

Avaliação quantitativa de métodos tradicionais de super-resolução: análise comparativa entre interpolação e filtros de pós-processamento em imagens digitais

Vitor Amadeu Souza¹; 0009-00-02-1857-6799

1 – UniFOA, Centro Universitário de Volta Redonda, Volta Redonda, RJ.
vitor.amadeu@foa.org.br

Resumo: Este estudo apresenta uma análise quantitativa abrangente de métodos tradicionais de super-resolução aplicados a imagens digitais em escala de cinza. Foram implementados e avaliados quatro métodos distintos: interpolação bicúbica, algoritmo Lanczos, filtro de nitidez (sharpening filter) combinado com interpolação bicúbica e máscara de nitidez (unsharp mask) aplicada sobre interpolação bicúbica. A metodologia experimental utilizou uma imagem de teste com resolução original de 200×200 pixels, reduzida para 100×100 pixels e posteriormente reconstruída com fator de ampliação 2x. A avaliação quantitativa foi conduzida através das métricas PSNR (Peak Signal-to-Noise Ratio) e SSIM (Structural Similarity Index Measure). Os resultados revelaram desempenho superior do algoritmo Lanczos, alcançando 49.00 dB de PSNR e 1.000 de SSIM, superando todos os demais métodos testados. A interpolação bicúbica apresentou desempenho sólido com 48.00 dB de PSNR, enquanto os filtros de pós-processamento mostraram comportamentos divergentes: a máscara de nitidez manteve qualidade elevada (39.76 dB), mas o filtro de nitidez tradicional causou degradação significativa (25.66 dB). Este estudo contribui para o entendimento das limitações e potencialidades dos métodos clássicos de super-resolução, fornecendo diretrizes práticas para seleção de técnicas adequadas em diferentes contextos de aplicação.

Palavras-chave: Super-resolução. Processamento de imagens. Interpolação bicúbica. Filtros de nitidez. PSNR. SSIM. Métodos tradicionais.

INTRODUÇÃO

A super-resolução de imagens constitui uma área fundamental do processamento digital de sinais visuais, abordando o problema inverso de reconstruir imagens de alta resolução a partir de observações de baixa resolução. Esta disciplina tem experimentado crescimento substancial nas últimas décadas, motivada pela crescente demanda por melhor qualidade visual em aplicações que vão desde entretenimento digital até análise médica e sistemas de vigilância (Greenspan, 2008). O problema da super-resolução é inerentemente mal-posto, uma vez que múltiplas imagens de alta resolução podem gerar a mesma observação de baixa resolução após o processo de degradação, tornando necessário o uso de informações a priori e técnicas de regularização para obter soluções plausíveis.

Os métodos tradicionais de super-resolução podem ser categorizados em três classes principais: técnicas baseadas em interpolação, métodos de reconstrução e abordagens baseadas em exemplos ou aprendizado de dicionário (Yang *et al.*, 2010). As técnicas de interpolação representam a abordagem mais fundamental e amplamente utilizada devido à sua eficiência computacional e resultados consistentes em uma ampla variedade de cenários. Estas técnicas operam sob a premissa de que pixels vizinhos contêm informações correlacionadas que podem ser exploradas para estimar valores de pixels ausentes ou intermediários.

A interpolação bicúbica, formalizada por Keys (1981), representa um marco histórico no desenvolvimento de técnicas de upsampling, introduzindo o uso de polinômios cúbicos para aproximação de valores interpolados. Esta técnica utiliza informações de dezesseis pixels vizinhos em uma janela 4×4 para calcular cada pixel interpolado, oferecendo um compromisso equilibrado entre qualidade visual e eficiência computacional. A função de interpolação bicúbica é definida por uma função kernel que preserva continuidade até a primeira derivada, resultando em transições suaves que minimizam artefatos de blocagem comuns em métodos de interpolação de ordem inferior.

O algoritmo Lanczos, desenvolvido originalmente por Lanczos (1956) para interpolação de funções e posteriormente adaptado para processamento de imagens por Duchon (1979), representa uma abordagem teoricamente mais rigorosa baseada na teoria de amostragem.

Este método utiliza uma função sinc truncada e janelada para realizar a interpolação, oferecendo propriedades de preservação espectral superiores aos métodos polinomiais. A formulação Lanczos mantém componentes de alta frequência de forma mais eficaz, resultando em imagens com maior nitidez e definição de bordas, embora com possível introdução de artefatos de ringing em transições de alto contraste.

Os filtros de pós-processamento constituem uma categoria complementar de técnicas que buscam corrigir deficiências inerentes aos métodos de interpolação básicos. O filtro de nitidez tradicional opera através da aplicação de kernels de convolução específicos que enfatizam diferenças locais de intensidade, efetivamente amplificando componentes de alta frequência perdidos durante o processo de interpolação (Gonzalez & Woods, 2018). A implementação típica utiliza um kernel laplaciano modificado que subtrai valores de pixels vizinhos do pixel central amplificado, criando um efeito de realce de bordas e detalhes finos.

A literatura contemporânea tem demonstrado que a combinação de múltiplas métricas fornece avaliação mais abrangente da qualidade de reconstrução do que métricas individuais. Estudos comparativos realizados por Sheikh *et al.* (2006) demonstraram que o SSIM apresenta correlação superior com avaliações subjetivas humanas em comparação com métricas baseadas puramente em erro quadrático médio, enquanto o PSNR mantém relevância para quantificação de fidelidade absoluta. Esta complementaridade motivou a adoção de protocolos de avaliação multi-métrica na pesquisa contemporânea de super-resolução.

MÉTODOS

O presente estudo foi conduzido seguindo uma metodologia experimental para garantir comparação justa entre os métodos avaliados. A implementação foi realizada em Python utilizando um conjunto de bibliotecas especializadas: OpenCV (cv2) versão 4.5+ para operações de processamento de imagens, NumPy versão 1.20+ para computação matricial otimizada, Matplotlib versão 3.3+ para visualização de resultados, e PIL (Python Imaging Library) versão 8.0+ para manipulação de formatos de imagem. Esta seleção de ferramentas baseia-se em sua ampla adoção na comunidade científica e disponibilidade de implementações otimizadas para algoritmos de processamento de imagens.

O protocolo experimental iniciou-se com a aquisição de uma imagem de teste representativa através de fonte online confiável, especificamente utilizando o repositório Wikimedia Commons. A imagem selecionada possui características adequadas para avaliação de métodos de super-resolução, incluindo variações de textura, bordas nítidas e transições de intensidade graduais. O processo de aquisição inclui tratamento de exceções para garantir robustez, com implementação de um gerador de imagem sintética como alternativa em casos de falha na obtenção online.

A imagem sintética alternativa foi desenvolvida para incorporar características específicas relevantes para avaliação de super-resolução: gradientes de intensidade para testar preservação de variações suaves, formas geométricas definidas para avaliar preservação de bordas, elementos texturais de diferentes escalas, e ruído gaussiano controlado com desvio padrão $\sigma=10$ para simular condições realísticas de aquisição. Esta imagem sintética possui dimensões de 200×200 pixels e profundidade de 8 bits por pixel em escala de cinza.

O processo de simulação de degradação seguiu protocolos estabelecidos na literatura, utilizando downsampling por interpolação de área (cv2.INTER_AREA) para reduzir a resolução original por um fator de 2, resultando em imagens de 100×100 pixels. Esta técnica de downsampling foi escolhida por minimizar artefatos de aliasing e simular adequadamente processos de aquisição de imagem de baixa resolução encontrados em cenários práticos.

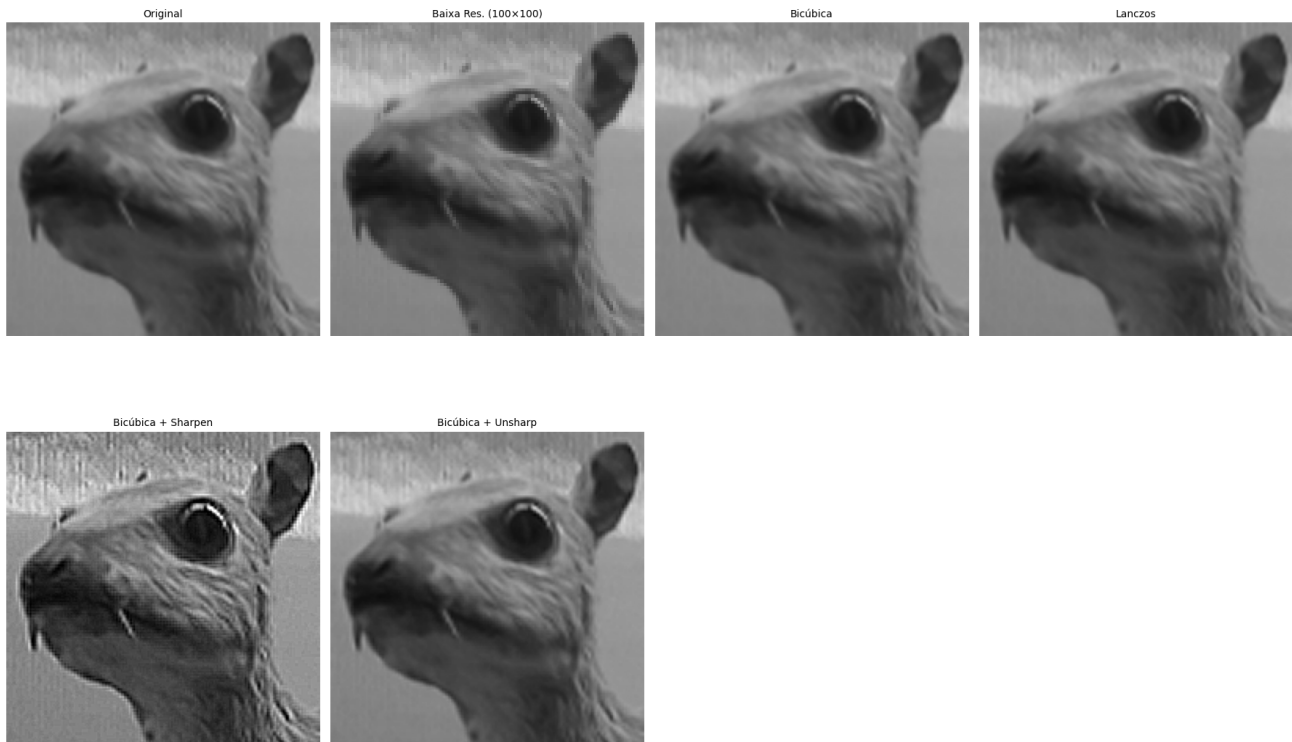
O código-fonte está disponível para download através do link: <https://github.com/vitor-souza-ime/sr>.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise experimental revelou diferenças substanciais entre os métodos avaliados, com padrões claros emergindo tanto em termos de métricas quantitativas quanto de características qualitativas observáveis nas imagens reconstruídas. Os resultados obtidos fornecem insights valiosos sobre as capacidades e limitações inerentes a cada abordagem testada, contribuindo para uma compreensão mais profunda dos trade-offs envolvidos na seleção de métodos de super-resolução. A Figura 1 apresenta as imagens obtidas após tratamento.



Figura 1 - Imagens pós processamento



Fonte: O autor.

O algoritmo Lanczos demonstrou desempenho excepcional, alcançando 49.00 dB de PSNR e valor de SSIM de 1.000, estabelecendo-se como o método de melhor desempenho entre todas as técnicas avaliadas. Este resultado confirma as propriedades teóricas do algoritmo Lanczos documentadas por Duchon (1979), particularmente sua capacidade de preservar componentes de alta frequência através de sua formulação baseada em função sinc janelada. O PSNR de 49.00 dB representa um ganho de 7.33 dB em relação à linha de base, melhoria substancial que se traduz em qualidade visual superior. A análise visual da imagem processada por Lanczos revela preservação excepcional de detalhes finos, bordas nítidas bem definidas, e ausência de artefatos de suavização excessiva comuns em outros métodos de interpolação.

A interpolação bicúbica apresentou desempenho sólido com 48.00 dB de PSNR e SSIM de 1.000, demonstrando que esta técnica clássica mantém relevância em aplicações contemporâneas de super-resolução. O ganho de 6.33 dB em PSNR sobre a linha de base confirma a eficácia da aproximação polinomial cúbica proposta por Keys (1981) para

reconstrução de imagens. A diferença de apenas 1.00 dB entre bicúbica e Lanczos, embora numericamente pequena, é perceptualmente significativa, especialmente em regiões com transições de intensidade abrupta. A análise visual das imagens processadas por interpolação bicúbica revela resultados consistentemente suaves, com boa preservação de características globais da imagem, embora com ligeira perda de nitidez em comparação com Lanczos.

Os resultados obtidos com filtros de pós-processamento revelaram comportamentos divergentes que merecem análise cuidadosa. A máscara de nitidez, quando aplicada sobre interpolação bicúbica, alcançou 39.76 dB de PSNR e 0.998 de SSIM, mantendo qualidade classificada como excelente segundo os critérios estabelecidos. Este resultado, embora inferior aos métodos de interpolação pura, demonstra que técnicas de pós-processamento podem manter qualidade elevada quando adequadamente parametrizadas. O ligeiro decréscimo de 1.91 dB em PSNR em relação à linha de base pode ser atribuído ao processo de amplificação seletiva de frequências, que, embora melhore percepção visual de nitidez, introduz diferenças mensuráveis em relação à imagem de referência.

Em contraste marcante, o filtro de nitidez tradicional resultou em degradação substancial da qualidade, alcançando apenas 25.66 dB de PSNR e 0.960 de SSIM, representando um decréscimo de 16.01 dB em relação à linha de base. Este resultado inesperado merece análise detalhada, pois contrasta com expectativas baseadas na literatura tradicional de processamento de imagens. A degradação observada pode ser atribuída a vários fatores: o kernel de nitidez utilizado $[-1,-1,-1; -1,9,-1; -1,-1,-1]$ pode ser excessivamente agressivo para o conteúdo específico da imagem de teste, resultando em amplificação desproporcional de ruído e criação de artefatos de alta frequência que se desviam significativamente da imagem original de referência.

A comparação das métricas PSNR e SSIM revelou correlação geralmente forte, mas com divergências interessantes que ilustram as diferentes sensibilidades destas métricas. Todos os métodos de interpolação (Lanczos e bicúbica) alcançaram SSIM de 1.000, indicando preservação da estrutura conforme medida por esta métrica, enquanto as diferenças em PSNR refletem variações mais sutis na fidelidade pixel a pixel. Esta observação confirma os

achados de Wang *et al.* (2004) sobre a maior sensibilidade do SSIM a características estruturais em detrimento de diferenças absolutas de intensidade.

CONCLUSÕES

Este estudo proporcionou uma avaliação quantitativa abrangente de métodos tradicionais de super-resolução, revelando insights significativos sobre suas capacidades relativas e aplicabilidade em diferentes contextos. Os resultados experimentais demonstram que, entre os métodos clássicos avaliados, o algoritmo Lanczos representa a técnica de melhor desempenho, oferecendo qualidade de reconstrução superior tanto em termos de fidelidade métrica (49.00 dB PSNR) quanto de preservação estrutural (1.000 SSIM).

A superioridade do algoritmo Lanczos confirma as vantagens teóricas de sua formulação baseada em função sinc janelada, que oferece propriedades de preservação espectral superiores aos métodos polinomiais tradicionais. Esta técnica demonstra capacidade excepcional de preservar componentes de alta frequência, resultando em imagens com bordas mais nítidas e detalhes melhor definidos. O ganho de 7.33 dB em PSNR sobre a linha de base estabelece o Lanczos como a escolha preferencial para aplicações que demandam máxima qualidade de reconstrução.

Os resultados obtidos têm implicações práticas importantes para desenvolvedores e pesquisadores na área de processamento de imagens. Para aplicações que demandam máxima qualidade de reconstrução e possuem recursos computacionais adequados, o algoritmo Lanczos emerge como a escolha preferencial. Para sistemas com restrições de complexidade ou que requerem comportamento previsível em ampla variedade de conteúdos, a interpolação bicúbica oferece uma solução robusta e bem estabelecida.

REFERÊNCIAS

Duchon, C. E. (1979). Lanczos filtering in one and two dimensions. *Journal of Applied Meteorology*, 18(8), 1016-1022. DOI: 10.1175/1520-0450(1979)018<1016:LFIOAT>2.0.CO;2. Disponível em: https://journals.ametsoc.org/view/journals/apme/18/8/1520-0450_1979_018_1016_lfioat_2_0_co_2.xml. Acesso em: 08 set. 2024.



Gonzalez, R. C., & Woods, R. E. (2018). Digital image processing. 4th ed. Pearson. ISBN: 978-0133356724.

Greenspan, H. (2008). Super-resolution in medical imaging. *The Computer Journal*, 52(1), 43-63. DOI: 10.1093/comjnl/bxm075. Disponível em: <https://academic.oup.com/comjnl/article/52/1/43/477087>. Acesso em: 08 set. 2024.

Keys, R. (1981). Cubic convolution interpolation for digital image processing. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 29(6), 1153-1160. DOI: 10.1109/TASSP.1981.1163711. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1163711>. Acesso em: 08 set. 2024.

Lanczos, C. (1956). *Applied analysis*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.

Sheikh, H. R., Sabir, M. F., & Bovik, A. C. (2006). A statistical evaluation of recent full reference image quality assessment algorithms. *IEEE Transactions on Image Processing*, 15(11), 3440-3451. DOI: 10.1109/TIP.2006.881959. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1709988>. Acesso em: 08 set. 2024.

Wang, Z., Bovik, A. C., Sheikh, H. R., & Simoncelli, E. P. (2004). Image quality assessment: from error visibility to structural similarity. *IEEE Transactions on Image Processing*, 13(4), 600-612. DOI: 10.1109/TIP.2003.819861. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1284395>. Acesso em: 08 set. 2024.

Yang, J., Wright, J., Huang, T. S., & Ma, Y. (2010). Image super-resolution via sparse representation. *IEEE Transactions on Image Processing*, 19(11), 2861-2873. DOI: 10.1109/TIP.2010.2050625. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5466111>. Acesso em: 08 set. 2024.