

PixelWare: Um Sistema de Processamento Digital de Imagens

CLODOVEU AUGUSTO DAVIS JR.
ARNALDO DE ALBUQUERQUE ARAÚJO

Departamento de Ciência da Computação
Universidade Federal de Minas Gerais
Caixa Postal 702
30161-970, Belo Horizonte, MG, Brasil
arnaldo@dcc.ufmg.br

Abstract. PixelWare, a digital image processing system, developed to work on PC-compatible microcomputers, is presented in this work. The system is compatible with SuperVGA video boards and monitors, which are affordable yet powerful enough to adequately support image processing work. PixelWare is a modular, expandable and user-friendly system, built upon a graphical user interface, with the intention to serve as a framework for further image processing development.

Motivação

O processamento digital de imagens é uma disciplina relativamente nova, em acelerada expansão, um campo fascinante para pesquisas. Considerando isto, o objetivo deste trabalho é fundamentar o desenvolvimento de pesquisas na área, com a conceituação, estudo e desenvolvimento de um sistema de processamento digital de imagens modular, expansível, amigável para com o usuário. Um sistema que possa servir de denominador comum, de fundação para trabalhos em diversas áreas, através da disponibilização de rotinas essenciais ao trabalho com imagens digitais.

Este sistema, denominado *PixelWare* [Davis-Araújo 90] [Davis 92] [Davis-Araújo 92], foi desenvolvido com base em uma interface gráfica com o usuário, concebida com a intenção de tornar o seu uso o mais intuitivo possível, de modo a minimizar a necessidade de treinamento. Este tipo de interface foi um dos pressupostos fundamentais do trabalho, considerando a tendência mundial em favor de interfaces gráficas e a necessidade de se ter um sistema utilizável também didaticamente.

Quanto às funções de processamento digital de imagens, o sistema inclui rotinas suficientes para cobrir as necessidades básicas de tratamento, além de prever a possibilidade de futuras expansões. Inicialmente, são apresentadas técnicas de estatística aplicáveis a imagens digitais. Em seguida, analisa-se as possibilidades de utilização de pseudocoloração para ampliar as possibilidades de análise visual de imagens. Rotinas de manipulação da escala de cinza são apresentadas a seguir, explorando algumas das técnicas disponíveis para melhorar o contraste de imagens. São também estudados neste trabalho os principais filtros

espaciais passa-baixas disponíveis, utilizados para suavização, além de funções básicas de aritmética de imagens. Por fim, as formas de transformação geométrica mais usuais são descritas, abrangendo translação, rotação e mudança de escala.

O sistema, por ter sido desenvolvido para funcionar em microcomputadores, equipamentos amplamente difundidos e de baixo custo, constitui uma excelente alternativa para uso educacional e profissional. Por não exigir periféricos especiais, à exceção de um monitor e uma placa gráfica com resolução e número de cores suficiente, é um sistema utilizável prontamente em um grande número de instalações. A comunicação do sistema com o restante do mundo está garantida, pois foram desenvolvidos programas utilitários que permitem o intercâmbio de imagens entre o sistema PixelWare e quaisquer outros que utilizem o formato PCX, que hoje é um dos mais amplamente difundidos.

Interface com o usuário

A maior parte dos aplicativos disponíveis atualmente, em diversas áreas da computação, comunica-se com os usuários através de diálogos orientados por comandos, ou por sistemas de estrutura hierárquica rígida, através de menus. No entanto, é vantajoso para o usuário, em diversos tipos de aplicações, que sua comunicação com o computador se faça através da manipulação direta de objetos na tela.

A manipulação direta faz com que diminua o esforço mental dispendido pelo usuário na memorização da sintaxe de comandos e da estrutura de menus. Um dos grandes fatores de sucesso da interface gráfica do Macintosh, e que por sua vez baseou-se nas experiências da Xerox com o *Smalltalk* [Goldberg-

Robson 86] [Smalltalk 86], é o fato de não ser necessário que o usuário atravesse uma rígida seqüência de comandos e menus para realizar uma operação. É muito mais natural, para o usuário, dominar um programa quando é possível manipular diretamente os objetos presentes na tela, em vez de ser obrigado a percorrer uma estrutura hierárquica fixa, sob a forma de menus ou comandos, para realizar uma operação.

Mas, apenas a manipulação direta não garante a eficiência do diálogo. Uma boa interface com o usuário deve também ser, dentro do possível, não-modal. "Modo", neste ponto de vista, é um estado transitório da interface, que independe de qualquer objeto em particular, e que serve apenas para dar uma interpretação temporariamente diferenciada a alguma ação do operador. A presença de modos no diálogo confunde a ação do usuário, forçando interpretações diferentes para operações semelhantes.

Do ponto de vista do usuário, uma boa interface [Cabral et al. 90] [SUN 89/1]:

- não lhe deve forçar a lembrar seqüências de comandos;
- não deve permitir que ações desastrosas ocorram acidentalmente;
- não lhe deve exigir que compreenda todo o sistema para que consiga realizar uma tarefa simples;
- deve ser consistente, ou seja, garantir que todos os tipos de ações semelhantes sejam executadas de forma idêntica ao longo de toda a aplicação, e sejam baseadas no mesmo conjunto de conceitos.

A existência de todos estes tipos de controles garante aos sistemas de interface gráfica com o usuário um lugar de destaque no presente estágio de evolução da computação. Sistemas como o Microsoft *Windows* [Hayes 89] [Stone 91], o *OS/2 Presentation Manager*, o *Open Look* [SUN 89/2] e o *X-Windows* são importantes pelo fato de oferecerem a usuários e programadores um conjunto de conceitos consistentes, o que facilita a vida de quem programa e simplifica o diálogo com o usuário, que passa a dominar a utilização do produto de forma mais rápida.

Do ponto de vista de programação, deve-se ter em mente que, muitas vezes, a definição da interface com o usuário define, implicitamente, grande parte dos requisitos funcionais do sistema. No entanto, é necessário ter um certo cuidado para que haja uma clara separação entre as funções do sistema e as rotinas responsáveis apenas pelo diálogo com o usuário.

Por outro lado, considerando que é possível determinar o tipo de interações necessárias para efetivar o diálogo, torna-se possível desenvolver a interface com o usuário de forma independente da aplicação final, construindo a ligação entre interface e aplicação apenas no momento adequado. Assim, a criação prévia dos diálogos requeridos entre a aplicação e o usuário constitui uma boa maneira de se construir um protótipo. Este protótipo poderá evoluir posteriormente, de forma gradual e controlada, até se transformar na aplicação completa.

Para este trabalho, foram criados diversos tipos de ferramentas gráficas de diálogo com o usuário, e também procedimentos de controle de eventos gerados por mouse ou teclado. Tipicamente, uma aplicação construída utilizando as ferramentas propostas seria controlada por um *loop* principal, que aguarda o acontecimento de eventos de mouse ou de teclado. A resposta obtida é tratada, selecionando-se, conforme a região da tela para a qual o cursor do mouse aponta ou conforme a tecla pressionada, qual será a função a realizar. Cada uma destas funções pode disparar um novo *loop* de eventos, que organiza a ativação de tarefas mais específicas, e assim por diante.

Os diálogos criados com as ferramentas propostas atendem aos requisitos de consistência citados anteriormente, pois se baseiam em um número relativamente pequeno de tipos de elementos, e cada tipo de elemento tem sua função definida, univocamente, ao longo de toda a aplicação.

Estatísticas da imagem

Enquanto conjunto de amostras, uma imagem digital pode ser analisada com técnicas estatísticas, permitindo um maior entendimento do objeto ou cena representada e quantificando parâmetros importantes para os processos de tratamento. São parâmetros que são úteis na escolha, por exemplo, de um filtro espacial para a suavização do ruído presente na imagem, ou para determinar o melhor processo para melhorar o contraste da imagem.

Uma das ferramentas mais utilizadas para análise estatística de imagens é o histograma de distribuição de níveis de cinza. Um histograma é representado, usualmente, por um conjunto de barras verticais, existindo uma barra para cada nível de cinza presente na imagem. A altura de cada barra é proporcional ao número de pixels que apresentam o mesmo nível de cinza.

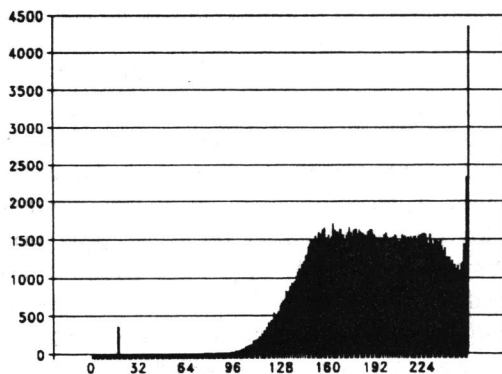


fig. 1 - histograma

São fornecidas, junto com o histograma, as seguintes informações:

- média dos valores dos pixels na região indicada;
- desvio padrão dos mesmos valores;
- extremos do histograma (níveis de cinza máximo e mínimo presentes na imagem);
- nível de cinza de maior concentração na imagem (ponto de máximo do histograma);
- número de pixels considerados.

Em muitas situações, é interessante observar a variação dos níveis de cinza de uma imagem ao longo de uma linha ou coluna da matriz de pontos. Para isto, o sistema incorpora uma função que representa graficamente esta variação, possibilitando ao usuário o discernimento de regiões de fronteira, a avaliação da redução do ruído, a estimação da faixa de níveis de cinza que representa um determinado objeto representado na imagem, dentre outras coisas (fig. 2).

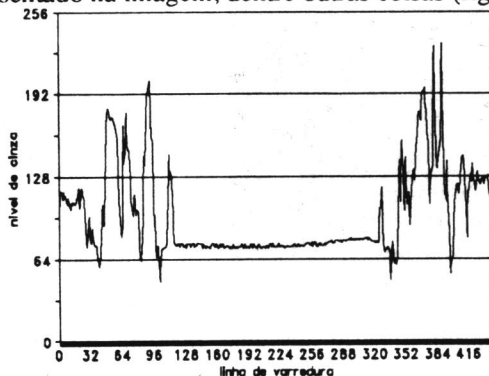


fig. 2 - perfil de linha

É útil, também, a inspeção direta dos valores dos níveis de cinza de uma determinada região da imagem. O sistema permite que esta inspeção seja feita em uma janela de 9 x 9 pixels, indicada sobre a imagem com o auxílio do mouse. O resultado é uma pequena tabela, contendo o valor numérico dos pixels contidos na região indicada.

Geralmente, quando se processa uma imagem digital, o objetivo é melhorar as condições para análise visual da cena. A qualidade da imagem, assim considerada, torna-se um parâmetro subjetivo. No entanto, muitas vezes é necessário comparar, quantitativamente, a qualidade de uma imagem em relação a outra. Por exemplo, quando se busca determinar qual dentre dois filtros espaciais apresenta melhor desempenho na remoção do ruído. Nestes casos aplica-se o cálculo do erro médio quadrático.

O sistema pode fornecer o erro médio quadrático entre duas imagens, calculado da seguinte forma:

$$EMQ = \frac{1}{n} \sum (a_{ij} - b_{ij})^2$$

onde n é o número total de pixels (em uma das imagens), a_{ij} e b_{ij} representam os pixels de mesma coordenada em cada uma das imagens.

O resultado deste cálculo é o erro médio quadrático entre as duas imagens, que é um número real, constituindo-se em um parâmetro de comparação: quanto maior, mais descorrelacionadas as imagens serão, e vice-versa. Observe-se que não há como determinar se o valor do erro médio quadrático foi obtido pela soma de muitos erros de pequeno valor ou se pela soma de poucos erros grandes. Quando existir este tipo de dúvida, é interessante determinar, para fins de comparação, a média e o desvio padrão dos valores dos pixels contidos em uma área aparentemente homogênea da imagem.

Uma utilização típica deste método de comparação é feita quando se avalia a eficiência de filtros espaciais. Parte-se de uma imagem artificial, com parâmetros bem conhecidos, adiciona-se ruído aleatório a esta imagem, aplicando-se os filtros à imagem ruidosa. O filtro mais eficiente será, no caso, aquele que conseguir, após o processamento, produzir uma imagem que, quando comparada à imagem original, apresente o menor erro médio quadrático.

No entanto, cada um dos filtros espaciais disponíveis tende a ser mais eficiente em um determinado conjunto de situações. A rotina de determinação do erro médio quadrático também pode ser usada para fornecer uma medida de eficiência para a suavização. Neste caso, o erro médio quadrático, calculado para uma mesma imagem antes e depois de sofrer suavização, indicará o nível de supressão de ruído obtido.

A análise dos parâmetros estatísticos, aqui citados, é de fundamental importância para a determinação de esquemas de pseudocoloração, bem como na escolha de parâmetros para a manipulação da escala de cinza e para a seleção e parametrização correta de filtros espaciais.

Pseudocoloração

Em uma imagem formada por tons de cinza, o observador médio é capaz de distinguir [Gonzales-Wintz 87] entre doze e vinte e quatro diferentes intensidades. No entanto, o sistema visual humano é capaz de diferenciar milhares de cores, comparando suas tonalidades e intensidades. O processo conhecido como *pseudocoloração* consiste em transformar tons de cinza em cores, de modo a realçar detalhes que seriam difíceis de serem percebidos na imagem monocromática. Com isto, pretende-se obter um maior volume de informação visual, além de melhorar as condições para análise da imagem.

As placas VGA e SuperVGA são capazes de apresentar até 256 cores simultâneas na tela, escolhidas dentre um conjunto de 262.144 cores. Para isto, possuem um dispositivo de *look-up table* (tabela de mapeamento), responsável pela tradução de cada um dos 256 possíveis valores de cada pixel para um nível de vermelho, um nível de azul e um nível de verde. Assim, a *look-up table* das placas VGA/SuperVGA tem 256 entradas, ou linhas, cada uma das quais associada a um trio de valores RGB. Cada primária pode assumir valores entre 0 e 63, e cada um destes 768 valores pode ser programado individualmente. Tons de cinza são obtidos quando valores iguais são programados para as três primárias.

O sistema PixelWare dá ao usuário a possibilidade

tornando-os de cor distintamente diferente daqueles que os cercam. A barra de cores, colocada no canto superior direito da tela, indicará imediatamente qualquer mudança realizada.

Para simplificar o trabalho de programação de grupos de cores dentro da *look-up table*, o sistema possibilita a montagem de gradientes cromáticos, formados pela interpolação linear de cada primária entre os componentes de duas cores dadas. O usuário deve indicar, diretamente ou com o auxílio das barras de *scroll*, quais são estas duas cores. Tipicamente, estas cores já estarão previamente escolhidas e programadas individualmente, conforme descrito anteriormente.

O sistema permite, também, a programação da contribuição de cada primária para a formação da *look-up table* de acordo com curvas de variação, definidas graficamente, de forma interativa, pelo usuário.

Alguns esquemas clássicos de pseudocoloração [Fonseca-Tozzi 90] [Niblack 86] estão disponíveis para uso imediato no sistema. Entre estes, destacam-se:

- Default VGA
- Módulo do Seno
- Modulação da Intensidade
- Escala Térmica
- Somatório para Escala de Cinza
- 256 Níveis de Cinza

O uso adequado de esquemas de pseudocoloração é interessante para se tentar obter, visualmente, mais

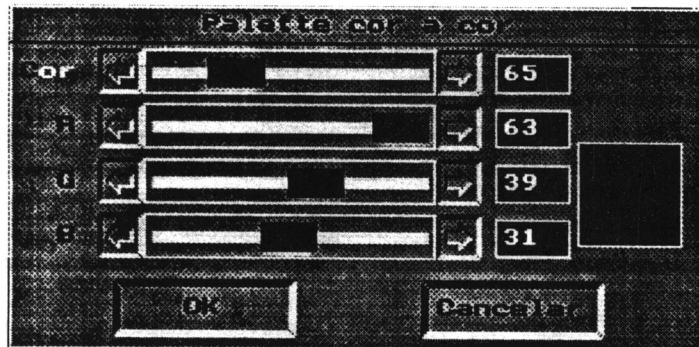


fig. 3 - Programação da *look-up table* cor a cor

de programar diretamente as intensidades de vermelho, verde ou azul que determinam a formação de cada uma das 256 cores disponíveis através da *look-up table*. Esta definição individual é feita através de uma caixa de diálogo, em que 4 barras de *scroll* são apresentadas, sendo uma para a cor a programar, e uma para a contribuição de cada primária (fig. 3). Adicionalmente, é apresentada uma amostra da cor obtida pela combinação definida no momento.

Com este recurso, é possível, por exemplo, destacar todos os pixels de um determinado valor,

informação a partir de uma imagem do que seria possível com o uso de uma escala de cinza. Com o uso de pseudocoloração, pequenos detalhes tornam-se visíveis com mais clareza e características do ruído presente na imagem podem ser percebidas com mais facilidade. É possível, também, realizar uma forma primitiva de classificação de imagens apenas com a estratificação dos níveis de cinza, e a associação de cada estrato a uma cor, segundo uma escala cromática adequada.

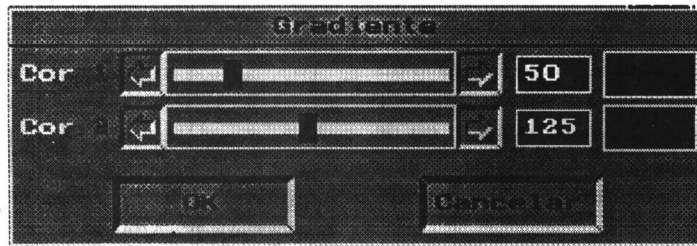


fig. 4 - Gradiente entre duas cores

O mais interessante aspecto do uso de pseudocoloração através de *look-up tables* é que não é necessário alterar de nenhuma forma a imagem em si: apenas a *look-up table* da placa SuperVGA necessita ser alterada, numa operação muito rápida. O usuário pode, assim, visualizar rapidamente diversos esquemas de pseudocoloração, experimentando combinações de cores até obter um esquema ideal para o tipo de imagem que deseja trabalhar. O esquema obtido, ou seja, o conteúdo da *look-up table*, pode, então, ser armazenado em separado, para reaproveitamento em outras imagens.

A análise da imagem com o auxílio do histograma e de esquemas de pseudocoloração pode ser útil na

escolha de procedimentos de manipulação da escala de cinza. Estes procedimentos serão descritos a seguir.

Manipulação da escala de cinza

Realçar uma imagem significa melhorar a sua qualidade, procurando dar ao usuário uma melhor condição visual para avaliar o seu conteúdo. Tipicamente, o que se busca é destacar regiões, melhorando a condição de interpretação de características que não estejam claramente definidas na imagem original. Isto é feito por meio de técnicas que alteram o nível de cinza de cada pixel de maneira conveniente.

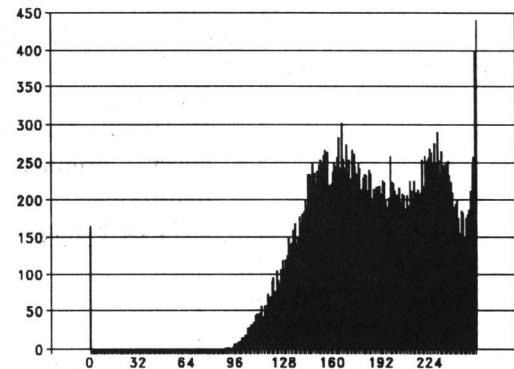
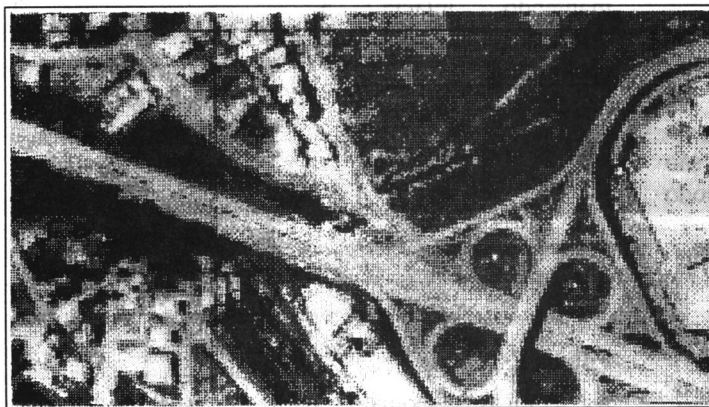


fig. 5 - imagem e histograma originais

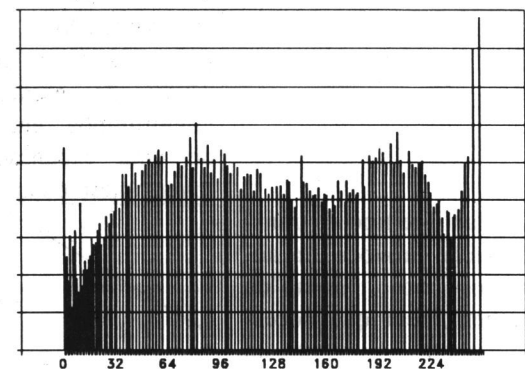
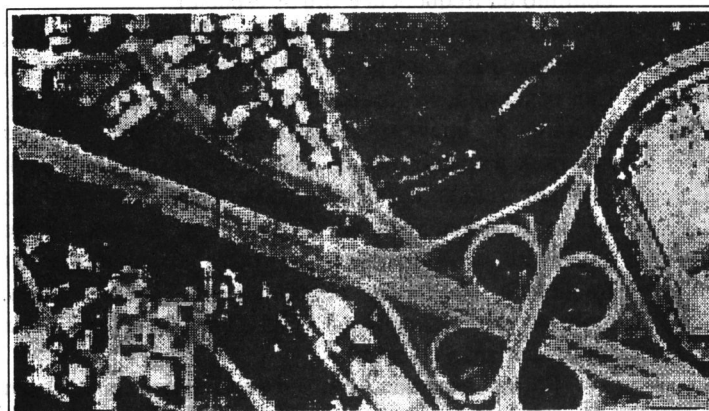


fig. 6 - imagem transformada e histograma equalizado

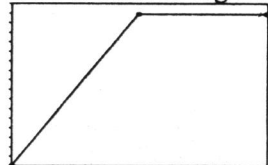
A equalização do histograma é uma destas técnicas. Aqui, busca-se obter uma distribuição mais uniforme dos pixels ao longo da escala de cinza, de modo a melhorar o contraste global da imagem ou de parte dela [Gonzales-Wintz 87]. Como esta é uma técnica bastante conhecida, não entraremos em maiores detalhes neste artigo.

Como exemplo, observe-se na fig. 6 a sensível melhoria no aproveitamento da escala de cinza, com a aplicação do algoritmo descrito sobre a imagem da fig. 5.

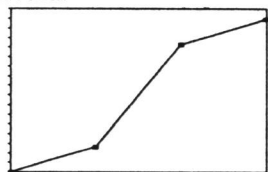
Além da equalização do histograma, em que a função de transformação é determinada através de um processo estatístico, existem também as transformações da escala de cinza com base em parâmetros fornecidos pelo usuário. Os parâmetros necessários são escolhidos com base na análise da necessidade de cada imagem, possivelmente com ajuda da análise do histograma.

O sistema PixelWare especifica uma série de transformações previamente programadas, mas o usuário pode alterá-las ou criar outras na medida da necessidade. Este tipo de transformação também foi implementado para a programação da *look-up table*, conforme descrito na seção anterior.

As transformações previamente definidas em PixelWare são as seguintes:

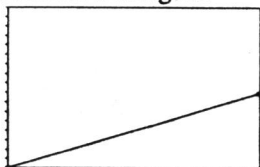


Compressão de contraste: Ao contrário da transformação anterior, a imagem é tornada mais escura.

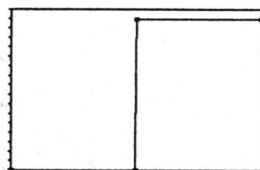
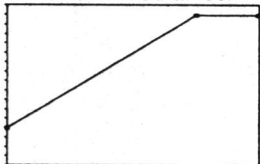


Escala: Este tipo de transformação provoca um aumento no "brilho" da imagem, sem que necessariamente o contraste seja alterado.

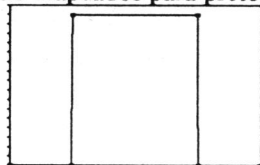
Expansão de Contraste: Os níveis de cinza originais são transformados de modo a clarear a imagem.



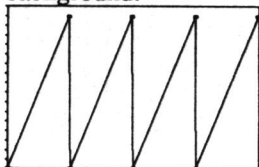
Expansão e compressão simultâneas: Nesta transformação os primeiros e os últimos níveis da escala são comprimidos, em favor de uma expansão nos níveis intermediários.



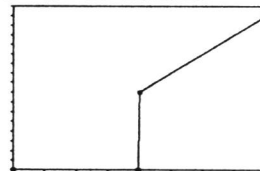
Limiar com background: Alternativa ao esquema anterior, nesta transformação apenas os níveis inferiores são mapeados para preto.



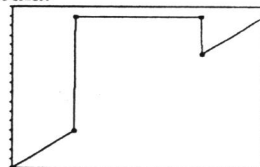
Fatiamento com background: Esta transformação, a exemplo da anterior, destaca uma faixa de níveis de cinza, mantendo intacta a informação de background.



Limiar: Todos os pixels abaixo de um determinado valor são mapeados para preto, e os restantes tornam-se brancos.



Fatiamento: Uma espécie de "limiar duplo", esta transformação destaca uma faixa de níveis de cinza no interior da escala.



Dentes-de-serra: Semelhante à anterior, porém fazendo uma transformação de escala em cada "dente", para que ocupe toda a escala de cinza.

Filtros Espaciais

As técnicas disponíveis para filtragem de imagens subdividem-se em dois grupos principais: filtros no domínio da frequência e filtros espaciais.

Os filtros no domínio da frequência, tipicamente, calculam uma transformada bidimensional da imagem (por exemplo, a transformada rápida de Fourier), alteram a imagem transformada, e em seguida invertem a transformação. São técnicas que permitem eliminar ruídos de determinada frequência que são adicionados à imagem em alguma etapa do processo de aquisição ou transmissão. Filtros no domínio da frequência não serão abordados por este trabalho, embora o sistema PixelWare preveja sua implementação no futuro.

Filtros espaciais são procedimentos que visam obter um realce da imagem, através da modificação direta do valor dos pixels, por meio de operações que

levam em consideração a vizinhança ao redor de cada pixel. Podem ser realizadas operações lineares, como convoluções, ou não lineares, como a mediana.

Os filtros espaciais dividem-se em dois grupos: filtros passa-altas e filtros passa-baixas. Os filtros passa-altas são geralmente empregados como detectores ou aguçadores de bordas, uma vez que são definidos de modo a realçar exatamente aquelas regiões em que ocorrem mudanças bruscas nos valores dos pixels. Este tipo de filtro não será analisado nem implementado neste trabalho, por estar sendo o motivo de um trabalho paralelo sobre segmentação de imagens.

Já os filtros passa-baixas atuam como supressores de ruído, suavizando a imagem original através da alteração de valores que sejam muito diferentes daqueles que os cercam. Devido a esta característica preponderante, os filtros passa-baixas apresentam uma tendência a nublar as fronteiras entre regiões distintas da imagem, prejudicando a definição dos contornos dos objetos presentes na cena. Os melhores processos de suavização passa-baixas são exatamente aqueles que conseguem uma redução significativa do nível de ruído além de preservarem as bordas [Gonzales-Wintz 87].

No entanto, como a importância da preservação de bordas é relativa à cada aplicação, uma ampla gama de filtros espaciais foi incluída neste trabalho, e implementada no sistema PixelWare.

Conforme foi dito, a maioria dos processos de filtragem espacial atua sobre uma pequena região quadrada, uma janela ao redor de cada pixel da imagem, de dimensões $W \times W$. W , normalmente, é um número ímpar, e os valores mais usados são 3, 5 e 7, formando janelas com 9, 25 ou 49 pixels.

Os seguintes filtros espaciais passa-baixas foram implementados e incluídos no sistema PixelWare:

- filtro da média [Gonzales-Wintz 87] [Rosenfeld-Kak 82] [Pratt 78];
- filtro da mediana [Pratt 78] [Ahmad-Sundararajan 87];
- filtros da ordem [Kim-Yaroslavskii 86] [Heygster 82];
- filtro dos k-vizinhos mais próximos [Davis-Rosenfeld 78];
- filtro sigma [Lee 83];
- filtro de Nagao-Matsuyama [Nagao-Matsuyama 79];
- suavização por soma das diferenças absolutas (SSDA) [Araújo 85] [Araújo 86] [Araújo 90];
- modelo de facetas [Haralick 80] [Haralick 81];
- suavização logarítmica [Chanda et al. 84];
- filtro da ordem adaptativo [Lee-Fam 87];
- filtro sigma adaptativo [Jung-Kim 88].

Para possibilitar a realização de análises comparativas do desempenho dos filtros implementados, foi desenvolvido um gerador de ruído, que adiciona a cada pixel da imagem (ou parte de imagem), um valor aleatório em distribuição gaussiana (normal) [Knuth 69], cujos parâmetros são determinados pelo usuário. Desta forma, a eficiência de cada filtro pode ser determinada, comparando o resultado da aplicação de cada técnica a uma imagem artificialmente poluída, e utilizando-se a imagem original como parâmetro.

Aritmética de imagens

Imagens digitais são, em última análise, matrizes de números. Sendo assim, é possível definir operações aritméticas sobre imagens digitais, de forma análoga à definição matricial. Portanto, na expressão

$$r_{ij} = p_{ij} \text{ op } q_{ij}$$

onde p , q e r são imagens digitais e op é um operador qualquer, define-se uma expressão em que uma imagem é formada a partir de outras duas.

O sistema PixelWare implementa operações de aritmética de imagens, baseadas na expressão acima, empregando os seguintes operadores:

- adição;
- subtração;
- diferença absoluta;
- média;
- operações binárias: AND, OR e XOR.

Também foram desenvolvidas funções que permitem a superposição total ou parcial de duas imagens, empregando no processo os mesmos operadores listados acima.

O uso das funções de aritmética é fundamental para a análise comparativa de imagens. Por exemplo, para se descobrir onde atuou um filtro espacial, pode-se fazer a subtração entre a imagem original e a imagem filtrada, aplicando, opcionalmente, pseudocoloração no resultado. Assim, será possível avaliar se o filtro escolhido conservou adequadamente as bordas ou não, ou se a eliminação do ruído teve conseqüências também em regiões da imagem onde se observavam texturas finas.

Eventualmente, na análise comparativa de imagens semelhantes, porém obtidas em tempos diferentes, será necessário eliminar diferenças ocorridas no registro das imagens. Para isto, o sistema PixelWare implementa algumas rotinas de transformação geométrica de imagens, que serão expostas a seguir.

Transformações geométricas

O processo de transformação implementado em PixelWare determina, com base em parâmetros fornecidos pelo usuário, um mapeamento entre a imagem resultante e a imagem original.

A idéia é calcular, para cada um dos pixels da imagem transformada, de coordenadas (x', y') , um par de coordenadas (x, y) no sistema da imagem original, por meio das seguintes equações:

$$x = p(x', y') \text{ e } y = q(x', y')$$

onde as funções p e q são escolhidas convenientemente, de acordo com o modelo da deformação que ocorreu, ou que se considera que tenha ocorrido, na imagem original.

O par de coordenadas resultante (x, y) , na maioria dos casos, não coincidirá exatamente com um pixel da imagem original. Nestes casos, o nível de cinza do pixel de saída será calculado por meio de uma operação denominada *reamostragem*, que realiza uma interpolação levando em conta o valor dos pixels na vizinhança das coordenadas calculadas.

[Niblack 86] apresenta três processos de reamostragem:

- escolha do pixel mais próximo;
- interpolação bilinear, que leva em conta os quatro pixels mais próximos à posição calculada;
- convolução cúbica, que calcula coeficientes a aplicar nos oito pixels mais próximos, segundo os eixos coordenados, da posição calculada com base em dois polinômios de terceira ordem.

O sistema PixelWare implementa a segunda opção, que representa um caso intermediário em termos de precisão e custo computacional, para dois tipos de básicos de transformação: rotação e mudança de escala. O terceiro tipo fundamental de transformação geométrica, que é a translação, dispensa o uso de reamostragem..

A mudança de escala envolve, genericamente, as seguintes funções de transformação:

$$p(x', y') = \frac{1}{F_x} x'$$

e

$$q(x', y') = \frac{1}{F_y} y'$$

onde F_x e F_y são os fatores de ampliação da imagem. Observe-se que os fatores são usados invertidos, pois o mapeamento é de saída para entrada. Assim, um F_x igual a 3 realiza uma ampliação de 3 vezes na dimensão da imagem segundo o eixo X : cada pixel da imagem resultante terá a coordenada X multiplicada por $1/3$ para se chegar à sua posição na imagem

Anais do SIBGRAPI V, novembro de 1992

original, e então obter o nível de cinza por reamostragem.

As funções de transformação para o caso básico de rotação são as seguintes:

$$p(x', y') = x' \cos(\theta) - y' \sin(\theta)$$

e

$$q(x', y') = x' \sin(\theta) + y' \cos(\theta)$$

onde θ é o ângulo de rotação considerado, e a rotação é feita em torno da origem.

No entanto, ao se rotacionar uma imagem ao redor da origem, fatalmente aparecerão pontos cujas coordenadas serão negativas. Sendo assim, é necessário alterar ligeiramente o equacionamento básico de forma a garantir que a imagem resultante fique toda contida no primeiro quadrante, com coordenadas sempre não-negativas, segundo o critério normalmente empregado na representação de imagens digitais.

A translação é o tipo de transformação mais simples possível, que é modelado da forma exposta abaixo:

$$p(x', y') = x' + \Delta x$$

e

$$q(x', y') = y' + \Delta y$$

onde Δx e Δy são os deslocamentos segundo os eixos X e Y .

As operações de mudança de escala, translação e rotação podem ser combinadas, montando-se uma só equação genérica pela simples adição das equações básicas apresentadas. O sistema PixelWare, no entanto, não realiza esta combinação, e inclui funções separadas para cada tipo de transformação básica.

Expansões futuras

O sistema PixelWare foi desenvolvido em parte com o intuito de se tornar, com o passar do tempo e com a contribuição de outros projetos de pesquisa, um sistema abrangente de processamento digital de imagens, com funções dedicadas aos problemas mais importantes da área. Sendo assim, neste trabalho, o sistema foi proposto de uma forma modular, em que novas funções podem ser acrescentadas sem prejuízo das já existentes, e podendo se beneficiar de todo o conjunto de funções básicas de PDI implementadas.

As seções seguintes expõem as áreas de expansão que se vislumbram no momento, para a complementação do conjunto de rotinas de uso geral e para resolver problemas específicos de processamento digital de imagens.

Segmentação de Imagens: Tendo como base o uso de filtros passa-altas para fazer a detecção de bordas, o estudo e implementação de rotinas de segmentação de imagens é também, conforme citado, o assunto de um trabalho paralelo [Parreira-Araújo 90].

É desnecessário dizer que este trabalho paralelo contribuirá para ampliar o escopo de aplicação do sistema PixelWare, e se beneficiará das rotinas já implementadas, deixando mais tempo dedicado ao problema específico de segmentação de imagens.

Correções Geométricas: O conjunto de rotinas de transformação geométrica incorporado ao sistema PixelWare cobre apenas alguns tipos de distorção, dentre os vários que podem ocorrer durante o processo de obtenção de uma imagem digital.

Sugere-se, portanto, que um futuro trabalho aborde a correção geométrica de imagens com base em pontos de controle, determinando as funções de transformação com base em uma regressão polinomial bidimensional.

Outros tipos de correção também úteis, porém mais simples, são o cisalhamento (*skew*) e o ajuste pelas bordas (*warp*). O primeiro corrige imagens distorcidas linearmente segundo um dos eixos, e o segundo determina funções para correção linear bidimensional.

Filtros no Domínio da Frequência: Para a eliminação de certos tipos de ruído, a suavização com base em filtros espaciais pode não ser suficiente. Em muitos casos, é necessário realizar a supressão do ruído também no domínio da frequência, com o uso principalmente da transformada rápida de Fourier (FFT).

A implementação de um filtro baseado na transformada rápida de Fourier é uma tarefa relativamente simples, considerando-se o extenso volume de bibliografia sobre o assunto. No entanto, a aplicação de correções à imagem transformada geralmente exige que o sistema disponha de recursos de edição, que não foram ainda implementados em PixelWare.

A análise visual pura e simples da imagem transformada também requer alguma experimentação, e o ideal seria desenvolver-se um trabalho no sentido de comparar o desempenho do filtro no domínio da frequência com o dos filtros espaciais passa-baixas já disponíveis em PixelWare, para diversos tipos de imagem e de ruído.

Classificação de Imagens: De importância fundamental na análise de imagens, principalmente daquelas geradas por sensoriamento remoto [Araújo et al. 92/3], a implementação de rotinas de classificação de imagens enriqueceria sobremaneira o sistema PixelWare. É freqüente a necessidade de classificar os pixels de uma imagem com base em informações externas, tais como a resposta de determinados tipos de objetos a radiações de comprimentos de onda específicos.

Diversos processos de classificação de imagens são conhecidos atualmente, e pode ser interessante implementar os mais importantes para fazer um estudo comparativo.

Aplicações Específicas: Além das expansões citadas acima, algumas outras áreas se destacam no conjunto de aplicações atuais do processamento digital de imagens, e que merecem atenção no desenvolvimento de novos trabalhos:

- codificação de imagens;
- aplicações em microscopia;
- aplicações em artes, particularmente na restauração de obras [Araújo et al. 92/1] [Araújo et al. 92/2];
- aplicações na medicina;
- aplicações na metalografia.

Além das aplicações citadas acima, um outro futuro assunto para pesquisa seria a migração do sistema PixelWare para estações de trabalho SUN, tornadas disponíveis recentemente no DCC. Este trabalho envolveria a transformação dos diálogos hoje implementados, de modo a adaptá-los aos recursos disponíveis na especificação funcional da interface *Open Look* [SUN 89/1] [SUN 89/2]. Dada a modularidade do sistema PixelWare, a maior parte das funções específicas de processamento digital de imagens poderia ser transportada sem modificações para o novo ambiente.

Referências

- [Ahmad-Sundararajan 87] Ahmad, M. O. & Sundararajan, D. *A Fast Algorithm for Two-Dimensional Median Filtering*, IEEE Transactions on Circuits and Systems, 34, 1987.
- [Araújo 85] Araújo, A. de A. *Sum of Absolute Grey Level Differences: An Edge-Preserving Smoothing Approach*, Electronics Letters, vol. 21, nº 25/26, 1985.
- [Araújo 86] Araújo, A. de A. *Sum of Absolute Difference Values Smoothing: Evaluation and Application*, Proceedings, III EUSIPCO 86, Elsevier Science Publishers, pp 773-776.
- [Araújo 90] Araújo, A. de A., Barros, M. A. & Queiroz, J. E. R. *Sum of Absolute Differences Smoothing: Comparison to New Algorithms and Application to Remote Sensing*, Proceedings, V EUSIPCO 90, Elsevier Science Publishers, pp 1043-1046.
- [Araújo et al. 92/1] Araújo, A. de A., Davis Jr., C. A., Daker, A. L. V., Sousa, L. A. C. & Leal, A. S. *Digital Processing of X-Rays of Sculptures: A Case Study of Aleijadinho's Work*, Proceedings, 4th International Conference on Image Processing and

- Its Applications, IPA/IEE, Maastricht, Holanda, 1992, pp 617-620.
- [Araújo et al. 92/2] Araújo, A. de A., Laender, A. F. H., Silva Jr., N. I., Veloso, B. R. & Coelho, B. V. *An Image Database System of Brazilian Historical Documents*, aceito para publicação no 2nd International Conference on Automation, Robotics and Computer Vision - ICARV/IEEE, Cingapura, 15-18 setembro 1992.
- [Araújo et al. 92/3] Araújo, A. de A., Soares Filho, B. S. & Sol, A. A. S. *Extraction of Linear Geologic Structures From Remote Sensing Orbital Images*, Proceedings, XVII Congress of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing - ISPRS, Washington, DC, Estados Unidos, 1992.
- [Cabral et al. 90] Cabral, R. H. B., Campos, I. M., Lucena, C. J. P. & Cowan, D. D. *Interfaces as Specifications in the MIDAS User Interface Development System*, Relatório Técnico RT004/90, Departamento de Ciência da Computação, UFMG, 1990.
- [Chanda et al. 84] Chanda, B; Chanduri, B. B. & Majunder, D. D. *Some Algorithms for Image Enhancement Incorporating Human Visual Response*, Pattern recognition, 17, 1984.
- [Davis-Rosenfeld 78] Davis, L. S. & Rosenfeld, A. *Noise Cleaning by Iterated Averaging*, IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 8, 1978.
- [Davis-Araújo 90] Davis Jr., C. A. & Araújo, A. de A. *Um Sistema de Tratamento e Classificação de Imagens de Satélites*, Comunicação Técnica apresentada no III SIBGRAPI, Gramado, 1990.
- [Davis 92] Davis Jr., C. A. *PixelWare: Um Sistema de Processamento Digital de Imagens*, Dissertação de Mestrado apresentada ao Departamento de Ciência da Computação da UFMG, 1992.
- [Davis-Araújo 92] Davis Jr., C. A. & Araújo, A. de A. *Manual de Projeto do Sistema PixelWare*.
- [Fonseca-Tozzi 90] Fonseca, L. E. N. & Tozzi, C. L. O. *O Uso da Cor no Processamento Digital de Imagens*, III SIBGRAPI, 1990.
- [Goldberg-Robson 83] Goldberg, A. & Robson, D. *SMALLTALK 80 - The Language and Its Implementation*, Addison-Wesley, 1983.
- [Gonzales-Wintz 87] Gonzalez, R. C. & Wintz, P. *Digital Image Processing*, 2nd. Edition, Addison-Wesley, 1987.
- [Haralick 80] Haralick, R. M. *Edge and Region Analysis for Digital Image Data*, Computer Graphics and Image Processing, 12, 1980.
- [Haralick 81] Haralick, R. M. *A Facet Model for Image Data*, Computer Graphics and Image Processing, 15, 1981.
- [Hayes 89] Hayes, F. & Baran, N. *A Guide to GUIs*, BYTE, July 89.
- [Heygster 82] Heygster, G. *Rank Filters in Digital Image Processing*, Computer Graphics and Image Processing, 19, 1982.
- [Jung-Kim 88] Jung, S. H. & Kim, N. C. *Adaptive Image Restoration of Sigma Filter Using Local Statistics and Human Visual Characteristics*, Electronics Letters, 24, 1988.
- [Kim-Yaroslavskii 86] Kim, V. & Yaroslavskii, L. *Rank Algorithms for Picture Processing*, Computer Vision, Graphics and Picture Processing, 35, 1986.
- [Knuth 69] Knuth, D. E. *The Art of Computer Programming*, Volume 2: *Seminumerical Algorithms*, Addison Wesley, 1969.
- [Lee 83] Lee, J. S. *Digital Image Smoothing and the Sigma Filter*, Computer Graphics and Image Processing, 24, 1983.
- [Lee-Fam 87] Lee, Y. H. & Fam, A. T. *An Edge Gradient Enhancing Adaptive Order Statistic Filter*, IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing, 35, 1987.
- [Nagao-Matsuyama 79] Nagao, M. & Matsuyama, T. *Edge Preserving Smoothing*, Computer Graphics and Image Processing, 9, 1979.
- [Niblack 86] Niblack, W. *An Introduction to Digital Image Processing*, Prentice-Hall International, 1986.
- [Parreira-Araújo 90] Parreira, G. C. & Araújo, A. de A. *Um Sistema para Segmentação de Imagens de Uso Geral*, Anais da Jornada EPUSP/IEEE em Computação Visual, São Paulo, SP, 1990, pp 329-334.
- [Pratt 78] Pratt, W. K. *Digital Image Processing*, John Wiley & Sons, 1978.
- [Rosenfeld-Kak 82] Rosenfeld, A. & Kak, A.C. *Digital Picture Processing*, 2nd. Edition, Volumes 1 e 2, Academic Press, 1982.
- [Smalltalk 86] *SMALLTALK/IV - Tutorial and Programming Handbook*, Digitalk Inc., 1986.
- [Stone 91] Stone, D. M. *Boosting Video Performance Under Windows 3.0*, PC Magazine, February 26, 1991.
- [SUN 89/1] Sun Microsystems, Inc. *OPEN LOOK Graphical User Interface Functional Description*, Addison Wesley, 1989.
- [SUN 89/2] Sun Microsystems, Inc. *OPEN LOOK Graphical User Interface Application Style Guidelines*, Addison Wesley, 1989.