《3》 撮像系と画像処理の連鎖による高画質化

《3-3》 高速画像処理を利用した撮像システムならびに その撮像処理への応用

小室 孝^{†1}, 奥 寛雅^{†2}, 石井 抱^{†3}, 石川 正俊^{†2}

キーワード 高速ビジョン, 高フレームレート, フォーカス制御, 映像ロギング, 画像合成

1 ま え が き

1秒間に500～10,000コマの動画を撮影する高速度カメラは古くから商品として存在し、高速現象の観測や解析に用いられてきた。近年では、CMOSイメージセンサの普及に伴い、高フレームレート (High Frame Rate: HFR) で撮影した動画をリアルタイムに外部のプロセッサに転送することが可能となり、また、プロセッサの処理能力も向上していることから、高速撮像とともに画像処理を行って、機器制御などに利用する研究が行われるようになった。このような技術は高速ビジョンと呼ばれ、従来の高速度カメラの用途とは異なる新しい応用分野を続々と開拓している¹⁾。

その一つに、撮像処理への応用が挙げられる。高速現象を撮影する際、単純に高速度カメラを用いるだけでは、視野、解像度、被写界深度、記録時間などに制約がある。そこで、高速撮像とともにリアルタイムに画像処理を行い、その情報を元に撮像系をダイナミックにコントロールすることで、従来は不可能であった新しい撮像が可能となる。

一方、通常の被写体であっても、高速撮像を行うことで、フレーム間の変化が小さくなり、追跡処理等が容易になるという利点がある。そのことを利用して、高速動画像に対して画像補正や画像合成を行うことで、暗所での高SNR撮像や高速移動するカメラによる広範囲撮像などの新しい画像センシングが実現される。

本稿では、そのような高速ビジョンを利用した撮像系の例を紹介し、その応用や将来展望について述べる。

2 ダイナミックイメージコントロール

動いている対象の撮影は難しいことが多い。例えば、ゴルフ中継においてショットしたボールの行方をカメラが追

図1 DICの代表的な構成

うシーンがあるが、テレビカメラが対象を見失う場面や、画面の中でボールが激しく動き視聴者にとって見づらい映像となってしまっている場面を見かけることがある。

この問題は、対象と撮像系との間の相対的な運動による映像の高速な変化が原因となっており、さまざまな撮像系において同種の問題が発生している。例えば、主としてコンパクトカメラで問題となる手ぶれは、手の生理的な震え (振戦) による撮像系の運動が無視できない大きさの対象像の動きを引き起こしていることが原因であり、撮像系の運動による撮像困難と捉えられる。このような運動に起因する映像のダイナミクスは、高い周波数成分を含むことが多く、その制御には高速性が求められる。

ダイナミックイメージコントロール (Dynamic Image Control: DIC) は、以上で述べたようなさまざまなダイナミクスを有する現象に対して、高速画像処理に基づいて光学系・照明系・処理系などをうまくコントロールすることで、通常では見ることができない対象や現象を、人間にとってわかりやすい映像で提示する技術である²⁾。従来の固定で低速の撮像系では、対象や撮像系のダイナミクスが映像に混入していたのに対して、この技術により、利用形態に合わせた映像のコントロールが可能となる。DICの代表的な構成を図1に示す。

DICの最も基本的な応用として、ビジュアルトラッキングがあげられる。これは動いている対象を継続的に視野内に捕捉することで、運動対象の詳細を長時間・広範囲に観察するものであり、これまで、サッカードミラーによる高速飛翔体計測³⁾や微生物トラッキング顕微鏡⁴⁾などが報告されている。

^{†1} 埼玉大学 理工学研究科

^{†2} 東京大学 情報理工学系研究科

^{†3} 広島大学 工学研究科

"Imaging Systems Using High Speed Image Processing and Their Applications" by Takashi Komuro (Graduate School of Science and Engineering, Saitama University, Saitama), Hiromasa Oku, Masatoshi Ishikawa (Graduate School of Information Science and Technology, the University of Tokyo, Tokyo) and Idaku Ishii (Graduate School of Engineering, Hiroshima University, Hiroshima)

図2 サッカードミラー試作システム外観写真 (a) とボール打撃動作におけるトラッキング結果連続画像 (b)

ここでは、具体例としてサッカードミラーを紹介する。カメラの視線方向を制御したい場合、通常は、雲台と呼ばれる機構系にカメラごと固定して、そのパンとチルト角度を制御することが多い。しかし、カメラ自体の慣性があるためにその応答速度には限界があり、球の跳躍のように急激な速度変化を伴う対象へ視線を追従させることは困難であった。サッカードミラーは、慣性の大きなカメラではなく、慣性の小さな鏡の回転角度を制御することで、高速に視線を制御する光学ユニットである。詳細は文献3)に譲るが、単純にカメラの前に鏡を設置すると画角が著しく制約されるため、瞳転送光学系と呼ばれる光学系を利用してカメラレンズの入射瞳を回転鏡近辺に転送し、広い画角と高速な2軸の視線方向制御とを両立している。

図2に試作システムの写真 (a) と、高速画像処理と組合せてボール打撃動作におけるボールに視線を追従した際の結果 (b) を示す。ボールが打撃される際には、対象の急激な速度変化があるため、従来の機械式視線制御機構では追従させることが難しかったが、サッカードミラーは、このような急激な動作にも、安定してボールを追従していることがわかる。高速に運動する対象を撮影する必要のあるスポーツ中継などに応用し、これまでにない迫力のある映像の撮影を目指している。

図3 DML試作品 (a) と可変焦点原理 (b) ~ (d)⁵⁾

図4 高速焦点スキャンによる動的物体を対象とした被写界深度の拡張。上の画像は4msで撮影された8枚のうちの4枚を抜粋。下の画像は合成結果。

3 ダイナモルフレンズ

撮像系を構成する重要な要素として、カメラレンズに代表される結像光学系がある。被写体との距離や大きさにあわせて、フォーカスやズームを適応的に制御できることが理想であるが、実際には光学系の応答速度が遅く、適応的な制御は速度の点で難しい。既存の光学系は物理的にレンズ位置を動かしてフォーカスやズームを行うため、その応答時間は速くても0.1s程度であった。

この問題を根本的に解決する光学デバイスとして、レンズ単体で焦点距離を高速に制御可能なダイナモルフレンズ (Dynamorph Lens: DML) が報告されている⁵⁾。図3にDMLの構造を示す。このレンズは、水と油のようにお互い混ざらない液体同士の界面を屈折面としており、その曲率を圧力によって高速に制御することで、高速な焦点距離制御を実現している。また、液-液界面は適切に形成すると高い精度の球面となるため、これにより結像に十分な光学性能を達成している。試作品から、ステップ応答時間で2msという高速応答性能と、RMS波面収差80.3nmという結像に充分適用可能な光学性能とが確認されている⁵⁾。

図5 IDP Expressの外観

図6 HFR映像記録機能を持つ対象追跡システム

DMLの広範な応用のうち、被写界深度の拡張を紹介する⁶⁾。DMLによってフォーカスを手前から奥まで4msで移動させ、その間に8枚の映像を撮影し、それを合成することで被写界深度を拡張した結果を図4に示す。対象のエビは自由に遊泳しているが、フォーカスの制御がエビより充分に速いので、自然に被写界深度が拡張されていることがわかる。

4 インテリジェント高速ビデオロガー

これまでの多くの高速ビジョンは、出力が対象の位置・大きさ等のスカラー画像特徴量に限定されるため、高速現象での決定的な瞬間を瞬時に捉え、そのHFR映像記録を同時記録することが難しかった。この問題に対し、HFR実時間映像処理・記録機能を実現した高速ビジョンIDP Express⁷⁾が開発され、① ビジュアルフィードバック制御用センサ、② 決定的な瞬間を判断する認識センサ、③ HFR映像レコーダの役割を同時実現するインテリジェント高速ビデオロガー、が実現されている。

高速ビジョンIDP Express (図5) は、2台の3.5cm大の高速カメラヘッド、専用FPGA画像処理ボード (IDP Express ボード)、PCから構成される。ステレオカメラヘッドからの512×512画素濃淡/カラー画像に対し、IDP ExpressボードではユーザによりFPGA (Field Programmable Gate Array) 上に回路実装されたアルゴリズムを2,000Hzで実行するとともに、入力画像および処理結果をPCの汎用メモリー上に高速転送することにより、HFR映像記録と実時間画像処理を同時実現する。ユーザが処理内容・性能・開発時間等に合わせた形で、アルゴリズムの実装先をFPGA、GPU (Graphics Processing Unit)、CPU (Central Processing Unit) と選択可能であり、FPGAを用いた高速色ヒストグラム追跡⁸⁾、GPUを用いたHaar-Like特徴に基づく高速顔検出⁹⁾などが報告されている。

インテリジェント高速ビデオロガーの実現例として、IDP Expressとステレオアクティブビジョンと連動させた高速対象追跡システム⁷⁾を図6に示す。2台の2自由度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対象がカメラ視野中心となるように制御し、画像特徴量の変化に基づきHFR映像記録のトリガ信号を自動生成

図7 風船の破裂時におけるHFR映像

する。毎秒3.5回転する風船を追跡し、破裂の瞬間のHFR映像を自動記録したとき、左右カメラに記録された2,000 fpsの512×512画素カラー映像の画像列を図7に示す。風船が高速に回転する場合でも、あたかも回転がないように、短時間での破裂現象を異なる視点からのズームアップされたステレオHFR映像として記録されている。

高速繰返動作における異常動作のHFR映像ロギング¹⁰⁾についても報告されている。この事例では、入力画像が周期信号の場合、図8のように、異常動作を含まない参照画像列と入力画像との差分画像に基づき、異常動作を検出している。毎秒15回の高速繰返動作を行う機械を用いた動作実験を行い、目視やNTSCビデオ画像では捉えられない高速な異常動作の自動検出・HFR映像記録を実現している。

このような高速ビジョン技術は、24時間連続稼働する機械における異常動作ロギングだけではなく、音声周波数レ

図8 高速繰返動作における異常動作検出

ベルでの構造特性の時空間変動の遠隔モニタリングを行う社会インフラ常時保全システムなど、人間の目では発見が難しかったさまざまな生体や物質の、高速な現象の常時モニタリングを可能とする。このように有用な知見を包含する高速現象のビヘイビアマイニングツールとして、高速視覚センシング技術は、今後大きく期待されるものといえる。

5 高速動画像の合成

イメージセンサの性能向上に伴い、デジタルカメラの高画質化が進んでいる。しかし、暗所で利用したり、動被写体をぶれなく撮影したりしようとすると、イメージセンサのさらなる高SNR化が必要となる。

撮影画像のSNRを向上させる簡便な手段として、露光時間を長くする方法がある。露光時間を長くすることにより、信号量を増やすことができるので、SNRを向上させること

ができる。しかしこの方法では、対象が静止していなければならない、カメラや撮影対象が動いた場合は画像がぶれてしまうという問題がある。

それに対し、高フレームレート撮像が可能なカメラを用いることで、ぶれの少ない画像を多数枚取得し、それらを合成することで、高画質の画像を得る手法が提案されている¹¹⁾。高フレームレートカメラを用いることで、露光時間と読み出し時間がほぼ等しくなり、光の情報を最大限に利用できる。また、フレーム間の画像の変化が小さくなり、動き推定が容易になる。

図9に、1,000fpsで撮影した500枚の連続画像を合成した結果を示す。基準フレームをずらしながら合成を繰り返すことで、動画から動画像への変換が実現されている。また、背景がある画像でも、物体と背景がそれぞれ正しく合成されていることがわかる¹²⁾。

被写体ではなくカメラが動く場合にも、高フレームレート撮像は有効である。カメラで撮影した複数枚の画像を貼り合わせて、1枚の大きな画像を作成するイメージモザイクという技術があるが、貼り合わせの境界で継ぎ目が発生してしまうという問題がある。高フレームレートで撮影した連続画像を貼り合わせることで、継ぎ目が少ない滑らかなモザイク画像を得ることができる¹³⁾。

このことを利用して、空中に投げ上げたカメラを用いてモザイク画像を生成した¹⁴⁾。用いたカメラは、CASIOのデジタルカメラEX-FC100で、 224×64 画素の動画像を1,000fpsで撮影できる。図10にモザイク画像を示す。通常では撮影することの難しい、撮影者本人の頭上からの映像を撮影できた。

図9 画像合成による高画質化

図10 投げ上げカメラによる頭上からの撮像

6 む す び

高速ビジョンの撮像系への応用として、高速画像処理に基づいて光学系・照明系・処理系などをコントロールし、通常では見ることができない対象・現象を、人間にとってわかりやすい映像で提示するダイナミックイメージコントロール技術と、その一例であるサッカードミラー、2msの高速応答性能で焦点距離制御を行う光学デバイスのダイナモルフレンズ、高速現象の決定的な瞬間を捉え、その高フレームレート映像記録を同時記録するインテリジェント高速ビデオロガー、高フレームレートで撮影した連続画像を合成して高SNRの画像を得る技術、空中に投げ上げたカメラによる撮影者本人の頭上からの映像撮影の例を示した。

これらの技術はハードウェアの進歩とともに実現が可能になった。今後、ますますの技術発展により、さらなる新しい技術が創出されることが期待される。

(2011年6月29日受付)

〔文 献〕

- 1) 石川正俊: “ビジョンチップとその応用～ヒューマンインタフェース”, 検査, 医療・バイオ, ロボット～(招待講演), 映情学技報, IST2010-11/CE2010-20, 34, 16, pp.15-20 (2010)
- 2) 奥寛雅, 石川正俊: “高速・高解像力液体レンズによるダイナミックイメージコントロール(招待講演)”, 映情学技報, IST2009-84, 33, 49, pp.7-14 (2009)
- 3) 奥村光平, 奥寛雅, 石川正俊: “アクティブビジョンの高速化を担う光学的視線制御システム”, 日本ロボット学会誌, 29, 2, pp.201-211 (2011)
- 4) 奥寛雅, 尾川順子, 石川正俊: “高速ビジョンによる微生物トラッキング顕微鏡”, 生物物理, 49, 1, pp.11-14 (2009)
- 5) H. Oku and M. Ishikawa: "High-speed liquid lens with 2 ms response and 80.3 nm root-mean-square wavefront error", Appl. Phys. Lett., 94, 221108 (2009)

- 6) N. Mizoguchi, H. Oku and M. Ishikawa: "High-speed variable-focus optical system for extended depth of field", Proc. IEEE Int. Symposium on Industrial Electronics (ISIE 2009), pp.1668-1673 (2009)
- 7) 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)
- 8) I. Ishii, T. Tatebe, Q. Gu and T. Takaki: "2000 fps Real-time Target Tracking Vision System Based on Color Histogram", Proc. SPIE-IS&T Electronics Imaging 2011 meeting, 7871, 787103 (2011)
- 9) I. Ishii, H. Ichida and T. Takaki: "GPU-based Face Tracking at 500 fps", Proc. IEEE Int. Conf. On Image Processing (2011)
- 10) Y.-D. Wang, I. Ishii, T. Takaki and K. Tajima: "An Intelligent High-Frame-Rate Video Logging System for Abnormal Behavior Analysis", J. Robotics and Mechatronics, 23, 1, pp.53-65 (2011)
- 11) T. Komuro, Y. Watanabe, M. Ishikawa, T. Narabu: "High-S/N Imaging of a Moving Object Using a High-frame-rate Camera", Proc. IEEE Int. Conf. On Image Processing (ICIP 2008), pp.517-520 (2008)
- 12) 小室孝, 渡辺義浩, 石川正俊: “高フレームレートカメラを用いた動被写体の高画質撮影”, 第13回映像メディア処理シンポジウム(IMPS2008)シンポジウム資料, pp.129-130 (2008)
- 13) 山本啓太郎, 小室孝, 石川正俊: “高速ビジョンを用いたビデオモザイクング”, 映情学技報, 33, 23, pp.49-52 (2009)
- 14) T. Kuwa, Y. Watanabe, T. Komuro, M. Ishikawa: "Wide Range Image Sensing Using a Thrown-Up Camera", Proc. IEEE Int. Conf. On Multimedia & Expo (ICME 2010), pp.878-883 (2010)

小室 孝 2001年, 東京大学大学院工学系研究科計数工学専攻博士課程修了。同年, 科学技術振興事業団研究員。2002年, 東京大学大学院情報理工学系研究科システム情報学専攻助手。2005年, 同講師。2011年, 埼玉大学大学院理工学研究科数理電子情報部門准教授。高速画像処理とその応用に関する研究に従事。博士(工学)。

奥 寛雅 2003年, 東京大学大学院工学系研究科計数工学専攻博士課程修了。同年, 科学技術振興事業団研究員。2005年, 東京大学大学院情報理工学系研究科システム情報学専攻助手。2007年, 同助教。2011年, 同講師。高速画像処理, 高速光学デバイスとその動的映像制御への応用に関する研究に従事。博士(工学)。

石井 抱 1994年, 東京大学大学院工学系研究科計数工学専攻修士課程修了。1996年, 同大学院博士課程中退。同年, 同大学工学系研究科計数工学専攻助手。2000年, 東京農工大工学部電気電子工学科講師。2002年, 同助教。2003年, 広島大学工学研究科複雑システム工学専攻助教授, 2007年, 同教授。2010年, 広島大学工学研究院電気電子システム数理部門教授。高速ロボットビジョン, センサ情報処理の研究に従事。博士(工学)。

石川 正俊 1979年, 東京大学大学院工学系研究科計数工学専門課程修士課程修了。同年, 工業技術院製品科学研究所研究員。1989年, 東京大学工学部計数工学科助教授。1999年, 東京大学大学院工学系研究科計数工学専攻教授。2004年, 東京大学副学長。2005年～2006年, 東京大学理事・副学長。2005年, 東京大学情報理工学系研究科創造情報学専攻教授。高速ビジョン, センサフュージョン, メタバーセプション等の研究に従事。工学博士。