

目視検査作業の機械化を目指した人の 検査メカニズムのモデル化

—【傷の気付きアルゴリズム】技術開発—*

Modeling of Human Inspection Mechanism for Instrumentation of Visual Inspection in Production Line
—Development of “KIZKI” Consciousness Algorithm for Defects—

興水大和** 青木公也** 舟橋琢磨** 三和田靖彦*** 石井博行†

Hiroyasu KOSHIMIZU, Kimiya AOKI, Takuma FUNAHASHI, Yasuhiko MIWATA and Hiroyuki ISHII

Key words appearance inspection, visual inspection, inspection mechanism, consciousness of attention

1. はじめに—技術的背景—

産業の、とりわけものづくりの現場において、外観検査・画像検査は欠くことができない。したがって、検査対象やキズ・欠陥像の種類は多岐にわたり、おびただしい数と種類の個別課題が存在することになる。これに対して画像検査機械開発の技術者・研究者は、もてる経験とノウハウを駆使した一品一様開発という戦略で各個撃破を繰り返し、外観検査・目視検査の自動化が達成されてきた。一方、自動車生産にも目視検査は不可欠であるが、利用者へ製品を提供する生産の究極の目標は、欠陥を発生させないことである。つまり、検査フリー生産を実現することである。われわれは、そこに至る具体的対策の一つは、製造プロセスにも検査プロセスにも通底して深く関与している熟練検査員の注意・集中意識¹⁾や、人の視覚生理機構の根本的機能を実装する技術開発にあると考えている²⁾³⁾。すなわち、「人の検査メカニズムのモデル化と機械化」である。「人に学ぶ」ことの重要性を再認識し、あらゆる個別事例に通貫した検査原理の解明を模索することが、画像検査機械実現への道程であると考え、本稿では、以上の視座に立って開発した【傷の気付きアルゴリズム】⁴⁾について解説する。

2. 技術的特徴と独創性の所在

2.1 研究開発のアプローチ

画像検査装置において、傷信号ができるだけ顕著になるように照明・光学系を工夫し、十分な解像度をもつカメラを用意することは可能となった。それにもかかわらず、外観検査・目視検査の自動化はいまだに一品一様であり、対象ごとにある種のノウハウを駆使した画像処理アルゴリズムを設計するのが一般的であるが、必ずしも成功しない。

例えば、カメラで撮像した画像をディスプレイに表示した場合、人には傷が判別できても、それと同等に傷のみを検出できる画像処理アルゴリズムの構築は容易でない場合がある。われわれの問題提起はこの点にある。つまり、信号処理の観点から、照明・光学系を工夫し、かつ高解像度の計測機器を使用すれば、それだけで傷が検出できるという“力づく”アプローチでないところに画像検査の技術的ブレークスルーがあり、その手掛かりの一つが「人の検査メカニズム」であると考え、

2.2 傷に「気付く」ということ

図1をご覧ください。お「気付き」のとおり、「JSPE」の文字列の並びの中で異なる箇所が4つある。お気付きにならなかった場合は、いま一度図1をご覧ください。正解を図2に示す。「気が付く」とは辞書によると、「それまで気にとめていなかったところに注意が向いて、物事の存在や状態を知る」とある。人は事前知識がなくとも、初見の画像でも、その中で相対的に異なる領域を“発見”することができる。これは、サリエンシ（saliency）とか顕著性と呼ばれる人の視知覚の課題であるともいえる。この事実を根拠にして、「周囲とは異なる領域に気付く」人の視覚のメカニズムの可能性に着目し、視覚生理機構に学んだ“気付き”の機能を実装することにより【傷の気付きアルゴリズム】を開発し、実験的にその有用

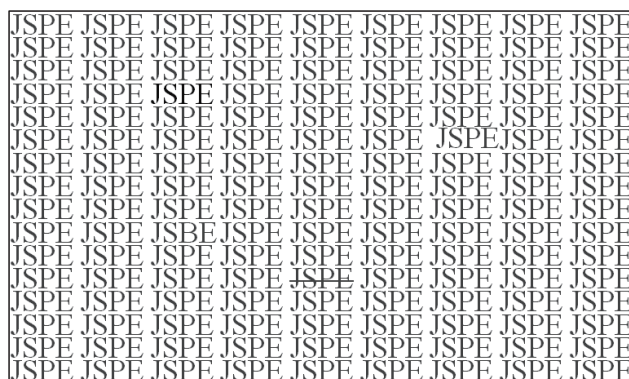


図1 気付きの体験

*原稿受付 平成 28 年 11 月 15 日

**正 会 員 中京大学工学部（名古屋市昭和区八事本町 101-2）

***正 会 員 国立研究開発法人理化学研究所（埼玉県和光市広沢 2-1）

†トヨタ自動車（株）（愛知県豊田市トヨタ町 1 番地）

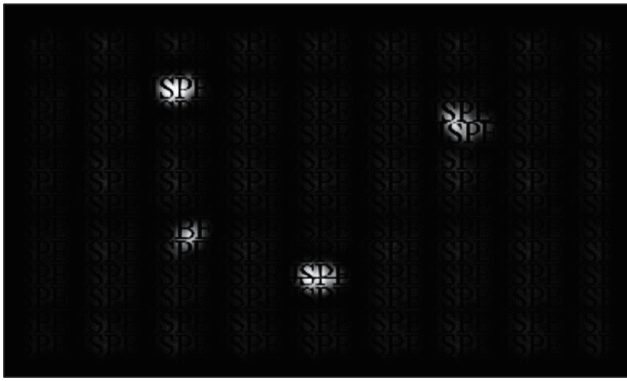


図2 正解は？

性を実証した。

図2は、実装したプログラムに図1を入力した際の出力画像である。異状領域にスポットライトが当たったような出力結果となっている。本技術開発では、心理・神経科学分野での用語に倣って、図2のような結果やその過程を「ポップアウト^{5)~7)}」と呼ぶ。このポップアウトを論じるにあたり、入力画像を空間的に均一な解像度の静止画とすることに対して異論を唱えるアクティヴ・ビジョンの考え方⁶⁾がある。つまり、網膜像は機能的に非均一であり、かつ眼球は常に振動（サッカードやマイクロサッカード）していることは自明であることから、視覚探索はそれらを積極的に利用しているとする立場である。アクティヴ・ビジョンでは、周辺視野の役割の一つは中心視の誘導に適切な情報を提供することである。

一方、われわれの先行研究⁸⁾においても、検査時における視覚機能による解像度制御と、俯瞰的・瞬間的にワークを目視することによる「傷の気付き」が示唆された。つまり、傷の“発見”においては、人は「キョロキョロとよく動く目」の機能と「ボヤッと領域全体を見る（が見える）」機能を有機的に併用していると考えた。具体的には、視覚生理機構の一つである周辺視と固視微動に着目した^{5)~7)}。検査作業では、ある範囲において全体を見るのは比較的低解像度の周辺視であり、固視微動によって標本化間隔・位相を瞬時に変化させながら得られる複数の画像を結合し、傷に気付いていると考えた。

2.3 周辺視と固視微動に学ぶ【傷の気付きアルゴリズム】

図3に【傷の気付きアルゴリズム】⁴⁾のフローを示す。処理は大きく分けて3つの見る要素からなる。1つ目の見る要素は、入力画像の低解像度化である。入力画像に格子を当てはめ、格子ごとの平均輝度値を算出することによりダウンサンプリングする。図のように、ダウンサンプリングのレベル（格子サイズ）を変化させる。2つ目の見る要素は、格子位相を変化させることである。低解像度化の格子位相を縦横に摂動させる。最後の3つ目の要素は、これら上記2つの格子状態で得られた低解像度画像の統合、いわば脳内処理に相当する処理である。それぞれの格子状態

で得られた低解像度画像を2値化し、元の画像サイズにおいて対応する画素に、2値化の状態等に応じて重み付け投票することによって統合する。格子サイズ変動と位相摂動を一通り適用して得られた投票画像を正規化し、疑似カラー表示したものを傷の気付きマップと呼ぶ。傷の気付きマップにおいて、高い出力をもつ領域が傷・欠陥候補となる。

外界シーンは網膜に結像されるが、この網膜像が均質でないことはよく知られている^{5)~7)}。視覚に対して1°までを中心窩、1~5°までを傍中心窩領域、これらを取り囲む残りの視野を周辺領域と呼び、中心窩から周辺領域にかけて視力は低下する。機能面から考えると、中心視システムは物体の色や形が処理され、周辺視システムは位置や運動が処理される。【傷の気付きアルゴリズム】における低解像度化は、周辺視から発想したもので、格子のサイズを変化させ同一領域をさまざまなレベルでダウンサンプリングすることは、網膜像の非均一性に学んだ処理である。視細胞について考えれば、網膜にある桿体細胞と錐体細胞のうち、周辺視は桿体細胞の領域である。桿体細胞は色を感じず、周辺領域では視細胞は疎であるが、明暗に対する感度は高いことが知られている。【傷の気付きアルゴリズム】が低解像度化時の画素の明暗により、図中の任意図形の「形」でなく「位置」を発見する点は、周辺視システムに学んだ有用な処理であることの良い証左といえる。また、画像処理的な観点で考えれば、低解像度化によって空間分解能は落ちるが、階調数は向上することになり、つまりターゲットの弁別しきい値の設定が容易となる。また、格子サイズを変化させることは、そもそも入力画像中のターゲット領域のサイズや形状が未知であることに対応している。さらに、画像の背景領域に関しては、規則正しい格子ごとの平均輝度値が等しいということは、その分解能においては背景の特徴が抑制されることを意味し、相対的に異状領域が顕在化する。

一方、【傷の気付きアルゴリズム】における格子位相の摂動は、固視微動^{5)~7)}に学んだ処理である。眼球運動はいくつかに分類できるが、ここでは注視中の眼球運動に着目した。「注視」とはまさに視線を動かさずに対象を観察することであるが、実際には注視中も眼球は絶えず微細に運動している。固視微動には、素早く直線的な動き、ゆっくりと蛇行する動き、小さく素早い振動がある。一回の固視微動で網膜像に映る像は数十から数百の視細胞を横切る。気付きマップへの統合処理は、固視微動にもかかわらず視知覚像は振動していないことから考えられた。画像処理の観点で考えれば、低解像度化によって顕在化するターゲット位置、および抑制される背景パターンの周期・分布が未知であることに対応する処理である。

2.4 【傷の気付きアルゴリズム】の効能

図4、図5に【傷の気付きアルゴリズム】による実験例を示す。図4は上段から1つだけ線分が付与された円、円群の中で円でない箇所、「P」のなかの「B」、市松模様の

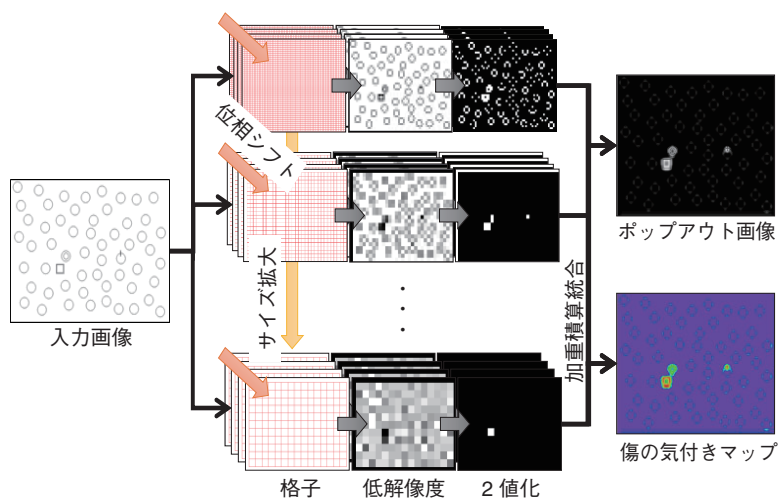


図3 【傷の気付きアルゴリズム】フロー

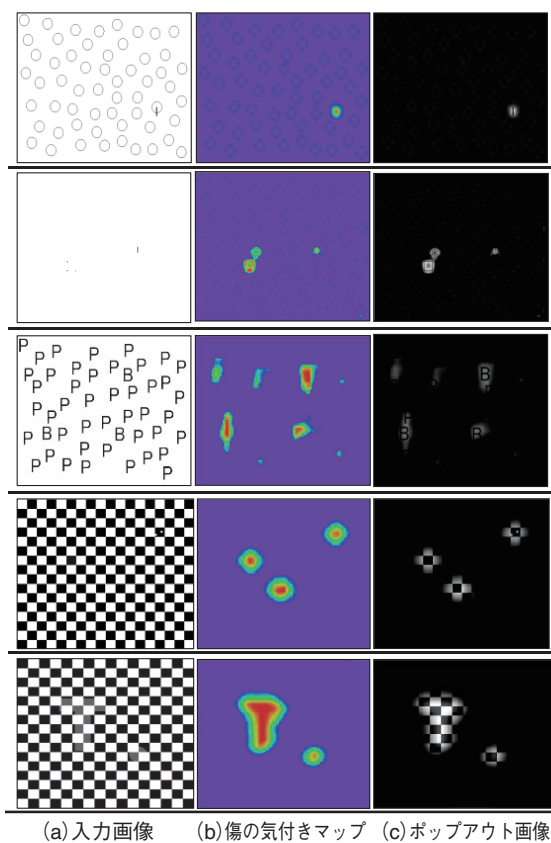


図4 検出結果例1

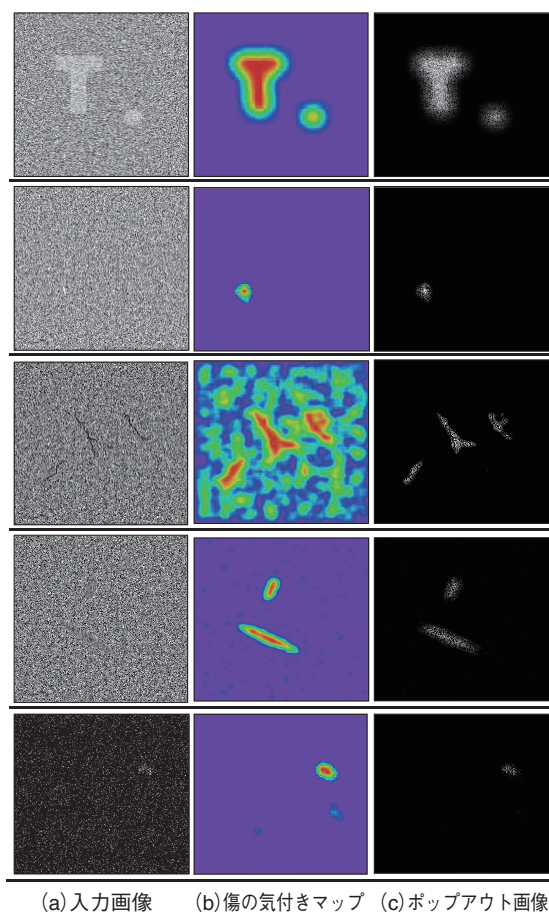


図5 検出結果例2

中の穴と薄い黒マスと角が途切れたマス，市松模様に重畳された薄い「T」と円である。同様に図5は，上段からランダムドット背景に重畳された薄い「T」と円，微小な「×」印，3本のクラック，シミのような2つの楕円，白ドットの密度が高い箇所である。ここで重要なことは，人は「何を検出しろ」という指示がなくとも，画像中で相対的に異なる領域に気付くことと，【傷の気付きアルゴリズム】の画像処理もそれと同等の機能を有することである。

図2，図4，図5の検出結果を得るには，それぞれの画像全体と検出対象の画像特徴を精査し，それに適した画像処理を組み合わせることが一般的である。例えば図1については，「JSPE」という文字列を検出するというタスクであれば，テンプレートマッチングが考えられる。図3の最上段については，白背景に黒の図形があることから，円検出と差分が考えられる。図3下段の市松模様については，

周波数空間での処理によって、白黒の周波数特徴を除去することが考えられる。図4中段のクラック検出では、ノイズ除去の前処理に始まり、2値化、マスク処理、モフォロジー演算等を駆使することが考えられる。一方、【傷の気付きアルゴリズム】によれば、簡単なパラメータ調整のみで、形状異状、シミ・汚れ、粒子状パターン、配置異状等、さまざまなタイプの傷・欠陥をまったく同一のプログラムによって発見できる。

以上、実験例を示したが、【傷の気付きアルゴリズム】は極めてシンプルで、かつパラメータのシビアな調整が不要であることから、画像検査問題において相異なる個別事例に通貫した検査原理の存在を強力に示唆していると考えられる。

3. 同類の技術との相違点

外観検査・目視検査の自動化の阻害要因はいくつか考えられるが、その中でも

- ・自動検査装置完成品の融通性の問題
- ・一品一様での開発の限界
- ・現状の検査画像処理の能力の限界

を挙げれば、汎用性の高い画像検査機械の実現が望まれていることになる。【傷の気付きアルゴリズム】もこれに相應する技術開発であると考えられる。一方、最近の人工知能の技術革新を考えれば、一例として、深層学習に基づく汎用的画像検査の新方式が期待されている。そうすると宿命として、多量の学習用画像の準備が現実には不可能なことやパラメータチューニングが容易でないこと、内部構造の意味理解が難しいことなど、現状では新たな自動化阻害要因を抱えることが課題となり、これらが多くの現場において根本的拒否反応を生んでもいる。【傷の気付きアルゴリズム】は、対象課題の真相を窺い知るためにサンプルサイズの物量に訴える深層学習という方式とは対照的に、上記のような諸課題に対処してきたであろう人の視知覚機能の知見に学ぶことにより、本質的で先天的な汎用性の高さを獲得することを目指した。

4. 【傷の気付きアルゴリズム】の改良・拡張

【傷の気付きアルゴリズム】は、少なくとも画像検査における傷・欠陥候補の“発見”のプロセスについては、さまざまな目視検査対象について、汎用的な画像処理手法が構築できる可能性を示唆していることは述べた。一方、最終的な良否判定においては、やはり、良品・不良品の限度見本の知識が必要であり、つまり“発見”に続く“精査”のプロセスにおいては事前知識を組み込む必要があることを意味している。それに対してわれわれは、図3に示した【傷の気付きアルゴリズム】のモデルを基盤として、複数の画像を時間的・空間的に“見比べる”機能を実装している。

例えば【整列検査方式】⁹⁾¹⁰⁾では検査対象画像群を空間的に整列した一枚の画像を生成し、それを【傷の気付きアル

ゴリズム】の入力とすることにより、異状ワークを検出することができる。また【時空間傷の気付き】¹⁰⁾では、過去の検査画像でのポップアウト状況に応じて、現在の検査画像のポップアウト状況を局所領域ごとに抑制または促進することにより、以前と異なる箇所といつも同じ箇所を区別することができる。つまり、【整列検査方式】では空間的に、【時空間傷の気付き】では時間的に検査画像を“見比べる”ことにより、検査画像中の良品特徴の抽出を抑制したり、限度見本より異状な箇所を顕在化させたりする機能が実装されている。さらに最近では【良品イメージ】¹¹⁾¹²⁾と呼ぶ概念を導入し、その一部機能の実装に成功した。これは、検査員が訓練によって獲得していると考えられる抽象的な、それでいて検査における良不良判定時には顕在化して機能する“良品のありさま”を、現場ではほぼ際限なく入手できる良品サンプルを見せるだけでモデル化する試みである。

いずれの場合も、以上の改良・拡張手法は、【傷の気付きアルゴリズム】が、先天的な汎用性の高さに加えて、柔軟にかつ後天的に多種多様な検査に対応できることを示すものである。

5. 技術の波及効果

【傷の気付きアルゴリズム】の学術的な評価の証左としては、その基本手法が学術論文として『精密工学会誌』に掲載⁴⁾されていることや、国際パターン認識連盟 IAPR 主催のパターン認識国際会議 ICPR2014 に採択されたこと¹²⁾が挙げられる。

一方、実用化については、基本技術が学会発表に先立って特許出願され、特許登録¹³⁾された。加えて、前述の改良・拡張手法についても特許出願中である。また、【傷の気付きアルゴリズム】の実運用については、主に自動車部品を対象に検討が続けられている。例えば、自動車用円筒部品の内面検査¹⁴⁾への適用については、関連学会において報告した。また、既の実運用されている例もあり、図6に開発技術が実装された自動車部品検査装置の外観を示す。今後も、さまざまな製造現場における検査装置に開発技術が実装されていくことが予想される。

6. おわりに

【傷の気付きアルゴリズム】は、幸いにして多くの皆様にご支持いただき、精密工学会・画像応用技術専門委員会主催のワークショップでの最優秀論文賞「小田原賞」の受賞¹⁵⁾¹⁶⁾や、今回の技術賞の受賞に至った。また、多くの関連専門誌『映像情報インダストリアル』『光アライアンス』『画像ラボ』『非破壊検査』『OplusE』において、解説記事を執筆する機会をいただいていた。

ご支持いただいた皆様の期待は、やはり、「【傷の気付きアルゴリズム】が実際の製造現場において実用化されるか」ということであろう。これに関しては、製造プロセスにおける検査工程の自動化という課題の性質上、実運用さ



図6 【傷の気付きアルゴリズム】が実装された自動車部品検査装置の外観（愛知製鋼(株)西畑室長よりご提供）

れていることの公表は困難な場合が多いが、本稿では、検査装置の外観写真（図6）を愛知製鋼(株)よりご提供いただき、紹介することができた。

今回、技術賞をいただいたプロジェクト名「目視検査作業の機械化を目指した人の検査メカニズムのモデル化」と、【傷の気付きアルゴリズム】開発における「個別事例に通貫した検査原理」という壮大な課題については、画像検査機械の開発に従事されている技術者・研究者の皆様と共有させていただき、検査画像処理が実問題に根差した一大分野として認知される一助となれば幸いである。

謝 辞

本技術賞受賞に際してご支援を賜った愛知製鋼(株)関係各位、三友工業(株)関係各位に心より御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) H. ベルグソン（高橋里美訳）：物質と記憶、岩波文庫、(1996)。
- 2) 奥水大和ら：産業を支える画像技術（総論論文，解説論文6件），映像情報メディア学会誌，**65**，11（2011）。
- 3) 奥水大和ら：画像技術の最前線（展望論文，解説論文5件），精密工学会誌，**77**，12（2011）。
- 4) 青木公也，舟橋琢磨，奥水大和，三和田靖彦：周辺視と固視微動に学ぶ「傷の気付き」アルゴリズム，精密工学会誌，**79**，11（2013）1045-1049
- 5) 日本視覚学会 編：視覚情報処理ハンドブック，朝倉書店，(2000)。
- 6) J.M. フィンドレイ，I.D. ギルクリスト（本田仁視監訳）：眼球運動の心理・神経科学 アクティヴ・ビジョン，北大路書房，(2006)。
- 7) 福田忠彦：感覚の生理と心理，Keio SFC Global Campus，(2003)。
- 8) 舟橋琢磨，藤原孝幸，山本明史，奥水大和，岩崎宏明，青野宏：作業員の動作・視線に基づく人らしい検査システム，ViEW2009，(2009)。
- 9) 青木公也，舟橋琢磨，奥水大和，三和田靖彦：整列検査方式—「傷の気付き」処理に基づくワーク良不良判定手法の提案—，DIA2013，(2013)。
- 10) 青木公也，根来秀多，吉村裕一郎，舟橋琢磨，奥水大和，三和

- 田靖彦：傷【のみ】に気付く，時空間【傷の気付き】処理，日本工業出版，画像ラボ，**26**，10（2015）39-46。
- 11) 岡本光旦，橋本静也，根来秀多，青木公也，舟橋琢磨，奥水大和，石井博行：目視検査員に学ぶ良品イメージに基づいた傷・欠陥候補検出，SSII2016，(2016)。
- 12) K. Aoki, T. Funahashi, H. Koshimizu and Y. Miwata: "KIZKI" Processing for Visual Inspection—A Smart Pattern Pop-out Algorithm based on Human Visual Architecture—, Proc. of International Conference on Pattern Recognition (ICPR2014), (2014), 2317-2322.
- 13) トヨタ自動車(株)，三和田靖彦，奥水大和，青木公也：欠陥検査装置及び欠陥検査方法，特許公報，特許第5821708号，(2015)。
- 14) 長嶋千恵，青木公也，塚田敏彦，三和田靖彦，奥水大和：内視鏡型センシングと気付きアルゴリズムによる自動車部品検査方式，精密工学会誌，**81**，12（2015）1180-1184。
- 15) 青木公也，舟橋琢磨，奥水大和，三和田靖彦：小田原賞受賞 周辺視と固視微動に学ぶ「傷の気付き」アルゴリズム，産業開発機構，映像情報インダストリアル，**3**（2013）50-59。
- 16) 長嶋千恵，青木公也，塚田敏彦，三和田靖彦，奥水大和：小田原賞受賞 内視鏡型センシングと気付きアルゴリズムによる自動車部品検査方式，産業開発機構，映像情報インダストリアル，**3**（2015）64-69。



奥水大和

1975年名古屋大学大学院工学研究科電気電子工学専攻(博)修了。工博。現在，中京大学工学部教授，中京大学人工知能高等研究所長。



青木公也

2000年慶應義塾大学大学院理工学研究科機械工学専攻修了。博士(工学)。現在，中京大学工学部教授。



舟橋琢磨

2008年中京大学大学院情報科学研究科情報認知科学専攻修了。博士(情報科学)。現在，中京大学工学部助教。



三和田靖彦

1982年名古屋工業大学工学部情報工学科卒業。1982年4月トヨタ自動車(株)入社。2015年より理化学研究所出向中。



石井博行

1989年岡山大学工学部電子工学科卒業。現在，トヨタ自動車(株)計測技術部設備計画室室長。