

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ v Praze

Fakulta elektrotechnická
Katedra kybernetiky

Soulep panoramatických snímků

Diplomová práce

2003

Pavel KRÍŽEK

ČVUT Praha

Poděkování

Rád bych poděkoval prof. Ing. Václavu Hlaváčovi, CSc., za příležitost pracovat v průběhu září 2002 v Centru strojového vnímání (CMP) na katedře kybernetiky FEL ČVUT, kde vznikl podklad pro tuto diplomovou práci. Dále bych rád poděkoval svému vedoucímu diplomové práce Ing. Vladimíru Smutnému za odborné vedení a cenné připomínky. Svůj dík bych také chtěl vyjádřit Mgr. Karlu Hantonovi i dalším pracovníkům katedry, kteří se mnou ochotně danou problematiku konzultovali.

Tato práce byla podpořena projektem MSM 212300013 Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy, grantem GACR 102/01/0971 Grantové agentury České republiky, grantem CTU 0209513 Grantové agentury ČVUT v Praze a projektem IST-2001-33266 Evropské unie.

Abstrakt

Ze sekvence snímků pořízených panoramatickou kamerou při inspekci kanalizační sítě jsme se snažili rekonstruovat vnitřní povrch potrubí jako jeden obraz rozvinutý do roviny. Nejprve byla provedena geometrická korekce obrazu zrcadla. Dále jsme definovali nelineární zobrazení pro získání rozvinutých panoramatických snímků pořízených kamerou, která je rovnoběžně posunuta od osy potrubí. Pro napojení dvou sousedních rozvinutých panoramatických snímků jsme využívali korelaci obrazů. Výpočet jsme urychlili použitím pyramidových datových struktur. Vzhledem k tomu, že inspekční robot použitý v našem experimentu nevytvářel rovnoměrné osvětlení, byla ještě před korelací provedena jasová korekce snímků. Algoritmus byl nejprve vyvíjen v laboratoři na dvou pokusných kanalizačních trubkách. Nakonec byl testován v terénu ve skutečném kanalizačním potrubí, kdy inspekční robot projel vzdálenost cca 30 m.

Klíčová slova: Panoramatická kamera, vytváření mozaik, soulep, panoramatické snímky, korelace obrazů, M-pyramidy, hierarchické struktury dat.

Abstract

We tried to reconstruct the pipeline inner surface texture like one “infinite” image unwrapped into the plane by mosaicing the sequence of the panoramic images captured by an omnidirectional camera during sewerage system inspection. At first we performed a geometric correction of the mirror in the camera image. Next, we defined nonlinear transformation for obtaining the uniform unwrapped panoramic images when the camera was parallelly displaced from the pipeline axis. To connect two neighbouring panoramic images the correlation was used. To speed up the algorithm we used pyramidal data structures. Since our inspection robots light did not shine uniformly in the whole omnidirectional camera view angle, we had to do brightness corrections before the correlation. At first, the algorithm was developed in the laboratory on two clayware sewerage pipes. Then it was tested in the real sewerage pipeline, when the inspection robot covered a distance of approximately 30 m.

Key words: Omnidirectional camera, catadioptric sensor, mosaicing, panoramic images, correlation, M-pyramids, hierarchical data structures.

Obsah

1	Úvod	5
2	Konstrukce inspekčního robota	9
2.1	Laboratorní experiment	9
2.2	Korekce osvětlení	11
2.3	Měření v terénu	11
3	Korekce zrcadla	13
3.1	Kalibrace optické soustavy	13
3.2	Určení funkce nelineární deformace	15
3.3	Korekce obrazu zrcadla	16
4	Získání panoramatických snímků	20
4.1	Rozvinutí obrazu s kamerou v ose potrubí	21
4.2	Umístění kamery při měření v terénu	22
4.3	Deformace obrazu při vyosení kamery	23
4.4	Matematický model rovnoběžně vyosené kamery	25
5	Určení posuvu dvou sousedních snímků	32
5.1	Korelace	32
5.2	Určení posuvu ve směru z – algoritmus I	33
5.3	Vliv 3D objektů na korelační funkci	34
5.4	Určení posuvu ve směru z – algoritmus II	36
5.5	Určení posuvu ve směru z – algoritmus III	37
5.6	Vzájemný posuv snímků ve směru φ – algoritmus IV	38
6	Nerovnoměrné osvětlení a jeho korekce	41
6.1	Korekce jasovou mapou	41
6.2	Získání jasové mapy	43
6.3	Průběhy korelační funkce	44
7	Algoritmus napojování snímků	49
7.1	Volba velikosti a pozice korelačního okna	49
7.2	Pohyb inspekčního robota pouze jedním směrem	49
7.3	Pohyb inspekčního robota oběma směry	50
7.4	Částečné překrývání zařazovaných snímků	50
7.5	Ukládání dat	50
8	Časová náročnost algoritmu	51
8.1	Výpočetní složitost	51
8.1.1	Korekce jasovou mapou	51
8.1.2	Převod barevného obrazu na šedotónový	51
8.1.3	Určení posuvu mezi dvěma snímky	51
8.2	Známary posuv robota mezi jednotlivými snímky	52
8.3	Neznámary posuv robota mezi jednotlivými snímky	52

8.4	Urychlení výpočtu — M-pyramidy	53
8.4.1	Určení posuvu mezi dvěma snímky	54
8.4.2	Volba startovací úrovně	54
8.4.3	Volba velikosti korelačních oken	55
9	Dosažené výsledky	56
10	Závěr	61

Přílohy

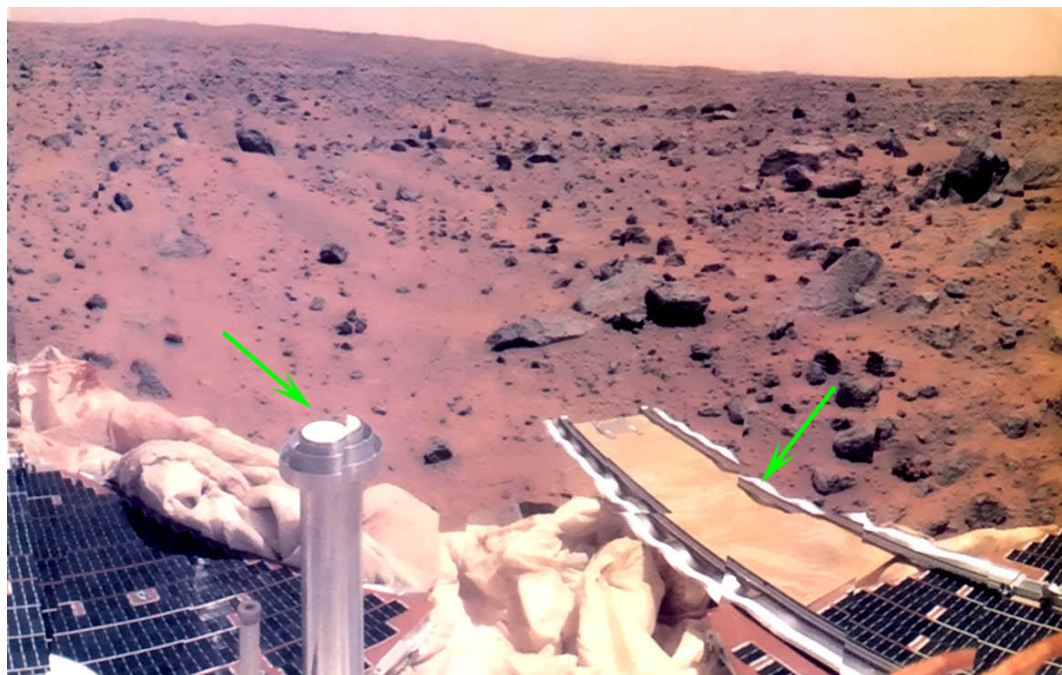
CD se zdrojovými kódy algoritmů a s dosaženými výsledky

1 Úvod

V dnešní době stále vzrůstá potřeba digitálního zpracování obrazu. Se snímkem, který je uložen v digitální formě v paměti počítače, lze provádět celou řadu manipulací, např. různé geometrické a jasové transformace či kopírování bez ztráty na kvalitě. Takový snímek se oproti analogovému záznamu i snáze uchovává na paměťovém médiu.

Nedílnou součástí digitálního zpracování obrazu je i technika vytváření mozaiky (angl. *mosaic*) ze sekvence snímků pořízených v různých polohách kamery za účelem získání globálního (např. panoramatického) obrazu. To spočívá v určení správné pozice každého takového snímku ve výsledném rekonstruovaném obraze. Přitom je nutné se vypořádat s rozdíly v osvětlení a různými geometrickými deformacemi obrazu v jednotlivých snímcích. Tyto nežádoucí vlivy se dále musí vhodně korigovat. Konečně takto upravené snímky je třeba vhodně napojit. Poznamenejme, že česká terminologie není v tomto oboru ještě zcela ustálena. Při vytváření mozaiky se např. při skládání map z množiny snímků můžeme také setkat se slovem soulep.

Tento úkol není zdaleka tak jednoduchý, jak je patrné např. z obrázku č. 1.1. Snímek zachycuje část povrchu planety Mars, který je po částech vyfotografován otočnou kamerou umístěnou na kosmické sondě Pathfinder. Hlavní potíž zde spočívá v tom, že obrazy vzdálených předmětů na povrchu Marsu se při otáčení kamery příliš nemění, zatímco obrazy blízkých předmětů (zejména vlastních částí sondy) se díky perspektivě, zkreslení kamery apod. mohou podstatně lišit. Proto je třeba najít nelineární transformaci, která by umožnila “hladké” napojení sousedních snímků.



Obrázek 1.1: Povrch planety Mars (foto NASA, 1997).

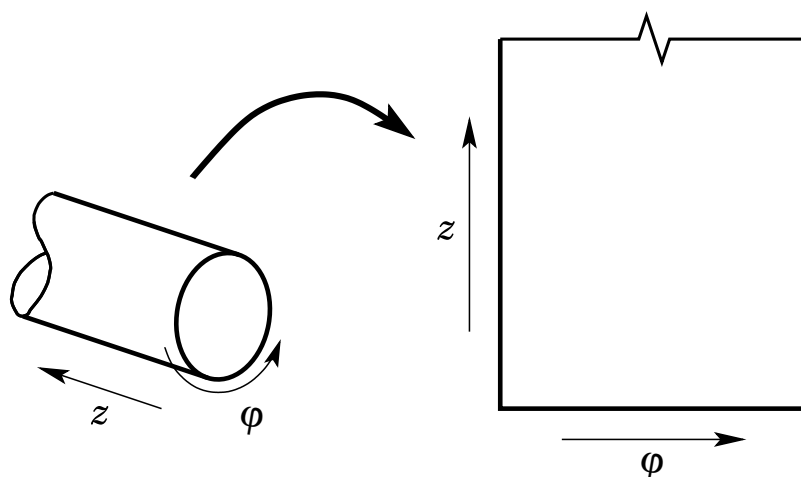
Jedním z hlavních úkolů této diplomové práce bylo navrhnout takovou nelineární geometrickou transformaci obrazu kamery a vhodný algoritmus pro vytváření mozaiky, které umožňují rekonstruovat obraz vnitřního povrchu kanalizačního potrubí jako jeden obraz rozvinutý do roviny napojováním dlouhé sekvence snímků pořízených panoramatickou kamerou umístěnou na robotu při inspekci kanalizační sítě. Dosaženými výsledky jsme přispěli do projektu ISAAC (*Inspecting Sewerage System and Image Analysis by Computer*), který probíhal během roku 2002 na katedře kybernetiky FEL ČVUT.

Inspekce kanalizačních sítí je důležité provádět z důvodů průběžného monitorování stavu potrubí. V případě lokalizace závady se určí závažnost poškození a potom je třeba rozhodnout o nutnosti případných oprav. Typická poškození, která v potrubí mohou vzniknout, jsou např. trhliny ve stěnách, špatná napojení dvou sousedních trubek, zhroutilé či jinak zatarasené potrubí apod.

V současné době se inspekce kanalizačních sítí provádějí pomocí specializovaných mobilních robotů s integrovanou televizní kamerou. Vyskolený personál pak na dálku ovládá pohyb robota v potrubí a vyhodnocuje jeho stav na základě obrazu kamery. Určení poškození je založeno na okamžitém rozhodnutí operátora, případně na pozdějším porovnání dlouhých videozáznamů s archivovanými daty.

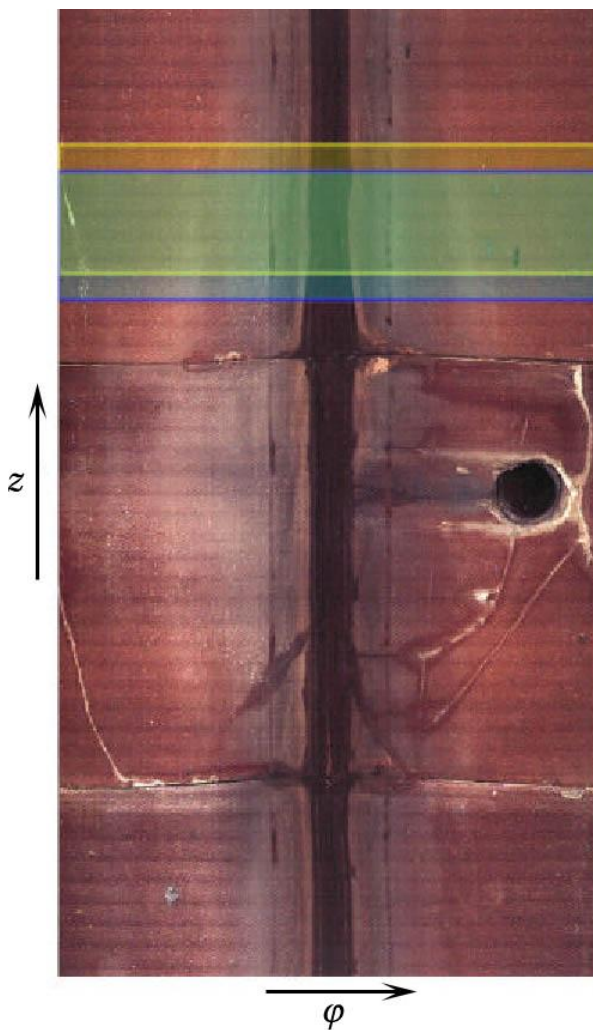
Motivací projektu ISAAC bylo vyvinout nové technologie průzkumu kanalizačních sítí, které využívají metod počítačového vidění. Obraz potrubí rozvinutý do roviny usnadňuje operátorovi orientaci po celé sledované délce a umožňuje tak provádět objektivní a poměrně přesná měření. Lepší archivace dat, snadnější srovnání nově naměřených dat s daty archivovanými a snadné porozumění obrazu je nespornou výhodou oproti současným metodám.

Pro získání rozvinutých panoramatických snímků byla v projektu ISAAC zvolena panoramatická kamera. Konkurenční projekty, které se snaží dosáhnout podobných výsledků, využívají např. rybiho oka, viz [10].



Obrázek 1.2: Schematické znázornění rozvinutí obrazu vnitřního povrchu potrubí do roviny $z - \varphi$, kde z a φ určují hloubku a úhel v potrubí o konstantním poloměru.

Napojováním jednotlivých panoramatických snímků jsme vytvořili celkový obraz vnitřního povrchu kanalizačního potrubí, který je rozvinut do roviny $z-\varphi$, viz obr. 1.2. Zde z a φ jsou standardní cylindrické souřadnice určující hloubku a úhel v potrubí o konstantním poloměru. Ukázka, jak může takový výsledný obraz vypadat, je znázorněna na obrázku č. 1.3.



Obrázek 1.3: Ukázka jak může vypadat výsledný obraz vnitřního povrchu kanalizačního potrubí rozvinutý do roviny. Modrý a žlutý pruh zde představují dva panoramatické snímky pořízené pomocí rybího oka v různých částech potrubí, viz [10].

Algoritmus pro rekonstrukci vnitřního povrchu potrubí jsme vyvíjeli nejprve v laboratorních podmínkách. Pro měření zde byly použity dvě kameninové kanalizační trubky o vnitřním průměru 250 mm. Jedna měla délku 0.75 m a byla bez odbočky a druhá měla délku 0.5 m a byla s odbočkou. Funkčnost algoritmu jsme dále testovali na datech získaných přímo v terénu, kdy inspekční robot projel v kanalizačním potrubí vzdálenost cca 30 m. Měřené materiály potrubí byly: beton o průměru 300 mm a 400 mm, kamenina o průměru 400 mm, PVC o průměru 400 mm a tvrzené PVC o průměru 380 mm.

Diplomová práce je rozdělena do deseti kapitol. V následující kapitole ukážeme, jak byl robot zkonstruován pro laboratorní experimenty a jak byla jeho konstrukce upravena pro měření v terénu.

Kapitola 3 se zabývá korekcí radiální nelinearity panoramatického zrcadla v obraze kamery.

Získání rozvinutých panoramatických snímků je popsáno v kapitole 4. Zde se věnujeme nejprve speciálnímu případu, kdy je osa panoramatické kamery umístěna v ose kanalizačního potrubí. Tuto situaci dále zobecníme na úlohu, kdy je osa kamery od osy potrubí rovnoběžně posunuta, což je z praktického hlediska nejdůležitější případ. Odvodíme zde nelineární zobrazení, které deformovaný obraz vnitřního povrchu kanalizačního potrubí v obraze kamery transformuje na nezkrácený rozvinutý panoramatický snímek.

V kapitole 5 definujeme tzv. korelační funkci dvou obrazů a ukážeme chování několika algoritmů, které jsou pro napojování rozvinutých panoramatických snímků klíčové.

Kapitola 6 se zabývá korekcí nerovnoměrného osvětlení vnitřního povrchu potrubí robotem.

Vlastní algoritmus pro vytváření mozaiky vnitřního povrchu kanalizačního potrubí rozvinutého do roviny je popsán v kapitole 7. Stručný popis celé procedury, časová náročnost jednotlivých kroků a urychlení výpočtu korelace pomocí M-pyramid je diskutována v kapitole 8.

Na závěr, v kapitole 9, ukážeme a porovnáme výsledky, které jsme v laboratoři a v terénu dosáhli. Dosažené technické parametry a návrhy na některá možná vylepšení uvedeme v kapitole 10.

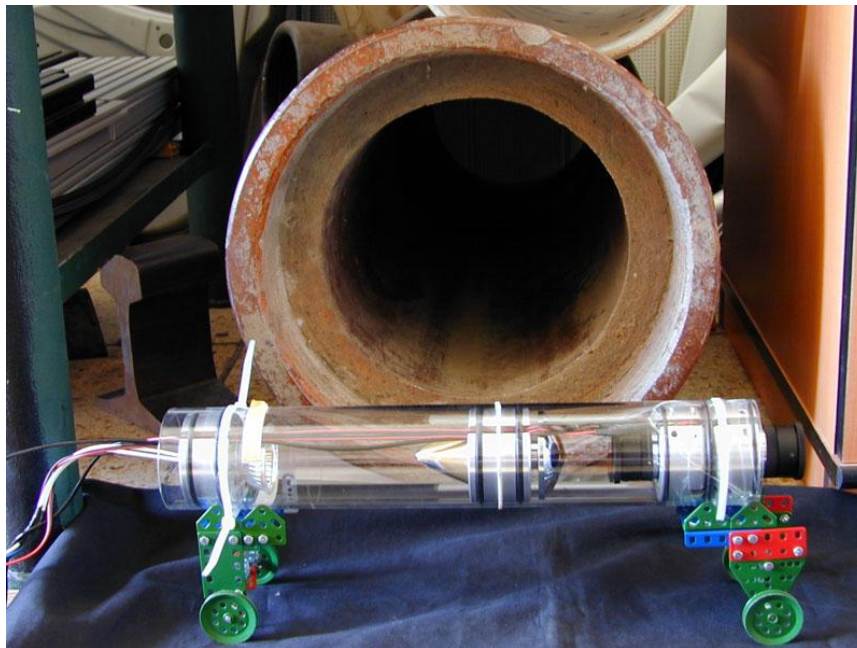
Část dosažených výsledků byla již publikována v anglickém jazyce jako výzkumná zpráva projektu ISAAC, viz [1]. Práce volně navazovala na předchozí výzkum projektu, kdy byl řešen problém reprojekce obrazu při vychýlení klasické kamery od osy kanalizačního potrubí, viz výzkumná zpráva [2].

2 Konstrukce inspekčního robota

Před měřením v terénu byla funkčnost konstrukce inspekčního robota testována v laboratorních podmínkách. Zajímali jsme se zejména o správné nastavení optické soustavy a o vhodný způsob nasvícení vnitřního povrchu kanalizačního potrubí v zorném úhlu panoramatické kamery.

2.1 Laboratorní experiment

Pro účely laboratorního experimentu jsme zkonstruovali inspekčního robota následujícím způsobem: Tělo bylo tvořeno ochrannou skleněnou trubkou o délce 400 mm a o průměru 70 mm. Uvnitř byla umístěna panoramatická kamera, obyčejná kamera a žárovkové osvětlení. Podvozek robota jsme sestavili ze stavebnice *Merkur*. Jeho výšku jsme nastavili tak, aby osa panoramatické kamery byla totožná s osou potrubí. Celou situaci zachycuje obrázek č. 2.1.



Obrázek 2.1: Fotografie a schematické znázornění inspekčního robota použitého při laboratorním experimentu. Legenda: a) skleněná trubka, b) panoramatické zrcadlo, c) a d) kamery, e) žárovka, f) hyperbolické zrcadlo, g) podvozek.

Jelikož výroba zrcadla pro danou panoramatickou kameru je finančně velmi nákladná, využili jsme zrcadla zhotoveného pro jiný experiment. Panoramatická kamera tak byla osazena osově symetricky zakřiveným zrcadlem s označením H5 (viz [3]) a dále pak barevnou kamerou s výrobním označením 53X11HP a objektivem s výrobním označením H3616FI. Vybrané technické parametry zrcadla a kamery jsou uvedeny v tabulkách 2.1 a 2.2. Použitý objektiv měl ohniskovou vzdálenost $f = 3.6$ mm a clonu nastavitelnou v rozsahu $F 1.6 - 16$.

Pro dosažení maximálního možného rozlišení panoramatických snímků bylo zrcadlo umístěno v takové vzdálenosti od objektivu kamery, aby pokrývalo co největší plochu v obraze kamery. Tato konfigurace nám umožňovala sledovat povrch kanalizačního potrubí v úhlu cca -25° až 40° (měřeno od kolmého pohledu kamery na stěnu potrubí).

Bohužel zrcadlo H5 bylo navrženo jako pro experiment se zcela odlišnými parametry optické soustavy. V naší konfiguraci jsme proto v radiálním směru zrcadla dostávali nelineárně deformovaný obraz. Korekce této nelinearity je popsána v kapitole 3. Návrhem zrcadel pro panoramatické kamery se zabývá článek [4].

Ohnisková vzdálenost objektivu kamery	12.5 mm
Vzdálenost objektů od zrcadla	2 m
Vzdálenost obrazové roviny od vrcholu zrcadla	155 mm
Zorný úhel	79.21°
Minimální elevační úhel	25.91°
Maximální elevační úhel	105.12°

Tabulka 2.1: Vybrané technické parametry panoramatického zrcadla H5.

TV systém	PAL
Senzor	CCD, 1/3 palce
Počet pixelů CCD senzoru	$798(H) \times 548(V)$
Snímací systém	625 řádek, 50 snímků / sec
Citlivost	0.1 lux, $F 1.2$, 5600 K
Ohnisková vzdálenost a zorný úhel	3.6 mm, $F 2.0 / 92^\circ$
Rozlišení	580 TV řádků (prokládaně)
Gama korekce	0.45
Napájení	DC 12 V \pm 1 V / 110 mA

Tabulka 2.2: Vybrané technické parametry kamery 53X11HP.

Druhá kamera sledovala scénu před robotem. Její použití se plánovalo pro jiný experiment. Ten se týkal určování polohy robota v kanalizačním potrubí pomocí dvou na sebe kolmých laserových rovin.

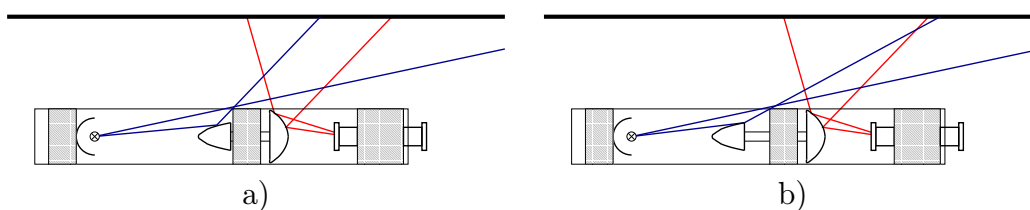
Žárovkové osvětlení bylo tvořeno bodovou žárovkou 12 V / 20 W a osově symetrickým hyperbolickým zrcadlem. Vnitřní povrch kanalizačního potrubí tak byl osvětlován přímým světlem žárovky a odraženým světlem od zrcadla. Tuto

konfiguraci jsme volili proto, aby byl celý zorný úhel panoramatické kamery osvětlen co nejrovnoměrněji.

2.2 Korekce osvětlení

V průběhu laboratorního experimentu vyšlo najevo, že díky nevhodnému upevnění hyperbolického zrcadla vznikala v zorném úhlu panoramatické kamery stín, který vrhala hrana úchytu zrcadla, viz obrázek 2.2a. Takto způsobený ostrý jasový přechod vadil při napojování panoramatických snímků, protože korelace, kterou zde využíváme, dávala někdy chybné výsledky, viz kapitola 6.

Abychom tento stín posunuli mimo zorný úhel panoramatické kamery, upevnili jsme zrcadlo na konec šroubu a vysunuli je do vhodné vzdálenosti, viz obrázek 2.2b.

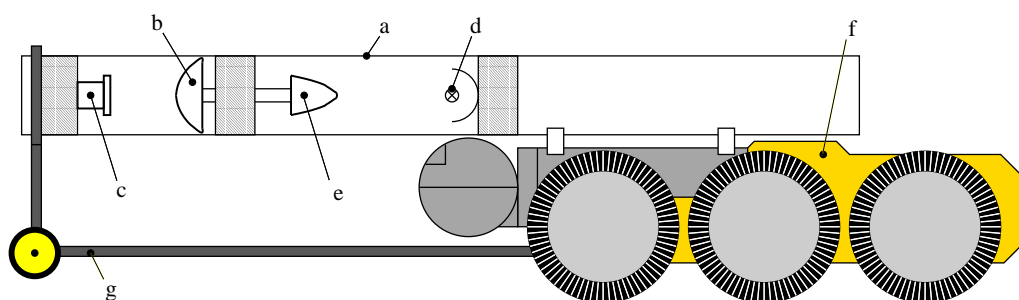


Obrázek 2.2: Schematické znázornění osvětlení kanalizačního potrubí inspekčním robotem a) před korekcí, b) po korekci.

2.3 Měření v terénu

Konstrukci inspekčního robota pro měření v terénu jsme částečně upravili následujícím způsobem: Pro tělo robota byla opět použita ochranná skleněná trubka o průměru 70 mm, tentokrát však o délce 700 mm. Z technických důvodů jsme odstranili přední kameru a osvětlení bylo korigováno tak, aby v zorném úhlu panoramatické kamery nevytvářelo žádné stíny, viz odstavec 2.2. Tělo robota bylo dále hermeticky uzavřeno, aby dovnitř nevnikala voda.

Takto zhotovený inspekční robot byl připevněn k průzkumnému traktoru, který zapůjčila britská společnost *Pearpoint*, viz [11]. Fotografie a schematické znázornění robota použitého při měření dat v terénu můžeme vidět na obrázku č. 2.3.



Obrázek 2.3: Fotografie a schematické znázornění inspekčního robota použitého při měření dat v terénu. Legenda: a) skleněná trubka, b) panoramatické zrcadlo, c) kamera, d) žárovka, e) hyperbolické zrcadlo, f) průzkumný traktor britské společnosti Pearpoint, g) nosník.

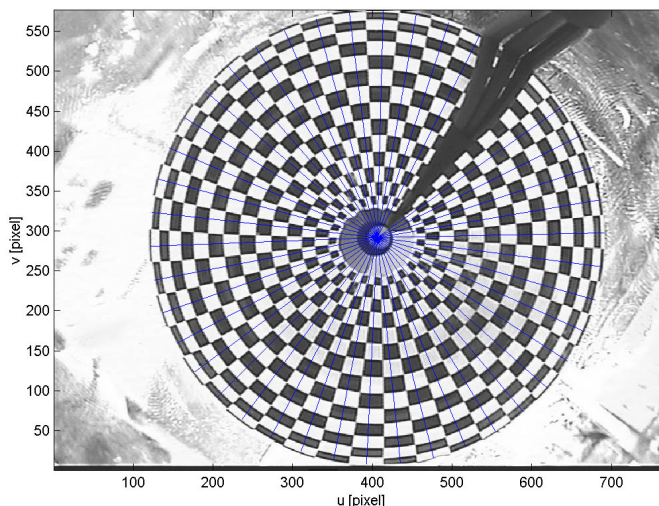
3 Korekce zrcadla

Panoramatické zrcadlo bylo navrženo pro experiment s odlišnými parametry optické soustavy (viz tabulka č. 2.1) tak, aby se předměty v určité vzdálenosti zobrazili do obrazu kamery lineárně v radiálním směru zrcadla. V naší konfiguraci ale máme odlišné parametry. Zrcadlo proto v radiálním směru dávalo nelineárně deformovaný obraz. To komplikovalo napojování rozvinutých panoramatických snímků. Deformace znemožňovala provádět i metrická měření v obraze. Tuto nelinearitu bylo proto třeba korigovat.

3.1 Kalibrace optické soustavy

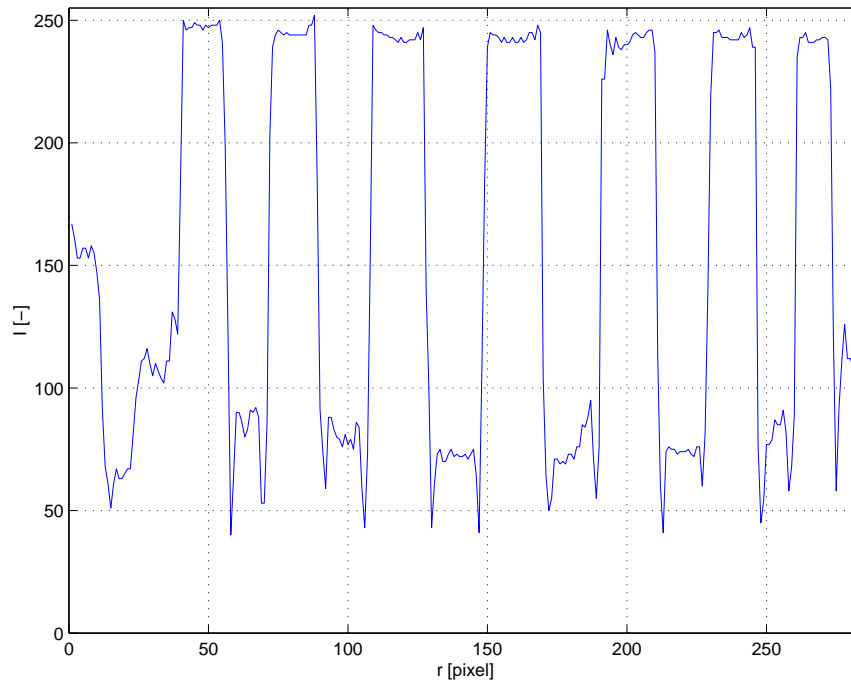
Pro kalibraci optické soustavy byla použita testovací trubka z umělé hmoty o průměru 270 mm. Její vnitřní povrch byl pokryt šachovnicovou texturou o velikosti jednoho čtverce 20×20 mm. Panoramatickou kameru jsme umístili tak, aby její osa byla totožná s osou trubky. Díky osové symetrii zrcadla tak docházelo k nelineární deformaci obrazu zrcadla v kameře pouze v radiálním směru. Abychom mohli tuto nelinearitu korigovat, museli jsme nejprve najít funkci, která tuto deformaci popisuje.

Vlastní kalibrace byla provedena tak, že jsme v obraze kamery změřili délku všech čtverců v radiálním směru zrcadla a určili funkci, která tuto závislost popisuje. Od středu zrcadla směrem k jeho okraji jsme vedli pomyslné paprsky tak, aby procházely každým čtvercem šachovnicové textury, viz obrázek č. 3.1. Podél každého takového paprsku byla následně určena hodnota jasové funkce, viz obrázek č. 3.2.

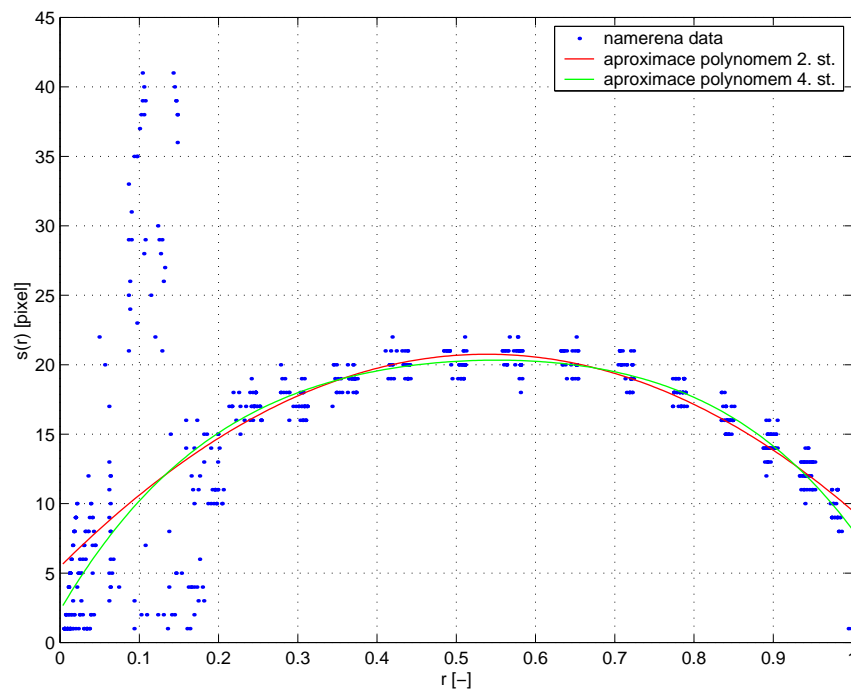


Obrázek 3.1: Měření délky čtverců v radiálním směru obrazu zrcadla podél paprsků.

Hranice mezi černými a bílými čtverci odpovídají skokovým změnám jasové funkce. Délka každého čtverce je potom dána délkou příslušného intervalu. Odpovídající poloměr r , kde byla délka čtverce změřena, jsme volili v polovině jednotlivých intervalů.



Obrázek 3.2: Typický průběh jasové funkce $I \in \{0, 1, \dots, 255\}$ v závislosti na vzdálenosti od středu zrcadla $r \in [0, R_{max}]$ podél jednoho z paprsků z obrázku č. 3.1. Zde $R_{max} = 284$ pixelů značí poloměr zrcadla v obraze kamery.



Obrázek 3.3: Závislost délky čtverců $s(r)$ na vzdálenosti od středu zrcadla r ; aproximace naměřených dat polynomy 2. a 4. stupně.

Vynesením takto získaných údajů do grafu jsme dostali diagram závislosti délky čtverců $s(r)$ na vzdálenosti od středu zrcadla r , viz obrázek č. 3.3. Díky nepřesnosti umístění panoramatické kamery do osy testovací trubky je v diagramu zastoupen šum. Vyšetřovaná závislost je navíc dána pouze diskrétními hodnotami. Abychom ji mohli popsat analytickou funkcí, proložili jsme diskrétní body polynomem pomocí metody nejmenších čtverců (viz [5, str. 620]). Pro srovnání byly pro aproximaci voleny polynomy 2. a 4. stupně. Abychom minimalizovali numerické chyby při výpočtu, znormovali jsme ještě poloměr zrcadla tak, aby měl velikost $R_{max} = 1$.

Vychýlené hodnoty přibližně v první čtvrtině grafu na obrázku č. 3.3 jsou způsobeny nedokonalým určením délky čtverců blízko středu zrcadla. Protože pro rozvinutí obrazu kamery do panoramatického snímku jsme neuvážovali vnitřní třetinu zrcadla kvůli malému rozlišení, nebyl na tyto hodnoty brán při aproximaci ohled. Podobně nebylo možné určit ani délku čtverců v oblasti, která odpovídá vnějšímu okraji zrcadla. Koefficienty polynomů jsme proto hledali tak, abychom naměřená data approximovali pouze na intervalu $[0.21, 0.99]$.

Výsledek aproximace dat polynomem 2. stupně:

$$s(r) = -52.79r^2 + 56.84r + 5.46. \quad (3.1)$$

Výsledek aproximace dat polynomem 4. stupně:

$$s(r) = -106.55r^4 + 222.84r^3 - 207.86r^2 + 97.39r + 2.32. \quad (3.2)$$

Z obrázku č. 3.3 je patrné, že polynom 4. stupně approximuje naměřená data lépe než polynom 2. stupně. Je to dáno tím, že polynomy vyšších stupňů umožňují dosažení vyššího stupně aproximace (tj. menší chyby).

3.2 Určení funkce nelineární deformace

Jak již bylo řečeno, k nelineární deformaci obrazu zrcadla v kameře docházelo díky osově symetrii zrcadla pouze v radiálním směru. Princip korekce tohoto zkreslení proto spočíval pouze v určení radiální souřadnice \tilde{R} v deformovaném obraze k dané radiální souřadnici r ve hledaném korigovaném obraze. Hledali jsme tedy funkci

$$\tilde{R} = \tilde{R}(r). \quad (3.3)$$

Předpokládejme, že $\tilde{R}(0) = 0$. Pak integrací funkce $s(r)$, určené kalibrací podle odstavce 3.1, získáme hledanou funkci $\tilde{R}(r)$, která deformaci zrcadla popisuje:

$$\tilde{R}(r) = k \int_0^r s(x) dx. \quad (3.4)$$

Zde r leží v intervalu $[0, 1]$ a k je normalizační konstanta, která je volena tak, aby $\tilde{R}(1) = 1$.

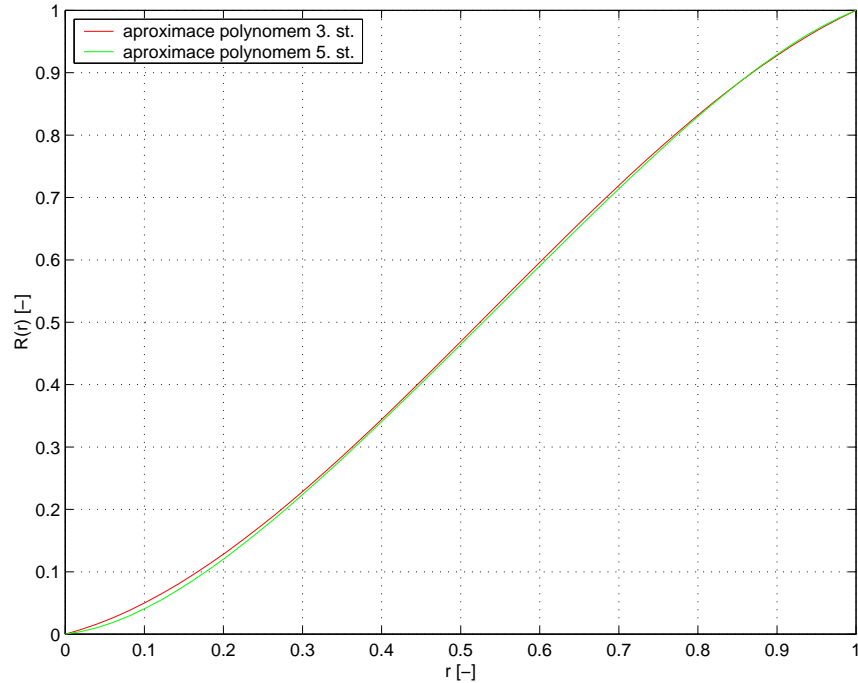
Ze vztahů (3.1) a (3.4) pak pro korekci nelineární radiální deformace obrazu zrcadla dostáváme aproximaci polynomem 3. stupně ($k = 0.061$):

$$\tilde{R}(r) = -1.08r^3 + 1.75r^2 + 0.34r, \quad (3.5)$$

a ze vztahů (3.2) a (3.4) aproximaci polynomem 5. stupně ($k = 0.062$):

$$\tilde{R}(r) = -1.32r^5 + 3.45r^4 - 4.30r^3 + 3.02r^2 + 0.14r. \quad (3.6)$$

Pro srovnání jsou na obrázku č. 3.4 oba polynomy vyneseny do grafu. Je zřejmé, že se na intervalu $[0.3, 1]$, tj. v oblasti kterou používáme pro rozvinutí obrazu zrcadla do panoramatických snímků, vzájemně liší jen velmi málo. Pro urychlení výpočtu lze ke korekci deformovaného obrazu zrcadla využít pouze polynom 3. stupně daný vztahem (3.5).



Obrázek 3.4: Aproximace převodní funkce $\tilde{R}(r)$ pro korekci nelineární radiální deformace obrazu zrcadla polynomy 3. a 5. stupně.

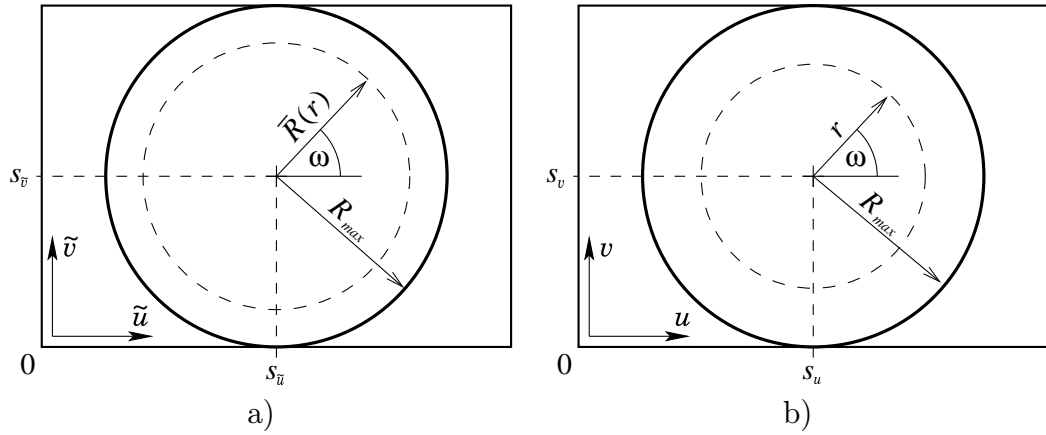
3.3 Korekce obrazu zrcadla

Známe-li funkci $\tilde{R}(r)$ (viz odstavec 3.2), která popisuje nelineární deformaci zrcadla v radiálním směru, můžeme přistoupit ke korekci obrazu zrcadla.

V principu jde o nalezení souřadnic \tilde{u} , \tilde{v} v původním nelineárně radiálně deformovaném obraze zrcadla k daným souřadnicím u , v ve hledaném korigovaném obraze zrcadla, viz obrázek č. 3.5. Jde tedy o transformaci

$$\tilde{u} = \tilde{u}(u, v), \quad (3.7)$$

$$\tilde{v} = \tilde{v}(u, v). \quad (3.8)$$



Obrázek 3.5: Princip korekce obrazu zrcadla: a) původní obraz zrcadla, b) korigovaný obraz zrcadla. Legenda: \tilde{u} , \tilde{v} je souřadný systém v původním obraze zrcadla, u , v je souřadný systém v korigovaném obraze zrcadla, $s_{\tilde{u}}$, $s_{\tilde{v}}$, s_u , s_v je poloha středů zrcadla v příslušném obraze, r a $\tilde{R}(r)$ jsou odpovídající si radiální souřadnice, ω je úhlová souřadnice a R_{max} je poloměr zrcadla v obraze kamery.

Pro zjednodušení dalšího značení zavedeme ještě funkci

$$\tilde{R}(r) = R_{max} \tilde{R} \left(\frac{r}{R_{max}} \right), \quad (3.9)$$

kde R_{max} je poloměr zrcadla v obraze kamery a $r \in [0, R_{max}]$ je radiální souřadnice v korigovaném obraze zrcadla.

Korekci obrazu zrcadla má smysl provádět pouze v oblasti, kde $r \leq R_{max}$. Pro dané r , danou úhlovou souřadnici ω a daný střed zrcadla v obraze kamery $(s_{\tilde{u}}, s_{\tilde{v}})$ platí rovnosti

$$\tilde{u} = \tilde{R}(r) \cos \omega + s_{\tilde{u}}, \quad (3.10)$$

$$\tilde{v} = \tilde{R}(r) \sin \omega + s_{\tilde{v}}. \quad (3.11)$$

Podobně i v hledaném obraze dostaneme pro dané souřadnice středu zrcadla (s_u, s_v) rovnosti

$$u = r \cos \omega + s_u, \quad (3.12)$$

$$v = r \sin \omega + s_v. \quad (3.13)$$

Nelinearita obrazu není díky osové symetrii zrcadla závislá na úhlové souřadnici ω . Ze vztahů (3.12) a (3.13) potom pro $r > 0$ plyne

$$\cos \omega = \frac{u - s_u}{r},$$

$$\sin \omega = \frac{v - s_v}{r}.$$

Následným dosazením do (3.10) a (3.11) dostaneme výslednou transformaci pro přepočítání původního obrazu zrcadla na obraz korigovaný, tedy

$$\tilde{u} = \bar{R}(r) \frac{u - s_u}{r} + s_{\tilde{u}}, \quad (3.14)$$

$$\tilde{v} = \bar{R}(r) \frac{v - s_v}{r} + s_{\tilde{v}}. \quad (3.15)$$

Radiální souřadnici r ve hledaném korigovaném obraze zrcadla určíme z rovnice kružnice jako

$$r = \sqrt{(u - s_u)^2 + (v - s_v)^2}. \quad (3.16)$$

Mimo oblast zrcadla, tj. kdy je $r > R_{max}$, a pro $r = 0$ jsme volili

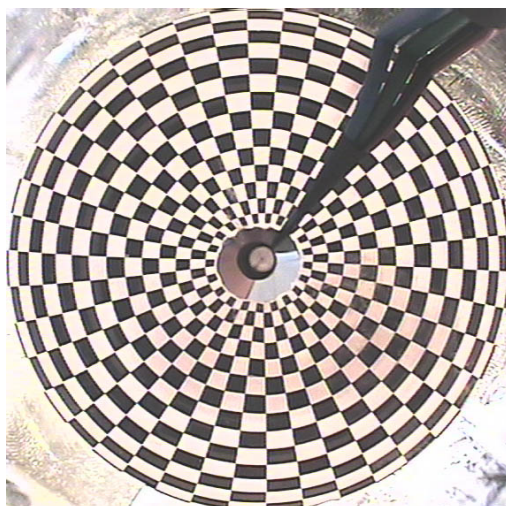
$$\tilde{u} = u, \quad (3.17)$$

$$\tilde{v} = v. \quad (3.18)$$

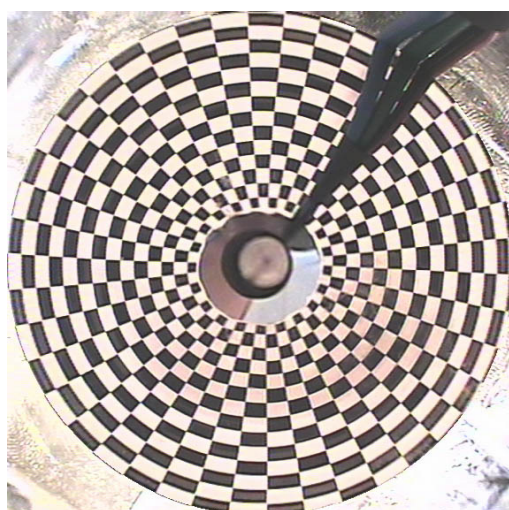
S využitím transformace popsané vztahy (3.14), (3.15), (3.17) a (3.18) jsme pro korekci obrazu zrcadla vytvořili softwarový filtr do programu *VirtualDub*. V konfiguračním dialogu je možné nastavit pozici středu zrcadla a délky poloos elipsy určující okraj zrcadla. Dále je zde možné zvolit interpolační metodu pro aproximaci jasové funkce. K tomuto účelu jsme implementovali metodu nejbližšího souseda a bilineární interpolaci (viz [6, str. 140], [7, str. 32]).

Pro zefektivnění algoritmu rozvinutí obrazu zrcadla do panoramatických snímků (viz kapitola 4) je výhodné rovnou korigovat radiální souřadnici podle (3.3).

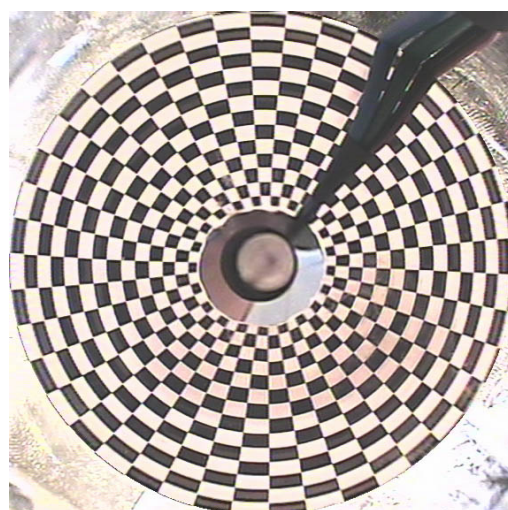
Výsledky korekce obrazu zrcadla pomocí polynomů 3. a 5. stupně (viz vztahy (3.5) a (3.6)) jsou na obrázku č. 3.6.



a)



b)



c)

Obrázek 3.6: Výsledky korekce obrazu zrcadla pomocí polynomů: a) originální obraz zrcadla, b) korekce polynomem 3. stupně, c) korekce polynomem 5. stupně.

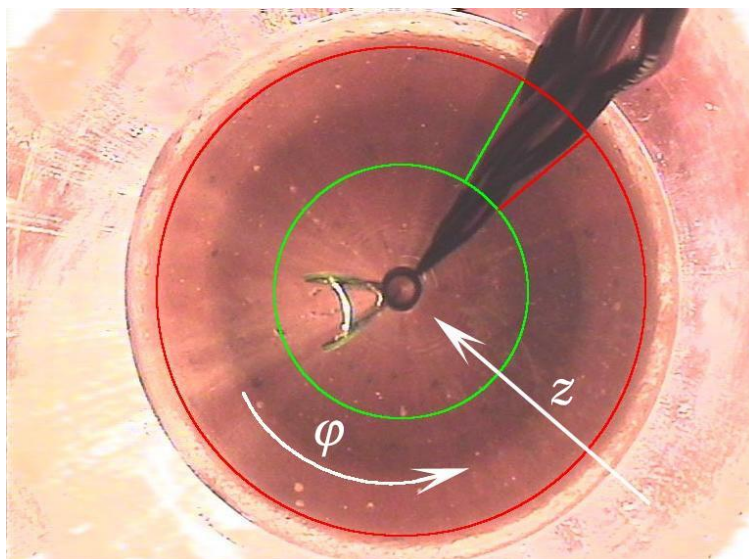
4 Získání panoramatických snímků

Měřená data při inspekce kanalizační sítě bylo možné získat dvěma způsoby:

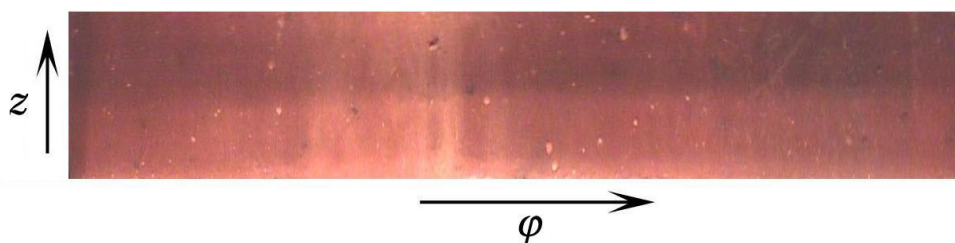
1. Záznamem obrazu panoramatické kamery přímo počítačem. Takto jsme prováděli většinu našich testů v laboratoři.
2. Záznamem obrazu panoramatické kamery v digitálním video formátu na pásku Hi8, odkud byla data dále přenesena do počítače. Tuto techniku jsme použili při záznamu inspekce skutečné kanalizační sítě.

Každý snímek ze vstupní sekvence obrazů byl transformován tak, abychom získali odpovídající rozvinutý panoramatický obraz.

Na obrázku č. 4.1 je zachycen typický obraz panoramatické kamery pořízený v laboratoři v kameninové kanalizační trubce. Kružnice a úsečky zde vytyčují oblast, ze které bude originální obraz transformován do výsledného panoramatického snímku. Ten je potom znázorněn na obrázku č. 4.2.



Obrázek 4.1: Typický obraz panoramatické kamery – vytyčení oblasti pro rozvinutí do panoramatického snímku.

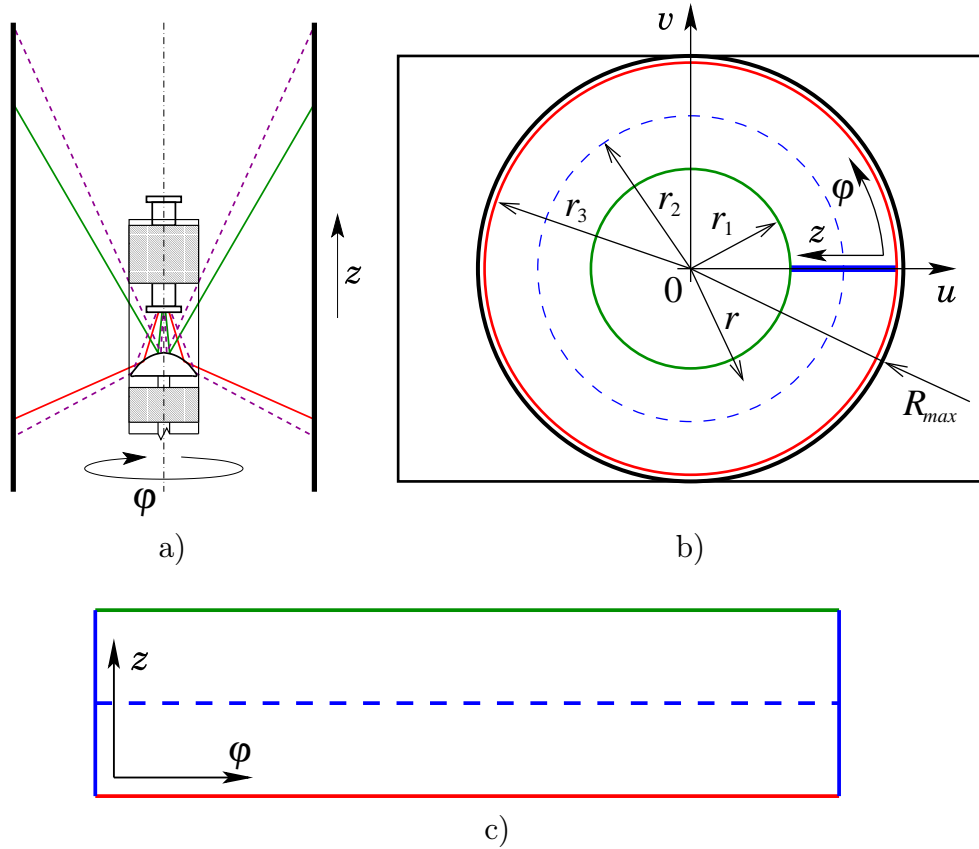


Obrázek 4.2: Rozvinutý panoramatický snímek.

O principu rozvinutí obrazu pojednáme v odstavcích 4.1 a 4.4. Budeme v nich uvažovat případ, kdy je osa panoramatické kamery totožná s osou kanalizačního potrubí a také případ, kdy je od ní rovnoběžně posunuta.

4.1 Rozvinutí obrazu s kamerou v ose potrubí

První experimenty jsme provedli v laboratoři. Panoramatická kamera byla připevněna k podvozku tak vysoko, aby byla její osa totožná s osou kanalizačního potrubí, viz obrázek 4.3a.



Obrázek 4.3: Schematické znázornění principu rozvinutí obrazu zrcadla, a) podélný řez kanalizační trubkou, b) obraz zrcadla pořízený kamerou, c) rozvinutý panoramatický snímek. Legenda: u, v je souřadný systém v obraze zrcadla, z, φ je souřadný systém v panoramatickém snímku, R_{max} je vnější okraj zrcadla, r_1 a r_3 vytyčují oblast pro rozvinutí obrazu zrcadla do panoramatického snímku, $r_2 = \frac{r_1+r_3}{2}$ a r je obecný poloměr.

Princip rozvinutí obrazu zrcadla (viz obr. 4.3b) do hledaného panoramatického snímku (viz obr. 4.3c) spočívá v nalezení souřadnic u, v v obraze zrcadla k danému úhlu φ a pozici z v panoramatickém snímku. Jde tedy o transformace

$$u = u(\varphi, z), \quad (4.1)$$

$$v = v(\varphi, z). \quad (4.2)$$

Díky osové symetrii panoramatického zrcadla i kanalizačního potrubí budou soustředné kružnice o poloměru r v obraze zrcadla se středem v 0 odpovídat hladinám o konstantním z nezávisle na úhlu φ . Hledaná transformace proto bude mít tvar převodu mezi kartézskými a polárními souřadnicemi, tedy

$$u = r \cos \varphi, \quad (4.3)$$

$$v = r \sin \varphi. \quad (4.4)$$

Zde hodnoty $r = r(z)$ probíhají interval $[r_1, r_3]$, kde r_1 a r_3 jsou poloměry vnitřní a vnější kružnice, viz obrázek 4.3b.

Je-li obraz zrcadla směrem ke středu lineární, můžeme poloměr r pro dané z určit jako

$$r = r_3 - kz, \quad (4.5)$$

kde k je konstanta, která odpovídá měřítku v ose z tak, aby při maximálním rozlišení byla výška a šířka rozvinutého panoramatického snímku ve stejném poměru (kalibraci v trubce se šachovnicovou texturou jsme pro naši konfiguraci určili $k = 1.75$). Hodnoty z probíhají interval $[0, \frac{r_3-r_1}{k}]$.

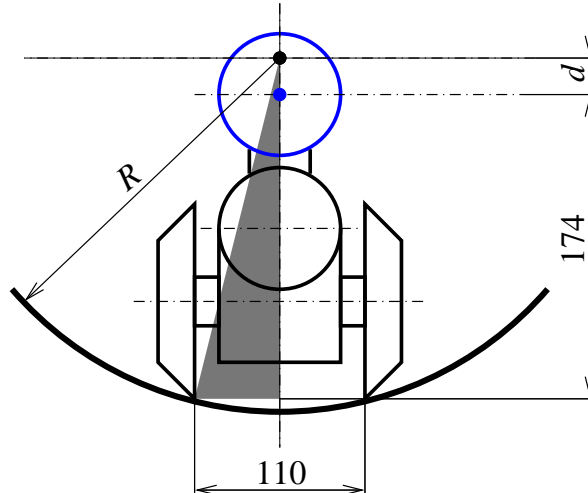
Rozměry výsledného rozvinutého panoramatického snímku v pixelech jsou určeny ze vstupního obrazu zrcadla. Šířka odpovídá délce kružnice o poloměru r_2 , kde $r_2 = \frac{r_1+r_3}{2}$. Výška je pak úměrná rozdílu poloměrů krajních kružnic, tedy $\frac{r_3-r_1}{k}$.

Vzhledem k tomu, že obraz zrcadla v kameře nebyl v naší konfiguraci v radiálním směru lineární, museli jsme jej nejprve korigovat pomocí transformace popsané v odstavci 3.3. Pro zefektivnění algoritmu rozvinutí do panoramatických snímků jsme dále spojili korekci zrcadla podle vztahu (3.3) s výpočtem poloměru podle vztahu (4.5).

Vstupní sekvenci obrazů z panoramatické kamery jsme v laboratorním experimentu transformovali do panoramatických snímků pomocí programu *VirtualDub*. Použitý softwarový filtr, který využíval principu transformace popsané vztahy (4.3) a (4.4), vytvořil Mgr. Karel Hanton z CMP FEL ČVUT.

4.2 Umístění kamery při měření v terénu

Díky konstrukci inspekčního robota pro měření v terénu jsme nemohli zajistit, aby osa panoramatické kamery byla totožná s osou kanalizačního potrubí.



Obrázek 4.4: Schematické znázornění polohy inspekčního robota v příčném řezu kanalizační trubkou. Legenda: R je poloměr kanalizačního potrubí, d je vzdálenost osy panoramatické kamery od osy potrubí.

Vztah mezi vzdáleností d osy panoramatické kamery od osy potrubí o konstantním poloměru R lze určit z Pythagorovy věty. Z trojúhelníku vyznačeného na obrázku č. 4.4 můžeme psát

$$R^2 = 55^2 + (174 + d)^2,$$

což snadnou úpravou vede k rovnosti

$$d = \sqrt{R^2 - 55^2} - 174 \quad [\text{mm}]. \quad (4.6)$$

Odpovídající vyosení pro různé materiály, ve kterých jsme nasníмали data v terénu, jsou uvedeny v tabulce č. 4.1.

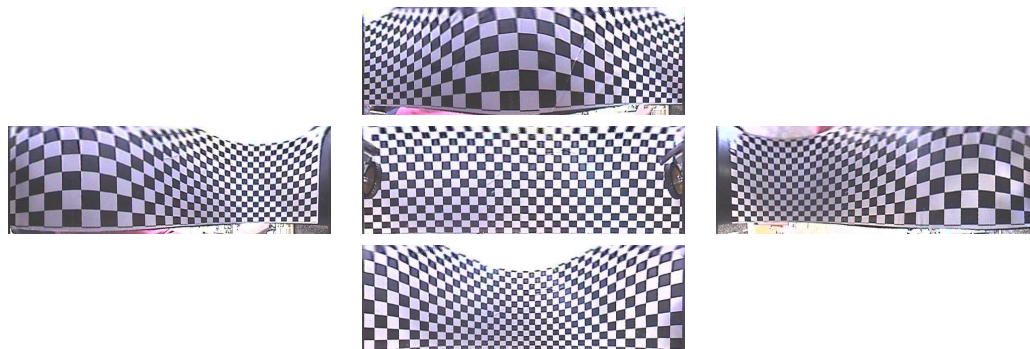
Materiál	R [mm]	d [mm]
Beton \varnothing 300 mm	150	-34.4
Tvrzené PVC \varnothing 380 mm	190	7.9
Beton \varnothing 400 mm	200	18.3
Kamenina \varnothing 400 mm	200	18.3
PVC \varnothing 400 mm	200	18.3

Tabulka 4.1: Materiály zkoumaného kanalizačního potrubí a odpovídající rovnoběžné vyosení panoramatické kamery.

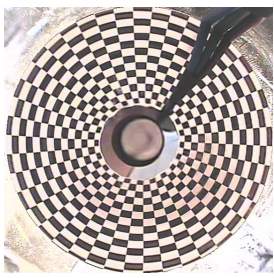
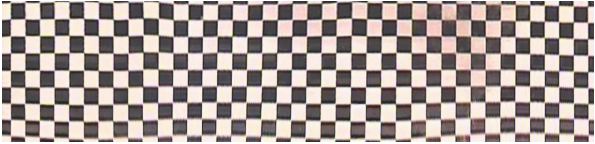
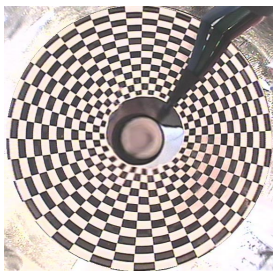

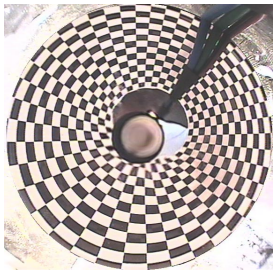
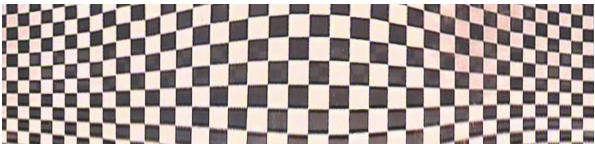
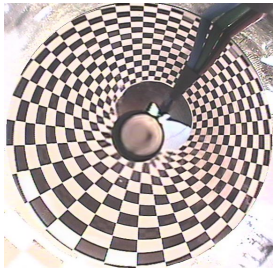
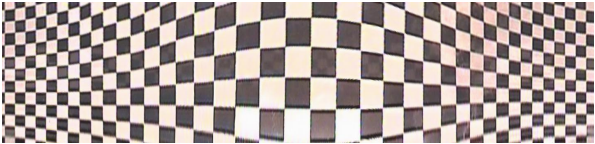
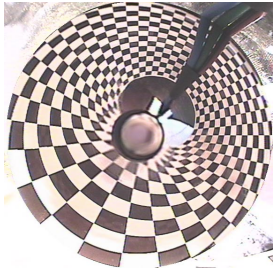
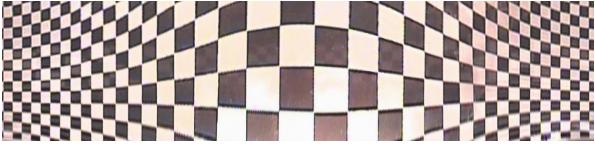
4.3 Deformace obrazu při vyosení kamery

V případě, že osa panoramatické kamery není totožná s osou kanalizačního potrubí, dochází při použití transformace popsané vztahy (4.3) a (4.4) pro rozvinutí vstupního obrazu zrcadla k deformacím ve výstupním panoramatickém snímku. Pro názornost budeme deformaci demonstrovat na testovací trubce o průměru 270 mm se šachovnicovou texturou o rozměru čtverců 20×20 mm.

Na obrázku č. 4.5 jsou zachyceny rozvinuté panoramatické snímky při rovnoběžném vyosení kamery do čtyř na sebe kolmých směrů.



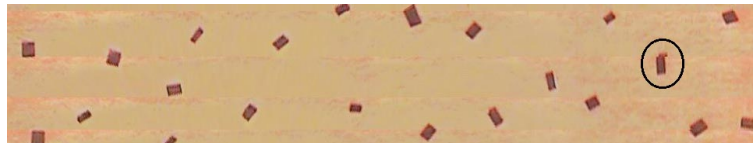
Obrázek 4.5: Ukázka deformace rozvinutých panoramatických snímků způsobené polohou kamery mimo osu testovací trubky.

d [mm]	Obraz kamery	Rozvinutý panoramatický snímek
0		
20		
40		
60		
80		

Tabulka 4.2: Ukázka obrazu zrcadla a příslušných rozvinutých panoramatických snímků při rovnoběžném vyosení kamery od osy testovací trubky o vzdálenost d . Pro rozvinutí byla použita transformace popsaná vztahy (4.3) a (4.4). Trubka měla průměr 270 mm a její vnitřní povrch byl pokryt šachovnicovou texturou o rozměru čtverců 20×20 mm.

Tabulka č. 4.2 následně ukazuje, jak vypadá obraz kamery a deformace v příslušném rozvinutém panoramatickém snímku, je-li osa kamery rovnoběžně posunuta od osy testovací trubky o vzdálenost d .

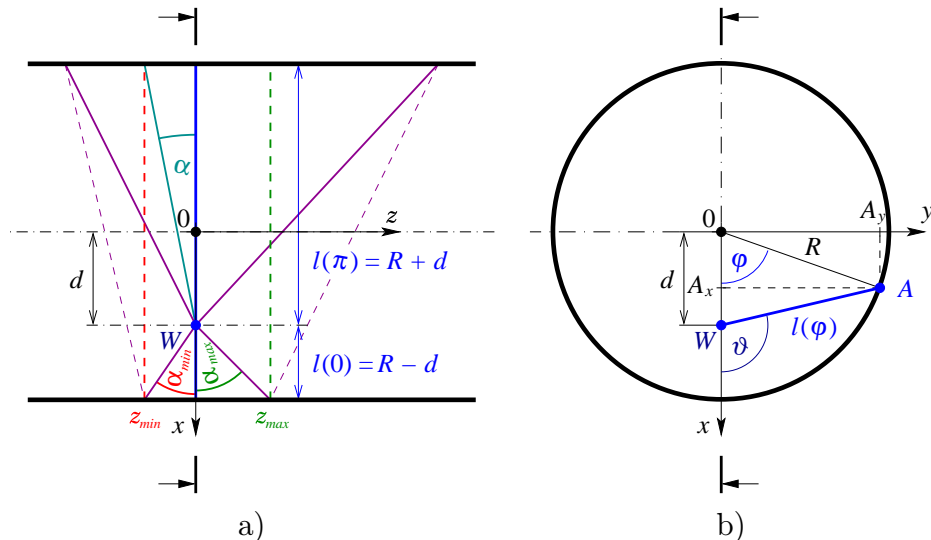
Vytváření mozaiky z panoramatických snímků je takovou deformací zkomplikováno. Ve výsledném rekonstruovaném obraze se to projeví nespojitostmi. Na obrázku č. 4.6 můžeme takovou situaci pozorovat na testovací laminátové trubce o průměru 260 mm s kalibračními terčíky. V následujícím odstavci se budeme věnovat metodě, jak tyto nespojitosti odstranit, je-li kamera od osy potrubí rovnoběžně posunuta.



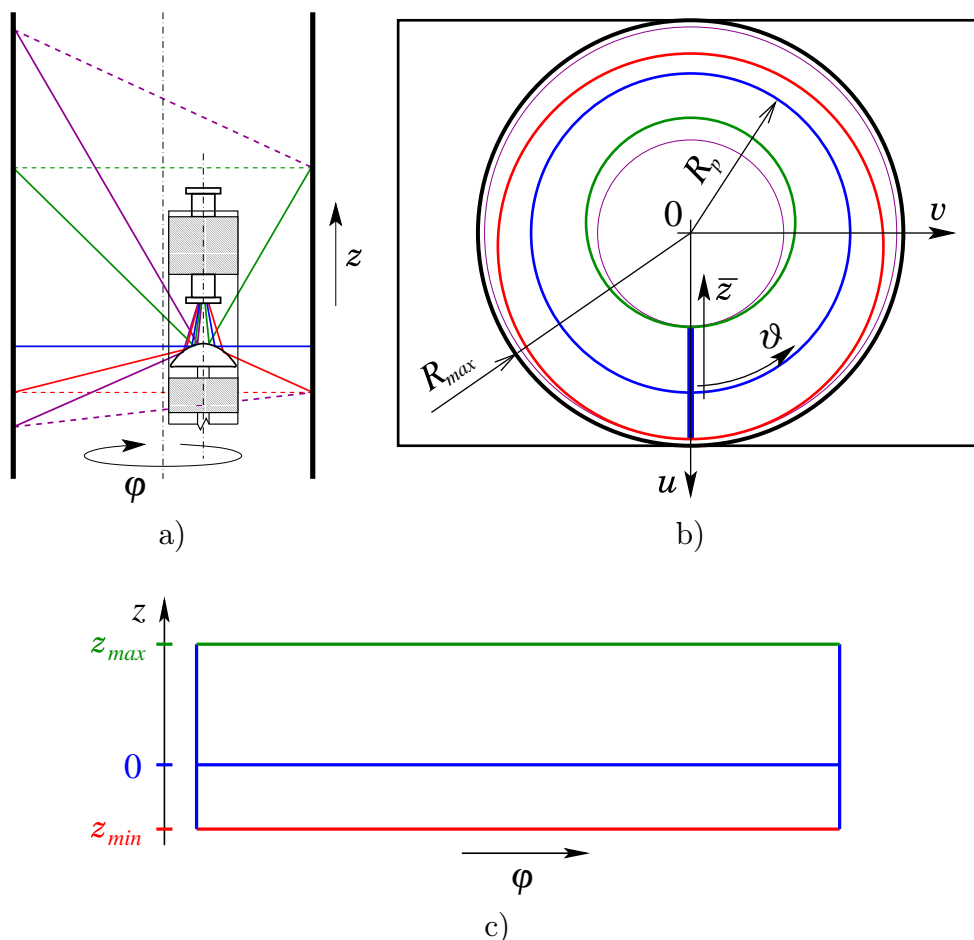
Obrázek 4.6: Ukázka nespojitosti při napojování deformovaných snímků.

4.4 Matematický model rovnoběžně vyosené kamery

Konstrukce inspekčního robota pro měření v terénu rovnoběžně posunula osu panoramatické kamery mimo osu kanalizačního potrubí. Aby nedocházelo k deformacím popsaným v odstavci 4.3, vytvořili jsme v tomto odstavci matematický model, který danou situaci popisuje. Na jeho základě byla následně sestavena transformace, pomocí které je možné získat z obrazu zrcadla nedeformované rozvinuté panoramatické snímky.



Obrázek 4.7: Schematické znázornění umístění panoramatické kamery v kanalizačním potrubí a) v podélném řezu, b) v příčném řezu. Legenda: 0 je počátek námi zvoleného souřadného systému, d je vzdálenost mezi osou kamery a osou kanalizačního potrubí ve směru osy x , W značí průsečík osy panoramatické kamery s rovinou jejího kolmého pohledu, R je poloměr potrubí, α_{min} a α_{max} určuje zorný úhel kamery.



Obrázek 4.8: Schematické znázornění principu rozvinutí obrazu zrcadla, a) podélný řez kanalizační trubkou, b) obraz zrcadla pořízený kamerou, c) rozvinutý panoramatický snímek. Legenda: u, v je souřadný systém v obraze zrcadla, z, φ a \bar{z}, ϑ jsou sobě si odpovídající souřadné systémy v rozvinutém panoramatickém snímku a v obraze zrcadla, R_{max} je vnější okraj zrcadla a R_p je poloměr kružnice, která odpovídá kolmému pohledu kamery.

Na obrázcích 4.7 a 4.8 je znázorněno umístění panoramatické kamery v kanalizačním potrubí a tomu odpovídající obraz zrcadla a hledaného panoramatického snímku. Souřadný systém x, y, z v kanalizačním potrubí a souřadný systém u, v v obraze kamery jsme volili tak, aby další matematický zápis byl co nejjednodušší. V potrubí je počátek umístěn v průsečíku osy potrubí s rovinou kolmého pohledu kamery na stěnu kanalizační trubky. V obraze kamery je počátek volen, podobně jako v odstavci 4.1, ve středu zrcadla. Osa panoramatické kamery je od osy potrubí rovnoběžně posunuta ve směru osy x o vzdálenost d .

Princip rozvinutí obrazu zrcadla (viz obr. 4.8b) do panoramatického snímku (viz obr. 4.8c) spočívá v nalezení souřadnic u, v v obraze zrcadla k danému úhlu φ a pozici z v rozvinutém panoramatickém snímku. Jde tedy o transformace

$$u = u(\varphi, z), \quad (4.7)$$

$$v = v(\varphi, z). \quad (4.8)$$

Při odvozování matematického modelu rovnoběžně vyosené panoramatické

kamery v potrubí snadno nahlédneme, že úhel ϑ v obrázcích 4.7b a 4.8b je totožný. Protože hledané transformace (4.7) a (4.8) závisí na úhlu φ , budeme nejprve hledat úhel ϑ jako funkci φ , tj.

$$\vartheta = \vartheta(\varphi). \quad (4.9)$$

Uvažujme kolmý pohled kamery na vnitřní stěnu potrubí o poloměru R podle obrázku 4.7b. Pohyb bodu $A = (A_x, A_y)$ zde můžeme popsat vztahy

$$A_x = R \cos \varphi, \quad (4.10)$$

$$A_y = R \sin \varphi. \quad (4.11)$$

Délku spojnice bodu A a průsečíku W určíme z kosinové věty jako

$$l(\varphi) = \sqrt{R^2 + d^2 - 2dR \cos \varphi}. \quad (4.12)$$

Pro úhel ϑ pak v trojúhelníku WAA_x platí

$$\cos \vartheta = -\frac{d - A_x}{l(\varphi)},$$

$$\sin \vartheta = \frac{A_y}{l(\varphi)}$$

a dosazením z (4.10) a (4.11) získáme

$$\cos \vartheta = \frac{R \cos \varphi - d}{l(\varphi)}, \quad (4.13)$$

$$\sin \vartheta = \frac{R \sin \varphi}{l(\varphi)}. \quad (4.14)$$

V podélném řezu kanalizačním potrubím podle obrázku 4.7a je dále naznačeno, jaká oblast vnitřního povrchu potrubí se v zrcadle panoramatické kamery zobrazí, je-li rovnoběžně vyosena o vzdálenost d ve směru osy x . Je zřejmé, že pro $d > 0$ se v zorném úhlu kamery, který je dán úhly α_{min} a α_{max} , nachází v dolní části potrubí nejkratší pozorovaný úsek. V horní části potrubí potom kamera zabírá úsek nejdelší.

Poznámka: Kvůli rozdílným vzdálenostem je třeba nastavit clonu kamery na dostatečně velkou hloubku ostrosti tak, aby nebyl obraz zrcadla v kameře rozostřený.

Hledaný panoramatický snímek vnitřního povrchu kanalizačního potrubí zde odpovídá pásu, který je dán nejkratším sledovaným úsekem. Jeho šířka je určena intervalem $[z_{min}, z_{max}]$, kde

$$z_{min} = (R - |d|) \operatorname{tg} \alpha_{min},$$

$$z_{max} = (R - |d|) \operatorname{tg} \alpha_{max}.$$

Soustředným kružnicím v obraze zrcadla se společným středem v počátku (viz obr. 4.8b) odpovídají paprsky dopadající do kamery pod konstantním úhlem α . Pro danou konstantní souřadnici z a pro daný úhel φ můžeme úhel α podle obrázku 4.7b určit jako

$$\alpha = \alpha(\varphi, z) = \operatorname{arctg} \frac{z}{l(\varphi)}. \quad (4.15)$$

Předpokládáme, že obraz zrcadla je v každém radiálním směru lineární. Díky rovnoběžnému vyosení kamery je ale obraz kanalizačního potrubí v zrcadle zdeformován. Pro konstantní úhel ϑ , respektive φ , proto můžeme ze vztahu (4.15) psát

$$\bar{z} = k \operatorname{tg} \alpha = k \frac{z}{l(\varphi)}, \quad (4.16)$$

kde \bar{z} odpovídá radiální souřadnici v obraze zrcadla a k je konstanta, která odpovídá měřítku v ose z .

Nyní máme zavedeny všechny potřebné proměnné a vztahy, pomocí kterých můžeme definovat výslednou transformaci obrazu zrcadla do rozvinutého panoramatického snímku. V principu jde o poněkud komplikovanější převod mezi kartézskými a polárními souřadnicemi. Úhel v obraze zrcadla odpovídá hodnotě ϑ a poloměr odpovídá souřadnici \bar{z} . Sestavením vztahů (4.13), (4.14) a (4.16) dostaneme

$$u = R_p (1 - \bar{z}) \cos \vartheta, \quad (4.17)$$

$$v = R_p (1 - \bar{z}) \sin \vartheta, \quad (4.18)$$

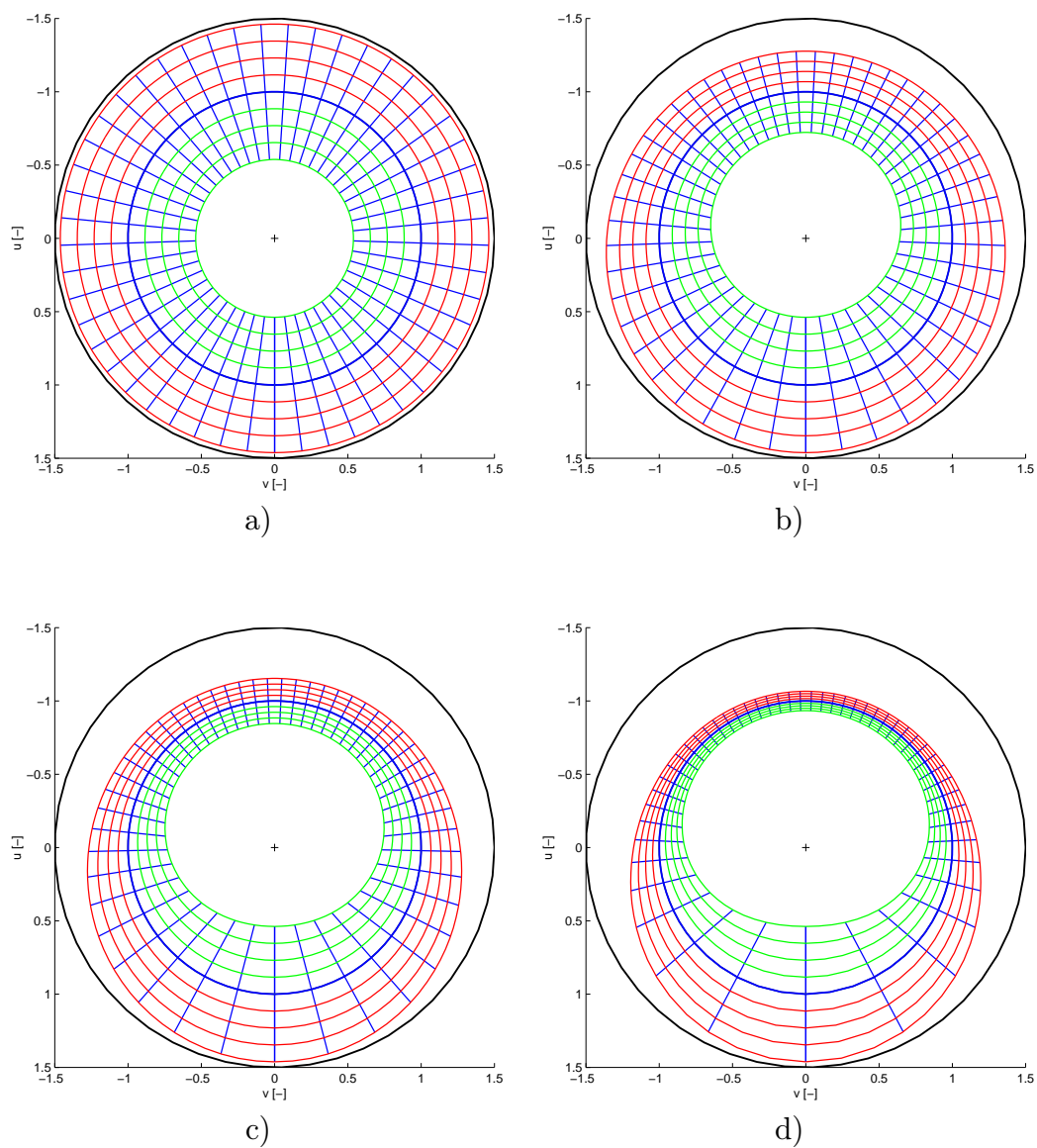
kde R_p je poloměr kružnice v obraze kamery určující kolmý pohled na stěnu potrubí a k z výrazu (4.16) je určeno kalibrací (v trubce se šachovnicovou texturou jsme pro naši konfiguraci určili $k = 0.39$).

Oblast hledaného panoramatického snímku v obraze zrcadla při rovnoběžném vyosení kamery od osy kanalizačního potrubí o vzdálenost d , popsaná transformací (4.17) a (4.18), je znázorněna na modelech na obrázku č. 4.9.

Od výsledného panoramatického snímku požadujeme maximální rozlišení a stejné měřítko v horizontálním i ve vertikálním směru. Poměr mezi délkou kružnice o poloměru R_p odpovídající v obraze kamery kolmému pohledu na stěnu potrubí a obvodem potrubí o poloměru R dávají pro rozlišení panoramatického snímku výraz

$$\rho = \frac{2\pi R}{2\pi R_p} = \frac{R}{R_p} \quad [\text{mm pixel}^{-1}]. \quad (4.19)$$

Rozměry výsledného rozvinutého panoramatického snímku v pixelech tak mohou být určeny ze vstupního obrazu zrcadla a ze skutečných rozměrů potrubí. Šířku snímku vypočteme z délky kružnice o poloměru R_p . Výšku určíme při známém rozlišení ρ z délky úseku $z_{max} - z_{min}$.



Obrázek 4.9: Model panoramatického snímku v obraze zrcadla při rovnoběžném vyosení kamery od osy kanalizačního potrubí o vzdálenost a) $d = 0$, b) $d = \frac{R}{4}$, c) $d = \frac{R}{2}$, d) $d = \frac{3R}{4}$. Zde R je poloměr potrubí a kružnice o poloměru $R_p = 1$ odpovídá kolmému pohledu kamery na stěnu potrubí.

Výhodou této transformace je, že když známe všechny délkové vstupní parametry v milimetrech, můžeme ve výsledném panoramatickém snímku při známém rozlišení ρ v [mm pixel⁻¹] snadno provádět metrická měření.

Nevýhodou je obtížné nastavení parametrů kružnice, která v obraze kamery odpovídá kolmému pohledu na stěnu potrubí. Protože pro danou konfiguraci panoramatické kamery jsou tyto parametry konstantní, lze je určit přesným kalibračním procesem pouze jednou.

Speciálním případem transformace popsané vztahy (4.17) a (4.18) je i situace, kdy osa panoramatické kamery je totožná s osou potrubí, tj. kdy $d = 0$. Ve vztazích (4.12), (4.13), (4.14), (4.16) tak dostaneme

$$\begin{aligned} l(\varphi) &= \sqrt{R^2 + 0 - 0} = R, \\ \cos \vartheta &= \frac{R \cos \varphi - 0}{R} = \cos \varphi, \\ \sin \vartheta &= \frac{R \sin \varphi}{R} = \sin \varphi, \\ \bar{z} &= k \frac{z}{R} = Kz \end{aligned}$$

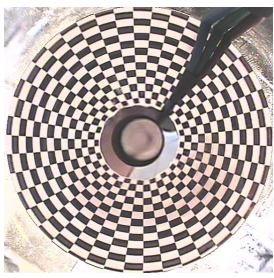
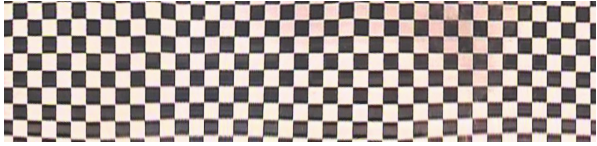
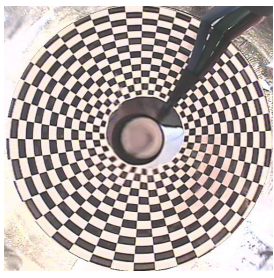

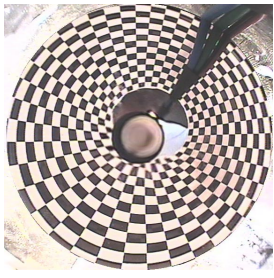
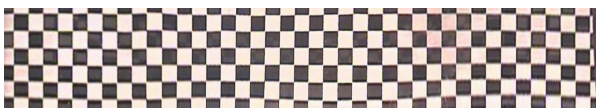
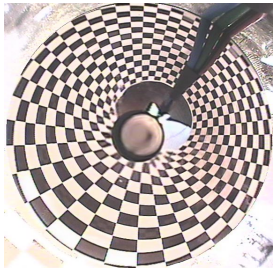

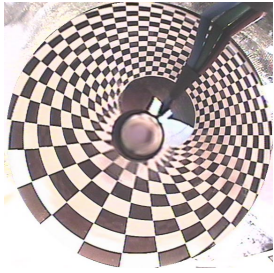
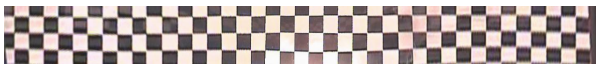
a dosazením do (4.17) a (4.18) získáme

$$\begin{aligned} u &= R_p(1 - Kz) \cos \varphi, \\ v &= R_p(1 - Kz) \sin \varphi. \end{aligned}$$

Je zřejmé, že tato transformace obrazu kamery do panoramatických snímků odpovídá právě vztahům (4.3) a (4.4), kdy jsme předpokládali, že osa panoramatické kamery je s osou potrubí totožná.

Pro rozvinutí obrazu zrcadla do panoramatických snímků s využitím transformace popsané vztahy (4.17) a (4.18) jsme vytvořili softwarový filtr do programu *VirtualDub*. V konfiguračním dialogu je možné nastavit průměr potrubí, velikost rovnoběžného vyosení, parametry kružnice definující kolmý pohled na potrubí, natočení celé transformace podle středu zrcadla, parametry zorného úhlu zrcadla a zapnutí souřadnicové mřížky s možností nastavení její velikosti. Je zde také možné zvolit interpolační metodu pro aproximaci jasové funkce. K tomuto účelu jsme implementovali metodu nejbližšího souseda a bilineární interpolaci (viz [6, str. 140], [7, str. 32]). Ukázky rozvinutí obrazů zrcadla do panoramatických snímků s využitím této transformace jsou pro různé vzdálenosti d uvedeny v tabulce č. 4.3.

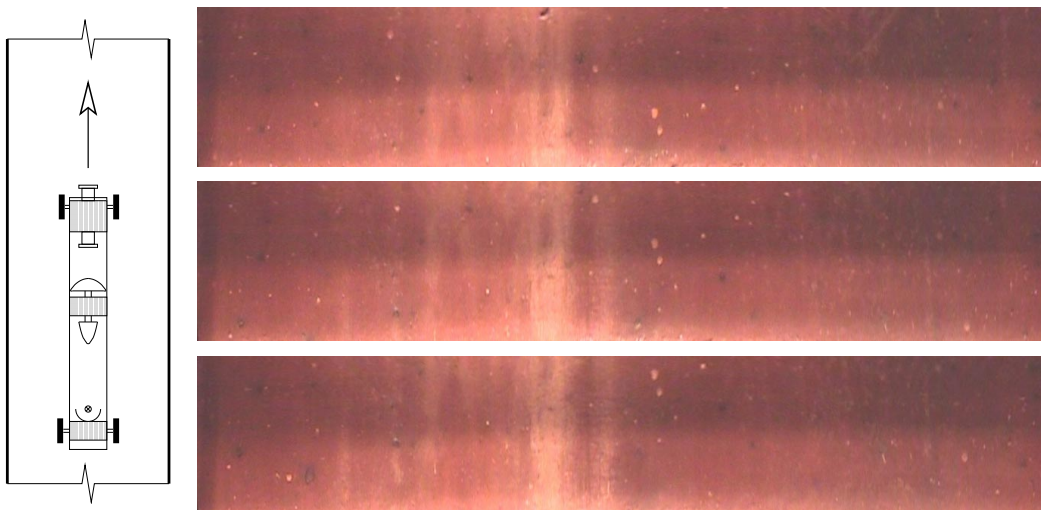
Poznámka: Pohybuje-li se inspekční robot v kanalizační síti, dochází na nerovnostech vnitřního povrchu potrubí k vychylování osy kamery od požadovaného směru. Jelikož jsme neměli možnost tyto změny měřit, nebyl na ně při dalším zpracování dat brán ohled. V dalších experimentech jsme proto předpokládali pouze rovné kanalizační potrubí. Pohyb inspekčního robota byl dále omezen pouze na pohyb dopředu, respektive dozadu, kdy panoramatická kamera byla umístěna rovnoběžně s osou potrubí ve známé pozici.

d [mm]	Obraz kamery	Rozvinutý panoramatický snímek
0		
20		
40		
60		
80		

Tabulka 4.3: Ukázka obrazu zrcadla a příslušných rozvinutých panoramatických snímků při rovnoběžném vyosení kamery od osy testovací trubky o vzdálenost d . Pro rozvinutí byla použita transformace popsaná vztahy (4.17) a (4.18). Trubka měla průměr 270 mm a její vnitřní povrch byl pokryt šachovnicovou texturou o rozměru čtverců 20×20 mm.

5 Určení posuvu dvou sousedních snímků

Pohybem inspekčního robota kanalizačním potrubím jsme získali sérii rozvinutých panoramatických snímků, viz obr. 5.1. Aby z nich bylo možné vytvořit mozaiku a zrekonstruovat tak obraz vnitřního povrchu kanalizačního potrubí rozvinutý do roviny, museli jsme nejprve zjistit, o kolik pixelů jsou jednotlivé sousední snímky vzájemně posunuty.



Obrázek 5.1: Série rozvinutých panoramatických snímků získaná při pohybu inspekčního robota kanalizačním potrubím.

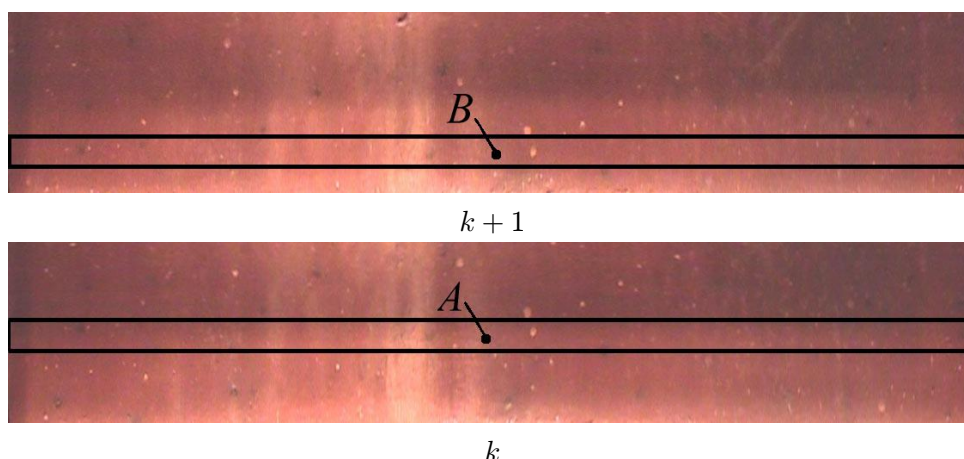
5.1 Korelace

Pro určení posuvu mezi dvěma sousedními panoramatickými snímky jsme v jednom z nich zvolili pevné okno a označili je A a ve druhém vytvořili pohyblivé okno a označili je B . Pohybem okna B ve druhém snímku je následně hledána ta část obrazu, která se nejvíce podobá úseku v okně A z prvního snímku, viz obrázek č. 5.2.

Rozdíl v pozicích pevně zvoleného okna A a nalezeného okna B odpovídá vzdálenosti, o jakou jsou oba sousední panoramatické snímky posunuty. Z této informace lze následně určit i to, kterým směrem se robot pohybuje, případně můžeme odhadnout i skutečnou vzdálenost, o kolik milimetrů se robot v kanalizačním potrubí posunul.

Podobnost mezi dvěma takovými okny určíme pomocí korelace, viz [8]. To je funkce dvou obrazů definovaná vztahem

$$\text{corr2}(A, B) = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (A_{ij} - \bar{A})(B_{ij} - \bar{B})}{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (A_{ij} - \bar{A})^2\right) \left(\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (B_{ij} - \bar{B})^2\right)}}. \quad (5.1)$$



Obrázek 5.2: Odpovídající si okna A a B při hledání posuvu mezi snímky k a $k+1$.

Zde $A = (A_{ij})$ a $B = (B_{ij})$ jsou obrazy korelačních oken ve dvou sousedních snímcích, $A_{ij}, B_{ij} \in \{0, 1, \dots, 255\}$,

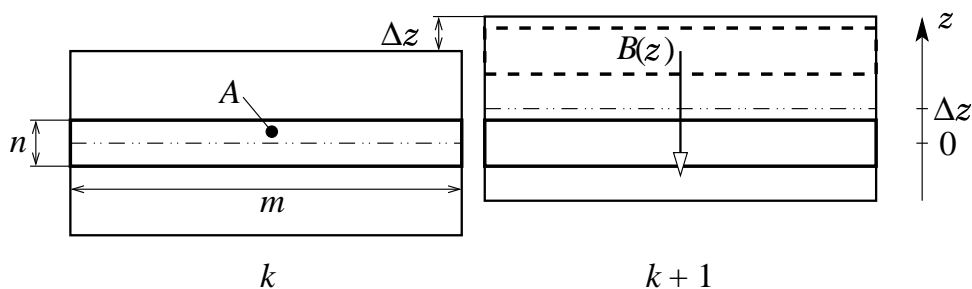
$$\bar{A} = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n A_{ij}}{mn}, \quad \bar{B} = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n B_{ij}}{mn}$$

a m, n jsou rozměry korelačního okna. Korelace má tím větší hodnotu, čím jsou si obrazy A a B podobnější.

Abychom zvýšili pravděpodobnost úspěšného nalezení posuvu ve směru osy z mezi dvěma sousedními panoramatickými snímky, volili jsme nejprve šířku korelačních oken m přes celou šířku jednotlivých snímků. O výhodnější volbě korelačních oken pojednáme v odstavcích 5.4 a 5.5. Volba výšky n a pozice pevného okna A bude diskutována v odstavci 7.1.

5.2 Určení posuvu ve směru z – algoritmus I

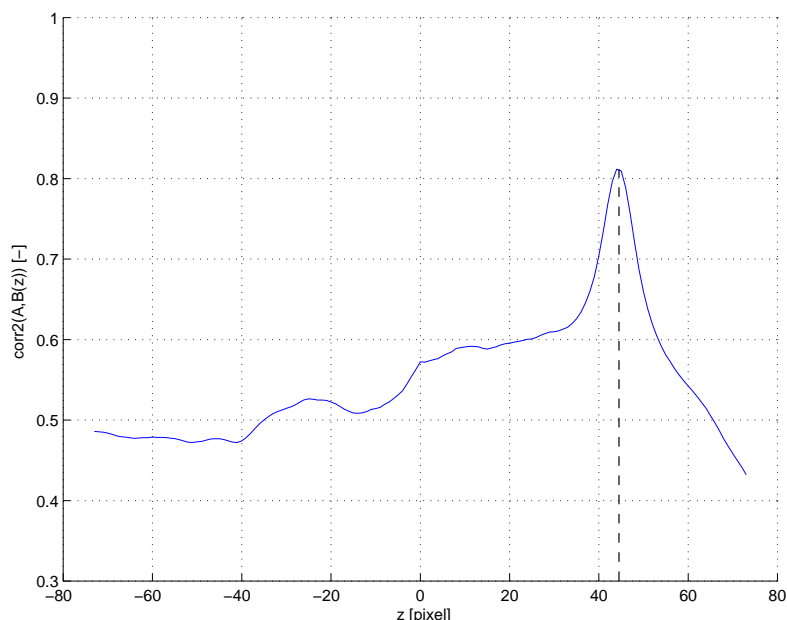
Při zjišťování vzájemného posuvu dvou sousedních panoramatických snímků ve směru osy z pohybujeme ve druhém snímku korelačním oknem B . Pro všechny jeho pozice následně určíme podle vztahu (5.1) hodnotu korelace s oknem A z prvního snímku, viz obrázek č. 5.3.



Obrázek 5.3: Postup algoritmu I při hledání vzájemného posuvu mezi dvěma sousedními rozvinutými panoramatickými snímky.

Tímto postupem získáme korelační funkci. Posuv mezi oběma snímky odpovídá maximu této funkce. Příklad takové korelační funkce je na obrázku č. 5.4.

Předchozí výpočet není nutné provádět v každé barevné složce obrazu zvlášť. Stačí, když korelační funkci určíme pouze v šedotónovém obraze. Je to rychlejší a pro naši aplikaci to postačuje.



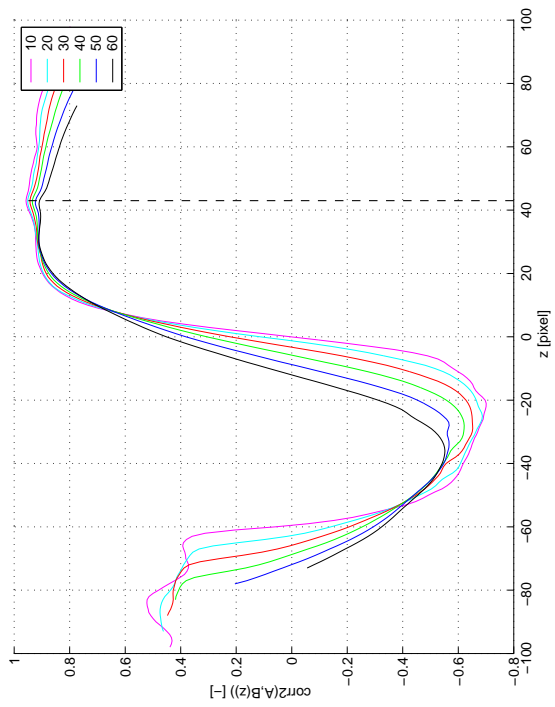
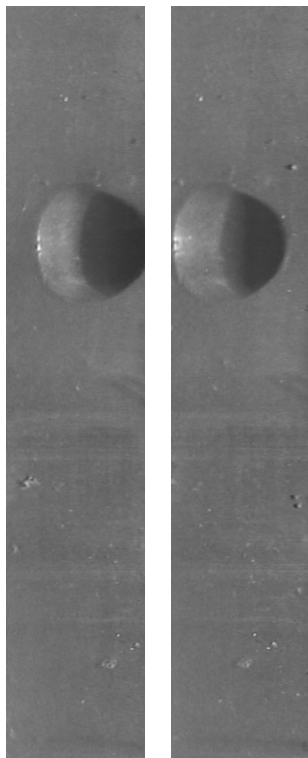
Obrázek 5.4: Příklad korelační funkce.

5.3 Vliv 3D objektů na korelační funkci

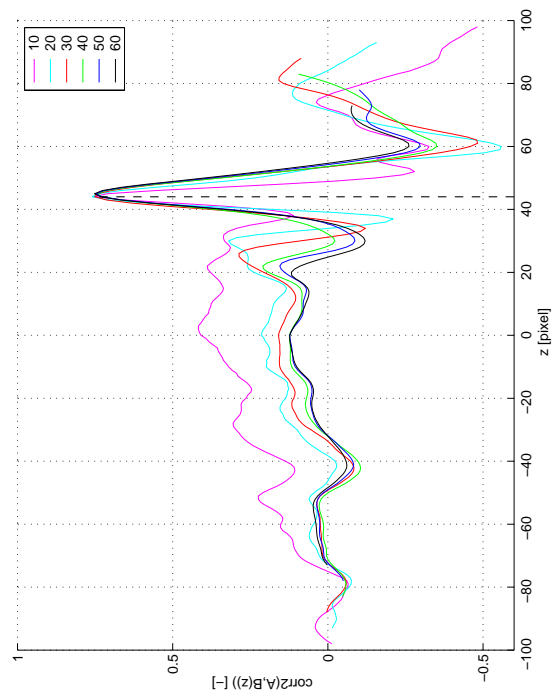
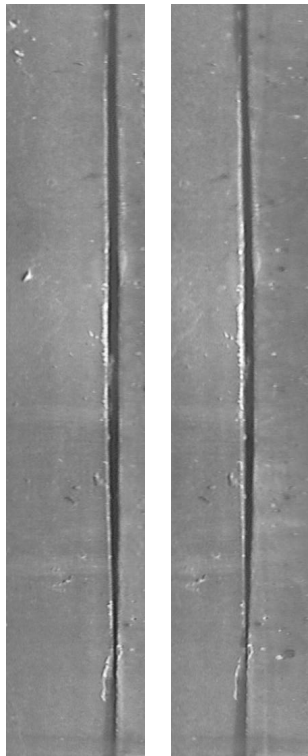
Napojování panoramatických snímků předpokládá, že vnitřní povrch kanalizačního potrubí je pouze dvourozměrná plocha. V potrubí se však vyskytují i trojrozměrné objekty. Jsou jimi především odbočky a spoje mezi jednotlivými kanalizačními trubkami. Nalezená korelační funkce je takovými objekty při určování vzájemného posuvu dvou sousedních panoramatických snímků ovlivněna.

Zejména obraz odbočky výrazně působí na průběh korelační funkce. Osvětlení vnitřního povrchu kanalizačního potrubí robotem a úhel pohledu panoramatické kamery na odbočku vytváří v obraze kamery v místě odbočky rozdílné obrazy v každé pozici inspekčního robota. Graf korelační funkce je potom při určování posuvu mezi dvěma snímky v blízkosti hledaného maxima příliš plochý. Průběhy korelačních funkcí v místě odbočky jsou pro různé velikosti korelačních oken znázorněny na obrázku 5.5a.

Podle našich zkušeností spoje mezi kanalizačními trubkami ovlivňují průběh korelační funkce spíše pozitivně. Díky jejich horizontálnímu charakteru v panoramatickém obraze nese široké horizontální korelační okno jednoznačnou informaci o skutečném posuvu mezi snímky. Průběhy korelačních funkcí v místě spoje dvou kanalizačních trubek jsou pro různé velikosti korelačních oken znázorněny na obrázku 5.5b.



a)

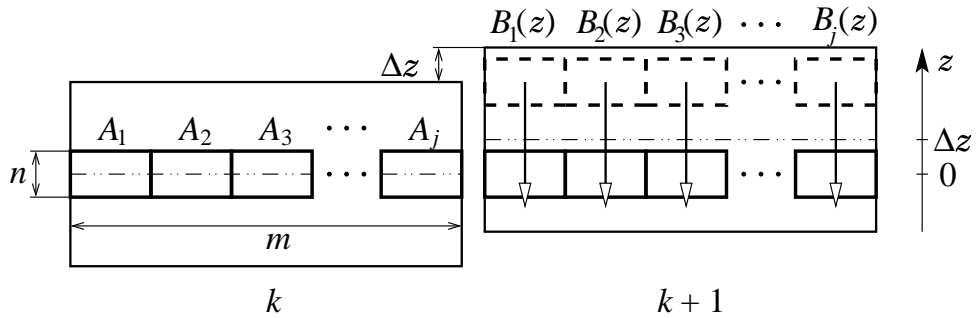


b)

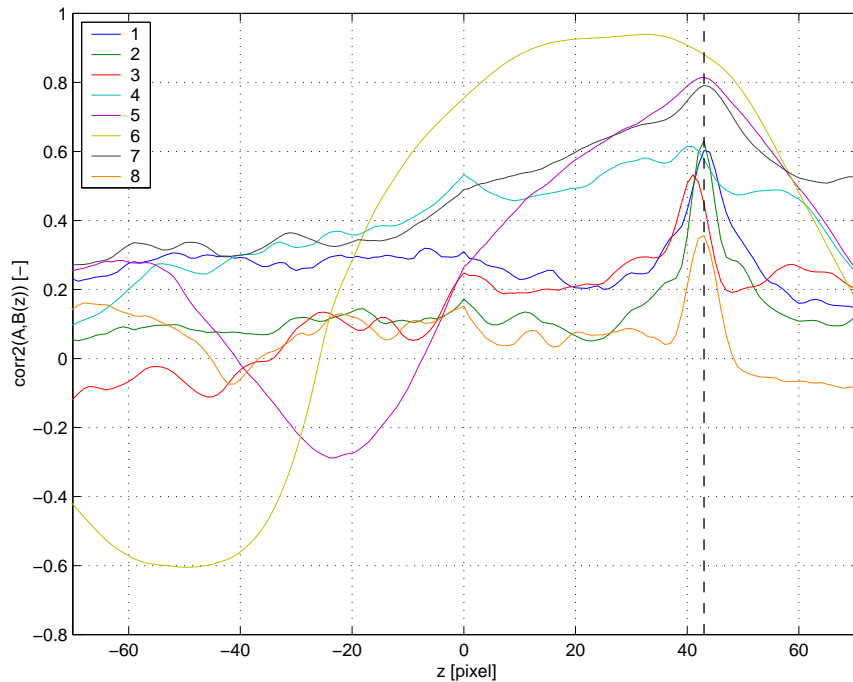
Obrázek 5.5: Průběhy korelačních funkcí pro různé velikosti korelačních oken a) v místě odbočky, b) v místě spoje dvou kanalizačních trubek.

5.4 Určení posuvu ve směru z – algoritmus II

Negativní vlivy 3D objektů na průběh korelační funkce byly odstraněny tak, že jsme jedno velké korelační okno (viz algoritmus I v odstavci 5.2) rozdělili na několik menších oken, viz obrázek č. 5.6. Korelační funkci pak určujeme pro každé z těchto oken zvlášť stejným způsobem jako v algoritmu I, tj. ve směru osy z pohybujeme okna B_1, B_2, \dots, B_j podél panoramatického snímku $k + 1$ a určujeme korelaci s pevně zvolenými okny A_1, A_2, \dots, A_j ze snímku k .



Obrázek 5.6: Postup algoritmu II při hledání vzájemného posuvu mezi dvěma sousedními rozvinutými panoramatickými snímky.

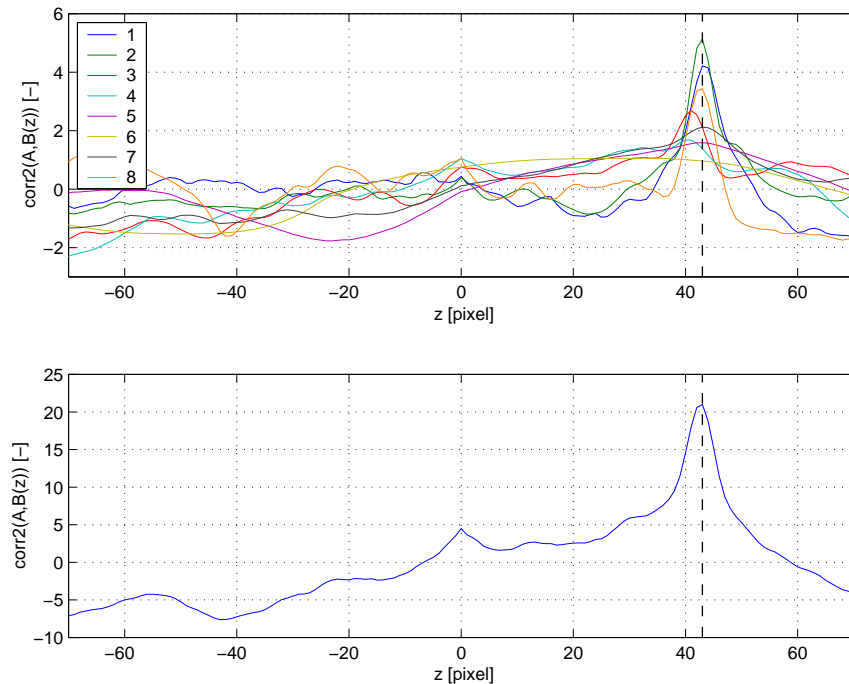


Obrázek 5.7: Průběhy korelačních funkcí pro jednotlivá korelační okna v místě odbočky při volbě výšky oken $n = 32$ a při počtu oken $j = 8$.

Na obrázku č. 5.7 je znázorněno, jak vypadají průběhy korelačních funkcí pro jednotlivá okna v místě odbočky při volbě počtu oken $j = 8$. Vidíme, že hlavně okno 6 a částečně i sousední okna 5 a 7 jsou obrazem odbočky ovlivněny. Pro ostatní okna lze maxima funkcí určit jednoznačně.

Aby bylo možné z tolika průběhů korelačních funkcí určit vzájemný posuv dvou sousedních panoramatických snímků v ose z , uvedli jsme tyto funkce nejprve do stejného měřítka. Dále bylo nutné potlačit negativní vlivy oken v místě odbočky a zvýraznit korelační funkce ostatních oken. Normovali jsme proto všechny průběhy tak, aby střední hodnota každého z nich byla $\mu = 0$ a rozptyl $\sigma = 1$. Takto upravené funkce jsme následně sečetli. Posuv mezi dvěma danými snímky byl následně určen jako maximum takto získané funkce. Odpovídající průběhy jsou znázorněny na obrázku č. 5.8.

Volba počtu oken závisí na velikosti 3D objektů v obraze. Velikost jednoho okna by měla být rozměrem srovnatelná s velikostí odbočky v panoramatickém snímku. Bude tak zajištěn dostatečný počet korelačních oken, která pak správně “hlasují” pro výsledný posuv. Šířka jednoho okna by ale měla být co největší, aby se zvýšila pravděpodobnost úspěšného nalezení posuvu tímto jednotlivým oknem. Při rozlišení, jaké v panoramatických snímcích dostáváme, se ukázalo vhodné volit počet oken $j = 8$.



Obrázek 5.8: Průběhy korelačních funkcí po jejich normalizaci (nahore) a po následném sečtení (dole) pro jednotlivá korelační okna v místě odbočky při výšce oken $n = 32$ a při volbě počtu oken $j = 8$.

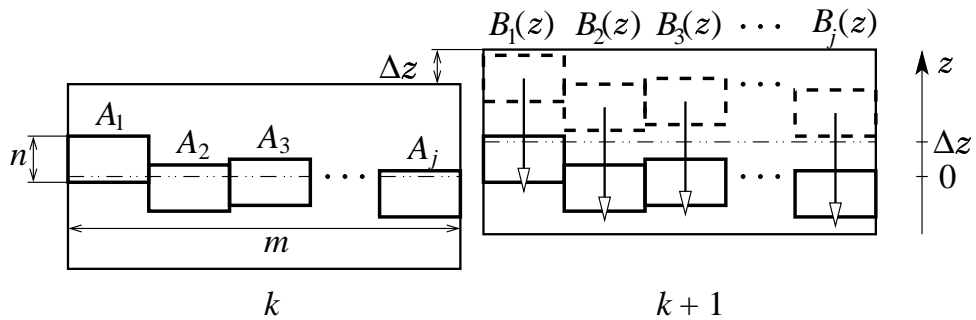
5.5 Určení posuvu ve směru z – algoritmus III

V důsledku nerovností povrchu potrubí, po kterém se inspekční robot pohyboval, docházelo k vychýlení osy kamery od osy potrubí. Následkem toho vznikaly v rozvinutých panoramatických snímcích deformace, viz odstavec 4.3, a prudké změny jasu. Takové obrazy na sebe nelze přesně napojit. Při vytváření mo-

zaiky jsme proto vycházeli alespoň ze vzájemného “průměrného” posuvu mezi jednotlivými snímky.

Korelační funkce každého z oken mohou mít díky deformacím maxima v různých bodech. Průměrný posuv určuje algoritmus II (viz odstavec 5.4) tak, že sečte jednotlivé korelační funkce a nalezne maximum součtu. Tento postup však nedával vždy dobré výsledky.

Algoritmus III se liší od algoritmu II pouze ve způsobu, jakým rozmístíme jednotlivá korelační okna. Nevolíme je již v jedné linii, ale rozmisťujeme je náhodně kolem společného středu na ose z v intervalu $[-0.5, 0.5]$ původní výšky okna, viz obrázek č. 5.9. Šířka úseku, ve kterém byla určována korelace, se nám tak oproti algoritmu II zdvojnásobila. Při výpočtech jsme proto měli k dispozici mnohem více informace o pohybu robota v ose z . Takto modifikovaný postup dával v porovnání s algoritmem II lepší výsledky hlavně v situacích, kdy docházelo k deformacím a ke změnám jasu v panoramatických snímcích.



Obrázek 5.9: Postup algoritmu III při hledání vzájemného posuvu mezi dvěma sousedními rozvinutými panoramatickými snímky.

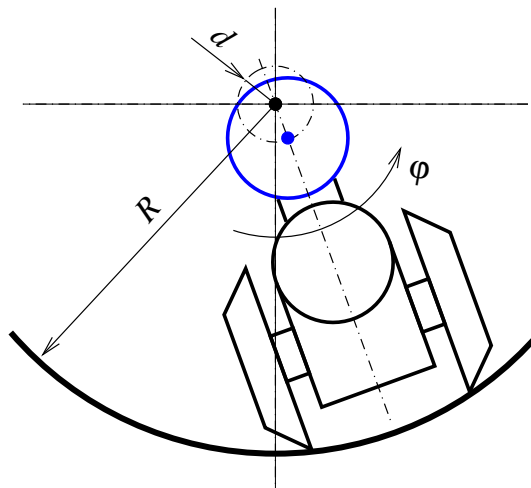
Algoritmy II a III mají přibližně stejný počet výpočetních operací. Nevýhodou jen je, že díky širšímu oknu je zkrácen interval, na kterém určujeme korelační funkce. Maximální možná vzdálenost mezi pořizemí dvou panoramatických snímků je proto omezena.

5.6 Vzájemný posuv snímků ve směru φ – algoritmus IV

Při průzkumu kanalizační sítě se inspekční robot nepohyboval jen podél osy z . Najížděl také mírně do stran, a to odpovídalo změnám v úhlu φ , viz obrázek č. 5.10. Sousední panoramatické snímky tak mohly být vzájemně posunuty i v tomto směru. Pro jejich správné napojení bylo proto třeba přidat další stupeň volnosti. Omezili jsme se však pouze na případ, kdy je osa panoramatické kamery rovnoběžná s osou kanalizačního potrubí.

K výpočtu korelační funkce jsme využili algoritmu III z předchozího odstavce. Šířka všech oken musela být ale zmenšena tak, abychom umožnili jejich pohyb i ve směru osy φ . Pro každé korelační okno zvlášť potom určíme dvourozměrnou korelační funkci v závislosti na pohybu podél osy z a φ .

Abychom mohli z tolika dvourozměrných korelačních funkcí určit vzájemný posuv mezi dvěma sousedními panoramatickými snímky v osách z a φ , uvedli

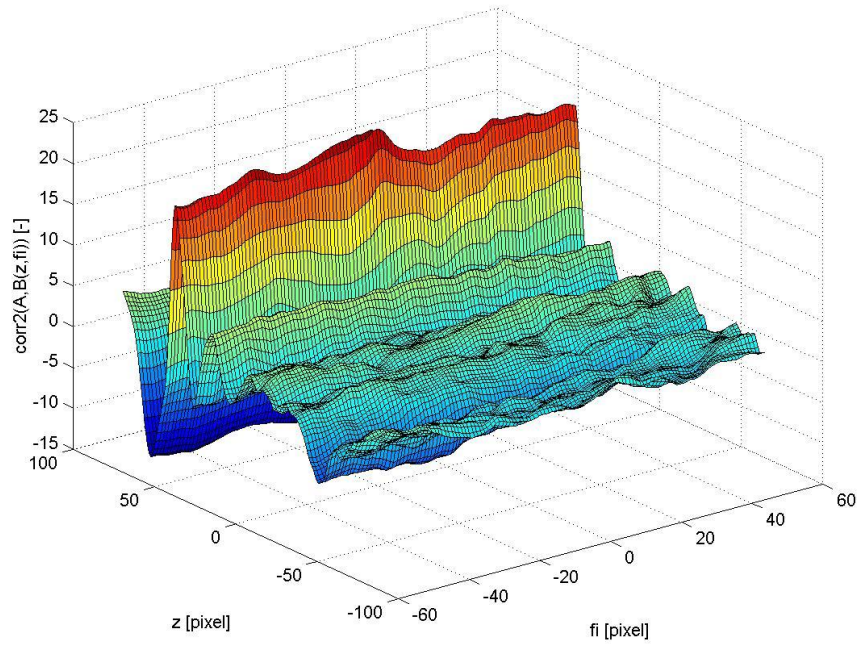


Obrázek 5.10: Posuv v úhlu φ při najetí robota do strany.

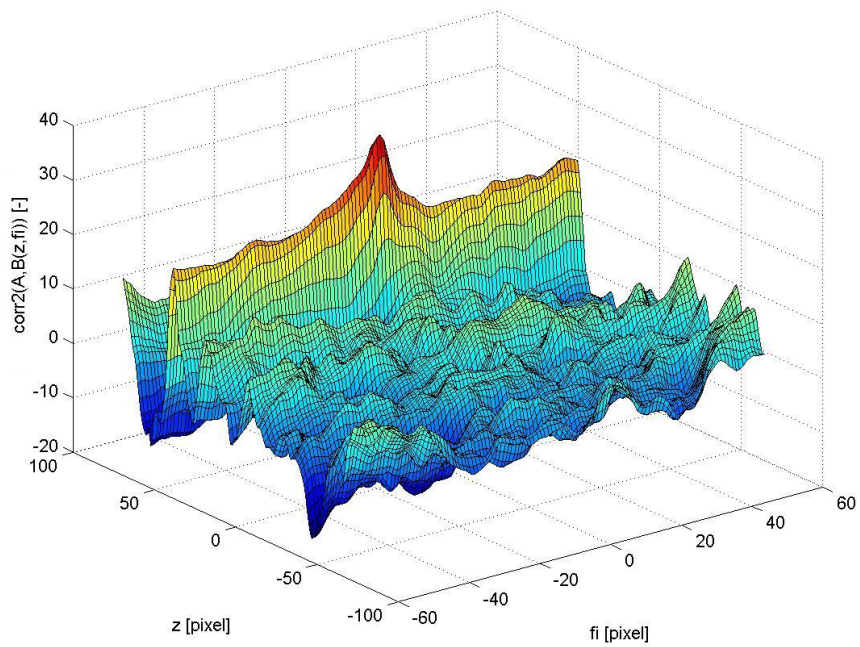
jsme je, podobně jako tomu bylo v algoritmu II, do stejného měřítka.

Pokud byla korelační funkce každého z oken normována jako funkce dvou proměnných tak, aby střední hodnota byla $\mu = 0$ a rozptyl $\sigma = 1$, nedostávali jsme vždy jednoznačný výsledek. Například v místě spoje dvou kanalizačních trubek, viz obrázek č. 5.5, nemá korelační funkce v ose φ ostré maximum, viz obrázek č. 5.11.

Ukázalo se výhodné normovat průběhy jednotlivých korelačních funkcí ve dvou na sebe kolmých směrech, tj. kdy jeden parametr držíme pevný a podél druhého provádíme normalizaci. Všechny takto upravené funkce jsme následně sečetli. Posuv mezi dvěma danými snímky byl určen opět jako maximum, tentokrát ale dvourozměrné korelační funkce, viz obrázek č. 5.12.



Obrázek 5.11: Průběh korelační funkce v místě spoje dvou kanalizačních trubek po dvou-rozměrné normalizaci.



Obrázek 5.12: Průběh korelační funkce v místě spoje dvou kanalizačních trubek po normalizaci ve dvou na sebe kolmých směrech.

6 Nerovnoměrné osvětlení a jeho korekce

V našich experimentech měl inspekční robot vlastní zdroj světla. Ten byl tvořen bodovou žárovkou a osově symetrickým hyperbolickým zrcadlem. Vnitřní povrch kanalizačního potrubí byl tak osvětlen jak přímým světlem ze žárovky, tak i odraženým světlem od zrcadla, viz odstavec 2.2.

V průběhu laboratorního experimentu vznikala díky nevhodnému upevnění hyperbolického zrcadla stín v zorném úhlu kamery. V rozvinutém panoramatickém snímku se to projevovalo ostrým jasovým přechodem podél osy z . Tímto byl výpočet korelační funkce negativně ovlivněn. Na obrázku č. 6.4 můžeme v této situaci sledovat chování jednotlivých algoritmů (viz kapitola 5) pro určení vzájemného posuvu dvou snímků. Je zřejmé, že hodnoty korelační funkce jsou značně ovlivněny v oblasti, která odpovídá nulovému posuvu právě podél osy z . To bylo způsobeno shodnou pozicí jasového přechodu v obou panoramatických snímcích. Korelace určená podle vztahu (5.1) zde reagovala na dominantní charakter stínu. V některých situacích tak nebylo možné určit skutečný posuv snímků pouze jako globální maximum korelační funkce.

Vhodnějším upevněním hyperbolického zrcadla jsme stín posunuli mimo zorný úhel kamery. V panoramatickém snímku tak podél osy z dále žádný ostrý jasový přechod nevznikal. Po této korekci osvětlení byla již hledaná maxima korelačních funkcí určena ve většině případů správně. Na obrázku č. 6.6 je znázorněno chování jednotlivých algoritmů při určování vzájemného posuvu dvou sousedních snímků po korekci upevnění hyperbolického zrcadla.

Při měření v terénu se inspekční robot nenacházel v ose kanalizačního potrubí. Některá část vnitřního povrchu potrubí tak byla osvětlena více a některá méně. V zorném úhlu robota to opět vytvářelo nerovnoměrné osvětlení, tentokrát však ve směru φ . Tento efekt měl rušivý vliv spíše na vnějšího pozorovatele.

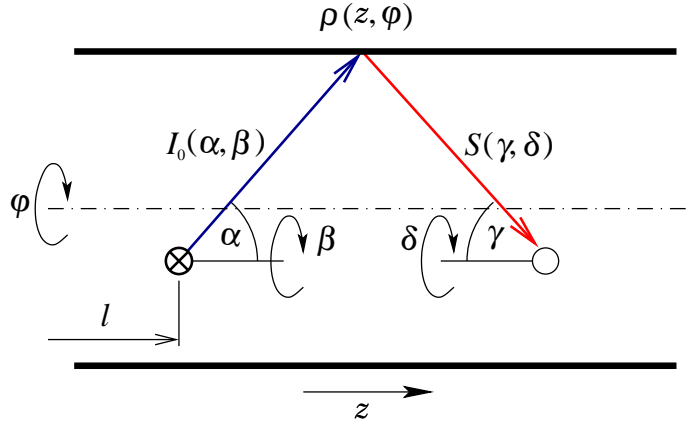
Výše popsané skutečnosti byly v obou případech způsobeny nerovnoměrným osvětlením vnitřního povrchu kanalizačního potrubí inspekčním robotem. Ve všech panoramatických snímcích se to projevilo stejnou jasovou mapou. Bylo proto vhodné jednotlivé snímky jasově korigovat.

6.1 Korekce jasovou mapou

Předpokládejme pohyb inspekčního robota kanalizačním potrubím pouze ve směru osy z . Ostatní parametry, které určují jeho polohu, jsou pevné. Intenzita světla $I(\bar{z}, \bar{\varphi}, l)$, kterou registrujeme v panoramatickém snímku v bodech o souřadnicích $\bar{z}, \bar{\varphi}$, závisí na poloze l robota podél osy z , viz obrázek č. 6.1. Lze ji stanovit podle vztahu

$$I(\bar{z}, \bar{\varphi}, l) = I_0(\alpha, \beta)\rho(z, \varphi)S(\gamma, \delta), \quad (6.1)$$

kde $\alpha = \alpha(\bar{z}, \bar{\varphi})$, $\beta = \beta(\bar{z}, \bar{\varphi})$, resp. $\gamma = \gamma(\bar{z}, \bar{\varphi})$, $\delta = \delta(\bar{z}, \bar{\varphi})$, jsou úhly analogické úhlům standardních sférických souřadnic, pod kterými světlo vychází ze zdroje, resp. dopadá do kamery, pro odpovídající bod o souřadnicích $\bar{z}, \bar{\varphi}$ v obraze kamery. Dále $I_0(\alpha, \beta)$ je intenzita osvětlení, kterou vyzařuje zdroj světla, $\rho(z, \varphi)$ je odrazivost vnitřního povrchu potrubí v místě z, φ a $S(\gamma, \delta)$ je citlivost kamery.



Obrázek 6.1: Schematické znázornění osvětlení potrubí robotem. Legenda: $I_0(\alpha, \beta)$ je intenzita osvětlení, kterou vyzařuje zdroj světla, $\rho(z, \varphi)$ je odrazivost vnitřního povrchu potrubí v místě z, φ a $S(\gamma, \delta)$ je citlivost kamery.

Z transformace popsané vztahy (4.17) a (4.18) je možné psát

$$\varrho(\bar{z}, \bar{\varphi}, l) = \rho(z, \varphi). \quad (6.2)$$

Osvětlení I_0 a citlivost kamery S jsou závislé pouze na $\bar{z}, \bar{\varphi}$. Redukovali jsme je proto do součinnu

$$\tilde{I}(\bar{z}, \bar{\varphi}) = I_0(\alpha, \beta)S(\gamma, \delta). \quad (6.3)$$

Vztah (6.1) se tak dosazením z (6.2) a (6.3) zjednoduší na rovnici

$$I(\bar{z}, \bar{\varphi}, l) = \tilde{I}(\bar{z}, \bar{\varphi})\varrho(\bar{z}, \bar{\varphi}, l). \quad (6.4)$$

Při výpočtu korelace (viz vztah (5.1)) dvou obrazů $I(\bar{z}, \bar{\varphi}, l_1)$ a $I(\bar{z}, \bar{\varphi}, l_2)$ se ve výsledku uplatní dvě složky. Je to odrazivost vnitřního povrchu potrubí ϱ , podle které určujeme posuv $\Delta\bar{z} = k(l_1 - l_2)$ dvou sousedních panoramatických snímků, a funkce \tilde{I} , která na l nezávisí, a proto ve všech snímcích vytváří stejnou jasovou mapu. Pro ni platí $\Delta\bar{z} = 0$.

Vliv nerovnoměrného osvětlení potrubí robotem, které vznikalo v důsledku nevhodného upevnění hyperbolického zrcadla a které je zahrnuto právě ve funkci \tilde{I} , je dobře patrný na obrázku č. 6.4. Korelační funkce zde dávala dvě lokální maxima. Jedno odpovídalo hledanému posuvu $\Delta\bar{z}$ dvou snímků a druhé stejné jasové mapě v obou snímcích.

Abychom mohli posuv dvou sousedních panoramatických snímků stanovit jako maximum korelační funkce, bylo nutné potlačit vliv \tilde{I} ve vztahu (6.4) a korelaci určovat pouze z odrazivosti ϱ .

Postupovali jsme následujícím způsobem. Vysčítáním (6.4) přes všechny snímky a vydělením počtem snímků n dostaneme

$$\frac{1}{n} \sum_{l=1}^n I(\bar{z}, \bar{\varphi}, l) = \frac{1}{n} \sum_{l=1}^n \tilde{I}(\bar{z}, \bar{\varphi})\varrho(\bar{z}, \bar{\varphi}, l).$$

Protože funkce \tilde{I} nezávisí na l , můžeme ji ze sumy vytknout. Získáme tak rovnost

$$\frac{1}{n} \sum_{l=1}^n I(\bar{z}, \bar{\varphi}, l) = \tilde{I}(\bar{z}, \bar{\varphi}) \frac{\sum_{l=1}^n \varrho(\bar{z}, \bar{\varphi}, l)}{n}$$

a úpravou dále dostaneme

$$\frac{1}{n} \sum_{l=1}^n I(\bar{z}, \bar{\varphi}, l) = \tilde{I}(\bar{z}, \bar{\varphi}) \bar{\varrho}(\bar{z}, \bar{\varphi}).$$

Zde $\bar{\varrho}(\bar{z}, \bar{\varphi})$ představuje střední hodnotu odrazivosti povrchu potrubí v bodě $\bar{z}, \bar{\varphi}$ panoramatického snímku. Při pohybu inspekčního robota v potrubí stejného materiálu je $\bar{\varrho}$ konstantní.

Funkci \tilde{I} lze následně určit jako

$$\tilde{I}(\bar{z}, \bar{\varphi}) = \frac{\sum_{z=1}^n I(\bar{z}, \bar{\varphi}, l)}{n \bar{\varrho}(\bar{z}, \bar{\varphi})}. \quad (6.5)$$

Dosazením (6.5) do (6.4) a úpravou dostaneme hledanou odrazivost vnitřního povrchu potrubí

$$\varrho(\bar{z}, \bar{\varphi}, l) = \bar{\varrho}(\bar{z}, \bar{\varphi}) \frac{I(\bar{z}, \bar{\varphi}, l)}{\frac{1}{n} \sum_{l=1}^n I(\bar{z}, \bar{\varphi}, l)}. \quad (6.6)$$

Vyjdeme-li ze vztahu (6.6), lze hodnotu každého pixelu v jednotlivých panoramatických snímcích korigovat podle

$$a_{i,j} = k \frac{I_{i,j}}{\tilde{I}_{i,j}}. \quad (6.7)$$

Zde $a_{i,j} \in \{0, 1, \dots, 255\}$ je hodnota intenzity pixelu o souřadnicích (i, j) ve výsledném korigovaném obraze, k je konstanta, která určuje jas korigovaného snímku (byla stanovena experimentálně a v našich měřeních jsme ji typicky volili z intervalu $[0.3, 0.7]$), $I_{i,j} \in \{0, 1, \dots, 255\}$ je hodnota intenzity v příslušném pixelu původního snímku a $\tilde{I}_{i,j} \in \{0, 1, \dots, 255\}$ je hodnota intenzity příslušného pixelu jasové mapy.

Korekci jsme provedli pro všechny tři barevné složky RGB pomocí stejné jasové mapy, abychom neporušili poměr zastoupení jednotlivých barev v obraze.

6.2 Získání jasové mapy

Za předpokladu, že panoramatická kamera robota zůstane čistá, stačí takovou mapu určit pouze jednou. Všechny snímky pořízené kamerou by se podle této mapy následně korigovaly. Robota by tak bylo možné před každým měřením zkalibrovat, např. v rovnoměrně zbarvené šedivé trubce.

V našem experimentu jsme jasovou mapu stanovili z šedotónových panoramatických snímků. Každý pixel této mapy byl vypočten jako medián ze všech



a)

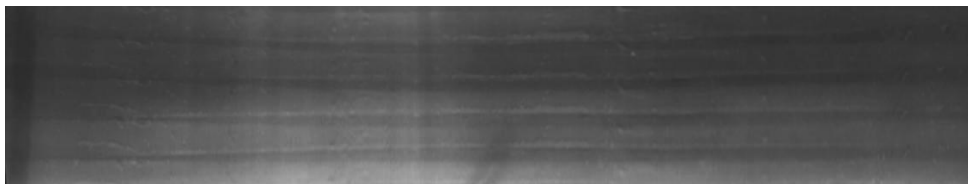


b)

Obrázek 6.2: Jasová mapa určená jako medián a) před korekcí, b) po korekci upevnění hyperbolického zrcadla.

pixelů na stejné pozici přes všechny šedotónové snímky. Abychom z jasové mapy dále odstranili šum, filtrovali jsme takto získanou mapu filtrem typu dolní propust. Příklady jasových map jsou na obrázku č. 6.2. Nevýhodou tohoto řešení byla hlavně velká paměťová náročnost výpočtu mediánu.

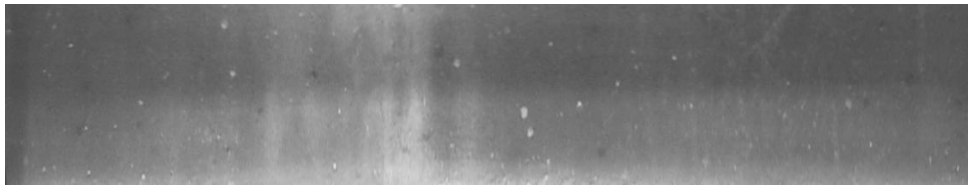
Kdyby se jasová mapa určovala podobným způsobem, ale pouze jenom jako průměr intenzit pixelů přes všechny snímky, objeví se v ní řada nežádoucích efektů, viz horizontální pruhy způsobené spoji mezi potrubím na obrázku č. 6.3. Takové pruhy by se dále projevíly i v korigovaných obrazech, což bylo nežádoucí.



Obrázek 6.3: Jasová mapa určená jako průměr.

6.3 Průběhy korelační funkce

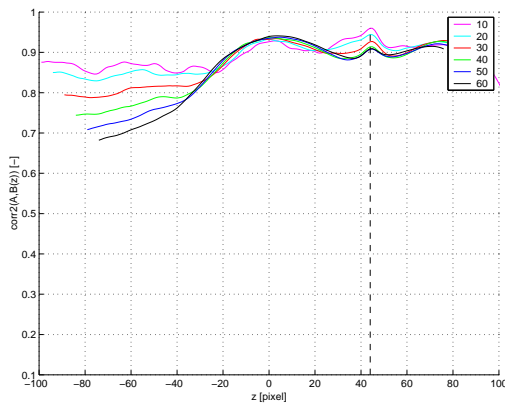
Na obrázcích 6.4, 6.5 a 6.6, 6.7 jsou znázorněny průběhy korelačních funkcí vypočtené jednotlivými algoritmy podle kapitoly 5. V prvním případě byly panoramatické snímky pořízeny v laboratoři v kameninové kanalizační trubce o průměru 250 mm a to před korekcí upevnění hyperbolického zrcadla. V případě druhém jsme panoramatické snímky pořídili v terénu po korekci upevnění hyperbolického zrcadla v betonovém kanalizačním potrubí o průměru 300 mm. Pro srovnání je v obou případech uveden výsledný průběh korelačních funkcí jak před korekcí pomocí jasové mapy tak i po ní. Z obrázků je patrné, že po korekci panoramatických snímků může být jejich skutečný vzájemný posuv určen jako globální maximum korelační funkce.



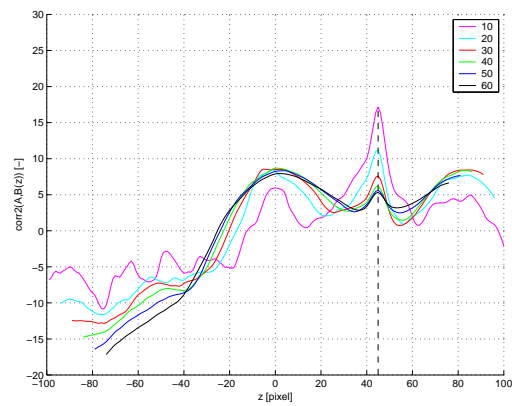
$k + 1$



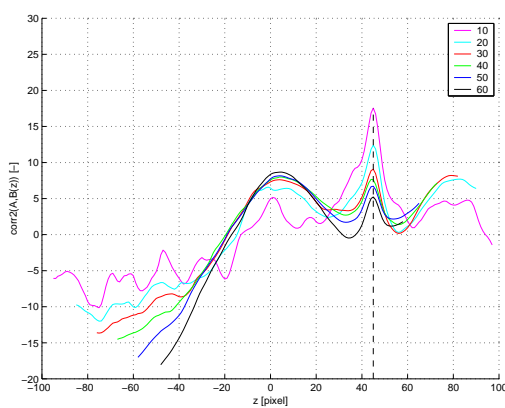
k



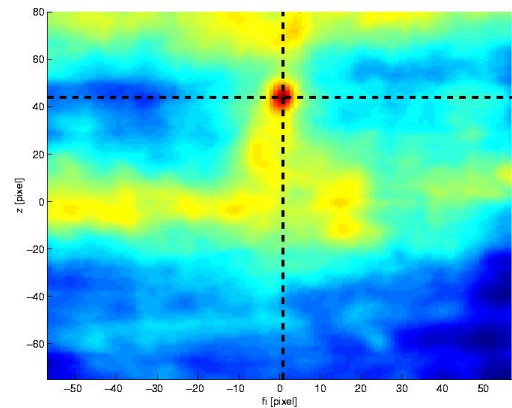
Algorithmus I



Algorithmus II

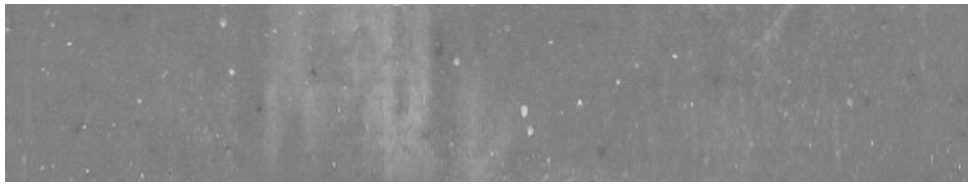


Algorithmus III



Algorithmus IV

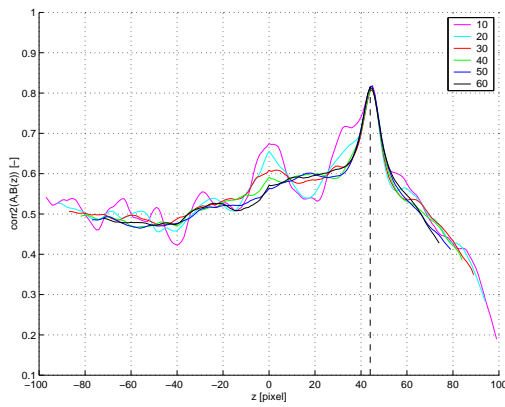
Obrázek 6.4: Ukázka průběhů korelačních funkcí vypočtených jednotlivými algoritmy podle kapitoly 5 pro různé velikosti korelačních oken. Snímky jsou pořizeny v laboratoři v kameninovém potrubí o průměru 250 mm před korekcí upevnění hyperbolického zrcadla.



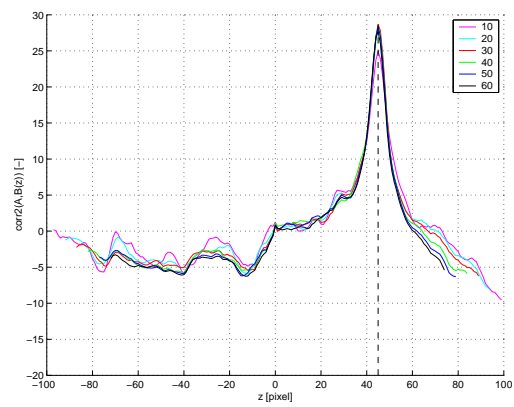
$k + 1$



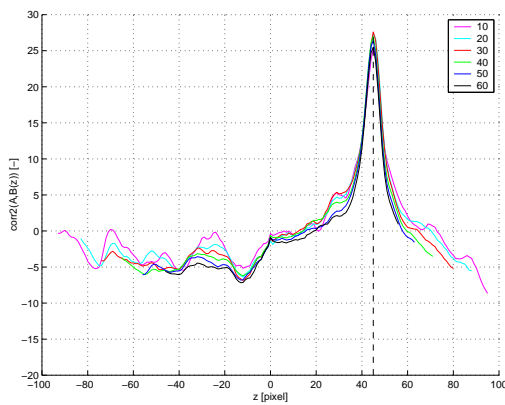
k



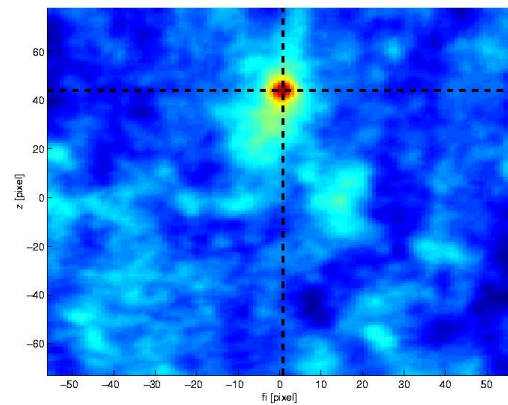
Algorithmus I



Algorithmus II

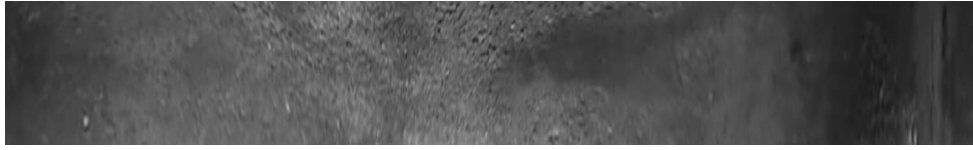


Algorithmus III

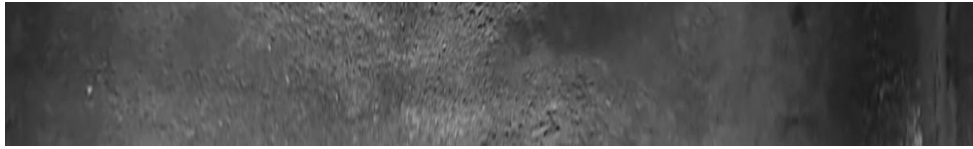


Algorithmus IV

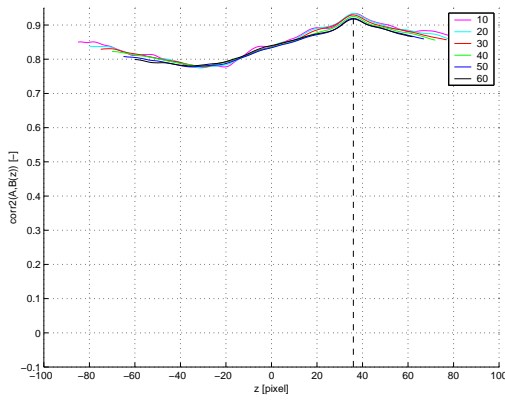
Obrázek 6.5: Ukázka průběhů korelačních funkcí vypočtených jednotlivými algoritmy podle kapitoly 5 pro různé velikosti korelačních oken. Snímky jsou korigovány jasovou mapou a byly pořízeny v laboratoři v kameninovém potrubí o průměru 250 mm před korekcí upevnění hyperbolického zrcadla.



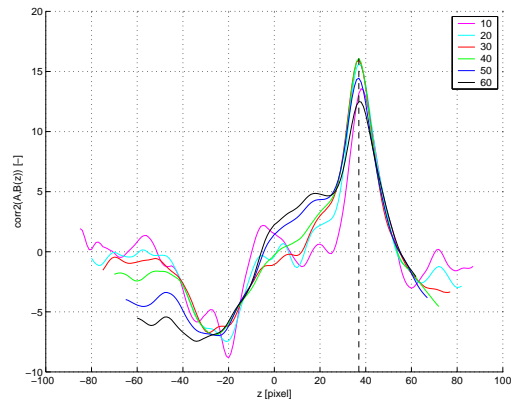
$k + 1$



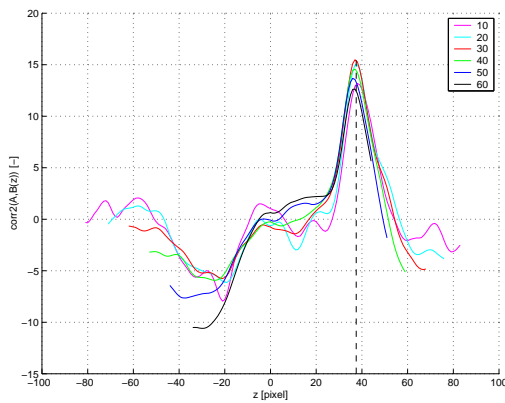
k



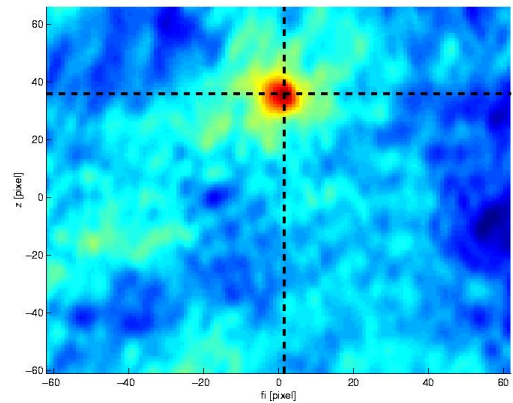
Algorithmus I



Algorithmus II

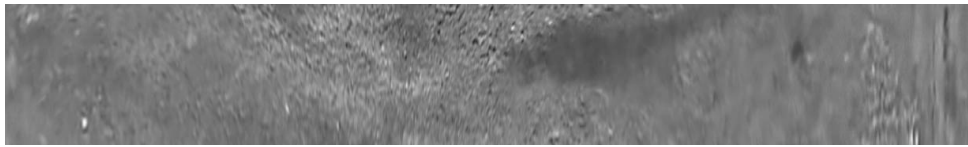


Algorithmus III

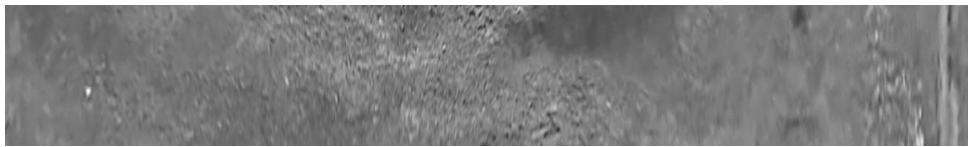


Algorithmus IV

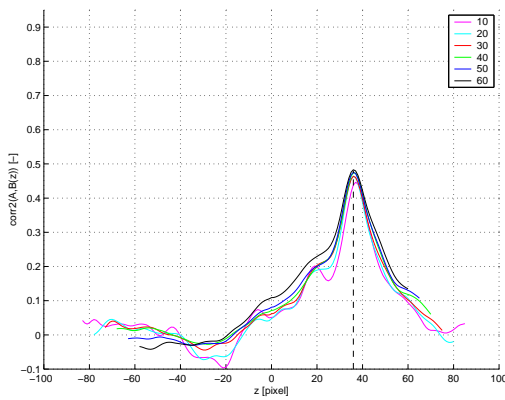
Obrázek 6.6: Ukázka průběhů korelačních funkcí vypočtených jednotlivými algoritmy podle kapitoly 5 pro různé velikosti korelačních oken. Snímky jsou pořízeny v betonovém potrubí o průměru 300 mm po korekci upevnění hyperbolického zrcadla.



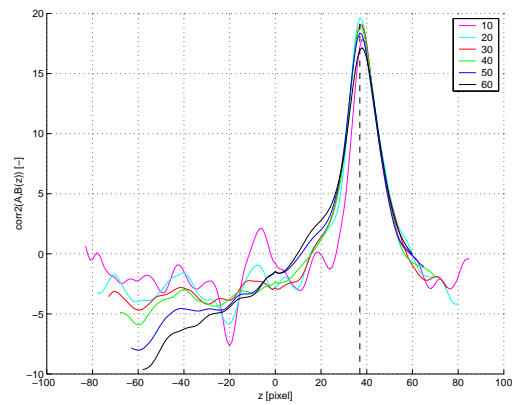
$k + 1$



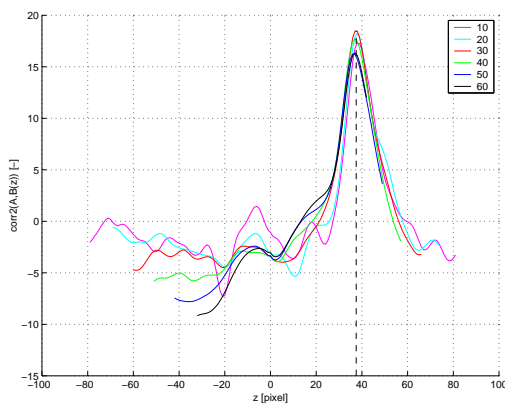
k



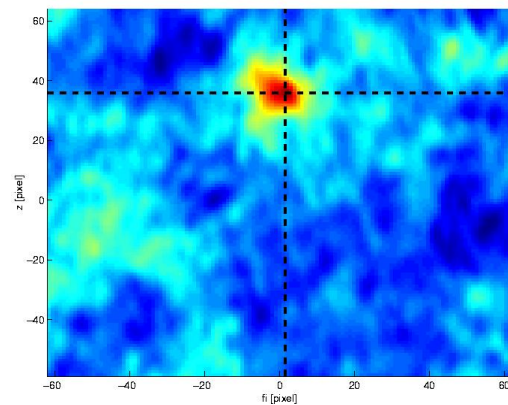
Algorithmus I



Algorithmus II



Algorithmus III



Algorithmus IV

Obrázek 6.7: Ukázka průběhů korelačních funkcí vypočtených jednotlivými algoritmy podle kapitoly 5 pro různé velikosti korelačních oken. Snímky jsou jasově korigovány a byly pořízeny v betonovém potrubí o průměru 300 mm po korekci upevnění hyperbolickeho zrcadla.

7 Algoritmus napojování snímků

K vytváření mozaiky vnitřního povrchu kanalizačního potrubí bylo možné přistoupit až po korekci panoramatických snímků jasovou mapou, viz kapitola 6, a po určení jejich vzájemného posuvu ve směru z a φ , viz kapitola 5.

7.1 Volba velikosti a pozice korelačního okna

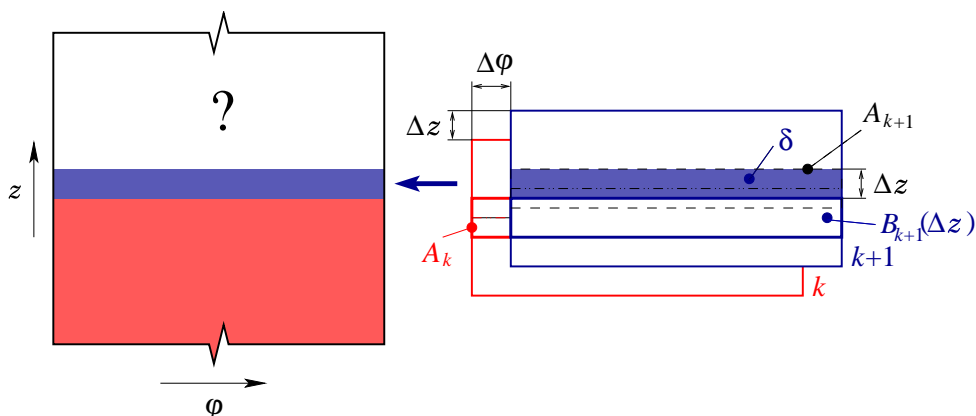
Pozici pevného korelačního okna A volíme v té části obrazu, do které je zobrazen kolmý pohled panoramatické kamery na stěnu potrubí. Důvodem je mj. nejmenší zkreslení odrazu.

V algoritmech I – IV (viz kapitola 5) jsme nejlepší výsledky dosahovali při volbě výšky korelačního okna $n = 16$, případně $n = 32$. Při volbě menších oken nemají korelační funkce vždy zcela hladký průběh a vykazují značné oscilace. Velká korelační okna dávají mnohem hladší průběhy. Jsou však výpočetně náročnější, a to zpomaluje rychlost určení posuvu dvou snímků. Pohyb inspekčního robota je navíc omezen díky kratšímu intervalu, na kterém je možné korelační funkci určit.

7.2 Pohyb inspekčního robota pouze jedním směrem

Při pohybu inspekčního robota pouze jedním směrem byla situace zjednodušena tím, že se nová data mohla připojovat až na konec doposud rekonstruované části obrazu kanalizačního potrubí.

Hodnota Δz určuje vzájemný posuv dvou sousedních snímků ve směru osy z a $\Delta\varphi$ posuv ve směru osy φ . Vertikální velikost nových dat, která chceme připojit k doposud vytvořené mozaice, odpovídá hodnotě Δz . Horizontální velikost těchto dat jsme volili v celé šířce panoramatického snímku. Oblast, ze které data vybíráme, byla volena těsně nad nalezeným korelačním oknem B , viz vyšrafovaná oblast δ na obrázku 7.1. Tento úsek se nacházel v blízkosti kolmého pohledu kamery na stěnu potrubí, což nám zaručilo vyšší rozlišení a menší deformace v napojovaném obraze.



Obrázek 7.1: Připojení nových dat k již rekonstruované části kanalizačního potrubí.

Poznámka: Protože pohyb inspekčního robota byl spojitý a my jsme určovali korelační funkci v celočíselných vzdálenostech odpovídajících jednotlivým pixelům, dopustili jsme se při zařazování nových dat systematické chyby. Tato chyba měla aditivní charakter. K výslednému obrazu by proto dále bylo ještě vhodné připojit údaj o uražené vzdálenosti v potrubí určený dalším měřením, např. jako dodatečné měřítko.

7.3 Pohyb inspekčního robota oběma směry

Začne-li inspekční robot couvat, není nutné panoramatické snímky zařazovat. Mozaika vnitřního povrchu kanalizačního potrubí je v této části již vytvořena. Určovali jsme proto pouze vzdálenost, o kterou se robot posunul zpět od naposledy zařazených dat. Při pohybu robota vpřed pak pokračujeme v sestavování mozaiky od místa, kde robot začal couvat.

K určení vzdálenosti při pohybu robota zpět jsme využívali pouze informaci o posuvu mezi dvěma sousedními snímky. Díky spojitému pohybu robota a zakrouhlování při výpočtu se tak dopouštíme systematické chyby, podobně jako v odstavci 7.2. Mohlo by zde proto dojít k chybnému určení skutečného posuvu a snímek by nebyl správně zařazen.

Do budoucna by proto bylo vhodné algoritmus upravit tak, aby se při výpočtu pohybu robota vzad prováděla ještě korelace s již rekonstruovanými daty. Teprve až na základě této informace by se určoval skutečný posuv robota.

7.4 Částečné překrývání zařazovaných snímků

Algoritmus vytváření mozaiky jsme ještě upravili tak, že se zařazované panoramatické snímky vzájemně částečně překrývaly. Vyhledali se tím hlavně spoje mezi napojovanými úseky. Tuto modifikaci jsme implementovali pouze pro pohyb robota vpřed.

Tento způsob ale vyžadoval více paměti než v předešlých případech. O každém řádku bylo zapotřebí navíc uchovávat informaci, kolikrát byl který překryt. V konečné fázi jsme každý pixel v jednotlivých řádcích podělili počtem překrytí. Určil se tím vlastně aritmetický průměr.

7.5 Ukládání dat

Protože jsme předem nevěděli, jak bude výsledný rekonstruovaný obraz potrubí velký, bylo vhodné alokovat operační paměť postupně po určitých blocích. Tyto bloky je možné udržovat ve struktuře např. spojového seznamu. Jednotlivý blok se pak plnil rekonstruovanými daty a při jeho zaplnění se naalokoval blok další. Tímto postupem jsme zamezili případné defragmentaci paměti.

8 Časová náročnost algoritmu

Algoritmus pro vytváření mozaiky ze sekvence snímků pořízených panoramatickou kamerou při inspekci kanalizační sítě jsme implementovali pouze v prostředí *Matlab 5.3*. Výpočet proto trval mnohem déle, než kdybychom jej implementovali např. v C++. Níže uváděné časové údaje odpovídají době výpočtu na procesoru *AMD Athlon XP 1600+*. Časy, které byly nutné k provedení jednotlivých kroků algoritmu při vytváření mozaiky, jsou uvedeny v tabulce 8.1.

Krok algoritmu	Doba výpočtu
Čtení snímku ze souboru	50 ms
Korekce obrazu jasovou mapou	290 ms
Převod barevného obrazu na šedotónový	60 ms
Určení posuvu mezi snímky	viz odstavce 8.2, 8.3, 8.4 (100 ms – 10 s)
Zařazení snímku	méně než 0.1 ms

Tabulka 8.1: Čas potřebný k provedení jednotlivých kroků algoritmů při vytváření mozaiky.

8.1 Výpočetní složitost

8.1.1 Korekce jasovou mapou

Každý pixel v každém zpracovávaném panoramatickém snímku musel být nejprve korigován hodnotou odpovídajícího pixelu jasové mapy. Ke korekci podle vztahu (6.7) bylo nutné provést $3wh$ dělení, kde w a h určují výšku a šířku panoramatického snímku v pixelech. To odpovídá výpočetní složitosti $\mathcal{O}(wh)$.

8.1.2 Převod barevného obrazu na šedotónový

Převod barevného obrazu na šedotónový byl určen jako lineární kombinace všech tří barevných složek. V každém panoramatickém snímku bylo proto nutné provést $2wh$ sčítání a $3wh$ násobení, kde w a h určují výšku a šířku jednoho snímku v pixelech. To opět odpovídá výpočetní složitosti $\mathcal{O}(wh)$.

8.1.3 Určení posuvu mezi dvěma snímky

Posuv dvou sousedních panoramatických snímků jsme určovali pomocí korelace podle vztahu (5.1). K výpočtu jedné hodnoty korelační funkce bylo nutné provést $9mn$ sčítání, $3mn + 3$ násobení, 3 dělení a 1 odmocnění, což odpovídá výpočetní složitosti $\mathcal{O}(mn)$. Zde m a n určují výšku a šířku korelačního okna. Záleží ale na velikosti intervalu, na kterém korelaci určujeme.

Algoritmy I, II a III (viz kapitola 5) mají společné to, že se výpočet provádí pouze podél osy z . Na intervalu délky q pixelů tak musí být korelace určena q krát. Normalizaci, kterou je nutné v algoritmech II a III provést, nemá na

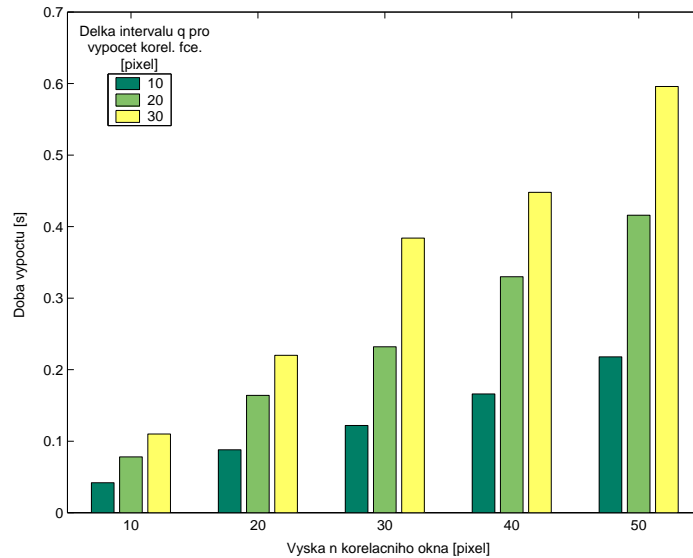
dobu výpočtu vliv. Výsledná výpočetní složitost je ve všech třech případech $\mathcal{O}(qmn)$.

V algoritmu IV určujeme dvourozměnou korelační funkci. Na intervalu délky q pixelů ve směru osy z a r pixelů ve směru osy φ proto musí být korelace určena qr krát. Normalizace průběhů jednotlivých korelačních funkcí nemá opět na dobu výpočtu vliv. Výpočetní složitost algoritmu IV je $\mathcal{O}(qrmn)$.

8.2 Známý posuv robota mezi jednotlivými snímky

Měření jsme nejprve prováděli v laboratoři. Vnitřní povrch testovacího kanalizačního potrubí, které jsme měli k dispozici, byl nasnímán v ekvidistantních úsecích vzdálených cca 1 cm. Z nasnímaných dat jsme určili, že takový pohyb robota odpovídal posuvu cca 15 pixelů (rozlišení rozvinutých panoramatických snímku bylo 1127×210 pixelů). Protože jsme věděli o kolik pixelů byly dva sousední snímky posunuty, bylo možné korelační funkci hledat pouze v blízkém okolí tohoto známého posuvu.

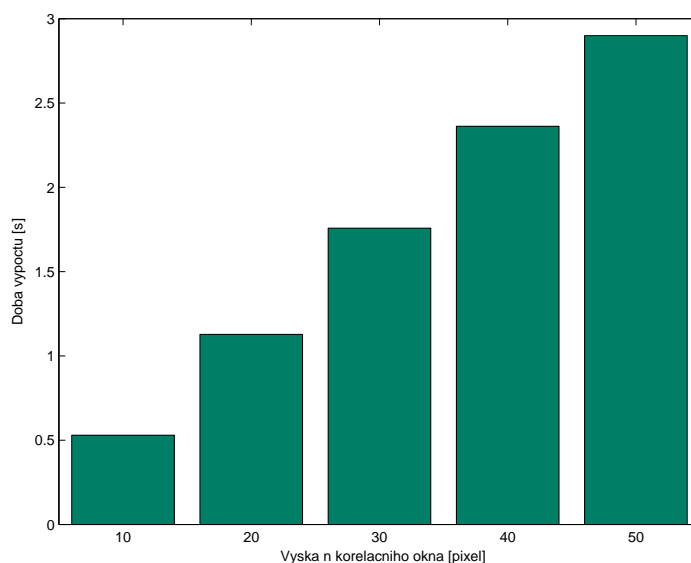
Na obrázku 8.1 můžeme vidět, jak rychle probíhal výpočet nalezení posuvu dvou sousedních panoramatických snímků pro různé velikosti n korelačních oken a pro jejich různě dlouhé posuvy podél osy z v intervalu q při použití algoritmu I.



Obrázek 8.1: Doba výpočtu korelační funkce algoritmem I při známém posuvu robota.

8.3 Neznámý posuv robota mezi jednotlivými snímky

Neznáme-li posuv inspekčního robota mezi pořízením jednotlivých panoramatických snímků, je třeba korelační funkci ve směru osy z hledat podél celého snímku. Takový výpočet je ale časově velmi náročný. Na obrázku č. 8.2 můžeme pozorovat, jak dlouho takový výpočet probíhal pro různé velikosti korelačních oken při použití algoritmu I.



Obrázek 8.2: Doba výpočtu korelační funkce algoritmem I při neznámém posuvu robota.

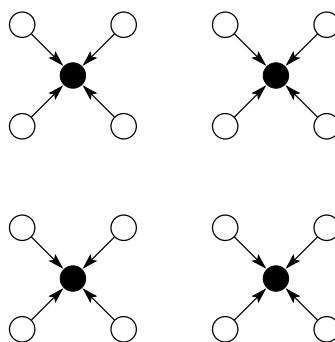
8.4 Urychlení výpočtu — M-pyramidy

Pyramidy jsou hierarchické datové struktury. Používají se při souběžné práci s obrazy v různém rozlišení.

Maticová pyramida, viz [9, str. 49 – 55], je posloupnost $\{M_1, M_2, \dots, M_L\}$ obrazů, kde M_1 odpovídá originálnímu obrazu, M_{i+1} získáme z M_i snížením rozlišení na polovinu a M_L odpovídá obrazu o velikosti jednoho pixelu.

Obraz v pyramidě, který má o stupeň menší rozlišení, má přibližně $4\times$ méně dat. Zpracování takového obrazu je proto zhruba $4\times$ rychlejší.

My jsme této datové struktury využili pro urychlení výpočtu při hledání posuvu dvou sousedních panoramatických snímků.

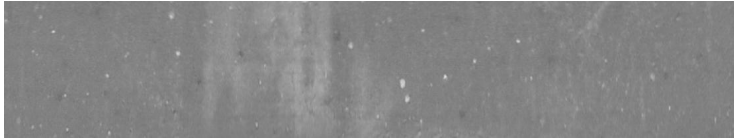
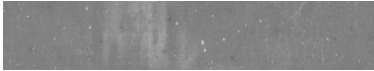








Obrázek 8.3: Snížení rozlišení pyramid.

Funkce pro práci s pyramidami nám poskytli Dr. Ing. Radim Šára a Ing. Vladimír Smutný z CMP FEL ČVUT. My jsme je pouze částečně modifikovali pro efektivnější práci v *Matlabu 5.3*. Nová hodnota intenzity pixelu na úrovni $i + 1$ je zde určena jako aritmetický průměr z okolních 4 pixelů na úrovni i , viz obrázek č. 8.3.

8.4.1 Určení posuvu mezi dvěma snímky

V pyramidách jsme uchovávali pouze šedotónové obrazy nutné pro výpočet korelační funkce. Příklad pyramidu jednoho panoramatického snímku můžeme vidět na obrázku č. 8.4.

Úroveň L	Rozlišení [pixel]	Panoramatické snímky v pyramidě
1	1127×210	
2	563×105	
3	281×52	
4	140×26	
5	70×13	
6	35×6	
7	17×3	
8	8×1	

Obrázek 8.4: Panoramatický snímek a jeho rozlišení na různých úrovních pyramidu.

Průběh celé korelační funkce je hledán pouze podél snímku s nejnižším rozlišením. Poloha maxima, která udává vzájemný posuv dvou sousedních panoramatických snímků, je potom upřesňována na úrovních pyramidu s vyšším rozlišením.

Interval, na kterém je výsledek postupně zpřesňován, stačí volit pouze v rozsahu ± 1 pixel kolem nalezeného maxima korelační funkce z úrovně pyramidu s nižším rozlišením. Pro větší spolehlivost výpočtu jsme tento interval volili v rozsahu ± 2 pixely.

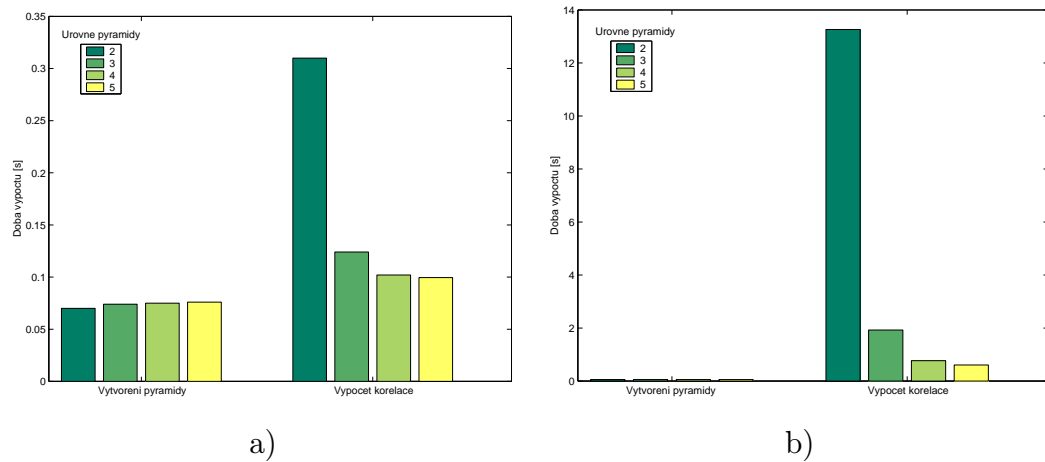
Použitím pyramidových struktur výrazně klesl počet operací při určení korelace podle vztahu (5.1). Řádově se tím zkrátila doba výpočtu ve srovnání s postupem popsáním v odstavci 8.3.

8.4.2 Volba startovací úrovně

Volba startovací úrovně závisí především na rozlišení původních snímků a na typu jejich textury. Čím je rozlišení vyšší, tím více má pyramidu úrovní. Startovací úroveň pyramidu ale záleží na tom, jak hrubý má textura vzor. Čím větší jsou její primitiva, tím nižší hladinu pyramidu lze pro start algoritmu zvolit.

V našem případě bylo nejlepších výsledků dosaženo při volbě startovací úrovně $L = 4$. Když jsme pro start algoritmu zvolili hladinu $L = 5$, byl výpočet sice o něco rychlejší, ale občas dával nespolehlivé výsledky. Úrovně s nižším

rozlišením obrazu ($L > 5$) nemělo smysl volit. Obraz zde již nenese dostatek informace a výpočet se tím výrazněji neurýchlí, viz graf na obrázku č. 8.5.



Obrázek 8.5: Doba výpočtu a) algoritmu I, b) algoritmu IV při určování posuvu dvou snímků z různých úrovní pyramid.

8.4.3 Volba velikosti korelačních oken

Abychom korelační funkci určovali ze stejné části obrazu na různých úrovních pyramid, nastavili jsme výšku n korelačních oken v poměru změny rozlišení. Při startu algoritmu z úrovně $L = 4$ bylo nejlepších výsledků dosaženo při volbě $n = 4$. S rostoucím rozlišením jsme dále na hladinách pyramid $L = 3, 2, 1$ volili výšky oken $n = 8, 16, 32$.

9 Dosažené výsledky

Na obrázcích 9.1 – 9.4 můžeme vidět výsledky rekonstrukce obrazu vnitřního povrchu kanalizačního potrubí rozvinutého do roviny. K získání těchto obrazů jsme použili výsledky předchozích kapitol 3 – 8.



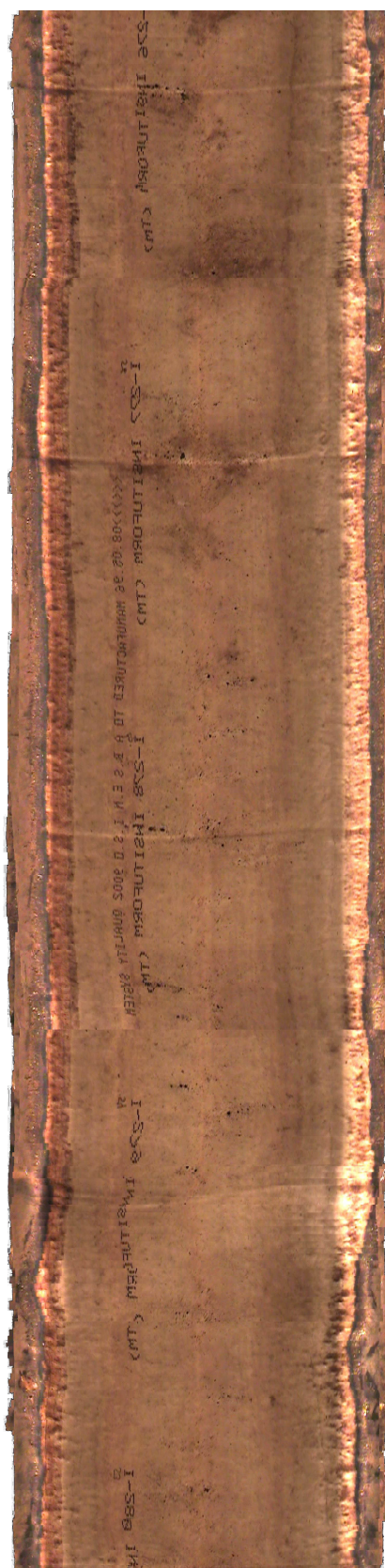
Obrázek 9.1: Výsledná mozaika - kameninové potrubí \varnothing 400 mm v délce cca 5.1 m.



Obrázek 9.2: Výsledná mozaika - betonové potrubí \varnothing 300 mm v délce cca 3.9 m.



Obrázek 9.3: Výsledná mozaika - potrubí z PVC \varnothing 400 mm v délce cca 5.1 m.



Obrázek 9.4: Výsledná mozaika - potrubí z tvrzeného PVC \varnothing 380 mm v délce cca 4.8 m.

10 Závěr

Podářilo se nám vyvinout algoritmus pro vytváření mozaiky, pomocí kterého je možné rekonstruovat obraz vnitřního povrchu kanalizačního potrubí jako jeden obraz rozvinutý do roviny napojováním dlouhé sekvence snímků pořizovaných panoramatickou kamerou umístěnou na robotu při inspekci kanalizační sítě. Algoritmus jsme implementovali v prostředí *MATLAB 5.3*. Napojení dvou panoramatických snímků trvalo přibližně 1.2 s. Dosažené technické parametry v různých průměrech kanalizačního potrubí jsou uvedeny v tabulce 10.1.

Průměr potrubí [mm]	Rozlišení v obraze [mm/pixel]	Vzdálenost mezi snímky [cm]
250	0.53	< 4
300	0.64	< 5
380	0.80	< 6
400	0.85	< 6

Tabulka 10.1: Dosažené technické parametry.

Pro rozvinutí obrazu kamery do panoramatických snímků jsme také navrhli složité nelineární zobrazení, které deformovaný obraz vnitřního povrchu kanalizačního potrubí v obraze kamery, vzniklý v důsledku rovnoběžného vyosení kamery od osy potrubí, transformovalo na nezkreslený rozvinutý panoramatický snímek. Pro tyto účely jsme vytvořili softwarový filtr do programu *VirtualDub*.

Přívodní kabely zabraňovaly panoramatické kameře sledovat povrch kanalizačního potrubí po celém vnitřním obvodu. Aby bylo možné do budoucna sledovat celých 360°, bylo by vhodné v konstrukci inspekčního robota zaměnit pořadí kamery a zrcadla. Vhodnou volbou zrcadla lze dále ušetřit softwarovou korekci nelineárně deformovaného obrazu v jeho radiálním směru.

Literatura

- [1] P. KŘÍŽEK, V. SMUTNÝ: *Mosaicing unwarped panoramic images into an infinite bitmap*. Výzkumná zpráva. CMP FEL ČVUT, katedra kybernetiky, Praha, 2002, 29 pp.
- [2] ERIK DEN DEKKER: *Robot assisted sewer inspection – Reprojection of a displaced camera in a pipe*. Výzkumná zpráva. CMP FEL ČVUT, katedra kybernetiky, Praha, 2002, 20 pp.
- [3] S. GÄCHTER: *Mirror Design for an Omnidirectional Camera with a Uniform Cylindrical Projection when Using the SVAVISCA Sensor*. Výzkumná zpráva. CMP FEL ČVUT, katedra kybernetiky, Praha, 2001, 35 pp.
- [4] S. GÄCHTER, T. PAJDLA, B. MIČUŠÍK: *Mirror Design for an Omnidirectional Camera with a Space Variant Imager*. Omnidirectional Vision Applied to Robotic Orientation and Nondestructive Testing Workshop. Budapest, August 2001.
- [5] K. REKTORYS A KOL.: *Přehled užité matematiky 2*. Prometheus, Praha, 2000.
- [6] V. HLAVÁČ, M. SEDLÁČEK: *Zpracování signálů a obrazů*. Skripta. FEL ČVUT, Praha, 2000.
- [7] M. KŘÍŽEK, P. NEITTAANMÄKI: *Finite element approximation of variational problems and applications*. Longman, Harlow, 1990.
- [8] *MATLAB 5.3 – Image Processing Toolbox Ref.*
- [9] M. ŠONKA, V. HLAVÁČ, R. BOYLE: *Image Processing Analysis and Machine Vision*. 2nd ed., PWS, Boston, 1998.
- [10] <http://www.ibak.de>
- [11] <http://www.pearpoint.com>