IoT 時代に対応するマルチタスク型の次世代ビジョンとそのセンシング応用

青山 忠義*, 石井 抱*

Multi-Task Next-Gen Vision and Its Sensing Application for IoT Age

Tadayoshi AOYAMA* and Idaku ISHII*

* 広島大学大学院工学研究院 (〒 739-8527 広島県東広島市鏡山 1-4-1)

* Graduate School of Engineering, Hiroshima University (1-4-1, Kagamiyama, Higashi-Hiroshima, Hiroshima 739-8527)

1. はじめに

高度化された生産ラインの生産現場において、高い品質管理を可能とする官能検査は、多くの場合、目視により行われているのが現状である。多くの人手による検査は、品質、生産効率、信頼性などの面で課題も多く、高い品質管理を可能とする検査工程の自動化が求められており、画像処理技術に基づく検査システムが数多く開発され、生産現場への導入も行われている¹⁾。

筆者らのグループも含め、これまでに目視では捕らえられない高速現象を実時間認識する高速ビジョンシステムを開発しており^{2)~4)}、イメージモザイク⁵⁾、色ヒストグラム追跡⁶⁾、オプティカルフロー⁷⁾、顔認識⁸⁾、三次元画像計測⁹⁾などのさまざまな画像処理機能を、高速ビジョン上の FPGA 回路や GPU コアなどに対して実装することにより、従来ビデオ画像 (NTSC 30 コマ/秒) に比べ二桁以上高速化された速度で実現してきた。また、開発した高速ビジョンの有効性については、ロボット制御¹⁰⁾やバイオ応用¹¹⁾などのさまざまな応用場面で示されてきた。

筆者らは、高速ビジョンを用いた計測システムが高速かつ高精度な官能検査の自動化への応用が期待できると考えており、本稿では、これまでに筆者らが行ってきた高速ビジョンのセンシング応用にかかわる研究事例^{12)~15)}を紹介する。さらに、筆者らが近年取り組んでいる高速ビジョンを用いたマルチタスク型の次世代ビジョンに関するコンセプトおよび研究事例^{16),17)}について紹介し、高速ビジョンがマルチタスク型の次世代ビジョン IoT として機能していく可能性を論じる。

2. 多面ミラーを用いた三次元計測

計算時間や計算コストなどの面で利点がある他、計測対象の模様などに依存しないロバスト性を持つことから、画像を用いた三次元計測技術として、光切断法が産業分野で広く用いられている。一方で、光切断法に基づくシステムの多くはビデオ信号 (NTSC 30~fps) を扱ったイメージセン

図1. 多面ミラーを用いた三次元計測

図2. 三次元計測実験の様子

サを用いるため、三次元形状取得における速度面での制限や、イメージセンサの空間解像度に依存した計測範囲および計測精度の制限がある。光切断法におけるこのような欠点を補うために、イメージセンサの画像領域を多面ミラーにより空間変換することで、ある一方向にのみ、イメージセンサの空間解像度よりも高い空間解像度を持たせることにより、平板対象に特化した形で高速かつ広範囲にわたる計測を実現する三次元形状計測法を提案した¹²⁾。

大きさ 93 mm × 155 mm のクリームはんだのみが印刷されている携帯電話用回路基板に対して、三次元形状計測実験を行った。図1に三次元形状計測システムの構成、図2に実験の様子を示す。さらに、図3に計測対象の写真と得

図3. 計測対象の写真(左)と得られた三次元形状(右)

られた三次元形状情報を示す。このように、印刷されたはんだ位置に対応した形で、高さ百数十 μm のサブmmサイズのクリームのはんだの三次元形状が計測されていることがわかる。提案したシステムでは、三次元形状パラメータは、計測と同時に実時間で計算することが可能であり、不良品検査などにおいて有効となる三次元形状パラメータの定量化が実現できるため、生産ラインの生産現場への応用が期待できる。

3. 実時間光沢面スキャナ

画像処理技術に基づく外観検査装置が数多く開発され、生産現場への導入が行われているが、金属プレス部材などの光沢を持つ対象について、表面研磨や塗装などの仕上がりを判断する場合、一方向から撮影した単一画像のみでは光沢情報の検出が一般に難しい。そのため、光沢面を持つワークの欠陥検査は、多くの生産現場において、目視により行われているのが現状である。こうした問題に対して、搬送されるワーク対象の表面反射特性を高速かつ高精度に検出する実時間光沢面スキャナを開発した¹³⁾。

開発した実時間光沢面スキャナでは、図4に示すように、(a) シリンドリカル光学系により、ラインレーザによる生成された反射光を一枚の画像としてイメージャへ集約、(b) 集約された反射光画像に対する、モデル近似に基づくパラメータフィッティング、(c) 外観検査に向けた表面反射特性の推定を実現する。発したスキャナを用いて、打痕のある板厚0.7 mmの平面金属プレス部材の表面反射特性を計測し、非接触3次元形状計測装置NH-3(三鷹光機)の計測データを用いて、推定される表面反射特性の比較実験を行った。図5は、本システムで推定された表面法線角度とNH-3で計測された3次元データから計算した表面法線角度の三次元プロット図である。打痕周辺の表面法線角度は、本システムでの推定値がNH-3の場合よりやや下回るものの、表面法線角度の変化は同様な傾向が得られ、実時間での光沢面スキャンを実現しており、実際の生産ラインにおける運用が期待される。

図4. 実時間光沢面スキャナの概要

図5. 計測された表面法線角度

4. モーションブラーフリー顕微鏡

高速運動対象を撮影する場合、モーションブラー[†]を抑えるためにシャッタ時間を小さくする必要があるが、イメージセンサの受光量減少に起因し、高輝度かつ広ダイナミックレンジな画像取得が困難となる。特に顕微鏡撮影のような高倍率観察では、見かけの速度が大きくなると同時に受光量が減少するため、輝度とモーションブラーのトレードオフの関係はより深刻となる。こうした問題に対して、撮影フレームごとに間欠的に観察対象を追跡することでモーションブラーを低減するモーションブラーフリー顕微鏡を提案した¹⁴⁾。

モーションブラーフリー顕微鏡には、カメラのシャッタ状態に応じた「ビジュアルフィードバック制御に基づく対象追跡制御」と「カメラがホーム位置へ戻る制御」の切り替えを機械的にカメラのイメージセンサへの光線パスを高速に変更することにより実現し、運動対象の撮影時の輝度とモーションブラーのトレードオフを解決する「瞬間間欠的トラッキング法」と呼ばれるアルゴリズムが実装されている。図6に瞬間間欠的トラッキング法によるモーションブラーフリー撮影の概要を示す。高速ビジョンとピエゾアクチュエータを用いたモーションブラーフリー顕微鏡構築し、リニアスライダにより8 mm/sで動作する珪藻サンプルの撮影実験を行った。図7にモーションブラーフリー顕

微鏡の外観と珪藻サンプルの写真を示す。さらに、図8にモーションブラーフリー顕微鏡により撮影された珪藻サンプルの画像と通常撮影された珪藻サンプルの画像を示す。モーションブラーフリー顕微鏡により撮影された画像は、

図 6. モーションブラーフリー撮影の概要

図 7. モーションブラーフリー顕微鏡の外観と珪藻サンプル

図 8. モーションブラーフリー顕微鏡により撮影された画像と通常撮影による画像

静止した珪藻の画像とほぼ同じであり、瞬間欠的トラッキング法を用いることにより、珪藻の被殻パターンが速度に関係なく大きなモーションブラーなしに観測可能であることが確認された。一方で、通常撮影の画像は大きなモーションブラーが発生している。このような顕微鏡下で高速に移動する対象のモーションブラーを抑えた形で撮影できるシステムは、マイクロ流路内を高速に流れる細胞の良否を検査するハイスループットな Lab-on-a-chip (LOC) ベースの細胞検査系への導入が期待される。

5. 動作補償を用いた実時間三次元計測

画像を用いた三次元計測は工場における検査や物体認識、ロボットのセンサなどへさまざまな応用がされており、コード化パターン光投影法はカメラおよびプロジェクタに基づく能動的計測法として、広く知られている。しかし、カメラ・プロジェクタ座標と計測対象の座標間の高速な相対運動が発生する場合、投影されたコード化パターンの同期ずれにより三次元形状の精度が悪化する。このような同期ずれに対応するため、高速な計測対象が観測された場合にも精度が悪化せずに三次元計測を行うことが可能な時間変化するプロジェクション投影を用いた動作補償型コード化パターン光投影法を提案した¹⁵⁾。

図9に示すように、高フレームレートカメラと高フレームレートプロジェクタからなる三次元計測モジュールを6軸ロボットマニピュレータに搭載し、カメラ・プロジェクタ座標と計測対象の座標間に高速な相対運動が発生する状況下で三次元形状計測実験を行った。図10に三次元形状計測実験の様子と結果を示す。図10(b)が従来のコード化パターン光投影法による計測結果を表し、図10(c)が動作補償型コード化パターン光投影法による結果である。これらの比較から動作補償型コード化パターン光投影法によって、計測対象との相対運動が発生した場合においても高精度で三次元計測が可能となることが確認でき、生産ラインの生産現場における検査への応用が期待できる。

図 9. 実時間三次元計測システムの外観

図 10. 実時間三次元計測実験結果

6. マルチスレッドアクティブビジョンを用いた実時間振動分布計測

橋梁などの大きな土木構造物の振動分布をビジョンシステムにより観測する場合、一般的に構造物の複数の観測点に対する振動変位を1つのカメラで同時に計測することが困難である。観測点ごとにカメラを用意することにより、広範囲にわたる多くの視野を同時にカバーした形の振動分布計測が考えられるが、カメラの物理的な大きさに伴う制限や制御ソフトウェアの複雑化など、観測点数に比例したカメラシステムの大規模化によるさまざまな制約・コストが生じる。こうした問題を解決するカメラシステムとして、秒間500視点を独立に制御可能とする高速マルチスレッドアクティブビジョンを導入し、単一アクティブビジョンによる構造物モデルの実時間振動分布計測を実現した¹⁶⁾。

本研究事例では、1 msを視線制御、1 msを露光・処理時間としたフレーム間隔2 msを最小スレッド単位時間と考え、500視点/秒の視線スレッドを図11のように15個の仮想カメラタスクに割り当てた視線マルチスレッド処理により、単一アクティブビジョンを15台の33.3 fps仮想カメラとして機能させ、4 m大のトラス構造を持つ橋梁モデルに対して振動実験を行い、中心周波数11.3 Hzで振動する橋梁モデルの振動分布を単一アクティブビジョンシステムで計測した。図12に橋梁モデルの振動計測の結果を示す。複数の加速度センサによる計測結果と同等な振動分布を捉えられることが確認された。本計測システムをベースにし、振動分布のモード解析を中心とした振動解析の実時間高速化などにより、実フィールドにおける橋梁を始めとした社会インフラ構造物のモニタリングシステムとしての応用展開が期待される。

High-speed Multithread Active Vision

図 11. マルチスレッド視点制御

図 12. 計測された橋梁モデルの構造

図 13. 視野拡張システムの外観

図 14. 生成されたパノラマ画像

7. ガルバノミラーを用いた視野拡張システム

画像処理によりマイクロ流路内の対象を解析するシステムでは、対物レンズの視野範囲が狭いため、顕微鏡下で解析可能な対象物の範囲や速度に制限があり、顕微鏡撮影での視野拡張が求められている。こうした要求に対し、ガルバノミラーを用いて対物レンズの視点を移動させることにより視野を拡張する顕微鏡撮影システムを提案した¹⁷⁾。

図 13 に示すような顕微鏡撮影のための視野拡張システムを構築し、ムラサキツユクサの葉表面を撮影対象としたパノラマ画像の生成実験を行った。図 14 に示す縦 2,769 μm 、横 3,932 μm のパノラマ画像が作成され、従来の顕微鏡撮影範囲に対して 17.4 倍程度の視野拡張が可能となり、視野面積が拡張されていることが確認された。バイオ・医療の分野に向けた細胞の形状や反応、特性などを解析する画像処理ベースの解析システムに本視野拡張システムを導入することで、解析システムの効率化・高性能化が期待される。

8. まとめ

本稿では、筆者らがこれまでに行った高速ビジョンのセンシング応用事例を紹介し、高速ビジョンを用いた計測システムが高速かつ高精度な官能検査の自動化に有効となる

ことを論じた。特に、高速ビジョンを用いたマルチタスク型の次世代ビジョンは、高速ビジョンの高時間分解能の利点を計測範囲の拡大・高空間解像度化に変換し、単一システムのみで広範囲の状況を瞬時認識する新たな集中管理型のセンシング応用技術である。今後、分散カメラネットワークに基づく従来技術に代わる次世代ビジョン IoT として機能していくことを期待したい。

(2016.8.19- 受理)

文 献

- 1) T. S. Newman and A. K. Jain: "A survey of automated visual inspection," Computer Vision and Image Understanding, Vol. **61**, No. 5, pp. 231–262, 1995
- 2) I. Ishii, T. Taniguchi, R. Sukenobe, and K. Yamamoto: "Development of High-Speed and Real-Time Vision Platform, H3 Vision," Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp. 3671–3678, 2009
- 3) I. Ishii, T. Tatebe, Q. Gu, Y. Moriue, T. Takaki, and K. Tajima: "2000 fps Real-time Vision System with High-frame-rate Video Recording," Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 1536–1541, 2010
- 4) Y. Watanabe, T. Komuro, and M. Ishikawa: "955-fps Real-time Shape Measurement of a Moving/Deforming Object using High-speed Vision for Numerous-point Analysis," Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 3192–3197, 2007
- 5) Q. Gu, S. Raut, K. Okumura, T. Aoyama, T. Takaki, and I. Ishii: "Real-Time Image Mosaicing System Using a High-Frame-Rate Video Sequence," J. of Robotics and Mechatronics, Vol. **27**, No. 1, pp. 12–23, 2015
- 6) I. Ishii, T. Tatebe, Q. Gu, and T. Takaki: "Color-Histogram-Based Tracking at 2000 fps, J. of Electronic Imaging," Vol. **21**, 013010, 2012
- 7) I. Ishii, T. Taniguchi, K. Yamamoto, and T. Takaki: "High-Frame-Rate Optical Flow System," IEEE Trans. on Circuits and Systems for Video Technology, Vol. **22**, No. 1, pp. 105–112, 2012
- 8) I. Ishii, T. Ichida, Q. Gu, and T. Takaki: "500-fps Face Tracking System, J. of Real-Time Image Processing," Vol. **8**, No. 4, pp. 379–388, 2013
- 9) H. Gao, T. Aoyama, T. Takaki, and I. Ishii: "A Self-projected Structured Light System for Fast Three-dimensional Shape Inspection," Int. J. of Robotics and Automation, Vol. **30**, No. 4, 206-4325, 2015
- 10) T. Aoyama, T. Takaki, T. Miura, Q. Gu, and I. Ishii: "Realization of Flower Stick Rotation Using Robotic Arm," Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp. 5648–5653, 2015
- 11) Q. Gu, T. Aoyama, T. Takaki, and I. Ishii: "Simultaneous Vision-Based Shape and Motion Analysis of Cells Fast-Flowing in a

- Microchannel,” IEEE Trans. on Automation Science and Engineering, Vol. **12**, No. 1, pp. 204–215, 2015
- 12) 石井 抱, 藤井宏明, 山本健吉, 高木 健: “多面ミラーを用いた三次元形状計測,” 日本機械学会論文集 (C 編), Vol. **76**, No. 772, pp. 223–231, 2010
- 13) 石井 抱, 角田真一, 山本健吉, 高木 健: “表面反射特性推定に基づく実時間光沢面スキャナの開発,” 日本機械学会論文集 (C 編), Vol. **76**, No. 763, pp. 135–142, 2010
- 14) 上野貴弘, 青山忠義, 顧慶毅, 高木 健, 石井 抱, 川原知洋: “間欠的高速トラッキングに基づく顕微鏡下でのモーションブレンダーフリー撮影,” 日本ロボット学会誌, Vol. **34**, No. 6, pp. 57–64, 2016
- 15) J. Chen, Y. Liu, Q. Gu, T. Aoyama, T. Takaki, and I. Ishii: “Robot-mounted 500-fps 3-D Shape Measurement Using Motion-compensated Coded Structured Light Method,” Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Biomimetics, pp. 1989–1994, 2014
- 16) 李 良, 青山忠義, 高木 健, 石井 抱, 梅本千佳子, 松田 浩: “高速マルチスレッドアクティブビジョンを用いた実時間振動分布計測,” ロボティクス・メカトロニクス講演会 2016 講演論文集, 2A1-20a4, 2016
- 17) 金石 守, 青山忠義, 高木 健, 石井 抱: “ガルバノミ

ラーを用いた顕微鏡撮影のための視野拡張システム,” 第 32 回日本ロボット学会学術講演会 講演論文集, RSJ2016AC 2E2-02, 2016

† 用語解説

モーションブレンダー: 動的対象物をカメラで撮影した時に生じるブレや残像

著者紹介

青山忠義 (あおやま ただよし)

2007 年名古屋大学工学部卒業。2009 年名古屋大学大学院工学研究科博士前期課程修了。2012 年名古屋大学大学院工学研究科博士後期課程修了。同年広島大学大学院工学研究院助教, 現在に至る。ロボット制御, 計測システムなどの研究に従事。博士 (工学)。

石井 抱 (いしい いだく)

1992 年東京大学工学部卒業。1994 年東京大学工学系研究科修士課程修了。1996 年同大学工学系研究科助手。2000 年東京農工大学工学部講師, 2002 年同助教授。2003 年広島大学大学院工学研究科助教授, 2007 年同教授, 現在に至る。高速ビジョン, センサ情報処理, ロボット制御などの研究に従事。博士 (工学)。