

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Brno, 2024

Ondřej Sedlák



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

LABORATORNÍ ÚLOHA PRO HODNOCENÍ VIZUÁLNÍ KVALITY KOMPRIMOVANÝCH OBRAZŮ

LABORATORY EXAM FOR VISUAL QUALITY ANALYSIS OF COMPRESSED IMAGES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ondřej Sedlák

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Ladislav Polák, Ph.D.

BRNO 2024

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Elektronika a komunikační technologie**

Ústav radioelektroniky

Student: Ondřej Sedlák

Ročník: 3

ID: 230312

Akademický rok: 2023/24

NÁZEV TÉMATU:

Laboratorní úloha pro hodnocení vizuální kvality komprimovaných obrazů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

V teoretické části práce podejte přehled o současných standardech pro kompresi obrazů a o postupech hodnocení kvality komprimovaného obrazu. Navrhněte a vytvořte vhodný framework, využívající dostupné referenční implementace vybraných kodeků, pro komprimaci různých obrazů.

V experimentální části práce proveďte komprese obrazů pomocí vybraných kodeků. Pomocí vhodných objektivních metrik, případně subjektivních metrik, analyzujte výstupy komprese. Získané výsledky přehledně zpracujte a diskutujte. Navrhněte laboratorní úlohu pro kompresi a hodnocení kvality komprimovaných obrazů a připravte vzorové vypracování navržené úlohy.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] NAVEEN KUMAR, S., M. V. VAMSHI BHARADWAJ a Shreyanka SUBBARAYAPPA. Performance Comparison of JPEG, JPEG XT, JPEG LS, JPEG 2000, JPEG XR, HEVC, EVC and VVC for Images. In: 2021 6th International Conference for Convergence in Technology (I2CT) [online]. IEEE, 2021, 2021-4-2, s. 1-8 [cit.2022-05-11]. ISBN 978-1-7281-8876-8.

Dostupné z: doi:10.1109/I2CT51068.2021.9418160

[2] SIMKA, Marek, Ladislav POLAK, Jan KUFA, Martin NOVOTNY, Adam ZIZIEN a Karel FLIEGEL. Omnidirectional Image Quality Assessment Database (OMNIQAD): Description and Examples. In: 2023 33rd International Conference Radioelektronika (RADIOELEKTRONIKA) [online]. IEEE, 2023, 2023-4-19, s. 1-5 [cit. 2023-05-13]. ISBN 979-8-3503-9834-2.

Dostupné z: doi:10.1109/RADIOELEKTRONIKA57919.2023.10109005

Termín zadání: 22.9.2023

Termín odevzdání: 27.5.2024

Vedoucí práce: doc. Ing. Ladislav Polák, Ph.D.

doc. Ing. Lucie Hudcová, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor semestrální práce nesmí při vytváření semestrální práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá hodnocením vizuální kvality komprimovaných statických obrazů. Teoretická část poskytuje přehled současných standardů pro kompresi obrazů a popisuje metody hodnocení kvality komprimovaného obrazu. Komprimační algoritmy jsou kategorizovány podle metod a zdůrazněny klíčové formáty, které budou použity v experimentální části. Důraz je také kladen na objektivní a subjektivní metody hodnocení, poskytující robustní rámec pro vyhodnocení výkonu kompresních kodeků. Praktická část se zaměřuje na aplikaci zvolených metodik komprimace a hodnocení kvality, porovnání jednotlivých výsledků a návrhu postupu pro zpracování laboratorní úlohy.

Klíčová slova

komprese statických obrazů, vizuální kvalita, objektivní a subjektivní metriky, experimentální hodnocení

Abstract

This bachelor's thesis deals with the evaluation of the visual quality of compressed still images. The theoretical part provides an overview of current standards for image compression and describes methods for evaluating the quality of a compressed image. Compression algorithms are categorized by method and the key formats that will be used in the experimental section are highlighted. Emphasis is also placed on objective and subjective evaluation methods, providing a robust framework for evaluating the performance of compression codecs. The practical part focuses on the application of selected compression and quality assessment methodologies, comparison of individual results and proposal of a procedure for the processing of a laboratory task.

Keywords

compression of static images, evaluation of visual quality, objective metrics, subjective metrics, experimental evaluation

Bibliografická citace

SEDLÁK, Ondřej. Laboratorní úloha pro hodnocení vizuální kvality komprimovaných obrazů [online]. Brno, 2024 [cit. 2024-01-01]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/153431>. Semestrální práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky. Vedoucí práce Ladislav Polák.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta:	<i>Ondřej Sedlák</i>
VUT ID studenta:	230312
Typ práce:	<i>Bakalářská práce</i>
Akademický rok:	2023/24
Téma závěrečné práce:	<i>Laboratorní úloha pro hodnocení vizuální kvality komprimovaných obrázků</i>

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 27. května 2024

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Ladislavu Polákovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce. Rovněž chci vyjádřit poděkování panu Ing. Marku Šimkovi za pomoc při automatizaci metodiky kompresních algoritmů.

V Brně dne: 27. května 2024

podpis autora

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ	3
SEZNAM TABULEK.....	4
ÚVOD	5
1. KOMPRESSE OBRAZU	6
1.1 METODY KOMPRESSE OBRAZU – ROZDĚLENÍ	6
1.1.1 Bezztrátová komprese obrazu	6
1.1.2 Ztrátová komprese obrazu	7
1.2 STRUČNÉ ROZDĚLENÍ GRAFICKÝCH FORMÁTŮ	8
1.2.1 Rastrový formát.....	8
1.2.2 Vektorový formát.....	9
2. KOMPRESNÍ ALGORITMY STATICKÝCH OBRAZŮ VÝZNAMNÝCH FORMÁTŮ 10	
2.1 JOINT PHOTOGRAPHIC EXPERTS GROUP (JPEG).....	10
2.2 JPEG 2000	11
2.3 JPEG XL	12
2.4 HIGH EFFICIENCY IMAGE FILE FORMAT (HEIF).....	13
2.5 AVI IMAGE FILE FORMAT (AVIF).....	14
2.6 WEBP	14
2.7 PORTABLE NETWORK GRAPHIC (PNG)	15
3. HODNOCENÍ KVALITY KOMPRESSE	17
3.1 OBJEKTIVNÍ METODY HODNOCENÍ KVALITY	17
3.1.1 Peak Signal to Noise Ratio (PSNR)	18
3.1.2 Structural Similarity Index Measure (SSIM).....	18
3.1.3 Natural Image Quality Evaluator (NIQE)	18
3.1.4 Blind Referenceless Image Spatial Quality Evaluator (BRISQUE).....	19
3.1.5 Universal Image Quality Index (UIQI).....	19
3.1.6 Video Multi-Method Assessment Fusion (VMAF).....	20
3.1.7 Visual Information Fidelity for Pixel-based images (VIFP).....	20
3.1.8 Gradient Magnitude Similarity Deviation (GMSD).....	21
3.1.9 Feature SIMilarity index for color images (FSIMc)	21
3.2 SUBJEKTIVNÍ METODY HODNOCENÍ KVALITY	22
3.2.1 Double Stimulus Impairment Scale (DSIS).....	22
3.2.2 Double Stimulus Continuous Quality Scale (DSCQS).....	22
3.2.3 Single Stimulus Method (SSM).....	23
4. IMPLEMENTACE KOMPRESNÍCH A HODNOTÍCÍCH NÁSTROJŮ	24
4.1 METODIKY KOMPRESNÍCH ALGORITMŮ	24
4.2 APLIKOVANÉ OBJEKTIVNÍ METRIKY HODNOCENÍ KVALITY	25
4.3 POPIS UŽIVATELSKÉHO PROSTŘEDÍ GUI	27
4.4 PRAKTICKÁ APLIKACE A VÝSLEDKY	29
4.4.1 Výsledky pro metriku PSNR	31
4.4.2 Výsledky pro metriku SSIM	32
4.4.3 Výsledky pro metriku NIQE	33
4.4.4 Výsledky pro metriku BRISQUE	34
4.4.5 Výsledky pro metriku UIQI	35
4.4.6 Výsledky pro metriku VMAF	36
4.4.7 Výsledky pro metriku VIFP	37
4.4.8 Výsledky pro metriku GMSD.....	38
4.4.9 Výsledky pro metriku FSIMc.....	39
4.4.10 Stručné shrnutí výsledků.....	40
5. ZÁVĚR.....	41

LITERATURA.....	42
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	45
SEZNAM PŘÍLOH.....	47

SEZNAM OBRÁZKŮ

2.1	Kódování JPEG – rámeček kodéru (překresleno dle [2]).....	10
2.2	Kódování JPEG – rámeček dekodéru (překresleno dle [2]).....	11
4.1	Pohled na uživatelské prostředí aplikaci k laboratorní úloze	28
4.2	Představení jednotlivých testovacích snímků.....	30
4.3	Výsledky pro metriku PSNR.....	31
4.4	Výsledky pro metriku SSIM.....	32
4.5	Výsledky pro metriku NIQE	33
4.6	Výsledky pro metriku BRISQUE.....	34
4.7	Výsledky pro metriku UIQI	35
4.8	Výsledky pro metriku VMAF	36
4.9	Výsledky pro metriku VIFP	37
4.10	Výsledky pro metriku GMSD	38
4.11	Výsledky pro metriku FSIMc.....	39

SEZNAM TABULEK

4.1 Použitá rozlišení a odpovídající snímky	29
---	----

ÚVOD

V současné digitální éře je významným aspektem zpracování multimediálních dat efektivní správa jejich velikosti a kvality. Zvyšující se objemy těchto dat a potřeba jejich rychlého přenosu či ukládání vytvářejí tlak na vývoj a vylepšování kompresních metod pro vizuální média. Komprese dat není jen o snižování velikosti souborů, ale také o nalezení optimálního kompromisu mezi velikostí a zachováním vizuální kvality. To nás vede k potřebě použití metrik hodnocení vizuální kvality a odhadu kvality dat.

Tato práce se zaměřuje na hodnocení vizuální kvality komprimovaných obrazů v kontextu současných kompresních metod. Cílem je porovnat a analyzovat použitelnost různých metrik pro hodnocení vizuální kvality komprimovaných obrazů a posoudit, jak se tyto metriky mohou uplatnit v praxi. Práce se také bude věnovat zhodnocení efektivity různých metod komprese a jejich schopnosti udržet vizuální kvalitu při různých kompresních úrovních.

První část práce se věnuje úvodu do problematiky komprese multimediálních dat, představuje důvody pro kompresi, uvádí metriky hodnocení vizuální kvality a způsoby odhadu kvality dat. Druhá část práce se soustředí na konkrétní metody a techniky komprese a analyzuje jejich použitelnost a vliv na vizuální kvalitu. Poslední část se zabývá měřením výsledků a uzavřením práce s ohledem na nalezené poznatky a jejich praktické využití.

1. KOMPRESSE OBRAZU

S příchodem digitálních technologií hraje komprese obrazu velkou roli. Ačkoliv koncept komprese dat není v dnešní době novinkou, snaha o co největší kompresi při dosažení co nejvyšší kvality obrázku je v ideálním případě takřka nedosažitelná.

Cílem komprese obrazů je zejména zmenšení množství dat za účelem snížení náročnosti na paměť úložiště nebo také pro snížení objemu dat k přenosu. Jedná se tedy o kompresi dvojrozměrných struktur, chceme-li matic náhodných vzorků [1].

1.1 Metody komprese obrazu – rozdělení

1. Metoda založená na interpretaci dat

Tato metoda vyžaduje segmentaci obrazu. Dosahuje vysokých kompresních poměrů, avšak při dekompresi nelze již získat zpět původní obraz.

2. Metoda bez interpretace dat

Dochází k odstranění redundantních a irelevantních informací = nadbytečných informací pro lidské vnímání obrazu.

I. Bezztrátová metoda

Eliminují se statisticky redundantní složky. Při rekonstrukci lze získat zpět úplný výchozí obraz, jelikož nedošlo ke ztrátě užitečné informace. Takovou redukci lze provést za užití některých známých algoritmů. Příkladem mohou být slovníkové algoritmy.

II. Ztrátová metoda

Nenávratně odstraní část informací, které jsou v daném kontextu pro vjem lidským okem irelevantní, nepodstatné. Mohou to být například vysoké frekvence a jasové detaily, které lidské oko již nerozezná a lze je ve zdrojovém kodéru potlačit. Rekonstrukcí takového obrazu ovšem získáme pouze částečně podobný obraz výchozímu.

1.1.1 Bezztrátová komprese obrazu

Cílem bezztrátové komprese obrazu je reprezentace obrazového signálu s co nejmenším počtem bitů tak, aby nedošlo k jakékoli ztrátě původních informací, přičemž docílíme zrychlení jejich přenosu a také minimalizace požadavků na úložiště.

Bezztrátová komprese neboli bezztrátové kódování je možné, jelikož se v obrazových signálech vyskytuje značná redundance, která je úměrná míře korelace mezi vzorky obrazových dat. V přirozeném statickém obraze existuje vysoká míra prostorové korelace

mezi sousedními vzorky obrazu. V barevných obrazech existuje spektrální korelace mezi vzorky obrazu v různých spektrálních složkách.

Při bezztrátovém kódování jsou dekódovaná data obrazu jak kvantitativně, tak kvalitativně identická. Tímto procesem zachováváme přesnou původní reprezentaci, avšak nejsme schopni docílit takové míry komprese.

Za účelem dosažení vyšších kompresních faktorů se metody percepčně bezztrátového kódování pokoušejí odstranit nadbytečné i percepčně irelevantní informace. V takových metodách musí být splněn požadavek na vizuální **podobnost** (= shodnost obrazu výchozího a dekódovaného), ne nutně však v plné kvantitě původních dat. V tomto případě je tedy určitá ztráta informací povolena, pokud je obnovený obraz vnímán jako totožný s původním [2] [3].

1.1.2 Ztrátová komprese obrazu

Cílem ztrátové komprese je dosáhnout co největší možné věrnosti dané dostupnou komunikační nebo úložnou kapacitou bitové rychlosti, minimalizovat počet bitů reprezentujících daný obrazový signál podléhající určité dovolené ztrátě informací.

Jedná se tedy o proces, při němž dochází ke ztrátě informací ze vstupních dat původního obrazu. Ztrátou určitých informací jsme schopni razantně snížit velikost zkomprimovaných dat a tím i nároky na velikost úložiště. Klesá tím také objem dat potřebných k přenosu takového obrazu. Tímto způsobem lze dosáhnout mnohem většího snížení bitové rychlosti v porovnání s bezztrátovou kompresí, která je nezbytná pro umožnění mnoha aplikací v reálném čase, jako jsou manipulace a přenos audiovizuálních informací.

Původní obraz byl uložen v rastrové grafice, kde je přesně znám každý jednotlivý bod – jeho přesná poloha, barva a příslušný barevný model. Základním krokem pro kompresní techniku je volba vhodného barevného modelu, následně je nutné provést podvzorkování.

Při podvzorkování využíváme vlastností lidského oka. Sítnice je mnohem citlivější na intenzitu jasu než na intenzitu barevných složek obrazu. Z toho vyplývá možnost redukovat určité nadbytečné barevné informace, které již lidské oko nedokáže rozlišit. Jedná se o první krok, při němž se.

Sousední pixely se stejnou barvou tvoří blok s obvyklou velikostí 4 x 2 pixely, lze jej reprezentovat pomocí trojic čísel ve tvaru 4:X:X. Nejznámějšími trojicemi podvzorkování jsou 4:4:4 (bez podvzorkování), 4:2:2 (horizontální podvzorkování barvonosných složek) či 4:2:0 (horizontální a vertikální podvzorkování barvonosných složek) [2] [3] [4].

1.2 Stručné rozdělení grafických formátů

Základní kompresní metody stanovují pravidla, podle nichž následně dochází k uložení obrázku do datového souboru. V základním rozdělení grafických formátů hovoříme o dvou typech:

1.2.1 Rastrový formát

Jinak také zvaný bitmapový. Obraz je složen z jednotlivých pixelů, každý z nich má definovanou barvu. Patří mezi nejrozšířenější formáty v oblasti zpracování snímků z fotoaparátů, skenerů nebo také tiskových či zobrazovaných souborů.

1.2.1.1 Bezztrátové formáty

- **BMP** = formát bitmapového obrázku, většinou bez komprese, vhodný pro uchování maximální kvality obrázků
- **GIF** = využívá LZW, umožňuje animace, barevná paleta maximálně 8 bitů
- **PNG** = metoda DEFLATE ((Lempel-Ziv 1977 + Huffmanovo kódování), barevná paleta až 24 bitů, průhlednost 8 bitů
- **RAW** = označení surového obrázku / fotografie => digitalizovaná data ze snímače bez úpravy, není standardizovaný
- **DNG** = formát digitálního negativu, jedná se o normovaný zápis digitálního obrázku přímo ze snímku (předchůdci: RAW a TIFF)
- **TIFF** = zejména pro rastrovou počítačovou grafiku, fotografie, sken, kontejnerové soubory či ukládání souborů před úpravami
- **JPEG LS** = náhrada bezztrátového JPEG režimu, různé techniky minimalizace redundance v datech, efektivní kódování rozdílů mezi předpovídanými a skutečnými hodnotami pixelů

1.2.1.2 Ztrátové formáty

- **JPEG** = nejrozšířenější, známý také jako JFIF, ukládání obrázků ve fotorealistické kvalitě, až 16 mil. barev, komprese až okolo 15:1, barevná hloubka 8 bitů
- **HEIF** = ukládání obrázků / obrazových sekvencí s možností pojmout dvojnásobek informací oproti JPEGu při zachování stejné velikosti souborů, až 16 bitů barevné hloubky, umožňuje průhlednost jako u PNG, podporuje HDR

1.2.1.3 Ztrátové i bezztrátové

- **JPEG XL** = nový standard dosahující až o 60% větší úspory dat oproti JPEGu, dokáže až polovinu snížit náročnost na úložiště v porovnání s PNG
- **JPEG 2000** = standard založený na tzv. vlnkové transformaci, při stejném kompresním poměru dosahuje vyšší kvality než JPEG a při bezztrátové kompresi může konkurovat i PNG
- **JPEG XR** = Windows Media Photo = HD Photo, standard pocházející od spol. Microsoft => předchůdce JPEG XL
- **AVIF** = otevřený bezplatný obrazový formát, velmi efektivní komprese s výjimečnou kvalitou a menší velikostí souborů oproti JPEG, až 16 bitů barevné hloubky, podpora HDR
- **WebP** = vysoká kvalita a efektivnější komprese než u JPEG, PNG nebo GIF, podpora animací, alfa kanálů a průhlednosti, nový nástupce webových obrázků

1.2.2 Vektorový formát

V případě vektorového typu je obraz tvořen vektorovými objekty, které mají definovanou barvu, styl obrysu a výplň. Každý z nich popisují parametry obrysu, nejčastěji Bézierovy křivky. Umožňují vytvoření popisu dvojrozměrné vektorové grafiky, z něhož bude následně vypočítán rastrový soubor obrázku pro zobrazení nebo tisk za pomoci příslušného počítačového softwaru.

- **SVG** = značkovací jazyk a formát souboru, seznam grafických objektů, z nichž je následně vykreslen obrázek, využívá XML jazyk k popisu dvojrozměrné vektorové grafiky

2. KOMPRIMAČNÍ ALGORITMY

STATICKÝCH OBRAZŮ VÝZNAMNÝCH FORMÁTŮ

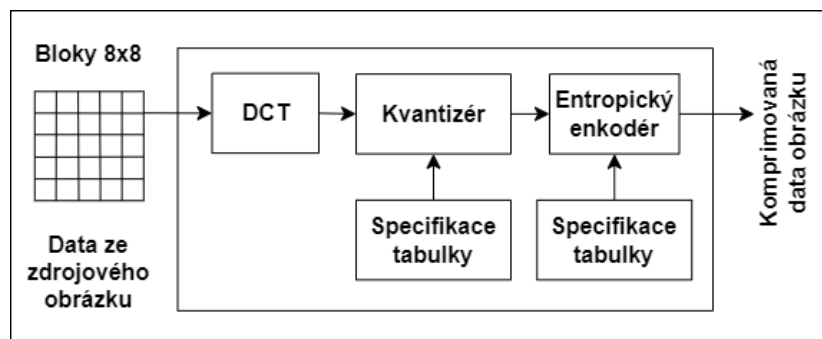
2.1 Joint Photographic Experts Group (JPEG)

Byl vyvinut ve stejnojmenné společnosti expertů výboru **Joint Photographic Experts Group**. Umožňuje jak bezztrátové, tak i ztrátové komprese s nejmenší náročností v oblastech hardwaru a softwaru. Dosahuje průměrného kompresního poměru přibližně 15:1. Umožňuje různé úrovně komprese, podporuje až 24 bitů barevné hloubky. Často se používá pro fotografie a obrázky se složitými barevnými přechody, ale při vysokých úrovních komprese může způsobit artefakty.

Ve formátu JPEG je klíčovým prvkem proces nazývaný diskretní kosinová transformace (DCT). Tato transformace převádí informace o barvách a intenzitě pixelů z prostorové do frekvenční domény. Výsledkem DCT jsou frekvenční koeficienty, které reprezentují, jaké frekvence jsou přítomny v daném bloku pixelů.

Bezztrátové komprese se u jeho nástupce **JPEG 2000** dosahuje pomocí kódovacích a kompresních technik založených na predikci – odstranění redundance. Těmi jsou například: Huffmanovo kódování, kódování délky běhu a diferenciální kódování. Přestože se jedná o bezztrátovou kompresi, velikost komprimovaného souboru závisí na konkrétním obsahu obrázku. Některé typy obrázků (např. fotografie s mnoha detaily a barevnými přechody) mohou být komprimovány lépe než jiné (např. jednoduché obrázky s ostrými hranami).

Prvním krokem JPEG komprese je převod na barevný model Y'CbCr, následuje podvzorkování jednotlivých složek, nejčastěji na model 4:2:0. V následujících obrázcích je znázorněn pohled na kodér a dekodér JPEG:



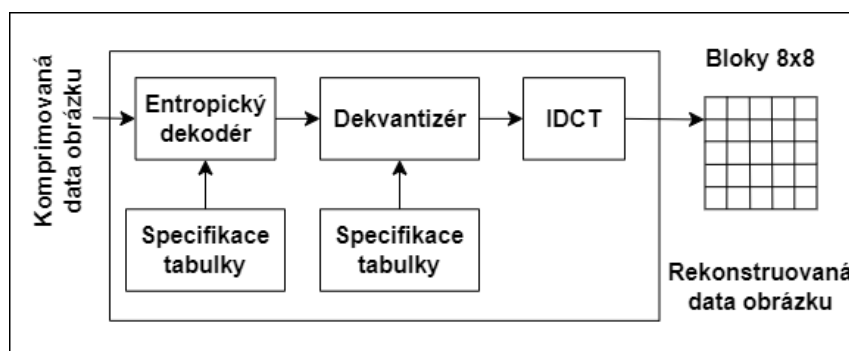
Obrázek 2.1 Kódování JPEG – rámeček kodéru (překresleno dle [2])

Blok kodéru zdrojového obrázku rozdělí vstupní data na bloky o velikosti 8x8 jasové a barevné složky. Následně jsou data převedena do transformačního bloku DCT, který provede dopřednou diskretní Kosinovu transformaci FDCT jako ztrátovou kompresi vstupních dat. Některé (vyšší) frekvenční složky jsou ztraceny, což vede k redukci detailů v obraze [2].

V bloku kvantizéru se za pomoci vícenásobných kvantovacích tabulek kvantují (zaokrouhlují) přivedené frekvenční koeficienty. Tyto tabulky určují velikost komprese a musí ji znát kodér i dekodér.

Entropický kodér se také podílí na redukci redundance výstupních dat. Analyzuje četnost výskytu různých symbolů, postupně čítá dané koeficienty metodou zig-zag, dochází k bezztrátové kompresi algoritmem RLE (Runlength encoding = kódování délky běhu) a vytvoří se kombinační tabulky. Každý vstupní symbol se pak nahradí (kóduje) příslušným kódem z tabulky – princip Huffmanova kódování.

Kódy pro jednotlivé symboly jsou připojovány k vytváření jednotného bitového proudu, ten je zapsán do výsledného JPEG souboru jako součást komprimovaných dat.



Obrázek 2.2 Kódování JPEG – rámec dekodéru (překresleno dle [2])

Při dekódování se celý postup obrátí. Komprimovaná data se přivádí na vstupní blok entropického dekodéru, jehož výstup je přiveden do bloku inverzní diskretní Kosinovy transformace IDCT – transformuje kosiny z frekvenční oblasti na konečné diskretní hodnoty a výsledkem jsou tedy rekonstruovaná data obrazu. [2].

2.2 JPEG 2000

Nástupce standardu JPEG. Poskytuje nejlepší poměr komprese ke kvalitě s možnostmi ztrátové i bezztrátové komprese. Dokáže pracovat s transparentním pozadím, pracuje s libovolnou bitovou hloubkou obrazu. Rovněž podporuje vysoké a nízké přenosové rychlosti, jelikož nedochází ke kompromisům v jeho výkonnosti.

Umožňuje nejmodernější kompresi díky implementaci DWT (diskrétní vlnkové transformaci) namísto klasické DCT. Stejně jako u JPEGu je nutný převod na barevný model Y'CbCr, následuje podvzorkování barvonosných složek a jejich nezávislé zpracování. Při kompresi dochází k rozdělení obrazu na dlaždice o stejné velikosti, na nich se potom aplikuje DWT transformace. Tato transformace převádí pixelovou hodnotu na soubor koeficientů, které reprezentují frekvenční složky obrazu.

Její koeficienty jsou kvantovány, některé z nich mohou být předsunuty před ostatní. Posledním krokem jsou kódovací algoritmy EBCOT a MQ kódování. EBCOT umožní adaptivní kódování bloků různými způsoby podle důležitosti, MQ zakóduje data na binární úrovni – binární symboly v bitovém proudu [2] [5].

Bezztrátová komprese v JPEG 2000 je založena na predikci, kódování rozdílů mezi hodnotami pixelů a předpovězenými hodnotami. Nejprve dochází k predikci hodnoty každého pixelu na základě průměrných hodnot okolních pixelů. Po predikci se vypočte rozdíl mezi skutečnou hodnotou pixelu a predikovanou hodnotou.

Rozdíly mezi skutečnou hodnotou a predikovanou hodnotou se kódují metodami Riceova nebo Golombova kódování. Následuje entropické kódování, obdobně jako u ztrátové komprese JPEG 2000 se snažíme opět minimalizovat redundantní části dat.

Bezztrátová komprese v JPEG 2000 dosahuje vysoké úrovně komprese při zachování všech informací obsažených v původním obrazu, čehož se využívá tam, kde je nutné uchovat všechny detaily a informace (např. lékařská diagnostika, archivace obrazů atd.).

2.3 JPEG XL

Jeden z nejnovějších kodeků vyvinutých pro velmi účinnou bezztrátovou i ztrátovou kompresi statických obrázků. Využívá percepčně optimalizovaný kodér, který byl koncipován na základě lidského zrakového vnímání (HVS). Ve srovnání s JPEG je univerzálnější a umožňuje dosáhnout lepší vizuální kvality obrázků při vyšších kompresních poměrech. Navržen rovněž pro webové a profesionální zpracování obrázků, podporuje vysoký dynamický rozsah a vysokou bitovou hloubku, progresivní kódování s širokou škálou možných aplikací, animace, alfa kanály, miniatury.

Jeho velkou výhodou je zpětná kompatibilita s formáty JPEG, a to v tom smyslu, že umožňuje efektivní bezztrátové překódování obrázků z JPEG do JPEG XL, což vede ke značnému snížení nákladů na úložiště. Tuto možnost tak mohou využít servery k jednoduchému přechodu na právě tento úspornější kodek.

Ve srovnání s JPEG nabízí výrazně vyšší kvalitu obrazu a lepší kompresní poměry (typicky 20:1 až 50:1), kódovací a dekodovací rychlost a vysokou věrnost ke zdrojovému obrázku. Nově také rozšiřuje podporu nových aplikací a pro 360° obrázky, série obrázků, velká panoramata či mozaiky a tisk.

2.4 High Efficiency Image File Format (HEIF)

Jedná se o moderní multimediální kontejnerový formát pocházející od společnosti Moving Picture Experts Group (MPEG). Byl navržen pro efektivní kompresi obrazových dat s cílem vysoké kvality a menší velikosti souborů. HEIF funguje jako univerzální kontejnerový formát pro ukládání různých multimediálních dat, zahrnující statické obrázky, animace, videa, alfa kanály a metadata, vše v rámci jednoho souboru.

HEIF využívá moderní a vysoce efektivní kompresní metody, jimiž jsou High Efficiency Video Coding (HEVC/H.265) a Advanced Video Coding (AVC/H.264), původně vyvinuté pro kompresi videa. Díky nim poskytuje vysokou kvalitu obrazu při menších velikostech souborů v porovnání se starším formátem JPEG. Umožňuje uchovat nejen jediný statický obrázek, ale také série obrázků, animace a krátké videosekvence, což je jeho klíčovou vlastností. Navíc podporuje High Dynamic Range (HDR), což umožňuje uchovat více detailů v jasných a tmavých částech obrazu díky širšímu rozsahu barev a kontrastů.

HEIC (High Efficiency Image Container) je konkrétní formát souboru, který využívá kompresi HEIF pro ukládání statických obrázků. Je optimalizován pro zachování vysoké kvality při menších velikostech souborů a využívá moderní kompresní technologie, které umožňují komprimovat obrázky s vysokou kvalitou. Jeho popularita stoupá díky schopnosti ukládat obrázky s vysokým rozlišením a vysokou kvalitou při zachování menších velikostí souborů, což je významná výhoda v oblasti digitálních médií a ukládání obrázků. HEIF a HEIC se stávají stále častějšími formáty pro ukládání a sdílení obrázků na moderních zařízeních, včetně mobilních telefonů, fotoaparátů a platforem sociálních médií. [6], [7].

2.5 AV1 Image File Format (AVIF)

Otevřený bezplatný obrazový formát založený na původním video kodeku AOMedia Video 1 (AV1). Poskytuje účinnou a vysoce kvalitní kompresi výjimečných kvalit při zlomku velikosti souborových dat, jako je tomu např. u JPEGu nebo PNG. Dosahuje vysokých kompresních poměrů bez kompromisů v kvalitě obrazu díky technikám podvzorkování barev a adaptivní kvantizaci, které umožňují výrazné snížení množství dat při zachování vizuální věrnosti obrazu. Kromě vysoké kvality komprese také poskytuje podporu zobrazování s vysokým dynamickým rozsahem HDR, široký barevný gamut a průhlednost.

Soubory formátu AVIF jsou organizovány do hierarchické struktury boxů, což jsou vnořené kontejnery obsahující různé typy dat a metadat. Obrazová data se ukládají jako sekvence komprimovaných obrázků a kódují se kodekem AV1, každý snímek má svůj vlastní box a je doplněn záznamem konfigurace dekodéru či parametry kódování. Tento způsob umožňuje ukládání více obrázků (řada miniatur nebo různých rozlišení stejného obrazu).

Jeho podpora stále roste, a to zejména díky nižší potřebě na šířku pásma pro webové stránky, aplikace, prohlížeče, nástroje pro úpravu obrázků, ale také napříč sítěmi a médii pro doručování obsahu (CDN). V mnoha případech mohou být soubory AVIF až o 50 % menší než ekvivalentní soubory JPEG při zachování stejné úrovně vizuální věrnosti. Pokročilé techniky kódování používané kodekem AV1 mohou vést k delší době kódování ve srovnání s tradičními formáty, jako jsou JPEG a PNG. Tvorba souborů ve formátu AVIF může být časově i výkonnostně náročnější v porovnání např. s JPEG. Podporuje i bezztrátovou kompresi [6], [8].

2.6 WebP

Jedná se o moderní obrazový formát vyvinutý společností Google. Kombinuje vysokou kvalitu obrazu s efektivní kompresí, což z něj činí vhodnou alternativu pro většinu webových aplikací, původně založených na formátech JPEG, PNG, nebo GIF, kde WebP dosahuje vyšších kompresních poměrů a vyšší podpory různých typů obrázků. Podporuje rovněž animace a dynamické obrázky.

Formát WebP podporuje jak ztrátovou, tak i bezztrátovou kompresi. Pro ztrátovou kompresi dosahuje vysokých kompresních poměrů s minimálními ztrátami kvality obrazu. Využívá kontejneru RIFF k uložení metadat a kodek VP8 pro ztrátovou kompresi s predikčními algoritmy umožňujícími predikovat hodnoty pixelů z okolních hodnot. Ukládají se jen chyby vzniklé předpovědí, správně predikované hodnoty jsou zastoupeny pouze nulovými hodnotami, kterých je v praxi většina. Tato skutečnost následně

umožňuje aplikaci i bezztrátových algoritmů (např. LZ77) s využitím kodeku VP8L a přispívá tak ke snížení celkové velikosti souborů.

V porovnání s PNG dosahuje WebP až o 26 % menší velikosti dat obrázků pro bezztrátovou kompresi a pro ztrátovou kompresi jsou objemy dat obrázků zmenšeny o 25-34 % než u JPEGu při ekvivalentním SSIM indexu kvality. Menší velikosti souborů jsou klíčovým faktorem pro rychlejší načtení webových stránek a úsporu místa velkých úložišť, což vedlo k rozšíření podpory tohoto formátu různými webovými prohlížeči [9], [10].

2.7 Portable Network Graphic (PNG)

Nepatentovaný rastrový grafický formát s bezztrátovou kompresí, rozšiřitelný, podporuje mnoho barevných typů, prokládání, průhlednost pixelů, využívá kompresní metodu Deflate a filtrování. Podporuje až 24 bitů barevnou hloubku. Oproti GIFu však neumožňuje animace.

Sestává se z hlavičky a datových bloků, přičemž každý může mít odlišný typ i velikost. Datové bloky se dělí na rozhodující a pomocné. Rozhodující (kritické) bloky musí umět zpracovat každý dekodér. Blok se skládá z částí: délka obsahu, název/typ, vlastní data a kontrolní součet CRC. Typy bloků jsou popsány čtyřmi znaky v ASCII kódu s rozlišením velkých a malých písmen. Velikost prvního znaku udává důležitost bloku (velké písmeno označuje kritické bloky, malé písmeno pomocné). Druhý znak podobně rozlišuje registrovaný či soukromý blok. Třetí je vždy velký, čtvrtý velký znak znamená, že blok nesmí být kopírován.

Všechny aplikace využívající PNG pracují pouze s bloky, kterým rozumí. Pomocné bloky lze přeskočit, pokud je daná aplikace nezná. Kritický blok přeskočit nelze, jestliže jej příslušná aplikace nezná, v dekódování již nelze pokračovat. Čtyři kritické bloky PNG jsou: IHDR (hlavička), PLTE (paleta), IDAT (obrazová data) a IEND (patička).

Po prvním kroku, který zahrnuje vytvoření palety a zakódování indexovaných barev, následuje vlastní komprese. Začíná predikcí, jinak také filtrací. Jedná se o nahrazování původních sekvencí vstupních dat sekvencí jinou, která je pro Deflate metodu efektivnější. Aplikace predikce probíhá po řádcích, dynamicky na základě analýzy konkrétních hodnot pixelů v daném řádku. Na každý řádek lze aplikovat jiný prediktor, což umožní kompresoru nalézt ty nejvhodnější kombinace. Existuje celkem pět různých typů filtrů [11]:

- **None** (bez filtru): Nedochozí k filtraci, uloží se každý pixel v původní hodnotě.
- **Sub** (subtract = rozdíl): Hodnota každého pixelu v řádku se odečte od hodnoty pixelu od něj nalevo. Metoda je efektivní, pokud jsou na řádku jen malé rozdíly mezi pixely.
- **Up** (nahore): Metoda porovnává pixely umístěné nad sebou a provede jejich rozdíl. Je efektivní, pokud jsou změny mezi pixely vertikální.
- **Average** (průměr): Pixelové hodnoty se odečtou od váženého průměru hodnot pixelů levého a nadřazeného pixelu. Tato metoda je efektivní pro obrazce, kde dochází ke změnám horizontálně i vertikálně.
- **Paeth** (Paethův prediktor): Rozdíl hodnot se provádí na základě Paethova předpovědního algoritmu, který kombinuje hodnoty levého, nadřazeného a diagonálního pixelu. Paeth prediktor je efektivní pro různorodé obrázky.

Po filtraci následuje samotná metoda Deflate, která provede onu bezztrátovou kompresi dat. Funguje na principu kombinace Huffmanova kódování a LZ77 (Lempel-Ziv 1977) algoritmu.

Pozn.: PNG formát bude v práci využíván jako bezztrátový kontejner pro komprimované obrázky. Výše definované formáty nejsou v prostředí MATLAB podporovány a nebylo by tak možné aplikovat jednotlivé objektivní metriky (některé z nich vyžadují dodatečné kodeky i pro zobrazení pomocí programů Windows Fotografie / Windows Prohlížeč fotografií, což je řešeno pomocí grafického editoru GIMP).

3. HODNOCENÍ KVALITY KOMPRESY

Hodnocení kvality komprese obrazu může být provedeno na dvou úrovních. První se zabývá subjektivním hodnocením kvality komprese, je plně závislá na pozorovateli, který hodnocení provádí, na jeho subjektivním vnímání, fyziologii zraku a vjemových schopnostech. Je časově náročnější, jelikož pro relevantní výsledky potřebujeme určitý počet subjektů a ze získaných dat teprve sestavit výsledky.

Druhá metoda je poněkud komplexnější. Objektívni hodnocení se opírá o nejrůznější matematické metody, není zatíženo subjektivním vnímáním konkrétního jedince, avšak nemusí být pro každý typ obrázku vždy správně aplikovatelné, vhodné a mohou nám v určitých případech poskytnout méně relevantní výsledky. Hlavní výhodou je jejich rychlost, ovšem některé vyžadují vyšší výpočetní výkon. Existuje však mnoho druhů objektívni metod a jimi se budeme dále zabývat.

Pokročilejší metody pak dokážou k hodnocení kvality kompresních algoritmuů využívat nejrůznější kombinace objektívni a subjektivni metod doplněné o analýzy komprimovaných dat pomocí umělé inteligence.

3.1 Objektívni metody hodnocení kvality

Objektívni hodnocení kvality obrazu se provádí pomocí různých metrik či měřítek. Oproti subjektivni metrikám mají pár podstatných výhod – jsou rychlé, levnější a nezávislé na subjektech. Jejich výsledky nemusí vždy korespondovat se subjektivni srovnáním, proto nám poskytují pouze jakýsi nezávislý přehled o kvalitě obrazu.

Žádná metrika tedy není úplně dokonalá, je třeba přihlédnout ke konkrétní okolnosti a charakteristice každého statického obrazu, jeho velikost, množství detailů, bitovou hloubku a další, lze však také kombinovat více různých metod a docílit tak komplexnějšího pohledu na kvalitu komprese obrazu.

Ukážeme si výčet několika nejznámějších metrik, jejich aplikovatelnosti, výhod a nevýhod či omezení, ale nejprve je nutné stanovit podmínky, za nichž můžeme jejich výsledky správně interpretovat.

Objektívni metriky můžeme dělit do tří skupin, některé umí hodnotit kvalitu i bez přítomnosti referenčního obrázku, nazýváme je jako **bez-referenční**. Jsou pro nás velmi cenné, ovšem nelze je využít pro všechny typy obrazů. Vyznačují se totiž velkou specifičností a neumožňují hodnocení např. 3D obrázků. Nejvíce rozšířené jsou metriky vyžadující referenční obrázek, a to buď celý, nezměněný, ve své původní kvalitě => **plně-referenční**, anebo alespoň jeho parametry pro porovnání => **s neúplnou referencí** [12].

3.1.1 Peak Signal to Noise Ratio (PSNR)

Peak Signal to Noise Ratio (PSNR), neboli “špičkový poměr signálu k šumu“, jak již název napovídá, jde o poměr mezi maximální možnou amplitudou signálu a šumu, který vznikl chybami při kompresi. Jedna z nejrozšířenějších a nejjednodušších pixelově orientovaných plně referenčních metod, disponuje svojí nízkou výpočtovou, malou časovou i výpočetní náročností.

Čím vyšší hodnota PSNR, tím méně šumu a obvykle tím i vyšší kvalita či podobnost obrazu, vyšší odstup signálu od šumu. To však nemusí nutně korespondovat s lidským vnímáním, zejména pokud jsou chyby po kompresi distribuovány nerovnoměrně. PSNR metoda je velmi rychlá, nenáročná a snadno implementovatelná. Její jednotkou jsou decibely (dB).

3.1.2 Structural Similarity Index Measure (SSIM)

Structural Similarity Index (SSI), v překladu “*index strukturální podobnosti*“, je metrika založená na funkcích lidského vizuálního systému (Human Visual System (**HVS**)), vyhodnocuje rozdíly mezi originálním a komprimovaným obrazem měřením jejich strukturální podobnosti. Zahrnuje aspekty jako jsou luminance, kontrast a detaily struktury, ale nemá takovou citlivost na jas a kontrast jako PSNR.

Porovnává rozdíly mezi okny obrázků o stejné velikosti, umí tedy poskytnout i grafický přehled jednotlivých oblastí – mapu podobnosti / rozdílnosti obrazů. Nabývá bezrozměrných hodnot v intervalu $\langle -1; 1 \rangle$, kde 1 znamená úplnou shodu. Vyšší hodnoty indikují lepší zachování kvality, vyšší strukturální podobnost mezi obrazy. Má také svá omezení při porovnávání obrazů s různými typy zkraslení nebo výraznými strukturálními odlišnostmi. Proto se často kombinuje s dalšími metrikami pro komplexnější pohled.

3.1.3 Natural Image Quality Evaluator (NIQE)

Jedná se v překladu o přirozený hodnotitel kvality obrazu (NIQE). Patří do skupiny bez-referenčních metrik a používá se k posouzení kvality na základě analýzy statistik obrazu. Vychází z předpokladu určitých statických charakteristik v přirozené scéně a pokouší se identifikovat odchylky v datech. K tomu využívá kontrast, texturu, distribuci barev, různé typy šumu.

Metoda operuje bez potřeby referenčních obrazů nebo trénování na lidských hodnoceních zkraslených obrazů. Využívá pouze měřitelné odchylky, snaží se eliminovat závislost na trénování na zkraslených datech a spoléhat se výhradně na statistické charakteristiky přirozených obrazů pro posouzení kvality.

Je bezrozměrná, vyšší hodnoty indikují zhoršenou kvalitu, protože poukazují na větší odchylky od statických charakteristik obrazů. Nemusí vždy správně interpretovat určité druhy zkreslení, ale její velkou výhodou je právě nezávislost na referenčních datech, což lze využít i v metodách strojového vidění [13].

3.1.4 Blind Referenceless Image Spatial Quality Evaluator (BRISQUE)

Hodnotitel prostorové kvality slepého bez-referenčního snímku (BRISQUE) je metoda, která se podobně jako NIQE spoléhá na statické vlastnosti obrazu a jejich porovnání s naučenými modely na různých typech obrazů. Hodnocení se zaměřuje na kvantifikaci možných ztrát přirozenosti v obrazech. Jde vlastně o identifikaci neobvyklých odchylek od očekávaných statických charakteristik typických pro kvalitní obrazy namísto hledání konkrétních vlastností zkreslení, jako jsou rozmazání, blokování atd. Využívá lokálně normalizované lumenční koeficienty k hodnocení ztrát přirozenosti v obrazech v důsledku přítomnosti zkreslení.

Při trénování se učí z datových sad obrazů různých kvalit, klade se větší důraz právě na odchylky od očekávaných charakteristik. Úskalím jsou opět některé druhy zkreslení, na které nebyla metrika trénována. Výsledné hodnoty lze interpretovat stejně jako u NIQE, vyšší hodnota znamená zhoršená kvalita obrazu. Dosahuje statisticky lepších výsledků než např. PSNR a SSIM [14], [15].

3.1.5 Universal Image Quality Index (UIQI)

Index univerzální kvality obrazu (UIQI) je komplexní metrika poskytující kvantitativní hodnocení kvality kombinující několik faktorů jako jsou podobnost, kontrast a strukturální informace různých vlastností obrazu a jas. Zahrnuje porovnání statistik v různých aspektech, např.: podobnosti průměrů, variance a kovariance obrazů. Poskytuje komplexnější pohled při hodnocení kvality oproti jednodušším metrikám typu PSNR, MSE, MAE, aj.

Na rozdíl od bez-referenčních metod, které mohou hodnotit kvalitu obrazu pouze na základě informací obsažených v samotném testovaném obrázku, UIQI potřebuje srovnání s referenčním obrázkem k dosažení svého hodnocení. Její hodnota se obvykle pohybuje mezi 0 a 1, kde 1 značí dokonalou shodnost a 0 označuje úplnou rozdílnost. Vyšší hodnoty UIQI tedy znamenají vyšší kvalitu komprimovaných obrázků. Jedná se o plně referenční metodu hodnocení míry podobnosti dvou snímků.

3.1.6 Video Multi-Method Assessment Fusion (VMAF)

V doslovném překladu ji lze interpretovat jako „Fúze hodnocení videa pomocí více metodických přístupů“ (VMAF). Tento pokročilý algoritmus vyvinutý společností Netflix slouží pro percepční hodnocení kvality videí a obrázků. Kombinuje výhody modelování lidského vnímání, různých prostorových a časových metod hodnocení spojených pomocí modelů strojového učení za účelem přesnějšího a komplexnějšího pohledu z hlediska měření. Zaměřuje se na artefakty vytvořené kompresí či změnou měřítka, odhaduje skóre kvality jeho výpočtem z několika algoritmů hodnocení kvality a spojením s podpůrným vektorovým strojem (SVM – Support Vector Machine).

K hodnocení kvality obrazu využívá kompletní informace o referenčním obrázku a porovnává je s testovaným obrazem. I když je tato metrika specifická pro videa, lze ji také použít k hodnocení kvality jednotlivých obrázků. Bylo prokázáno, že funguje poměrně dobře pro obrazové kodeky založené na učení. Vzhledem k tomu, že metrika přijímá jako vstupní nezpracované obrázky ve formátu barevného prostoru YUV, obrázky PNG (barevný prostor RGB) jsou převedeny do formátu YUV 4:4:4 pomocí FFMPEG.

Zakládá si na předních metrikách kvality obrazu, zahrnujících Visual Information Fidelity (VIF) – věrnosti vizuální informace, Detail Loss Metric (DLM) – metriky ztráty detailů a využívá podporu vektorové regrese (SVR – Support of Vector Regression) k integraci předpovědí z těchto metrik do jediného skóre. Toto skóre je navíc spojeno s výsledky subjektivních experimentů (MOS – Mean Opinion Scores). Vyšší skóre znamená lepší kvalitu obrazu [6], [16].

3.1.7 Visual Information Fidelity for Pixel-based images (VIFP)

Rozšíření metriky Visual Information Fidelity (VIF), lze ji interpretovat jako „Věrnost vizuálních informací pro obrázky založené na pixelech“. Hodnotí kvalitu pixelů v obraze, zachování jejich vizuálních informací. Provádí porovnávání struktur a textur pixelů a poskytuje nám v podstatě přehled o efektivnosti komprese z hlediska zachování detailů. Bere v úvahu vnímání lidského vizuálního systému HVS, snaží se simulovat lidské vnímání detailů a textur. Vyžaduje vstup referenčního obrázku = plně-referenční metrika.

Její hodnoty vyjadřující míru podobnosti se pohybují v intervalu $<0; 1>$, kde hodnoty blízké se k 1 naznačují vysokou podobnost mezi originálním a komprimovaným obrázkem na úrovni detailů a textur. Naopak nižší hodnoty znamenají větší ztrátu detailů, může docházet k degradaci kvality [12].

3.1.8 Gradient Magnitude Similarity Deviation (GMSD)

Metoda GMSD (Gradient Magnitude Similarity Deviation) je moderní plně referenční metrikou pro porovnávání kvality obrazu, která kombinuje vlastnosti globální a lokální podobnosti mezi dvěma obrázky. GMSD měří odchylku v jasových gradientech mezi referenčním a zkoumaným obrazem. Vyšší hodnoty GMSD indikují větší odchylku mezi intenzitami světla obrazů, a tedy nižší kvalitu. Tato metrika je zejména užitečná pro hodnocení obrazových algoritmů, jako je komprese nebo úprava obrazu, kde je důležité zachovat detaily a strukturu.

V kompresních algoritmech je GMSD často používána pro optimalizaci parametrů komprese a pro porovnání kvality obrazu před a po kompresi. Dále se využívá při segmentaci obrazu k vyhodnocení přesnosti oddělení jednotlivých objektů a struktur. V restauraci obrazu slouží k hodnocení úspěšnosti obnovování chybějících detailů a struktury. Její hodnoty se nachází v intervalu $<0; 1>$. Například, při kompresi JPEG s kvalitou 90 dosahuje GMSD kolem 0.045 (což naznačuje mírnou odchylku od referenčního obrazu), zatímco při kompresi s kvalitou 50 může dosahovat hodnoty až kolem 0.2 (značí výraznější degradaci obrazové kvality) [17].

3.1.9 Feature SIMilarity index for color images (FSIMc)

Metoda FSIMc je metrikou navrženou k posouzení podobnosti mezi dvěma barevnými obrazy založenými na extrakci strukturálních informací, vyžaduje úplnou referenci. Kombinuje barevné informace a strukturální podobnost obrazu, což z ní činí vhodný nástroj pro hodnocení kvality obrazu s ohledem na lidskou vizuální percepci (HVS). Tato metrika je založena na měření podobnosti v různých prostorových frekvenčních pásmech a je schopna zachytit jak globální, tak lokální strukturální informace.

Například, vysoce kvalitní obraz s minimálními kompresními artefakty může dosáhnout hodnoty FSIMc kolem 0.9, zatímco obraz s výraznými artefakty způsobenými kompresí může mít hodnotu FSIMc kolem 0.6. Výsledky FSIMc jsou interpretovány v intervalu $<0; 1>$, kde vyšší hodnota indikuje lepší kvalitu obrazu [18].

3.2 Subjektivní metody hodnocení kvality

V rámci analýzy a posouzení kvality statických obrázků je důležité zvážit nejen objektivní metriky, ale také subjektivní přístupy, které reflektují individuální vnímání a preference uživatelů. Subjektivní metriky se staly nedílnou součástí procesu hodnocení, jelikož poskytují hlubší vhled do celkového vjemového dojmu, který obrázky vyvolávají.

Oproti objektivním metodám nám přináší určité výhody spočívající v možnostech zachycení věrnějšího odrazu lidského vnímání, jeho komplexnosti a estetické preference. Umějí zachytit různé aspekty kvality, jako je estetika, kompozice, barevná přitažlivost, které mohou ovlivňovat celkový dojem. Jsou flexibilní, mohou být upraveny pro specifické aplikace a kontexty.

Najdeme u nich i značnou část nevýhod. Mezi ty největší patří časová a finanční náročnost, jelikož sběr dat od jednotlivých respondentů bývá často zdoluhavý proces a je třeba počítat i následné náklady na zpracování získaných dat, nikoliv jen samotnou účast v průzkumu. Pro získání spolehlivých výsledků je nutné zajistit větší množství respondentů, jelikož tyto metody s sebou nesou i rizika v podobě nedostatečné standardizace, omezené reprodukovatelnosti a možnostech potenciálního zkreslení výsledků kvůli individuálním preferencím či vnějším faktorům (únava, prostředí atd.). Z těchto důvodů se počítá průměrné skóre pro všechny pozorovatele, označujeme ho jako průměrné skóre mínění MOS [12].

3.2.1 Double Stimulus Impairment Scale (DSIS)

Metoda hodnocení podle subjektu na základě škály. Respondenti ohodnocují dvojici obrázků (referenční a zkreslený) různých scén na základě stanovených kritérií (jas, kontrast, ostrost) pomocí škály, která může být definována v rozmezí např. 1 až 5, kde 1 značí velmi špatnou kvalitu, velké zkreslení a 5 vynikající kvalitu, nepostřehnutelné zkreslení. Touto metodou lze prozkoumat několik proměnných parametrů, kterými mohou být: bitová rychlost, kompresní formát aj. Soustředí se na hledání zlomu ve vnímání kvality.

3.2.2 Double Stimulus Continuous Quality Scale (DSCQS)

Oproti DSIS se měří na kontinuální stupnici od 0 do 100, namísto referenčního obrázku je zde respondentovi poskytnuta dvojice obrazů A a B, přičemž není předem stanoveno, který z nich je referenční. Metoda se soustředí na hodnocení diferencí u každého páru s ohledem na následující scénu, je tedy vhodná pro sledování malého stupně zkreslení.

3.2.3 Single Stimulus Method (SSM)

V metodě SSM jsou pozorovatelům postupně prezentovány samostatné scény bez porovnávání s jinými obrazy. Poskytuje dva přístupy: SS (Single Stimulus) bez opakování jednotlivých scén a SSMR (Single Stimulus Multiple Repetitions) s vícenásobným opakováním scén. Pro statické obrázky není přístup SSMR vhodný, proto se jím dále nebudeme zabývat.

Pro výsledné hodnocení lze aplikovat dva způsoby: **nepřímý** (adjectival) zahrnuje pětistupňovou škálu s krokem 0,5 stupně a **nekategorický** (non-categorical) využívá kontinuální stupnici s rozsahem 0 až 100, kde respondenti hodnotí kvalitu scény na základě svého subjektivního vnímání a posouvají hodnotící ukazatel na určité místo škály odpovídající jejich vnímání kvality [19].

4. IMPLEMENTACE KOMPRESNÍCH A HODNOTÍCÍCH NÁSTROJŮ

Implementace těchto nástrojů představuje klíčový krok pro následující procesy zkoumání a hodnocení kvality obrazových dat. Tato kapitola se podrobněji zaměřuje na praktickou realizaci kompresních algoritmů a aplikaci zvolených objektivních metrik pro hodnocení kvality komprimovaných statických obrazů.

Práce na takovém projektu začíná vytvořením flexibilního frameworku, který bude využíván jako základní kámen pro celkový proces komprimace a hodnocení. Framework nebude tedy pouze součástí bakalářské práce, je upraven tak, aby jej bylo možné využívat v rámci laboratorní úlohy. Má za úkol usnadnit zkoumání statických obrázků a urychlit jejich analýzu. Nabízí možnosti interní komprimace s využitím nástroje Ffmpeg nebo přípravu externě komprimovaných obrázků pro následný výpočet implementovaných hodnotících metrik, souhrnně označovaných jako “analýza obrázků”.

4.1 Metodiky komprimačních algoritmů

Při navrhování kompresních postupů bylo hlavním cílem dosáhnout užitečných výsledků v kontextu porovnání různých kompresních formátů. Tento požadavek se zaměřuje také na minimalizaci bitů na pixel (BPP), což umožní důkladně srovnávat výsledky mezi jednotlivými formáty. Klíčovým faktorem je přiblížit se k optimálně nízkým hodnotám BPP, abychom mohli objektivně porovnávat účinnost a výhody jednotlivých kompresních algoritmů.

Pro interní kompresi obrázků s možností nastavování parametru kvality QV (quality value) do zvoleného výstupního formátu je využíván program Ffmpeg. Celý proces komprimace po jednom obrázku by byl pro uživatele zdlouhavý a časově příliš náročný, tudíž je tento program volán pomocí definovaných skriptů a příkazového řádku MS Windows předáním přes vytvořenou funkci *compressImage.m* v Matlabu.

Tato funkce obsahuje několik částí kódu pro komprimaci do uživatelem zvoleného výstupního formátu, unikátní časovou značku v názvu nově komprimovaných souborů. Provádí rovněž jeho převod do bezztrátového kontejneru PNG a ukládá cesty všech vzniklých souborů do proměnných sloužící jako mezi-paměť adres celého procesu.

Změnou hodnoty QV dochází k vizuálním změnám v obraze, jako jsou ztráta detailů, zvýraznění artefaktů nebo zhoršení celkové ostrosti obrázku, mění se také výsledná velikost souboru. Různé kompresní formáty mají specifické rozsahy tohoto parametru. Definice mohou být odlišné. U některých formátů může 0 znamenat optimální kvalitu,

zatímco u jiných je vyšší číslo spojeno s lepší kvalitou, liší se v závislosti na použitém kodeku a vnitřní implementaci v programu FFmpeg. V rámci aplikace byly jejich meze intervalů komplexně označeny popisky “MIN“ a “MAX“, přičemž “MAX“ hodnota koresponduje s nejvyšší mírou komprese obrázku.

Za účelem automatického vytvoření několika různě komprimovaných vzorků od všech zvolených formátů se do zmíněného algoritmu vnořil for-cyklus, jehož úkolem je vytvořit uživatelem zadaný počet vzorků s odpovídajícím krováním parametru kvality QV, jehož intervaly lze blíže specifikovat.

Využití programu FFmpeg ovšem přineslo i jisté nevýhody. Bez složitější kompilace externích knihoven, jako jsou například *libheif* nebo *libjpeg*, nelze provádět správnou komprimaci do formátů HEIF a JPEG. FFmpeg tyto knihovny v základní verzi neobsahuje. Pro JPEG využívá standardně definovanou knihovnu *mjpeg*, neboli Motion JPEG. Tento formát není vhodný pro kompresi statických obrázků, nýbrž jednotlivých snímků videí z průmyslových IP kamer aj. Navržená aplikace a kompresní funkce obsahuje tedy pouze možnost rozšíření – úpravou příkazů pro FFmpeg a mezi QV. Kodek pro HEIF je prozatím skrytý, nicméně JPEG zůstal dostupný a slouží nyní pouze jako ukázka nevhodně zvoleného kodeku.

Dalším formátům bylo nezbytně nutné přiřadit správné knihovny. Konkrétně jsou to: JPEG 2000 – *jpeg2000*, JPEG XL – *libjxl*, AVIF – *libaom-av1*, WebP – *libwebp*. Tyto formáty jsou v současné verzi frameworku funkční, byly vybrány i z důvodu jejich širokého využití v nejrůznějších oblastech.

Aplikace v rámci bakalářské práce získala rozšíření o možnost načtení externě komprimovaných obrázků, v našem případě v prostředí grafického editoru GIMP. Tím je uživateli umožněno prozkoumat nejznámější formát JPEG, benefity formátu HEIF – *x265 encoder* či jiné, další. Podporované formáty obrázků jsou definovány v hlavní funkci *START_MainGUI.m*, v proměnné *supportedFormats*.

4.2 Aplikované objektivní metriky hodnocení kvality

Různé kompresní algoritmy vyžadují odlišné přístupy k hodnocení kvality, aby reflektovaly specifika jednotlivých formátů a jejich efektivitu v zachování detailů, barev a celkové kvality obrázku. Níže uvedené metriky volíme s ohledem na odlišná specifika kompresních formátů a jejich schopnost posuzovat změny kvality v mnoha aspektech obrázků.

PSNR a SSIM jsou zvoleny pro jejich rychlost, univerzálnost a schopnost detekce změn v jasových, kontrastních a strukturálních aspektech obrázků. Tyto metriky jsou obecně využívány a poskytují informace o výsledné kvalitě vzhledem ke ztrátě dat při

kompresi. K jejich aplikaci se využívá doplňku Image Processing Toolbox (IPT) verze 23.2 pro Matlab.

NIQE a BRISQUE byly zahrnuty jako bezreferenční metriky, umožňují hodnotit kvalitu bez přítomnosti originálního obrázku. Tato vlastnost je vhodná při jejím posuzování v reálném prostředí, kde originální obrázek nemusí být k dispozici. Funkce jsou rovněž obsaženy v doplňku IPT.

Do výčtu metrik byla začleněna i metoda UIQI, která slouží k porovnání kvality obrázků a měření jejich podobnosti. Tato metrika byla využita pro demonstrační účely a srovnání jejich výsledků s ostatními metrikami při hodnocení kvality komprimovaných obrázků. Implementace pochází z doplňku Image Quality – Index Analysis GUI verze 1.6.0.0 (lze najít v lit. [20]), dostupného na stránkách MathWorks. Byla modifikována pro porovnávání dvou statických obrázků jako samostatná funkce *calculateUIQI.m*.

Pro náročnější posouzení kvality byly implementovány metriky VIFP a VMAF, které se zaměřují na vizuální podobnost s lidským vnímáním. Jsou komplexnější, umožňují podrobnější zhodnocení kvality s ohledem na lidský zrak a psychovizuální aspekty. Výpočet VMAF se provádí přes program FFmpeg s využitím knihoven *lavfi* a *libvmaf*. VIFP pochází z online dostupného skriptu [21], celý adresář *metrix_mux*, kde bylo nutné přizpůsobit vstupní proměnné pro dva statické obrázky. Obě tyto funkce tedy využívají referenční obrázek, ačkoliv je možné se setkat i s bez-referenčními aplikacemi. Podobnou aplikaci lze najít i v literatuře OMNIQAD [6].

Komplexnějšího posouzení kvality je dosaženo upravenými implementacemi metrik GMSD (Gradient Magnitude Similarity Deviation), upravená funkce *calculate_GMSD*, a FSIMc (Feature Similarity Index for color images), upravená funkce *calculate_FSIM*. Implementace obou metrik zahrnuje analýzu různých vlastností obrazu v různých prostorových frekvenčních pásmech, což umožňuje detailnější posouzení jejich podobnosti a kvality.

GMSD se zaměřuje na hodnocení podobnosti mezi dvěma obrazy prostřednictvím analýzy jejich gradientů, což umožňuje zachytit rozdíly v kontrastu a struktuře mezi obrazy. Původní verzi funkce pro výpočet GMSD lze najít v [22]. FSIMc je rozšířením metriky FSIM pro barevné obrazy, která kombinuje barevné informace s analýzou strukturální podobnosti obrazu. Tímto způsobem modeluje lidskou vizuální percepční kvalitu barevných obrázků a zachycuje jak globální, tak lokální strukturální informace v obraze. Původní metriky FSIM a FSIMc převzaty z [23].

Všechny výše zmíněné metriky jsou prostřednictvím programu MATLAB implementovány ve společné funkci *performAnalysis.m*, ta zároveň přebírá uložené adresy komprimovaných obrázků z mezipaměti kompresní funkce *compressImage.m*,

počítá skutečné hodnoty BPP a aplikuje jednotlivé metriky. Jejich sled, základní ovládání včetně předání vstupních parametrů a dat je realizováno v rámcové funkci uživatelského rozhraní *START_MainGUI.m*, která po ukončení všech výpočtů metrik provede vykreslení závislostí do nového okna.

Výpočet hodnot BPP je proveden pro každý komprimovaný obrázek dle následujícího vzorce:

$$BPP = \frac{\text{Velikost souborů v bitech}}{\text{Počet pixelů}}. \quad (4.1)$$

4.3 Popis uživatelského prostředí GUI

V rámci automatizace komprimačních a hodnotících procesů bylo nezbytné vytvořit uživatelsky přívětivé a jednoduché prostředí GUI, viz. Obrázek 4.1, ve kterém lze definovat vstupní a výstupní parametry, adresáře, spouštět kompresi nebo funkci analýzy. Z uživatelského hlediska jej lze rozdělit na dvě poloviny, levou a pravou.

V levé části odshora tedy nejprve zadáváme zdrojovou cestu k referenčnímu obrázku, což je základní kámen pro kompresi i analýzu. Dále určíme výstupní adresář pro komprimované obrázky, pokračujeme volbou výstupních komprimačních kodeků, úpravou mezi parametrů QV a určením počtu kroků, tedy počtu obrázků na výstupu k jednotlivým kodekům. QV parametry lze měnit v již předvyplněných polích, pro náповědu jsou mezi nimi zobrazeny jejich intervaly. Označení MIN / MAX definují minimální a maximální hranici intervalu míry komprese.

Uprostřed najdeme dvě tlačítka – **Vymazat komp. data** (nejprve je skryto) a **PROVÉST KOMPRESI**. Po spuštění komprese jsou do výstupního adresáře ukládány jednotlivé obrázky vč. bezztrátových kontejnerů PNG.

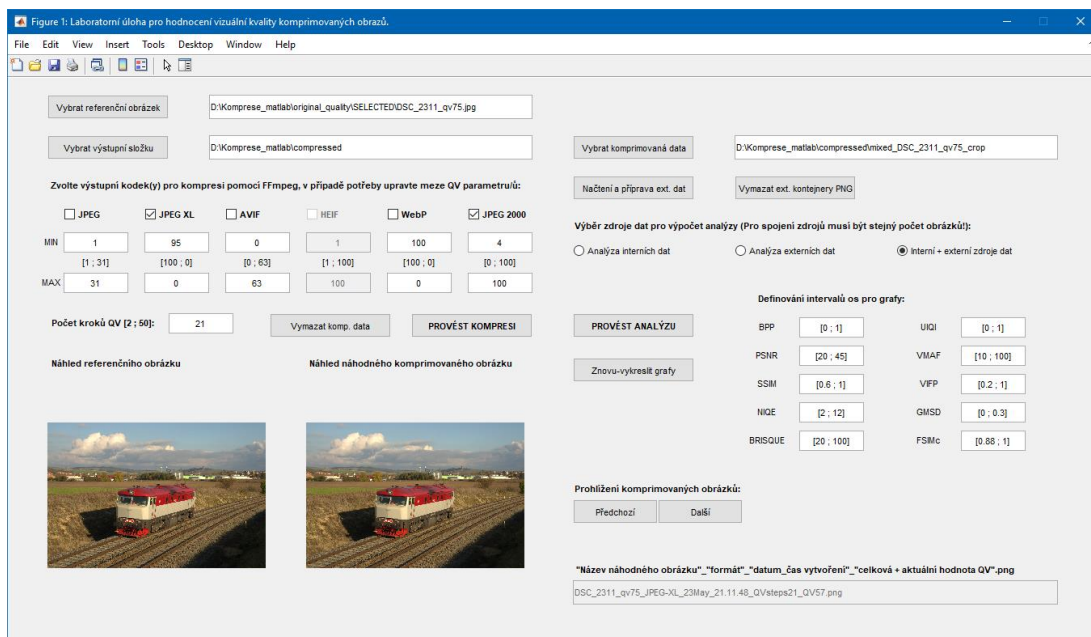
O výběru referenčního obrázku, výstupní složky či dokončení komprese je uživatel informován prostřednictvím tzv. message-boxů. Po výběru referenčního obrázku, rovněž po dokončení komprese (tlačítko pro vymazání obrázků definovaných formátů je již zpřístupněno), se zobrazí náhledy referenčního a náhodného komprimovaného obrázku. Lze také procházet mezi komprimovanými obrázky v okně *Náhled náhodného komprimovaného obrázku*, což je doplněno o výpis jeho názvu, ze kterého je patrné, o jaký snímek se jedná včetně aktuálního QV parametru a typu zvoleného kodeku.

V pravé části GUI lze zadat cestu k adresáři s již komprimovanými obrázky. Dále je třeba stiskem **Načtení a příprava ext. dat** provést načtení jejich adres a vytvoření jednotlivých PNG kontejnerů. Po tomto kroku je uživateli umožněno tyto kontejnery z adresáře opět vymazat.

Následuje volba zdroje dat pro výpočet analýzy. Zde má uživatel tři možnosti, odkud bude proces analýzy počítat výsledky jednotlivých metrik. Volba **Analýza interních dat** znamená, že budou předány k analýze pouze ty obrázky, které byly komprimovány prostřednictvím Ffmpeg implementace v rámci této aplikace. **Analýza externích dat** bere v potaz jen obrázky načtené z externího zdroje. Poslední možnost **Interní + externí zdroje dat** provede načtení adres obrázků z obou zdrojů, sjednotí je do společné matice a předá k analýze. Pro tuto volbu MUSÍ oba zdroje dat obsahovat stejný počet obrázků všech jednotlivých formátů!

Samotnou analýzu pak spouštíme tlačítkem **PROVÉST ANALÝZU**. V závislosti na dostupném výpočetním výkonu a velikosti jednotlivých obrázků (objemu dat) jsou postupně prováděny výpočty výsledků metrik, při jejichž dokončení aplikace automaticky vykreslí výsledky v novém okně. Zobrazí se devět grafů s metrikami: PSNR, SSIM, NIQE, BRISQUE, UIQI, VMAF, VIFP, GMSD a FSIMc. Jejich výsledky jsou vztaženy ku hodnotám BPP jednotlivých obrázků. Po prvotním vykreslení je zpřístupněno tlačítko **Znovu-vykreslit grafy**. Toho lze využít v případě, kdy je nutné upravit intervaly některých os grafů bez nutnosti opakování komprese / analýzy. Pro tento typ úprav byla aplikace vybavena textovými poli v pravé spodní části s příslušnými popisky, ve výchozím stavu předvyplněná a přístupná i pro první analýzu.

Většina funkcí GUI (kromě zadávání intervalů) je ošetřena vstupními podmínkami, odezva spuštěných procesů (i v případě chyby při kompresi) je řešena zobrazením informačního okénka (message box) a výpisem do příkazového okna MATLABu.



Obrázek 4.1 Pohled na uživatelské prostředí aplikaci k laboratorní úloze

Poslední část GUI umožňuje uživateli listování mezi interně komprimovanými obrázky, kde se ve spodním textovém poli zobrazují jeho základní informace. Díky vytvořenému uživatelskému GUI lze propojit komprimační a hodnotící algoritmy do jednoho celku.

4.4 Praktická aplikace a výsledky

K testování bylo vybráno celkem osm různých snímků, což vedlo k zajištění rozmanitosti ve vlastnostech, struktuře, odlišném rozlišení, barevnosti, kontrastu a světlosti jednotlivých scén. Vybrané snímky pochází z online dostupných databází nebo z vlastního zdroje (pořízen pomocí Nikon D7000, bezztrátově uložen do RAW (NEF) a převeden do PNG kontejneru).

Tabulka 4.1 Použitá rozlišení a odpovídající snímky

Rozlišení			Snímky	
Horizontální × vertikální počet pixelů	Celkový počet pixelů [Mpx]	Poměr stran	Zdroj / databáze	Názvy snímků [.png / (.jpg)*]
256 × 256	0,066	1:1	CSet8 [24]	Barbara, Boats
481 × 321	0,154	3:2	CBSD68 [25], [26]	0011, 0058
768 × 512	0,393	3:2	Kodak [27]	kodim23
2000 × 3000	6	2:3	Unsplash [28]	sarah-sheedy- unsplash*
4920 × 3280	16,138	3:2	Vlastní: NIKON D7000 ořez a snížení QV (75)	DSC_2311_qv75*
5568 × 2784 (360°)	15,501	4:2	QooCam 3, Kandao [29]	Tokyo_Station

V další části jsou představeny vybrané snímky doplněné o výsledky z aplikovaných objektivních metrik, graficky znázorněných závislostí funkcí *plot* pro získané hodnoty ku počtu bitů na pixel (rozdílnému bitovému toku).

Barbara.png (256 x 256)



Boats.png (256 x 256)



Terej.png (481 x 321)



Arches.png (481 x 321)



kodim23.png (768 x 512)



sarah-sheedy-unsplash.jpg (2000 x 3000)



DSC_2311_qv75.jpg (4920 x 3280)



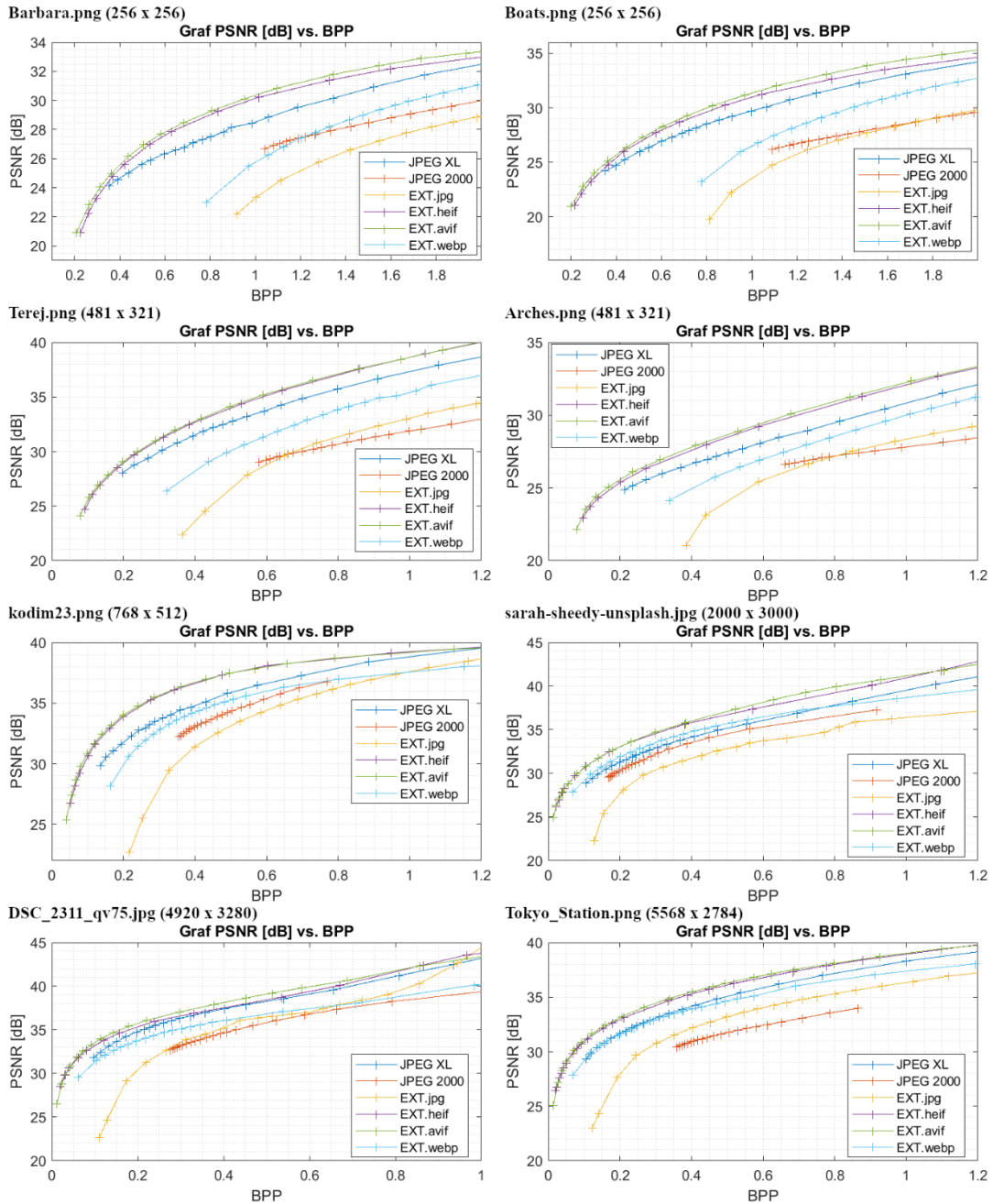
Tokyo_Station.png (5568 x 2784)



Obrázek 4.2 Představení jednotlivých testovacích snímků

4.4.1 Výsledky pro metriku PSNR

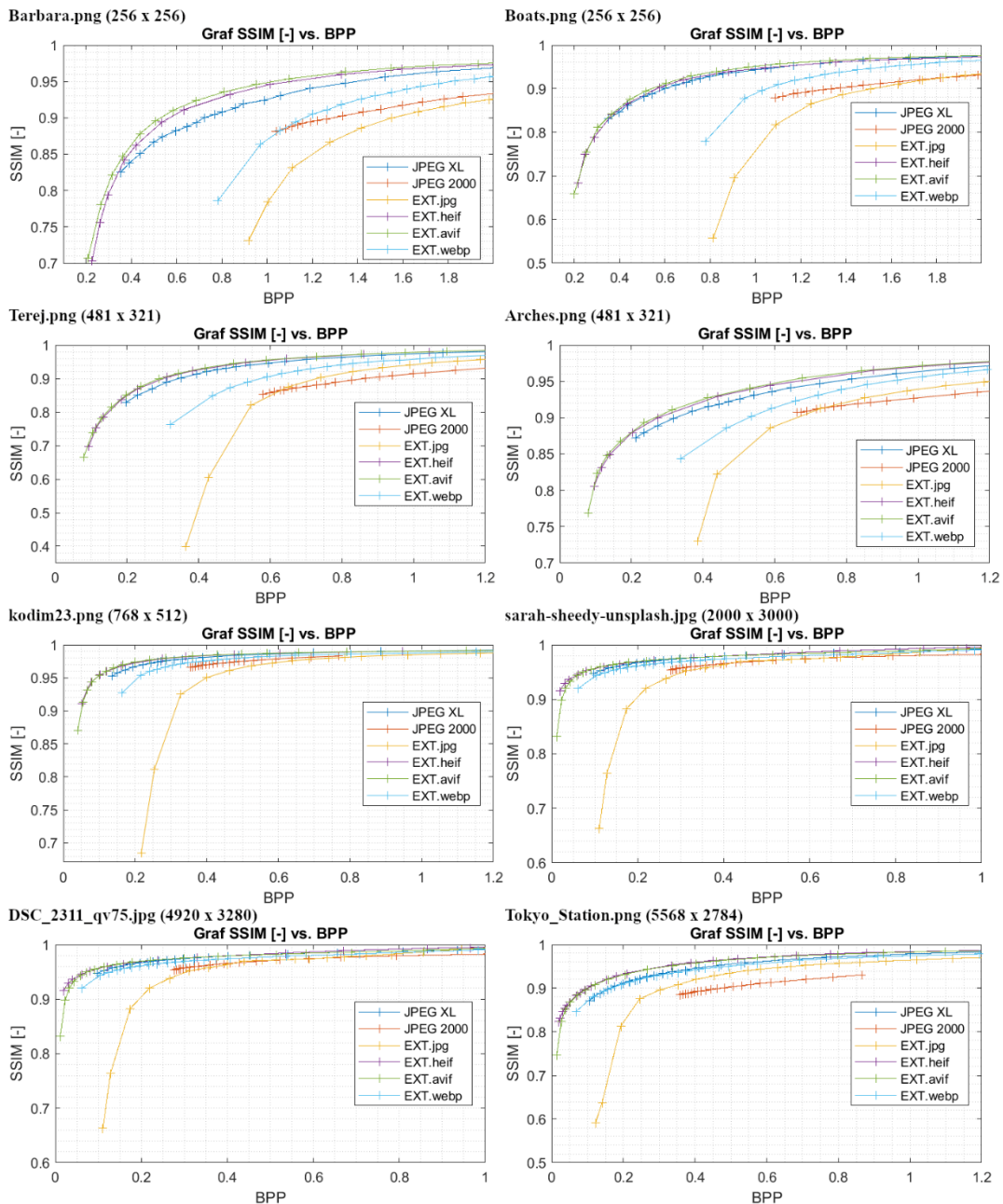
Metodou PSNR získáme rychlý přehled o kvalitě komprimovaných snímků, je citlivá na přítomnost artefaktů vzniklých při kompresi. Dle těchto výsledků nám vychází nejlépe formáty AVIF a HEIF, dokáží nejefektivněji pracovat i s menším množstvím dat. Velmi dobrých výsledků dosahuje také JPEG XL. U obrázků s větším rozlišením lze zvážit i výhody formátu WebP.



Obrázek 4.3 Výsledky pro metriku PSNR

4.4.2 Výsledky pro metriku SSIM

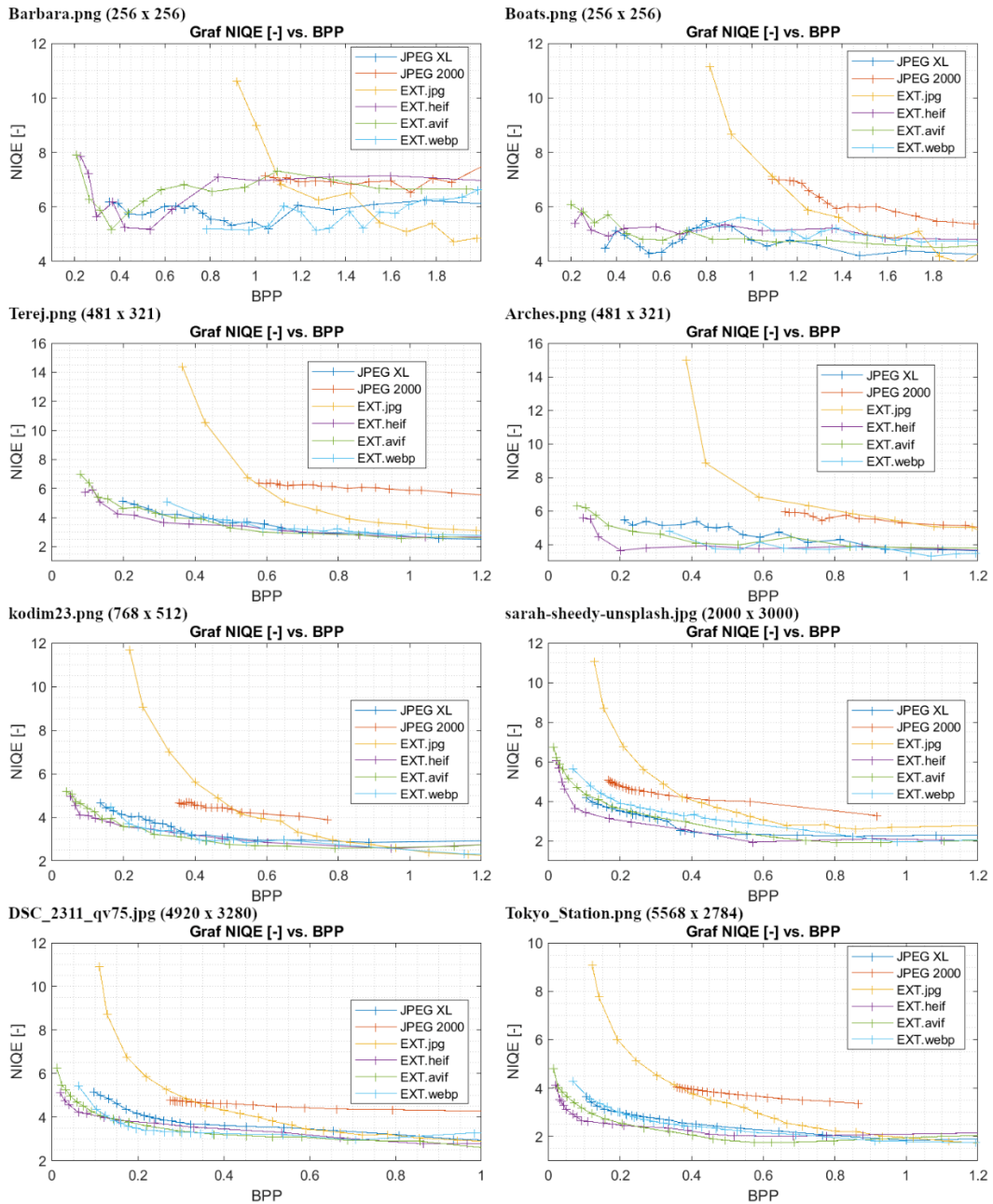
Metoda SSIM poskytuje sofistikovanější přehled o kvalitě komprimovaných snímků než PSNR, jelikož bere v úvahu lidské vnímání podobnosti. Formáty AVIF a HEIF opět dosáhly nejlepších výsledků, protože efektivně zachovávají strukturu obrazu i při vyšší kompresi. JPEG XL rovněž vykazuje velmi dobré výsledky, zatímco WebP je vhodný pro obrázky s větším rozlišením, kde zachovává dobrou strukturální podobnost.



Obrázek 4.4 Výsledky pro metriku SSIM

4.4.3 Výsledky pro metriku NIQE

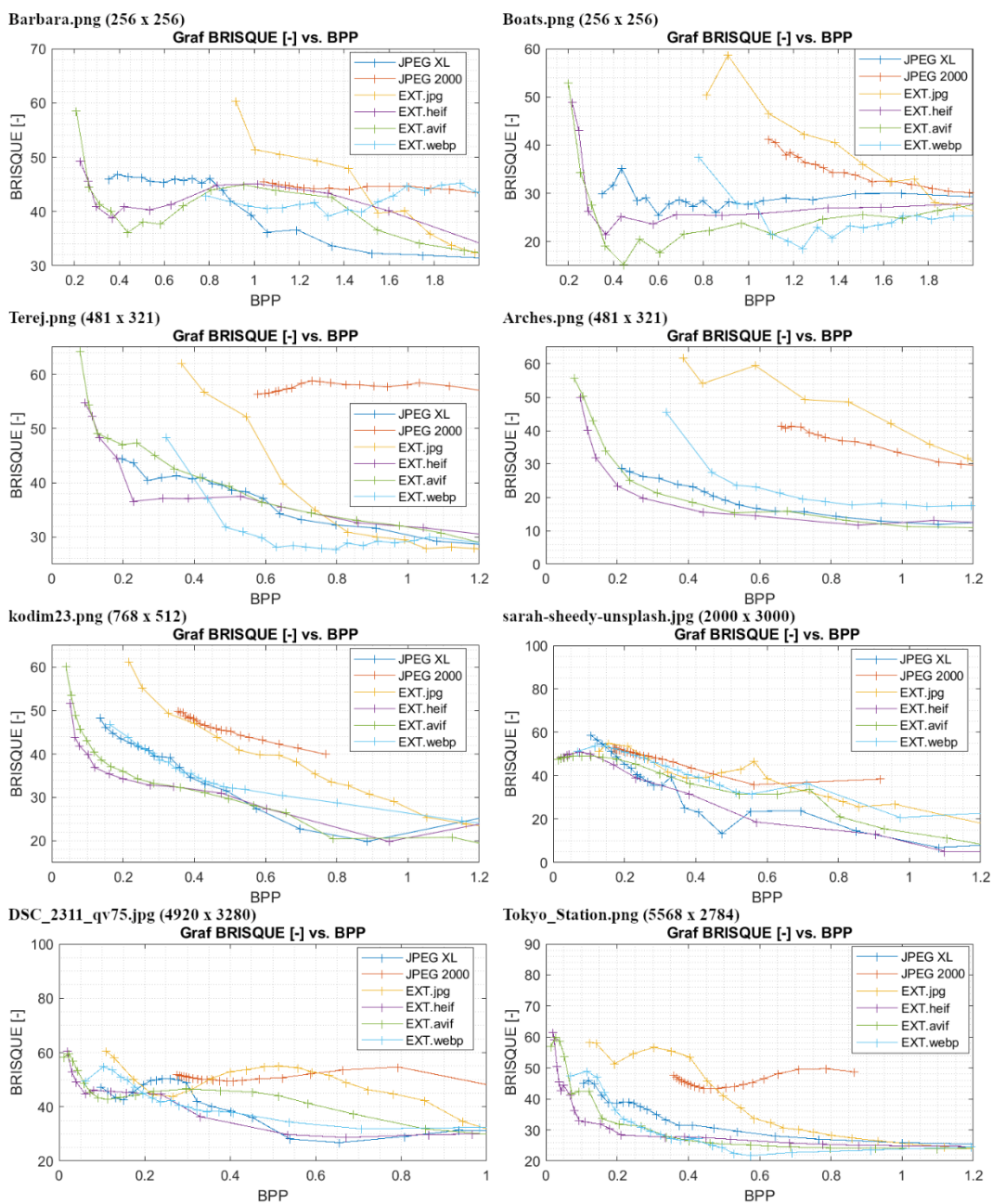
Bez-referenční metoda NIQE počítá výsledné skóre na základě statických charakteristik obrazu. Kvalitnější obrázky dosahují nižšího skóre, pro vybrané snímky se nejčastěji výsledky pohybují v intervalu 2 až 6. Formáty AVIF a HEIF obecně dosahují velmi dobrých výsledků, nicméně u obrázků s nižším rozlišením, jako např. Barbara.png nebo Boats.png, vítězí JPEG XL, jelikož pracuje efektivněji i s menším množstvím dat a zachovává vysokou kvalitu obrazu, což potvrzují také nízké hodnoty NIQE.



Obrázek 4.5 Výsledky pro metriku NIQE

4.4.4 Výsledky pro metriku BRISQUE

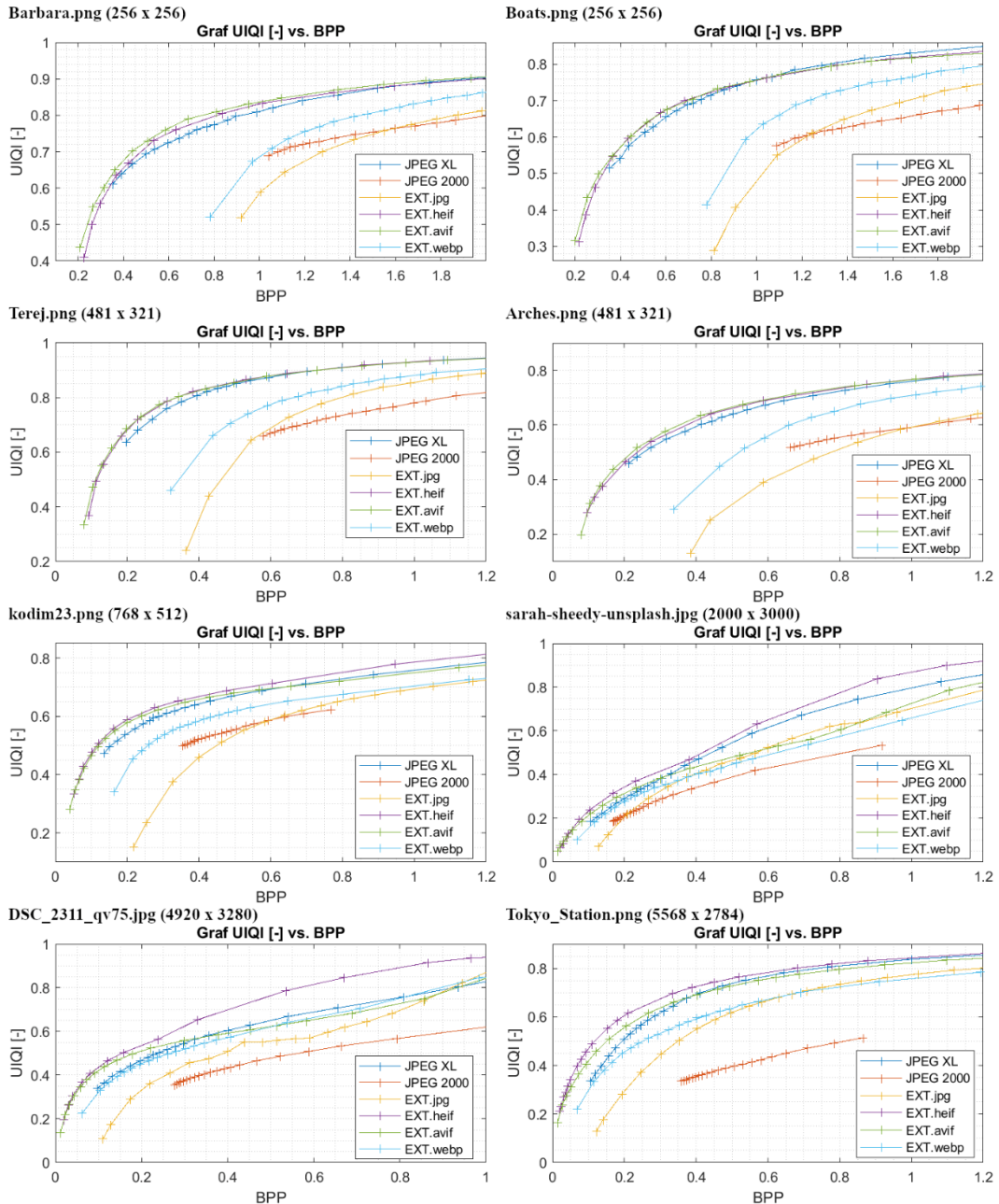
Opět bez-referenční metoda, která ovšem hodnotí kvalitu prostorových vlastností snímků. Pro vybrané snímky se výsledky skóre pohybují zhruba v intervalu 20 až 60. Formáty AVIF a HEIF poskytují nejlepší kvalitu obrazu, což potvrzují jejich nízké hodnoty BRISQUE. JPEG XL a WebP také vykazují solidní výkony, ovšem v závislosti na struktuře a specifických vlastnostech obrazu. Celkově se formáty AVIF a HEIF jeví jako nejvhodnější volba pro zachování vysoké kvality obrazu při kompresi.



Obrázek 4.6 Výsledky pro metriku BRISQUE

4.4.5 Výsledky pro metriku UIQI

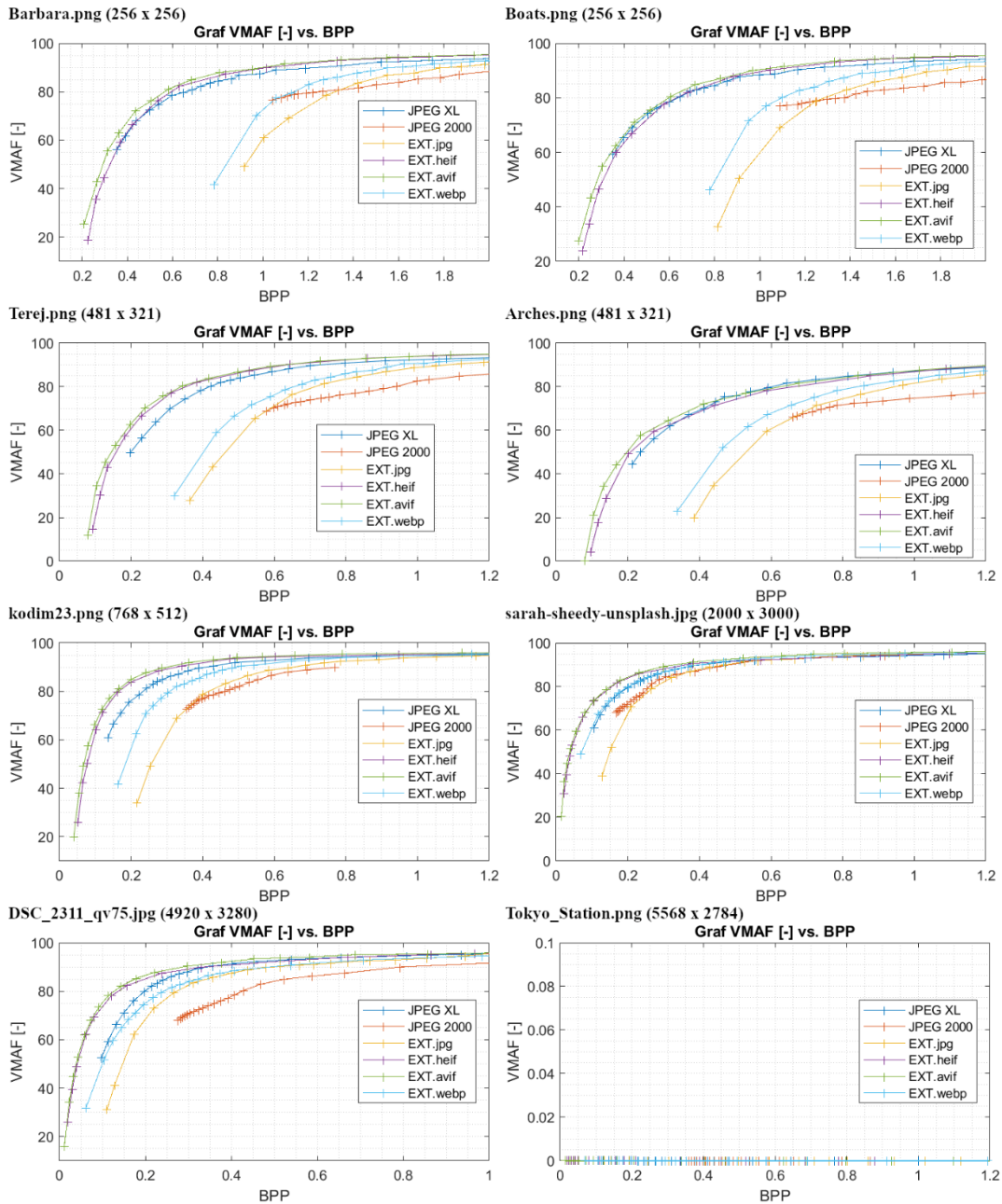
Analýza UIQI ukazuje, že formáty JPEG XL, AVIF a HEIF poskytují nejlepší výsledky z hlediska strukturální kvality obrazu, následované formátem WebP. Klasický JPEG vykazuje nižší hodnoty UIQI, což naznačuje horší zachování kvality při kompresi. Tyto výsledky podporují použití moderních formátů pro aplikace, kde je důležité zachování struktury a kvality obrazu.



Obrázek 4.7 Výsledky pro metriku UIQI

4.4.6 Výsledky pro metriku VMAF

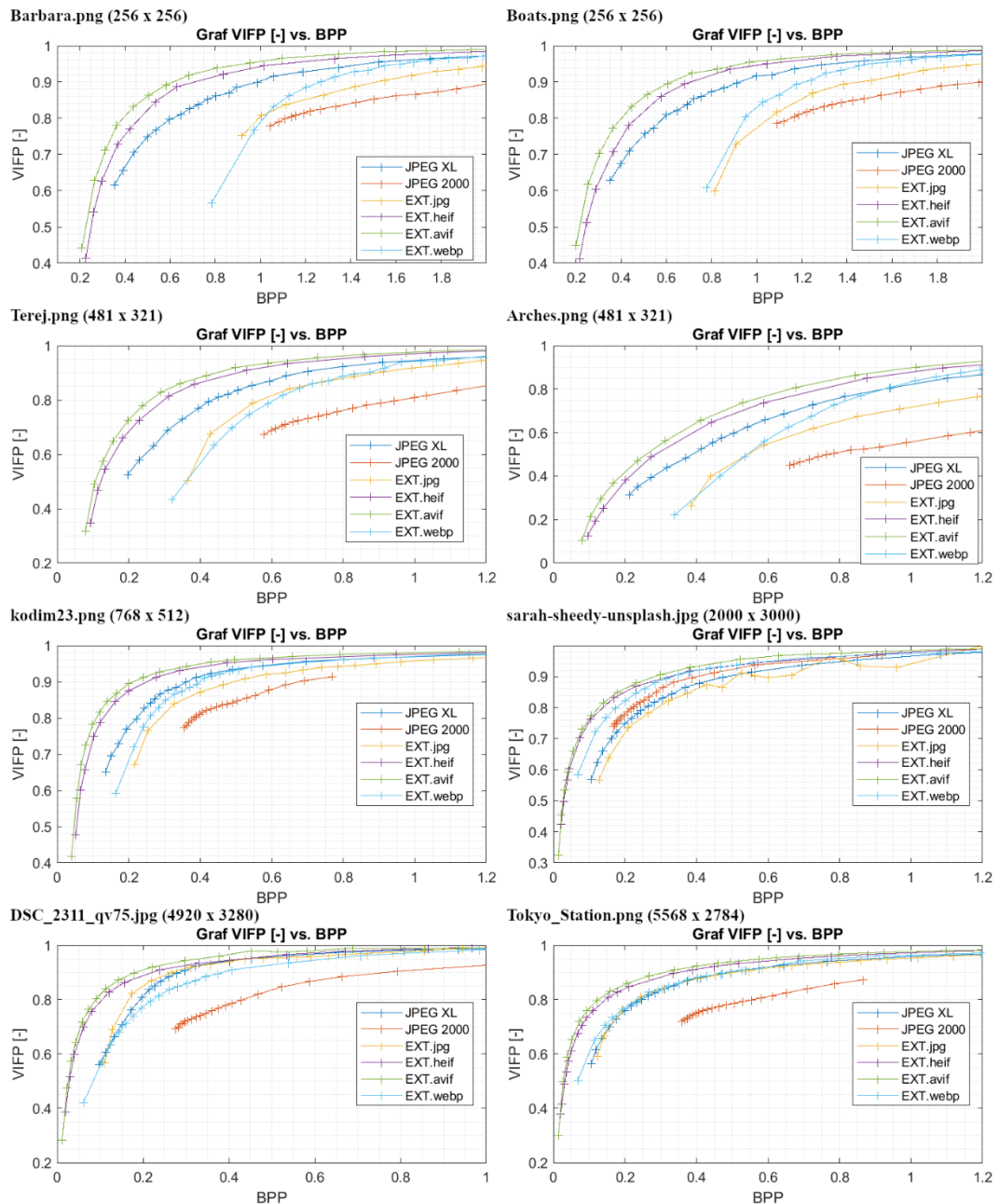
Dle VMAF dosahují JPEG XL, AVIF a HEIF nejlepších výsledků z hlediska vizuální kvality napříč všemi testovanými obrázky, následované formátem WebP. Původní JPEG dosahuje nejhorších výsledků ve srovnání s ostatními moderními formáty. U obrázku *Tokyo_Station.png* jsou hodnoty VMAF nulové, protože VMAF nedokáže adekvátně hodnotit kvalitu 360° obrázků. Tento výsledek zdůrazňuje výhody moderních formátů pro běžné typy obrázků a potřebu speciálních nástrojů pro hodnocení 360° snímků.



Obrázek 4.8 Výsledky pro metriku VMAF

4.4.7 Výsledky pro metriku VIFP

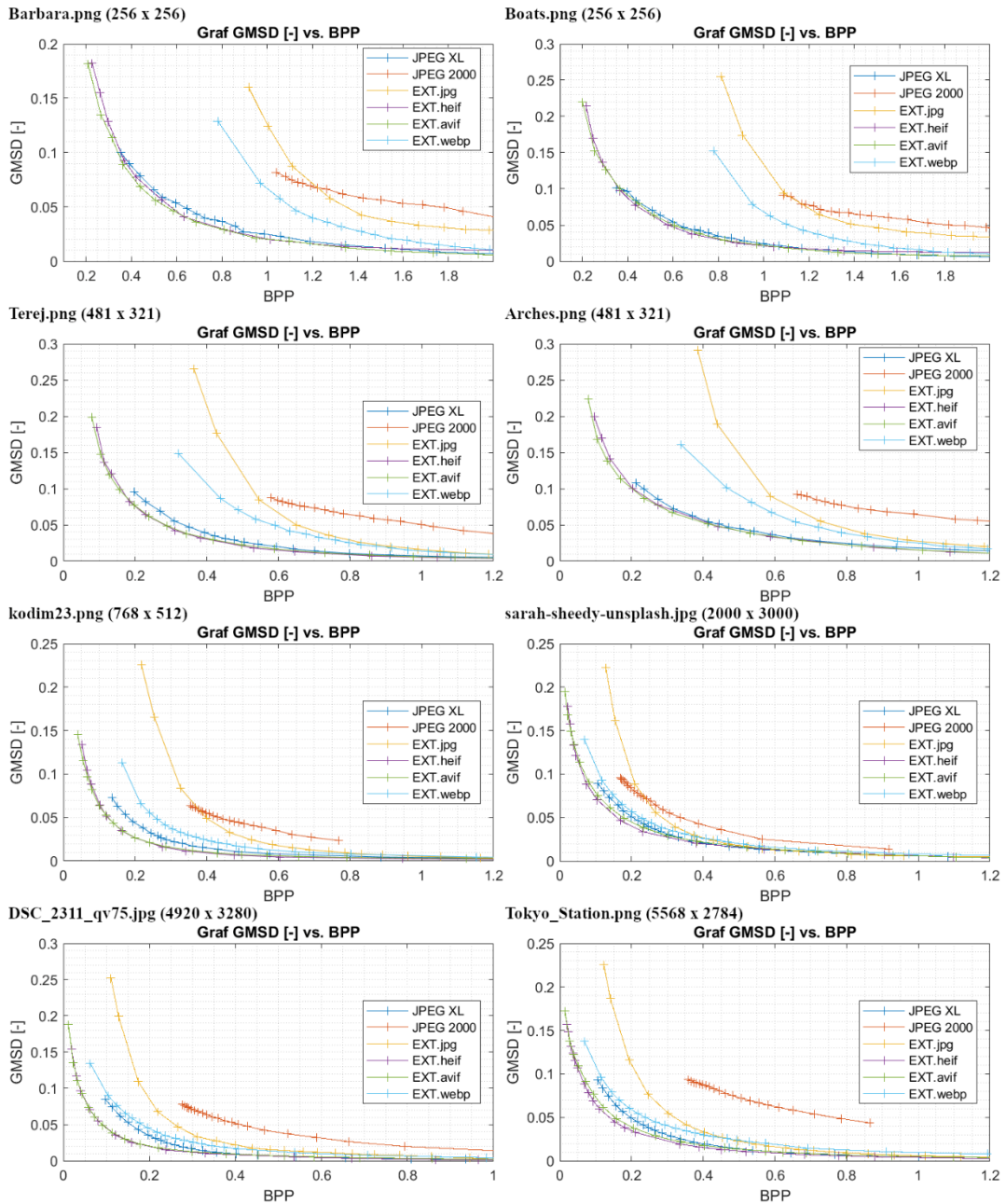
Metoda VIFP opět naznačuje příznivý vývoj pro formát AVIF, ale také HEIF a JPEG XL nezaostávají v dobrých výsledcích ve vyšších úrovních komprese. Opět podstatně záleží na specifických vlastnostech snímků, vidíme, že např. u *Tokyo_Station.png* jsou JPEG, WebP a JPEG XL téměř shodně kompresně efektivní (z pohledu porovnání struktur a textur pixelů v obrázcích).



Obrázek 4.9 Výsledky pro metriku VIFP

4.4.8 Výsledky pro metriku GMSD

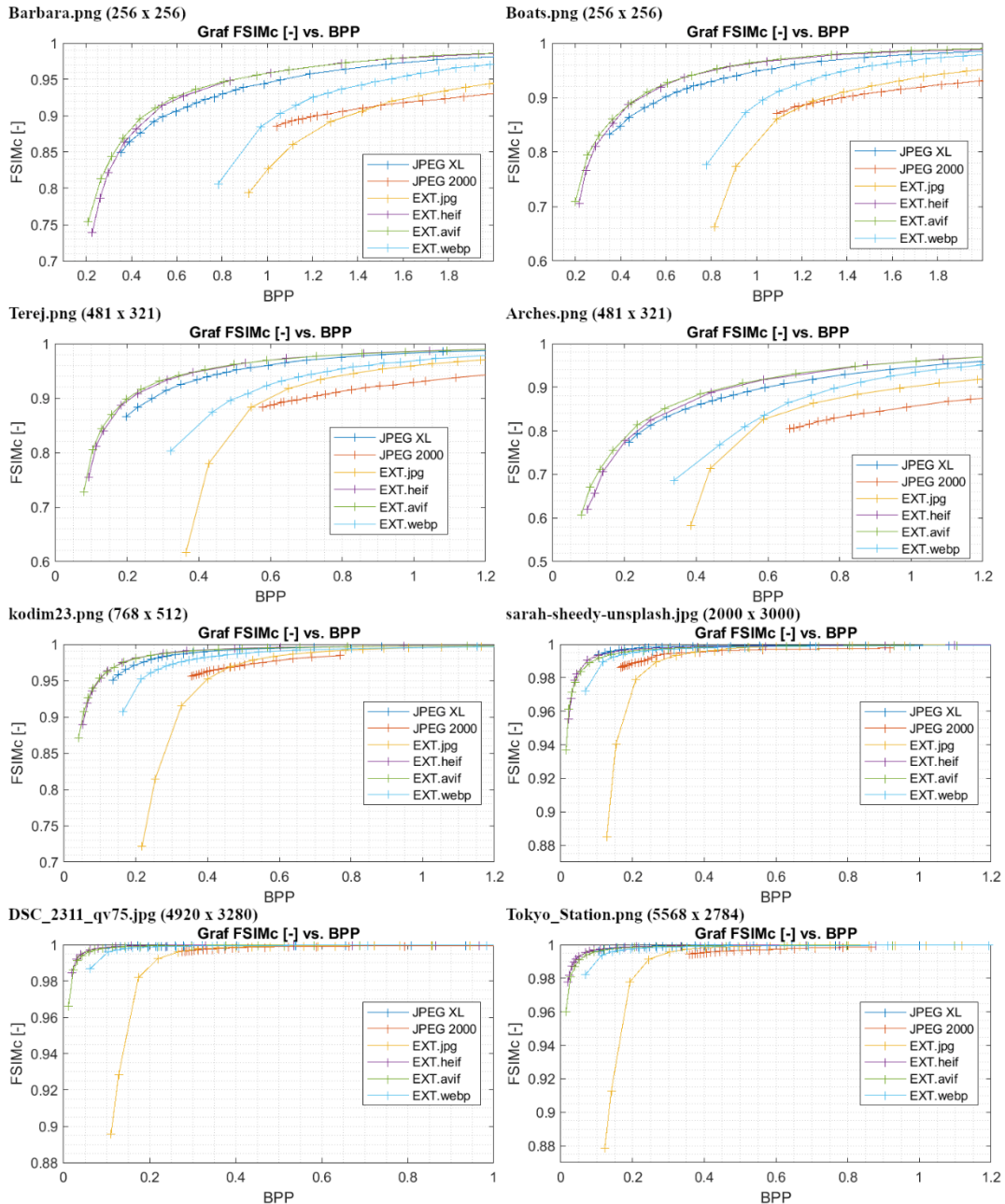
GMSD sleduje podobnost mezi gradienty jasů, které odrážejí změny intenzity světla mezi sousedními pixely, což je klíčové pro lidské vnímání jemných detailů a hran ve vizuálním obraze. Jak je patrné z grafů, formáty AVIF a HEIF dosahují velmi věrných výsledků, u větších snímků formát HEIF konkuruje ostatním. Oba formáty mají silného konkurenta v podobě JPEG XL. AVIF a HEIF však prokazují vysokou efektivitu, zejména při vyšších úrovních komprese, zachovávají vysokou kvalitu obrazu s nízkými hodnotami GMSD.



Obrázek 4.10 Výsledky pro metriku GMSD

4.4.9 Výsledky pro metriku FSIMc

Metrika FSIMc sleduje podobnost mezi obrazy z hlediska strukturálních a barevných informací. Jak je patrné z grafů, formáty AVIF a HEIF dosahují velmi vysokých hodnot FSIMc napříč různými úrovněmi komprese. Formát AVIF často dosahuje nejlepší kvality, těsně následovaný formátem HEIF. U větších snímků vykazuje HEIF velmi dobré výsledky a konkuruje AVIF. U velkých obrázků jsou rozdíly hodnot jen velmi malé.



Obrázek 4.11 Výsledky pro metriku FSIMc

4.4.10 Stručné shrnutí výsledků

Obrázky pro analýzy byly komprimovány s pomocí programu GIMP, pouze v případech JPEG 2000 a JPEG XL byl využit nástroj FFmpeg, jelikož zmíněný grafický editor neumožňuje ztrátovou kompresi do těchto formátů. Bylo tak učiněno i z důvodu jednodušnosti komprimovaných dat a krokování ve stejných intervalech. Dalšími pokusy při komprimaci lze zjistit, že např. komprimací do WebP přes FFmpeg můžeme dosáhnout nižších hodnot BPP pro obrázky malých rozlišení.

Formáty AVIF, HEIF, WebP a JPEG XL nabízejí moderní a efektivní alternativy ke klasickému JPEG. AVIF a HEIF jsou vynikající pro vysokou kompresi s minimální ztrátou kvality, ale konkrétní výsledky mohou záviset na typu obrazu a kompresních nastaveních. AVIF může v některých případech nabídnout i lepší poměry kvality ku velikosti souboru než HEIF díky pokročilým kompresním technikám AV1, zatímco JPEG XL poskytuje nejlepší poměr kvality a velikosti souboru. WebP nabízí flexibilitu díky podpoře bezztrátové komprese. Klasický JPEG, přestože méně efektivní, zůstává stále pro svoji univerzálnost podporou široce používaným formátem.

Obecně lze konstatovat, že z dosavadně získaných dat je možné pozorovat vyšší efektivitu u novějších komprimačních algoritmů typu AVIF a HEIF. Zejména HEIF je v dnešní době velmi rozšířený formát u společnosti Apple Inc., kde přináší mnoho výhod z hlediska úspory paměti, rychlého přenosu dat a zachování velmi kvalitních obrázků u mobilních zařízení s výkonnými fotoaparáty.

Velkou výhodou přináší také JPEG XL a WebP, kde je třeba zmínit, že, navzdory horším schopnostem dosahovat tak vysokých kompresních poměrů při zachování stejných kvalit, mohou konkurovat díky kompatibilitě a jednoduchému konvertování ze staršího, stále velmi rozšířeného standardu JPEG. V případě WebP je nižší účinnost kompenzována nižšími nároky na výpočetní výkon a čas.

Zvláštních výsledků dosahují obrázky komprimované do formátu JPEG 2000. Zdá se, že jeho implementace by mohla být chybná, jelikož dosahujeme poměrně úzkého rozpětí hloubky komprese oproti ostatním kodekům navzdory krokování v celém intervalu QV. Také výsledky všech použitých metrik naznačují, že komprimované obrázky do JPEG 2000 by měly být dokonce v horší kvalitě než původní JPEG, což neodpovídá teoretickým předpokladům. Bohužel tento formát není podporovaný použitým grafickým editorem GIMP, nelze tedy přesně určit (porovnat výsledné hodnoty), zda je implementace v FFmpegu neúplná či se jedná o charakteristické rysy pro použitý kodek. Jedním z možných řešení je tedy rozšíření úlohy o další grafický editor, pomocí něhož lze vytvořit sadu komprimovaných obrázků daného formátu ztrátovou kompresí a opětovně provést analýzu výsledků.

5. ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo podat přehled o současných komprimačních standardech statických obrázků a rovněž o metodikách hodnocení jejich výsledné kvality. V teoretické části jsou jednotlivé standardy komprese a metody hodnocení rozebrány, přičemž zde byly zmíněny jejich základní rozdíly a srovnány výhody / nevýhody či možné aplikace.

Praktická část se soustředí na vytvoření framework aplikace, který bude v budoucnu využíván pro účely laboratorní úlohy. Zde se jedná např. o zautomatizování procesu komprese a zejména objektivního hodnocení, aby byl uživateli zjednodušen přístup ke hledaným metodám či pozorování jejich odchylek a rozdílů. Aplikace taktéž nabízí přehledné uživatelské prostředí a možnost volby přípravy vstupních dat pro analýzu, jejíž realizace byla jednou z hlavních cílů bakalářské práce, a to vč. zachování původní interní komprimace.

Tato práce rovněž poukazuje na klíčovost volby správné metriky i pro objektivní posouzení vizuální kvality komprimovaných obrázků. Získané poznatky představují důležitý základ pro další výzkum a zdokonalování metod hodnocení vizuální kvality v digitálním zpracování obrazu, ale i při rozvoji nových kompresních algoritmů.

Poslední částí v příloze je laboratorní úloha s detailnějším nastavením vytvořené aplikace v MATLABu, popisem obsluhy grafického editoru GIMP pro kompresi včetně jejího vzorového vypracování, kompletního .zip souboru s aplikací a sadou vybraných referenčních obrázků.

Nápadem pro budoucí vylepšení by zajisté mohlo být rozšíření programu FFmpeg o chybějící kodeky, jelikož vytvořená aplikace nadále počítá s jeho rozvojem, framework by tak mohl fungovat dle původních představ a ušetřit spoustu času s přípravou jednotlivých dat pro analýzu. Aplikace původně měla také vytvořit sadu obrázků pro subjektivní hodnocení, což však již nebylo časově zvládatelné. Kvůli komprimaci přes externí grafický editor, a tedy subjektivní závislosti celého procesu i na uživateli, neproběhla realizace přehledu o časové náročnosti komprimace snímků.

LITERATURA

- [1] BAYER, Tomáš. Algoritmy pro kompresi rastrových dat. online. In: *Přírodovědecká fakulta Univerzita Karlova*. 2023, 2023-01-13 18:09, s. 29. Dostupné z: <https://web.natur.cuni.cz/~bayertom/images/courses/Apk/kompresse.pdf>. [cit. 2023-11-14].
- [2] NAVEEN KUMAR, S.; M. V. VAMSHI BHARADWAJ, a SUBBARAYAPPA, Shreyanka. *Performance Comparison of JPEG, JPEG XT, JPEG LS, JPEG 2000, JPEG XR, HEVC, EVC and VVC for Images*. online. 2021. Pune, India.: 6th International Conference for Convergence in Technology (I2CT), 2021. ISBN 978-1-7281-8876-8. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/I2CT51068.2021.9418160>. [cit. 2023-05-11].
- [3] BOVIK, Alan C. *Handbook of Image and Video Processing*. online. 1. Academic Press, 2000. ISBN 978-0121197902. Dostupné z: <https://preetikale.files.wordpress.com/2018/07/handbook-of-image-and-video-processing-al-bovik1.pdf>. [cit. 2024-05-27].
- [4] KALABZA, Marek. *SROVNÁNÍ MODERNÍCH FORMÁTU PRO ZTRÁTOVOU KOMPRESI OBRAZU*. Bakalářská práce, vedoucí Ing. David Bařina, Ph.D. VUT v Brně, FIT, ÚSTAV POCÍTACOVÉ GRAFIKY A MULTIMÉDIÍ: VUT v Brně, FIT, 2019. Dostupné také z: <https://www.fit.vut.cz/study/thesis-file/21605/21605.pdf>.
- [5] BAŘINA, David a ZEMČÍK, Pavel. *Multimédia: Studijní opora*. online. FIT VUT v Brně, 2023, 04. 04. 2023. Dostupné z: <https://www.fit.vutbr.cz/~ibarina/pub/mul-opora-2023-04-04.pdf>. [cit. 2023-11-08].
- [6] SIMKA, M.; POLAK, L.; KUFA, J.; NOVOTNY, M.; ZIZIEN, A. et al. Omnidirectional Image Quality Assessment Database (OMNIQAD): Description and Examples: Description and Examples. In: *2023 33rd International Conference Radioelektronika (RADIOELEKTRONIKA)*. 2023, s. 1-5. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/RADIOELEKTRONIKA57919.2023.10109005>.
- [7] *HEIF Image Format*. online. 2021. Dostupné z: <https://nokiatech.github.io/heif/technical.html>. [cit. 2023-12-05].
- [8] *AVIF Format: A Next-Gen Image Format to Rule them All?*. online. In: Cloudinary. 2023. Dostupné z: <https://cloudinary.com/guides/image-formats/avif-format-a-next-gen-image-format-to-rule-them-all>. [cit. 2023-12-05].
- [9] *An image format for the Web*. online. In: WebP. 2023, 2023-09-14. Dostupné z: <https://developers.google.com/speed/webp>. [cit. 2023-12-06].
- [10] KRČMÁŘ, Petr. *Má nový formát WebP od Google šanci nahradit JPEG?*. online. In: ROOT.CZ. 2010, 2010-10-04. Dostupné z: <https://www.root.cz/clanky/ma-novy-format-webp-od-google-sanci-nahradit-jpeg/>. [cit. 2023-12-29].

- [11] TIŠNOVSKÝ, Pavel. *Řádkové filtry v PNG*. online. In: ROOT.CZ. 2006, 29. 9. 2006. Dostupné z: <https://www.root.cz/clanky/radkove-filtry-v-png/>. [cit. 2023-11-12].
- [12] BHOLA, V.; SHARMA, T. a BHATNAGAR, J. Image Quality Assessment Techniques. online. *International Journal Of Information Technology And Knowledge Management: Special Issue (ICFTEM-2014)*. 2014, roč. 2014, č. 34, s. 156-161. ISSN 0973-4414. Dostupné z: <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=1d108ad4dcf1b9752b285970e6d2b0825f9a6b47>. [cit. 2023-12-12].
- [13] MITTAL, A.; SOUNDARARAJAN, R. a BOVIK, A. Making a “Completely Blind” Image Quality Analyzer. *IEEE Signal Processing Letters*. 2013, roč. 20, č. 3, s. 209-212. ISSN 1558-2361. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/LSP.2012.2227726>.
- [14] MITTAL, A.; MOORTHY, A. a BOVIK, A. No-Reference Image Quality Assessment in the Spatial Domain. *IEEE Transactions on Image Processing*. 2012, roč. 21, č. 12, s. 4695-4708. ISSN 1941-0042. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/TIP.2012.2214050>.
- [15] MITTAL, A.; MOORTHY, A. a BOVIK, A. Blind/Referenceless Image Spatial Quality Evaluator. In: *2011 Conference Record of the Forty Fifth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers (ASILOMAR)*. 2011, s. 723-727. ISSN 1058-6393. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/ACSSC.2011.6190099>.
- [16] LI, Zhi; ARON, Anne; KATSAVOUNIDIS, Ioannis; MOORTHY, Anush a MANOHARA, Megha. *Toward A Practical Perceptual Video Quality Metric: Video Multimethod Assessment Fusion (VMAF)*. online. In: Medium.com. 2016, 2016-06-06. Dostupné z: <https://netflixtechblog.com/toward-a-practical-perceptual-video-quality-metric-653f208b9652>. [cit. 2023-12-29].
- [17] XUE, Wufeng; ZHANG, Lei; MOU, Xuanqin a BOVIK, Alan. Gradient Magnitude Similarity Deviation: A Highly Efficient Perceptual Image Quality Index. online. *IEEE Transactions on Image Processing*. 2014, roč. 23, č. 2, s. 684-695. ISSN 1057-7149. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/TIP.2013.2293423>. [cit. 2024-05-16].
- [18] ZHANG, Lin; ZHANG, Lei; MOU, Xuanqin a ZHANG, David. FSIM: A Feature Similarity Index for Image Quality Assessment. online. *IEEE Transactions on Image Processing*. 2011, roč. 20, č. 8, s. 2378-2386. ISSN 1057-7149. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/TIP.2011.2109730>. [cit. 2024-05-16].
- [19] NETUŠIL, Kamil. *Subjektivní a objektivní hodnocení kvality obrazu a videa*. Bakalářská práce, vedoucí Ing. Ivo Veřtát. Plzeň: ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI, Fakulta elektrotechnická, 2011.
- [20] WANG, Zhou a RAJASHEKAR, Umesh. *File Exchange: Image Quality - Index Analysis GUI*. online. In: MathWorks. 2013-09-11. Dostupné z: https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/41464-image-quality-index-analysis-gui?s_tid=srchtitle_site_search_3_image%20quality. [cit. 2024-01-01].

- [21] *Sattarab / image-quality-tools / metrix_mux / metrix_vifp.m.* online. In: GitHub. 2014, 2014-02-03. Dostupné z: <https://github.com/sattarab/image-quality-tools>. [cit. 2024-01-01].
- [22] XUE, Wufeng; ZHANG, Lei; MOU, Xuanqin a BOVIK, Alan. *Gradient Magnitude Similarity Deviation: A Highly Efficient Perceptual Image Quality Index.* online. In: FELLOW OF IEEE, DEPARTMENT OF COMPUTING, THE HONG KONG POLYTECHNIC UNIVERSITY. Lei Zhang. 2014. Dostupné z: <https://www4.comp.polyu.edu.hk/~cslzhang/IQA/GMSD/GMSD.htm>. [cit. 2024-05-16].
- [23] ZHANG, Lin; ZHANG, Lei; MOU, Xuanqin a ZHANG, David. *FSIM: a feature similarity index for image quality assessment.* online. In: GitHub. 2010. Dostupné z: <https://github.com/sunxirui310/FSIM-FSIMc-matlab/blob/master/FSIM.m>. [cit. 2024-05-16].
- [24] *Databáze: Dataset /CSet8.zip: Boats.png, Barbara.png.* 2019. Dostupné také z: <https://github.com/ysix7/Dataset/blob/master/CSet8.zip>.
- [25] *Databáze: CBSD68-dataset/CBSD68/original_png/0011.png.* online. In: . 2018. Dostupné z: https://github.com/claasmichele/CBSD68-dataset/blob/master/CBSD68/original_png/0011.png. [cit. 2023-12-31].
- [26] *Databáze: CBSD68-dataset/CBSD68/original_png/0058.png.* online. In: . 2018. Dostupné z: https://github.com/claasmichele/CBSD68-dataset/blob/master/CBSD68/original_png/0058.png. [cit. 2023-12-31].
- [27] Kodak Image 23: two macaws. online. In: *Kodak Lossless True Color Image Suite.* 1999, 2013-01-27. Dostupné z: <https://r0k.us/graphics/kodak/kodim23.html>. [cit. 2023-12-31].
- [28] SHEEDY, Sarah. A very tall mountain covered in lots of snow. online. In: *Unsplash.* 2024. Dostupné z: <https://unsplash.com/photos/a-very-tall-mountain-covered-in-lots-of-snow-2RtLORSbm4Q>. [cit. 2024-05-21].
- [29] Architecture by Sujit Chachad: Tokyo_Station_Sujit Chachad. online. In: *KANDAO.* 2023. Dostupné z: https://drive.google.com/file/d/1hNBRVTZsPI9a0ZG2mHoRW4OJu2c4kEBo/view?usp=drive_link. [cit. 2024-05-21].

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratky:

ASCII	kódování znaků pro anglický jazyk (american standard code for information interchange)
AVIF	formát s kódováním AV1 (AV1 image file format)
BMP	bitmapový obrázek (windows bitmap)
BPP	označení hodnoty počtu bitů na pixel (bit per pixel)
CDN	síť serverů pro rychlé doručení obsahu (content delivery network)
CRC	metoda ověření integrity dat (cyclic redundancy check)
DCT	diskrétní kosinova transformace (discrete cosine transform)
DNG	formát digitálního negativu (digital negative)
DWT	metoda analýzy signálu podle velikosti a polohy (discrete wavelet transform)
EBCOT	technika pro efektivní kompresi obrazu (embedded block coding with optimized truncation)
FDCT	dopředná diskretní kosinová transformace (Forward-DCT)
GIF	formát rastrové grafiky (graphic interchange format)
HDR	rozsah vysokého dynamického rozsahu (high dynamic range)
HEIC	vysoce účinný obrázkový kontejner (high efficiency image container)
HEIF	vysoce účinný obrázkový formát (high efficiency image file format)
HVS	lidský vizuální systém, zodpovědný za vizuální vnímání (human vision system)
IDCT	inverzní diskretní kosinová transformace (Inverse-DCT)
IP	protokol pro směrování dat v síti (internet protocol)
JPEG	společná skupina fotografických expertů (joint photography expert group)
LZW	bezztrátový kompresní algoritmus (lempel-ziv-welch)
MQ	metoda kódování s různou délkou kódu pro různé symboly (modified human coding)
PNG	přenosná síťová grafika (portable network graphics)
QV	hodnota parametru kvality (quality value)

RAW	označení pro surový, nezpracovaný soubor
RIFF	formát souboru pro multimediální data (resource interchange file format)
SVG	škálovatelná vektorová grafika (scalable vector graphics)
TIFF	formát rastrové počítačové grafiky (tag image file format)
WDP	algoritmus od spol. Windows (windows media photo + HD photo)
WebP	obrázkový formát vyvinutý společností Google
XML	rozšířený značkovací jazyk (extensible markup language)

SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA A - LABORATORNÍ ÚLOHA	48
PŘÍLOHA B - MATLAB APLIKACE A JEDNOTLIVÉ FUNKCE JSOU PŘILOŽENY V SOUBORU .ZIP	58

Příloha A - Laboratorní úloha

Digitální televizní a rozhlasové systémy (MDTV, LDTV)

Laboratorní úloha

Laboratorní úloha pro hodnocení vizuální kvality komprimovaných obrazů

Účelem úlohy je prozkoumat kompresní algoritmy různých formátů statických obrázků, provést komprimaci těchto obrázků pomocí několika implementovaných kodeků v dostupné framework aplikaci programu MATLAB, porovnat výsledky grafických závislostí objektivních metrik a diskutovat jednotlivé rozdíly v závislosti na výsledné velikosti, rozmanitosti ve vlastnostech, struktuře, odlišném rozlišení, barevnosti, kontrastu a světlosti jednotlivých scén obrázků.

Teoretický úvod

V současné digitální éře je významným aspektem zpracování multimediálních dat efektivní správa jejich velikosti a kvality. Zvyšující se objemy těchto dat a potřeba jejich rychlého přenosu či ukládání vytvářejí tlak na vývoj a vylepšování kompresních metod pro vizuální média. Komprese dat není jen o snižování velikosti souborů, ale také o nalezení optimálního kompromisu mezi velikostí a zachováním vizuální kvality. To nás vede k potřebě použití metrik hodnocení vizuální kvality a odhadu kvality dat.

Tato úloha se zaměřuje na hodnocení vizuální kvality komprimovaných obrazů v kontextu nejznámějších současných kompresních metod. Cílem je porovnat a analyzovat použitelnost různých metrik pro hodnocení vizuální kvality komprimovaných obrazů a posoudit, jak se tyto metriky mohou uplatnit v praxi. Soustředí se také na pozorování efektivity různých metod komprese a schopnosti udržet vizuální kvalitu při různých kompresních úrovních.

Pro potřeby laboratorní úlohy bylo vybráno 6 nejznámějších formátů podporujících ztrátovou kompresi (JPEG, JPEG 2000, JPEG XL, HEIF, AVIF, WebP). Výběr objektivních metrik je poněkud obsáhlejší (PSNR, SSIM, NIQE, BRISQUE, UIQI, VMAF, VIFP, GMSD, FSIMc). Zmíněné formáty a metriky si nyní představíme.

JPEG

(Joint Photographic Experts Group) je nejrozšířenější formát pro kompresi fotografií. Využívá diskrétní kosinovou transformaci (DCT) k převodu obrazu z časové oblasti do frekvenční oblasti, kde mohou být nízkofrekvenční komponenty uloženy s vyšší přesností než vysokofrekvenční komponenty. Kvantizace pak snižuje přesnost méně důležitých komponent, což vede ke ztrátě dat, ale také výrazné redukci velikosti souboru. Výhodou je velmi široká podpora ve všech zařízeních a softwarech, efektivní komprese pro fotografie. Nevýhodou je degradace kvality při vyšší kompresi, chybějící podpora průhlednost.

Pozn.: V současné verzi aplikace není správná implementace dostupná, proto je nutné provádět komprimaci do JPEGu v prostředí GIMP!

JPEG 2000

JPEG 2000 je vylepšený formát JPEG, který využívá pokročilejší kompresní techniky. Využívá vlnkovou transformaci (wavelet transform) místo DCT, což umožňuje lepší kompresi a vyšší kvalitu obrazu při nižších bitových rychlostech. Dosahuje vyšší kvality obrazu při stejných nebo menších velikostech souborů než standardní JPEG, podporuje ztrátovou i bezztrátovou kompresi, lepší odolnost proti chybám. Nevýhodami jsou menší rozšíření a podpora než u standardního JPEG, vyšší výpočetní nároky.

Pozn.: V současné verzi aplikace není správná implementace dostupná, proto jej lze úplně vynechat.

JPEG XL

JPEG XL je nový standard pro kompresi obrazu, který nabízí vyšší kompresní poměry a je zpětně kompatibilní s původním JPEG formátem. Kombinuje moderní kompresní techniky a podporu pro pokročilé funkce jako HDR (High Dynamic Range), animace a vícevrstvé obrázky.

Nabízí poměrně vysokou kompresní účinnost, podporuje i bezztrátové komprese, zajišťuje taktéž kompatibilitu s existujícími JPEG soubory, což má usnadnit jejich přechod na efektivnější metodu, nástupce JPEGu. JPEG XL je relativně nový kompresní standard, takže podpora může být omezenější v porovnání s tradičním JPEG, navíc je mnohem náročnější na výpočetní kapacitu.

HEIF

(High Efficiency Image Format) je formát založený na kompresním standardu HEVC (High Efficiency Video Coding), známý také jako H.265. Používá pokročilé techniky komprese z HEVC, což umožňuje vyšší kompresní poměry a podporu pro HDR. Velmi vysoká kompresní účinnost, podpora pro HDR, možnost uložení více snímků (např.

sekvenční fotografie) a metadat do jednoho souboru. Patentovaná technologie vyžaduje licencování, což může omezit šíření, menší podpora ve srovnání s tradičním JPEG. HEIF je vlajkovou lodí pro zařízení od společnosti Apple Inc., která jej hojně využívá jako efektivnějšího nástupce JPEG či H.264 pro ukládání dat z fotoaparátu.

AVIF

(AV1 Image File Format) je formát pro kompresi obrazu, který je založen na video kompresním standardu AV1, vyvinutém Alliance for Open Media (AOMedia). Využívá pokročilé kompresní techniky z AV1, což umožňuje vysokou kompresi a kvalitní reprodukci obrazu, může v některých případech nabídnout i lepší poměry kvality ku velikosti souboru než HEIF. Má vysokou kompresní účinnost, je to otevřený a licenčně bezplatný formát, podporuje HDR a dosahuje velmi dobré kvalita obrazu. AVIF je relativně nový formát, takže podpora může být omezenější, nevýhodami jsou také vyšší výpočetní nároky při kompresi a dekompresi.

WebP

WebP je moderní formát pro kompresi obrazu vyvinutý společností Google, kombinuje vysokou kvalitu obrazu a efektivní kompresi. Podporuje jak ztrátovou, tak bezztrátovou kompresi, přičemž využívá techniky z formátů VP8 (pro ztrátovou kompresi) a VP9 (pro bezztrátovou kompresi). WebP nabízí vysokou kompresní účinnost, podporuje animace, průhlednost a metadata. Tento formát má širokou podporu v moderních webových prohlížečích. Nicméně, podpora ve starších prohlížečích a některých grafických softwarech je omezená a využití patentovaných technologií může vyžadovat licencování.

PSNR

(Peak Signal-to-Noise Ratio) je metrika, která měří poměr mezi maximálním možným výkonem signálu a šumem, který ovlivňuje kvalitu obrazu. Vysoké hodnoty PSNR obvykle naznačují vyšší kvalitu obrazu, protože signál (původní obraz) převládá nad šumem (chyby v komprimovaném obraze). PSNR je často používán v oblastech zpracování obrazu a videa, kde je třeba kvantifikovat rozdíl mezi původním a komprimovaným obrazem.

SSIM

(Structural Similarity Index) hodnotí podobnost mezi dvěma obrazy na základě jejich jasu, kontrastu a struktury. Na rozdíl od PSNR, který je založen na rozdílech v hodnotách pixelů, SSIM bere v úvahu vnímání strukturálních informací v obrazech, což jej činí více

v souladu s lidským vizuálním vnímáním. SSIM se často používá k hodnocení kvality komprimovaných obrazů a videí.

NIQE

(Natural Image Quality Evaluator) je bez-referenční metrika, která hodnotí kvalitu obrazu na základě statistických charakteristik, aniž by potřebovala referenční obraz. NIQE analyzuje obraz a porovnává jeho statistické vlastnosti s předem naučeným modelem kvality přirozených obrazů. Výsledkem je hodnocení kvality obrazu, které je nezávislé na konkrétním referenčním obrazu, což je užitečné v situacích, kde není dostupný originál.

BRISQUE

(Blind/Referenceless Image Spatial Quality Evaluator) hodnotí kvalitu obrazu bez potřeby referenčního obrazu, zaměřuje se na prostorové charakteristiky. BRISQUE využívá příznaky extrahované z místních prostorových statistik, aby předpověděl kvalitu obrazu. Tato metrika je zvláště užitečná v aplikacích, kde je třeba hodnotit kvalitu obrazů v reálném čase nebo kde není k dispozici původní obraz.

UIQI

(Universal Image Quality Index) měří podobnost mezi dvěma obrazy na základě statistik. UIQI se zaměřuje na tři hlavní aspekty: podobnost v jasu, kontrastu a struktuře. Tato metrika je navržena tak, aby byla univerzální a mohla být použita pro různé typy obrazových dat. Výhodou UIQI je jeho jednoduchost a schopnost poskytovat intuitivní interpretace kvality obrazu.

VMAF

(Video Multi-Method Assessment Fusion) je komplexní metrika, která využívá více metod pro hodnocení kvality videa a obrazů. VMAF kombinuje výsledky z různých algoritmů a modelů, aby poskytla jediné hodnocení kvality, které je více v souladu s lidským vnímáním. Tato metrika je vyvinuta společností Netflix a je široce používána v průmyslu pro optimalizaci a hodnocení kvality streamovaných videí.

Pozn.: Implementace VMAF v programu FFmpeg neumí hodnotit 360VR obrázky.

VIFP

(Visual Information Fidelity for Pixel-based images) měří vizuální věrnost obrazů na základě informací o pixelech. Hodnotí, kolik vizuální informace je zachováno v komprimovaném obraze ve srovnání s původním. Metrika je založena na modelování lidského vizuálního systému a jeho schopnosti extrahovat informace z obrazu.

GMSD

(Gradient Magnitude Similarity Deviation) hodnotí rozdíly v gradientu mezi dvěma obrazy. Gradienty v obrazech jsou důležité pro zachycení detailů a hran, které jsou klíčové pro lidské vnímání vizuální kvality. Nižší hodnoty GMSD naznačují vyšší podobnost mezi gradienty, a tudíž vyšší kvalitu komprimovaného obrazu.

FSIMc

(Feature SIMilarity index for color images) měří podobnost mezi obrazy na základě klíčových vlastností a barev. FSIMc kombinuje informace o fázové kongruenci, která zachycuje významné strukturální informace, a gradientu, který odráží detailní textury a hrany. Metrika také zahrnuje barevné informace, což ji činí zvláště užitečnou pro hodnocení kvality barevných obrazů.

Popis aplikace frameworku v Matlab GUI

V rámci automatizace komprimačních a hodnotících procesů bylo nezbytné vytvořit uživatelsky přívětivé a jednoduché prostředí GUI, viz. Obrázek 4.1, ve kterém lze definovat vstupní a výstupní parametry, adresáře, spouštět kompresi nebo funkci analýzy. Z uživatelského hlediska jej lze rozdělit na dvě poloviny, levou a pravou.

V levé části odshora tedy nejprve zadáváme zdrojovou cestu k referenčnímu obrázku, což je základní kámen pro kompresi i analýzu. Dále určíme výstupní adresář pro komprimované obrázky, pokračujeme volbou výstupních komprimačních kodeků, úpravou mezi parametrů QV a určením počtu kroků, tedy počtu obrázků na výstupu k jednotlivým kodekům. QV parametry lze měnit v již předvyplněných polích, pro nápovědu jsou mezi nimi zobrazeny jejich intervaly. Označení MIN / MAX definují minimální a maximální hranici intervalu míry komprese.

Uprostřed najdeme dvě tlačítka – **Vymazat komp. data** (nejprve je skryto) a **PROVÉST KOMPRESI**. Po spuštění komprese jsou do výstupního adresáře ukládány jednotlivé obrázky vč. bezztrátových kontejnerů PNG.

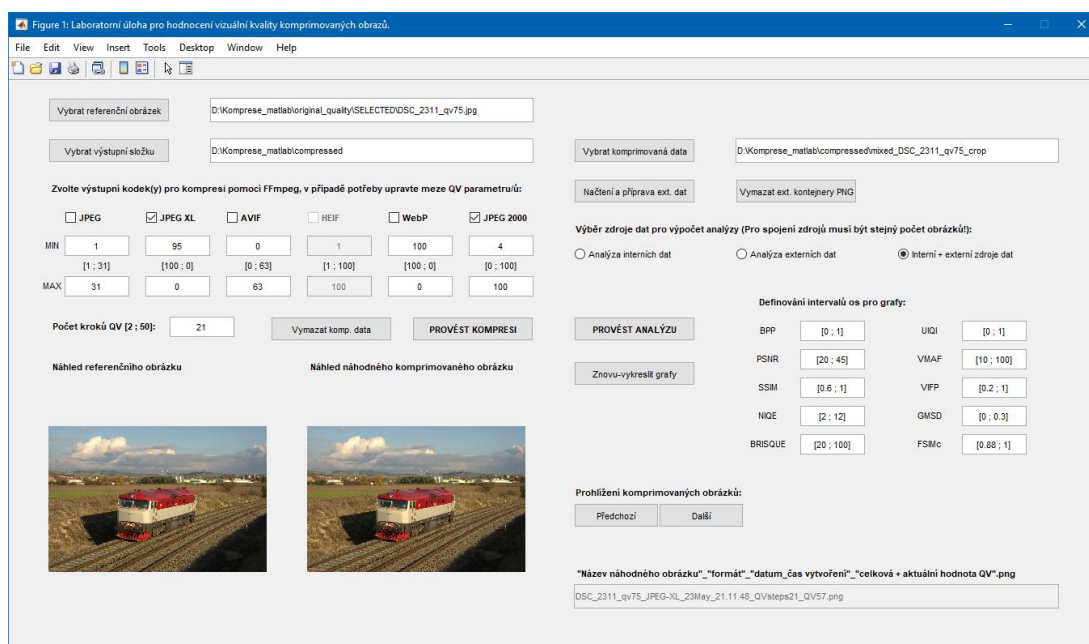
O výběru referenčního obrázku, výstupní složky či dokončení komprese je uživatel informován prostřednictvím tzv. message-boxů. Po výběru referenčního obrázku, rovněž po dokončení komprese (tlačítko pro vymazání obrázků definovaných formátů je již zpřístupněno), se zobrazí náhledy referenčního a náhodného komprimovaného obrázku. Lze také procházet mezi komprimovanými obrázky v okně *Náhled náhodného komprimovaného obrázku*, což je doplněno o výpis jeho názvu, ze kterého je patrné, o jaký snímek se jedná včetně aktuálního QV parametru a typu zvoleného kodeku.

V pravé části GUI lze zadat cestu k adresáři s již komprimovanými obrázky. Dále je třeba stiskem **Načtení a příprava ext. dat** provést načtení jejich adres a vytvoření jednotlivých PNG kontejnerů. Po tomto kroku je uživateli umožněno tyto kontejnery z adresáře opět vymazat.

Následuje volba zdroje dat pro výpočet analýzy. Zde má uživatel tři možnosti, odkud bude proces analýzy počítat výsledky jednotlivých metrik. Volba **Analýza interních dat** znamená, že budou předány k analýze pouze ty obrázky, které byly komprimovány prostřednictvím FFmpeg implementace v rámci této aplikace. **Analýza externích dat** bere v potaz jen obrázky načtené z externího zdroje. Poslední možnost **Interní + externí zdroje dat** provede načtení adres obrázků z obou zdrojů, sjednotí je do společné matice a předá k analýze. Pro tuto volbu MUSÍ oba zdroje dat obsahovat stejný počet obrázků všech jednotlivých formátů!

Samotnou analýzu pak spouštíme tlačítkem **PROVÉST ANALÝZU**. V závislosti na dostupném výpočetním výkonu a velikosti jednotlivých obrázků (objemu dat) jsou postupně prováděny výpočty výsledků metrik, při jejichž dokončení aplikace automaticky vykreslí výsledky v novém okně. Zobrazí se devět grafů s metrikami: PSNR, SSIM, NIQE, BRISQUE, UIQI, VMAF, VIFP, GMSD a FSIMc. Jejich výsledky jsou vztaženy ku hodnotám BPP jednotlivých obrázků. Po prvotním vykreslení je zpřístupněno tlačítko **Znovu-vykreslit grafy**. Toho lze využít v případě, kdy je nutné upravit intervaly některých os grafů bez nutnosti opakování komprese / analýzy. Pro tento typ úprav byla aplikace vybavena textovými poli v pravé spodní části s příslušnými popisky, ve výchozím stavu předvyplněná a přístupná i pro první analýzu.

Většina funkcí GUI (kromě zadávání intervalů) je ošetřena vstupními podmínkami, odezva spuštěných procesů (i v případě chyby při kompresi) je řešena zobrazením informačního okénka (message box) a výpisem do příkazového okna MATLABu.



Obrázek 1.1 Pohled na uživatelské prostředí aplikaci k laboratorní úloze

Poslední část GUI umožňuje uživateli listování mezi interně komprimovanými obrázky, kde se ve spodním textovém poli zobrazují jeho základní informace. Díky vytvořenému uživatelskému GUI lze propojit komprimační a hodnotící algoritmy do jednoho celku.

Instalace programů a nastavení Path v MS Windows

1. Instalace FFmpeg

Program FFmpeg je třeba stáhnout z oficiálních webových stránek (<https://www.gyan.dev/ffmpeg/builds/>), „ffmpeg-git-full.7z“ a extrahovat soubory z archivu do umístění `C:\ffmpeg`.

2. Instalace ImageMagick

Instalace ImageMagicku není tolik náročná. Je třeba stáhnout archiv z oficiálních webových stránek (<https://imagemagick.org/script/download.php#windows>) portable verzi (odzkoušeno s `ImageMagick-7.1.1-33-portable-Q16-HDRI-x64.zip`) a opět jen extrahovat soubory do umístění `C:\imagemagick`.

3. Nastavení Proměnného prostředí Path a framework aplikace

V MS Windows je třeba upravit proměnnou Path a přidat do ní správné adresáře instalovaných programů pro kompresi a konverzi do PNG kontejnerů. Tento krok je velmi důležitý pro správnou funkci framework aplikace!

V prostředí MS Windows 10 stiskneme tlačítko Start -> vepíšeme „Upravit proměnné prostředí systému“ -> v záložce „Upřesnit“ vybereme možnost „Proměnné prostředí“. V novém okně, v horní polovině „Uživatelské proměnné pro uživatele ***“ označíme proměnnou „Path“ a stiskneme „Upravit“. V dalším okně s názvem „Upravit proměnnou prostředí“ je třeba stiskem „Nový“ přidat cestu k výchozím adresářům programů FFmpeg a ImageMagick.

Cesty k adresářům by měly vypadat například takto:

- FFmpeg: `C:\ffmpeg\bin`
- ImageMagick: `C:\imagemagick`

Ve framework aplikaci je nutné při každém spuštění Matlabu otevřít příslušný adresář s funkcemi (C:\Komprese_matlab) v prohlížeči v sekci „Current folder“, označit tento adresář, pravým tlačítkem myši otevřít nabídku a v ní zvolit: „Add to path -> Selected Folders and Subfolders“.

Komprimace za pomoci graf. editoru GIMP

Doporučeno zejména pro JPEG, jelikož FFmpeg neobsahuje správný kodek pro komprimaci statických obrázků!

Pro komprimaci přes GIMP je doporučeno vytvořit si příslušný adresář s podsložkami pro každý formát a dbát na to, aby ke každému z nich byl stejný počet obrázků. Hodnotu QV parametru dopište vždy jako dvouciferné číslo do názvu obrázku s použitím „_XY“, takto: „obrazek.png“ => „obrazek_05.png“. V případě nastavování QV = 100 nikdy nepoužívejte „obrazek_100.png“, došlo by ke čtení dat ve špatném pořadí!!

Pro komprimaci obrázku v GIMPU do formátů JPEG (.jpg), AVIF (.avif), WebP (.webp) a HEIF (.heif) začněte tím, že spustíte GIMP a otevřete svůj obrázek přes *Soubor > Otevřít*. Pro kompresi obrázku do formátu JPEG, zvolte *Soubor > Exportovat jako...* (Ctrl+Shift+E), vyberte umístění, název souboru, doplňte „_XY“ a upravte příponu na „.jpg“. Klikněte na Exportovat. V dialogovém okně Exportovat obrázek jako JPEG nastavte úroveň kvality pomocí posuvníku a klikněte na Exportovat.

Pro formáty AVIF, WebP a HEIF postupujte stejně, tedy *Soubor > Exportovat jako...* a zvolte příslušnou příponu (.avif, .webp, .heif). Po kliknutí na Exportovat nastavte parametry komprese v dialogovém okně, které se objeví. Pro AVIF, WebP a HEIF se objeví specifické možnosti pro každý formát, kde můžete upravit úroveň komprese a další parametry. To však není žádoucí, pro účely této úlohy postačí pouze změna QV. Klikněte na *Exportovat*, aby se obrázek uložil s novými nastaveními komprese. Tímto způsobem dosáhnete efektivní komprese obrázku v GIMPU do požadovaných formátů.

Zadání a postup

1. Seznamte se s teoretickým úvodem, prozkoumejte základní informace o vybraných formátech, metrikách. Nastudujte si ovládání aplikace frameworku a grafického editoru GIMP.
2. Spustíte Matlab, nezapomeňte zvolený adresář „*Komprese_matlab*“ přidat do cesty vč. podsložek a spustíte aplikaci z funkce *START_MainGUI.m*. Otevře se okno s názvem *Laboratorní úloha pro hodnocení vizuální kvality komprimovaných obrazů*, s jehož ovládáním se obeznámíte v kapitole **Popis aplikace frameworku v Matlab GUI**.
3. Ve složce „*compressed*“ lze nalézt již před-vytvořené balíčky dat (složky „*mixed*“), ty obsahují komprimovaná data z prostředí GIMP, vždy po 21 snímcích. Stačí tedy zvolit správný referenční obrázek, provést komprimaci do JPEG XL – taktéž pro 21 snímků. Vybrat externí zdroj dat, načíst a převést data, spojit je pro analýzu a provést ji. Po jejím vypočtení se zobrazí grafické závislosti, v případě potřeby upravte meze os a proveďte opětovné vykreslení. Výsledné grafické závislosti si ukládejte např. do zvláštní složky pro každý snímek. Cílem komprimace je snížit datový tok, v případě grafických závislostí se příslušnou úpravou intervalu QV snažíme dostat k podobným hodnotám počtu (BPP) bitů na pixel, nejčastěji [0 ; 2].
4. Nyní si budete moct vytvořit vlastní sadu dat. Ve složce „*original_quality*“ najdete obrázky z dostupných databází. Vyberte si některý z obrázků mimo skupinu SELECTED. Proveďte komprimaci a přípravu dat, obdobně jako tomu bylo v bodě 3., spustíte analýzu, prozkoumejte výsledky (případně upravte meze) a uložte si grafické závislosti do zvláštní složky.
5. V závěru úlohy se zamyslete nad tím, zda výsledky korespondují s teoretickými předpoklady a diskutujte, které formáty by mohly v budoucnu nahradit JPEG. Prohlédněte si PNG kontejnery komprimovaných obrázků a vyberte ty z nich, které jsou vizuálně ve stále dobré kvalitě. Zkuste odhadnout, kolik místa v úložišti lze přibližně ušetřit (v %) komprimací do námi známých formátů.

Závěr

V závěru úlohy studenti uvedou své individuální hodnocení efektivity použitých kompresních algoritmů, doplněným o výsledky analýz. Dále pak diskutují efektivnost algoritmů s ohledem na úsporu místa úložiště.

Kontrolní otázky

1. Které moderní formáty jsou schopny konkurovat JPEGu a v čem vidíte jejich velké výhody či nevýhody?
2. Jaké znáte referenční objektivní metriky hodnocení kvality?
3. Z jakého důvodu nelze provádět ztrátovou kompresi do JPEG 2000 či JPEG XL v GIMPu?
4. Na čem je založena metoda FSIMc (jaké vlastnosti v obraze hodnotí)?
5. Která z metod není vhodná pro 360° obrázky?
6. Které z objektivních metrik jsou méně a které více náročné na výpočetní výkon?

Použitá a doporučená literatura

- [1] *Databáze: Dataset /CSet8.zip: Boats.png, Barbara.png.* 2019. Dostupné také z: <https://github.com/ysix7/Dataset/blob/master/CSet8.zip>.
- [2] *Databáze: CBSD68-dataset/CBSD68/original_png.* online. In: . 2018. Dostupné z: https://github.com/clausmichele/CBSD68-dataset/tree/master/CBSD68/original_png
- [3] *Kodak Image 23: two macaws.* online. In: *Kodak Lossless True Color Image Suite.* 1999, 2013-01-27. Dostupné z: <https://r0k.us/graphics/kodak.html>.

**Příloha B - Matlab aplikace a jednotlivé funkce
jsou přiloženy v souboru .zip**