

平成 23 年度戦略的基盤技術高度化支援事業  
(平成 23 年度第 3 次補正予算事業 研究開発の前倒し事業)

「外観検査用産業用ロボットを高度化する画像処理組込みソフトウェア  
の開発と事業化」

## 研究開発成果等報告書

平成 24 年 12 月

委託者 東北経済産業局  
委託先 株式会社インテリジェント・コスモス研究機構

## 目 次

第1章 研究開発の概要.....	1
1.1 研究開発の背景・研究目的及び目標.....	1
1.1.1 研究概要.....	1
1.1.2 実施内容.....	1
1.1.2(1) 自動外観検査用光学ヘッドの開発.....	1
1.1.2(2) 鏡面・塗装面の微小凹凸検査用システムの開発.....	1
1.1.2(3) 塗装面の色・質感自動検査用システムの開発.....	1
1.1.2(4) 事業化に向けた装置仕様の策定.....	2
1.2 研究体制.....	3
1.2.1 研究体制.....	3
1.2.2 管理体制.....	3
1.2.2(1) 管理法人.....	3
1.2.2(2) 再委託先.....	4
1.2.3 研究者及び管理者氏名.....	5
1.2.4 他からの指導・協力者及び指導・協力事項.....	6
1.2.5 研究実施場所.....	6
1.2.6 知的財産権等の取り組み状況.....	6
1.2.7 郊外発表等の状況.....	6
1.3 成果概要.....	7
1.3.1 自動外観検査用光学ヘッドの開発.....	7
1.3.1(1) 光学ヘッドを複雑な形状のワークに対して、より確実に安全にテー チングをする制御システムの開発.....	7
1.3.1(2) ロボット先端に搭載する為の光学ヘッドの軽量化及び構造の最適化.....	7
1.3.1(3) 有機 EL 照明の検出能力に関する評価と事業化に向けた研究開発....	7
1.3.1(4) 欠陥箇所をマーキングする機能の検討.....	7
1.3.2 鏡面・塗装面の微小凹凸検査用システムの開発.....	7
1.3.2(1) 「変曲線マッチング法」の研究開発.....	7
1.3.3 塗装面の色・質感自動検査用システムの開発.....	8
1.3.3(1) 「変角分光光度測定」を用いた質感の特徴抽出ソフトウェアの開発.....	8
1.3.3(2) 「ウィナー推定」の推定精度に関する研究.....	8
1.3.4 事業化に向けた装置仕様の策定.....	8
1.4 当該プロジェクト連絡窓口.....	8
第2章 本 論.....	9
2.1 自動外観検査用光学ヘッドの開発.....	9
2.1.1 光学ヘッドを複雑な形状のワークに対して、より確実に安全にテー チングする制御システムの開発.....	9
2.1.2 ロボット先端に搭載する為の光学ヘッドの軽量化及び構造の最適化.....	11

2.1.3	有機 EL 照明の検出能力に関する評価と事業化に向けた研究 .....	11
2.1.4	欠陥箇所をマーキングする機能の検討 .....	14
2.2	鏡面・塗装面の微小凹凸検査用システムの開発 .....	16
2.2.1	「変曲線マッチング法」の研究開発 .....	16
2.3	塗装面の色・質感自動検査用システムの開発 .....	18
2.3.1	色情報の特徴抽出ソフトウェアの開発 .....	18
2.3.2	「変角分光光度測定」を用いた質感の特徴抽出ソフトウェアの開発 ....	18
2.3.2(1)	質感の特徴抽出ソフトウェアを含むシステムの概要 .....	18
2.3.2(2)	目視官能評価 .....	19
2.3.3	「ウィナー推定」の推定精度に関する研究 .....	20
2.3.3(1)	オフセットゲイン補正を用いた分光反射率推定手法 .....	20
2.3.3(2)	メタリック・パール塗料への対応検討 .....	22
2.4	事業化に向けた装置仕様の策定 .....	23
最終章	全体総括 .....	25
参考文献	.....	26

## 第1章 研究開発の概要

### 1.1 研究開発の背景・研究目的及び目標

#### 1.1.1 研究概要

自動車等の工業製品は、品質維持の為に外観検査を行っている。異品や欠品、キズ等の検査は画像処理により自動化されているが、塗装表面等の鏡面状の製品の微小な凹凸や塗装の色や質感等は目視による官能検査に頼っている。一番厳しい検査基準は、 $10\mu\text{m}$ の高さ(深さ)の凹凸であるが、官能検査である為、下流工程へ流出するケースが問題となっている。

そこで本研究では、川下企業で行われている目視や触感による検査を自動化する為、マルチバンド撮影や位相限定相関法を用いた画像処理等の技術シーズを用いた組み込みソフトウェア、及び光学ヘッドを開発し、それらを用いた画像検査による欠陥検出を自動的に行い、目視検査と同等に検出する為の外観検査装置システム用の組み込みソフトウェアの開発を目的とする。

#### 1.1.2 実施内容

##### 1.1.2(1)自動外観検査用光学ヘッドの開発

自動車外観検査用光学ヘッドの開発では、微小な凹凸に対して感度が最大限に得られるスリットパターンを考案し、車体等の複雑な形状のワークでも最適な画像が取得出来る光学的な構造を持つ光学ヘッドを開発する。

光学ヘッドを複雑な形状のワークに対して、より確実に安全にティーチングする制御システムの開発では、キャラクターラインなどの複雑な形状に対応出来る検査有効エリアを基準としたティーチングソフトウェアの開発を行う。

ロボット先端に搭載する為の光学ヘッドの軽量化及び構造の最適化では、実用化へ向けた欠陥検出能力及び信頼性を高めた光学ヘッド(総質量  $2.5\text{kg}$  以下)を開発する。

有機 EL 照明の検出能力に関する評価と事業化に向けた研究開発では、検出能力の向上を検討する為スリット間隔を更に狭小化した有機 EL 照明を試作し、事業化へ向けて実際の車体生産ラインと同様に様々な車体色におけるスリットの写り込み状況及び欠陥検査能力の性能評価を行うと共に、実現可能で有効なマーキング機能の検討を行う。

##### 1.1.2(2)鏡面・塗装面の微小凹凸検査用システムの開発

鏡面・塗装面の微小凹凸検査用システムの開発では、ワークに写り込んだ有機 EL 照明のスリットを撮影した画像から、空間周波数や変曲線の変化量と変化幅・位相等の情報を用いて、直径  $0.25\text{mm}$  の欠陥を 100%検出することが出来る「変曲線マッチング法」のアルゴリズム開発を行う。

##### 1.1.2(3)塗装面の色・質感自動検査用システムの開発

塗装面の色・質感自動検査用システムの開発では、目視検査等の官能検査に依存し

ていた塗装面の色や質感を、マルチバンド撮影及び変角分光光度測定を用いて数値化するソフトウェアを開発する。数値化された色・質感情報と目視検査の相関性を研究し、目視検査の置換を図る。

(1) 色情報の特徴抽出ソフトウェアの開発

カメラに光学フィルタを組み合わせ、RGB R' G' B' の6バンドから色情報の抽出を行い、得られた色情報の分析を行う。得られた色情報を基に人の知覚との相関性に優れた L\*a\*b\*表色系等の色空間に当てはめる為のソフトウェアを開発する。

(2) 「変角分光光度測定」を用いた質感の特徴抽出ソフトウェアの開発

「色情報の特徴抽出ソフトウェア」を用いて、「変角分光光度測定」による質感の数値化について研究を行う。「変角分光光度測定」では、カメラを対象物と正対するように配置し、照明を 25°、45°、75° 等の異なる方向から照射して色情報の特徴抽出を行う必要がある。

また、角度毎の色情報を3次元グラフで視覚的に表現する質感の視覚化ソフトウェアを開発する。更に得られた結果と目視官能評価との相関評価を行う。

(3) 「ウィナー推定」の推定精度に関する研究

ウィナー推定により数値化の精度向上を図り、「質感の数値化」と「目視検査による官能検査」との相関評価に用いることが出来る分解能 $\angle$ E1.5以下を目標とする。

推定精度の評価は、川下企業で使用している塗料等を用いてサンプル行列を作成し、「マルチバンド撮影」で撮影した画像から「色情報の特徴抽出ソフトウェア」で推定した分光分布特徴と分光放射輝度計で測定した81バンドの分光分布特性を比較することで、推定精度に関する評価・研究を行う。

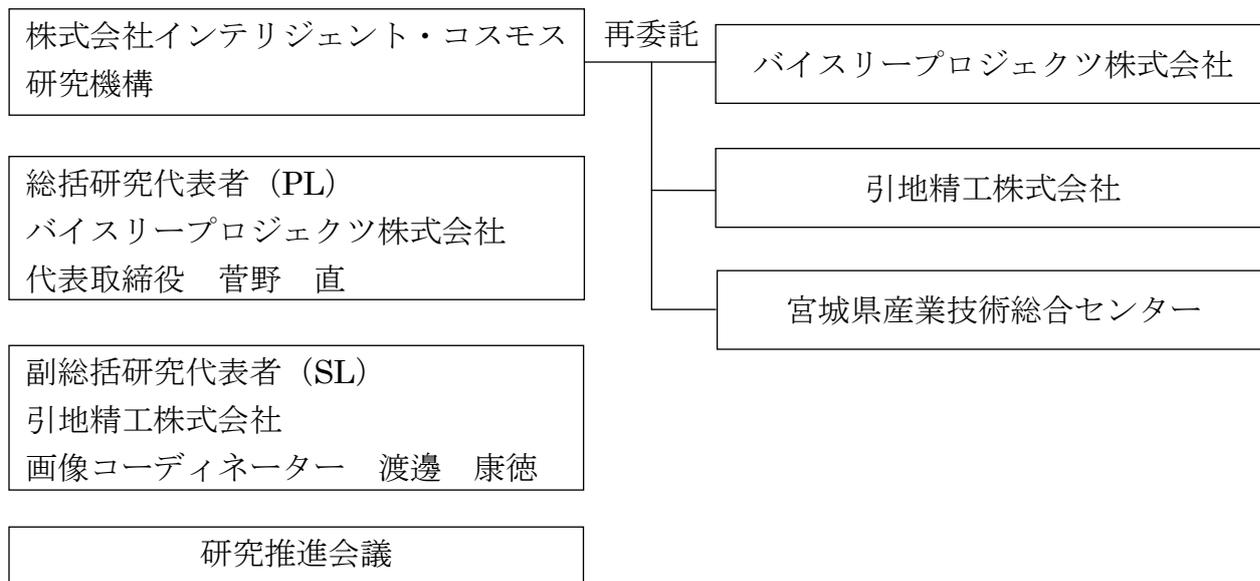
また、車体の塗装色はメタリックやパール塗装が多い為、これらの塗色に有効な推定行列を研究し、メタリックやパール塗色に関しても推定精度 $\angle$ E1.5以下を実現する。

1.1.2(4) 事業化に向けた装置仕様の策定

事業化に向けては、川下企業のライン制御と同期して動作を行う外観検査ロボットが必要となる。車種の判別、ライン速度や振動、車種毎のティーチング、欠陥箇所のマーキング、導入箇所の外乱光環境の影響など、導入に向けて多くの課題がある為、これらの課題を川下企業と共に明確にすることで導入に向けて具体的な作業に着手出来るよう仕様化する。

## 1.2 研究体制

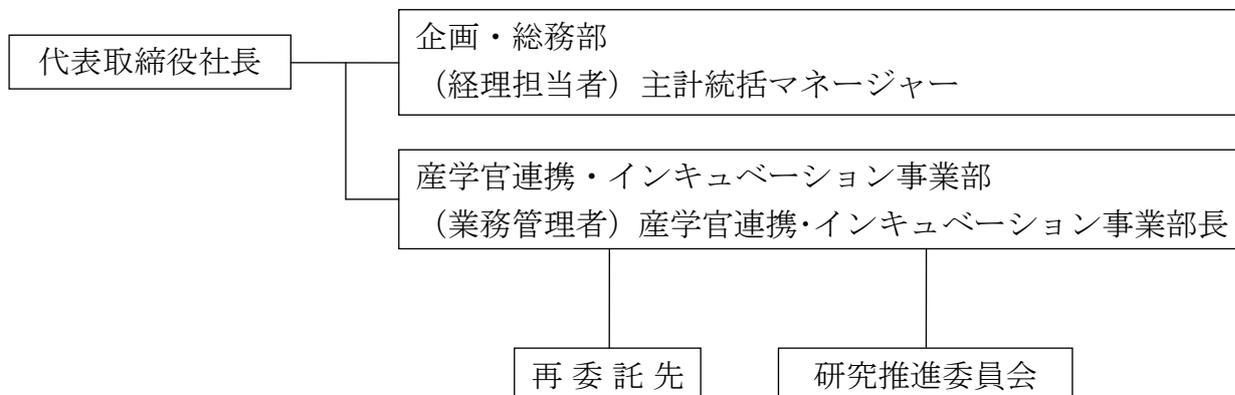
### 1.2.1 研究体制



### 1.2.2 管理体制

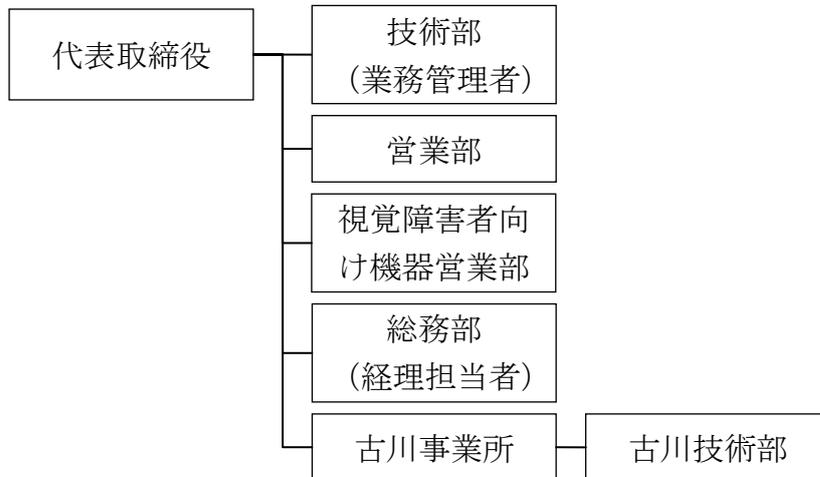
#### 1.2.2(1)管理法人

株式会社インテリジェント・コスモス研究機構

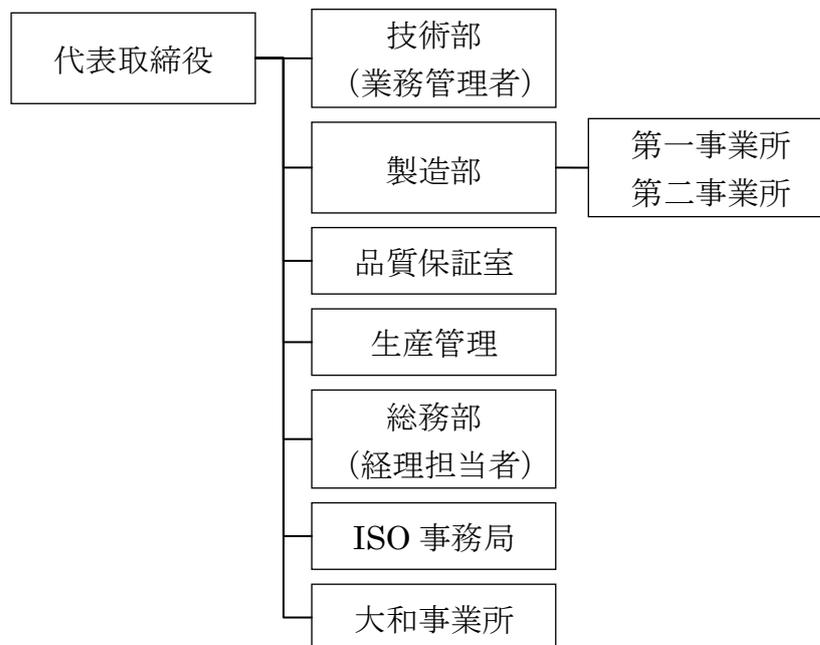


### 1.2.2(2)再委託先

バイスリープロジェクト株式会社



引地精工株式会社



宮城県産業技術総合センター



### 1.2.3 研究者及び管理者氏名

【管理法人】株式会社インテリジェント・コスモス研究機構

管理員（プロジェクト管理員）

氏名	所属・役職	実施内容（番号）
宍戸 郁郎	常務取締役（兼）産学官連携・インキュベーション事業部 事業部長	
猪股 則夫	産学官連携・インキュベーション事業部 統括マネージャー	
多賀 雄次	産学官連携・インキュベーション事業部 プロジェクト・マネージャー	
三浦 未紀枝	産学官連携・インキュベーション事業部 管理員	

【再委託先（研究員）】

バイスリープロジェクト株式会社

氏名	所属・役職	実施内容（番号）
菅野 直	代表取締役	PL
海老澤 正人	技術部 リーダーエンジニア	1.1.2(1), 1.1.2(2)
一ノ瀬 友道	技術部 リーダーエンジニア	1.1.2(4)
高橋 祐貴	技術部 エンジニア	1.1.2(2)
新田 翔	技術部 エンジニア	1.1.2(2)
鈴木 淳	技術部 エンジニア	1.1.2(3)

引地精工株式会社

氏名	所属・役職	実施内容（番号）
渡邊 康德	技術部 画像処理 画像コーディネーター	SL
柴田 寿志	技術部 画像処理	1.1.2(1)
小島 英敏	技術部 画像処理	1.1.2(1)
佐々木 勝	技術部 画像処理	1.1.2(1)

宮城県産業技術総合センター

氏名	所属・役職	実施内容（番号）
太田 晋一	機械電子情報技術部 情報技術開発班 研究員	1.1.2(1), 1.1.2(2)
荒木 武	機械電子情報技術部 情報技術開発班 技師	1.1.2(2)

#### 1.2.4 他からの指導・協力者及び指導・協力事項

##### 研究推進会議 アドバイザー

アドバイザー 氏名	主な指導・協力事項
青木 孝文	変曲線マッチング法、マルチバンド撮影法等の画像処理に関する事項
川村 洋一	川下企業としてのニーズ出しに関する事項
長草 善孝	
馬江 祐介	ロボット制御及び市場動向に関する事項

#### 1.2.5 研究実施場所

バイスリープロジェクト株式会社（最寄り駅：仙台市営地下鉄南北線八乙女駅）  
〒981-3212 宮城県仙台市泉区長命ヶ丘4丁目15番22号

引地精工株式会社（最寄り駅：JR 東日本鉄道常磐線・東北本線岩沼駅）  
〒989-2436 宮城県岩沼市吹上1丁目14-37

宮城県産業技術総合センター（最寄り駅：東北新幹線仙台駅）  
〒981-3206 宮城県仙台市泉区明通2丁目2番地

#### 1.2.6 知的財産権等の取り組み状況

特許出願：平成24年6月19日提出

特願 2012-137465

発明の名称：表面検査装置及び表面検査方法

#### 1.2.7 郊外発表等の状況

特筆事項なし

### 1.3 成果概要

#### 1.3.1 自動外観検査用光学ヘッドの開発

##### 1.3.1(1)光学ヘッドを複雑な形状のワークに対して、より確実に安全にティーチングをする制御システムの開発

光学ヘッドを複雑な形状のワークに対して、より確実に安全にティーチングする制御システムの開発では、複雑な形状のワークに対してカメラ視野サイズ、被写界深度、スリット照明の有効範囲を考慮したティーチングポジションを求める手法としてアルゴリズムの改良を行い、「平面スライド法」というアルゴリズムの開発を行うことで、ティーチング作業の負担を軽減させることが出来るソフトウェアの作成を実施した。

##### 1.3.1(2)ロボット先端に搭載する為の光学ヘッドの軽量化及び構造の最適化

ロボット先端に搭載する為の光学ヘッドの軽量化及び構造の最適化として、有機 EL 照明の製造方法見直しによる回路部一体型を製作し、分離型の回路部のケース、保持機構を削減することで軽量化を図った。その結果、光学ヘッドの総質量が約 2.1kg となり目標である総質量 2.5kg 以下を達成出来た。

##### 1.3.1(3)有機 EL 照明の検出能力に関する評価と事業化に向けた研究開発

欠陥検出能力向上の為、スリット間隔を狭小化した有機 EL 照明を使用し、キャラクターラインでの検出可能範囲の確認、様々な車体色におけるスリットの写り込みと欠陥検出能力の評価、有効検査エリアの検証を、川下企業の生産ラインで実際のワークを使用して評価を行った。

結果としては、川下企業の目視検査で最高水準である直径 0.5mm の欠陥を検出出来ることが確認出来た。但し、当初の目標としていた直径 0.25mm の欠陥を 100%検出することは出来ず、ライン導入に向けて様々な課題が挙がった。

##### 1.3.1(4)欠陥箇所をマーキングする機能の検討

ワークの欠陥位置を視認可能にする為のマーキング方法について検討を行い、ロボットのティーチング座標とワークのポリゴンデータから欠陥位置を特定し、ディスプレイ上に表示・印刷する方法に決定し、ソフトウェア開発を行った。

その結果、川下企業から提供頂いたサンプルワークを検査し、欠陥位置をディスプレイ上に表示出来ていることを確認した。

#### 1.3.2 鏡面・塗装面の微小凹凸検査用システムの開発

##### 1.3.2(1)「変曲線マッチング法」の研究開発

「変曲線マッチング法」の研究開発では、ワークに写り込んだ有機 EL 照明のスリットを撮影した画像から、空間周波数や変曲線の変化量と変化幅・位相等の情報をを用いて、直径 0.25mm の欠陥を 100%検出することが出来る「変曲線マッチング法」のアルゴリズム開発を行った。パラメータの自動算出により、ロバストな性能を有したア

ルゴリズム開発に成功したが、目標としていた直径 0.25mm の欠陥を 100%検出することは出来なかった。

### 1.3.3 塗装面の色・質感自動検査用システムの開発

#### 1.3.3(1) 「変角分光光度測定」を用いた質感の特徴抽出ソフトウェアの開発

「変角分光光度測定」を行う質感の特徴抽出ソフトウェアを開発した。ロボットに取り付けた色の検査用光学ヘッドで対象物を多角度から撮影し、撮影した画像から分光光度を「ウィナー推定」する。角度毎の分光光度は 3 次元グラフに表示され、検査する色と基準となる色のデータとで観察角度毎の色差を算出する事が出来る。

また、色の検査用光学ヘッドと目視官能との比較を行ったが、相関関係は見られなかった。原因として、新規に作成した光学ヘッドのウィナー推定の推定精度が平均  $\Delta E 20$  以下と大変悪かった事が挙げられる。

#### 1.3.3(2) 「ウィナー推定」の推定精度に関する研究

メタリック・パール色塗料での「ウィナー推定」推定精度は目標の色差平均  $\Delta E 1.5$  以下に到達しなかった。しかし、カメラのダイナミックレンジ (撮影可能な明暗の差) を広げて撮影する手法 「ハイダイナミックレンジ撮影 (HDR 撮影)」により 13.5 から 7.5 にまで精度向上させる事が出来た。HDR 撮影によりメタリック・パール色塗料の特徴である大きな輝度値の変化をカメラで捉える事に成功した。

但し、実験では上手くいった方法でも 1.3.3(2)の様にシステム化すると推定精度が悪くなるなど、未だ試行錯誤の状態である。

### 1.3.4 事業化に向けた装置仕様の策定

事業化に向けて、川下企業のライン制御と同期して動作を行う外観検査ロボットが必要となる。車種の判別、ライン速度や振動、車種毎のティーチング、欠陥箇所のマーキング、導入箇所の外乱光環境の影響など、導入に向けて多くの課題がある。

本研究では事業化へ向けた第一歩として川下企業でのライン検証を実施し、欠陥検出能力の評価を実施した。結果として数多くの解決しなければならない課題が挙がり、事業化に向けた装置仕様の策定までには至らなかった。

## 1.4 当該プロジェクト連絡窓口

株式会社インテリジェント・コスモス研究機構

産学官連携・インキュベーション事業部

プロジェクト・マネージャー 多賀 雄次

989-3204 宮城県仙台市青葉区南吉成 6 丁目 6-3

Tel:022-279-8811 Fax:022-279-8880

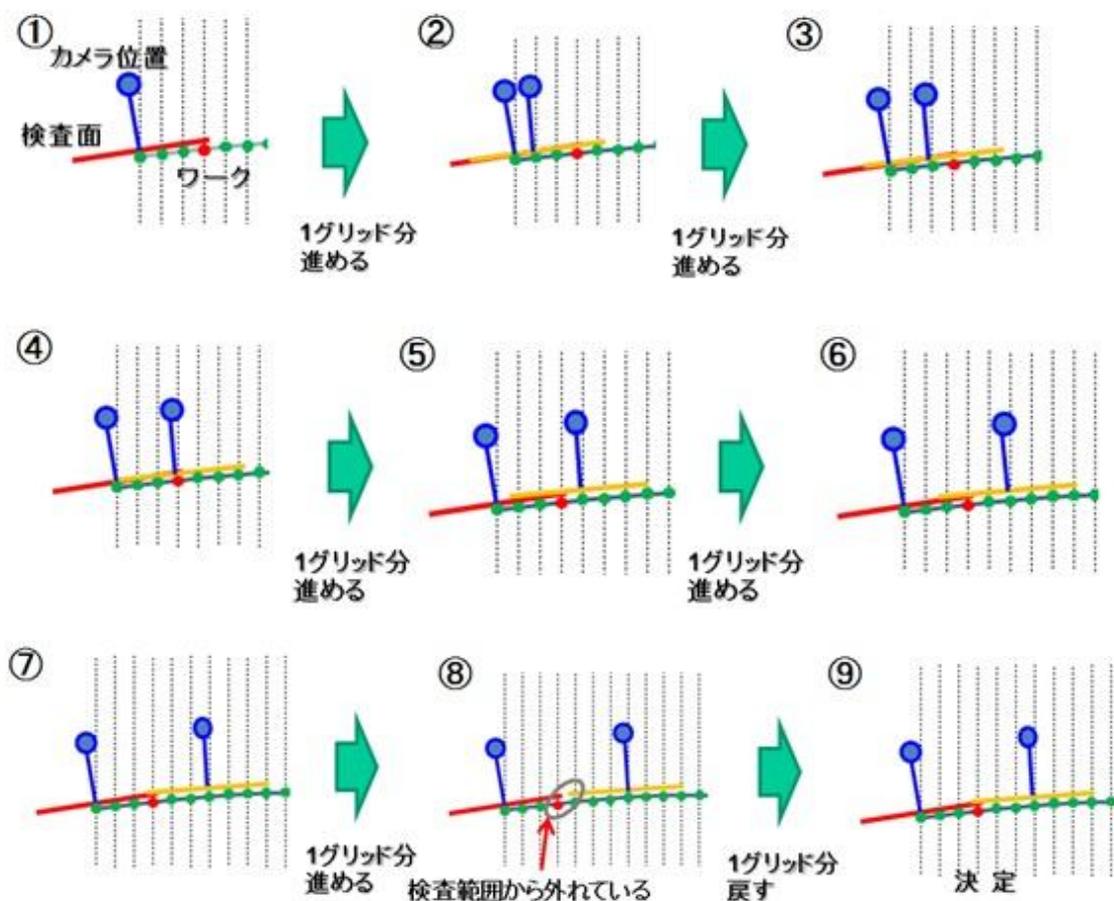
## 第2章 本 論

### 2.1 自動外観検査用光学ヘッドの開発

#### 2.1.1 光学ヘッドを複雑な形状のワークに対して、より確実に安全にティーチングする制御システムの開発

車体形状に対するティーチング作業は、数百点のティーチングを手動で行う必要があり非常に時間のかかる作業となる。そこで本研究では光学ヘッドを複雑な形状のワークに対して、より確実に安全にティーチングする制御ソフトウェアを開発し、ティーチング作業の負担を軽減させることを目指す。

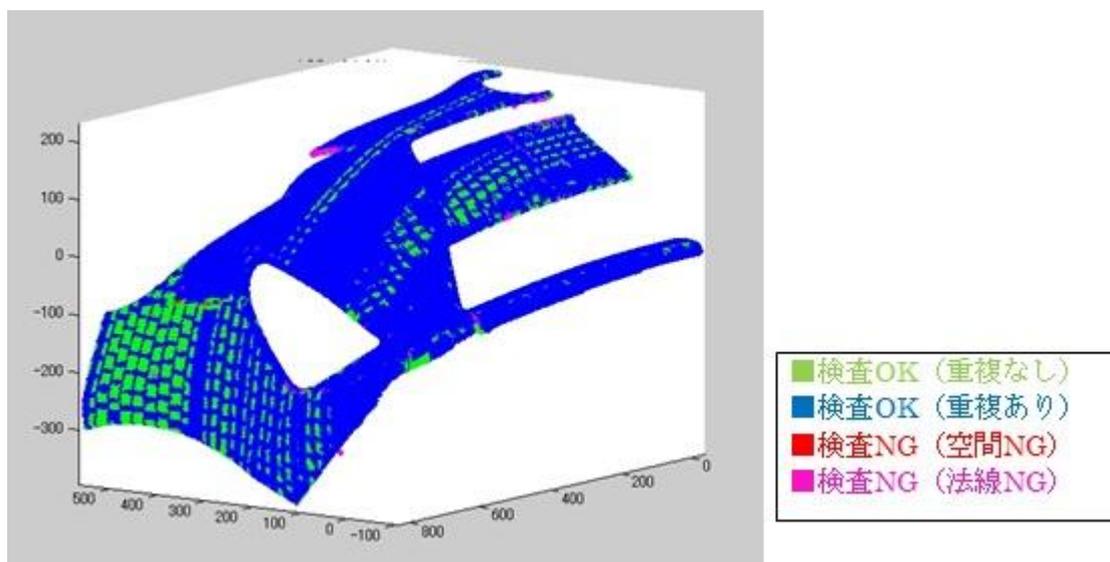
制御ソフトウェアを開発するに当たり、複雑な形状のワークに対してカメラ視野サイズ、被写界深度、スリット照明の有効範囲を考慮したティーチングポジションを求める手法として「平面スライド法」を用いて開発を行った。第 2.1.1-1 図に「平面スライド法」の考え方を示す。まず初めに CAD データ上のワークの端に最初のカメラ位置を決定し、検査面に含まれる端のワークの点を基準点とする (①の赤点)。次に 1 グリッド分カメラ位置をスライドさせ (②~⑦)、基準点が検査範囲から外れたら (⑧)、1 グリッド分カメラ位置を戻し、次のカメラ位置を決定する (⑨)。この手順を繰り返す事によりワークに対してティーチングを行っていく。



第 2.1.1-1 図 「平面スライド法」の考え方

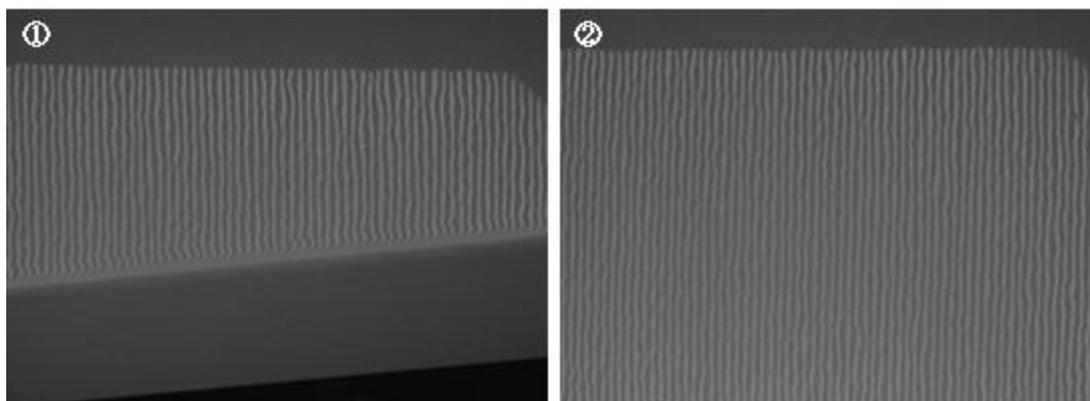
続いて作成したアルゴリズムの評価を実施した。評価方法は川下企業より提供して頂いたサンプルワークを用いた。まずこのサンプルワークを3次元計測し、その後3D CADデータ化して求めたティーチングポジションを、アルゴリズムの評価ソフトウェアを使用して検査カバー率等を算出した。

第2.1.1-2図にアルゴリズムによる評価結果を示す。結果は検査カバー率が99%、ティーチングポイント数が2148ポイントとなった。平面スライド法ではカメラ角度、カメラ視野サイズ、被写界深度、ワーク面の角度を考慮しティーチングポジションを決める為、重複して検査される箇所（青色の部分）とティーチングポイント数が多い結果となった。



第 2.1.1-2 図 アルゴリズムの評価結果

続いて本アルゴリズムを用いて作成したロボット設定ファイルを使用して、外観検査ロボットでワークの撮像を行った。



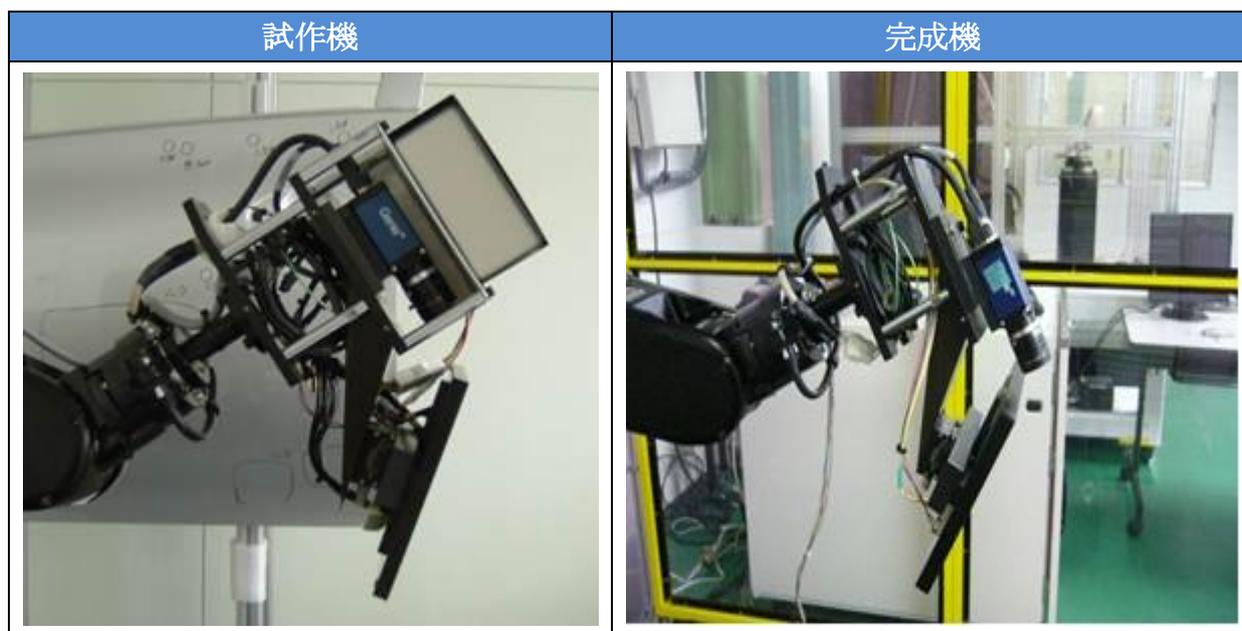
第 2.1.1-3 図 サンプルワークのロボット撮像画像

撮像画像からワークにスリット照明が写り込んでいることが確認出来る。また、スリットにフォーカスがほぼ合っていることから本アルゴリズムがティーチング支援に有効であることが確認出来た。

### 2.1.2 ロボット先端に搭載する為の光学ヘッドの軽量化及び構造の最適化

車体などの複雑な形状のワークに対して、最適な画像を取得する為には光学的な構造を持ち、ロボット動作の高速性を考慮した耐加速性、耐振動性も兼ね備えた光学ヘッドが必要となる。そこで本研究では事業化に向けて欠陥検出能力及び信頼性を高めた有機 EL 照明を取り付ける機構を持ち、且つ軽量化(総質量 2.5kg 以下) に配慮した光学ヘッドの設計・試作を実施した。

結果としては有機 EL 照明の製造方法見直しによる回路部一体型を製作し、分離型の回路部のケース、保持機構を削減することで軽量化を行うことが出来た。それにより目標値であった総質量 2.5kg を上回る総質量約 2.1kg の光学ヘッドの開発に成功した。

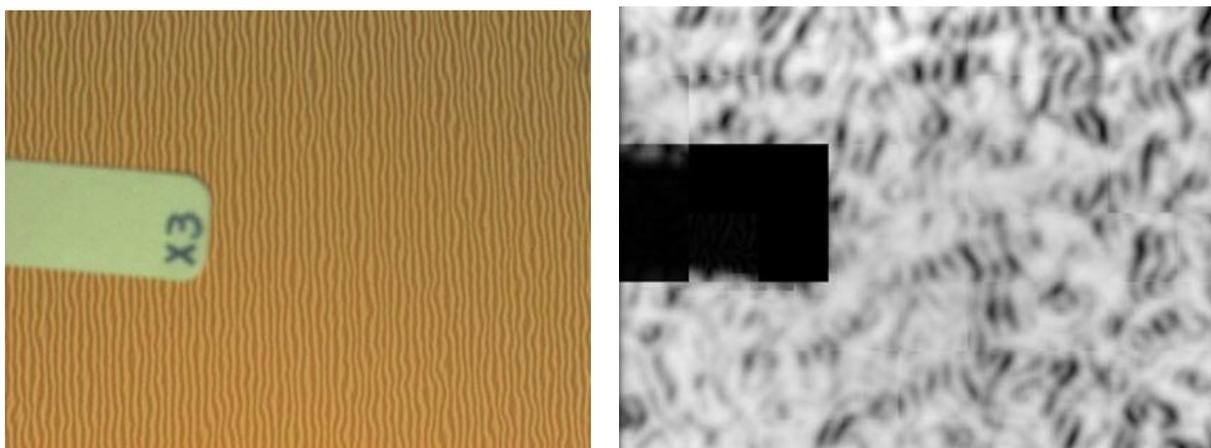


第 2.1.2-1 図 試作機と完成機の光学ヘッド・有機 EL 照明外観

### 2.1.3 有機 EL 照明の検出能力に関する評価と事業化に向けた研究

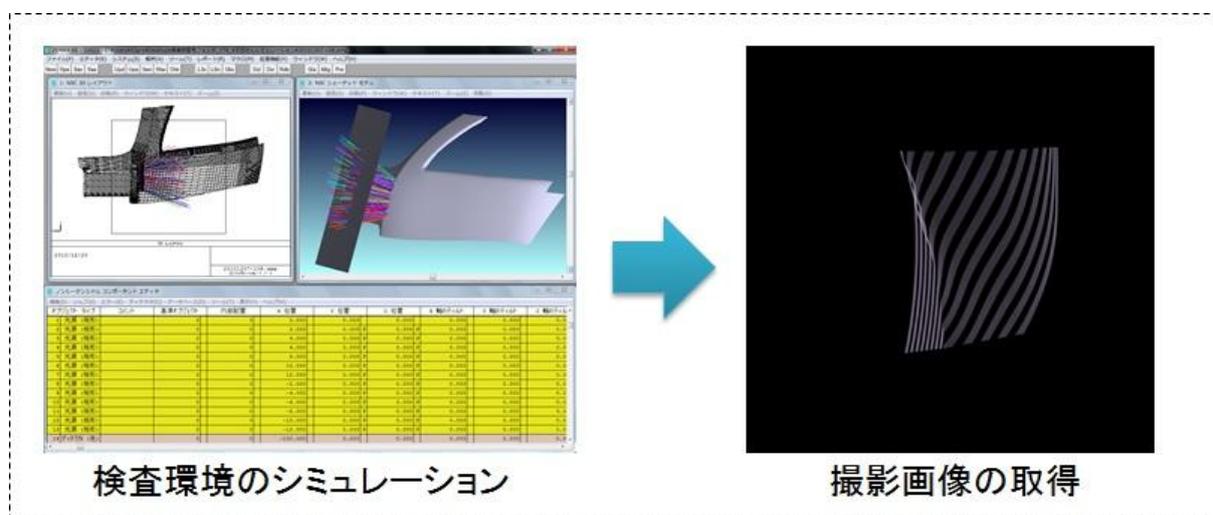
川下企業の塗装検査工程においては、様々な色の車体を同一のラインで検査を実施している。その為、狭小化したスリットを用いた有機 EL 照明と「変曲線マッチング法」を用いて、事業化へ向けて実際の車体生産ラインにて様々な車体色におけるスリットの写り込み状況及び欠陥検査能力の性能評価を実施した。

事前に川下企業から提供頂いたサンプルワークの撮影評価実験から、欠陥検出において塗装表面上のゆらぎの影響(第 2.1.3-1 図)を考慮する必要があることが分かっていた。

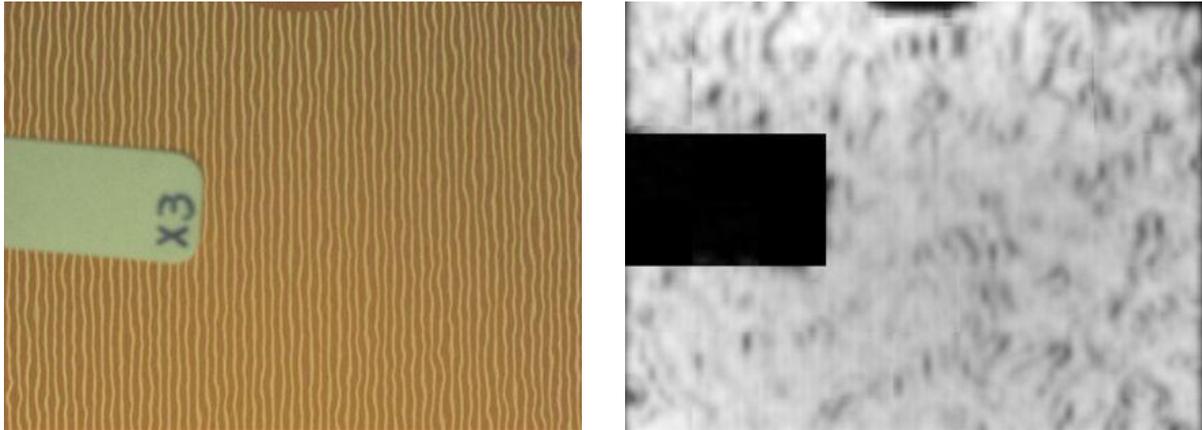


第 2.1.3-1 図 ゆらぎの影響が大きいスリット画像と「変曲線マッチング法」の結果

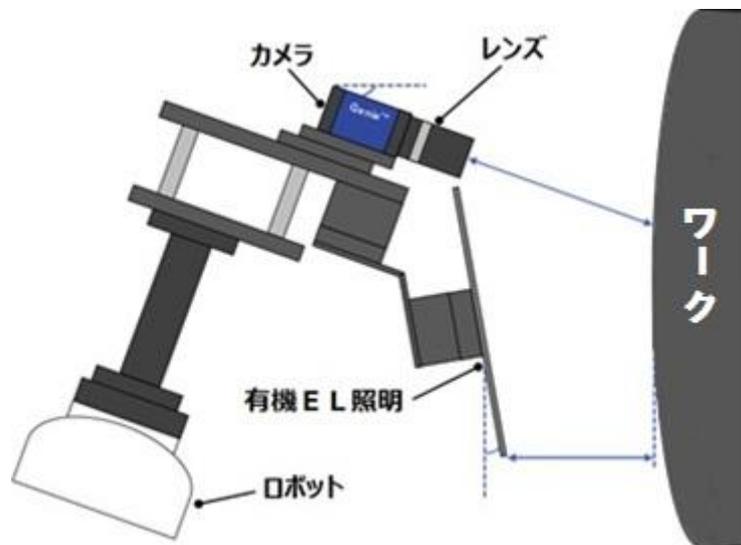
その為、有機 EL 照明、カメラの光学条件の最適化を行うことで塗装表面上のゆらぎを軽減し（第 2.1.3-3 図）、また「変曲線マッチング法」にて使用するパラメータの最適値の算出を行ってから川下企業でのライン検証に挑んだ。尚、光学条件の最適化では「Zemax」という光学設計・評価ソフトウェアでのシミュレーション結果を参考にした（第 2.1.3-2 図）。算出した光学条件を第 2.1.3-4 図に示す。



第 2.1.3-2 図 「Zemax」を用いた光学条件のシミュレーション



第 2.1.3-3 図 光学条件を最適化して撮影したスリット画像と「変曲線マッチング法」の結果



第 2.1.3-4 図 撮影構成図

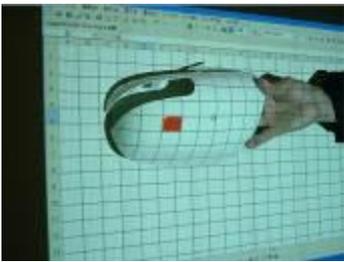
結果として光学条件等の最適化を行ったにも関わらず、ワークの塗装表面上ゆらぎ等の影響による誤検出が非常に多かった。その為、「変曲線マッチング法」の欠陥検出率は 50%であった。但し、設定したパラメータでは検出出来ない欠陥が有ることが判明した為、「変曲線マッチング法」のパラメータを調整して、再度画像処理を行ったところ、欠陥検出率は 70%に向上した。また検出した欠陥の大きさの平均値を測定したところ、あくまでも目安ではあるが、平均値は直径 1.1mm であり、検出した欠陥の最小値は直径 0.161mm であった。

このことから、「変曲線マッチング法」は微小な欠陥に対する検出能力はあるものの、ゆらぎ等による影響で誤検出してしまうことがある。よってゆらぎの影響を受けない光学条件の算出、及び補正方法が求められる。

### 2.1.4 欠陥箇所をマーキングする機能の検討

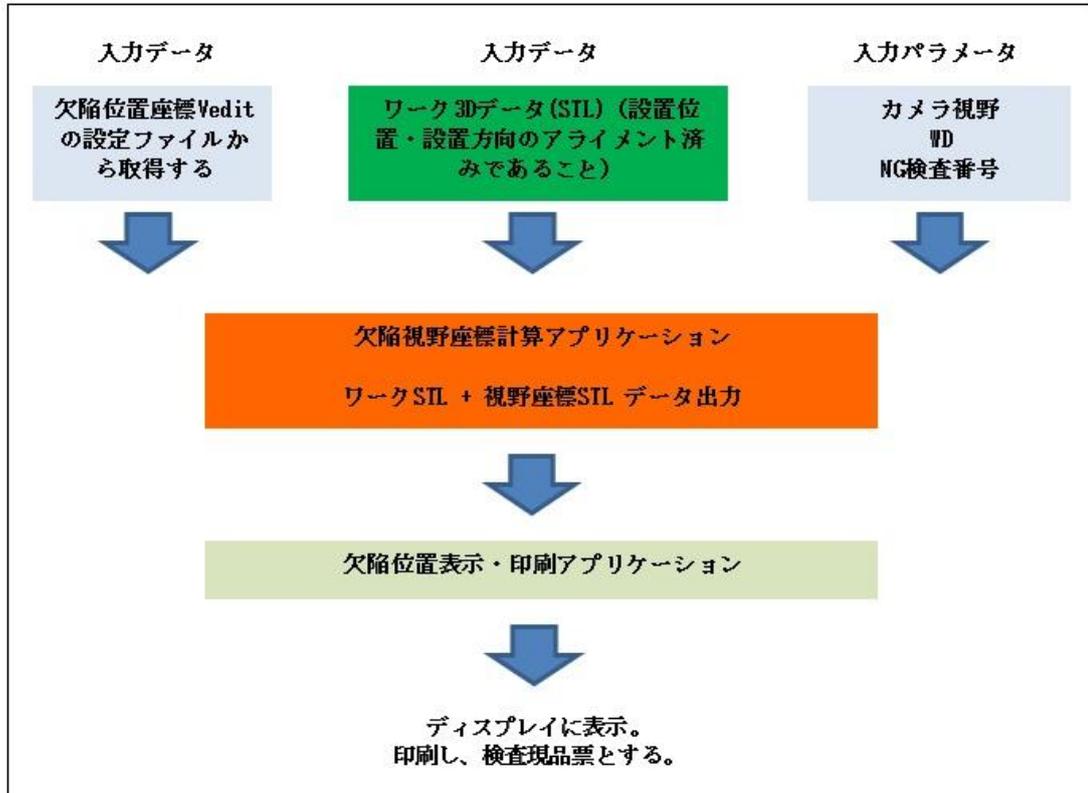
欠陥検査工程を自動化するに当たり、欠陥を検出した場合、欠陥位置を視認する機能は当然のことながら不可欠である。その為、実現可能で有効な欠陥位置視認の手法について検討を行った結果(第2.1.4-1表)、ティーチング座標とワークのポリゴンデータの関連付けを行い、ディスプレイ上に欠陥位置を表示・印刷する手法が有効であるとの判断に至った。そこで本研究では検討した機能を有するソフトウェア開発を行った。

第 2.1.4-1 表 マーキング手法

No.	欠陥位置視認方法	製品接触	課題	可否
1	水溶したコンパウンドや塗料を塗布する	接触	<ul style="list-style-type: none"> <li>水溶したコンパウンドや塗料等の液を塗布した際に飛散する。</li> <li>ディスペンサーと多関節ロボットが新たに必要となる。</li> </ul>	△
2	消せるサインペンを使用する	接触	<ul style="list-style-type: none"> <li>ペン先で製品を傷つける可能性がある。</li> <li>多関節ロボットが新たに必要となる。</li> </ul>	×
3	プロジェクターに投影する 	非接触	<ul style="list-style-type: none"> <li>ワークの曲面部分ではマス目に歪みが発生する為、形状に合わせてマス目のサイズを変える必要がある。</li> <li>後工程の欠陥箇所修正時、作業者がプロジェクターの光を遮ると、欠陥位置が分からなくなる。</li> </ul>	×
4	ディスプレイ上に3D表示。更に表示画面を印刷してワーク治具に貼り付ける。 	非接触	<ul style="list-style-type: none"> <li>ディスプレイ上に欠陥位置を表示するソフトウェアが必要</li> </ul>	○

欠陥位置表示ソフトウェア概略を第 2.1.4-1 図に示す。本ソフトウェアの入力データは Vedit 設定ファイル(ロボットティーチング座標)とワークの STL データである。

入力パラメータはカメラ視野とワーキングディスタンス (WD)、Vedit 上の NG 検査番号である。これらの入力からワークの STL データに欠陥位置 STL データを付加した STL データを出力し、ディスプレイ上に表示する。



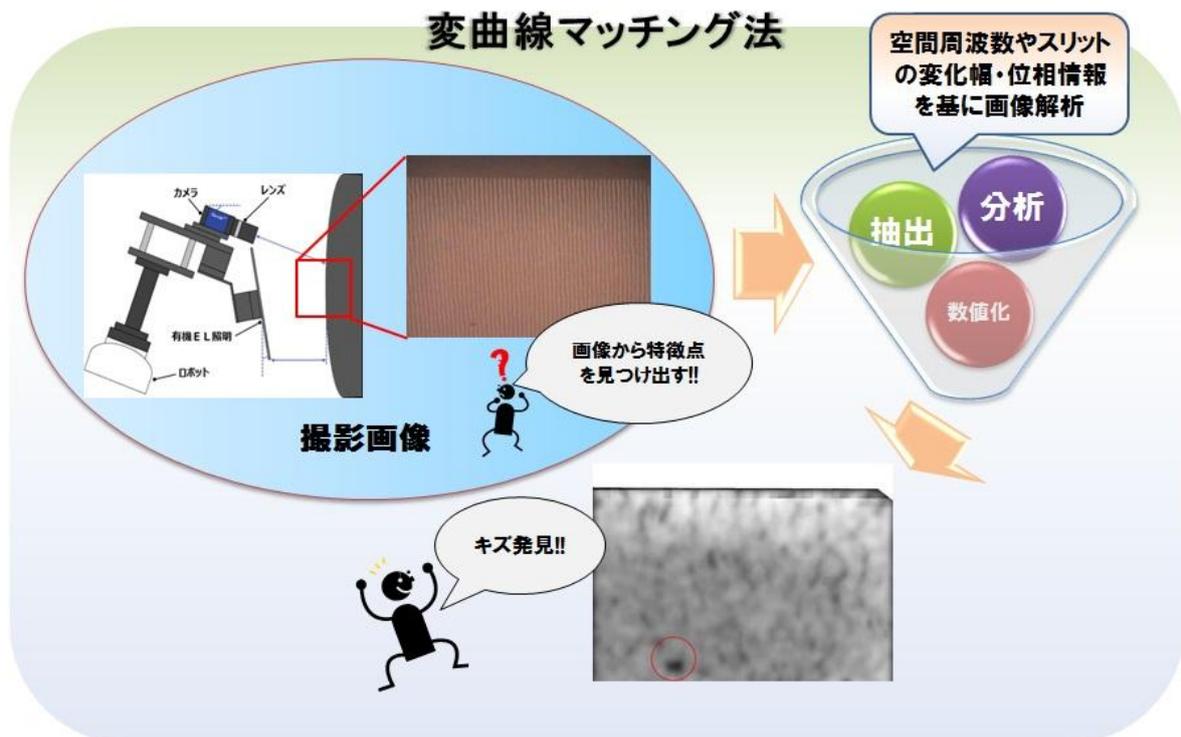
第 2.1.4-1 図 ソフトウェア概略

ティーチングした座標、及び対象ワークの STL を使用し、欠陥位置をディスプレイ上に表示することが出来た。しかし、検査結果を日付で管理する機能やデータベース化する機能等、検査結果表示以外の機能は実装されていない為、事業化に向けてはトレーサビリティの向上を図っていく必要がある。

## 2.2 鏡面・塗装面の微小凹凸検査用システムの開発

### 2.2.1 「変曲線マッチング法」の研究開発

「変曲線マッチング法」の研究開発では、対象物に写り込んだ有機 EL 照明のスリットを撮影した画像から空間周波数や変曲線の変化量と変化幅・位相などの情報を得て、直径 0.25mm の欠陥を 100%検出することが出来るロバストな性能を有したアルゴリズムの開発を実施した。



第 2.2.1-1 図 変曲線マッチング法処理フロー

「変曲線マッチング法」の開発に当たり、我々はガボールフィルタを用いた欠陥検出方法を検討した。ガボールフィルタとは人間の物体認識方法をモデル化したもので、虹彩認識や指紋認識などの生体認証に必要なパターン認識技術にも利用されている。ガボールフィルタは三角関数とガウス関数の積で定義されるフィルタであり、このフィルタとスリット画像から取得した空間周波数情報を掛け合わせることで、局所的変化を強調したデータ、即ち欠陥を抽出しようと考えた。ガボールフィルタの式を第 2.2.1-1 式に示す。

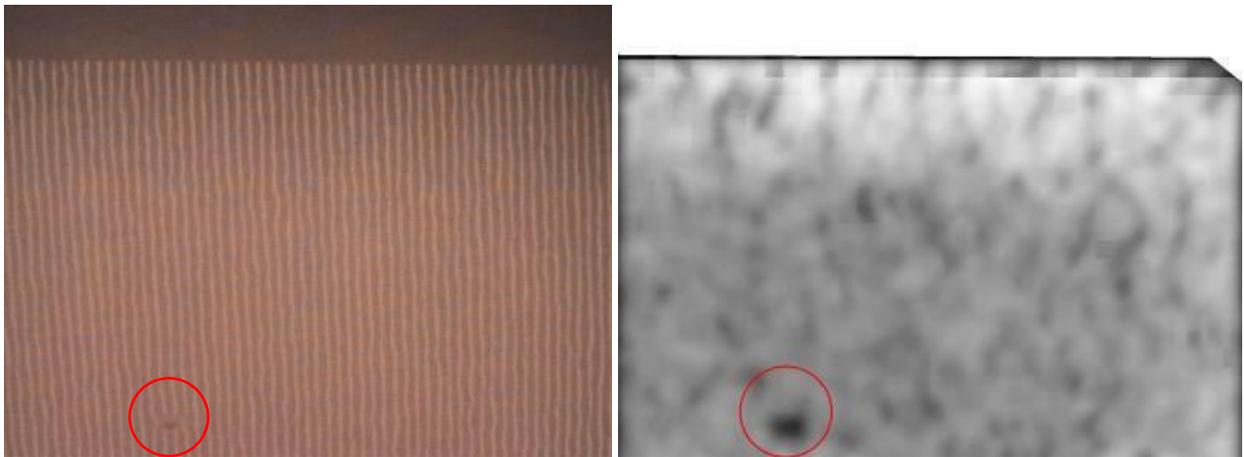
$$g(x, y | \lambda, \theta, \Psi, \sigma, \omega) = \exp\left(-\frac{x'^2 + \gamma^2 y'^2}{2\sigma^2}\right) \exp\left(i\left(2\pi \frac{x'}{\lambda} + \psi\right)\right) \quad \dots \quad \text{第 2.2.1-1 式}$$

$$x' = x \cos \theta + y \sin \theta$$

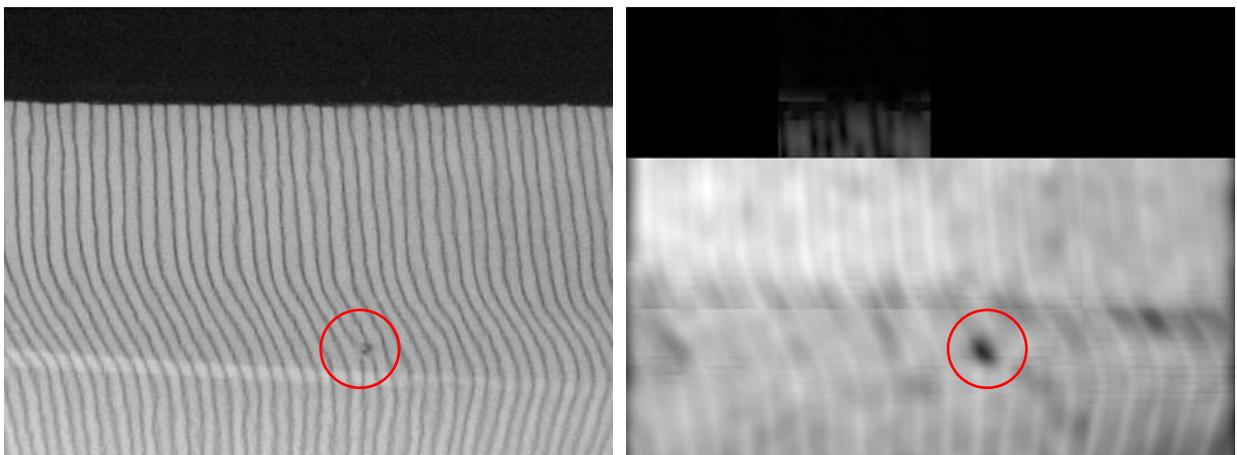
$$y' = -x \sin \theta + y \cos \theta$$

ここで  $\lambda$  は波長のコサイン成分、 $\theta$  はガボール関数の縞模様方向、 $\psi$  は位相オフセット、 $\gamma$  は空間アスペクト比、即ちガボール関数の楕円率を表す。

ガボールフィルタの作成に必要なパラメータは標準偏差、周波数、角度の3つであるが、今回これらのパラメータを自動算出することで、平面や緩やかな曲面、及びキャラクターラインなどの複雑な曲面の欠陥で変化したスリット画像から欠陥をロバストに検出することが可能となった。



第 2.2.1-2 図 平面上の欠陥に対する欠陥検出結果



第 2.2.1-3 図 複雑な曲面上の欠陥に対する欠陥検出結果

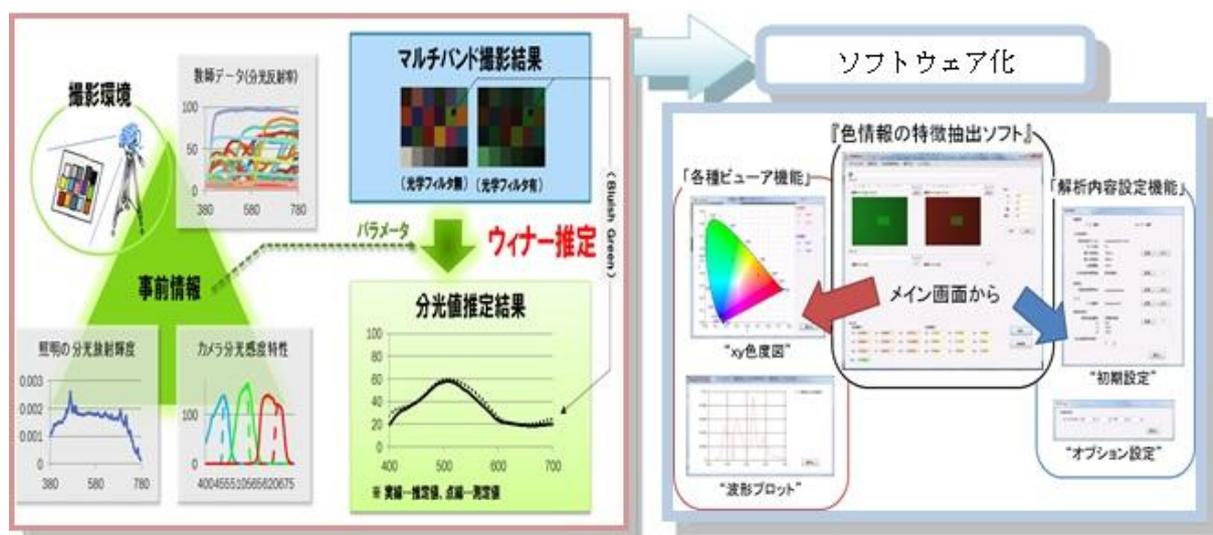
但し、パラメータの自動算出など処理が増えたことで、「変曲線マッチング法」の処理速度が大幅に低下してしまい、実用化の際に本アルゴリズムでは対応出来ない。そこで、GPU を利用することで、「変曲線マッチング」の最適化及び高速化を図ることが可能となり、1 画像当たりの処理速度が 250msec まで到達することが出来た。

更に本アルゴリズムの欠陥検出能力を評価する為に、川下企業のサンプルワークを用いて、欠陥検出能力の評価を実施した。結果としては 2.1.3 で述べている通りワークの欠陥に対しての検出率は 70%程度であり、当初の計画であった直径 0.25mm の欠陥を 100%検出するという目標は達成出来なかった。

## 2.3 塗装面の色・質感自動検査用システムの開発

### 2.3.1 色情報の特徴抽出ソフトウェアの開発

色情報の特徴抽出方法として、カメラによるマルチバンド撮影とウィナー推定の組み合わせにより、撮影対象の分光反射率を数学的に推定する手法を用いた。そして、この手法を「色情報の特徴抽出ソフトウェア」として実装した。



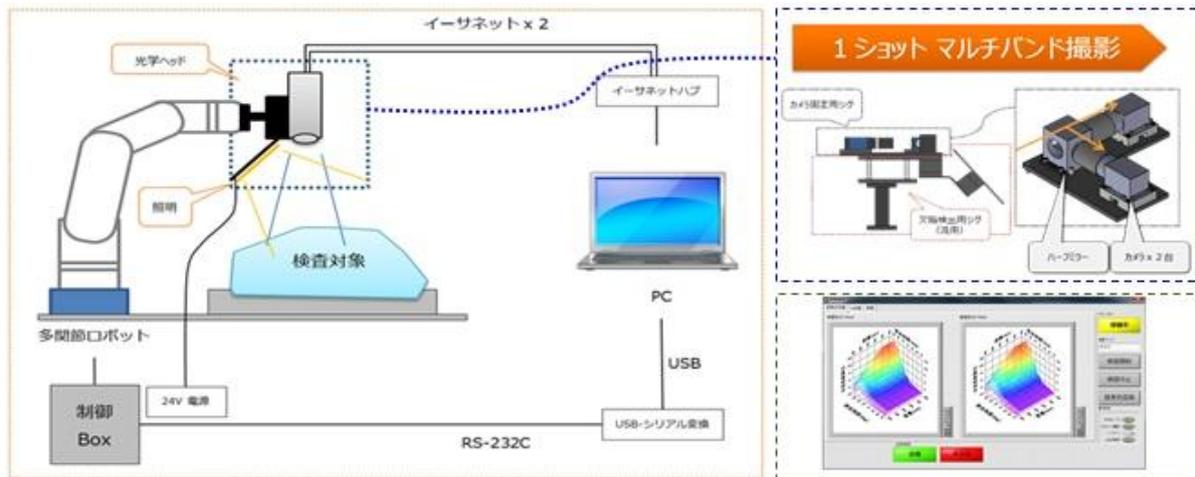
第 2.3.1-1 図 色情報の特徴抽出手法とソフトウェア

### 2.3.2 「変角分光光度測定」を用いた質感の特徴抽出ソフトウェアの開発

メタリックやパール塗装のような照明角度や受光角度による見えの変化が伴う色について、その特徴を捉える手段として「変角分光光度測定」がある。

#### 2.3.2(1) 質感の特徴抽出ソフトウェアを含むシステムの概要

多関節ロボットのアームに光学ヘッドを搭載し、検査対象物に対して「変角分光光度測定」を行うシステムを開発した。



第 2.3.2-1 図 システム構成

このシステムで用いる「質感の特徴抽出ソフトウェア」の機能として、カメラ・ロボットの制御、各種演算処理とウィナー推定処理を行う機能を備えた。また、検査システムとして測定した変角分光光度の3次元グラフ表示と、比較対象の基本色を登録する機能、検査色と基本色の色差を判定し合否判定する機能を作成した。

### 2.3.2(2) 目視官能評価

メタリック・パール色サンプルを含む目視官能評価を第 2.3.2-1 表に示す方法にて行った。

第 2.3.2-1 表 目視官能評価方法と等級表

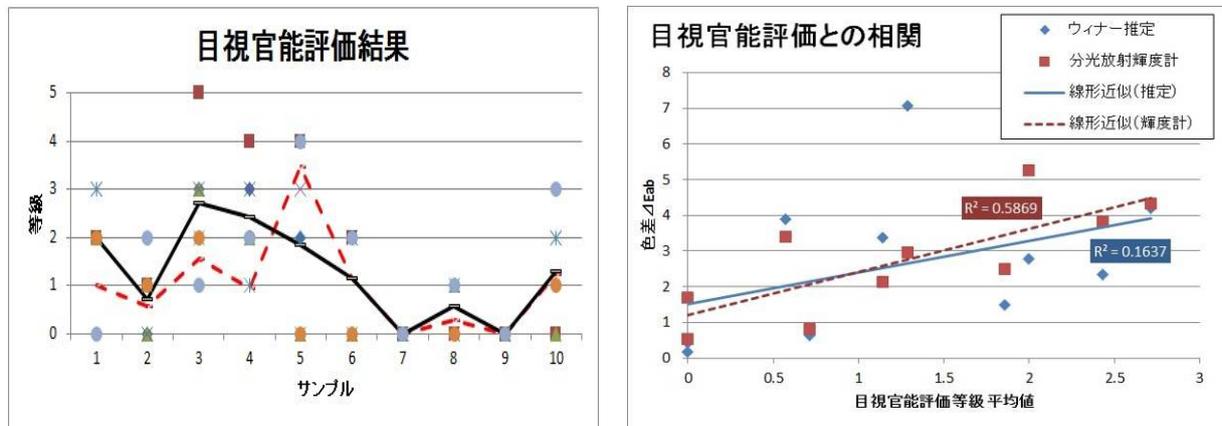
項目	内容
評価方法	JIS Z8090 採点法
試料	2011 オートペイントカラーズ 調色者訓練用肌色サンプル
評価者	素人 7名
環境	室内 (サンプル観察に後述の観察 ボックスを用いる)
等級	色の差

<等級表>

等級	差の程度
0	知覚出来ない差
1	非常にわずか、すなわち、知覚出来る限度の差
2	わずか、しかし明らかに知覚出来る差
3	適度の差
4	かなりの差
5	非常に大きな差

色サンプルは予め分光放射輝度計にて計測し、色差 0.5~5 の適度なものをペアに選び、2 色を観察ボックスに配置し評価した。また、メタリック・パール色のサンプルでは、片方のサンプルにだけ角度を付けて配置し、意図的に色差を作り出している。こうすることで、比較的自由にサンプルを決める事が出来た。

目視官能評価の結果を第 2.3.2-2 図（左）に示す。各点は各色サンプルにおける等級、赤い点線は色サンプル毎の分散、黒線は平均値を示す。また、等級の平均値と分光放射輝度計、及び作成したシステムで測定したウィナー推定結果との相関関係を第 2.3.2-2 図（右）に示す。



第 2.3.2-2 図 目視官能評価結果(左)と推定値、計測値と目視官能評価結果の相関(右)

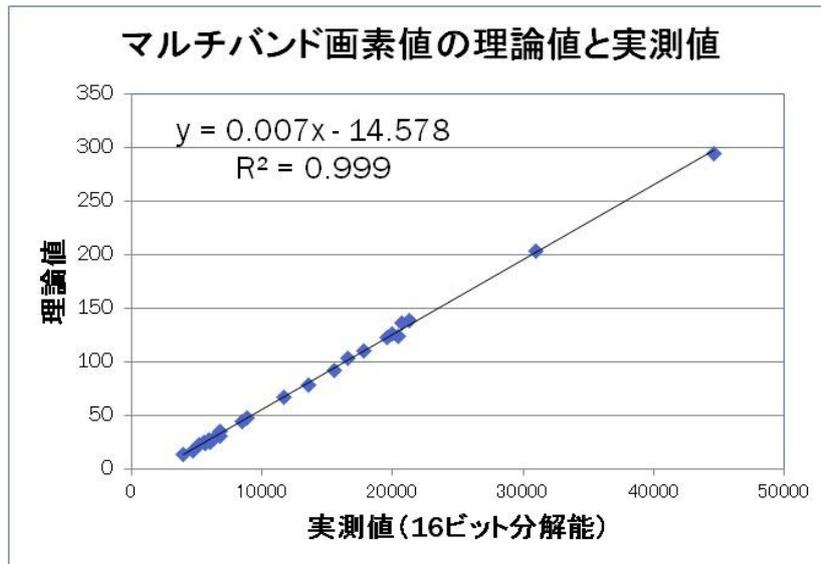
分光放射輝度計については相関係数  $R^2=0.58$  と弱いながらも正の相関関係が認められる。しかし、ウィナー推定については  $R^2=0.16$  と相関関係が認められない。これは、色の検査用光学ヘッドでのウィナー推定結果と、分光放射輝度計での計測値との平均色差  $\Delta E_{a^*b^*}$  が 20 程度と良くなかった為と思われる。

### 2.3.3 「ウィナー推定」の推定精度に関する研究

#### 2.3.3(1) オフセットゲイン補正を用いた分光反射率推定手法

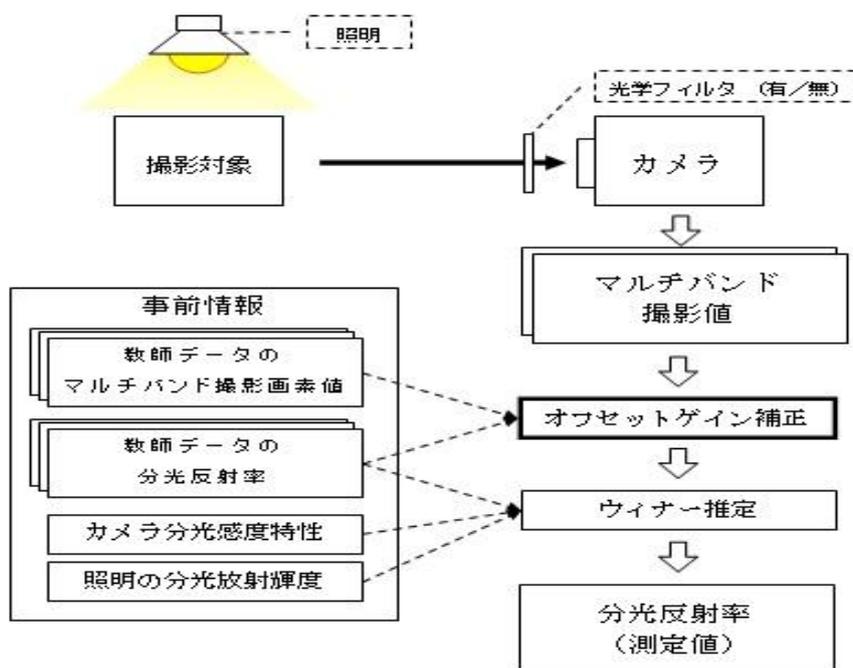
推定精度を向上させるには、事前情報（照明の分光放射輝、カメラの分光感度、教師サンプルの分光反射率）から算出される理論上の撮影環境で計算された画素値と、実際にカメラで撮影された画素値が一致する事が望ましい。この差が開く程、推定精度は悪くなると言われている。<sup>1</sup> しかし、実際にはノイズなどの様々な理由でこれらの画素値は一致しない。例えば、第 2.3.3-1 図の様に撮影対象の分光反射率から求めた理論上の画素値と、実際にカメラで撮影した画素値とは大きく異なる。

<sup>1</sup> 3)山口雅浩."第5章分光画像の記録と再現". 分光画像処理入門. 三宅洋一編. 東京大学出版会, 2006, p. 108-111.



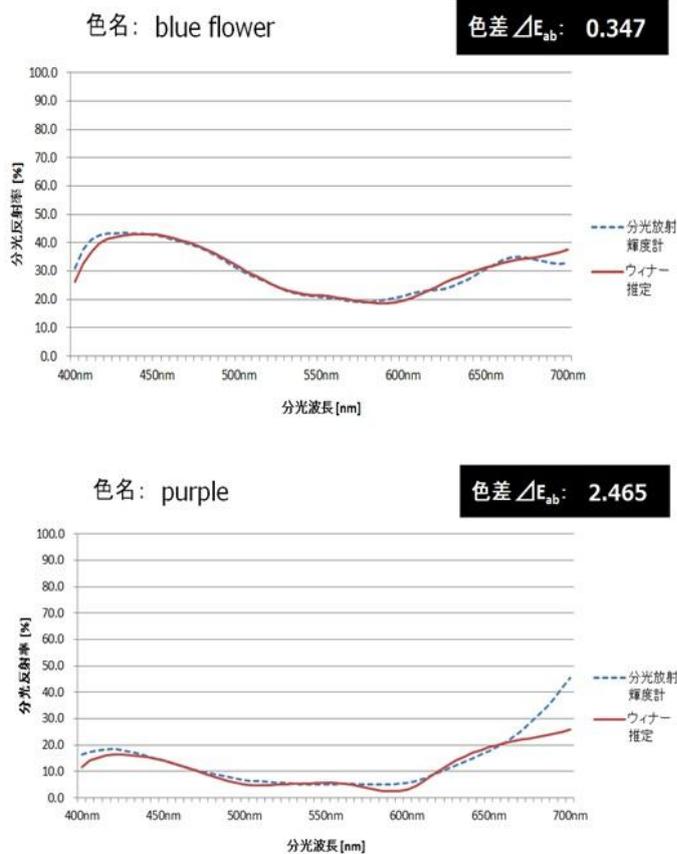
第 2.3.3-1 図 マルチバンド画素値の理論値と実測値の相関

そこで回帰直線から実測値を補正する方法を考えた。



第 2.3.3-2 図 マルチバンド撮影とウィナー推定を用いた分光反射率推定手法の改良

事前情報として、改良前のウィナー推定が必要とするデータの他に教師データのマルチバンド撮影で得た画素値も必要になる。各バンドにおいて理論上の画素値と実測した画素値の関係から回帰直線を求め、傾きをゲイン値、切片をオフセット値として補正を行ってから推定処理する。第 2.3.3-3 図の通り、改良前に比べ格段に精度が向上した。



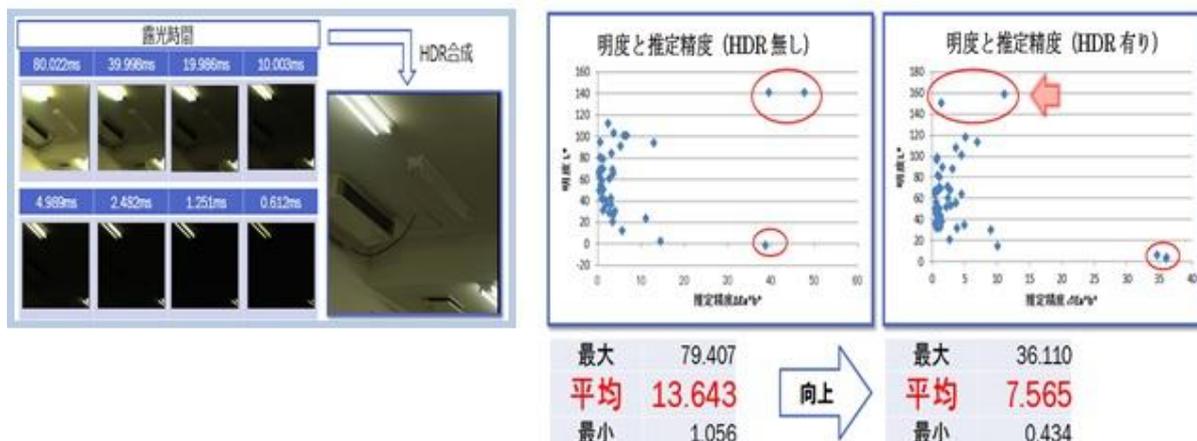
対計測器 (CS-1000 分光放射輝度計) 推定精度

サンプル名	色差 $\Delta E_{ab}^*$	
	改良前	改良後
dark skin	6.648	0.908
light skin	2.106	0.669
blue sky	4.576	0.415
foliage	7.175	1.508
blue flower	4.728	0.347
bluish green	9.237	0.566
orange	10.558	0.972
purplish blue	6.349	1.074
moderate red	7.522	0.484
purple	8.826	2.465
yellow green	10.554	0.847
orange yellow	8.949	1.406
blue	8.102	1.514
green	9.291	0.630
red	10.855	2.462
yellow	10.329	0.459
magenta	9.259	1.381
cyan	8.903	0.882
white	8.725	0.454
neutral 8	6.939	0.524
neutral 6.5	4.516	0.602
neutral 5	0.381	0.329
neutral 3.5	5.858	0.321
black	12.373	2.283
<b>最大</b>	<b>12.373</b>	<b>2.465</b>
<b>平均</b>	<b>7.615</b>	<b>0.979</b>
<b>最小</b>	<b>0.381</b>	<b>0.321</b>

第 2.3.3-3 図 改良手法のウィナー推定結果と精度

### 2.3.3(2)メタリック・パール塗料への対応検討

自動車塗料で多く用いられるメタリック色やパール色の塗装は、照明と観察する角度によって明暗の差が大きく変化する。「変角分光光度測定」を行う上で、この明暗の差を撮影出来る環境が必要となる。通常のカメラで暗い所と明るい所の両方を一度に撮影すると、明るすぎる部分は白く飛び、暗すぎる部分は黒く潰れる。そこで、カメラの露光時間を調整し、徐々に明るさを絞って暗く撮影するようにし、後から画像処理によって画素値の連続性を保ったまま合成した。これはハイダイナミックレンジ合成 (HDR 合成) という手法である。この手法を用いたメタリック・パール色サンプルのウィナー推定精度は平均値で約 7.5 となり、通常の 13.6 よりも精度が向上した。



第 2.3.3-4 図 HDR 合成とメタリック・パール色サンプルのウィナー推定精度

本研究ではオフセットゲイン補正とハイダイナミックレンジ合成の2つの手法により推定精度を向上させる事が出来た。但し、実験では上手くいった方法でも 2.3.2 のようにシステム化すると推定精度が悪くなるなど、未だ試行錯誤の状態である。

## 2.4 事業化に向けた装置仕様の策定

事業化に向けての第一歩として、本研究で開発した光学ヘッド、また「変曲線マッチング法」を用いて、川下企業で事業化へ向けた欠陥検出能力の評価をさせて頂いた。結果としては事前に光学条件の最適化や「変曲線マッチング法」のパラメータ調整を行っていたにも関わらず、直径 0.25mm の欠陥を 100%検出することが出来ず、また数多くの課題が発生した。検証後、今回の成果から事業化へ向けた課題抽出を行い、課題解決の為、今後の方針について検討した。第2表に主な課題と今後の方針を示す。

第2表 主な課題と今後の方針

個別課題		今後の方針	
欠陥 検出	画像処理	<ul style="list-style-type: none"> <li>・表面上のゆらぎによる誤検出</li> <li>・処理速度の向上</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・新たなアルゴリズムの検討またはスリット光以外の照明の検討</li> <li>・アルゴリズムの改良及びハードウェア化</li> </ul>
	光学 ヘッド	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ワークとヘッドの干渉</li> <li>・光源の明るさが足りない</li> <li>・表面上のゆらぎに影響されない撮影方法</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ヘッドの小型化</li> <li>・光源の輝度向上若しくは補助照明の使用</li> <li>・光学条件の再検討</li> </ul>
	ロボット 制御	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ロボットの動作速度</li> <li>・ロボットのアーム長不足</li> <li>・位置再現性</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・高性能かつ大型ロボットの使用</li> </ul>
	システム	<ul style="list-style-type: none"> <li>・治具の位置決め精度</li> <li>・マーキング機能の不足</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・画像処理で位置補正機能の追加</li> <li>・継続して最適なマーキング方法の検討</li> </ul>

第2表の結果を見ても分かる通り、ライン検証で判明した課題が数多く残っている為、目標であった事業化に向けての仕様作成までには至らなかった。

## 最終章 全体総括

本研究を通じて自動外観検査用光学ヘッドを搭載したロボット制御システムがほぼ完成し川下企業の製造現場に於けるライン検証を行うことが出来た。

光学ヘッドに搭載する有機 EL 照明は、事業化を考慮し量産設備を持った製造会社で試作を行い評価することが出来た。これまでに試作した照明と比較して、制御回路を照明本体に組み込むことでより小型で軽量の照明を作ることが出来た。

変曲線マッチング法については、アルゴリズムの最適化を図ると共に、GPU を用いて高速化を図った結果、1 画像当たりの処理時間を 250msec 以下にすることが出来た。

こうした成果をもとに、川下企業に於いてライン検証を実施して多くのデータを集めることが出来たのが本研究の最大の収穫である。同時に、事業化へ向けての課題も見つかった。今後は、川下企業と共に問題解決を図り川下企業への設備導入に結び付けるよう開発を継続して行く。また、塗装工程を持つ製造業に於ける目視検査工程の省人化を事業ターゲットとして開発を継続し事業化を行う。

「変角分光光度測定」を用いた質感の特徴抽出ソフトウェアの開発では、塗装色の特徴を数値化することが出来たが、ウィナー推定の精度面で課題が残った。カメラを使用した測色については面における色のバラツキやムラなどを検査出来るメリットがある。今後は、精度向上を行い事業化出来るよう開発を継続して行く。

本研究に於いて、様々な場面でアドバイスをいただきました青木孝文先生に深謝いたします。また、アドバイザーの皆様のご協力に感謝申し上げます。皆様のご助力のおかげで本研究開発では、多くの成果を上げることが出来ました。本当にありがとうございました。

## 参考文献

- 1) 豊田えみ子, 坪内健治郎. "塗料・塗装と分析技術－表面・局所の分析－". 塗料の研究. 2003.12, no. 141, p. 27-34.
- 2) Lin Hong, Yifei Wan, and Anil Jain. "Fingerprint Image Enhancement: Algorithm and Performance Evaluation". IEEE Trans. on PAMI. 1998.8, vol. 20, no. 8, p. 777-789.
- 3) 山口雅浩. "第5章分光画像の記録と再現". 分光画像処理入門. 三宅洋一編. 東京大学出版会, 2006, p. 108-111.