Digitalizace vytlačovaných plastových profilů

Bc. Petr Přindiš

Diplomová práce
2017

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky

Fakulta aplikované informatiky
akademický rok: 2016/2017

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení:	**Bc. Petr Přindiš**
Osobní číslo:	**A16636**
Studijní program:	**N3902 Inženýrská informatika**
Studijní obor:	**Informační technologie**
Forma studia:	**kombinovaná**
Téma práce:	**Digitalizace vytlačovaných plastových profilů**
Téma anglicky:	**The Digitialization of Extruded Plastic Profiles**

Zásady pro vypracování:

1. **Analyzujte problémy výroby a kontroly kvality vytlačovaných plastových profilů.**
2. **Prostudujte možnosti digitalizace plastových profilů za účelem měření jejich rozměrů.**
3. **Navrhněte možné způsoby digitalizace plastových profilů s důrazem na minimální cenu použité technologie.**
4. **Implementujte algoritmy a SW aplikaci pro digitalizaci profilů.**
5. **Otestujte vaši aplikaci s reálnými vzorky plastových profilů a vyhodnoťte dosahovanou přesnost měření.**

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

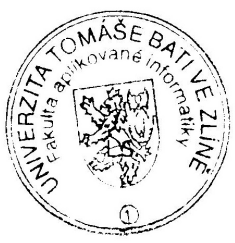
1. **HLAVÁČ, Václav a Milan ŠONKA. Počítačové vidění. Praha: Grada, 1992. ISBN 80-854-2467-3.**
2. **DAWSON-HOWE, Kenneth. A practical introduction to computer vision with OpenCV. ISBN 9781118848456.**
3. **BRADSKI, Gary R. Learning OpenCV. Sebastopol: O'Reilly, c2008. ISBN 978-0-596-51613-0.**
4. **LAGANIÉRE, Robert. OpenCV 2 computer vision application programming cookbook: over 50 recepies to master this library of programming functions for real-time computer vision. Brimmingham: Packt Publishing, 2011. Quick Answers to Common Problems. ISBN 978-1-84951-324-1.**
5. **CVonline: Visual Processing Software & Environments [online]. The University of Edinburgh: Fisher, 2014 [cit. 2017-02-03]. Dostupné z: http://homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/CVonline/SWEnvironments.htm**
6. **PROSISE, Jeff. Programování ve Windows pomocí MFC. Praha: Computer Press, 2000. Programování. ISBN 80-722-6309-9.**

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Tomáš Dulík, Ph.D.**
Ústav informatiky a umělé inteligence

Datum zadání diplomové práce: **3. února 2017**

Termín odevzdání diplomové práce: **16. května 2017**

Ve Zlíně dne 3. února 2017



doc. Mgr. Milan Adámek, Ph.D.
děkan

prof. Mgr. Roman Jašek, Ph.D.
ředitel ústavu

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby;
- beru na vědomí, že diplomové práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k prezenčnímu nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v příruční knihovně Fakulty aplikované informatiky. Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen připouští-li tak licenční smlouva uzavřená mezi mnou a Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně s tím, že vyrovnání případného přiměřeného příspěvku na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše) bude rovněž předmětem této licenční smlouvy;
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem na diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně 15. 5. 2017 .....

podpis autora

ABSTRAKT

Cílem této diplomové práce je návrh a vývoj systému pro měření a kontrolu kvality vytlačovaných profilů, snímaných pomocí digitálního fotoaparátu. Teoretická část této práce se zabývá problematikou digitalizace a popisem obrazových deformací, včetně možností, jak je eliminovat. V praktické části je popsán postup implementace korekčních algoritmů s využitím knihovny pro počítačové vidění OpenCV. Na závěr jsou uvedeny výsledky testování vytvořeného nástroje na reálných profilech.

Klíčová slova: digitalizace, OpenCV, vytlačování profilů, digitální fotoaparát, kontrola kvality

ABSTRACT

The aim of this master's thesis is to design and develop a system for measuring and quality control of extruded profiles captured by a digital camera. The theoretical part of this thesis deals with the problems of digitization, explains the image distortions and ways how to elminate them. The practical part describes how to implement the correction algorithms using the OpenCV computer vision library. At the end, there are listed the test results of the created tool on the real profiles.

Keywords: digitization, OpenCV, profile extrusion, digital camera, quality control

Chtěl bych poděkovat Ing. Tomáši Dulíkovi, Ph.D. za ochotu vést tuto práci.

OBSAH

ÚVOD ... **10**

I TEORETICKÁ ČÁST ... **10**

1 VYTLAČOVÁNÍ PLASTOVÝCH PROFILŮ ... **12**

1.1 Jednošnekový extruder ... 12

1.2 Problémy při výrobě ... 13

1.2.1 Tvarová přesnost ... 13

1.2.1.1 Problém s distribucí materiálu ... 13

1.2.1.2 Stagnace materiálu ... 14

1.2.1.3 Chlazení profilů ... 14

1.2.2 Tokové nestability ... 15

1.2.2.1 Žraločí kůže ... 15

1.2.2.2 Lom taveniny ... 16

1.2.3 Degradace materiálu ... 17

1.2.3.1 Tepelná degradace ... 17

1.2.3.2 Mechanická degradace ... 17

1.2.3.3 Chemická degradace ... 17

1.3 Měření profilů ... 18

2 DIGITALIZACE PROFILŮ ... **19**

2.1 Profesionální nástroje ... 19

2.1.1 SCAN FIT & MEASURE ... 19

2.1.1.1 Parametry hardwaru uvedené výrobcem ... 19

2.1.1.2 Schopnosti softwaru uvedené výrobcem ... 19

2.1.2 Kamera s telecentrickým objektivem ... 20

2.2 Běžné dostupné nástroje ... 21

2.2.1 Skener ... 21

2.2.2 Fotoaparát ... 22

3 KNIHOVNA OPENCV ... **23**

3.1 Model Kamery ... 23

3.2 Zkreslení objektivu ... 26

3.2.1 Radiální zkreslení ... 26

3.2.2 Tangenciální zkreslení ... 27

3.3 Kalibrace ... 28

3.3.1 Kalibrační obrazce ... 28

3.4 Rozšířená realita ... 28

3.4.1 ArUco ... 29
3.4.2 ChArUco ... 30
4 BÉZIEROVA KŘIVKA ... 33
4.1 Konstrukce křivky ... 33
4.2 Rozdělení křivky ... 34
4.3 Manipulace s křivkou ... 35
II PRAKTICKÁ ČÁST ... 36
5 VLASTNÍ SOFTWAROVÉ ŘEŠENÍ ... 38
5.1 Požadavky ... 38
5.1.0.1 Funkční požadavky ... 38
5.1.0.2 Nefunkční požadavky ... 38
5.2 Použité nástroje a technologie ... 38
5.3 Kalibrace kamery ... 39
5.4 Odstranění radiálního zkreslení ... 40
5.5 Odstranění vlivu perspektivy ... 41
5.5.1 Úprava kalibračního obrazce ... 42
5.6 Korekce výšky ... 45
5.7 Aplikace korekcí a měření rozměrů ... 46
6 PROFILE DIGITIZER ... 50
6.1 Kreslící plátno ... 50
6.2 Práce s daty ... 50
6.2.1 Snímky ... 50
6.2.2 Formát DXF ... 51
6.2.3 Archivace ve formátu XML ... 53
7 OVLÁDÁNÍ APLIKACE ... 57
7.1 Kalibrace kamery ... 58
7.2 Nastavení korekční šablony ... 60
7.3 Vytvoření nového projektu ... 61
7.3.1 Příprava profilu ... 61
7.3.2 Vyfocení profilu ... 61
7.3.3 Zpracování snímku v aplikaci ... 61
7.3.4 Ovládání plátna ... 62
7.4 Měření rozměrů a úhlů ... 62
7.5 Srovnání s požadovaným tvarem ... 63

7.6 Digitalizace profilu ... 64
7.6.1 Kreslení rovných čar ... 65
7.6.2 Kreslení křivek ... 66
7.6.3 Převod rovné čáry na křivku a naopak ... 66
7.6.4 Výběr bodů pro editaci ... 66
7.6.5 Přesun a mazání bodů ... 67
7.6.6 Editace Bézierových křivek ... 67
7.6.7 Rozšiřování a spojování křivek ... 67
7.7 Uložení projektu a export dat ... 68
7.8 Nastavení prostředí ... 68
8 MĚŘENÍ DOSAHOVANÉ PŘESNOSTI ... 69
8.1 Přesný kovový válec - nízký ... 69
8.2 Přesný kovový válec - vysoký ... 70
8.3 Profil 1 ... 71
8.4 Profil 2 ... 72
8.5 Profil 3 ... 73
ZÁVĚR ... 74
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY ... 76
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK ... 78
SEZNAM OBRÁZKŮ ... 79
SEZNAM TABULEK ... 81
SEZNAM PŘÍLOH ... 82

ÚVOD

Vytlačování je v dnešní době jeden z nejrozšířenějších a nejdůležitějších způsobů výroby. Vytlačovat znamená působit na materiál silou a tlačit jej proti vytvarovanému otvoru. Při průchodu otvorem získá materiál podobný tvar, jako má otvor. Vytlačováním se zpracovává velké množství různorodých materiálů, jako je guma, kov, hlína při výrobě keramiky, nebo například těsto při výrobě nudlí.

Samostatnou kapitolou je vytlačování plastů, které je z hlediska zpracovávaného množství materiálu nejčastěji používanou metodou při výrobě plastových výrobků. Využívá se pro výrobu širokého spektra produktů. Od polotovarů, jako jsou okenní rámy, okapy, těsnění, přes vodovodní trubky, kabely, chráničky až po různé druhy fólií, krycího materiálu a nespočtu dalších výrobků.[1, 2]

Velkou část této výroby tvoří vytlačování profilů. Profily mohou mít různé tvary a složitosti provedení. Od relativně jednoduchých standardních tvarů až po složité vícekomorové okenní rámy. Jejich výroba je náročný proces, při kterém je nutné neustále hlídat výrobní parametry tak, aby výrobek odpovídal požadovanému tvaru a kvalitě.

Řešení problémů vznikajících při výrobě je často stylem pokus-omyl, jelikož ne vždy je na první pohled zřejmé, kde chyba vzniká a jak ji napravit. K tomu, aby se počet těchto pokusů minimalizoval, nebo aby se jim mohlo předcházet je třeba mít přehled o kvalitě výrobku, zejména o jeho tvarové přesnosti.

Získat přesné rozměry výrobku tak, aby jej bylo možné porovnat s výkresovou dokumentací je v praxi téměř nemožné. Běžně používaným měřící nástrojem je posuvné měřítko, které ale umožňuje měřit pouze některé rozměry výrobku. Tabulková přesnost tohoto nástroje je sice dostatečná, ale skutečná přesnost závisí především na správném umístění měřících čelistí. Dalším, často používaným způsobem je obkreslení profilu na průsvitný papír a optické srovnání tvaru profilu s vytisknutou předlohou. Tento způsob měření je spíše orientační a nelze pomocí něj získat příliš přesné hodnoty.

Problémy s měřením mohou vyřešit profesionální měřící přístroje, které jsou velmi přesné a zpravidla také velmi drahé. Mají ale spoustu nevýhod. Kromě vysoké ceny jsou většinou těžké, špatně přenosné a mají různá technická omezení, která nemusí vyhovovat všem druhům výrobků.

Mezi ručním měřením a profesionálními nástroji neexistuje žádná alternativa, která by tuto mezeru vyplňovala. Proto ve firmě Compuplast International a.s., která se mj. zabývá problémy souvisejícími s vytlačováním, vznikl požadavek na realizaci nástroje, který by umožňoval měření profilu jako celku a jeho přímé srovnání s požadovaným tvarem bez nutnosti pořizovat drahý hardware.

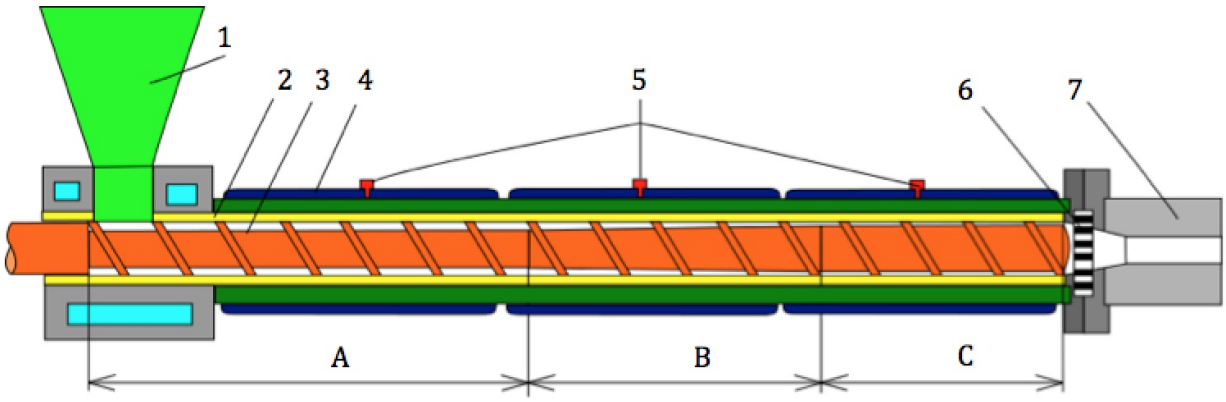
I. TEORETICKÁ ČÁST

1 Vytlačování plastových profilů

Pro vytlačování plastových profilů se používá zařízení zvané extruder. Úkolem tohoto zařízení je ze surového polymeru ve formě granulí, nebo prášku vytvořit roztavenou hmotu a tu následně protlačit otvorem s požadovaným tvarem. Extrudery je možné rozdělit na dva základní typy. Extrudery s kontinuální výrobou a extrudery s dávkovou výrobou. Kontinuální extruder zpravidla využívá k transportu hmoty rotační prvky, dávkový extruder většinou používá zařízení na principu pístu. Tyto dva typy se mohou dále dělit na extrudery jednošnekové, vícešnekové, diskové a spoustu dalších typů podle zaměření výroby. [4]

1.1 Jednošnekový extruder

Nejjednodušším typem extruderu je jednošnekový extruder. Tvoří jej šnek uzavřený v ocelovém válci, který je poháněn elektromotorem s převodovkou. Materiál ve formě granulí je pomocí násypky dávkován na začátek šneku do prostoru mezi šnekem a válcem. Otáčením šneku se materiál postupně posunuje vpřed. Šnek je rozdělen na tři zóny. Plnící, kompresní a vytlačovací. Materiál postupně prochází těmito zónami, kde je čím dál více stlačován mezi šnekem a stěnou válce. Způsobeným třením vzniká teplo, které je podpořeno elektrickým vyhříváním válce a materiál se postupně mění v taveninu. Na konci válce projde roztavená hmota vytlačovací hlavou, kde postupně dostane požadovaný tvar. Po výstupu z extruderu se výrobek chladí, případně kalibruje a dále zpracovává. [4, 5]



Obr. 1.1 Jednošnekový extruder [5]

Na obrázku 1.1 je schéma jednošnekového extruderu. A – plnící zóna, B – kompresní zóna, C – vytlačovací zóna, 1 – násypka, 2 – válec, 3 – šnek, 4 – topná tělesa, 5 – termočlánky měřící teplotu v zónách, 6 – lamač, 7 – vytlačovací hlava. [5]

1.2 Problémy při výrobě

Vytlačování plastových profilů je náročný proces probíhající za vysokého tlaku. Na kvalitu výrobků má vliv spousta parametrů, které musí být správně nastaveny a regulovány ve všech částech výrobní linky. Základní požadovaná kritéria pro výrobu a výrobek jsou:

1. tvarová přesnost
2. kvalita povrchu
3. rychlost výroby
4. mechanické vlastnosti

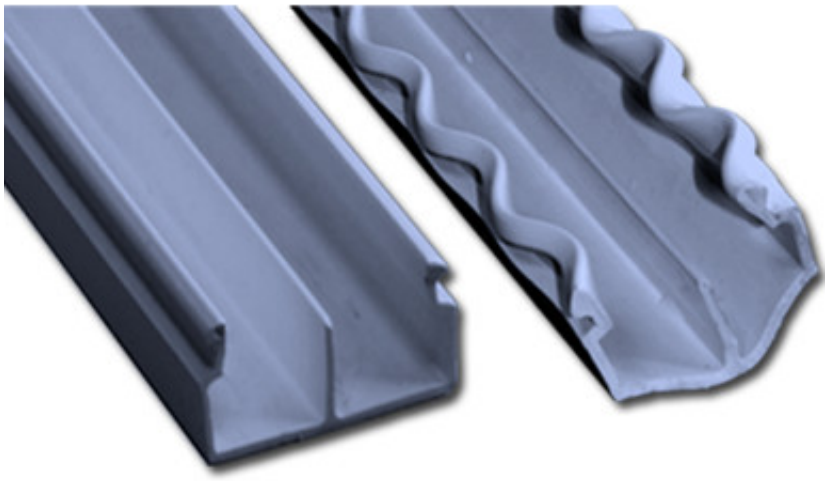
Hlavní parametry, které ovlivňují kvalitu výroby jsou tlak a teplota. Při vysoké teplotě může docházet k hoření materiálu uvnitř extruderu. Příliš vysoký tlak zase může způsobit mechanické poškození výrobní linky, roztržení válce, nebo i vystřelení vytlačovací hlavy z extruderu a zranění obsluhy. Většina potíží při výrobě se týká především kvality výsledného výrobku. Problémů se může vyskytnout celá řada, ale většinou mají všechny spojitost s tlakem a teplotou, ať už z důvodu špatně nastavených parametrů výrobní linky, nebo nevhodně navrženému tvaru vytlačovací hlavy. [4]

1.2.1 Tvarová přesnost

Jedním ze základních požadavků výroby je tvarová přesnost výrobku. Problémů, které způsobují tvarové deformace je celá řada. Příčinou může být například příliš vysoká rychlost výroby, nevhodný tvar vytlačovací hlavy, opotřebení součástí výrobní linky, nebo i samotný materiál, jehož vlastnosti se mohou lišit i mezi jednotlivými šaržemi.

1.2.1.1 Problém s distribucí materiálu

Problémy s distribucí materiálu ve vytlačovací hlavě mohou mít mnoho příčin. Jejich důsledkem je nerovnoměrné rozdělení hmoty ve vytlačovací hlavě a vznik míst, kde je materiálu přebytek, nebo kde materiál naopak chybí. Důvodem může být například špatně navržená vytlačovací hlava. Tavenina díky svým fyzikálním vlastnostem jen velmi neochotně vtéká do úzkých štěrbin a proto je správné rozvedení hmoty do problematických míst klíčové pro dosažení správného tvaru profilu. Tento problém je znázorněn na obrázku 1.2, kde je jasně vidět velký přebytek hmoty na krajních stěnách profilu, který způsobuje zvlnění a nedostatek hmoty u prostředního žebra. [6]



Obr. 1.2 Deformace profilu způsobená špatnou distribucí materiálu (zdroj: Compuplast Int. a.s.)

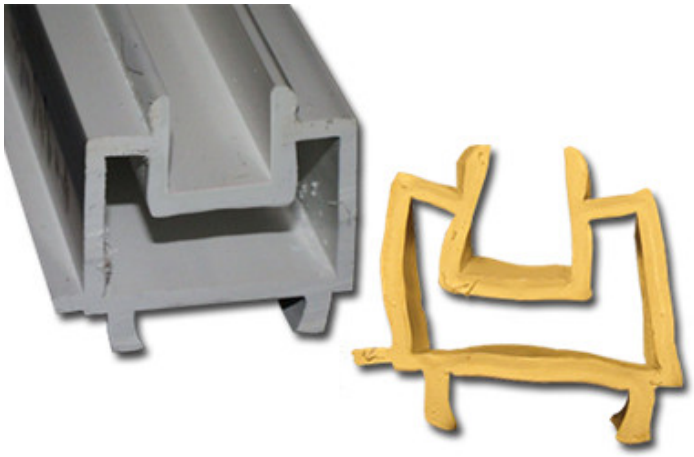
1.2.1.2 Stagnace materiálu

Tento problém také souvisí s tvarem tokového kanálu ve vytlačovací hlavě. Tavenina se nepohybuje rovnoměrně rychle v celém průřezu kanálu. Čím blíže je ke stěně, tím se pohybuje pomaleji. V některých místech, jako jsou rohy a štěrbiny se může tok hmoty natolik zpomalit, že vlivem dlouhotrvající vysoké teploty dojde k degradaci materiálu a zároveň k deformaci tvaru výsledného výrobku, jelikož v některých místech není dostatek hmoty pro dosáhnutí požadovaného tvaru. [6]

1.2.1.3 Chlazení profilů

Velmi důležitým krokem při výrobě vytlačovaných profilů je jejich chlazení po opuštění vytlačovací hlavy. Proces chlazení je zodpovědný za kvalitu povrchu, tvarovou přesnost, stabilitu a mechanickou odolnost výrobku.

Chlazení je problematické především u uzavřených, nebo velmi členitých profilů, u kterých je možné ochlazovat pouze vnější stěny. Velký rozdíl teplot mezi vnitřní a vnější stěnou profilu způsobí nerovnoměrné smrštění a v daném místě tak vznikne nežádoucí prohnutí, viz obrázek 1.3. Deformace profilu se může projevit i v podélném směru (obrázek 1.4). [3]



Obr. 1.3 Deformace profilu vlivem špatného chlazení (zdroj: Compuplast Int. a.s.)

Obr. 1.4 Prohnutí profilu vlivem špatného chlazení (zdroj: Compuplast Int. a.s.)

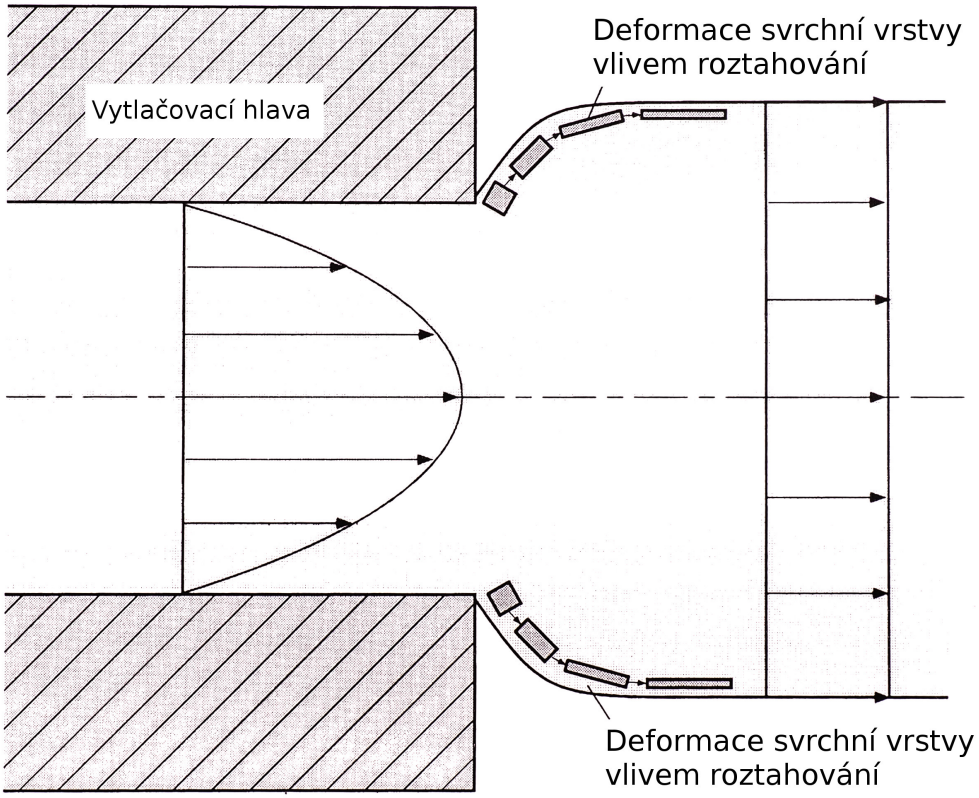
1.2.2 Tokové nestability

Jedním z hlavních problémů při vytlačování je nestabilní tok taveniny přes vytlačovací hlavu, který může způsobit nechtěné vady výrobku. Dva hlavní problémy způsobené nestabilitou toku jsou efekt žraločí kůže a lom taveniny. [4]

1.2.2.1 Žraločí kůže

Efekt žraločí kůže se projevuje změnou vzhledu a struktury povrchu výrobku. Může dosahovat různé intenzity. Od změny lesku až po citelné zdrsnění povrchu. Na jeho vznik

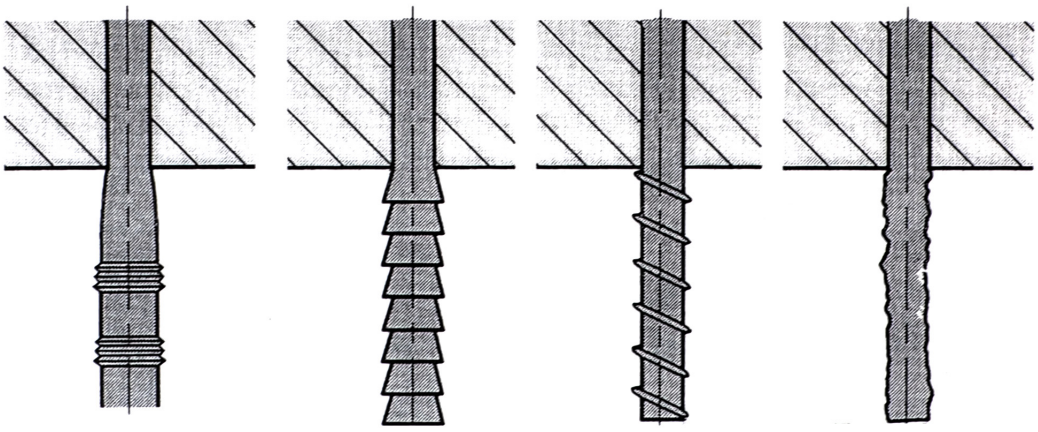
má vliv především teplota a rychlost vytlačování. Způsobuje jej prudká změna rychlosti povrchové vrstvy výrobku těsně po opuštění vytlačovací hlavy. Pokud je změna rychlosti příliš velká, dojde vlivem přílišného protažení povrchové vrstvy k jejímu porušení a vzniku typických vrásčitých útvarů. Princip tohoto jevu je znázorněn na obrázku 1.5. [4]



Obr. 1.5 Princip vzniku efektu žraločí kůže [4]

1.2.2.2 Lom taveniny

Další závažnou deformací je lom taveniny. Na rozdíl od efektu žraločí kůže tento druh deformace nepostihuje pouze povrch výrobku, ale celý jeho tvar. Vyskytovat se může s různou intenzitou a vytvářet tak různé zvlnění, spirály a další nechtěné změny tvaru výrobku. Vznik tohoto defektu může mít různé příčiny, které se mohou lišit pro různé materiály a tvary tokového kanálu. Obecně je způsobován vysokou hodnotou smykového tření na stěně vytlačovací hlavy. [4]



Obr. 1.6 Různé formy lomu taveniny [4]

1.2.3 Degradace materiálu

Častým problémem při výrobě vytlačovaných profilů je degradace materiálu. Může způsobovat změnu barvy výrobku, ztrátu mechanických vlastností a další problémy. Degradace se dělí podle příčiny jejího vzniku na tepelnou, mechanickou a chemickou. [4]

1.2.3.1 Tepelná degradace

K tepelné degradaci dochází při vystavení polymeru vysoké teplotě. Její výši určuje použitý materiál a jeho tepelná stabilita. Při degradaci dochází k depolymerizaci a rozpadu makromolekul polymeru, čímž materiál ztrácí své fyzikální vlastnosti. [4]

1.2.3.2 Mechanická degradace

Mechanická degradace vzniká působením mechanického namáhání na taveninu. Způsobena je smykovým, nebo elongačním napětím, případně oběma zároveň. Působení těchto sil způsobí roztrhání dlouhého řetězce makromolekuly polymeru. Většinou se vyskytuje spolu s tepelnou degradací, jelikož při silné mechanické deformaci vzniká velké množství tepla. [4]

1.2.3.3 Chemická degradace

Chemická degradace vzniká při kontaktu polymeru s chemickou látkou. Existují dva důležité typy chemické degradace. Solvolýza a oxidace. U solvolýzy se jedná především o hydrolýzu. Některé druhy polymerů, jako například polyethylen a polyester ochotně absorbují vodu a pro zamezení degradace musí být předem řádně vysušeny. Oxidační degradace je velmi běžným typem degradace u polymerů. Vzniká při vysoké teplotě a často se objevuje spolu s tepelnou degradací. [4]

1.3 Měření profilů

Všechny zmíněné problémy, které mohou při výrobě vytlačovaných plastových profilů nastat, jsou důsledkem nesprávně zvolených parametrů, nevhodného materiálu, nebo špatně navržené vytlačovací hlavy. Aby bylo možné zjednat nápravu, musí se nejprve problém identifikovat. Vzhledem k množství parametrů, které ovlivňují výrobu a tvar výrobku jde často o postup pokus–omyl. Hlavním kritériem každé výroby je minimalizace prostojů a čas, který se věnuje na odstranění problému může být velmi drahý. Z tohoto důvodu je důležité co možná nejlépe určit odchylku výrobku od jeho požadovaného tvaru a najít tak místo, kde problém vzniká.

Nejčastěji používaným nástrojem je obyčejné posuvné měřidlo, kterým je ale možné změřit pouze některé rozměry. Zkontrolovat celý průřez profilu a porovnat jej s požadovaným tvarem se tímto nástrojem nedá. Požadovaný tvar je zpravidla dostupný pouze ve formě technického výkresu ve formátu pro CAD software.

Aby bylo možné zjistit skutečnou odchylku celého profilu, je potřeba uříznout z vytlačeného profilu plátek a ten následně pomoci specializovaného nástroje digitalizovat a porovnat v počítači s výkresem.

2 Digitalizace profilů

Důvodů pro digitalizaci vytlačovaných profilů může být několik. Kromě zmíněného měření a porovnávání s výkresovou dokumentací může být důvodem například tvorba podkladů pro profil stejného, nebo podobného tvaru, jehož dokumentace není k dispozici, nebo průběžná kontrola kvality výroby. K tomuto účelu je možné použít specializované přístroje, které jsou zpravidla přesné a velmi drahé, nebo běžné měřící nástroje, které pro tyto účely původně určeny nejsou.

2.1 Profesionální nástroje

Profesionální nástroj určený přímo pro plastikářský průmysl, který by umožňoval jak kontrolu přesnosti tvaru, tak i převod existujícího profilu do CAD modelu doposud neexistuje. Profesionální nástroje se vesměs zaměřují pouze na srovnání tvaru a vyhodnocení odchylek profilu od výkresové dokumentace.

2.1.1 SCAN FIT & MEASURE

Jedním z těchto nástrojů je SCAN FIT & MEASURE. Je to 2D systém pro automatické měření a porovnání tvaru vytlačovaného profilu, vyvíjený softwarovou společností EngView Systems. Základ systému tvoří plochý skener, který ve spojení s dodávaným softwarem umožňuje zcela automatické porovnání tvaru profilu s předem připraveným CAD modelem. [7]

2.1.1.1 Parametry hardwaru uvedené výrobcem

- Maximální rozměry profilu 300 × 400 mm
- Maximální výška profilu 130 mm
- Odolné provedení

2.1.1.2 Schopnosti softwaru uvedené výrobcem

- Automatické zarovnání skenované části s modelem
- Vizuální porovnání a generování reportů
- Přesnost měření srovnatelní s digitálním posuvným měřidlem
- Možnost nastavení tolerance rozměrů
- Skenování více částí najednou

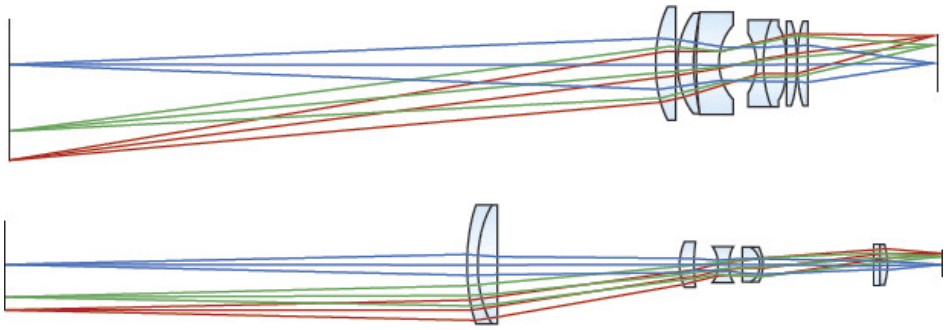
- Výstupní data v otevřeném formátu

Měřící systém je vhodný zejména pro vytlačované plastové a hliníkové profily, trubičky, těsnění, ploché výlisky a tvarované fólie. [7]

Obr. 2.1 Měřící systém Scan Fit Scanner 200 [7]

2.1.2 Kamera s telecentrickým objektivem

Další, o něco univerzálnější, ale stále profesionální měřící nástroj je kamera vybavená telecentrickým objektivem. Patří mezi často používaná zařízení v oblasti automatizace, strojového vidění a automatického měření. Telecentrický objektiv je speciální typ objektivu, který dokáže snímat objekty bez perspektivního zkreslení. Průměr vstupní čočky objektivu je stejný, jako úhlopříčka zorného pole. Hlavní výhoda telecentrického objektivu je v tom, že se jeho zvětšení nemění vzhledem k hloubce. Tento princip snímání je znázorněn na obrázku 2.2. [8, 9]



Obr. 2.2 Princip snímání obrazu klasickým objektivem (nahoře) a telecentrickým (dole) [8]

Tato vlastnost způsobuje, že je snímaný objekt zobrazován stále stejně, bez ohledu na tom, v jaké vzdálenosti od objektivu se nachází. Pokud by byly pomocí telecentrického objektivu snímány dva stejné předměty, z nichž jeden by se nacházel ve větší

vzdálenosti od objektivu, než druhý, tak by z výsledného snímku nebylo možné určit, který z nich to je. Při snímání stejné scény klasickým objektivem by byl vzdálenější předmět na snímku menší. Díky tomuto jevu je možné telecentrický objektiv použít pro velmi přesné měření. Jeho nevýhodou je ale vysoká cena a omezená velikost snímaného předmětu. [8, 9]

2.2 Běžné dostupné nástroje

Běžně dostupné, neprofesionální nástroje, které jsou schopné zaznamenat tvar nějakého objektu jsou v podstatě pouze dva. Skener a fotoaparát. Na první pohled je zřejmé, že pro účely digitalizace a měření vytlačovaných profilů není uzpůsoben ani jeden z nich. Na rozdíl od profesionálních nástrojů ale mají jednu velkou výhodu. Jsou natolik rozšířené, že jsou většinou vždy po ruce a jejich pořizovací hodnota je oproti profesionálnímu vybavení zanedbatelná.

2.2.1 Skener

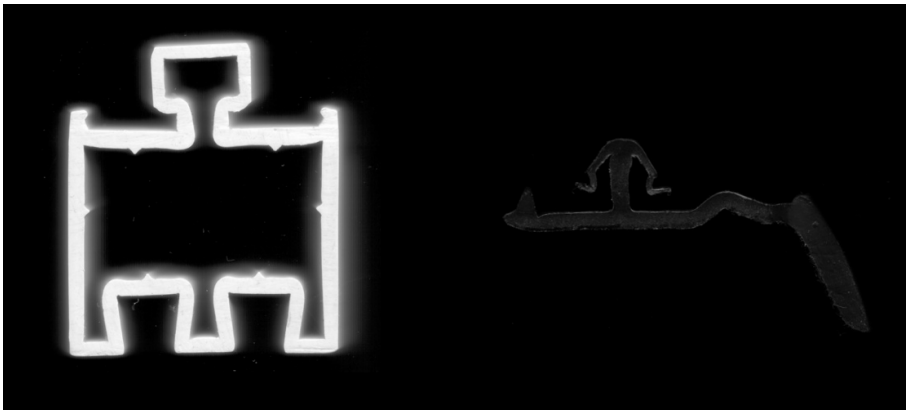
První z dvojice nástrojů je skener. Jedná se o zařízení, které slouží pro převod grafických předloh do digitální formy pro zpracování na počítači. Nejčastěji se jedná o ploché předměty, jako jsou dokumenty, nebo filmy. Jedním z hlavních parametrů skeneru je jeho rozlišení, ve kterým je schopen obraz zaznamenat. [10]

Skener bývá vybaven většinou řádkovým CCD snímačem, který obsahuje tři řady světlocitlivých buněk, každou pro jednu základní barvu barevného spektra RGB. Tento snímač zaznamená vždy celou šířku svého rozsahu najednou a následně se posune pomocí krokového motorku o jeden řádek dál. (Některé skenery mohou místo snímače posunovat předlohu). Takto se postupuje řádek po řádku, dokud se nezaznamená celá plocha předlohy. Rozlišení skeneru je tedy dáno jednak počtem světlocitlivých buněk v jednom řádku a jednak velikostí jednoho kroku krokového motorku. Hodnota rozlišení se udává v jednotkách DPI. U některých, převážně levnějších skenerů může být rozlišení v řádku a sloupci rozdílné. V tom případě se udávají dvě hodnoty. [10]

Pro digitalizaci vytlačovaných profilů není většina běžných skenerů přizpůsobena. Vhledem k jejich zaměření převážně na skenování dokumentů mají mezi snímací plochou a krytem jen velmi málo místa. V případě skenování profilů se tak neobejdou bez dodatečné úpravy.

Druhým velkým problémem u klasických skenerů je nasvícení předmětu ze spodní strany. Při skenování dokumentů je osvětlení skenované strany nezbytné pro správné zachycení jejich obsahu. Při skenování profilů ale dochází k některým nechtěným jevům. U světlých, nebo lesklých profilů dochází k odrazům světla od bočních hran profilu, které pak na snímku vytváří nechtěné odlesky, viz obrázek 2.3. Opačný problém nastává

u tmavých profilů, které je velmi těžké na naskenovaném snímku rozeznat od černého pozadí.



Obr. 2.3 Problémy při skenování profilů

2.2.2 Fotoaparát

Druhým, běžně dostupným nástrojem pro záznam obrazu je digitální fotoaparát. Jedná se o zařízení, které stejně jako skener využívá ke snímání obrazu nejčastěji CCD snímač. Ten, na rozdíl od skeneru není lineární, ale plošný. Tvoří jej dvourozměrná mřížka světlocitlivých bodů, které bývají v případě barevného fotoaparátu vybaveny barevnými filtry pro rozlišení jednotlivých barevných složek RGB spektra. [11]

Kvalitu fotoaparátu určuje spousta parametrů, jako je rozlišení a fyzické rozměry snímače, kvalita optické soustavy a mnoho dalších. Typickými problémy u digitálního fotoaparátu jsou různá zkreslení obrazu. Tangenciální zkreslení, které je způsobeno nepřesnou montáží snímače, radiální zkreslení, které způsobuje optická soustava a perspektivní zkreslení, které je dáno polohou snímaného předmětu ke kameře. Poslední zmíněné zkreslení umí odstranit speciální telecentrický objektiv. Ten ale nepatří mezi běžně dostupné nástroje. [11, 16]

V případě použití fotoaparátu, jako nástroje pro digitalizaci a měření profilů je dalším problémem neznámá vzdálenost foceného předmětu od snímače. Pokud je předmět umístěn dále od fotoaparátu, tak na pořízeném snímku zabírá menší plochu, než když je blíže. Tento problém způsobuje, že není možné určit skutečnou velikost předmětu bez znalosti jeho aktuální vzdálenosti.

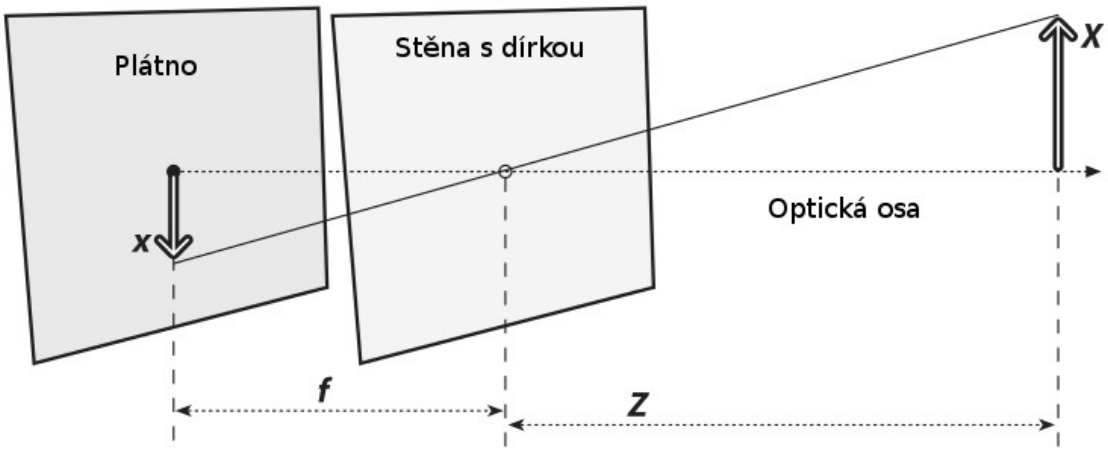
Oproti skeneru má ale velkou výhodu v tom, že je daleko univerzálnější. Není závislý na tvaru, rozměrech ani barvě profilu a nevyžaduje žádnou dodatečnou hardwarovou úpravu. Druhou výhodou je jeho obrovská rozšířenost. Téměř každý má u sebe fotoaparát v podobě kamery zabudované v mobilním telefonu. Vhodnou softwarovou úpravou je zároveň možné některá zmíněná zkreslení odstranit. Jejich matematickému popisu a možnostem odstranění se věnuje následující kapitola.

3 Knihovna OpenCV

OpenCV je multiplatformní knihovna pro zpracování obrazu a počítačové vidění. Šířena je pod 3 bodovou licencí BSD a je tak možné ji využít pro komerční aplikace s uzavřeným kódem. Samotná knihovna je napsána převážně v jazyce C a C++ s podporou moderních výpočetních technologií, jako jsou CUDA a OpenCL. Knihovna je distribuována v přeložené formě usnadňující její použití na konkrétní platformě, nebo ve formě zdrojových kódů. Oficiálně je podporovaná velká škála operačních systémů. Z desktopových jsou to Windows, Linux, Android, Mac Os, FreeBSD a OpenBSD. Z mobilních jsou to Android, Maemo a iOS. Pro vývoj aplikací je možné použít kromě jazyka C a C++ také jazyky Python, Java a Matlab. Pro celou knihovnu je zpracována velmi kvalitní dokumentace, spousta návodů a tutoriálů. Díky všem těmto vlastnostem je knihovna OpenCV používána v mnoha aplikacích pro zpracování obrazu a počítačové vidění. Mezi velkými společnostmi využívajícími tuto knihovnu je možné najít například Google, Microsoft, IBM, Hondu a spoustu dalších. [12]

3.1 Model Kamery

Základním prvkem počítačového vidění je digitální kamera. Jedná se o zařízení, které umožňuje zachytit dopadající záření a zaznamenat tak realitu podobně, jako to umí lidské oko. Paprsek světla, který vychází z nějakého zdroje záření, jako je například žárovka, nebo slunce, je po střetnutí s objektem částečně absorbován a částečně odražen. Odražený paprsek poté dopadne na sítnici oka, nebo na snímací čip kamery, čímž se získá energie paprsku. Ta se následně interpretuje jako barva povrchu předmětu, od kterého se paprsek odrazil. [13]

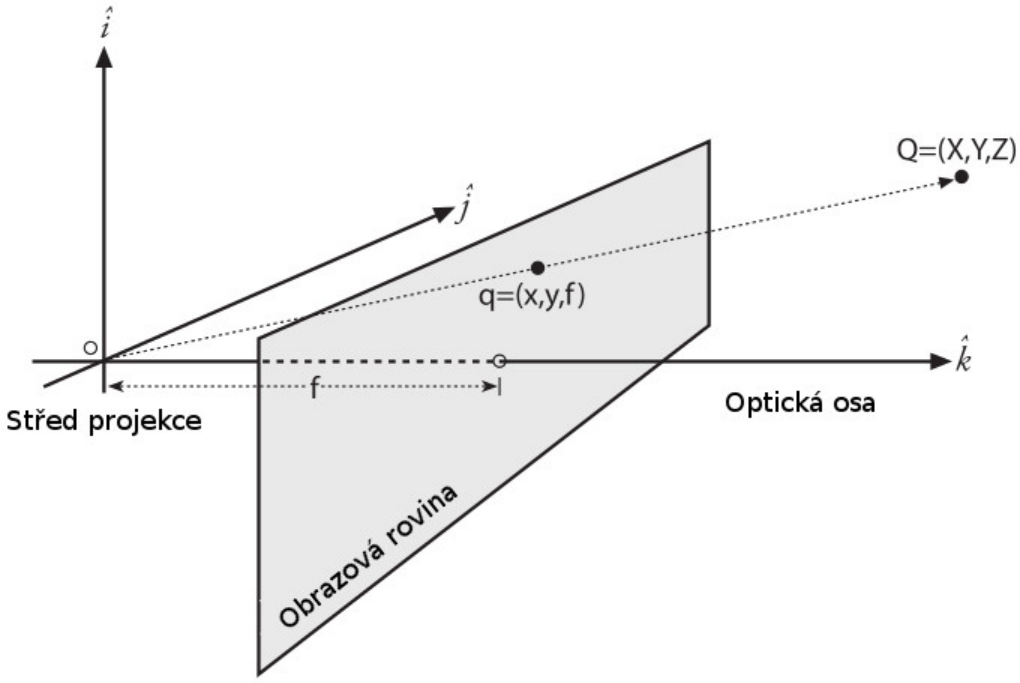


Obr. 3.1 Princip dírkové komory [13]

Pro počítačové zpracování obrazu zachyceného digitální kamerou je nezbytné vědět, co je na snímku ve skutečnosti zobrazeno. K tomuto účelu slouží matematický model, který vychází z historicky nejjednodušší kamery, dírkové komory. Jedná se o velice jednoduché zařízení, které je tvořeno stěnou, uprostřed které je malá dírka. Z jedné strany stěny se nachází požadovaná scéna a z druhé strany je umístěno plátno. Paprsek světla prochází dírkou ve stěně a na plátno promítá obraz scény z druhé strany stěny. [13, 15]

Popis takovéto kamery je velice jednoduchý, jelikož je definována pouze jedním parametrem, vzdáleností dírky od projekční obrazové roviny (plátna). Tento parametr se nazývá ohnisková vzdálenost. Poměr reálné velikosti předmětu ku jeho vzdálenosti od dírky je shodný s poměrem zobrazené velikosti předmětu ku vzdálenosti plátna od dírky. Princip je zobrazen na obrázku 3.1. Tento vztah je možné vyjádřit vzorcem 3.1 [13, 15]

$$-x = f\frac{X}{Z} \tag{3.1}$$



Obr. 3.2 Upravený model dírkové komory [13]

Tato reprezentace má ale jednu nevýhodu. Obraz na projekčním plátně je vždy převrácený oproti originálu. Tohoto jevu je možné se zbavit záměnou obrazové roviny a roviny s dírkou. Jedná se o úpravu, která je na reálné dírkové komoře neprovedi-

telná, ale z matematického hlediska je ekvivalentní původnímu modelu. Místo dírky tak vznikne bod, který se nazývá střed projekce obr. 3.2. Vztah mezi reálným objektem a promítnutým objektem na obrazové rovině se touto úpravou zjednoduší (vzorec 3.2) a je tak možné přímo promítnout bod reálného objektu *Q=(X,Y,Z)* do obrazového bodu *q=(x,y,f)*. [13, 15]

$$\frac{x}{f} = \frac{X}{Z} \tag{3.2}$$

V ideálním případě by tento model kamery byl dostačující. Pro reálnou kameru je potřeba vzít v potaz nedostatky, které mohly vzniknout při výrobě. V jednoduchém modelu na obr. 3.2 prochází optická osa přesným středem obrazové roviny, v případě digitální kamery středem snímacího čipu. V praxi je ovšem nereálné umístit střed čipu přesně do středu optické osy. Zavádí se proto parametry c_x a c_y, které určují posunutí optického středu oproti středu obrazové roviny. [13, 15]

Další problém reálné kamery je hodnota ohniskové vzdálenosti. Ta je dána nejenom vzdáleností čipu od středu projekce, ale také vlastními rozměry snímacího čipu. Ty je možné určit v jednotkách pixel na milimetr. Přesnou fyzickou velikost čipu je v praxi nereálné zjistit, je znám pouze údaj o rozlišení v pixelech. Co je ovšem známý údaj je vzdálenost mezi čipem a středem projekce, který je možné určit v milimetrech. Skutečná hodnota ohniskové vzdálenosti je pak dána součinem velikosti čipu a vzdáleností od středu projekce $f = F.s$, čímž vznikne hodnota, jejíž jednotkou je pouze pixel.

Velkým problémem převážně levných kamer jsou obdélníkové body snímače. Čip má proto jinou velikost v pixelech na milimetr na výšku a jinou na šířku. Je proto potřeba zavést dva parametry ohniskové vzdálenosti. Jeden pro osu X a druhý pro osu Y. Výsledný model kamery se všemi těmito nedostatky popisuje vzorec 3.3. [13, 15]

$$x = f_x \frac{X}{Z} + c_x, \quad y = f_y \frac{Y}{Z} + c_y, \tag{3.3}$$

Pomocí tohoto vzorce je možné jednoduše promítnout reálný bod *(X, Y, Z)* do obrazové roviny *(x, y)*. Výsledný model je vhodné upravit do maticového tvaru s využitím homogenních souřadnic 3.5. [13, 16]

$$q = MQ \tag{3.4}$$

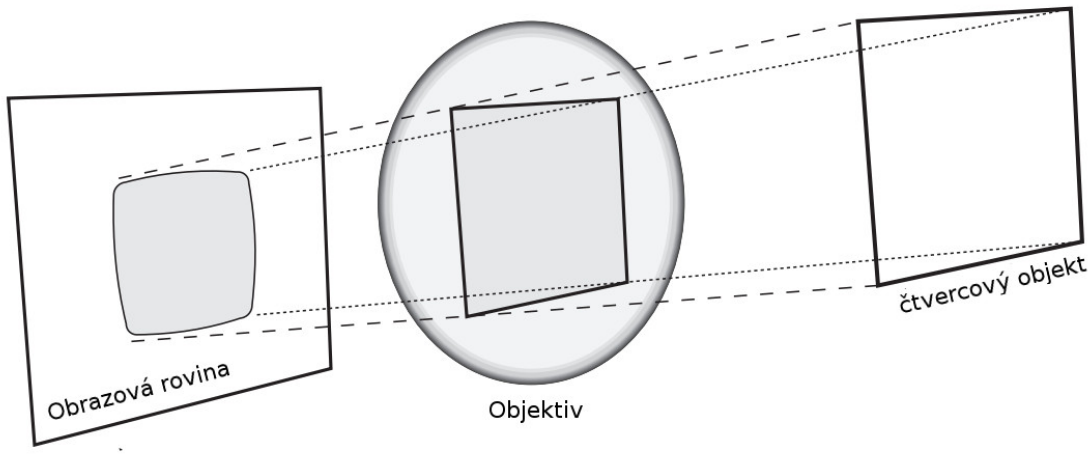
$$q = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}, \quad \text{kde } q = \begin{bmatrix} x \\ y \\ w \end{bmatrix}, \tag{3.5}$$

3.2 Zkreslení objektivu

Dalším prvkem, který výrazně zasahuje do přesnosti zachycení reálné scény je objektiv. Především u levnějších kamer, kde není kladen velký důraz na kvalitu a přesnost montáže bývá zkreslení objektivu jedním z hlavních faktorů ovlivňujících kvalitu a přesnost výsledných snímků. Rozlišují se dva druhy zkreslení. Radiální, které je dané tvarem objektivu a tangenciální, které je způsobeno nepřesnou montáží.

3.2.1 Radiální zkreslení

Radiální zkreslení je radiálně symetrické okolo optické osy. Způsobuje efekt známý jako soudkovité, nebo poduškovité zkreslení. Velice výrazný je tento efekt u objektivů typu rybí oko. Intenzita zkreslení je závislá na vzdálenosti od optické osy. Přímo uprostřed je zkreslení nulové a na okraji je zkreslení největší. [13, 15]



Obr. 3.3 Vznik radiálního zkreslení [13]

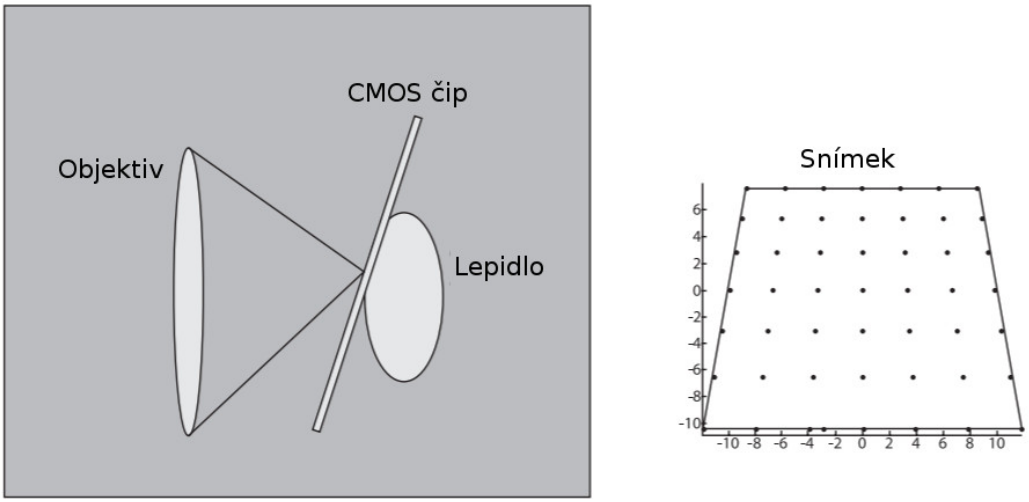
Na obrázku 3.3 je znázorněn princip vzniku radiálního zkreslení. Paprsek světla procházející optickým středem není zakřivením objektivu nijak ovlivněn. Čím dále od optického středu paprsek objektivem prolétá, tím více je ohýbán. Kvalitní objektivy tento efekt dokáží částečně eliminovat svou konstrukcí optické soustavy. Toto zkreslení je možné popsat za pomoci Taylorova rozvoje. Pro standardní objektivy postačí dva členy rozvoje. Pro objektivy s velkým zkreslením typu typu rybí oko je potřeba použít tři členy. [13]

$$x_{opraveno} = x(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6)$$
$$y_{opraveno} = y(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \tag{3.6}$$

Pomocí vzorce 3.6 je možné radiální zkreslení opravit. Koeficienty x a y jsou původní souřadnice obrazového bodu, $x_{opraveno}$ a $y_{opraveno}$ jsou opravené souřadnice obrazového bodu na obrázku bez zkreslení. Koeficienty k_1, k_2 a k_3 určují míru zkreslení a parametr r udává vzdálenost bodu od optické osy. [16]

3.2.2 Tangenciální zkreslení

Tangenciální zkreslení nastane v případě, kdy snímací čip není umístěn přesně paralelně s rovinou obrazu. Jedna strana snímače se dostane blíže k objektivu, než druhá strana a vznikne tak rozdílná hodnota zvětšení na různých částech snímku. Hlavním důvodem vzniku tohoto zkreslení je nedostatečná kvalita výroby a montáže, proto se projevuje především u levných zařízení. Princip jeho vzniku je znázorněn na obrázku 3.4 .[13, 15]



Obr. 3.4 Vznik tangenciálního zkreslení u nekvalitně vyrobené kamery. [13]

Pro matematický popis tangenciálního zkreslení postačí dva parametry, p_1 a p_2. Opravu snímku je pak možné provést pomocí vzorce 3.7.

$$x_{opraveno} = x + [2p_1 y + p_2(r^2 + 2x^2)]$$
$$y_{opraveno} = y + [p_1(r^2 + 2y^2) + 2p_2 x] \tag{3.7}$$

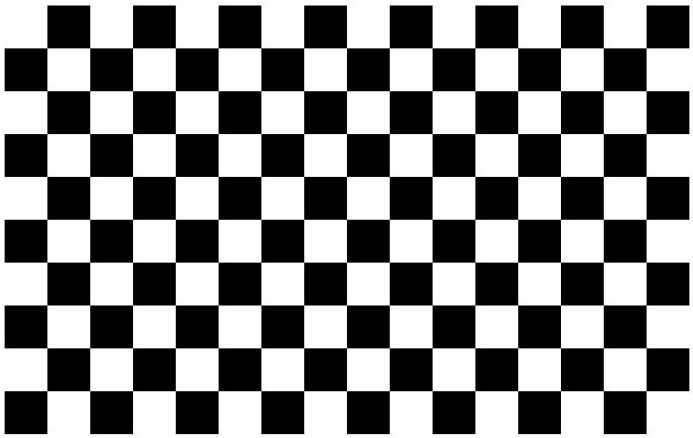
3.3 Kalibrace

Aby bylo možné zbavit se všech výše popsaných vad, je potřeba určit několik parametrů kamery. Jmenovitě se jedná o matici vnitřních parametrů kamery s koeficienty f_x, f_y, c_x a c_y. Dva parametry k_1 a k_2 pro eliminaci radiálního zkreslení a dva parametry p_1 a p_2 pro odstranění tangenciálního zkreslení. Celkem se tedy jedná o osm parametrů. K jejich určení slouží postup zvaný kalibrace kamery, který knihovna OpenCV umožňuje provést.

Principem kalibrace je pořízení série snímků předmětu se známou strukturou a identifikovatelnými body. Teoreticky je možné použít libovolný předmět, který splňuje tyto dvě podmínky, ale z důvodu jednoduchosti a přesnosti se používá plochý předmět, typicky s šachovnicovým vzorem (dále nazývaný jako kalibrační obrazec). Aby byla kalibrace možná, snímky musí být pořízeny v různých pozicích a úhlech ke kalibračnímu obrazci.

3.3.1 Kalibrační obrazce

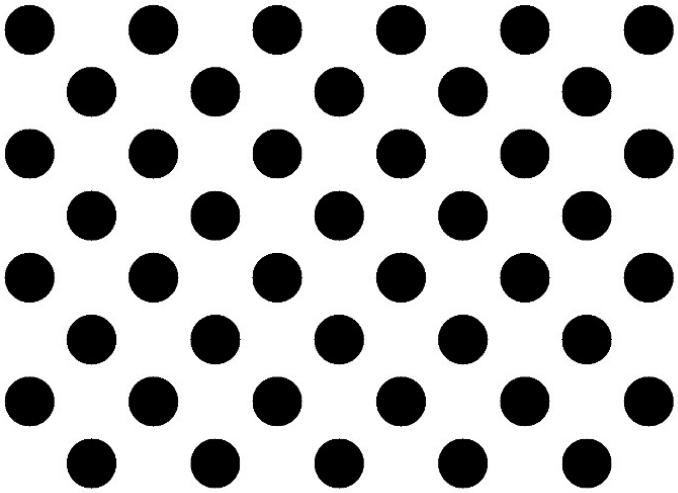
Knihovna OpenCV nabízí několik variant kalibračních obrazců, pomocí kterých lze určit body pro následnou kalibraci kamery. Základní obrazce jsou šachovnice (obr. 3.5) a mřížka kruhových bodů, případně varianta s asymetricky uspořádanými kruhy (obr. 3.6). [12]



Obr. 3.5 Kalibrační obrazec: šachovnice

3.4 Rozšířená realita

Knihovna OpenCV dokáže využít kalibrační obrazce i jiným způsobem. Na základě snadno detekovatelného vzoru se známými rozměry dokáže určit jeho přibližnou polohu a natočení ke kameře. Na základě těchto údajů umí odhadnout pozici souřadného



Obr. 3.6 Kalibrační obrazec: asymetrická mřížka kruhových bodů [12]

systému obrazce a využít ji pro účely rozšířené reality. Tato vlastnost může být velice užitečná i pro potřeby digitalizace objektů, které se v obraze nacházejí a jejichž polohu je potřeba přesně určit.

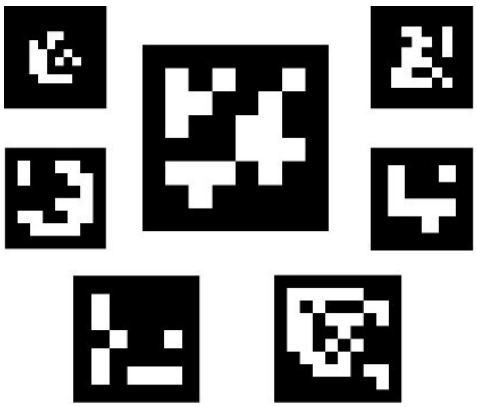
Standardní kalibrační obrazce ale nejsou pro rozšířenou realitu příliš vhodné. Hlavním problémem je nejednoznačné natočení šablony na snímku, protože jsou všechny detekovatelné body stejné. Pro práci s rozšířenou realitou slouží v OpenCV modul ArUco (od anglického výrazu Augmented reality), který částečně vychází z kalibračních obrazců a dokáže je i nahradit.

3.4.1 ArUco

Základem rozšířené reality je přesné určení souřadnic na snímku, do kterých má být dodatečně vykreslen zvolený 3D objekt. K tomuto účelu poskytuje modul ArUco speciální 2D kódy, které umožňují jednoznačně definovat pozici souřadného systému na vybraném místě.

ArUco kódy jsou podobné běžně používaným 2D kódům, například QR code, nebo Data Matrix. Je to dáno velmi dobrou detekovatelností všech těchto kódů v obraze. Na rozdíl od běžných kódů nenesou ArUco kódy žádnou informaci, kterou by bylo možné z nich přímo dekódovat. Tyto kódy jsou generovány na základě slovníku, ve kterém je každému kódu přiřazen určitý index. Po přečtení kódu se pak pouze vyhledá ve slovníku jeho odpovídající pozice. Pokud se na snímku nachází těchto kódů více a pokud je známá jejich skutečná vzájemná poloha, tak je možné určit jejich relativní polohu ke kameře a odhadnout pozici jejich souřadnicového systému. Při vytváření slovníku se zároveň bere v potaz počet potřebných kódů a pokud je to možné, vygenerují se s

co možná největší vzájemnou Hammingovou vzdáleností. Tím je umožněna správná detekce i na špatně čitelném snímku. [17]



Obr. 3.7 Různé ArUco kódy [17]

Detekce a zpracování kódů probíhá v několika krocích. Prvním z nich je vyfiltrování vhodných kandidátů. K tomu se používá metoda prahování, kdy se podle zvolené prahové hodnoty barvy změní snímek na dvoubarevný, typicky černý a bílý. V tomto snímku se následně vyhledají všechny objekty, které by mohly být ArUco kódy. Celý tento krok je možné provést pro několik úrovní prahové hodnoty, aby bylo možné detekovat kódy i na snímcích s různou intenzitou osvětlení. Příklad použití prahové hodnoty je na obrázku 3.8. [17]

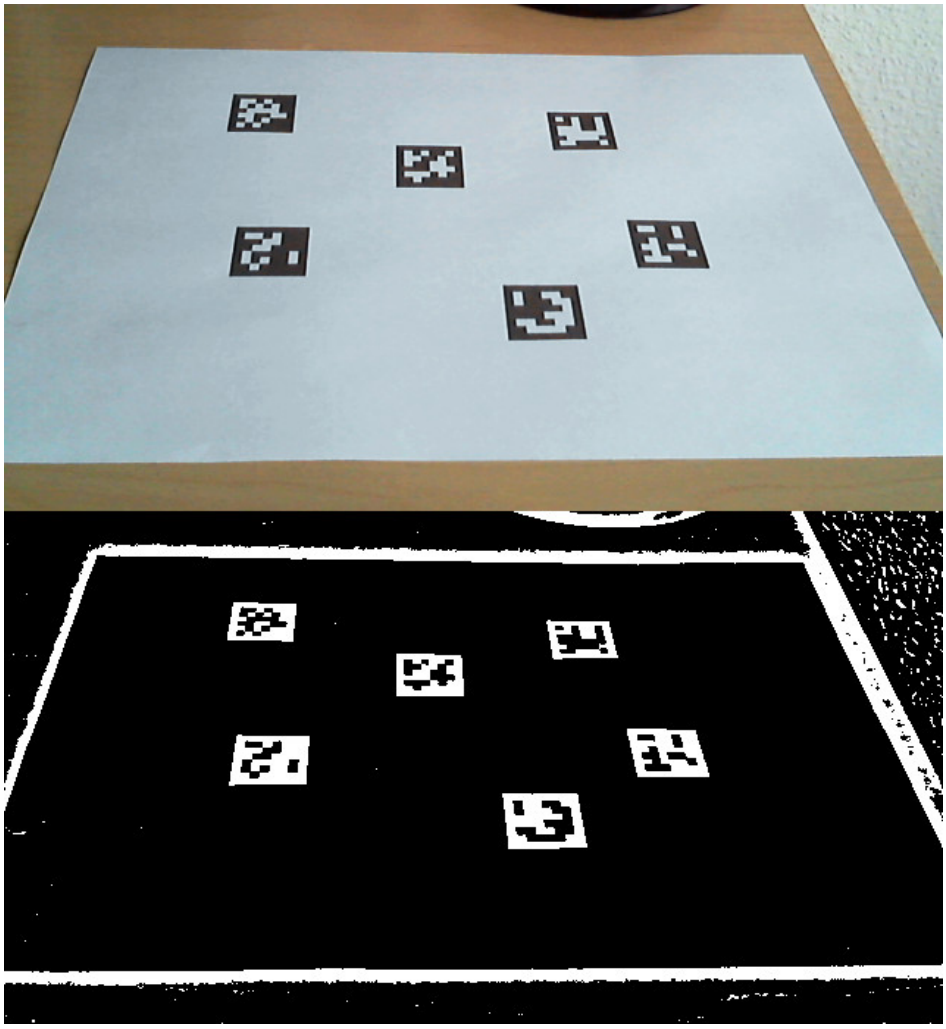
Nalezení kandidáti se následně vyfiltrují podle nastavených kritérií minimální a maximální velikosti vztažené k velikosti snímku. U ostatních kandidátů se provede pokus o dekódování jejich binární reprezentace. Postup dekódování je znázorněn na obrázku 3.9. Nejprve se opraví perspektivní zkreslení kódu a následně se určí barva každého jeho segmentu. Ta se poté převede do binární reprezentace a pomocí slovníku se určí, jestli se jedná o některý z AruCo kódů. [17]

Nalezením ArUco kódu v obraze se získá informace o jeho přibližné poloze ke kameře. Tím, že jsou ArUco kódy nesymetrické je možné jednoznačně určit jejich natočení. Tyto informace o poloze a natočení jsou dostačující k tomu, aby bylo možné určit lokální souřadnicový systém každého kódu (obrázek 3.10).

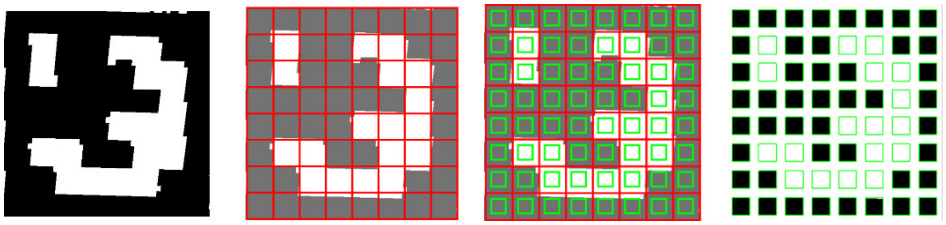
ArUco kódy je možné uspořádat do pravidelné mřížky a určit tak souřadnicový systém celé pokryté plochy. Dalším možným využitím je kalibrace kamery, jelikož stejně jako klasické kalibrační obrace poskytují informace o vzájemné poloze bodů na snímku, jejichž relativní rozměry a vzdálenosti jsou předem známé.

3.4.2 ChArUco

ChArUco je speciální typ obrazce pro kalibraci kamery a rozšířenou realitu. Vznikl kombinací klasického šachovnicového vzoru (chessboard) a ArUco kódů. Díky tomuto



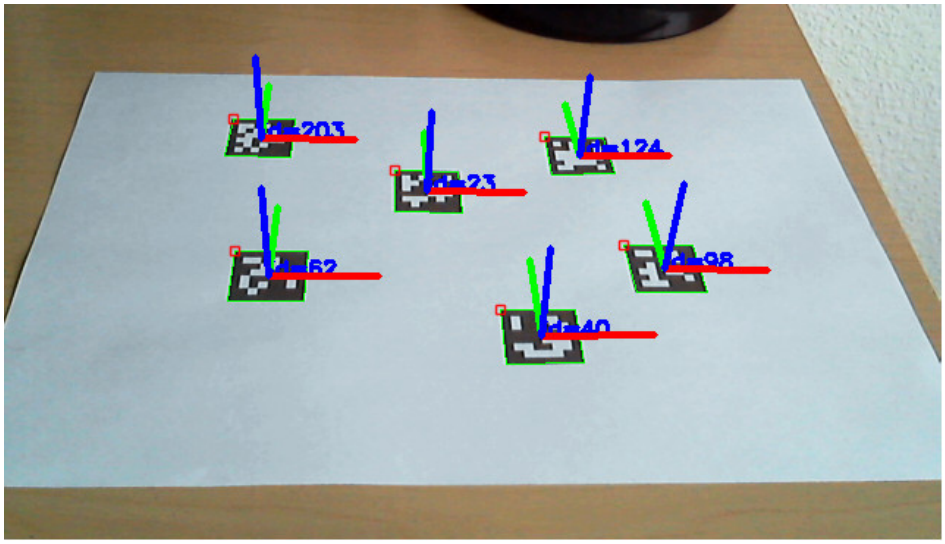
Obr. 3.8 Použití prahování při detekci ArUco kódů [17]



Obr. 3.9 Dekódování ArUco kódu [17]

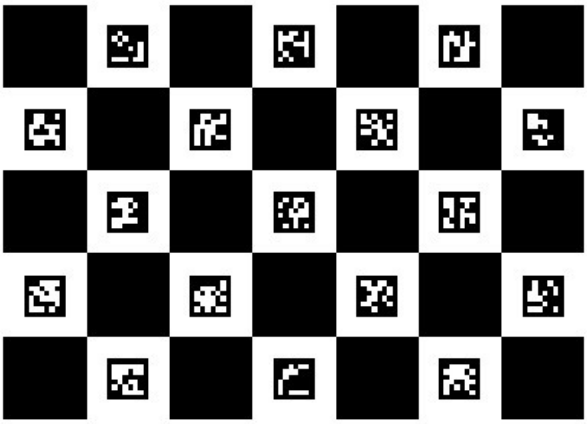
spojení může využívat jejich výhody najednou. Z šachovnicového vzoru přesnost a z ArUco jednoznačně definovanou polohu. [18]

ChArUco obrazec je tvořen černobílou šachovnicí, která má v každém bílém políčku umístěn jedinečný ArUco kód. Detekování tohoto obrazce probíhá ve dvou hlavních krocích. Nejprve jsou určeny polohy všech ArUco kódů. Jelikož má každý kód svou předem známou polohu k ostatním kódům, je možné určit přibližnou polohu a natočení celého obrazce na snímku. Ve druhém kroku se pro zpřesnění využije šachovnicový vzor. Mezi každými dvěma ArUco kódy se na úhlopříčce nachází bod, ve kterém se dotýkají



Obr. 3.10 Nalezení souřadnicového systému ArUco kódů [17]

dva černé čtverce. Tento bod je přesně v polovině vzdálenosti mezi dvěma ArUco kódy, jejichž poloha je známá z předchozího kroku. Detekce polohy ArUco kódů není zcela přesná, proto se vypočítaná poloha bodu nemusí shodovat se skutečným průsečíkem černých čtverců. Pro určení přesné polohy se okolo vypočítaného bodu vytvoří okolí, ve kterém se hledá skutečný průsečík. Tímto postupem vznikne matice bodů, které mají známou vzájemnou polohu a jsou jednoznačně definované pomoci sousedních ArUco kódů. [18]



Obr. 3.11 ChArUco obrazec [18]

ChArUco obrazec je rovněž možné použít pro kalibraci kamery. Oproti klasickým kalibračním obrazcům má jednu velikou výhodu. Jelikož je možné každému bodu přiřadit jednoznačný identifikátor, nemusí být obrazec na snímku zachycen celý. Pokud je některý bod překrytý, nebo se nachází mimo snímek, je možné dopočítat jeho polohu a použít ji pro další zpracování. [18]

4 Bézierova křivka

Tato kapitola se zaměřuje především na konstrukci a výpočty kubických Bézierovych křivek, které jsou implementovány jako nástroj pro ruční digitalizaci profilů v praktické části této práce.

Bézierova křivka je jednou z mnoha parametrických křivek. Pojmenovaná je po francouzském inženýru Pierru Bézierovi. Nezávisle na něm ji vymyslel i matematik Paul de Casteljau a tak není zcela jisté, komu patří prvenství. Bézierovy křivky jsou v podstatě Bernsteinovy polynomy, rodina matematických funkcí, kterou zkoumal Sergei Natanovich Bernstein. Bézierovy křivky jsou velice oblíbené pro kreslení složitých grafických prvků napříč různými grafickými editory, CAD programy a všude tam, kde je potřeba pracovat s jednoduše editovatelnými křivkami. [19]

Bézierovy křivky jsou typicky definovány mezi počátečním a koncovým bodem. Tvar křivky se poté upravuje jedním, nebo více řídícími body v závislosti na tom, kolikátého je stupně. Pro ruční kreslení v grafických editorech se většinou používají křivky kvadratické a kubické, respektive druhého a třetího řádu.

4.1 Konstrukce křivky

Bézierova křivka je definována mezi dvěma body na intervalu 0 – 1, který bývá označován jako souřadnice t. Obecná Bézierova funkce pro výpočet křivky stupně n je ve vzorci 4.1. [19]

$$Bezier(n,t) = \sum_{i=0}^{n} \binom{n}{i} (1-t)^{n-i} \cdot t^i \cdot P_i \tag{4.1}$$

Z obecné Bézierovy funkce se dosazením stupně 3 za n získá rovnice pro výpočet kubické Bézierovy křivky (vzorec 4.2), kde P_1 tvoří počáteční bod, P_2 koncový bod a C_1, C_2 jsou řídící body. [19]

$$CubicBezier(t) = P_1 \cdot (1-t)^3 + C_1 \cdot 3 \cdot (1-t)^2 \cdot t + C_2 \cdot 3 \cdot (1-t)^2 + P_2 \cdot t^3 \tag{4.2}$$

Vzorec 4.2 je možné jednoduchou úpravou převést do maticového tvaru 4.3, který je pro počítačové zpracování vhodnější. Zároveň umožňuje snáze provádět další operace a výpočty s Bézierovou křivkou. [19]

$$CubicBezier(t) = \begin{bmatrix} 1 & t & t^2 & t^3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ -3 & 3 & 0 & 0 \\ 3 & -6 & 3 & 0 \\ -1 & 3 & -3 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_1 \\ C_1 \\ C_2 \\ P_2 \end{bmatrix} \tag{4.3}$$

Pokud je potřeba zjistit pouze průběh Bézierovy křivky, například kvůli jejímu vykreslení, je možné použít iterační de Casteljau algoritmus. [19]

4.2 Rozdělení křivky

Jednou z operací, kterou je možné pomoci maticového zápisu snadno provést je rozdělení Bézierovy křivky v určeném bodě tak, aby tvar dvou menších křivek přesně odpovídal původnímu tvaru.

Nejprve je nutné definovat bod z, ve kterém má být křivka rozdělena. Tento bod může být libovolný bod na intervalu 0 – 1. Cílem je najít souřadnice bodů dvou nově vzniklých křivek. Do původní funkce pro výpočet křivky je třeba přidat dělící bod z (4.4). [19]

$$CubicBezier(t) = \begin{bmatrix} 1 & (z \cdot t) & (z \cdot t^2) & (z \cdot t^3) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ -3 & 3 & 0 & 0 \\ 3 & -6 & 3 & 0 \\ -1 & 3 & -3 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_1 \\ C_1 \\ C_2 \\ P_2 \end{bmatrix} \tag{4.4}$$

$$CubicBezier(t) = \begin{bmatrix} 1 & t & t^2 & t^3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & z & 0 & 0 \\ 0 & 0 & z^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & z^3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ -3 & 3 & 0 & 0 \\ 3 & -6 & 3 & 0 \\ -1 & 3 & -3 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_1 \\ C_1 \\ C_2 \\ P_2 \end{bmatrix}$$

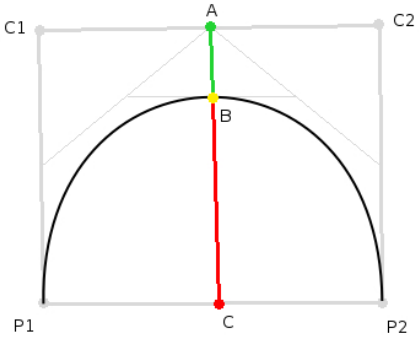
Sérií úprav pomocí lineární algebry vzniknou dvě funkce pro intervaly 0 – z a z – 1. Vzorec 4.5 je pro výpočet první části Bézierovy křivky. Vzorec 4.6 je pro výpočet druhé poloviny. [19]

$$LeftBezier = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ -(z-1) & z & 0 & 0 \\ (z-1)^2 & -2 \cdot (z-1) \cdot z & z^2 & 0 \\ -(z-1)^3 & 3 \cdot (z-1)^2 \cdot z & -3 \cdot (z-1) \cdot z^2 & z^3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_1 \\ C_1 \\ C_2 \\ P_2 \end{bmatrix} \tag{4.5}$$

$$RightBezier = \begin{bmatrix} -(z-1)^3 & 3\cdot(z-1)^2\cdot z & -3\cdot(z-1)\cdot z^2 & z^3 \\ 0 & (z-1)^2 & -2\cdot(z-1)\cdot z & z^2 \\ 0 & 0 & -(z-1) & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_1 \\ C_1 \\ C_2 \\ P_2 \end{bmatrix} \tag{4.6}$$

4.3 Manipulace s křivkou

Změnit tvar Bézierovy křivky je možné pomocí změny souřadnic řídících bodů. Tato úprava ale není příliš intuitivní a vyžaduje jisté zkušenosti s kreslením křivek. Pro běžného uživatele je mnohem jednodušší měnit tvar křivky přímo přetažením některé její části na požadované místo.



Obr. 4.1 ABC body na Bézierově křivce [19]

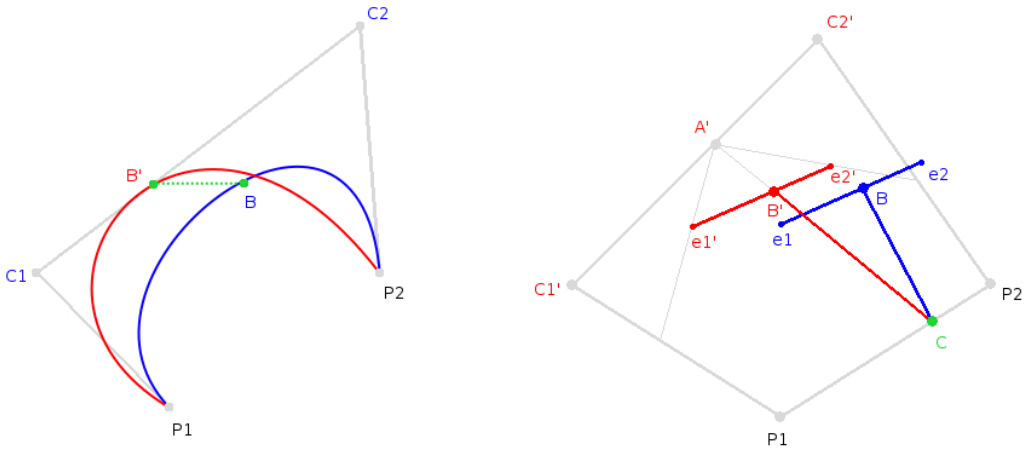
Aby bylo možné zachovat během přetahování křivky její tvar, je nutné určit tzv. ABC poměr. Jedná se o hodnotu vypočítanou jako poměr délek úseček mezi body AB a BC zobrazených na obrázku 4.1. Bod B leží na křivce v místě, které má být přetaženo (typicky tam, kde jej uživatel zvolil stisknutím tlačítka myši). Bod A leží na úsečce tvořené řídícími body C_1 a C_2 v bodě první iterace de Casteljau algoritmu pro stejnou hodnotu t, jako má zvolený bod B. Bod C vznikne jako průsečík mezi přímkou vzniklou z úsečky AB a úsečkou mezi počátečním bodem P_1 a koncovým bodem P_2. Pro kvadratickou a kubickou křivku je možné poměr ABC vypočítat i pouze ze znalosti hodnoty t, viz vzorec pro kubickou Bézierovu křivku 4.8. [19]

$$A = (C_2 - C_1)\cdot t + C_1 \tag{4.7}$$

$$ABCratio(t) = \left| \frac{t^3 + (1-t)^3 - 1}{t^3 + (1-t)^3} \right| \tag{4.8}$$

Po přetažení zvoleného bodu B na novou pozici B' je potřeba určit nové umístění bodu A'. To lze snadno vypočítat ze známého poměru ABC podle následujícího vzorce 4.9. [19] Pozice bodu C se přetažením nezmění.

$$A' = B' - \frac{C - B'}{ABCratio} \tag{4.9}$$



Obr. 4.2 Přetažení bodu na kubické Bézierově křivce [19]

Samotný poměr ABC pro zachování tvaru křivky nestačí. Dále je třeba zafixovat i pozici bodů e_1 a e_2 vzhledem bodu B. Tyto dva body se nachází v místě druhé iterace de Casteljau algoritmu, viz obrázek 4.2. [19]

Nové pozice řídících bodů se vypočítají pomocí vzorců 4.10 a 4.11, které rovněž vychází z algoritmu de Casteljau. [19]

$$\begin{aligned} v_1 &= A' + \frac{e_1 - A'}{1 - t} \\ v_2 &= A' + \frac{e_2 - A'}{t} \end{aligned} \tag{4.10}$$

$$\begin{aligned} C_1 &= P_1 + \frac{v_2 - P_1}{t} \\ C_2 &= P_2 + \frac{v_2 - P_2}{1 - t} \end{aligned} \tag{4.11}$$

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 Vlastní softwarové řešení

Všechny profesionální nástroje pro měření a kontrolu kvality vytlačovaných profilů jsou založeny na speciálním hardwaru, který umožňuje dosáhnutí vysoké přesnosti. Nevýhodou je jejich vysoká pořizovací cena. Oproti tomu běžně používané nástroje, jako je posuvné měřítko, umožňují měřit pouze některé rozměry. Celková kontrola tvaru profilu pouze optickým srovnáním se už měřením nedá nazvat vůbec, přitom určení odchylky a místa jejího vzniku je zcela zásadní pro rychlé sjednání nápravy. Mezi ručním měřením a profesionálními přístroji je obrovský rozdíl jak v ceně, tak v možnostech měření. Žádný alternativní systém, který by umožňoval rozšířené možnosti měření a přitom nevyžadoval drahý hardware doposud neexistuje.

Z tohoto důvodu vznikl ve firmě Compuplast International a.s. požadavek na vytvoření nástroje pro měření profilů, který by vyplňoval mezeru mezi ručními měřícími nástroji a profesionálními systémy.

5.1 Požadavky

5.1.0.1 Funkční požadavky

- Měření všech vnitřních a vnějších rozměrů profilů
- Měření úhlů
- Srovnání profilu s požadovaným tvarem
- Archivace profilů
- Převod tvaru profilu do vektorové podoby

5.1.0.2 Nefunkční požadavky

- Použití běžně dostupného hardware
- Vývoj softwaru v MFC C++
- Kompatibilita s formátem DXF

5.2 Použité nástroje a technologie

Vzhledem k požadavku na řešení bez použití specializovaného hardwaru je volba vhodného nástroje pro zachycení tvaru profilu značně omezená. Jediné záznamové zařízení, které má téměř každý k dispozici je fotoaparát. Proto padla volba primárního digitalizačního nástroje právě na něj. Jako alternativní možnost byl zvolen digitální skener, který rovněž dokáže digitalizovat profil, ale musí být pro tuto funkci patřičně upraven.

V běžném provedení může skener vytvářet obtížně odstranitelné vady, proto byl zvolen jako doplňková možnost a hlavní úsilí padlo na využití fotoaparátu.

Aby bylo možné použít pro digitalizaci běžný digitální fotoaparát, který má spoustu nedokonalostí a optických zkreslení, byla v aplikaci využita open source knihovna pro počítačové vidění OpenCV ve verzi 3.2.0, která umožňuje tyto nedostatky eliminovat.

Pro vývoj softwarové části nástroje bylo využito vývojové prostředí Microsoft Visual Studio 2012. Jako programovací jazyk byl podle požadavků zvolen C++ s knihovnou MFC.

Pro tvorbu všech grafických prvků a ikon byly použity open source nástroje Gimp 2.8.18 a Inkscape 0.91.

Testování dosahované přesnosti proběhlo s digitálním fotoaparátem Olympus OMD EM-10 s objektivem M.ZUIKO 14-42mm f/3,5-5,6 a jako zástupce běžné střední třídy mobilních telefonů byl použit Huawei P9 lite, který obsahuje kameru s rozlišením 13 Mpx s velikostí snímacího čipu 1/3 palce a světelností f/2.0. [20]

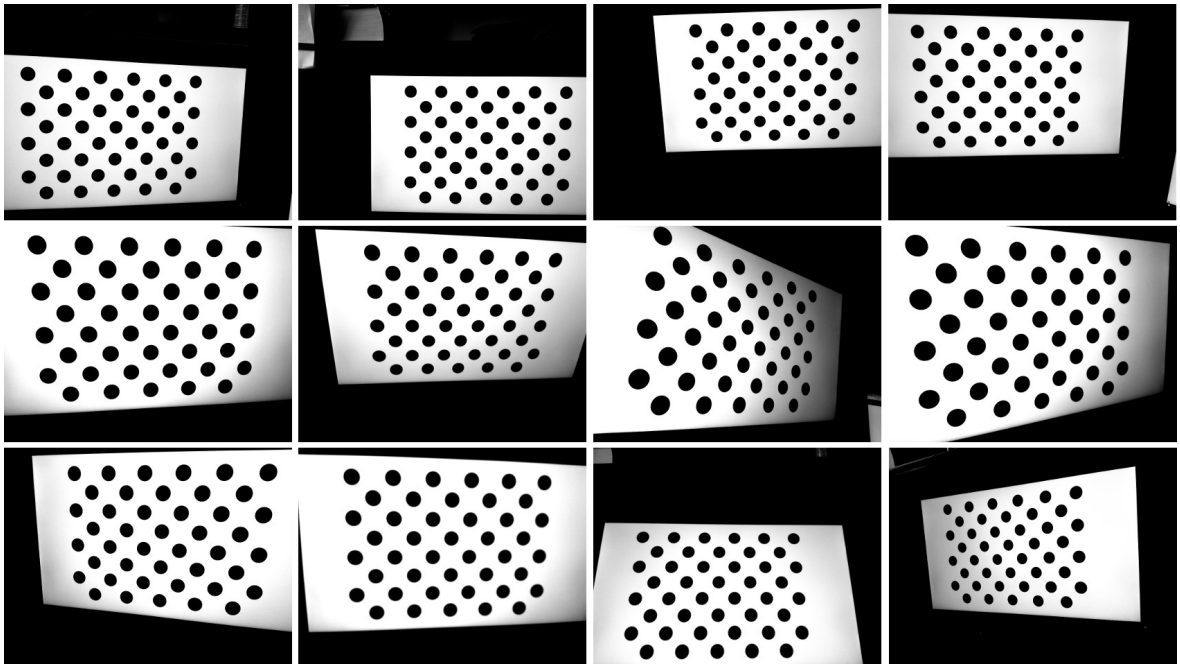
5.3 Kalibrace kamery

Při použití digitálního fotoaparátu pro účely pořizování přesných snímků je nejprve nutné zbavit se optických vad, které se na snímcích mohou objevit a které znemožňují zachycení skutečných tvarů objektů. K tomuto účelu jsou v knihovně OpenCV připraveny funkce, které umožní provést proces zvaný kalibrace kamery a následně ze získaných informací o optických vlastnostech fotoaparátu eliminovat radiální a tangenciální zkreslení. Teoretický popis optických vad fotoaparátu a princip kalibrace je uveden v kapitole 3.

Samotná kalibrace spočívá v pořízení série snímků kalibračního obrazce. Snímky by měly být pořízeny z různých úhlů a vzdáleností tak, aby byly získané údaje co nejpřesnější. Jako kalibrační obrazec je možné použít kterýkoliv ze zmíněných obrazců, které jsou v knihovně OpenCV k dispozici. Pro účely vlastní aplikace byl zvolen jako hlavní kalibrační obrazec asymetrická mřížka kruhových bodů, protože dosahuje dobrých výsledků i při malém počtu snímků (přibližně 15 - 20). Kromě ní je možné použít i ChArUco šablonu u které je ale nutné pro dosažení stejné přesnosti pořídit minimálně dvojnásobný počet snímků. Ve výsledku je jedno, která šablona byla použita pro kalibraci, jelikož jsou získané koeficienty totožné.

Důležitým parametrem kalibrace je tzv. *Reprojection error*, který udává jak kvalitně se podařilo kameru nakalibrovat. Vypočítá se jako druhá odmocnina ze střední kvadratické odchylky mezi skutečnou a vypočítanou hodnotou bodů pro každý kalibrační snímek. V ideálním případě by tato hodnota měla být menší než 1.

Výstupem kalibrace je matice vnitřních parametrů kamery (kapitola 3.1) a matice



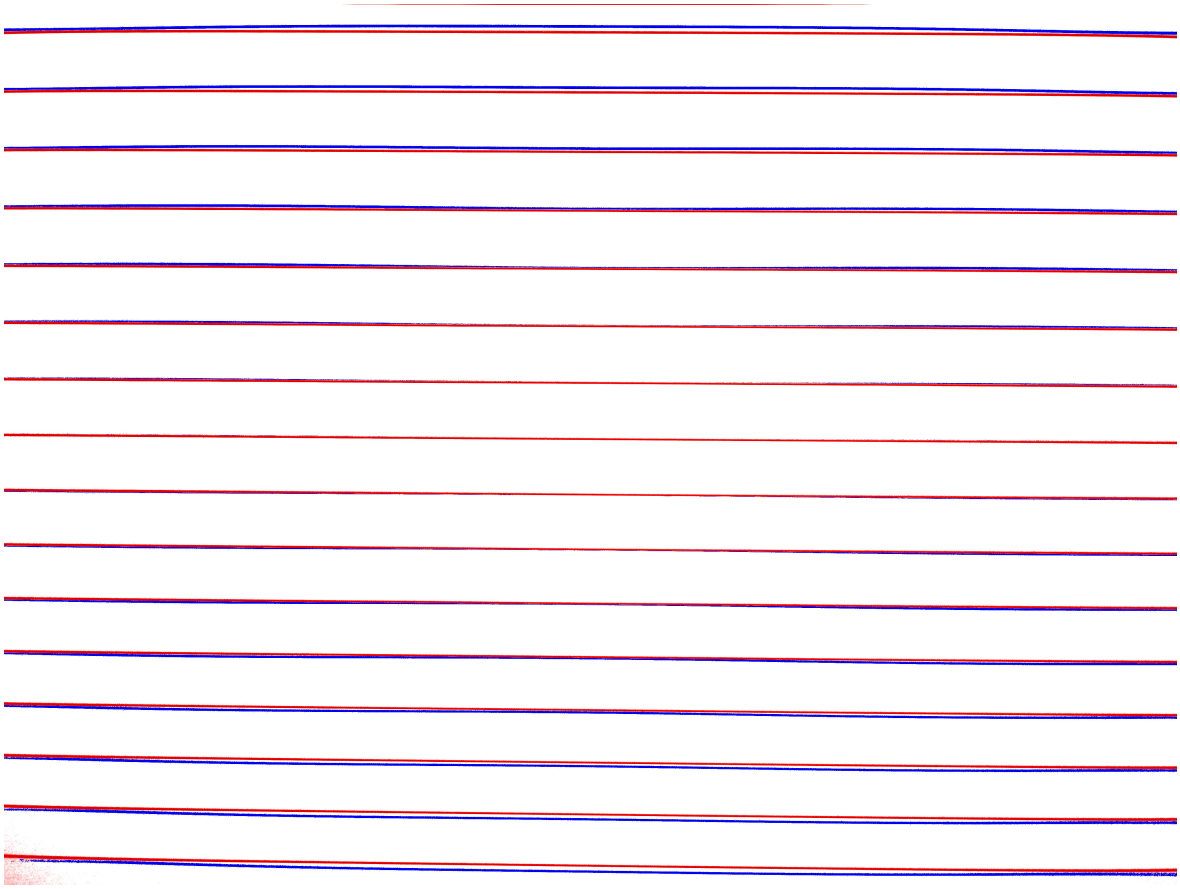
Obr. 5.1 Příklad pořízených kalibračních snímků

koeficientů zkreslení (kapitola 3.2). Tyto hodnoty jsou neměnné a proto stačí pro každou kameru provést kalibraci pouze jednou. Jedinou nevýhodou jsou digitální fotoaparáty, které umožňují změnu ohniska. U nich jsou tyto získané údaje vázány na konkrétní hodnotu ohniskové vzdálenosti a proto je nutné buď provést kalibraci pro různé ohniskové vzdálenosti, nebo používat při focení pouze jedno nastavení. Tento problém se nemusí řešit u fotoaparátů ve většině mobilních telefonů, jelikož jejich kamery mají fixní hodnotu ohniskové vzdálenosti.

5.4 Odstranění radiálního zkreslení

Pomoci matic získaných při kalibraci kamery je možné odstranit radiální zkreslení z jakéhokoliv dalšího snímku, který je daným fotoaparátem pořízen. Postup opravy je popsán v kapitole 3.2. Radiální zkreslení je nejvíce patrné na rovných liniích, které se s rostoucí vzdáleností od středu ohýbají.

Na obrázku 5.2 je ukázka radiálního zkreslení před a po korekci. Jedná se dvě kopie téhož snímku šestnácti vodorovných, vzájemně paralelních čar, které jsou pro názornost překryty přes sebe a obarveny. Modré čáry patří snímku před korekcí, červené čáry patří snímku po opravě radiálního zkreslení. Z obrázku je rovněž patrná zvětšující se míra zakřivení s rostoucí vzdáleností od optického středu.



Obr. 5.2 Radiální zkreslení před korekcí (modré čáry) a po korekci (červené čáry)

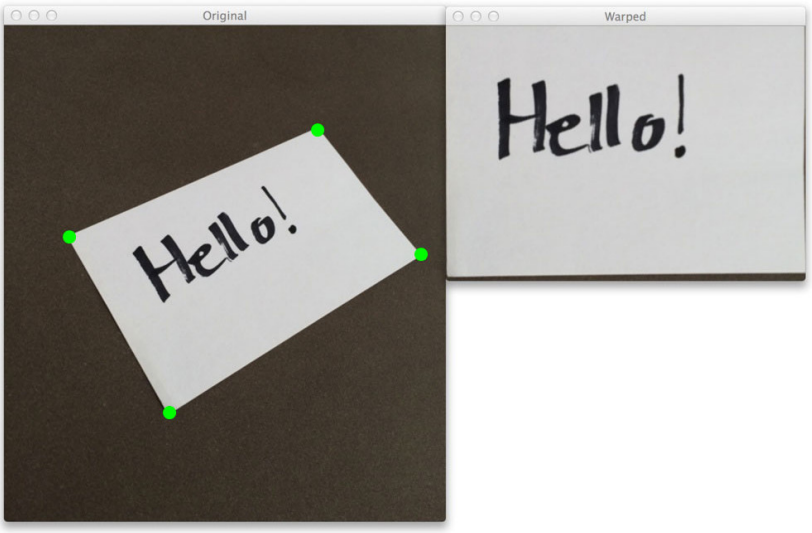
5.5 Odstranění vlivu perspektivy

Zbavit se radiálního a tangenciálního zkreslení je poměrně snadné. Daleko větší problém je zkreslení perspektivy. Zásadním krokem v procesu digitalizace a měření profilu je získat snímek jeho přesného tvaru. Zkreslení perspektivy způsobí, že tvar profilu na snímku je oproti skutečnému deformovaný a pro tento účel naprosto nevhodný. Rozměry profilu ze snímku také nelze zjistit. K tomu, aby bylo možné se s tímto problémem vypořádat, musela by být známá vzdálenost a přesná poloha foceného objektu ke kameře a ta zpravidla známá není a měřit ji ručně je prakticky nemožné.

Aby bylo možné tento zdánlivě neřešitelný problém vyřešit, musí se do snímku umístit objekt, jehož rozměry jsou předem známé. K tomuto účelu se výborně hodí již zmíněné kalibrační obrazce, které jsou automaticky detekovatelné a obsahují body, jejichž vzájemná vzdálenost je známá jak na snímku, tak ve skutečnosti.

Opravu perspektivy umožňuje v knihovně OpenCV funkce *WarpPerspective,* která provede warp obdélníku vyznačeného na snímku čtyřmi rohovými body do kolmého zobrazení s odpovídajícím poměrem stran. Všechny body na snímku, které tvoří obdélník jsou přemapovány do pohledu shora a vliv perspektivy se tak vyruší. Ukázka této

funkce je na obrázku 5.3. Pokud se umístí dovnitř tohoto obdélníku předmět, který má zanedbatelnou výšku (na příkladu jej reprezentuje nápis „Hello!“), dojde u něj rovněž k opravě zkreslení perspektivy. Tento princip lze využít i pro opravu perspektivy vyfoceného profilu. Pokud se místo nápisu vloží doprostřed obdélníku uříznutý plátek profilu, dojde k opravě perspektivy i u něj.



Obr. 5.3 Warp perspektivy pomoci čtyř bodů [21]

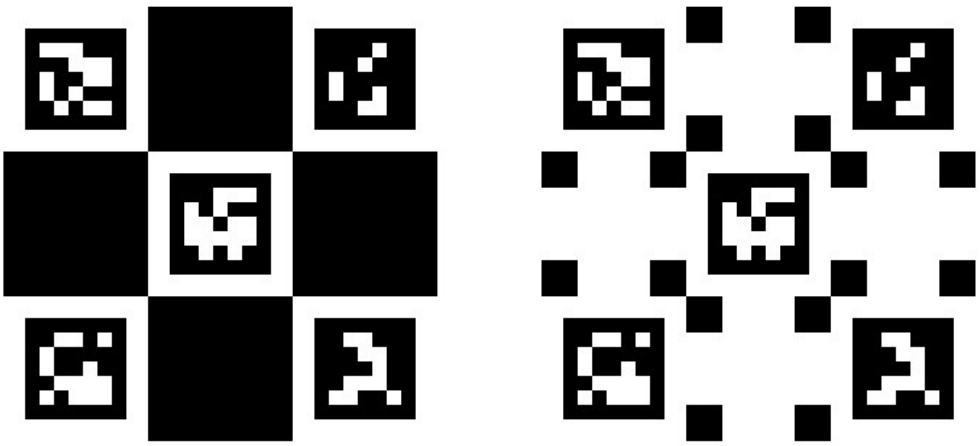
Na zmíněném příkladu na obrázku 5.3 je nutné vyznačit rohy obdélníku ručně. To ale neplatí v případě použití některého z kalibračních obrazců, které knihovna OpenCV umí automaticky na snímku najít a zjistit z něj souřadnice všech detekovaných bodů. Z těchto bodů lze snadno určit čtyři rohové a použít je jako vstupní parametr do funkce pro warp perspektivy.

5.5.1 Úprava kalibračního obrazce

Standardní kalibrační obrazce, jako je šachovnice, nebo mřížka kruhových bodů mají jednu velkou nevýhodu. Aby je bylo možné správně detekovat a určit rohové body, musí být na snímku viditelné celé. Cílem ale není opravit pouze perspektivu obrazce, ale především předmětu, který je na něm umístěn. Pokud se na kalibrační obrazec položí nějaký předmět, způsobí jeho částečné překrytí a znemožní tak jeho správnou detekci a tím i celý warp perspektivy.

Zmíněný problém zdárně řeší obrazce z ArUco modulu, které přiřazují každému bodu jedinečný identifikátor a v případě překrytí některého bodu umožní jeho dopočítání ze sousedních bodů (popis ArUco moulu je uveden v kapitole 3.4.1). Umístění předmětu na ArUco šablonu tak neznemožní detekování rohových bodů a tak nic nebrání tomu využít je na automatický warp perspektivy. Pro účely této aplikace byla zvolena šablona ChArUco, která je rozšířením šablony ArUco a dosahuje větší přesnosti.

Šablona ChArUco spojuje klasický šachovnicový vzor a ArUco kódy. Původně byl šachovnicový vzor určen pro celkovou detekci polohy obrazce na snímku. V případě ChArUco šablony slouží pouze pro dodatečné zpřesnění polohy, ke kterému se využívají společné rohy šachovnicových čtverců. Přibližný postup detekce je popsán v kapitole 3.4.1. Problémem těchto čtverců je jejich velká plocha, která v případě tisku šablony na papír spotřebuje velké množství barvy. Jelikož se z každého černého čtverce využijí při detekci pouze jeho rohy, bylo možné černé čtverce z šablony odstranit a nahradit každý z nich čtyřmi menšími čtverci reprezentujícími pouze jejich rohy. Schopnosti detekce tak zůstaly nezměněny a barevná plocha šablony se značně zmenšila. Porovnání původního vzoru šablony a upraveného je na obrázku 5.4. Na první pohled je patrná velká úspora barvy při tisku šablony. Tato upravená šablona je dále nazývána jako korekční šablona.

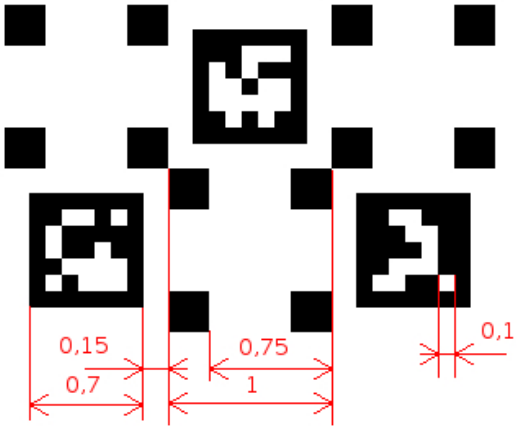


Obr. 5.4 Původní vzor (vlevo) a upravený vzor (vpravo)

Rozměry celé šablony se vztahují k původnímu šachovnicovému vzoru a jsou tedy určeny počtem čtverců šachovnice na šířku a na výšku. Pro účely měření profilů byl zvolen rozměr šablony 16 čtverců na šířku a 10 na výšku. Důvodem je předpokládaný tisk šablony na papír standardních rozměrů.

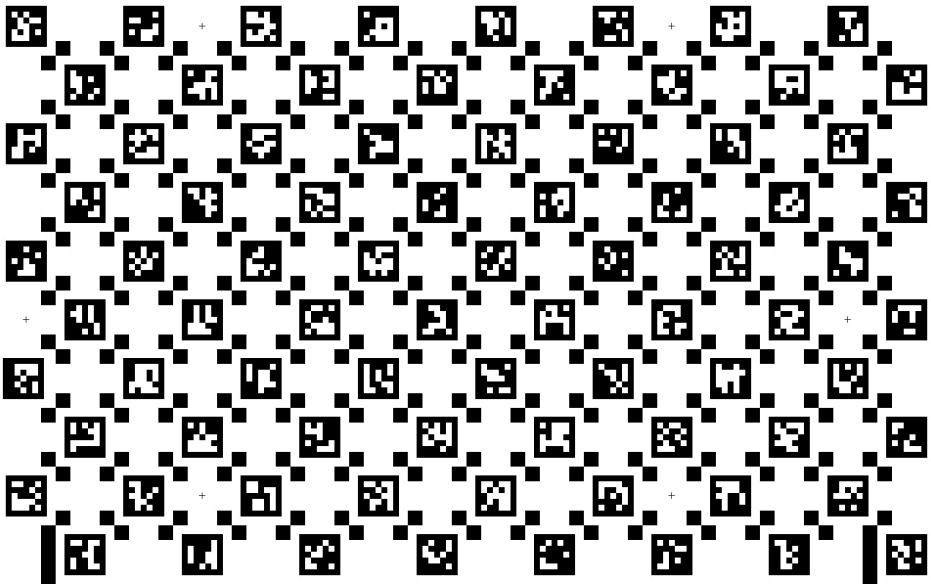
Rozměry jednotlivých částí šablony jsou zvoleny pouze poměrově a jejich fyzická velikost se určí až při samotném tisku šablony. Základní rozměr je určen původním šachovnicovým vzorem a strana jednoho políčka šachovnice má tedy velikost 1. Po upravení a nahrazení šachovnicového vzoru rohovými čtverci se tento základní rozměr vztahuje na vzdálenost vnějších stran dvou malých čtverců, které původně tvořily jedno políčko. Velikost strany čtverce tvořícího 2D kód je 0,7 a velikost jednoho malého čtverce uvnitř 2D kódu je 0,1. Všechny rozměry jsou zobrazeny na obrázku 5.5.

Šablona obsahuje celkem 80 2D ArUco kódů. Jednotlivé kódy jsou tvořeny mřížkou 5×5 čtverců, které jsou buď bílé, nebo černé. Na základě jejich barvy je možné



Obr. 5.5 Poměry velkostí jednotlivých částí obrazce

určit jedinečný identifikátor kódu. Všechny kódy byly vygenerovány pomocí knihovny OpenCV tak, aby jejich vzájemná Hammingova vzdálenost byla co největší. Díky tomu je možné použít opravné mechanismy při nesprávné detekci kódu na snímku. Je tak možné opravit 2 chybně detekované čtverečky v každém kódu. Použitý slovník obsahuje celkem 250 unikátních kódů. Důvodem použití většího slovníku je případné další rozšíření šablon a zachování zpětné kompatibility.



Obr. 5.6 Výsledná šablona

Na obrázku 5.6 je finální podoba upravené ChArUco šablony. Jelikož jsou rozměry šablony určeny pouze poměrově, je potřeba zjistit pro pozdější použití i její skutečné fyzické rozměry. Pro snadné změření obsahuje šablona ve své spodní části dva černé

pruhy. Vzdálenost vnějších hran těchto pruhů je přesně 14,25 násobek rozměru základního čtverce.

5.6 Korekce výšky

Korekce perspektivy pomocí obdélníkové šablony se známým poměrem stran je poměrně přesná. Má ale jeden velký nedostatek. Oprava perspektivy se provede pouze v rovině šablony. Aby bylo možné opravit perspektivu i u předmětu položeného na této šabloně, musel by ležet ve stejné rovině, jako šablona. Jinak řečeno, musel by mít nulovou výšku. V praxi je ale nereálné uříznout profil tak tenký, že by jeho výška byla zanedbatelná a je tedy potřeba provést korekci perspektivy s ohledem na skutečnou výšku profilu. Bez této korekce by bylo možné měřit profil pouze na úrovni šablony, ale v této rovině je většina plochy profilu zakrytá.

K tomuto účelu bylo využito možností knihovny OpenCV a jejího modulu ArUco pro rozšířenou realitu. Principem rozšířené reality je přidání nějakého počítačem vytvořeného objektu do snímku a vytvoření tak průniku reálného a virtuálního světa. Modul ArUco se zaměřuje na vykreslování 3D objektů a k tomu potřebuje určit v obraze lokální souřadnicový systém. Pro tento účel slouží již zmíněné šablony ArUco a ChArUco, které obsahují unikátní detekovatelné body. Na základě vzájemné polohy těchto bodů a ze znalosti pozice celé šablony ke kameře se odhadne lokální souřadný systém šablony, jehož Z souřadnice je k šabloně kolmá v každém jejím bodě. Do tohoto souřadného systému se následně vykreslují požadované objekty v rámci rozšířené reality.

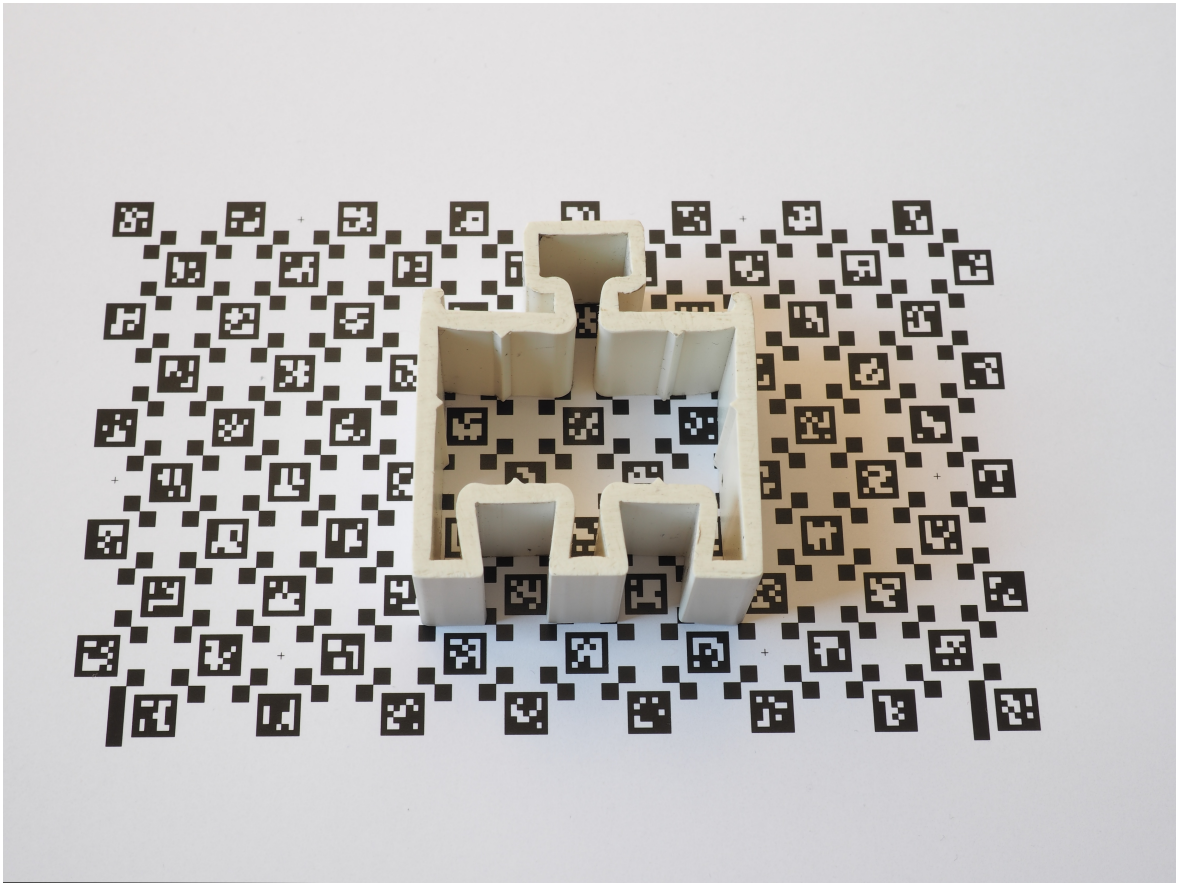
Tento princip je ale možné použít i jiným způsobem. Místo přidávání digitálních objektů do obrazu je možné využít znalost lokálního souřadnicového systému k odhadu relativní polohy skutečného předmětu ku šabloně. Pokud se na ChArUco šablonu umístí například krychle, pak jsou její svislé hrany paralelní se Z souřadnicí šablony. Pokud by byla známá skutečná velikost šablony a délka strany krychle, bylo by možné vykreslit do obrazu přesně stejnou krychli, jaká se tam ve skutečnosti nachází. Cílem ale není vykreslovat do obrazu další objekty. Hlavním záměrem je opravit perspektivu předmětu, který je na šabloně položen.

Využitím znalosti souřadnicového systému šablony je možné virtuálně posunout celou šablonu do stejné výšky, jakou má objekt, který se na ní nachází. Jinými slovy změnit Z souřadnici všech bodů šablony na předem změřenou výšku uřezaného profilu. Následně se tyto posunuté body transformují zpět do snímku a vnikne tak nová rovina, která se nachází přesně ve výšce profilu. V této nové rovině se určí body obdélníku, ve kterém se nachází profil a provede se warp perspektivy stejným způsobem, jako s obdélníkem definovaným čtyřmi rohy šablony. Perspektiva se tak opraví v rovině, ve které

se nachází čelo profilu a ve které se jako jediné dají měřit všechny potřebné rozměry.

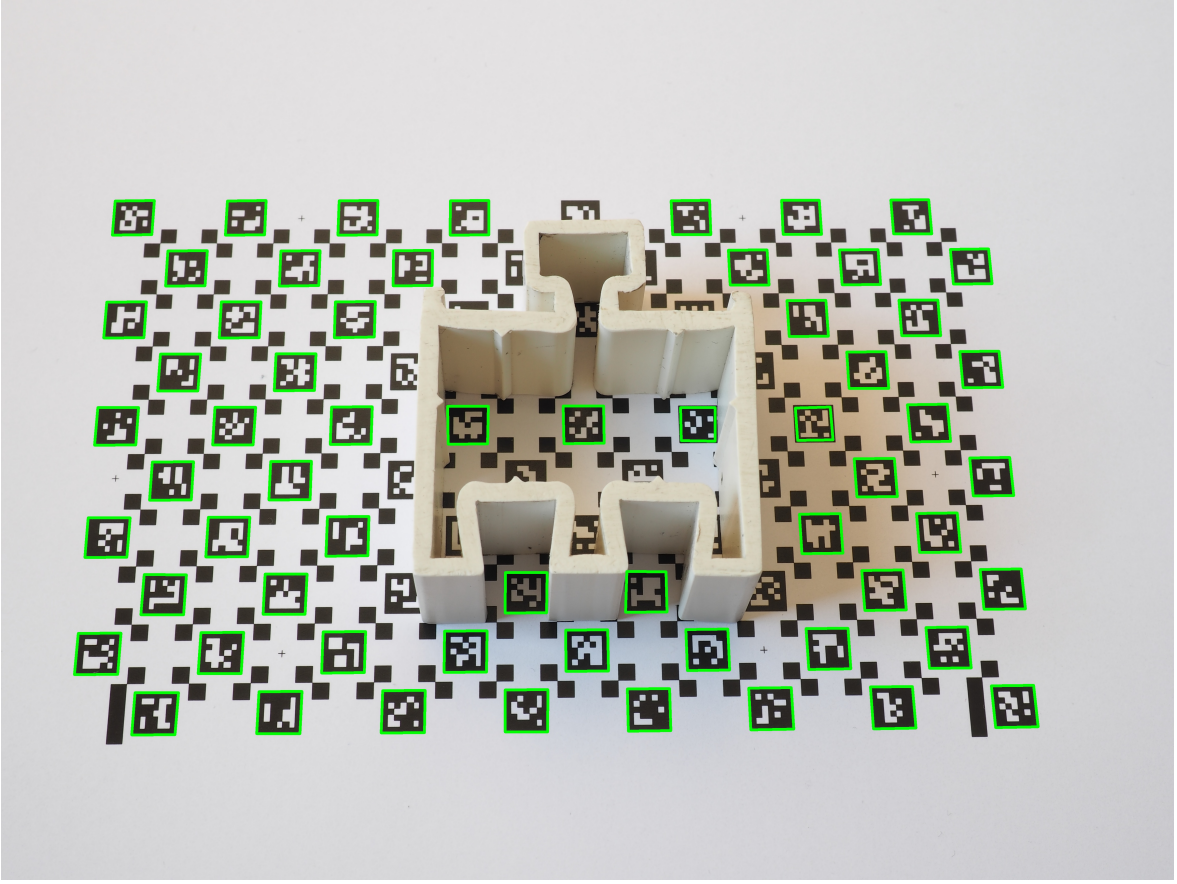
5.7 Aplikace korekcí a měření rozměrů

Aby bylo možné měřit vytlačovaný profil na snímku pořízeném fotoaparátem, musí se postupně provést všechny korekce popsané v předchozích kapitolách 5.4, 5.5 a 5.6. Celý proces začíná kalibrací kamery (kapitola 5.3). Jakmile je kamera správně nakalibrovaná, může se pořídit snímek požadovaného profilu umístěného na upravené ChArUco šabloně (obrázek 5.7). Na tento snímek se aplikují korekce radiálního a tangenciálního zkreslení podle koeficientů získaných z kalibrace.



Obr. 5.7 Snímek profilu

Následující kroky už jsou plně automatické a nevyžadují žádnou akci ze strany uživatele. Nejprve se detekují ArUco kódy (obrázek 8.3). Tento krok slouží pro hrubý odhad polohy šablony na snímku. Všechny správně detekované kódy jsou zeleně ohraničeny. Z obrázku je patrné, že kódy, které jsou zakryté profilem detekovány nebyly. Minimální počet správně detekovaných kódů není určen. Důležité je, aby se nacházely rovnoměrně okolo celého profilu. Je proto nutné zvolit velikost šablony přiměřeně k velikosti profilu.

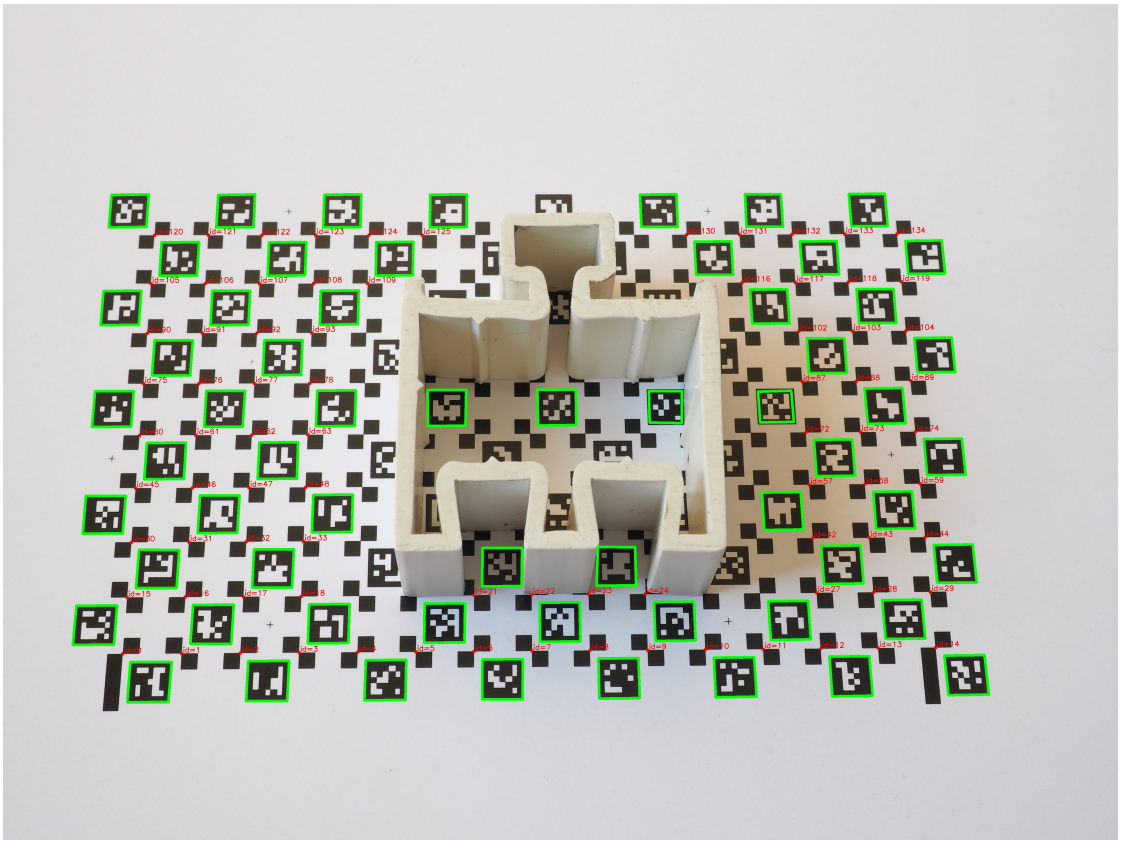


Obr. 5.8 Detekce 2D kódů

Dalším krokem je detekce rohů šachovnice, respektive průsečíků malých čtverců, které je v upravené šabloně nahradily. Každý roh je určen dvěma diagonálně sousedícími kódy. Popis detekce je v kapitole 3.4.1. Na obrázku 5.9 jsou detekované rohy znázorněny červenými tečkami. Každý bod má zároveň přiřazeno jedinečné ID, které se určí na základě sousedních kódů. V dalších krocích se využijí už jen tyto přesné body.

Z takto získané mřížky bodů se následně vytvoří 3D souřadný prostor. Jeho vizualizace je na obrázku 5.10. Červené svislé čáry vycházejí z pozic rohových bodů a jsou k šabloně kolmé. Z obrázku je patrné, že čáry vychází i z bodů, které byly v zákrytu a nemohly být detekovány přímo. Jejich poloha je dopočítána díky znalosti pozice ostatních bodů. Stejným způsobem lze vypočítat polohu libovolného bodu v této 3D mřížce. Svislé čáry rovněž dokazují správnost této metody. Na obrázku je možné porovnat, že jsou s kolmými stěnami profilu paralelní.

Následujícím krokem je oprava perspektivy. Aby mohla být perspektiva správně opravena, musí být známá výška profilu. Je to jediný rozměr, který musí být pro každý profil ručně změřen. Údaj o výšce poslouží jako hodnota Z souřadnice, do které se posunou všechny body mřížky. Na obrázku 5.10 je tato rovina znázorněna zelenou mřížkou. Následně se v této posunuté mřížce určí 4 rohové body a provede se 4 bodový

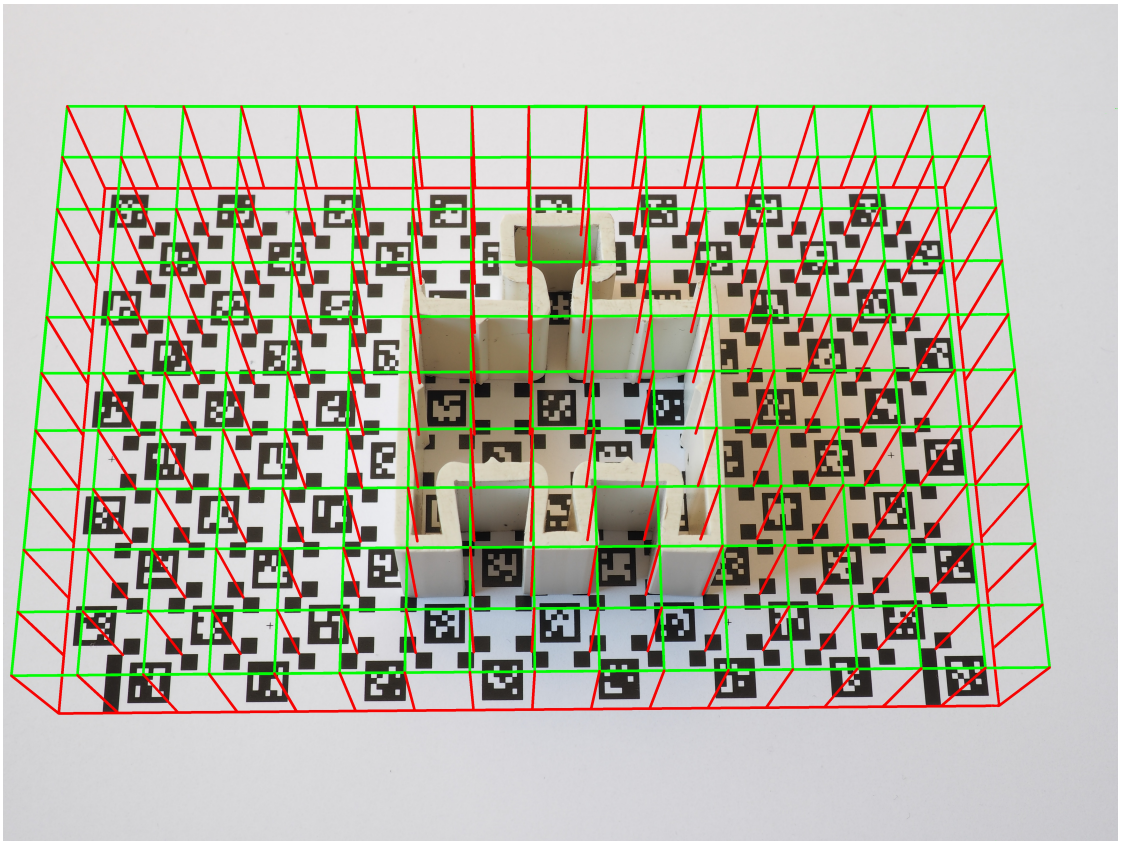


Obr. 5.9 Detekce rohů původní šachovnice

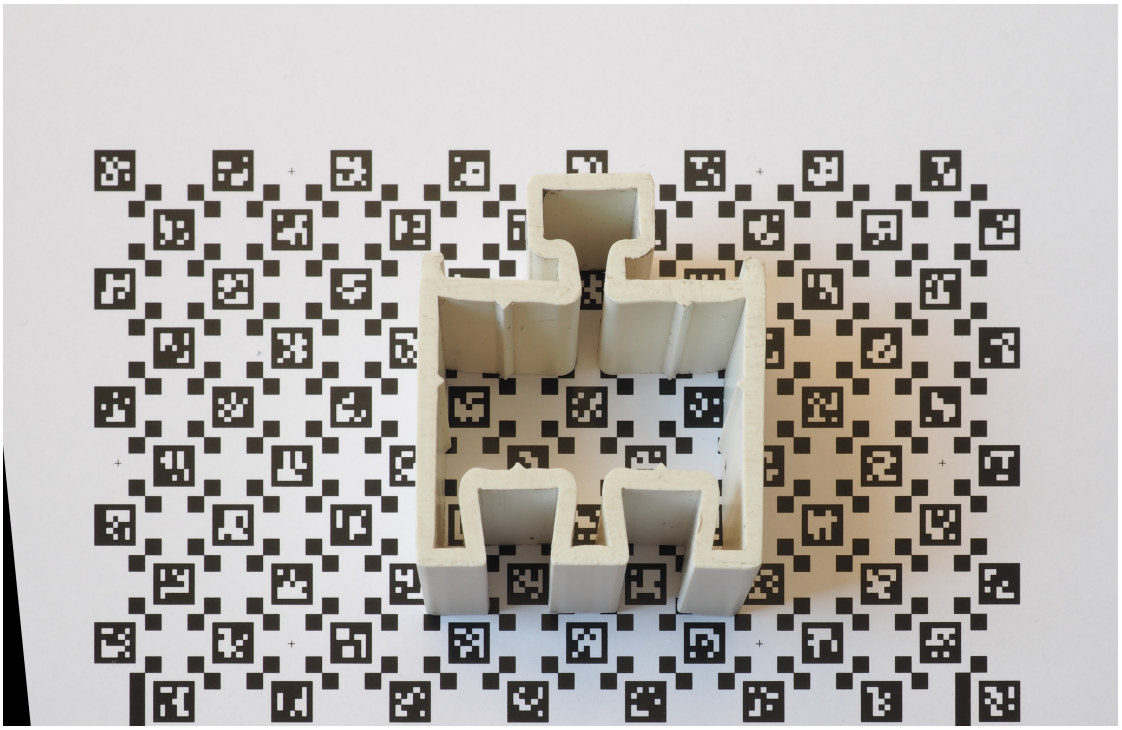
warp perspektivy.

Na obrázku 5.11 je výsledek všech korekčních úprav. Na první pohled se může opravený snímek stále jevit jako zkreslený, ale je to pouze optický klam. Oprava perspektivy proběhla pouze ve vrstvě, ve které se nachází horní strana profilu. Všechno ostatní, co se na snímku nachází v jiné vrstvě nad šablonou, včetně šablony samotné je zobrazeno špatně. Jediná část snímku, která je vyobrazena z hlediska perspektivy správně je horní strana profilu.

Posledním krokem je získání měřítka snímku, aby bylo možné měřit všechny požadované rozměry. K tomu stačí znát pouze velikost, respektive šířku šablony v milimetrech, změřenou mezi dvěma vyznačenými měřícími body. Z této hodnoty lze jednoduchým poděleným číslem 14,25 vypočítat velikost jednoho čtverce šablony. Nyní stačí vzít šířku upraveného obrázku v pixelech, podělit ji počtem čtverců šablony a nakonec ještě podělit skutečnými rozměry jednoho čtverce. Vznikne tak koeficient, jehož jednotka je pixel na milimetr. Následně je možné změřit na snímku libovolný rozměr horní strany profilu v pixelech a jednoduchým přepočtem určit jeho reálnou velikost v milimetrech.



Obr. 5.10 Vytvoření 3D mřížky



Obr. 5.11 Provedení warpu perspektivy

6 Profile Digitizer

Na základě algoritmů popsaných v předchozí kapitole vznikla aplikace Profile Digitizer. Jedná se o samostatnou, plně funkční aplikaci pro operační systém Microsoft Windows 10, která splňuje všechny zadané požadavky.

Aplikace Profile Digitizer je navržena tak, aby umožňovala rychlé a snadné měření rozměrů profilů, srovnání jejich skutečného tvaru s výkresem a převod do vektorové podoby, se kterou umí pracovat různé CAD programy.

6.1 Kreslící plátno

Základ aplikace tvoří kreslící plátno, postavené na grafickém rozhraní GDI+. Veškeré operace měření, srovnávání a digitalizace probíhají právě na tomto plátně. Základní vrstvu plátna tvoří fotografie profilu. Ostatní objekty se malují vždy nad tuto vrstvu. Kreslící plátno slouží zároveň jako nástroj pro zobrazování a kreslení kubických Bézierovych křivek a rovných čar.

Bézierovy křivky jsou využity jak pro vyznačení tvaru profilu, tak pro vykreslení požadovaného tvaru pro optické srovnání s fotografií. Použití pouze kubických Bézierových křivek je výhodné z hlediska vykreslování a archivace dat. Lze s nimi jednoduše popsat téměř libovolný tvar a přitom jsou definovány pouze čtyřmi body. Počátečním, koncovým a dvěma řídícími. Rovné čáry jsou rovněž tvořeny Bézierovými křivkami. Ty mají řídící body shodné s počátečním a koncovým bodem. Díky tomu je možné jednoduše vytvořit z rovné čáry křivku a naopak bez nutnosti měnit typ vykreslovaného objektu.

6.2 Práce s daty

Aplikace Profile Digitizer musí vzhledem ke svému zaměření zvládat práci s různými typy souborů. Pro zpracování fotografií musí podporovat nejpoužívanější grafické formáty. Aby bylo možné porovnat požadovaný tvar profilu a export geometrie vyfoceného profilu, musí umět pracovat s CAD formátem DXF. V poslední řadě musí umožňovat ukládání vlastních projektů z důvodu archivace a možnosti vrátit se k práci později.

6.2.1 Snímky

Pořízené digitální snímky je možné do aplikace importovat ve všech formátech, které jsou podporovány grafickým rozhraním GDI+. Jmenovitě jsou to BMP, GIF, PNG, JPEG a TIFF. V těchto formátech lze rovněž snímek exportovat. Ostatní formáty, které dokáže GDI+ zpracovat (WMF, EMF, ...) je možné rovněž importovat. Jejich použití se ale v rámci této aplikace nepředpokládá. [22]

6.2.2 Formát DXF

DXF je vektorový grafický formát vytvořený firmou AutoCAD. Je to jeden z nejzákladnějších formátů pro přenos souborů mezi CAD aplikacemi. Kromě širokého rozšíření je jeho velkou výhodou strukturovaný ASCII zápis vektorových objektů, který je snadno čitelný i pro člověka. Existuje i binární varianta formátu DXF, ta ale není tolik rozšířena a práce s ní je náročnější. V aplikaci Profile Digitizer je implementována ASCII varianta, která slouží pro import požadovaného tvaru profilu a pro export obrysu vyfoceného profilu. [23]

Formát DXF podporuje velké množství entit a jejich vlastností. V aplikaci Profile Digitizer jsou implementovány pouze některé základní entity.

Obecný textový soubor DXF obsahuje osm sekcí. Každá sekce začíná svým identifikátorem a končí značkou konce oblasti. Některé sekce jsou nepovinné a nemusí být v souboru obsaženy. Podrobný výpis jednotlivých sekcí je v tabulce 6.1

Tab. 6.1 Popis sekcí v DXF souboru [23]

Název sekce	**Význam**
HEADER	Hlavička souboru, která obsahuje informace o výkresu a programu, který jej vytvářel.
CLASSES	Informace o třídách vytvořených v CAD programu.
TABLES	Styly pro vykreslení, nastavení písem, pohledů, kótování a další.
BLOCKS	Bloky, které slučují entity pod jeden identifikátor.
ENTITIES	Výpis jednotlivých grafických entit a bloků.
OBJECTS	Informace o negrafických entitách.
EOF	Konec souboru.

Do jednotlivých sekcí se dále zapisují skupiny, které jsou tvořeny vždy dvěma řádky. Na prvním z těchto řádku je číselný kód skupiny a na druhém řádku příslušná hodnota. Ta může být buď textová, nebo číselná. Vazba mezi kódem skupiny a typem hodnoty je vypsána v tabulce 6.2. [23]

Aplikace Profile Digitizer vyžaduje pouze sekci ENTITIES a umí importovat entity typu POLYLINE, LINE, ARC a CIRCLE. Ostatní sekce a entity jsou ignorovány. Pro export dat využívá pouze univerzální entity typu POLYLINE. Podporované kódy pro jednotlivé entity jsou uvedeny v a tabulkách 6.3, 6.4, 6.5. Entita POLYLINE má pouze jeden podporovaný parametr a to je vrchol (VERTEX, tabulka 6.6). Těchto vrcholů může obsahovat libovolné množství. Úhel, který definuje zakřivení polyčáry je určen

Tab. 6.2 Rozsahy skupin a příslušné datové typy v DXF [23]

Rozsah kódu skupin	**Typ uložených údajů**
0–9	řetězce
10–59	reálná čísla
60–79	celá čísla
140–147	reálná čísla
170–175	celá čísla
210–239	reálná čísla
999	řetězec (komentář)
1000–1009	řetězce
1010–1059	reálná čísla
1060–1079	celá čísla

pro každý segment jeho vrcholem a je vypočítán jako tangent 1/4 vloženého úhlu mezi aktuálním a následujícím vrcholem.

Tab. 6.3 Entita LINE

Kód skupiny	**Hodnota**
10	X souřadnice počátečního bodu
20	Y souřadnice počátečního bodu
11	X souřadnice koncového bodu
21	Y souřadnice koncového bodu

Tab. 6.4 Entita ARC

Kód skupiny	**Hodnota**
10	X souřadnice středového bodu
20	Y souřadnice středového bodu
40	poloměr
50	počáteční úhel
51	koncový úhel

Tab. 6.5 Entita CIRCLE

Kód skupiny	**Hodnota**
10	X souřadnice středového bodu
20	Y souřadnice středového bodu
40	poloměr

Tab. 6.6 Entita VERTEX

Kód skupiny	**Hodnota**
10	X souřadnice vrcholu
20	Y souřadnice vrcholu
42	úhel určující zakřivení segmentu

6.2.3 Archivace ve formátu XML

Každá rozsáhlejší aplikace, která umožňuje zpracovávat data by měla umět uložit svůj aktuální stav a znovu jej načíst. Tato funkce je nesmírně důležitá z hlediska archivace projektu, jeho přenášení, posílání elektronickou cestou, nebo pro možnost vrátit se k rozpracovanému projektu později.

Aplikace Profile Digitizer při práci využívá několik různých typů dat. V prvé řadě je to obrázek, respektive pořízená fotografie, dále jsou to různé číselné informace například o rozlišení snímku v milimetrech a nakonec vektorová data popisující tvar profilu. Aby se celý projekt snáze přenášel, musí být všechny vyjmenované součásti uloženy do jednoho souboru. Existuje spousta možností, jak toho dosáhnout, například použít serializaci a vytvořit ze všech dat jeden binární soubor. Takovýto binární soubor má ale spoustu nevýhod. Je možné jej zpracovat pouze v rámci dané aplikace, obtížně se dodržuje zpětná kompatibilita při rozšiřování funkcí a není jej možné ručně prohlížet a editovat. Druhou možností je použít textový soubor. Ten má hlavní výhodu v tom, že jej lze jednoduše prohlížet a upravovat. Navíc pokud se použije přesně definovaný strukturovaný zápis, například značkovací jazyk XML, je možné vytvořit soubor jednoduše čitelný jak pro aplikaci, tak pro člověka. Jeho největší výhoda je ale zároveň jeho největší nevýhodou. Umožňuje zápis pouze textových hodnot. V případě, kdy je potřeba uložit i binární data (obrázek) musí být nejprve převedena do textové podoby a tím značně naroste velikost souboru.

I přes nutnost ukládat obrázek byl pro ukládání projektu v aplikaci Profile Digitizer zvolen textový formát s XML strukturou. Výhody ruční editace a prohlížení dat zvítězily nad uzavřeným binárním souborem.

Aby bylo možné obrázek uložit do textového souboru, musí být převeden do textové podoby. Jednou z možností, jak toho dosáhnout je uložit hodnoty RGB složek pro každý pixel obrázku v hexadecimálním tvaru. Každý obrazový bod by tak zabíral 9 znaků. Na první pohled je jasné, že pro velké obrázky, které produkují současné digitální fotoaparáty by byl soubor nesmyslně velký a jakákoliv manipulace s ním by byla obtížná. Druhou možností je nechat obrázek tak jak je a převést celou jeho binární reprezentaci do textové podoby. V tomto případě dojde pouze k částečnému navýšení velikosti souboru, které je oproti prvnímu případu v mnohem snesitelnějších mezích. Pro aplikaci Profile Digitizer byla zvolena druhá možnost, přičemž obrázek jako takový je pro ještě výraznější úsporu místa převeden do formátu JPEG nezávisle na tom, v jakém formátu byl původně importován.

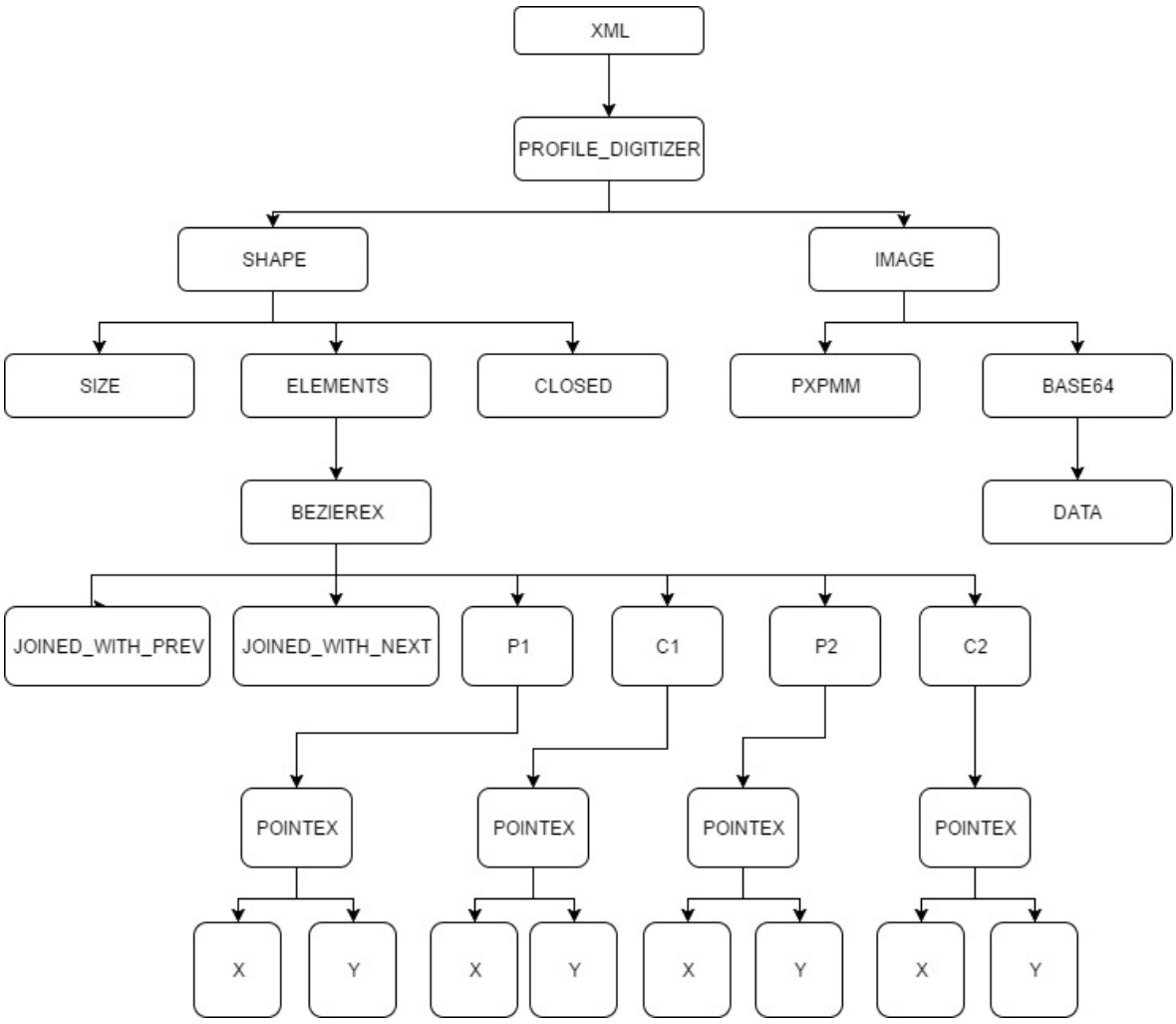
Tab. 6.7 Převodní tabulka kódování Base64 [24]

Hodnota	ASCII znak	Hodnota	ASCII znak	Hodnota	ASCII znak	Hodnota	ASCII znak
0	A	17	R	34	i	51	z
1	B	18	S	35	j	52	0
2	C	19	T	36	k	53	1
3	D	20	U	37	l	54	2
4	E	21	V	38	m	55	3
5	F	22	W	39	n	56	4
6	G	23	X	40	o	57	5
7	H	24	Y	41	p	58	6
8	I	25	Z	42	q	59	7
9	J	26	a	43	r	60	8
10	K	27	b	44	s	61	9
11	L	28	c	45	t	62	+
12	M	29	d	46	u	63	/
13	N	30	e	47	v		
14	O	31	f	48	w		
15	P	32	g	49	x		
16	Q	33	h	50	y		

Pro převod obrázku do textové podoby je použito kódování Base64. Toto kódování umožňuje převést binární data uspořádaná do oktetů na 64 tisknutelných znaků z ASCII znakové sady. Pro převod není podstatný obsah ani formát dat, jelikož se převádí přímo jejich binární reprezentace. Samotný převod probíhá v několika krocích. Nejprve se binární soubor rozdělí na skupiny po 3 osmibitových hodnotách. Každá tato skupina

je poté převedena na 4 šestibitová čísla. Každé šestibitové číslo je tedy v rozsahu $0–63_{10}$. Následně stačí tato čísla vzít a podle překladového slovníku je převést na odpovídající tisknutelný znak. Převod z Base64 kódování zpět do binární podoby se provádí opačným postupem. Překladový slovník je uveden v tabulce 6.7. [24]

Po převedení obrázku do kódování Base64 jsou již všechna potřebná data pro popis aktuálního stavu aplikace v textové podobě a mohou být uložena v jediném textovém souboru s XML strukturou. Stromová struktura je znázorněna na obrázku 6.1.



Obr. 6.1 Struktura XML souboru pro uložení projektu

Kořenový adresář obsahuje dva základní objekty. Obrázek profilu *IMAGE* a vektorový tvar profilu *SHAPE*. Obrázek se nachází v XML souboru vždy pouze jeden. Obsahuje údaj o svém rozlišení v milimetrech na pixel *PXPMM* a binární data v kódování Base64. Ta jsou uložena v řetězcích po 128 znacích mezi tagy *DATA*.

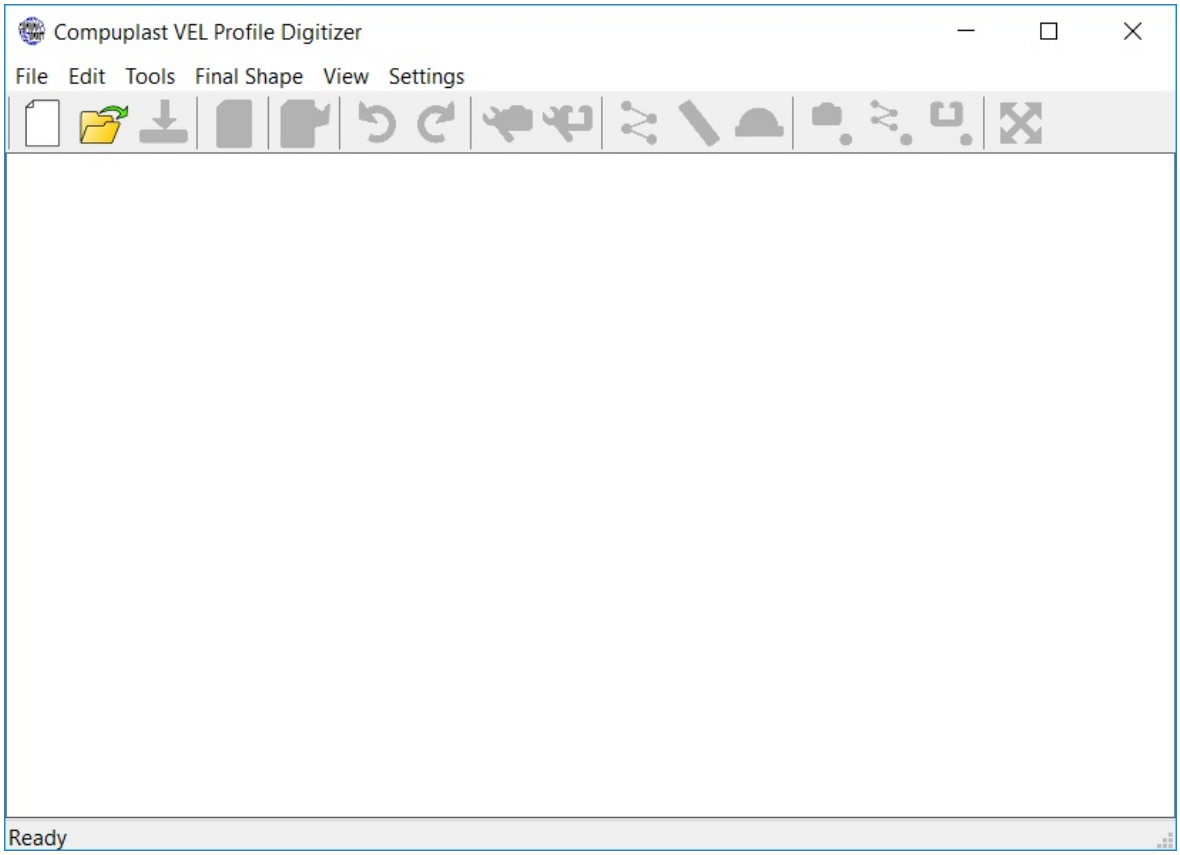
Elementů *SHAPE* se může v souboru nacházet více. Každý *SHAPE* tvoří jednu nepřerušenou stopu složenou z Bézierovych křivek. Element *SIZE* udává, z kolika křivek se skládá a element *CLOSED* určuje, jestli je křivka uzavřená a jestli má být poslední

bod poslední křivky spojen s první bodem první křivky.

Jednotlivé Bézierovy křivky se dále skládají ze svých čtyř definičních bodů *P1*, *P2*, *C1*, *C2* a jejich *X* a *Y* souřadnic. Další dva elementy pojmenované jako *JOINED_WITH_PREV* a *JOINED_WITH_NEXT* určují chování řídících bodů, respektive určují, jestli jsou řídící body spojeny s řídícími body sousední křivky. Toto spojení se projevuje především při editaci křivky, kdy změnou polohy řídícího bodu křivky dojde zároveň k opačné změně polohy přilehlého řídícího bodu sousední křivky.

7 Ovládání aplikace

Aplikace Profile Digitizer byla navržena s ohledem na co nejjednodušší ovládání. Všechny důležité funkce jsou dostupné z nástrojové lišty a veškeré operace měření a digitalizace profilu je možné provést pouze pomocí myši. Základní okno aplikace je na obrázku 7.1.



Obr. 7.1 Základní okno aplikace

Na obrázku 7.1 je zobrazena nástrojová lišta, jejíž popis je v seznamu níže.

Obr. 7.2 Nástrojová lišta

1. Vytvoření nového projektu
2. Otevření uloženého projektu
3. Uložení aktuálního projektu
4. Export obrysu profilu jako DXF

5. Import požadovaného tvaru profilu ve formátu DXF
6. Vrátit akci zpět
7. Znovu provést akci
8. Přepínač editace profilu
9. Přepínač editace požadovaného tvaru
10. Kreslení Bézierových křivek
11. Pravítko pro měření rozměrů
12. Úhloměr pro měření úhlů
13. Zobrazení/skrytí podkladové fotografie
14. Zobrazení/skrytí nakreslených křivek
15. Zobrazení/skrytí požadovaného tvaru
16. Zoom na vše

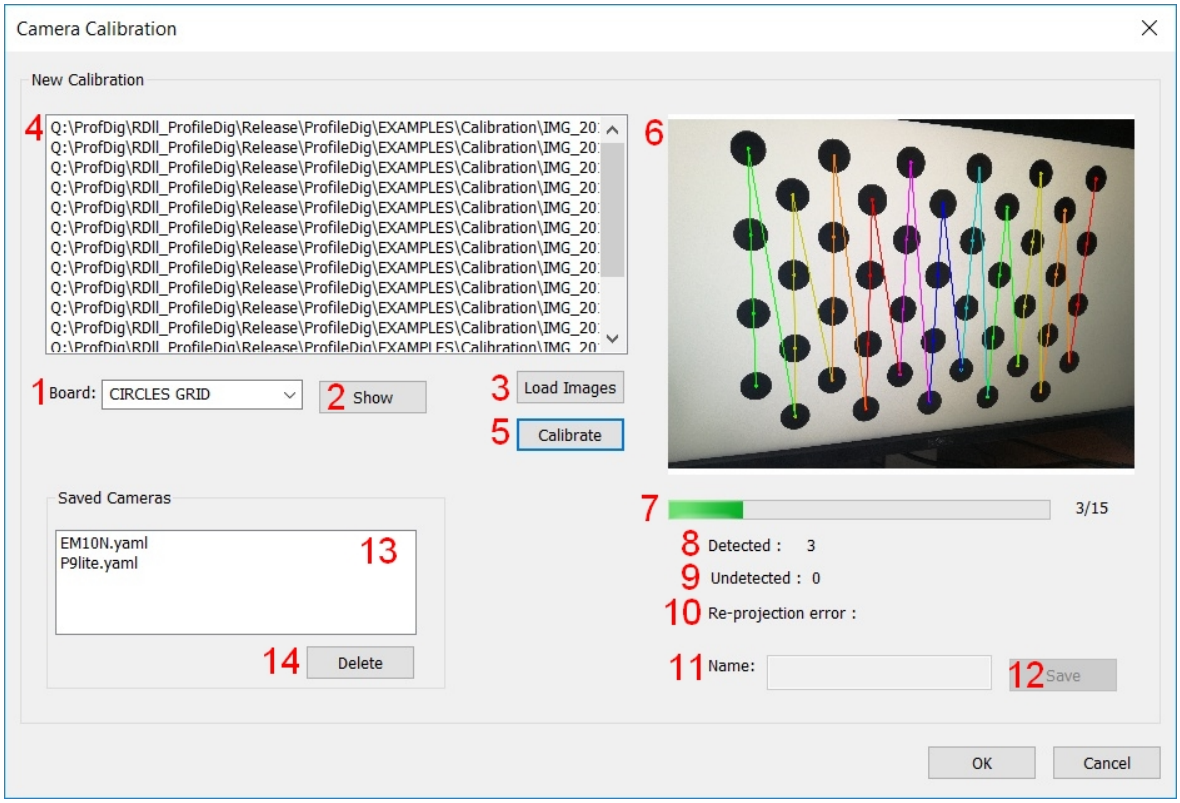
7.1 Kalibrace kamery

Aby bylo možné aplikaci Profile Digitizer plnohodnotně používat, musí se nejprve nakalibrovat alespoň jeden fotoaparát. Kalibrace se nachází v menu *Settings→Camera Calibration*, nebo ji lze spustit při zakládání nového projektu.

Dialog pro kalibraci je zobrazen na obrázku 7.3. Na výběr je ze dvou kalibračních obrazců: *CIRCLES GRID* (asymterická mřížka kruhových bodů) a *CHESSBOARD* (ChArUco šablona). Z rolovacího menu (bod 1) se nejprve musí zvolit, která šablona se má pro kalibraci použít. Přednastavená volba je *CIRCLES GRID*, která je pro kalibraci vhodnější. Druhá šablona (*CHESSBOARD*) nedosahuje takové přesnosti a je zde pouze pro případ, kdy je potřeba provést kalibraci pomocí vytisknuté korekční ChArUco šablony.

Vybranou kalibrační šablonu je možné zobrazit na monitoru klepnutím na tlačítko *Show* (bod 2). Šablona se zobrazí přes celou plochu obrazovky tak, aby ji bylo možné jednoduše vyfotit. Je potřeba pořídit alespoň 15 fotografií při použití šablony *CIRCLES GRID*. Pro *CHESSBOARD* je třeba alespoň 30 fotek. Snímky šablony musí být pořízeny z různých úhlů a vzdálenosti. Ukázka pořízených snímků šablony je v kapitole o kalibraci na obrázku 5.1. Šablonu je možné zavřít stisknutím klávesy *Esc*.

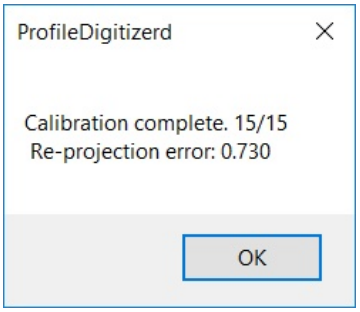
Snímky šablony je poté potřeba nahrát do aplikace klepnutím na tlačítko *Load Images* (bod 3) a zvolením jejich umístění. Všechny nahrané snímky se poté vypíší



Obr. 7.3 Okno kalibrace kamery

do seznamu snímků (bod 4). Samotný proces kalibrace se zahájí tlačítkem *Calibrate* (bod 5).

Proces kalibrace zabere několik vteřin až jednotek minut v závislosti na počtu snímků, jejich rozlišení, použité šabloně a výkonu počítače. Kalibraci je možné sledovat v okně (bod 6), kde se v případě správě detekovaného snímku vykreslí barevné čáry propojující středy detekovaných bodů. Celkový průběh kalibrace je znázorněn na ukazateli průběhu (bod 7). Pod ukazatelem jsou vypsány aktuální informace o počtu detekovaných a nedetekovaných snímků (bod 8 a 9).



Obr. 7.4 Oznámení o dokončení kalibrace

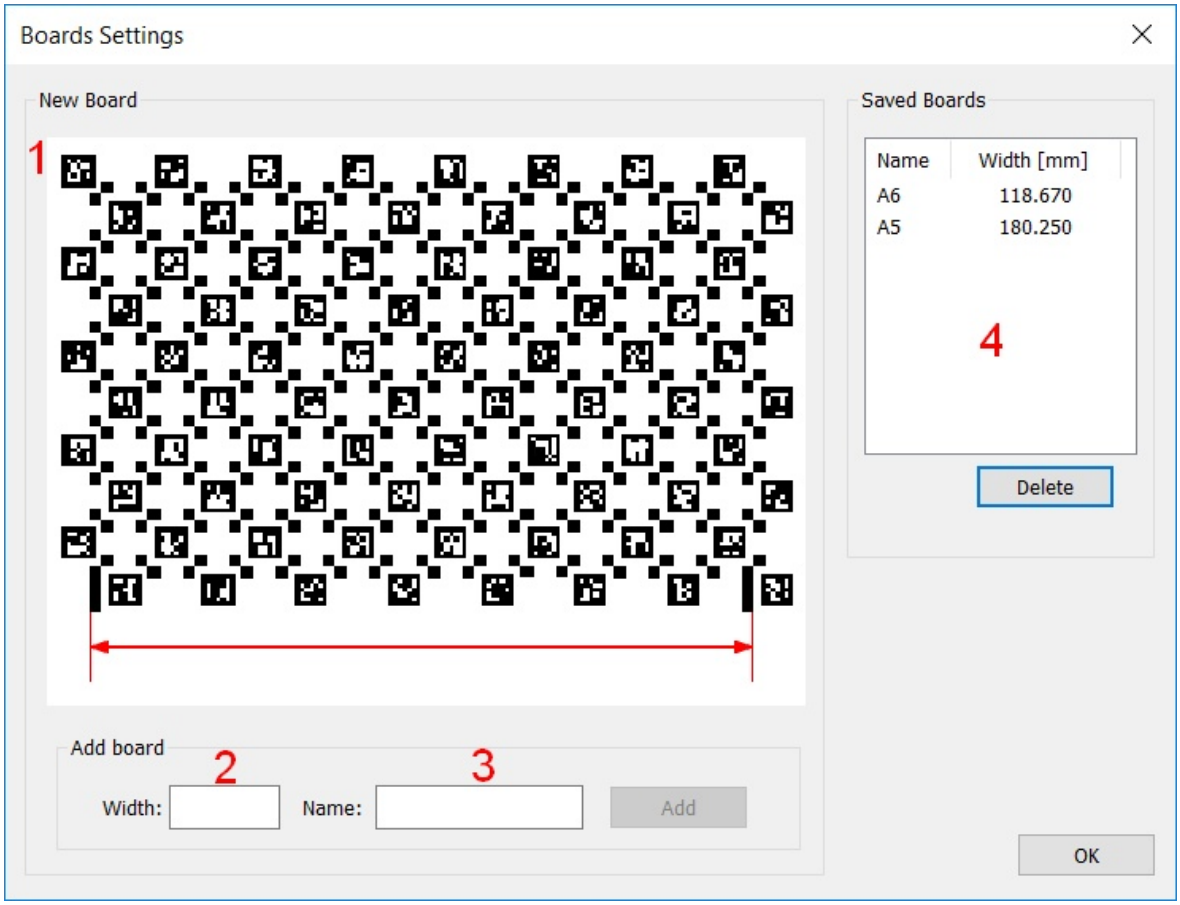
Po dokončení kalibrace se zobrazí okno oznamující celkový počet detekovaných

snímků a chybu zpětné projekce (*Re-projection error*). Zobrazena je i v okně aplikace (bod 10). Tato chyba by neměla být větší než 1.

Následně je potřeba zvolit název (bod 11) a kalibrační údaje uložit klepnutím na tlačítko *Save* (bod 12). Všechny nakalibrované kamery se zobrazují v seznamu kamer (bod 13), odkud je možné je smazat pomocí tlačítka *Delete* (bod 14).

7.2 Nastavení korekční šablony

Druhý krok, který je nutné provést, aby bylo možné aplikaci plnohodnotně používat je nastavení rozměrů korekčních šablon. Aplikace již obsahuje několik přednastavených rozměrů šablon, které jsou dodávány spolu s programem v papírové formě, nebo jako PDF dokument připravený k vytisknutí. V případě použití dodaných šablon je možné celý tento krok přeskočit. V případě tisku vlastního rozměru šablony je potřeba zaregistrovat její rozměr v aplikaci. Dialog pro nastavení šablony je možné otevřít z menu *Settings→Board*, nebo při vytváření nového projektu. Tento dialog je zobrazen na obrázku 7.5.



Obr. 7.5 Přidání nového rozměru šablony

Při registraci šablony je potřeba změřit její rozměr. Ten se měří pomocí dvou značek

na spodní straně šablony. Způsob měření je znázorněn na obrázku šablony (bod 1). Změřený rozměr se následně zadá do políčka *Width* (bod 2) a zvolí se jméno, pod kterým se bude šablona používat (bod 3). Pomocí tlačítka *Add* se rozměr uloží a objeví se v seznamu šablon (bod 4). Z toho seznamu je možné zaregistrované šablony mazat pomocí tlačítka *Delete*.

7.3 Vytvoření nového projektu

Po úspěšné kalibraci fotoaparátu a zaregistrování rozměru šablony je možné začít samotnou digitalizaci profilů.

7.3.1 Příprava profilu

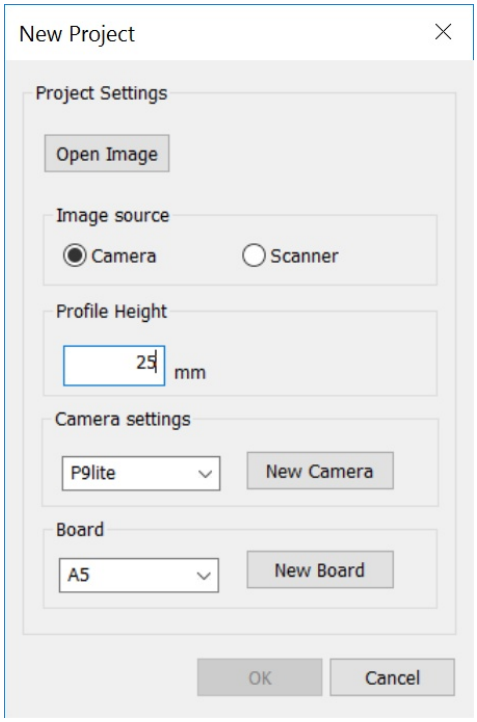
Prvním krokem je příprava profilu pro focení. Z požadovaného profilu se kolmo na směr vytlačování uřízne tenký plátek. Jeho tloušťka není přímo omezena, ale neměla by přesáhnout 5cm. Čím tenčí plátek je možné uřezat, tím přesnějších výsledků je možno dosáhnout. Řez musí být proveden rovně a hrany profilu musí zůstat ostré.

7.3.2 Vyfocení profilu

Uřezaný plátek se následně vloží doprostřed korekční šablony. Velikost šablony se volí přiměřeně k velikosti profilu tak, bylo na snímku okolo profilu dostatečné množství viditelných kódů. Následně se pořídí pomocí nakalibrovaného fotoaparátu snímek šablony s profilem. Snímek by neměl být pořízen přesně kolmo na šablonu, ale z mírného úhlu. Ukázka správně vyfoceného profilu je na obrázku 5.7.

7.3.3 Zpracování snímku v aplikaci

Pro zpracování snímku je potřeba založit v aplikaci Profile Digitizer nový projekt klepnutím na příslušnou ikonu, nebo volbou v menu *File→New Project*. Tímto se otevře dialog s nastavením projektu (obrázek 7.6). V tomto dialogu je potřeba zvolit cestu k fotografii profilu (tlačítko *Open Image*). Dále je třeba zvolit, jestli byl snímek pořízen fotoaparátem, nebo skenerem. V případě skeneru se žádné obrazové korekce neprovádějí. Do políčka *Profile Height* je třeba doplnit výšku profilu (respektive tloušťku uřezaného plátku) v milimetrech. Dále je třeba zvolit uloženou kalibraci použitého fotoaparátu a velikost korekční šablony, na které byl profil vyfotografován. Po vyplnění všech těchto požadovaných údajů se stiskem tlačítka *OK* automaticky provedou všechny potřebné korekce a výsledný upravený snímek se zobrazí v okně aplikace.



Obr. 7.6 Vytvoření nového projektu

7.3.4 Ovládání plátna

Upravený snímek se vykreslí na kreslící plátno aplikace. Plátno je možné přibližovat, posouvat a otáčet. Základní ovládací prvky jsou popsány v tabulce 7.1.

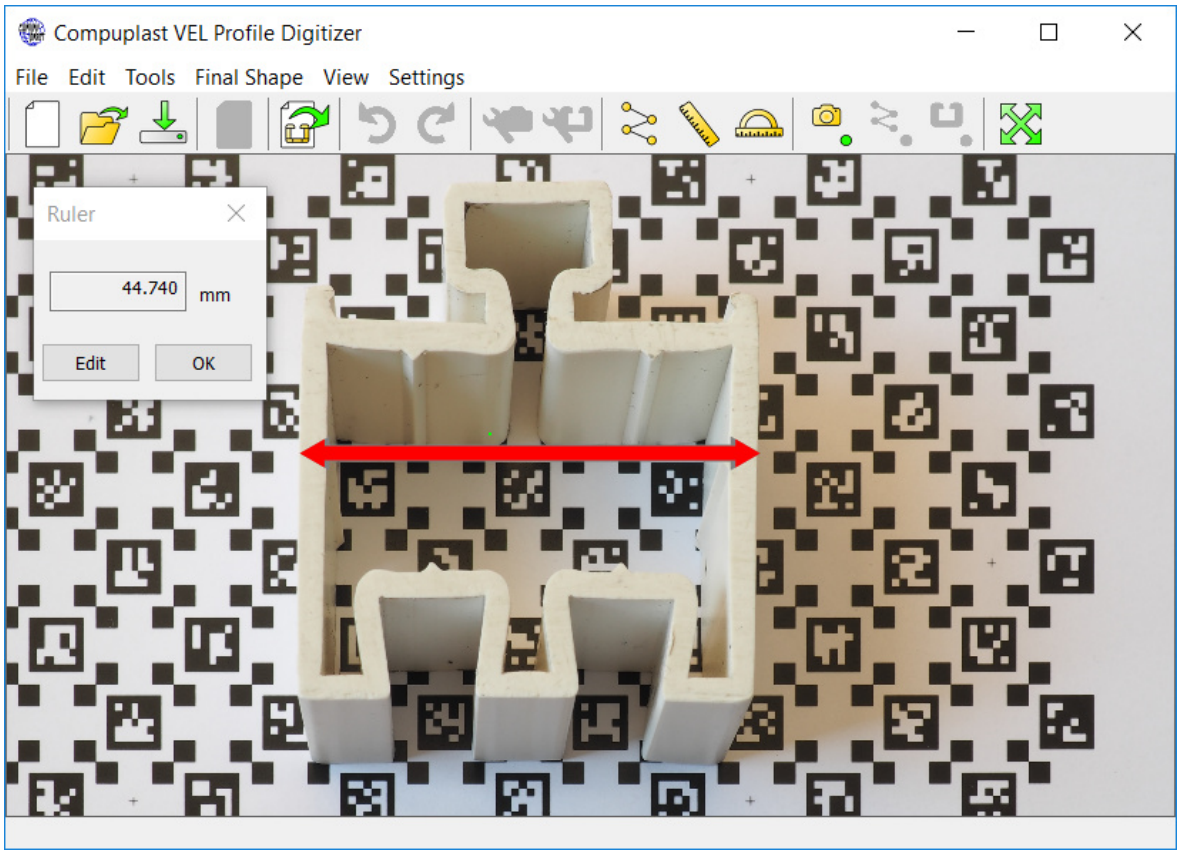
Tab. 7.1 Pohyb po plátně

Požadovaná Akce	**Provedení**
Posun plátna	Stisk a současné tažení pravého tl. myši
Přiblížení a oddálení plátna	Otáčení kolečka myši
Rotace plátna	Stisk a držení klávesy Ctrl a současně stisk a tažení pravého tlačítka myši.

7.4 Měření rozměrů a úhlů

Nástroj pro měření rozměrů se nachází v menu *Tools→Measuring Tools→Ruler*, případně je dostupný přímo z nástrojové lišty. Měření rozměru profilu se provádí vždy mezi dvěma body na snímku. Stisknutím a držením levého tlačítka myši se definuje první bod. Tažením myši se stále stisknutým levým tlačítkem se určí druhý bod. Uvolněním tlačítka myši se pozice měřících bodů zafixuje a odpovídající rozměr se zobrazí v

plovoucím okně. Následně je možné polohu měřících bodů upravovat stiskem a tažením levého tlačítka myši na počátečním, nebo koncovém bodě ve tvaru šipky.



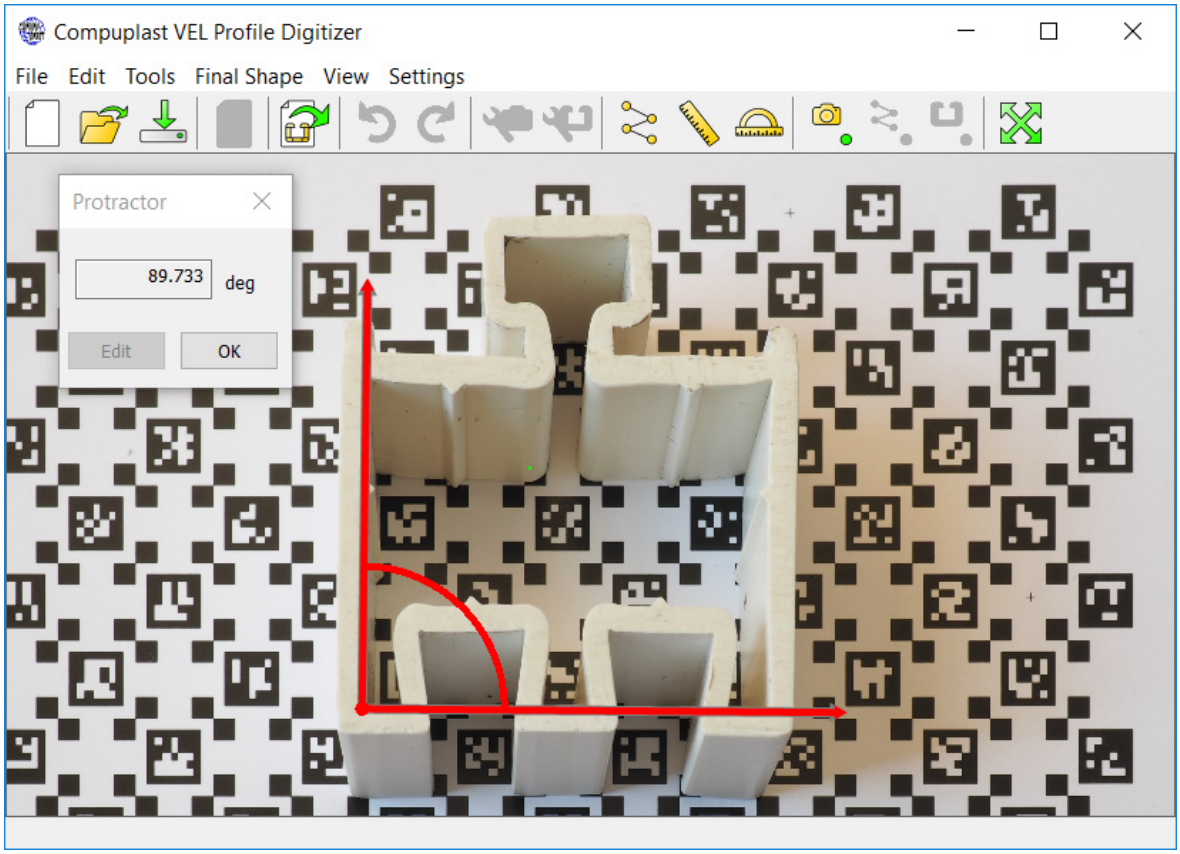
Obr. 7.7 Měření rozměrů

Měření úhlů probíhá podobným způsobem. Položkou v menu *Tools→Measuring Tools→Protractor* se vybere nástroj úhloměr, případně se zvolí přímo z nástrojové lišty. Úhloměr se ovládá stejně, jako pravítko pro měření rozměrů. Stiskem levého tlačítka myši a jejím tažením se definuje úsečka určující počáteční úhel. Koncový úhel se zobrazí automaticky v ose Y. Polohy obou úseček definujících sevřený úhel je možné měnit stisknutím a tažením levého tlačítka myši na jejich koncích. Stejným způsobem je možné posunout celý úhloměr najednou při stisku a tažení levého tlačítka myši na jeho středovém bodě. Hodnota změřeného úhlu se průběžně zobrazuje v plovoucím okně.

7.5 Srovnání s požadovaným tvarem

Pro porovnání tvaru profilu s požadovaným tvarem je možné importovat výkres ve formátu DXF. Podporované entity jsou *POLYLINE*, *LINE*, *ARC* a *CIRCLE*. Pokud se ve výkresu vyskytují jiné elementy, je nutné jej nejprve převést pomocí externího programu do jednodušší formy, která využívá pouze uvedené elementy.

Otevřít výkres je možné pomocí volby v menu *Final Shape→Load Shape*, nebo přímo z nástrojové lišty, Po otevření se vykreslí na plátno ve stejném měřítku, jako má profil



Obr. 7.8 Měření úhlů

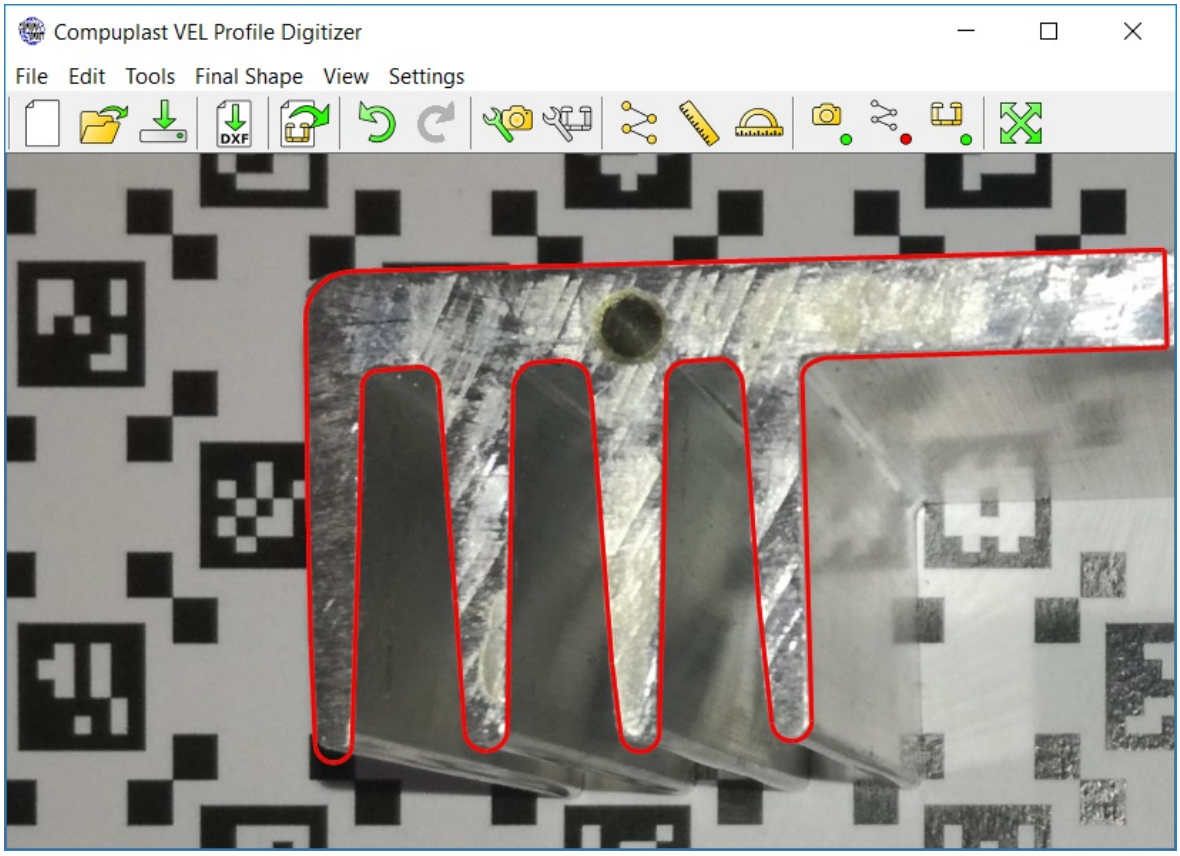
na fotografii a je tak možné opticky porovnat tvarovou shodnost. Případně lze změřit rozdíly pomocí nástroje Pravítko (*Ruler*).

Aby bylo možné srovnání provést, musí se nejprve výkres posunout do stejné polohy, jako má profil na fotografii. Výkres v tomto případě funguje jako samostatná vrstva, kterou lze posunovat a otáčet stejným způsobem, jako samotné plátno. Stisknutím pravého tlačítka myší a tažením se výkres posunuje, přidržením klávesy *Ctrl* při posunování výkres rotuje. Pro přepínání mezi editací plátna a výkresu slouží přepínač v podobě dvou tlačítek v nástrojové liště.

7.6 Digitalizace profilu

Digitalizovat vyfocený profil je možné pomocí ručního vyznačení jeho tvaru. K tomu slouží nástroj pro kreslení kubických Bézierovych křivek, které umožňují velice jednoduše popsat libovolně složitý tvar. Kreslení Bézierovych křivek je dostupné v menu *Tools→Draw Polylines*, případně přímo z nástrojové lišty.

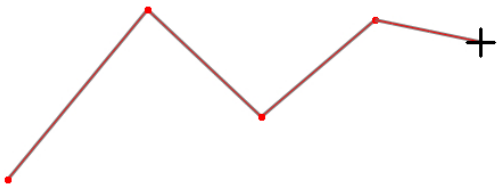
Veškeré kreslení a editace křivek se provádí pouze levým tlačítkem myši.



Obr. 7.9 Srovnání fotografie profilu s požadovaným tvarem

7.6.1 Kreslení rovných čar

Kreslení rovné čáry se zahájí klepnutím levým tlačítkem myši do prostoru kreslícího plátna. Tím se vytvoří počáteční bod čáry, jejíž druhý konec je přichycen ke kurzoru. Opětovným klepnutím levým tl. myši do volného místa na plátně se přichycený bod ukotví a ke kurzoru se přichytí nová čára vedoucí od posledního přidaného bodu.



Obr. 7.10 Krelsení rovných čar

Přidávání bodů lze ukončit několika způsoby. Dvojklikem do volného místa na plátně, kdy se na toto místo přidá poslední bod, ze kterého již další část čáry nepokračuje. Druhou možností je stisk klávesy *Esc*, který odstraní bod přichycený ke kurzoru myši a na plátně zůstane pouze poslední potvrzený bod. Třetí možností je klepnutí na koncový

bod jiné čáry, nebo křivky, čímž se spojí v jednu. Může se jednat i o počáteční bod aktuální křivky. Tím vznikne uzavřený tvar.

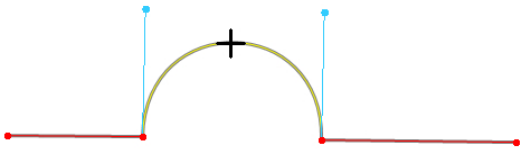
7.6.2 Kreslení křivek

Křivky se kreslí podobným způsobem, jako rovné čáry. První bod se přidá klepnutím levým tlačítkem myši do plátna. Při přidávání následujícího bodu se stiskne levé tlačítko myši a současným tažením kurzoru po plátně se určí pozice řídícího bodu Bézierovy křivky. Ukončení kreslení se provádí stejným způsobem jako v případě rovných čar

Obr. 7.11 Kreslení křivek

7.6.3 Převod rovné čáry na křivku a naopak

Z rovné čáry je možné jednoduchým způsobem vytvořit křivku. Kurzor se umístí nad požadovaný segment křivky tak, aby byl zbarven žlutě. Následně se stisknutím a držením levého tlačítka myši za současného tažení v požadovaném směru vytvoří z rovného segmentu Bézierova křivka, spolu s odpovídajícími řídícími body.



Obr. 7.12 Vytvoření křivky z rovné čáry

Převést křivku zpět na rovnou čáru je možné přetažením odpovídajících řídících bodů do počátečního a koncového bodu křivky.

7.6.4 Výběr bodů pro editaci

Výběr všech nakreslených elementů se provádí pomocí výběru jejich bodů. Klepnutím levým tlačítkem myši na požadovaný bod se provede jeho výběr. Pro výběr více bodů je třeba držet stisknutou klávesu *Shift* a postupným klepáním levým tlačítkem na jednotlivé body provést jejich výběr. Hromadný výběr bodů lze provést také pomocí

výběrového obdélníku. Stisknutím levého tlačítka myši na volné ploše kreslícího plátna a současným tažením ve zvoleném směru se vykreslí obdélník. Po opětovném uvolnění levého tlačítka myši se označí všechny body, které byly uvnitř tohoto obdélníku. Odznačení bodů se provede stisknutím klávesy *Esc*, nebo klepnutím levým tlačítkem myši do volné plochy plátna.

7.6.5 Přesun a mazání bodů

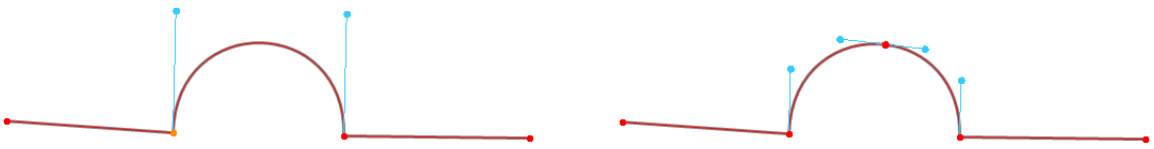
Označené body je možné přesunout stisknutím levého tlačítka myši nad jedním z vybraných bodů a následně tažením myši určit jeho novou polohu. Pokud je bodů vybráno více, přesunou se všechny najednou. Označené body je možné smazat stisknutím tlačítka *Delete*. Smazat křivku je možné pouze smazáním všech jejich bodů. Pokud na plátně zůstane křivka pouze s jedním bodem, automaticky zanikne.

7.6.6 Editace Bézierových křivek

Každá Bézierova křivka má kromě svého počátečního a koncového bodu také dva řídící body, které definují její tvar. Změnou polohy těchto bodů je možné změnit její tvar. Další možností je uchytit stisknutím levého tlačítka myši přímo požadovanou část křivky a tažením myši změnit její tvar.

7.6.7 Rozšiřování a spojování křivek

Do nakreslené křivky je možné přidat další body dvojitým poklepáním na zvolené místo na křivce. Pokud se jedná o rovnou čáru, přidá se pouze bod. Pokud je zvolené místo tvořeno Bézierovou křivkou, rozdělí se daný segment na dvě menší křivky, které mají stejný tvar, jako původní křivka. Řídící body nově vzniklého společného bodu obou křivek se propojí a v případě editace jednoho z nich se zároveň změní poloha druhého bodu v opačném směru. Tuto vazbu je možné rozpojit dvojitým poklepáním na společný bod křivek.



Obr. 7.13 Přidání bodu na Bézierovu křivku

Rozšířit neuzavřenou křivku je možné dvojitým poklepáním levým tlačítkem myši na jeden z jejich koncových bodů. Tím se naváže nový bod na její konec a dále se pokračuje stejným způsobem, jako při vytváření křivky.

Spojovat a uzavírat křivky je možné přetáhnutím jednoho koncového bodu a jeho upuštěním na koncový bod jiné křivky, případně jedné a té samé křivky, pokud má vzniknout uzavřený tvar.

7.7 Uložení projektu a export dat

Celý projekt je možné uložit volbou v menu *File→Save project As*. Projekt se uloží do zvoleného umístění ve formátu XML. Dále je možné z projektu exportovat pouze opravenou fotku profilu volbou *File→Export Image*. Na výber jsou formáty JPEG, BMP. TIFF a PNG. V poslední řadě je možné uložit vyznačený tvar profilu ve formátu DXF volbou *File→Export to DXF*. Všechny nakreslené elementy se uloží jako elementy typu *POLYLINE*. Při tomto převodu dojde k chybě, jelikož Bézierovy křivky není možné zcela přesně převést na oblouky. Maximální tolerovaná chyba převodu se nastavuje v menu *Settings→Options*.

7.8 Nastavení prostředí

Nastavení programu se provádí v menu *Settings→Options*. Zde je možné kromě nastavení tolerancí při převodu křivek do oblouků nastavovat také barvy a velikosti různých grafických prvků. Všechna tato nastavení jsou uložena v registrech Windows.

8 Měření dosahované přesnosti

Měření rozměrů profilů pomocí programu Profile Digitizer je závislé na spoustě parametrů a není tak možné jednoznačně definovat dosahovanou přesnost. V přesnosti hraje velkou roli kvalita pořízené fotografie, především její ostrost. Další důležitý parametr je rozlišení fotografie a s tím související počet pixelů na milimetr, který může být odlišný pro každý pořízený snímek. Další významné parametry ovlivňující kvalitu jsou výška profilu, přesnost řezu, přesnost korekční šablony, kvalita kalibrace fotoaparátu a v poslední řadě hraje roli také subjektivní složka, kdy je třeba určit hranu profilu vlastním úsudkem.

Dosahovanou přesnost lze brát pouze jako orientační hodnotu. V této kapitole jsou výsledky měření několika testovacích a reálných profilů v porovnání s výsledky naměřenými pomocí digitálního posuvného měřidla. Referenční měřidlo má měřící rozsah 0 – 200mm a udanou přesnost 0,02mm.

Testovací snímky byly pořízeny dvěma přístroji. Digitálním fotoaparátem Olympus OMD EM10 a mobilním telefonem Huawei P9L, který zde figuruje jako zástupce typického telefonu střední třídy, na který je aplikace Profile Digitizer cílena.

8.1 Přesný kovový válec - nízký

Materiál: Ocel.
Výška: 19,8mm
Korekční šablona: A6

Tab. 8.1 Kovový válec - nízký, OMD EM10

Rozměr	**Naměřený rozměr [mm]**	**Skutečný rozměr [mm]**	**Absolutní chyba [mm]**	**Relativní chyba [%]**
Průměr 1	29,80	29,90	-0,1	-0,33
Průměr 2	29,84	29,90	-0,06	-0,20

Tab. 8.2 Kovový válec - nízký, Huawei P9L

Rozměr	**Naměřený rozměr [mm]**	**Skutečný rozměr [mm]**	**Absolutní chyba [mm]**	**Relativní chyba [%]**
Průměr 1	29,80	29,90	-0,1	-0,33
Průměr 2	29,96	29,90	0,06	0,20

8.2 Přesný kovový válec - vysoký

Materiál: Ocel.
Výška: 49,9mm
Korekční šablona: A6

Tab. 8.3 Kovový válec - vysoký, OMD EM10

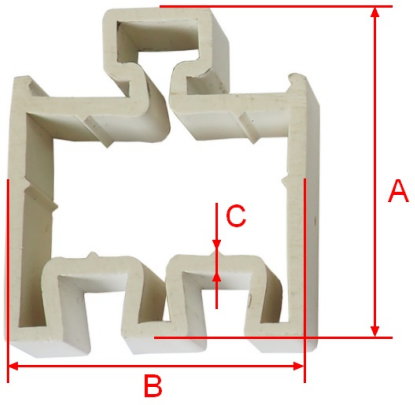
Rozměr	**Naměřený rozměr [mm]**	**Skutečný rozměr [mm]**	**Absolutní chyba [mm]**	**Relativní chyba [%]**
Průměr 1	29,78	29,90	-0,12	-0,40
Průměr 2	29,73	29,90	-0,17	-0,57

Tab. 8.4 Kovový válec - vysoký, Huawei P9L

Rozměr	**Naměřený rozměr [mm]**	**Skutečný rozměr [mm]**	**Absolutní chyba [mm]**	**Relativní chyba [%]**
Průměr 1	29,72	29,90	-0,18	-0,33
Průměr 2	29,90	29,90	0,00	0,00

8.3 Profil 1

Materiál: PVC.
Výška: 23,7mm
Korekční šablona: A6



Obr. 8.1 Profil 1: Měřené rozměry

Tab. 8.5 Profil 1, OMD EM10

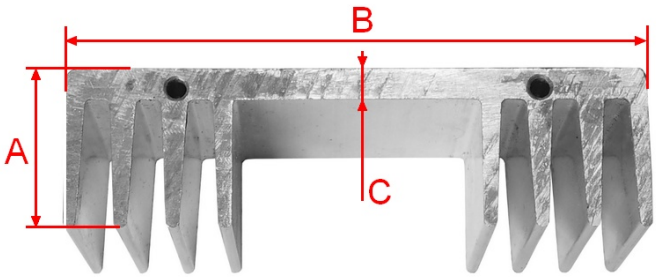
Rozměr	**Naměřený rozměr [mm]**	**Skutečný rozměr [mm]**	**Absolutní chyba [mm]**	**Relativní chyba [%]**
A	50,57	50,85	-0,28	-0,55
B	45,13	44,96	0,17	0,38
C	3,52	3,52	0,00	0,00

Tab. 8.6 Profil 1, Huawei P9L

Rozměr	**Naměřený rozměr [mm]**	**Skutečný rozměr [mm]**	**Absolutní chyba [mm]**	**Relativní chyba [%]**
A	51,04	50,85	0,19	0,37
B	45,25	44,96	0,29	0,65
C	3,56	3,52	0,04	1,14

8.4 Profil 2

Materiál: Hliník.
Výška: 49,8mm
Korekční šablona: A5



Obr. 8.2 Profil 2: Měřené rozměry

Tab. 8.7 Profil 2, OMD EM10

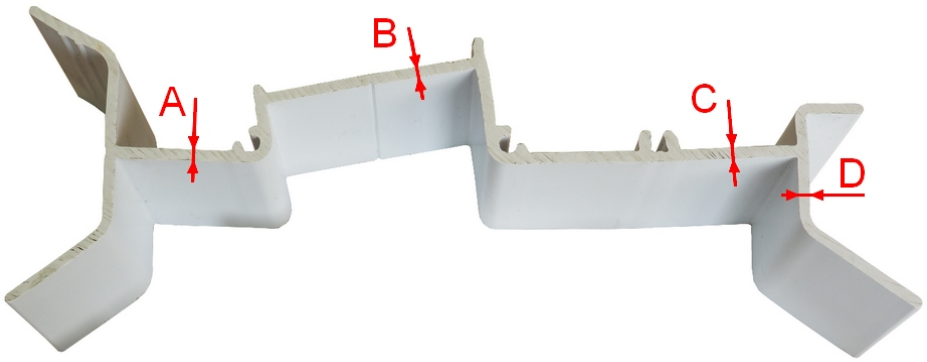
Rozměr	**Naměřený rozměr [mm]**	**Skutečný rozměr [mm]**	**Absolutní chyba [mm]**	**Relativní chyba [%]**
A	24,63	24,85	-0,22	-0,89
B	89,09	89,78	-0,69	-0,77
C	4,73	4,93	-0,20	-4,06

Tab. 8.8 Profil 2, Huawei P9L

Rozměr	**Naměřený rozměr [mm]**	**Skutečný rozměr [mm]**	**Absolutní chyba [mm]**	**Relativní chyba [%]**
A	24,73	24,85	-0,22	-0,48
B	89,43	89,78	-0,69	-0,39
C	4,88	4,93	-0,20	-1,01

8.5 Profil 3

Materiál: PVC.
Výška: 55,5mm
Korekční šablona: A4



Obr. 8.3 Profil 3: Měřené rozměry

Tab. 8.9 Profil 3, OMD EM10

Rozměr	Naměřený rozměr [mm]	Skutečný rozměr [mm]	Absolutní chyba [mm]	Relativní chyba [%]
A	2,79	2,80	-0,01	-0,36
B	2,64	2,67	-0,03	-1,12
C	2,70	2,67	0,03	1,12
D	2,51	2,55	-0,04	-1,57

Tab. 8.10 Profil 3, Huawei P9L

Rozměr	Naměřený rozměr [mm]	Skutečný rozměr [mm]	Absolutní chyba [mm]	Relativní chyba [%]
A	2,82	2,80	0,02	0,71
B	2,75	2,67	0,08	3,00
C	2,72	2,67	0,05	1,87
D	2,59	2,55	0,04	1,57

ZÁVĚR

Digitalizace a měření profilů bez použití speciálního hardwaru se z počátku zdála jako neřešitelný úkol, který nikdy nebude schopen dosáhnout požadované přesnosti. Obyčejný digitální fotoaparát se zdál jako příliš nepřesný přístroj zatížený spoustou obrazových vad. Postupem času se ale podařilo všechny důležité defekty a zkreslení obrazu, které použití fotoaparátu bránily pochopit a eliminovat je za pomoci speciálních algoritmů. Všechny pokročilé úpravy obrazu umožnila open source knihovna pro počítačové vidění OpenCV, která pro tyto účely poskytuje nepřeberné množství algoritmů.

Postupně se provedením nespočtu pokusů a projitím množství slepých uliček podařilo vytvořit nástroj, který překonal původní očekávání. Vznikl měřící systém, jehož jedinými hardwarovými požadavky jsou digitální fotoaparát a korekční šablona, která může být vytisknuta na tvrdém papíru. Náklady na pořízení hardwaru jsou tak naprosto minimální, jelikož dostatečně kvalitní digitální fotoaparát je dnes běžnou součástí chytrých mobilních telefonů. Všechny potřebné korekce jsou prováděny čistě softwarovou cestou pomocí aplikace, která dostala název Profile Digitizer.

Tato aplikace umožňuje měřit veškeré rozměry a úhly profilu, dokáže porovnat skutečný tvar s požadovaným tvarem a pomocí zabudovaného vektorového editoru převést tvar profilu do formátu DXF, díky kterému je možné se získanými daty dále pracovat v nejrůznějších CAD programech. Aplikace Profile Digitizer může sloužit i jako nástroj pro archivaci jednotlivých vytlačovacích pokusů, kdy dokáže nahradit nepraktické skladování vzorků a zároveň umožňuje jejich posílání elektronickou poštou.

Postup měření se může na první pohled zdát komplikovaný, jelikož je třeba zajistit, aby byla korekční šablona rovná, což v případě papíru vyžaduje hustotu alespoň $250\mathrm{g/m}^2$. Dále je třeba uříznout plátek profilu rovně a zachovat ostré hrany (stejný požadavek bývá i u profesionálních skenerů). V poslední řadě je třeba pořídit ostrou fotografii. Neostré snímky jsou problémem zvláště u levných fotoaparátů při zhoršených světelných podmínkách. Všechny tyto problémy jsou ale velice jednoduše řešitelné se zanedbatelnými finančními náklady oproti pořízení profesionálního přístroje.

Použití nástroje Profile Digitizer se původně vztahovalo pouze na vytlačované profily z plastu. Jeho použití je ale mnohem širší. Nic nebrání měření profilů z jiných materiálů, například z hliníku, nebo z gumy. Kromě profilů jej lze použít také na všechny ostatní předměty obdobného charakteru, jako jsou různé trubičky, těsnění, vyřezávané výrobky a další.

Dosahovaná přesnost měření je závislá na spoustě parametrů a nelze ji jednoznačně určit. Ovlivněna je rovnosti korekční šablony a přesnosti jejího změření, rozlišením použitého fotoaparátu, ostrosti fotografie a vlastním úsudkem. Hlavním rozdílem oproti

mechanickým měřícím nástrojům je chyba procentuálně vztažená k délce. Chyba naměřená na testovacích profilech byla v průměru okolo 1%, což je dostačující pro většinu předpokládaných použití. Při měření větších rozměrů se procentuální chyba projevuje ve větší míře a může se tak dostat i mimo tolerovanou mez. Typickým požadavkem je ale měření tlouštěk stěn, kde naopak tato chyba měřenou hodnotu téměř neovlivní a dosahovaná přesnost je v tomto případě téměř srovnatelná s digitálním posuvným měřidlem.

Další důležitý parametr, který ovlivňuje přesnost měření je výška uřezaného plátku profilu. Výška hraje roli hned ze dvou důvodů. Prvním z nich je samotný algoritmus, který se stará o opravu perspektivy ve správné rovině. Čím výše je třeba rovinu šablony posunout relativně k rozměrům šablony, tím vznikne větší chyba. Druhým důvodem je hloubka ostrosti, která se projevuje především u fotoaparátů v mobilních telefonech, kde není možné nastavit hodnotu clony. Pokud je profil příliš vysoký, tak není možné při focení z krátké vzdálenosti zachytit ostře jak šablonu, tak profil. Pro všechny případy se osvědčila výška profilu okolo 3cm. Je to rozměr, který se dá poměrně snadno uřezat u libovolně složitého profilu a nepřesnost způsobená výškovou korekcí je v únosných mezích. Rovněž hloubka ostrosti u takto nízkého profilu většinou není problémem.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

[1] *MAŇAS, Miroslav a Jiří VLČEK. Aplikovaná reologie.* Zlín: Univerzita Tomáše Bati, 2001. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-7318-039-1.

[2] *HUNEAULT, M. A., P. G. LAFLEUR a P. J. CARREAU, 1992. Designing Profile Extrusion Dies: A Systematic Approach.* Antec '92: Plastics: Shaping the future. Volume 1. Detriot, 431-435.

[3] *MICHAELI, Walter a Christian HOPMANN. Extrusion dies for plastics and rubber. 4th Edition.* Munich: Hanser, 2016. ISBN 978-1-56990-623-1.

[4] *RAUWENDAAL, Chris. Polymer extrusion. 5th edition.* ISBN 978-1-56990-539-5.

[5] *AUSPERGER, Aleš. Technologie zpracování plastů.* publi.cz, 2016. ISBN 978-80-88058-77-9.

[6] LEVY, Sidney. The Technology of Plastics Profile Tooling. *Advances in plastics technology.* 1981, 8-31. ISSN 0272-9504.

[7] *Scan Fit and Measure: Profile measuring system* [online]. 2017 [cit. 2017-04-17]. Dostupné z: `http://www.sfmeasure.com/en/`

[8] *Imaging Resource Guide: The Advantages of Telecentricity, Edmund Optics* [online]. [cit. 2017-05-05]. Dostupné z: `https://www.edmundoptics.com/resources/application-notes/imaging/advantages-of-telecentricity/`

[9] *HAVLE, Otto, 2008. Strojové vidění III: Kamery a jejich části. Automa: časopis pro automatizační techniku.* 2008(03), 42-44. ISSN 1210-9592.

[10] *Střední formát: O skenování a skenerech podrobně I. - Základní pojmy, 2004. GRAFIKA: Vše o počítačové grafice* [online]. [cit. 2017-05-05]. Dostupné z: `http://www.grafika.cz/bazar/bazar---kupuji/fotoaparaty-klasicke-a-prislusenstvi/stredni-format/o-skenovani-a-skenerech-podrobne-i-zakladni-pojmy-132966cz`

[11] *MILBURN, Ken. Digitální fotografie: profesionální techniky.* Brno: CP Books, 2005. ISBN 80-251-0642-x.

[12] *OpenCV.* About [online]. OpenCV team, 2017 [cit. 2017-04-03]. Dostupné z: http://opencv.org/about.html

[13] *BRADSKI, Gary R. Learning OpenCV.* Sebastopol: O'Reilly, c2008. ISBN 978-0-596-51613-0.

[14] *LAGANIÉRE, Robert. OpenCV 2 computer vision application programming cookbook: over 50 recepies to master this library of programming functions for real-time computer vision.* Brimmingham: Packt Publishing, 2011. Quick Answers to Common Problems. ISBN 978-1-849513-24-1.

[15] *DAWSON-HOWE, Kenneth. A practical introduction to computer vision with OpenCV.* Trinity College Dublin, Ireland: Wiley, 2014. ISBN 9781118848456.

[16] *Camera calibration With OpenCV. OpenCV 2.4.13.2 documentation* [online]. opencv dev team, 2014 [cit. 2017-04-04]. Dostupné z: `http://docs.opencv.org/2.4/doc/tutorials/calib3d/camera_calibration/camera_calibration.html`

[17] *Detection of ArUco Markers. OpenCV 3.1.0 documentation* [online]. opencv dev team 2015 [cit. 2017-04-11]. Dostupné z: `http://docs.opencv.org/3.1.0/d5/dae/tutorial_aruco_detection.html`

[18] *Detection of ChArUco Corners. OpenCV 3.1.0 documentation* [online]. opencv dev team 2015 [cit. 2017-04-11]. Dostupné z: `http://docs.opencv.org/3.1.0/df/d4a/tutorial_charuco_detection.html`

[19] *KAMERMANS, Mike, A Primer on Bézier Curves: A free, online book for when you really need to know how to do Bézier things.* [online]. [cit. 2017-05-04]. Dostupné z: `https://pomax.github.io/bezierinfo/`

[20] *KWOK, Shu On, 2016. HUAWEI P9 LITE REVIEW: THE LIGHTWEIGHT COMPETITOR. Androidpit* [online]. [cit. 2017-04-18]. Dostupné z: `https://www.androidpit.com/huawei-p9-lite-review`

[21] *ROSEBROCK, Adrian, 2014. 4 Point OpenCV getPerspective Transform Example. PyImageSearch: Be awesome at learning OpenCV, Python, and computer vision* [online]. [cit. 2017-04-18]. Dostupné z: `http://www.pyimagesearch.com/2014/08/25/4-point-opencv-getperspective-transform-example/`

[22] *PROSISE, Jeff. Programování ve Windows pomocí MFC.* Praha: Computer Press, 2000. Programování. ISBN 80-722-6309-9.

[23] *TIŠNOVSKÝ, Pavel, 2007. Vektorový grafický formát DXF. Root: Informace nejen ze světa Linuxu* [online]. 2007 [cit. 2017-05-03]. ISSN 1212-8309. Dostupné z: `https://www.root.cz/clanky/vektorovy-graficky-format-dxf/`

[24] *JOSEFSSON, Simon, 2006. The Base16, Base32, and Base64 Data Encodings* [online]. [cit. 2017-05-04]. Request for Comments: 4648. Dostupné z: `https://tools.ietf.org/html/rfc4648`

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

ASCII	American Standard Code for Information Interchange
BMP	Bitmap image file
BSD	Berkeley Software Distribution
CAD	Computer Aided Design
CCD	Charge-coupled device
CUDA	Compute Unified Device Architecture
CV	Computer Vision
DPI	Dots per inch
DXF	Drawing Exchange Format
EMF	Enhanced Metafile
GDI	Graphics Device Interface
GIF	Graphics Interchange Format
IBM	International Business Machines Corporation
ID	Identifier
JPEG	Joint Photographic Experts Group
MFC	Microsoft Foundation Class
PNG	Portable Network Graphics
PVC	Polyvinylchlorid
QR code	Quick Response code
RGB	Red Green Blue
TIFF	Tagged Image File Format
WMF	Windows Metafile
XML	Extensible Markup Language

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1 Jednošnekový extruder [5] 12
Obr. 1.2 Deformace profilu způsobená špatnou distribucí materiálu (zdroj: Compuplast Int. a.s.) 14
Obr. 1.3 Deformace profilu vlivem špatného chlazení (zdroj: Compuplast Int. a.s.) 15
Obr. 1.4 Prohnutí profilu vlivem špatného chlazení (zdroj: Compuplast Int. a.s.) 15
Obr. 1.5 Princip vzniku efektu žraločí kůže [4] 16
Obr. 1.6 Různé formy lomu taveniny [4] 17
Obr. 2.1 Měřící systém Scan Fit Scanner 200 [7] 20
Obr. 2.2 Princip snímání obrazu klasickým objektivem (nahoře) a telecentrickým (dole) [8] 20
Obr. 2.3 Problémy při skenování profilů 22
Obr. 3.1 Princip dírkové komory [13] 23
Obr. 3.2 Upravený model dírkové komory [13] 24
Obr. 3.3 Vznik radiálního zkreslení [13] 26
Obr. 3.4 Vznik tangenciálního zkreslení u nekvalitně vyrobené kamery. [13] . . 27
Obr. 3.5 Kalibrační obrazec: šachovnice 28
Obr. 3.6 Kalibrační obrazec: asymetrická mřížka kruhových bodů [12] 29
Obr. 3.7 Různé ArUco kódy [17] 30
Obr. 3.8 Použití prahování při detekci ArUco kódů [17] 31
Obr. 3.9 Dekódování ArUco kódu [17] 31
Obr. 3.10 Nalezení souřadnicového systému ArUco kódů [17] 32
Obr. 3.11 ChArUco obrazec [18] 32
Obr. 4.1 ABC body na Bézierově křivce [19] 35
Obr. 4.2 Přetažení bodu na kubické Bézierově křivce [19] 36
Obr. 5.1 Příklad pořízených kalibračních snímků 40
Obr. 5.2 Radiální zkreslení před korekcí (modré čáry) a po korekci (červené čáry) 41
Obr. 5.3 Warp perspektivy pomoci čtyř bodů [21] 42
Obr. 5.4 Původní vzor (vlevo) a upravený vzor (vpravo) 43
Obr. 5.5 Poměry velkostí jednotlivých částí obrazce 44
Obr. 5.6 Výsledná šablona 44
Obr. 5.7 Snímek profilu 46
Obr. 5.8 Detekce 2D kódů 47
Obr. 5.9 Detekce rohů původní šachovnice 48
Obr. 5.10 Vytvoření 3D mřížky 49
Obr. 5.11 Provedení warpu perspektivy 49

Obr. 6.1 Struktura XML souboru pro uložení projektu 55
Obr. 7.1 Základní okno aplikace 57
Obr. 7.2 Nástrojová lišta 57
Obr. 7.3 Okno kalibrace kamery 59
Obr. 7.4 Oznámení o dokončení kalibrace 59
Obr. 7.5 Přidání nového rozměru šablony 60
Obr. 7.6 Vytvoření nového projektu 62
Obr. 7.7 Měření rozměrů 63
Obr. 7.8 Měření úhlů 64
Obr. 7.9 Srovnání fotografie profilu s požadovaným tvarem 65
Obr. 7.10 Krelsení rovných čar 65
Obr. 7.11 Kreslení křivek 66
Obr. 7.12 Vytvoření křivky z rovné čáry 66
Obr. 7.13 Přidání bodu na Bézierovu křivku 67
Obr. 8.1 Profil 1: Měřené rozměry 71
Obr. 8.2 Profil 2: Měřené rozměry 72
Obr. 8.3 Profil 3: Měřené rozměry 73

SEZNAM TABULEK

Tab. 6.1 Popis sekcí v DXF souboru [23] 51
Tab. 6.2 Rozsahy skupin a příslušné datové typy v DXF [23] 52
Tab. 6.3 Entita LINE 52
Tab. 6.4 Entita ARC 52
Tab. 6.5 Entita CIRCLE 53
Tab. 6.6 Entita VERTEX 53
Tab. 6.7 Převodní tabulka kódování Base64 [24] 54
Tab. 7.1 Pohyb po plátně 62
Tab. 8.1 Kovový válec - nízký, OMD EM10 69
Tab. 8.2 Kovový válec - nízký, Huawei P9L 69
Tab. 8.3 Kovový válec - vysoký, OMD EM10 70
Tab. 8.4 Kovový válec - vysoký, Huawei P9L 70
Tab. 8.5 Profil 1, OMD EM10 71
Tab. 8.6 Profil 1, Huawei P9L 71
Tab. 8.7 Profil 2, OMD EM10 72
Tab. 8.8 Profil 2, Huawei P9L 72
Tab. 8.9 Profil 3, OMD EM10 73
Tab. 8.10 Profil 3, Huawei P9L 73

SEZNAM PŘÍLOH

PI CD s elektronickou verzí této práce, zkompilovanou aplikací a zdrojovými kódy.

PII Korekční šablony.