

外観検査における人間中心型の作業と自動化のデザイン

Human-Centered Work and Automation Design in Appearance Inspection

○中嶋 良介 (電気通信大学) *1 蔵方 英紀 (電気通信大学) *2 三上 彩寧 (電気通信大学) *3

*1 Ryosuke Nakajima, The University of Electro-Communications, 1-5-1 Chofugaoka, Chofu, Tokyo, 182-8585, nakajima@uec.ac.jp

*2 Hidenori Kurakata, The University of Electro-Communications, 1-5-1 Chofugaoka, Chofu, Tokyo, 182-8585, k1510055@uec.ac.jp

*3 Ayane Mikami, The University of Electro-Communications, 1-5-1 Chofugaoka, Chofu, Tokyo, 182-8585, m1610606@uec.ac.jp

キーワード: 外観検査, 目視検査, 作業設計, 自動化, 機械学習

1. 研究背景

工業製品の生産現場において、人間による作業は IE (Industrial Engineering) 手法である直接観察法や PTS (Pre-determined Time Standard) 法などを用いて、その作業に適正に必要な時間を標準時間として決定し、その時間をもとに生産計画や作業改善が行われている。ただし、工業製品の外観上に微小なキズや汚れなどの欠点がないことを保証するための外観検査に関しては、その他の組立や加工のように製品自体に直接的に付加価値が与えられるものではなく、かつ別の検査者や管理者が外部からその作業の妥当性を評価することが難しいという問題がある⁽¹⁾。また、近年では製造業においても少子高齢化による人材不足が深刻で、過去 20 年間で労働人口が 11.6%減少し、製造業に関する事業者数も半減しており、さらに新型コロナウイルス感染症による影響で対面での OJT (On the job training) の機会が減少し、従来の人から人への技能伝承が困難な状況となっている⁽²⁾。

これらの問題に対して、古くから人間による外観検査に関する研究が進められている。例えば、検査精度や検査効率の向上のために検査者の目視方法を分析した研究⁽³⁾⁻⁽⁶⁾、身体負担の低減のために検査者の視覚的・身体的負担を分析した研究⁽⁷⁾⁻⁽⁹⁾などが多く行われている。ただし、これらの研究は、個別の外観検査工程の作業改善を目的とした分析的なアプローチによる検討に留まっている。すなわち、多くの工業製品や欠点の特徴に合わせて幅広く適用できるような作業設計の方法論が示されるには至っておらず、現在でも標準時間を設定する方法が確立されていない。そのため、実際の生産現場では、過度な検査精度の追求による過剰な検査 (ムダな作業) となっている場合や、過度な検査効率の追求による人間の視覚機能の限界を超えた検査 (ムリな作業) となっている場合がある⁽¹⁰⁾。また、適正な作業設計がなされていないので、検査者に対しては「集中してよく見なさい」といった非科学的な指導がなされている場面も見受けられる⁽¹¹⁾。

そのため、一部の生産現場では外観検査の自動化の導入に向けた検討が行われている。比較的古くから注目されている手法として、画像処理技術や統計手法を用いた自動検査システム⁽¹²⁾⁻⁽¹⁴⁾、レーザーを用いた自動検査システム⁽¹⁵⁾

が提案され、その有効性も報告されている。しかしながら、検査精度・検査効率が不十分といった問題や過検出 (第一種過誤) と誤検出 (第二種過誤) をバランスするための閾値の調整が難しいといった問題、さらには導入コストや運用コストに対して費用対効果が低いといった問題も指摘されており⁽¹⁶⁾⁻⁽¹⁸⁾、技術的・経済的な両面から必ずしも実用化が進んでいない状況もある。ただし、近年では、良品画像と不良品画像を教師データとする機械学習を用いた自動検査システムも提案されはじめ、一部の外観検査工程において技術的・経済的な問題を解決しうることが報告されており⁽¹⁹⁾⁻⁽²¹⁾、その動向が注目されている。

2. 研究目的

本研究では、工業製品の外観上の品質を保証するための外観検査を研究対象として、検査精度と検査効率を向上させるため、多種多様な工業製品や欠点の特徴に合わせて幅広く適用できる作業設計の方法論を確立することを目的とする。すなわち、作業改善のための分析的アプローチだけでなく、作業設計を目的とした設計的なアプローチによる検討を目指している点が他の関連研究⁽³⁾⁻⁽⁹⁾と本質的に異なる点である。さらに、それらの知見と画像データによる機械学習を用いた自動化を目的としている。

3. 研究の全体像と研究経過

上述した研究目的を達成するため、本研究では図 1 に示す通り、外観検査の構成要素の観点から検査対象 (工業製品や欠点) と検査環境 (照明と用具)、検査者、自動検査システムの 4 つに整理し、それぞれに [1]検査対象の評価方法に関する検討、[2]検査環境の設計に関する検討、[3]検査者の検査方法の設計・訓練・管理に関する検討、[4]自動検査システムの開発に関する検討として課題を設定し、研究を実施している。なお、これらの研究課題を実施する上では、研究室における被験者実験とシステム開発のみならず、実際の外観検査工程における実態調査・検証も並行して実施している⁽²²⁾⁻⁽²⁴⁾。

各研究テーマの具体的な研究経過として、[1]検査対象の評価方法に関する検討に関しては、本研究で考案する作業設計の方法論をあらゆる工業製品や欠点に適用するため、様々な工業製品や欠点を欠点検出の観点から評価する指標

Research Questions (RQ)とこれまでの研究であきらかになったこと

RQ1 検査対象
 多種多様な工業製品（検査対象と欠点）をどのように評価し、本研究で考案する方法論に適用すべきか？
 検査対象や欠点の特徴を変動要因とする実験を考案し、それらが検査精度や検査効率に及ぼす影響を検討した。
 →[1-1]検査対象は色と形状/構造の複雑性で評価可能であることがわかった。
 →[1-2]欠点はエッジの長さに輝度コントラストを乗じて得られる欠点の面光度で評価可能であることがわかった。

RQ2 検査環境
 検査で用いる拡大鏡や照明はどのように設計すべきか？
 拡大鏡や照明の使用法を変動要因とする実験を考案し、それらが検査精度や検査効率に及ぼす影響を検討した。
 →[2-1]欠点の面光度に合わせて適正な拡大鏡の拡大倍率を設計可能であることがわかった。
 →[2-2]欠点の面光度によらず、検査対象に対して照明の照射角度を変化させる検査方法が有効であることがわかった。

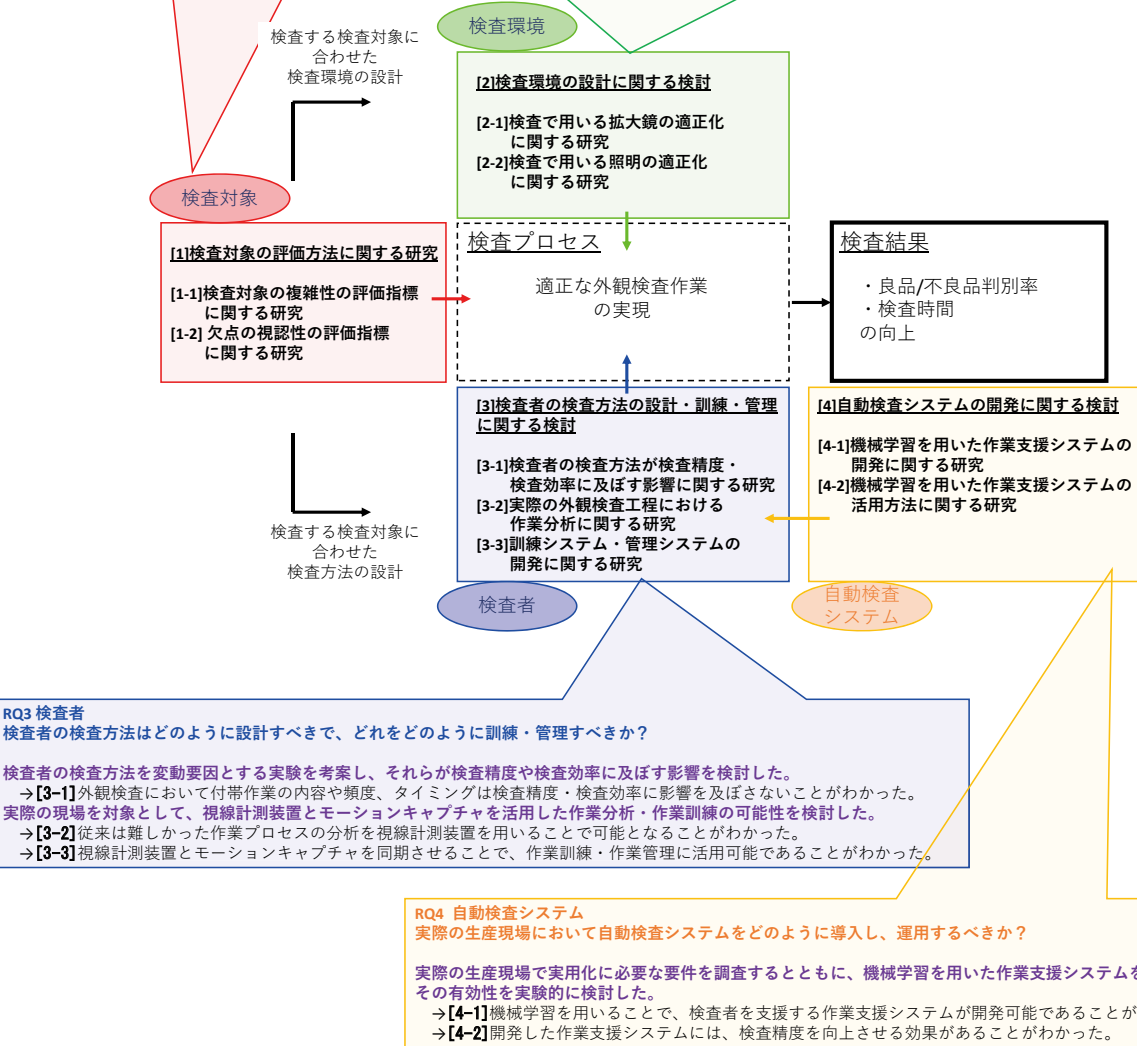


Fig.1 Overview of this research and Research Question

の検討を進めている。[2]検査環境の設計に関する検討に関しては、[1]検査対象で考案した評価指標をもとに、検査で用いる拡大鏡や照明を適正化するための検討を進めている。[3]検査者の検査方法の設計・訓練・管理に関する検討に関しては、[1]検査対象で考案した評価指標をもとに、検査者の検査方法を適正化するための検討、実際の生産現場での有効性の検証、および訓練システムや管理システムのプロトタイプの開発を進めている。[4]自動検査システムの開発に関する検討に関しては、実際の外観検査工程で実用化・導入に必要な要件を整理した上で、機械学習を活用した作業支援システムの開発とその活用方法の検討を進めている。

4. 研究課題：[1-1]検査対象の評価指標に関する研究

本章では、図1の[1]検査対象の評価方法に関する検討における[1-1]検査対象の評価指標に関する研究について述べる。

4.1. 検査対象の評価の研究背景

外観検査の対象となる工業製品には、自動車用のガラスやボディのような検査対象面が単純なものから、電子部品用のプリント基板のような複雑なものまで多種多様である。そして、検査対象面が複雑になるにつれて、外観検査自体

が難しくなることが予想される⁽²⁵⁾。すなわち、検査対象面の複雑性に応じて適正な検査環境や検査方法を設計する必要があると考えられるが⁽²⁶⁾、そのために必要な検査対象面を評価する指標が存在しておらず、多種多様な工業製品に適用可能な作業設計の方法論の確立が困難であった⁽²⁷⁾。

4.2. 検査対象の複雑性が欠点検出に及ぼす影響に関する被験者実験

検査対象の複雑性に及ぼす要因を網羅的に整理した上で、それらを実験要因とする被験者実験を図2に示すように実施し、それらが検査精度に及ぼす影響を検討した。

4.3. 検査対象の複雑性の評価指標の考案

実験の結果、色の複雑性（撮影した工業製品の画素値の平均情報量を示す指標である情報エントロピーの値）と構造・形状の複雑性（撮影した工業製品の画素値の濃淡面の変化や形状の粗さ、テクスチャの複雑性を示すフラクタル次元の値）が検査精度に有意（5%水準）に影響を及ぼすことを確認した（図3）。具体的には、これらの2つの評価指標で評価可能で、複雑性が高くなると、欠点検出率も段階的に低くなることを示した。

これらの実験結果より、多種多様な工業製品を欠点検出の観点から評価することが可能となり、作業設計の方法論の確立に向けて重要な知見が得られている。

5. 研究課題：[4-2]機械学習を用いた作業支援

システムの有効性に関する研究

本章では、図1の[4]自動検査システムの開発に関する検討における[4-2]機械学習を用いた作業支援システムの有効性に関する研究について述べる。

5.1. 作業支援システムの研究背景

産学で検討が進められている自動検査システムの動向や問題点を調査⁽¹⁸⁾するとともに、外観検査工程で実際に実用化するために必要な要件を文献調査⁽²⁸⁾⁻⁽²⁹⁾、および実際の外観検査工程の実務担当者へのヒアリングを通じて整理した。その結果、(1)材質や形状、意匠などが多種多様な製品において多様な状態を呈すキズや汚れなどの欠点を探索すること（探索プロセス）と欠点の状態に合わせて良品・不良品の判別すること（判別プロセス）が難しく、さらに異常箇所の切除や洗浄などの手直しによって良品にできるものの判別が難しいという技術的な問題があることがわかった。また、(2)自動検査システムは導入コストや運用コストが膨大で、採算が合うかどうか不確実なものに対して設備投資に踏み切れないという経済的な問題もあることがわかった。さらに、(3)自動検査システムを導入するには、検査する製品や検出すべき欠点に合わせて良品と不良品を判別するための特徴点・特徴量を定義し、運用の中で必要に応じてそれらを再定義するといった試行錯誤が必要となるが、生産現場で従事されている方々は必ずしもシステム開発に精通していない場合が多く、これが自動化推進の弊害になっており、実運用上の問題があることもわかった。以上の(1)~(3)の問題点に対して、欠点の探索プロセスのみの自動化（判別プロセス以降は作業者が従事）を想定し、一般的な汎用カメラやPCのみを用いて、システム開発に関して特別な知識や技術を有さない方々でも良品と不良品の製品画像を準備することで扱えるシステムが開発でき



Fig.2 State of the subject experiment

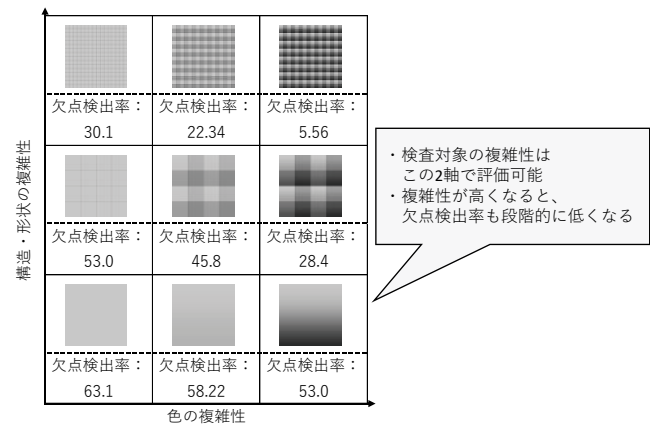


Fig.3 Relationship between color complexity, structure / shape complexity and inspection accuracy

ば、多くの外観検査工程で自動化の検討が推進できる可能性があると考えた。

5.2. 作業支援システムの開発と有効性の検証実験

工業製品をモデル化した6種類の欠点画像を対象とし、探索プロセスに対して、その作業を支援するシステムの開発を行った。具体的には、作業者が検査する前にカメラで製品の画像を撮影し、学習済みネットワークを経て良品か不良品かの判別を行うとともに、作業者へ判別結果とその根拠を Grad-CAM の技術⁽³⁰⁾を用いて可視化する作業支援システムを開発した（図4）。

また、良品画像 300 枚と不良品画像 300 枚を Deep Learning の技術を用いて学習し、学習済みネットワークを構築し、作業支援システムを用いないで全て人間が検査する場合と、作業支援システムを用いて Grad-CAM の画像のみを提示する場合、および Grad-CAM の画像と判定結果の両方を提示する場合の3つの条件を実験要因とする被験者実験を実施し、それらが検査精度や検査時間に及ぼす影響を検討した。

5.3. 作業支援システムの有効性の検証結果

実験の結果、検査精度は作業支援システムを用いない場合が 80.80%であったのに対して、作業支援システムを用いて Grad-CAM の画像のみを提示する場合が 97.33%、Grad-CAM の画像と判定結果の両方を提示する場合が 96.83%となり、作業支援システムには検査精度を 16%程度向上させる効果があることを示した（図5）。また、検査時間はどの方法でも同程度であったため、作業支援システムを用いる

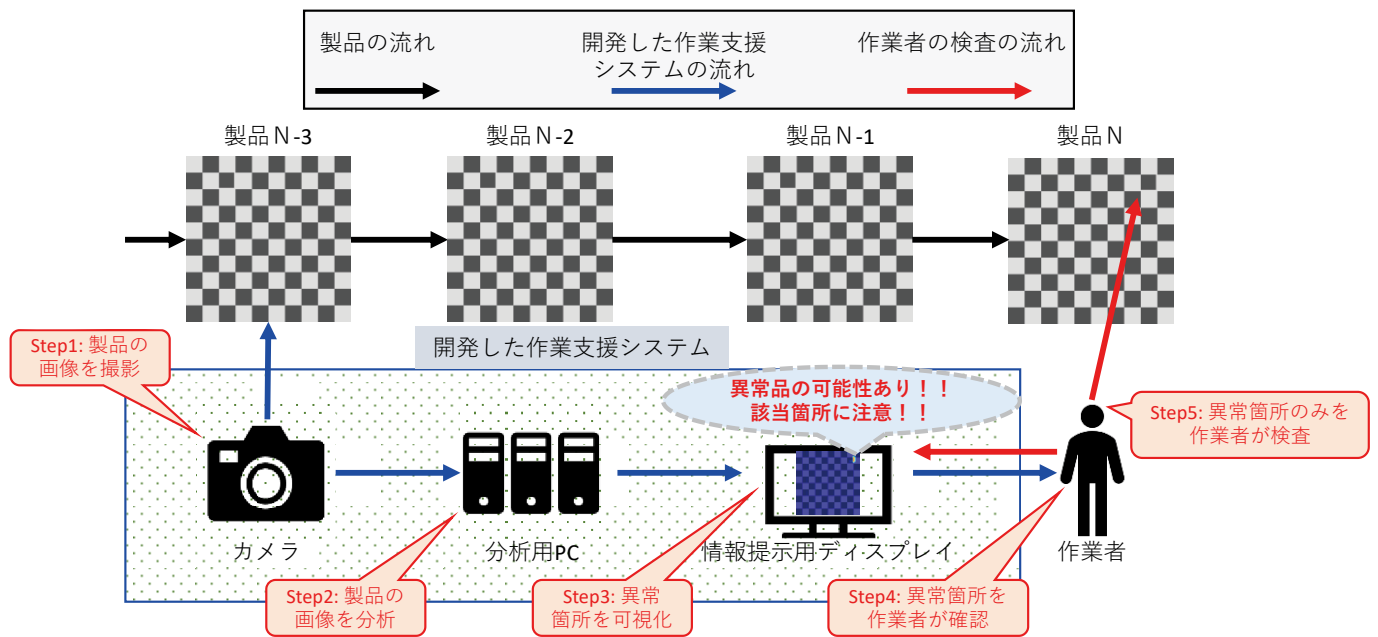


Fig.4 Overview of the developed work support system

場合も検査効率は低下しないことがわかった。

さらに、実際の製品に適用するためには、学習に大量の入力画像が必要となるという新たな課題も明らかになった。そこで現在は、実際の欠点には光の当て方によって視認性が変化するという特徴に着目し、比較的少量の質の高い入力画像のみを用いて学習済みネットワークを構築することで、開発した作業支援システムの適用可能範囲を拡大することを試みている。

6. 今後の研究計画

これまでに推進した研究より、外観検査の作業設計と自動化に向けた多くの知見と今後の課題が明らかになりつつある。今後は図6に示す通り、各研究テーマにさらなる課題を設定し、研究目的を達成するために引き続き研究を推進する予定である。

各研究テーマの具体的な研究計画として、[1]検査対象の評価方法に関する検討に関しては、これまでに考案した工業製品と欠点の評価指標をもとに、人間と[4]で開発した自動検査システムの検査精度・検査効率を比較することで、人間・機械の分業方法に関する研究を推進する。[2]検査環境の設計に関する検討に関しては、これまでに得られた研究データを統合し、総合的な作業設計の方法論の構築に関する研究を推進する。[3]検査者の検査方法の設計・訓練・管理に関する検討に関しては、これまでに得られた研究データを統合し、総合的な作業設計の方法論の構築に関する研究、および実際の外観検査工程での訓練システム・管理システムの実証研究を推進する。[4]自動検査システムの開発に関する検討に関しては、これまでモデル画像を用いて検討した自動検査システムの知見をもとに、実製品の画像を用いた実証研究や少ない入力画像で検査精度を向上させる方法に関する研究、可視光線だけでなく、紫外線や赤外線などの特性の異なるカメラで撮影した画像の有効性に関する研究を推進する。

以上のように、今後も各研究テーマについて研究を推進

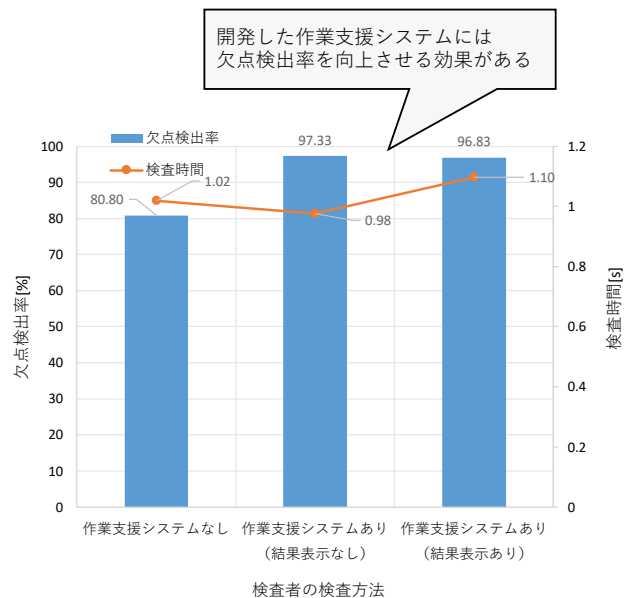


Fig.5 Verification result of the effectiveness of the work support system

し、得られた結果などについては積極的に発表することを考えている。

謝 辞

本研究を実施するにあたり、実際の外観検査のフィールドを提供していただき、実態調査や実験にご協力いただいた製造業の皆様へ感謝の意を表す。また、本研究の一部は JSPS 科研費若手研究 (19K15237) と電気通信大学「研究の連携・統合化等による本学の機能強化に係る取組支援：機械学習とスマートデバイスを融合したサステナブル生産支援システムのイノベーションに関する研究」の助成を受けたものである。

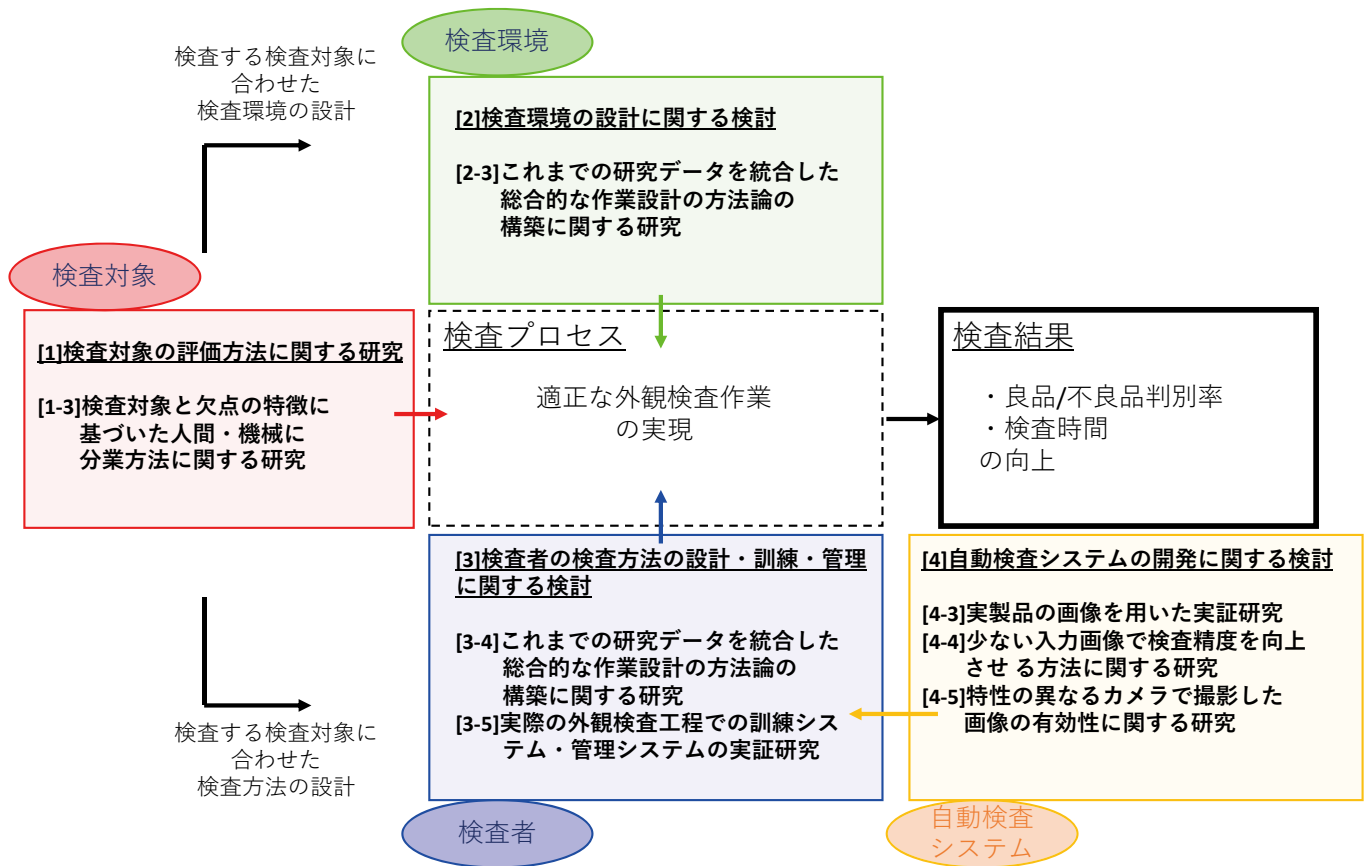


Fig.6 Overview of future research plans

文 献

- (1) Druty, C. G., et al.: Improving Visual Inspection Using Binocular Rivalry, International Journal of Production Research, Vol. 39, No. 10, pp. 2143-2153, 1986
- (2) 経済産業省: 2020年度版ものづくり白書, 2020 https://www.meti.go.jp/report/whitepaper/mono/2020/honbun_pdf/index.html (参照 2020-12-26)
- (3) Megaw E. D., et al.: Eye Movements and Industrial Inspection, Applied Ergonomics, Vol. 10, No. 3, pp. 145-154, 1979
- (4) Nickles G. M., et al.: A Comparison of Three Levels of Training Designed to Promote Systematic Search Behavior in Visual Inspection, International Journal of Industrial Ergonomics, Vol. 32, pp. 331-339, 2003
- (5) Chang J. J., et al.: The Development of a Training Expert System for TFT-LCD Defects Inspection, International Journal of Industrial Engineering: Theory, Applications and Practice, Vol. 16, No. 1, pp. 41-50, 2009
- (6) Krzysztof K., et al.: Evaluating and Improving the Effectiveness of Visual Inspection of Products from the Automotive Industry, Advances in Manufacturing II, pp. 231-243, 2019
- (7) 斎藤むら子: 目視検査作業と疲労, からだの科学, Vol. 148, pp.67-73, 1989
- (8) Yeow P. H., et al.: Ergonomics Improvements of the Visual Inspection Process in a Printed Circuit Assembly Factory, International Journal of Occupational Safety and Ergonomics, Vol. 10, No. 4, pp. 369-385, 2004
- (9) 肥田拓哉, 他: 目視検査作業における検査対象面と把持位置が上肢負担に与える影響, 日本経営工学会論文誌, Vol.65, No.4, pp. 260-267, 2015
- (10) 菅原隆宏, 他: 不良項目別の有効視野範囲と目視角度に着目した新たな周辺視目視検査の作成手順の提案, 日本経営工学会論文誌, Vol. 62, No. 4, pp. 153-163, 2011
- (11) 中嶋良介: 人間の視覚特性に基づいた外観検査作業の改善活動の考え方, IE レビュー, Vol. 60, No. 1, pp. 35-39, 2019
- (12) 西村晃紀, 他: ヒストグラムベースの局所特徴量を用いた電子部品の外観検査手法の提案, 精密工学会誌, Vol. 84, No. 7, pp.664-670, 2018
- (13) Mar N. S., et al.: Design and Development of Automatic Visual Inspection System for PCB Manufacturing, Robotics and Computer Integrated Manufacturing, Vol. 27, No. 5, pp. 949-962, 2011
- (14) 吉川智洋, 他: タイヤ検査のための画像処理に関する研究, 映像情報メディア学会技術報告, Vol.137, pp.69-72, 2013
- (15) Okada S., et al.: Development and Commercialization of Laser Inspection System to Detect Surface Flaws of Machined Holes, Synthesiology English Edition Vol. 11, No. 3, pp. 133-145, 2019
- (16) Taifeng L., et al.: Free-Form Surface Parts Quality

- Inspection Optimization with a Novel Sampling Method, *Applied Soft Computing*, Vol. 62, pp. 550-570, 2018
- (17) Johnson T. L., et al.: How and Why We Need to Capture Tacit Knowledge in Manufacturing: Case Studies of Visual Inspection, *Applied Ergonomics*, Vol. 74, pp. 1-9, 2019
- (18) 梶原康博: 製造工程における自動化技術の現状と課題, *経営システム*, Vol.30, No. 2, pp. 176-181, 2021
- (19) Lisha C., et al.: SDDNet: A Fast and Accurate Network for Surface Defect Detection, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 70, pp. 1-13, 2021
- (20) Hua Y., et al.: Multiscale Feature Clustering Based Fully Convolutional Auto Encoder for Fast Accurate Visual Inspection of Texture Surface Defects, *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, Vol. 16 No. 3, pp. 1450-1467, 2019
- (21) 中島彩奈, 他: 機械学習にもとづくプラスチック製品の外観検査における欠陥と背景の画像合成に関する検討, *エレクトロニクス実装学会誌*, Vol.22, No. 6, pp. 559-567, 2019
- (22) 上村美晴, 他: 外観検査作業を対象としたIE改善活動のための現状分析に関する実証研究, *日本経営工学会 2020年春季大会*, Paper ID C11, 2 pages, 2020
- (23) 上村美晴, 他: 画像処理技術と視線解析技術を用いた外観検査作業のIE改善活動の推進に関する研究, *日本経営工学会 2020年秋季大会*, pp. 53-56, 2020
- (24) 中嶋良介: 視線計測装置を用いた外観検査の作業分析に関する事例研究, *2021年度精密工学会春季大会学術講演会*, pp. 159-160, 2021
- (25) Nakajima R., et al.: A Study on the Effect of Irradiation Angle of Light on Defect Detection in Visual Inspection, *International Journal of Industrial Engineering: Theory, Applications and Practice*, Vol. 22, No. 1, pp. 525-537, 2015
- (26) Nakajima R., et al.: The Relationship Between Dirt Levels of Inspection Surface and Defect Detection in Visual Inspection Utilizing Peripheral Vision, *Industrial Engineering & Management Systems*, Vol. 17, No. 1, pp. 102-112, 2018
- (27) 中嶋良介, 他: 目視検査における欠点の特徴と検出視野の関係に関する研究, *人間工学*, Vol.51, No.5, pp.333-342, 2015.
- (28) 本郷満: 中国地域製造業における検査工程の状況, *季刊中国総研*, Vol. 20-2 No. 75, pp. 33-45, 2016
- (29) Rongsheng L.: Review on Automated Optical (Visual) Inspection and Its Applications in Defect Detection, *Acta Optica Sinica*, Vol. 38, No. 8, Article No. 0815002, 2018
- (30) Selvaraju R. R., et al.: Grad-CAM: Visual Explanations from Deep Networks via Gradient Based Localization, *Proceedings of IEEE International Conference on Computer Vision*, pp.618-626, 2017