

高速度ビデオカメラによるアーチェリー矢の飛翔状態の自動解析

村上 陸^{*1}, 守 裕也^{*2}, 宮寄 武^{*3}, 高橋 直也^{*4}

Automatic image analysis of an archery arrow in free flight using high-speed video cameras

Riku MURAKAMI^{*1}, Hiroya MAMORI^{*2}, Takeshi MIYAZAKI^{*3}, and Naoya TAKAHASHI^{*4}^{*1,*2,*3} The university of Electro-Communications

1-5-1 Chofugaoka, Chofu, Tokyo 182-8585, Japan

^{*4} Tokyo Denki University

5 Senju Asahi-cho, Adachi-ku, Tokyo 120-8551, Japan

Received: XXXX; Revised: XXXX; Accepted: XXXX

Abstract

Archery at the Olympic games is a competition that hits a target 70 m away. The shooting performance of bows has improved, and athletes are required to have high accuracy shooting at the 10-point zone with a diameter of 122 mm. It is important to know the flight trajectory and attitude of arrow shot to improve the competitive ability. For this purpose, it is necessary to analyze an image of each arrow shot by a high-speed video camera with high accuracy. In this study, an automatic image analysis software for analyzing the velocity and attitude of archery arrows in free flight was developed. In order to confirm the reliability of the analysis results, we measured the velocity and attitude of arrows launched at various initial velocities by a shooting machine using compressed air, and also the arrows shot from bows by an athlete and a robot. Consistency between the results of the conventional visual analysis and those of the automatic image analysis was confirmed. The analysis time was reduced to 1/10 or less. Based on the information obtained from the automatic image analysis, it became possible to examine the flight characteristics of arrow shots, such as the variations in the initial arrow velocity, the initial angle of attack and the velocity decay rate. Knowing these flight characteristics on site will contribute to the optimization of arrow parts composition and the improvement of the athletes' competitive ability.

Keywords : Archery arrow, Arrow velocity, Arrow attitude, Image processing, High-speed camera

1. 緒 言

オリンピック競技としてのアーチェリーは 70 m 先にある直径 1220 mm の的を射る競技であり、東京 2020 大会での日本選手の活躍も記憶に新しい。新素材の採用や新機構の導入により弓の発射性能は向上しており、競技者には直径 122mm の 10 点圏を射抜き続けるための高い命中精度が求められる。そのため放たれた矢が、どのような飛翔姿勢でどのような飛翔軌道を辿るかを精確に知ることが、競技力を高めるうえで重要である。

アーチェリー矢は 60 m/s ~ 70 m/s の速さで飛翔する。代表長さを矢のシャフト直径とすると、 Re 数はおおよそ 2×10^4 程度になる。細長い矢の側面に沿う境界層流れの状態が矢の空力特性を決める。Liston (Liston, 1988) と Park (Park, 2011) は、矢を構成している鏃、シャフト、矢羽、ノックのそれぞれの抵抗の総和が矢の抵抗であるとし、矢側面の境界層流れが層流または乱流であるかにより抗力係数が異なることを指摘した。鈴木ら (鈴木他, 2010) は、圧縮空気を用いた発射装置による飛翔実験と、宇宙航空研究開発機構 (JAXA) の 60 cm 磁力支持天秤装置式風洞 (MSBS 風洞) を用いた風洞実験を行い、クロスボウ矢における 3 種類の鏃形状の違い (流線形、椎型、凹凸型) が側面境界層流れに及ぼす影響を調べた。測定した Re 数領域 ($Re = 5.3 \times 10^3 \sim 5.2 \times 10^4$) において、流線形鏃を装着した矢の側面境界層流れは層流、凹凸型鏃では乱流、そして椎型鏃を装着した矢の場合には $Re = 9.8$

No.xx-xxxx [DOI: 10.1299/transjsme.1x-00000]

^{*1} 学生員, 電気通信大学大学院 情報理工学研究科 (〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1)^{*2,*3} 正員, 電気通信大学大学院 情報理工学研究科 (〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1)^{*4} 正員, 東京電機大学 工学部 (〒120-8551 東京都足立区千住旭町 5)

E-mail of corresponding author: miyazaki@mce.uec.ac.jp

[DOI: 10.1299/transjsme.1x-00000]

© 201x The Japan Society of Mechanical Engineers

$\times 10^3$ 付近で層流から乱流に遷移することを示した。宮寄ら (Miyazaki et al., 2013) は MSBS 風洞実験と圧縮空気を用いた飛行実験を実施し、A/C/E シャフトに Spin-Wing-Vane 矢羽 (ともに EASTON 社製) を装着した矢の空力特性を調査した。その結果、 $Re = 1.3 \times 10^4 \sim 1.8 \times 10^4$ において抗力係数が層流境界層に相当する値と乱流境界層に相当する値に 2 極化することを示した。また、宮寄ら (Miyazaki et al., 2017) は側面境界層流れの乱流遷移は飛行中の矢の迎角に起因する可能性を指摘し、主流に対して $\pm 0.6^\circ$ 以上の迎角がつくと乱流遷移が起きることを示した。宮寄ら (Miyazaki et al., 2013) および宮寄ら (Miyazaki et al., 2017) では、高速度ビデオカメラで撮影された飛行中の矢の映像を目視で読み取り矢の飛行速度と飛行姿勢を解析している。精度を確保するために複数の解析者の結果を平均化しており、解析結果を得るのに膨大な時間が必要である。このような解析は競技者のすぐ横で実施することが理想であり、解析結果が撮影した“その場で”得られれば競技者へのフィードバックが可能になる。

スポーツ競技における流体現象は非定常性を伴うため、飛行実験や風洞実験において高速度ビデオカメラが活用されている (例えば J. E. Goff, 2013)。近年、その性能は著しく向上しており、より高速で瞬間的な現象の撮影が可能になっている。その一方で、画像解析作業の効率化が求められている。そこで本研究では、矢の飛行状態の解析の効率化を図るため、精度を維持しつつ自動化する画像処理ソフトを開発する。解析結果の精度を確認するために、圧縮空気を用いた発射装置により様々な初速で打ち出された矢や、競技者やロボットによって弓から放たれた矢の飛行速度と飛行姿勢を計測した。これらの解析結果に基づいて、空気抵抗による矢の減速率や飛行中の矢の迎角の時間変化などの矢の飛行特性について議論する。

2. 飛行実験

飛行実験は江戸川区総合体育館の屋内アーチェリー場 (50 m レンジ) で行われた。背景風の影響を排除するため、空調を落としてできるだけ無風状態とした。図 1 に飛行実験の配置を示す。発射位置からの的までの距離は、アーチェリー場で最大限取れる距離である 55 m とした。打ち出し直後の矢の飛行速度・姿勢を撮影するためにモノクロの高速度ビデオカメラ 3 台を使用し、発射位置から 1.5 m, 2 m, 2.5 m の位置に設置した。さらに的の手前 1 m にカラーの高速度ビデオカメラ 1 台を設置して、矢の飛行状態を撮影した。カメラの画角は矢が 2 本分映るように調整した。発射位置から順にカメラを cam 1, cam 2, cam 3, cam 4 とする。また矢の的の中位置の的中心からのずれを一射ごとに計測した。

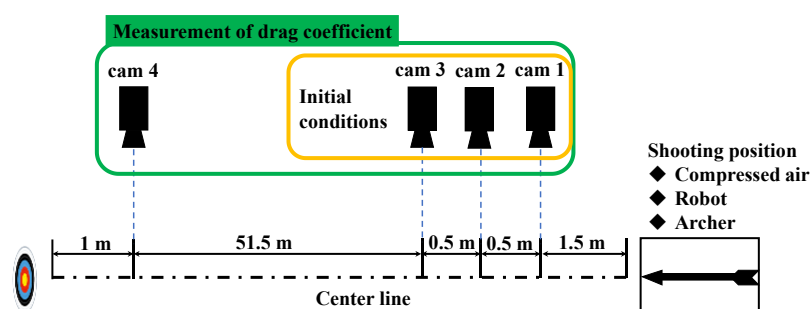


Fig. 1 Flight experiments in August and December, 2020.

表 1 に飛行実験で使用したカメラを示す。括弧内に示す実験日ごとに異なる組合せとなっている。高速度ビデオカメラの撮影条件は、モーションブラーを防ぎ画角に収められるコマの数を増やすため、3000 fps、露光時間は 20 μ s、撮影サイズ (画素数) は 1280 \times 720 (V2640 以外) ピクセルおよび 2048 \times 1952 ピクセル (V2640) とした。なおこの画素数の差は解析結果に影響を与えず、画素数は 1280 \times 720 で十分であった。各画像における 1 ピクセル当たりの長さは較正バーを撮影することで決定した。V2640 以外のカメラでは 0.83 \sim 1.1 mm/pixel であり、V2640 では 0.69 mm/pixel であった。発射位置付近のカメラ (cam 1, cam 2, cam 3) はグレースケール撮影とし、的前のカメラ (cam 4: V710) はカラー撮影とした。ここで、様々な機種の高速度ビデオカメラで矢の打ち出しを撮影したのは、新旧の高速度ビデオカメラの性能を比較するためである。開発の古い cam 3 (MiroLC310) は、より新

しい cam 1 や cam 2 と同等の信頼できる速度情報をもたらすが、角速度情報についての信頼性は低いことが分かった。

Table 1 High speed cameras used in the flight tests (All are monochromes except for V710).

Camera number	Model (Flight test date)
1	Miro LC310 (2020/8, 2021/7), VEO1310 (2020/12, 2021/6)
2	VEO710(2020/8), V2640 (2020/12)
3	Miro LC310 (2020/8, 2020/12)
4	V710 (2020/8, 2020/12)

アーチェリー矢は図2に示す通り、鏃 (point), シャフト (shaft), 矢羽 (vane), 矢筈 (nock) の4部位から構成される。上の矢はEASTON社製A/C/Eシャフトに4.4 cmのEASTON社製Diamond vaneと流線形鏃を組み合わせたもので、下の矢はEASTON社製X10シャフトにEASTON社製Spin-Wing-Vaneと椎型鏃, Beiter社製のインアウトノックを組み合わせたものである。トップレベルの競技者はこの2種類のシャフトを用いることが多い。飛翔実験では、図3に示す異なる3種類の発射方法(圧縮空気を用いた発射装置, ロボット, 競技者)で矢を放った。弓から放たれる矢はたわみ振動するので、圧縮空気を用いた発射装置(図3(a))を用いて、剛体運動する矢を様々な初速で打ち出し画像解析の精度を確認した。この時の矢はA/C/Eシャフトに4.4 cmのDiamond vaneと流線形鏃または椎型鏃を組み合わせ、発射装置のノズルをシャフト内に差し込むため矢筈を外した。次にロボット(図3(b))と競技者(図3(c))が弓から放つ矢の画像解析を行い、矢のたわみ振動の影響を確認した。ロボットによる打ち出しではX10シャフトにEaston社製Spin-Wing-Vaneと椎型鏃を、競技者による打ち出しではA/C/EシャフトにEaston社製Spin-Wing-Vaneと椎型鏃を組み合わせた。各矢の物性値を表2に示す。



Fig. 2 Arrows shot by the shooting machine (upper: A/C/E shaft, Diamond vanes, and streamlined point) and by the robot (bottom: X10 shaft, Spin-Wing-Vanes, bulge point, and In-Out nock).

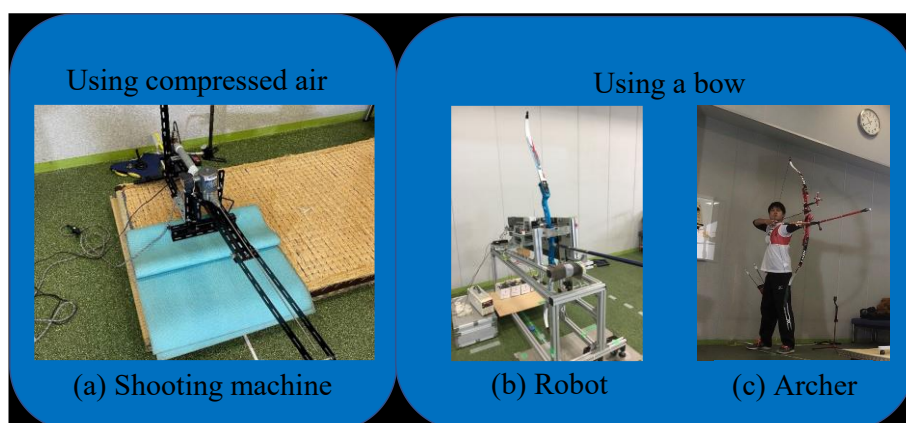


Fig. 3 Arrow shooting methods.

Table 2 Physical properties of the arrows.

Shaft, Point, Vane	Diameter [10^{-3} m]	Length [m]	Distance from point to center of mass [m]	Mass [10^{-3} kg]
A/C/E, Streamlined, Diamond vane	5.24	0.644	0.248	14.5
A/C/E, Bulge, Diamond vane	5.24	0.638	0.244	14.6
X10, Bulge, SWV (X10_1)	4.82	0.658	0.204	19.7
X10, Bulge, SWV (X10_2)	4.97	0.756	0.248	21.2
A/C/E, Bulge, SWV (A/C/E_1)	5.49	0.729	0.250	17.7
A/C/E, Bulge, SWV (A/C/E_2)	5.46	0.730	0.248	18.0

3. 画像解析手法

本研究では以下の手順で画像解析を自動化し、MATLAB に準拠して具体的な画像解析プログラムを作成した。

3・1 飛翔速度の解析

矢の重心の飛翔速度を解析するために、図 4 に示す一連の処理を行った。まず、画像処理を行う前の画像（図 4 (a)）に対して、背景差分法により矢領域の抽出を行った。背景画像を別撮りすると不要なノイズが発生するため、背景画像を一連の映像から作成した。矢が通過する軌道に残る点状のごま塩ノイズを除去するために、メディアンフィルタを用いた（例えば Marques, 2011, § 12.3）。背景差分後の画像を図 4 (b) に示す。背景差分した画像の輝度調節およびトップハット処理（Marques, 2011, § 13.7）により矢をより鮮明に抽出した。また矢の外形を画像の平滑化後に抽出し（図 4 (c)）、処理を施した画像と乗算を行った。乗算された画像に 2 値化処理を施し 2 値化画像を作成した。このとき矢を構成するピクセルの一部が欠損するため、モルフォロジー変換（欠損部分に対して画像の膨張もしくは収縮処理（Marques, 2011, Chap. 13）によりピクセル補間）を行った。これらの処理により得られた画像（図 4 (e)）において、矢の画像を構成しているピクセルを検出し、ハリスのコーナー検出法によって矢の先端・後端を検出する。先端・後端座標を読み取り、そのデータを利用して重心座標と飛翔速度の算出を行った。ここで鍔先端から重心、そして重心から後端部までの距離比は事前に測定された値（表 2）を用いる。

3・2 飛翔姿勢の解析

鉛直面内での矢の飛翔姿勢を以下のように解析する。§ 3.1 で用いたコーナー検出で得られた座標はピクセル単位であり、矢軸の角度の解析精度が低い。一方で、振幅スペクトルの環状領域を用いれば微小な回転角の推定を行うことができる（梅津他, 2013）。ここで、飛翔速度解析のために用いた図 4 (e) は使用しない。図 4 (e) ではピクセル補間において矢羽に印字されている文字を拾うため、シャフト本来の太さより太くなる部分が生じ、またフィルター処理の効果によって、フーリエ変換後の画像における低周波成分に悪影響を及ぼす可能性がある。そこで、ピクセル補間と 2 値化処理を施す前の画像（図 4 (d)）に対し、矢羽を削除した画像（図 4 (f)）を用いて解析を行った。

角度変化を求めるための基準画像として、矢の重心位置が映像中央を通過したときの画像（図 5 (a)）を用い、2 次元高速フーリエ変換 (FFT) を行う（図 5 (c)）。これとは別に、各フレームの画像をあらかじめ回転させ（図 5 (b)）、同様に FFT を行う（図 5 (d)）。これら 2 画像の振幅差の二乗を波数空間全体で足し合わせたものを評価関数とする。この評価関数の極小値をもたらし回転角を、2 画像の角度差とする。評価関数は角度に対して下に凸となるので、二次関数でフィッティングを行い、その頂点を極小点とした（図 6）。評価関数の詳細については付録に記述する。この操作を基準画像の前後の 10 フレームについて行い、矢の傾きの時間変化を解析して角速度を求める。この角速度の値を傾きとして、先端・後端座標を読み取ることで得られた矢の傾き角の時間変化を 1

次関数でフィッティングし、矢の重心位置が画面中央にある時間における矢の傾き角を算出する。そして、飛翔速度の解析から得られた仰角と矢の傾き角の差から迎角が算出される。

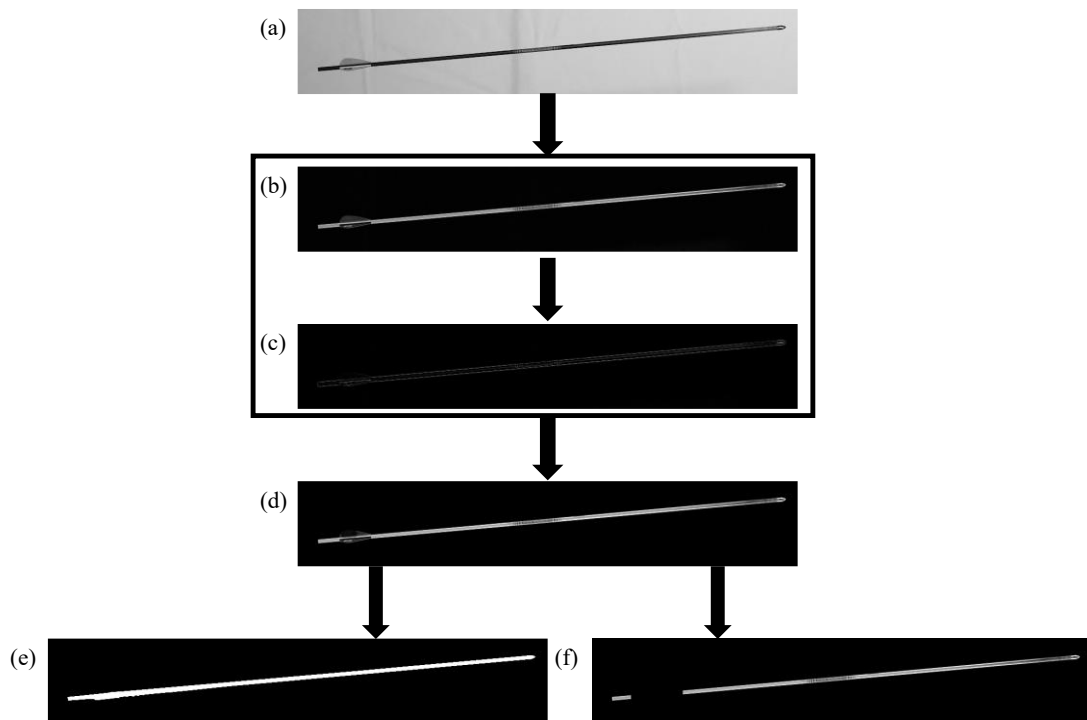


Fig. 4 Algorithm of image processing: (a) original image, (b) image after background subtraction, (c) outline extraction of the image (b), (d) image obtained by multiplying (b) and (c), (e) mensurative image after image denoising and pixel interpolation, (f) mensurative image 2 (after image denoising and cutting vanes).

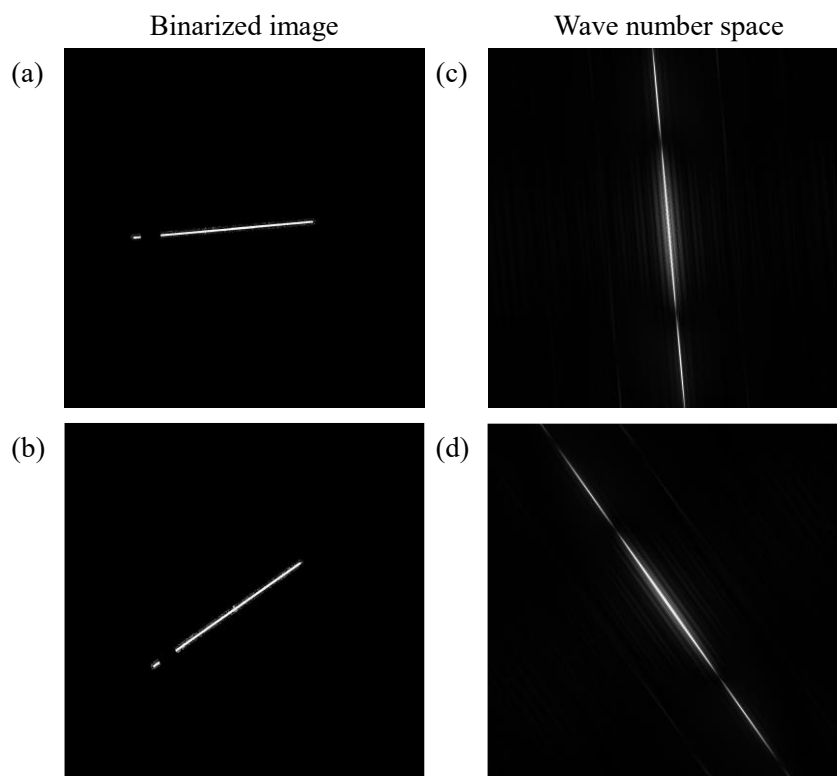


Fig. 5 Algorithm in the angular velocity analysis: (a) binarized image as the reference, (b) rotated and binarized image of another frame, (c) Fourier transformed image of (a), (d) Fourier transformed image of (b).

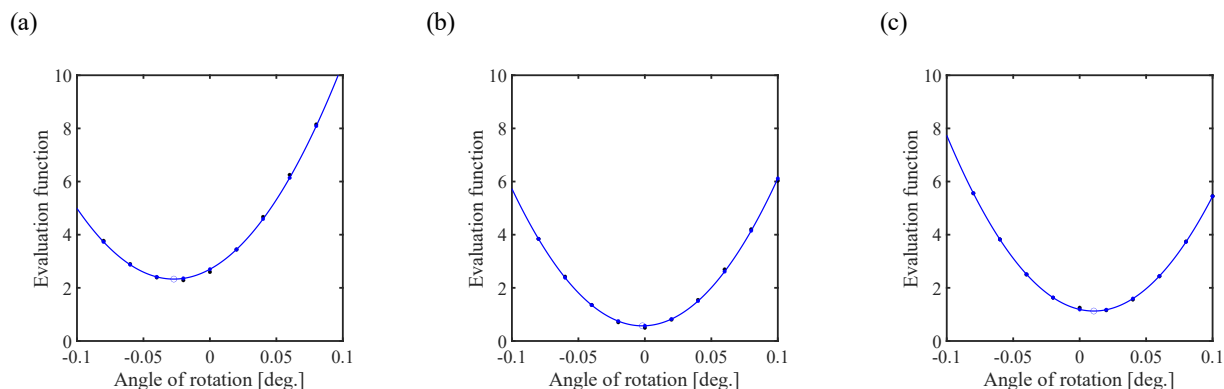


Fig. 6 Evaluation function near the reference frame: (a) 1/750 sec before the reference frame, (b) 1/3000 sec before the reference frame, (c) 1/750 sec after the reference frame.

4. 画像の目視による解析と自動解析との比較

自動画像解析による解析結果を従来の目視による解析結果と比較する。圧縮空気を用いた発射装置から放たれた剛体運動する矢を対象とし、2020年8月および12月の飛翔実験から得られた結果で解析精度を検証する。矢の初速は40~60 m/s、圧縮空気の圧力は3.0~7.5 MPaでの実験結果である。

4・1 矢の飛翔速度

飛翔速度の解析結果を図7(a)(b)に示す。縦軸は目視による値、横軸は自動画像解析による値を示す。傾き 45° の点線を比較のために引いている。目視の解析では、複数人(4~5名)の解析結果を平均しているため、標準偏差をエラーバーとしてつけている。図7(a)の水平方向成分では、目視との相対誤差が0.9%以内に収まり、図7(b)の鉛直方向成分では相対誤差2.0%以内に収まった。撮影された画像の画質が悪いと目視による解析結果の標準偏差が大きくなり、自動画像解析結果との差が大きくなる。アーチェリー競技における標準的な矢速60 m/s付近での画像の解析結果では、矢速の相対誤差は0.2%程度となる。一方、解析にかかる時間は、目視の場合では1ケース20分程度(4人合計)であったが、自動画像解析では2分程度であった。

4・2 矢の飛翔姿勢

飛翔姿勢の解析結果を図8(a)(b)に示す。縦軸は目視による値、横軸は自動画像解析による値を示す。比較のために傾き 45° の点線を引いている。飛翔速度の場合と同様に、複数人の平均値である目視の結果には標準偏差をエラーバーとしてつけている。図8(a)の迎角は頭上げの状態を正として、 1° 未満となった。一方、図8(b)の角速度は頭下げの状態を正として、0.5 rad/s未満となった。速度や迎角に比べて角速度のデータ量が少ないのは、目視による角速度の解析が困難だったためである。目視による迎角・角速度の解析結果はばらつきが大きいですが、画像解析結果とはほぼ整合する。1つのケースの解析にかかる時間は、目視では4時間程度(4人合計)であったが、自動画像解析では4分程度に短縮された。

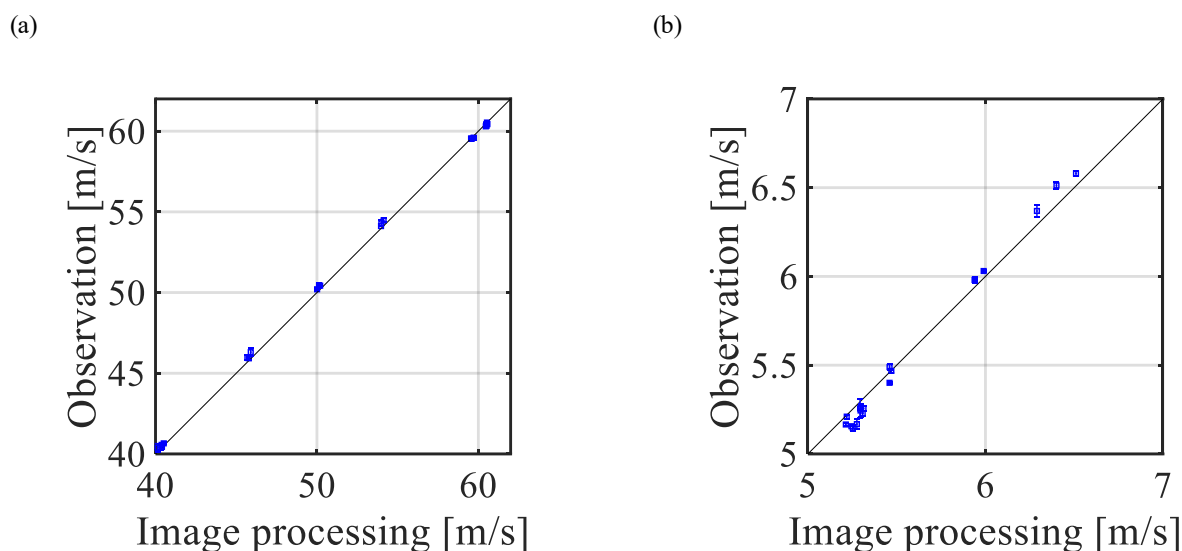


Fig. 7 Comparison of image processing results and observation results for (a) horizontal and (b) vertical velocity components.

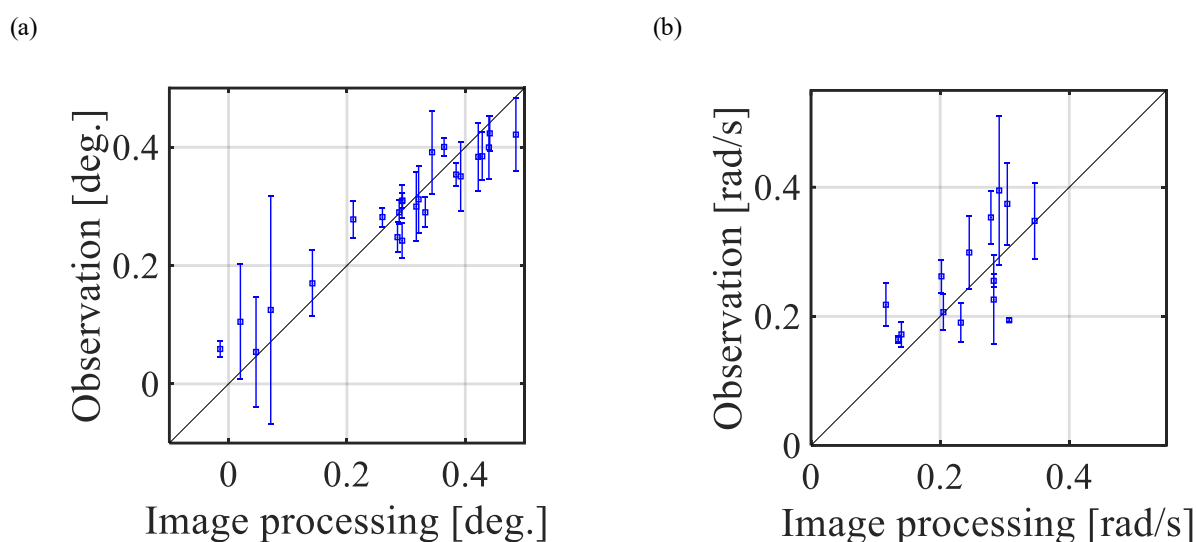


Fig. 8 Comparison of image processing results and observation results for (a) angle of attack and (b) angular velocity.

5. 解析結果の考察

前節において、目視による解析結果と自動画像解析を用いた解析結果の整合性が確認された。以下では、自動画像解析から得られた情報に基づいて矢の飛翔特性を考察し、その有用性を示す。

5・1 画像処理上における矢の長さの時間変化

画像処理では様々な処理を施しているが、特に2値化の過程では、閾値の決定や膨張・収縮処理によって画像にノイズが発生し、矢の長さが本来の長さからずれる可能性がある。図9に、圧縮空気ですり出した矢の長さをフレーム毎に示し、その時間変化を確認する。重心が画面中央を通過するフレームとその前後5フレーム、計11フレームを抽出して、打ち出した10本分の平均値と標準偏差（エラーバー）を示している。赤のシンボルは椎型鏃、青のシンボルは流線形鏃の結果を表す。点線はそれぞれの矢の真の長さとして静止状態で計測した値、0.638 mと0.644 mを示す。また、○はcam 1、□はcam 2の映像からの解析結果である。流線形鏃ではカメラの種類に関わらず、圧縮空気ですり出された矢の長さはエラーバーの範囲内で真の長さとも一致することが確認され、画像の2値化処理に伴う悪影響はないと考えられる。一方、椎型鏃の場合には少し短めの解析結果となっているが、丸みを帯びた鏃先端の検出に伴う誤差がその原因と考えられる。

一方、図 10 にロボットから放たれた矢の長さの解析結果を示す。椎型鏃が装着された X10 矢であり、その真の長さは 0.756 m である。矢の両端が映っているフレームで重心が画面中央を通過するフレーム前後 10 点を抽出しており、打ち出した本数分 (35 本) を平均し、標準偏差をエラーバーで示している。解析結果は真の値と比べて最大 2 cm 程度短くなり、ほとんどばらつきなく規則的に時間変化している。ロボットによって弓から放たれた矢はたわみ振動するとともに、水平面内で迎角がつく可能性があるため、その影響が現れたものと考えられる。矢の長さの時間変化からたわみ振動の振動数を評価すると、およそ 20 フレームが半周期に該当するので 75 Hz 程度と推定される。矢の飛翔状況を 3 次元的に捉えるためには、水平方向に加えて鉛直方向から高速度ビデオカメラでステレオ撮影する必要がある、今後の課題となる。

5・2 競技者とロボットによる発射特性

2020 年 12 月に行われた飛翔実験で、競技者とロボットから打ち出された矢の速さを図 11 に示す。競技者は 2 本の A/C/E 矢を 18 射ずつ合計 36 射放った。青丸で示した矢 (A/C/E_1: 17.73 g) と赤丸で示した矢 (A/C/E_2: 17.99 g) ではわずかに質量が異なる。矢速の平均は A/C/E_1 の場合は 59.67 m/s, A/C/E_2 の場合は 59.21 m/s となり、質量が大きな矢の平均速度は小さかった。標準偏差は A/C/E_1 の場合は 0.34 m/s, A/C/E_2 の場合は 0.40 m/s となり、わずかに A/C/E_1 のほうが小さかった。また、的中位置の鉛直方向のばらつき (平均中心からずれ) を標準偏差で評価したとき A/C/E_1 が 107 mm, A/C/E_2 が 108 mm となる。このばらつきは 55 m 先の的でのものであり、70 m 先の直径 122 mm の 10 点圏を捉えきれていない。

一方、黒×で示すように、ロボットから打ち出された矢速の平均は 58.55 m/s で標準偏差は 0.13 m/s であり、平均値に対する相対誤差は 0.23 % であった。競技者に比べて標準偏差が小さく、的中位置の鉛直方向のばらつき (標準偏差) も 34 mm と小さいことが確認できた。ただし、発射回数が増えるとともに、矢速が単調に減少していることが確認され、ロボットにも改良の余地が認められた (2020 年 12 月)。改良後に行われた実験 (2021 年 6 月) のデータを図に黒口で示す。異なる X10 矢 (X10_2) を放ったために、矢速の平均値 (51.96 m/s) は下がっているが、標準偏差 (1.9×10^{-2} m/s) は小さくなり、矢速はほぼ一定値を維持している。実際、改良後のロボットの的中位置の鉛直方向のばらつきは 9 mm であり、背景風のない屋内アーチェリー場であれば 70 m 先の直径 61 mm の円内 (X ゾーン) に的中する命中精度を持つことが分かる。

5・3 矢の鉛直速度成分と鉛直方向の的ずれ

発射時における矢の鉛直速度成分 (cam 1 の映像解析結果) のばらつきは、的における鉛直方向の的中位置のばらつきに直結する。図 12 は両者の相関を示すが、縦軸が的中位置の鉛直方向のずれを、横軸が鉛直方向速度成分を表している。図中の○は競技者の結果 (2020 年 12 月) を、□は改良後のロボット (2021 年 6 月) の結果を表す。実線は各データの線形関数による近似直線である。鉛直方向の的ずれは、矢の鉛直速度成分の差に飛翔時間 (飛翔距離/平均水平速度成分) を乗じた値で近似できるので、飛翔時間を傾きとして固定した近似直線を点線で示す。ロボットによるデータでは両者がよく一致し、鉛直方向速度成分の画像解析結果が信頼できることを裏付ける。一方、競技者による結果では両者に差が見られるが、この差は競技者の打つ矢の速度の水平方向成分のばらつきが大きいためと考えられる。撮影現場でこのようなデータ分析を行えば、個々の競技者の的中率の向上のための指針を示唆できるはずである。

5・4 空気抵抗による矢の減速

図 13 に、圧縮空気による A/C/E 矢の打ち出し実験における、発射位置からの飛翔距離 (横軸) と矢速の対数値 (縦軸) の関係を示す。抗力係数が一定であると仮定できる場合、矢の水平速度成分は飛翔距離の指数関数で減衰するので、片対数グラフ上では直線になる (Miyazaki et al., 2013) ことから、傾きの大きさが抗力係数の大きさを表す。

2 種類の鏃を装着した矢の初速を同じ 57 m/s で打ち出した場合、傾きは椎型鏃のほうが大きくなった。これは椎型鏃をつけた矢の抗力係数が流線形鏃をつけた矢のものよりも大きいことを示している。矢側面の境界層流れは椎型鏃をつけた場合には乱流状態になり、流線形鏃をつけた場合には層流状態になったと考えられる (鈴木他, 2010) (宮寄, 2020)。流線形鏃をつけた場合、矢の初速が 60 m/s でも直線の傾きは同一であり、抗力係数が変化

せず境界層流れの層流状態が維持される。一方、椎型鏃をつけた場合、矢の初速が 50 m/s でも直線の傾きは 57 m/s の場合と変わらず、境界層流れは乱流状態であることが分かる。このように矢を構成する各パーツの選択が矢の空力特性に及ぼす影響を“その場で”で評価できれば、最適なパーツの組合せの探索が効率化されるであろう。

5・5 飛翔姿勢の時間変化

圧縮空気を用いた発射装置から打ち出された A/C/E 矢を cam 1, cam 2 で撮影し、それぞれの画像を解析して、速度情報と角度情報を得た。そのデータを初期値として、剛体運動をする矢の飛翔軌道を予測する数値計算プログラムで迎角の時間変化を算出した (Miyazaki et al., 2017)。A/C/E 矢の空力特性 (抗力係数, 揚力係数, ピッチングモーメント係数) については, MSBS 風洞実験および飛翔実験から得られた結果 (Julio et al., 2020) を数値計算プログラムに入力している。その結果を図 14 (a) (b) に示す。(a) は流線形鏃を, (b) は椎型鏃を装着した場合の計算結果である。cam 1 と cam 2 の画像解析結果に基づく計算結果をそれぞれ青色, 黒色で示す。カメラは横並びに 50 cm の間隔で置かれているため, 時間の原点を補正すると 2 つの結果は一致するはずであり, それぞれの飛翔速度・姿勢の解析結果に対する信頼性の指標となる。図 14 (a) で, 2 つの計算結果が少しずれるのは, 矢の姿勢が初期角速度に敏感で, その解析精度に改善の余地があることを示している。図 14 (a) の最大迎角は 0.46° もしくは 0.51° , 図 14 (b) の最大迎角は 0.44° であった。椎型鏃を装着した矢の迎角のほうが若干小さいが, 矢の側面境界層流れは流線形鏃では層流状態だったのに対し, 椎型鏃では乱流状態であった。迎角の大小ばかりでなく, 鏃形状が境界層流れの状態を決定する要因となっていることが分かる。

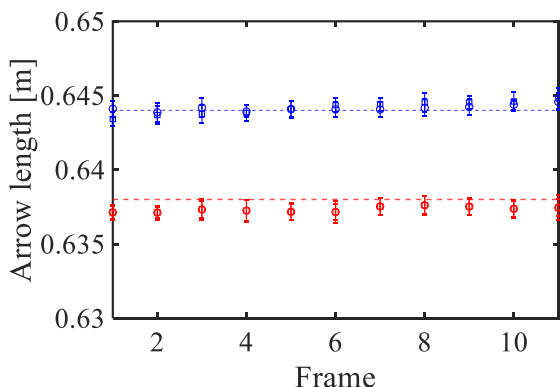


Fig. 9 Time variation of the arrow length by the shooting machine: circle, cam 1; square, cam 2; red, Bulge point; blue, streamlined point.

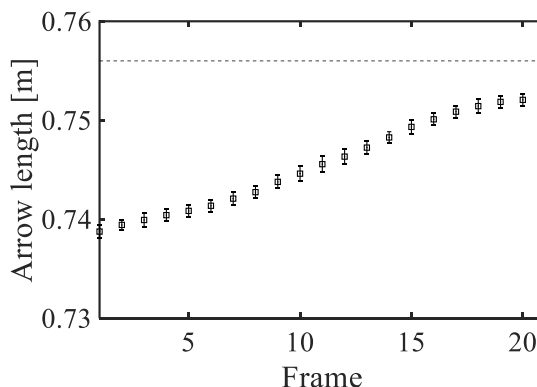


Fig. 10 Time variation of the arrow length by the archery robot (cam 1).

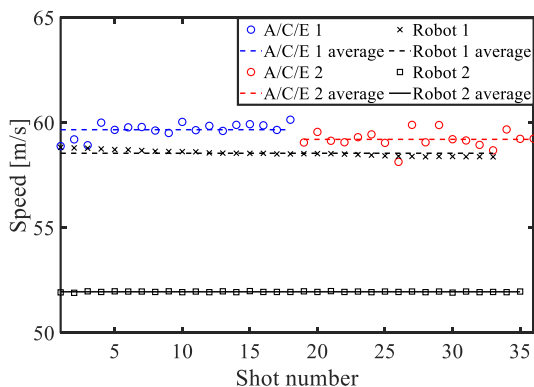


Fig. 11 Initial speed of the arrows at cam 1 shot by the archer on Dec. 2020 and by the robot on Dec. 2020 and on Jun. 2021.

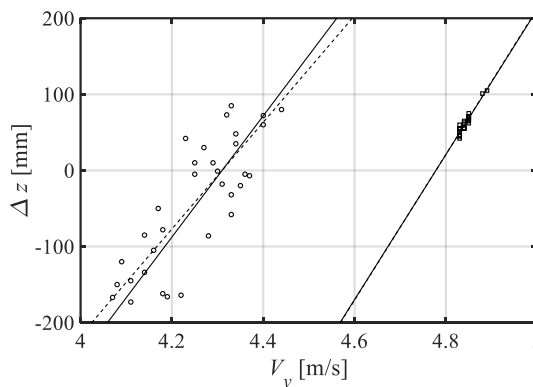


Fig. 12 Vertical displacement at the target (Δz) vs vertical velocity component (V_y at cam 1): circle, shot by the archer; square, shot by the robot.

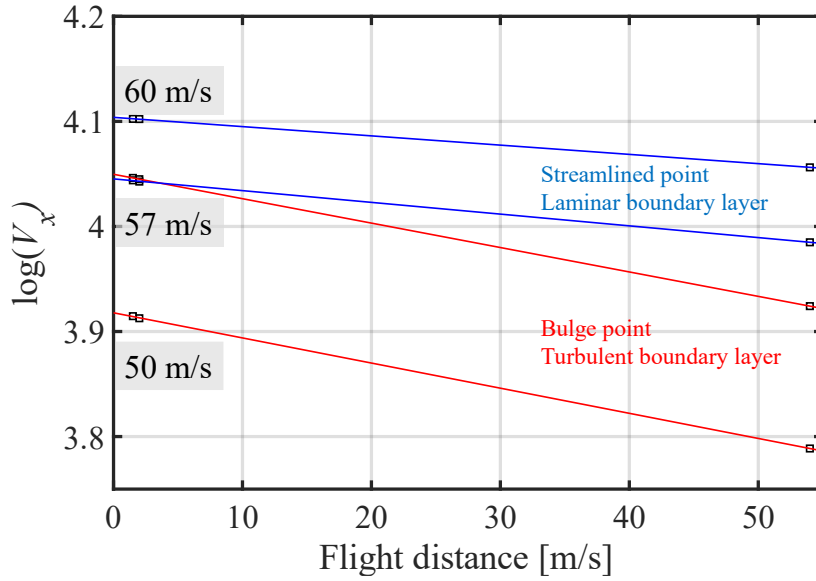


Fig. 13 Arrow speed as a function of flight distance: red, bulge point; blue, streamlined point.

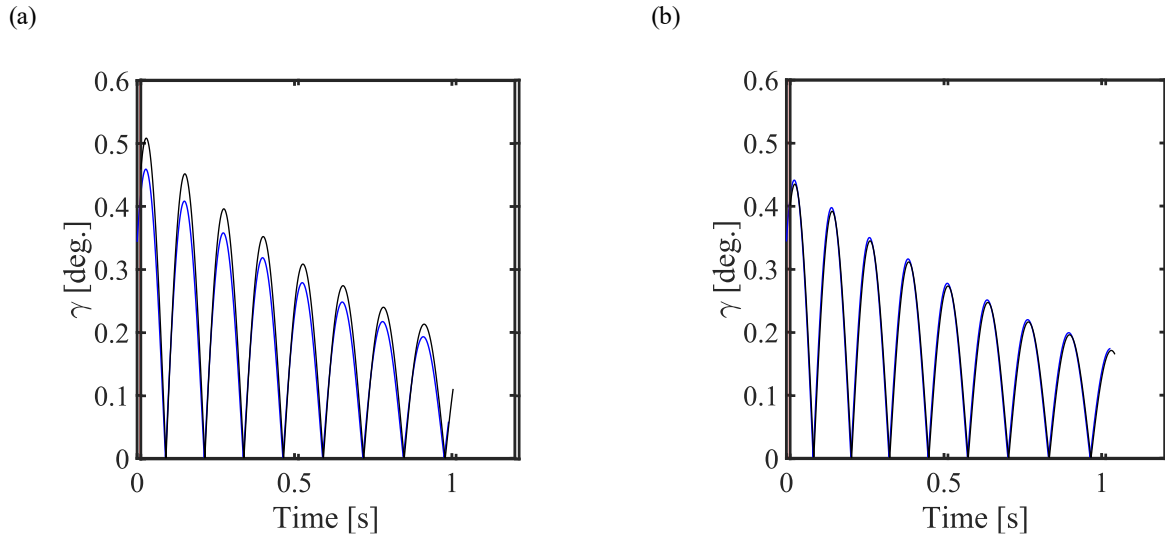


Fig. 14 Time evolution of the angle of attack of the arrow with (a) the streamlined point and (b) the bulge point: Blue and black lines show the results obtained using the initial conditions from cam 1 and cam 2, respectively.

6. 結 言

本研究では、矢の飛翔速度・姿勢の解析を行うための自動画像解析ソフトを開発した。従来の目視による解析結果と自動画像解析結果の整合性が確認され、解析時間を 1/10 以下に短縮できた。自動画像解析手法を用いることで、初速度と的ずれの関係、鏃形状が減速率に及ぼす影響などを“その場で”解析できるようになり、矢のパーツ構成の最適化や競技者の競技能力向上に資することが期待される。弓から放たれる矢はたわみ振動や矢軸周りに回転運動するので、矢の鉛直面内での飛翔状態に加えて水平面内での飛翔状態を解析する必要がある。今後、複数の高速度ビデオカメラによってステレオ撮影を行い、取得された画像を自動解析する手法へと発展させていくことが望まれる。

謝 辞

本研究は(株)西川精機製作所との共同研究「弓具の発射精度評価基準の確立」のもとで実施されました。ロボット(図3(b))による矢の発射を含め、その支援がなければ本研究を遂行することはできませんでした。ここに記して謝意を表します。また、飛翔実験に協力してくれた電気通信大学と東京電機大学の学生達に感謝いたします。

文 献

- Goff J. E., A review of recent research into aerodynamics of sports projectiles, *Sports Engineering*, Vol. 16 (2013), pp. 137-154.
- Liston T. L., *Physical laws of archery*, Liston and Associates, San Jose (1988).
- Marques O., *Practical Image and Video Processing Using MATLAB*, Wiley (2011).
- Miyazaki T., Mukaiyama K., Komori Y., Okawa K., Taguchi S., and Sugiura H., Aerodynamic properties of an archery arrow, *Sports Engineering*, Vol. 16 (2013), pp. 43-54.
- Miyazaki T., Matsumoto T., Ando R., Ortiz J., and Sugiura H., Indeterminacy of drag exerted on an arrow in free flight: arrow attitude and laminar-turbulent transition, *European Journal of Physics*, Vol. 38 (2017), 064001, 19 pp.
- Ortiz J., Ando M., Murayama K., Miyazaki T., and Sugiura H., Computation of the trajectory and attitude of arrows subject to background wind, *Sports Engineering*, Vol. 22 (2020), 9 pp.
- Park J. L., The aerodynamic drag and axial rotation of an arrow, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P: Journal of Sports Engineering and Technology*, Vol. 225 (2011), pp. 199–210.
- 鈴木一史, 榊井和典, 向山桂太, 宮寄武, 澤田秀夫, 矢の空力特性 - 境界層遷移に対する先端形状の影響, *ながれ*, Vol. 29, No.4 (2010), pp. 287-296.
- 梅津信幸, 清水勲, 鶴野克宏, フーリエ変換差分法による画像間の回転角の推定, *精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集* (2015), pp. 281-282.

References

- Goff J. E., A review of recent research into aerodynamics of sports projectiles, *Sports Engineering*, Vol. 16 (2013), pp. 137-154.
- Liston T. L., *Physical laws of archery*, Liston and Associates, San Jose (1988).
- Marques O., *Practical Image and Video Processing Using MATLAB*, Wiley (2011).
- Miyazaki T., Mukaiyama K., Komori Y., Okawa K., Taguchi S., and Sugiura H., Aerodynamic properties of an archery arrow, *Sports Engineering*, Vol. 16 (2013), pp. 43-54.
- Miyazaki T., Matsumoto T., Ando R., Ortiz J., and Sugiura H., Indeterminacy of drag exerted on an arrow in free flight: arrow attitude and laminar-turbulent transition, *European Journal of Physics*, Vol. 38 (2017), 064001, 19 pp.
- Ortiz J., Ando M., Murayama K., Miyazaki T., and Sugiura H., Computation of the trajectory and attitude of arrows subject to background wind, *Sports Engineering*, Vol. 22 (2020), 9 pp.
- Park J. L., The aerodynamic drag and axial rotation of an arrow, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P: Journal of Sports Engineering and Technology*, Vol. 225 (2011), pp. 199–210.
- Suzuki K., Masui K., Muraiyama K., Miyazaki T., and Sawada H., Aerodynamic Properties of an Arrow -Influence of Point-shape on the Boundary Layer Transition-, *Nagare*, Vol. 29, No. 4 (2010), pp. 287-296 (in Japanese).
- Umezumi N., Shimizu I., Uno K., Estimation of Rotation Angles between Images using Fourier Transform Magnitude Difference, *JSPE* (2015), pp. 281-282 (in Japanese)

付 録

梅津ら (梅津他, 2013) の提案に基づきフーリエ変換差分法を用いた矢の飛翔姿勢・角速度解析の詳細手順を付録として示す. 画像データは MATLAB 上では 2 次元配列として保存されるので, 基準画像 A に対応する配列を $\mathbf{A}(j, k)$ と置く. ここで (j, k) はそれぞれ画像の x, y 方向の座標を表している整数で, $0 \leq j \leq N_x - 1$, $0 \leq k \leq N_y - 1$ であり, N_x, N_y はそれぞれ x, y 方向の画像の解像度である. この配列 $\mathbf{A}(j, k)$ に対して, MATLAB に実装されているフーリエ変換を行う.

$$\tilde{\mathbf{A}}(p, q) = \sum_{j=0}^{N_x-1} \sum_{k=0}^{N_y-1} \omega_{N_x}^{jp} \omega_{N_y}^{kq} \mathbf{A}(j, k)$$

ここで $-N_x/2 \leq p \leq N_x/2 - 1$, $-N_y/2 \leq q \leq N_y/2 - 1$, $\omega_{N_x} = e^{-\frac{2\pi}{N_x}i}$, $\omega_{N_y} = e^{-\frac{2\pi}{N_y}i}$ であり, $i = \sqrt{-1}$ である. 同様に撮影画像 B に対応する配列 $\mathbf{B}(j, k)$ を基準画像 A と重心を一致させたのち, 重心周りに θ 回転した配列を $\mathbf{B}'(\theta; j, k)$ とし, それをフーリエ変換したものを $\tilde{\mathbf{B}}'(\theta; p, q)$ とする.

$$\tilde{\mathbf{B}}'(\theta; p, q) = \sum_{j=0}^{N_x-1} \sum_{k=0}^{N_y-1} \omega_{N_x}^{jp} \omega_{N_y}^{kq} \mathbf{B}'(\theta; j, k)$$

類似度の評価関数 $F(\theta)$ は, $\tilde{\mathbf{A}}(p, q)$, $\tilde{\mathbf{B}}'(\theta; p, q)$ から高波数成分である $|p| > N_x/4$, $|q| > N_y/4$ を除いて足し合わせ, 次のように定義する.

$$F(\theta) = \frac{1}{N_x N_y} \sum_{|p| \leq \frac{N_x}{4}} \sum_{|q| \leq \frac{N_y}{4}} |\tilde{\mathbf{A}}(p, q) - \tilde{\mathbf{B}}'(\theta; p, q)|^2$$

この関数は, 撮影した画像 B に対応する配列 \mathbf{B} を θ 回転した配列 $\mathbf{B}'(\theta; j, k)$ が基準画像に対応する配列 $\mathbf{A}(j, k)$ に近いほど小さくなると期待される. 実際, 図 6 に示すように, 基準画像 A と重なるような適切な θ の範囲に対して $F(\theta)$ を計算すると, 極小点付近で下に凸の関数が現れる. この関数を二次関数でフィッティングして, 頂点の θ 座標を求め, その値を基準画像 A に対して撮影画像 B がずれている角度とする.