

**Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích
Přírodovědecká fakulta**

Analýza biometrických mechanismů smartphonů

Bakalářská práce

Daniel Pražák

Školitel: Ing. Petr Břehovský.

České Budějovice 2019

Bibliografické údaje

Pražák, D., 2019: Analýza biometrických mechanismů smartphonů. [Analysis of biometric mechanisms of smartphones. Bc. Thesis, in Czech] – 30 p., Faculty of Science, University of South Bohemia, České Budějovice, Czech Republic.

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá analýzou metod, které umožňují prolomit biometrické autentizace chytrých telefonů. Teoretická část seznamuje čtenáře s problematikou biometrických autentizačních metod a pojednává o technologiích a metodách využívaných k jejich prolomení ve smartphonech. Praktická část zahrnuje testování popsanych metod na chytrých telefonech s operačními systémy Android a iOS. Na závěr bude porovnána úspěšnost jednotlivých metod mezi sebou a vyvození závěrů o bezpečnosti biometrických autentizačních mechanismů u chytrých telefonů.

Klíčová slova

čtečka otisků prstů, senzor otisků prstů, snímač otisků prstů, Touch ID, autentizace, biometrie

Abstract

This thesis deals with the analysis of methods that allow to break the biometric authentication on smartphones. The theoretical part of the work acquaints the reader to the issue of biometric authentication methods and concerns technologies and methods used for their break in smartphones. The practical part includes testing describing methods on smartphones with Android and iOS. At the conclusion will be compared the success of various methods among themselves and will be make a conclusion about the safety of biometric authentication mechanisms in smartphones.

Keywords

fingerprint sensor, Touch ID, authentication, biometrics

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci Analýza biometrických mechanismů smartphonů jsem vypracoval samostatně pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury.

Prohlašuji, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb. v platném znění souhlasím se zveřejněním své bakalářské práce, a to v nezkrácené podobě elektronickou cestou ve veřejně přístupné části databáze STAG provozované Jihočeskou univerzitou v Českých Budějovicích na jejích internetových stránkách, a to se zachováním mého autorského práva k odevzdanému textu této kvalifikační práce. Souhlasím dále s tím, aby toutéž elektronickou cestou byly v souladu s uvedeným ustanovením zákona č. 111/1998 Sb. zveřejněny posudky školitele a oponentů práce i záznam o průběhu a výsledku obhajoby kvalifikační práce. Rovněž souhlasím s porovnáním textu mé kvalifikační práce s databází kvalifikačních prací Theses.cz provozovanou Národním registrem vysokoškolských kvalifikačních prací a systémem na odhalování plagiátů.

V Českých Budějovicích dne 16. 4. 2019

Daniel Pražák

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Petru Břehovskému za metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat Mgr. Jakobovi Geyerovi za odborné poznatky při konzultacích ohledně praktické části bakalářské práce, konkrétně při návrhu jedné z metod.

Obsah

Úvod.....	1
1 Otisk prstu.....	2
1.1 Historie	2
1.2 Papilární linie v rámci stavby kůže.....	3
1.3 Charakteristiky otisků prstů.....	5
1.3.1 Singularity a třídy	5
1.3.2 Markanty.....	6
1.3.3 Detaily linií	7
2 Snímače otisků prstů v chytrých telefonech	8
2.1 Kapacitní.....	8
2.2 Swipe	9
2.3 Ultrazvukové	10
Praktická část.....	12
3 Metodika a cíle	12
4 Testovaná zařízení	13
4.1 Apple iPhone 8 Plus	13
4.2 Samsung Galaxy S10.....	14
4.3 Samsung Galaxy S5.....	15
5 Metody a jejich návrh	16
5.1 3D Otisk.....	16
5.1.1 Sejmутí otisku	16
5.1.2 Vytváření 3D modelu	18
5.2 Odlitek otisku	20
5.2.1 Vytvoření odlitku.....	20
6 Testování a výsledky	22
6.1 Kapacitní senzor	22
6.2 Ultrazvukový	23
6.3 Swipe	25
Závěr	27
Seznam použité literatury	28
Seznam tabulek	30
Seznam obrázků.....	30

Úvod

V současné době dochází k velkému rozšíření chytrých telefonů se čtečkou otisků prstů. Pro uživatele se jedná o pohodlnou a rychlou autentizaci a následný přístup ke svému chytrému telefonu. Počátky komerčního využívání senzorů otisků prstů v telefonech se datují do roku 2013, kdy americká společnost Apple Inc. Představila první chytrý telefon, model iPhone 5s, se čtečkou otisků prstů integrovanou v domovském tlačítku a definovala tak nový způsob autentizace u smartphonů. Myšlenky se krátce poté ujali i ostatní výrobci telefonů s operačním systémem Android a čtečka otisků prstů se začala významně rozšiřovat. V současné době ji nabízejí i telefony střední třídy, a tak se tento způsob autentizace pochopitelně rozšiřuje stále k více uživatelům.

Nicméně jak správně upozorňuje společnost Kaspersky Lab¹ zabývající se globální kyber bezpečností již od roku 1997, senzory otisků prstů rozhodně nejsou bezchybné. Většina senzorů totiž nedokáže rozlišit mezi skutečným prstem a „odlitkem“, což představuje hrozbu bezpečnosti.

Jindy je zase na vině samotný výrobce smartphonu, který sice použije nejnovější dostupnou technologii, ale nedokáže ji bezpečně integrovat do svého systému. Příkladem pak jistě mohou být společnosti HTC a Samsung, které ve svých chytrých telefonech ukládaly snímky otisků prstů uživatelů v nezašifrované podobě jako soubor s příponou .bmp, tedy jako obyčejný bitmapový obrázek. Jakákoliv aplikace s povoleným přístupem k uživatelským obrázkům a přístupem k internetu tak mohla snímky otisků prstů ukrást.

A právě v této práci se budu zabývat otázkou, zda jsou již dnešní čtečky otisků prstů u smartphonů bezpečné, či je možné je jednoduchým způsobem oklamat. Využiji již ověřené metody k prolomení biometrických autentizačních mechanismů smartphonů a pokusím se je replikovat na novějších technologiích současných smartphonů od různých výrobců.

¹ Mobile fingerprint sensors: more or less secure? In: Kaspersky Lab [online]. 2016 [cit. 2016-05-15].

1 Otisk prstu

Kapitola shrnuje historii zkoumání otisků prstů a vyzdvihuje důležité osobnosti spojené s touto problematikou. Další část kapitoly pojednává o papilárních liniích, jejich vzniku, charakteristice, zařazuje je do tříd a věnuje se jejich markantům a detailům.

1.1 Historie

Nejstarší dochovaný důkaz znalosti existence papilárních linií sahá do období několik tisíciletí před naším letopočtem, kdy indiánské kmeny, sídlící na území dnešního státu Indiana ve Spojených státech amerických, vytvářely ryté obrazy znázorňující lidskou ruku včetně papilárních linií, tzv. „petroglyfy“.²

První zmínky o využívání otisku prstu jako unikátního identifikačního prvku se datují do 9. století před naším letopočtem. V té době Asyřané používali specifickou podobu článků prstů, aby zabránili falsifikaci vlastnoručně vyrobených hliněných tabulek. K podobným účelům sloužily otisky také při výrobě keramických výrobků v Řecku, Egyptě a na území Římské říše.

Jakožto prostředek k určování totožnosti osob začali otisk prstu poprvé používat v Číně. Důkazem je vůbec první spis o otiscích čínského autora Kio Kung-yen, podle kterého byli Číňané s významem otisku dobře obeznámeni a využívali ho při obchodních záležitostech. V období od 7. do 10. století n. l. nařizoval starý čínský zákoník otiskem prstu verifikovat rozvodový dokument.

Přibližně ve stejném období začali výhod daktyloskopie využívat také v Japonsku, kde se vůbec poprvé zaměřili na otisk z kriminalistického hlediska. Konkrétně byl snímán levý palec – tzv. „bo-han“ – pouze zločincům. Odsouzení museli stvrdit svým otiskem i proti nim vznesený rozsudek. Postup byl prováděn až do roku 1868 a šlo tak o vůbec první rozsáhlou registraci otisků prstů usvědčených zločinců.

Patrně jako první, kdo se otiskům prstů začal věnovat z vědeckého hlediska, byl italský lékař a přírodovědec Marcello Malpighi, který v roce 1686 zkoumal papilární linie pod mikroskopem a popsal spirálu a smyčku, tedy dva z dnes již několika základních typů dermatoglyfů. Přibližně o sto let později rozpoznal unikátnost otisku prstu britský kreslář

² JEDLIČKA, Miroslav. Kriminalistická daktyloskopie. Kriminalistika [online]. [cit. 2019-04-15].

a grafik Thomas Bewick, který otisk používal jako podpis u svých děl a publikací.³

O největší přínos v oblasti daktyloskopie se postaral Jan Evangelista Purkyně, český fyziolog, který v roce 1823 ve svém latinsky psaném spisu poprvé popsal vzory papilárních linií a na základě jejich geometrického upořádání určil devět typů vzorů – oblouk, strmý oblouk, ulnární smyčka, radiální smyčka, paví oko, dvojsmyčka, spirální vír, eliptický vír a kruhový vír. Rovněž stanovil jako podstatný klasifikační znak tzv. deltu (trojúhelníkové seskupení papilárních linií). Práce však řadu let nebyla mezinárodně uznávána.⁴

Až v roce 1888 položil základy kriminalistické daktyloskopie Dr. Henry Faulds z Tokia. Tomu se jako prvnímu podařilo určit totožnost, dopadnout a usvědčit pachatele dvou krádeží za pomoci otisků prstů sejmutých na místě činu. Jeho publikace v časopise *Nature*, popisující zkušenost při využití nové metody, pomohla k rozšíření daktyloskopické identifikace v kriminalistice do Velké Británie a Německa.⁵

1.2 Papilární linie v rámci stavby kůže

Kůže je největší lidský orgán skládající se z vrstvy několika druhů buněk. Kromě estetické funkce chrání tělo před bakteriemi a vnějším prostředím, zajišťuje termoregulaci, umožňuje vnímat tlak, teplo, chlad a cit, zbavuje tělo odpadních látek a podílí se na příjmu potřebných vitamínů. Plocha kůže na lidském těle dospělého člověka činí 1,6 – 1,8 m² a váží přibližně 3 kilogramy. Její tloušťka je na různých místech těla rozdílná – od 0,5 do 4 mm. Nejtenčí kůže se nachází na očních víčkách a uchu, naopak v místech většího opotřebení a tlaku – plosky nohou, záda či dlaně – je nejtlustší.

Kůži tvoří nervová zakončení, cévy pro zásobování živinami, potní žlázy zajišťující termoregulaci, mazové žlázy sloužící k promaštění pokožky, vlasové váčky a mnoho dalších důležitých částí (obr. 1)⁶. Stavbu kůže tvoří tři hlavní vrstvy: pokožka (epidermis), škára (dermis) a podkožní vazivo (hypodermis). Ze škáry vybíhají proti pokožce hřebínkovité výběžky (tzv. papily), ve kterých se nacházejí nervová zakončení pro vnímání citu a krevní

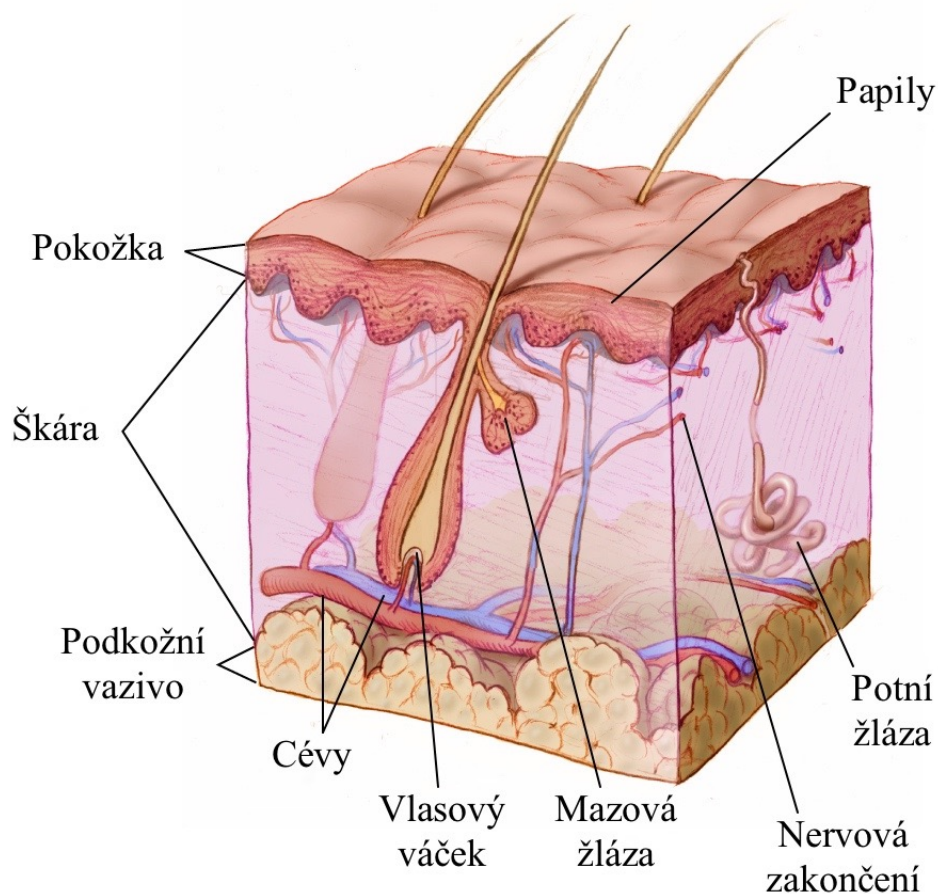
³ SAMS, C. *Journal of the Forensic Science Society: Thomas Bewick—His Mark*. Issue 4. England: Elsevier, 1975. ISBN 0015-7368.

⁴ GRZYBOWSKI, Andrzej. *Clinics in Dermatology: Jan Evangelista Purkynje (1787–1869): First to describe fingerprints* [online]. 2015 [cit. 2019-04-16].

⁵ TREDoux, Gavan. *Henry Faulds: the Invention of a Fingerprinter* [online]. 2003 [cit. 2019-04-16].

⁶ BLISS, Don. *Skin Anatomy*. In: *National Cancer Institute* [online]. May 26, 2010 [cit. 2016-05-15].

vlásečnice sloužící k výživě pokožky. Stejný vzor papil jako uvnitř kůže je tvořen i na jejím vnějším povrch, kde představuje papilární linie dosahující výšky od 0,1 do 0,4 mm a šířky 0,2 – 0,7 mm. Místa mezi výběžky se nazývají brázdy. Kombinace papil a brázd tvoří charakteristický obraz otisku, který se nachází na dlaních, prstech rukou i nohou a na chodidlech.



Obrázek 1: Stavba a vrstvy kůže

Papily se začínají vytvářet již při vývoji plodu, konkrétně v prenatálním období mezi čtvrtým a pátým měsícem. V průběhu života se linie zvyšují a rozšiřují, ale jejich unikátní struktura se nikterak nemění. Vlivem stárnoucí kůže mohou specifickou kresbu linií narušovat pouze vrásky. Při poškození kůže popálením či pořezáním se papilární linie odstraní dočasně a po zahojení dojde k jejich obnově do původní podoby.

Z kriminalistického a bezpečnostního hlediska je významná zejména skutečnost, že kresba linií je pro daného člověka jedinečná. Na světě neexistují dva jedinci, kteří by měli stejnou kresbu papilárních linií. S jistou pravděpodobností shody lze operovat, nicméně je extrémně nízká, konkrétně jde o poměr 1:64 miliardám.

1.3 Charakteristiky otisků prstů

Klasifikace znaků průběhu papilárních linií je určována tříúrovňovým, po sobě jdoucím systémem. Nejprve je otisk zařazen do třídy, následně jsou určeny markanty a na závěr jsou rozlišovány detaily linií.

1.3.1 Singularity a třídy

Ačkoli se otisky prstu vyznačují svojí unikátností, lze je všechny zařadit do specifických tříd, které jsou charakterizovány opakujícími se vzory průběhu linií. Globální tvary se vyznačují určitým počtem singularit, jež jsou označovány jako jádro a delta. Jádro představuje pomyslný vrchol otisku, bod delta je popsán jako místo, odkud se linie rozbíhají do třech různých směrů.

Zařazení otisků do tříd výrazně urychluje vyhledávání shody, kdy není potřeba prohledávat celou databázi, ale pouze její podmnožinu. O jejich klasifikaci se zasloužil Dr. Edward Henry na přelomu 19. a 20. století. Tříd je celkem pět, ale základ tvoří tři – papilární linie jdoucí do oblouku se rozdělují na obyčejný a klenutý, linie jdoucí do smyčky jsou rozdělovány podle strany na pravou a levou (Obrázek 2).⁷

Definice tříd podle vzoru papilárních linií a singularit:

- **Klenutý oblouk** – obsahuje jedno jádro a jednu deltu, přičemž bod delty se nachází přímo pod jádrem
- **Oblouk** – neobsahuje žádnou singularitu
- **Levá smyčka** – obsahuje jedno jádro a jednu deltu, bod delty se nachází vpravo od jádra
- **Pravá smyčka** – obsahuje jedno jádro a jednu deltu, bod delty se nachází vlevo od jádra
- **Spirála** – obsahuje jedno jádro a dvě delty, jádro se nachází mezi body delty



Obrázek 2: Třídy otisků prstů

⁷ SHOEWU, Oluwagbemiga a N. T. MAKANJUOLA. Biometric-based Attendance System: LASU Epe Campus as Case Study. In: *ResearchGate* [online]. January 2014 [cit. 2016-04-30].

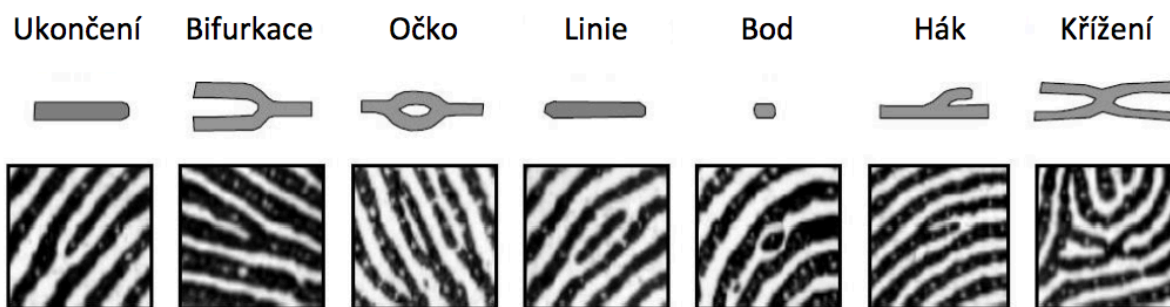
1.3.2 Markanty

Druhou úroveň při klasifikaci otisků prstů představuje určení markantů. Jde o charakteristické rysy papilárních linií, na jejichž základě probíhá porovnání otisků. Markanty jsou zpravidla zařazovány do tříd a jsou jim přiřazeny souřadnice X a Y a úhel jakým směřují. Otisk může obsahovat několik desítek markantů, přičemž nejčastějším zástupcem je tzv. vidlice, tedy rozdvojení papilárních linií.

Za markant lze obecně považovat jakoukoli nepravidelnost nebo zvláštnost v otisku. Aby byla jejich charakterizace o něco snazší, je určováno více než deset typů markantů. K základním se řadí sedm z nich.

Základní typy markantů:

- **Ukončení** – papilární linie má tvar polopřímky
- **Rozdvojení (vidlice)** – papilární linie se rozdvouje
- **Očko** – papilární linie se spojuje do kruhu
- **Linie** – papilární linie ve tvaru úsečky mezi ostatními liniemi
- **Bod** – samostatná linie ve tvaru tečky
- **Hák** – papilární linie se rozdvouje, přičemž jedna je kratší než 3 mm
- **Křížení** – dvě papilární linie se kříží

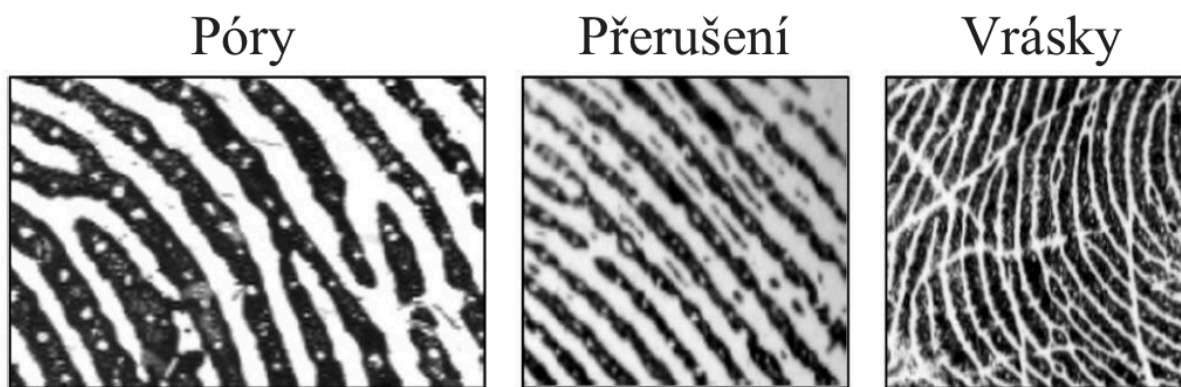


Obrázek 3: Základní typy markantů

Více typů markantů rozlišují především policejní technici na odboru kriminalistické techniky a expertíz. V komerční sféře jsou většinou určovány pouze dva typy markantů – ukončení a rozdvojení, které se zároveň řadí mezi ty nejčastěji se vyskytující. Důvodem je zejména zkrácení výpočetní doby algoritmu a tím urychlení celého procesu při porovnání otisků.

1.3.3 Detaily linií

Po zařazení otisku do třídy a určení jednotlivých markantů jsou na třetí úrovni rozlišovány ještě detaily jednotlivých papilárních linií. V potaz se bere poloha pórů kůže na liniích, přerušení linií a vrásky vzniklé stárnutím kůže. Hledí se také na rozměry linií i brázd mezi nimi.



Obrázek 4: Detaily linií

Detaily linií jsou při porovnávání dvou otisků velmi cenným atributem a umožňují určit shodu s vysokou mírou přesnosti. Je v podstatě nulová pravděpodobnost, že by dva jedinci měli v rámci jednoho otisku kromě singularit a markantů shodné i detaily linií. K jejich rozpoznání a určení je však potřeba disponovat kvalitním snímkem otisků ve vysokém rozlišení.

2 Snímače otisků prstů v chytrých telefonech

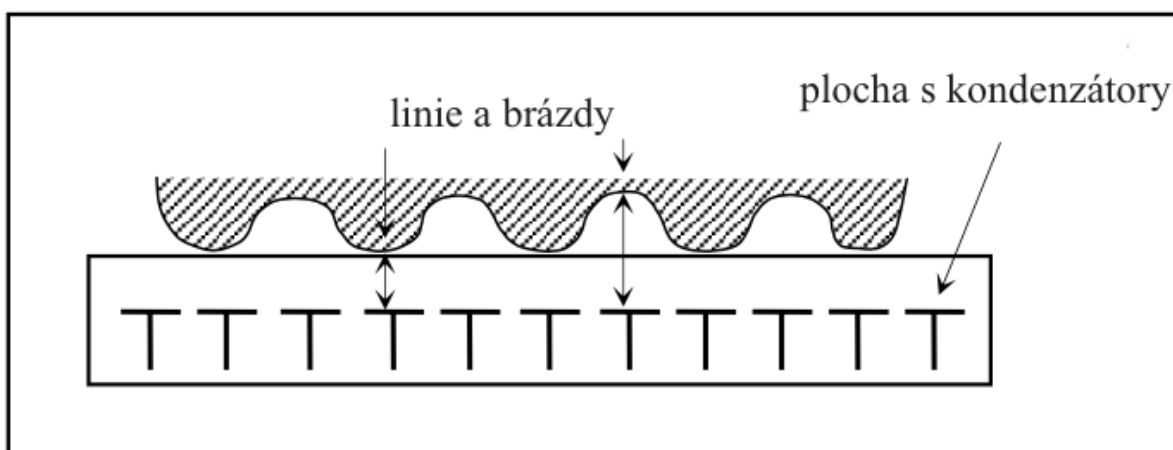
V podstatě nejdůležitější částí při snímání otisků jsou samotné senzory. Ty se liší nejenom samotným způsobem snímání, ale také velikostí, cenou a hlavně bezpečností. Všechny současné senzory patří v podstatě vždy do jedné z následujících skupin: optické, kapacitní a ultrazvukové. Optický senzor se ale nikdy v žádném telefonu neobjevil.

První čtečka otisků prstů byla použita v roce 2013 v iPhone 5s americké společnosti Apple Inc. Konkrétně se jednalo o kapacitní senzor, který byl integrovaný přímo do domovského tlačítka telefonu. Postupem času se čtečky otisků prstů začaly objevovat i v dalších telefonech konkurenčních značek, kdy například jihokorejská společnost Samsung nasadila do svého telefonu jednodušší verzi kapacitního senzoru, konkrétně tzv. Swipe senzor.

V poslední době se v telefonech začínají používat senzory ultrazvukové, které přináší několik výhod, kdy tou hlavní je bezpečnost. Předpokládá se, že senzory využívající ultrazvukových vln postupně v telefonech nahradí kapacitní senzory, a to především díky schopnosti naskenovat otisk prstu i skrze displej

2.1 Kapacitní

Kapacitní snímače otisků prstů jsou v současné době vůbec nejrozšířenější, přičemž jejich začátek komerčního využívání sahá do 90. let minulého století. Jedná se o senzory, které jsou nejčastěji k nalezení v současných chytrých telefonech, i když je pomalu začínají nahrazovat senzory ultrazvukové.



Obrázek 5: Schéma kapacitního senzoru

Kapacitní snímač se řadí mezi polovodičové senzory. Jedná se o dvourozměrné pole složené z destiček mikro kondenzátorů, které jsou zabudované do čipu, čímž je vytvořen

skener. Ten má tak velkou citlivost, že po přiložení prstu dokáže díky změně elektrického náboje rozeznat, kde jsou papilární linie. V místě, kde mezi kondenzátorem a prstem dojde ke změně náboje, se nachází papilární linie neboli hřeben. Naopak v místě, kde ke změně elektrického náboje nedojde, se nachází brázda. Snímač je pak schopný zaznamenat, v jakém místě přesně došlo ke změně náboje a v jakém naopak ne. Následně převodník analogového signálu na digitální dokáže zaznamenané údaje předat v příslušné formě dále ke zpracování, kdy jsou porovnány s již naskenovanými vzory.

Schopnost kapacitního skeneru přesně rozeznat otisky prstů, je přímo úměrně dána počtem kondenzátorů. Jednodušší snímače disponují jen několika stovkami kondenzátorů. Naopak kvalitní skenery mají kondenzátorů několik tisíc. Zpočátku se v chytrých telefonech používaly senzory otisků prstů s malým počtem kondenzátorů, tudíž snímače nebyly tak bezpečné, a navíc ani nebyly tak přesné a rychlé. Nejnovější telefony disponující senzorem otisků prstů se ale mohou pochlubit již kvalitním snímačem s několika tisíci kondenzátory.

Hlavní výhodou kapacitních skenerů je především bezpečnost, obzvláště při porovnání s optickými senzory, které se však nikdy do telefonů nedostaly. Kapacitní senzory v telefonech navíc reagují převážně na specifickou změnu velikosti náboje v kondenzátorech při kontaktu s lidskou pokožkou. Proto není jednoduché kapacitní snímač obelstít například vytištěnou 3D mapou otisku. Na prolomení je potřeba mít skutečně kvalitní snímek otisku prstu a použít vodivý inkoust.

2.2 Swipe

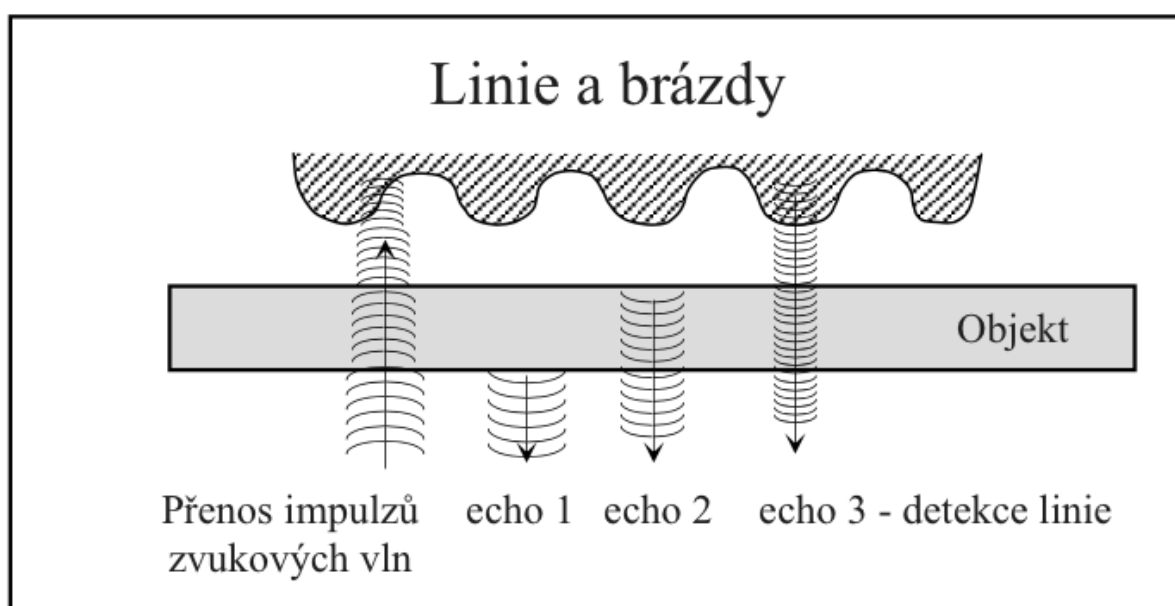
Dalším zástupcem senzorů otisků prstů v chytrých telefonech je tzv. Swipe snímač. Nicméně, nejedná se o zcela odlišný senzor, ale o druh kapacitního snímače. Swipe se používal v době, kdy se se čtečkami otisků prstů v telefonech teprve začínalo. Vzhledem k vysoké ceně jednotlivých součástek kapacitního snímače, a především pak senzorů s vysokým počtem kondenzátorů, přistoupili někteří výrobci ke kompromisu. Vytvořili snímač, který měl menší počet kondenzátorů, ale i přesto dokázal vytvořit kvalitní snímek otisku prstu

Namísto toho, aby se naskenoval celý otisk najednou, se po snímači přejelo prstem, čímž se otisk nasnímal v několika fázích a nebylo tak zapotřebí používat více kondenzátorů. Nevýhodou Swipe snímače ale byla jeho spolehlivost a tím i snížení uživatelské přívětivosti. Mnohdy totiž bylo zapotřebí po senzoru přejet vícekrát, aby ověření proběhlo v pořádku. Typickým příkladem telefonu se Swipe snímače je Samsung Galaxy S5.

2.3 Ultrazvukové

Posledním zástupcem čteček otisků prstů v chytrých telefonech, jsou snímače ultrazvukové. Ty jsou nejenom nejnovější, ale také nejpokročilejší. Hlavní předností ultrazvukových vln je schopnost pronikat skrze materiály, což se v případě chytrých telefonů projeví jako výhoda především při snaze docílit co nejmenších rozměrů. Ultrazvukové snímače jsou totiž schopné naskenovat otisk prstu například i skrze displej, čímž odpadá nutnost integrovat čtečku na záda telefonu nebo do fyzického domovského tlačítka pod displejem.

Ultrazvukový snímač je založený na odesílání akustických signálů směrem k prstu a zachycování tzv. echo signálů při každé změně impedance. Vyslané signály se od snímaného prstu odrazí a vrací se zpět k ultrazvukovému senzoru. Přijímač v závislosti na době, za kterou se signál vrátil, vyhodnotí, zdali se ultrazvukový signál odrazil od papilární linie či od brázdy. Čím déle bude prst na snímač přiložený, tím detailnější otisk prstu se podaří naskenovat.



Obrázek 6: Schéma ultrazvukového senzoru

Výhod ultrazvukového snímače otisků prstů je hned několik. V první řadě je možné otisk naskenovat i za předpokladu, že je prst špinavý. Ultrazvukovým signálům nevadí ani vlhkost nebo dokonce voda, tudíž na rozdíl od kapacitních senzorů nemají ty ultrazvukové problémy s potem na ruce. Největší výhodou je ovšem samotná bezpečnost, která je dokonce vyšší než u senzorů kapacitních. Prolomit ultrazvukový snímač je tak možné pouze na softwarové úrovni.

Nevýhodami jsou naopak déle trvající proces skenování, větší mechanické díly, a především pak vyšší pořizovací cena jednotlivých součástí. Proto v současné době nalezneme ultrazvukové čtečky otisků prstu jen ve vybraných telefonech, ale s jejich masivnějším rozšířením se do budoucna počítá, a to především kvůli jejich schopnosti skenovat prst skrze displej.

Praktická část

Tato kapitola se zabývá praktickou částí, tedy návrhem, realizací a testováním metod sloužících k analýze biometrických autentizačních mechanismů smartphonů, konkrétně senzorů otisků prstů.

3 Metodika a cíle

Cílem práce je otestovat míru zabezpečení jednotlivých typů senzorů otisků prstů, které se od roku 2013 začaly komerčně využívat v chytrých telefonech. Primárním účelem tedy je získat autentizaci, tím i přístup do telefonu a v konečném důsledku i ke všem datům, aplikacím a jejich obsahu, které jsou v telefonu uloženy.

Určité, převážně novější druhy senzorů ale mohou být komplexněji zabezpečené, jejich prolomení se nemusí zdařit a přístup do telefonu tak nebude získán. Za těchto okolností bude vždy popsáno, jak se určitý typ senzoru během pokusů o prolomení choval – zda rozeznal falešný otisk a odmítl autentizaci, nebo jestli ani nezaregistroval přiložení falzifikovaného otisku a tím tak pokus o jeho prolomení.

Každý jednotlivý druh čtečky otisků prstů bude testován na odlišném zařízení. Lišit se tak budou nejenom výrobci telefonů, ale také nainstalované mobilní operační systémy, tím i způsob a míra zabezpečení senzoru, ukládání a následné porovnání skenovaného otisku s předlohou. Brán v potaz bude i tvar senzoru, který by mohl hrát stěžejní roli při pokusech o rozpoznání falešného otisku.

4 Testovaná zařízení

Pro účely testování byla vybrána celkem tři zařízení s ohledem na použitý senzor a jeho nejnovější generaci. Každé zařízení představuje zástupce jednoho typu snímače otisků prstů používaného v odvětví chytrých telefonů. Při výběru byly také zohledněny dva nejrozšířenější mobilní operační systémy – Google Android a Apple iOS – kdy každý z nich má minimálně jednoho zástupce.

Zvoleny byly chytré telefony, které při daných specifikacích – typ senzoru a druh systému – disponují nejaktuálnějšími technologiemi v době psaní bakalářské práce. Snahou tak bylo dosáhnout co možná nejspravedlivějších porovnání.

Tabulka 1: Testovaná zařízení

Zařízení	Typ čtečky	Operační systém
iPhone 8 Plus	kapacitní	iOS 12.2
Galaxy S10	ultrazvuková	Android 9.0
Galaxy S5	swipe	Android 6.0.1

4.1 Apple iPhone 8 Plus

Zástupce pro kapacitní senzor byl zvolen Apple iPhone 8 Plus představený na podzim roku 2017. Jedná se o nejnovější telefon s platformou iOS, jenž nabízí snímač otisků prstů. Apple kapacitní senzor ve svých zařízeních marketingově označuje jako Touch ID a v případě zvoleného modelu se jedná již o druhou generaci snímače, která je rychlejší, nikoli však zabezpečenější.

Senzor je integrován do hlavního tlačítka Domů nacházejícího se na přední straně telefonu v okraji pod displejem. Tloušťka senzoru činí 170 mikronů a zaznamenává obraz otisku v rozlišení 500 ppi (pixelů na palec, pixels per inch). Snímač je chráněn laserově broušeným křišťálovým sklem, jež zároveň slouží jako čočka, která zaostří na bříško prstu. O registraci prstu se stará ocelový kroužek v okolí tlačítka, který po přiložení otisku vyšle k senzoru pokyn k zahájení skenování.⁸

Stěžejní informací pro tuto bakalářskou práci je, že Touch ID snímá jen subepidermální

⁸ Apple Special Event. September 10, 2013 In: Youtube [online]. 8.10.2013 [cit.2018-05-25].

vrstvu kůže, tedy že ignoruje odumřelou kůži prstu a skenuje jen novou kůži pod ní. Tím by měl snímač snadno rozeznat, zda se jedná o falešný otisk prstu či nikoli. Při testování a následném vyhodnocování bude tento fakt zohledňován.

Ze snímku Touch ID provede inteligentní analýzu a otisk zařadí do kategorie v závislosti na tvaru papilárních linií – oblouk, smyčka či spirála. Vyhodnoceny jsou také markanty, drobné rozdíly v jejich směru způsobené strukturou pórů i struktura jejich okrajů.

Informace jsou následně zašifrovány a uloženy jako matematické vyjádření do bezpečnostní architektury Super Enclave, jež se součástí hlavního procesoru. Díky tomu jsou data oddělena od systému i aplikací a nelze k nim získat přístup. Data se ani nijak nezalohují a nikdy je nelze použít ke zjištění shody v jiné databázi otisků prstů nebo z nich zpětně sestavit obraz otisku.⁹

4.2 Samsung Galaxy S10

Ultrazvuková čtečka otisků prstů byla testována na Samsungu Galaxy S10, který zároveň představuje nejaktuálnějšího zástupce s tímto snímačem. Telefon byl představen začátkem roku 2019 a v době psaní bakalářské práce nabízí nejmodernější technologii ultrazvukového senzoru v kategorii smartphonů.

Telefon disponuje 3D ultrazvukovým snímačem od společnosti Qualcomm, tedy nejzabezpečenější mobilní čtečkou otisků prstů na trhu. Senzor o tloušťce menší než 0,2 mm je integrován pod displej, skrze který emituje zvukové vlny a pomocí nich mapuje jedinečný vzor otisku prstu – vlny snímají drobné vzduchové mezery mezi prstem a povrchem displeje, čímž určují linie a brázdy. Získaná data jsou následně předána procesoru k vyhodnocení, zda se jedná o shodu s dříve naskenovaným otiskem či nikoli.¹⁰

Zabezpečení snímače je zajištěno několika způsoby. Hlavní přednost spočívá ve schopnosti pomocí ultrazvukových vln naskenovat trojrozměrný obraz otisku prstu, což představuje také výhodu oproti dříve používaným dvojrozměrným optickým snímačům. Pro účely bakalářské práce je podstatný především fakt, že senzor při snímání otisku detekuje i průtok krve v prstu. Dodatečná ochrana by měla znemožnit čtečku oklamat falešným otiskem v podobě fotografie nebo odlitku.

⁹ BREWER, Teresa a Natalie KERRIS. *Apple Announces iPhone 5s—The Most Forward-Thinking Smartphone in the World* [online]. September 10, 2013 [cit. 2018-05-25].

¹⁰ Feast Your Eyes on the Future: The Galaxy S10's Stunning Display: Beefed-Up Biometric Security. *Samsung Newsroom* [online]. February 21, 2019 [cit. 2019-03-16].

Čtení pulzů také vede ke snazšímu rozpoznání otisku, pokud je prst mokrá nebo špinavý, čímž je zajištěna větší uživatelská přívětivost. Detekce průtoku krve může být navíc použita k monitorování srdeční frekvence, k měření BMI a analýze hladiny cukru v krvi. Tím se značně rozšiřuje funkcionality senzoru, kterou ostatní typy čteček (kapacitní a swipe) nejsou schopné z technologického hlediska nabídnout.¹¹

4.3 Samsung Galaxy S5

Samsung představuje jediného výrobce, který svůj telefon osadil swipe senzorem otisků prstů. Sporadicky využívaný snímač nabízí konkrétně model Galaxy S5 představený na začátku roku 2014, který je zároveň jediným, a tudíž také nejnovějším smartphonem, jenž zmíněnou čtečkou disponuje. I navzdory svému stáří byl proto zařazen mezi zařízení, která budou v rámci této bakalářské práce testována.¹²

Galaxy S5 byl vůbec prvním telefonem od Samsungu disponujícím biometrickou autentizací v podobě senzoru otisků prstů. Společnost využila swipe snímač kvůli nižším výrobním nákladům – senzor je vybaven menším počtem tranzistorů – a pro úsporu místa, kdy mohl být integrován do úzkého tlačítka Home.

Vzhledem k tomu, že je senzor příliš malý, aby mohl sejmout celý otisk prstu najednou, je potřeba po něm pomalu přejíždět od shora dolů. Tím se nasnímají jednotlivé části otisku, které software následně automaticky spojí do jednoho snímku. Popsaný přístup nicméně přináší sníženou přesnost snímání, kdy mohou představovat problém rychlost a úhel, jakým je po snímači přejížděno.¹³

Ačkoli snímač není schopný zajistit tak vysokou míru přesnosti a zabezpečení jako ostatní, výše popsané typy senzorů, v konečném důsledku to může pro účely bakalářské práce představovat negativum. V praxi mívá čtečka občasné problémy s rozpoznáním skutečného otisku, který byl do telefonu řádně přidán. Při použití falsifikátu by tudíž snímač mohl kopie papírných linií vyhodnotit jako nedostatečně čitelné, nikoli však díky vyššímu zabezpečení, ale kvůli omezeným schopnostem čtení otisků.

¹¹ CHENG, Francisco. Samsung Galaxy S10 taps Qualcomm 3D Sonic Sensor for top-notch security and accuracy. *OnQ Blog* [online]. February 20, 2019 [cit. 2019-03-16].

¹² Samsung unveils Galaxy S5 to focus on what matters most to consumers. *Samsung Mobile Press* [online]. February 24, 2014 [cit. 2018-05-25].

¹³ HUMRICK, Matt. Samsung Galaxy S5 Smartphone Review: Fingerprint Scanner. *Tom's Hardware* [online]. February 14, 2015 [cit. 2018-05-26].

5 Metody a jejich návrh

Za účelem analýzy míry zabezpečení kapacitního, ultrazvukového a swipe senzoru otisků prstů ve výše uvedených telefonech byly zvoleny dvě rozdílné metody. První z nich představuje 3D model otisku zrekonstruovaný z dvojrozměrné předlohy. Druhá metoda spočívá v tvorbě odlitku přímo z prstu jedince.

Metody byly zvoleny a navrženy s ohledem na testované typy senzorů tak, aby ve všech případech existovala jistá pravděpodobnost jejich prolomení. Brány v potaz byly technologické možnosti jednotlivých snímačů, jejich proces snímání otisku a přítomnost dalších prvků zajišťujících jejich vyšší bezpečnost (viz kapitola 5).

V rámci realizace vybraných metod byla zohledněna jejich finanční náročnost. V úvahu byla brána také dostupnost technologií k rekonstrukci modelu a odlitku otisku s tím, že první vybraná metoda představuje sofistikovanější způsob zhotovení a druhá je méně náročná jak z finančního, tak z technologického hlediska.

Následující kapitoly popisují proces návrhu a realizace jednotlivých metod za účelem následného otestování zabezpečení a analýzy senzorů otisků prstů v telefonech.

5.1 3D Otisk

První, technologicky i finančně náročnější zvolená metoda představuje vytvoření 3D modelu otisku prstu z dvojrozměrné předlohy. Proces se skládá z několika částí – nejprve bude otisk sejmut ze skleněného povrchu za pomoci daktyloskopické sady, získaný vzorek se následně vyfotografuje a převede z rastrové do vektorové grafiky pro účely vytvoření 3D modelu za pomoci softwaru, který bude sloužit jako předloha pro tisk na 3D tiskárně.

5.1.1 Sejmutí otisku

Jedním z hlavních cílů metody je získání otisku prstu bez vědomí majitele telefonu, tedy například z předmětů zabavených v rámci domovní prohlídky vykonané policejním orgánem. K těmto účelům byla použita kriminalistická sada pro snímání daktyloskopických vzorků, jež byla zapůjčena od Policie České republiky, Krajského ředitelství policie Jihočeského kraje, z odboru kriminalistické techniky a expertiz.

Zapůjčená daktyloskopická sada obsahovala:

- 50 ml daktyloskopický prášek Argentorat
- 50 ml daktyloskopický prášek Černý standard
- 1 ks jemný štětec Spokar s šířkou stírací plochy 2,54 cm
- 2 ks ultra jemný štětec „veverka“ s číselným označením NO. 1-0031
- 1 ks daktyloskopická páska transparentní s rozměry 5 x 914 cm
- 10 ks černé pozadí s rozměry 5 x 10 cm
- 10 ks bílého pozadí s rozměry 5 x 10 cm

Pro zajištění otisku prstu ze skla byl použit daktyloskopický prášek Argentorat, jemný štětec Spokar, ultra jemný štětec „veverka“ a 1 kus černého pozadí zmenšených rozměrů 2,5 x 5 cm.



Obrázek 7: Použitá sada pro sejmutí otisku ze skla

Na otisk prstu umístěného na skle byl nejprve pomocí jemného štětce nanášeno odpovídající množství Argentoratu. Následně za pomoci ultra jemného štětce byl krouživými pohyby prášek odstraněn z míst brázd otisku, čímž se zvýraznily papilární linie a dosáhlo se tak výsledku o odpovídající kvalitě. Přiložením černého pozadí přilnavou stranou na otisk došlo k jeho sejmutí – otisk se včetně detailů obtiskl na plochu pozadí a zároveň se zrcadlově otočil. Nakonec byl sejmutý otisk přelepen transparentní fólií, aby nedošlo k jeho rozmazání.



Obrázek 8: Proces snímání otisku

5.1.2 Vytváření 3D modelu

Pro potřeby vytvoření 3D modelu byl otisk zachycen 12megapixelovým fotoaparátem s teleobjektivem o šířce 52 mm a ohniskovou vzdáleností f/2.4. Fotografie byla následně exportovaná do profesionálního grafického editoru Adobe Photoshop ve verzi 19.0.

Za pomoci dostupných nástrojů byla na snímek aplikována tzv. alfa maska, čímž se vyznačily papilární linie a celkově došlo ke zvýraznění struktury otisku. Aplikace masky je nutná pro následný postup, kdy je fotografie otisku převáděna do vektorů.

Nicméně ani při snaze dosáhnout co možná nejlepšího výsledku nebylo možné zachovat původní strukturu otisku – papilární linie se úpravou na mnoha místech přerušily a celkově došlo ke ztrátě potřebných detailů. Lepšího výsledku nebylo možné dosáhnout ani při opakovaných pokusech či při využití jiného snímku otisku prstu.

Problém částečně představuje kvalita sejmutého otisku prstu pomocí daktyloskopické sady. V místě jádra otisku jsou linie často spojené, což může být zapříčiněno neodborným nanášením daktyloskopického prášku. Ve výsledných testech by uvedená nedokonalost pravděpodobně nepředstavovala problém, ale při snaze převést fotografii otisku do vektorů v požadované kvalitě je nežádoucí.

I navzdory výše popsaným nedokonalostem byl snímek otisku ve vektorech dokončen a po předchozí domluvě konzultován s panem Mgr. Jakubem Geyerem z Přírodovědecké fakulty Jihočeské univerzity, který se specializuje na 3D tisk. Během konzultací bylo dospěno

k závěru, že kvalita otisku ve vektorové grafice dostatečně neodpovídá požadavkům pro tisk na 3D tiskárnách, které jsou dostupné v rámci Přírodovědecké fakulty Jihočeské univerzity. Tiskárny nejsou schopné kvalitně tisknout v řádech desetin milimetrů, což je pro tisk papilárních linií bezpodmínečně nutné – linie dosahují výšky od 0,1 do 0,4 mm a šířky od 0,2 do 0,7 mm (viz kapitola 1.2).

Ačkoli se metodu nepodařilo kvůli nedostupnosti potřebných technologií a dostatečné kvalitě předlohy dokončit, bude i nadále zkoumána se snahou vytisknout 3D otisk v potřebné kvalitě. Přírodovědecká fakulta v následujících týdnech očekává doručení nového, pokrokovějšího druhu 3D tiskárny, jenž bude schopný tisknout v řádech mikronů. Jejím výsledkem by tak měl být odpovídající 3D otisk, kterým by mohla být provedena analýza senzorů otisků prstů v testovaných zařízeních.



Obrázek 9: Snímek otisku prstu převedený do vektorů

5.2 Odlitek otisku

Druhou, z technologického hlediska jednodušší a finančně dostupnější metodu představuje vytvoření odlitku prstu. Za pomoci tavné parfony a tekutého lepidla bude zkonstruována poměrně přesná kopie otisku prstu s detaily papilárních linií a některými markanty. Metoda byla zvolena zejména kvůli rychlému procesu přípravy a nízkým nákladům, kdy se cena potřebných materiálů pohybuje okolo sto českých korun.

Příprava metody s sebou přináší i jistá negativa. Zejména je nutné mít k dispozici osobu, u níž se bude kopie prstu provádět. V rámci kriminalistického vyšetřování je možné otisk získat podle §114 Trestního řádu, kdy osoby spojené s vyšetřováním mají povinnost se takového úkonu podrobit. V případě, že by osoba měla v případě postavení obviněného nebo podezřelého (po sdělení podezření), je možné úkon provést i formou fyzického donucení, a to po předchozím souhlasu státního zástupce.¹⁴

Za předpokladu, že analýza některého z testovaných senzorů skončí kladným výsledkem pak by popsána metoda mohla být za jistých okolností použita v rámci kriminalistické činnosti.

5.2.1 Vytvoření odlitku

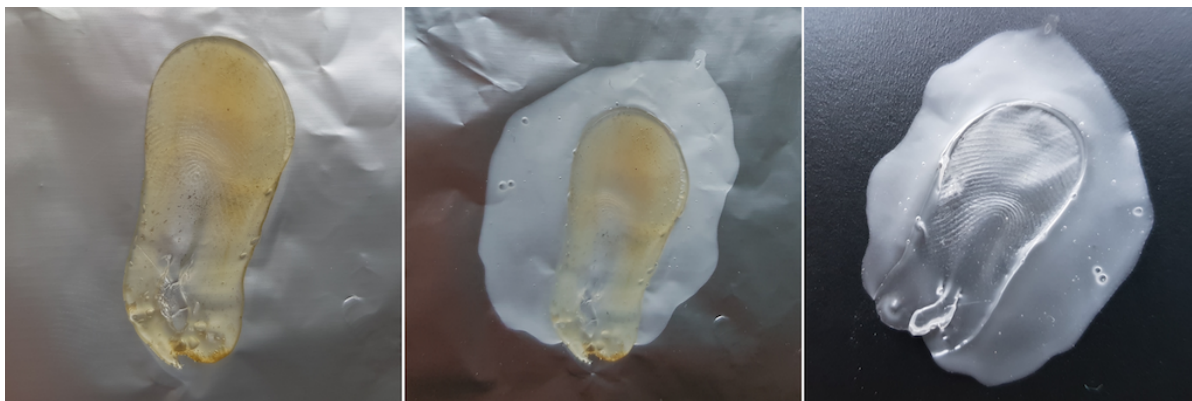
Pro vytvoření odlitku byla použita tenká hliníková fólie o tloušťce 20 mikronů, tavná patrona značky Pattex, zapalovač a školní voděodolné lepidlo Elmer's pocházející ze Spojených států amerických. Materiály byly snadno dostupné – lepidlo lze objednat z aukčního portálu eBay – a jejich cena činila 106 Kč.

Proces výroby odlitku není nikterak složitý. Důležité je pouze přiložit prst na rozehřátý materiál ve správnou chvíli, tedy kdy má vhodnou teplotu a zároveň ideální vlastnosti k okopírování papilárních linií.

Zapalovačem byl nejprve roztaven jeden z konců tavné patrony a následně byl rozehřátý vzorek umístěn na hliníkovou fólii (postačil vystřižený kousek o čtvercovém půdorysu s rozměry 20 x 20 cm). Ještě do mírně rozehřátého vzorku byl položen prst otiskem směřujícím dolů. Tím byl vytvořen na detaily bohatý odlitek otisku se všemi papilárními liniemi a většinou markantů.

¹⁴ Zákon číslo 141/1961 Sb., trestní řád, ve znění pozdějších předpisů. Prohlídka těla a jiné podobné úkony, § 114.

Takto odlitý otisk je zrcadlově otočený a senzor otisků prstů v telefonu by jej vyhodnotil jako nesprávný otisk. Odlitek je navíc příliš silný, a tak nemůže nabýt kapacitních vlastností. Z formy je tedy potřeba vytvořit ještě jeden odlitek. Pro tyto účely bylo použito lepidlo Elmer's, jehož tenká vrstva byla nanášena na vytvořenou formu z tavné patrony. Lepidlo je potřeba nechat hodinu zaschnout a následně sloupnout z původního odlitku. Tím se získá věrná kopie otisku s kýženými vlastnostmi.

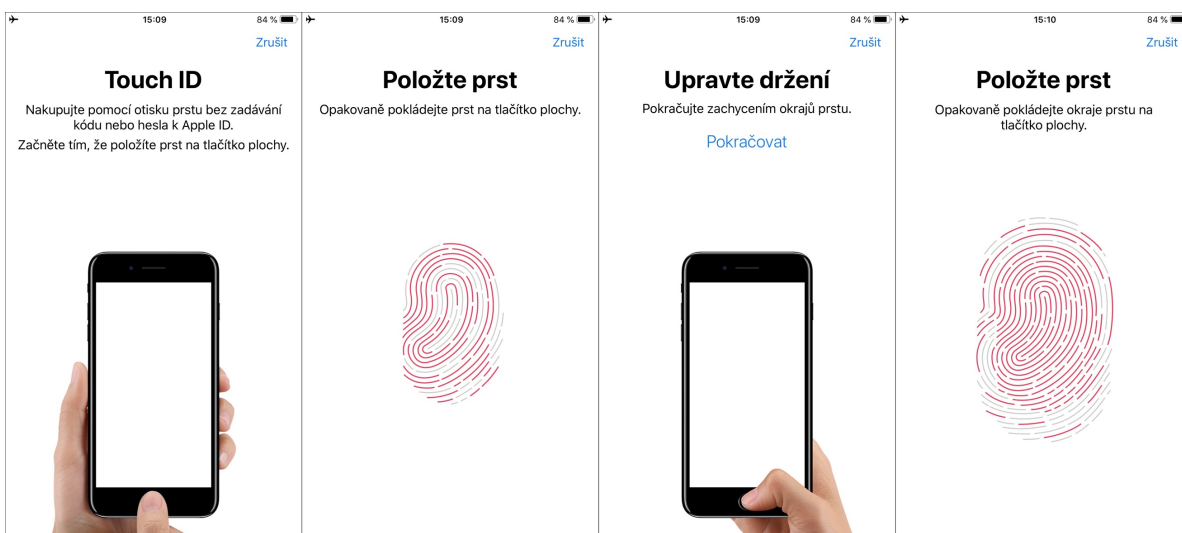


Obrázek 10: Postup výroby odlitku

6 Testování a výsledky

6.1 Kapacitní senzor

Testování kapacitního senzoru odlitek probíhalo na iPhone 8 Plus, na kterém byl nainstalovaný v době psaní bakalářské práce nejnovější dostupný operační systém – Apple iOS 12.2. Nejprve bylo nutné do zařízení naskenovat skutečný otisk prstu. Přidání otisku se provádí v Nastavení → Touch ID a kódový zámek. Systém vyžaduje opakovaně, osmkrát přiložit prst na snímač. Následně je nutné ještě upravit držení a znovu, tentokrát šestkrát přiložit prst, aby zachytil i jeho okraje a získal obraz celého otisku.



Obrázek 11: Přidání otisku na iPhone 8 Plus

Možnosti testování jsou v případě iPhone 8 Plus, resp. iOS omezené – systém po pěti špatných pokusech vyžaduje zadání přístupového hesla. Z tohoto důvodu bylo provedeno pět pokusů o prolomení. Aby byl odlitek kapacitní a snímač jej zaregistroval, byl přiložen společně s prstem, jehož otisk nebyl do telefonu přidán. Použit lze také hřbet ruky nebo loket.

Tabulka 2: Analýza kapacitního senzoru

Pokus	Status
1.	Přístup odepřen
2.	Přístup odepřen
3.	Přístup povolen
4.	Přístup povolen
5.	Přístup povolen

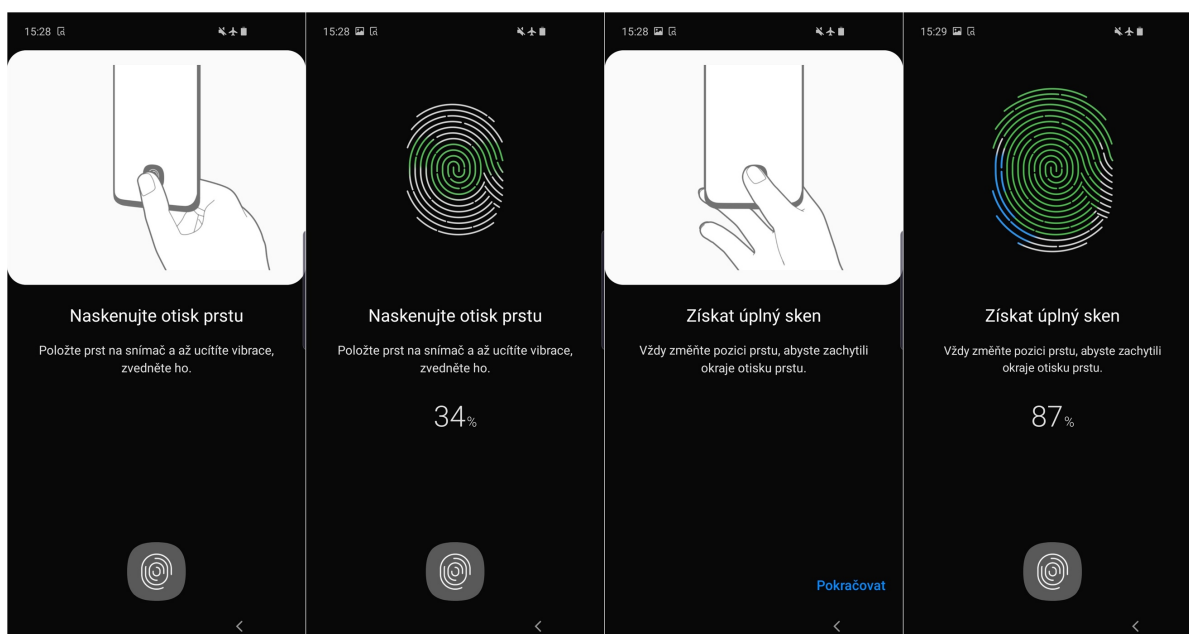
Kapacitní senzor se podařilo odlitkem prolomit ve třech pokusech z pěti. Snímač ve všech případech poznal, že se jedná o otisk. Zpočátku falzifikovaný otisk odmítal schválit, ale při třetím pokusu se podařilo získat autentizaci a telefon odemknout.

K prolomení pomohlo, když se odlitek přilnul ke kůži prstu. Jistou roli hrály i zahřáté ruce, jež napomáhaly k vytváření potu na prstech, který se následně propíjel skrze slabou vrstvu odlitku a umožňoval tak senzoru rozeznat jednotlivé papilární linie, které však byly jen odlité.

6.2 Ultrazvukový

Testování ultrazvukového senzoru probíhalo na modelu Galaxy S10 od společnosti Samsung. V době psaní bakalářské práce byl na telefonu nainstalovaný nejaktuálnější systém – Google Android 9.0 s nadstavbou Samsung One UI verze 1.1 – a aplikována byla i nejnovější úroveň opravy zabezpečení Android z 1. března 2019.

Otisk se do telefonu přidává v Nastavení → Biometrika a zabezpečení → Otisky prstů, kde lze po zadání přístupového kódu zvolit volbu Přidat otisk prstu. Proces vyžaduje opakované přikládání prstu na vyhrazené místo displeje, pod který je čtečka integrovaná. Snímání v závislosti na otisku a způsobu přikládání je realizováno až patnáctkrát. Následně je nutné ještě minimálně pětkrát přiložit hrany prstu, aby systém získal kompletní 3D otisk.



Obrázek 12: Přidání otisku prstu na Galaxy S10

Také v případě nové verze systému Android jsou možnosti testování omezené. Telefon umožňuje maximálně dvacet neúspěšných pokusů snímání, přičemž po každém pátém je nutné počkat třicet sekund. Po dvacátém neúspěšném pokusu vyžaduje systém zadání přístupové hesla, což představuje jeden z nejběžnějších ochranných prvků.

Tabulka 3: Analýza ultrazvukového senzoru

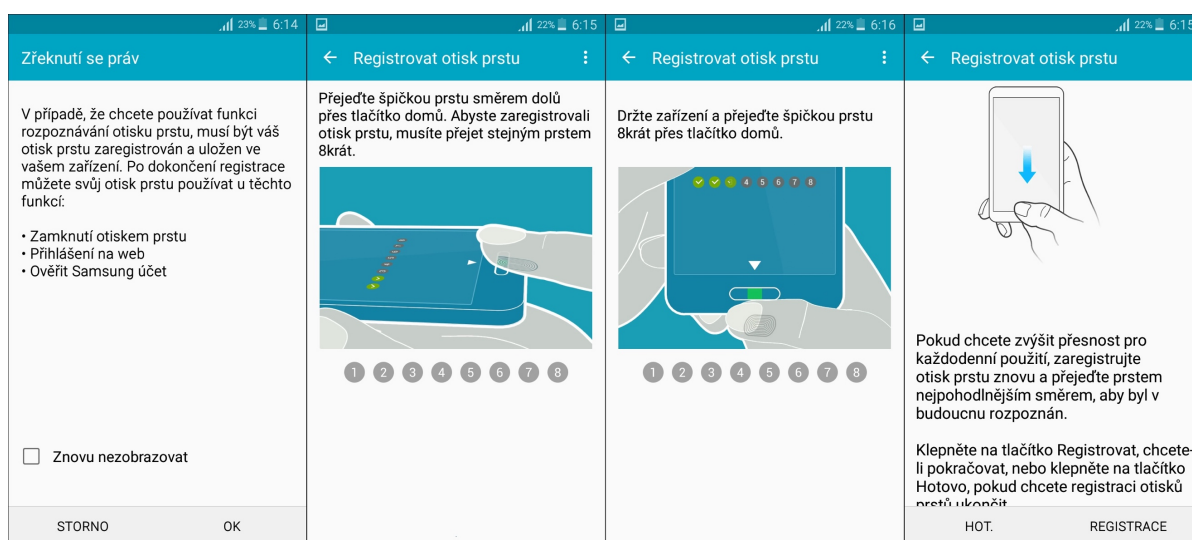
Pokus	Status
1.	Přístup odepřen
2.	Přístup odepřen
3.	Přístup odepřen
4.	Přístup odepřen
5.	Přístup odepřen

Ultrazvukový senzor se odlitkem nepodařilo prolomit za žádných okolností, a to ani při použití nového odlitku nebo při snaze pokládat falsifikovaný otisk pod různými úhly. Nejmodernější technologie použité v ultrazvukovém senzoru spolu se schopností detekovat průtok krve prstem (viz kapitola 5.1) tak zajišťují maximální zabezpečení, což dokazuje i provedená analýza.

6.3 Swipe

Testování swip senzoru probíhalo na telefonu Samsung Galaxy S5, který představuje nejnovějšího zástupce s tímto typem snímače. V době psaní bakalářské práce byl na telefonu nainstalovaný nejaktuálnější systém Google Android 6.0.1 s nejnovější úrovní opravy zabezpečení Android pro tento model z 1. srpna 2017.

Otisk se do telefonu přidává v Nastavení → Snímač prstů → Správce otisků prstů, kde lze přidat nový otisk bez nutnosti autorizovat se přístupovým heslem. Proces vyžaduje opakované přejíždění po senzoru směrem shora dolů, a to celkem osmkrát. Následně je ještě možné nasnímat otisk po přejíždění pod různými úhly, tento proces však není povinný.



Obrázek 13: Přidání otisku prstu na Galaxy S5

Vzhledem ke stáří telefonu a starší verzi systému je Galaxy S5 ze všech tří testovaných zařízení nejméně zabezpečený – snímání lze provádět opakovaně bez omezení, tedy bez nutnosti po několika neúspěšných pokusech zadávat přístupové heslo. Aby ale byly podmínky pro všechna zařízení stejná, bylo opět provedeno pět hlavních pokusů a ty vyhodnoceny.

Tabulka 4: Analýza swipe senzoru

Pokus	Status
1.	Přístup odepřen
2.	Přístup odepřen
3.	Přístup odepřen
4.	Přístup odepřen
5.	Přístup odepřen

Swipe senzor se odlítkem nepodařilo prolomit ani v jednom z pěti pokusů. Negativní výsledek analýzy nicméně není zajištěn specifickými zabezpečovacími, nýbrž spíše typem samotného senzoru, který má při běžném používání mnohdy problém s rozpoznáním skutečné a řádné přidaného otisku.

Závěr

Bakalářské práce byla zaměřena na analýzu biometrických mechanismů smartphonů, konkrétně senzorů otisků prstů. Cílem práce bylo navrhnout a zrealizovat metody k analýze snímačů otisk prstů používaných v oblasti chytrých telefonů.

Teoretická část bakalářské práce je vymezena tématům zabývající se historií klasifikace otisků prstů, stavbou papilárních linií v rámci lidské kůže, zařazení otisků do specifických tříd, popsáním markantů a detailů. Druhým tématem, které tvoří teoretický rámec práce, je charakteristika senzorů otisků prstů používaných ve smartphonech. Pozornost je věnována rozdílům mezi kapacitním, ultrazvukovým a swipe snímačem.

Předmětem praktické části bakalářské práce je shrnutí konkrétních specifikací tří analyzovaných senzorů, kterými disponují vybraná zařízení. Další část byla věnována návrhu a realizaci metod aplikovaných při analýze senzorů. Vybranými metodami byly 3D otisk a odlitek otisku. Kompletně zrealizovat se podařila druhá zmíněná metoda.

Výsledky získané prostřednictvím analýzy biometrických mechanismů chytrých telefonů, se zaměřením na senzory otisků prstů, vykazují zranitelnost pouze u kapacitního snímače. Zbylé dva typy senzorů se nepodařilo pomocí použité metody prolomit, přičemž u ultrazvukového senzoru je ochrana zajištěna moderními bezpečnostními prvky, zatímco v případě swipe senzoru je negativní výsledek analýzy zapříčiněn hardwarovou architekturou snímače.

Seznam použité literatury

1. Apple Special Event. September 10, 2013 In: Youtube [online]. 8.10.2013 [cit. 2018-05-25]. Dostupné z: <https://youtu.be/yBX-KpMoxYk>. Kanál uživatele Apple
2. BLISS, Don. Skin Anatomy. In: National Cancer Institute [online]. May 26, 2010 [cit. 2016-05-15]. Dostupné z: <https://visualsonline.cancer.gov/details.cfm?imageid=4604>
3. BREWER, Teresa a Natalie KERRIS. Apple Announces iPhone 5s—The Most Forward-Thinking Smartphone in the World [online]. September 10, 2013 [cit. 2018-5-25]. Dostupné z: <https://www.apple.com/newsroom/2013/09/10Apple-Announces-iPhone-5s-The-Most-Forward-Thinking-Smartphone-in-the-World/>
4. Feast Your Eyes on the Future: The Galaxy S10's Stunning Display: Beefed-Up Biometric Security. Samsung Newsroom [online]. February 21, 2019 [cit. 2019-03-16]. Dostupné z: <https://news.samsung.com/global/in-depth-look-1-feast-your-eyes-on-the-future-the-galaxy-s10s-stunning-display>
5. GRZYBOWSKI, Andrzej. Clinics in Dermatology: Jan Evangelista Purkyně (1787–1869): First to describe fingerprints [online]. 2015 [cit. 2019-04-16]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0738081X14001539>
6. HUMRICK, Matt. Samsung Galaxy S5 Smartphone Review: Fingerprint Scanner. Tom's Hardware [online]. February 14, 2015 [cit. 2018-05-26]. Dostupné z: <https://www.tomshardware.com/reviews/samsung-galaxy-s5-smartphone,3908-4.html>
7. CHENG, Francisco. Samsung Galaxy S10 taps Qualcomm 3D Sonic Sensor for top-notch security and accuracy. OnQ Blog [online]. February 20, 2019 [cit. 2019-03-16]. Dostupné z: <https://www.qualcomm.com/news/onq/2019/02/20/samsung-galaxy-s10-taps-qualcomm-3d-sonic-sensor-top-notch-security-and-accuracy>
8. JEDLIČKA, Miroslav. Kriminalistická daktyloskopie. Kriminalistika [online]. [cit. 2019-04-15]. Dostupné z: <http://kriminalistika.eu/daktyl/daktyl.html>
9. KOCHETKOVA, Kate. Mobile fingerprint sensors: more or less secure?. *Kaspersky Lab* [online]. 2016 [cit. 2016-05-15]. Dostupné z: <https://www.kaspersky.com/blog/fingerprints-sensors-security/10951/>
10. SAMS, C. Journal of the Forensic Science Society: Thomas Bewick—His Mark. Issue 4. England: Elsevier, 1975. ISBN 0015-7368.

11. Samsung unveils Galaxy S5 to focus on what matters most to consumers. Samsung Mobile Press [online]. February 24, 2014 [cit. 2018-05-25]. Dostupné z: <http://www.samsungmobilepress.com/news/samsung-unveils-galaxy-s5-to-focus-on-what-matters-most-to-consumers>
12. SHOEWU, Oluwagbemiga a N. T. MAKANJUOLA. Biometric-based Attendance System: LASU Epe Campus as Case Study. In: ResearchGate [online]. January 2014 [cit. 2016-04-30]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/326493967_Biometric-based_Attendance_System_LASU_Epe_Campus_as_Case_Study
13. TREDoux, Gavan. Henry Faulds: the Invention of a Fingerprinter [online]. 2003 [cit. 2019-04-16]. Dostupné z: <http://galton.org/fingerprints/faulds.htm>
14. Zákon číslo 141/1961 Sb., trestní řád, ve znění pozdějších předpisů. Prohlídka těla a jiné podobné úkony, § 114.

Seznam tabulek

Tabulka 1: Testovaná zařízení	13
Tabulka 2: Analýza kapacitního senzoru.....	22
Tabulka 3: Analýza ultrazvukového senzoru	24
Tabulka 4: Analýza swipe senzoru	26

Seznam obrázků

Obrázek 1: Stavba a vrstvy kůže	4
Obrázek 2: Třídy otisků prstů.....	5
Obrázek 3: Základní typy markantů	6
Obrázek 4: Detaily linií	7
Obrázek 5: Schéma kapacitního senzoru.....	8
Obrázek 6: Schéma ultrazvukového senzoru.....	10
Obrázek 7: Použitá sada pro sejmutí otisku ze skla.....	17
Obrázek 8: Proces snímání otisku	18
Obrázek 9: Snímek otisku prstu převedený do vektorů.....	19
Obrázek 10: Postup výroby odlitku	21
Obrázek 11: Přidání otisku na iPhone 8 Plus	22
Obrázek 12: Přidání otisku prstu na Galaxy S10.....	23
Obrázek 13: Přidání otisku prstu na Galaxy S5.....	25