

Inpainting Digital Via Replicação por Blocos e o Método SPH

Guilherme Valderramos Montroni¹

Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente-SP

Marilaine Colnago²

Universidade Estadual Paulista (UNESP), Campus de Rosana, Rosana-SP

Wallace Casaca³

Universidade Estadual Paulista (UNESP), Campus de Rosana, Rosana-SP

Resumo. Técnicas de *inpainting digital*, também conhecidas na literatura como métodos de retoque digital, tem como propósito recompor as partes faltantes de uma imagem ou, ainda, remover objetos indesejados da mesma. Nessa frente, um problema recorrente é o alto custo computacional dos métodos existentes, além do próprio aspecto visual dos resultados obtidos que, sob determinadas condições, produzem reconstruções de baixa qualidade gráfica. Visando explorar e adaptar o método já consagrado *Smoothed-Particle Hydrodynamics* (SPH) no contexto de *inpainting digital*, esta pesquisa focou no estudo e desenvolvimento de um novo método de restauração baseado na formulação clássica do SPH. Assim, a formulação SPH foi redesenhada para endereçar o problema de *inpainting digital* de modo a empregar o paradigma de reconstrução de imagens denominado replicação de blocos de pixels, isto é, *patch-based inpainting*, em que cada partícula SPH foi interpretada como um bloco (*patch*) de pixels na modelagem do problema. Os resultados obtidos demonstraram que a abordagem proposta foi capaz de reconstruir imagens com diferentes níveis de complexidade a um custo computacional inferior às estratégias de *inpainting* clássicas baseadas exclusivamente na difusão de um único pixel por vez.

Palavras-chave. *Inpainting*, *Smoothed Particle Hydrodynamics*, *Processamento Digital de Imagens*, *Remoção de Objetos*.

1 Introdução

Técnicas de *inpainting*, também conhecidas como estratégias de restauração de pinturas, obras de arte, ou ainda ilustrações visuais, têm sido aplicadas desde os tempos remotos, o que inclui a própria criação artística. No contexto de Processamento Digital de Imagens (PDI), o propósito da restauração é o de atuar em aplicações envolvendo partes danificadas [1], deterioradas [1, 2], ausentes [3], ou até mesmo para remoção de alvos [4] em uma imagem de modo que a mesma venha a se assemelhar à sua forma original, ou seja, o processo deverá preservar as características genuínas da imagem de modo a retratá-la da maneira mais fiel possível à percepção humana [3].

Bertalmio e colaboradores [1] apresentaram um dos primeiros modelos efetivos de *inpainting* digital, tarefa antes realizada manualmente. O modelo apresentado pelos autores foi bem aceito pela comunidade científica, já que a metodologia proposta assume como entrada apenas a imagem-alvo, isto é, uma função $I : \Omega \rightarrow \mathbb{R}$, $\Omega \subset \mathbb{R}^2$, e uma máscara guia, $D \subset \Omega$, que discrimina as informações da região deteriorada na imagem I . Após o processo de restauração, as características da imagem são então recompostas, gerando assim uma imagem reconstruída (ver Figura 1).

¹g.montroni@unesp.br

²marilaine.colnago@unesp.br

³wallace.casaca@unesp.br

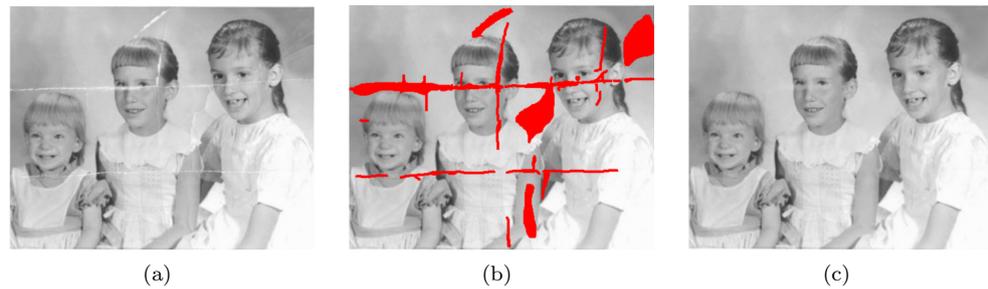


Figura 1: (a) Imagem-alvo. (b) Região deteriorada (em vermelho). (c) Imagem restaurada. Fonte: [1].

Com a tecnologia em constante evolução, há dispositivos cada vez mais modernos como câmeras digitais, celulares, entre outros. Contudo, por motivos técnicos ou de ambientação, as imagens capturadas por esses dispositivos podem conter, em muitos casos, falhas as quais damos o nome de *ruído*. O processo de remoção de ruídos (denominado também de *denoising*) é outra aplicação bastante conhecida na área de PDI e, de certa forma, também está relacionado à linha geral de restauração de imagens digitais.

No que diz respeito ao uso do método SPH na linha de restauração de imagens, as propostas tem focado na aplicação de *denoising*. Por exemplo, em [5], os autores descreveram o método SPIR (do inglês, *Smoothed Particle Image Reconstruction*) que, em resumo, utiliza o método SPH no tratamento das partículas – representadas pelos *pixels* da imagem – a fim de remover os ruídos da imagem. O método SPIR é eficiente na eliminação de ruídos nos casos em que há uma quantidade aceitável de *pixels* não deteriorados em uma vizinhança próxima a um pixel danificado. Por outro lado, em problemas de reconstrução envolvendo lacunas maiores, frequentemente explorados nas aplicações de *inpainting*, o método SPIR se torna ineficiente. De modo a adaptar a proposta anterior para a tarefa de *inpainting*, em [6], Mazzini implementou uma nova técnica de restauração inspirada no algoritmo SPIR, dando assim origem ao método denominado por G-SPIR (do inglês, *Gather Smoothed Particle Image Reconstruction*). Esse método faz uso de uma estratégia conhecida como *abordagem por agrupamento* para discretizar o modelo matemático do SPIR. Em síntese, o referido método emprega um suporte compacto, de raio h_j e centro p (pixel degradado) a fim de restaurar um pixel danificado. Assim, o tamanho de h_j se altera dependendo da necessidade de se obter k *pixels* não-deteriorados nas proximidades do pixel-alvo, a ser restaurado.

Limitações como o preenchimento de áreas extensas e texturizadas, tal como ocorre com as técnicas descritas acima, geraram a necessidade de se criar outras estratégias para endereçar esses pontos. Nessa frente, tem-se a chamada *restauração via blocos de pixels* como um paradigma já consagrado na literatura, que foi inicialmente estabelecido por Criminisi et al. [2]. Este paradigma tem produzido resultados bastantes promissores, pois além de ser eficiente no tratamento de grandes lacunas, também busca determinar uma *prioridade* entre a recomposição dos pixels deteriorados, ajudando assim na preservação de contornos e dos padrões da imagem.

Com base na discussão apresentada, o presente trabalho tem como objetivo propor uma nova metodologia de restauração de imagens digitais a partir da combinação da formulação SPH, para *inpainting*, e a estratégia de replicação da informação via blocos de pixels. A fim de alcançar o objetivo desejado, propõe-se redesenhar o método G-SPIR para a aplicação de *inpainting* envolvendo mais de uma partícula simultaneamente, ou seja, pretende-se restaurar regiões degradadas de uma imagem a partir de um conjunto de blocos de partículas, acelerando assim o processo de restauração. Além disso, propõe-se a utilização de um critério de ordenação ao longo do preenchimento dos pixels, o que possibilita melhorar a qualidade final da reconstrução.

2 Etapas Metodológicas

2.1 Método SPH com Replicação via Blocos de Pixels e Prioridade de Preenchimento

O método SPH adaptado para operar com blocos de pixels [7] é uma tentativa de aperfeiçoar o método G-SPIR original, onde as boas características da técnica continuam sendo válidas, porém, com a vantagem de que novas funcionalidades e características são incorporadas em um novo algoritmo, incluindo uma melhor performance computacional, bem como ainda a possibilidade de se trabalhar com regiões texturizadas na imagem.

Desta forma, a busca por pixels no processo de restauração da imagem é feito a partir de duas vias: o domínio da intensidade da imagem, e o domínio geométrico do problema. A inspeção é definida em termos de um volume compacto (V), centrado em um conjunto de pixels que se deseja restaurar. Assim, as duas regiões de buscas são, na verdade, centralizadas no bloco a ser restaurado. Com isso, a cada iteração, a busca acompanha a localização do bloco de referência.

A partir das designações das regiões de busca, são computadas a média relativa a dois blocos de pixels, definidos pela semelhança de intensidade das cores e pela proximidade com a região de retoque. Na sequência, uma ponderação é empregada, a qual prioriza a importância desses dois blocos no processo de preenchimento das informações faltantes. Mais detalhes a respeito desses procedimentos serão apresentados na próxima seção.

2.2 Detalhes do Método Proposto

Seja o conjunto dos pixels $p \in \Omega$ que, posteriormente, serão alocados como centros nos blocos alvo durante o processo de restauração da imagem. Inspirado nos trabalhos [2, 3, 8], a ordem de preenchimento de um dado pixel p pode ser computada a partir da seguinte medida de prioridade:

$$P(p) = R(p)D(p), \quad R(p) = (1 - \omega)C(p) + \omega, \quad D(p) = \frac{|\nabla f_p^\perp \cdot \vec{\eta}_p|}{\alpha}, \quad (1)$$

sendo $R(p) \in [\omega, 1]$ o termo de confiabilidade, com $\omega \in [0, 1]$, que tem como propósito suavizar o processo iterativo de reconstrução, e $D(p) < 1$ determina a direção de propagação dos pixels de acordo com a orientação e intensidade de cores dos isótopos (pixels de mesma tonalidade de cinza) na vizinhança do pixel p . A partir da Equação (1), um pixel p é então selecionado dentre um conjunto ordinário de todos os pixels a serem reconstruídos na máscara Ω priorizando as partículas mais próximas do contorno ($\partial\Omega$).

Uma vez determinado p , obtém-se um bloco de dimensão $m \times m$, de centro p , denotado aqui por $H_m(p)$ e, assim, é calculado os k “blocos ótimos” de partículas vizinhas mais próximas, denotados aqui por $H_m(q)$. Esses blocos dão origem a uma vizinhança, de centro p e raio h , denotado aqui por volume compacto (V). No esquema da Figura 2, identificado o bloco a ser reconstruído a partir do pixel de maior prioridade, p , inicia-se a busca pelo $k = 1$ blocos ótimos, ou seja, um bloco referente à região proximal e outro relativo à intensidade dos pixels, sendo $q_1 \in V$ e $q_2 \in \Phi$ os pixels que originam os blocos $H_m(q_1)$ e $H_m(q_2)$, respectivamente.

O processo iterativo do método se desenvolve através dos k blocos ótimos H_{q_i} . Além disso, a fim de preservar as características positivas da proposta do G-SPIR [6], empregamos como núcleo do volume compacto (núcleo de proximidade) a seguinte função gaussiana:

$$W(R_j, h_i) = \frac{1}{\pi h_i^2} e^{-R_j^2}, \quad (2)$$

com $R_j = \|p_i - q_j\|$ tal que p_i e q_j são definidos como sendo os pixels centrais do bloco a ser restaurado e os blocos vizinhos que serão utilizados neste processo, respectivamente, e $h_i = \max\{ad_{ij} :$

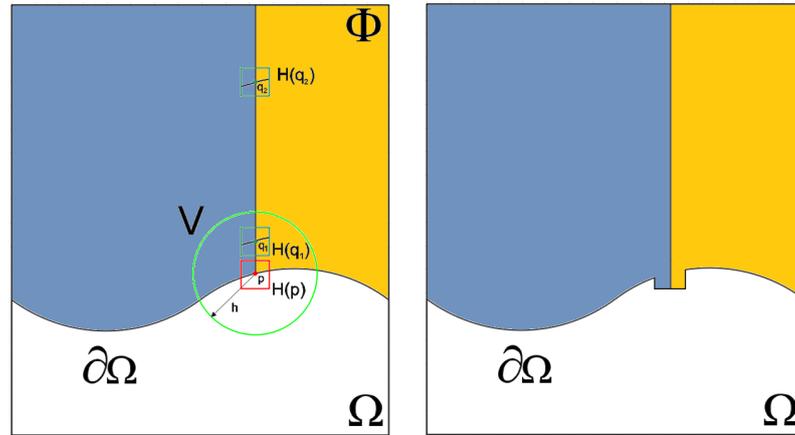


Figura 2: Esquematisaçaõ da abordagem de *inpainting* proposta via replicaçaõ de blocos.

$j \in V\}$, sendo d_{ij} a distância euclidiana entre p_i e q_j , e α um parâmetro para que todos os blocos candidatos H_q pertençam ao núcleo de proximidade V .

A média computada sobre os melhores blocos relacionados à distância é denominada por *bloco longitudinal* (H_L), e é dada por:

$$H_L = \sum_{j \in V_k} H_{kj} W_{kj} V_j, \quad (3)$$

em que $H_{kj} = H(q_j)$ representa os k blocos ótimos vizinhos com $j = 1, 2, \dots, k$, W_{kj} o núcleo por proximidade e $V_j = 1/k$ é o elemento de área da partícula q_j que considera o mesmo peso para cada um dos blocos. Já no caso da região de amostragem que está relacionada à similaridade de cores, esta visa ponderar o efeito das intensidades dos pixels, lembrando que para essa busca, é determinada uma área (Φ) menos restritiva. Em razão disso, a métrica das partículas p_k mencionada em questão é dada por:

$$H_{\hat{q}} = \arg \min_{H_q \in \Phi} d(H_p, H_q), \quad d(H_p, H_q) = \sum_{i \in \Phi} (H_{q_i} - H_{p_i})^2. \quad (4)$$

Assim, o bloco resultante relacionado à intensidade, denominado aqui de *bloco de Intensidade* (H_I), é computado a partir da seguinte expressão:

$$H_I = \sum_{j \in \Phi_k} H_{kj} V_j. \quad (5)$$

Após determinados os blocos mais adequados referente à distância (H_L) e à intensidade (H_I) dos pixels, respectivamente, a restauração é então realizada através da seguinte equação discreta:

$$I_R(H_p) = \sigma H_L + (1 - \sigma) H_I, \quad \text{com } \sigma \in (0, 1). \quad (6)$$

O método descrito é aplicado de forma iterativa, em que não é necessário calcular o conjunto de todos os volumes compactos (N_k). Desta forma, é possível utilizar os blocos restaurados no processo de retoque digital, o que influencia positivamente nos resultados.

3 Resultados e Discussão

Nesta seção são apresentadas duas aplicações do método proposto, além de comparações envolvendo os algoritmos de Criminisi e G-SPIR. A análise dos resultados foi realizada de forma qualitativa e, no caso onde havia a imagem original à disposição, de forma quantitativa.

3.1 Restauração de Imagens Degradadas

O objetivo deste experimento é avaliar os métodos quanto à tarefa de recuperação de fotografias danificadas. Para tal, foi usada uma imagem do rosto de John Lennon⁴.

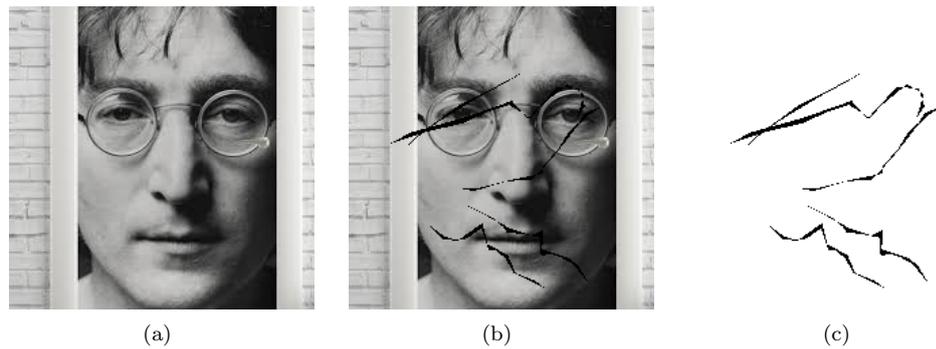


Figura 3: (a) Imagem original, (b) Imagem degradada, e (c) Máscara de retoque.

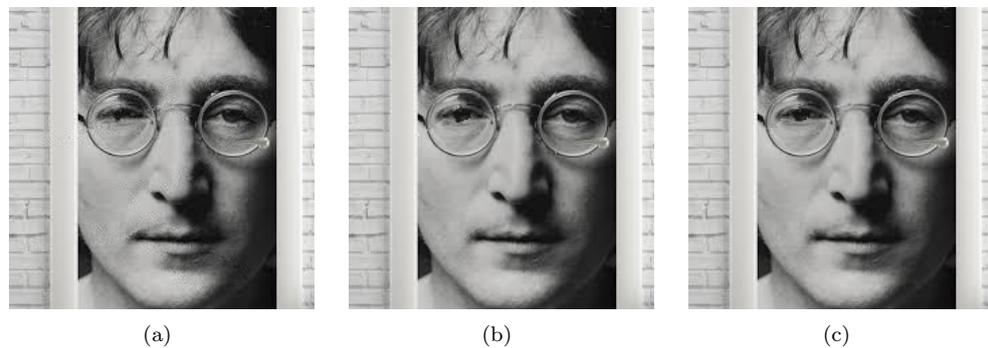


Figura 4: Resultados obtidos. (a) Método Criminisi, (b) Método G-SPIR e (c) Método SPH via blocos.

Como pode ser visto na Figura 4, embora todas as saídas geradas mostraram-se satisfatórias, o método SPH por blocos apresentou resultados mais acurados quando comparados aos métodos Criminisi e *G-SPIR*, visto que o mesmo corrigiu os danos, inclusive em zonas de fronteiras. A Figura 5 evidencia os detalhes de restauração obtidos pelos métodos de maior acurácia visual, G-SPIR e SPH via blocos, em que foi comparado os resultados com o recorte da imagem original. Ao comparar os resultados de maneira qualitativa, é possível observar que os detalhes da região do óculos foram reconstruídos de maneira satisfatória, em especial a restauração produzida pelo método proposto, que preservou o olho direito na fotografia de modo a minimizar o aspecto visual artificial da reconstrução da imagem.

⁴Imagem disponível em: <http://twixar.me/kn0T>. Acesso em: 22 nov.2019.

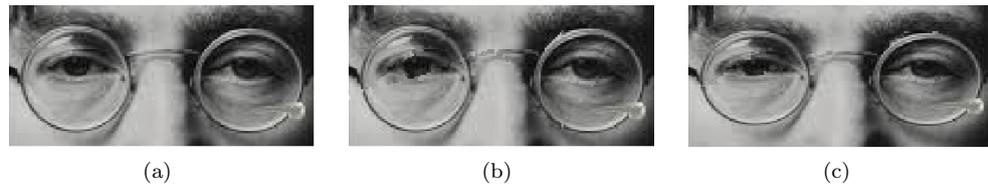


Figura 5: Região dos olhos: (a) Imagem original, (b) Método G-SPIR e (c) Método SPH por blocos.

A Tabela 1 lista a aplicação das métricas de avaliação *Peak Signal-to-Noise Ratio* (PSNR) e *Structural Similarity* (SSIM) nos resultados da Figura 3, em que é possível constatar que, para ambas as métricas, o modelo proposto produziu os *scores* mais altos.

Métodos	PSNR (\uparrow)	SSIM (\uparrow)
Criminisi	34.7002	0.9636
G-SPIR	38.0677	0.9943
SPH via blocos	39.7223	0.9953

Tabela 1: Resultados quantitativos. A seta indica a relação “quanto maior, mais acurado”.

3.2 Remoção de Objetos em Imagens

Para este experimento, a proposta foi verificar como o método SPH via replicação por blocos se comportaria na tarefa de remoção de objetos em imagens digitais – em comparação com os demais métodos – e avaliar se os modelos são capazes de preservar o aspecto visual natural da imagem.

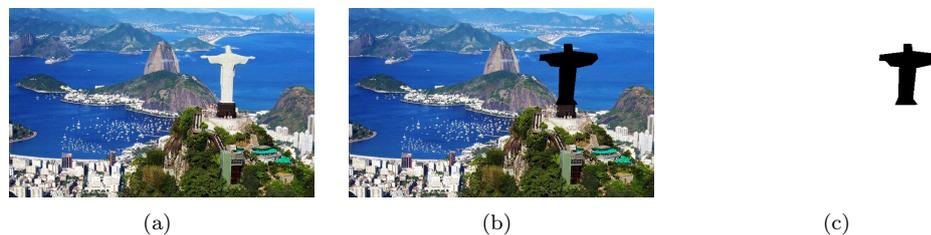


Figura 6: (a) Imagem original, (b) Objeto a ser removido e (c) Domínio de remoção.



Figura 7: Remoção de objetos: (a) Modelo Criminisi, (b) G-SPIR e (c) SPH via replicação por blocos.

Conforme ilustrado na Figura 7, o modelo Criminisi falhou no processo de retoque, onde a região central degradada foi preenchida incorretamente devido à replicação de artefatos na região

marítima. Já o método G-SPIR produziu um resultado acurado, porém acabou prolongando a borda (Palanque do Cristo Redentor⁵). Finalmente, o método SPH via blocos conservou a textura e os detalhes intrínsecos da imagem de maneira adequada, incluindo regiões de fronteiras da imagem.

4 Conclusões

Este trabalho apresentou o método de *inpainting* SPH munido de um mecanismo de replicação de blocos de pixels e de um critério de prioridade no preenchimento da informação. O modelo foi capaz de produzir restaurações de alta acurácia visual, mesmo quando aplicado em imagens com diferentes alvos a serem recuperados. Conforme evidenciado pelos resultados experimentais, o método foi efetivo tanto no tratamento de regiões homogêneas como de áreas texturizadas nas imagens, sendo estas características não simultaneamente presentes nas demais técnicas como o modelo de Criminisi et al. e o algoritmo G-SPIR.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade Virtual de São Paulo e à FAPESP pelo suporte à pesquisa.

Referências

- [1] Bertalmio, M., Sapiro, G., Caselles, V. and Ballester, C. Image Inpainting *Proceedings of the 27th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., 417-424. New York, NY, USA, 2000.
- [2] Criminisi, A., Perez, P., Toyama, K. Region filling and object removal by exemplar-based image inpainting, *IEEE Transactions on Image Processing*. 13(9):1200-1212, 2004.
- [3] Casaca, W., Boaventura, M., Almeida, M.P., Nonato, L.G. Combining anisotropic diffusion, transport equation and texture synthesis for inpainting textured images, *Pattern Recognition Letters*, Elsevier, 36:882–889, 2014.
- [4] Casaca, W., Motta, D., Taubin, G., Nonato, L.G. A user-friendly interactive image inpainting framework using Laplacian coordinates, *IEEE International Conference on Image Processing*, pp. 862–866, IEEE Press, 2015.
- [5] Di Blasi, G., Francomano, E., Tortorici, E. and Toscano, E. A Smoothed Particle Image Reconstruction Method, *Calcolo*. Springer-Verlag New York, Inc, 48:61–74, 2011.
- [6] Mazzini, F. A. Retoque digital com o método SPH. Master's thesis, Dissertação de Mestrado, Instituto Nacional de Matemática Pura e Aplicada, 2017.
- [7] Montroni, G. V. Inpainting digital via replicação por blocos e o método SPH. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual Paulista, 2020.
- [8] Wang, J., Lu, K., Pan, D., He, N., Bao, B. Robust object removal with an exemplar-based image inpainting approach, *Neurocomputing*. 123:150-155, 2014. Contains Special issue articles: Advances in Pattern Recognition Applications and Methods.

⁵Imagem disponível em: <https://turismo.ig.com.br/destinos-internacionais/2018-05-28/monumentos-historicos-mundo-brasil.html>. Acesso em: 22 de out. 2019.