

MELHORAMENTO DA RESOLUÇÃO A PARTIR DE SEQÜÊNCIAS DE IMAGENS

Enhancing Image Resolution from Image Sequence

LEANDRO LUIZ DE ALMEIDA
ANTONIO MARIA GARCIA TOMMASELLI

Universidade Estadual Paulista – Unesp
Faculdade de Ciências e Tecnologia – FCT
Departamento de Cartografia
Rua Roberto Simonsen, 305
19.060-900 – Presidente Prudente, SP
leandro@apec.unoeste.br
tomaseli@prudente.unesp.br

RESUMO

A resolução de uma imagem pode ser melhorada a partir do processamento conjunto de uma seqüência de imagens da cena, técnica esta que é útil em várias aplicações. Para melhorar a resolução de uma imagem, utilizando-se de uma seqüência, há a necessidade de se registrar as imagens para retificá-las em relação a uma de referência. Após a retificação executa-se o processo de fusão, o que pode ser feito por vários métodos. Neste trabalho foram implementados os métodos da média aritmética entre os níveis de brilho dos paises e o método de minimização dos erros, a partir de uma imagem de alta resolução inicial aproximada. As etapas descritas, exceto a de registro das imagens, foram implementadas em C++. Neste trabalho são apresentados experimentos mostrando que há um significativo melhoramento nas resoluções geométrica e radiométrica após a fusão das imagens.

Palavras-chave: Resolução, melhoramento, seqüência de imagens, restauração.

ABSTRACT

Image resolution can be enhanced by processing an image sequence, which is useful in several applications. This resolution enhancement firstly requires, image registration of each one of the images with respect to the one considered as a reference, in order to rectify each image. Following image rectification is the process of image fusion with several different methods. Two approaches were compared in this paper: the method of gray levels average and the method of error minimization from an approximated initial high resolution image. The mentioned

steps, except for image registration, were implemented by C++ language. Some experiments are presented and discussed, showing remarkable resolution enhancement in the resulting images after fusion

Keywords: Resolution, enhancement, image sequence, restoration.

1 INTRODUÇÃO

A análise de imagens é utilizada em várias áreas do conhecimento e um problema comum é o uso de imagens de baixa resolução, como, por exemplo, seqüências de imagens de vídeo, o que dificulta a visualização precisa de detalhes dos fenômenos imageados.

A qualidade de uma imagem digital é vinculada às resoluções espacial e radiométrica. A resolução espacial está associada ao tamanho do pixel o que depende do número e dimensão dos elementos sensores. A resolução radiométrica está ligada aos níveis de quantização empregados para amostrar a luminosidade refletida pela cena, o que depende do número de bits usados para armazenar a informação de brilho (ou cor) de cada pixel. É importante distinguir entre *elemento de resolução*, que é o tamanho do pixel, e resolução espacial, que está relacionada à dimensão dos menores detalhes visíveis na imagem. A resolução espacial é a capacidade que um sistema de imageamento possui de registrar feições adjacentes em um objeto e é dada em pares de linha/mm ou usando a Função Transferência de Modulação (MTF).

A imagem digital pode sofrer um processo de degradação de sua qualidade devido a alguns fatores, como, por exemplo:

- Aberrações das lentes da câmara, que causam um efeito de borramento circular;
- Focalização incorreta, o que ocorre quando o sensor não está corretamente posicionado no plano imagem, atendendo à equação das lentes;
- Deslocamento do sistema sensor durante a aquisição da imagem, o que causa o chamado arrastamento;
- Deslocamento de um objeto da cena, o que causa um borramento equivalente ao arrastamento;
- Deficiência ou excesso de iluminação;
- Espalhamento atmosférico.

A resolução espacial está diretamente ligada ao tamanho do pixel, que depende das características do sensor. Para aumentar a resolução espacial, pode-se aproximar o sensor na direção do objeto, aumentando a escala da imagem, ou recorrer a um sensor com um maior número de elementos. Quando as imagens já estão disponíveis, as opções anteriores não são aplicáveis, sendo necessário recorrer a técnicas de Processamento de Imagens.

Uma possibilidade para aumentar a resolução espacial é a análise de seqüências de imagens de uma mesma cena, com o objetivo de se criar uma imagem com uma melhor resolução espacial, a partir da transformação e fusão de várias imagens. Trata-se de uma técnica de Restauração, uma vez que se tenta estimar a função imagem original.

O objetivo deste trabalho é apresentar uma metodologia para o melhoramento da resolução espacial de uma imagem, usando seqüências de imagens tomadas de pontos de vista próximos.

2 MÉTODOS PARA RESTAURAÇÃO A PARTIR DE SEQUÊNCIAS DE IMAGENS

Peleg et al. (1987) destacam que é possível produzir uma imagem com resolução melhorada, a partir de imagens de baixa resolução, usando os deslocamentos conhecidos entre as imagens. O processo para a geração da imagem de alta resolução, proposto pelos autores, inicia com uma imagem superamostrada, determinada como sendo uma aproximação inicial. Este processo é iterativo, onde os novos valores para cada pixel são determinados, nesta imagem, após se verificar o menor erro ocasionado pela diferença entre os níveis de brilho dos pixels das imagens de baixa resolução e os seus correspondentes na imagem de alta, que está sendo gerada. Varia-se a intensidade de brilho dos pixels que estão sendo analisados na imagem super amostrada, no intervalo $[-1, 1]$, realizando-se combinações neste bloco, com o intuito de estabelecer qual o valor de brilho que produz a menor diferença entre as imagens.

Peleg e Irani (1991) sugeriram melhorias no método apresentado por Peleg et al. (1987). Os autores tomaram o registro de imagens como base para a determinação de uma imagem de melhor resolução. Desenvolveram algoritmos iterativos para se obter um melhoramento na resolução espacial das imagens, com precisão subpixel, tanto em imagens de baixa resolução em níveis de cinza como nas coloridas. Com os deslocamentos da imagem e o processo de imageamento conhecidos, pode-se realizar uma fusão entre as imagens de baixa resolução, desde que pertençam à mesma seqüência que compõe a cena, usando técnicas de interpolação e gerando-se, assim, uma imagem de melhor resolução espacial.

Gross e Ur (1992) desenvolveram uma abordagem para se gerar uma imagem de melhor resolução, através do conhecimento a priori dos deslocamentos existentes nas imagens de baixa resolução que pertençam à cena. Apesar de abordar um método que se utiliza das frequências dos sinais gerados pela imagem, esse processo possui a mesma base do desenvolvido por Peleg e Irani (1991), pois se utiliza da fusão entre as imagens de baixa resolução, através da interpolação entre as mesmas. A determinação do valor de brilho do novo pixel na imagem de alta resolução considera o menor erro possível, após serem analisados todos os erros gerados pela variação dos valores de brilho dos pixels no intervalo $[-1, 1]$, além da aplicação de

um filtro de deconvolução para eliminar os borramentos causados anteriormente. Os experimentos foram feitos utilizando-se imagens simuladas e imagens reais, mas sempre com os deslocamentos horizontais conhecidos a priori.

Wiman (1992) trabalhou com o aumento da resolução espacial de uma imagem digital (tons de cinza) através de super amostragem. Desenvolveu um método para obtenção de uma imagem de alta resolução a partir de imagens de baixa resolução digitalizadas em *scanners*. Nesta abordagem, o processo de geração da imagem de alta resolução se baseia em equações que calculam os níveis de cinza dos pixels na imagem gerada com base nas adquiridas. As equações se baseiam na média aritmética e nos deslocamentos conhecidos (adotado como sendo de um pixel).

Hathaway & Meyer (1999) desenvolveram um software denominado VISAR (VÍdeo Image Stabilization and Registration), utilizado para melhorar a resolução espacial de imagens com o intuito de se realizar análises de imagens científicas, vídeos da área médica, vídeos de circuitos fechados realizados por câmeras de segurança para identificação de intrusos, imagens que identificam motoristas infratores, aparelhos eletrônicos, além de uma série de outras situações que envolvem uma seqüência de imagens. Estas imagens de uma cena, podem ser geradas por câmaras de vídeo ou fotográficas. Este software, inicialmente, era de uso restrito aos laboratórios do FBI, sendo posteriormente liberado para comercialização. O software serve de apoio para o sistema que captura a cena (seqüência de imagens) possibilitando a determinação de novos detalhes, levando em consideração a intensidade de luz existente e a velocidade no momento da aquisição. O software gera imagens de alta resolução removendo os efeitos ocasionados pelos deslocamentos e efeitos de zoom ocorridos durante a aquisição com base nos frames ou imagens que compõem a cena, resultando na minimização de ruídos existentes nas imagens.

Baker & Kanade (1999) apresentaram uma solução para a geração de imagens de maior resolução, a partir de seqüências de imagens não-planares, não-rígidas e sujeitas auto-oclusões, já que, a grande maioria dos trabalhos desenvolvidos, nessa linha, utiliza imagens planares e rígidas. Os autores, buscaram melhorar a resolução espacial das imagens, ou partes das mesmas, que envolviam expressões faciais, pois há grande dificuldade na construção do modelo 3-D da face humana. Com base no algoritmo do fluxo ótico (algoritmo para a determinação dos parâmetros de registro e retificação entre imagens), versão de Lucas & Kanade (1981) apud Baker & Kanade (1999), consegue-se gerar, simultaneamente, os parâmetros para retificação e registro das imagens, e a de melhor resolução.

Kang et al. (2000) desenvolveram um software que visa gerar imagens de alta resolução a partir de imagens de baixa resolução. Para isso, determinaram o número mínimo de imagens que deveriam ser adquiridas, levando-se em consideração a minimização de custos em relação à aquisição das imagens e equipamentos utilizados, o tempo de processamento, o mínimo de ruídos gerados e como resultado

final, uma imagem que pode ser interpretada de forma confiável. O algoritmo implementado é capaz de determinar os parâmetros de deslocamentos e rotação entre as imagens de baixa resolução através do método de correspondência baseado em área por mínimos quadrados. Posteriormente, determina-se o grau de aumento no tamanho da imagem e o valor do ruído mínimo que se deseja obter, ou seja, a qualidade da imagem resultante em relação ao erro médio que pode ocorrer entre a imagem de super resolução determinada e a imagem que foi identificada no software como a de referência. A etapa para determinação da imagem de alta resolução é executada iterativamente, até se obter a convergência em relação à qualidade desejada.

Joyeux et al. (2001) abordaram o processo de reconstrução de seqüências de imagens degradadas com ênfase em restauração de filmes antigos em preto e branco. O objetivo dos autores seria minimizar a quantidade de ruídos que aparecem em uma cena com base na seqüência de imagens que compõem o filme. Todo o trabalho foi realizado utilizando-se de processos no domínio de frequência para remover ruídos e borramentos encontrados nas imagens, por meio de filtros passa-baixa e passa-alta, além das séries de Fourier.

Como pôde ser observado, todo processo de geração de imagens de alta resolução com base em seqüências de imagens deve ser precedido da determinação dos parâmetros de deslocamentos existentes na cena. Estes são definidos a priori ou calculados por meio do registro de imagens.

2.1 RETIFICAÇÃO E RETIFICAÇÃO DE IMAGENS

O objetivo da restauração e retificação de imagens é a correção das degradações ou distorções que ocorrem no processo de aquisição da cena.

Essas distorções ou degradações que geram a aquisição de imagens de baixa resolução radiométrica, podem ser causadas, segundo Lillesand & Kiefer (1987), pela variação na iluminação no momento da aquisição da imagem, devido às condições atmosféricas, o local em que o sensor se encontra, além, das características do mesmo.

Mas, para se aplicar qualquer tipo de técnica para a restauração dessas imagens é necessário, anteriormente, realizar a retificação das imagens que pertencem à cena adquirida, para se posicionar uma imagem em relação à outra, ou seja, o registro de imagens deve ser executado.

O registro de imagens é processo que permite definir uma transformação geométrica relacionando cada ponto de uma imagem com as coordenadas de um sistema de referência qualquer (RICHARDS, 1986). Uma possibilidade seria a de escolher uma imagem como referência (imagem principal) e registrar as outras imagens (imagens secundárias) em relação à de referência.

A principal etapa do registro de imagens é a determinação da correspondência entre os pontos da imagem com seus correspondentes no sistema de referência. Neste trabalho, utiliza-se como referência uma das imagens da seqüência. A correspondência pode ser determinada visualmente ou utilizando técnicas automáticas, como a correlação de imagens ou métodos de correspondência por feições ou correspondência estrutural (SCHENK, 1999).

A transformação entre os sistemas de coordenadas pode ser feita usando diferentes modelos matemáticos, dependendo da realidade física. As transformações freqüentemente usadas para o registro de imagens são a afim, a projetiva ou a polinomial (ANDRADE, 1998; FONSECA & MANJUNATH, 1996; MOFFITT & MIKHAIL, 1980). Pode-se adotar, ainda, o processo de recessão espacial como forma de determinar o registro entre uma imagem e um sistema de coordenadas, utilizando, neste caso, o modelo de colinearidade (ANDRADE, 1998; WOLF, 1983).

As paralaxes existentes em uma imagem, entretanto, causadas pelas variações de profundidade da cena, não permitem o registro com apenas uma transformação para toda a cena. Somente no caso de uma região relativamente plana é possível aceitar a determinação do registro, aplicando-se uma única transformação para toda a imagem.

Uma vez definida a transformação ser empregada para o registro, a determinação dos parâmetros é efetuada a partir de um conjunto de pontos correspondentes nos dois referenciais envolvidos, utilizando-se uma técnica de estimação, sendo mais freqüente o uso do Método dos Mínimos Quadrados.

Pode-se fazer, então, a retificação da imagem, que consiste na geração de uma nova imagem a partir da imagem original, mas no sistema de coordenadas de referência. Para a retificação imagem, utiliza-se o modelo de transformação previamente escolhido reamostrando-se a imagem no novo sistema. Para a reamostragem é necessário empregar alguma técnica de interpolação, sendo comum utilizar a interpolação bilinear, que produz bons resultados a um custo computacional aceitável (ATKINSON, 1996).

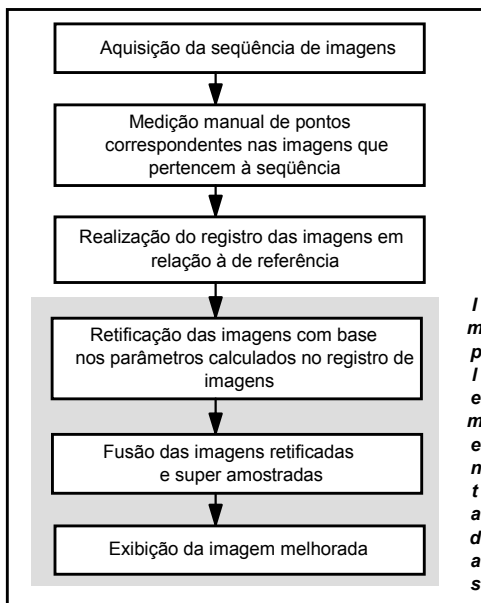
3 UM MÉTODO PARA O MELHORAMENTO DA RESOLUÇÃO

Nesta seção é apresentada a metodologia empregada neste trabalho para a geração de imagens com resolução melhoradas. A geração de imagens de melhor resolução com base em uma seqüência, requer, primeiramente, que as imagens pertencentes à cena estejam retificadas e num mesmo sistema de referência, ou seja, o registro de imagens deve ter sido executado previamente.

Neste trabalho foram utilizadas as câmeras digitais Kodak DC-40 e a Kodak DC-210 para a coleta das imagens. Uma visão geral da metodologia empregada para o desenvolvimento do trabalho pode ser vista na figura 1. As etapas iniciais foram

realizadas manualmente enquanto que as finais, relativas ao processo de melhoramento, foram implementadas em linguagem C.

Figura 1 – Etapas para a geração das imagens de melhor resolução.



3.1 ETAPAS PARA A GERAÇÃO DAS IMAGENS

a) Coleta das Imagens:

Para coletar a sequência de imagens foram usadas duas câmaras digitais já mencionadas, introduzindo-se pequenos deslocamentos lineares entre as imagens. As imagens coletadas com a câmara Kodak DC-40, foram obtidas a uma distância de 2m, com uma escala equivalente a 1:43, e tamanho do pixel na cena de 6mm. O primeiro conjunto de imagens coletado com a câmara Kodak DC-210, foi obtido a uma distância de aproximadamente 1m, e no segundo experimento, a uma distância de 2,13m, obtendo-se o pixel de tamanho igual a 2,2mm no espaço objeto e escala equivalente a 1:73. Esta coleta pode ser realizada também, de forma contínua por meio de câmeras de vídeo, mas seria necessária, a utilização de software específico para a digitalização e separação dos *frames* de interesse.

b) Registro e Retificação:

Para se obter o registro e, posteriormente, a retificação das imagens, foi feita uma medição manual das coordenadas dos pontos correspondentes entre as imagens,

utilizando-se qualquer software de visualização de imagens. Neste trabalho, foi utilizado o software Adobe Photoshop 5.0. Para tanto, foi usado o máximo nível de *zoom* e anotadas as coordenadas em linha e coluna, com o objetivo de se minimizar o erro de pontaria. Essas coordenadas (em pixels) foram transformadas para um referencial com origem no centro da imagem (em milímetros), usando as equações (3.1).

$$x_{\text{fot}} = (x_i - N\text{Col} / 2) * \text{TamPixel} \quad (3.1)$$

$$y_{\text{fot}} = -(y_i - N\text{Lin} / 2) * \text{TamPixel}$$

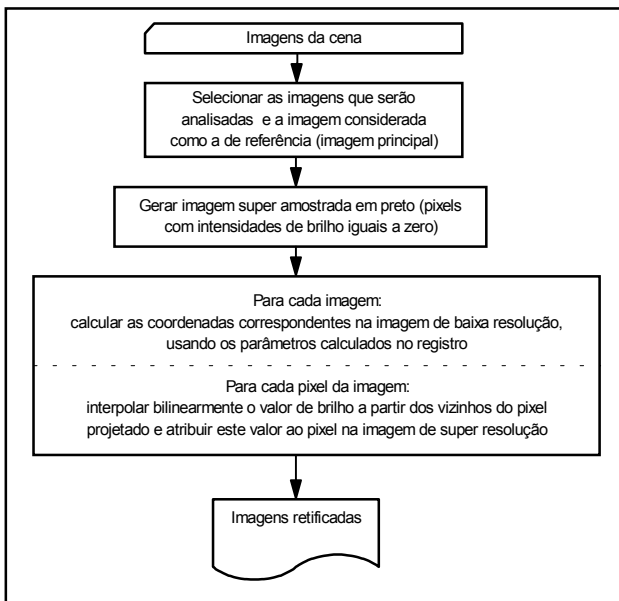
Onde:

- $x_{\text{fot}}, y_{\text{fot}}$: coordenadas no referencial com origem no centro da imagem;
- x_i, y_i : coordenada imagem (coluna, linha);
- $N\text{col}, N\text{lin}$: número de colunas e linhas da imagem;
- TamPixel : tamanho do pixel em milímetros na imagem a ser gerada.

Com estes pontos determinados, o próximo passo foi determinar os parâmetros para a realização do registro entre as imagens. Para isso, foram utilizadas as equações de transformação projetiva e o modelo de colinearidade.

Após os parâmetros terem sido determinados, fez-se simultaneamente, a retificação e reamostragem das imagens que pertencem à sequência em relação à imagem de referência. A imagem resultante foi produzida na resolução aumentada, isto é, esta imagem foi gerada para servir de entrada no processo. Esta retificação foi realizada obtendo-se a correspondência de cada pixel da imagem de referência super amostrada com a imagem original de baixa resolução, que inicialmente, possuía intensidades de brilho iguais a zero. A figura 2 mostra, de forma geral, o processo de retificação implementado.

Figura 2. Processo de retificação das imagens.



Com base nas equações que possibilitaram o registro das imagens (transformação projetiva ou modelo de colinearidade), determina-se a correspondência dos pixels nas imagens de baixa resolução. Como as coordenadas projetadas na imagem de baixa resolução estão em frações de coordenada do pixel, há a necessidade de uma interpolação entre os vizinhos para a determinação do nível de brilho relativo ao que se deseja determinar na imagem de super resolução. O método de interpolação bilinear foi o utilizado, levando-se em consideração a influência de cada pixel em relação ao que deveria ser gerado.

c) Fusão e Geração da Imagem de Super Resolução:

Uma vez retificadas, todas as imagens reamostradas da sequência estão em um mesmo sistema de coordenadas e com resolução espacial aumentada. Teoricamente, os tons de cinza de cada pixel deveriam ser os mesmos em todas as imagens, o que evidentemente não ocorre, em função das degradações nas imagens originais. É necessário, então, fundir todas as imagens, gerando uma única. Nesta etapa obtém-se a imagem de super resolução, podendo ser realizada de duas formas:

1. *Média entre os valores de brilho dos pixels*: é realizada a média aritmética dos níveis de brilho dos pixels correspondentes determinados pelos processos de registro e retificação nas imagens da sequência;

2. *Processo com minimização de erros*: inicialmente realiza-se uma primeira estimação dos níveis de brilho da imagem de alta resolução, por exemplo, usando a imagem de referência superamostrada pela interpolação bilinear. A partir da imagem de alta resolução aproximada, projeta-se cada pixel nas imagens de baixa resolução. O valor de brilho será projetado em coordenadas fracionárias (ao nível de subpixel) e deve-se interpolar o valor correspondente em cada imagem de baixa resolução. Obtém-se, então, a diferença entre o valor de brilho projetado e o valor de brilho observado, originando um erro residual (*er*). Calcula-se, então, o erro médio quadrático (*emq*) (equação 3.2) para um o bloco de quatro pixels vizinhos. Considerando-se todas as imagens da sequência; decrementa-se o valor de brilho do primeiro pixel de -1, na imagem de alta resolução e repete-se a projeção para o cálculo do erro. Incrementa-se +1 e repete-se o cálculo. Por meio desse processo, são calculados os erros para todas as combinações possíveis de valores de brilho, variando-se os valores de brilho no intervalo [-1,1]. A combinação que apresentar o menor erro médio quadrático é mantida na imagem de alta resolução.

$$emq = \sqrt{\frac{\sum er^2}{n - 1}} \quad (3.2)$$

Onde:

- *emq*: Erro Médio Quadrático dos níveis de brilho;
- *er*: erro residual (diferença nos valores de brilho, entre o pixel projetado e o observado);
- *n*: número de pixels da imagem.

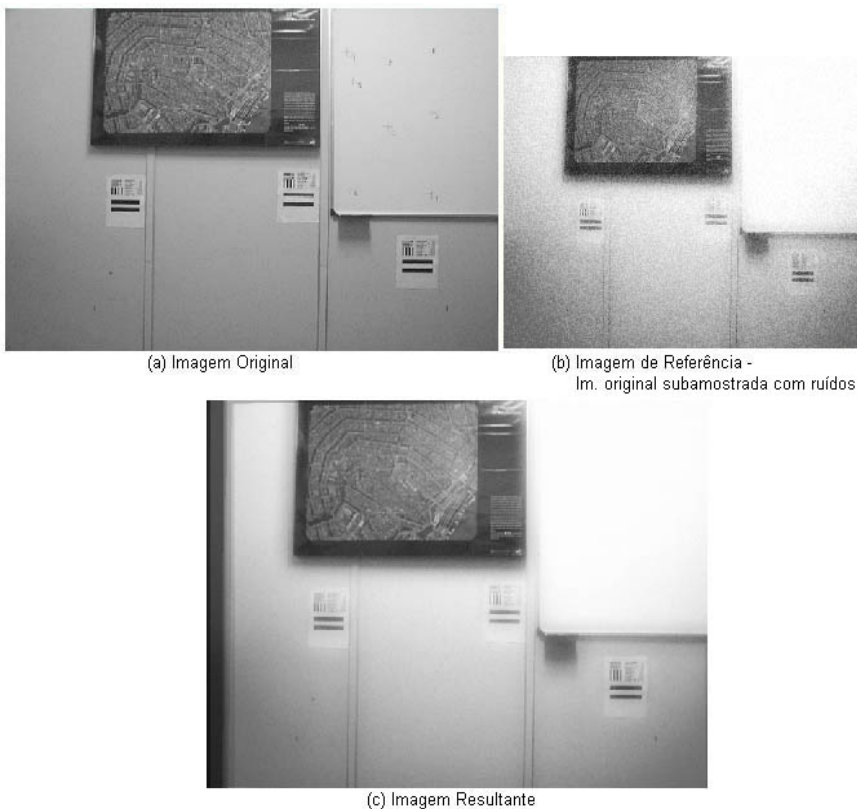
4 EXPERIMENTOS E RESULTADOS

Foram realizados vários experimentos com dados simulados e dados reais, para verificar o melhor método de registro e de fusão. Nos casos estudados, verificou-se que a transformação projetiva apresentou melhores resultados que a resseção espacial usando a colinearidade, após a análise de resíduos e dos resultados globais. Neste trabalho são apresentados apenas os experimentos mais significativos, com imagens reais coletadas com a câmara Kodak DC210. Em ambos os experimentos a serem mostrados, foi usado o método da transformação projetiva para o registro das imagens.

As imagens originais (resolução de 1152x864 pixels) foram registradas e subamostradas para a resolução de 564x432, adicionando-se, ainda, ruídos à imagem, para simular imagens coletadas com dispositivos de baixa resolução, como

câmaras de vídeo. A imagem original foi utilizada como referência para avaliação da qualidade dos métodos estudados, usando-se como critério de qualidade o erro médio quadrático das discrepâncias nos níveis de cinza entre a imagem gerada e a imagem original.

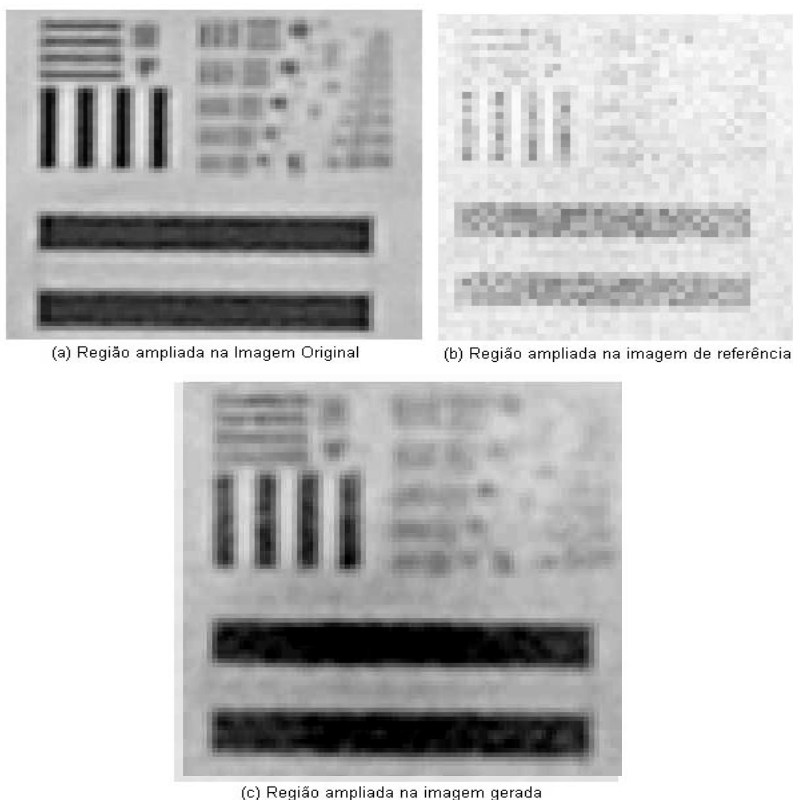
Figura 3 – Melhoramento da resolução usando a transformação projetiva para o registro e retificação e o método da média para fusão.



A figura 3 mostra o resultado do melhoramento de resolução a partir do registro pela transformação *projetiva* e fusão pela *média* de uma seqüência com oito imagens com pequenos deslocamentos e ruídos adicionados por software. A imagem mostrada em 3(a) é a imagem original; na figura 3(b) mostra-se a imagem subamostrada e acrescida de ruídos, usada como a imagem de referência da seqüência; na figura 3(c) mostra-se a imagem resultante, podendo-se verificar o

efeito de melhoramento e a obtenção de uma imagem que se aproxima da imagem original. Na figura 4 são mostrados os detalhes destacados na figura 3. Pode-se observar o padrão pouco nítido na figura 4(b) é convenientemente restaurado, após a fusão das imagens, cujo resultado é mostrado em 4(c). A seqüência de imagens, mesmo degradadas propositalmente com ruídos, permitiu a recuperação das informações da cena original. O erro médio quadrático das diferenças entre os níveis de cinza da imagem original e da imagem resultante foi de 53,5 (em níveis de cinza), calculado pela equação (3.2).

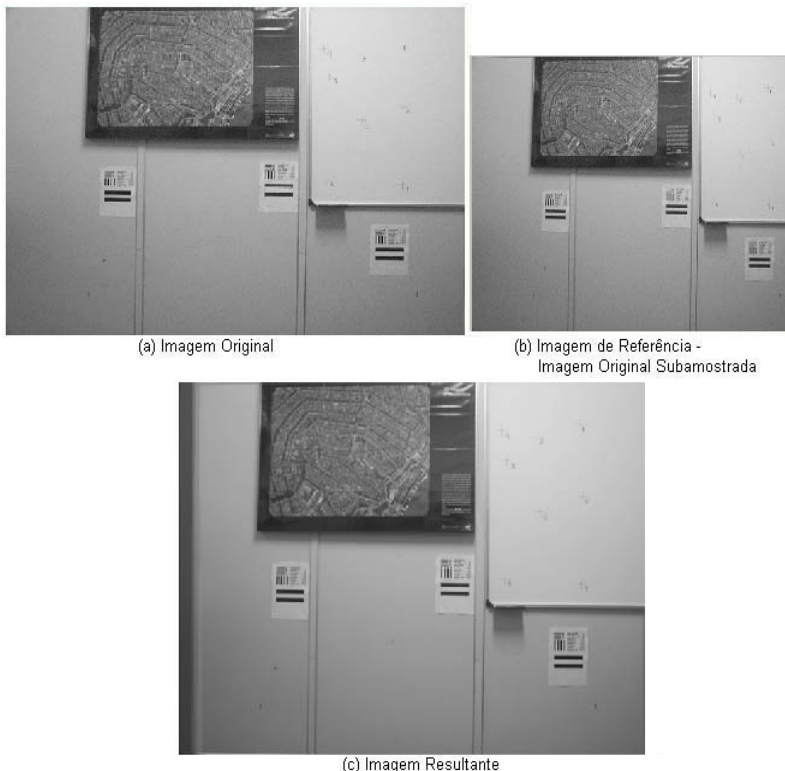
Figura 4 – Detalhes das imagens mostradas na Figura 3.



Este experimento foi realizado com imagens muito degradadas por ruídos, para mostrar os resultados positivos da abordagem. Embora o erro médio quadrático nos níveis de brilho restaurados seja elevado em relação a outros experimentos, devido à alta degradação introduzida na seqüência de imagens, é

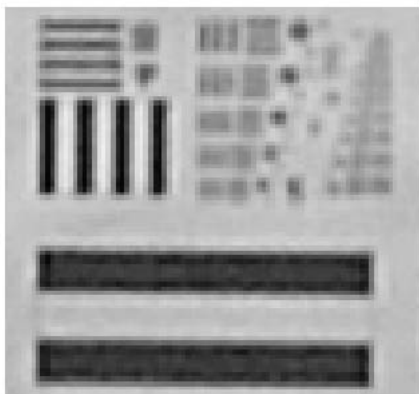
visível o melhoramento na resolução da imagem, com a identificação de detalhes antes imperceptíveis.

Figura 5 – Melhoramento da resolução usando a transformação projetiva para o registro e retificação e o método de minimização de erros, variando-se os valores de brilho no intervalo $[-5, 0, +5]$.

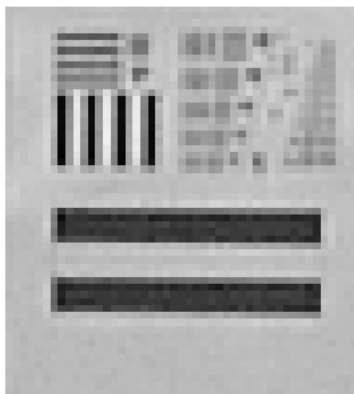


Na figura 5 observa-se o resultado obtido a partir de uma sequência de imagens composta por oito imagens de baixa resolução espacial, mas de boa qualidade radiométrica. Ao contrário do experimento apresentado anteriormente, as imagens não foram degradadas com ruído, obtendo-se um erro médio quadrático entre a imagem original e a gerada pelo método de 12,2 (em níveis de cinza). Neste experimento foi usado o método de minimização de erros, variando-se os valores de brilho de $[-5,0,+5]$. Na figura 6 são mostrados os detalhes destacados na figura 5.

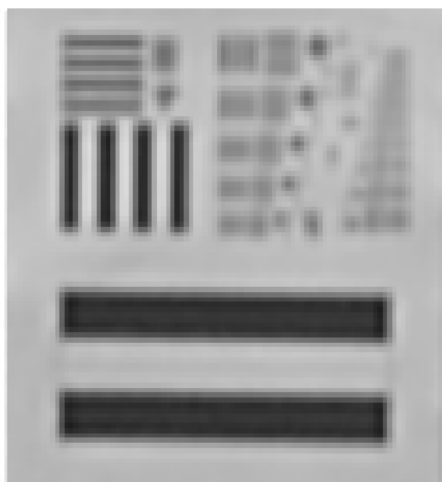
Figura 6 – Detalhes das imagens mostradas na Figura 5



(a) Região ampliada na Imagem Original



(b) Região ampliada na imagem de referência



(c) Região ampliada na imagem gerada

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho apresentou-se um método para o melhoramento da resolução espacial de sequência de imagens, analisando-se os resultados de alguns experimentos com imagens reais. Foi desenvolvida uma ferramenta computacional na qual foram implementados dois de métodos de fusão e geração de imagens de melhor resolução. Estes métodos foram comparados e os resultados foram discutidos.

Observou-se que o método de registro com a transformação projetiva apresentou resultados de melhor qualidade radiométrica, particularmente para imagens planas, devido à transformação com erros menores que meio pixel. Erros de registros maiores que 1 pixel, causam borramento na imagem fundida, pois valores de brilho de pixels diferentes são incorretamente misturados. É, portanto, crítico neste processo, o registro das imagens ou de partes, sendo recomendado estudar métodos que proporcionem exatidão subpixel e que façam o registro automaticamente, evitando erros de pontaria do operador. Da mesma forma, é importante considerar a transformação adequada à realidade física do sensor.

Verificou-se que o método de minimização de erros, que leva em consideração uma aproximação inicial que é analisada e melhorada ao longo do processo de geração da imagem de super resolução, gera uma sensível suavização nas regiões que representam as altas frequências na imagem, como as bordas.

Embora o processo tenha sido implementado para imagens em tons de cinza, é possível utilizá-lo também para imagens coloridas, bastando replicar o procedimento para os três canais R, G e B.

Outra possibilidade interessante para investigação futura seria a fusão de imagens ortoretificadas, nas quais o efeito de paralaxe por variação de altitude foi previamente eliminado.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDRADE, J. B. **Fotogrametria**. SBEE; Curitiba – Pr; 1998. 258p.
- ATKINSON, K.B. **Developments in Close Range Photogrammetry**. Essex, England: Applied Science Publishers LTD. 1980.
- BAKER S., KANADE T. **Super-Resolution Optical Flow**. [s.l.]: CMU-RI-TR-99-36, 1999.
- FONSECA, L.M. G.; MANJUNATH, B.S. **Registration Techniques for Multisensor Remotely Sensed Imagery**. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 62, nº 9, September 1996, pp. 1049-1056.
- GROSS, D., Ur, A. **Improved Resolution from Subpixel Shifted Pictures**. CVGIP- Graphical Models and Image Processing. Vol. 54, Nº 2, Março, 1992, pp. 181-186.
- HATHAWAY, D., MEYER P. NASA: **Video Enhancer For Law Enforcement & More**. Advanced Imaging: Solutions for the Electronic Imaging Professional; Maio, 1999, pp. 7.
- JOYEUX, L., et al. **Reconstruction of degraded image sequences**. Application to film restoration. Image and Vision Computing. Nº 19, France, 2001, pp. 503-516.
- KANG, M.J, et al. **The Digital Image Acquisition of High-Resolution by Enhancement the Multiple Images**. ASPRS-Proceedings - Launching the Geospatial Information Age, Washington, 2000.

- LILLESAND, T. M.; KIEFER, R. W. **Remote Sensing and Image Interpretation**; New York. John Wiley & Sons. 2ed. 1987.
- MOFFITT, F. H., MIKHAIL, E. M. **Photogrammetry**. 3ª ed. vol. II. New York, Harper & Row Publishers, 1980. 268p.
- PELEG, S., IRANI, M., **Improving Resolution by Image Registration**. Graphical Models and Image Processing. vol. 53, nº 3, 1991, p. 231-239.
- PELEG, S., KEREN, D., SCHWEITZER, L. **Improving Image Resolution Using Subpixel Offsets (Motion)**. Pattern Recognition Letters, 1987, 223-226.
- RICHARDS, J. A. **Remote Sensing Digital Image Analysis - An Introduction**. Berlin-Heidelberg. Springer-Verlag, 1986.
- SCHENK, A. F. **Digital Photogrammetry**. TerraScience, 428 p., 1999.
- WIMAN, H. **Improvement of Digital Resolution by Oversampling**. ISPRS Commision II, Washington, 1992.
- WOLF, P. R. **Elements of Photogrammetry**. 2 ed. McGraw-Hill; Singapore, 1983. 628p.

(Recebido em dezembro/01. Aceito em agosto/03)