**ŽILINSKÁ UNIVERZITA V ŽILINE**
**FAKULTA RIADENIA A INFORMATIKY**

# Semestrálna práca

Počítačová grafika – 2024

**Bc. David Kučera**
Akademický rok 2024/25, zimný semester

# Obsah

## Zadanie a cieľ práce

Načítajte obrázok zo súboru, formát obrázka je YUV420. V prvej časti súboru sa nachádzajú dáta Luminancie. Veľkosť obrázka je 512 x 512 px, luminancia je zakódovaná ako hodnota 0..255 svietivosti pre 1 pixel. Farebné dáta v obrázku, ktoré nasledujú môžete ignorovať. V obrázku sa nachádza čierna čiara na bielom pozadí. Vašou úlohou je získať stred čiary a vektorizovať ho pomocou Beziérovej krivky.

Cieľom tejto práce je nájsť taký postup pre spracovanie obrázkov, aby bol z výpočtového hľadiska čo najefektívnejší a dokázal spracovávať dáta z kamery v čo najkratšom čase.

Taktiež je nutné riešenie implementovať v prostredí Microsoft Visual Studio 2022 na platforme .NET 8.0 v programovacom jazyku C#. Nie je dovolené používať OpenCV.

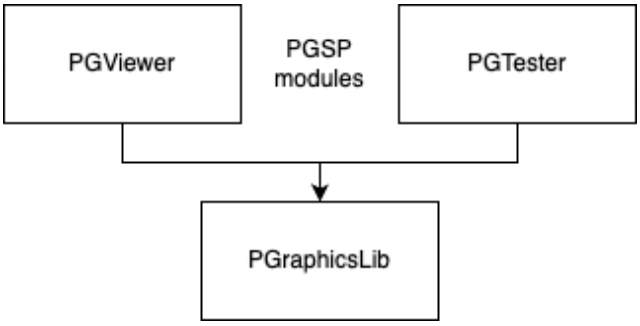
## Popis a analýza problému

Počas riešenia úlohy budú potrebné rôzne metódy spracovania obrazu, napríklad vysokofrekvenčný Gaussov filter, alebo iný vhodný filter, histogram, algoritmus pre adaptívne prahovanie, napr. Otsu treshold, hľadanie hrán, napr. Sobel edge detector, práca s maticami a vektormi, knižnica na prekladanie krivky bodmi, napr. MathNet.Numerics.

Na otestovanie funkčnosti navrhnutého riešenia boli poskytnuté nasledovné 3 dátové súbory: *NewImage.txt*, *NewImage2.txt*, *NewImage3.txt*. Každý súbor obsahuje obrázok formátu YUV420 veľkosti 512 x 512 – na ňom sa nachádza čierna čiara na bielom pozadí. Na týchto obrázkoch bolo spravených niekoľko experimentov popísaných nižšie v dokumente. Taktiež bolo poskytnutých niekoľko podobných obrázkov, avšak veľkosti 640 x 480. Na týchto obrázkoch bolo testované cyklické spracovanie.

## Návrh samostatných častí programu

Práca bola implementovaná v programovacom jazyku **C#** na platforme **.NET 8.0** a bola vyvíjaná vo vývojom prostredí Visual Studio 2022, podľa požiadaviek zadania. Obsahuje program s grafickým rozhraním pre načítanie a zobrazenie obrázkov typu YUV420, poskytuje aj rôzne možnosti ich úpravy pomocou implementovaných operácií. Ďalej obsahuje aj jednoduché konzolové rozhranie pre testovanie rýchlostí jednotlivých algoritmov na obrázkoch, či už jednotlivo, alebo aj cyklicky. Tieto dva programy využívajú spoločnú knižnicu, v ktorej sú algoritmy implementované. Práca teda obsahuje dokopy 3 moduly – ***PGViewer*** (GUI), ***PGraphicsLib*** (DLL), ***PGTester*** (CLI). Prepojenie týchto modulov je možné vidieť v nasledovnom diagrame.




*Obrázok 1 Diagram modulov*

### Riešenie problému hľadania beziérovej krivky

V tejto práci je cieľom zo vstupného súboru dostať ako výstup beziérovu krivku, ktorá bude čo najlepšie opisovať čiernu čiaru obsiahnutú v dátových súboroch.

Algoritmus je nasledovný:

1. **Načítanie** dátového súboru formátu YUV420. Tento obrázok obsahuje čiernu čiaru na pozadí, ktoré je odlišné od čiernej – biele, odtiene šedej.
   Je možné načítať len niektoré časti obrázka, pre zrýchlenie trvania algoritmu, napr. stačí prečítať každý 10. riadok.
2. Vykonanie **filtrácie** pomocou Gaussovho algoritmu. Tento krok sa nemusí vykonať, avšak je dobré ho zahrnúť, pretože obrázky môžu obsahovať istý šum, ktorý vďaka tomuto kroku odfiltrujeme. Taktiež vďaka tomu zanedbáme nepotrebné detaily.
3. Binarizácia obrázka na čiernu a bielu farbu pomocou **prahovania**. Pre výpočet prahu je v práci implementovaný aj Otsu prah, ale v mojom testovaní nebol tak dobrý, ako jednoduché **priemerné** prahovanie. Preto sa používa druhý variant.
4. Hľadanie **stredu** čiary. Tento stred čiary sa po predošlých operáciách hľadá pomerne ľahko, nakoľko v ideálnom prípade máme biele pozadie a čiernu

čiaru – tak stačí len nájsť súradnice čiernych pixelov a vziať ich stred. Takto to spravíme pre každý (alebo každý n-tý) riadok. Niektoré z týchto bodov nám budú popisovať výslednú beziérovu krivku.

5. Nakoniec sa z bodov vyberie začiatok a koniec – tie nám budú pevne definovať začiatok a koniec beziérovej krivky. K nim sa vyberú ešte dva kontrolné body, ktoré budú určovať tvar kubickej **beziérovej krivky**.

## Štruktúra programu

Odovzdaný repozitár obsahuje nasledovné priečinky:

- data – obsahuje vstupné dáta (taktiež aj v prípade, že chceme nové dáta pridať, je nutné ich vkladať sem, inak sa v module PGViewer nezobrazia),
- doc – obsahuje dokumentáciu, UML diagramy, grafy,
- modules – obsahuje zdrojové kódy modulov-projektov (.csproj, .cs, ...),
- solution – obsahuje solution (.sln) pre otvorenie projektov v prostredí VS2022.

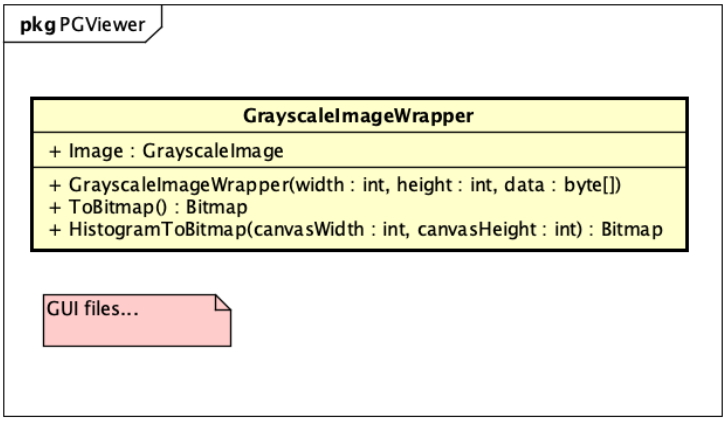
Po prípadnom builde vo VS2022 pribudnú nasledovné priečinky:

- run/run64/run_D/run64_D – obsahuje .exe binárky pre spustenie programu na základe konfigurácie (viď nižšie),
- tmp – dočasné súbory (priečinok obj),
- output – obsahuje výstup z testovacej aplikácie, ak sa nastaví konštanta.

Programy je možné zbuildovať a následne spustiť v nasledovných konfiguráciách:

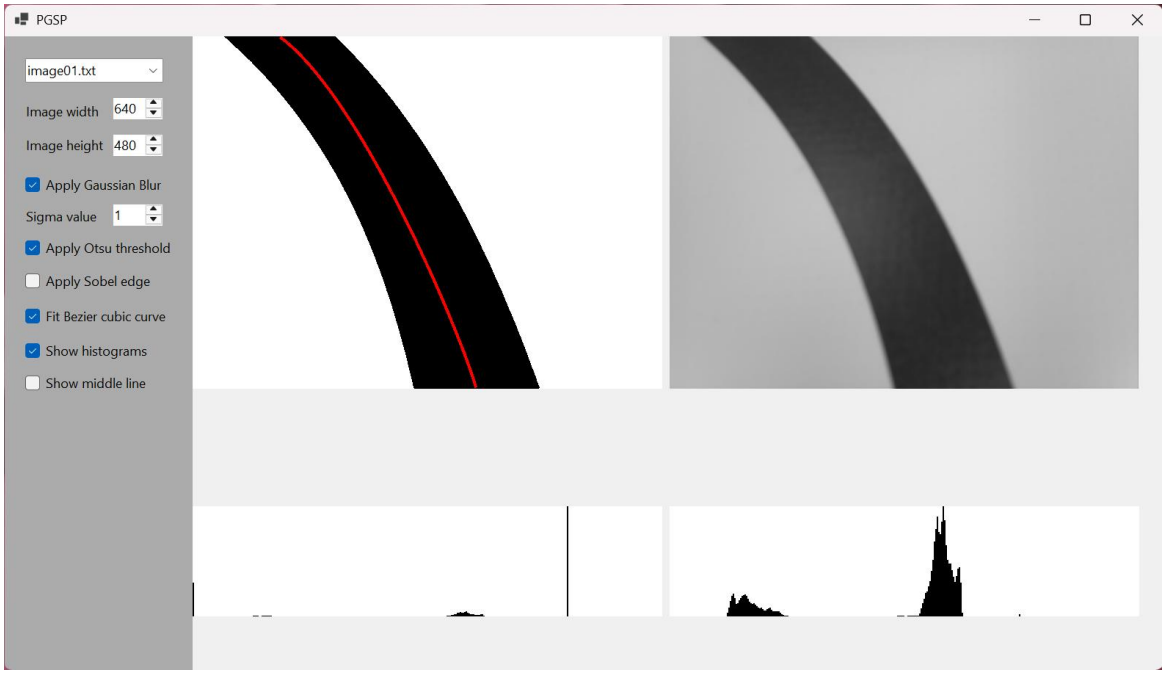
- Debug
  - x64 (priečinok run64_D)
  - x86 (priečinok run_D)
- Release
  - x64 (priečinok run64)
  - x86 (priečinok run)

## Modul PGViewer




*Obrázok 2 Diagram tried modulu PGViewer*

Modul obsahuje grafické rozhranie implementované pomocou **WinForms**, nakoľko sa s ním pracovalo na cvičeniach tohto predmetu. Ukážka vzhľadu aplikácie je na nasledovnom obrázku.




*Obrázok 3 Grafické rozhranie PGViewer*

Okno obsahuje v ľavej časti niekoľko možností:

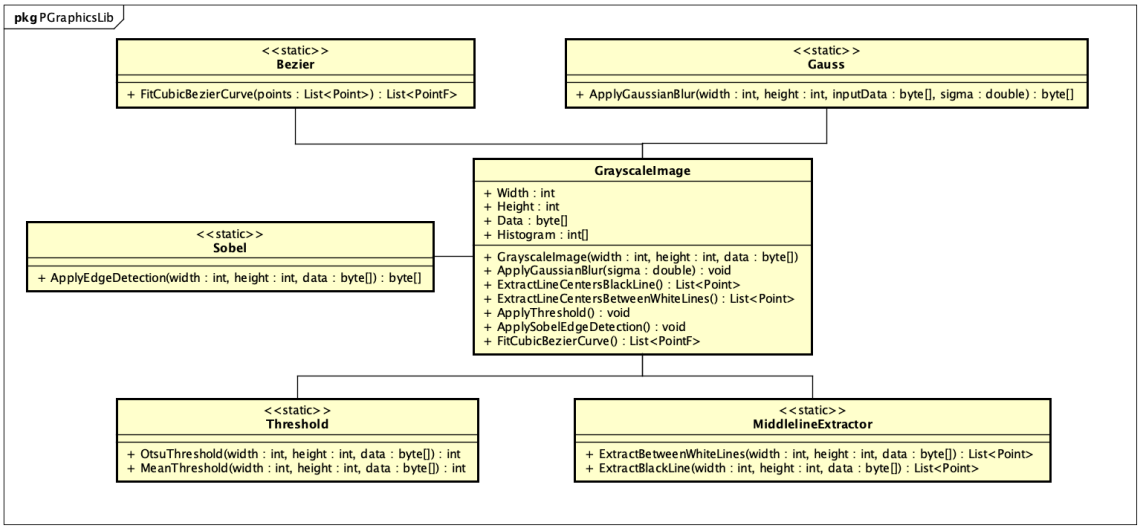
- voľba dátového súboru,
- nastavenie šírky a dĺžky obrázka pre prípad iných rozmerov,
- aplikovanie Gaussovho šumu s rôznym parametrom sigma (udáva mieru zašumenia),

- aplikovanie tresholdingu,
- aplikovanie Sobel Edge Detection,
- zobrazenie Beziérovej krivky,
- zobrazenie histogramov obrázkov,
- zobrazenie stredovej čiary čiernej čiary.

V pravej časti sa nachádza po načítaní originálny obrázok (vpravo) spolu s manipulovaným obrázkom (vľavo), aby bolo možné ihneď porovnať rozdiely. Taktiež pod obrázkami je možné zobrazovať ich histogramy, prípadne zobraziť aj nájdený stred čiernej čiary.

## Modul PGraphicsLib

Táto knižnica obsahuje všetky implementované operácie a algoritmy pre manipuláciu s obrázkami. Všetky triedy obsahujú nejakú funkčnú časť použiteľnú pre rôzne obrázky. Preto sú všetky ich operácie statické a ako parameter majú rozmery obrázka a dáta obrázka.




*Obrázok 4 Diagram tried modulu PGraphicsLib*

### GrayscaleImage.cs

Hlavná trieda celej knižnice. Obsahuje všetky potrebné dáta o obrázku, ako rozmery a jednotlivé bajty dát. Jediné obmedzenie je veľkosť obrázka – ten musí mať rozmer minimálne 16 x 16 a maximálne 1024 x 1024. Inak obsahuje metódy pre aplikáciu operácií na daný obrázok, ako napr. aplikovanie gaussovho šumu, extrakcia stredu čiary, aplikovanie prahovania, Sobel detekcie hrán a fitnutie beziérovej krivky.

### Bezier.cs

V tejto triede je metóda *FitCubicBezierCurve*, ktorá má ako parameter body nájdené z triedy MiddlelineExtractor. Z týchto bodov zoberie prvý a posledný bod, ktoré

definujú začiatok a koniec beziérovej krivky. Následne vezme podľa vzťahu ďalšie 2 kontrolné body, ktoré určujú tvar tejto beziérovej krivky. Na výstupe sú teda 4 body definujúce výslednú beziérovu krivku.

### Gauss.cs

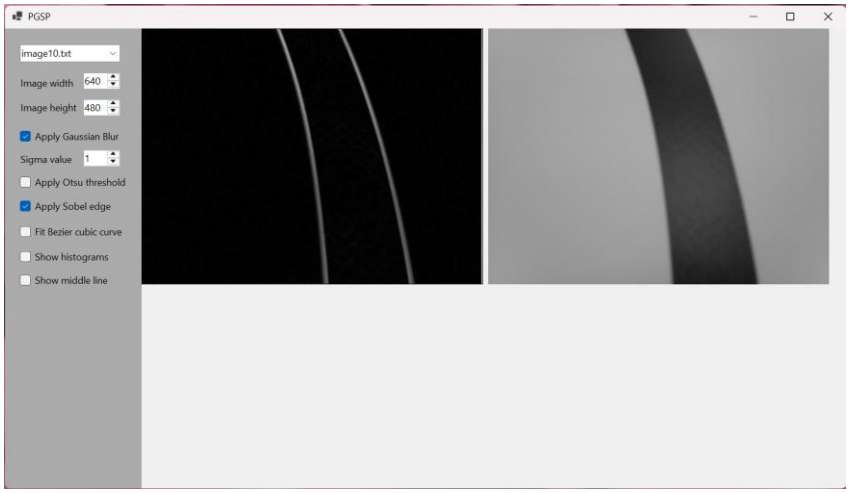
Metóda *ApplyGaussianBlur* zoberie dáta a aplikuje na ne gaussovký šum. Tým sa obrázok „vyhľadí“ a zanedbajú sa nepotrebné detaily. Vďaka tomu sa potom lepšie aplikuje prahovanie – binarizácia obrázka.

### MiddlelineExtractor.cs

Trieda obsahuje dve metódy – *ExtractBlackLine* – tá sa používa pri klasickom algoritme popísanom vyššie, teda hľadá stred čiernej čiary, ktorá je na bielom pozadí po aplikácií prahovania. Avšak, ak aplikujeme ešte predtým Sobel detekciu hrán, tak po prahovaní bude výsledný obrázok mať čierne pozadie a hrany čiary budú bielej farby. Teda metóda *ExtractBetweenWhiteLines* sa používa, ak sa aplikuje aj Sobel detekcia hrán. Pri mojom testovaní tento variant nebol efektívny a bol veľmi náchylný pre rôzne situácie, ako napr. že na hranách obrázku boli biele čiary – vtedy to zle vypočítalo stred a teda aj výslednú beziérovu krivku. Preto sa v hlavnom algoritme nepoužíva tento variant.

### Sobel.cs

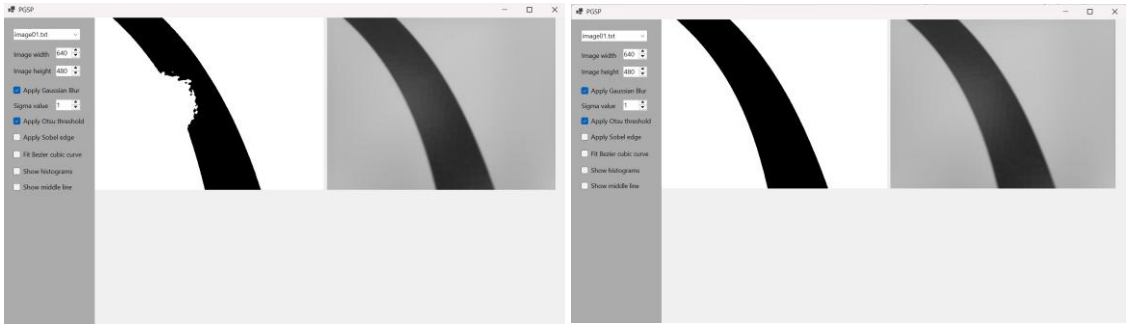
Obsahuje metódu *ApplyEdgeDetection*, ktorá aplikuje na dáta detekciu hrán. Výsledok je možné vidieť v obrázku nižšie. Nakoľko tento proces trvá relatívne dlhú dobu a je nutné po prahovaní inak hľadať stred čiary, v algoritme sa táto operácia nepoužíva.




*Obrázok 5 Sobel detekcia hrán*

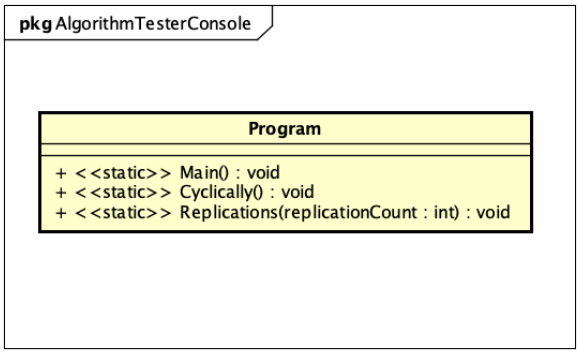
### Threshold.cs

Trieda obsahuje dve rôzne metódy pre prahovanie. Jednou je *OtsuThreshold* a druhou je *MeanThreshold*. Obe hľadajú prah, podľa ktorého sa budú dáta-bajty obrázka binarizovať medzi čiernu a bielu farbu. Avšak, v mojom testovaní mi prišiel druhý variant spoľahlivejší, preto sa v hlavnom algoritme používa tento variant, viď obrázok nižšie (vľavo Otsu, vpravo Mean, rovnaké parametre gauss. šumu).



*Obrázok 6 Porovnanie Otsu vs Mean prahovania*

## Modul PGTester




*Obrázok 7 Diagram tried modulu PGTester*

Tento modul obsahuje len jeden súbor *Program.cs*, ktorý obsahuje jedinú triedu Main. V nej sú všetky potrebné náležitosti pre vykonanie **testovania** vybraných algoritmov tejto práce. Je možné si výsledky testov ukladať do externého csv súboru, napríklad pre ďalšiu analýzu, prípadne pre tvorbu prehľadných grafov.

### Možnosti testov

Test je možné spustiť s uvedením parametrov

- n – počet behov,
- c – cyklické spracovanie všetkých poskytnutých obrázkov rozmeru 640 x 480 px.

Teda napr. zadaním 10 sa vykoná jedna replikácia s 10 behmi algoritmov na jednom obrázku. Ak zadáme c, tak sa vykoná jedna replikácia v ktorej sa spracujú po sebe všetky obrázky daného rozmeru.

Ak chceme zmeniť počet replikácií, je nutné to zmeniť v zdrojovom kóde v sekcii Constants – NUMBER_OF_REPLICATIONS. Ak chceme zmeniť obrázok pre testovanie behov – IMAGE_NAME, prípadne DIRECTORY_PATH. Ak chceme ukladať výsledky replikácií do CSV súboru, je nutné nastaviť konštantu SAVE_RESULTS na true. Ak to nastavíme, výstup sa uloží do priečinku output v hlavnom repozitári. Ak chceme nastaviť, aby sa spracoval len každý n-tý riadok, je nutné zmeniť konštantu PROCESS_EVERY_NTH_LINE.

### Externé knižnice

V práci sa nepoužívajú žiadne externé knižnice, len tie, čo sú súčasťou .NET.

# Vyhodnotenie rýchlostí

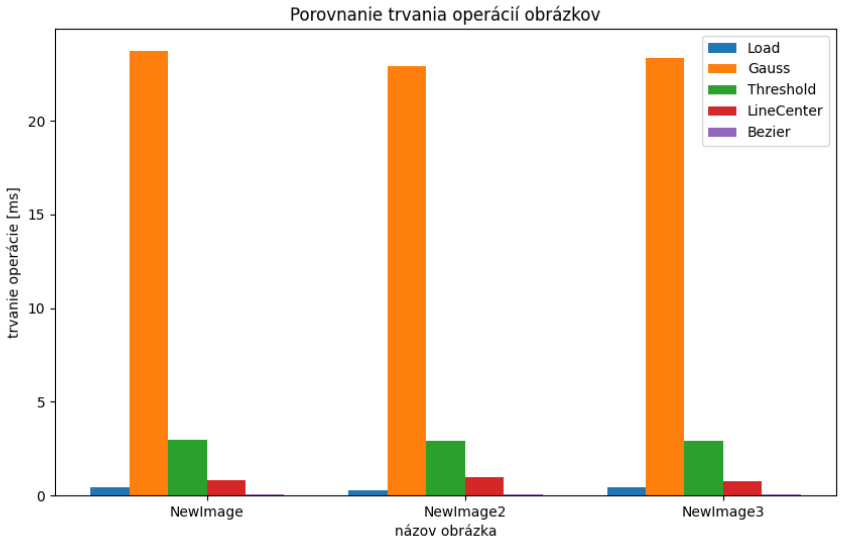
V tejto sekcii sa zhodnotia a porovnajú jednotlivé rýchlosti a experimenty, ktoré sa vykonali.

**Pokiaľ nie je uvedené inak, tak výsledky sú z build verzie Debug x86, pri počte behov 10 a 10 replikáciách a spracovaní všetkých dát/riadkov obrázka. Hodnoty sú uvedené v milisekundách [ms].**

*Pozn. grafy boli vytvorené v programovacom jazyku Python pomocou knižnice matplotlib.pyplot.*

## Porovnanie rýchlostí operácií jednotlivých obrázkov

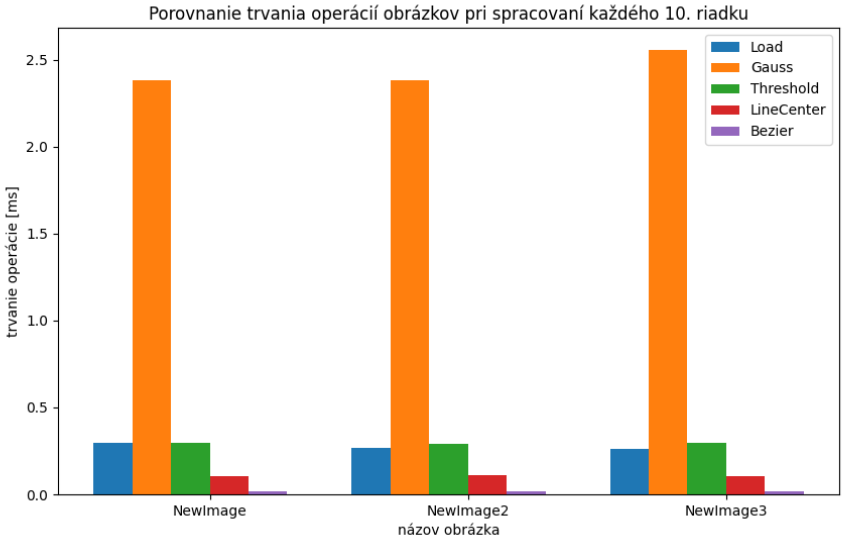
V prvom vyhodnotení si porovnáme, či rozličné obrázky majú nejaký vplyv na trvanie jednotlivých operácií. Ako je možné vidieť v grafe, každá operácia trvá približne rovnako bez ohľadu na obrázok. Najdlhšie trvá operácia aplikácie gaussovho šumu, potom aplikácia prahovania, hľadanie stredu hrany a nakoniec samotné načítanie obrázkov. Hľadanie beziérovej krivky je oproti ostatným operáciám časovo takmer zanedbateľné. Výsledky sú uvedené v nasledovnom grafe.




*Obrázok 8 Graf porovnania trvania operácií obrázkov*

## Porovnanie rýchlostí operácií jednotlivých obrázkov pri spracovaní každého 10. riadku

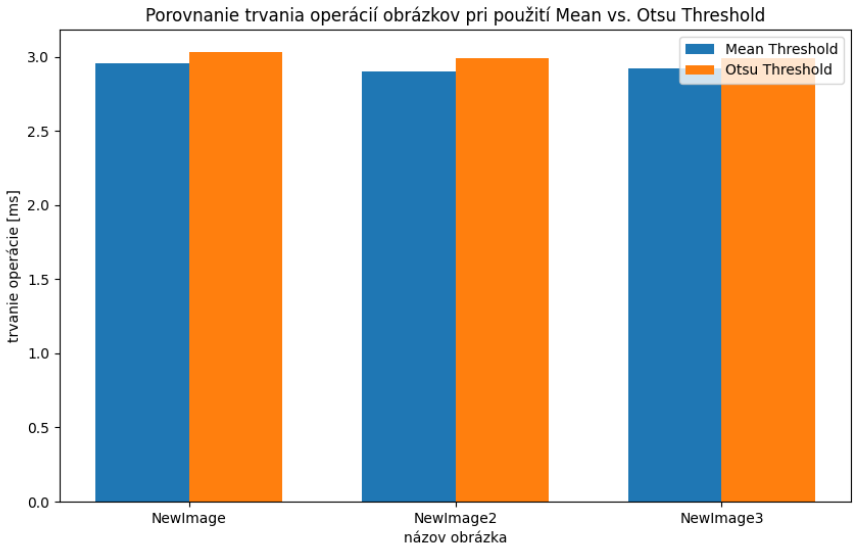
Toto porovnanie porovnáva, aký veľký rozdiel bude oproti predošlému experimentu, ak budeme spracovávať len každý 10. riadok obrázku. Je jasné, že časy budú výrazne lepšie, takmer 10x lepšie. Avšak, čo je zaujímavé, že trvanie načítania obrázku a prahovania trvá takmer rovnako. Zvyšné operácia trvajú proporcionálne rovnako ako v predošlom prípade. Výsledky je možné vidieť v grafe nižšie.




*Obrázok 9 Graf porovnania trvania operácií obrázkov pri spracovaní každého 10. riadku*

## Porovnanie rýchlostí prahovaní

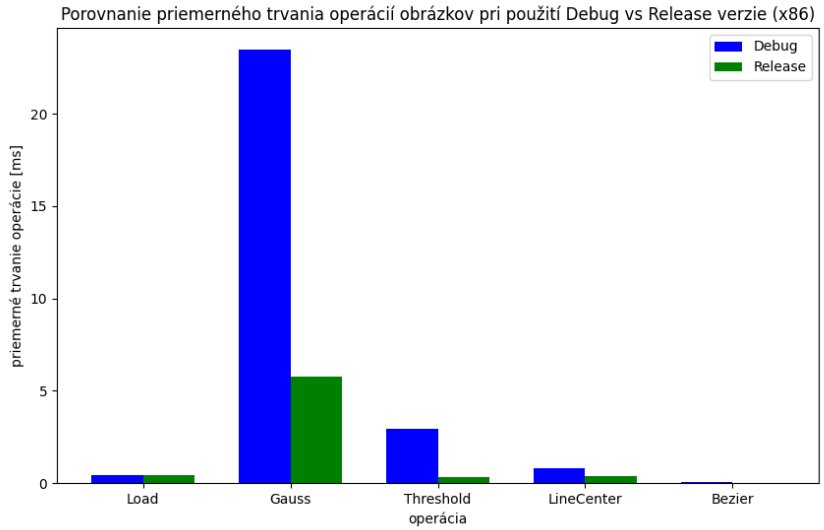
V tomto experimente porovnáme časové trvanie dvoch druhov prahovaní, ktoré bolo implementované a testované v práci. Vyššie bolo uvedené, že spoľahlivejšie je Mean prahovanie, ktoré je odôvodnené obrázkom 6. V tomto experimente som chcel porovnať, či je rozdielny aj čas týchto variantov. Avšak, vyzerá to tak, že ich trvanie je takmer totožné. Preto v algoritme bol použitý Mean variant, nakoľko bol naoko spoľahlivejší.




*Obrázok 10 Graf porovnania Mean vs Otsu prahovania*

## Porovnanie build verzií x86

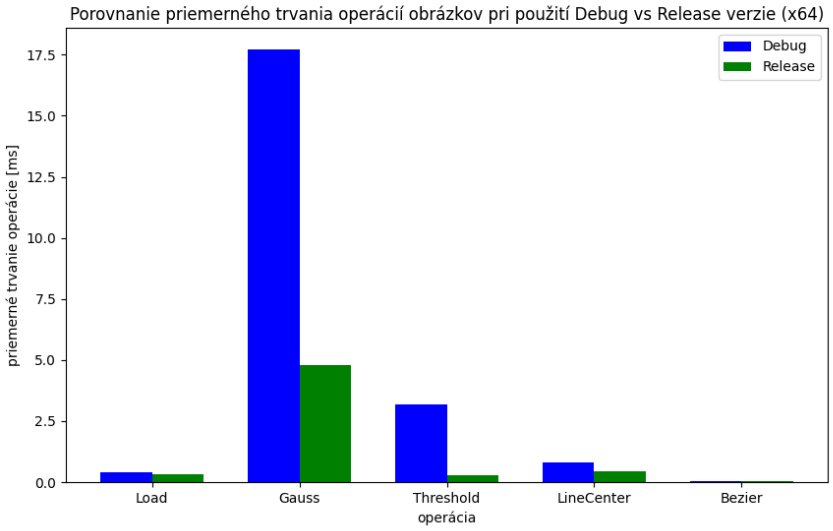
V tomto experimente som chcel otestovať, aký vplyv má verzia Debug a Release programu pre architektúru x86. Ako je možné vidieť v grafe nižšie, načítanie trvá rovnako, avšak pri ostatných operáciách je signifikantný rozdiel trvania operácií v prospech Release verzie.




*Obrázok 11 Graf porovnania build verzií x86*

## Porovnanie build verzií x64

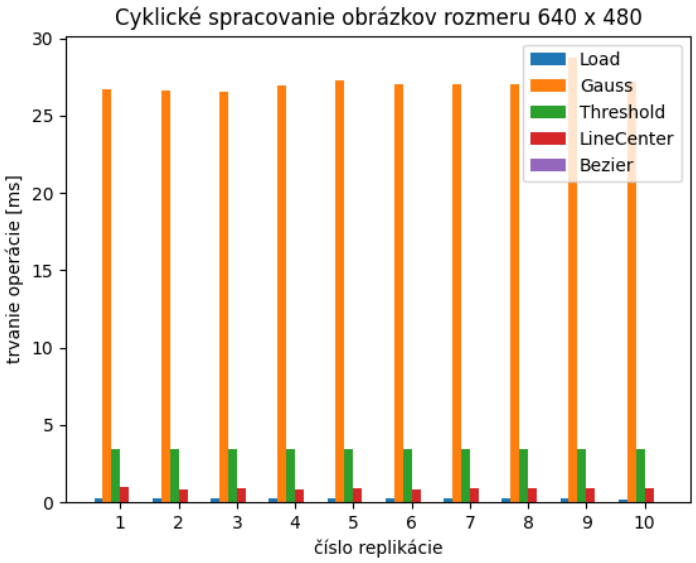
Tento experiment je rovnaký, ako predošlý, avšak pre architektúru x64. Výsledky sú porovnateľné s predošlým prípadom v prospech Release verzie. Rozdiel oproti x86 je v hodnotách osi y, teda časoch operácií – x64 je o čosi rýchlejšia ako x86.




*Obrázok 12 Graf porovnania build verzií x64*

### Cyklické spracovanie obrázkov rozmeru 640 x 480

V poslednom experimente je možné vidieť trvanie 10 replikácií cyklických spracovaní všetkých obrázkov formátu YUV420 a rozmeru 640 x 480 px, ktoré boli poskytnuté. Všetky operácie trvajú v každej replikácií takmer rovnako. Najdlhšie trvá gaussovo zašumenie, prahovanie, hľadanie stredu čiary, načítanie a zanedbateľne fit beziérovej krivky.




*Obrázok 13 Graf cyklického spracovania*

### Výsledné najlepšie časy

Nakoľko je z experimentov jasné, časovo najlepšia konfigurácia je pri **x64** architektúre a verzii **Release**. Na tejto konfigurácií sme spravili 10 replikácií pri 10 behoch na obrázku *NewImage.txt* a priemerné časy jednotlivých operácií sú uvedené v nasledovnej tabuľke. (spracovanie všetkých dát obrázku) Taktiež sú v tabuľke uvedené aj priemerné časy pri cyklickom spracovaní všetkých obrázkov rozmerov 640 x 480 px. **Uvedené časy sú v milisekundách [ms].**

| **Operácia\Typ testu** | **1 obrázok** *NewImage.txt* | **Cyklické spracovanie** |
|---|---|---|
| **Load** | 0.322441 | 0.219195 |
| **Gauss** | 4.716582 | 5.200465 |
| **Threshold** | 0.258720 | 0.285637 |
| **LineCenter** | 0.414642 | 0.341851 |
| **Bezier** | 0.015242 | 0.003365 |
| **SUM** | 5.72762777777778 | 6.050512108262109 |

## Záver

Cieľ a zadanie práce bolo splnené. Súčasťou práce sú 3 moduly, ktoré efektívne riešia danú problematiku. Jeden modul obsahuje grafické rozhranie pre dynamickú manipuláciu s obrázkami. Druhý modul obsahuje konzolové rozhranie pre testovanie rýchlostí jednotlivých algoritmov obsiahnutých v práci. Posledný modul je knižnica, ktorá sa využíva v oboch predošlých moduloch. V práci sme popísali jednotlivé moduly, algoritmus riešenia a dôvody použitia daných krokov. Nakoniec sme spravili a vyhodnotili niekoľko experimentov s obrázkami a ich trvaniami. Moduly je možné využiť pre ďalšiu budúcu analýzu a prípadné testovanie algoritmov a operácií.