

実時間高速画像処理に基づく高フレームレートビデオロガー

石 井 抱

High-Frame-Rate Video Logger Based on Real-Time Fast Image Processing

Idaku ISHII

This paper reports on the development of our high-speed vision platform that can execute video processing and recording of 512×512 images in real time at 2000 fps. Owing to its simultaneous high-frame-rate (HFR) video processing and recording function, our high-speed vision platform can work as a control sensor for target tracking, a recognition sensor to evaluate behavior at crucial moments, and an HFR video recorder. Consequently, it can also work as an intelligent HFR video logger that can only record frames required for crucial moments in long-term high-speed phenomena analysis. Several case studies of intelligent HFR video logging have been introduced to demonstrate the effectiveness of our new real-time vision system, which can track high-speed phenomena that cannot be observed by the human eye.

Key words: real-time vision, high-speed vision, target tracking, abnormal behavior detection, behavior mining

高速度カメラは、高速現象をオフライン解析するための高フレームレート (HFR) ビデオレコーダーとして、さまざまな応用分野で広く使われている。その多くは、メモリの制限等から短時間 HFR ビデオを記録するものであり、画像に基づいたビデオキャプチャーのトリガータイミング決定ができない。多くの場合、工場における生産機械の異常動作といった、長時間にわたる高速現象での突発現象の HFR ビデオ画像記録のトリガータイミングは、オペレーターの目視により決定されているため、オペレーターに過大な肉体的負担を与えるとともに、目視能力の速度限界から、決定的な瞬間を見逃す場合が頻発する。

一方で、実世界での高速な現象を認識するために、ビデオレートを上回る多くの高速ビジョンが開発され、センサーと処理要素をワンチップ集積化したビジョンチップ^{1,2)}、高速カメラを接続した FPGA ボード上にアルゴリズムを回路実装する FPGA ベースド高速ビジョン^{3,4)}等が報告されている。その一方で、多くの高速ビジョンは出力がスカラー特徴量に限定され、高速現象での決定的な瞬間

の認識と同時に詳細な事後解析のための HFR 映像を記録する機能をもっていない。

そこで本稿では、長時間にわたる高速現象における決定的な瞬間を HFR 映像として自動記録する知的 HFR ビデオロガーのコンセプトを述べた上で、実時間 HFR 映像処理と映像記録を同時実現する高速ビジョンとして、筆者らが開発を進めている高速ビジョンプラットフォーム IDP Express⁵⁾を紹介する。また、いくつかの動作例の紹介を通し、人間の目には捉えられない高速な動きを決して見逃さない知的 HFR ビデオロガーとしての有効性を示す。

1. 知的 HFR ビデオロガー

多くの市販高速度カメラは、カメラヘッドからの画像を専用メモリーに高速転送することにより HFR ビデオ記録する一方で、専用メモリーに記録された画像を外部機器に高速転送する機能がないため、使用目的がオフラインでのスローモーション解析に限定される。このような制限は、図 1 のように、(a) 飛翔する対象の衝突現象といった、広

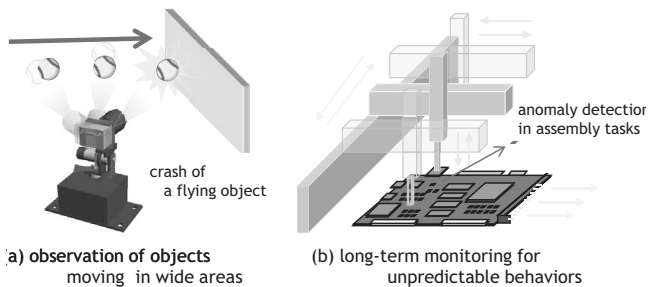


図1 知的 HFR ビデオロガーが必要な場面。

範囲にわたる運動対象の観測や、(b) 生産機械における異常動作といった、長時間にわたる予測不能な異常現象の観測で問題となる。(a) では、固定カメラではすべての運動を捉えるためにズームアウトする必要があり、画像の空間解像度が劣化する。(b) では、オペレーターが常に高速現象を観測してトリガータイミングを決める必要があり、視力の限界から決定的な瞬間を見逃す場合がある。

これらの問題に対し、筆者らは決定的な瞬間の周辺フレームのみの自動選択により、効率的な HFR ビデオ記録を行う知的 HFR ビデオロガーとして動作する高速ビジョンプラットフォームの開発を進めている。本稿で紹介する知的 HFR ビデオロガーは、(a) 高速ビジュアルフィードバック制御のためのセンサー、(b) 決定的な瞬間における動きを判断する認識センサー、(c) 高フレームレートでの映像レコーダーといった機能を同時実現することにより、計測対象が広範囲にわたり高速に運動する場合においても、機械的な追跡により運動対象をズームインしたまま、決定的な瞬間を画像処理によりイメージベースドトリガー信号として検出できる。長時間にわたる高速現象に対するモニタリングおよび解析を可能とする HFR ビデオロガーは、組み立て工程での異常動作検出、機械の耐久試験、細胞内シグナル検出、術中インシデント記録、スポーツにおけるインパクト解析など、見えざる高速現象をマイニングするセンシングツールとして、さまざまな応用場面において有効である。

2. 高速ビジョンプラットフォーム IDP Express

筆者らと (株) フォトロンが共同開発した IDP Express⁵⁾ は、2 台のカメラヘッド、専用 FPGA 画像処理ボード (IDP Express ボード)、PC から構成され、ハードウェア/ソフトウェアによる画像処理アルゴリズム実装による処理結果と同時に HFR 入力画像を PC 上の汎用メモリーに記録可能とした、高速ビジョンプラットフォームである。外観を図2に示す。

カメラヘッドは、6 画素並列読み出しにより、カラー /

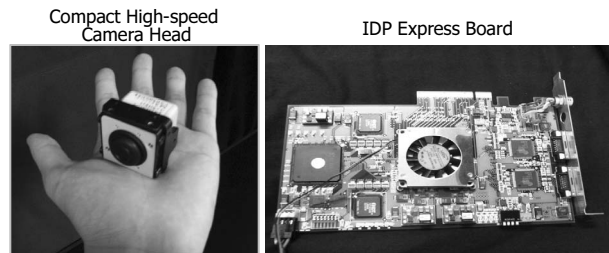


図2 IDP Express の外観。

濃淡 8 ビット 512×512 画像を 2000 fps、512×96 画像を 10000 fps でキャプチャー可能とする。大きさ 35×35×34 mm、重量 100 g (キューブ型の場合) と、ロボット等の可動体への搭載に対応した小型軽量なものとして設計された。IDP Express ボードは、2つのカメラヘッドからの 512×512 画像に対し、2000 fps での実時間映像処理・記録を同時実現するために設計された専用 FPGA 画像処理ボードである。ボードは、カメラ I/O および PCI-e バス制御を行う FPGA (Xilinx XCVFX60, FPGA1)、ユーザー実装用 FPGA (Xilinx XC3S5000, FPGA2)、カメラ入力用シリアル変換回路、FPGA 間のデータ通信用 FIFO、FPGA コンフィグレーション用の PROM から構成される。図3に処理ブロック図を示す。

IDP Express ボードでは、最初にカメラヘッドからの画像について、6 画素を単位として、クロック 100.8 MHz に従う 48 ビットパラレルデータに変換する。次に、FPGA1 上において、100.8 MHz で転送される 96 ビット (12 画素分) のパラレルデータを、FPGA2 の動作クロック 151.2 MHz に従った 80 ビットパラレルデータ (8 画素分に対応、10 ビット / 画素) に変換する。FPGA1 からの 80 ビットパラレルデータは、画像処理をユーザ実装可能とする FPGA2 上の処理ブロックにより処理される。なお、パラメーター用レジスターとして、クロック 50.4 MHz で PC からその値を更新できるレジスターが使用できる。FPGA2 での入力画像や処理結果は、FIFO メモリーを介して、クロック 151.2 MHz に従う 80 ビットパラレルデータとして、FPGA1 に転送される。またこれらのすべてのデータは、FPGA1 内の PCI-e エンドポイントを介して、PCI-e バスに出力される。

IDP Express 用の PC は、8 レーン以上の PCI-e 2.0 バスおよび汎用メモリーに対する DMA 機能をもち、Windows XP 以降の Windows OS が実装されたコンピューターで動作する。PCI-e バスに転送された入力画像および処理結果は、DMA 機能により、PC 上のあらかじめ確保されたメモリー領域上に 512×512 画像を 4000 fps でメモリーマップされる。また、カメラパラメーター制御、ボード制御や

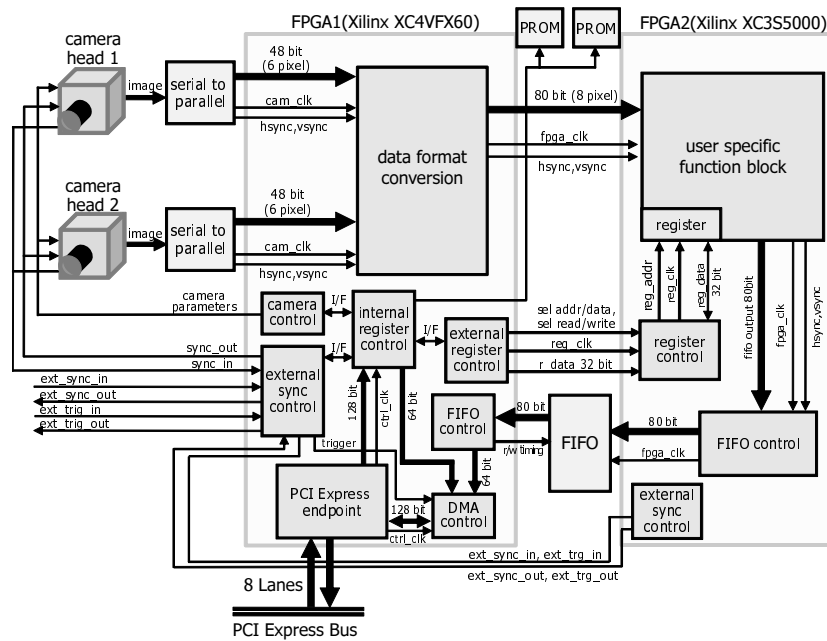


図3 IDP Express ボードの処理ブロック図.

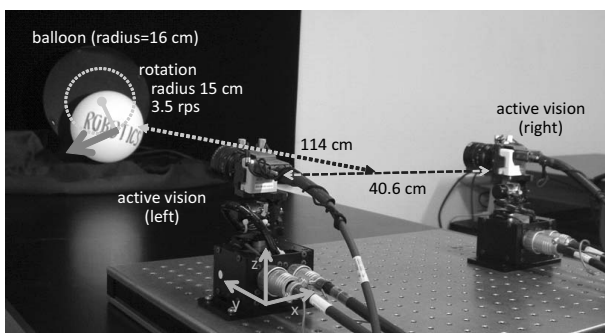


図4 HFR 映像記録機能をもつ対象追跡システム.

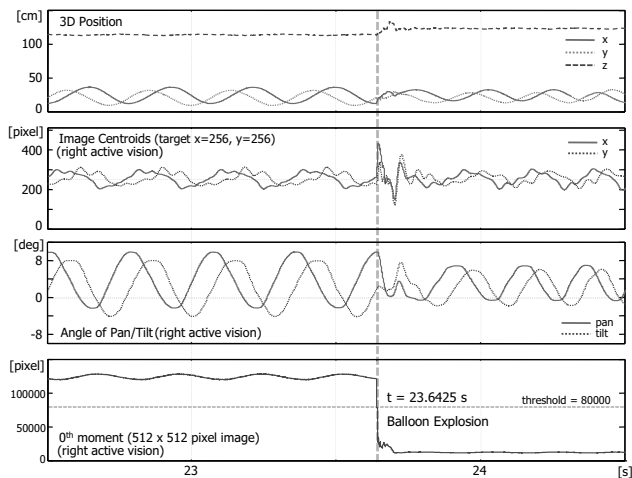


図5 風船の三次元位置, 右アクティブビジョンのパン / チルト角, 画像重心および0次モーメント.

データアクセスの各種 API 関数をミドルソフトウェアとして用意し, 汎用プログラミング言語を用いた各種応用ソフトウェア開発を可能とする.

IDP Express では, 入力画像および処理結果を PC 汎用メモリーへ高速転送することにより, ユーザーが画像処理アルゴリズムの実装先を FPGA, GPU, CPU と容易に選択可能であり, 要求される処理内容・性能・開発時間などに合わせ, ユーザーが自在にプログラミングできる柔軟な開発環境が用意されている. 筆者らは, 認識機能をもつラベリング⁶⁾, 色ヒストグラム追跡⁷⁾, 顔追跡⁸⁾等の高速化に成功しているが, 以降では誌面の都合上, IDP Express を知的 HFR ビデオロガーとして用いた動作事例に焦点を絞り, 紹介する.

3. HFR ビデオ記録機能をもつ対象追跡システム

運動対象における高速現象を HFR ビデオに記録するた

めに, 図4で示す構成で2台の2軸アクティブビジョンと IDP Express が連動した対象追跡システム⁵⁾を構築した. 本システムでは, アクティブビジョンにカメラヘッドを搭載し, 左右カメラヘッド位置は画像重心位置に基づき対象がカメラ視野中心となるように制御した. 重心位置は, IDP Express ボード上に回路実装されたモーメント計算モジュールからの0次, 1次モーメント特徴に基づき, 512×512画素画像に対し2000fpsで計算される. アクティブビジョンのパン/チルト角はフィードバックレート2kHzで制御される.

3.5回転/秒で回転する風船を追跡し, 破裂する瞬間の HFR ビデオを自動記録した場合について, 図5に, 破裂時

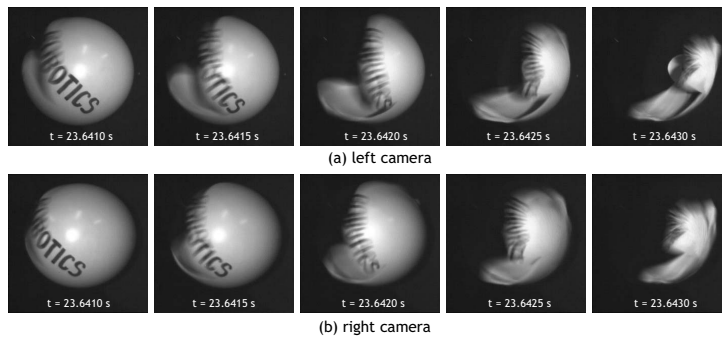


図6 風船の破裂時の HFR ビデオ.

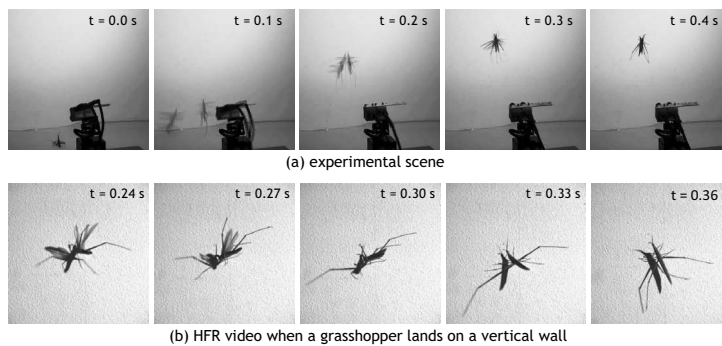


図7 バッタが垂直壁に着地時の HFR ビデオ.

刻を含む 2 秒間の風船の三次元位置，右アクティブビジョンでの画像重心，パン / チルト角，総和を，図 6 に，左右カメラの映像として記録された 0.5 ms 間隔の画像列を示す．撮影開始トリガー信号は，右カメラの 0 次モーメントがある閾値（80000 画素）を下回るときを風船が破裂したとして生成した．風船が高速に回転する場合でも，あたかも画像内に回転がないように，サブミリ秒の短時間での破裂現象が左右カメラの異なる視点からの HFR ビデオとして自動記録された．

広範囲で運動する生体に対する追跡例として，ジャンプするバッタが垂直壁に着地するまで追跡した場合について，市販ビデオカメラで撮影された実験の様子，および自動記録された HFR ビデオの画像列の一部を図 7 に示す．この実験では，単一アクティブビジョンによる追跡により，バッタを視野中心に捉えたまま，512×512 画像を 1000 fps で自動記録した．ジャンプ開始から着地までの 0.4 秒間について，目視では詳細を捉えることが難しい羽ばたきの様子，さらには，バッタが自分の体を壁に対し垂直にして着地を行い，全身をばねのようにして着地の衝撃を抑える様子が，HFR ビデオとして自動記録された．

4. 高速な繰り返し機械動作における異常動作ロギング 機械が長時間にわたり高速な繰り返し動作を行う生産現

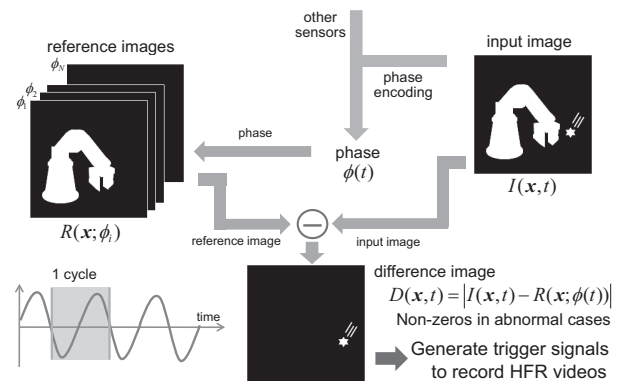


図8 高速繰り返し動作における異常動作検出.

場において，製品欠陥の発生要因となる異常動作の HFR ビデオの自動記録は，原因解明の時間短縮など品質管理の効率化に直結する．そこで，入力画像が周期信号の場合について，図 8 のように，画像から周期信号の位相を自動エンコードした上で，異常動作が含まれない参照画像列と入力画像の差分画像に基づく異常動作検出機能を IDP Express に実装し，高速繰り返し動作における異常動作の HFR ビデオロギングを実現した⁹⁾．

高速な反復動作を行うミシンを用いて，異常動作検出実験を行った．実験環境を図 9 に示す．カメラヘッドはミシンの斜め上方に設置され，ミシンは 30 mm の長さをもつ 1 mm 径針を秒間 12.5 回上下動かせる．位相検出および異

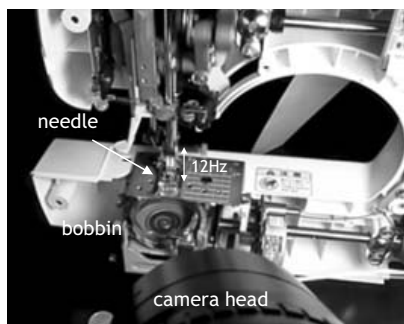


図9 高速動作するミシン.

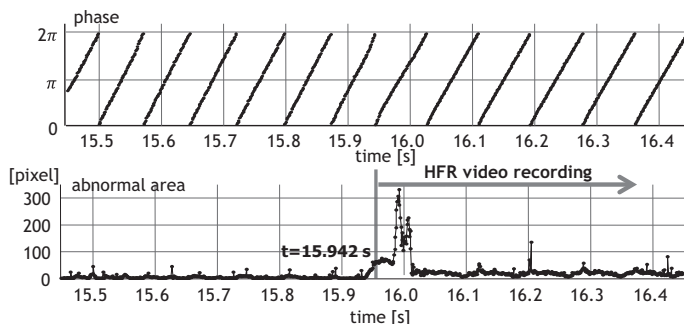


図10 検出された周期位相と差分画像の総和.

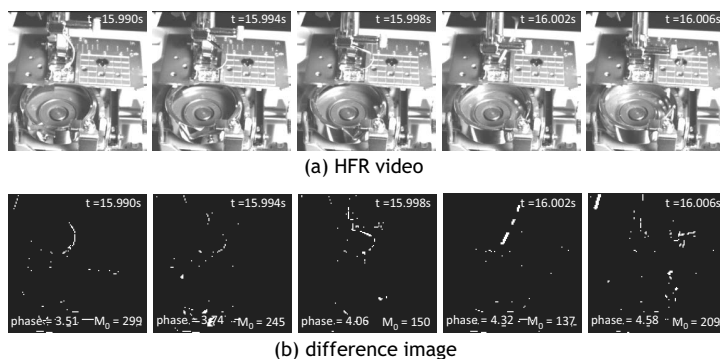


図11 異常動作時に自動記録された HFR ビデオ.

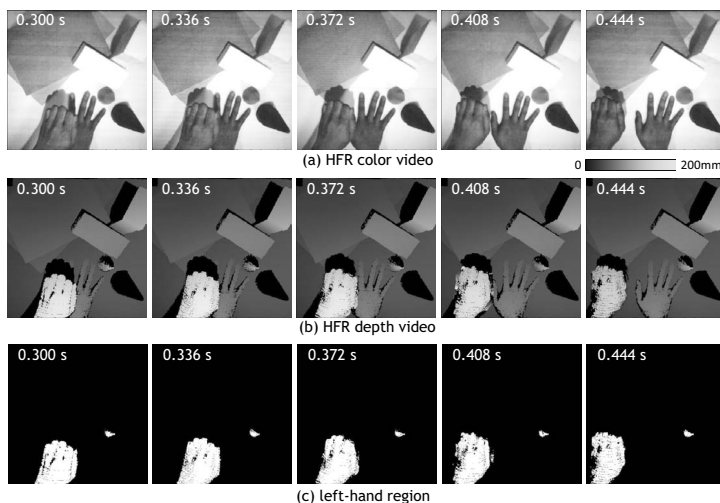


図12 高速な手の動きに対する HFR デプスビデオ.

常動作検出は、8画素おきに間引きされた 128×128 画像に対して行った。周期位相は画像中の 50 点の輝度変化に基づき検出され、参照画像と入力画像の差分計算とともに 1000 fps で実時間動作する。参照画像には 1024 枚の 128×128 画像を用い、HFR 映像には 512×512 画像を 1000 fps で記録した。

針が外れる異常動作がある場合について、検出周期位相と差分画像の総和の時間変化を図 10 に示す。差分画像の総和は異常動作判定に用いられ、 $t = 15.942$ s に異常動作

が発生したとして HFR ビデオ記録を始めた。図 11 に、記録された HFR ビデオと異常動作判定に用いた差分画像を示す。外れた針が変形した上で視野から高速に外れていく様子が、0.02 秒といった短時間挙動として捕捉できている。これらの結果から、目視では見ることが難しい高速周期運動中の異常動作を、HFR ビデオとして自動記録できることが確認できた。

5. HFR デプスビデオロギング

三次元空間での突発現象を解析する場合、二次元 HFR ビデオ記録だけではなく、HFR でのデプスビデオ記録が有効となるものと予想される。最後に、HFR での実時間デプス画像処理およびビデオ記録を両立可能とした HFR RGB-D ビジョン¹⁰⁾を紹介する。

構築した RGB-D ビジョンは、IDP Express と高速プロジェクター (DLP Light Commander 5500, Texas Instruments) が同期連動し、1000 fps で計測対象に投影された 8 ビットグレイコードに基づくパターン光をキャプチャーした HFR ビデオに対し、コード化パターン光投影法を GPU ボード (Quadro FX5800, NVIDIA) 上で並列実行することにより、512×512 画素のデプスビデオを 500 fps で実時間処理・記録することを可能とした。デプスビデオと同時にカラービデオの HFR 出力、さらには RGB-D 画像に対する実時間処理機能も実装されており、指先の肌色など指定色をもつ対象領域の三次元位置を 500 fps で実時間計算できる。

本や立体物が置かれた平面上で、右手は平面に静止して、左手を上方で 2 回 / 秒程度繰り返し動かした場合の、0.036 秒間隔の画像列として得られる HFR カラービデオ、HFR デプスビデオ、および左手領域を示す画像を図 12 に示す。左手領域は肌色抽出とデプス閾値処理に基づくマスク処理により抽出した。手の動きや高さに応じた形でカラービデオとデプスビデオが同時に HFR 取得され、左手と右手が重なった場合でも、左手領域のみが抽出できることがわかる。また背景対象や異なる高さに影響されることなく、2 回 / 秒といった左手の動きに対応した三次元位置が実時間取得できることも確認されている。このような HFR RGB-D ビジョンは、知的 HFR ビデオロガーの三次元化に大きな役割を果たすと考えられる。

本稿では、人間の目には捉えられない高速な動きを決して見逃さない実時間画像システムとして、筆者らが開発を

進めている高速ビジョンプラットフォーム、および、それに基づくイメージベースドトリガータイプの HFR ビデオロガーの事例研究を紹介した。知的 HFR ビデオロガーの概念は、これまで人間の能力の限界から発見・解明できなかった多岐にわたる高速現象に対する次世代のデータロギングシステムを実現するものであり、FA (factory automation)、ロボット、バイオ・医療分野などにおけるビヘイビアマイニングツールとして今後期待される。

文 献

- 1) J. E. Eklund, C. Svensson and A. Astrom: "VLSI implementation of a focal plane image processor: A realization of the near-sensor image processing concept," *IEEE Trans. VLSI Syst.*, **4** (1996) 322-335.
- 2) T. Komuro, S. Kagami and M. Ishikawa: "A dynamically reconfigurable SIMD processor for a vision chip," *IEEE J. Solid-State Circuits*, **39** (2004) 265-268.
- 3) 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," *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation* (Roma, 2007) pp. 3192-3197.
- 4) I. Ishii, T. Taniguchi, R. Sukenobe and K. Yamamoto: "Development of high-speed and real-time vision platform, H³ Vision," *IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems* (St. Louis, 2009) pp. 3671-3678.
- 5) 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," *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation* (Anchorage, 2010) pp. 1536-1541.
- 6) Q. Gu, T. Takaki and I. Ishii: "Fast FPGA-based multi-object feature extraction," *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol.*, **23** (2013) 30-45.
- 7) I. Ishii, T. Tatebe, Q. Gu and T. Takaki: "Color-histogram-based tracking at 2000 fps," *J. Electron. Imaging*, **21** (2012) 013010.
- 8) I. Ishii, T. Ichida, Q. Gu and T. Takaki: "500-fps face tracking system," *J. Real-Time Image Process.* (2012), DOI: 10.1007/s11554-012-0255-8 (online first).
- 9) Y. Wang, I. Ishii and T. Takaki: "HFR-video-based machinery surveillance for high-speed periodic operations," *J. Syst. Des. Dyn.*, **5** (2011) 1310-1325.
- 10) 山本貴土, 高 皓, 青山忠義, 高木 健, 石井 抱: "実時間高フレームレート RGB-D ビジョン", 日本ロボット学会第 30 回記念学術講演会予稿集, 4I3-6 (2012).

(2013 年 2 月 15 日受理)