

# 透過顯現隱形指紋解開密碼鎖

## 第一階段：指紋類型與特徵、指紋辨識原理與應用

### 【上課講義】

#### ■ 指紋類型與特徵

##### 一、指紋—摩擦脊紋與指印

摩擦脊紋 ( Friction ridge patterns ) 是指人類手掌、指尖、腳掌與腳趾表皮上由脊線與溝線所形成的自然皮膚結構圖案，用以增加摩擦力、防止滑動。指印 ( Fingerprint ) 是指手指與物體接觸時，留下隱形的摩擦脊線痕跡。摩擦脊紋與指印互為鏡像，如圖 1 所示。摩擦脊紋與指印本質不同，但是常被「指紋」( Fingerprint ) 一詞混用，可以指「指紋的結構」或「指紋的印痕」。

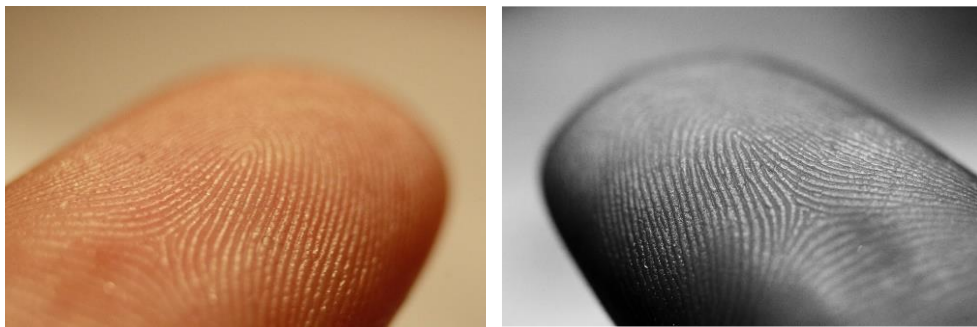


圖 1：摩擦脊紋 ( 左 ) 和指印 ( 右 )，兩者互為鏡像。

( 圖片來源：Fingerprint, <https://en.wikipedia.org/wiki/Fingerprint> )

指紋採集是法醫學中的關鍵程序。手指分泌的水分和油脂會在光滑表面留下隱形痕跡，經墨水或顯色劑處理後，能被轉印並觀察。指紋結構極細緻且相當穩定，不易改變，即使同卵雙胞胎也不相同，因此指紋可作為長期可靠的身份識別方式。

##### 二、指紋的類型

美國聯邦調查局 ( Federal Bureau of Investigation, FBI ) 自 20 世紀初期建立指紋檔案系統以來，採用系統化指紋分類系統，便於快速查詢並比對大量指紋。在電腦化之前，這套系統主要依靠紙本卡片與人工歸檔。FBI 的分類系統源自於亨利分類系統 ( Henry Classification System )，最早由英國愛德華·理查·亨利爵士 ( Sir Edward Richard Henry ) 於 1896 年在印度提出，美國後續修訂並擴展。在 1924 年美國司法部合併軍方與民間的指紋檔案後，FBI 建立世

界最大規模的指紋檔案庫，並對亨利系統加以簡化與擴展，成為 FBI 指紋分類系統( Fingerprint Classification System )。FBI 系統是依照指紋圖形特徵 ( Pattern types ) 與數值分類公式 ( Numerical Classification Formula ) 進行歸類。主要圖形類型初步分為三種：(1)迴旋紋( Loops )、(2)弓形紋 ( Arches ) 及(3)漩渦紋 ( Whorls ) ( Behind the Crime, n.d. )，如圖 2 所示。



圖 2：FBI 初步分類指紋主要類型為三種：迴旋紋 ( 左，編號 1 )、弓形紋 ( 中，編號 2 ) 及漩渦紋 ( 右，編號 3 ) ( 註：此處編號僅當作後續學習的開鎖碼 )

美國聯邦調查局又細分指紋為八種紋型 ( Palm Reading Perspectives, 2011 )：平弓紋 ( Plain Arch )、帳篷弓紋 ( Tented arch )、尺側迴紋 ( Ulnar loop )、橈側迴紋 ( Radial loop )、平渦紋 ( Plain whorl )、中央袋迴紋 ( Central pocket loop whorl )、雙迴紋 ( Double loop whorl ) 及偶然紋 ( Accidental whorl )，如圖 3 所示。

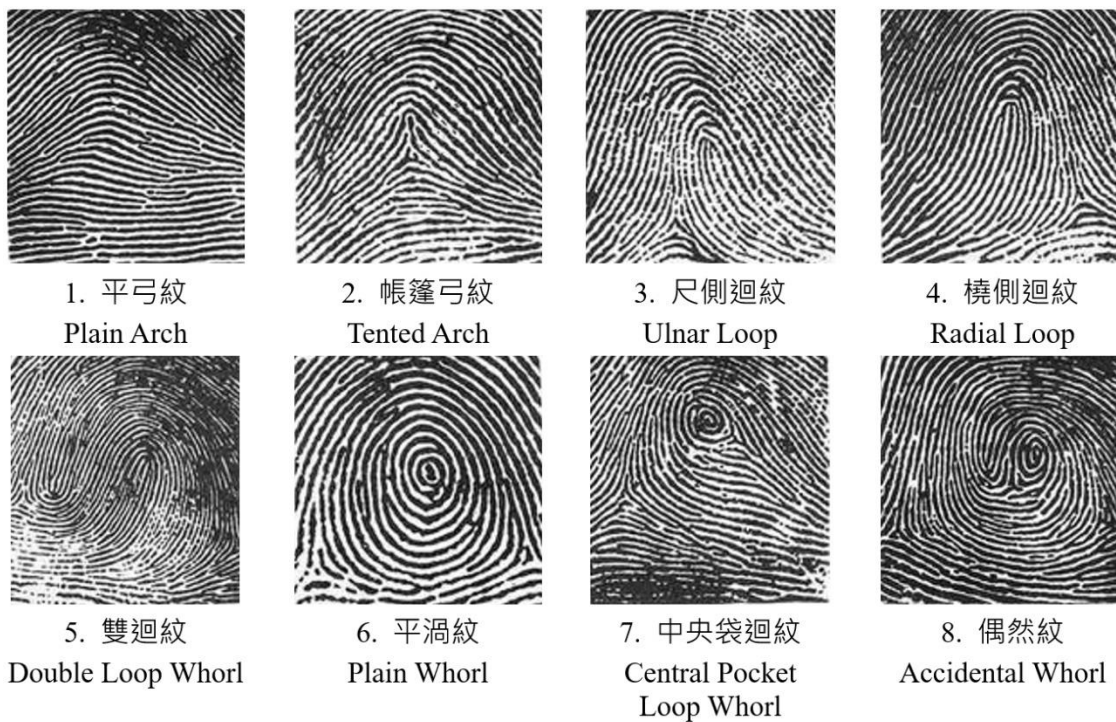


圖 3：FBI 細部分類指紋為八種及其編號。( 註：此處編號僅當作後續學習的開鎖碼 )

( 圖片來源：<https://ar.pinterest.com/pin/737112664007042690/> )

### 三、指紋的細節特徵

手指末端、手掌與足底的脊線構成明顯的圖案，這些圖案可依其整體結構進一步分類。單一脊線常呈現多樣的方向變化、不連續及分支等特徵，稱為細節特徵 ( minutiae features )。這些微觀結構構成自動指紋識別系統 ( Automated Fingerprint Identification System, AFIS ) 比對與辨識的核心依據，廣泛用於指紋鑑識與身份辨認。

指紋的細節特徵主要是各種脊線變化，大致有十一種常見的特徵 ( Champod et al., 2004 & Wikipedia, n.d. )：(1)脊線終端 ( Ridge ending )：指紋脊線在某點突然中止；(2)短脊線 ( Short ridge )：脊線僅延伸短距離即停止；(3)分叉 ( Bifurcation )：一條脊線分岔為兩條；(4)點 / 島嶼 ( Dot / Island )：短小、獨立的脊線，兩端為脊線終止，且不與其他脊線相連；(5)湖泊 / 眼睛 / 封閉 ( Lake / Eye / Enclosure )：兩條脊線分開後再合併，形成封閉的環狀結構；(6)鉤子 / 馬刺 ( Hook / Spur )：自脊線延伸出短小的分支，形狀似鉤或馬刺；(7)橋樑 / 交叉 ( Bridge / Crossover )：兩條脊線間由短脊線連接，或彼此交叉；(8)三角形 ( Delta )：脊線形成三角形區域，通常位於核心點的下方或側邊；(9)核心 ( Core )：脊線中心區域的點，常為環狀或螺旋狀圖案的中心；(10)雙重分叉 ( Double bifurcation )：脊線連續發生兩次分叉；以及(11)三叉分叉 ( Trifurcation )：單一脊線分為三條。以上特徵如圖 4 所示。

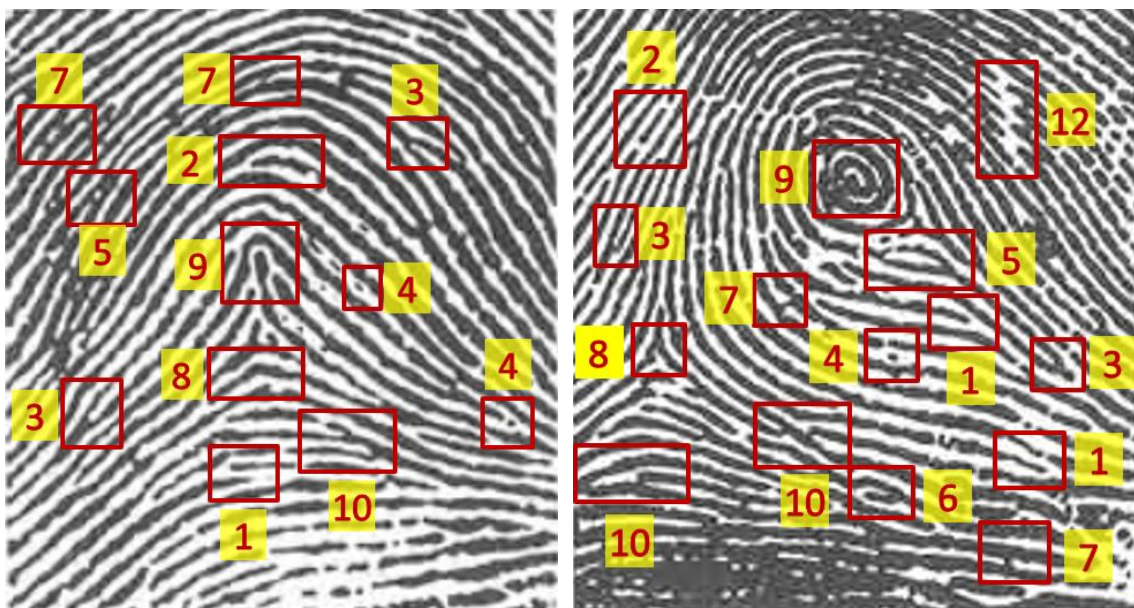


圖 4：常見的指紋細節特徵及其編碼。圖示說明：(1)脊線終端、(2)短脊線、(3)分叉、(4)點 / 島嶼、(5)湖泊 / 眼睛 / 封閉、(6)鉤子 / 馬刺、(7)橋樑 / 交叉、(8)三角形、(9)核心、(10)雙重分叉、(11)三叉分叉 ( 未呈現 )；此外，(12)傷痕不列入脊線特徵。( 此處編號僅當作後續學習的開鎖碼，編碼 10 視為 0，編碼 11 視為 1 )

( 圖片修改自圖 3 )

## ■ 指紋辨識原理與應用

每枚指紋大約有 50 個左右的細節特徵點，取得特徵點的位置和方向，就能用於指紋辨識。一般指紋辨識技術並非完整紀錄整枚指紋的圖案，而是僅僅儲存指紋的特徵點。分析時會比對指紋特徵點的方向和位置是否相同。根據亨利分類系統，指紋被歸類為二部八類，其中只要 13 個特徵點相同，即可確認是相同的指紋。

### 一、電腦化之前—亨利分類系統

在電腦自動化之前，美國聯邦調查局對於傳統的指紋分類系統是以亨利分類系統為基礎，此系統以索引方式把大量的十指指紋分類編碼，以便快速從大量的檔案中尋找對應的指紋紀錄。此系統把指紋的主要類型（迴旋紋、弓形紋及漩渦紋）數值化為分類碼（Henry, 1900），成為早期世界各地指紋比對系統的基礎。在 20 世紀初被英國蘇格蘭採納並廣泛使用，後來成為許多國家指紋資料庫與自動系統發展的歷史基礎（National Institute of Justice, 2011）。

#### (一) 亨利系統的二部

在亨利系統的索引架構裡，常把指紋分類為主要的「二部」(two-parts)：「數字部」(primary/first division) 與「次要部」(secondary/further divisions)。簡單說法，先用一組主要編碼把整個資料庫切成大群，再用次級編碼縮小範圍，以利由一對多的人工（Henry, 1900）。

#### (二) 亨利系統的八類

亨利系統把十指指紋類型歸納成若干基本類型，常見說法為「八類」(eight classes)，這些類別是用來表示手掌 / 指尖上主要紋型分佈的類別標籤（如前「八種紋型」細部分類），把十指每指的紋型與位置編碼化，再依規則產生總分類索引。舉例：如果某人的右食指 (R2) 是尺側迴紋、左中指 (L3) 是平渦紋，然後依照亨利分類系統的規則把十指各自的類型轉成數值，再合成主分類碼與次分類碼（Henry, 1900）。因為亨利系統是為十指檔案設計，系統能在數百萬筆資料中先用編碼篩選出小群候選，再做更細節特徵比對。

#### (三) 指紋數值分類公式

FBI 數值分類公式 (FBI Classification Formula) 是先把每個人的十指編號：右手 (1-5)：拇指(1)、食指(2)、中指(3)、無名指(4)、小指(5)；左手 (6-10)：拇指(6)、食指(7)、中指(8)、無名指(9)、小指(10)。再把十指依順序分成「分數手指」與「分母手指」，分子組為偶數手指的數值：2、4、6、8、10，對應到：右食指、右無名指、左拇指、左中指、左小指；分母組為奇數手指的數值：1、3、5、7、9，對應到：右拇指、右中指、右小指、左食指、左無名指。給分規則：只有漩渦紋才計分，弓形紋和迴旋紋計為 0 分；十指漩渦紋依序每兩指逐次地減半給分：右拇指和右食指開始給 16 分，右中指和右無名指給 8 分，右小指和左拇指給 4 分，

左食指和左中指給 2 分，左無名指和左小指給 1 分 ( Namus / PNWD-IAI., n.d. )。

FBI 數值分類公式 ( 即主要分類公式 )，如[1]和[2]所示：分子為偶數手指 ( 2, 4, 6, 8, 10 )；分母為奇數手指 ( 1, 3, 5, 7, 9 )；+1 是為了避免分子和分母為零。

$$\text{主要分類} = \frac{(\text{偶數手指漩渦紋給分之和}) + 1}{(\text{奇數手指漩渦紋給分之和}) + 1} \quad [1]$$

$$\text{主要分類} = \frac{(\text{右手食指} + \text{右手無名指} + \text{左手拇指} + \text{左手中指} + \text{左手小指}) + 1}{(\text{右手拇指} + \text{右手中指} + \text{右手小指} + \text{左手食指} + \text{左手無名指}) + 1} \quad [2]$$

實際例子：若雙手只有右手拇指 ( 1 )、中指 ( 3 )、小指 ( 5 ) 是漩渦紋，其餘都不是 ( 偶數手指都不是漩渦紋 )。因此分子組 = 0；分母組 = 16 ( 右拇指 ) + 8 ( 右中指 ) + 4 ( 右小指 ) = 28。主要分類 = (0 + 1) / (28 + 1) = 1/29，結果：1/29。

這個主要分類只是第一層篩選，用來快速歸檔。FBI 的完整系統還有次要、次次要、最後、關鍵、延伸等，逐步細化，直到找到最接近的指紋卡。

#### (四) 13 特徵點標準

在歷史與司法實務上 ( 特別是英國與英聯邦國家 )，習慣視「13 個或以上指紋特徵點一致」為能在法庭上接受的最低常用門檻；這是歷史實務標準而非嚴格的科學定律 ( Henry, 1913 )。指紋比對常用的特徵點包括：紋線的端點、分叉、點 / 島、橋樑 / 交叉、包圍、三角形等，又稱加爾頓點 ( Galton points )。每一枚指紋通常含數十個可辨識的特徵點 ( FBI., n.d. )。

### 二、電腦化之後—IAFIS/NGI 電腦系統

現代科學與標準 ( 例如：NIJ 指紋手冊 / 各國實驗研究 ) 傾向不再強調單一固定數字，而是評估：指印的品質、特徵的分佈、比對的整體一致性與隨機吻合機率 ( probability of random correspondence, PRC )。也就是說，有時少於 13 個高質量的吻合加上其它支撐證據，也可能被認為足夠；反之，13 個低質量、近距離聚集且易錯認的點也不足以確定 ( National Institute of Justice, 2011 )。

#### (一) 隨機吻合機率

指紋的特徵點之間並非完全獨立，特徵點的分佈、方向及相對位置等皆影響機率計算。學術界多採用隨機吻合機率 ( PRC )，下面以簡化模型示範基本的計算。若考慮資料庫大小  $N$  筆 ( 在  $N$  筆指紋中找出任一個與這枚印記碰巧吻合的數量 )，則期望的隨機碰巧數 ( expected random correspondence, ERC )  $ERC = N \times PRC$ 。例如：若指紋建檔有一百萬筆  $N = 10^6$  且設隨機吻合機率  $PRC = 10^{-6}$ ，則期望值  $ERC = 10^6 \times 10^{-6} = 1$ ，也就是期望會有 1 次隨機吻合。( Su & Srihari, 2009 )。

## (二) 整合式自動指紋辨識系統與下一代身分識別

在 1999 年後，FBI 建立整合式自動指紋辨識系統 ( Integrated Automated Fingerprint Identification System, IAFIS )，於 2014 年升級為下一代身分識別 ( Next Generation Identification, NGI )。在電腦自動化後，傳統的分數分類公式已經不再是必要的查詢方式，但仍具歷史與教育價值。現在主要依靠基於細節特徵的比對，透過紋線端點、分叉點等細節自動比對。這套方法是指紋學史上重要的里程碑 ( Hutchins, 2010 )。

IAFIS 在 1999 年由 FBI 啟用直到 2014 年，是全球第一個大規模全國性自動化指紋比對系統。以往數千萬筆刑事與民事指紋紀錄，人工分類可能需時幾小時或幾天。現今透過電腦演算法比對指紋特徵點，IAFIS 可在數分鐘內比對數千萬筆 ( Federal Bureau of Investigation, 2015 )。在 2014 年由 IAFIS 升級為 NGI，直到現在仍在使用。其功能不只是指紋系統，而是一個多形態生物特徵識別平台。涵蓋範圍有指紋與掌紋、支援高解析度掌紋資料庫、人臉辨識、利用監視器、證件照進行自動人臉搜尋、及虹膜識別。NGI 的效能為比對速度更快，準確度高於 IAFIS。NGI 每天可處理數百萬次查詢，已變成跨生物特徵的綜合辨識平台，讓 FBI 在調查犯罪、背景審查及國土安全上有更全面的工具 ( National Institute of Standards and Technology, 2000 )。

## (三) 指紋感應的運作過程

在數位世界中，指紋是由傳感器板以電子方式讀取的。手指的摩擦脊紋是不連續的，並形成具有顯著細節特徵的圖案 ( Nandakumar & Jain, 2010 )。細節的圖案可以被繪製並連接起來形成一個模板，可以存儲並在未來與指紋進行比較 ( Singh et al., 2023 )。指紋感應的運作過程如下：(1) 生物識別 ( Biometric )：手指放在感測器上，取得原始指紋圖案的影像；(2) 特徵點 ( Minutia Points )：出現在指紋脊線的起點、終點、分支和匯合處，並在每個點上沿著脊線畫一條線；(3) 特徵點地圖 ( Minutia Map )：這些點被映射到特徵點地圖上，並在每個點之間畫一條線，顯示每個點與其他點之間的關係；(4) 數據流 ( Data Stream )：然後，該映射將作為稱為細部模板的數據流儲存在資料庫中，以便將來與其他指紋進行比較，做出認證 / 辨識決策，如圖 5 所示。

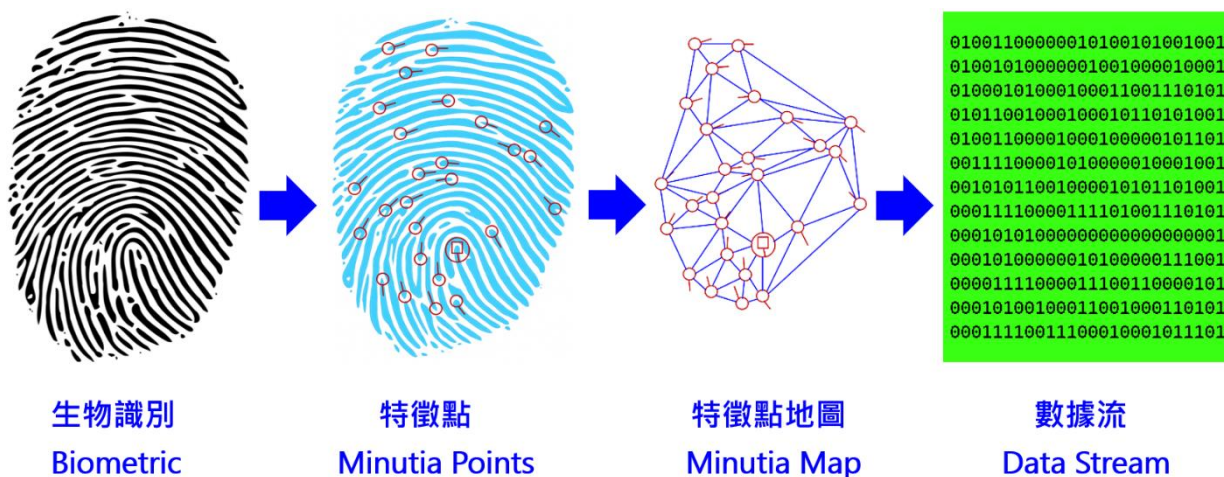


圖 5：指紋感應的運作過程：生物識別 ( Biometric ) → 特徵點 ( Minutia Points ) → 特徵點地圖 ( Minutia Map ) → 數據流 ( Data Stream )

( 最左邊指紋圖案來源：<https://www.pngegg.com/en/png-nvgzd> )

## ■ 參考資料

- Behind the Crime. (n.d.). Fingerprints. <https://behindthecrime.wordpress.com/about/fingerprints/>
- Champod, C., Lennard, C., Margot, P., & Stoilovic, M. (2004). *Fingerprints and other ridge skin impressions*. Boca Raton, FL: CRC Press.
- FBI. (n.d.). *Fingerprint recognition [PDF]*. UCR / FBI. [https://ucr.fbi.gov/fingerprints\\_biometrics/biometric-center-of-excellence/files/fingerprint-recognition.pdf](https://ucr.fbi.gov/fingerprints_biometrics/biometric-center-of-excellence/files/fingerprint-recognition.pdf)
- Henry, E. R. (1900). *Classification of Finger Prints*. George Routledge and Sons Ltd. Retrieved from <https://archive.org/details/dli.ernet.26302>
- Henry, E. R. (1913). *Classification and uses of finger prints (4th ed.) [PDF]*. Crime-Scene-Investigator.net. <https://www.crime-scene-investigator.net/PDF/classification-and-uses-of-finger-prints-1913-sir-henry.pdf>
- Hutchins, L. A. (2010). Chapter 5: Systems of Friction Ridge Classification. In *Fingerprint Sourcebook* (NIJ Publication NCJ 225325). U.S. Department of Justice, Office of Justice Programs. <https://www.ojp.gov/library/publications/fingerprint-sourcebook-chapter-5-systems-friction-ridge-classification>
- Nandakumar, K., & Jain, A. K. (2010). *Fingerprint matching [PDF]*. Biometrics Research Group, Michigan State University. Retrieved from [https://biometrics.cse.msu.edu/Publications/Fingerprint/JainFpMatching\\_IEEEComp10.pdf](https://biometrics.cse.msu.edu/Publications/Fingerprint/JainFpMatching_IEEEComp10.pdf)
- Namus / PNWD-IAI. (n.d.). *Explanation of fingerprint classification systems: Henry, NCIC, etc.* Retrieved from <https://pnwdiai.org/wp-content/uploads/2021/07/NAMUS-Explanation-of-Fingerprint-Classification-Systems.pdf>
- National Institute of Justice. (2011). *Fingerprint Sourcebook*. U.S. Department of Justice. Retrieved from <https://nij.ojp.gov/library/publications/fingerprint-sourcebook>
- Palm Reading Perspectives. (2011). The F.B.I. fingerprint types vary significant among ethnic

populations! <https://palmreadingperspectives.wordpress.com/2011/06/03/the-f-b-i-fingerprint-types-vary-significant-among-ethnic-populations/>

Singh, A., Hou, W.-C., Lin, T.-F., & Zepp, R. G. (2023). Fingerprint recognition in forensic scenarios. *Forensic Science International: Digital Investigation*, 44, 301567. <https://doi.org/10.1016/j.fsidi.2023.301567>

Su, C., & Srihari, S. N. (2009). Probability of random correspondence for fingerprints. In Z. J. M. H. Geradts, K. Y. Franke, & C. J. Veenman (Eds.), *Computational Forensics (Lecture Notes in Computer Science*, vol. 5718, pp. 55–66). Springer. <https://cedar.buffalo.edu/~srihari/papers/IWCF2009-FP-PRC.pdf>

Wikipedia. (n.d.). Fingerprint: Fingerprint verification. In *Wikipedia*. <https://en.wikipedia.org/wiki/Fingerprint>

## 第一階段：指紋類型與特徵、指紋辨識原理與應用

## 【學習單】

年級：\_\_ 班別：\_\_ 課程名稱：\_\_\_\_\_ 授課教師：\_\_\_\_\_ 上課日期：\_\_\_\_\_

組別：\_\_ 姓名：\_\_\_\_\_ 學號：\_\_\_\_\_ 組員：\_\_\_\_\_

## ■ 指紋類型與特徵

回答下面問題

1. 分別寫出下面指紋 BI 的初步分類名稱 (有三種) 和 FBI 的細部分類名稱 (有八種)。

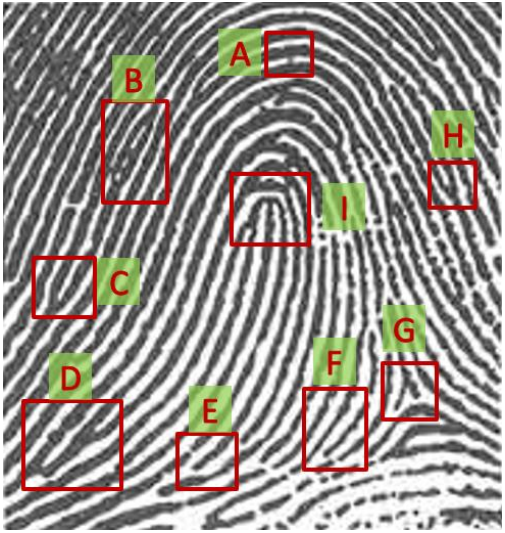
 <p>( 圖片來源：<a href="https://worksheets.clipart-library.com/worksheet/fingerprint-2.html">https://worksheets.clipart-library.com/worksheet/fingerprint-2.html</a> )</p>	<p>初步分類名稱</p> <p>左： 中： 右：</p>	<p>細部分類名稱</p> <p>左： 中： 右：</p>
--	---------------------------------------	---------------------------------------

2. 在下面兩指紋圖案中，用箭頭標示十一種指紋脊線特徵及其編碼，標示方式與圖四相同。  
(在兩指紋中盡可能找出十一種細節特徵，不必標示每一指紋圖案的所有細節特徵)

 <p>( 圖片來源：<a href="https://www.chendurs.com/all-newsletters/how-do-fingerprint-scanners-work">https://www.chendurs.com/all-newsletters/how-do-fingerprint-scanners-work</a> )</p>
--

& <https://www.goodfreephotos.com/vector-images/fingerprint-vector-clipart.png.php> )

3. 寫出下面指紋圖式編號 A ~ I 的細節特徵名稱。

 <p>( 圖片修改自圖三 )</p>	<p>A. B. C. D. E. F. G. H. I..</p>
--	--

4. 逐條地寫出心得與感想( 心得是由心領悟對知識和技能的學習獲得；感想是感受、想法、意見、反思及評論。 )

### ■ 指紋辨識原理與應用

答下面問題

1. 簡述電腦化之前亨利系統的二部和八類。

2. 透過資料查詢，補充說明電腦化之後的「整合式自動指紋辨識系統」( IAFIS ) 的資料。

3. 透過資料查詢，補充說明電腦化之後的「下一代身分識別」( NGI ) 的資料。

4. 逐條地寫出心得與感想( 心得是由心領悟對知識和技能的學習獲得；感想是感受、想法、意見、反思及評論。 )

設計者：蔡家興<sup>1</sup>、游文綺<sup>2</sup>、許榮成<sup>2</sup>、陳芷誼<sup>2</sup>、李忠家<sup>2</sup>、楊水平<sup>3,\*</sup>

<sup>1</sup> 國立彰化女子高級中學

<sup>2</sup> 國立彰化師範大學化學系( 時任教學助理 )

<sup>3</sup> 國立彰化師範大學化學系

文章發佈：《臺灣化學教育》，第 62 期，2025。

期刊網站：<https://chemed.chemistry.org.tw/>