

## Pendekatan Pengesanan Titik Sauh Secara Automatik bagi Kesan Pin Peletup Senjata Api (Automatic Anchor Point Detection Approach for Firearms Firing Pin Impression)

ZUN LIANG CHUAN, NOR AZURA MD GHANI, CHOONG-YEUN LIONG\* & ABDUL AZIZ JEMAIN

### ABSTRAK

Oleh sebab kejadian jenayah bersenjata api semakin berleluasa, pengesanan senjata api yang digunakan oleh penjenayah amat diperlukan sebagai bahan bukti dalam mahkamah. Beberapa sistem pengesanan senjata api telah diutarakan sebagai pengganti kepada cara penyiasatan tradisional yang amat bergantung kepada kepakaran ahli balistik. Pemetakan rantau tumpuan (ROI) berdasarkan kedudukan titik sauh (PAP) sempadan bulatan kesan pin peletup pada tapak kelongsong peluru merupakan langkah yang amat penting dalam sistem pengesanan senjata api automatik. Walau bagaimanapun, kaedah yang digunakan dalam kajian lepas bagi mengesan PAP sempadan bulatan tersebut adalah sangat kompleks dan memerlukan masa pemprosesan yang panjang. Kajian ini menerokai algoritma yang efisien dan berkemampuan untuk mengesan PAP sempadan bulatan secara automatik. Algoritma yang diutarakan merupakan gabungan daripada penapis penajaman reruang, penormalan histogram, pengambangan dan penganggar kuasa dua terkecil tak berpemberat. Dua kaedah pengambangan yang terkenal telah diuji dan dibandingkan, iaitu kaedah pengambangan berasaskan pengelompokan dan kaedah berasaskan entropi. Di samping itu, penerokaan kesan saiz dan bentuk ROI terhadap kadar pengelasan senjata api turut dipersembahkan. Sebanyak 747 imej kesan pin peletup jenis sempadan bulatan peletup yang dihasilkan oleh lima pucuk pistol yang berlainan daripada jenis yang sama digunakan untuk menguji algoritma yang diutarakan. Kadar pengelasan imej kesan pin peletup yang memberangsangkan (> 95%) telah dicapai dengan algoritma yang dicadangkan. Kajian juga mendapati bahawa saiz dan bentuk pemetakan ROI mempunyai kesan langsung terhadap kadar pengelasan senjata api.

*Kata kunci:* Balistik forensik; rantau tumpuan; senjata api; titik sauh

### ABSTRACT

Since the number of crimes involving firearms is becoming rampant, identification of firearms used by criminals is a crucial step in the court. Several automatic firearm identification systems have been developed to improve on the traditional investigation method which relies heavily on the expertise of the forensic ballistics experts. An important step in automatic firearm identification is partitioning of the region of interest (ROI) based on the position of the anchor point (PAP) within the circular boundary of a firing pin impression. However, in the previous studies, the methods used to determine the PAP of a circular boundary are very complex and time consuming. This study explored algorithms that are efficient and able to detect the anchor point of a circular boundary automatically. The proposed algorithms are a combination of sharpening spatial filter, histogram normalization, thresholding and an unweighted least square estimator. Two popular threshold selection methods, namely clustering-based and entropy-based threshold selection methods, have been investigated and compared. In addition, exploration on the effects of size and shape of ROI on the firearm classification accuracy rates were discussed. A total of 747 images of circular boundary firing pin impression produced by five different pistols of the same model were used to test the proposed algorithms. Encouraging classification rates of the firing pin impression images (> 95%) were achieved with the proposed algorithms. This study also found that the size and the shape of the ROI partition have a direct effect on the firearms classification rates.

*Keywords:* Anchor point; firearms; forensic ballistics; region of interest

### PENGENALAN

Jenis senjata api yang digunakan oleh penjenayah dapat dipastikan melalui kelongsong peluru yang ditemui di tempat jenayah berlaku. Dalam Makmal Forensik Malaysia, penyiasatan senjata api yang digunakan oleh penjenayah dikendalikan dengan menggunakan kaedah pepadanan imej bagi tapak kelongsong peluru atau anak

peluru (Ghani et al. 2009, 2010). Walau bagaimanapun, kaedah ini amat bergantung kepada kepakaran ahli balistik dan memerlukan masa yang panjang. Tambahan pula, kaedah ini tidak mampu menampung bebanan bilangan jenayah bersenjata api yang semakin meningkat. Oleh itu, sistem pengesanan senjata automatik perlu dibangunkan. Beberapa sistem automatik telah diutarakan oleh para

penyelidik dan sistem yang diutarakan melibatkan fasa-fasa utama yang dipamerkan dalam Rajah 1. Dalam fasa pemetakan imej, langkah yang kritikal adalah mengesan kedudukan titik sauh (PAP) iaitu titik  $C = (X_c, Y_c)'$ , bagi sempadan bulatan kesan pin peletup pada tapak kelongsong peluru. Kesan pada tapak terhasil apabila pin peletup mengetuk tapak kelongsong peluru semasa tembakan berlaku.

Merujuk kepada kajian Xin et al. (2000) dan Zhou et al. (2001), mereka telah menggunakan penganggar penjelmaan Hough untuk mengesan PAP sempadan bulatan kesan pin peletup pada tapak kelongsong peluru. Di samping itu, Li (2003) pula telah menggunakan kaedah penganggar kuasa dua terkecil penyuaian elips ke atas sistemnya untuk mengesan PAP sempadan bulatan kesan pin peletup. Walau bagaimanapun, kedua-dua kaedah tersebut adalah sangat kompleks dan memerlukan masa pemprosesan yang panjang. Suatu sistem pengecaman senjata api automatik yang cekap dan berkesan telah diutarakan oleh Ghani et al. (2010). Akan tetapi, pengesanan PAP sempadan bulatan kesan pin peletup dalam sistem tersebut dilaksanakan secara manual. Kesemua kajian lepas yang dibincang dan kajian ini memberi tumpuan kepada kesan pin peletup kerana kesan ini merupakan kesan yang paling teguh dan berkesan dalam pengecaman senjata api (Geradts et al. 2001; Ghani et al. 2010).

Sebanyak lima pucuk pistol jenis Vektor Parabellum SP1 9 mm telah digunakan dalam kajian ini dan masing-masing diberi label A, B, C, D, E untuk tujuan pengecaman. Rajah 2 menunjukkan sampel imej kesan pin peletup jenis sempadan bulatan yang terbentuk pada tapak kelongsong peluru daripada kelima-lima pistol tersebut. Tanda 'x' dalam rajah menunjukkan PAP sempadan bulatan kesan

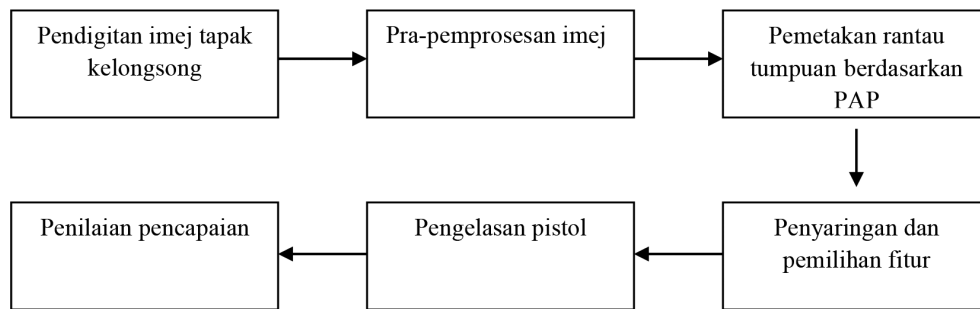
pin peletup manakala bulatan putih merupakan sempadan bulatan kesan pin peletup berjejari  $S$  (Ghani 2010). Saiz jejari  $S$  adalah berbeza daripada satu imej ke imej yang lain dan perlu dianggarkan. Sempadan bulatan kesan pin peletup ini juga merupakan rantau tumpuan ROI yang ingin dipetakan daripada tapak kelongsong dalam kajian ini.

Sebelum pemetakan ROI dilaksanakan, PAP perlu ditentukan terlebih dahulu kerana PAP sempadan bulatan kesan pin peletup adalah berbeza bagi setiap imej. Oleh yang demikian, kajian ini dijalankan bertujuan membangunkan satu algoritma baru yang berkemampuan mengesan PAP sempadan bulatan kesan pin peletup secara automatik dan cekap. Di samping itu, kajian ini juga bertujuan meneroka kesan saiz jejari dan bentuk pemetakan ROI yang berbeza terhadap kadar pengelasan senjata api dan masa pemprosesan.

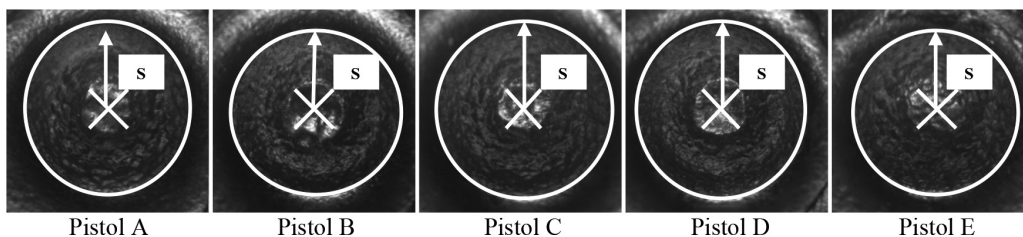
KAEDAH PELAKSANAAN ALGORITMA PENGESANAN KEDUDUKAN TITIK SAUH (PAP)

Langkah-langkah pelaksanaan algoritma pengesanan PAP yang diutarakan menggunakan pakej R adalah seperti berikut:

1. Input matriks imej,  $I = [g(x,y)]_{M \times N}$  dengan  $x = 0, 1, \dots, M-1$  dan  $y = 0, 1, \dots, N-1$  dan nilai keamatan,  $g \in \Omega = \{i/255; i = 0, 1, \dots, T = 255\}$ .
2. Penapis penajaman ruwang dilaksanakan ke dalam matriks  $I$ . Tujuan penggunaan penapisan ini adalah untuk menonjolkan sisi sempadan bulatan kesan pin peletup dan melaraskan peralihan kontras antara sempadan bulatan kesan pin peletup dan latar belakangnya (Shih 2010). Penapis penajaman yang digunakan dalam kajian ini adalah penapis *Laplacian*. Dalam langkah ini, suatu imej baru,  $I_L = [g_L(x,y)]_\Delta$



RAJAH 1. Fasa-fasa utama bagi sistem pengecaman senjata api



RAJAH 2. Sampel imej sempadan bulatan kesan pin peletup berjejari  $S$

yang bersaiz  $\Delta = (M-2) \times (N-2)$  dihasilkan selepas nilai keamatan pada matriks  $\mathbf{I}$  digantikan dengan nilai gradien yang diperoleh melalui fungsi berikut:

$$g_L(x, y) = 255 \text{vec}(\mathbf{K})' \text{vec}(\mathbf{W}), \quad (1)$$

dengan,

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} g(x-1, y+1) & g(x, y+1) & g(x+1, y+1) \\ g(x-1, y+0) & g(x, y+0) & g(x+1, y+0) \\ g(x-1, y-1) & g(x, y-1) & g(x+1, y-1) \end{bmatrix},$$

$\text{vec}(\cdot)$  pemvektoran matriks,  $\mathbf{W}$  sub-matriks  $\mathbf{I}$  dan  $x, (y) = 1, 2, \dots, M-2, (N-2)$ .

3. Nilai unsur matriks  $\mathbf{I}_L$  tidak berada dalam  $\{i/255; i = 0, 1, \dots, T = 255\}$ . Oleh itu, penormalan histogram perlu dilaksanakan menggunakan fungsi berikut:

$$g_N(x, y) = \frac{1}{255} \left[ \frac{g_L(x, y) - \min g_L}{\max g_L - \min g_L} \times 255 \right]. \quad (2)$$

Hasilnya adalah matriks imej baru,  $\mathbf{I}_N = [g_N(x, y)]_{\Delta}$ .

4. Pengembangan dilaksanakan dengan menjelmakan imej  $\mathbf{I}_N$  kepada imej yang bersifat perdua. Dua kaedah pengembangan yang luas digunakan, iaitu kaedah berasaskan pengelompokan (Gupta et al. 2007; Leng & Huang 2012; Otsu 1979) dan kaedah berasaskan entropi (Kapur et al. 1985; Tang et al. 2011) dipilih untuk tujuan perbandingan. Nilai ambang,  $\tilde{k}$ , bagi kedua-dua kaedah masing-masing ditentukan dengan menggunakan (3) dan (4) berikut:

$$\tilde{k} = \frac{1}{255} \arg \left( \max_k \left[ (\mu_T - \mu_k)^2 \frac{\omega_k}{1 - \omega_k} \right] \right). \quad (3)$$

$$\tilde{k} = \frac{1}{255} \arg \left( \max_k \left[ \log(\omega_k(1 - \omega_k)) + \frac{\pi_k(2\omega_k - 1) - \pi_T \omega_k}{\omega_k(1 - \omega_k)} \right] \right). \quad (4)$$

dengan

$$\mu_k = \sum_{\theta=0}^k 255\theta P_N(\theta),$$

$$\omega_k = \sum_{\theta=0}^k P_N(\theta)$$

$$\pi_k = \sum_{\theta=0}^k P_N(\theta) \log P_N(\theta),$$

$$P_N(\theta) = \frac{1}{\Delta} \sum_{x,y} I(g_N(x, y) = 255\theta),$$

$I(\cdot)$  suatu fungsi penunjuk dan

$$\theta = \{i/255; i = 0, 1, \dots, T = 255\}.$$

Menerusi nilai ambang yang ditentukan di atas, suatu imej perdua baru terhasil, iaitu matriks  $\mathbf{I}_B = [g_B(x, y)]_{\Delta}$  dengan:

$$g_B(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{untuk } g_N(x, y) \geq \tilde{k} \\ 0 & \text{untuk } g_N(x, y) < \tilde{k} \end{cases}.$$

5. PAP dapat dianggarkan selepas  $\mathbf{I}_B$  diperoleh dengan menggunakan penganggaran kaedah kuasa dua terkecil tak berpemberat (Thomas & Chan 1989; Wu & Yu 2009). PAP pada titik  $(X_C, Y_C)$  untuk sempadan bulatan kesan pin peletup dianggarkan menggunakan hubungan berikut:

$$\begin{bmatrix} X_C \\ Y_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2(\alpha_{10}^2 \alpha_{00} - \lambda \alpha_{20}) & 2(\alpha_{10} \alpha_{01} - \lambda \alpha_{11}) \\ 2(\alpha_{10} \alpha_{01} - \lambda \alpha_{11}) & 2(\alpha_{01}^2 \alpha_{00} - \lambda \alpha_{02}) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \alpha_{10}(\alpha_{20} - \alpha_{02}) - \lambda(\alpha_{12} + \alpha_{30}) \\ \alpha_{01}(\alpha_{20} - \alpha_{02}) - \lambda(\alpha_{21} - \alpha_{03}) \end{bmatrix}, \quad (5)$$

dengan

$$\alpha_{ab} = \sum_{x,y} x^a y^b g_B(x, y),$$

$$\lambda = \sum_{x,y} g_B(x, y).$$

#### PENENTUAN RANTAU TUMPUAN (ROI) DAN PENYARINGAN FITUR

Ciri-ciri seperti tekstur, bentuk dan jejari yang disaring daripada ROI dapat dipersembahkan sebagai set fitur imej. Pengelasan senjata api boleh diperoleh seandainya set fitur imej yang disaring berkemampuan meminimumkan variasi dalam set fitur dan memaksimumkan variasi antara set fitur. Dalam kertas ini, sebanyak tujuh fitur momen ortogon Legendre seperti yang dicadangkan oleh Ghani (2010) telah disaring, iaitu  $L_{10}, L_{11}, L_{20}, L_{02}, L_{12}, L_{21}$  dan  $L_{22}$ . Momen yang terpilih ini dihasilkan berdasarkan fungsi berikut:

$$L_{pq} = \frac{(2p+1)(2q+1)}{4} \sum_{s=0}^p \sum_{t=0}^q c_{ps} c_{tq} m_{st}, \quad p, q = 0, 1, 2, \dots, \quad (6)$$

dengan pekali  $c_{ps}$  dan  $c_{tq}$  dan momen geometri,  $m_{st}$  masing-masing ditakrifkan sebagai:

$$c_{ps} = \begin{cases} \frac{(-1)^{(p-s)/2} (p+s)!}{2^p \left(\frac{p-s}{2}\right)! \left(\frac{p+s}{2}\right)! s!}; & (p-s) \text{ genap} \\ 0 & ; (p-s) \text{ ganjil} \end{cases}.$$

$$m_{st} = \sum_{x,y} \left( \frac{2x}{J-1} - 1 \right)^s \left( \frac{2y}{J-1} - 1 \right)^t g(x, y).$$

Selain daripada momen ortogon Legendre, terdapat momen-momen lain yang amat terkenal disaring sebagai fitur termasuklah momen geometri (Ghani et al. 2009,

2010), momen Hu (Hu 1962; Pattanachai et al. 2012), momen Pan-Keane (Pan & Keane 1994) dan momen Tchebichef (Mukundan et al. 2001; Shu et al. 2010). Selepas kesemua momen ini diuji dengan menggunakan data kajian ini, hasil kajian menunjukkan bahawa momen ortogon Legendre merupakan momen yang paling cekap berbanding dengan momen-momen yang dinyatakan di atas. Di samping itu, momen Zernike (Radhika et al. 2011; Teague 1980) juga merupakan momen yang amat terkenal disaring sebagai set fitur dalam aplikasi pengecaman pola. Walau bagaimanapun, momen Zernike tidak dipertimbangkan dalam makalah ini. Ini kerana momen Zernike merupakan momen yang rumit dan memerlukan masa pemprosesan yang panjang berbanding dengan momen ortogon Legendre. Dengan itu, momen ortogon Legendre dipilih sebagai fitur untuk pengecaman.

Kajian ini bertujuan untuk menilai kecekapan algoritma yang dicadangkan untuk pelbagai bentuk dan saiz ROI yang berlainan. Bentuk dan saiz ROI dikaji kerana ia boleh memberi kesan kepada masa pemprosesan dan nilai fitur yang terhasil. Tujuh fitur momen ortogon Legendre yang disaring daripada matriks ROI,  $\xi = [g(x_0, y_0)]_{J \times J}$ , dengan saiz jejari pemetakan,  $J = S/\delta$ ;  $\delta = 1, 2, 4, 6, 8, 10$  dan  $x_0 = 0, 1, \dots, J-1, y_0 = 0, 1, \dots, J-1$  dikaji. Saiz jejari pemetakan ditentukan dengan menjadikan PAP, seperti yang dianggarkan daripada algoritma, sebagai pusat rujukan ROI. Saiz jejari pemetakan terbesar,  $J = S$  yang disajikan di atas merupakan saiz yang ditentukan secara manual dalam kajian Ghani (2010). Di samping saiz ROI, bentuk ROI, iaitu bulatan dan segi empat sama, juga dikaji. Kecekapan algoritma yang dicadangkan ditentukan dengan mengambil kira kadar pengelasan dan masa pemprosesan algoritma. Algoritma yang diutarakan diisytiharkan baik sekiranya kadar pengelasan senjata api adalah melebihi 90% dan masa pemprosesan algoritma adalah singkat.

#### PENILAIAN PENCAPAIAN DAN PERBINCANGAN

Kajian ini melibatkan sebanyak 747 imej kesan pin peletup jenis sempadan bulatan berjejari  $S$  dengan 150 imej masing-masing dihasilkan daripada tembakan pistol A, B, C manakala 149 imej dan 148 imej pula dihasilkan daripada tembakan pistol D dan E. Analisis pengesanan titik sauh dan penyaringan fitur imej telah dilaksanakan dengan pakej R ke atas kesemua imej dengan saiz jejari

pemetakan ROI yang berbagai. Jadual 1 menunjukkan kadar pengelasan senjata api, manakala Jadual 2 menunjukkan jumlah masa pemprosesan yang diperuntukkan bagi keseluruhan proses meliputi pengesanan PAP, pemetakan ROI dan penyaringan fitur daripada ROI. Rajah 3 dan 4 menggambarkan perbandingan yang lebih jelas antara keempat-empat algoritma daripada segi kadar pengelasan dan masa pemprosesan yang diperlukan.

Merujuk kepada Jadual 1, didapati kadar pengelasan senjata api bagi pemetakan ROI bersaiz  $S/2$  dan  $S/4$  melebihi 90%. Namun demikian, saiz  $S/4$  menghasilkan kadar pengelasan tertinggi bagi kesemua algoritma. Ini ditunjukkan dalam Rajah 3 yang juga jelas mempamerkan bahawa kadar pengelasan bagi ROI segi empat sama (ES dan PS) adalah lebih tinggi berbanding dengan ROI bulatan (EB dan PB) bagi kedua-dua saiz jejari  $S/2$  dan  $S/4$ . Jadual 1 juga menunjukkan kadar pengelasan adalah hampir sama bagi kedua-dua kaedah pengambangan yang digunakan untuk saiz ROI bersamaan dengan  $S/2$  dan  $S/4$ . Ini bermakna kedua-dua kaedah pengambangan mampu memberikan kadar pengelasan yang serupa.

Berdasarkan Jadual 2 dan Rajah 4, jelas ditunjukkan bahawa jumlah masa pemprosesan adalah berkadar dengan saiz pemetakan. Jumlah masa pemprosesan untuk proses pengesanan, pemetakan dan penyaringan fitur daripada ROI berbentuk segi empat sama adalah jauh lebih cepat berbanding dengan rantau tumpuan berbentuk bulatan. Di samping itu, Rajah 4 juga menunjukkan bahawa jumlah masa pemprosesan dengan penggunaan kaedah pengambangan entropi (ES dan EB) adalah lebih tinggi daripada kaedah pengambangan pengelompokan (PS dan PB) secara keseluruhannya.

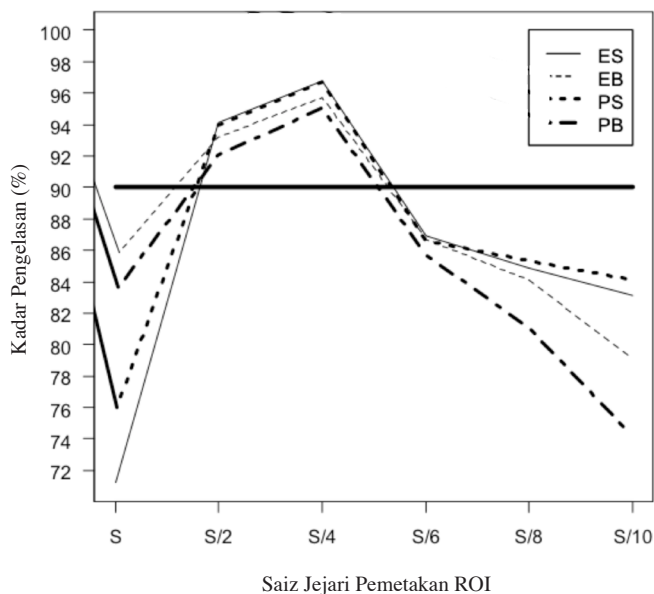
Berdasarkan kadar pengelasan dan masa pemprosesan yang diperoleh, pengesanan PAP dengan menggunakan kaedah pengambangan berasaskan pengelompokan dan seterusnya pemetakan dan penyaringan fitur daripada ROI berbentuk segi empat sama boleh dirumuskan sebagai algoritma yang berpotensi untuk digunakan dalam sistem pengecaman senjata api automatik.

#### KESIMPULAN

Kajian ini telah mengutarakan suatu algoritma yang memberangsangkan dalam pengesanan PAP sempadan bulatan kesan pin peletup pada tapak kelongsong peluru. Kajian ini juga mendapati bahawa bentuk dan saiz

JADUAL 1. Kadar pengelasan senjata api (%) bagi keempat-empat algoritma yang diutarakan dengan saiz jejari pemetakan ROI yang berbeza

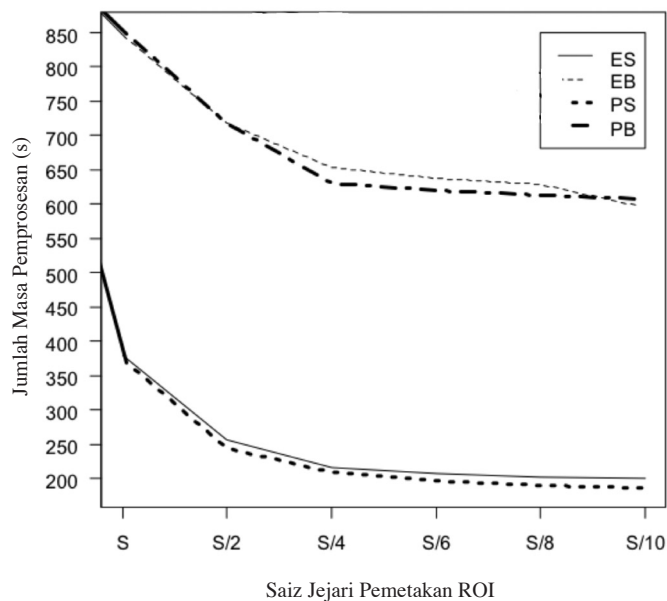
Pengambangan	Bentuk ROI	Singkatan	Saiz jejari pemetakan ROI					
			S	S/2	S/4	S/6	S/8	S/10
Pengelompokan	Segi empat sama	PS	75.8	94.0	96.7	86.6	85.3	84.1
Entropi	Segi empat sama	ES	71.2	94.1	96.8	86.9	84.9	83.1
Pengelompokan	Bulat	PB	83.4	92.1	95.0	85.7	81.1	74.2
Entropi	Bulat	EB	85.6	93.2	95.7	86.7	84.1	79.1



RAJAH 3. Perbandingan kadar pengelasan senjata api (%) bagi keempat-empat algoritma yang diutarakan dengan saiz jejari pemetakan ROI yang berbeza

JADUAL 2. Jumlah masa pemprosesan (s) bagi keempat-empat algoritma yang diutarakan dengan saiz jejari pemetakan ROI yang berbeza

Pengembangan	Bentuk ROI	Singkatan	Saiz jejari pemetakan ROI					
			S	S/2	S/4	S/6	S/8	S/10
Pengelompokan	Segi empat sama	PS	375.0	244.4	208.6	197.1	190.8	185.8
Entropi	Segi empat sama	ES	379.5	256.3	217.0	208.3	202.0	199.8
Pengelompokan	Bulat	PB	852.8	718.0	630.1	619.4	612.2	607.9
Entropi	Bulat	EB	845.8	717.6	653.6	637.3	628.8	596.1



RAJAH 4. Perbandingan jumlah masa pemprosesan (s) keempat-empat algoritma yang diutarakan dengan saiz jejari pemetakan ROI yang berbeza



jejari pemetakan ROI daripada tapak kelongsong peluru mempengaruhi kadar pengelasan senjata api dan masa pemrosesan. Walaupun PAP sempadan bulatan kesan pin peletup dapat ditentukan secara automatik, namun saiz jejari pemetakan ROI yang digunakan dalam kajian ini ditentukan secara manual. Oleh itu, penerokaan terhadap kaedah yang berkemampuan menentukan saiz bagi sempadan bulatan kesan pin peletup pada tapak kelongsong peluru perlu dipertimbangkan dalam kajian selanjutnya. Langkah ini adalah penting ke arah menghasilkan sistem pengesanan senjata api automatik yang lebih cekap untuk menggantikan kaedah tradisional yang memerlukan kepakaran manusia yang amat terhad dan masa pengesanan senjata api yang agak panjang.

#### PENGHARGAAN

Penulis ingin merakamkan penghargaan kepada Ketua Penolong Pengarah Forensik Jabatan Siasatan Jenayah dan kesemua warga Seksyen Balistik, Makmal Forensik Polis Diraja Malaysia, atas bantuan peralatan dan segala kerjasama yang diberikan. Terima kasih kepada Universiti Kebangsaan Malaysia (UKM-ST-06-FRGS0183-2010) dan Kementerian Pengajian Tinggi Malaysia kerana telah membiayai penyelidikan ini. Penyelidikan ini turut dibiayai melalui geran DIP-2012-15.

#### RUJUKAN

- Geradts, Z., Bijhold, J., Hersen, R. & Murtagh, F. 2001. Image matching algorithms for breech face marks and firing pins in a database of spent cartridge cases of firearms. *Forensic Science International* 119(1): 97-106.
- Ghani, N.A., Liang, C-Y. & Jemain, A.A. 2009. Analysis of geometric moments as features for identification of forensic ballistics specimen. *Lecture Notes in Computer Science: LNCS 5518*. Berlin: Springer.
- Ghani, N.A. 2010. Analisis spesimen balistik forensik untuk pengesanan senjata api. Tesis Dr. Fal, Pusat Pengajian Sains Matematik, Universiti Kebangsaan Malaysia (tidak diterbitkan).
- Ghani, N.A., Liang, C-Y. & Jemain, A.A. 2010. Analysis of geometric moments as features for firearm identification. *Forensic Science International* 198(1-3): 143-149.
- Gupta, M.R., Jacobson, N.P. & Garcia, E.K. 2007. OCR binarization and image pre-processing for searching historical documents. *Pattern Recognition* 40: 389-397.
- Hu, M-K. 1962. Visual pattern recognition by moment invariants. *IRE Transactions on Information Theory* 8(2): 179-187.
- Kapur, J.N., Sahoo, P.K. & Wong, A.K.C. 1985. A new method for gray-level picture thresholding using the entropy of the histogram. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing* 29: 273-285.
- Leng, J. & Huang, Z. 2012. On analysis of circle moments and texture features for cartridge images recognition. *Expert Systems with Applications* 39: 2092-2101.
- Li, D.G. 2003. Image processing for the positive identification of forensic ballistics specimens. *Proceedings of the 6th International Conference on Information Fusion 2003*.
- Mukundan, R., Ong, S.H. & Lee, P.A. 2001. Image analysis by Techebichef moments. *IEEE Transactions on Image Processing* 10(9): 1357-1364.
- Otsu, N. 1979. A threshold selection method form gray-level histograms. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics* SMC-9(1): 62-66.
- Pan, F. & Keane, M. 1994. A new set of moment invariants for handwritten numeral recognition. *Proceedings of the International Conference on Image Processing*, hlm 154-158.
- Pattanachai, N., Covavisaruch, N. & Sinthanayothin, C. 2012. Tooth recognition in dental radiographs via Hu's moment invariants. *Proceedings of the 9th International Conference on Electrical Engineering/ Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology*, hlm. 1-4.
- Radhika, K.R., Venkatesha, M.K. & Sekhar, G.N. 2011. An approach for on-line signature authentication using Zernike moments. *Pattern Recognition Letters* 32: 749-769.
- Shih, F.Y. 2010. *Image Processing and Pattern Recognition: Fundamentals and Techniques*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons.
- Shu, H., Zhang, H., Chen, B., Haigron, P. & Luo, L. 2010. Fast computation of Tchebichef Moments for binary and grayscale images. *IEEE Transactions on Image Processing* 19(12): 3171-3180.
- Tang, Y., Mu, W., Zhang, Y. & Zhang, X. 2011. A fast recursive algorithm based on fuzzy 2-partition entropy approach for threshold selection. *Neurocomputing* 74(17): 3072-3078.
- Teague, M.R. 1980. Image analysis via the general theory of moments. *Journal of the Optical Society of America* 70(8): 920-930.
- Thomas, S.M. & Chan, Y.T. 1989. A simple approach for the estimation of circular arc center and its radius. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing* 45: 362-370.
- Wu, W-Y. & Yu, W-B. 2009. Subpixel detection of circular objects using geometric property. *World Academy of Science, Engineering and Technology* 56: 236-240.
- Xin, L.P., Zhou, J. & Rong, G. 2000. A cartridge identification system for firearms authentication. *Proceedings of the 5th International Conference on Signal Processing, WCCC-ICSP 2000*, hlm. 1405-1408.
- Zhou, J., Xin, L.P., Gao, D.S., Zhang, C.S. & Zhang, D. 2001. Automated identification for firearms authentication. *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition CVPR'01*, hlm 749-754.
- Zun Liang Chuan, Abdul Aziz Jemain & Choong-Yeun Liang\*  
Pusat Pengajian Sains Matematik  
Fakulti Sains dan Teknologi  
Universiti Kebangsaan Malaysia  
43600 UKM Bangi, Selangor DE  
Malaysia
- Nor Azura Md Ghani  
Pusat Pengajian Statistik dan Sains Pemutusan  
Fakulti Sains Komputer dan Matematik  
Universiti Teknologi MARA  
40450 Shah Alam, Selangor DE  
Malaysia
- \*Pengarang untuk surat-menyurat; email: lg@ukm.my
- Diserahkan: 22 Mei 2012  
Diterima: 10 Mac 2013