

DETEKCE VAD PŘI 3D TISKU BETONOVÝCH SMĚSÍ POMOCÍ METOD POČÍTAČOVÉHO VIDĚNÍ

Šír Jakub

Sekce – STROJÍRENSTVÍ

Fakulta strojní, 2. ročník

Magisterský studijní program – INOVAČNÍ A PRŮMYSLOVÉ INŽENÝRSTVÍ

Abstrakt: Tato práce se zabývá návrhem a realizací systému pro sledování kvality při 3D tisku betonových směsí pomocí metod počítačového vidění a laserové triangulace. Cílem je měřit geometrii nanesených vrstev v reálném čase a na základě porovnání s požadovanými hodnotami detekovat možné vady. Systém je implementován v jazyce Python s důrazem na modulární architekturu, která umožňuje snadné přizpůsobení různým typům zařízení a rozšíření o navazující funkce, jako je například zpětnovazební řízení tisku. Cílem je poskytnout univerzální měřicí nástroj pro monitoring kvality, který může sloužit jako základní stavební kámen pro další automatizaci procesu 3D tisku betonových směsí.

Klíčová slova: 3D tisk betonu, počítačové vidění, laserová triangulace, monitorování

1 Úvod

3D tisk betonu představuje atraktivní technologii pro automatizaci stavebních procesů a v poslední době získává stále větší popularitu. Umožňuje vytvářet betonové konstrukce nanášením směsi vrstvu po vrstvě bez nutnosti tradičního bednění, čímž otevírá nové možnosti z hlediska rychlosti výstavby, tvarové svobody a efektivity práce. Tento přístup zároveň rozšiřuje možnosti personalizace stavebních prvků a je diskutován i potenciál pro úsporu materiálu a snížení environmentální zátěže[1, 2].



Obrázek 1: Příklady vad při tisku betonu - kolaps stěn výtisku[3]

Navzdory rychlému rozvoji této technologie zůstává jedním z hlavních problémů zajištění konzistentní kvality tisku v reálném čase. Beton je materiál s proměnlivými vlastnostmi, které

se mění v závislosti na jeho složení, čase, teplotě, vlhkosti i mechanickém namáhání během extruze. Tyto faktory zvyšují riziko vzniku vad, jako jsou deformace vrstvy, nestejněměrná výška nebo šířka, případně selhání struktury. Tradičně je kvalita tisku kontrolována vizuálně nebo do-
datečně, což je nejen zdlouhavé, ale především nedostačující pro včasné odhalení odchylek[4].

S rostoucími nároky na přesnost, velikost a komplexitu tištěných konstrukcí se proto zvyšuje potřeba systémů, které umožní automatizované sledování kvality přímo během procesu tisku. Taková řešení však v současnosti buď nejsou běžně dostupná, jsou finančně náročná, nebo vyžadují specifický hardware a rozsáhlou integraci. [1, 4].

Tato diplomová práce reaguje na uvedené potřeby návrhem modulárního a prakticky použitelného monitorovacího systému, který využívá metody počítačového vidění pro detekci vad během 3D tisku betonových směsí. Cílem je navrhnout řešení, které bude schopné v reálném čase sledovat geometrii tištěné vrstvy a detekovat případné odchylky, a tím přispět ke zvýšení spolehlivosti procesu. Systém je koncipován jako otevřený a rozšiřitelný, s důrazem na využití běžně dostupných komponent a potenciál pro budoucí integraci do širších automatizačních celků.

2 Princip fungování systému

Navržený monitorovací systém slouží k detekci geometrických vad vznikajících během 3D tisku betonových vrstev. Je založen na principu bezkontaktního optického měření využívajícího aktivní triangulaci s liniovým laserem. Systém je koncipován jako autonomní jednotka pevně uchycená k tiskové hlavě, která umožňuje snímat profil vrstvy v reálném čase bez nutnosti zásahu do samotného procesu tisku.

Na povrch vrstvy je promítána úzká laserová čára, jejíž tvar se mění v závislosti na geometrii povrchu. Kamera tuto čáru snímá a na základě její deformace v obraze je možné spočítat aktuální výšku a šířku vrstvy. Výpočet probíhá kontinuálně a výsledné hodnoty jsou porovnávány s předem definovanými tolerancemi. Pokud některý z rozměrů překročí nastavený limit, systém zaznamená potenciální vadu.

Každé měření je zároveň ukládáno včetně časového údaje a pozice tiskové hlavy, což umožňuje zpětnou kontrolu průběhu tisku i následnou analýzu chování tiskového procesu. Tento koncept zároveň otevírá prostor pro budoucí využití pokročilejších metod, jako je strojové učení pro analýzu procesu nebo prediktivní řízení.

Obsluha systému probíhá přes jednoduché webové rozhraní, které umožňuje nastavovat referenční parametry, sledovat aktuální měření a přehledně zobrazovat případné odchylky. I bez zásahu uživatele je však měření zcela autonomní a probíhá paralelně s tiskem.

3 Použité komponenty a konstrukce systému

Navržená konstrukce monitorovacího systému představuje funkční a modulární řešení určené pro vývoj a ověřování metod měření při 3D tisku betonu. Systém byl navržen s důrazem na dostupnost komponent, flexibilní ladění jednotlivých částí a snadnou adaptaci na různé provozní podmínky. Čtyři hlavní komponenty – kamera, objektiv, laserový zdroj a výpočetní jednotka – společně zajišťují akvizici, zpracování a vyhodnocení dat potřebných pro sledování geometrie tištěné vrstvy v reálném čase.

Záznam obrazu a optika: Základem obrazové části systému je kamera Raspberry Pi HQ Camera, která nabízí kompatibilitu s výkonnou výpočetní platformou a zároveň umožňuje použití výměnných objektivů. Pro účely měření je použit objektiv typu C-mount s možností ma-

nuálního nastavení ostrosti i clony, což usnadňuje přizpůsobení snímání různým vzdálenostem a světelným podmínkám. Kvalitní optika je důležitá pro přesnou lokalizaci laserové čáry v obraze a tím i pro výpočet prostorových souřadnic měřených bodů.

Laserový zdroj vytváří úzkou světelnou linii pomocí cylindrické optiky, kterou sleduje kamera pod definovaným úhlem. Deformace čáry v obraze následně odpovídá tvaru povrchu vrstvy. Stabilní geometrické uspořádání kamery a laseru je klíčové pro správné fungování triangulační metody, na níž systém měření výšky a šířky vrstvy stojí.

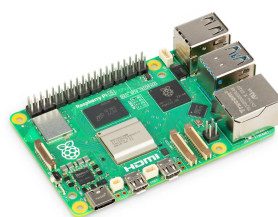
Řídící jednotka: Veškeré zpracování dat probíhá na mikropočítači Raspberry Pi 5, který zajišťuje běh softwarového systému, detekci geometrie vrstvy a případně i přenos dat. Díky kompaktním rozměrům je platforma vhodná pro integraci přímo na zařízení. K napájení je využit Power over Ethernet (PoE) modul, který umožňuje přenos energie i dat jediným kabelem, čímž výrazně zjednodušuje kabeláž a zvyšuje provozní spolehlivost.



(a) Kamera[5]



(b) Objektiv



(c) Mikropočítač [6]



(d) Laser

Obrázek 2: Hlavní hardware komponenty systému

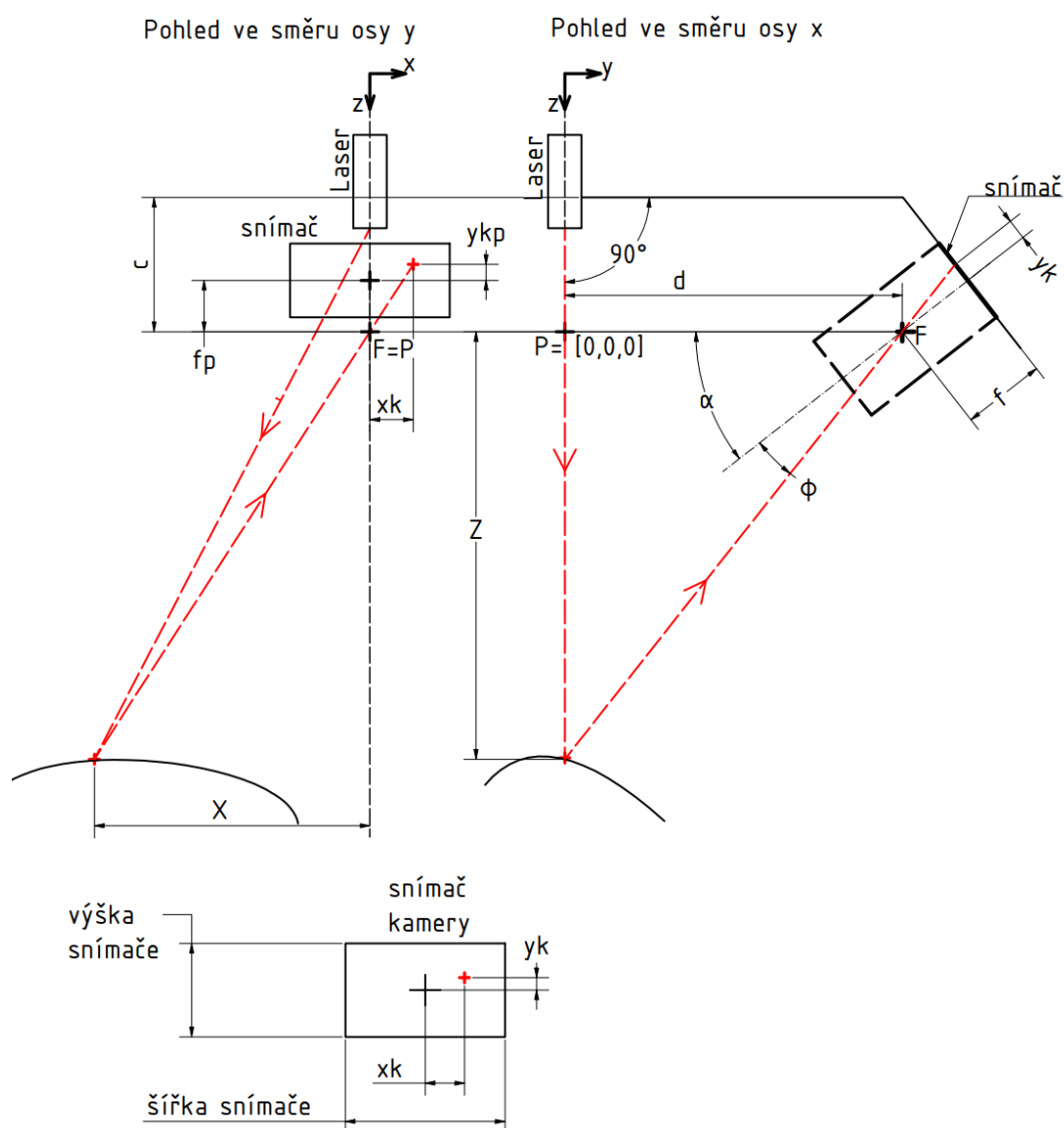
Mechanická konstrukce: je postavena z hliníkových extudovaných profilů typu 2020 a doplněna o 3D tištěné komponenty pro uchycení jednotlivých částí. Konstrukce byla navržena s důrazem na jednoduchost, snadnou montáž a možnost rychlých úprav během vývoje. Otevřené řešení bez krytování usnadňuje přístup ke všem prvkům při ladění a testování systému.



Obrázek 3: Pohled na kompletní zařízení

4 Měření rozměrů vrstvy

Princip měření: Použitá metoda vychází z principu liniové laserové triangulace, kdy je na povrch vrstvy promítán úzký světelný proužek – laserová čára – a ta je pod známým úhlem snímána kamerou. Známa geometrie uspořádání kamery a laseru umožňuje převést pozici každého bodu na čáře z obrazového souřadného systému do trojrozměrného prostoru. Výsledkem je sada 3D bodů reprezentujících řez vrstvou, ze kterého lze dále odvodit výšku i šířku naneseného materiálu. Tento přístup umožňuje získat přesné informace o tvaru vrstvy v reálném čase při zachování jednoduché konstrukce a relativně nízké výpočetní náročnosti.



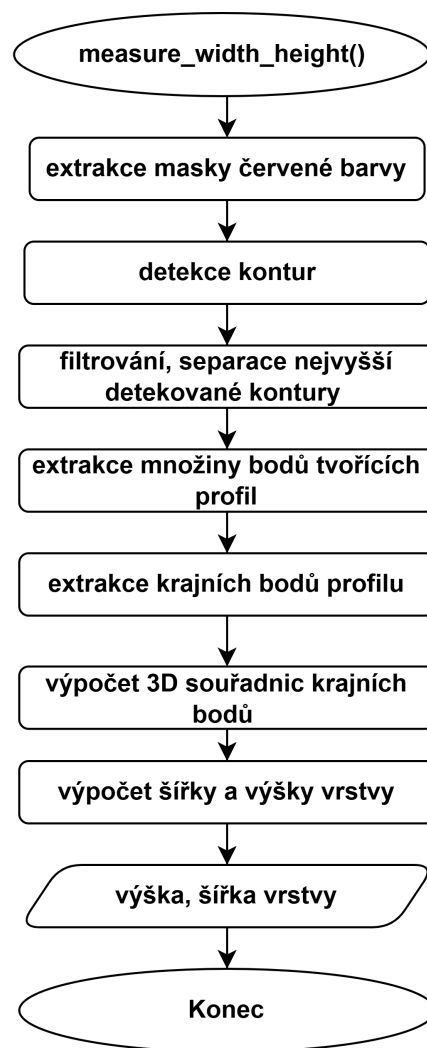
Obrázek 4: Schéma pro odvození triangulačních vztahů

Algoritmus monitorování geometrie: Při pořízení snímku kamera zachytí obraz laserové čáry promítnuté na povrch právě tištěné vrstvy. Aby bylo možné tuto čáru přesně vyhodnotit, je z obrazu vytvořena tzv. binární maska – binární obraz (viz obr. 6), ve kterém jsou zachovány pouze oblasti odpovídající barvě laseru a ostatní informace jsou potlačeny. Tento krok zjednodušuje detekci a zvyšuje spolehlivost celého systému.

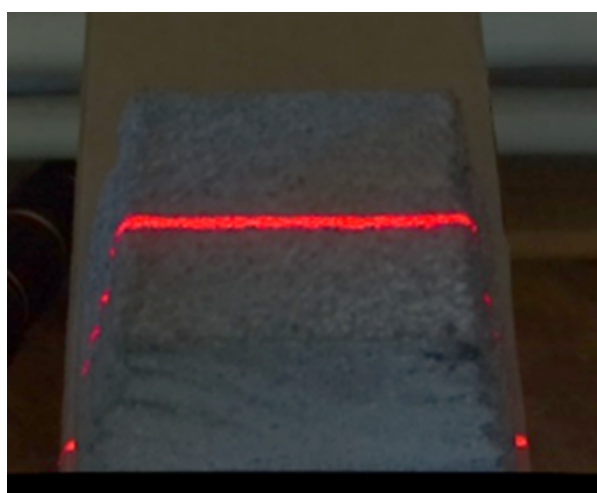
Z takto upraveného obrazu jsou vyhledány kontury, a z nich se vybere spodní hrana čáry, která v praxi nejlépe odpovídá skutečnému tvaru povrchu vrstvy. Vzhledem k optickému rozptylu laseru má čára v obraze určitou tloušťku, a právě její spodní okraj nejlépe kopíruje skutečný profil extrudovaného materiálu.

Souřadnice každého bodu této křivky jsou následně převedeny z obrazových souřadnic do reálného 3D prostoru. To je možné díky známé prostorové konfiguraci kamery a laseru – tedy jejich vzdálenosti, úhlu a ohniskové vzdálenosti. Výsledkem je přesný příčný řez vrstvy, ze kterého jsou vybrány krajní body určující šířku vrstvy, zatímco výška je určena jako průměr jejich výškových hodnot s korekcí podle referenční roviny systému.

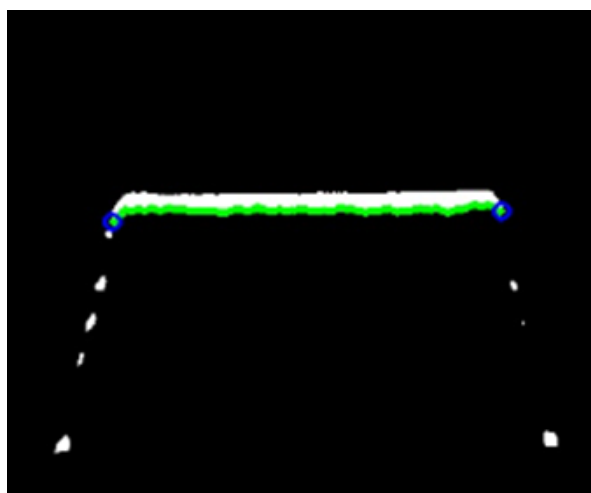
Celý tento proces probíhá automaticky a v reálném čase. Díky tomu může systém kontinuálně sledovat kvalitu tisku a včas upozornit na případné odchylky.



Obrázek 5: Měřicí algoritmus



(a) Původní obraz



(b) Detekovaná spodní hrana a krajní body laserové čáry

Obrázek 6: Vizualizace detekce laserové čáry

5 Softwarová architektura systému

Aby mohl systém v reálném čase měřit rozměry tištěné vrstvy a detekovat odchylky, bylo potřeba navrhnout efektivní a modulární softwarovou architekturu, která je dostatečně výkonná, spolehlivá a zároveň rozšiřitelná. Celý software je napsán v jazyce Python a běží na mikropočítači Raspberry Pi 5, který zajišťuje řízení všech činností zařízení – od pořizování snímků až po zpracování výsledků a zobrazení výstupu v uživatelském rozhraní(UI).

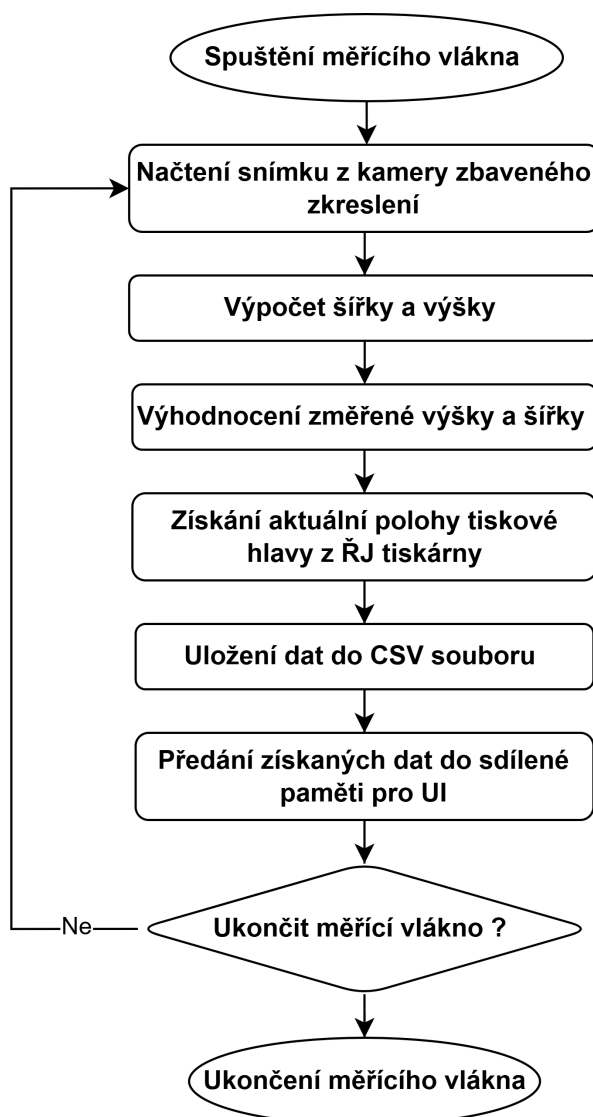
Systém je rozdělen do několika samostatných komponent, které běží paralelně. Tím je zajištěna plynulost celého chodu, a především to, že jednotlivé části (například pořizování snímků, vyhodnocení geometrie nebo komunikace s uživatelem) se navzájem neblokuji. Tento přístup také umožňuje snadno systém rozšířit o nové funkce – například pokročilejší metody vyhodnocení nebo externí komunikaci s tiskárnou.

Hlavní funkční části systému:

- **Akvizice dat** – pořizování snímků z kamery a jejich předzpracování.
- **Zpracování obrazu** – detekce laserové čáry, výpočet 3D souřadnic bodů a odvození šířky a výšky vrstvy.
- **Vyhodnocení kvality** – porovnání naměřených hodnot s tolerancemi.
- **Uživatelské rozhraní (UI)** – vizualizace výsledků a nastavení parametrů.
- **Správa režimu běhu** – provoz s webovým rozhraním nebo v režimu bez UI.

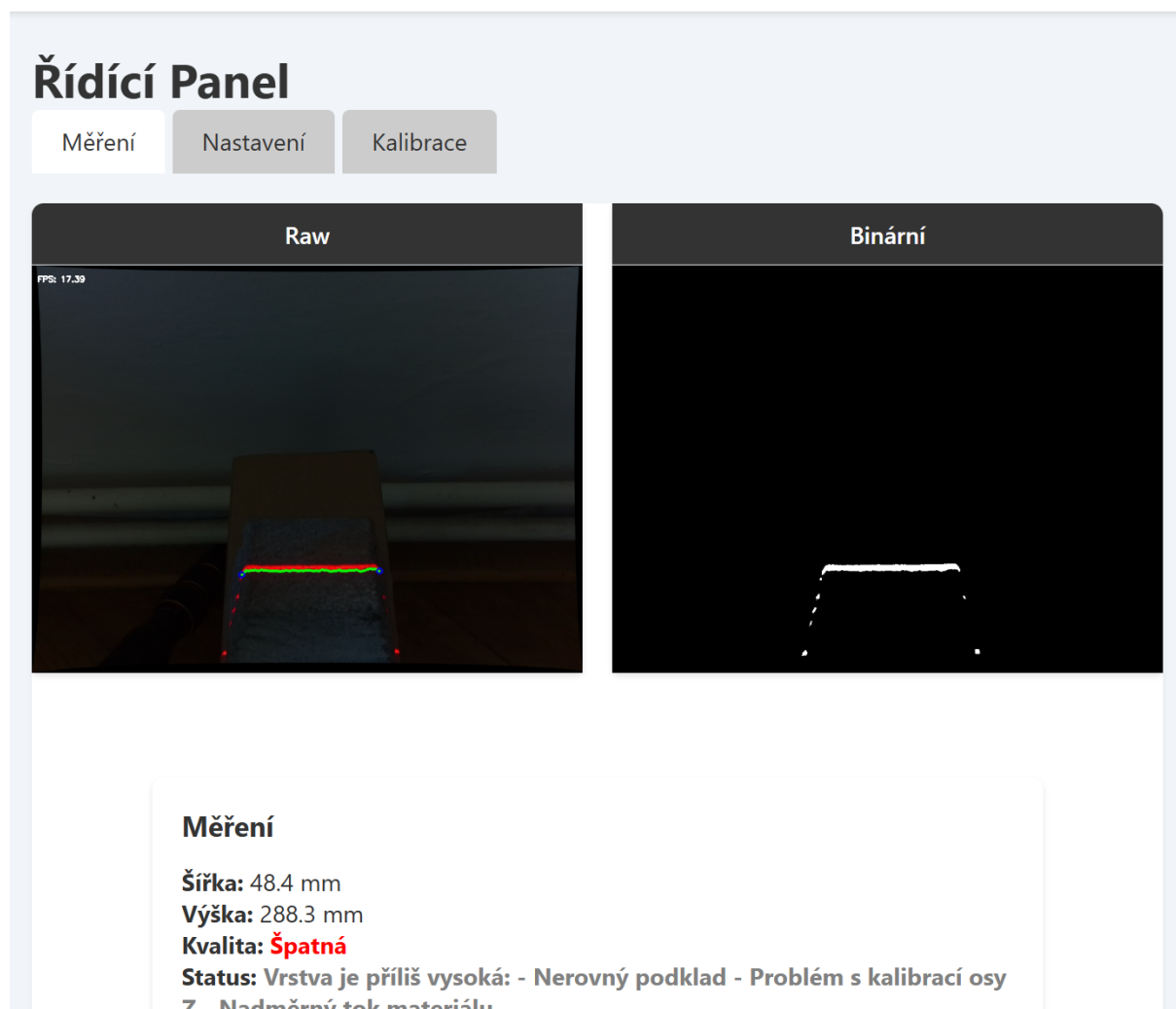
Získaná data o šířce a výšce vrstvy jsou v reálném čase ukládána spolu s časovou značkou a polohou tiskové hlavy. Zároveň poskytují zpětnou vazbu v reálném čase prostřednictvím uživatelského rozhraní.

Navržený systém je tak koncipován jako **modulární a otevřená platforma**, kterou lze dále rozvíjet dle konkrétních potřeb aplikace – jako nástroj pro kontrolu kvality, nebo základ pro plně autonomní řízení tisku.



Obrázek 7: Algoritmus hlavní měřicí smyčky

DigiBeton Scanner



Obrázek 8: Uživatelské rozhraní systému

6 Testování a výsledky

Navržený systém byl ověřován ve dvou etapách – nejprve v laboratorním prostředí a následně během reálného provozu na 3D tiskárně. Cílem bylo zhodnotit jeho funkčnost, stabilitu a schopnost spolehlivě měřit rozměry tištěné vrstvy.

Laboratorní testování probíhalo mimo tiskové zařízení a sloužilo k ověření správnosti výpočtového modelu a doladění klíčových parametrů. Systém byl umístěn na stavitelný rám a testován na vzorcích různých tvarů, které simulovaly reálný tiskový profil. Byly laděny hlavně geometrické vztahy – zejména úhel kamery, vzdálenost mezi kamerou a laserem a přepočít obrazových souřadnic na reálné.

Při testování se ukázalo, že i drobné nepřesnosti v těchto hodnotách mají významný dopad na výsledek měření. Největší chybu způsobovala nesprávně zadaná vzdálenost mezi kamerou a laserem, která musela být upravena experimentálně. Po doladění parametrů byl výstup výpočtu stabilní a odpovídal skutečnosti.

Na výsledky měření měl vliv i světelný režim okolí. Laserová čára byla nejlépe detekovatelná při nízkém a rovnoměrném osvětlení bez přímých světelných zdrojů. Optimalizace nastavení

clony a barevných prahů umožnila výrazně zlepšit kvalitu detekce a potlačit chyby způsobené přexpozicí či nedostatečným kontrastem.

Přesnost byla ověřena pomocí referenční měřky o známé šířce. Výsledky měření ukázaly odchylku do $\pm 0,2$ mm, což je vzhledem k účelu systému považováno za plně vyhovující.



(a) Umístění zařízení na tiskové hlavě



(b) Projekce čáry na tištěnou vrstvu

Testování při tisku proběhlo na experimentální tiskárně v Kloknerově ústavu ČVUT. Systém byl dočasně uchycen k rámu tiskové hlavy a sledoval průběh vrstvy při aktivním tisku. Detekce laserové čáry fungovala spolehlivě po úpravě parametrů vzhledem k tmavému odstínu čerstvého betonu. Výstupní měření šířky se pohybovalo kolem očekávané hodnoty 25 mm a odpovídalo ruční kontrole pravítkem.



(a) Detekované krajní body vrstvy



(b) Segmentovaná laserová čára

Obrázek 10: Testování na experimentální tiskárně v Kloknerově ústavu

Celý systém se při provozu choval stabilně – žádné výpadky softwaru ani chyby ve zpracování nenastaly. Obrazová akvizice, výpočet i rozhraní pracovaly plynule a opakované spuštění po přenastavení probíhalo bez problémů.

Testování potvrdilo, že systém je schopen stabilního měření a detekce základních geometrických odchylek. Přesnost je dostatečná pro praktické využití při sledování kvality 3D tisku, přičemž největší důraz musí být kladen na správné nastavení geometrie a podmínek snímání.

7 Závěr

V rámci této práce byl navržen a realizován otevřený a modulární systém pro sledování kvality během 3D tisku betonových směsí, založený na metodách počítačového vidění s využitím principu aktivní triangulace. Navržené řešení umožňuje v reálném čase měřit základní geometrické parametry vrstvy – konkrétně její výšku a šířku a detekovat případné odchylky od požadovaného tvaru. Měřicí sestava je upevněna přímo na tiskové hlavě zařízení a kombinuje běžně dostupné komponenty – kameru, liniový laser a výpočetní jednotku.

Data získaná z měření jsou v reálném čase vyhodnocována a následně ukládána ve strukturovaném formátu, doplněna o informace o poloze tiskové hlavy a časové značky. Tento přístup umožňuje jak okamžité vyhodnocení kvality vrstvy během tisku, tak i následnou analýzu nebo budoucí rozšíření systému o pokročilejší metody, například využívající strojové učení. Výsledky vyhodnocení jsou zároveň dostupné prostřednictvím webového rozhraní, které je přístupné přes běžný prohlížeč. Rozhraní umožňuje zadání požadovaných rozměrových parametrů a tolerancí, spuštění měření a kalibrace, přehledné zobrazení detekovaných hodnot a v případě odchylky okamžité upozornění obsluhy. Navrženo bylo s důrazem na dostupnost, přehlednost a snadné použití.

Funkčnost systému byla ověřena v laboratorních podmínkách i během testovacího provozu na reálném tiskovém zařízení. Výsledky ukázaly, že systém je schopen stabilního provozu a průběžného sledování základních geometrických charakteristik vrstvy. Přesnost výpočtu je úzce svázána se správným nastavením a kalibrací systému – zejména vzájemnou geometrií kamery a laseru – a s kvalitou snímání za daných světelných podmínek. Přesto výsledky potvrzují, že navržené řešení odpovídá očekávanému chování a poskytuje využitelná a interpretovatelná data.

Výsledkem je funkční, otevřený a flexibilně navržený systém, který tvoří solidní základ pro další rozvoj. Díky modulární architektuře, použití dostupného hardwaru a důrazu na přehlednost a přizpůsobitelnost lze systém snadno modifikovat podle požadavků konkrétní aplikace. Práce tak nejen splňuje stanovené cíle, ale zároveň otevírá prostor pro navazující vývoj – ať už směrem k větší přesnosti, automatizovanému zásahu do tisku, nebo propojení s dalšími monitorovacími a řídicími systémy. V průběhu realizace bylo rovněž identifikováno několik oblastí s potenciálem pro zlepšení, které jsou diskutovány v příslušné kapitole a mohou sloužit jako výchozí body pro další iterace systému. Díky tomu může práce sloužit jako ucelený podklad pro reimplementaci obdobného řešení nebo jako praktická inspirace pro výzkum a vývoj v oblasti inteligentního dohledu nad 3D tiskem stavebních materiálů.

Tato diplomová práce vznikla jako součást řešení projektu č. FW06010422/digiBeton, který se zaměřuje na vývoj digitálních nástrojů a technologií pro efektivnější a kvalitnější realizaci betonových konstrukcí pomocí aditivních metod.

Literatura

- [1] Fuyan Lyu et al. “Overview of the Development of 3D-Printing Concrete: A Review”. en. In: *Applied Sciences* 11.21 (led. 2021). Number: 21 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute, s. 9822. ISSN: 2076-3417. DOI: 10.3390/app11219822. URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/11/21/9822> (cit. 05.03.2025).
- [2] Jianzhuang Xiao et al. “Large-scale 3D printing concrete technology: Current status and future opportunities”. In: *Cement and Concrete Composites* 122 (zář. 2021), s. 104115.

- ISSN: 0958-9465. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2021.104115. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958946521001839> (cit. 25. 03. 2025).
- [3] A. S. J. Suiker et al. “Elastic buckling and plastic collapse during 3D concrete printing”. In: *Cement and Concrete Research* 135 (zář. 2020), s. 106016. ISSN: 0008-8846. DOI: 10.1016/j.cemconres.2020.106016. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884620300946> (cit. 25. 02. 2025).
- [4] “(PDF) Top challenges to widespread 3D concrete printing (3DCP) adoption – A review”. en. In: *ResearchGate* (pros. 2024). ISSN: 1964-8189. URL: https://www.researchgate.net/publication/370952351_Top_challenges_to_widespread_3D_concrete_printing_3DCP_adoption_-_A_review (cit. 25. 03. 2025).
- [5] *Camera - Raspberry Pi Documentation*. en. URL: <https://www.raspberrypi.com/documentation/accessories/camera.html> (cit. 24. 03. 2025).
- [6] *Raspberry Pi 5 - RPishop.cz*. cs. URL: <https://rpishop.cz/2109-raspberry-pi-5/> (cit. 28. 04. 2025).