解 説

高速ビジョンと科学計測

High-speed Vision and Scientific Measurement

奥 寛 雅^{*1} 末 石 智 大^{*2} ^{*1}群馬大学 ^{*2}東京大学Hiromasa Oku^{*1} and Tomohiro Sueishi^{*2} ^{*1}Gunma University ^{*2}The University of Tokyo

1. は じ め に

近年、カメラの視線方向を高速に制御できる高速視線制御機構が開発され、映像計測などへの応用が期待されている。この機構は回転鏡を利用してカメラの視線方向を制御するものであり、カメラの解像力を保ったままその視線方向をミリ秒程度で制御できる。この応答性能から概算すると音速で移動する対象でも追従できる性能があることが分かってきた。

一方、音速もしくはそれ以上の高速飛翔体は科学捜査や航空宇宙分野において主要な研究対象となっている。特にその周囲の流体との相互作用や衝突時の挙動についていまだに不明な点が多く、盛んに研究が行われている。このような研究では映像による計測が重要であり、高速カメラが用いられている。しかしながら、通常は固定視野での計測となるため、対象が視野を横切るわずかな時間のみが計測可能であり、より長時間にわたって何が起きているのかを計測することは難しかった。

そこで、筆者らのグループでは高速視線制御機構と高速ビジョンとを組み合わせ、このような高速飛翔体を視野内にトラッキングし、より長時間にわたって対象の挙動を計測することが可能となる手法を研究してきた。本稿では、高速飛翔体の映像計測応用に関するこれまでの取り組みを紹介する。

2. 高速視線制御機構による高速飛翔体の映像計測

本章では、まず基本的なデバイスである高速視線制御機構と、その応用技術である1 ms オートパンチルトについて説明し、次に高速飛翔体の映像計測について紹介する。

2.1 高速視線制御機構と1 ms オートパンチルト

カメラによる映像計測では視野が限られているため、対

象の動きに合わせて視線方向の向きを変えたいという要求がある。これを満たすために機械的にパン（横方向）とチルト（縦方向）を変えられる雲台にカメラを載せることが一般的である。しかし、カメラ自体の質量があるため、この原理で高速に視線方向を制御することは難しい。そこで、カメラの代わりにカメラの前に置かれた2軸の回転鏡の角度を制御することで光学的に視線方向を変更する高速視線制御機構が提案され、サッカードミラーとよばれている[1]。単純にカメラの前に鏡を置くと鏡が大きくなるので、カメラと鏡の間に瞳転送光学系を配置して小さな鏡に必要な光線がすべて反射できるようにしてあるところに特徴があり、これにより、ミリ秒程度の高速な応答と高い解像力とを両立している[2]。

さらに、高速ビジョンを利用すると1 [ms] で高速に対象を認識できるので、これに基づいてサッカードミラーを制御すると高速な応答をもつ物体への視線トラッキングができ、この原理は1 ms オートパンチルトという名称で提案されている[3]。実際に試作した1 ms オートパンチルトシステムは、ラリー中の卓球などの高速かつ不規則に運動する対象を安定に画面中央に補足しながら映像計測することに成功している。

2.2 高速飛翔体の映像計測

サッカードミラーが利用している回転鏡はガルバノミラーとよばれる電動回転鏡であり、40 [deg] の視線変更を3.5 [ms] で実現できる性能を持つ。この値から単純に平均的な角速度を求めると約11,400 [deg/s] となり、これは、2 [m] 離れた場所で約400 [m/s] = 1,440 [km/h] の速度で移動する物体に一致する角速度である。このことからサッカードミラーを利用すれば音速程度の高速飛翔体でもトラッキングできる可能性があることが示唆され、そこで実際に高速飛翔体の映像計測への応用手法が研究されてきた[4]。

対象とした高速飛翔体は、長さ18 [mm] の鉛を真鍮でコーティングした金属片である[4]。最初に利用した対象は火薬を利用した射出装置を用いることで、250 [m/s] = 900 [km/h] 前後の速さでほぼ等速直線運動で飛翔するもので、この飛翔体を常に画面中央付近で安定した映像計測を実現することを目的とした。

原稿受付 2017 年 7 月 3 日

キーワード: Gaze Control, Visual Tracking, Background-oriented Schlieren

^{*1}〒376-8515 桐生市天神町 1-5-1

^{*2}〒113-8656 文京区本郷 7-3-1

^{*1}Kiryu-shi, Gunma

^{*2}Bunkyo-ku, Tokyo

このような飛翔体は運動が単純で予測が容易であるため、従来から回転鏡などを利用してカメラの視線方向を動かして映像を計測することが行われてきた[5]。しかし、飛翔体の運動は単純であるものの、飛翔体ごとに速度に個体差があり、それぞれの速度に合わせてより安定した映像計測を行うためには1 ms オートパンチルトのような画像のフィードバックに基づく視線のトラッキングが有用となる。

さて、トラッキングによる映像計測では、対象を観察しやすい適切な画角で視野内に収める必要があるため、対象が、自身の長さ（大きさ）に対して単位時間あたりにどれだけ進行するかという相対速度がトラッキングの難しさに関係する。例えば直径40 [mm] の卓球の球がスマッシュされて時速200 [km/h] で飛んでいく場合を考えると、相対速度は約1,400 [lengths/s] となる。これと同様に今回対象とする飛翔体の相対速度を求めると、約14,000 [lengths/s] にもなり、桁違いに高速であることが分かる。これは高速ビジョンのフレーム周期である1 [ms] の間に自分の長さの14倍も移動することを意味しており、仮に露光時間を1 [ms] とするならば、モーションブラーで対象の鮮明な映像は取得できない。

この対象の高速性が特に問題となるのは、トラッキングを開始する際である。画像から対象が視野に入ってきたことを検出したいが、対象のモーションブラーは大きく検出は難しい。さらに、仮に検出できたとしても、回転鏡の加速に時間が掛かるので、追いつく前に視野内から対象が外れてしまい追従に失敗することが予見された。そこで、飛翔体の射出時に別のセンサからトリガ信号を発生させ、それに同期してあらかじめ平均的な軌道に従って鏡を加速することとした。これに加え、平均的な軌道との違いから発生するトラッキング誤差を高速ビジョンによるビジュアルフィードバックで低減するという「ハイブリッド視線制御戦略」を採用した[4]。

このときの実験のセットアップを図1に示す。サッカードミラーには1,000 [fps] の高速ビジョンと、10,000 [fps] の映像記録用高速カメラとを接続した。これらは光軸を共有しており、同じ視野を得ることができる。高速ビジョンが取得した画像はリアルタイムに画像処理用計算機に転送され、この画像から対象の飛翔体位置を認識し、トラッキングエラーに基づいてエラー補正用角度指令値を出力する。この信号にあらかじめ生成した軌道信号を信号発生器で生成した予測角度指令値を加算して、サッカードミラーの回転鏡へ入力する。

以上の原理に基づいて飛翔体を追跡して得られた映像を図2に示す。おおむね3~4 [ms] で視野の中央に対象を捕捉して追従していることが読み取れる。また、この実験を通して視線トラッキングを行うことで相対速度が減少し、長い露光時間でもモーションブラーが軽減できるという利点

図1 飛翔体トラッキング実験セットアップ

図2 飛翔体トラッキング実験結果

があることも判明した。この利点は特に照明強度に制約がある場合に有用である。

3. 高速飛翔体の高解像度計測

飛翔体周囲の流れ場の状態をより詳細に観察したいなどの理由でより高い解像度で飛翔体を観察したい場合があるが、サッカードミラーは望遠レンズと相性が悪く、解像度をあげることは難しかった。

この原因は大きく分けて二つある。一つめは、瞳転送光学系と望遠レンズとの相性の問題である。サッカードミラーが利用する瞳転送光学系は主に広角レンズに合わせて設計されており、望遠レンズの場合には光学性能が不足して解像度が悪くなってしまう。このため、望遠レンズの性能よりも解像度が低下する。二つめは、ミラーが許容するビーム径の制約である。光学的な解像力は光学系の開口径が大きいほど高くなる。しかし、サッカードミラーで利用している鏡は直径15 [mm] のビームに合わせて設計されており、望遠レンズの開口径を狭めてしまうために解像力が低下する。

図3 高解像度計測実験セットアップ

図4 高解像度計測実験結果。(a) トラッキング結果, (b) サッカードミラーによる対象像, (c) 高解像度計測実験セットアップでの対象像

これを解決するためには瞳転送系を利用せずに、大きな開口径を持つミラーと望遠レンズを直接接続すればよい。というのも、実は瞳転送系はカメラレンズが広角のときにミラーサイズを低減するには大きな効果を発揮するが、望遠レンズの場合はその寄与はわずかである。そのため取り外しても必要なミラーサイズはあまり変化せず致命的な問題にはならないからである。

そこで、50 [mm] 径のビームに対応する大口径ガルバノミラーと望遠レンズを直接組み合わせ、これを利用して高速飛翔体を計測した[6]。実験の構成を図3に示す。ガルバノミラーの直後にハーフミラーを設置して光路を分岐し、高速ビジョンと観測用高速度カメラとで光路を共有できるようにした。視線方向の制御手法は前述したサッカードミラーを利用した場合と同じ手法を用いた。

構築したシステムで飛翔体をトラッキングした結果を図4(a)に、また、実験系により取得した画像とサッカードミラーによる画像とをそれぞれ図4(b), (c)に示す。大口径ミラーを用いた場合のほうが高い解像度で計測できていることが分かる。

4. 高速飛翔体の衝撃波計測

4.1 衝撃波の非定常現象

圧縮性流体である空気に対して物体が音速で飛翔する場

図5 代表的な光学的可視化手法。a) シュリーレン法, b) BOS法

合、その物体周囲に物理量の不連続な変化である衝撃波が発生する[7]。衝撃波は高速飛翔体の振る舞いを理解する上で重要な現象であり、詳細な理解が求められている。

音速流れはマッハ数 M を用いて分類される[7]が、亜音速領域 ($0.3 < M < 0.8$) や超音速領域 ($1.2 < M < 5$) と比較して、遷音速領域 ($0.8 < M < 1.2$) では衝撃波の発生位置が振動するなどの非定常現象が知られている。この非定常現象は数値シミュレーションによってある程度再現することも可能だが、計算コストや再現精度の面から多数の有意な試行を重ねることは困難である。そのため遷音速で飛翔する物体周囲の衝撃波非定常現象を詳細に理解するには、高解像度かつ長時間の計測技術の実現が望まれる。

4.2 衝撃波の光学的可視化手法

衝撃波などの流れを可視化する際の代表的な光学的可視化手法を図5に示す。図5-a)は古典的なシュリーレン法である[8]。空気の密度変化（衝撃波）を含む被写体に対し、レンズ（または凹面鏡）と点光源による平行光を通す。もう一つのレンズの集光位置に設置したナイフエッジ越しに撮影すると、被写体で微小に屈折した光がナイフエッジに遮られ、流れが明暗として可視化される。シュリーレン法は高感度な計測を可能とする一方で、光学系の調整が煩雑であり平行光を用いるため計測範囲が狭いという課題がある。

図5-b)は古典的なシュリーレン法を発展させた、Background-oriented Schlieren (BOS) 法である[8]。ランダムドットパターンなどテクスチャを有する背景を用いて、被写体での光の屈折による撮影画像中のゆがみを画像処理によって検出することで流れを可視化する。カメラとテクスチャ背景のみを利用する簡便な手法であるが、固定撮像系における拡散光を扱うため、イメージセンサの限られた画素数では広い計測範囲と高い解像度の両立が困難である。

高速飛翔体の衝撃波計測において要求される高解像度性と継続性に対しては、前述の高速光軸制御を用いたトラッキング撮影技術の利用が期待できる。すなわち高速光軸制御技術とBOS法を上手く組み合わせたトラッキングBOS法[9]によって、高速飛翔体の衝撃波計測が実現可能となる。

図6 トラッキング BOS 法の模式図

4.3 トラッキング BOS 法

トラッキング BOS 法 [9] の模式図を図 6 に示す。縞状背景の前を通過する高速飛行体に対して、2 枚のガルバノミラーを用いてカメラの光軸を追従させる。リアルタイムコントローラ dSPACE を用いた $50 [\mu\text{s}]$ ごとの予測軌道指令と制御コンピュータを用いた $1 [\text{ms}]$ ごとの高速ビジュアルフィードバックによって、 $10,000 [\text{fps}]$ の記録用高速高解像度カメラの画角内に飛行体ならびに衝撃波を捉え続ける。記録した $10,000 [\text{fps}]$ のトラッキング映像を S-BOS 法 [10] などによりさらに解析することで衝撃波を可視化する技術である。

4.4 高速光軸制御と BOS 法の統合時の工夫

ここでトラッキング BOS 法 [9]、すなわち高速光軸制御技術と BOS 法の統合時の工夫について下記のとおり整理する。

高速飛行体の画像認識

BOS 法ではわずかな光の屈折を捉えるため計測対象とテクスチャ背景の両方に合焦する必要があり、カメラレンズの絞りを極めて小さくする（今回は $f/22$ ）。そのため光量確保のためカメラ系と同一光軸に金属ハライド光源を、背景に再帰性反射特性を、それぞれ導入している。

このような状況のとき、カメラでは周期的な明暗のある縞の前に存在する飛行体のシルエットを捉えることとなる。高速ビジュアルフィードバックのため飛行体位置を検出する方法としてエッジ検出を利用する戦略 [4] も存在するが、背景縞をエッジとして誤認識する恐れがある。そこで再帰照明系を利用したダイナミックプロジェクションマッピング（るみぺん 2）[11] と同様に対象のシルエットを認識する戦略を、膨張収縮処理による背景情報の除去と組み合わせて利用することで、高速飛行体の確実な画像認識を実現する。

背景テクスチャのモーションブラー

高速光軸制御の利点は、画像計測の高解像度性と継続性

図7 トラッキング BOS 法による高速飛行体（393.6 [m/s]）の衝撃波可視化。a) トラッキング中の撮影画像、b) 飛行体周囲の ROI 領域における S-BOS 法 [10] による可視化結果

の両立だけでなく、長露光時間による S/N 比の増大や計測対象の低モーションブラー化にもある。しかしこれらの特徴は背景に大きくモーションブラーが生じることを意味するため、標準的なランダムドットパターン [8] では BOS 法が上手く機能しなくなる。一方で S-BOS 法 [10] のように周期的な縞を背景として利用することも可能であるため、飛行軌道と平行な背景縞を用意することで、高速光軸制御の利点を伴った BOS 法の統合に繋げることができる。

参照画像の計測精度

BOS 法による計測では衝撃波による背景画像のゆがみを検出するため、衝撃波を含む計測画像だけでなく衝撃波を含まない参照画像を取得する必要がある。すなわち高速飛行体を追従撮影した計測画像群だけでなく、同等のミラー角度における参照画像群を別途計測しなければならない。しかし高速光軸制御系の高精度校正手法 [12] で示したように、ミラー角度分解能不足がここで問題となる。例えば、市販のガルバノミラーの非直線性（角度誤差）は $\pm 20 [\text{deg}]$ に対し 0.1% ($\pm 0.02 [\text{deg}]$ 相当) であり、飛行体を高解像度に捉える際の望遠レンズの焦点距離を $200 [\text{mm}]$ 、カメラの画素サイズを $20 [\mu\text{m}]$ とすると、 $\pm 3.5 [\text{pixel}]$ という BOS 法において非常に大きな誤差を含むこととなる。また、ミラー角度情報と画像取得の時間同期の誤差も、画素レベルでは大きく影響する可能性が高く、参照画像を別途計測する戦略は計測精度の面で大きな困難を伴う。

ここで縞状背景では一部の領域が衝撃波によりゆがんだ計測画像でも、周囲の周期的な輝度分布情報からゆがみのない参照画像を比較的容易に復元することができる。すなわち単一計測画像からの参照画像復元が、角度誤差を含む回転ミラーを経由した BOS 法を可能にする戦略となる。なお、この参照画像復元処理はステレオカメラなどで実現される Reference-free BOS 法の概念に相当する [8]。

4.5 衝撃波の継続的高解像度可視化

トラッキング BOS 法によって取得した、 $M = 1$ 前後の高速飛行体の撮影画像と衝撃波の可視化画像を図 7 に示す。図 7-a) の撮影画像から、飛行体を中心とした Region of Interest (ROI) 領域をオフラインで抽出する。縞の周期的輝度変化を正弦波と多項式によりパラメトリックに推

定し、そのパラメータ群を平滑化することでゆがみを含まない参照画像を生成する。そして S-BOS 法 [10] を適用することで、図 7-b) に示すように衝撃波が可視化できる。

飛翔体前後の大きな衝撃波と比較して、飛翔体先端付近から発生している小さな衝撃波には時間的な揺らぎが認められ、局所的な輝度分布を解析することで 500 [Hz] 程度の振動であることが確認できた。一方で、ミラーを静止した固定撮像系の状態では飛翔体を画角内で 0.7 [ms] しか捉えられず、これは 500 [Hz] の現象を理解するうえではサンプリング定理を考慮しても不十分である。すなわち光軸制御によって 10 [ms] 程度まで長時間化された高解像度計測により、500 [Hz] 程度の衝撃波非定常現象の可視化に成功した。

5. お わ り に

本稿では科学計測における高速飛翔体について、高速視線制御機構を用いた映像計測と、特に近年改良された高解像度計測ならびに衝撃波計測技術を紹介した。高速視線制御機構は音速に達する飛翔体をも追従撮影可能な性能を持つことから、自動車や新幹線などの高速移動体を含めた工学・ロボット応用だけでなく、衝撃波に代表される高速な自然現象の解明など科学的応用も含め、様々な応用展開が今後期待される。

なお、本稿で扱った射出装置は国内では法令によって使用が制限されているが、射出装置の使用を法的に許可された者（警察職員）が、十分な安全性を確保して対象の射出を行った。

謝 辞 本稿で紹介した内容は群馬大学、東京大学と科学警察研究所との共同研究の成果であり、研究遂行にあたっては、科学警察研究所の石井将人氏に多大なご協力をいただきました。また、2 章の高速飛翔体追従に関する研究は東京大学（当時）奥村光平氏の、3 章の高解像度計測に関

する研究は群馬大学 館野友貴美氏の尽力によるものです。ここに改めて感謝の意を表します。

参 考 文 献

- [1] 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, vol.29, no.2, pp.201–211, 2011.
- [2] 奥寛雅: “光学式視線制御機構による高速ビジュアルトラッキング”, 日本ロボット学会誌, vol.32, no.9, pp.774–778, 2014.
- [3] K. Okumura, K. Yokoyama, H. Oku and M. Ishikawa: “1 ms auto pan-tilt-video shooting technology for objects in motion based on saccade mirror with background subtraction,” Advanced Robotics, vol.29, no.7, pp.457–468, 2015.
- [4] 奥村光平, 石井将人, 巽瑛理, 奥寛雅, 石川正俊: “高速視線制御光学系による高速飛翔体の映像計測”, 計測自動制御学会論文集, vol.49, no.9, pp.855–864, 2013.
- [5] Specialised Imaging, Tracker2—flight follower system, <http://specialised-imaging.com/products/tracker2-award-winning-flight-follower-system>.
- [6] Y. Tateno, M. Ishii and H. Oku: “High resolution imaging of a subsonic projectile using automated mirrors with large aperture,” Proc. SPIE 10328, Selected Papers from the 31st International Congress on High-Speed Imaging and Photonics, 103280W, 2017. doi:10.1117/12.2269907.
- [7] 杉山弘: 圧縮性流体力学. 森北出版, 2014.
- [8] M. Raffel: “Background-oriented schlieren (bos) techniques,” Experiments in Fluids, vol.56, no.3, p.60, 2015.
- [9] T. Sueishi, M. Ishii and M. Ishikawa: “Tracking background-oriented schlieren for observing shock oscillations of transonic flying objects,” Applied Optics, vol.56, no.13, pp.3789–3798, 2017.
- [10] 赤塚純一, 永井伸治, 本阿弥真治: “Background oriented schlieren 法に基づく密度勾配の可視化法の改良”, 日本機械学会論文集 B 編, vol.77, no.784, pp.2391–2400, 2011.
- [11] T. Sueishi, H. Oku and M. Ishikawa: “Lumipen 2: Dynamic projection mapping with mirror-based robust high-speed tracking against illumination changes,” PRESENCE: Teleoperators and Virtual Environments, vol.25, no.4, pp.299–321, 2017.
- [12] 末石智大, 奥寛雅, 石川正俊: “駆動鏡面式高速光軸制御系の 3 次元計測に向けた高精度校正手法”, 映像情報メディア学会誌, vol.71, no.5, pp.J162–J171, 2017.

奥 寛雅 (Hiromasa Oku)

1998 年東京大学理学部物理学科卒業。2000 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。2003 年同専攻博士課程修了。2003～2005 年科学技術振興機構研究員。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 年同講師を経て, 2014 年群馬大学大学院理工学府准教授 (現職)。高速画像処理と高速光学系の融合によるダイナミックイメージコントロールの研究に従事。2014 年計測自動制御学会論文賞・蓮沼賞, 2015 年日本バーチャルリアリティ学会論文賞, 2016 年日本ロボット学会 Advanced Robotics Best Paper Award, 等を受賞。博士 (工学)。(日本ロボット学会正会員)

末石智大 (Tomohiro Sueishi)

2012 年東京大学工学部計数工学科卒業。2014 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修士課程修了。2017 年同専攻博士課程修了。2014～2017 年日本学術振興会特別研究員 (DC1)。2017 年同研究科特任助教, 現在に至る。高速光軸制御を用いた画像計測に関する研究に従事。2015 年日本バーチャルリアリティ学会論文賞を受賞。博士 (情報理工学)。