.25 倍に向上した。受給電の電極長を長くするとその直下の部分の未検出領域が増える課題は、 長くした受給電の主電極の間に一対の補助の受給電極を設け、主電極の未検出領域は補助電極で検出 する方式の開発を実施した。この補助電極を設けることで未検出領域を削減し解像度を 2.0 倍以上にする ことができた。



図2-1-3 電極長さと検出電圧

平成 27 年と平成 28 年の結果を合わせると、解像度は4.38倍となり技術目標値の2.5倍を達成し、感度は 6.03 倍に向上して技術目標の2.5倍を達成した。

## 2-2 振幅信号と位相信号を組み合せたアルゴリズム開発

平成 27 年度は振幅信号と位相信号を出力できる IC 方式の振幅位相検波基板を製作して評価を行った。 平成 28 年度は平成 27 年度で製作した IC 方式の振幅位相検波基板の課題を解決するため、アナログス イッチ方式と乗算器方式の振幅位相検波を製作して評価を行い、両方式とも平成 27 年度の課題は解決し た。乗算器方式に比べアナログスイッチ方式は振幅・位相検波特性が良いので、アナログスイッチ方式を 採用した。

<b>炒</b> 油士士比盐	H28 年度詞	<b>没</b> 計	H27年度設計	従来
使极力式比較		浴井十十		
特性	アナログスイッチ方式	乗算器方式	IC 方式	<b>徙米</b> 万式
振幅検波特性	0	$\bigtriangleup$	$\bigtriangleup$	$\bigtriangleup$
位相検波特性	0	$\bigtriangleup$	$\bigtriangleup$	×
ゲイン特性	0	0	0	$\bigtriangleup$
周波数特性	0	0	0	$\bigtriangleup$
変調周波数特性	0	0	0	$\bigtriangleup$
ダイナミックレンジ	0	0	×	$\bigtriangleup$
温度上昇	0	0	×	0

表2-2-1 振幅位相検波基板の性能比較

また、平成 28 年度は振振幅信号と位相信号の差分のそれぞれの値を同一ディメンジョンにして掛け 合わせる新規のアルゴリズムを開発し、そのアルゴリズムを適用すると従来の検出方法に比べ感度(SN 比)は 14.9 倍に向上して、技術目標の 2.0 倍を達成した。

 	SN比			
	NG1	NG2		
従来アルゴリズム	280	408		
新アルゴリズム	4204 (15.0)	6079(14.9)		

表2-2-2 アルゴリズムのおける感度比較

()内数字は新アルゴリズム/従来アルゴリズムを示す



## 2-3 高ノイズ除去のデジタル信号処理技術の開発

平成 27 年度は高ノイズ除去のデジタル信号処理技術の開発を行い、デジタル信号処理を実施することで 欠陥信号のレベルはほとんど変わらずノイズ部分のみを除去することができ、S/N比が 51db と向上し、技 術目標の 3.5db を達成した。上段は従来技術の検出波形、下段は新技術の検出波形を示す。



図2-3-1 高ノイズ除去のデジタル信号処理技術のおける感度改善

## 2-4 高機能非接触検査ヘッドの開発による実証試験

平成 29 年度はこれまでにサブテーマ「【1】高解像度かつ高感度の高機能非接触検査ヘッドの実現」の 【1-1】【1-2】【1-3】で開発した機器およびアルゴリズムで、アドバイザー様の既存装置に取り付ける改造さ せていただき、実証試験を実施し欠陥検出率の評価を実施した。

表2-4-1にゲートライン基板の欠陥種類に対する欠陥検出信号の試験結果を示す。GO(ゲート・オー プン)・GGS(ゲート・ゲート・ショート)欠陥において従来技術に比べ新技術では欠陥検出信号のS/Nが 向上して欠陥検出がより確実なものとなった。また、GCS(ゲート・コモン・ショート)においては S/N が 3.2 と欠陥検出ができなかったが、新技術での同期検波の位相信号を使用すると S/N が 64.9 と大幅に向上 して欠陥が検出できるようになった。

欠陥種類		GO	GGS	GCS	
		(ゲート・オープン)	(ゲート・ゲート・ショート)	(ゲート・コモン・ショート)	
従来技術	ダイオード 検波		anti a construitante en la const		
		S/N=40.9	S/N=8.7	S/N=3.2	
新技術	ダイオード 検波	S/N=111.0	S/N-52.5		
		5/ N-111.0	5/ N=32.3	5/ N-14.7	
	同期検波 (振幅)			าใหร่องรับรายางหลุ่มสายสายรู้ไป ที่ใหร่องรับรายางหลังสายสายรู้ไป	
		S/N=117.9	S/N=50.7	S/N=14.4	
	同期検波 (位相)	S/N=51.7	S/N=18.7	S/N=64.9	

表2-4-1 ゲートライン・フラットパネル基板 試験結果

表2-4-2にデータライン基板の試験結果を示す。データライン基板のDDS(データ・データ・ショート) 欠陥の検出は難しく、従来技術では検出できなかったが、新技術の同期検波の振幅信号を使用すると欠 陥検出信号の S/N が3.5倍の 12.2 となり検出が可能となった。

欠陥種類		DO	DDS	DGS
		(データ・オープン)	(データ・データ・ショート)	(データ・ゲート・ショート)
従来技術	ダイオード 検波	S/N=99.8	S/N=3.5	S/N=68.9
新				
技術	ダイオード 検波		Hereformalinetical fortaneon of the confidence of the state of the second second second second second second se	for state in the first of the state of the s
		S/N=70.8	S/N=5.5	S/N=59.8
	同期検波 (振幅)	S/N=74 1	S/N=12.2	S/N=62.4
		S/N=74.1	S/N=12.2	S/N=62.4
	同期検波 (位相)	S/N=54.3	S/N=8.9	S/N=47.1

表2-4-2 データライン・フラットパネル基板の試験結果

これらの結果、総合欠陥検出率は、従来技術では 65.9%であったが、新技術を導入するとそれが 97.1%に 向上し、高度化目標 97%を達成した。

パネル種類	パネル種類毎の欠陥検出率		総合欠陥検出率			
	従来技術	新技術	従来技術	新技術	高度化目標	
ゲート基板	71.8%	97.5%	6E 09/	07.1%	07 10/	
データ基板	60.0%	96.6%	03.9%	97.1%	97.1%	

表2-4-3 基板ごとに欠陥検出率と総合検出率

総合欠陥検出率 = (ゲート基板の欠陥検出率+データ基板の欠陥検出率) / 2

ゲートライン基板の欠陥検出率=

- GO(ゲート・オープン)の不良発生率×欠陥検出率
- + GGS(ゲート・ゲート・ショート)の不良発生率×欠陥検出率
- +GGS(ゲート・コモン・ショート)の不良発生率×欠陥検出率

データライン 基板の 欠陥検出率=

DO(データ・オープン)の不良発生率×欠陥検出率

- + DDS(データ・データ・ショート)の不良発生率×欠陥検出率
- +DGS(データ・ゲート・ショート)の不良発生率×欠陥検出率



図 2-4-1 欠陥検出率の変化

## 第3章 フラットパネル基板と非接触検査ヘッド間のギャップ高精度制御技術実現

## 3-1 非接触ヘッド用ギャップセンサの開発

平成 27 年度はラインセンサ・静電容量・マイクロエアー方式の 3 タイプのギャップセンサを製作してその 評価を行った。その結果、エアマイクロ方式は感度は静電容量方式に比べ小さいが、形状はコンパクトで フラットパネル基板の影響がなく、コストが安価であるため、この方式で進めることとした。

		ラインセンサ	静電容量	エアマイクロ
		方式	センサ方式	方式
Ľ.	サイズ	×	0	0
精度		0	$\bigcirc$	0
測	定範囲	0	Ô	0
D	素ガラス	0	×	0
99	パターン付	0	0	0
	価格	高価	高価	安価

表3-1-1 ギャップセンサ性能比較

## 3-2 表面うねり抽出アルゴリズムを適用した実機試験

平成 29 年度は平成 28 年度までに開発したリアルタイムな関数近似による表面うねり抽出アルゴリズム(以下うねり抽出アルゴリズム)を使用してギャップ制御の精度の実機検証を行った。 図3-2-1にキャップ制御の測定システムを示す。



図3-2-1 キャップ制御の測定システム

先行するギャップが紙を検知して320umから150umとギャップは狭くなった場合、制御結果の非接触 センサとフラットパネル間のギャップはそれぞれ 100um/75um/50um に制御できた。ギャップ制御誤差 は±1.0um以下であり、目標値の±5.0umを達成することができた。



図3-2-2 ギャップ制御結果



図3-2-3 ギャップ制御誤差

#### 3-3 リアルタイムな関数近似による表面うねり抽出アルゴリズムの研究開発

初年初年度である平成 27 年度は計画通り、システムの開発環境の構築を行い、アルゴリズムの理論的 検証を行った。2 年目である平成 28 年度も計画通り、実機を用いて開発したシステムをについて評価し、 必要な改良を行った。最終年度である平成 29 年度は、収集されたデータに対し開発したシステムを評価 した。また、大学間で開発したシステムの実証評価を行った。 3-3-1. フラットパネル基板に関する検査の概要

まず、フラットパネル基板に関する検査を概説する。フラットパネル基板(以下、基板)の検査では、基板 表面上方を非接触検査ヘッド(以下、検査ヘッド)が通過し、非接触で検査を実施する。このとき、検査ヘ ッドが基板表面に近ければ近いほど、欠陥検出の感度が向上する。一方、土台となるステージを回転さ せる目的でエアを使って浮かせているため、基板表面は波打っており、また基板をステージに吸着させる ときのその吸着度合等から、上下幅として数十から百数十 um の範囲で起伏が生じている。

これまでの検査では、起伏を生じた基板表面に対して、検査ヘッドが基板に衝突しないように、検査ヘッドを基板から上方におおよそ百数十 um 以上離して直進させていた。しかし、4K あるいは 8K の基板な どでは配線間隔が極めて短いことから、検査性能を確保する上で、検査ヘッドを基板表面に近付けること が喫緊の課題であった。これを実現するべく、検査ヘッド前方に基板表面位置(以下、変位)を計測する ギャップセンサを取り付け検査ヘッドの制御を試みた。ただし、ギャップセンサではレーザーを反射する基 板表面の材質や傾斜などのため、計測結果にノイズが混入する。したがって、基板表面上方を一定の距 離を保ちつつ検査ヘッドを走査させるためには、このノイズを考慮しつつ、基板表面の起伏(以下、表面 うねり)を抽出するための方法が必要となる。



図3-3-1 フラットパネル基板に関する検査の概略図

3-3-2. 表面うねり抽出アルゴリズムの概要およびその問題点

既述の通り、ギャップセンサより取得された計測結果をもとに検査ヘッドが進むべき軌道を求める必要がある。基板表面と一定距離を保ちつつ走査させることを考えると、検査ヘッドが進むべき軌道は、 基板の表面うねりと同値である。ギャップセンサの計測結果より、基板表面の起伏形状を抽出するのが、表面うねり抽出アルゴリズムである。

具体的に、表面うねり抽出アルゴリズムでは、一定区間において、等間隔に得られたギャップセンサ による変位データをもとに、複数の線形関数を接合するにより擬似的表面うねりを抽出する。表面うね りを複数の線形関数を接合した擬似的非線形関数として抽出することのメリットが次の2つである。 ひとつは、関数の構築・選択が比較的容易である。非線形関数は無限にバリエーションが考えられ、 表面うねりに最もフィットする非線形関数を抽出することは、現実的には難しい。ましてや、リアルタイム に変位データを取得しながら、限られた時間において、最もフィットする非線形関数を抽出することは 不可能に近い。この問題を回避するために表面うねりを擬似的非線形関数として抽出することにはメ リットがある。もうひとつは、検査ヘッドを上下させる機構の制御の問題のしやすさである。検査ヘッドを 上下させる機構は、一定間隔ごとに基板表面上方の位置を指定し、それに従って直線的に移動する。 そのため、直線移動を基本とした複数の線形関数を接合した擬似的表面うねりの抽出が最も都合が よい。また、非線形のような関数では上下移動が一定の傾きを有するわけでなく、急激な変化が求め られる場合もある。このとき、走査速度によっては、指定した位置まで進むことができない場合もある。 このような制御の問題を回避するために表面うねりを擬似的非線形関数として抽出することにはメリッ トがある。

一方、開発された表面うねり抽出アルゴリズムにおいても次の 2 つの問題が考えられる。ひとつは、 図3-3-2に示すような、変位データ(青線)のノイズによる突発的な変化に対する問題である。本来、 表面うねりは、物理的にも明らかなように、緩やかな曲面である。図3-3-2は実際のギャップセンサ の計測結果であり、突発的な変化は何かしらのノイズの影響と考えられる。開発した表面うねり抽出ア ルゴリズムの結果は赤線で示されており、直線的傾向を抽出する際、突発的なノイズの影響を受けて、 抽出結果がゆがめられていることが図3-3-2(b)拡大図より明らかにわかる。もうひとつは、表面うね り抽出アルゴリズムの適用区間の境界における問題である。表面うねり抽出アルゴリズムをある区間に 適用し軌跡を抽出した場合、その区間の最後の位置が後続する区間での解析の始点として与えられ る。表面うねり抽出アルゴリズムを適用する 2 つの連続する区間の境界周辺で、ある程度の急激な変 化がある場合、あるいはノイズが含まれている場合、その影響を受けて表面うねり抽出アルゴリズムが うまく機能しない場合がある。具体的には、図3-3-3の場合である。図3-3-3は実際のギャップ センサの計測結果であり、途中から変位データの結果と表面うねり抽出アルゴリズムの抽出結果とが 大きく乖離している様子が確認できる。





図3-3-3 アルゴリズムの適用区間の境界における問題

- 3-3-3. 表面うねり抽出アルゴリズムにおける問題の解決策に関する指針 既述の2つの問題に関して、それぞれ以下のような解決策の指針を示す。
  - (1) ノイズによる突発的な変化における問題

サブテーマ2-3「計算知能技術による表面うねり抽出アルゴリズムの高度化」において、これまでに取得された過去の変位データを Deep Learning や Genetic Programming 手法などを用いて学習することで、より高度な解析をすることが可能となっている。変位データを取得する段階において、 突発的なノイズの影響が含まれると予想される変位データを、サブテーマ2-3で開発された手法を用いて学習データに基づく予測値に置き換えて、表面うねり抽出アルゴリズムを適用することが可能となる。

(2) アルゴリズムの適用区間の境界における問題

実運用上では、表面うねり抽出アルゴリズムを適用する2つの連続する区間において、境界以降 のまだ変位データが未取得の状況で対策を考えなければならない。一方、サブテーマ2-4「組み 込み GPU クラスタによる表面うねり抽出アルゴリズムの高速化」において、クラスタリング手法に基 づく変位データのパターン抽出の手法が研究されている。具体的には、これまでに取得された過 去の変位データを用いて、表面うねり抽出アルゴリズムがうまく機能した変位データのパターン、あ るいはうまく機能しなかった変位データのパターンなどを抽出することができる。したがって、過去 のデータより、図3-3-3の右半分のように、表面うねり抽出アルゴリズムがまく機能しなかった場 合の一つ前の区間の変位データのパターンを抽出し、運用上においてこれと同様の変位データの 結果が得られた場合には、事前になんらかの対応することを考えられる。

## 3-4 計算知能技術による表面うねり抽出アルゴリズムの高度化

初年度である平成 27 年度は計画通り、システムの開発環境の構築を行い、計算知能に関するアルゴリ ズムの理論的検証を行った。2 年目である平成 28 年度も計画通り、提供されたデータに対する開発した 手法を評価し、必要な改良を行った。最終年度である平成 29 年度は、収集されるデータの仕様が変わっ たため、システムの大幅な改良を行い、再度検証を行った。また、大学間で開発したシステムの実証評価 を行った。

2017 年 2 月 28 日に提供されたギャップ制御データは、3-2-1節で述べられている通り、土台となる ステージを回転させる目的でエアを使って浮かせているため、平成 28 年度に分析したデータと大幅に異 なっていた。このため、ギャップ制御データの形状を分析する必要があり、表3-4-1に示すとおりである ことが分かった。さらに、3-2節で述べた表面うねり抽出アルゴリズムはこれまで予測精度の評価が行 われていなかったため、表3-4-1のデータを用いて評価を行った結果、表3-4-2のような結果が 得られた。なお、ここで「回帰分析手法」とは、3-2節で開発された表面うねり抽出アルゴリズムを指す。

		ファイル数	観測値の数	平均值	標準偏差	最大値	最小値
	ガラス1	270	296.9	-5125.6	77.7	-4999.0	-5382.0
光回日株	ガラス 2	260	296.9	-5128.3	60.3	-4983.0	-5223.0
則凹미饻	ガラス 3	260	297.0	-5214.0	69.8	-5043.0	-5354.0
	ガラス 4	260	297.9	-5319.6	65.4	-5135.0	-5416.0
サイズ大	ガラス1	260	350.0	-5195.9	108.5	-4999.0	-5456.0
うねり大	ガラス1	26	297.0	-5784.8	668.1	-5010.0	-6853.0
	ガラス2	26	296.9	-5662.9	716.8	-4633.0	-6775.0
E the	ガラス1	26	297.2	-5057.2	165.0	-4916.0	-6116.0
共初	ガラス2	26	297.0	-5130.3	151.1	-5017.0	-6116.0

表3-4-1 ギャップ制御データの概要(単位: 0.1um)

		ファイル数	平均值	標準偏差	最大値	最小值
	ガラス1	270	2.885	3.572	168.000	0.000
光口口株	ガラス 2	260	3.427	4.054	58.000	0.000
則凹미様	ガラス 3	260	5.010	6.770	182.000	0.000
	ガラス 4	260	3.230	3.768	290.000	0.000
サイズ大	ガラス 1	260	1.975	1.850	31.000	0.000
ふわりナ	ガラス1	26	3.116	3.528	42.000	0.000
うねり大	ガラス 2	26	3.015	3.211	34.000	0.000
異物	ガラス 1	26	41.131	70.949	891.000	0.000
	ガラス 2	26	20.628	42.770	775.000	0.000

表3-4-2 回帰分析手法の誤差の分布(単位: 0.1µm)

平成28年度までに開発した深層学習アルゴリズム<sup>1)2)34)5)</sup>を用いて、表3-4-1のデータを学習し、予 測精度の評価を行ったところ、表3-4-3のような結果が得られた。なお、ここで、構造適応型DBN <sup>6)7)8)9)</sup>とは、開発した自己組織化<sup>10)11)12)</sup>を実現した深層学習アルゴリズムで、データ増強とは教師となるデ ータ数が少ないため、平成28年度に開発したノイズ重畳アルゴリズムにより、人工的にデータを増やした ものを指す。表3-4-2により、我々が開発した深層学習アルゴリズムの予測精度が最も良いことが分か る。特に、異物を含むガラスにおいては、その精度の差が明らかに示されている。この事例を図示したも のが、図3-4-1となる。検査装置に、GPU装置を装備し、深層学習を用いた検査装置を用意すること が望ましいと考えられる。

データセット	手法	平均值	標準偏差	最大値	最小値
	回帰分析手法	2.452	0.274	2.922	2.007
前回同様	構造適応型 DBN(データ増強なし)	1.378	0.208	1.597	0.929
<i>ハ</i> クス 1	構造適応型 DBN(データ増強あり)	1.087	0.231	1.471	0.789
お回日様	回帰分析手法	3.017	0.379	3.734	2.549
1月回回休 ガラフ 9	構造適応型 DBN(データ増強なし)	1.092	0.181	1.340	0.848
<i>M ) ~ 2</i>	構造適応型 DBN(データ増強あり)	0.844	0.170	1.138	0.628
前回日桂	回帰分析手法	3.017         0.37           曽強なし)         1.305         0.12	0.379	3.734	2.549
1月回回休 ガラス 3	構造適応型 DBN(データ増強なし)	1.305	0.127	1.561	1.119
X / / X 3	構造適応型 DBN(データ増強あり)	1.025	0.075	1.144	0.919
前同同样	回帰分析手法	3.250	1.037	5.690	2.492
前回同様	構造適応型 DBN(データ増強なし)	1.288	0.209	1.561	0.904
7774	構造適応型 DBN(データ増強あり)	0.925	0.132	1.150	0.708
サイブナ	回帰分析手法	2.013	0.224	2.925	1.658
サイズ大 ガラス 1	構造適応型 DBN(データ増強なし)	1.191	0.296	1.987	0.743
<i>X</i> /X1	構造適応型 DBN(データ増強あり)	0.972	0.273	1.671	0.657
ふわれた	回帰分析手法	6.820	0.241	7.186	6.539
ガラフ 1	構造適応型 DBN(データ増強なし)	4.126	0.464	6.560	3.652
<i>X</i> /X1	構造適応型 DBN(データ増強あり)	3.178	0.467	4.030	2.404
ふわれた	回帰分析手法	7.098	0.276	7.573	6.718
ガラフク	構造適応型 DBN(データ増強なし)	3.581	0.482	4.905	3.025
	構造適応型 DBN(データ増強あり)	2.352         0.214           なし)         1.378         0.208           あり)         1.087         0.231           3.017         0.379           なし)         1.092         0.181           あり)         0.844         0.170           3.017         0.379           なし)         1.305         0.127           あり)         0.844         0.170           3.017         0.379           なし)         1.305         0.127           あり)         1.025         0.075           3.250         1.037           なし)         1.288         0.209           あり)         0.925         0.132           2.013         0.224            なし)         1.191         0.296           あり)         0.972         0.273           6.820         0.241            なし)         4.126         0.464           あり)         3.178         0.467           なし)         3.581         0.482           あり)         2.923         0.416           39.003         47.100            なし)         8.357         0.226      <	3.689	2.443	
異物 -	回帰分析手法	39.003	47.100	113.734	8.801
	構造適応型 DBN(データ増強なし)	8.357	0.226	9.735	7.057
<i>X</i> / <i>X</i> 1	構造適応型 DBN(データ増強あり)	7.098	0.276	7.573	6.718
E H/m	回帰分析手法	12.081	0.877	13.677	10.684
	構造適応型 DBN(データ増強なし)	4.486	0.557	5.316	3.835
	構造適応型 DBN(データ増強あり)	4.089	0.147	4.296	3.848

表3-4-3 深層学習の誤差の分布(単位: 0.1µm)



また、平成28年度までに開発した、進化計算手法Semantic Genetic Programming (Semantic GP)を用いた知識獲得手法についても、表面うねりの予測を可能にするため、次時刻のギャップ値の予測式を知識表現として扱うように拡張した。

知識獲得の際は、ギャップ制御データの観測値の時系列を対数差分時系列に変換して扱う。具体的に は、図3-4-2のように、原系列{ $y_0, y_1, y_2, \cdots$ }に対して  $Y_t=\ln|y_t-\ln|y_{t-1}|$ を求め、次時刻のギャップの予測 値  $y_t$ を、それ以前の対数差分時系列データ{ $Y_{t-1}, Y_{t-2}, \cdots, Y_{t-25}$ }を用いて予測する。Semantic GP の個体 は、直前の観測値からの変化率 fを表す数式であり、関数記号  $F=\{+, -, , if>=\}$ 、終端記号  $T=\{Y_{t-1}, Y_{t-2}, Y_{t-3}, \cdots, Y_{t-25}, R$ を組み合わせた木構造プログラムで表現する。結果として、次時刻のギャップ値  $y_t$ は  $y_t=y_{t-1}*\exp(f)$ で表現される。進化計算を実行する際の適応度は、全観測点における実際の観測値と予 測値の誤差の二乗和とした。



$$y_t = y_{t-1} \times e^{f(y_{t-1}, \dots, y_{t-24})}$$
$$Y_t = \ln|y_t| - \ln|y_{t-1}|$$

c ....

図3-4-2 進化計算により獲得した知識を用いた過去の時系列からの次時刻の予測方法

提供された実データ「前回同様」のガラス 1 からガラス 4 の全データを一括して学習用データとし、 Semantic GP により最適化を行い獲得した知識の一部を図3-4-3に示す。変化率 fは、多数の項の線 形和で表現され、各項は過去の観測値を利用した木構造プログラムにより表現されている。

$y_t = y_{t-1} \times e^{f(Y_{t-1}, \dots, Y_{t-25})}$
$\begin{split} f(Y_{t-1},\ldots,Y_{t-25}) &= 0.009201 * T_{29} + 0.381341 * T_{60} + 0.280378 * T_{172} \\ &+ 0.129561 * T_{193} + 0.014505 * T_{333} + \ldots \end{split}$
$T_{29} = (* Y_{t-5} 1.0)$ $T_{60} = (* (- (+ (+ Y_{t-4} Y_{t-8})Y_{t-5})R_{1_{-1}5})(ifgt Y_{t-2} (+ (* Y_{t-18} R_{1_{-5}}))))$ $(* (+ Y_{t-8} Y_{t-4})(- (+ R_{1_{-1}5} (+ (- (- (* Y_{t-4} Y_{t-9})(- Y_{t-13} Y_{t-12})))))))$ $Y_{t-8} (Y_{t-9})(Y_{t-2}))(- (+ (- Y_{t-15} Y_{t-10})(* Y_{t-12} Y_{t-13}))Y_{t-4})))$ $T_{} = (* (- (* (- Y_{t-1} - Y_{t-1}))))$
$T_{172} = (+ (-Y_{t-1} R_{1_{20}}) T_{t-18})$ $T_{193} = (+ Y_{t-1} (+ Y_{t-1} (* (+ Y_{t-9} R_{1_{20}}) Y_{t-18})))$ $T_{333} = (-R_{1_{20}} Y_{t-17})$ $R_{1-n} = \sum_{i=1}^{n-1} Y_{t-i}$

図3-4-3 Semantic GP により獲得した知識の一部

また、表3-4-4に、獲得した知識を用いた予測の精度の検証結果を示す。「回帰分析手法」は3-2 節で開発された表面うねり抽出アルゴリズムを指す。この表から、Semantic GP により獲得した知識による 予測は、回帰分析と同程度の誤差の平均値を示し、また誤差の最大値が大きく減少していることが分かる。 獲得した知識による予測は、回帰分析による手法と同等の精度を持つとともに、ギャップの急激な変化な どで回帰分析がうまく機能しない場合にも回帰分析より少ない誤差で予測が可能となった。

データセット	手法	平均值	標準偏差	最大値
前回同様	回帰分析手法	2.977	3.469	72.000
ガラス1	Semantic GP により獲得した知識	3.747	4.424	81.857
前回同様	回帰分析手法	4.833	21.464	700.000
ガラス 2	Semantic GP により獲得した知識	3.554	4.292	66.976
前回同様	回帰分析手法	4.942	11.189	145.000
ガラス 3	Semantic GP により獲得した知識	3.602	4.212	67.359
前回同様	回帰分析手法	3.301	3.756	44.000
ガラス 4	Semantic GP により獲得した知識	4.219	4.424	47.030
全体:	回帰分析手法	4.004	12.347	700.000
前回同様 (ガラス 1~4)	Semantic GP により獲得した知識	3.780	4.348	81.857

表3-4-4 Semantic GPと回帰分析手法の誤差の比較(単位: 0.1µm)

#### 3-5 組み込み GPU クラスタによる表面うねり抽出アルゴリズムの高速化

初年度である平成 27 年度は計画通り、システムの開発環境の構築を行い、クラスタリングに関するアル ゴリズムの理論的検証を行った。2年目である平成 28 年度も計画通り、提供されたデータに対して開発し たクラスタリング手法を評価し、必要な改良を行った。最終年度である平成 29 年度は、収集されるデータ の仕様が変わったため、システムの大幅な改良を行い、再度検証を行った。また、大学間で開発したシス テムの実証評価を行った。

H29 年度は、最初に、エアで浮かせている装置で取得した新しいデータセットを用いてクラスタリングシ ステムの再検証を行った。また、ギャップ測定データを複数の断片データに分けてクラスタリングを行い、 200 個のクラスタパタンを抽出した。さらに、サブテーマ【2-2】が適用可能なパターンとそれ以外を分割 し、サブテーマ【2-3】のアルゴリズムの高速化を実現した。

3-5-1 クラスタリングシステムの実データを用いた再検証

H27年度にクラスタリングシステムの環境構築を行い、H28年度には、クラスタリングシステムの開発と実 データと拡張したデータを用いた検証を実施した。しかしながら、3-2-1節に「土台となるステージを回 転させる目的でエアを使って浮かせているため、基板表面は波打っており、また基板をステージに吸着さ せるときのその吸着度合等から、上下幅として数十から百数十 um の範囲で起伏が生じている」と述べら れているように、エアを使った装置で測定されたギャップ測定データの傾向が大幅に変わっているため、 H28年度の検証を再度、実施する必要があり、クラスタリングシステムの再検証を行った。再検証の主な 理由として、クラスタリングについては、MACDヒストグラム<sup>1)2)</sup>を用いてギャップ測定データ間の距離を定 める手法が良い精度であることをH28年度において検証結果を示しているが、エアによる上下変動が MACDヒストグラムに悪影響を及ぼしている可能性があるため再検証を行う必要があったためである。

H28 年 2 月 28 日に提供されたうねりを測定したギャップ測定データの概要は以下の通りである。

①ガラス4枚で10か所の位置でそれぞれ26回測定したデータ(前回提出と同一)

②ガラスサイズで傾向が異なる可能性の確認のため、ガラスサイズが異なったものを追加

③検証装置はエアベア増設でうねりが小さくなったので、疑似的にうねりを大きくしたものーガラスとステ ージの間に紙を挟んだ状態で測定

④異物などの異常状態を確認するために、異物が入ったデーターガラス表面にテープを貼った状態で測定したもの

ここでは、クラスタリングシステムを検証するのに十分なデータ数が存在するデータセット①を検証対象と する。4 種類のガラス基板から取得した 1,040 個 (ファイル)のギャップ測定データであり、ガラス4種類で、 スキャン位置が 10 ラインで 26 回繰り返して取得している。ガラス基板の長さは 592mm であり、ライン上の サンプリング間隔は 2mm である。図3-5-1にデータファイルの詳細を示す。

Sample pitch = 2[mm], correction pitch = ,Scan 1, Scan 2 Distance[mm], Sample Gap[0.1um], Con Sample Gap[0.1um], Correct Gap[0.1um 0,-5314, -5313, 0, 0,	2[mm] rect Gap[0.1um], ]	- 最初の2行はヘッダ
2, -5314, -5312, 0, 0, 4, -5311, -5312, 0, 0,	0, -5314, -531	.3, 0, 0,
6, -5311, -5311, 0, 0,	2, -5314, -531	.2, 0, 0,
568, -5148, -5148, 0, 0, 570, -5146, -5144, 0, 0,	4, -5311, -531	.2, 0, 0,
572, -5135, -5139, 0, 0, 574, -5138, -5135, 0, 0,	6, -5311, -531	1, 0, 0,
698, 346, 346, 0, 0, 700, 200, 200, 0, 0	1 ~	
700, 300, 300, 0, 0, 702, 0, 0, 0, 0, 704, 0, 0, 0, 0,	4	チップナンサ
704,0,0,0,0,0, カラス基板の	<sup>「</sup> 「ころの」の「「「」。 「この」。 「この」。	より取得した計測値[um]
5196, 0, 0, 0, 0, 0, 5198, 0, 0, 0, 0, 0,		
	*	(値が小さいほど測定器に近し

図3-5-1 各データファイルの内容



図3-5-2 ガラス1の測定結果

(測定1回目, 縦軸の単位は 0.1 µm で、横軸の単位は 1mm、凡例の番号は各ライン番号である)



図3-5-3 ガラス2の測定結果

(測定1回目、縦軸の単位は 0.1 µm で、横軸の単位は 1mm、凡例の番号は各ライン番号である)



図3-5-4 ガラス3の測定結果

(測定1回目、縦軸の単位は 0.1 µm で、横軸の単位は 1mm、凡例の番号は各ライン番号である)





(測定1回目、縦軸の単位は 0.1 µm で、横軸の単位は 1mm、凡例の番号は各ライン番号である)

図3-5-2~図3-5-5にそれぞれ、ガラス1~ガラス4の1回目の測定をプロットしたグラフを示す。そ れぞれの図から分かるように、不規則に上下変動が観測されており、物理的にガラスが壊れてしまうような 変動についてはエアの上下運動によって観測された測定値と考えられる。また、ガラス2にいては通常は 考えられないエラーデータも存在しており、エラーデータは除外をして実験を実施した。

表面うねりとして取得されるギャップ測定データは時系列データとして扱うことができる。クラスタリングシス テムにおける時系列データのクラスタリングは、①時系列データから特徴として MACD ヒストグラムの抽出、 ②時系列データ間の距離計算、③クラスタ分割の3つのステップから構成される。また、*k*-medoids 法をク ラスタ分割手法として用いている。処理手順は次の通りである。①と②についてはデータ間の依存関係が ないためデータ分割並列化で、③についてはクラスタへの割当てやクラスタでの新しい代表時系列デー タの選出が並列化できる。

- (1) ランダムに k 個の時系列データを選択し、クラスタの代表時系列データとする。
- (2) 各時系列データについて最も距離が近い代表時系列データが所属するクラスタに割当てを行う。
- (3) 各クラスタについて、次の処理を行う。クラスタに所属する各時系列データについて他の時系列デー タとの距離の総和が最も小さい時系列データを新しい代表時系列データとして選出する。
- (4) ユーザが指定した回数、もしくは、クラスタの構成が変化しなくなるまで(1)~(3)を繰り返す。

各ガラスで取得された 260 個のデータはそれぞれ 10 個の検査ラインを測定して得られたデータから作成されているため、10 ライン×26 個であり、10 グループに分割できるかどうかで評価を行う(図3-5-6)。



表 3-5-1に距離関数ごとの Rand Index の平均値と標準偏差を示す。MACD ヒストグラムを使用する ことでクラスタリングの精度が向上することを確認できた。

	2	ガラス1	オ	ガラス2 ガラス3		ガラス4		
千汁	測定	MACD	測定	MACD	測定	MACD	測定	MACD
十伝	データ	ヒストグラム	データ	ヒストグラム	データ	ヒストグラム	データ	ヒストグラム
最良値	1.0	1.0	0.998	0.998	0.994	0.998	0.989	1.0
平均	0.943	0.942	0.932	0.944	0.945	0.946	0.940	0.944
(標準	(0.032)	(0.030)	(0.031)	(0.029)	(0.033)	(0.032)	(0.042)	(0.040)
偏差)								

表 3-5-1 実験結果

3-5-2 表面うねり抽出アルゴリズムのためのパターン抽出

3-2-2節に述べられているように、測定装置に変更が行われていたため、回帰分析では対応できない表面うねりのパターンが生じており、うねりのパタン(形状)に基づいて、「回帰分析」と「抽出した知識を用いる手法」を切り替えることを実現するために次の項目を実施した。

- ・ クラスタリングに基づくパターン分析
- ・ パターンに基づく手法の切替えアルゴリズムの開発



図3-5-7 パターン分析と手法の切替え

最初に、表面うねりのデータを用いて、クラスタリングでグループ分けした断片データ集合の特徴から回 帰分析が対応可能なパターンとそれ以外のパターンが何であるかを調査した。4 種類のガラスのすべて のデータについて、うねりの形状、つまりギャップ測定データを固定長(25 点)の断片データに分け(ストラ イド 5 点)、断片データ集合を作成した。クラスタリング各クラスタについて、各断片データと同じ区間の絶 対値誤差を算出し、平均値を求めた。絶対値誤差の平均が小さいクラスタは回帰による関数近似の誤差 が小さく、3-2節で述べた方法で制御可能なパタン(A)であり、大きなクラスタはそれ以外(B)となる。



図3-5-8に、3-2節で述べた方法で制御可能なパタン(A)の上位3個の平均形状データ、図3-5-9にそれ以外のパタン(B)の平均形状データを示す。図に示す平均形状データのパターンは、最初のギ ャップ測定値を 0 としてその変動を表示している。パタン(A)はなだらかなパターンであることがわかる。 パタン(B)のクラスタ186は、一見、なだらかなパターンに見えるがクラスタに所属するデータは小刻みな 変動をしているパターンが多く、そのため、全体的に対応が難しいパターンとなったと考えられる。また、ク ラスタ161と、クラスタ192には明らかに物理的な形状としては考えられないパターンであり、3-2節で述 べた方法で制御ができないことがわかる。

また、パターンのマッチングの処理性能の評価も実施した。評価実験に使用した計算機は、H27年度に 購入設置を行った GPGPU 計算機(CPU:Intel Core i7-4790、インテル(R) Z97 チップセット、メモリ: 16GBPC3-19200(DDR3-2400))である。断片データ 14310 個について、200 個のクラスタに対しる平均パ ターンとのマッチングしたときの処理時間は 0.07ms(標準偏差は 0.003)であり、マッチングに関してのコス トは小さいことを確認できた。

これらのことにより、表面うねり抽出アルゴリズムを次のように改良した。

- a) ガラスの形状を3-5節で開発されたクラスタリングアルゴリズムにより、3-2節で述べた方法で制御 可能なパタン(A)とそれ以外(B)に分類する。
- b) パタン(A)については、3-2節で述べた抽出アルゴリズムを実施する。
- c) パタン(B)については、予測値を返すとともに、3-2節で述べた抽出アルゴリズムを停止する信号を 送信する。

この改良では、通常のガラスの検出では問題ないと考えられるが、一般に、検査装置を含む検査環境に 異常がある場合は、検査自体を停止することで、異物を取り除くこと作業が必要であることを示唆すること ができる。

#### 第4章 データクラウドシステムの開発とスマートタブレットによる情報可視化

#### 4-1 データクラウドシステムの開発及び構築

初年度である平成 27 年度は計画通り、ネットワーク環境に基づいたクラウドシステムの設計、構築を行った。2 年目である平成 28 年度も計画通り、開発したクラウドシステムのネットワーク通信に関する実証評価、改良を行った。最終年度である平成 29 年度は、大学間で開発したシステムの実証評価を行った。

クラウド上へデータ自動転送システムを開発し、検査機器によって計測されたデータをクラウドシステム で蓄積することを可能とした。

#### 4-2 データ分析手法のデータクラウドシステムへの組込み

初年度である平成27年度は計画通り、GPU計算機とクラウドシステムとの連携に係るシステム構築を行った。2年目である平成28年度も計画通り、収集されたデータに対して開発したシステムの実証評価・改良を行った。最終年度である平成29年度は、当初想定していなかったデータが収集され、欠陥検査の異常を検出するためのプロセス改善のシステム開発があったため、システムの大幅な改良を行い、対応を行った。また、大学間で開発したシステムの実証評価を行った。

欠陥検査データとは、検査機器において実施される検査において検出された欠陥に関するデータのこ とである。欠陥検査データは表4-2-1に示すように5つの属性から構成されるデータである。1列目が Glass ID、2列目が経過時間、3列目と4列目は欠陥が発生した座標値、5列目が欠陥の種類である。 Glass ID は、検査をおこなったパネルの識別番号であり、経過時間は検査が始まってからの経過時間、 座標値は、パネルのどの位置で欠陥が発生しているかを示し、欠陥の種類として SHORT と OPEN の 2 種類がある。SHORT はゲートラインやデータラインがショートしている部分で、OPEN はゲートラインやデ ータラインの断線である。例えば、3行目であれば、Glass ID=3 の、座標値(194.518, 2062.2)で SHORT が発生したことを示す。

	公文 \ 더 마는 티티	欠陥座	一四月二千米五	
Glass No	栓適時间	Х	Y	火陥種類
3	0:07:39	194.518	2062.2	SHORT
14	0:35:42	1623.364	1017.904	OPEN
23	0:58:39	1313.143	1729.337	SHORT
28	1:11:24	262.593	1287.746	OPEN
29	1:13:57	1366.189	47.115	SHORT

表4-2-1 欠陥検査データの例

欠陥検査データを用いて実施する内容は、「欠陥検出データがクラウドに蓄積されていく過程で、異常 を検出」することであり、異常の定義として、以下の定義が与えられている(OHT 定義)。

① 連続して同一個所に同一種類の欠陥がある場合(*mm* 角の範囲で *n* 回以上)

② 一枚のガラスに大量の NG がある場合(m 個以上)

図4-2-1に異常①の例を示す。異常①は、連続して局所的な場所に同種の欠陥が発生すことであ り、図に示す例では、1mm 角の範囲で 5 回以上の OPEN が発生している。図4-2-2に異常②の例を 示す。異常②は、1枚のガラスに一定数以上の欠陥が発生することであり、図に示す例では、1枚のガラ

スに20回以上の欠陥が発生している。



図4-2-1 異常①の例



図4-2-2 異常②の例

表4-2-2に示すデータセットは OHT から提供があった 5 つのデータセット、このデータセットを使用 して、機械学習による判定を行うように依頼があり検討を行った。大学間で慎重に協議を重ねた結果、異 常発生を検出することは、AI 分析で言うレベル1の問題であり、制御問題で機械学習の問題ではないこと が明らかになった。異常①については、次の欠陥データが同種で mm 以内か、また,異常②について は、Glass ID ごとに欠陥数をカウントすることで検出することができる。

	欠陥数	ガラス数 (欠陥あり)	欠陥種別 OPEN	欠陥種別 SHORT
Data1	2366	2073	1414	952
Data2	2346	2075	1385	961
Data3	2388	2121	1415	973
Data4	2350	2086	1410	940
Data5	2351	2081	1398	953

表4-2-2 分析対象データセット

表4-2-2に示すデータを用いて、実際に異常の検出が行えるか検証実験を行った。パラメータ設定 r=1、 n=5、 m=20 と設定したときの異常発生数は表4-2-3の通りである。自明ではあるが、表4-23の異常をすべて検出することができた。また、パラメータ設定 *r*=1、 *n*=3、 *n*=10 と設定したときの異常 発生数は表4-2-4の通りである。同じく、自明ではあるが、表4-2-4の異常をすべて検出することが できた。

表4-2-3 異常発生数(パラメータ設定 r=1, n=5, m=20)

	Data1	Data2	Data3	Data4	Data5
異常①の発生数	1	1	2	0	2
異常②の発生数	1	0	1	0	0

表4-2-4 異常発生数(パラメータ設定 r=1, n=3, m=10)

	Data1	Data2	Data3	Data4	Data5
異常①の発生数	1	1	2	0	2
異常②の発生数	1	0	1	0	0

異常を検出する問題自体は、制御問題であり、機械学習ではなかった。また、提供があったデータは、 説明変数が、時間、位置、種別だけなので、発生状況のみしか分析できない。サブテーマ【3-2】の当初 目的のひとつである工程へのフィードバックには発生原因を明らかにするためには、数ヶ月規模の欠陥 の画像(写真)を含む環境データ(一般に数万枚のデータ)が必要である。

## 4-3 スマートタブレットによる情報可視化

初年度である平成 27 年度は計画通り、ハードウェアの購入は予定されていなかったため、スマートタブ レットアプリケーションの開発を仮想環境で行った。2 年目である平成 28 年度は計画通り、購入したハー ドウェアにおいて、開発したソフトウェアを用いた実証評価・改良を行った。最終年度である平成 29 年度 は、4-2においてプロセス改善に係るシステム開発の提案を受け、システムの大幅な改良を行い、対応 を行った。また、大学間で開発したシステムの実証評価を行った。

4-1及び4-2において開発もしくは分析された結果をもとに、情報を可視化するスマートタブレットア プリケーションを開発した。ここでは、クラウドサーバのホスト名を「deeplearning.puhiroshima.ac.jp/owncloud」と仮定する。利用可能なデータの種類は、どちらも提供されたもので、A)ギャ ップ制御データ(図4-3-1)、B)ガラス欠陥検査データ(図4-3-2)である。

Sample pitch = 2[ mm], correction pitch = 2[ mm]
Scan 1, Scan 2
Distance [mm], Sample Gap [0.1 um], Correct Gap [0.1 um], Sample Gap [0.1 um]
0, -5382, -5385, 0, 0,
2, -5382,
...

図4-3-1 ギャップ制御データ

```
Glass No. 経過時間欠陥座標[mm] 欠陥種類
X Y
3 ,0:07:39 ,194.518 ,2062.2 , SHORT
14 ,0:35:42 ,1623.364 ,1017.904 , OPEN
23 ,0:58:39 ,1313.143 ,1729.337 , SHORT
•••
```

図4-3-2 ガラス欠陥検査データ(2017年8月10日提供)

A) ギャップ制御データの可視化方法は、次のような手順になる。 すなわち、「データダウンロード」ボタン を押し、スマートタブレット上にデータをダウンロードする。 ダウンロードされたデータは本アプリのみ、読み 書きできない設定になっており、他のアプリケーションからは閲覧できないようなセキュリティが施されてい る。 データの同期が終了すると、図4-3-3のように、可視化するファイルを選択するために、プルダウン メニューが表示される。 データ名を選択し、「可視化」ボタンを押すと、図4-3-4のような画面が表示さ れる。

さんほん回答	🕑 🛜 🕯 🔀 15:46
1 時間 サポインデータ可視化インターフェース	
ギャップ制御データの可視化 ファイル名 Competitions (1980)150-270-20170208-142423 dat	
	4
可视化	
ガラスの欠陥箇所の可視化	
ファイル名 欠陥情報20170807-1 csv	
THE HARLEST SOUTH ON THE STREET	4
비행다	
データダウンロード	
ث c	đ
	6 122 LD

図4-3-3 データ選択

図中の横軸と縦軸は、それぞれガラスの位置(mm)とギャップ制御値(0.1um)を示しており、青線は測 定値、赤線は【2-2】で開発されたアルゴリズムによる推定値、緑線は【2-3】で開発された知識獲得手 法の知識による予測値を示している。



図4-3-4 ギャップ制御データ可視化

B)ガラス欠陥個所の可視化方法は、同様に、「データダウンロード」ボタンを押し、スマートタブレットとク ラウドサーバ上のデータを同期させる。閲覧したいデータを選択し、「可視化」ボタンを押すと、図4-3-5のような画面が表示される。



図4-3-5 欠陥個所可視化

図中の縦軸と横軸は、原点を0 としたガラスの位置(mm) を示しており、青と赤の点は、それぞれ元のデータの「OPEN」、「SHORT」の2種類の欠陥箇所を示している。ここで、次の2種類の条件による異常検知が行われる.

(a) 複数のガラスについて、r ミリ区間でM 個以上の欠陥がある場合(欠陥の種類の区別あり)

(b) ガラス1枚にN 個以上の欠陥がある場合(欠陥の種類の区別なし)

図4-3-6は,異常を検出した事例である。



条件(a)による異常の検出

条件(b)による以上の検出

図4-3-6 異常検出結果の例

#### 第5章 全体総括

#### 5-1 高度化目標と技術的目標値

5-1-1 高度化目標值

サブテーマ「【1】高解像度かつ高感度の高機能非接触検査ヘッドの実現」の【1-1】【1-2】【1-3】で開発した機器およびアルゴリズムで、アドバイザー様の既存装置に取り付ける改造させていただき、実証試験を実施し欠陥検出率の評価を実施した。その結果、総合欠陥検出率が65.9%から97.1%と向上して高度化目標値97.0%を達成した。

5-1-2 技術目標値

【1-1】高機能非接触検査ヘッドの開発

給電ヘッドの給電電極を5電極の構成として給電指向性の改良を行い解像度が 2.38 倍になった。 また、補助の受給電電極を増設する多チャンネル電極の改良を行い、未検出領域を削減し解像度を 2.0 倍以上にすることができ、合わせて解像度は 4.38 倍以上となり、技術目標値2.5倍を達成した。

ノイズキャンセリング電極を追加することでSN比(感度)が3.78倍となり、給受電電極の形状の改良を行い感度が2.25倍となり、合わせて6.03倍に向上して技術目標2.5倍を達成した。

【1-2】振幅信号と位相信号を組み合せたアルゴリズム開発

振幅信号と位相信号の差分のそれぞれの値を同一ディメンジョンにして掛け合わせる新規のアルゴリ ズムを開発し、S/N比は従来に比べ14.9倍に向上し、技術目標の2.0倍を達成した。

【1-3】高ノイズ除去のデジタル信号処理技術の開発

高ノイズ除去のためデジタル信号処理技術を開発してSN比は 51db と向上し、技術目標の 3.5db を 達成した。

【2】フラットパネル基板と非接触検査ヘッド間のギャップ高精度制御技術実現

リアルタイムな関数近似による表面うねり抽出アルゴリズムをギャップ 50um で制御精度±1.0um 以下 を達成した。

【2-1】非接触検査ヘッド用ギャップセンサの開発

ラインセンサ方式静電容量・センサ方式・エアマイクロ方式の3種類のギャップセンサを製作して性能 評価を実施した。3種類の総合評価ではエアマイクロ方式が最良で、その性能は検出距離250~ 500um 検出精度 0.1um で技術目標を達成した。

【2-2】リアルタイムな関数近似による表面うねり抽出アルゴリズムの研究開発

ギャップ制御(現在 100µm)を 75µm±5µm に狭小化するという技術目標について、50µm±5µm を 達成した。研究計画当初には含まれていなかったエアマイクロ方式を用いたことで、アルゴリズムが 適用できないケースがあるが、このケースを特定するためには、実際に稼働している装置から自動送 信されるデータを分析する必要がある。

【2-3】計算知能技術による表面うねり抽出アルゴリズムの高度化

ギャップ制御(現在 100µm)を 50µm±5µm に狭小化するという技術目標について、50µm±5µm を 達成した。開発した深層学習アルゴリズムの分類精度は、ベンチマークデータでは世界1位であり、 これは大量な実測値データを学習することで実現している。データ量が不足しているため、今後予 測できないケースがあるが、その場合でも逐次的に学習を行うことで精度が向上できる。また、GPU 装置を用いない環境でも深層学習から知識を抽出し、それを利用する制御方法を開発することがで きた。知的財産権の出願が今後求められる。 【2-4】組み込み GPU クラスタによる表面うねり抽出アルゴリズムの高速化

表面うねり抽出アルゴリズムを実用できる計算速度の実現という技術目標に対して,実用可能 な計算速度を実現し,技術目標を達成した。表面うねりのデータをクラスタリングでグループ分け するシステムとパターンを抽出するシステムを開発した。抽出したパターンは提供されたデータの みで有効であり,新たにデータを追加した場合は,再度,パターンの検証を行う必要がある。 【3】データクラウドシステムの開発とスマートタブレットによる情報可視化

【3-1】データクラウドシステムの開発及び構築

データクラウドシステムを開発するという技術目標に対して、クラウドシステムとデータ収集装置を開発し、技術目標を達成した。データクラウドシステムは開発、構築しているが、実用化する場合は、セキュリティ等の対策が必要となり、維持するためには費用が必要となる。 【3-2】データ分析手法のデータクラウドシステムへの組込み

プロセス改善に関する知識の抽出という技術目標に対して、知識を抽出でき、技術目標を達成した。データクラウドシステムには、深層学習アルゴリズムの組み込みが可能となったが、データの蓄積については、装置とインターネット接続が必要となる。また、取得するデータについては、単なる計測値だけでなく、温度、湿度、画像などの情報が必要であり、データ提供がなかったため、その分析が行われていない。

【3-3】スマートタブレットによる情報可視化

データの可視化の方法を確立という技術目標に対して,可視化ツールを開発し,技術目標 を達成した。データクラウドシステムには,情報可視化ツールを開発した。しかしながら,可視化 すべきデータが変更されれば,新しい可視化ツールが必要となる。

## 5-2 今後の追加試験の内容

フラットパネルは液晶パネルでは 4K・8K と高解像度化が進み、有機 EL(OLED)は技術課題が解決されてきており量産化が進んでいくものと考える。そのため今後は以下の追加開発を実施していく予定である。

- (1) 非接触検査装置の更なる欠陥検出率の向上
- (2) 有機 EL パネルの欠陥検出の取り込み
- (3)リペア装置と非接触検査装置を組合せた複合機の開発

#### 5-3 事業化計画

- (1)既に納入しているユーザへ OHT 非接触検査装置(GX-3S)検査ヘッド・検査システムおよび検査 ソフトウェアの改造
- (2)新規に開発した OHT 非接触検査装置(GX-5N)の販売
- (3)リペア装置と非接触検査装置を組合せた複合機の販売

## 第6章 専門用語の説明

オープン:電極配線が断線している欠陥

ショート:隣の配線や層間に接触し、短絡している欠陥

フルハイビジョンディスプレイパネル(FHD):

フルハイビジョンテレビで使用されているパネルで、1920×1080のマトリックスで構成されている。 8K フラットパネル:

次世代の高精細テレビで開発目標としているパネルで、8K×4Kのマトリックスで構成されている。 **欠陥検出率**:フラットパネル基板の欠陥は断線欠陥と短絡欠陥があり、それの検出率のこと。

検査機による欠陥検出の数/全不良の数でこの値が小さいと下流に不良が流出する。

#### リペア歩留まり率:

欠陥が検出されると修理(リペア)が行われ、良品となる。リペア部留まり率とは修理後の歩留まり率のことを示す。

#### 給電ヘッドと受電ヘッド:

フラットパネル基板の非接触センサはフラットパネル基板の端の一方から信号を印可して他の端からその信号を受信して欠陥を検出する一対のセンサから構成される。その信号を印可するセンサ側を給電 ヘッド、信号を受信するヘッドを受電ヘッドである。図1-1. 非接触検査方式原理図を参照のこと。

#### ゲートライン基板:

フラットパネル基板で横方向に画素数分配線された基板

### データライン基板

フラットパネル基板で縦方向に配線された基板で RGB 配線のため画素数の 3 倍の配線量がある。ゲートライン基板と重ねて一枚のパネルとなる。

ギャップセンサ:非接触で測定対象物との微小な距離を測定する変位センサの一種。

S/N比:信号雑音比(signal-noise-ratio)の略で、信号量(signal)と雑音量(noise)の比。

#### バリキャップ:

ダイオードの一種で、端子に加える電圧によって静電容量が変化するダイオードである。 トリマコンデンサ:可変容量コンデンサ

#### 回帰分析:

ある変数上の観測結果と別の変数の観測結果の関係を測定における誤差を考慮して関数として記述 する統計学の一手法。関数 y = f(x) において、y は被説明変数、x は説明変数と呼ばれる。説明変数 が 1 変数の場合は単回帰分析、2 変数以上の場合は重回帰分析と呼ばれる。また、関数 f(x) が一次 関数で与えられる場合を特に線形回帰分析と呼び、その関数を回帰直線と呼ぶ。線形回帰分析の場 合、観測地と回帰直線の誤差が最も小さくなるように回帰直線のパラメータを決定する。この方法を最小 二乗法と呼ぶ。

#### 関数記号:

木構造プログラムにおいて内部ノードに用いられる記号。

#### 関数同定問題:

回帰分析において、対象のモデルをあらかじめ仮定せず、関数を推定する問題。一般的な回帰分析では、1次式や2次式といったモデルを仮定し各次数の係数を最適化対象のパラメータとして最適化するが、関数同定問題では与えられた入出力データにふさわしいモデルの構造とパラメータの両方を最適化する。

木構造:

ノードとエッジで表される無向グラフのうち、連結で閉路を持たないもの。最上位にあるノードをルートノ ードとし、下位に子ノードを持つ内部ノードと子ノードを持たない葉ノードからなる。

クラスタリング

教師なしデータ分類手法のひとつである。与えられたデータ集合を複数の部分集合(クラスタ) に分ける。それぞれのクラスタに含まれるデータが同じ特徴を持つように、つまり類似している ように分割する。

交叉:

生物学における染色体間の部分交換のアナロジーで、進化計算において複数の親個体の形質を受け 継いだ次世代の個体を生成する操作。個体集団に対して交叉を適用する割合を交叉率により定める。

時系列データ:

時間の経過と順序に合わせて観測されるデータ。

終端記号:

木構造プログラムにおいて葉ノードに用いられる記号。

#### 情報量規準:

想定される複数の統計モデルの中で最も適切なものを選択するためのモデル選択基準。

#### 進化計算:

生物の進化に着想を得た最適化アルゴリズムの総称。問題の解候補を表す個体を複数生成し、選択・ 交叉・突然変異といった遺伝操作を繰り返し適用することで準最適解を効率的に探索する。木構造プロ グラムの最適化のための手法として遺伝的プログラミングがある。

## 選択:

次世代の個体集団を生成するための親個体を適者生存の原理に基づいて選出する操作。トーナメント 選択では、トーナメントサイズで指定された数だけ個体をランダムに選択し、その中で最も適応度の高い 個体を選出するという操作を個体数分繰り返す。

## 動的計画法:

「最適政策は最適部分政策からなる」とする最適性の原理に基づく多変数最適化問題を解くための一手法。

#### 動的タイムワーピング(DTW)

時系列データの距離を計測するために使用されている手法である。2 つの時系列データの各系列要素の距離を総当りで比較した場合において、時系列データ間の距離が最短となる要素同士を対応付け時系列データ間の距離を求める。

## **Rand Index**

ランド指数と呼ばれ、正解ラベルを持つデータのクラスタリングの結果を評価するのに使用されている。すべてのデータの組合せについて、正解ラベルが同一で、かつ同一クラスタに含まれるデータペアの数(A)と、正解ラベルが同一ではなく、かつ同一のクラスタには含まれていないデータペアの数(B)を求める。ランド指数とは(A+B)/データペアの総数で計算される数値である。

## 深層学習(Deep Learning)

大規模な多層構造を持った階層型ニューラルネットワークの総称。ニューラルネットワークとは、人間の 脳内の神経回路網の挙動を模倣した数理モデルである。事前学習は深層学習の代表的な学習法の一 つであり、多層構造を各層ごとに学習し、そこで抽出された特徴を組み合わせることで、データに含まれ る抽象的な特徴かつ具体的な特徴を高い精度で表現できる。

## 機械学習(Machine Learning)

人工知能(AI)の一つであり、人間の学習能力をコンピュータで実現する手法である。与えられたデータ を反復的に学習し、データに含まれる有用なパターンや知識等を発見できる。上記深層学習も機械学 習の手法の中に含まれる。教師あり学習、教師なし学習、半教師あり学習、強化学習等に分類される。

#### 教師ありデータ

教師あり学習で使用されるデータの種類であり、観測されたデータに対して人間が正解のラベルを付与 したデータ。一方、正解ラベルが付与されていないデータは教師なしデータと呼ばれ、クラスタリング手 法等の教師なし学習で使用される。

### データ増強(Data Augmentation)

データセットのサンプル数を増加(水増し)させる手法である。機械学習や深層学習では、精度を向上 するために大容量のビックデータが必要である。そのため、元のデータに対してノイズを加える処理や、 画像であれば明度や位置の変形を行うことで、疑似的にデータを生成する処理が行われている。

## **GPU** (Graphics Processing Unit)

画像処理に特化したプロセッサである。CPU は逐次処理が得意であるが、GPU は搭載されているコア 数が桁違いに多いため、並列処理が得意である。そのため、GPU は画像処理以外の汎用的な計算目 的にも応用され、この技術を GPGPU(General-purpose computing on graphics processing units)と呼ぶ。 近年の深層学習における演算処理には必須となっている。

## クラウドサーバ

インターネット上からアクセス可能な Web サーバの総称。その利用形態から、クラウドサーバはインター ネット経由でアプリケーションやソフトウェアを提供する SaaS(Software as a Service)、アプリケーション開 発のプラットフォームを提供する PaaS(Platform as a Service)、ハードウェア等のインフラを提供する IaaS(Infrastructure as a Service)に分類される。

## ホスト名

ネットワーク上にあるコンピュータ等の機器を識別する名前。インターネット上では, DNS サーバを介し てアクセス可能な名前である Fully Qualified Domain Name(FQDN; 完全修飾ドメイン名)の意味として 使われることもある。 第1章

## $1-1 \sim 1-3, 1-5[1], 1-5[2-1]$

- 1) オー・エイチ・ティー株式会社. 回路パターン検査装置. 特許第 5417651 号. 2014 02 19
- 2) オー・エイチ・ティー株式会社.回路パターン検査装置およびその方法.特許第 4417858 号. 2010 02 17
- 3) 羽森寛、片桐英樹、加藤浩介.フェーズドアレイシステムを用いた高精細フラットパネル配線の非接触 検査手法.映像情報メディア学会技術報告. 2013. 37(16). p.1-6.
- 4) 羽森寛, 坂和正敏, 片桐英樹, 松井猛. フラットパネル製造工程におけるデュアルチャネルシステムに 基づく高速非接触検査手法. エレクトロニクス実装学会誌. 2010. vol. 13, no. 7, p.562-568.

### 第2章

- 1) オー・エイチ・ティー株式会社. 回路パターン検査装置. 特許第 5417651 号. 2014 02 19
- 2) オー・エイチ・ティー株式会社.回路パターン検査装置およびその方法.特許第 4417858 号. 2010\_02\_17
- 3) 羽森寛、片桐英樹、加藤浩介.フェーズドアレイシステムを用いた高精細フラットパネル配線の非接触 検査手法.映像情報メディア学会技術報告. 2013. 37(16). p.1-6.
- 4) 羽森寛, 坂和正敏, 片桐英樹, 松井猛. フラットパネル製造工程におけるデュアルチャネルシステムに 基づく高速非接触検査手法. エレクトロニクス実装学会誌. 2010. vol. 13, no. 7, p.562-568.

#### 第3章

3 - 1

- 1) オー・エイチ・ティー株式会社. 回路パターン検査装置. 特許第 5417651 号 . 2014 02 19
- 2) オー・エイチ・ティー株式会社. 回路パターン検査装置およびその方法. 特許第 4417858 号. 2010 02 17
- 3) 羽森寛、片桐英樹、加藤浩介.フェーズドアレイシステムを用いた高精細フラットパネル配線の非接触 検査手法.映像情報メディア学会技術報告. 2013. 37(16). p.1-6.
- 4) 羽森寛, 坂和正敏, 片桐英樹, 松井猛. フラットパネル製造工程におけるデュアルチャネルシステムに 基づく高速非接触検査手法. エレクトロニクス実装学会誌. 2010. vol. 13, no. 7, p.562-568.

3 - 2

- 1) 山本紗稔, 竹本康彦, 有薗育生. 線形近似回帰分析の提案. 日本経営工学会 2014 年秋季大会予稿 集. 2014, p.234-235.
- 2) 竹本康彦, 岡田奈々代. 情報量規準に基づく折れ線回帰分析に関する一考察. 2016 IEEE SMC Hiroshima Chapter 若手研究会講演論文集. 2016、p.54-55
- 岡田奈々代,竹本康彦,有薗育生.情報量規準に基づく折れ線回帰分析に設計.日本経営工学会 2016 年秋季大会. 2016, p.150-151
- 4) 加藤直樹. 数理計画法. コロナ社, 2008
- 5) 小西貞則,北川源四郎. 情報量規準. 朝倉書店, 2004

3 - 3

- LeCun, Yann; Boser, Bernhard; Denker, John S.; Henderson, D.; Howard, Rihard E.; Hubbard, Wayne; Jackel, Lawrence D. Backpropagation applied to handwritten zip code recognition, Neural Computation. 1989, vol.1, no.4, pp.541-551
- Hinton, Geoffrey E., Osindero, Simon; Teh, Yee W. A Fast Learning Algorithm for Deep Belief Nets, Neural Computation. 2006, vol.18, no.7, pp.1527–1554
- Hinton, Geoffrey E.; Salakhutdinov, Ruslan R. Reducing the Dimensionality of Data with Neural Networks, Science. 2006, vol.313, no.5786, pp.504–507
- Bengio, Yoshua. Learning Deep Architectures for AI. Foundations and Trends in Machine Learning 2, 2009, 127p
- 5) Hinton, Geoffrey E. Training products of experts by minimizing contrastive divergence, Neural Computation. 2002, vol.14, pp.1771-1800
- 6) Shin, Kamada; Takumi, Ichimura. An Adaptive Learning Method of Restricted Boltzmann Machine by Neuron Generation and Annihilation Algorithm, Proc. of 2016 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (IEEE SMC 2016), 2016, pp.1273-1278
- Shin, Kamada; Takumi, Ichimura. An Adaptive Learning Method of Deep Belief Network by Layer Generation Algorithm, Proc. of IEEE TENCON 2016, 2016, pp.2971-2974
- Shin, Kamada; Takumi, Ichimura. Knowledge Extracted from Recurrent Deep Belief Network for Real Time Deterministic Control. Proc. 2017 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (IEEE SMC 2017), 2017, pp.825-830
- Shin, Kamada; Takumi, Ichimura. Fine Tuning of Adaptive Learning of Deep Belief Network for Misclassification and its Knowledge Acquisition, International Journal Computational Intelligence Studies, 2017, vol.6, no.4, pp.333-348
- 10) 市村匠,石田与志,目良和也,大枝真一,山下利之,杉原亮宏.並列砂時計ニューラルネットワークと 情緒生起手法を用いた感情指向型インタフェースの応用.ヒューマンインタフェース学会誌,2001,第3
   巻,第4号, pp.225-238
- 11) Ichimura, Takumi; Oeda, Shinichi; Suka, Machi; Mackin, Kenneth J.; Yoshida, Katsumi. ``Adaptive Learning Methods of Reflective Neural Networks and Immune Multi-agent Neural Networks". Knowledge-Based Intelligent System for Healthcare. Ichimura, Takumi and Yoshida, Katsumi, Eds. Advanced Knowledge International, 2004, pp.11-49
- 12) Ichimura, Takumi; Oeda, Shinichi; Suka, Machi; Yoshida, Katsumi. A learning method of immune multiagent neural networks, the Neural Computing and Applications Journal. 2005, vol.14, p.132-148
- Koza, John R.. Genetic Programming -- On the Programming of Computers by Means of Natural Selection. The MIT Press, 1992, 840p.
- 14) McPhee, Nicholas F.; Ohs, Brian; Hutchison, Tyler. Enumerating building block semantics in genetic programming. University of Minnesota Morris Working Paper Series. 2007,vol.3 no.1, p.1-11.
- McPhee, Nicholas F.; Ohs, Brian; Hutchison, Tyler. Semantic Building Blocks in Genetic Programming. EuroGP 2008. 2008, LNCS 4971, p.134-143.
- Moraglio, Alberto; Kwawiec, Krzysztof; Jhonson, Colin G., Geometric Semantic Genetic Programming. Parallel Problem Solving From Nature. 2012, XII, Part I, p.21-31.

 Vanneschi, Leonardo; Castelli, Mauro; Manzoni, Luca; Silva, Sara. A New Implementation of Geometric Semantic GP and Its Application to Problems in Pharmacokinetics. EuroGP 2013. 2013, LNCS 7831, p.205-216.

## 3 - 4

- 1) Murphy, John J. Technical Analysis of the Financial Markets: A Comprehensive Guide to Trading Methods and Applications, Prentice Hall Press, 1999, 576 p.
- 2) Tamura, Keiichi; Matsui Tomoki; Kitakami Hajime; Sakai Tatsuhiro. "Identifying Local Temporal Burstiness Using MACD Histogram". Proceedings of 2015 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics. IEEE. 2015, p. 2666-2671.

## 4 - 1

- 1) owncloud, https://owncloud.org/, [online] (2017/2/21 閲覧)
- Kamada, Shin.; Ichimura, Takumi.; Shigeyasu, Tetsuya.; Takemoto, Yasuhiko. Registration System of Cloud Campus by using Android Smart Tablet, SpringerPlus, A Springer Open Journal. 2014, vol.3, no.761, doi: 10.1186/2193-1801-3-761.