Histogram Intersection を用いた弾丸固有の 線条痕の絞込み手法の提案*

西村晃紀** 前田俊二*** 荒木智行** 金子俊一† 渋谷久恵†††
仁戸部勤††† 安野拓也††† 飯塚正美††† 中山 透†

Proposal of Extraction Method of Inherent Striated Toolmarks for Bullet Discrimination Using Histogram Intersection

Koki NISHIMURA, Shunji MAEDA, Tomoyuki ARAKI, Shun'ichi KANEKO, Hisae SHIBUYA,

Tsutomu NITOBE, Takuya YASUNO, Masami IIZUKA and Toru NAKAYAMA

Bullet identification requires special skills and takes a long time. So novel method is expected to be developed for assisting this skillful and time-consuming work. The discrimination of two bullets needs similarity quantification of striated toolmarks most. But conventional method based on image correlation is not applicable because of lower striated toolmark similarity. In this paper, a new method based on intersection which extracts common elements is proposed to measure similarity correctly between striated toolmarks of bullets and makes it possible to extract inherent striated toolmarks of used gun. The effectiveness of the proposed method is confirmed through experiments.

Key words: bullet identification, striated toolmark, similarity, histogram intersection

1. 緒 言

科学警察研究所や各都道府県の科学捜査研究所では、銃器事件解決のために、銃器の鑑定作業を行っている。事件で使用された拳銃と発砲された弾丸との関係を、事件現場から発見された現場弾丸あるいは、押収された拳銃からの試射弾丸と、警察に保管されている過去の現場弾丸との間で識別を行い、弾丸が同一拳銃から発射されたかどうかを判定する¹⁾。この鑑定作業は、異同識別と呼ばれ、発射された弾丸に残されたきず（線条痕）や薬莖に残るきず（撃針痕）などを対象に、比較顕微鏡を用いて目視により行われている。しかし、照合すべき弾丸が多いことや鑑定作業自体に多くの時間（数日～数週間）を必要とすること、また鑑定作業に専門的な知識・技術が必要とされることなどの課題があり、鑑定員の負担軽減が求められている。

これらの問題に対処するため、線条痕の形状解析や画像解析により異同識別の自動化が試みられている^{2)~7)}。また、3次元データを用いた手法⁸⁾も提案されている。しかし、鑑定作業に必要な固有線条痕の抽出・提示は実現されているとは言い難い。

文献 17 は、そこで提案された Histogram Intersection をベースにした類似性評価手法によって、二つの弾丸の類似性を定量的に評価し、鑑定者の判断作業を支援することを可能にしたものである。しかしながら、あらかじめ専門家によって対応を確認された旋丘痕を対象とし、類似性評価をする箇所が絞込まれていたため、実際の鑑定作業の一部のみの支援にとどまっている。実用化するには、対応付けがなされていない状態を想定し、評価箇所の絞り込み方法を検討する必要がある。

本研究では、弾丸の回転方向に旋丘痕の対応付けを行う位相合せ手法、および試行錯誤で今まで決定してきた固有の線条痕の候補の抽出手法の提案を行い、抽出箇所の類似性を評価する。特に、鑑定者の判断支援のため、固有線条痕を ROI (Region of Interest) として定量的に順位付けて提示することを目的とする。

2. 識別対象である線条痕

鑑定の対象である線条痕 (Toolmark) を、図 1 を用いて説明する。拳銃 (Pistol) の銃身 (Barrel) 内部には、ライフルリングと呼ばれる螺旋状の溝 (Spiral groove) が刻まれている。これは、発射弾丸 (Fired Bullet) に回転運動を与えることで、弾道の安定性と直進性を高め、命中精度を向上させるためのものである。ライフルリングは山の部分 (旋丘) (Land) と谷の部分 (旋底) (Groove) が並んでいる。発射弾丸には、旋丘によって刻まれる旋丘痕と、旋底により刻まれる旋底痕が、弾丸表面に残される。この痕跡は、拳銃固有のものである。

旋丘痕や旋底痕の領域には、複数の擦過痕が存在する。線条痕には、拳銃固有のきずであるものもあれば、弾丸の発射前後に付く拳銃固有でないきずもある。同一拳銃から発射された弾丸であったとしても、一致度合いが低い線条痕も多く含まれるが、異同識別を行う上で決め手となる線条痕も内在している。このような線条痕は固有線条痕と呼ばれ、鑑定をする際に試行錯誤で決定される。

3. 異同識別の技術課題と提案

3.1 技術課題

識別対象である線条痕の性質および識別課題を整理しておく。

- 鑑定の決め手となる固有線条痕を、試行錯誤を重ねることなく決定する必要がある。
- 鑑定の際の照明、検出の条件により線条痕の見え方には差が生じる。

* 原稿受付 平成 28 年 12 月 12 日

掲載決定 平成 29 年 5 月 1 日

** 広島工業大学 (広島市佐伯区三宅 2 丁目)

*** 正 会 員 広島工業大学

† 正 会 員 北海道大学大学院 (札幌市北区北 13 条西 8 丁目)

†† 日立製作所 研究開発グループ (横浜市戸塚区吉田町 292)

††† 科学警察研究所 (千葉県柏市柏の葉 6 丁目 3 番地 1)

‡ 神奈川県警察科学捜査研究所 (横浜市中区山下町 155-1)

Fig.1 Rifling and striated toolmarks

Fig.2 Flow of the proposed method

- ・同一拳銃から発射された弾丸でも完全に同一の線条痕が付く訳ではなく、対応する線条痕でも類似性は低い場合が多い。
- ・二つの弾丸を比較顕微鏡により観察する際、弾丸を回転方向に対応を探しながら線条痕を比較する作業(位相合せと呼ばれる)は手間がかかる。

類似性評価をする際によく用いられる手法に正規化相関がある⁹⁾¹⁰⁾。しかし、この手法では、密に混在する対応しない線条痕が相関値を下げてしまうため、鑑定者によって固有線条痕として認識された画像(100×150画素, 10枚)であっても、正規化相

Fig.3 Histogram Intersection

関値は0.141～0.412程度と低くなってしまふ。そのため、筆者らは類似性評価手法としてLIP-HI法を提案した¹⁷⁾。本論文では、弾丸の回転方向に旋丘痕の対応付けを行う位相合せ手法、および試行錯誤で今まで決定してきた固有の線条痕の候補の抽出手法の提案を行い、LIP-HI法によって固有線条痕かどうかの判断を与える。

3.2 提案手法

今までの研究では、固有線条痕をROIとして優先順位をつけて提示することはなされていなかった。本論文では、固有線条痕のROIとしての提示を、網羅的手順ではなく短時間で効率的に実現することを目指す。提案手法の基本概念は、線条痕の存在、線条痕の本数、線条痕のdetailといったヒストグラム規範の着眼点で、インターセクションを通して対象領域をROIとして絞り込んでいき、同時に処理の負荷を低減し実用的な時間で収めること、しかも、線条痕の本数といった鑑定者の着眼点を尊重した手法として実現することにした^{10)~14)}。

本手法の全体的な流れを図2に示す。Hough変換による $\rho-\theta$ 空間を対象にしたヒストグラム類似度により旋丘痕の位相合せを行い、次に線条痕に対応した直線本数が多い領域をROIとして絞り込む。そして、ヒストグラム類似度によりROIの更なる絞込みを行う。提案手法は、Histogram Intersection (以下HI法と略す)¹⁸⁾という類似性評価手法を中核として、種々のヒストグラムデータに対するインターセクションという共通要素を抽出するという基本的アイデアによって異同識別を統一的にとらえたものである。なお、現場弾丸には変形もあるため、線条痕の多少の傾きは旋丘痕の位相合せの段階までは考慮し、傾きがある場合は幾何変換するものとした。

3.2.1 Histogram Intersection 法

まず、基本のHI法を、図3を用いて説明した後、図2の各項目について説明する。HI法において、画像 $f(x,y), g(x,y)$ 間の類似度HIは次式により表され、

$$HI = \frac{\sum_i \min_{bin[i]} \{h(f(x,y)), h(g(x,y))\}}{\sum_{bin[i]} h(g(x,y))} \quad (1)$$

評価値は最小(完全不一致)で0、最大(完全一致)で1の値をとる。例えば、図3の右上の画像を対象とする場合、弾丸方向(水平方向)の位置座標をx、回転方向(垂直方向)の位置座標をyとし、iはbinの番号とすると、 $h(f(x,y)), h(g(x,y))$ は、画像 $f(x,y), g(x,y)$ のn個のbinをもつヒストグラムをそれぞれ示し、

$\sum_i \min_{bin[i]} \{h(f(x,y)), h(g(x,y))\}$ は、binごとに画像 $f(x,y), g(x,y)$

の度数の小さい方を加算するものであり、 $\sum_{bin[i]} h(g(x,y))$ は、ヒストグラムのbinごとの度数を全て加算することで総画素数を算出するものである。

Fig.4 $\rho\theta$ space images

Fig.5 Straight line number Intersection

3.2.2 旋丘痕の位相合せ

旋丘痕の一致具合を、画像の Hough 変換により得られる $\rho\theta$ 空間の投票度数であるヒストグラムの類似度により評価する¹¹⁾¹²⁾。まず、比較する旋丘痕を対象に取得した二つの画像を、弾丸の変形を吸収すべく複数領域(ROI)に分割する。各領域に対して Hough 変換を行い、 $\rho\theta$ 空間画像を取得する。この $\rho\theta$ 空

間画像を対象に HI 値を求める。そして、旋丘痕内の複数 ROI の HI 値を加算する。旋丘痕の組合せを変えて、上記加算値を求め、これが最大となるものを対応した旋丘痕であると判断する。

図 4 に $\rho\theta$ 空間画像の一例を示す。対象画像と参照画像 1 (位相合せを行った場合)、参照画像 2 (位相をずらした場合) の $\rho\theta$ 空間画像である。それぞれを比較したものがインターセクション 1, 2 であり、式(1)の $\min_{bin[i]} \{h(f(x,y)), h(g(x,y))\}$ を計算したも

のである。この例では線条痕が横方向の直線状のキズであることから、 $\rho\theta$ 空間画像の中心部分(赤枠の範囲)を比較する。各インターセクションの赤枠の範囲の輝度値ヒストグラムをそれぞれの下部に示す。各ヒストグラムを比較すると、位相合せを行った場合には輝度値の高い範囲にも分布が広がっているが、位相をずらした場合にはその広がりが少ないことが確認できる。このように、対象画像と参照画像の各 $\rho\theta$ 空間画像のインターセクションにより得られた画像の総画素値が多いものを、旋丘痕が対応している画像であると判断する。

なお、Hough 変換には Canny フィルタを用いることにした。

3.2.3 ROI narrowing with Straight line number Intersection

異同識別において、線条痕が何本一致しているかという CMS (Consecutively Matching Striations) という概念がある²⁾。このため、共通線条痕の本数は鑑定作業で重視されることを考えると、その本数が多い箇所に照準を絞ることは、重要である。

位相合せ後に、対応線条痕の多い箇所に照準を絞るべく、着目すべき線条痕個所を、Hough 変換による直線検出数により抽出する。直線本数によるインターセクション法を Straight Line Number Intersection¹³⁾¹⁴⁾ (以下 SLNI 法) と呼ぶことにする。SLNI 法を図 5 に示す。まず、比較する二つの画像を複数の領域 ROI に分割する。各領域に対して Hough 変換を行い、直線本数を検出する。直線本数を各領域間で比較し、小さい方を各領域に割り付ける。図 3 に示した HI 法の考えである。そして、直線本数上位のものを着目すべき ROI として絞込む。なお、評価の前段階として、旋丘痕レベルでの画像位置合せを行う。

3.2.4 Precise ROI narrowing with LIP-Histogram Intersection

線条痕の類似性評価および提示のため、画像のヒストグラムの類似度により、ROI の絞込みを行う。対応しない線条痕が多数存在する課題に対応すべく、HI 法を用いることにした。HI 法は、二つの画像間で類似画素のみの加算評価となるため、対応しない線条痕の悪影響を受けないと考えられる。しかしながら、HI 法は対象範囲をヒストグラム化し、範囲内の線条痕がすべて一つのヒストグラムに投票され、共通部分として加算されるため、線条痕の位置情報が失われる。そのため、線条痕の対応を確認することが困難となる。そこで、本報告では位置情報を保存した HI 法、すなわち LIP-HI 法 (Location Information Preserved HI) を用いる。

次に、位置情報を保存するための LIP-HI 法¹⁷⁾を図 6 に示す。文献 17 記載の手続きを踏襲している。図 6 に示すように、ROI 内部を複数ブロックに分割し、各ブロックでヒストグラムを生成して HI 値を算出し、得られた HI 値を ROI 内で加算することで、ブロック単位で位置情報を保存した評価を可能としている。

なお、LIP-HI 法適用の前処理として、Canny フィルタではなく、図 7 に示す微分フィルタリングを画像に施すことにした¹⁷⁾²⁰⁾。微分の種類は種々のものが考えられるが、ここでは水平な線状のきずを強調するものとして、実験的に試行し、同図の 2 次微分形

Fig.6 LIP-Histogram Intersection

-1	-1	-1	-2	-2	-2	-1	-1	-1
2	2	2	4	4	4	2	2	2
-1	-1	-1	-2	-2	-2	-1	-1	-1

Fig.7 Second derivative filtering

Table1 Experimental conditions

Image detection conditions	
Light source	Halogen lamp 100W
Illumination	Oblique illumination
Optical system magnification	0.65x (Object-side telecentric)
Camera	CMOS sensor
Bullet attitude control	Vertical bullet+5-axis control
Image size	2,088 × 1,552 Pixels
Evaluation conditions	
Evaluation range	1,900 × 300 Pixels
ROI size	100 × 150 Pixels
Block size	100 × 5 Pixels
Minimum segment length	50 Pixels

Fig.8 Bullet images to be compared (2,088×1,552 pixels)

Fig.9 Evaluation ranges in lands

式を選定した。現場弾丸などで変形がある場合は必ずが水平になるよう幾何変換しておくこととした。

画像の平坦部では、線条痕がなくてもヒストグラムが一致し評価値が上がる。これを避けるため画像のクリッピングを行う。具体的には、評価を通して、微分フィルタリングの後に、画素の明るさが 0 となる画素をヒストグラム生成時に除外している。なお、微分フィルタリング後に、128 階調を加えてヒストグラム表示した。

4. 実験条件と結果

4.1 実験条件

実験条件を表 1 に示す。同一の拳銃による試射弾丸の画像を用いる。8 枚の試射弾丸画像を A1～A8 と名付けた。ROI への分割について述べる。まず ROI の寸法を決める必要があるため、いくつかの条件で試行し、横幅が 100 画素から 150 画素で LIP-HI 法が安定することを確認した¹⁶⁾。現場弾丸の変形を考慮すると寸法が小さい方がよいが、100 画素以下では線条痕の途切れなどの影響を受けて LIP-HI 法の結果が不安定になるため、100 画素とした。縦幅は旋丘痕をカバーするが、その両端の深いキズのみが LIP-HI 法を支配しないよう、これらが入らない寸法として 150 画素を選んだ。そして、この ROI で旋丘痕の画像を分割した。ROI の位置、すなわち位相の影響はほとんどないことを確認した上で、画像の端から重複なく格子状に分割した。ブロックの縦幅についても同様の評価を行い、対応する線条痕の位置ずれを許容しつつ、対応していない線条痕の誤対応を防ぐことが可能かどうかを評価し、縦幅として 5 画素を選んだ。これらの結果、ROI の寸法は 100×150 画素、ブロックの寸法は 100×5 画素とした。

旋丘痕の位相合せは全ての組合せで行った。A4 の試射弾丸画像を対象画像とし、他の試射弾丸画像を参照画像として、SLNI 法による ROI 候補の抽出および LIP-HI 法による固有線条痕 ROI の提示を行う実験を行った。そして、実験結果の妥当性を専門家に判断していただいた。

旋丘痕の位相合せでは、6 条ある旋丘痕の 6 通りの組合せにおいてそれぞれ類似度を求め、これらの合計が最も高い組合せを位相があった状態として求める。

次に、SLNI 法により絞込みがなされた上記 ROI ペアに対し、参照画像上で片方の ROI が半分重複するまで位置をずらせて、対応する ROI ペアを LIP-HI 法によって設定しなおす。実験に用いた弾丸画像の例を図 8 に示す。この二つの画像はすでに鑑定の専門家によって対応していることが確認されたものである。

図 9 に評価範囲を示す。評価は旋丘痕全体ではなく、旋丘痕の

Fig.10 $\rho\theta$ histogram similarity distribution

Fig.11 Similarities at landmark combinations

端を除いた $1,900 \times 300$ 画素とした。これは、線条痕が旋丘痕の中心部に多く残っているためである。また、LIP-HI 法では、走査範囲を SLNI 法による絞込み ROI の周辺に限定した。これは、SLNI 法による絞込み ROI の周辺に、LIP-HI 法においても高い評価値が出るであろうという考えによるものである。

4.2 実験結果

4.2.1 旋丘痕の位相合せ

図 10 に、 $\rho\theta$ 空間のヒストグラム類似度の分布を、弾丸の回転方向 (Rotation) と弾軸方向 (Bullet Axis) に対して 3 次元表示したものを示す。これは、分割した各領域の $\rho\theta$ 空間の Histogram Intersection による類似度を分布にしたものであり、弾軸方向の右側に高い値が確認できる。同図分布の体積が旋丘痕の類似度となる。A4 と A1~A3, A5~A8 のそれぞれの評価結果を図 11 に示す。旋丘痕の対応をずらしながら比較したものであ

Fig.12 Images of bullet A2 and A8 including lands

る。同図の各グラフの一番左が、位相が対応したもの、その他が対応をずらしたものとなっている。各グラフいずれも、対応しているものが最も高くなっている。

所有している八つの弾丸の画像に対して上記手法を適用した。図 11 では、A4 と A1~A3, A5~A8 を比したが、すべての組合せ、すなわち 56 通りを評価した。その結果、A2-A8, すなわち A2-A8 と A8-A2 という組合せを除く 54 通りについては、正しい位相で旋丘痕の類似度がいずれも高くなった。A2-A8 については、正しい位相は得られなかった。これは、図 12 に例を示すように A2 側の 6 条の旋丘痕のうち五つで線条痕が不鮮明であ

Fig.13 Line number distributions

Fig.14 ROIs narrowed by SLNI

り、A2-A8は上位2番目が対応する位相となった。しかし、類似度が他の弾丸の組合せと比べて60%程度と小さく、これについては、上位複数(ここでは最低でも上位2個)の位相で最終段の

Fig.15 ROIs narrowed by LIP-HI

LIP-HI まで評価することによって、最終的に正しい位相でのROIを提示することができた。ここで、A2-□、A8-□の□に入る数字は条に付けた番号を表す。なお、A2-A8の組合せにおいてA2:A8は対象画像であるA8上で領域を回転方向に少し走査最も評価値を用いているため、A2:A8とA8:A2は異なる結果になる可能性があり、これらは別なものと扱うことにした。

なお、対象とした試射弾丸では、現場弾丸のような弾丸の変形はないとみなせた。

4.2.2 SLNI 法による ROI 候補抽出

次に、SLNI 法によって得られる直線本数の分布を、図13に示す。A4-1を対象画像、A3-1を参照画像とした際の結果を示す。弾軸方向の右の方に高い値が存在していることが確認できる。インターセクションの分布上で直線本数が上位のものをROIとして絞り込む。絞り込んだROIの例を図14に示す。同図は、絞り込んだROI(上位10個)を参照画像上に重ねて示したものである。画像上で中央位置に、ROIを重ねた。明瞭な線条痕が対応しているものがあることが確認できる。

4.2.3 LIP-HI 法による固有線条痕 ROI の提示

次に、SLNI 法により絞り込みがなされた上記ROIペアに対し、対応するROIペアをLIP-HI法によって設定し直した。得られたROIペアおよび得られた類似度分布を図15に示す。図14の(a)、(b)、(i)、(j)が類似度上位に選ばれたものである。同図(f)など不鮮明な対応となった線条痕をもつものは類似度下位の順位となった。図15において弾軸方向に尾根状に連続して高い値が出

ていることが確認できる。これは、線条痕の性質上、弾軸方向に連続して似通った線条痕が存在するためであり、妥当な結果であると思われる。同図各分布の最大 HI 値を各 ROI の評価値とする。同図左に、HI 値上位 4 個の ROI を参照画像上に重ねて示す。いずれも明瞭な線条痕が対応しており、類似箇所の提示ができています。これらの対応は鑑定の専門家によって妥当性を検証頂いた。鑑定者は、選ばれた ROI に基づき鑑定書を完結することができる。なお、線条痕の本数に応じて LIP-HI が高い類似度をもつなど、LIP-HI の特性は文献 17 に記載した通りである。

ROI の絞込みについては、SLNI 法で直線本数により ROI を 10 個に絞込み、そこから LIP-HI 法で、下位 6 つの HI 値が上位 4 つの HI 値よりも比較的小さかったことから、上述したように、上位 4 つを選んだ。何個までを候補とするのかを一義的に決めるのは難しいが、LIP-HI 法の評価値に対するしきい値で判断することにした。

このように、鑑定者が納得する結果が得られるかどうかを評価し、二つの弾丸に関して旋丘痕の対応付け(位相合せ)、対応する線条痕の多い箇所への絞込みといった提案手順が有効に動作することが確認できた。

4.2.4 処理時間

本手法の実行時間は、Intel core i7-4790 3.60GHz メモリ 8GB なる条件下で、一連の提案全体で 580s となった。内訳は旋丘痕の位相合せが 420s、SLNI 法が 60s、LIP-HI 法が 100s であった。

LIP-HI 法では、複数領域に分割した各領域すべてを ROI 候補とした場合、ROI 数は 270,000 個となる。ROI 一つあたりの評価時間が 10.0s であるため、旋丘痕の位相が合っていたとしても、六条の旋丘痕全ての評価時間は 190 日を要する。SLNI 法による ROI の絞込みによって LIP-HI 法に用いる ROI 候補数を絞り込むことで、ROI 数 270,000 個を 10 個とし、190 日を SLNI 法 60s と LIP-HI 法 100s の合計 160s に短縮した。SLNI 法は CMS を反映し、かつ高速化の鍵となっている。

なお、線条痕の途切れなどの影響を受けるため、ROI 寸法をこれ以上小さくすることは得策でなく、結果として ROI 数を増やすことはないため、対象とした範囲では時間が増加する要因はないと考えている。なお、LIP-HI 法に関しては、SLNI 法による絞込み ROI を 10 個にした時間となっており、絞込み ROI の個数によって処理時間は変わる。

以上述べたように、提案手法は、固有線条痕の絞込みを上述したように短時間で実現でき、鑑定作業を大幅に高効率化するものである。最終的に、提案した ROI 絞込み手順において、その精度と処理時間の双方において、その有効性を評価できたと考える。

文献 10 は、弾丸の異同識別可能性を論じているが、鑑定書に揭示すべき ROI を提示しているわけではなく、鑑定者は識別の決め手となる箇所を新たに探す必要がある。鑑定書に掲載すべき固有線条痕を ROI として提示することは、本論文が初めての試みと考えており、専門家による目視で数日から数週間かかることが通常の処理時間であることを考えると、580s という時間は決して長くないものと考えている。

5. 結 言

弾丸の鑑定者に、固有線条痕を ROI として優先順位をつけて提示することを目的として、線条痕の存在、線条痕の本数、線条痕の detail といったヒストグラム規範の着眼点で、インターセクションを通して対象領域を ROI として順次絞り込んでいき、同時に処

理の負荷を低減し実用的な時間で収めること、しかも、線条痕の本数といった鑑定者の着眼点を尊重した手法を提案した。

具体的には、Hough 変換による ρ θ 空間を対象にした Histogram Intersection による類似度を用いた旋丘痕の位相合せ、Hough 変換により得られる直線本数に着目した ROI 絞込み、絞り込まれた ROI を対象にした画像の HI 法による類似性評価について述べた。

提案手法を評価した結果、弾丸の旋丘痕の対応付けを可能とし、さらに画像に潜んでいる固有の線条痕を適切に絞り込んで、鑑定者に適切に提示することが可能であるという評価結果を得た。また、処理時間は 580s (絞込み ROI が 10 個) であることを確認した。従って、提案手法は鑑定作業の CMS 共通線条痕の本数といった鑑定者の考えを踏襲しつつ、数日から数週間を要する鑑定作業の大幅な時間短縮を実現したことになる。

このように、提案手法は弾丸に固有の線条痕を鑑定者に提示することを、許容し得る時間で実現可能としたもので、有効な手法であると考えられる。提案手法は、弾丸異同識別支援に大きく貢献し得るものである。

今後の課題は、現場弾丸の評価である。さらには、弾丸の 3 次元計測データに提案手法を適用することである。

参 考 文 献

- 1) 高取 健彦：捜査のための法科学，第二部（法工学・法化学），株式会社法令文社，東京都（2005）。
- 2) 内山 常雄：線条痕の画像解析，日本写真学会誌，67，4（2006）361。
- 3) 五十嵐 直明，津村 徳道，羽石 秀昭，三宅 洋一：線条痕画像解析による発射銃器の同定，日本写真学会誌，60，2（1997）83。
- 4) Wei Chu, John Song, Theodore V. Vorburger, Robert Thompson, and Richard Silver : Selecting Valid Correlation Areas for Automated Bullet Identification System Based on Striation Detection, J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol., 116, 3（2011）。
- 5) F. León : Automated comparison of firearm bullets, Forensic Sci. Int., 156,（2006）40。
- 6) D. Li : Ballistics Image Processing and Analysis for Firearm Identification, Image Processing, INTECH（2009）。
- 7) Z. Huang, J. Leng : An Online Ballistics Imaging System for Firearm Identification, 2nd ICSPS（2010）。
- 8) Wei Chu, Robert M. Thompson, John Song and Theodore V. Vorburger : Automatic identification of bullet signatures based on consecutive matching striae (CMS) criteria, Forensic Sci. Int., 231,（2013）137。
- 9) 前田 俊二，丸山 重信，飯塚 正美，仁戸部 勤，中山 透：線条痕顕在化と画像分割照合による発射弾丸の異同識別方式の検討，精密工学会誌，79，5，（2013）423。
- 10) 米田 圭吾，金子 俊一，渋谷 久恵，前田 俊二，仁戸部 勤，飯塚 正美，中山 透：画像解析に基づく線条痕の特徴強調と局所照合による発射弾丸の異同識別，精密工学会誌，80，12，（2014）1182。
- 11) 西村 晃紀，前田 俊二，仁戸部 勤，安野 拓也，飯塚 正美，中山 透，金子 俊一，渋谷 久恵，Hough 変換による ρ θ 空間を対象とした Histogram Intersection と弾丸異同識別への適用，R16-22-01，平成 28 年（第 67 回）電気・情報関連学会 中国支部連合大会（2016.10.22）。
- 12) 西村 晃紀，前田 俊二，金子 俊一，渋谷 久恵，仁戸部 勤，安野 拓也，飯塚 正美，中山 透，弾丸の異同識別のための線条痕の特徴による ROI の選択，D-34，日本法科学技術学会第 22 回学術集会（2016.11.11）。
- 13) 西村 晃紀，前田 俊二，金子 俊一，渋谷 久恵，中山 透，仁戸部 勤，安野 拓也，飯塚 正美，弾丸異同識別のための固有線条痕の検出方法の提案，ISI-15，第 22 回画像センシングシンポジウム SSI2016（2016.6.8）。
- 14) 西村 晃紀，片山 拓哉，前田 俊二，金子 俊一，渋谷 久恵，仁戸部 勤，安野 拓也，飯塚 正美，中山 透，固有線条痕を手がかりとした弾丸画像の対応付け，A-8-24，2016 年電子情報通信学会ソサイエティ大会（2016.9.21）。
- 15) Michael J. Swain, Dana H. Ballard : Color Indexing, International Journal of Computer Vision, 7, 1（1991）11。
- 16) 中田 英紀，藤井 周，前田 俊二，飯塚 正美，安野 拓也，仁戸部 勤，中山 透，金子 俊一，渋谷 久恵：試射弾丸の画像類似性評価のための局所領域の寸法決定，H-006，FIT2015 第 14 回情報科学技術フォーラム（2015.9）。

- 17) 藤井 周, 前田 俊二, 荒木 智行, 仁戸部 勤, 金子 俊一, 渋谷 久恵, 安野 拓也, 飯塚 正美, 中山 透, 弾丸異同識別のための線条痕の重み付けと位置を保存した Histogram Intersection による類似性評価手法の提案 精密工学会誌, **82**, 7 (2016) 672.
- 18) 藤井 周, 大西 淳, 中田 英紀, 前田 俊二, 飯塚 正美, 安野拓也, 仁戸部 勤, 中山 透, 金子 俊一, 渋谷 久恵: 試射弾丸の異同識別を目的としたヒストグラムを用いた類似度分布の取得, IS1-B7, DIA2015 (2015.3).
- 19) 藤井 周, 大西 淳, 中田 英紀, 前田 俊二, 飯塚 正美, 安野拓也, 仁戸部 勤, 中山 透, 金子 俊一, 渋谷 久恵: 試射弾丸の異同識別を目的とした Histogram Intersection と共通線条痕への重み付けに基づく類似性評価手法, 22-8, 299-300, 第 66 回電気・情報関連学会中国支部連合大会(2015.10).
- 20) 西村 晃紀, 片山 拓哉, 藤井 周, 前田 俊二, 金子 俊一, 渋谷 久恵, 仁戸部 勤, 安野 拓也, 飯塚 正美, 中山 透, 弾丸の異同識別における線条痕の強調, C21, 精密工学会, 2016 年度春季大会(2016.3.15).