

马晏铖, 焦伟鹏. 一种面向无线三维扫描仪的高性能图像压缩算法[J]. 智能计算机与应用, 2024, 14(11): 144-150. DOI: 10.20169/j.issn.2095-2163.24070601

一种面向无线三维扫描仪的高性能图像压缩算法

马晏铖, 焦伟鹏

(奥比中光科技集团股份有限公司, 广东 深圳 518000)

摘要: 为了提高无线三维扫描仪的图像传输帧率, 提出一种结合有损图像编码、无损图像编码以及并行化方法的高性能图像压缩算法。基本思想是根据设置的门限值通过并行化方法查找替代值个数, 然后根据替代值个数自适应选择有损图像编码或无损图像编码。实验结果表明, 与多种常用的图像压缩算法相比, 该算法不仅提高了图像的传输帧率以及重构图像的质量, 还缩短了编解码耗时。

关键词: 无线三维扫描仪; 有损图像编码; 无损图像编码; 并行化方法

中图分类号: TP391

文献标志码: A

文章编号: 2095-2163(2024)11-0144-07

A high-performance image compression algorithm for wireless 3D scanners

MA Yancheng, JIAO Weipeng

(Orbbec Inc., Shenzhen 518000, Guangdong, China)

Abstract: To improve the image transmission frame rate of wireless 3D scanners, the paper proposes the high-performance image compression algorithm combining lossy image encoding, lossless image encoding, and parallelization method. The basic idea is to find the number of replacement values through a parallel method according to the set threshold value, and to select lossy or lossless image encoding adaptively based on the number of replacement values. Experimental results demonstrates that the proposed algorithm could not only improve the image transmission frame rate and the quality of reconstructed image, but also reduce the encoding and decoding time compared with various common image compression algorithms.

Key words: wireless 3D scanners; lossy image coding; lossless image coding; parallelization method

0 引言

三维扫描仪是一种非接触式测量被测物体三维信息的仪器, 广泛应用于逆向工程^[1-2]、医疗护具制作^[3-4]、建筑建模^[5]、文物修复^[6-7]、文物数字化存档^[8-9]等方面。常用三维扫描仪通过有线方式将采集的图像传输到计算机, 然后在计算机上进行被测物体的三维重建, 这种扫描仪的便携性和灵活性欠缺, 使用场景受限。针对有线三维扫描仪的不足, 各大厂商相继推出无线三维扫描仪。无线三维扫描仪通过 WiFi 将采集的图像传输到计算机或者移动设备上, 当传输大分辨率图像时, 由于 WiFi 传输带宽受限, 导致传输到接收端的图像帧率较低, 这将会极大影响用户体验。为了给用户提供更好的交互体验, 对于无线三维扫描仪采集的图像需要使用图像

压缩算法进行压缩。为了获得较高的图像传输帧率, 图像压缩算法不仅压缩率要高, 而且在发送端的压缩帧率以及接收端的解码帧率都要满足较高帧率, 这就对图像压缩算法的性能提出了更高要求。

图像压缩算法主要分为两大类, 即无损图像压缩和有损图像压缩。其中, 无损图像压缩、即解码恢复后的图像与原图像一致, 常用的无损图像压缩算法有基于信息熵^[10]的熵编码^[11-13]、基于重复符号的行程编码^[14]、基于滑动窗口的字典编码^[15-16]、基于多种编码方式的混合编码^[17-18]。有损压缩、即解码恢复后的图像与原图像有差异, 常用的有损图像压缩算法有 jpeg^[19-20]和 turbojpeg^[21]。随着深度学习技术的快速发展, 有学者将深度学习应用于图像压缩领域。文献[22]提出了基于自编码器的图像压缩算法。文献[23]提出了基于卷积神经网络的

作者简介: 焦伟鹏 (1995—), 男, 硕士, 主要研究方向: 图像压缩, 高性能计算。

通信作者: 马晏铖 (1989—), 男, 博士, 主要研究方向: 图像压缩, 高性能计算, 模型部署。Email: tonyma0755@163.com。

收稿日期: 2024-07-06

哈尔滨工业大学主办 ◆ 专题设计与应用

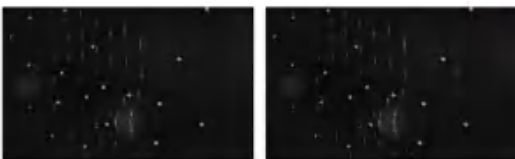
图像压缩算法。文献[24]提出了基于循环神经网络的图像压缩算法。文献[25]提出了基于生成式对抗网络的图像压缩算法。文献[26]提出了基于转换器和卷积神经网络结合的图像压缩算法。文献[27]提出了基于扩散模型的图像压缩算法。考虑到产品制造成本,各大厂商在无线三维扫描仪图像发送端采用的嵌入式芯片算力有限,这导致了常用的无损图像压缩、有损图像压缩以及深度学习图像压缩算法难以同时满足高压压缩率、高压压缩帧率以及高解码帧率的要求。

本文基于无线三维扫描仪采集图像的特点,提出一种结合有损编码、无损编码以及并行化方法的高性能图像压缩算法。该算法通过设置合理门限值,对于三维重建算法精度不敏感的图像区域采用有损编码来提高图像的压缩率,对于三维重建算法精度敏感的图像区域采用无损编码来保留图像关键特征。为了提高压缩帧率,采用基于 ARM SIMD 的并行化方法来快速处理图像像素值。本文算法在算力较低的嵌入式芯片上,可以同时获得高压压缩率、高压压缩帧率以及高解码帧率。

1 有损无损混合编码

1.1 算法描述

无线三维扫描仪采集的左右图像如图 1 所示。图 1 中,较亮的线表示激光线,较亮的圆斑表示标志点。研究可知,三维重建算法的精度对激光线和标志点区域很敏感,对其他区域不敏感。基于三维重建算法的这一特点,本文提出一种有损无损混合编码 MixCodec。若图像中相邻像素差异小于等于设置门限值,则采用有损编码,编码格式为[替代值个数][替代值],有损编码可以提高图像压缩算法的压缩率;否则采用无损编码,编码格式为[替代值个数 0][原始图像像素值],无损编码保留了图像的重要细节特征。算法流程图如图 2 所示。



(a) 左图 (b) 右图

图 1 无线三维扫描仪采集左右图像

Fig. 1 Left and right image acquired by wireless 3D scanners

本文的算法流程如下:

(1) 初始化变量 $count$ 为图像宽度与高度的乘积。

(2) 判断 $count$ 是否大于 0。是,跳转到第(3)步;否,跳转到第(9)步。

(3) 使用并行化方法从输入内存中查找替代值个数并赋值给变量 $nums$ 。

(4) 判断 $count$ 是否小于 8。是,跳转到第(5)步;否,跳转到第(6)步。

(5) 遍历输入内存最后 $count$ 个像素值并保存到输出内存中,跳转到第(9)步。

(6) 判断 $nums$ 是否等于 0。是,跳转到第(7)步;否,跳转到第(8)步。

(7) 使用无损编码格式将替代值个数 0 以及原始像素值保存到输出内存中, $count$ 值减去 1,跳转到第(2)步。

(8) 使用有损编码格式将替代值个数以及替代值保存到输出内存中, $count$ 值减去 $nums$,跳转到第(2)步。

(9) 结束。

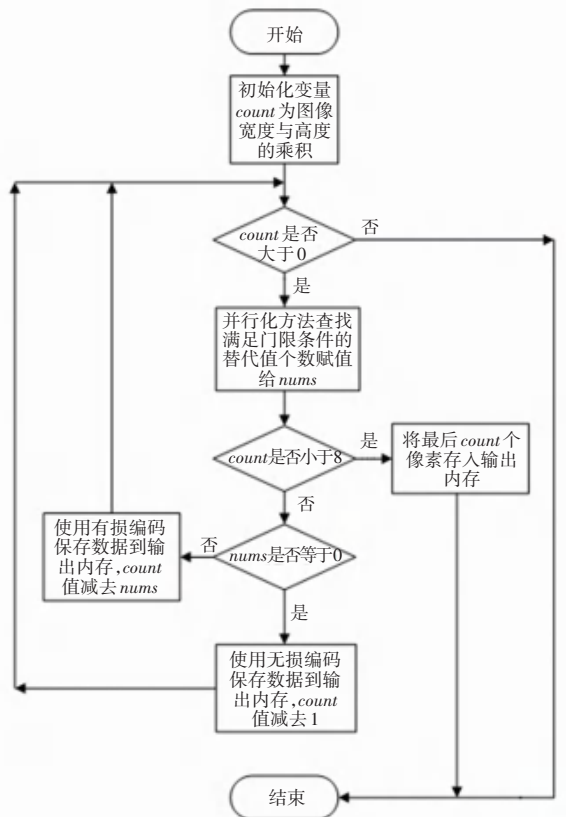


图 2 有损无损混合编码流程图

Fig. 2 Flowchart of lossy and lossless hybrid coding

为了提高图像压缩算法的压缩帧率,对于查找满足门限条件的替代值个数模块,本文提出一种基于 ARM SIMD 并行化方法查找替代值个数的算法,算法流程如图 3 所示。

基于 ARM SIMD 并行化方法查找满足门限条

件替代值个数的算法流程如下:

(1) 设门限值变量 *threshold* 为 2, *start* 指针为图像第一个元素位置, *end* 指针为图像最后一个元素位置, *total_nums* 为 0, *flag* 为真, *nums* 为 0。

(2) 使用赋值指令 *vmov_n_u8* 生成全 *threshold* 值向量 *th_vec*。

(3) 使用赋值指令 *vmov_n_u8* 生成全零向量 *zero_vec*。

(4) 判断 *start* 是否小于 *end* 且 *flag* 为真。是, 跳转到第(5)步; 否, 跳转到第(21)步。

(5) *flag* 设为假, 判断 *start* 加 8 是否小于等于 *end*。是, 跳转到第(6)步; 否, 跳转到第(18)步。

(6) 判断 *total_nums* 是否等于 0。是, 跳转到第(7)步; 否, 跳转到第(13)步。

(7) 使用数据加载指令 *vld1_u8* 从 *start* 处开始一次加载 8 个像素生成向量 *vec1*。

(8) 使用计算向量相邻元素最大值指令 *vpmax_u8* 处理 *vec1* 与 *zero_vec* 生成向量 *vec2*。

(9) 使用计算向量相邻元素最大值指令 *vpmax_u8* 处理 *vec2* 与 *zero_vec* 生成向量 *vec3*。

(10) 使用计算向量相邻元素最小值指令

vpmi_n_u8 处理 *vec3* 与 *zero_vec* 生成向量 *vec4*。

(11) 取 *vec4* 第一个元素值赋给变量 *value*。

(12) 基于 *value* 值使用赋值指令 *vmov_n_u8* 生成全 *value* 值向量 *vec5*。

(13) 使用数据加载指令 *vld1_u8* 从 *start* 处开始一次加载 8 个像素生成向量 *vec6*。

(14) 使用计算向量绝对差指令 *vabd_u8* 处理 *vec6* 与 *vec5* 生成向量 *vec7*。

(15) 使用向量判断指令 *vcle_u8* 处理 *vec7* 与 *th_vec* 生成向量 *vec8*。

(16) 判断向量 *vec8* 元素是否遍历结束。是, 跳转到第(19)步; 否, 跳转到第(17)步。

(17) 判断 *vec8* 元素是否等于 0, 是, 跳转到第(19)步; 否, *nums* 值加 1, 跳转到第(16)步。

(18) *nums* 设为 0。

(19) *total_nums* 值加上 *nums*。

(20) 8 减去 *nums* 值结果取非运算, 然后与 *flag* 取或运算, 并将结果赋给 *flag*, *start* 加上 *nums*, 跳转到第(4)步。

(21) 输出 *total_nums* 值。

(22) 结束。

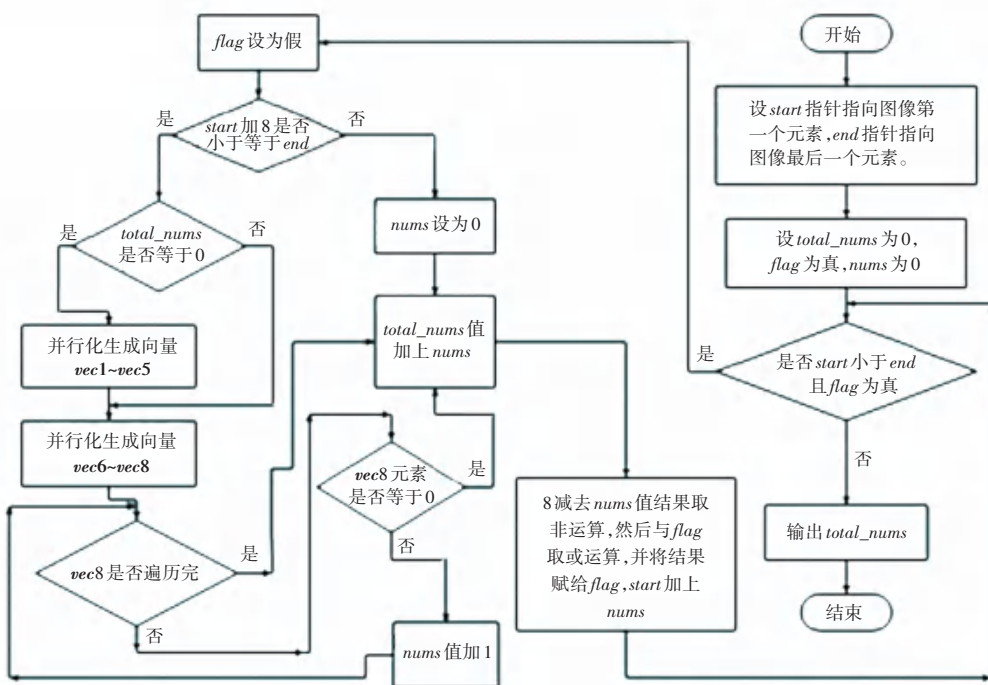


图3 ARM SIMD 并行化查找替代值个数算法流程图

Fig. 3 Flowchart of finding numbers of replacement values by ARM SIMD parallelization method

1.2 解码算法

在无线三维扫描仪中, 解码算法将编码数据进行解码恢复成原分辨率大小的图像, 然后输入给三

维重建算法进行目标的三维重建, 解码算法流程如图 4 所示。

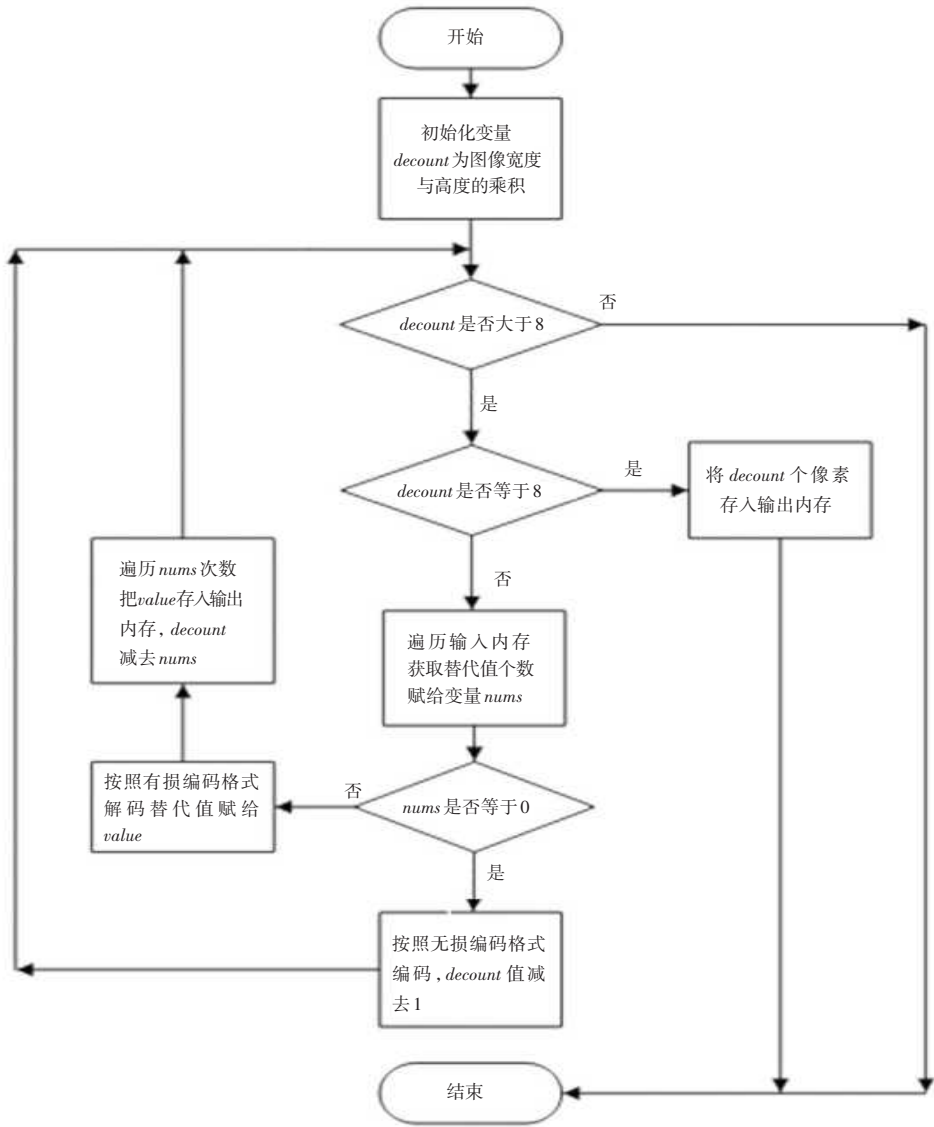


图 4 有损无损混合编码解码流程图

Fig. 4 Flowchart of lossy and lossless hybrid coding and decoding

解码算法流程如下:

(1) 初始化变量 $decout$ 为图像宽度与高度的乘积。

(2) 判断 $decout$ 是否大于 0。是, 跳转到第(3)步; 否, 跳转到第(10)步。

(3) 判断 $decout$ 是否小于 8。是, 跳转到第(4)步; 否, 跳转到第(5)步。

(4) 遍历输入内存中 $decout$ 个元素并直接保存到输出内存中, 跳转到第(10)步。

(5) 遍历输入内存获取替代值个数并赋值给变量 $nums$ 。

(6) 判断 $nums$ 是否等于 0。是, 跳转到第(7)步; 否, 跳转到第(8)步。

(7) 按照无损编码格式从输入内存中解码原始

像素值并保存到输出内存中, $decout$ 值减去 1, 跳转到第(2)步。

(8) 按照有损编码格式从输入内存中解码替代值并赋值给变量 $value$ 。

(9) 遍历 $nums$ 次数把 $value$ 保存到输出内存中, $decout$ 值减去 $nums$, 跳转到第(2)步。

(10) 结束。

2 实验结果分析

2.1 实验数据与实验平台

实验数据为图 1 中的左右两张图像, 其分辨率大小为 $1\ 920 \times 1\ 200$, 每个像素用 8 bit 表示。

图像压缩的实验平台为 Linux ARM Cortex A53 4 核, 主频为 2.0 GHz, 实验中使用 2 个线程分别压

缩左右图像。

图像解码的实验平台为 Android SM8350 手机, 实验中使用 2 个线程分别解码左右编码数据。

2.2 评价指标

图像压缩算法评价指标主要有压缩率与压缩耗时。对于有损压缩算法, 为了评估解码恢复的图像质量, 还有峰值信号噪声比 (*PSNR*)。在无线三维扫描仪中, WiFi 传输带宽受限、约为 300 Mbps, 传输 1 920×1 200 大分辨率图像, 传输帧率约为 17 帧/s, 为了给用户极致的交互体验, 需要无线传输、算法压缩耗时以及解码耗时的帧率至少在 40 帧/s 以上, 由此可知要选择适合无线三维扫描仪的图像压缩算法, 该算法的压缩率至少为 2.3, 同时算法压缩耗时以及解码耗时不能超过 25 ms。图像压缩率 *CR* 计算公式如下:

$$CR = raw_size/compressed_size \quad (1)$$

其中, *raw_size* 表示原始图像字节数, *compressed_size* 表示图像压缩后的字节数。

PSNR 计算公式如下:

$$PSNR = 10 \times \log_{10}(MAX^2/MSE) \quad (2)$$

其中, *MAX* 表示图像像素值可以选取的最大值, *MSE* 表示恢复图像像素值与原图像像素值的均方误差。

帧率 *FPS* 计算公式如下:

$$FPS = 1\ 000/cost_time \quad (3)$$

其中, *cost_time* 表示图像压缩耗时, 单位为 ms。

2.3 常用无损压缩算法实验结果

本文对常用的图像无损压缩算法 RLE, RVL, LZ4, Zstd 在图像压缩实验平台进行了性能验证, 性能统计结果见表 1。

表 1 常用无损压缩算法性能统计

Table 1 The performance statistics for common lossless compression algorithm

算法	左图压缩率	右图压缩率	压缩耗时/ms	压缩帧率/fps
RLE	1.13	1.12	22.73	43.99
RVL	1.93	1.94	33.22	30.10
LZ4	1.67	1.68	23.24	43.03
Zstd	2.65	2.69	53.18	18.80

由表 1 统计结果可知, 对于无线三维扫描仪的压缩率至少为 2.3, 同时压缩帧率至少为 40 帧/s 的要求, 4 种常用无损压缩算法无法同时满足要求。其中, RLE 与 LZ4 压缩帧率满足要求, 但是压缩率不满足要求; RVL 不管是压缩率、还是压缩帧率都

不满足要求; Zstd 压缩率满足要求, 但是压缩帧率不满足要求。

2.4 有损无损混合编码实验结果

本文采用业界常用的有损图像压缩算法 *turbojpeg* 作为性能对比, 分别在图像压缩实验平台以及图像解码实验平台上验证 *turbojpeg* 与并行化有损无损混合编码 *MixCodec* 的性能。其中, *turbojpeg* 算法的质量因子为 98, *MixCodec* 算法的门限值为 2。压缩性能统计结果见表 2, 解码性能统计结果见表 3。

表 2 *turbojpeg* 与 *MixCodec* 压缩性能统计

Table 2 The compression performance statistics for *turbojpeg* and *MixCodec* algorithm

算法	左图压缩率	右图压缩率	压缩耗时/ ms	压缩帧率/ fps
<i>turbojpeg</i>	4.89	4.93	30.08	33.24
<i>MixCodec</i>	7.05	7.93	11.88	84.18

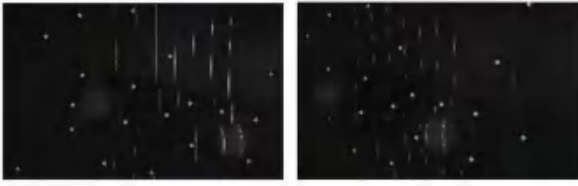
表 3 *turbojpeg* 与 *MixCodec* 解码性能统计

Table 3 The decompression performance statistics for *turbojpeg* and *MixCodec* algorithm

算法	解码耗时/ ms	解码帧率/ fps	左图 <i>PSNR</i> / dB	右图 <i>PSNR</i> / dB
<i>turbojpeg</i>	31.89	31.36	9.47	12.07
<i>MixCodec</i>	11.72	85.32	17.59	18.81

由表 2 统计结果可知, 对比无线三维扫描仪的压缩率至少为 2.3, *MixCodec* 左图压缩率提升 2.06, 右图压缩率提升 2.45, 对比无线三维扫描仪的压缩帧率至少为 40 帧/s, *MixCodec* 压缩帧率提升 1.10。 *turbojpeg* 压缩率满足无线三维扫描仪的压缩率至少为 2.3 的要求, 但是压缩帧率不满足 40 帧/s 的要求。

由表 3 统计结果可知, 对比无线三维扫描仪的解码帧率至少为 40 帧/s, *MixCodec* 解码帧率提升 1.13, 而 *turbojpeg* 却不能满足无线三维扫描仪的解码帧率 40 帧/s 的要求。 *MixCodec* 解码恢复的左图 *PSNR* 较 *turbojpeg* 解码恢复的左图 *PSNR* 高 8.12 dB, *MixCodec* 解码恢复的右图 *PSNR* 较 *turbojpeg* 解码恢复的右图 *PSNR* 高 6.74 dB。 *MixCodec* 解码恢复的左右图像如图 5 所示。由图 5 可知, 恢复的左右图中, 关键的激光线和标志点特征得以保留, 即 *MixCodec* 解码恢复的左右图像对三维重建算法的精度没有影响。



(a) 解码恢复左图 (b) 解码恢复右图

图 5 MixCodec 门限值为 2 时解码恢复左右图像

Fig. 5 The left and right reconstructed images when the threshold value of MixCodec is 2

2.5 有损无损混合编码不同门限值实验结果

有损无损混合编码 MixCodec 默认门限值为 2, 为了验证 MixCodec 在不同门限值下的性能, 分别设置门限值为 5 和 9, 在图像压缩实验平台验证其压缩性能, MixCodec 在不同门限值下的压缩性能统计结果见表 4。在图像解码实验平台验证其解码性能, MixCodec 在不同门限值下的解码性能统计结果见表 5。

表 4 MixCodec 不同门限值压缩性能统计

Table 4 The compression performance statistics for different threshold value of MixCodec algorithm

门限值	左图压缩率	右图压缩率	压缩耗时/ms	压缩帧率/fps
2	7.05	7.93	11.88	84.18
5	16.02	17.56	8.17	122.40
9	21.75	23.56	7.48	133.69

表 5 MixCodec 不同门限值解码性能统计

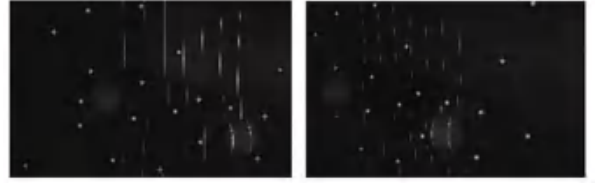
Table 5 The decompression performance statistics for different threshold value of MixCodec algorithm

门限值	解码耗时/ ms	解码帧率/ fps	左图 PSNR/ dB	右图 PSNR/ dB
2	11.72	85.32	17.59	18.81
5	8.25	121.21	16.96	18.33
9	7.08	141.24	16.80	18.22

由表 4 统计结果可知, 随着门限值的增加, MixCodec 压缩率以及压缩帧率都随之增加, 对比无线三维扫描仪的压缩率至少为 2.3, 门限值为 5 时, MixCodec 左图压缩率提升 5.97, 右图压缩率提升 6.63; 门限值为 9 时, MixCodec 左图压缩率提升 8.46, 右图压缩率提升 9.24。对比无线三维扫描仪的压缩帧率至少为 40 帧/s, 门限值为 5 时, MixCodec 压缩帧率提升 2.06; 门限值为 9 时, MixCodec 压缩帧率提升 2.34。

由表 5 统计结果可知, 随着门限值的增加, MixCodec 解码帧率随之增加, 左右图 PSNR 随之减小。门限值为 5 时, 解码恢复的左右图像如图 6 所示。门限值为 9 时, 解码恢复的左右图像如图 7 所

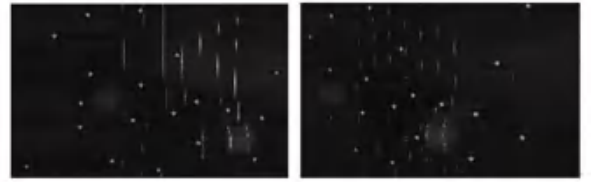
示。由图 6、图 7 可知, 恢复的左右图中, 关键的激光线和标志点特征得以保留, 即在门限值为 5 和 9 时解码恢复的左右图像对三维重建算法的精度没有影响。



(a) 解码恢复左图 (b) 解码恢复右图

图 6 MixCodec 门限值为 5 时解码恢复左右图像

Fig. 6 The left and right reconstructed images when the threshold value of MixCodec is 5



(a) 解码恢复左图 (b) 解码恢复右图

图 7 MixCodec 门限值为 9 时解码恢复左右图像

Fig. 7 The left and right reconstructed images when the threshold value of MixCodec is 9

3 结束语

本文提出了一种面向无线三维扫描仪的高性能图像压缩算法。该算法根据设置的门限值通过并行化方法快速查找替代值个数, 然后根据替代值个数自动选择有损编码或无损编码。实验结果表明, 与多种常用的图像压缩算法相比, 本文算法具有压缩率高、压缩速度快、解码速度快以及恢复图像质量好的优点。

参考文献

- [1] 韦迎, 欧洪金, 张云鹏, 等. 基于逆向工程的零件检测方法研究[J]. 科技与创新, 2024(5): 114-116.
- [2] 马浩浩, 郭泰聪, 姬智新, 等. 基于逆向工程的上肢关节个性化康复器械的设计与实现[J]. 数字技术与应用, 2021, 39(7): 141-143.
- [3] 张振江. 3D 打印康复外固定支具设计方法与应用研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古工业大学, 2021.
- [4] 谢韦莲. 基于三维扫描与 3D 打印的个性化康复护具设计[D]. 广州: 广东工业大学, 2019.
- [5] 陈占军, 林姚宇, 龚咏喜, 等. 古建筑视觉三维重建系统设计与实现[J]. 计算机应用与软件, 2021, 38(8): 17-22.
- [6] 吕瑞. 基于数字技术的青铜器三维扫描与修复方法探索[J]. 文物鉴定与鉴赏, 2024, 271(4): 59-62.
- [7] 周璐. 基于三维扫描打印技术的馆藏玉器文物仿制及思考[J]. 文物鉴定与鉴赏, 2024, 269(2): 36-39.
- [8] 姜宽舒, 于泓, 宋元山, 等. 基于三维扫描及 3D 打印的文物数字

- 化保存与逆向修复技术研究与应用[J]. 科学技术创新, 2024(2):17-23.
- [9] 巴钧才. 基于3D扫描技术的古建筑附着艺术品数字化研究[J]. 文物鉴定与鉴赏, 2024, 271(4):146-149.
- [10] SHANNON C E. A mathematical theory of communication[J]. Bell System Technical Journal, 1948, 27(3): 379-423.
- [11] HUFFMAN D A. A method for the construction of minimum-redundancy codes[J]. Proceedings of the IRE, 1952, 40(9): 1098-1101.
- [12] LANGDON G G. An introduction to arithmetic coding[J]. IBM Journal of Research and Development, 1984, 28(2): 135-149.
- [13] MARTIN G N N. Range encoding: An algorithm for removing redundancy from a digitised message [C]//Proceedings of Institution of Electronic and Radio Engineers International Conference on Video and Data Recording. Southampton, United Kingdom; dblp, 1979:24-27.
- [14] GOLOMB S. Run-length encodings (corresp.) [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1966, 12(3): 399-401.
- [15] YANN Collet. LZ4 - Extremely fast compression algorithm[EB/OL]. [2024-07-01]. <http://code.google.com/p/lz4>.
- [16] YANN Collet. Zstandard[EB/OL]. [2024-07-01]. <https://github.com/facebook/zstd>.
- [17] WILSON A D. Fast lossless depth image compression [C]//Proceedings of the 2017 ACM International Conference on Interactive Surfaces and Spaces. New York; ACM, 2017: 100-105.
- [18] 金璐, 张盛兰, 何小海, 等. 基于仿射不变的分布式多时相图像压缩[J]. 智能计算机与应用, 2023, 13(3):157-162.
- [19] WALLACE G K. The JPEG still picture compression standard [J]. Communications of the ACM, 1991, 34(4): 30-44.
- [20] TAUBMAN D S, MARCELLIN M W, RABBANI M. JPEG2000: Image compression fundamentals, standards and practice[J]. Journal of Electronic Imaging, 2002, 11(2): 286-287.
- [21] MASARU M. Libjpeg - turbo [EB/OL]. [2023-11-29]. <https://libjpeg-turbo.org/>.
- [22] THEIS L, SHI W, CUNNINGHAM A, et al. Lossy image compression with compressive autoencoders [J]. arXiv preprint arXiv, 1703.00395, 2017.
- [23] MINNEN D, BALLE J, TODERICI G D. Joint autoregressive and hierarchical priors for learned image compression [C]//Advances in Neural Information Processing Systems. Montreal, Canada; NIPS Foundation, 2018: 10793-10802.
- [24] JOHNSTON N, VINCENT D, MINNEN D, et al. Improved lossy image compression with priming and spatially adaptive bit rates for recurrent networks [C]//Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Salt Lake City, USA; IEEE, 2018: 4385-4393.
- [25] AGUSTSSON E, TSCHANNEN M, MENTZER F, et al. Generative adversarial networks for extreme learned image compression [C]//Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision. Piscataway, NJ; IEEE, 2019: 221-231.
- [26] LIU Jiming, SUN Heming, KATTO J. Learned image compression with mixed transformer-CNN architectures [C]//Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway, NJ; IEEE, 2023: 14388-14397.
- [27] YANG Ruihan, MANDT S. Lossy image compression with conditional diffusion models [C]//Proceedings of the 37th International Conference on Neural Information Processing Systems. New Orleans, USA; NIPS Foundation, 2023: 64971-64995.