

平成 22 年度予備費事業 戦略的基盤技術高度化支援事業

「熱画像センサとステレオビジョンによる
高度なホットメルト検査システムの開発」

成果報告書概要版

平成 24 年 1 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 研究開発の目的・概要	1
1.1.1 研究開発の目的	1
1.1.2 研究開発の概要	1
1.2 研究体制	4
1.2.1 研究組織	4
1.2.2 管理体制	5
1.2.3 管理員および研究員	6
1.2.4 協力者（アドバイザー）	7
1.3 成果概要	8
1.3.1 事業計画履行状況	8
1.3.2 目標達成度	11
1.4 研究実施場所	12
1.5 当該プロジェクトの連絡窓口	12
第2章 本論	13
2.1 3次元熱画像マッピングシステムの構築	13
2.1.1 3次元計測手法の検討	13
2.1.2 カメラキャリブレーション技術の開発	14
2.1.3 同期取り込み技術の開発	14
2.1.4 温度補正処理技術の開発	15
2.2 接着状態の異常判定アルゴリズムの開発	16
2.2.1 正規化熱画像の生成	16
2.2.2 接着領域・接着面積・接着位置の推定	16
2.2.3 接着の良否判定	18
2.3 アルゴリズムの高速化	19
2.3.1 並列処理化の検討	19

2.3.2	並列処理化の最適化	20
2.4	プロトタイプシステムの開発と評価	21
2.4.1	プロトタイプシステムの開発	21
2.4.2	能動型 3 次元測定手法と高解像度熱画像装置を用いた比較評価.....	23
第 3 章	全体総括	25
3.1	研究開発成果	25
3.2	研究開発後の課題・事業化展開	26
3.2.1	今後の課題	26
3.2.1	事業化計画	26

第1章 研究開発の概要

1.1 研究開発の目的・概要

本特定研究開発等計画は、中小企業の特定制品づくり基盤技術の高度化に関する指針(平成19年経済産業省告示第25号 平成20年度変更)に掲げる事項のうち、以下の項目に対応している。

(一) 組込みソフトウェアに係る技術に関する事項

1. 組込みソフトウェアに係る技術において達成すべき高度化目標

(1) 産業機械及び産業用ロボットに関する事項

①川下製造業者等の抱える課題及びニーズ

イ. 高品質・短納期・低コスト

エ. 新たな適合分野への対応

(5) 川下分野横断的な共通の課題・ニーズに関する事項

①川下製造業者等の抱える共通の課題及びニーズ

ア. コスト削減

ウ. 品質の向上

1.1.1 研究開発の目的

ホットメルトの接着検査を正確に行うことは各種製造業にとって重要な問題であり、より精度が高く、安心・安全な接着検査へのニーズは確実に高まっている。

本研究開発では、熱画像センサとステレオカメラ等を用いて、接着されたホットメルト接着面の温度、形状、位置、面積(量)を精密に測定する新たな手法を開発する。本システムは従来の検査システムに比べ、ホットメルトの接着状態、位置、面積(量)を正確に検査可能であり、接着不良による包装不良を防ぎ、包装後の製品不良発生を防止できる。

さらに、上記特徴により運送中の事故を防止し、生産性の向上と安心、安全を図るものである。

また、本検査システムは、ダンボールの包装のみならず、食品業界、その他様々な製造企業の検査ラインの高度化を可能とする。

1.1.2 研究開発の概要

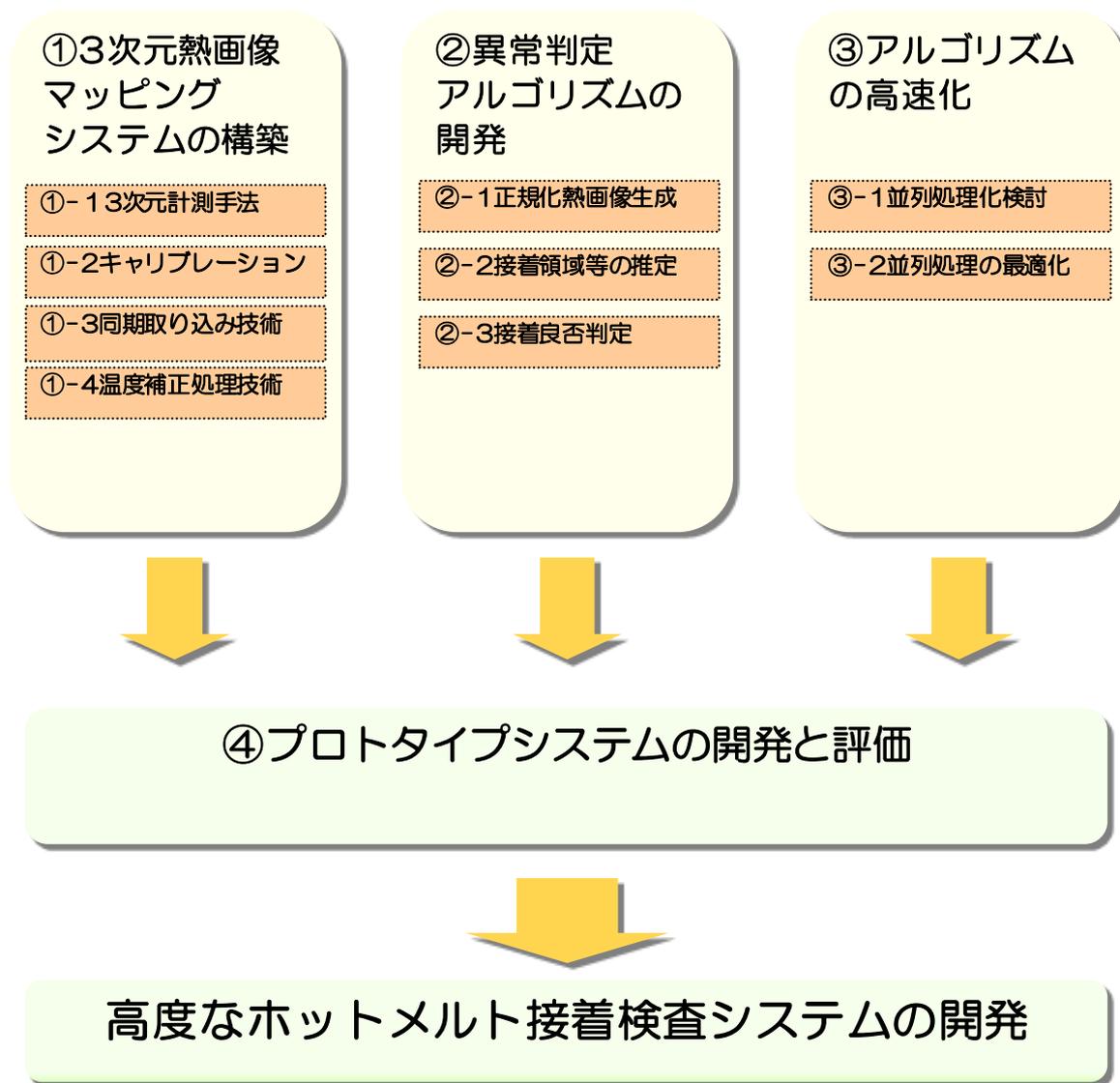
位相限定相関法等の高精度な画像マッチング手法を活用した3次元計測技術と、熱画像を組み合わせた新たな検査手法による、被着体の外観を認識した接着面の3次元計測、形状、面積(量)を同時に計測できる高度なホットメルト接着検査システムを開発する。

本研究開発では、3次元計測技術を用いた3次元モデル上に、熱画像センサから取得した熱画像を正確な位置にマップする3次元熱画像マッピングシステムを構築し、その3次元熱画像マップ情報から接着領域・接着面積・接着位置を推定し、接着状態の良否判定を行う異常判定アルゴリズムを構築する。

また、生産ライン上の製品検査に適用するためには、計算処理のリアルタイム化が必須で

あるため、汎用で安価なハードウェアアクセラレータである GPU を活用し、計算処理の高速化を図る。

さらに、本事業で開発したホットメルト検査システムの事業化を見据え、実際の生産ラインの検査要件を想定したプロトタイプシステムの開発を進めながら妥当性検証を実施する。本研究開発の課題を第 1.1.2-1 図に体系的に示し、各々について概要を説明する。



第 1-1-2-1 図 本研究開発の開発課題体系図

課題①：3次元熱画像マッピングシステムの構築

ステレオカメラ等で取得した検査対象物の3次元形状情報から生成したポリゴンメッシュ上に、熱画像センサから取得した熱画像を正確な位置にマップする手法を確立する。

課題②：接着状態の異常判定アルゴリズムの開発

温度補正後の3次元熱画像マップ情報から、画像上の接着面を射影変換することで、既定サイズの四角形の画像に変換した正規化熱画像を生成する。そして、あらかじめ設定した温度を基準として正規化熱画像からホットメルトが接着された領域を抽出する。この抽出領域に対し画像処理を施し、その領域、面積、位置をパラメータ推定する。最後にこれらのパラメータから接着状態の成否判定を行う。

本アルゴリズムの開発には、疑似検査ラインを想定したホットメルト検査システムテスト装置を用い、実験用のダンボールのホットメルトを塗布し、その疑似検査ラインから得られたデータと、実際の検査ラインから得られたデータを用いる。

課題③：アルゴリズムの高速化

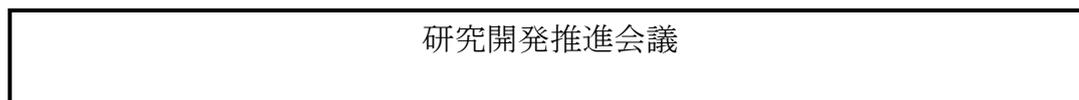
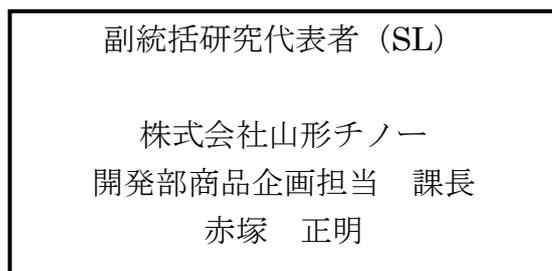
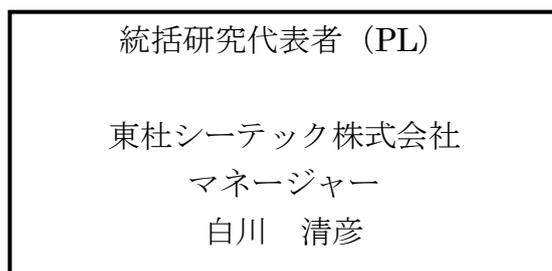
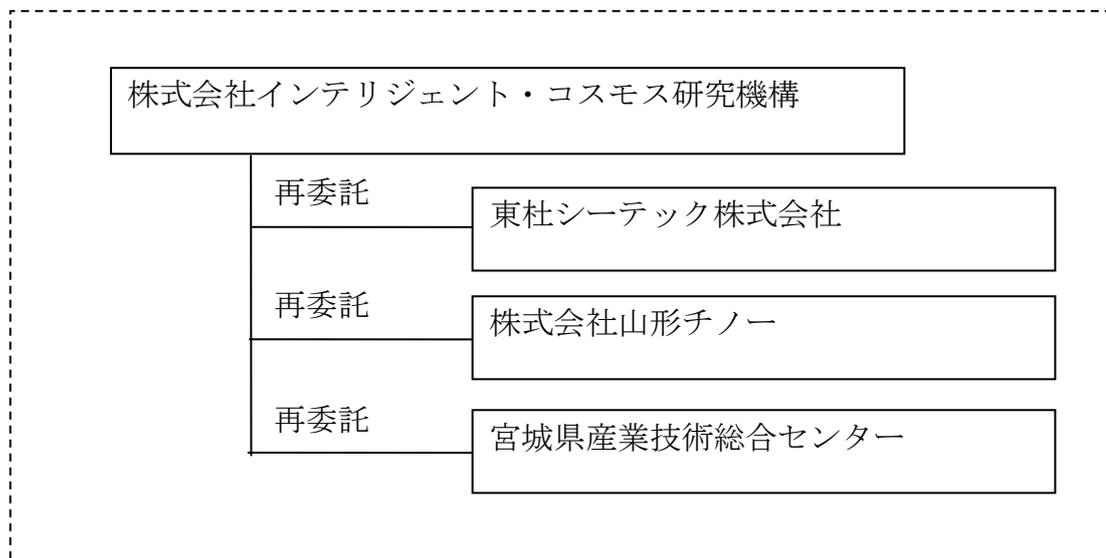
①および②で開発したアルゴリズムを、生産ライン上の製品の検査に適用するためには計算処理のリアルタイム化が必須である。一般に3次元画像計測処理および画像認識処理には多大な計算量が必要とされ、この計算量は計測精度とトレードオフの関係にある。リアルタイム性を損なうことなく高精度に計測を行うため、処理をピクセル単位で100万以上のスレッドに分割し、汎用的で安価なハードウェアアクセラレータであるGPU搭載マシンを活用する。

課題④：ホットメルト検査装置プロトタイプシステムの開発と評価

3次元熱画像マッピングを用いたホットメルト接着剤の接着状態を検査するプロトタイプシステムを開発する。実際の生産ラインにおいてテストを行うために、検査要件にあわせたハードウェア構成などについても検討・構築を行う。作成したプロトタイプシステムは、性能評価を実施する。

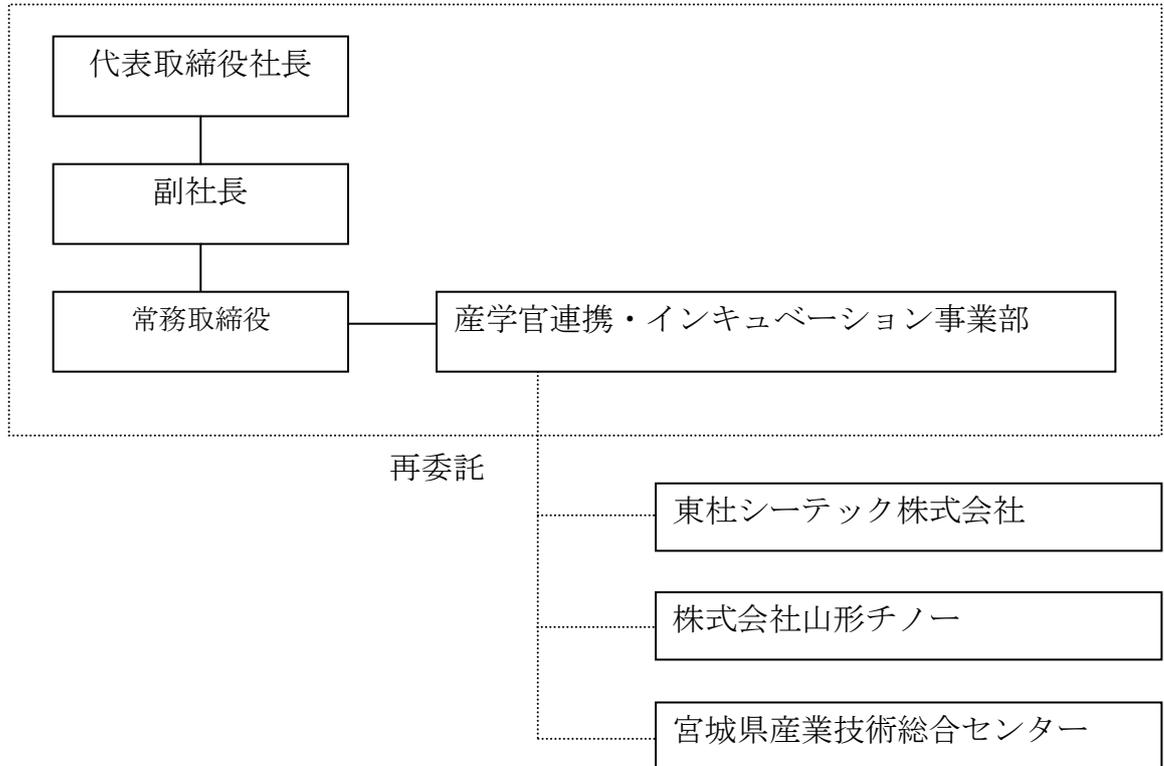
1.2 研究体制

1.2.1 研究組織



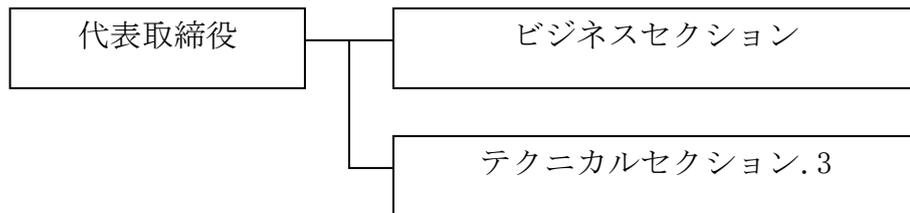
1.2.2 管理体制

①事業管理者（株式会社インテリジェント・コスモス研究機構）

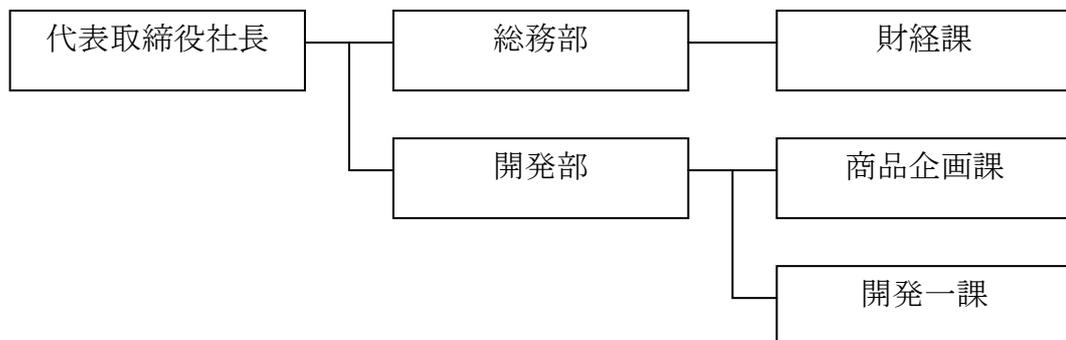


②再委託先

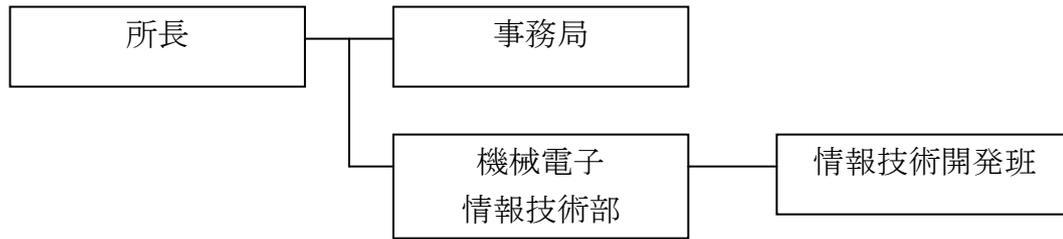
東杜シーテック株式会社



株式会社山形チノー



宮城県産業技術総合センター



1.2.3 管理員および研究員

【事業管理者】株式会社インテリジェント・コスモス研究機構

管理員

氏名	所属・役職
田村 光男	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
池田 由美	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）】

東杜シーテック株式会社

氏名	所属・役職
白川 清彦	テクニカルセクション. 3 マネージャー
高橋 愛	テクニカルセクション. 3 チーフ
関口 尚大	テクニカルセクション. 3 チーフ
藤江 英里子	テクニカルセクション. 3
鈴木 直樹	テクニカルセクション. 3
鈴木 智浩	テクニカルセクション. 3
村山 結美	テクニカルセクション. 3
三浦 真実	テクニカルセクション. 3
藤丸 拓	テクニカルセクション. 3
平 慎太郎	テクニカルセクション. 3
飯川 賢太	テクニカルセクション. 3
村山 友美	テクニカルセクション. 3
今野 範明	テクニカルセクション. 3
相澤 和宏	テクニカルセクション. 3
佐々木 謙太	テクニカルセクション. 3
河村 崇正	テクニカルセクション. 3
真鍋 俊久	テクニカルセクション. 3

上野 裕也	テクニカルセクション. 3
後藤 勝巳	ビジネスセクション セールスマネージャー
佐藤 恵理	ビジネスセクション セールスエンジニア

株式会社山形チノー

氏名	役職・所属
赤塚 正明	開発部 商品企画担当 課長
山澤 裕之	開発部 1 課 課長
吉泉 徹	開発部 1 課 係長
長尾 浩敏	開発部 1 課 主任

宮城県産業技術総合センター

氏名	役職・所属
太田 晋一	機械電子情報技術部 情報技術開発班 技師

1.2.4 協力者（アドバイザー）

氏名	所属・役職	主な指導・協力事項
青木 孝文	東北大学大学院 情報科学研究科 教授	位相限定相関法、画像処理における技術指導
菊池 務	東北大学大学院工学研究科 IIS 研究センター 特任教授	画像処理における技術指導
小林 孝次	株式会社山武 技術開発本部基幹技術開発部 コントロールグループ 主席技師	プロトタイプ開発における技術指導
土屋 浩	株式会社ハイテックシステム 代表取締役	GPU 搭載マシンにおける技術指導
土井 義浩	株式会社ハイテックシステム 取締役	組込み製品開発における技術指導
湯浅 勉	有限会社湯浅製作所 代表取締役	検査装置における技術指導

1.3 成果概要

1.3.1 事業計画履行状況

以下に、各課題に対して履行状況を説明する。

1.3.1.1 3次元熱画像マッピングシステムの構築

(1) 3次元計測手法の検討

3次元形状モデルと可視カメラを用いて検査対象の面推定、姿勢推定可能な最小コストでの3次元計測アルゴリズム検討を実施し、3次元形状モデルと可視カメラによる簡易3次元計測手法を構築した。検査対象の面抽出精度をダンボール側面の4点から確認した結果、最大誤差は1.45mmを確認。目標値の±5mmの範囲内であることを確認し、目標を達成することが出来た。

(2) カメラキャリブレーション技術の開発

熱画像センサと可視カメラ間のカメラキャリブレーション手法を開発するため、熱画像センサ、可視カメラ間で同一特徴点を得るためのキャリブレーションボードを開発。キャリブレーションボードは3回の試作を行い、最終的には、現場生産ラインでもキャリブレーションが出来るサイズのキャリブレーションボードを開発。また、熱画像センサー可視カメラ間のキャリブレーション精度を確認した結果、最大再投影誤差は、2.22mmを確認。目標値の±5mmの範囲内であることを確認し、目標を達成することが出来た。

(3) 同期取り込み技術の開発

本3次元熱画像マッピングシステムでは、検査対象に対して、熱画像センサと可視カメラの位置関係は同一状態で撮影（同期取り込み）しなければならない。そのため、熱画像センサと可視カメラの同期取り込み手法の検討を実施し、熱画像センサとレーザセンサ（外部トリガ）を組み合わせた同期取り込み手法を開発。本手法で開発した同期取り込みの効果を確認した結果、位置抽出精度が目標値の±5mmの範囲内であることを確認し、目標を達成することが出来た。

(4) 温度補正処理技術の開発

熱画像センサの補正に用いる測定対象までの距離と測定対象の面積から温度補正を行う数式から撮影距離に対して簡易的な温度補正を行う手法の検討を実施し、簡易温度補正アルゴリズムを構築した。ただし、本研究開発で開発するホットメルト検査システムでは、絶対温度が重要でなく、ホットメルトが塗布された領域（熱源）とそれ以外の温度差が重要であることが判明した。そのため、プロトタイプシステムには導入せず。ただし、今後事業化を進める上で、さらに温度差を明確にする必要が生じた場合は有効な手段といえるので活用していく。

1.3.1.2 接着状態の異常判定アルゴリズムの開発

(1) 正規化熱画像の生成

3次元熱画像マッピングシステムで確立した3次元計測手法、熱画像センサー可視カメラ間のキャリブレーション手法により、可視画像からダンボール測定面を確定し、さらに熱画像上から対応する測定面を抽出しアフィン変換することで、接着領域推定および良否判定可能な正規化熱画像を生成する手法を確立した。

(2) 接着領域・接着面積・接着位置の推定

正規化熱画像から接着領域を抽出するための二値化閾値の算出方法の検討を実施。正規化熱画像の平均温度、標準偏差および係数から接着領域を抽出する二値化閾値を算出する方法を確立した。また、抽出した接着領域より接着状態の良否判定を行うための接着面積、位置を推定するアルゴリズムを開発し、精度検証を実施。精度検証の結果、ホットメルト検査システムとして要求される精度の範囲内であることを確認した。

(3) 接着の良否判定

接着領域・接着面積・接着位置の推定するための二値化閾値をもとに正規化熱画像を二値化画像へ変換し、接着状態の異常判定を行うアルゴリズムを開発。ホットメルト検査システムテスト装置と実際のフィールドにてテストを実施し効果を確認。ただし、パターン認識手法が確立できるほどのデータ収集は得られておらず、今後、フィールドテストを通してデータ収集を行い、さらに良否判定精度を向上していく。

1.3.1.3 アルゴリズムの高速化

(1) 並列処理化の検討

①3次元熱画像マッピングシステムの構築および②接着状態の異常判定アルゴリズムで開発したアルゴリズム内で、リアルタイム処理化する上でボトルネックとなるアルゴリズム、並列処理可能なアルゴリズムの調査・検討を実施した。その結果、①の簡易3次元計測手法内の面抽出処理（特徴量抽出アルゴリズム）が処理全体の約50%を占めることが判明した。当該アルゴリズムをGPGPUを用いて高速化し、速度検証を行った結果、試作段階で約15倍の高速化を実現した。なお、特徴量抽出アルゴリズムは入力パラメータにより速度が可変するため、パラメータによっては15倍以上の高速化が実現可能であることを確認した。

(2) 並列処理の最適化

ボトルネックアルゴリズムの GPGPU 化による高速化の効果を確認し、今後事業化を進める上で有効な手段であることが実証できた。

ただし、並列処理の最適化を行わなくても目標のタクトタイムを達成することが確認できた為、プロトタイプシステムへの実装は行っていない。今後、事業化を進める上で、必要に応じて本技術を活用したい。

1.3.1.4 プロトタイプシステムの開発と評価

(1) プロトタイプシステムの開発

①～③で開発したアルゴリズムの妥当性評価のため、プロトタイプシステムを開発した。プロトタイプシステムは、3つのフェーズで開発した。フェーズ1では、3次元熱画像マッピングシステムを検証し、フェーズ2では、ホットメルト検査システムテスト装置での動作検証を行った。さらにフェーズ3では、実ラインでの動作検証することを目的とし、検証および各フェーズでの課題の洗い出しを実施した。その結果から、熱画像センサー可視カメラ間のキャリブレーション精度向上、簡易3次元計測手法の精度向上および良否判定アルゴリズムの精度向上を実施した。

(2) 能動型3次元測定手法と高解像度熱画像装置を用いた比較評価

高解像度熱画像装置及び能動型3次元測定器を用いた検査対象物の実測データと、本提案システムの実測データとの比較評価を実施した。本提案システムでは、低コスト化を実現するために低解像度の熱画像センサを用いたシステム構成としており、比較評価では、主に当該熱画像センサと高解像度の熱画像センサの精度検証を実施した。その結果から、本提案システムで採用したセンサ構成が精度として必要十分でありシステムを構成する製品の価格が高精度な計測機器に比べ、コスト的に優れていることが確認できた。

1.3.2 目標達成度

3次元熱画像マッピングシステムの構築	目標値	実績値	
キャリブレーションパラメータの推定精度	誤差±5mm	2.22mm	○
温度情報の補正	誤差±2%以内	補正不採用	—

接着異常判定アルゴリズムの開発	目標値	実績値	
接着面積の推定誤差	誤差±25mm ²	面積比で判定	△

アルゴリズムの高速化	目標値	実績値	
ボトルネックアルゴリズムの高速化	CPU比10倍	CPU比15倍	○
接着状態の検査処理時間	2.0秒以内	2.0秒以内	○

プロトタイプシステムの開発と評価	目標値	実績値	
ホットメルト接着面の温度計測値	±2%以内	2.0%	○
補正を行った温度計測値	±2%以内	補正不採用	—
接着領域の推定面積	誤差±25mm ²	面積比で判定	△
接着領域の推定位置	誤差±5mm	x : ±3.6mm y : ±3.56mm	○

以上のことから本研究開発では、概ね目標を達成し、ホットメルト検査システムとしてベースとなる要素技術を開発はできた。

なお、接着異常判定アルゴリズムの開発における「接着面積の推定誤差」、プロトタイプシステムの開発と評価における「接着面積の推定誤差」については、相対面積比による判定でも十分実用化できると考え面積比を用いた判定方法を採用している。ただし、今後、定量的な判定方法が必要となった場合は、それに応じて補完研究を行い、判定手法を構築する予定である。

1.4 研究実施場所

東杜シーテック株式会社（最寄り駅：JR 北仙台駅）

〒981-0913 宮城県仙台市青葉区昭和町 5-23

株式会社山形チノー（最寄り駅：JR 天童駅）

〒994-0002 山形県天童市大字乱川 1515

宮城県産業技術総合センター（最寄り駅：仙台市地下鉄 泉中央駅）

〒981-3206 宮城県仙台市泉区明通 2-2

1.5 当該プロジェクトの連絡窓口

株式会社インテリジェント・コスモス研究機構（担当：田村、池田）

〒989-3204 宮城県仙台市青葉区南吉成六丁目 6 番地の 3

電話 022-279-8811（代）

第2章 本論

熱画像センサとステレオカメラ等を用いて、接着されたホットメルト接着面の温度、形状、位置、面積（量）を精密に測定する新たな手法を開発した。手段として3次元計測技術を用いた3次元モデル上に、熱画像センサから取得した熱画像を正確な位置にマップする3次元熱画像マッピングシステムを構築し、その3次元熱画像マップ情報から接着領域・接着面積・接着位置を推定し、さらに接着状態の良否判定を行うアルゴリズムを構築した。本システムの検証として、確立したアルゴリズムを搭載したプロトタイプの実験システムを作成し実証試験を行い、概ね予定通りの動作を確認した。

2.1 3次元熱画像マッピングシステムの構築

ステレオカメラ等で取得した検査対象物の3次元形状情報から生成したポリゴンメッシュ上に、熱画像センサから取得した熱画像を正確な位置にマップするアルゴリズムの構築を実施した。

2.1.1 3次元計測手法の検討

3次元計測技術には、ステレオカメラ、単眼、多眼等を用いた様々な手法があり、本システムにおいて安定して計測対象面の位置、姿勢が推定でき、かつ製品コストが最も小さい手法の選定を目的に、第2.1.1-1表に示す3次元計測技術の検討を実施した。

第2.1.1-1表 3次元計測技術の検討手法

3次元計測技術	1視点毎の機器構成
ステレオ法（受動型）	C×2、IR×1
スポット光投影法（能動型）	C×1、P×1、IR×1
グレイコードパターン投影法（能動型）	C×1、P×1、IR×1
3次元形状モデルと単眼による3次元計測	C×1、IR×1

※C：可視カメラ、IR：熱画像センサ、P：パターン光源

3次元計測技術に代表される手法としては、ステレオカメラによるステレオ法が主流であるが、低コスト、かつ拡張性のある計測手法として、「3次元計測モデルと可視カメラ（単眼）を用いた3次元計測手法（簡易3次元計測）」が最適であるとの結論を得た。

また、簡易3次元計測手法は、本提案システムのスケーラビリティを考慮した場合、基盤となる技術であり、必要に応じて、ステレオ法やパターン光源を用いた能動型3次元計測手法にも拡張可能であることから本手法を採用した。

2.1.2 カメラキャリブレーション技術の開発

本研究開発では、熱画像センサと可視カメラを用いた検査システムを実現する。そのため、熱画像センサと可視カメラ間のカメラキャリブレーション手法の開発を目的に熱画像センサ、可視カメラ間で同一特徴点を得ることができるキャリブレーションボードを検討し、試作および精度検証を行い、±5mm 以内のキャリブレーション精度を確保した。

2.1.2.1 キャリブレーションボードの開発

キャリブレーションボードは熱源と断熱性の素材を組み合わせ、白色部を低温、黒色部を高温となるよう設計した。従来ステレオカメラ等のキャリブレーションボードは、チェッカーパターンを用いて、特徴点としてコーナーを用いるが、熱画像センサは、従来のチェッカーパターンによる特徴点（コーナー）では、温度差が明確に出ず、特徴点を検出することが難しい。そのため、チェッカーパターンのボードではなく、楕円を並べたキャリブレーションボードとした。これにより可視画像、熱画像それぞれの特徴点を対応づけることが可能となり、両カメラ間のカメラキャリブレーションが可能となった。

2.1.3 同期取り込み技術の開発

検査システムに用いる熱画像センサ、可視カメラはそれぞれ入力インターフェイス、フレームレートが異なり、生産ライン上の製品の検査を行うためには、各々のカメラを同期させ画像取り込みを行う必要がある。熱画像センサは可視カメラと比べ、低フレームレートであるが、本研究開発の目標値であるタクトタイム 2.0 秒以内での接着状態の検査を実現するため、リアルタイムに熱画像センサと可視カメラの同期取り込み手法を検討した。

また、本 3 次元熱画像マッピング手法では、熱画像センサ、可視カメラ、検査対象の位置関係が同じ状態で撮影しなければ接着領域の位置推定精度が低下する。そのため、接着領域の位置推定の精度目標（誤差±5mm）を満たす同期取り込み技術の開発を実施した。

2.1.3.1 熱画像・可視画像の同期取り込み手法の検討

熱画像・可視画像の同期取り込み手法について検討を実施し、以下の 4 つの同期取り込み手法について試作を行った。

- ① 画像の位置ズレを用いる手法
- ② 熱画像センサから受信タイミングを用いる手法
- ③ アーム駆動を用いる手法
- ④ 熱画像センサの改良

2.1.3.2 熱画像・可視画像の同期取り込み手法の効果確認

試作した各同期取り込み手法の効果確認のため、ダミーのダンボールに熱源を取り付け、その熱源の位置推定の精度（標準偏差）検証を行った。第 2.1.3.2-1 表に効果確認結果を示す。

第 2.1.3.2-1 表 熱画像・可視画像の同期取り込み手法の効果確認

同期取り込み手法	標準偏差 σ (mm)		
	対象静止時	対象移動時	
	v=0mm/s	v=250mm/s	v=1000mm/s
なし	0.5~0.6	16.5~17.2	—
①画像の位置ズレを用いる	—	5.6~6.8	—
②受信タイミングを用いる	—	1.7~3.8	—
③アーム駆動を用いる	—	1.9~2.7	2.0~2.7

確認の結果、「②熱画像センサから受信タイミングを用いる手法」と「③アーム駆動を用いる手法」の両手法で、目標値 $\pm 5\text{mm}$ を達成した。

上記のことから、対象物の移動速度が 250mm/sec 以下であれば、両手法が有効であり、移動速度が、 250mm/sec を超える場合は、「③アーム駆動を用いる手法」が有効な手段であることが分かった。

なお、「④熱画像センサの改良」にてサーバーモードを追加し検証を行ったが、可視カメラとの同期取り込みにタイムラグが生じてしまう結果となり、対象が移動している場合は大きく位置ずれが生じてしまうため、本検証には採用しなかった。

ただし、新たに追加したサーバーモードは、データ取り込みを行う時間間隔が十分あればタイムラグの影響ないため、同期取り込み手法として有効な手段である。例えばアーム駆動と併用することで、静止時と同じ条件とすることができ、同期取り込みの簡素化、安定化が可能である。

2.1.4 温度補正処理技術の開発

熱画像センサから測定対象までの距離と測定対象の面積から温度補正を行うパラメータから撮影距離に対して簡易的な温度補正を行う検討を実施し、簡易温度補正アルゴリズムを構築した。ただし、本研究開発で開発するホットメルト検査システムでは、絶対温度が重要でなく、ホットメルトが塗布された領域（熱源）とそれ以外の温度差が重要であることが判明した。そのため、プロトタイプシステム開発には導入していない。ただし、今後実用化を進める上で、さらに温度差を明確にする必要が生じた場合は有効な手段となり今後活用していく。

2.2 接着状態の異常判定アルゴリズムの開発

3次元熱画像マップ情報から、画像上の接着面を射影変換することで、既定サイズの四角形の画像に変換した正規化熱画像を生成し、ホットメルトが接着された領域を抽出するための閾値の算出方法を検討した。また、求めた閾値から接着領域、面積、位置をパラメータ推定し、それらのパラメータから接着状態の良否判定を行う手法を構築した。

2.2.1 正規化熱画像の生成

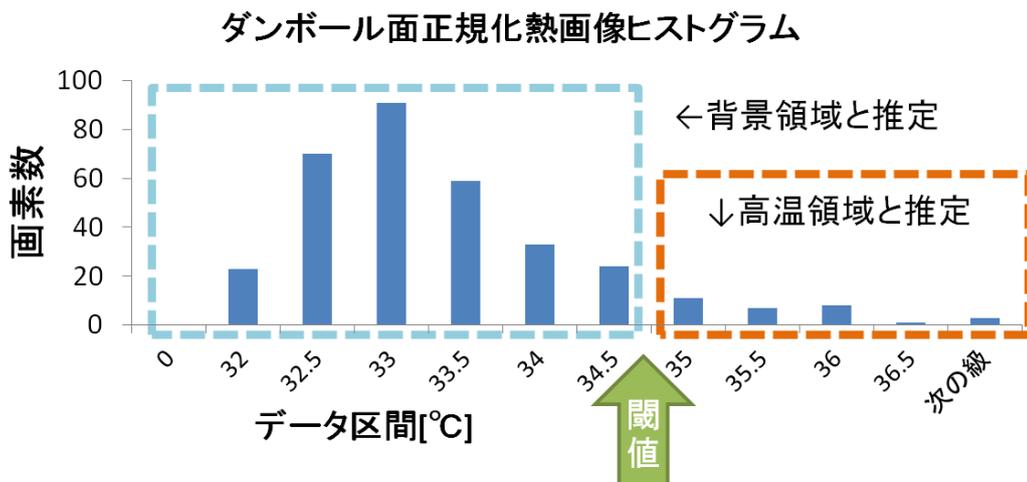
接着状態の異常判定を行うためには、熱画像上から検査対象の測定面を抽出する必要がある。そのため、3次元熱画像マッピングシステムで確立した3次元計測手法、熱画像センサと可視カメラ間のキャリブレーション手法により、可視画像からダンボール測定面を確定し、さらに熱画像上から対応する測定面を抽出しアフィン変換することで、接着領域推定および良否判定可能な正規化熱画像を生成する手法を確立した。

2.2.2 接着領域・接着面積・接着位置の推定

正規化熱画像から接着領域を抽出するためには、接着領域となる熱源とそれ以外の温度分布を区分する必要がある。そのため、接着領域を抽出するための閾値の算出方法を検討し、抽出した接着領域より接着状態の異常判定を行うための接着面積、位置に関する推定するアルゴリズムの構築を実施した。

2.2.2.1 接着領域抽出のための閾値設定の検討

熱伝導方程式より、温度の空間的広がりには正規分布に従うことから、ホットメルトを塗布したダンボール面にはホットメルトを塗布していない低温部分と、ホットメルトを塗布した高温部分の2つの分布が現れる。第2.2.2.1-1図に温度分布のヒストグラムを示す。



第2.2.2.1-1図 温度分布ヒストグラム

ホットメルトを塗布したダンボール面を測定した熱画像の温度分布は、ホットメルトが存在しない領域と存在する領域の2つの正規分布を足し合わせたものであることが予想される。このとき、多正規分布の分離を行う事でホットメルトを塗布していない背景領域とホットメルトの熱が伝わっている高温領域の分布を分離する事が出来ると考えられ、以下の仮定をもとに閾値を決定した。

仮定 1) 背景領域に対して高温領域が十分高温である

仮定 2) 面積比で高温領域に当たる画素が十分小さい

2.2.2.2 接着面積に関する推定手法の検討

ホットメルト接着面積に関する推定手法の検討として、ホットメルト接着剤の塗布有無と高温領域の面積に相関があるか検証を実施した。

検証の結果、塗布されている領域は比率1に近い値となるが、塗布されていない領域は、比率1から大きく離れる傾向があることを知り得た。この結果から、正常パターンの相対面積値から、塗布されていない領域の有無が判断可能であることを確認し、塗布面積の領域判定の手段として有効な手法であることから本手法を採用した。

2.2.2.3 接着位置に関する推定手法の検討

ホットメルト接着位置に関する推定手法の検討として、ホットメルト塗布位置と速度を変化させてその関係について検証を実施した。

第1段階として静止状態と、移動状態（ラインスピード 500mm/sec）におけるホットメルト塗布領域（熱源）の重心の関係について、検証を実施した。第2段階として、熱源の先頭 x 座標に注目し、熱源の位置と推定位置についての関係を検証した。さらに、第3段階として、ラインスピードを 1000mm/sec に変え検証を実施した。

検証の結果、ラインスピード 1000mm/sec では、熱源の設置位置と推定位置の線形関係が崩れることが判明した。そのため、ラインスピードと推定精度の関係について検証を行い、検出可能なずれ量の検証を行った。

第 2.2.2.3-4 表 ラインスピードと推定精度の関係

ラインスピード (mm/sec)	評価 対象	検出可能なずれ量(mm)	標準偏差 (mm)	最大誤差 (mm)
250	x	4	±2	±2.6
	y	2.5	±1.3	±1.8
500	x	10	±5	±6.2
	y	5	±2.5	±2.3
1000	x	16	±8.1	±16.9
	y	3	±1.5	±4.3

ラインスピードと推定精度の検証を実施した結果、上記の第 2.2.2.3-4 表の通りラインスピードが 250mm/sec 以下であれば検出可能なずれ量は、精度目標値の±5mm の範囲内であるが、250mm/sec を超えると横方向の推定精度が低下し、画像の流れによるノイズの影響を受けることを確認した。

そこで、実際の検査に求められる最低精度と推定位置精度について確認を実施した。

実際の検査に求められる精度としては、ホットメルト接着剤の塗布位置のずれ方向とずれ量によって製品不良が起こるかを検証し要求精度を算出し検証を実施した。

第 2.2.2.3-6 表 検査に求められる最低精度

ずれの方向	要求の着目点	要求精度
横方向	塗布位置が中央方向にずれることによる内部商品への付着	28.0mm
縦方向	塗布位置が中央方向にずれることによるフラップ表面へののみ出し	7.5mm

第 2.2.2.3-6 表の要求精度と第 2.2.2.3-4 表の各ラインスピードの推定精度の検証結果をもとに検証した結果、横方向、縦方向ともに「検査に求められる最低精度」は達成していることを確認した。このことから、接着位置を推定方法は、熱源の先頭 x 座標を用いる手法を採用した。

2.2.3 接着の良否判定

2.2.2 で推定した接着領域数、接着面積、接着位置を入力データとして、接着の良否を判定する接着状態の異常判定アルゴリズムの検討を実施した。

判定基準として使用する特徴量は、抽出した高温領域から第 2.2.3-1 表に示す特徴量を算出し、良否判定をおこなう。

第 2.2.3-1 表 良否判定を行う特徴量

特徴量	判定項目
領域数	高温領域の領域数を確認することで、ホットメルトの塗布漏れを検出する。
面積	高温領域の面積から、ホットメルトの塗布量の増減を判定する。
位置	各高温領域の重心位置から塗布位置のずれを判定する。

上記の良否判定方法を使い、テスト用として計測した熱画像について想定通りに判定が可能かどうかを検証した結果、領域数については、ある程度の細かな塗布領域については、1 つの大きな高温領域として判定条件を設定する手法を採用し、面積については、相対面積値から塗布されていない領域の有無を判定する手法を採用し、位置については、x 方向の位置ずれの判定には、熱源の先頭 x 座標を用い、y 方向の位置ずれの判定には、熱源の重心 y 座標を用いる手法を採用した。

2.3 アルゴリズムの高速化

2.1 および 2.2 で開発した簡易 3 次元計測手法と接着領域の異常判定アルゴリズムを、生産ライン上の製品の検査に適用するためには計算処理のリアルタイム化が必須である。

本研究では検査処理をリアルタイムに行う上で必要となる処理速度の要件を満たすため、システムにおけるボトルネック処理の洗い出しを行い、GPU を用いた並列処理による高速化検討を行った。高速化の目標は高速化前の CPU 比にして 10 倍、接着状態検査のタクトタイムで 2 秒 (2,000ms) 以内とする。

2.3.1 並列処理化の検討

システム上のボトルネック処理を洗い出すため、システム中の各処理の処理時間について解析を行った。第 2.3.1-1 表に各処理時間の計測結果を示す。

第 2.3.1-1 表 システムにおける各処理時間の割合

システム処理	処理時間	処理時間 (割合)	累計処理時間
可視・熱画像撮影	122~249ms	1~77%	190~6,926ms
3 次元計測	60~6,665ms	18~98%	
熱画像正規化	4~6ms	0~3%	
良否判定	4~6ms	0~3%	

計測結果から「可視・熱画像撮影」と「3 次元計測」の二つの処理が主な負荷処理であることが分かった。

「可視・熱画像撮影」は検査処理上常に必要となる処理である。それに対して「3 次元計測」は入力条件や設定パラメータにより処理時間が大きく増減する処理であり、最大 6,665ms とタクトタイムへクリティカルに影響するほど時間がかかるケースがあるため、対応が必須となる処理である。

以上のことから、「3 次元計測」を高速化の検討対象として調査検討を進めた。

3 次元計測処理についてもシステムと同様に処理時間を解析すると、第 2.3.1-2 表に示す様な結果が得られた。

第 2.3.1-2 表 3 次元計測における各処理時間の割合

3 次元計測処理	処理時間
SURF による面抽出	20~6,625ms
検査面頂点座標算出	20ms
姿勢推定	20ms

結果として、「SURFによる面抽出」が「3次元計測」中で最大99%を占める処理であり、さらにシステム全体を通して最大95%の割合を占めるボトルネック処理であることが明確になった。

今回並列化対象としたSURFは同等手法の並列化実装が既に幾つか存在しているため、その中から二つの手法を選定し、比較を行った。第2.3.1-3表に示すのが、各並列化実装(GPUSIFT,GPUSURF)とCPU実装(SURF)による処理時間の関係である。速度倍率は、それぞれCPU実装(SURF)を基準とした比率を示している。

第2.3.1-3表 各並列化実装とCPU実装の処理時間の比較

実装	最小処理時間	最大処理時間	最小速度倍率	最大速度倍率
SURF	20.6ms	6625.8ms	1倍	1倍
GPUSIFT	918.5ms	1163.45ms	約0.02倍	約5.6倍
GPUSURF	7.05ms	102.53ms	約2.9倍	約64.6倍

以上のように、システム中のボトルネック処理を洗い出し、ボトルネック処理である「SURFによる面抽出」へ並列化実装GPUSURFを適用することで、CPU比で最大約64.6倍、精度の安定するパラメータでは約15倍と高速化目標を達成することができた。

2.3.2 並列処理化の最適化

「3次元計測」中の「SURFによる面抽出」処理を並列化実装に置き換えることにより、最大で6625ms掛っていた処理を102msまで高速化することが出来ている。接着状態検査に掛る時間に換算すると、最も時間が掛っても約900ms以内の検査を実現することが可能であると言える。

本開発の目標処理時間は接着状態検査において2秒(2,000ms)以内としていたが、この目標を大きく超えて達成することができた。

今後は製品化システムへ向けて、よりフィールド設置を考慮したフハードウェア構成の設計を行う必要があると考えており、その過程で並列化処理についても詳細な最適化検討が必要であるため、今後の課題である。

2.4 プロトタイプシステムの開発と評価

3次元熱画像マッピングを用いたホットメルト接着剤の接着状態を検査するプロトタイプシステムを開発した。実際の生産ラインにおいてテストを行うために、検査要件にあわせたハードウェア構成などについても検討・構築を行った。作成したプロトタイプシステムは、高解像度熱画像装置を用いて比較評価を実施した。

2.4.1 プロトタイプシステムの開発

本研究開発で開発したアルゴリズムの妥当性評価を目的として、検査用 PC で動作するプロトタイプシステムを開発し、評価・検証を実施した。

2.4.1.1 機器構成

プロトタイプシステムの構成は、「検査用 PC」、簡易 3次元計測に用いる「熱画像センサ」、「可視カメラ」とし、ライン上を流れてくる検査対象を撮影しホットメルト検査を行う。また、プロトタイプシステムは、カメラの設置方法が異なるカメラ固定タイプとカメラ追従タイプの2つのシステムを開発した。

2.4.1.2 性能評価

開発したアルゴリズムを統合し、システム全体の妥当性評価を目的に、「タクトタイム」、「検査面抽出」、「良否判定」の3項目について性能評価を実施した。

(1) タクトタイム

本研究開発におけるタクトタイムは、2秒(2000msec)以内を目標値としており、各プロトタイプシステムがこの目標値を満たしているか処理時間を測定し評価を行った。第2.4.1.2-1表に各プロトタイプシステムの処理時間の測定結果を示す。

第2.4.1.2-1表 各プロトタイプシステムの処理時間測定結果

カメラタイプ	移動速度 (mm/sec)	最大処理時間 (msec)	最小処理時間 (msec)	平均処理時間 (msec)
カメラ固定タイプ	250	648	477	546
	1000	547	389	467
カメラ追従タイプ	250	829	625	729
	1000	804	616	723

結果として、カメラ固定タイプ、カメラ追従タイプともに最大処理時間は、タクトタイムの目標値2秒の範囲内であることから、目標を達成した。

(2) 検査面抽出の比較評価

カメラ固定タイプとカメラ追従タイプのホットメルト検査面抽出処理の性能評価を目

的に、可視画像から検査面を抽出する際に行っている特徴点のマッチング処理におけるマッチング対応点数を測定し評価を行った。第 2.4.1.2-2 表に各プロトタイプシステムのマッチング対応点数の測定結果を示す。

第 2.4.1.2-2 表 各プロトタイプシステムの対応点数測定結果

カメラタイプ	移動速度 (mm/sec)	最大対応点数 (個)	最小対応点数 (個)	平均対応点数 (個)
カメラ固定 タイプ	250	151	120	134
カメラ追従 タイプ	250	143	119	131
	1000	145	125	133

結果として、カメラ追従タイプの対応点数は、移動速度に関わらず最小対応点数は約 120 個、平均対応点数は約 130 個であり、カメラ固定タイプと比較した場合、対応点数はほぼ同等の値となっている。このことから、カメラ追従タイプは、カメラ固定タイプと同等の面抽出精度であることが確認でき、面抽出精度の目標値±5mm を達成した。

(3) 良否判定の比較評価

カメラ固定タイプとカメラ追従タイプの良否判定の性能評価を目的に、熱画像センサで撮影した接着領域 4 箇所の先頭 x 座標を測定し、接着領域の横方向に対するブレ量の評価を行った。第 2.4.1.2-4 図に先頭 x 座標標準偏差の比較グラフを示す。

第 2.4.1.2-4 表 各プロトタイプシステムの接着領域先頭座標測定結果

カメラタイプ	移動速度 (mm/sec)	評価項目	接着領域先頭座標(pixel)			
			左上	左下	右上	右下
カメラ固定 タイプ	250	平均	16.65	15.10	232.35	233.70
		標準偏差	5.98	4.40	5.56	3.94
カメラ追従 タイプ	250	平均	12.05	12.05	224.43	224.48
		標準偏差	2.30	2.63	2.68	1.97
	1000	平均	8.86	8.67	222.48	221.86
		標準偏差	2.27	2.75	2.36	2.01

結果として、接着領域の横方向に対するブレ量を示す標準偏差は、カメラ固定タイプが約 4~6pixel、対してカメラ追従タイプは、移動速度に関わらず約 2~3pixel となっており、カメラ固定タイプと比較して精度が向上している。このことから、カメラ追従タイプの方が良否判定に用いる接着領域の抽出精度が高く、また、移動速度に影響されないことから、ラインスピードが速い生産ラインのホットメルト検査システムとして有効な手段である。

2.4.2 能動型 3次元測定手法と高解像度熱画像装置を用いた比較評価

本提案システムで使用している熱画像センサがホットメルト検査システムの熱画像計測装置として十分な精度を有していることを検証する為に、高解像度熱画像装置を用いて、以下の3項目について比較評価を実施した。

- ✓ ホットメルト接着面の温度計測値（目標値：±2%以内）
- ✓ 接着領域の推定面積（目標値：誤差±25mm²）
- ✓ 接着領域の推定位置（目標値：誤差±5mm）

本提案システムで使用した熱画像センサと比較評価に用いた高解像度熱画像装置を第2.4.2-1図に示す。



第 2.4.2-1 図 比較装置

2.4.2.1 ホットメルト接着面の温度計測値

ホットメルト接着面の温度計測値について熱画像センサ（TP-H）と高解像度熱画像装置（CPA-T425）でホットメルト検査対象面の5つのポイント（ホットメルト接着位置4箇所とダンボール面中央）を測定し比較評価を実施した。

比較評価の結果、TP-H、CPA-425ともに接触式温度計で測定した実測温度に対して温度が高い傾向にあり、目標値±2%を大きく上回る結果となった。ただし、ホットメルト検査システムの良否判定では、測定温度の正確性よりも、ホットメルト接着剤の塗布位置、非塗布位置の温度差が重要である。そのため、塗布位置、非塗布位置の温度差に着目し、比較評価を実施した。

結果、TP-H、CPA-T425ともにホットメルト接着剤が塗布されている箇所の温度と塗布されていない箇所の温度の温度差は4℃以上あり、本システムで接着状態の良否判定を行うには十分な値となっている。また、CPA-T425の相対温度とTP-Hの相対温度の比率は、±2%であることを確認した。このことから、温度計測値の目標は達成した。

2.4.2.2 接着領域の推定面積

ホットメルト接着領域の推定面積について比較評価を実施した。比較評価は、ダンボール面に複数の塗布パターンを模した熱源を取り付け、TP-H、CPA-T425それぞれで熱画像を取得し、ホットメルト塗布面積の比率から評価を行った。

比較評価の結果、上図中央の塗布パターンの通り、ホットメルトが正しく塗布されてい

る領域が左上と右下のみであるのに対して、面積の比率は、左上と右下以外は極端に面積の比率が減少していることが分かった。

各塗布パターンにおける面積の比率は、TP-H、CPA-T425 同様の傾向を示しており、相対面積値を用いたホットメルト塗布有無の判定について有効な手段である。

ただし、本提案システムの面積による良否判定手法については、定量的な判定を行っていない。その為、定量的な判定を行う手法の構築を目的に、必要に応じて様々な塗布パターンでの実験や、フィールドテストを通じて収集したデータをもとに補完研究を進めていく。

2.4.2.3 接着領域の推定位置

ホットメルト接着領域の推定位置について比較評価を実施した。比較評価は、静止している対象について、高温領域の先頭 x 座標、重心 y 座標の標準偏差を評価した。

第 2.4.2.3-2 表に x 方向の推定位置の測定結果、第 2.4.2.3-3 表に y 方向の推定位置の測定結果を示す。

第 2.4.2.3-2 表 x 方向の推定位置 (指標: 先頭 x 座標)

センサ		左上(mm)	左下(mm)	右上(mm)	右下(mm)
TP-H	平均	54.32	51.70	232.78	230.20
	標準偏差	1.66	1.80	1.23	1.51
CPA-T425	平均	50.50	48.60	252.12	251.80
	標準偏差	0.68	0.64	0.69	0.61

第 2.4.2.3-3 表 y 方向の推定位置 (指標: 重心の y 座標)

センサ		左上(mm)	左下(mm)	右上(mm)	右下(mm)
TP-H	平均	39.55	94.07	42.28	94.13
	標準偏差	1.33	1.78	1.48	1.52
CPA-T425	平均	35.82	103.17	34.80	102.49
	標準偏差	0.09	0.10	0.11	0.12

比較評価の結果は、CPA-425 と比較し TP-H の方が標準偏差の値が大きい (ブレ量大きい) ものの位置推定に関しては TP-H でも十分な精度が得られており、x 方向の位置推定精度は、 $\pm 3.6\text{mm}$ (最大標準偏差 $1.8\text{mm} \times 2$)、y 方向の位置推定精度は、 ± 3.56 (最大標準偏差 1.78×2) となり、位置推定精度の目標値 $\pm 5\text{mm}$ の範囲内に収まっていることが確認できる。従って、位置推定の目標は達成した。

第3章 全体総括

3.1 研究開発成果

製造業の自動包装に幅広く用いられるホットメルトの接着状態の検査精度向上を目的として、3次元計測を活用して可視画像と熱画像を統合し、従来手法では成し得なかった正確な接着位置および接着面積（量）の推定が可能な検査システムの研究開発を実施した。

本研究開発は、要素技術の開発として「3次元熱画像マッピングシステムの構築」、「接着状態の異常判定アルゴリズムの開発」を実施し、「プロトタイプシステム開発」でその妥当性検証を実施した。また、生産ラインに適応すべく処理の高速化を目的に、ボトルネックアルゴリズムを調査し、「高速化の検討・試作および評価」を実施した。

本研究開発の結果、「3次元熱画像マッピングシステムの構築」については、熱画像センサ、3次元形状モデルおよび可視カメラを用いて検査対象のダンボール面の推定、姿勢推定可能な最小コストの3次元計測アルゴリズムを確立することができ、その精度においても目標値の範囲内を実現出来たことから一応の目標を達成した。

「接着状態の異常判定アルゴリズムの開発」については、熱画像上からダンボール面を切り出し、接着領域抽出の閾値から二値化画像を作成し、接着状態の良否判定を行うアルゴリズムを確立し、接着位置の判定、接着領域の有無までは判定することが出来た。しかし、接着面積を判定するアルゴリズムの確立までは至らず、また良否判定の精度にも改善の余地があり、今後の課題である。そのため、事業終了後は、様々な塗布パターンによる実験やフィールドテストから得たデータを収集・蓄積し、それらデータに基づく最適な良否判定アルゴリズムの構築を進めていく。

「プロトタイプシステムの開発」では、開発した要素技術を統合し、カメラ固定タイプとカメラ追従タイプのシステムを構築し、各アルゴリズムの妥当性評価、実際のテストラインを想定したシステムの検証を実施した。カメラ固定タイプのシステムは、生産ライン上を移動する検査対象の速度が低速（約250mm/sec）であれば良否判定可能であるが、それを超える速度の場合は、熱画像の流れが発生するため正確な判定は不可能である。ただし、その対策として、カメラ追従タイプのプロトタイプシステムにて検証を実施した結果、移動速度が250mm/secを超える速度であっても安定した検査ができ、実用化に向けて有効な手段である。

また、「高速化の検討・試作および評価」においては、ボトルネックアルゴリズムをGPUを用いて高速化を実施し、十分な結果が得られた。しかし、プロトタイプに折り込んだ評価はできず、今後の実用化に向けて改善の余地がある。

以上のことから本研究開発では、概ね目標を達成できたが、一部課題も残ったため、今後は課題解決のための補完研究を進め、実用化に向けた取り組みを進めていく予定である。

3.2 研究開発後の課題・事業化展開

3.2.1 今後の課題

本研究開発における今後の課題は、以下の3点である。

- ① 性能・品質の向上
- ② ユーザー操作を意識したシステム設計
- ③ 現場環境に適したハードウェア設計

今回開発したホットメルト検査システムは、ホットメルト検査に必要な最低限の機能、性能であり、今後は現場サイドからの要求事項としてあがっている性能を満たしたシステムを設計する必要がある。

また、品質面については、接着良否判定の精度向上に向けて、接着領域抽出の二値化閾値の設定方法の最適化や接着領域の位置推定の精度向上、接着面積を判定する手法を確立し、安定した良否判定が行える検査システムに改良する必要がある。

さらに、初期設定、運用などにおいて現場ユーザーが容易に行えるシステム設計、ユーザーインターフェイス設計を行う必要がある。

一方で、飲料水等の生産ラインに本システムを設置することを踏まえると、防塵、防滴に優れたハードウェアが必要であり、今後は、現場環境に適したハードウェア設計を行い、ホットメルト検査システムを構築する必要がある。

最後に、今回開発したホットメルト検査システムは、前述の通り改良の必要がある。そのため、課題に対する補完研究の他に、現場フィールドでの実験、データ収集等から最適な手法へ改良し、実用化を目指す。

3.2.1 事業化計画

近年、製品の品質を保つためにも、熱画像でホットメルト検査を実現したいというニーズは高まっており、大手飲料水メーカーは、高画素の熱画像センサを用いた高性能の検査システムの導入が進められている。しかし、中小飲料水メーカーは、高画素の熱画像センサを用いた検査システムは導入コストが高く導入できていない。

本提案システムは、熱画像と可視画像を組み合わせることで、熱源の位置が特定可能であり、検査対象の姿勢変化にもつよく、可視カメラを用いることで外観検査などを付加価値とすることもできる。また低価格な熱画像センサを用いていることもあり、高画素の熱画像センサと比較して導入コストを抑えることが可能である。そのため、導入コストが障壁となっている中小飲料水メーカーに対しては、これらのメリットが強みになると考えている。