

Impronte digitali

Introduzione

Annalisa Franco
annalisa.franco@unibo.it

Dario Maio
dario.maio@unibo.it

2

Impronte digitali

- **Vantaggi:**
 - Elevato potere discriminante e unicità
 - Non mutano nel corso della vita di una persona (anche se possono variare temporaneamente a causa di tagli e abrasioni o delle condizioni meteorologiche)
 - Pubblicamente riconosciute come affidabili
 - Gemelli identici hanno impronte diverse
- **Svantaggi**
 - Sporczia sul sensore o sul dito può compromettere il riconoscimento
 - Alcune persone presentano impronte di bassa qualità intrinseca
 - Associazione con “criminalità”



Storia delle impronte (1)

Neolithic
Carvings
(Gavrinis
Islands)



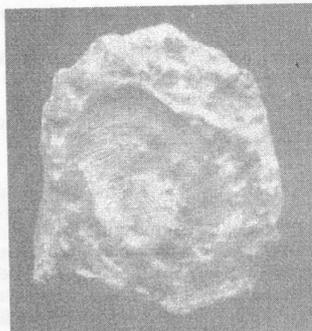
(a)



(b)

2000 B.C.
Standing
Stone (Goat
Island)

300 B.C.
A
Chinese
clay seal



(c)



(d)

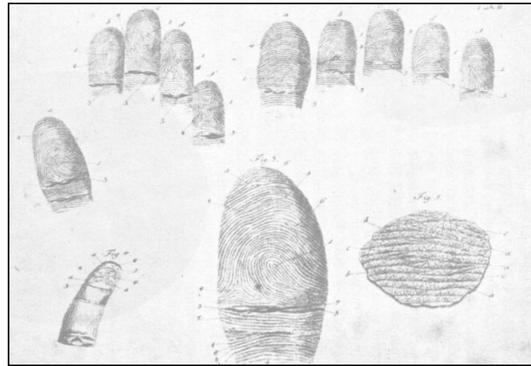
400 A.D.
An
impression
on a
Palestinian
lamp

Storia delle impronte (2)

- Alcuni reperti archeologici evidenziano che i **dermatoglifi** e, in particolare, le impronte erano utilizzati in passato **come forma di identificazione personale**;
- Nell'impero romano le impronte erano utilizzate con fini d'identificazione;
- In Persia, nel XIV secolo, osservando diversi documenti ufficiali che erano stati siglati con impronte, un ufficiale notò che non esistono due impronte esattamente uguali;
- Nel 1686, **Marcello Malpighi**, professore di anatomia all'università di Bologna, analizzò ridge line, whorl e loop in un suo trattato, ma non enfatizzò l'importanza delle impronte ai fini dell'identificazione personale;
- **John Evangelist Purkinji**, professore di anatomia all'università di Breslau, nel 1823 descrisse nella sua tesi nove pattern riscontrabili nelle impronte, ma neppure egli fece riferimento all'importanza delle impronte ai fini del riconoscimento

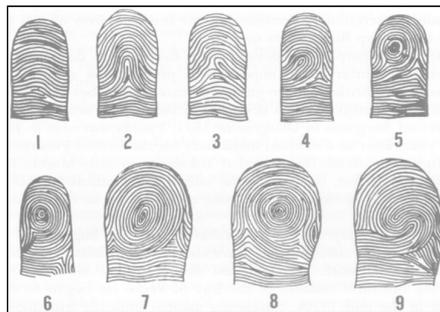
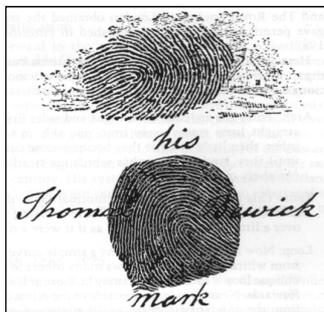
Storia delle impronte (3)

I dermatoglifi disegnati da Grew (1664)



Disegni delle impronte di Mayer (1788)

Marchio di fabbrica di Thomas Bewick (1809)



I nove pattern descritti nella tesi di Purkinje (1823)

Storia delle impronte (4)

- Nel 1856, **William Herschel**, nel suo lavoro di magistrato a Jungipoor, India, utilizzò le impronte nei contratti degli abitanti del luogo, tenendo in considerazione la credenza locale secondo la quale il contatto personale con il documento sarebbe stato maggiormente vincolante rispetto a una semplice firma; inoltre Herschel si convinse che l'impronta potesse confermare o negare l'identità, grazie alle caratteristiche di unicità dell'impronta e di persistenza nel corso della vita.
- Nel 1880, il Dr. **Henry Faulds**, il sovrintendente del reparto di chirurgia dell'ospedale di Tsukiji Hospital a Tokio, Giappone, descrisse scientificamente le impronte come un mezzo di identificazione e inventò un metodo per la memorizzazione e classificazione di impronte.
- Il Dr. Faulds chiese a **Charles Darwin** un supporto scientifico e Darwin, ormai in età avanzata, segnalò suo cugino, Sir **Francis Galton**, un antropologo inglese.

Storia delle impronte (5)

- **Galton**, il cui interesse principale era l'uso delle impronte come un ausilio nello studio dell'ereditarietà razziale, pubblicò nel **1892** un libro, intitolato "Fingerprints" nel quale introdusse la nozione di minuzia e suggerì il primo semplice sistema di classificazione di impronte, basato sul raggruppamento dei pattern in arches, loops e whorls.
- **Galton scoprì presto che le impronte non avevano alcuna utilità nella determinazione della storia genetica dell'individuo, ma provò scientificamente la loro individualità e persistenza.**
- Nel **1891**, **Juan Vucetich**, un ufficiale di polizia argentino raccolse i primi file di impronte basandosi sulla classificazione di Galton, e nel **1892** effettuò la prima identificazione di un criminale per mezzo di impronte. Il **sistema di classificazione Vucetich** è tuttora in uso in molti Paesi di lingua spagnola.

Storia delle impronte (6)

- In Inghilterra e nel Galles l'introduzione delle impronte per l'identificazione dei criminali cominciò nel **1901**, sulla base delle teorie di Francis Galton riviste in seguito da **Edward Richard Henry** (che divenne poi il commissario capo della polizia metropolitana di Londra).
- Il **sistema di classificazione di Galton-Henry** fu pubblicato nel giugno **1900**, e adottato da numerosi uffici di polizia in diversi stati, e risulta tuttora in uso in tutti i Paesi di lingua inglese.
- **Il primo caso di applicazione sistematica delle impronte per l'identificazione di persone negli Stati Uniti si verificò nel 1902 nella Civil Service Commission di New York .**

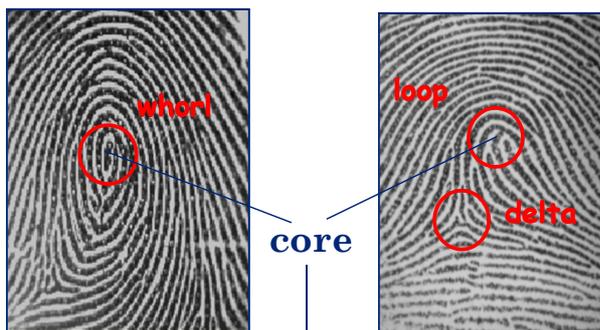
Storia delle impronte (7)

- A seconda della tipologia di impronte, sono comunemente individuate **cinque classi (Arch, Left loop, Right loop, Whorl e Tented arch)** e utilizzate per la **classificazione esclusiva**. Purtroppo, gli approcci che operano una classificazione esclusiva risentono della distribuzione non uniforme delle impronte tra le diverse classi (**approssimativamente il 90% delle impronte appartiene a tre sole classi**) e dell'esistenza di impronte "ambigue", che neppure gli esperti riescono a classificare con certezza in maniera esclusiva.
- Recentemente è stato proposto un **approccio continuo alla classificazione**, nel quale ogni impronta è caratterizzata da un vettore numerico utilizzato per l'indicizzazione del database; tale approccio fornisce prestazioni migliori rispetto alla classificazione esclusiva sia in termini di accuratezza che di efficienza.
- Il problema della classificazione delle impronte ha suscitato un grande interesse all'interno della comunità scientifica a causa della sua importanza e della difficoltà intrinseca che presenta, e su questo argomento sono stati pubblicati numerosi articoli scientifici.

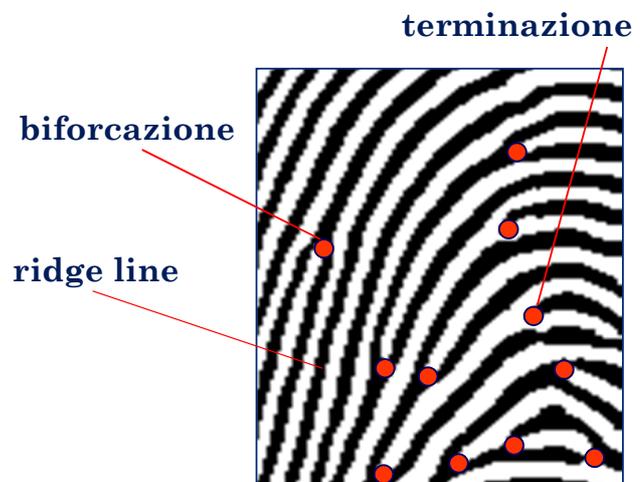
Macro- e micro-caratteristiche delle impronte

Un'impronta è composta da un insieme di linee (**ridge line**), che scorrono principalmente parallele, creando un pattern (**ridge pattern**)

Talvolta le ridge line producono **macro-singolarità** locali, chiamate **whorl (O)**, **loop (U)** e **delta (D)**

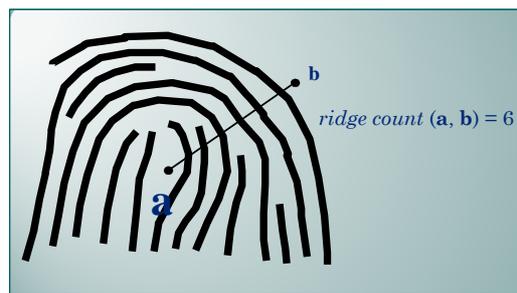
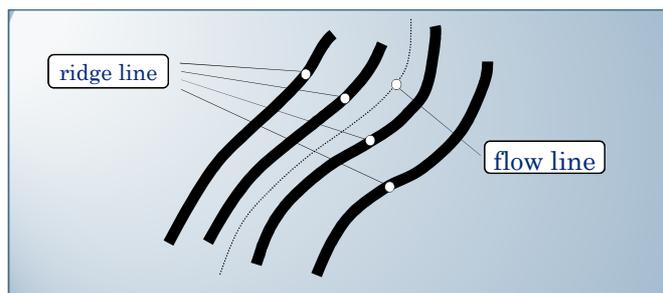


Il punto più a nord della ridge line più interna

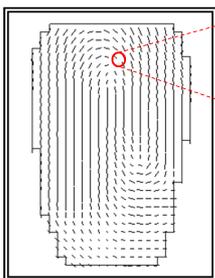
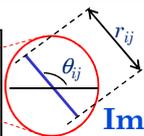


Le minuzie, o **caratteristiche di Galton**, sono determinate a partire dalle terminazioni o biforcazioni delle ridge line

Macro-caratteristiche delle impronte



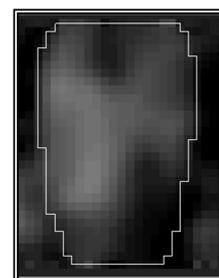
impronta

immagine
direzionale

$$0 \leq \theta_{ij} < 180^\circ$$

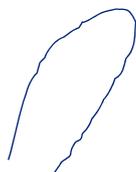
Immagine direzionale
(Grasselli 1969):

Ogni elemento θ_{ij} ,
corrispondente al nodo $[i,j]$
di una griglia a maglie
quadrate sovrapposta al
pixel $[x_i, y_j]$, indica
l'orientazione media delle
ridge delle impronte in un
intorno di $[x_i, y_j]$

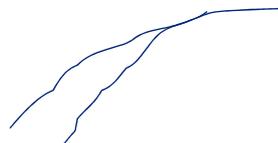
mappa di
densità

Alcune definizioni (1)

Recurving ridge



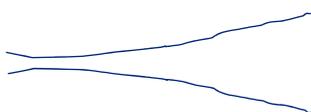
Converging ridge



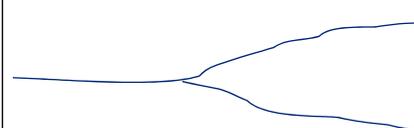
Appendage



Diverging ridges

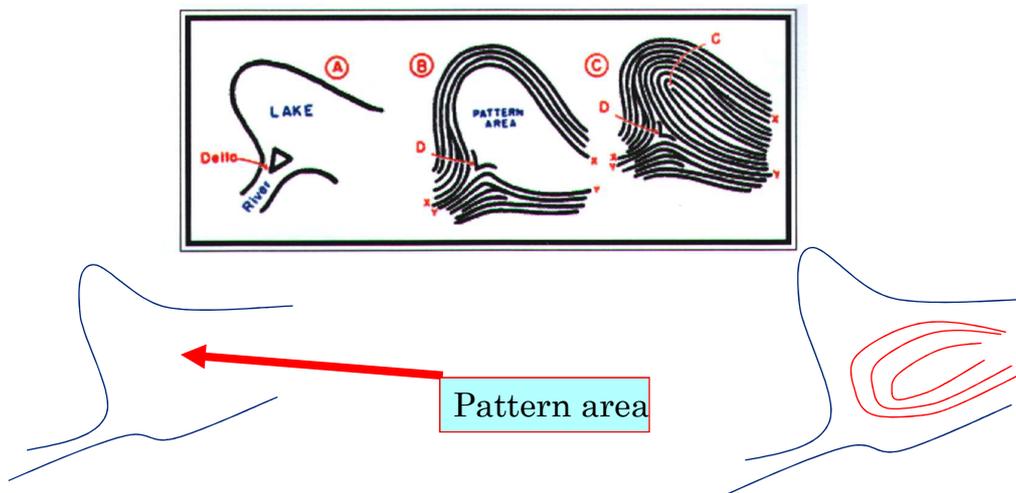


Bifurcating ridges



Alcune definizioni (2)

Type Line: formano il contorno dell'area dell'impronta usata per la classificazione. Sono costituite da ridge che corrono parallele e si originano dall'angolo più in basso del pattern, si espandono internamente e verso l'alto divergendo rispetto al bordo dell'area.



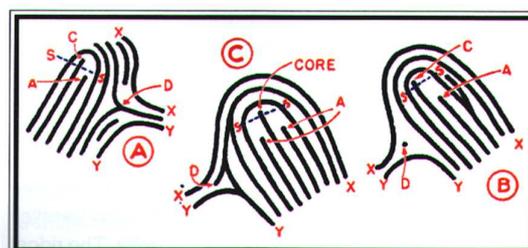
Alcune definizioni (3)

All'interno dell'area del pattern si trovano, solo in impronte di tipo **loop** e **whorl**, due singolarità caratteristiche: **delta** e **core**

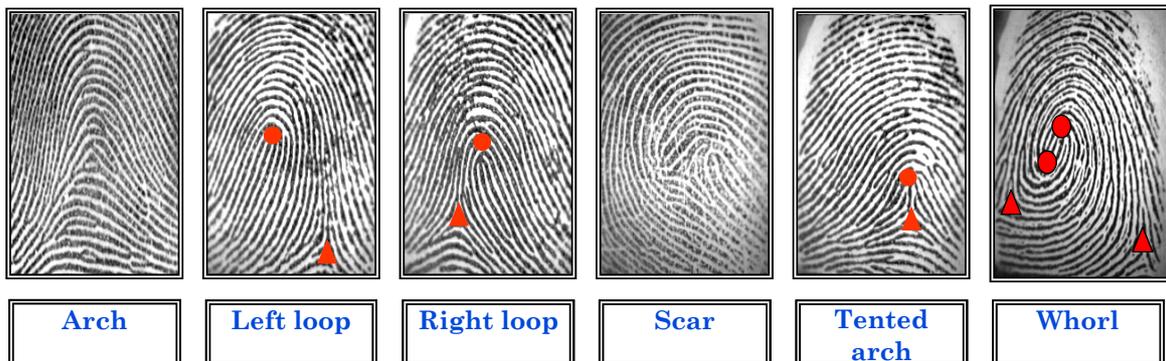
- *Type lines* ↔ *banks of river*
- *Delta* ↔ *river delta*



Il core può essere definito anche come punto di massima curvatura della recurving ridge più interna



Classificazione delle impronte



Le sei classi del metodo di classificazione dell'American National Institute of Technology

Micro-caratteristiche: minuzie

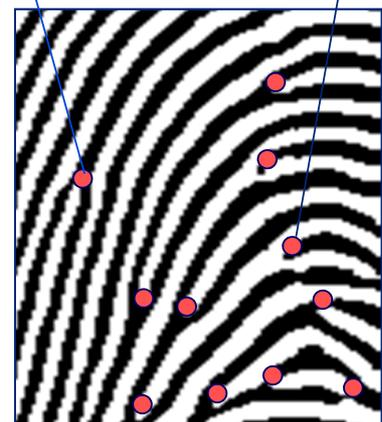
Le minuzie, o feature di Galton (1892), consistono in discontinuità delle ridge line

Il modello di coordinate basato su minuzie dell'FBI considera solo terminazioni e biforcazioni.

biforcazione terminazione

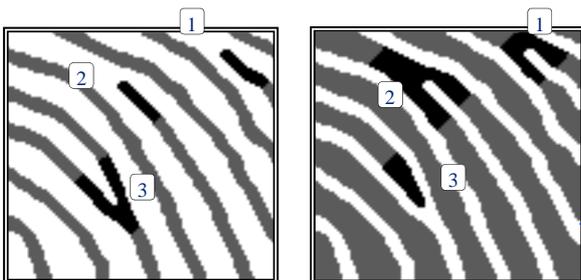
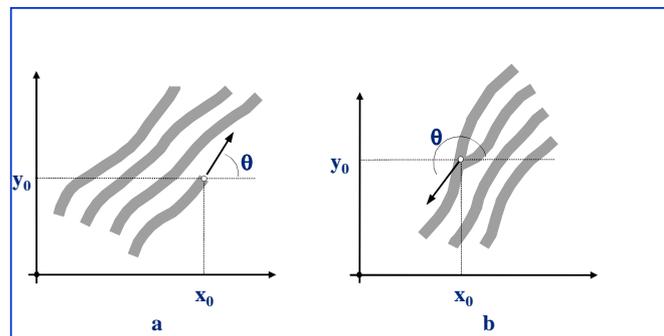
I tipi di minuzie più comuni

	Terminazione
	Biforcazione
	Lake
	Independent ridge
	Point or island
	Spur
	Crossover



Rappresentazione di minuzie

Nel modello dell'FBI le terminazioni e le biforcazioni sono modellate in termini di coordinate (x,y) e dell'angolo che la tangente alla minuzia forma con l'asse orizzontale.

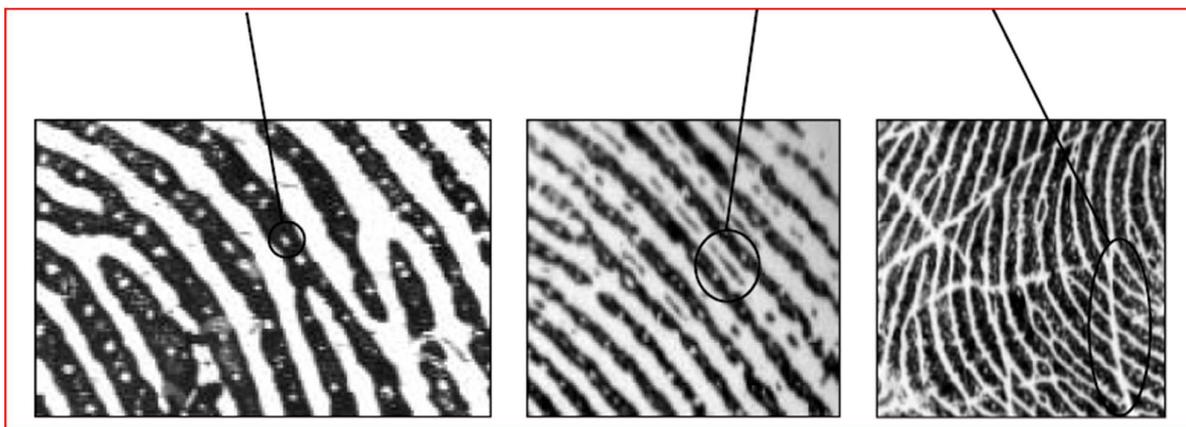


Dualità di terminazioni-biforcazioni in un'immagine binaria e nella sua negativa

Pori, creste incipienti, abrasioni

- A un maggior livello di dettaglio (es. acquisizione a 1000 dpi) è possibile identificare :

i pori della pelle (da 60 a 250 μm), creste incipienti, abrasioni, ecc.



Altre informazioni: problemi di privacy?

L'immagine di un'impronta può fornire anche altre informazioni considerate "sensibili"

- presenza di dermatiti
- strutture papillari particolari (causate ad es. da pesanti lavori manuali)
- stato di nutrizione della madre del soggetto nei primi tre mesi di gravidanza

Studi empirici mostrano l'esistenza di correlazioni tra certe strutture papillari e l'origine della popolazione o la probabilità di contrarre alcune malattie.

Acquisizione di impronte: parametri del dispositivo

- **Risoluzione**
il numero di dot per inch (dpi). 500 dpi è la risoluzione minima per scanner FBI-compliant; la risoluzione minima per l'estrazione di minuzie è circa 200-300 dpi.
- **Area**
un'area maggiore o uguale a un quadrato di 1×1 inch (secondo le specifiche FBI) permette l'acquisizione chiara di un'intera impronta
- **Range dinamico (o profondità)**
numero di bit utilizzati per codificare il valore di intensità di ciascun pixel
- **Accuratezza geometrica**
la massima distorsione geometrica introdotta dal dispositivo di acquisizione



Acquisizione delle impronte: qualità delle immagini

- **Qualità delle immagini di impronte**

- È difficile scindere la qualità dell'immagine dell'impronta [**Modulation Transfer Function, Signal-to-Noise Ratio, Output Gray-Level, Contrast, Ridge-direction consistency, ...**] dalla qualità intrinseca e dalle condizioni dell'impronta.
- Impronte di bassa qualità:
 - ridge line poco prominenti (lavoratori manuali e persone anziane)
 - impronte troppo umide o troppo secche



Buona qualità Impronta secca Impronta umida Impronta di cattiva qualità intrinseca

Acquisizione di impronte: off-line vs. on-line

- **Acquisizione off-line**

- Tecnica a inchiostro
- Impronte latenti



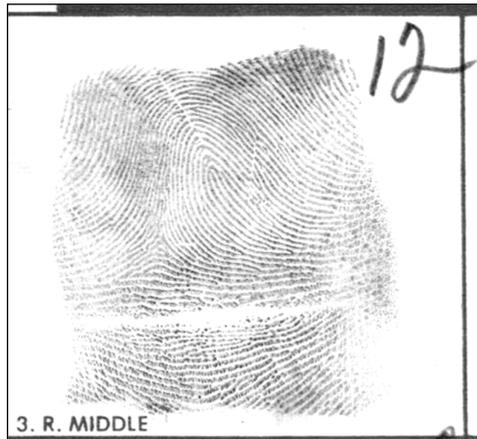
- **Acquisizione on-line**

- Optical sensors
- Silicon-based sensors
- ...



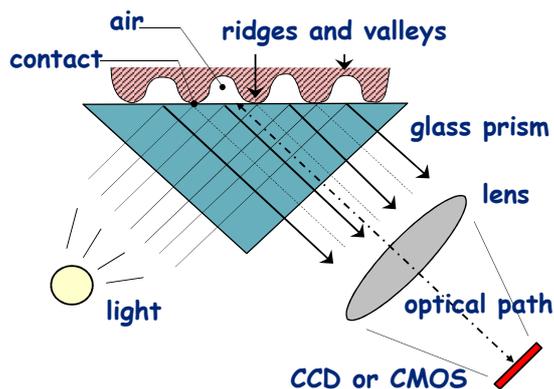
Tecnica a inchiostro

- Prima si ricopre la pelle del dito con inchiostro nero e poi si imprime l'impronta su carta
- L'immagine è convertita in formato digitale (utilizzando uno scanner o una telecamera CCD ad alta qualità)
- **La risoluzione di default è 500 dpi**
- In alcune regioni dell'impronta parte delle informazioni possono essere perse a causa di una quantità eccessiva o insufficiente d'inchiostro



Sensori ottici (1)

- Frustrated Total Internal Reflection (FTIR)
 - L'impronta tocca la parte superiore di un **prisma di vetro (o di materiale plastico)**
 - La luce che attraversa il prisma è riflessa nelle valli, e sparsa casualmente (assorbita) dalle ridge
 - I dispositivi basati su FTIR non possono essere rimpiccioliti notevolmente



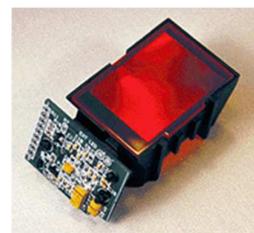
Biometrika



Identix Touchview II



Identicator DFR200



Sensori ottici (2)

FTIR con prismi multipli

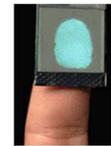
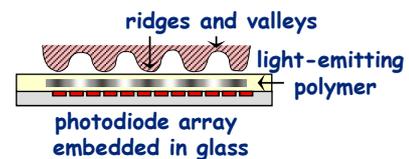
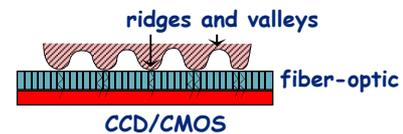
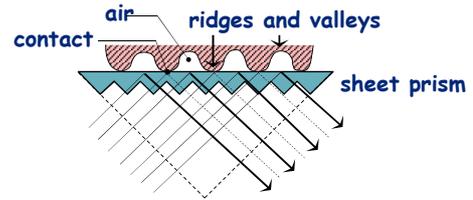
La dimensione può essere in parte ridotta; la qualità delle immagini risulta inferiore rispetto al FTIR tradizionale.

Fibre ottiche

La dimensione può essere ridotta ulteriormente; richiede un grande CCD/CMOS (costo elevato).

Elettro-ottico

Un polimero che emette luce a seconda del potenziale applicato su un lato: il potenziale non è lo stesso lungo la superficie di contatto. Elevata miniaturizzazione ma scarsa qualità delle immagini.



Who?Vision TactileSense

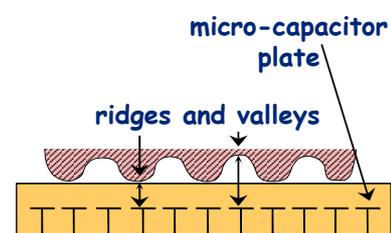
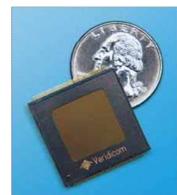
Sensori a stato solido (1)

- Silicon-based sensors
 - Costituiti da un array di pixel; ogni pixel è un piccolo sensore
 - L'utente tocca direttamente la superficie del silicio
 - Non sono necessari componenti ottici
 - *Maggior grado di miniaturizzazione, ma qualità inferiore rispetto a FTIR*
 - Effetto capacitivo:
 - Un array bidimensionale di micro-condensatori
 - L'altro lato di ciascun micro-condensatore è il dito stesso
 - Quando il dito è posizionato sul sensore si creano piccole cariche elettriche
 - Il valore di queste cariche dipende dalla distanza dalla pelle, permettendo così la determinazione di ridge e valli
 - Altri effetti sfruttati in sensori a stato solido:
 - Termico, Campo elettrico e piezoelettrico

STM - TCS1A TouchChip



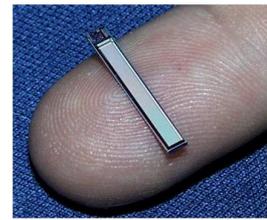
Veridicom FPS100



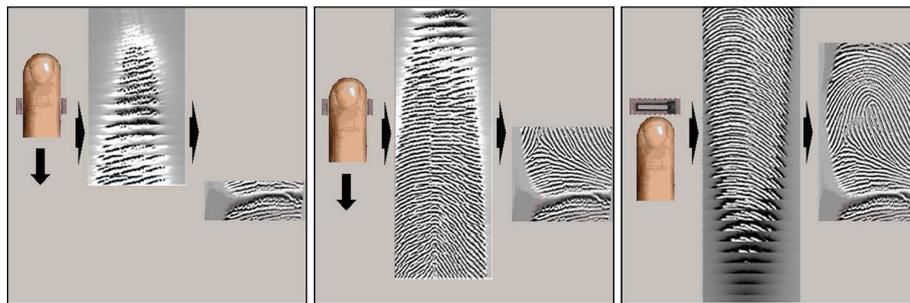
Sensori a stato solido (2)

- **Sensori a scorrimento**

- Un metodo di acquisizione diverso: si basa sull'idea di far scorrere l'impronta sul sensore
- L'altezza del sensore può essere ridotta drasticamente (in teoria 1 pixel) → costo inferiore
- Più difficile da usare (gli utenti devono essere ben addestrati)
- La ricostruzione dell'immagine non è semplice



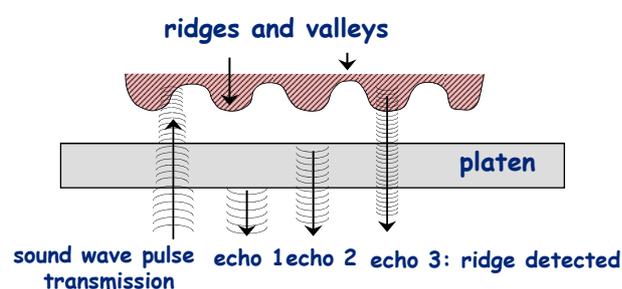
Atmel
FingerChip



Sensori a ultrasuoni

- **Simile all'ecografia**

- Segnali acustici sono inviati verso la punta del dito e l'eco è catturata
- Questo metodo descrive lo strato sottostante la pelle del dito (anche attraverso guanti sottili)
- Non risente di sporczia o presenza di unto
- È necessario un dispositivo abbastanza grande
- Molto lento: richiede qualche secondo per l'acquisizione di un'impronta
- Costo elevato



Trade-off tra area del sensore e accuratezza

L'area del sensore varia da circa 1.0×1.0 inches quadrati nei dispositivi professionali a 0.42"×0.42" per dispositivi più economici.

Si noti che nel secondo caso l'immagine acquisita è circa **5.6 volte** più piccola.

Le dimensioni di un'impronta media sono circa 0.5"×0.7" (più piccole nelle donne e nei bambini, più grandi negli uomini adulti).

La porzione d'immagine registrata in acquisizioni diverse dello stesso dito è diversa a causa del differente posizionamento del dito sul sensore.



Quattro immagini diverse dello stesso dito acquisite con un sensore ottico di dimensioni 0.51" × 0.51"

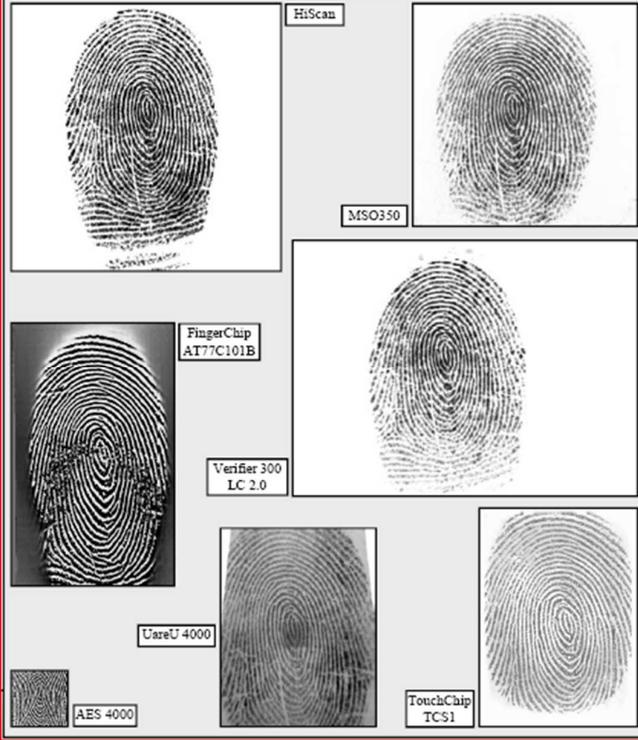
Alcuni scanner commerciali

	Technology	Company	Model	Dpi	Area (h×w)	Pixels
Optical	FTIR	Biometrika www.biometrika.it/eng/	FX2000	569	0.98"×0.52"	560×296 (165,760)
	FTIR	Digital Persona www.digitalpersona.com	UareU2000	440	0.67"×0.47"	316×228 (72,048)
	FTIR (sweep)	Kinetic Sciences www.kinetic.bc.ca	K-1000	up to 1000	0.002"×0.6"	2×900 (H×900)
	FTIR	Secugen www.secugen.com	Hamster	500	0.64"×0.54"	320×268 (85,760)
	Sheet prism	Identix www.identix.com	DFR 200	380	0.67"×0.67"	256×256 (65,535)
	Fiber optic	Delsy www.delsy.com	CMOS module	508	0.71"×0.47"	360×240 (86,400)
	Electro-optical	Ethentica www.ethentica.com	TactilSense T-FPM	403	0.76"×0.56"	306×226 (69,156)
Solid-state	Capacitive (sweep)	Fujitsu www.fme.fujitsu.com	MBF300	500	0.06"×0.51"	32×256 (H×256)
	Capacitive	Infineon www.infineon.com	FingerTip	513	0.56"×0.44"	288×224 (64,512)
	Capacitive	ST-Microelectronics us.st.com	TouchChip TCS1AD	508	0.71"×0.50"	360×256 (92,160)
	Capacitive	Veridicom www.veridicom.com	FPS110	500	0.60"×0.60"	300×300 (90,000)
	Thermal (sweep)	Atmel www.atmel.com	FingerChip AT77C101B	500	0.02"×0.55"	8×280 (H×280)
	Electric field	Authentec www.authentec.com	AES4000	250	0.38"×0.38"	96×96 (9,216)
	Piezoelectric	BMF www.bm-f.com	BLP-100	406	0.92"×0.63"	384×256 (98,304)

Alcuni scanner commerciali a confronto



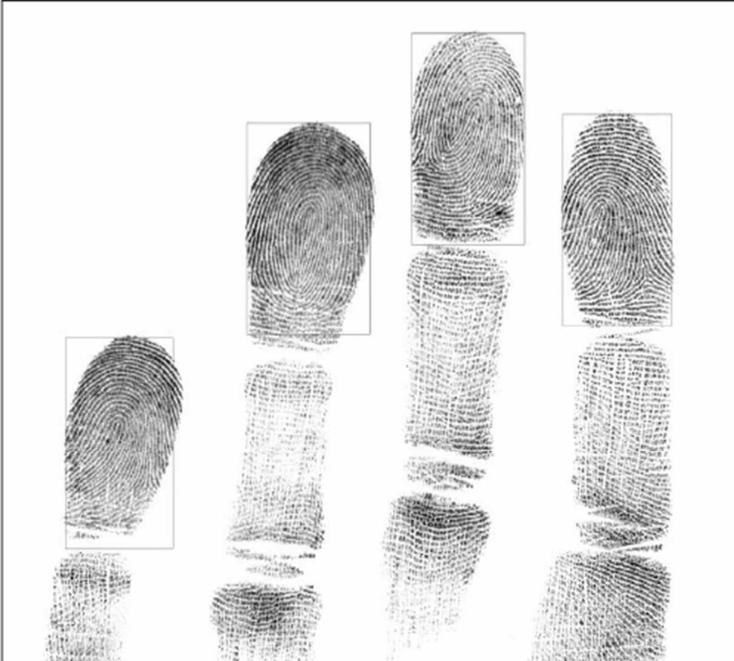
Technology	Company	Model	Dpi	Area (h×w)	PIV IQS compliant
FTIR	Biometrika www.biometrika.it	HiScan	500	1"×1"	✓
FTIR	Crossmatch www.crossmatch.net	Verifier 300 LC 2.0	500	1.2"×1.2"	
FTIR	Digital Persona www.digitalpersona.com	UareU4000	512	0.71"×0.57"	
FTIR	L-1 Identity www.l1id.com	DFR 2100	500	1.05"×1.05"	✓
FTIR	Sagem www.morpho.com	MSO350	500	0.86"×0.86"	✓
FTIR	Secugen www.secugen.com	Hamster IV	500	0.66"×0.51"	✓
Capacitive	Upek www.ukek.com	TouchChip TCS1	508	0.71"×0.50"	✓
Thermal (sweep)	Atmel www.atmel.com	FingerChip AT77C101B	500	0.02"×0.55"	
Electric field	Authentic www.authentic.com	AES4000	250	0.38"×0.38"	
Piezoelectric	BMF www.bmf.com	BLP-100	406	0.92"×0.63"	



Scanner d'impronta per più dita



Technology	Company	Model	Dpi	Area (h×w)	IAFIS IQS compliant
FTIR	Crossmatch www.crossmatch.net	L SCAN 1000	1000	3.0"×3.2"	✓
FTIR	L-1 Identity www.l1id.com	TouchPrint 4100	500	3.0"×3.2"	✓
FTIR	Papillon www.papillon.ru	DS-30	500	3.07"×3.38"	✓



Certificazione IAFIS

L'organizzazione FBI ha definito uno standard per valutare la qualità dell'immagine (IQS) catturata da scanner IAFIS -



Appendix F "Electronic Fingerprint Transmission Specification" (EFTS)

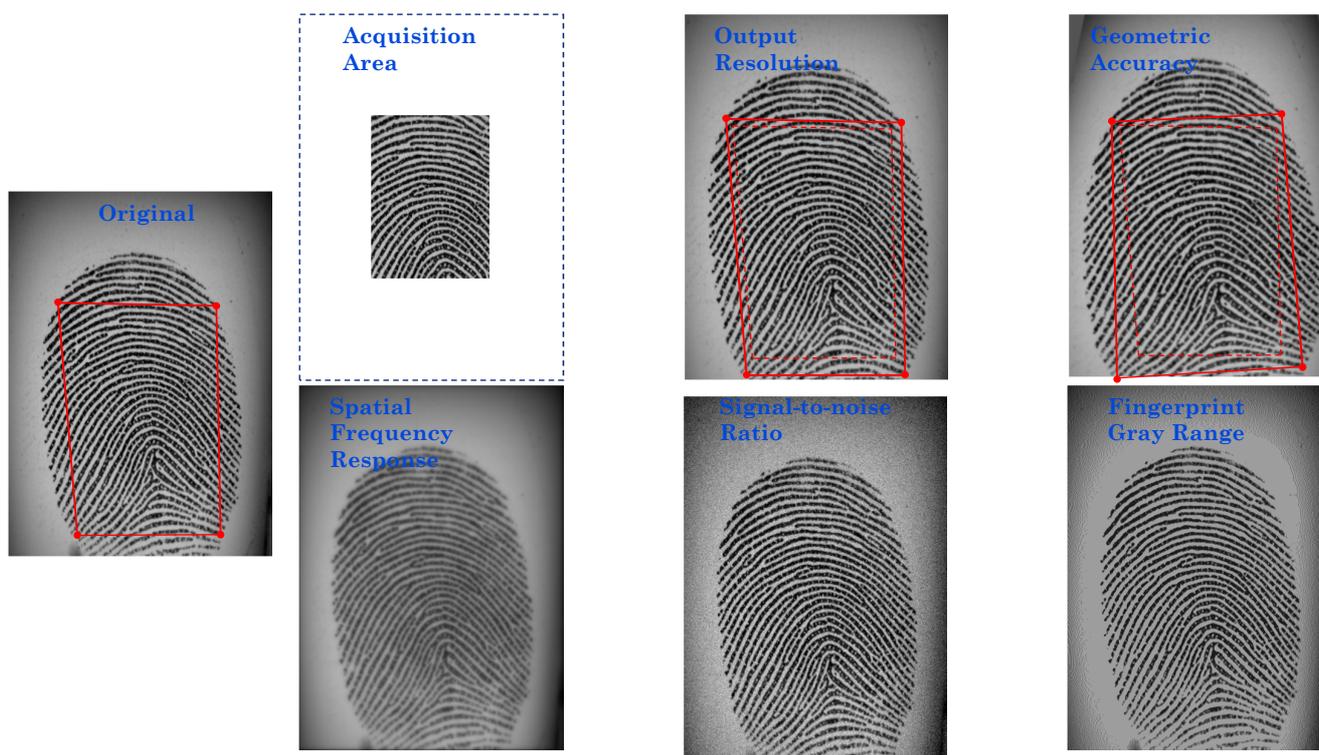


Certificazione PIV

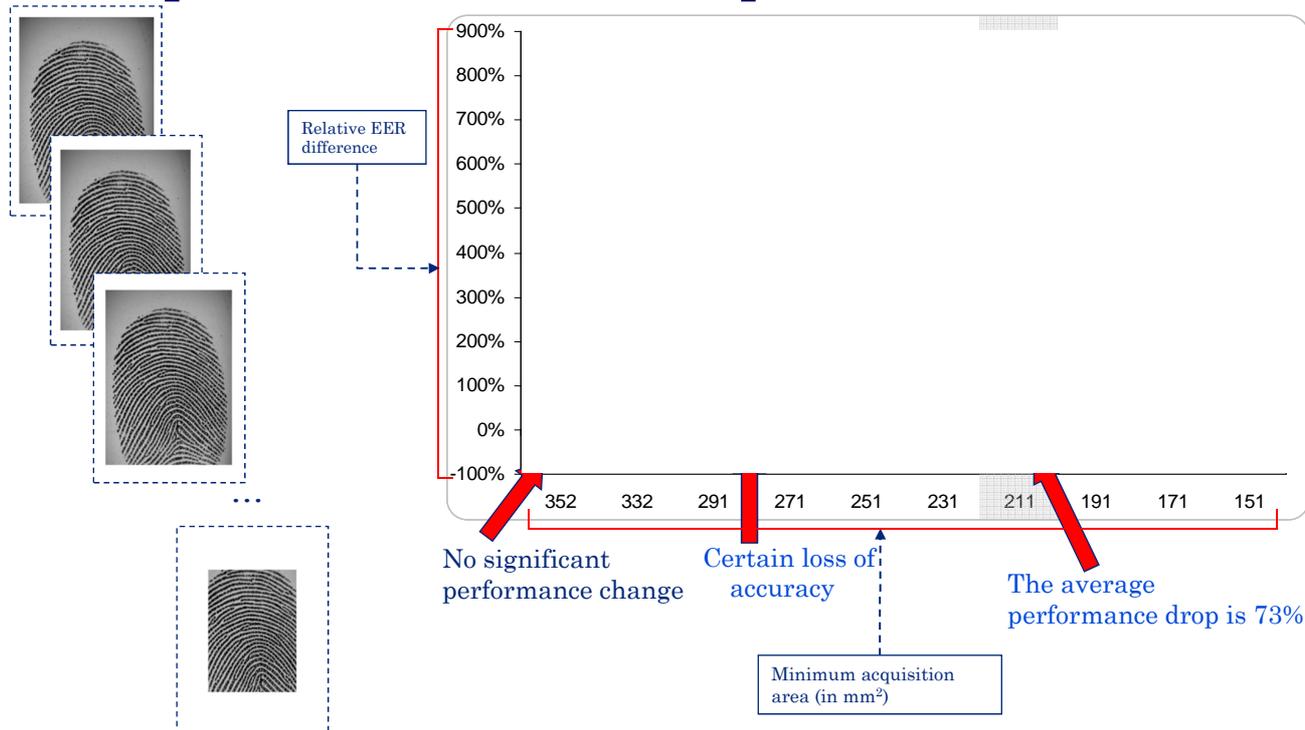
Recentemente, per dare supporto al programma PIV (Personal Identity Verification) l'organizzazione FBI ha introdotto uno standard IQS per dispositivi di cattura di un'impronta di un singolo dito da impiegare per l'accesso a servizi e sistemi informativi federali



Parametri di qualità degli scanner



L'area del sensore: il parametro più importante ai fini delle prestazioni



Confronto d'impronte digitali

Obiettivo: verificare la similarità tra due impronte

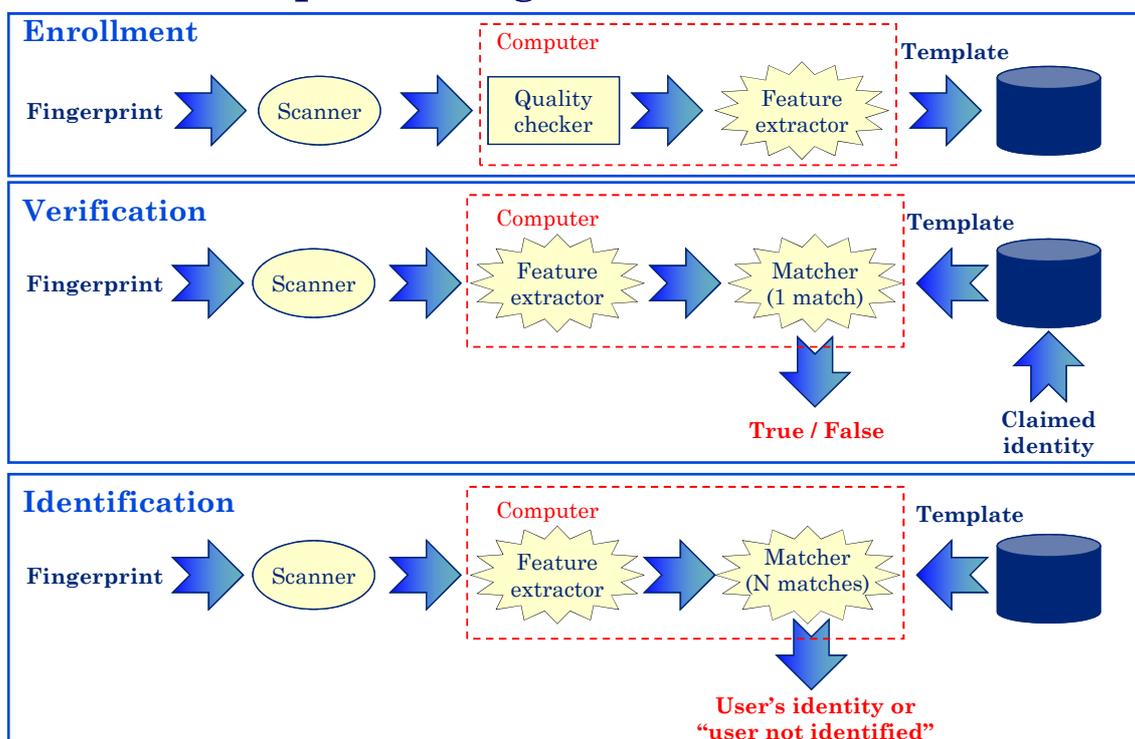


Impronte di uno stesso dito



Impronte di dita diverse

Architettura di un sistema di riconoscimento basato su impronte digitali



Perché il confronto di impronte è così difficile?



scarsa sovrapposizione



condizioni della pelle molto diverse



elevata distorsione non lineare

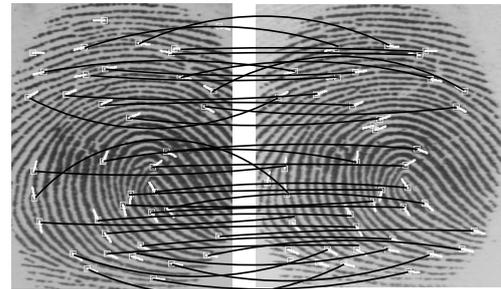
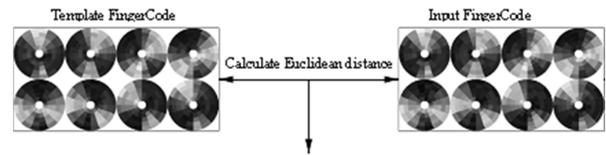
Coppie di immagini della stessa impronta che erroneamente non sono state riconosciute come tali dalla maggior parte degli algoritmi sottmessi a FVC2002

Riconoscimento di impronte: principali problematiche

- **Eccessivo spostamento e/o distorsione**
 - Scarsa sovrapposizione tra il template e l'impronta in input. Questo problema è particolarmente rilevante per i sensori con area d'acquisizione piccola. Uno spostamento di soli 2 mm (impercettibile per l'utente) determina una traslazione di circa 40 pixel in un'impronta acquisita a 500 dpi.
- **Distorsione non lineare della pelle**
 - L'acquisizione di un'impronta consiste nel mappare una forma tridimensionale sulla superficie bidimensionale del sensore. Si produce in questo modo una distorsione non lineare, dovuta all'elasticità della pelle, che può variare in acquisizioni successive della stessa impronta.
- **Pressione variabile e condizioni della pelle**
 - Pressione non uniforme del dito sul sensore, impronta troppo secca o umida, malattie della pelle, sporcizia sul sensore, umidità nell'aria.
- **Errori nell'estrazione delle caratteristiche**
 - Gli algoritmi di feature extraction sono imperfetti e spesso introducono errori di misurazione, in particolare con impronte di bassa qualità.

Tecniche di confronto

- **Tecniche basate sulla correlazione tra immagini**
 - Correlazione spaziale tra immagini query e template
 - Sensibile a trasformazioni rigide e non lineari
 - Complessità computazionale elevata
- **Approcci basati sull'analisi del ridge pattern**
 - Analisi della frequenza, dell'orientazione delle ridge line, analisi della texture dell'impronta
 - Basso potere discriminante
- **Metodi basati su minuzie**
 - Analisi delle minuzie (tipo, posizione, orientazione)
 - Si tratta di un problema di point pattern matching



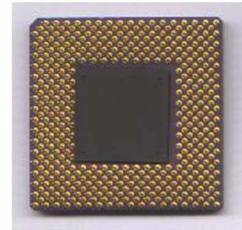
Embedded fingerprint-based biometric systems

- **Terminali** per controllo di accessi fisici
 - operano in modalità stand-alone o in rete
- **MOD** (Match On Device): scanner con capacità di feature extraction e matching on-board
 - per evitare di trasmettere immagini/template a un PC host
- **MOC** (Match On Card): lo scanner effettua feature extraction e una smart card elabora il confronto tra template
 - il template dell'utente non esce mai dall'ambiente protetto della smart card
 - MOC non necessariamente è più sicuro di MOD, infatti anche se il template di enrolment non lascia mai la smart card, il template corrente per il confronto è fornito dal dispositivo per la verifica
- **Moduli di riconoscimento** (companion chip)
 - per l'integrazione in dispositivi di terze parti



Prestazioni dei sistemi embedded

- Le risorse di calcolo di un sistema embedded sono significativamente inferiori a quelle di un moderno PC
 - 100..200 MIPS invece di 10,000 o più MIPS
 - RAM limitata (solitamente <16 MB)
 - di solito assenza di supporto floating-point
- Gli algoritmi devono essere fortemente ottimizzati
 - sempre scritti in C (C++) ottimizzato con porzioni in linguaggio assembly
 - conversione da floating point ad aritmetica intera
 - uso di tecniche di pre-calcolo e discretizzazione
- L'ottimizzazione può rendere un algoritmo 100 o più volte veloce



Impronte false

Diamonds are forever
(1971)



Bond goes undercover as Peter Franks, a diamond smuggler...



Creare impronte false

- Creare una falsa impronta non è semplice, ma con appropriate conoscenze e idonei materiali...
 - molto semplice con la cooperazione dell'utente
 - materiali tipici:
 - **Gelatina, Silicone, Latex.**



Gelatina



Silicone



Latex

False impronte e dispositivi

- La resistenza dei dispositivi commerciali agli attacchi con false impronte è stata studiata in recenti lavori tra cui:
 - Fingerprint recognition—don't get your fingers burned [Van der Putte, Keuning, 2000]
 - Impact of artificial “gummy” fingers on fingerprint systems [Matsumoto, 2002]
 - Fake Finger Detection by Skin Distortion Analysis [A. Antonelli, R. Cappelli, D. Maio and D. Maltoni - IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2006]
- Possibili misure
 - Proprietà intrinseche della persona
 - elasticità della pelle, resistenza elettrica, colore della pelle,
 - Segnali generati involontariamente
 - Pulsazione, pressione del sangue, traspirazione della pelle, ...
 - Risposte volontarie/involontarie a stimoli esterni

Riconoscimento di false impronte mediante analisi della distorsione

L'utente deve posizionare il dito sullo scanner e applicare una certa pressione mentre ruota il dito stesso



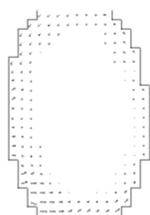
Real finger



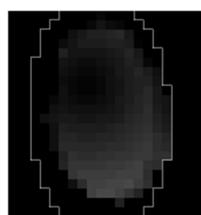
Fake finger



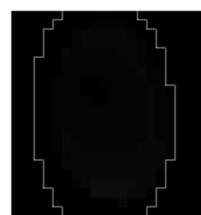
Source frame



Optical Flow



Distortion Map

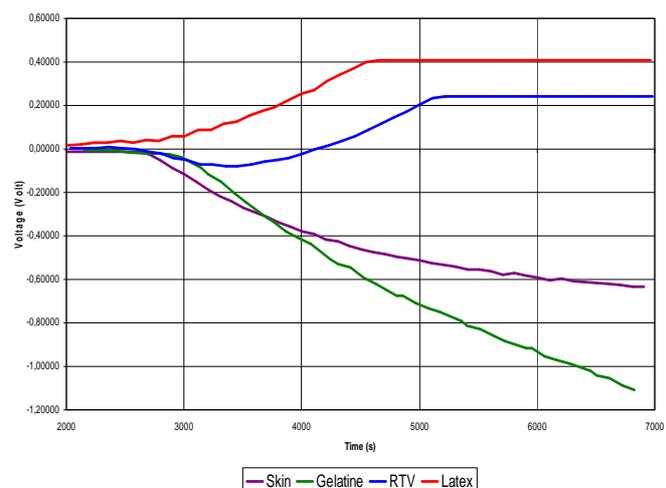


Integrated DM



DistortionCode

Riconoscimento di false impronte mediante analisi dell'odore



- L'idea:
 - Usare “nasi elettronici” per rilevare presenza di materiali diversi dalla pelle umana