解 説

高速ビジョンのダイナミックセンシング応用

Dynamic Sensing Applications of High-speed Vision

石 井 抱* *広島大学

Idaku Ishii* *Hiroshima University

1. は じ め に

人間の視覚では、秒間数十コマのパラパラ漫画を動画として認識してしまうことから分かるように、その時間分解能は聴覚や触覚等から比べて低く、人間の可聴域に対応した数百 Hz～数 kHz といった高速な動きを人間の目で捉えることは不可能である。ロボット研究の多くでは、人間の感覚が持つ時間分解能に合わせて、人間の目で捉えられる動きはビデオレートカメラ (NTSC 30 [fps]) で代表される視覚センサで空間的に認識し、音声周波数レベルの音や振動は聴覚センサや触覚センサ等によりセンシングする。人間と同レベルの時間分解能を持つセンサ情報処理は、人間と同じ機能を持つロボットを目指す場合に有効な一方で、人間には実現不可能なハイパーヒューマンな機能を工学的に実現する場合には、視覚センサと聴覚センサや触覚センサが受け持つ時間周波数帯域を分離する必要があるにもかかわらず、暗黙的に因襲的な制限を与える場合がある。

一方で、様々な応用分野から、目視では捉えられない高速現象を実時間認識する高速ビジョンへの要求が高まっており、近年では画像処理アルゴリズムを回路実装可能とした高速ビジョン [1]～[3] 等が開発されている。またハードウェア開発と並行して、「フレーム間の画像変化が微小」という高速ビジョン特性によりフレーム間の対応づけ問題を高速化した集積化アルゴリズムの導入により、オプティカルフロー [4]、色ヒストグラム追跡 [5]、顔追跡 [6]、イメージモザイク [7] 等、様々な動画像処理について 1,000 [fps] レベルでの高フレームレート動作が報告されている。高速ビジョンの実時間センサとしての有効性は、高速対象追跡 [8]、高速ロボット制御 [9]、細胞センシング [10] [11] 等の様々な応用システムで実証されている。

高速ビジョンは、単位時間あたりの検出・処理情報量の大幅な向上という量の改善だけではなく、ビデオレートカメラでは観測不能である高速現象を定量化する点で新たな質

を与える視覚センシングを可能とする。特にフレーム間隔が微小であり、時間差分に基づく速度・加速度分布が精度高く計測できるため、力分布や粘弾性等の機械的インピーダンス等の対象が持つダイナミクスにかかわる様々な情報を捉える分布的ダイナミックセンシングが可能となる。例えば $F = ma$ の運動方程式に従う対象は、質量が既知であれば、センサを装着せずに、画像からの加速度計測により対象に働く力が推定でき、高速ビジョンは力覚センサとして機能する。このような高速ビジョンは、ピンポイント計測を行う音響センサ、加速度センサ等を用いた従来ダイナミックセンシング技術を革新し、音声周波数レベルの変位・振動分布からダイナミクスを時空間分布として瞬時に捉えるダイナミックセンシングツールとして、生体ダイナミクス、構造ダイナミクス、物質ダイナミクス等の計測・制御を必要とする様々な応用分野において大いなる可能性を持つ。

本論文では、筆者らが行ってきた高速ビジョンのダイナミックセンシング応用にかかわる研究事例を紹介し、目視では観測不能な高速現象を瞬時に定量化するダイナミックセンシング技術における高速ビジョンの可能性を論じる。

2. 指先の実時間タッピング動作検出

キーボードやマウスに代わる次世代インターフェイスの実現に向け、カメラを用いたインタラクション研究が数多く行われているが、これらの多くではビデオレートカメラを用いており、十数回/秒といった指先タッピング動作を捕捉することは難しい。この問題に対し、ステレオ高速ビジョンにより、人間の指先タッピング動作を実時間解析した上で、指先の三次元位置と接触状態を同時計測するインターフェイスを構築した [12]。

指先を 8 回/秒程度上下に動かした場合、接触の有無に応じて指先位置が鉛直方向にどう変わるかを図 1 (a) に示す。接触がない能動的な指先動作に比べ、接触がある指先動作では、特に接触瞬間に高周波数成分が発生することが分かる。そこで構築システムでは、図 1 (b) のように、人間が指先を能動的に制御できる周波数帯域を超えた 40 [Hz] 以上の高周波数成分を接触瞬間に生じる指先位置のダイナ

原稿受付 2014 年 7 月 16 日

キーワード: Real-time Vision, Vibration Analysis, 3-D Shape Measurement, Behavior Analysis

*〒 739-8527 広島市鏡山 1-4-1

*Higashihiroshima-shi, Hiroshima

図 1 Fingertap detection using frequency filtering

図 2 Virtual musical instrument

ミックな変化として実時間検出し、タッピングに伴う接触状態を指先位置とは無関係に推定することを可能とした。

指先タッピングインターフェイスを用いたデモシステム例として、図 2 に示すような仮想楽器を構築した。このシステムでは、ステレオ高速ビジョンによりマーカー装着された複数指先位置を数百 fps で追跡した上で、接触発生時の指先位置および接触力を推定し、紙に描いたピアノ鍵盤に対応した音階、音量、発音タイミング等の MIDI イベント生成により、演奏者の十数回/秒といった指先の動きに応じて DTM 音源が実時間発音する。このように高速ビジョンでは、人間の目視では計測不能な周波数帯域の運動情報が利用できるため、人間と実環境の間に発生したダイナミックな応答を積極的に利用した様々なヒューマンインタラクション応用が期待できる。

3. 実験用マウスの擦過運動解析

実験動物を用いた新薬開発や毒性試験等では、疾病の程度を *in vivo* レベルで定量化するモデル行動解析が重要となるが、十数回/秒の繰返動作を伴う四肢動作が含まれる場合、目視による正確かつ客観的な観測が難しい。この問題に対して、高速ビデオ画像解析により、痒みを示すモデル行動である後肢で頭部を引っ掻く擦過運動等、四肢の高速動作を伴う実験動物のモデル行動を定量化する自動行動認識システムを構築した [14]。

動物の位置や姿勢に依存せずにモデル行動を定量化するために、1) 輪郭抽出のための極座標変換、2) 位置・姿勢不変な部位ごとのフレーム差分特徴計算を行った。図 3 に

図 3 Recognition algorithm for fast repetitive limb motions

図 4 Scratching behavior analysis

処理の流れを示す。頭部、左胴体、右胴体、尾部のフレーム差分特徴により、四肢の高速繰返動作を部位ごとに検出し、immobility (運動がない)、moving (歩くまたは走る)、left-side scratching (左後肢による擦過運動)、right-side scratching (右後肢による擦過運動)、head-grooming (毛繕い)、rearing (立ち上がる) のモデル行動を定量化した。

構築システムでは、マウスケージ上方に高速ビジョン、底面に近赤外平板 LED 照明を設置し、240 [fps] の 320×400 白黒画像から毛色等に関係なくシルエット像を取得する。図 4 (a) に ICR マウスの left-side scratching 時の入力画像および部位ごとのフレーム間差分特徴の抽出例を示す。左後肢による 13 回/秒の擦過運動に対応し、左胴体のフレーム差分特徴に周期パルスが検出されている。複数の ICR マウスに対し 10 分間の行動解析を行い、すべてのモデル行動に対し 80% 以上の認識率の定量化を実現した。これらの一部機能を実時間実装した SCLABA-Real [13] は、すでにアトピー新薬等の薬効評価系として実用化されている。

4. 実験用ラットの心運動モーションキャプチャ

実験用ラットの心運動を計測するモーションキャプチャシステム [15] では、図 5 (a) のように開胸ラット上方に設置したステレオ高速ビデオカメラからの 512×512 カラー画像に基づき、図 5 (b) のように心臓に貼付した径 0.5 [mm] のマーカー三次元位置を計算し、図 5 (c) のマーカーが囲む三角形領域に基づいた心筋面積の変化率に基づいた局所的な心筋組織の拡張・収縮運動の時空間遷移の定量化を可能とした。計測された心臓の三次元形状例を図 5 (d) に示す。

図5 Cardiac motion capture system for laboratory rat

図6 Experiments for rat model of myocardial infarction

左冠動脈前下行枝の結紮により虚血状態を発生させた心筋梗塞モデルラットに対し、心運動モーションキャプチャを行った。図6(a)は結紮1分後の右心室に対応した三角形面積の時間変化であり、呼吸等に伴う心臓全体の動きがキャンセルされ、心筋組織の拡大・収縮に伴う4回/秒前後の周期変化のみが抽出された。結紮1分後の心筋面積変化率を1とした相対心筋面積変化率(RCMA)について、左心室、右心室、右心房に対応した領域での時間変化を図6(b)、心臓全体に対してマッピング表示した結果を図6(c)に示す。右心室、右心房周辺のRCMA値は変化しない一方で、左心室から徐々にRCMA値が低下、つまり梗塞領域が拡大し、結紮20分後には左心室の全領域が梗塞した。これらの現象は、結紮により生じた左心室の虚血状態による心筋組織の壊死に対応する。このように目視観測が難しい虚血性心疾患での特徴的な心運動変化が定量化できるため、虚血性心疾患における薬効評価系として期待できる。

5. 高速ビジョン스코プによる実時間声帯振動解析

喉頭がん等の声帯疾患に伴う異常声帯振動は、声帯が音声周波数レベルで振動するため、声帯鏡を用いた目視検査では詳細な病態進行状況を捉えることが難しい。このような声帯振動を実時間定量化するために、高速ビジョンを用いて声帯の時空間振動分布を計測する喉頭高速ビジョン

図7 Real-time HFR-video-based laryngoscope

図8 Images and velocity distributions of human vocal folds

コープを開発した[16]。喉頭高速ビジョン스코プでは、図7(a)のように硬性声帯鏡(Machida, LY-CS30)に高速ビジョンカメラヘッドを装着し、声帯を観察した512×512白黒画像を2,000 [fps]で取得する。取得された画像は、図7(b)のように、声門領域を抽出した上で、その左右端位置の速度分布を声帯振動分布として計測し、声帯振動における左右非対称性を実時間定量化する。声帯振動の左右非対称性を検出する定量化指標には、声門の左右端の振動速度に基いた振幅比および位相比を計算した。

臨床現場における4人の被験者に対する声帯振動解析について、撮影画像例および声帯振動における左右振幅分布を図8に示す。被験者A, B, Cは20代の健常男性、Dは声帯ポリープを持つ50代女性である。声帯の振動周波数は順に180, 200, 140, 160 [Hz]、振幅比は0.034, -0.039, -0.070, 0.353、位相比は-0.922, -0.875, -0.892, -0.282であった。振幅比が0、位相比が-1に近いほど声帯振動が左右対称である。被験者A, B, Cでは、左右振幅比が0、位相比が-1付近と左右対称な声帯振動であるのに対し、被験者Dの値は、声門右側のポリープにより、これらの値から外れ、声帯振動の左右非対称性が顕著である。このように喉頭高速ビジョン스코プでは、声帯疾患に伴うダイナミクス変化を実時間定量化できることが分かる。

6. 振動対象の実時間ターゲットトラッキング

高速ビジョンは、音声周波数レベルで動作する光センサ

の集合といえ、画素ごとに観測される輝度の時間変動は、振動対象が引き起こす周期変化を含む時系列信号として見なせる。そこで画素ごとに特定周波数帯域信号のみを通過させるデジタルフィルタを高速ビジョンに実装し、振動分布の実時間定位に基づく対象追跡システムを構築した[17]。図9に画素レベルデジタルフィルタに基づく振動対象追跡の概念を示す。構築システムでは、前フレームの画像データ蓄積によるデジタルフィルタ遅延を抑制するために、色相に基づくマスク処理を追加した上で2自由度アクティブビジョンによる追跡制御を行った。

動きを伴う電動人形等を含む背景下において、図10(a)のように30[rps]で回転する小型三枚羽ファンを手動で高速に動かした場合の追跡画像例を図10(b)に示す。実験では1,000[fps]で取得した 512×512 画像を4画素おきにダウンサンプリングした 128×128 画素に対し、ファン回転数の3倍(90[Hz])を中心に80~100[Hz]帯域の信号を通過するデジタルフィルタを実装した。ファンが人形の前を通過した瞬間を含む0.3秒間について、A(64,76), B(106,28), C(110,110)での輝度値を図10(c)に示す。ファン上の点Aでは90[Hz]前後の周期的変化があるが、点Bや点Cでは特徴的な周期的変化はない。図10(b)で示すように、これらの人形やカメラヘッド自体の動きはデジタルフィルタにより除去され、回転ファンのみが振動対象として抽出され、アクティブビジョンにより画像中心に制御されている。このような追跡技術は、例えば数百Hzの羽ばたき周波数を持つ蚊などの昆虫が複雑背景下で飛翔する場合にも適用

図9 Vibrating object tracking with pixel-level digital filters

図10 Target tracking of a fan rotating at 30[rps]

でき、様々な分野での振動源定位技術として期待できる。

7. 実時間モード解析に基づくダイナミック画像検査

ダイナミクスベース画像検査法[18]では、図11のように高速ビジョン入力に対してモード解析を行い、対象を加振させて初めて観測できるモード特性に基づく構造認識を実現する。モード解析は構造検査ツールとして広く使われ、共振周波数等のモード特性は加振入力に対し不変な対象固有な特徴として計算される。ダイナミクスベース画像検査では、単一画像による外観画像検査では判別不能なレベルでも、このモード特性の違いにより、クラック等の微小な構造欠陥を検出可能とする。

72方向のモード特性を瞬時推定するダイナミクスベース画像検査システム[19]における、16[cm]長の0.98[mm]径鉄製ビームの実験結果を図12に示す。実験では、10,000[fps]の 512×96 ステレオ画像から三次元振動分布を計測し、ビーム軸周りの72方向の共振周波数およびモード波形をSSI-CPAST法[18]を用いた出力オンリーモード解析により実時間計算した。クラックのないビーム(NC)に対して計測された72方向一次、二次モード波形を図13(b)に示す。異なる加振入力(T1~T6)でも、入力不変な構造特徴としてモード波形が計測されている。支点から2[cm]の位置に10, 20, 30%カットのある(C1, C2, C3)ビームの

図11 Dynamics-based visual inspection

図12 Experimental results of steel beam inspection

図 13 Hyper human applications of high-speed vision

72 方向一次，二次共振周波数を図 13(c) に示す。NC の一次共振周波数は軸対称で 26.7 [Hz] であるのに対し，C3 では平均値 25.0 [Hz] に低下し，クラック位置に相当した形で 9% の逸脱が観測され，音声周波数レベルの実時間振動解析に基づき非対称なダイナミクス特性が実時間定量化されている。

8. お わ り に

本論文では，筆者がこれまで行った高速ビジョンのダイナミックセンシング応用事例の紹介を通して，人間が感じとることが難しいインセンシブルダイナミクスを検出するセンシングツールとして高速ビジョンが有効となることを論じた。実世界では人間が日常感じるができずかつ操作できないタスクが様々な応用場面において山積しているにもかかわらず，我々は自分が持つ感覚の限界に縛られてしまいがちであり，これらの問題を積み残してしまうジレンマが存在する。高速ビジョンは，このようなジレンマを打破し，ダイナミックセンシング，超高速マニピュレーション，瞬時検査など人間の五感の常識に縛られないハイパーヒューマン応用をもたらす画像センシング技術として，図 13 に示すように，マルチメディア分野，ロボット分野，FA 分野だけではなく，バイオ・医療分野，マイクロ・ナノ分野，社会基盤・構造物分野等，多岐にわたる応用分野における人間の目を超えるロボットの目として，従来にはない技術革新をもたらすものである。特に対象ダイナミクスを時空間分布として捉えるダイナミクスベースド画像処理技術は，従来のアピランスベースドな画像処理技術と一線を画すものといえ，ダイナミクス解析と画像処理解析が統合した新たなアルゴリズム・理論の構築も含めて，従来とはまったく質の異なる次世代の画像センシング技術として今後期待していきたい。

参 考 文 献

- [1] I. Ishii, et al.: "Development of high-speed and real-time vision platform, H³ Vision," Proc. IROS, pp.3671–3678, 2009.
- [2] I. Ishii, et al.: "2000 fps real-time vision system with high-frame-rate video recording," Proc. ICRA, pp.1536–1541, 2010.
- [3] Y. Watanabe, et al.: "955-fps real-time shape measurement of a moving/deforming object using high-speed vision for numerous-point analysis," Proc. ICRA, pp.3192–3197, 2007.
- [4] I. Ishii, et al.: "High-frame-rate optical flow system," IEEE Trans. Circuits Sys. Video Technol., vol.22, no.1, pp.105–112, 2012.
- [5] I. Ishii, et al.: "Color-histogram-based tracking at 2000 fps," J. Electr. Imaging, vol.21, 013010, 2012.
- [6] I. Ishii, et al.: "500-fps face tracking system," J. Real-Time Image Processing, vol.8, no.4, pp.379–388, 2013.
- [7] K. Okumura, et al.: "Real-time feature-based video mosaicing at 500 fps," Proc. IROS, pp.2665–2670, 2013.
- [8] 奥村ら: "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, vol.29, no.2, pp.201–211, 2011.
- [9] T. Kizaki and A. Namiki: "Two ball juggling with high-speed hand-arm and high-speed vision system," Proc. ICRA, pp.1372–1377, 2012.
- [10] S. Sakuma, et al.: "Red blood cell fatigue evaluation based on the close-encountering point between extensibility and recoverability," Lab on a Chip, vol.14, pp.1135–1141, 2014.
- [11] Q. Gu, et al.: "Simultaneous vision-based shape and motion analysis of cells fast-flowing in a microchannel," IEEE Trans. Automat. Sci. Eng., doi: 10.1109/TASE.2013.2292583 (early access articles), 2013.
- [12] 山本ら: "高速ビジョンを用いた実時間指先タッピングインタフェース", 電子情報通信学会論文誌 D, vol.J90-D, no.2, pp.544–555, 2006.
- [13] Y. Nie, et al.: "Real-time scratching behavior quantification system for laboratory mice using high-speed vision," J. Real-Time Image Processing, vol.4, no.2, pp.181–190, 2009.
- [14] Y. Nie, et al.: "Behavior recognition in laboratory mice using HFR video analysis," Proc. ICRA, pp.1595–1600, 2011.
- [15] 石井ら: "高速ビデオ画像を用いた心筋梗塞モデルラットの心運動解析", 計測自動制御学会論文集, vol.46, no.9, pp.547–554, 2010.
- [16] I. Ishii, et al.: "Real-time laryngoscopic measurements of vocal fold vibrations," Proc. EMBC, pp.6623–6626, 2011.
- [17] 小原ら: "振動ベースド画像特徴量を用いた高速ターゲットトラッキング", 日本機械学会論文集 (C 編), vol.78, no.788, pp.1143–1153, 2012.
- [18] H. Yang, et al.: "Dynamics-based visual inspection through real-time modal analysis," Proc. ICRA, pp.5979–5984, 2011.
- [19] H. Yang, et al.: "Dynamics-based stereo visual inspection using multidimensional modal analysis," IEEE Sensors J., vol.13, no.12, pp.4831–4843, 2013.

石井 抱 (Idaku Ishii)

1992 年東京大学工学部卒業。94 年東京大学工学系研究科修士課程修了。96 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）。（日本ロボット学会正会員）