

2015(平成 27)年度修士論文

設備保全作業教育支援システムの 開発に関する研究

指導教員 梶原 康博

首都大学東京大学院

システムデザイン研究科

経営システムデザイン学域

学修番号：14892531

山崎 勇二

目次

1. 緒言	1
2. 提案手法	3
2.1 テンプレートマッチング	3
2.1.1 SURF.....	3
2.1.2 一致キーポイントの外れ値の除外	6
2.2 作業未完了箇所検出機能	8
2.2.1 特徴量情報を用いた画像補正	8
2.2.2 閾値の自動決定手法	12
2.2.3 背景差分処理・2値化処理	13
2.2.4 縮小・膨張処理	14
2.2.5 画像の合成.....	16
3. システム構成.....	17
3.1 使用機材	17
3.2 基本機能.....	18
3.3 遠隔操作機能.....	21
4. 適用例.....	23
4.1 工具の使用使用方法説明機能	23
4.2 作業の進捗確認機能.....	25
4.2.1 進捗確認機能	25
4.2.2 作業の未完了箇所検出機能	27
4.3 同種異系統機器確認機能	28
4.3.1 同種異系統機器確認	28
5. 運用実験内容	31
5.1 作業の進捗確認の精度検証.....	31
5.2 作業未完了箇所の精度検証.....	34
5.3 作業対象バルブの識別機能の精度検証.....	35
6. 運用実験結果	36
6.1 作業の進捗判定	36
6.2 作業未完了箇所検出の検証結果	41
6.3 作業対象バルブの識別機能の検証結果.....	42
7. 考察.....	44
7.1 作業の進捗確認の精度検証結果についての考察	44
7.2 作業の未完了箇所の検出機能の精度検証結果についての考察	46
7.3 作業対象バルブの識別機能の精度検証結果についての考察.....	47

8. 結言	49
9. 参考文献.....	50

1. 緒言

製品の生産や資源の確保を行うために、化学プラントの存在は欠かせないものである。化学プラントは新規建設が少なく、設備の長期使用とそれに伴う設備の老朽化を余儀なくされている。このような状況の中で過酷な運転がなされるプラント設備は、長期使用によって腐食、劣化、割れ等の損傷を受けることがあり、そのメンテナンスが重要となる。したがって、もし設備診断等によって損傷が発見されたとき、その損傷に対して適切な補修対策が取られなければならない[1]。これらの大規模な化学プラントにおいて、ひとたび事故が発生した場合、非常に重大な災害を引き起こし、従業員やプラントそのものに多大な損害を与える可能性がある。それだけにとどまらず、爆発により飛散したプラントの建材破片が周辺の地域に落下したり、有害物質が漏洩したりするなど、周辺地域の住民や建物へ被害が拡大する可能性もある。これらの災害を防ぐために、化学プラントの安全性向上と事故防止のための十分な対策が求められている[2]。

化学プラントでの産業事故は、類似の装置を間違えて操作した、疲労や緊張により誤った操作を実施したなどの「誤操作」や、認知していたが思い出せず誤った判断をした、作業の意味を理解せず誤った判断をしたなどの「誤判断」、必要な確認を実施しなかったなどの「誤認識」等、多くが人為的なミスに起因して発生している(図1)[3]。また近年、運転効率向上のために、プラントの自動化、機械化が急速に進んでいる。それにより、プラントは長期にわたって安定的に稼働している一方で、生産コストを低減させるため作業員の数減少傾向にあり、一人作業が増加している。このため、一人当たりの担当範囲が拡大傾向にあり、多能工化が進んでいるため、教育が十分でない新人作業員が一人でプラントを運転する機会が増加している。[4]これらの原因により、作業員の異常・緊急事態への対応力が不足しているため、マニュアルに存在する対応操作が必要な場合でも、適切な操作が行われないことなどがある。それらの設備保全作業を担う作業員は国内外から選抜され、研修センター等で予め設備保全作業の研修を受ける。作業員は研修を受けた後に現地に派遣される。近年は、東南アジアからの作業員が国内で研修を受け、諸外国のプラントの設備保全作業に派遣されるケースが増加している。設備保全作業の研修には、作業手順、治工具の使い方、安全教育、品質に関する注意等の広範な内容が含まれる。そして、座学に加えて研修の実効性を高めるために実習が行われる。座学に比較して実習は機材の準備に時間を要すること及び台数の制約による待ちの発生や、初心者では一見何に使用する治工具であるかを判別することが出来ない工具が多数存在することで、1つ1つの工具に対して、より専門的な知識や技能の研修が必要となるなどのため、多くの研修時間を要する。しかし、海外から研修に参加する作業員は、研修期間が極めて限られているために、研修期間内に全ての設備保全作業の実習を行うことは難しい。そのため、全ての設備に対する作業手順や治工具の使い方を習得することは困難であり、技能や知識が不完全なまま現場にしている現状がある。[5]そこで、研修で学ぶことが出来なかった作業方法や知識を座学によって学ぶことがそれらの対策として挙げられる。しかし、座学によって学ぶことは設備や工

具の大きさ、重さ等作業する上で必須となる感覚を知ることが出来ないため、研修として不十分であり、実物を前にして、いかにして作業を行うべきかを学ぶことが研修には必要であると考えられる。また、プラントの設備保全作業は最大で7年に一度しか行われられないものもあり、熟練作業者であっても十分に作業方法等を記憶しておらず、紙に記された作業手順文書を閲覧しながら作業を行うことも少なくない。そのため、映像等により作業方法を参照出来る仕組みが望まれる。その際に、映像を見ながら実作業現場で治工具および装置に直接触れて、重量、大きさ、質感等を体感することができれば、現実感を持ち、かつ円滑に設備保全作業方法を学習出来ると考えられる。東洋エンジニアリング社ではウェアラブルデバイス及び保守・点検作業管理システムにより収集した情報や作業ノウハウを基にフィールドオペレーターの模範作業を作業者に提示出来る教育ツールを開発している[6]。しかし、作業者それぞれ学習不足の箇所が異なるため、この装置を使用した場合、ピンポイントで学習したい作業の一部についての説明を表示するのが困難である。また、名称がわからない工具等に関する情報を表示するのも困難である。

従来研究ではタブレットPCを用いて工具、作業中の機械設備の写真を撮影し、得られた画像に対し、SURF[7]によるテンプレートマッチングを用いて対象物を識別し、対象工具や作業の進捗に応じた正確な作業内容を作業者に指示すること、および撮影画像に対し画像処理を行うことで作業の未完了箇所を検出することができるシステムを開発した。[8]しかし、従来研究では撮影環境により対象物の識別精度が著しく低下してしまう問題があった。そこで、本研究では新たに撮影環境の影響を小さくすることができるテンプレートマッチング手法、および作業の未完了箇所検出手法を提案する。これらの手法を本システムに実装し、運用試験により以下のことに対して従来手法との精度の比較・検証を行った。作業の進捗を入力画像から自動認識出来る機能、進捗に合わせて作業内容をモニタに逐次表示出来る機能および未完了箇所をモニタ上に表示出来る機能を実現した。

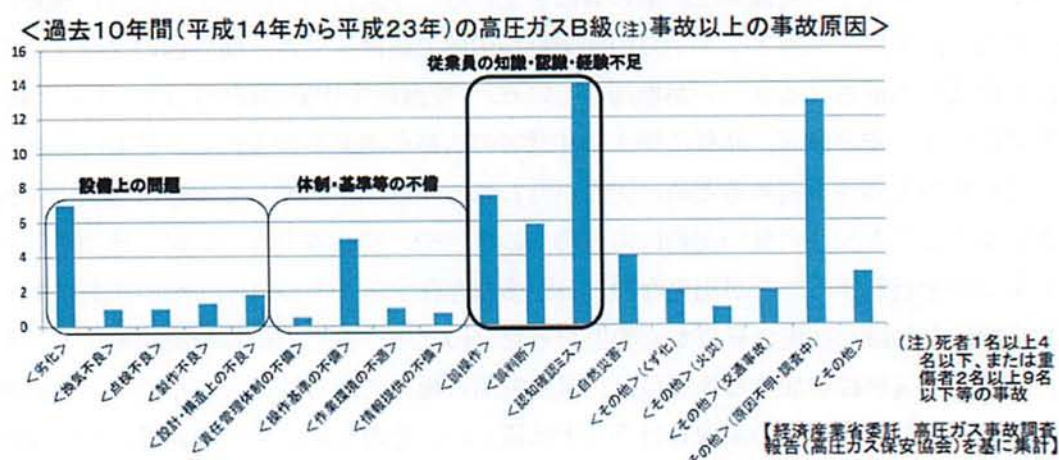


図1. 産業事故の発生原因内訳

2. 提案手法

2.1 テンプレートマッチング

本システムはテンプレートマッチング処理の際に、SURF (Speed Up Robust Feature) [7]を用いる。SURF は局所特微量の情報を用いることで入力画像中とテンプレート画像中の対象物のサイズのズレおよびカメラ光軸回りの回転の角度のズレを補正して画像認識を行うことができる。作業の未完了箇所を検知する際に入力画像とテンプレート画像に対し、背景差分処理法を用いる。SURF および背景差分処理法の具体的な処理内容を以下に示す。

2.1.1 SURF

SURF とは撮影画像およびテンプレート画像に対してフィルタリングを行い、キーポイントと呼ばれる x,y 方向に対して輝度値が大きく変化する座標を検出し、求められたキーポイントに対し特微量と呼ばれるキーポイント周辺の輝度変化の情報を基にテンプレートマッチングを行う手法である。

(1) キーポイントの検出

作業対象を撮影した画像およびテンプレート画像から SURF を用いて画像局所特微量に基づくキーポイントを検出する。キーポイントの検出では、まず、BOI フィルタを用いて近似ヘッセ行列式に基づく画像を作成する。BOX フィルタにはガウス関数の2次微分を近似した図2に示す3種類 (L_{xx} , L_{yy} , L_{xy}) の 9×9 画素によるフィルタを用いる。そして、これらのBOX フィルタを対象とする画像に畳み込むことで、式(1)に示される近似ヘッセ行列 H の行列式 $\det(H)$ に基づく画像が作成される。ここで、 w は近似誤差を修正するための係数であり、 $w=0.9$ とする。

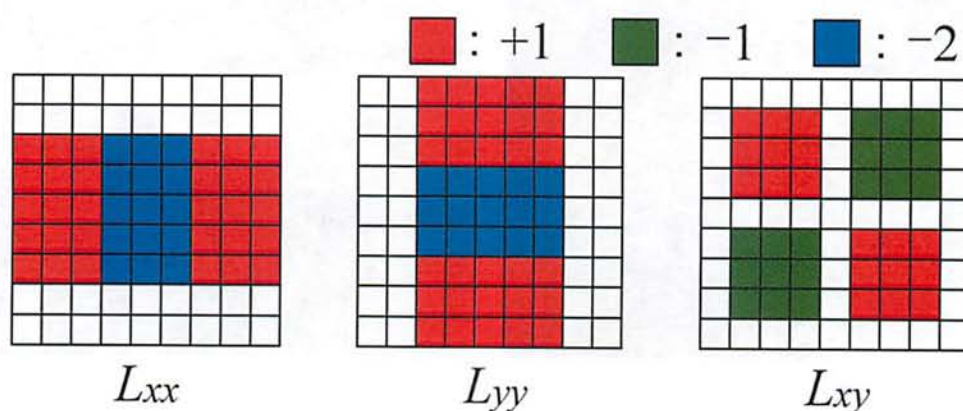


図2 BOX フィルタ

$$\det(H) = L_{xx}L_{yy} - (wL_{xy})^2 \quad (1)$$

さらに、BOX フィルタのフィルタサイズを 15×15 , 21×21 , 27×27 画素に変更し、同様

にしてそれぞれのフィルタサイズでの近似ヘッセ行列式に基づく画像を作成する。そして、図3に示すようにBOXフィルタのフィルタサイズを変更して作成した画像を3枚1組として、注目画素とその近傍26画素の比較から注目画素が極値となっている場合には、その注目画素をキーポイント候補点とする。最後に、コントラストや主曲率による絞り込みによりエッジ上の点等を除去し、残ったキーポイント候補点をキーポイントとする。

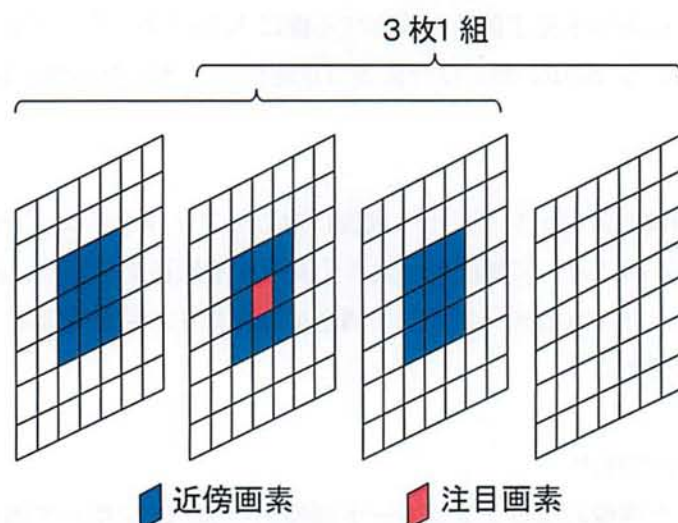


図3 注目画素と近傍画素

原画像の例を図4、検出されたキーポイントの例を図5に示す。



図4 原画像例

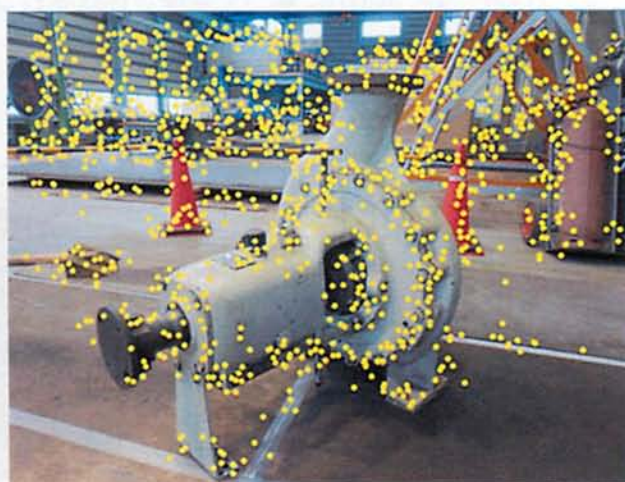


図5 検出キーポイント例

(2) キーポイントの特徴量

検出したキーポイントから回転変化や照明変化に頑健な特徴量を記述する。キーポイントを中心とした半径 $6s$ ($s=1.2, 2.0, 2.8, 3.6$) の範囲から 60 度ごとに勾配強度を求める。そして、勾配強度が最も大きい方向をオリエンテーションとする。次にキーポイントを中心とした正方形領域をオリエンテーションの方向に回転させ、 4×4 のサブ領域に分割する。この分割されたサブ領域において、Haar-Wavelet フィルタを用いて x, y 方向それぞれの勾配方向をとして求める。この求められた勾配方向から 4 次元ベクトル ($\sum dx, \sum dy, \sum |dx|, \sum |dy|$) がサブ領域の特徴量として算出される。これを 4×4 の全てのサブ領域について行い、求められた 64 次元ベクトルを各キーポイントの特徴量とする。

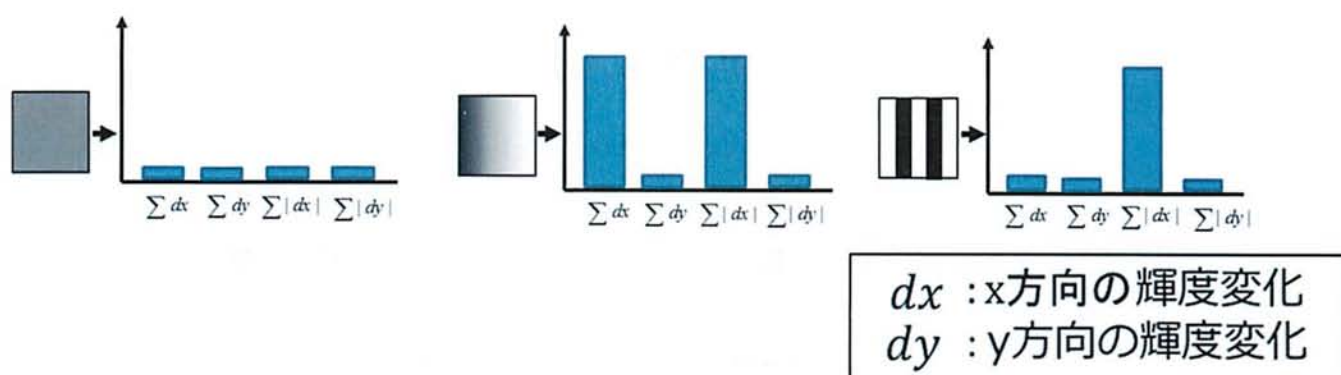


図 6 キーポイントの特徴量

(3) 特徴量の比較

撮影画像およびテンプレート画像において求められた特徴量を比較することにより画像の対応付けを行う。対応付けの様子を図 7 に示す。図 7 では、撮影画像中の複数のキーポイントに対してテンプレート画像中の特徴量が一致するキーポイントを求め、線分で結んでいる。これにより各テンプレート画像において撮影画像との一致したキーポイントの個数を求めることができる。

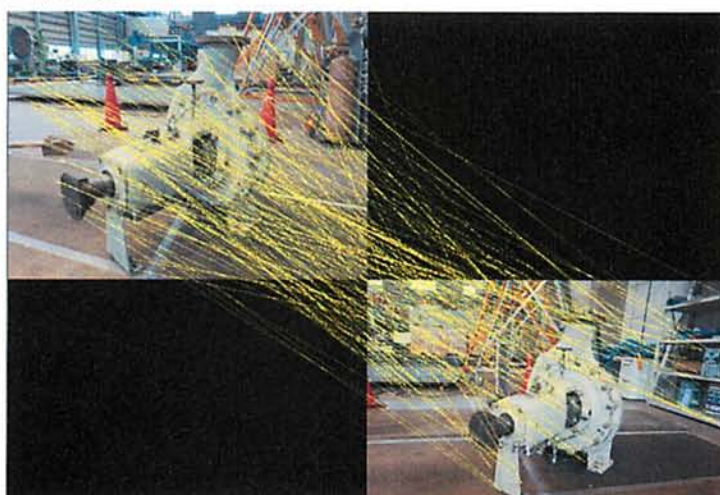


図 7 画像の対応付け

2.1.2 一致キーポイントの外れ値の除外

従来の SURF を利用した場合、対象物を撮影した際に、背景に人や工具などのノイズが映り込んでしまうと、テンプレートマッチングの精度が著しく低下してしまう。そのため、大型の設備に対するメンテナンス作業や複数の人数で行うメンテナンス作業に対しては適していなかった。そこで、順次撮影される画像とテンプレート画像のキーポイントの検出および照合を SURF により行い、照合が行われたキーポイントのうち、座標情報から外れ値を除外することでノイズの影響を小さくする。以下に外れ値を除外する手法を示す。

撮影画像およびテンプレート画像においてマッチングされたキーポイントの座標をそれぞれ

$$\begin{aligned} p_k &= (i_k, j_k) \\ q_k &= (u_k, v_k) \quad (k = 1, 2, \dots, n) \end{aligned}$$

とし、撮影画像とテンプレート画像とで一致したキーポイントとの座標間距離 L_k を求める。

$$L_k = \sqrt{(i_k - u_k)^2 + (j_k - v_k)^2} \quad (4)$$

このとき求められた L_k に対して平均 \bar{L} を求める。

$$\bar{L} = \frac{\sum_{i=1}^n L_k}{n} \quad (5)$$

次に L_k の標準偏差 σ を求める。

$$\sigma = \sqrt{\left(\frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (L_k - \bar{L})^2\right)} \quad (6)$$

工程管理に使用される管理限界の考えを用いて不適合キーポイントを除外する。上限値

$$UCL = \bar{L} + \alpha \cdot \sigma \quad (7)$$

とする。 $L_k > UCL$ となるキーポイントは除外し、テンプレートマッチングには用いないものとする。

この際、係数 α の値が 1 より大きいほど除外されるべきキーポイントがテンプレートマッチングに用いられる危険性が増加する。 α は 1 より小さいほど本来はテンプレートマッ

グに使用されるべきキーポイントが誤って除外される危険性が高まる。そのため、本論では係数 α は実際に装置を作業現場使用し、実状に合わせて調整されるものとする。これにより、図8に示すように、座標間距離の離れた一致キーポイントはテンプレートマッチングにおいて除外し、画像認識の精度を上げることができる。不適合キーポイントを除外することで画像認識の精度を上げ、かつ画像処理速度を向上させることが可能となった。以下に外れ値を除外されたテンプレートマッチング結果の例を示す。

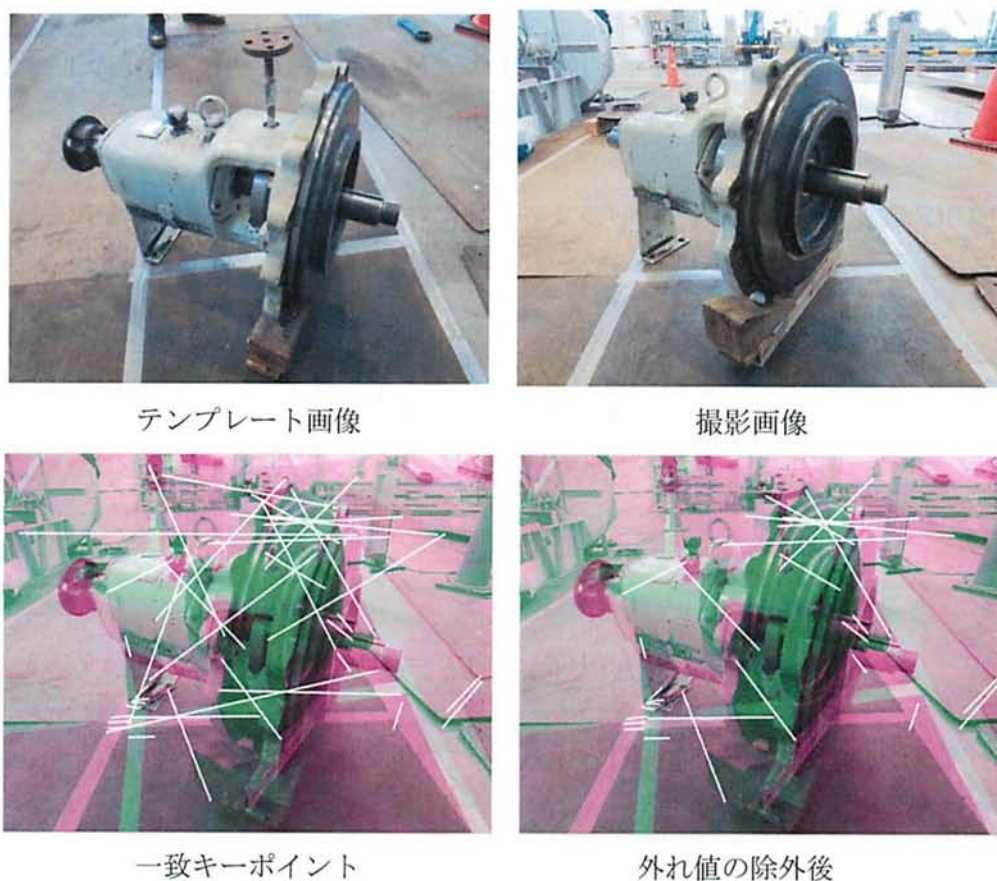


図8 外れ値の除外

2.2 作業未完了箇所検出機能

作業の未完了箇所検出機能において、従来手法を使用した場合、撮影画像とテンプレート画像とで撮影距離や撮影角度、日照条件の変化により、ノイズが発生し、適切な検出が行われない問題があった。そこで、テンプレートマッチングの際に得られる特徴量情報を基に撮影画像に対して拡大縮小・回転処理を行うこと、および二値化の際の閾値の自動決定手法を導入することにより、ノイズの発生を低減させる手法を提案する。

2.2.1 特徴量情報を用いた画像補正

本研究では画像補正の変換に M 推定[9]を用いる。M 推定とはロバスト推定の 1 つで最小二乗法における誤差(式 16, 式 17 右辺第 2 項)の影響を小さくするものである。

まず、SURF により一致したキーポイントの座標に対して 2 次元のアフィン変換行列 A を仮定する。

$$A = \begin{pmatrix} a & b & c \\ d & e & f \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (8)$$

キーポイントごとに(8)式を代入すると

$$u_k = ai_k + bj_k + c, \quad v_k = di_k + ej_k + f$$

となる。導かれる変換式には誤差が存在する。そこで u_k の誤差量を δ_{uk} , v_k の誤差量を δ_{vk} とする。この関数は次式で表される。

$$\begin{pmatrix} u_k \\ v_k \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a & b & c \\ d & e & f \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_k \\ j_k \\ 1 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \delta_{uk} \\ \delta_{vk} \\ 0 \end{pmatrix} \quad (9)$$

$$\delta_{uk} = ai_k + bj_k + c - u_k \quad (10)$$

$$\delta_{vk} = di_k + ej_k + f - v_k \quad (11)$$

(9)式より、誤差関数 ϕ_u を次式で表す。

$$\Phi_u = \sum_{k=1}^n \delta_{uk}^2 = \sum_{k=1}^n (a i_k + b j_k + c - u_k)^2 \quad (12)$$

$$\Phi_v = \sum_{k=1}^n \delta_{vk}^2 = \sum_{k=1}^n (d i_k + e j_k + f - v_k)^2 \quad (13)$$

次に Φ_u , Φ_v が最小となる a, b, c, d, e, f を求める. Φ_u, Φ_v は二次関数なので, まず Φ_u に対して a, b, c で, Φ_v に対して d, e, f でそれぞれ偏微分をする. 偏微分した関数が0すなわち極値となる Φ_u, Φ_v は最小値となる. この関数は次式で表される.

$$\begin{pmatrix} \sum_{k=1}^n i_k^2 & \sum_{k=1}^n i_k j_k & \sum_{k=1}^n j_k \\ \sum_{k=1}^n i_k j_k & \sum_{k=1}^n j_k^2 & \sum_{k=1}^n j_k \\ \sum_{k=1}^n i_k & \sum_{k=1}^n j_k & n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{k=1}^n u_k i_k \\ \sum_{k=1}^n u_k j_k \\ \sum_{k=1}^n u_k \end{pmatrix} \quad (14)$$

$$\begin{pmatrix} \sum_{k=1}^n i_k^2 & \sum_{k=1}^n i_k j_k & \sum_{k=1}^n j_k \\ \sum_{k=1}^n i_k j_k & \sum_{k=1}^n j_k^2 & \sum_{k=1}^n j_k \\ \sum_{k=1}^n i_k & \sum_{k=1}^n j_k & n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ e \\ f \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{k=1}^n v_k i_k \\ \sum_{k=1}^n v_k j_k \\ \sum_{k=1}^n v_k \end{pmatrix} \quad (15)$$

(14)式, (15)式より a, b, c, d, e, f の値を求める.

$$\begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{k=1}^n i_k^2 & \sum_{k=1}^n i_k j_k & \sum_{k=1}^n j_k \\ \sum_{k=1}^n i_k j_k & \sum_{k=1}^n j_k^2 & \sum_{k=1}^n j_k \\ \sum_{k=1}^n i_k & \sum_{k=1}^n j_k & n \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \sum_{k=1}^n u_k i_k \\ \sum_{k=1}^n u_k j_k \\ \sum_{k=1}^n u_k \end{pmatrix} \quad (16)$$

$$\begin{pmatrix} d \\ e \\ f \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{k=1}^n i_k^2 & \sum_{k=1}^n i_k j_k & \sum_{k=1}^n j_k \\ \sum_{k=1}^n i_k j_k & \sum_{k=1}^n j_k^2 & \sum_{k=1}^n j_k \\ \sum_{k=1}^n i_k & \sum_{k=1}^n j_k & n \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \sum_{k=1}^n v_k i_k \\ \sum_{k=1}^n v_k j_k \\ \sum_{k=1}^n v_k \end{pmatrix} \quad (17)$$

これにより, アフィン変換行列 A を求める.

誤差量の許容範囲点を α としたとき, 誤差 δ_{uk}, δ_{vk} が最小二乗法に与える影響を小さくするように, 以下の式により重み $w_k(\delta_{uk}), w_k(\delta_{vk})$ を計算する.

$$w_k(\delta_{uk}) = \begin{cases} \left\{1 - \left(\frac{\delta_{uk}}{\alpha}\right)^2\right\}^2 & (|\delta_{uk}| \leq \alpha) \\ 0 & (|\delta_{uk}| > \alpha) \end{cases} \quad (18)$$

$$w_k(\delta_{vk}) = \begin{cases} \left\{1 - \left(\frac{\delta_{vk}}{\alpha}\right)^2\right\}^2 & (|\delta_{vk}| \leq \alpha) \\ 0 & (|\delta_{vk}| > \alpha) \end{cases} \quad (19)$$

$|\delta_{uk}|, |\delta_{vk}|$ が許容範囲 α 以上の場合はそのキーポイントは画像補正処理には使用しない。
 $|\delta_{uk}|, |\delta_{vk}|$ が許容範囲 α 以下の場合は $|\delta_{uk}|, |\delta_{vk}|$ が小さいほど画像補正処理の計算に与える影響を大きくする。この重み $w_k(\delta_{uk}), w_k(\delta_{vk})$ を (u_k, v_k) に関して計算し、 w_k を付加した最小二乗法を再度行うことで、重みを付加したアフィン変換行列 A' を得る。

$$A' = \begin{pmatrix} a' & b' & c' \\ d' & e' & f' \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (20)$$

$$\begin{pmatrix} \sum_{k=1}^n w_k(\delta_{uk}) i_k^2 & \sum_{k=1}^n w_k(\delta_{uk}) i_k j_k & \sum_{k=1}^n w_k(\delta_{uk}) i_k \\ \sum_{k=1}^n w_k(\delta_{uk}) i_k j_k & \sum_{k=1}^n w_k(\delta_{uk}) j_k^2 & \sum_{k=1}^n w_k(\delta_{uk}) j_k \\ \sum_{k=1}^n w_k(\delta_{uk}) i_k & \sum_{k=1}^n w_k(\delta_{uk}) j_k & \sum_{k=1}^n w_k(\delta_{uk}) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a' \\ b' \\ c' \end{pmatrix} \\ = \begin{pmatrix} \sum_{k=1}^n w_k(\delta_{uk}) u_k i_k \\ \sum_{k=1}^n w_k(\delta_{uk}) u_k j_k \\ \sum_{k=1}^n w_k(\delta_{uk}) u_k \end{pmatrix} \quad (21)$$

$$\begin{pmatrix} \sum_{k=1}^n w_k(\delta_{vk}) i_k^2 & \sum_{k=1}^n w_k(\delta_{vk}) i_k j_k & \sum_{k=1}^n w_k(\delta_{vk}) i_k \\ \sum_{k=1}^n w_k(\delta_{vk}) i_k j_k & \sum_{k=1}^n w_k(\delta_{vk}) j_k^2 & \sum_{k=1}^n w_k(\delta_{vk}) j_k \\ \sum_{k=1}^n w_k(\delta_{vk}) i_k & \sum_{k=1}^n w_k(\delta_{vk}) j_k & \sum_{k=1}^n w_k(\delta_{vk}) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d' \\ e' \\ f' \end{pmatrix} \\ = \begin{pmatrix} \sum_{k=1}^n w_k(\delta_{vk}) v_k i_k \\ \sum_{k=1}^n w_k(\delta_{vk}) v_k j_k \\ \sum_{k=1}^n w_k(\delta_{vk}) v_k \end{pmatrix} \quad (22)$$

式(21), 式(22)より a', b', c', d', e', f' が求まる。

$$\begin{pmatrix} a' \\ b' \\ c' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{k=1}^n w_k(\delta_{uk}) i_k^2 & \sum_{k=1}^n w_k(\delta_{uk}) i_k j_k & \sum_{k=1}^n w_k(\delta_{uk}) i_k \\ \sum_{k=1}^n w_k(\delta_{uk}) i_k j_k & \sum_{k=1}^n w_k(\delta_{uk}) j_k^2 & \sum_{k=1}^n w_k(\delta_{uk}) j_k \\ \sum_{k=1}^n w_k(\delta_{uk}) i_k & \sum_{k=1}^n w_k(\delta_{uk}) j_k & w_k(\delta_{uk}) n \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \sum_{k=1}^n w_k(\delta_{uk}) u_k i_k \\ \sum_{k=1}^n w_k(\delta_{uk}) u_k j_k \\ \sum_{k=1}^n w_k(\delta_{uk}) u_k \end{pmatrix} \quad (23)$$

$$\begin{pmatrix} d' \\ e' \\ f' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{k=1}^n w_k(\delta_{vk}) i_k^2 & \sum_{k=1}^n w_k(\delta_{vk}) i_k j_k & \sum_{k=1}^n w_k(\delta_{vk}) i_k \\ \sum_{k=1}^n w_k(\delta_{vk}) i_k j_k & \sum_{k=1}^n w_k(\delta_{vk}) j_k^2 & \sum_{k=1}^n w_k(\delta_{vk}) j_k \\ \sum_{k=1}^n w_k(\delta_{vk}) i_k & \sum_{k=1}^n w_k(\delta_{vk}) j_k & w_k(\delta_{vk}) n \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \sum_{k=1}^n w_k(\delta_{vk}) v_k i_k \\ \sum_{k=1}^n w_k(\delta_{vk}) v_k j_k \\ \sum_{k=1}^n w_k(\delta_{vk}) v_k \end{pmatrix} \quad (24)$$

これにより A' が求まる。原画像に対し、アフィン変換行列 A' の変換を行うと、変換後の座標値に小数が含まれるため、全ての画素が埋まらなくなる可能性がある。そこで、変換後の画像の座標からそれに対応する元画像の座標にある色を取得することで、変換による不足画素を補う。まず逆数 A'^{-1} を求める。

$$A'^{-1} = \frac{1}{\det A'} \begin{pmatrix} e' & -b' & b'f' - c'e' \\ -d' & a' & c'd' - a'f' \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (25)$$

求められた A'^{-1} を変換行列の左辺にかけることで画像の拡大縮小・回転の補正を行う。

$$A'^{-1} \begin{pmatrix} u_k \\ v_k \\ 1 \end{pmatrix} = A'^{-1} A' \begin{pmatrix} i_k \\ j_k \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} i_k \\ j_k \\ 1 \end{pmatrix} \quad (26)$$

これにより、撮影画像とテンプレート画像の各キーポイントの座標を一致させることができる。

2.2.2 閾値の自動決定手法

入力画像とテンプレート画像を比較することで、テンプレート画像には存在しない領域を抽出することで未完了箇所を検出する。入力画像とテンプレート画像との間で差分処理を行う。差分処理後の画像は背景と対象物とが未分類状態の濃淡画像である。そこで、次に影などを含む背景と対象物を分離するために二値化を行う。従来手法では二値化処理を行う際の閾値は複数の実験により得られた値を使用していた。しかし、一般的に考えれば保全対象の設備の色は一色に限定することはできない。また、対象物に応じて二値化の度に閾値を設定することも実用的ではない。そこで、閾値を自動決定する自動決定を導入する。本研究では閾値の決定に判別分析法(大津の二値化)[10]を用いる。判別分析法とは画像中の分離度(separation metrics)が最大となる閾値を求め、自動的に二値化を行う手法である。分離度とはクラス内分散 σ_w^2 とクラス間分散 σ_b^2 の比であり、分離度は以下の式から求められる。

$$\sigma_w^2 = \frac{\omega_1 \sigma_1^2 + \omega_2 \sigma_2^2}{\omega_1 + \omega_2}, \quad \sigma_b^2 = \frac{\omega_1 \omega_2 (m_1 - m_2)^2}{(\omega_1 + \omega_2)^2} \quad (27)$$

$$\sigma_{th}^2 = \sigma_b^2 + \sigma_w^2 \quad (28)$$

$$\frac{\sigma_b^2}{\sigma_w^2} = \frac{\sigma_b^2}{\sigma_{th}^2 - \sigma_b^2} \quad (29)$$

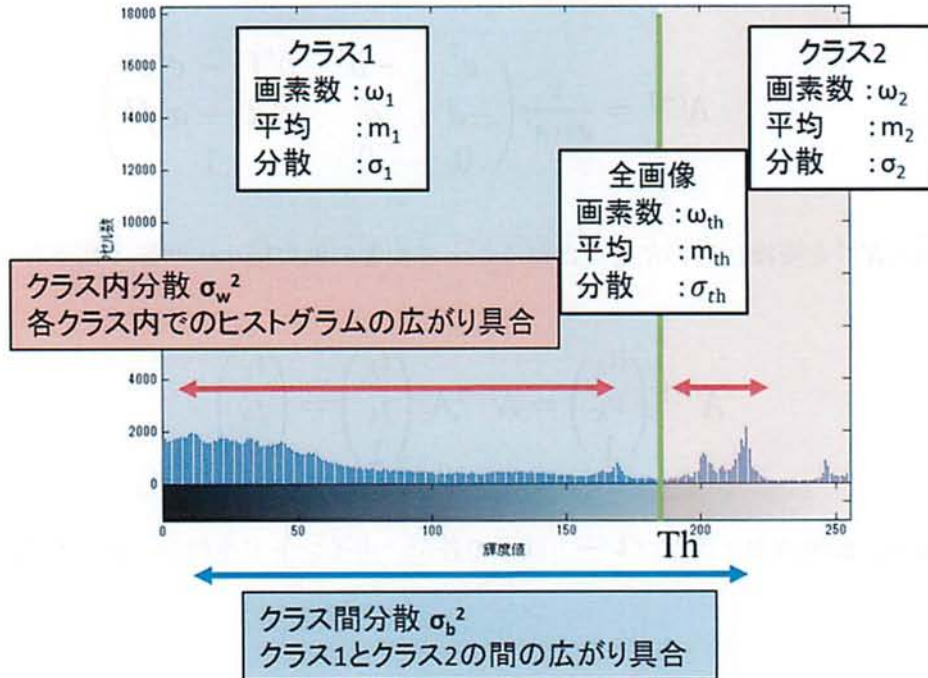


図9 判別分析法

2.2.3 背景差分処理・2値化処理

背景差分処理[11]とは入力画像とテンプレート画像を比較することで、事前を取得した画像には存在しない物体を抽出する処理を指す。このとき、事前を取得した画像を背景画像と呼ぶ。また、背景画像に存在しない物体が占める領域を前景領域、それ以外を背景領域と呼ぶ。背景差分は次式により求めることが出来る。

$$T = |I(u, v) - B(u, v)| \quad (2)$$

T は輝度値の変化量、 $I(u, v)$ は入力画像、 $B(u, v)$ は背景画像とする。急激な輝度値の変化がピクセル上に生じた場合、変化量 T の値は大きくなる。次に2値化処理を行う。ここでピクセル状態を表す $M(u, v)$ は、輝度変化を処理することにより、次式に示すように前景領域(1)、背景領域(0)に判定することが出来る。 Th は急激な変化量を判定する閾値である。

$$M(u, v) = \begin{cases} 1, & T > Th \\ 0, & T < Th \end{cases} \quad (3)$$

背景差分処理による前景領域検出の様子を図10に示す。

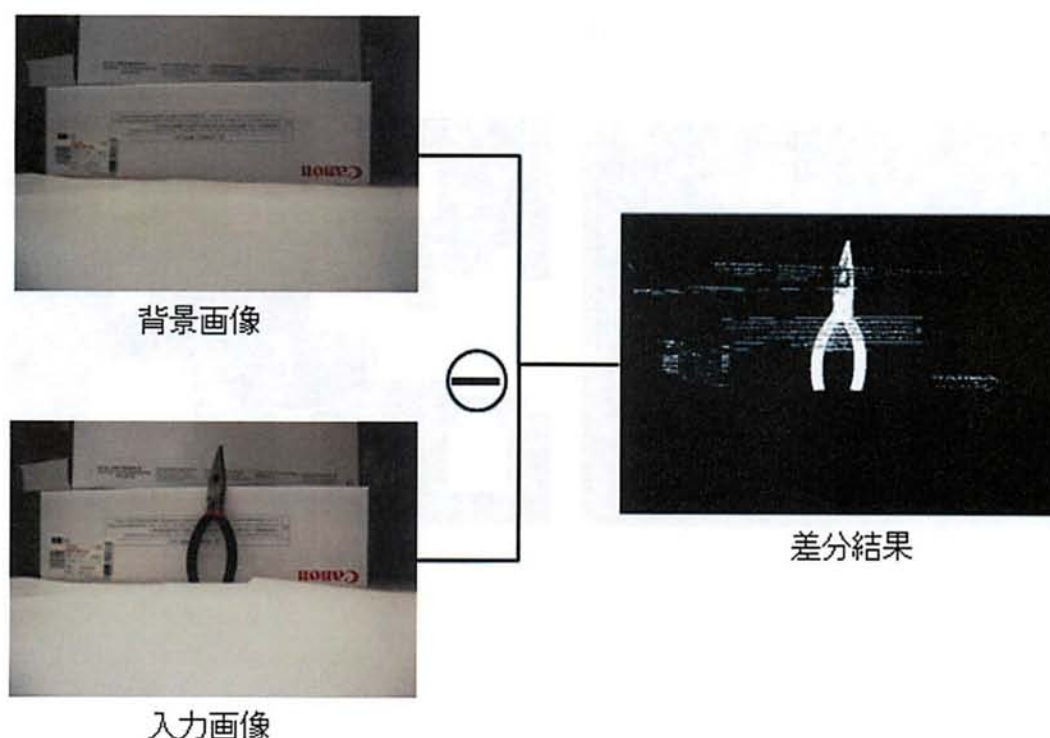


図10 前景領域の検出例

2.2.4 縮小・膨張処理

次に得られた差分画像に対して縮小・膨張処理を行う。縮小・膨張処理とは二値化された白黒画像に対して行うもので、注目画素周辺 8 画素を調べ、8 画素のうち 1 画素でも黒い画素がある場合、注目画素を黒い画素に置き換える処理を縮小処理、8 画素のうち 1 画素でも白い画素がある場合、注目画素を白い画素に置き換える処理を膨張処理という。縮小・膨張処理を複数繰り返すことで、差分画像内のノイズの除去を行う。

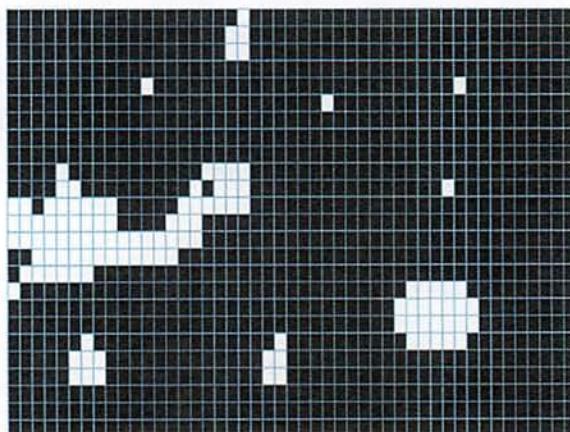


図 11 原画像例

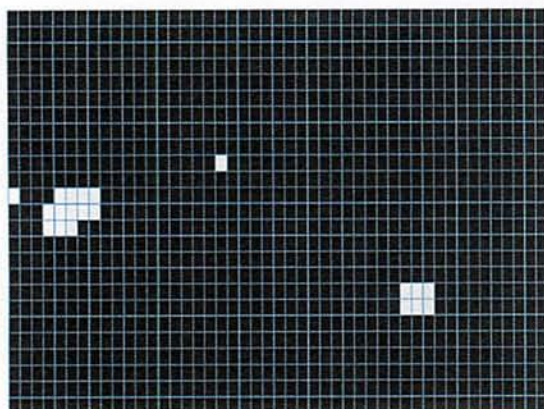


図 12 縮小処理例

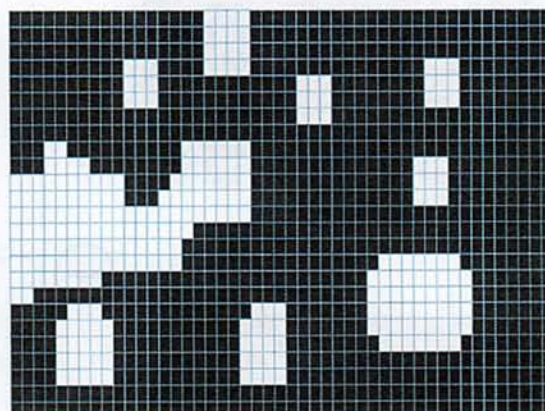


図 13 膨張処理例

以下に差分画像とノイズ除去後の画像例を示す.



図 14 テンプレート画像



図 15 撮影画像

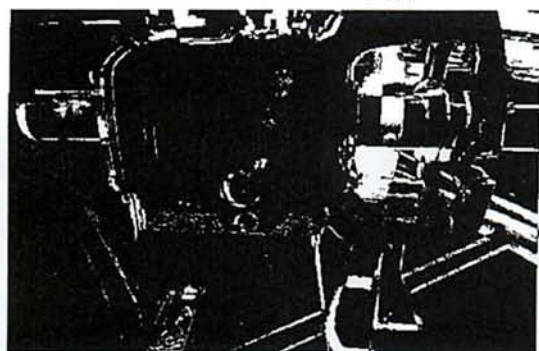


図 16 差分処理結果

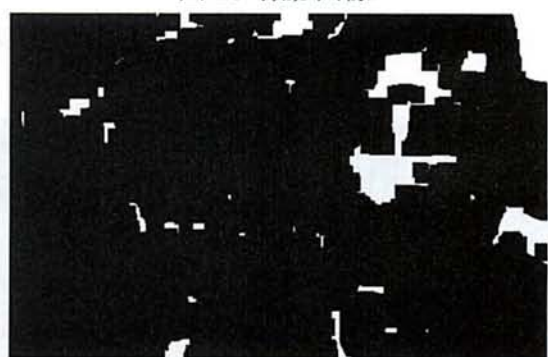


図 17 ノイズの除去結果

2.2.5 画像の合成

対象物によっては部品の不足箇所が背景差分処理により検出されない場合がある。これは撮影画像の部品の不足箇所がテンプレート画像の所定の箇所より、輝度値が高い場合と低い場合があるためである。背景差分処理では単純に2画像間の輝度値を引くことで輝度値の差を0から255で求め、表示するものなので、輝度値の差が負の値となる場合は輝度値が0であると判断されてしまうためである。そこで、撮影画像からテンプレート画像を引いた差分画像Aとテンプレート画像から撮影画像を引いた差分画像Bの2枚の差分画像を作成し、これらに対し、2値化処理を行った後に2枚の画像を合成し、全ての部品の不足箇所を検出することを可能にする。

次に(3)により得られた2値化画像とテンプレート画像とを合成する。これにより撮影画像とテンプレート画像の差異を表示する。図18、図19に差分処理の結果、図20に差分画像の合成結果、図21に未完了箇所の検出結果を示す。



図18 撮影画像からテンプレート画像
を引いた結果

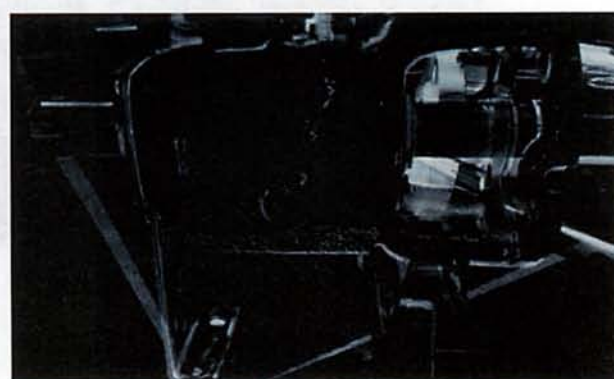


図19 テンプレート画像から撮影画像
を引いた結果

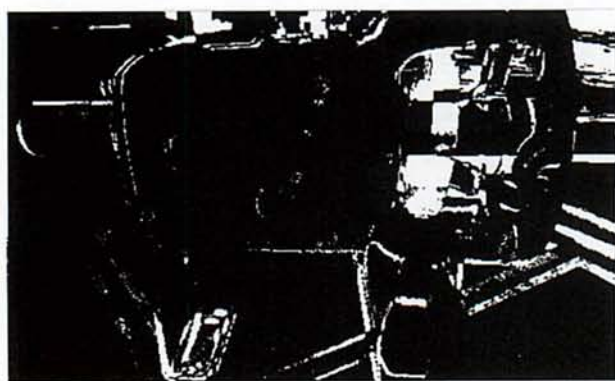


図20 差分画像の合成結果

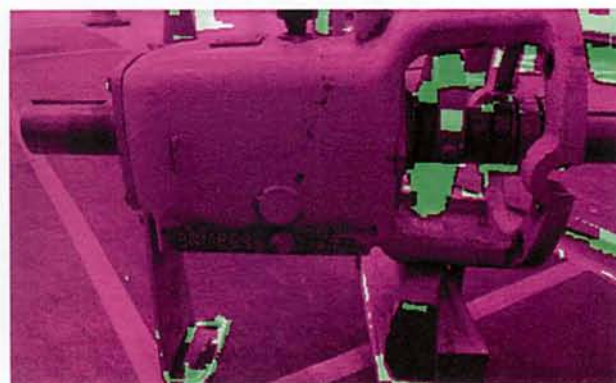


図21 未完了箇所の検出結果

3. システム構成

3.1 使用機材

本システムは背面にカメラを備えたタブレット PC を使用する。応用例では、ヘッドマウントディスプレイと携帯することのできる小型のノート PC を使用する。

また、本システムの開発環境には MathWorks 社が開発している数値解析ソフトウェアである MATLAB を使用する。

(1) タブレット PC

製造元	:	日本電気株式会社
機種名	:	LaVie LU350/T
CPU	:	インテル® Core™ M プロセッサー
メモリ	:	4.00 GB
OS	:	Windows8.1
内蔵ディスプレイ	:	11.6 型ワイド
質量	:	795 g
カメラ	:	HD 解像度(1080p)対応カメラ, 有効画素数 500 万画素

(2) デスクトップ PC (サーバー側 PC)

製造元	:	日本ヒューレット・パッカード株式会社
機種名	:	HP Pavilion 500-240jp/CT
CPU	:	インテル® Core™ i5-4440 プロセッサー
メモリ	:	8.00 GB
OS	:	Windows10
ストレージ	:	500GB
質量	:	7.0kg

3.2 基本機能

本システムは画像認識技術を用いてタブレット PC の背面カメラで撮影された対象物は何であるかを判別し、その結果に応じた説明文書を画面上に表示することができる。

その中で、本システムはプラントメンテナンスに使用される工具を判別し、その工具の使用方法を表示する機能、作業中の機械設備の作業進捗状況を判別し、次工程における作業内容を表示する機能、撮影画像に対し、画像処理を行うことで、作業ミスを検知し、画面上に表示する機能、複数の PC を用いて画像認識処理を遠隔で行うことのできる機能がある。図 22 にシステムの起動画面を示す。

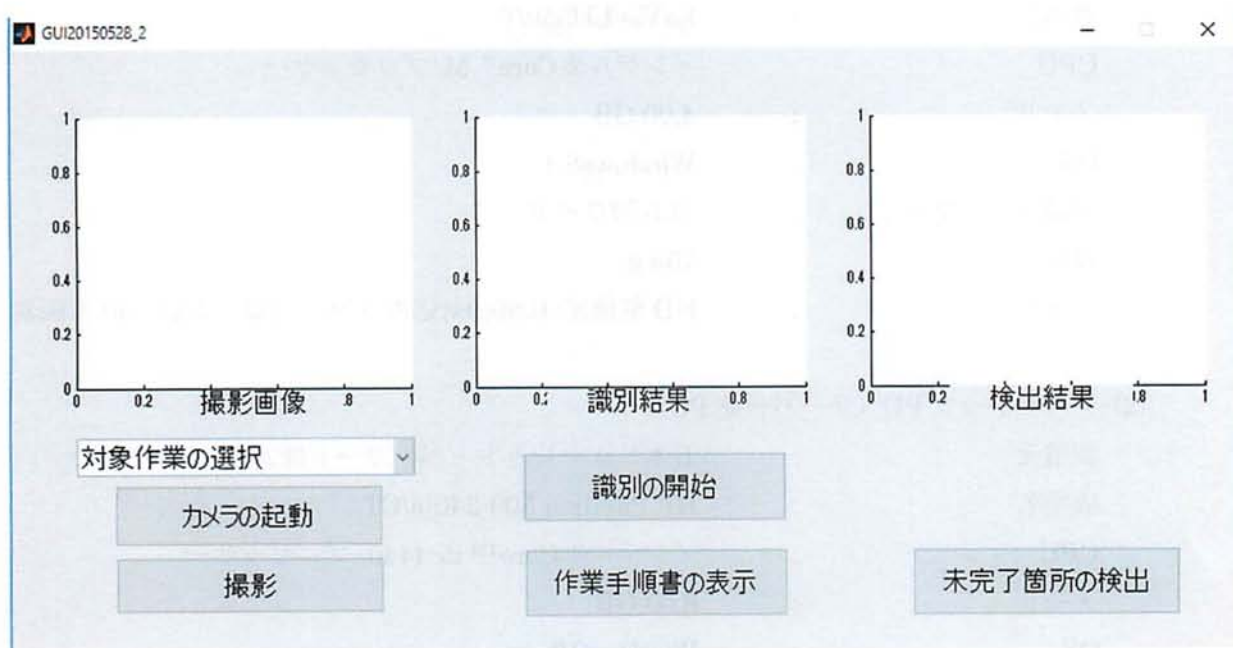


図 22 システムの起動画面

本システムは以下の手順により行われる。

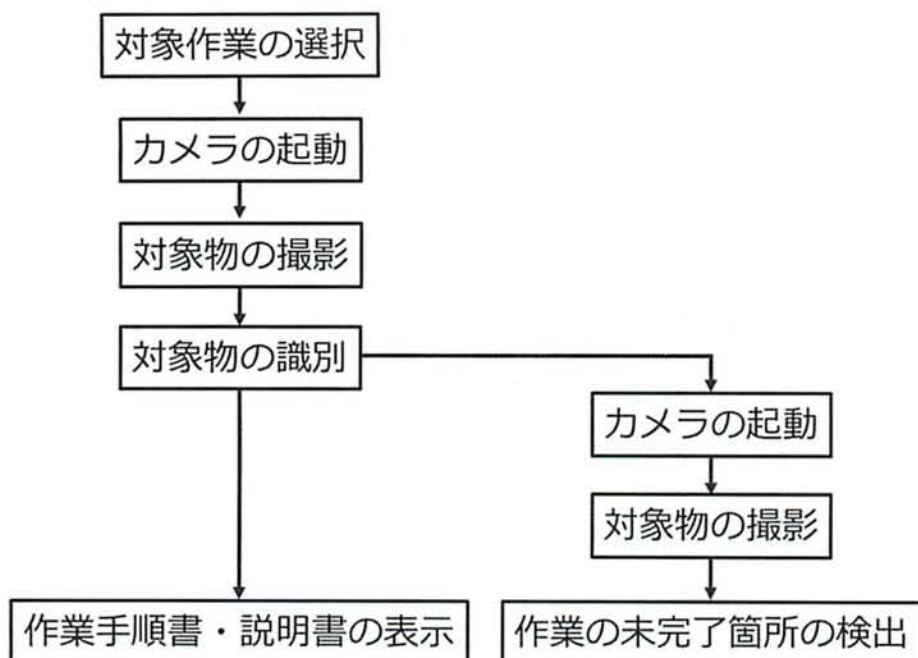


図 23 システムの操作手順

(1) 対象作業の選択

対象となる作業を選択する。「対象作業の選択」のポップアップメニューを選択すると、選択することのできる作業のリストの一覧が表示される。ここで対象とする作業を選択することができる。

(2) カメラの起動

タブレット PC 背面に搭載されたカメラを起動する。「カメラの起動」のボタンを選択するとカメラ映像が画面上に表示される。

(3) 対象物の撮影

対象物をカメラ映像の中心に捉え、写真を撮影する。「撮影」のボタンを選択するとカメラ映像がフォルダに保存される。

(4) 対象物の識別

撮影画像に対し、テンプレートマッチングを行う。「識別の開始」のボタンを選択すると複数のテンプレート画像から撮影画像と最も類似したテンプレート画像を選び出す。また、選び出されたテンプレート画像のファイル名が所定のテキストファイルに書き出される。

(5) 作業手順書・説明書の表示

テンプレートマッチングにより選出された対象物に応じた作業手順書・説明書を表示する。「作業手順書の表示」のボタンを選択するとテンプレートマッチングにより書き出されたテキストファイル内の文章を参照し、そのテンプレート画像に適したパワーポイントファイルが画面上に表示される。

(6) 作業の未完了箇所の検出

撮影画像中の部品の不足箇所等を検出する。「未完了箇所の検出」のボタンを選択すると撮影画像と選出されたテンプレート画像を比較し、2 画像間の相違箇所を検出し、画面上に表示される。

3.3 遠隔操作機能

本システムは国内外の多くのプラントで複数の作業者に使用されることを前提としている。その際、テンプレート画像や作業手順書を更新しようとする、すべてのタブレット PC に対し、データを更新しなければならない。そのため、作業の追加や作業手順の変更、作業対象物を変更する際に、膨大な人的コストを要する。また、画像処理を行う際の処理時間はタブレット PC のスペックに大きく依存するため、端末ごとに処理時間が異なる。そのため、作業者が使用し、対象物の撮影と作業手順書等の表示のみを行うクライアント側 PC と管理者が使用し、複雑な画像処理を行うサーバー側 PC とに分け、これらをクラウドでつなぐことで、データの一元管理および処理時間の均一化を可能である。従来手法ではテンプレート画像や作業手順書等のデータはサーバー側 PC に保存されており、データの送受信を行う際に、大幅に時間がかかっていた。そこで、テンプレートマッチング処理に必要なテンプレート画像やテンプレートマッチング結果に基づき表示される作業手順書はクラウド上に保存し、データの送受信を最小限にすることで、処理速度を短縮することができた。以下に処理の詳細を示す。図 24 に処理内容のフローチャート図を示す。

- (1) クライアント側 PC が写真を撮影するとそのデータがクラウドに自動で送信される。
- (2) サーバー側 PC がクラウドにデータが転送されたことを検知し、送られた画像に対して高速の画像処理を行い、選ばれたテンプレート画像のファイル名がクラウド上のテキストファイルに書き込まれる。
- (3) バッチファイルを使用し、テキストファイルに書き込まれたテンプレート画像名を作業手順書名に変換する。
- (4) クライアント側 PC でテキストファイルに書かれた作業手順書を画面上に表示する。

テンプレート画像や作業手順書等のデータはクライアント側タブレット PC に保存する必要がない。また、テンプレートマッチング等の複雑な処理はサーバー側 PC で行われるため、処理時間はタブレット PC のスペックに依存しない。

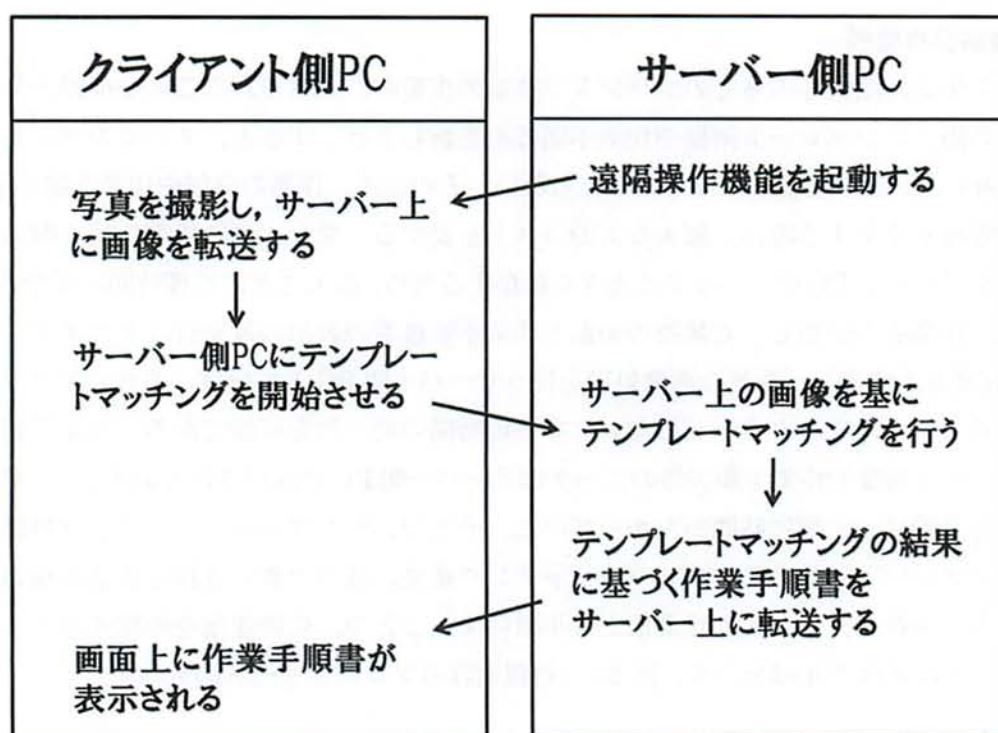


図 24 遠隔操作機能のフローチャート図

4. 適用例

4.1 工具の使用手法説明機能

プラントメンテナンスにおいて使用される工具は多種多様であり、新人作業者はすべての工具の使用手法や使用用途を学習するのに時間を要する。そこで、本機能ではタブレット PC で撮影された工具の写真とあらかじめ用意しておいた複数の工具の写真とでテンプレートマッチング処理を行い、撮影された工具を判別する。判別された工具の使用手法や使用する作業内容等を画面上に表示する。これにより、作業者が工具の使用手法を学ぶ際の時間を短縮することができる。

戻る

工具名: **エアードリル**





<工具説明>
 圧縮空気を動力源とする穴あけ機械工具。
 ギアで回転数を落とし回転トルクを上げ、その力を先端のドリルに伝える。
 電動工具と比べて長所は小型、軽量。高速回転を得やすく、
 耐水性に優れ、引火、爆発、感電の危険がない等。
[エアーツール マニュアル\(注意点など\)](#)は[こちら](#)を参照。

<使用用途>
 抜管の際にねじ込む矢の座の座りを良くするために、ザグリを行う際に使用。

ザグリ
 における作業動画


図 25 工具説明画面

戻る


ザグリ

<作業一覧>

<使用工具一覧>
画像をクリックすると、工具説明が表示



エアードリル




潤滑剤

<目的> 管壁に拡張固定されたチューブの固着力を減少させるために、古チューブの管壁に施す加工。

<作業手順>

- 作業の邪魔とならないよう、配線の配置を行う。
- チューブの内径に応じて、エアードリルに用いる先端部の選択を行う。
- エアードリルにエアースーツを取り付ける。
- 古いチューブの拡張部にエアードリルを使用し、ザグリを行う。図面で確認した拡張範囲の数値まで、メタルボーラーが挿入された状態を作業終了の目安とする。
適宜、潤滑剤(ワイナザー タッピングコンパウンド)を6～10cm離して切削部に吹き付けながら行う。



ザグリ後仕上げ

<品質上の注意点>

作業3, 4) 工具寿命延長、精度向上、切削速度と送りの増大のため、適宜、潤滑剤(ワイナザー タッピングコンパウンド)を切削部に吹き付けながら行う。
(安全な取り扱い方法は[こちら](#)を参照)

作業3, 4) [エアーツールに関するマニュアル\(注意点など\)](#)は[こちら](#)を参照。

作業4) 人体保護のため、作業保護具を使用する。

<作業一覧>

研削

開先加工

ザグリ

拡張
クランプ

拡張
チューブ
ブロー

管穴清掃

計測

チューブ挿入

拡張

溶接

図 26 対象工具を使用する作業説明画面

工具に関する表示内容は、以下の4種類の情報から構成している。

(1) 工具使用方法

工具の一般的な使用用途等を表示する。

(2) 工具の使用上の注意

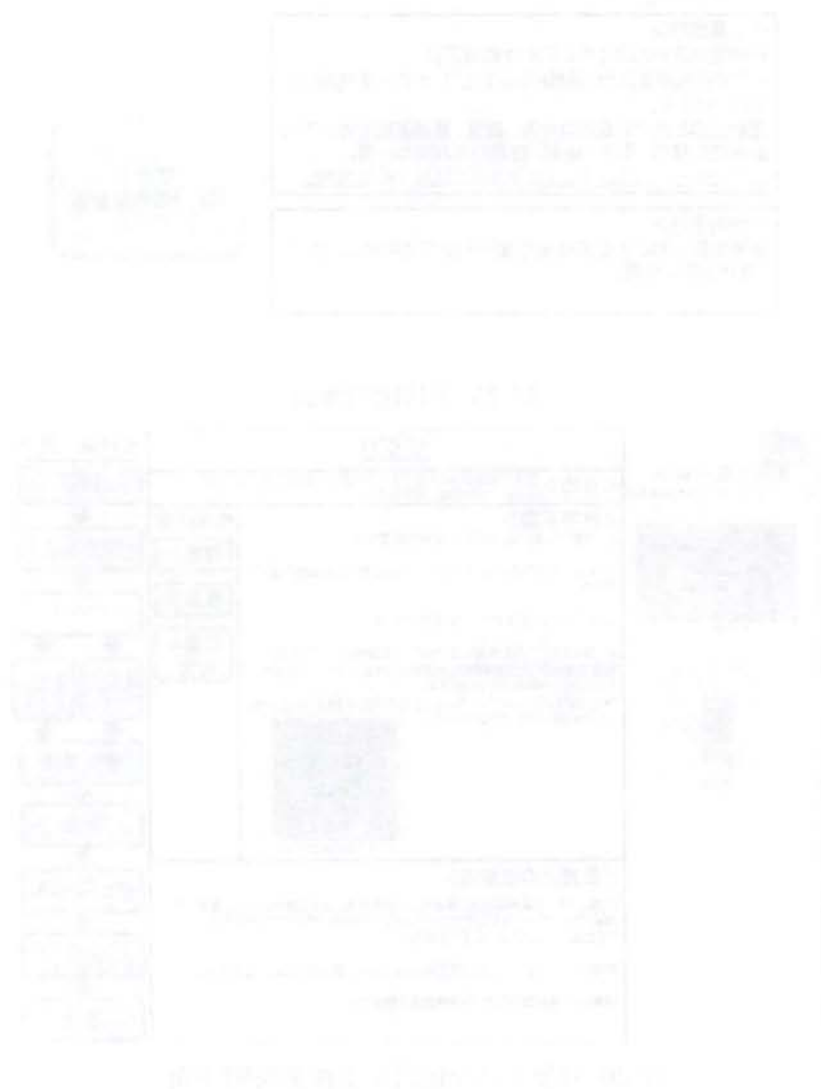
作業者が工具を使用する上での安全上、設備に対する品質上の注意点等を表示する。

(3) 工具画像

工具の形状を表示しており、工具の一覧形式で複数表示している場合は、他の工具の使用方法等も併せて閲覧できる。

(3) 実作業動画

工具を実際に使用した際の作業内容を文章、図、動画で閲覧することができる。



4.2 作業の進捗確認機能

4.2.1 進捗確認機能

プラントメンテナンスにおいて、研修期間内にすべての機器、機械設備等を実習により学習することは困難である。そこで、本機能では点検中の機械設備の画像を撮影し、テンプレートマッチングを行うことで、現在の作業の進捗状況を把握し、次工程に行うべきことを表示し、作業者に知らせることができる。これにより、実習を行うことのできなかった作業に対し、実際に作業を行いながら作業方法を学ぶことができる。

グラウンドカバー取り外し			
作業内容 (作業番号をクリックすると、作業手順動画を表示します。) 3-1 ナットを対角にあるものを順番に外す。 3-2 クレーンを用いてグラウンドカバーを軸受胴体から外す。 3-3 主軸からメカニカルシールを取り外す。	 作業前  作業後	作業一覧 ケーシング 取り外し 羽根車 取り外し グラウンドカバー 取り外し 主軸 取り外し 玉軸受 取り外し 使用工具 一覧	
安全・作業上の注意点 ・ナットを外す際は一つ一つ外すのではなく、全部外すに経めていく。 ・グラウンドカバーを取り外す際にクレーンの高さは常に水平になるように調整する。		終了	

図 27 作業内容説明画面

3-2. グラウンドカバーの取り外し			
	作業一覧 ケーシング 取り外し 羽根車 取り外し グラウンドカバー 取り外し 主軸 取り外し 玉軸受 取り外し 使用工具 一覧 作業説明に 戻る 終了	<目的> ポンプの軸受胴体とグラウンドカバーを分解する。	安全・作業上の注意点
<作業手順> 3-1 ナットを対角にあるものを順番に外す。 3-2 クレーンを用いてグラウンドカバーを軸受胴体から外す。 3-3 主軸からメカニカルシールを取り外す。			

図 28 作業動画表示画面

作業に関する表示内容は以下の 8 種類の情報により構成している。

(1) 作業フロー

表示している工程の各作業の詳細を順番に表示しており、各作業へのリンク付けをしている。工程内での現在位置を赤字で表示することで自分の作業を把握できる。

(2) 作業の目的

工程内の各作業の目的等を表示する。

(3) 作業・安全上の注意点

各作業を行う際に、工具や設備などが作業者の身体に与える危険や作業者が工具や設備に対して品質を低下させる恐れのある危険を表示する。

(4) 作業一覧

対象作業の全工程を順番に表示しており、各工程へのリンク付けがなされている。作業中の工程の部分は赤く表示され、他工程を選択すれば他の工程の作業手順書を表示できる。

(5) 使用工具一覧

表示している作業で用いられるすべての工具画像が一覧で表示されており、工具画像からは各工具に関するマニュアルへのリンク付けがされていて、工具画像を選択することで、工具に関するマニュアルを表示することができる。

(6) 作業動画

装置の使用者が現実感を持って作業方法を体得するために、作業熟達者が作業している様子や手元の動作などを閲覧することができる。

(7) 分解全体図

対象設備全体に対して作業者がどの部分の作業をしているかを確認することができる。工程毎に作業すべき部分を赤枠で表示している。

(8) 作業終了図

各工程において作業終了状態の見本の画像を表示する。作業者は表示された画像と自身が実際に作業した対象設備とを閲覧し確認する。また、作業者は表示された画像と同じように撮影することで次工程の作業手順書を表示することができる。

4.2.2 作業の未完了箇所検出機能

作業の進捗確認機能を使用した際、テンプレート画像には含まれていない部品の付け忘れや付け間違いなどのヒューマンエラーが生じ、重大な事故が起こってしまう可能性がある。そこで、本機能では、タブレット PC により撮影された画像とテンプレート画像とを比較し、それぞれの画像の相違箇所を検出することで部品の付け忘れや付け間違いを検知し、作業者に提示することができる。これにより、作業者が作業を行う際に生じるヒューマンエラーを防ぐことができる。

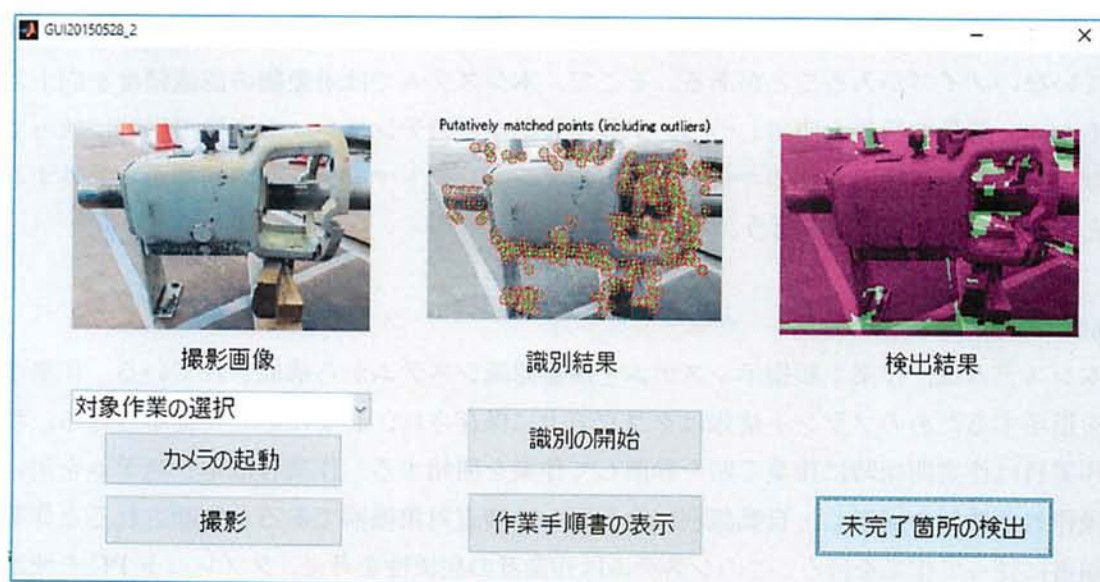


図 29 作業の未完了箇所の結果表示画面

4.3 同種異系統機器確認機能

上記で提案した一致キーポイントの外れ値を除外する対象作業識別手法を用いて、プラントの現場作業を対象とした誤操作・誤判断を防ぐための作業情報提示システムを開発した。作業の進捗確認機能では背景に検出される一致キーポイントを除去することで精度の向上を図った。しかし、本システムにおいては撮影対象と同一の形状をもつ作業対象物がプラント内に多く存在するため、正しい識別を行うためには背景の情報も使用した上でテンプレートマッチングを行う必要がある。しかし、プラント作業現場には、テンプレートマッチングの認識精度に影響を及ぼす他の要因がある。機械設備の保全作業は複数の作業員により行われるため、撮影画像の背景に工具や人影などのテンプレート画像撮影時に映っていないノイズが入ることがある。そこで、本システムでは対象物の認識精度を向上させるため、背景の情報を使用しつつ、工具や人影などのテンプレート画像撮影時に映っていないノイズから検出されるキーポイントをテンプレートマッチングの候補から除外することで作業対象物の認識を行う。

4.3.1 同種異系統機器確認

本システムは、作業手順指示システムと機器認識システムから構成されている。作業手順を指示するためのプラント情報はクラウド上に保存され、必要に応じて提示される。現場作業員は作業開始時に作業手順を参照して作業を開始する。作業員は本システムを用いて操作対象機器を撮影し、自動識別により正しい捜査対象機器であると判断されると作業手順書に従って作業を行う。このシステムは作業員の利便性を考え、タブレット PC を使用した。図 30 にシステムの構成、図 31 にシステムの起動画面、図 33、図 34 にシステムの動作風景を示す。

上記システムを利用した作業の流れは次の通りである。

- (1) 現場作業員はタブレット PC を操作して作業手順を確認し、最初の作業工程を選択し、作業手順書を表示する。
- (2) カメラで、対象設備・機器を撮影する。
- (3) 撮影された機器の画像をテンプレート画像と比較して撮影対象が正しい操作対象機器であることを確認する。
- (4) 対象機器を操作し作業を行う。
- (5) 作業を終了する。
- (6) 表示されている作業手順書を閉じ、次の作業工程を選択する。
- (7) (1)～(6)を繰り返し、作業を行う。
- (8) 作業をすべて完了したことを確認する。

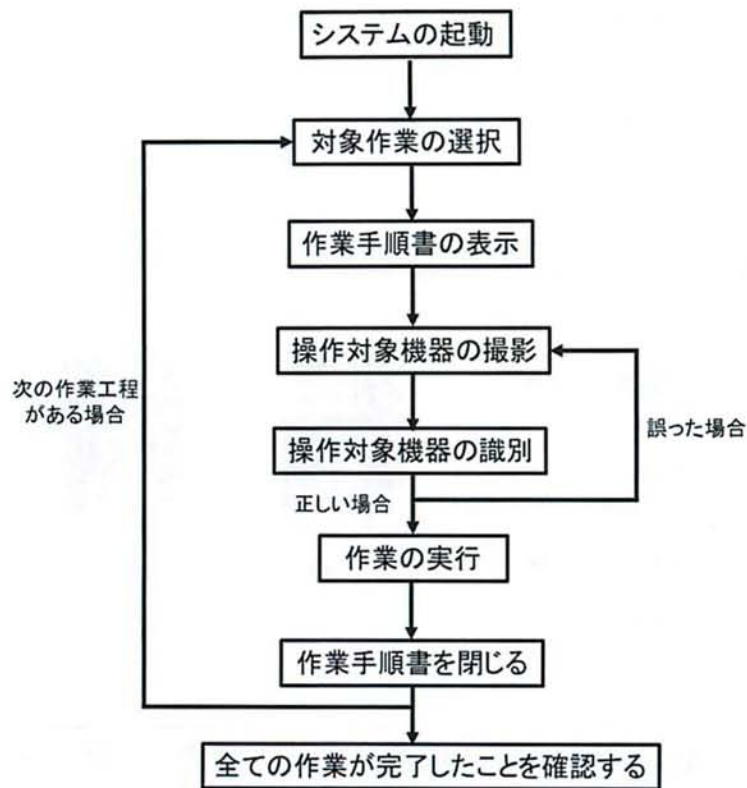
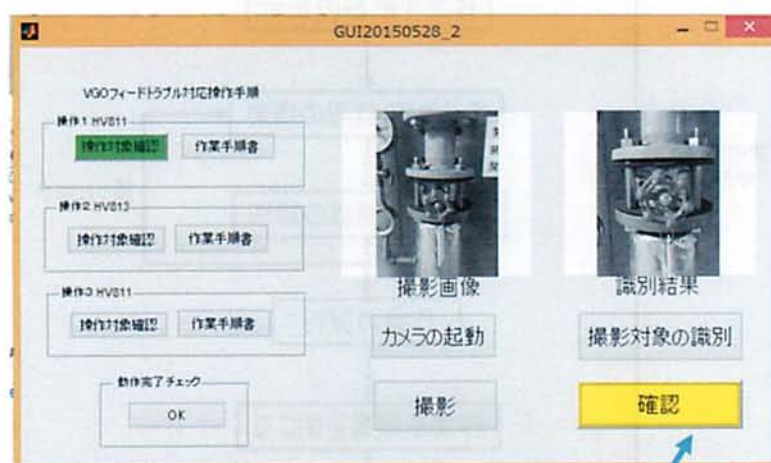


図 30 システム使用時の作業の流れ



図 31 システム画面

この際、一度選択された作業は対象作業のボタンが緑色に変化し、現在作業の進捗度を目視で確認することが出来る。また、作業は撮影された設備・機器が正しいものであると判断されると図 33 の右下部の「確認」のボタンが緑色に変化する。また撮影された設備・機器が誤ったものであると判断された場合には「確認」のボタンが赤色に変化する。これにより、作業対象機器を間違えることで生じるヒューマンエラーを未然に防ぐことが出来る。



作業対象物が正しい場合、ボタンが黄色に変化する

図 32 作業対象物の正誤判定



作業対象物が誤っている場合、ボタンが赤色に変化する

図 33 作業対象物の正誤判定

5. 運用実験内容

本システムの画像認識精度，画像処理精度，遠隔操作の際の処理時間の実用性を検証するために以下の3つの実験を行った

5.1 作業の進捗確認の精度検証

本システムの運用試験は，遠心ポンプの分解点検作業に対して行った．遠心ポンプの組立作業を

- ① ケーシングの取り外し，
- ② 羽根車の取り外し
- ③ グランドカバーの取り外し
- ④ 主軸受けの取り外し
- ⑤ 玉軸受の取り外し

の5工程に区分し，これらに対し，正しい識別を行うことが出来るかの検証を行った．

また，その際に SURF のみを使用した場合と SURF と一致キーポイントの外れ値を除外する手法を使用した場合の一致キーポイント情報の比較を行った．

その際，作業が全て完了したことを確認するために，作業完了後の写真もテンプレート画像として用意する．そのため，本実験では計 6 枚のテンプレート画像と工程ごとに撮影された 5 枚の撮影画像を用いてテンプレートマッチングを行う．その際のテンプレート画像の一覧および撮影画像の一覧を以下に示す．



図 34. 第 1 工程



図 35. 第 2 工程



図 36. 第 3 工程



図 37. 第 4 工程



図 38. 第 5 工程



図 39. 作業完了図



図 40. 撮影画像 1



図 41. 撮影画像 2



図 42. 撮影画像 3



図 43. 撮影画像 4



図 44. 撮影画像 5

5.2 作業未完了箇所の精度検証

遠心ポンプの組立作業内の主軸受け取り外し工程において提案手法による作業の未完了箇所の検出を行った。撮影画像では W/P ベ어링およびメカニカルシールが不足している。主軸受け取り外し工程のテンプレート画像と撮影画像に対し、提案手法を使用することで W/P ベ어링とメカニカルシールのみを検出することができれば遠心ポンプ分解点検作業における作業の未完了箇所を検出することが可能であると考えられる。



図 45. テンプレート画像



図 46. 撮影画像



図 47. W/P ベ어링



図 48. メカニカルシール

5.3 作業対象バルブの識別機能の精度検証

作業対象バルブの識別機能の精度検証実験は、首都大学東京日野キャンパスのボイラー室のバルブを対象に行った。従来の SURF 法および提案手法を図 49 の撮影画像と図 50 から図 53 の 4 枚のテンプレート画像に対して行った。これらのテンプレート画像中に存在するバルブは同一の形状をしているが、設置箇所・使用用途がそれぞれ異なる。撮影画像ではバルブ 1 を撮影したものであり、これを正しく識別することができるかの検証を行った。



図 49. 撮影画像



図 50. バルブ 1



図 51. バルブ 2



図 52. バルブ 3

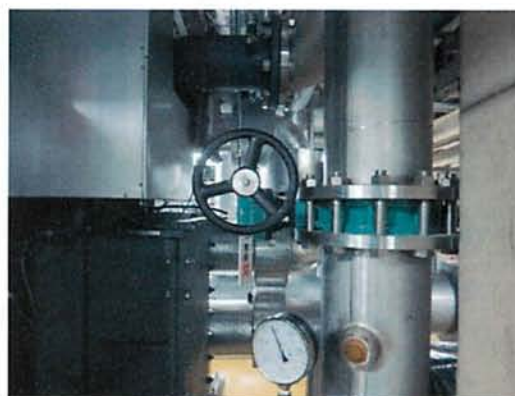


図 53. バルブ 4

6. 運用実験結果

6.1 作業の進捗判定

撮影画像 1 から 5 に対してそれぞれテンプレートマッチングを行った結果を以下に示す.

(1) 撮影画像 1 (第 1 工程)

第 1 工程を撮影した撮影画像 1 に対し, 従来手法を用いてテンプレートマッチングを行った結果, それぞれのテンプレート画像との一致キーポイントの数は 24, 11, 11, 21, 13, 14 となり, 正しい識別を行うことが出来たことを確認した.

次に提案手法を用いた場合の一致キーポイント数は 14, 8, 8, 13, 8, 11 となり, 正しい識別を行うことが出来た. この際の \bar{L} の値はそれぞれ 191.65, 270.23, 250, 239.6, 256.33, 262.77, σ の値はそれぞれ 111.62, 132.36, 147.63, 73.86, 123.76, 134.58 であった.

表1 撮影画像 1						
	第1工程	第2工程	第3工程	第4工程	第5工程	作業完了図
従来手法	24	11	11	21	13	14
提案手法	14	8	8	13	8	11

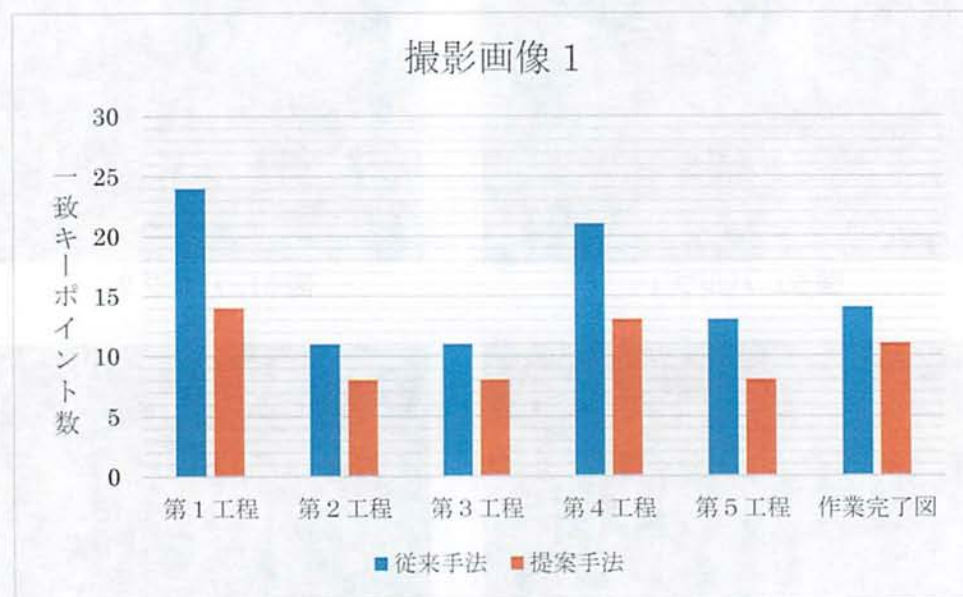


図 54. 撮影画像 1 に対する結果

(2) 撮影画像 2 (第 2 工程)

第 2 工程を撮影した撮影画像 2 に対し、従来手法を用いてテンプレートマッチングを行った結果、それぞれのテンプレート画像との一致キーポイントの数は 22, 69, 20, 35, 17, 20 となり、正しい識別を行うことが出来たことを確認した。

次に提案手法を用いた場合の一致キーポイント数は 18, 26, 20, 35, 17, 20 となり、正しい識別を行うことが出来た。この際の \bar{L} の値はそれぞれ 202.75, 37.73, 220.4, 168.84, 290.5, 299.61, σ の値はそれぞれ 118.25, 69.68, 166.12, 127.29, 143.84, 117.31 であった。

表2 撮影画像 2						
	第1工程	第2工程	第3工程	第4工程	第5工程	作業完了図
従来手法	22	69	20	35	17	20
提案手法	18	26	13	19	8	11

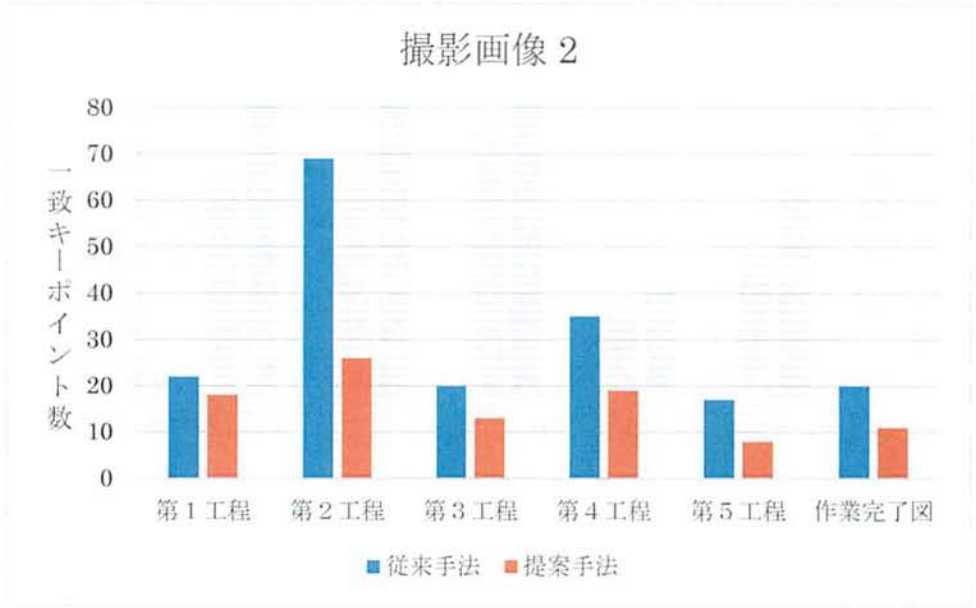


図 55. 撮影画像に対する結果

(3) 撮影画像 3 (第 3 工程)

第 3 工程を撮影した撮影画像 3 に対し、従来手法を用いてテンプレートマッチングを行った結果、それぞれのテンプレート画像との一致キーポイントの数は 24, 12, 37, 35, 38, 32 となり、誤ったテンプレート画像が選び出されてしまった。

次に提案手法を用いた場合の一致キーポイント数は 16, 9, 30, 26, 25, 19 となり、正しい識別を行うことが出来た。この際の \bar{L} の値はそれぞれ 230.21, 200.27, 129.27, 259.12, 140.34, 169.58, σ の値はそれぞれ 123.46, 124.23, 108.57, 108.18, 109.43, 110.01 であった。

表3 撮影画像 3						
	第1工程	第2工程	第3工程	第4工程	第5工程	作業完了図
従来手法	24	12	37	35	38	32
提案手法	16	9	30	26	25	19

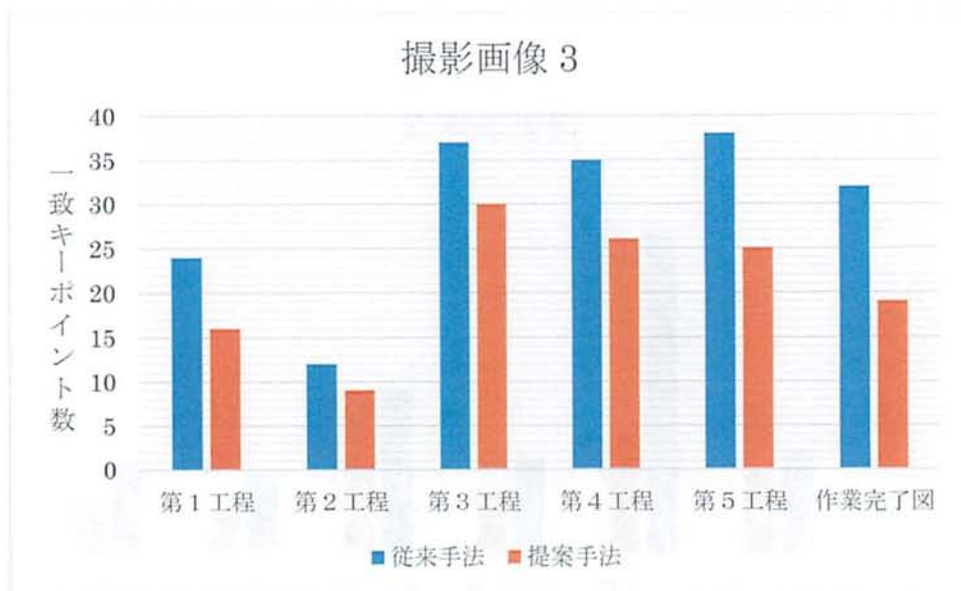


図 56. 撮影画像 3 に対する結果

(4) 撮影画像 4 (第 4 工程)

第 4 工程を撮影した撮影画像 4 に対し、従来手法を用いてテンプレートマッチングを行った結果、それぞれのテンプレート画像との一致キーポイントの数は 30, 15, 35, 62, 23, 13 となり、正しい識別を行うことが出来たことを確認した。

次に提案手法を用いた場合の一致キーポイント数は 19, 10, 22, 44, 15, 8 となり、正しい識別を行うことが出来た。この際の \bar{L} の値はそれぞれ 234.96, 143.17, 267.5, 98.12, 273.48, 302.88, σ の値はそれぞれ 132.15, 92.8, 124.42, 95.82, 121.09, 127.58 であった。

表4 撮影画像 4						
	第1工程	第2工程	第3工程	第4工程	第5工程	作業完了図
従来手法	30	15	35	62	23	13
提案手法	19	10	22	44	15	8

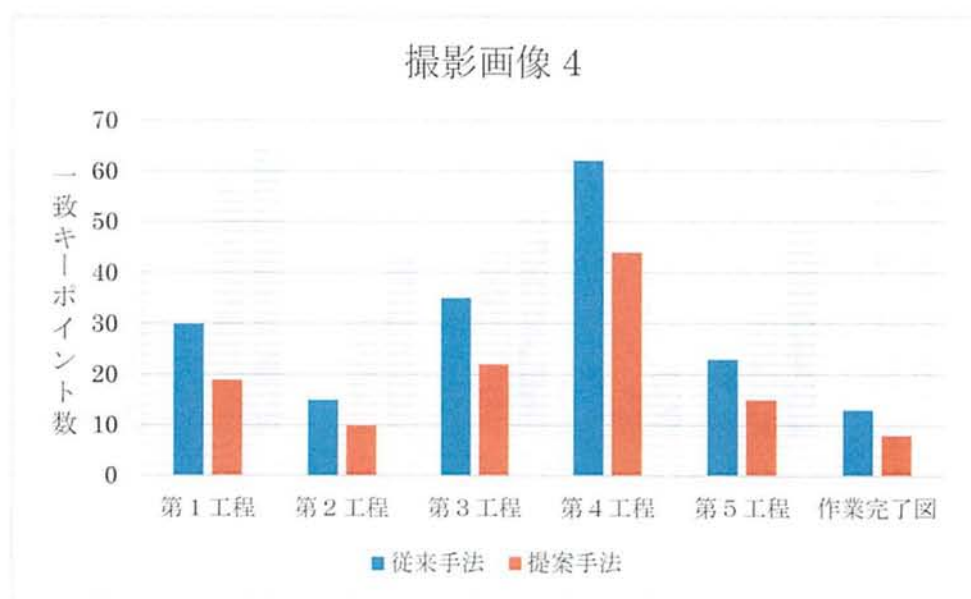


図 57. 撮影画像 4 に対する結果

(5) 撮影画像 5 (第 5 工程)

第 5 工程を撮影した撮影画像 5 に対し、従来手法を用いてテンプレートマッチングを行った結果、それぞれのテンプレート画像との一致キーポイントの数は 35, 12, 38, 30, 49, 28 となり、正しい識別を行うことが出来たことを確認した。

次に提案手法を用いた場合の一致キーポイント数は 21, 9, 32, 20, 42, 16 となり、正しい識別を行うことが出来た。この際の \bar{L} の値はそれぞれ 263.61, 297, 202, 217.27, 239, 159.45, σ の値はそれぞれ 102.91, 130.48, 114.29, 106.94, 145.4, 154.79 であった。

表5 撮影画像 5						
	第1工程	第2工程	第3工程	第4工程	第5工程	作業完了図
従来手法	35	12	38	30	49	28
提案手法	21	9	32	20	42	16

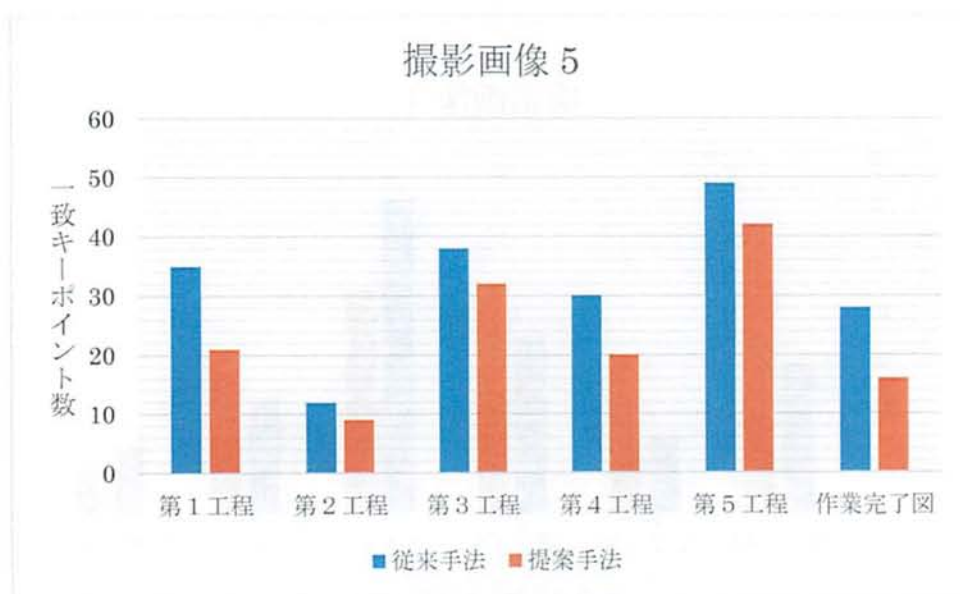


図 58. 撮影画像 5 に対する結果

6.2 作業未完了箇所検出の検証結果

背景差分処理による作業未完了箇所の検出の際の撮影画像，テンプレート画像，検出結果を以下に示す．その際の撮影画像とテンプレート画像の検出キーポイント数はそれぞれ 307 個，350 個である．そのうち画像補正に使用されたキーポイント数は各 23 個であり，ロバスト推定によるアフィン変換行列 A' は式(2)から式(26)より

$$A' = \begin{pmatrix} 1.0052 & -0.0024 & 14.6073 \\ -0.0024 & 1.0052 & -18.7082 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

A' の逆行列 A'^{-1} は式(24)より

$$A'^{-1} = \begin{pmatrix} 0.9948 & 0.0024 & -14.4865 \\ -0.0024 & 0.9948 & 18.6460 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

また，判別分析法の結果，分離度が最大となる閾値 Th の値は $Th=70.992$ であった．

その結果，撮影画像の不足部品である W/P ベ어링およびメカニカルシールを検出することが出来た．



図 59. 撮影画像



図 60. テンプレート画像

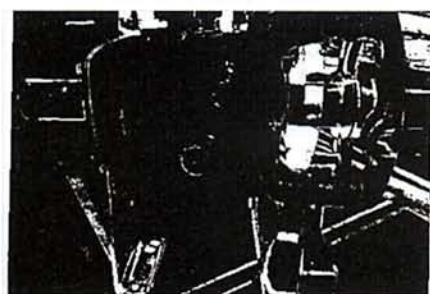


図 61. 差分処理後

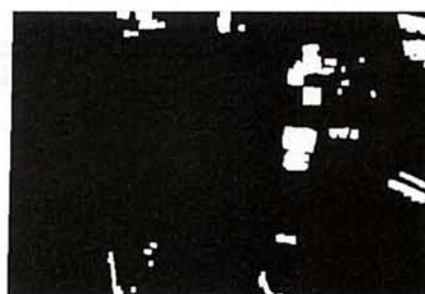


図 62. ノイズ除去後



図 63. 検出結果

6.3 作業対象バルブの識別機能の検証結果

まず，従来手法を使用した際の結果を表 6 に示す．

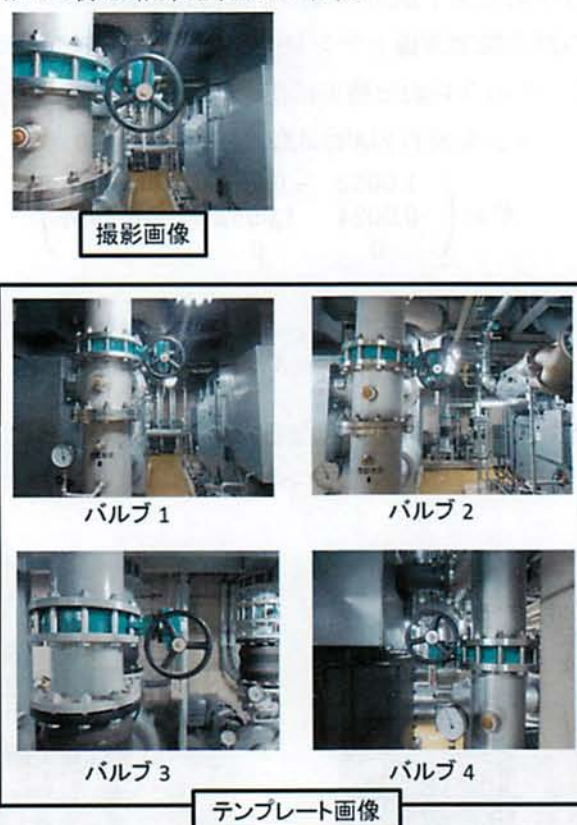


図 64. 撮影画像とテンプレート画像例

表6 従来手法による一致キーポイント数				
	バルブ1	バルブ2	バルブ3	バルブ4
一致キーポイント数	75	31	22	12

従来の SURF を使用した場合，バルブ 1 とバルブ 2 の一致キーポイント数はそれぞれ 78 個，49 個となり，正しい識別を行うことができた．しかし，SURF によるキーポイント検出の結果は一様ではなく，また背景に人などのノイズが映り込んだ場合，対象物の認識ミスを起こす可能性がある．そこで，それぞれのテンプレート画像に対して不適合キーポイントの除去処理を行う．まず，それぞれのテンプレート画像に対して式(3)，式(4)より \bar{L} と σ を求める．その結果， \bar{L} と σ はそれぞれ表 7 のようになった．

表7 L_k の平均と標準偏差				
	バルブ1	バルブ2	バルブ3	バルブ4
\bar{L}	82.96	194.7	241.27	198
σ	95.16	106.65	95.69	114.24

次に UCL を求める。その結果、 UCL はそれぞれ表 8 のような結果になった。

表8 UCL				
	バルブ1	バルブ2	バルブ3	バルブ4
UCL	178.12	301.35	336.96	312.24

次にそれぞれのテンプレート画像に対して $L_k > UCL$ となるキーポイントを除外する。その結果を表 9 に示す。

表9 提案手法による一致キーポイント数				
	バルブ1	バルブ2	バルブ3	バルブ4
一致キーポイント数	66	25	17	11

この結果、バルブ 1 とバルブ 2 の誤った一致キーポイントが除外されていることがわかる。これにより、不適合キーポイントを除外する手法を導入することでより精度の高い画像認識を行うことが可能となることがわかる。

7. 考察

7.1 作業の進捗確認の精度検証結果についての考察

従来手法では第3工程以外の撮影画像に対して正しい識別が行われた。第3工程の撮影画像に対しては誤って第5工程のテンプレート画像が選び出された。提案手法ではすべての工程に対し正しい識別を行うことができた。そこで、第3工程と第5工程のテンプレート画像に対し、従来手法と提案手法を用いて識別を行った際の一致キーポイントの比較を行う。まず図65から図67に撮影画像、第3工程、第5工程のテンプレート画像のキーポイントの検出結果を示す。検出されたキーポイントは図中の緑点である。この結果をみると撮影画像と第5工程のテンプレート画像では対象物のみでなく、背景にも多くのキーポイントが検出されていることが分かる。

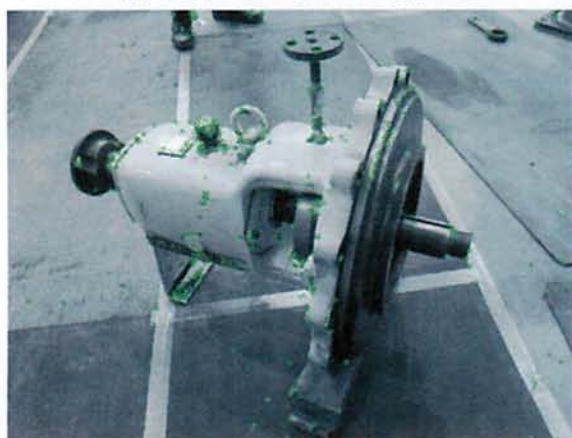


図 65. 撮影画像の検出キーポイント



図 66. 第3工程の検出キーポイント



図 67. 第5工程の検出キーポイント

次に従来手法と提案手法の一致キーポイントについての検証を行う。
第3工程と第5工程の一致キーポイントの検出結果を図68, 図69に示す。この際、図中の青線は提案手法により除外された一致キーポイント, 黄線は提案手法により採用された一致キーポイントである。この結果をみると第5工程のテンプレート画像では第3工程のテンプレート画像と比較して、背景に多くの一致キーポイントが検出されていることが分かる。このため、従来手法では誤った識別が行われてしまったと思われる。

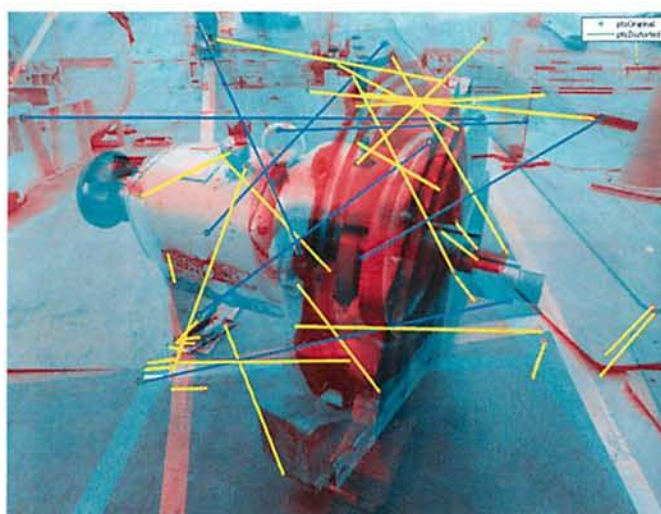


図 68. 撮影画像と第3工程の
テンプレート画像の一致キーポイント

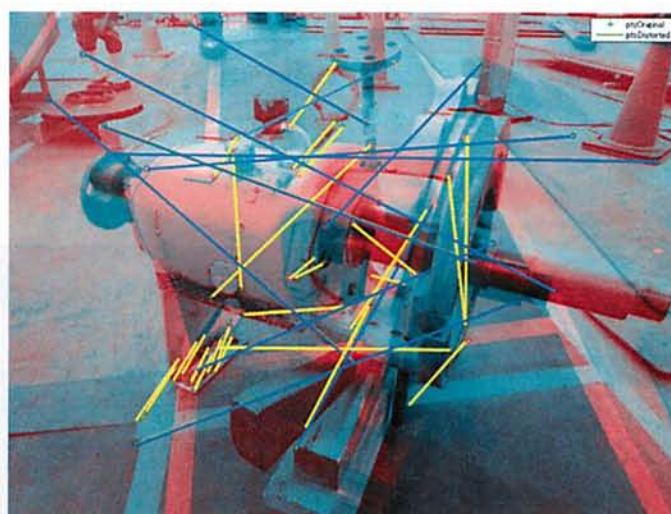


図 69. 撮影画像と第5工程の
テンプレート画像の一致キーポイント

7.2 作業の未完了箇所を検出機能の精度検証結果についての考察

実験の結果により検出すべき W/P ベ어링およびメカニカルシールを検出することができた。そこで、提案手法による実験結果と従来手法による実験結果とを比較を行う。従来手法による検出結果を図 70, 提案手法による検出結果を図 71 に示す。この結果をみると、提案手法では従来手法に比べ、ノイズが大幅に減ったことが分かる。しかし、提案手法を使用した際にも撮影をする際の角度や背景にカラーコーンなどが映り込んでしまった場合、それらも検知してしまう。また、判別分析法を行う際、撮影画像とテンプレート画像とでそれぞれの撮影される際の照明条件が大幅に異なる場合や部品の不足箇所の輝度変化が小さい場合、適切な閾値を定めることが出来ず、正確に未完了箇所を検出することができない場合がある。そのため、より適切な閾値を導き出す手法を提案することを今後の課題とする。

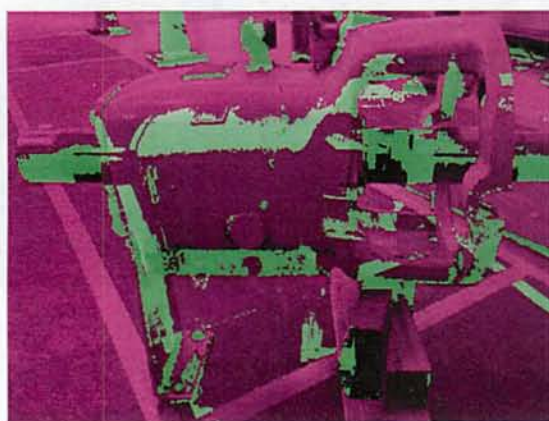


図 70. 従来手法による
未完了箇所検出結果

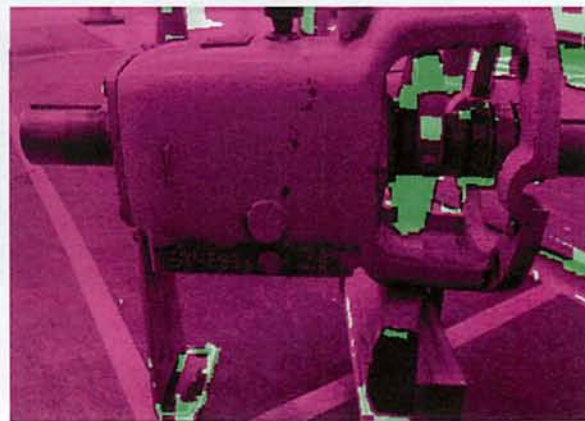


図 71. 提案手法による
未完了箇所検出結果

7.3 作業対象バルブの識別機能の精度検証結果についての考察

実験の結果により正しいバルブを認識することができた。その際の正しいテンプレート画像と誤ったテンプレート画像の一致キーポイントの検出結果を図 72 に示す。

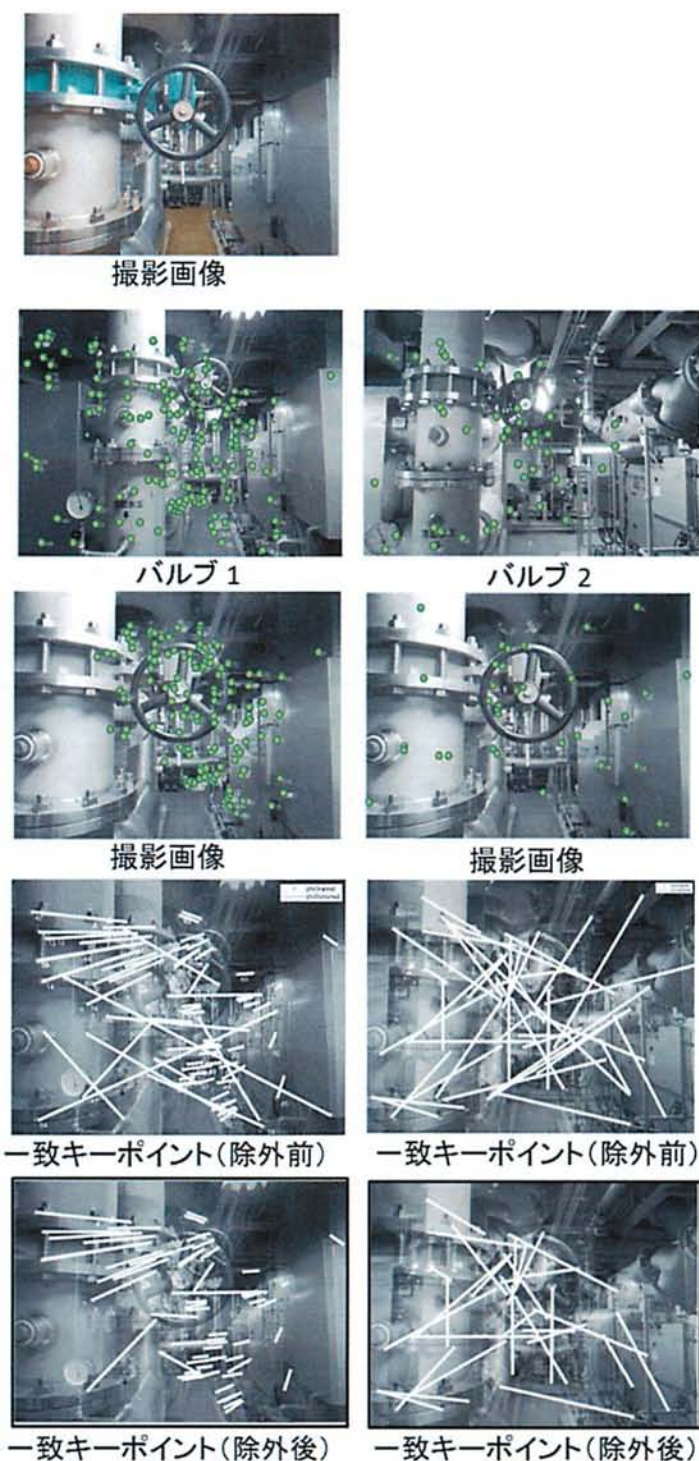


図 72. 一致キーポイント

これにより、正しいテンプレート画像では一致キーポイントの外れ値を多く除外することができていることが分かる。しかし、誤ったテンプレート画像では、一致キーポイントの外れ値を十分に除外しきれていないことが分かる。そこで、 α の値を変更した際の一致キーポイント数の推移を検証した。その結果を図 73 に示す。

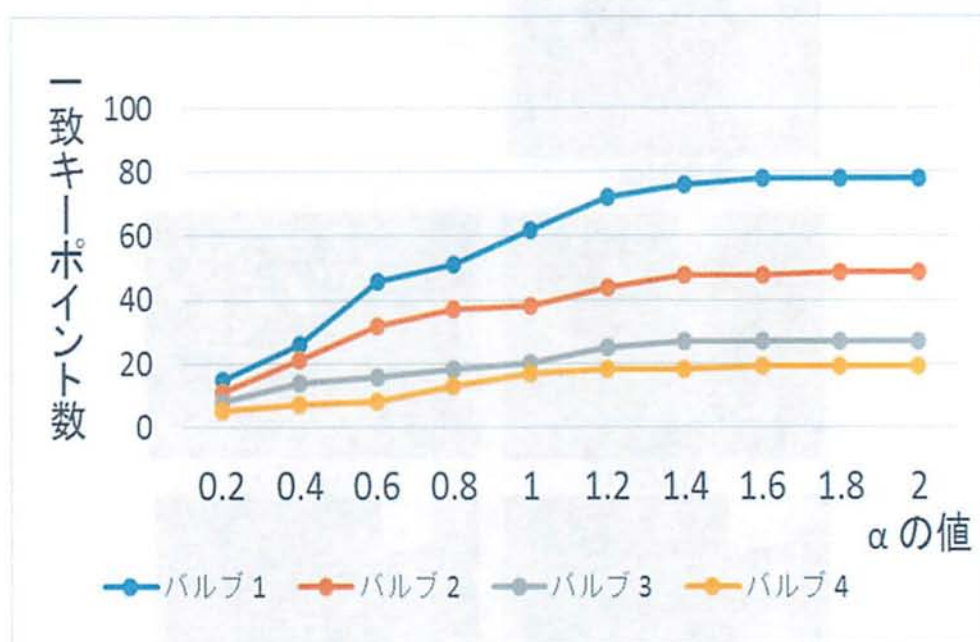


図 73. 一致キーポイント数の推移

この結果を見ると α の値が 2 の場合、誤ったキーポイントが十分に除去しきれていないことが分かる。そのため、 α の値を 1 とし、優位水準を 68% にすることでより精度の高い認識を行うことができると考えられる。