

AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA DETECÇÃO DE BORDAS EM UMA SEQUÊNCIA DE IMAGENS DE RUAS E RODOVIAS

Quality evaluation of edge detection in a road image sequences

João Fernando Custódio da Silva¹
Ricardo Luís Barbosa²
Rodrigo Bezerra de Araújo Gallis²
Leonardo Marini Pereira³

Universidade Estadual Paulista – UNESP
Faculdade de Ciências e Tecnologia
19060-900 – Presidente Prudente – SP – Brasil

¹Departamento de Cartografia

jfcsilva@prudente.unesp.br

²Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas

ricardo_rodrigo@prudente.unesp.br

³Curso de Engenharia Cartográfica

marini@webmac.psi.br

RESUMO

Sistemas terrestres de mapeamento móvel mapeiam feições de interesse ao longo de ruas ou rodovias, como, por exemplo, postes, sinais de trânsito, guias ou sarjetas, lixeiras etc. O trabalho de laboratório, no que tange à reconstrução do objeto, consiste em transformar as imagens de vídeo em imagens paradas, sobre as quais são feitas a seleção e a redução de pontos e feições homólogos nos pares da seqüência. Por meio da interseção fotogramétrica, calculam-se as coordenadas-objeto dos pontos e feições homólogos para a reconstrução 3D. Tendo por base o algoritmo de Canny para a detecção automática de bordas em uma seqüência de imagens de ruas e rodovias, o artigo focaliza inicialmente a determinação empírica dos parâmetros (desvio-padrão σ e limiar alto T_a e baixo T_b), requeridos pelo algoritmo. Posteriormente, segue a análise da qualidade, em termos do deslocamento, das bordas detectadas automaticamente semelhantes às feições retas selecionadas e extraídas visualmente (manualmente), por um operador humano, que as toma como corretas, portanto, de referência para a comparação e avaliação da qualidade da extração automática. Os resultados dos testes são discutidos e mostram que a qualidade da detecção automática, medida por uma quantidade de acertos e erros, varia com os parâmetros desvio-padrão e limiar alto e baixo, determinados empiricamente, e também com o ambiente (rua ou rodovia) da seqüência de imagens.

Palavras chaves: sistema móvel de mapeamento, seqüência de imagens, detecção de bordas, avaliação da qualidade.

ABSTRACT

Terrestrial mobile mapping systems map interest features along roads such as poles, traffic signs, curb lines, garbage cans etc. The lab work, concerned to the object reconstruction, consists of transforming the video into still images on which homologous points and features of the road sequence are selected and measured. By means of photogrammetric intersection the object coordinates of these features and points are computed for 3D reconstruction. Using Canny algorithm for the automatic edge detection in a road image sequence the article initially focuses on the empiric determination of the required parameters (standard deviation σ and high T_a and low T_b threshold). Then it presents the quality in terms of displacement of the automatically detected edges similar to those visually (manually) selected straight features extracted by a human operator that takes them as correct, therefore, as reference for the automatic extraction comparison and the quality evaluation. The results of the tests are discussed and show that the quality of the automatic detection – measured by a quantity of rights and wrongs – vary accordingly to the empirically determined standard deviation and high and low thresholds and also to the image sequence environment (street or road).

Keywords: mobile mapping system, image sequences, edge detection, quality evaluation.

1. INTRODUÇÃO

Um sistema terrestre de mapeamento móvel consiste na integração de sensores de navegação e de coleta de dados. Sensores de posicionamento e de navegação orientam a câmara no momento da tomada das imagens. As câmaras são sincronizadas com os sensores de posicionamento, de tal forma que se conhece os elementos de orientação exterior e torna-se possível a automatização da reconstrução tridimensional (3D) (TAO et al., 2001). Um protótipo de baixo custo é apresentado em Silva et al. (2003), cujo segmento móvel é denominado de Unidade Móvel de Mapeamento Digital (UMMD). O mesmo protótipo também é detalhado por Guardia et al. (1999) e Delgado et al. (2000).

A principal tarefa do mapeamento móvel terrestre é mapear feições de interesse ao longo de ruas ou rodovias, como, por exemplo, postes, sinais de trânsito, lixeiras etc. A grande quantidade de dados eleva os custos para extrair manualmente essas informações e, portanto, justificam-se os esforços para automatizar esse processo.

Após o levantamento em campo, o trabalho em laboratório consiste em transformar as imagens de vídeo em imagens paradas (*still images*) para que se possa coletar pontos homólogos nos pares e fazer a reconstrução 3D através do método da interseção fotogramétrica. O processo de extração de pontos homólogos tem sido feito manualmente e consome muito tempo (GUARDIA et al., 1999; DELGADO et al., 2000).

Com o intuito de reduzir o tempo de extração de pontos homólogos no sistema, foi implementado o algoritmo de Canny (1986) para detectar bordas automaticamente. Dentre as várias bordas, há interesse particular nas retas e nestas alguns pontos que podem funcionar como homólogos, quando comuns a ambas as imagens do par.

Entretanto, o resultado da aplicação do mencionado algoritmo varia com os parâmetros desvio-padrão e limiares alto e baixo. Ademais, dada a especificidade das imagens terrestres horizontais dos levantamentos de ruas e rodovias, no que tange à geometria e às condições de iluminação, tais parâmetros precisam de ser determinados empiricamente.

Este trabalho apresenta os resultados referentes aos experimentos realizados em uma seqüência de pares de imagens de ruas e rodovias, com o intuito de conhecer a resposta do algoritmo de Canny, diante de uma situação ou aplicação incomum. Os resultados sugerem os valores mais adequados para os parâmetros. A avaliação dos resultados é feita por meio de um controle de qualidade que compara feições retas selecionadas e extraídas visualmente com as bordas semelhantes, detectadas automaticamente, que coincidam com as feições selecionadas visualmente.

2. DETECÇÃO DE BORDAS

Em imagens, a frequência é definida pela variação dos níveis de cinza e áreas de alta frequência são aquelas onde essas variações mais ocorrem. As regiões de baixa frequência são caracterizadas pelas áreas em que a imagem permanece sem variação (GONZALEZ e WOODS, 1992).

Uma borda ou aresta corresponde a uma descontinuidade significativa (alta frequência) na intensidade dos tons de cinza dos pixels que formam a imagem. Um operador que detecta essa variação é chamado de detector de bordas (VALE e DAL POZ, 2002). Os operadores mais utilizados são os que fazem uso da primeira derivada (ponto de máximo ou de mínimo) e os que fazem uso da segunda derivada (cruzamento por zero ou *zero crossing*) (GONZALEZ e WOODS, 1992; PARKER, 1997).

Os principais passos para a detecção de bordas são: filtragem, realce e limiarização. A filtragem é necessária para reduzir o ruído presente na imagem, pois um ruído também irá apresentar mudança no gradiente e pode resultar em uma borda falsa, mas uma redução do ruído pode reduzir ou até mesmo eliminar bordas. O realce é o cálculo da magnitude do gradiente e a limiarização consiste em determinar quais bordas serão consideradas, pois não é possível saber o valor máximo da magnitude do gradiente que realmente corresponde a uma borda.

Canny (1986) estabeleceu que um bom algoritmo detector de bordas deve atender a três condições básicas: i) *baixa taxa de erro*: deve haver uma baixa probabilidade de falhar ao detectar verdadeiros pontos de borda e uma baixa probabilidade de detectar falsas bordas; ii) *localização*: os pontos marcados como bordas devem estar o mais próximo possível do centro da verdadeira borda; iii) *resposta*: deve haver apenas um máximo como resposta em uma borda. Além disso, ele modelou matematicamente estas três condições e desenvolveu um detector considerado ideal que minimiza os ruídos e otimiza a localização das bordas na imagem (VALE e DAL POZ, 2002).

O filtro ótimo construído por Canny pode ser aproximado pela primeira derivada da função gaussiana $G(x)$:

$$G'(x) = -\frac{x}{\sigma^3 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

cujo gráfico, com desvio-padrão (σ) igual a 1, pode ser visto na figura 1.

Como esta função é separável, ela pode ser aplicada em uma imagem (2D), primeiramente nas linhas e em seguida nas colunas. O grau de suavização a ser utilizado depende do desvio-padrão da função gaussiana. Quanto maior for o valor de σ , mais borrada é a imagem resultante e mais espessa se torna a borda, dificultando assim a sua localização exata.

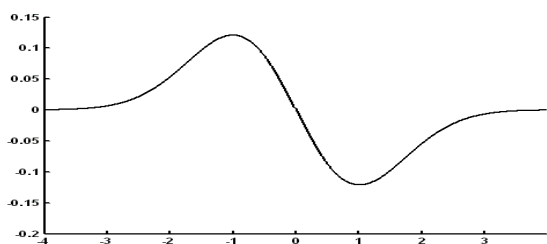


Fig. 1: Primeira derivada da função gaussiana.

Canny propôs também a supressão não máxima e a histerese. A supressão não máxima é um processo de afinamento das bordas e se baseia no princípio de que a derivada de um ponto de borda deve ter valor máximo.

A magnitude da imagem terá valores maiores onde o gradiente for maior, porém, isso não é o bastante para identificar as bordas. A localização exata de uma borda é o ponto onde a sua derivada é um máximo local. Sendo assim, a supressão não máxima é a anulação dos pixels, cujos valores não são máximos locais, na direção perpendicular à borda. Esse processo proporciona um afinamento e uma melhor localização das bordas, além de fazer com que somente as bordas que apresentam pontos com magnitude de grande intensidade permaneçam. A supressão não máxima consiste na eliminação de todos os pixels ao longo da linha do gradiente, que não são máximos locais.

Mesmo após a suavização da imagem e da supressão dos pixels que não são máximos locais, existe ainda a necessidade de se realizar uma limiarização para completar o processo de segmentação da imagem, chamada de histerese, que consiste numa dupla limiarização, pois ao se utilizar apenas um limiar, o resultado apresentará bordas fragmentadas. Isso ocorre porque a magnitude dos pixels ao longo de uma borda dificilmente se mantém constante. Tal processo é aplicado na magnitude da imagem e utiliza dois limiares: um limiar alto T_a e um limiar baixo T_b . Assim, em primeiro lugar, faz-se a limiarização a partir do limiar alto, em geral, entre 80% e 90%. Todos os pontos que estiverem acima de T_a serão classificados como pontos de borda, formando um conjunto L_1 . O limiar baixo é utilizado para eliminar todos os pontos que estiverem abaixo de T_b . Geralmente, o valor utilizado para T_b é a metade ou um terço de T_a (CANNY, 1986).

Ao realizar o procedimento acima, em virtude da não uniformidade das bordas, elas ainda poderiam aparecer fragmentadas. Para resolver este problema, utilizam-se os pontos que ficaram entre T_a e T_b (para realizar um processo de complementação das bordas), que formam então um conjunto L_2 . Desse modo, os pontos de L_2 somente são utilizados quando for encontrada uma descontinuidade na borda que passou no limiar alto.

O algoritmo consiste em buscar no conjunto de pontos detectados L_1 , a ocorrência de extremidades de contornos e, no segundo conjunto de pontos L_2 , escolher os pixels que completam este contorno. O algoritmo efetua este procedimento até que não haja mais fragmentos de contorno isolados em L_1 , ou que não

existam mais pontos em L_2 que possam ser aproveitados. Com isso, o resultado final é uma imagem onde aparecem as bordas detectadas na imagem original. Vale e Dal Poz (2002) detalham por completo o algoritmo.

3. IMPLEMENTAÇÃO E TESTES

Foi desenvolvido um programa em linguagem C/C++, em ambiente Builder 5.0, que implementa o algoritmo de Canny, para uso nas imagens obtidas com a UMMD. O programa abre um conjunto de imagens, solicita os parâmetros de detecção, executa o algoritmo e armazena os resultados, tanto para a sequência da direita quanto para a da esquerda.

As imagens obtidas no processamento do vídeo estão no formato BMP de 24 bits (RGB) e o processamento se dá sobre a luminância da imagem, cuja equação é (GONZALEZ e WOODS, 1992):

$$Lum = 0,299 * R + 0,587 * G + 0,114 * B \quad (2)$$

na qual R, G e B são os canais vermelho, verde e azul respectivamente.

As imagens foram obtidas em dois levantamentos com a UMMD, um na área urbana da cidade de Presidente Prudente/SP, e o outro em uma rodovia intermunicipal nesta região.

O limiar alto mais utilizado e recomendado para o processo de histerese está em torno de 80%. Canny (1986) sugere que o limiar baixo, por sua vez, seja a metade ou um terço do limiar alto. Tendo em vista estas recomendações, utilizou-se, para este parâmetro, o valor de 40%. Pequenas variações na escolha do limiar baixo não proporcionam grandes diferenças no resultado final, conforme os testes realizados. O valor ideal para estes parâmetros varia de imagem para imagem, dependendo da qualidade da mesma, da maneira como estão dispostos os objetos na cena, das condições de iluminação etc. Uma maneira de estimar esses valores é a partir de uma análise visual e empírica. Para isso foram feitos testes em imagens de vias de transporte pavimentadas urbanas (fig. 2 e fig. 4) e de uma estrada de rodagem intermunicipal (fig. 3), atribuindo valores diferentes para σ e T_a .

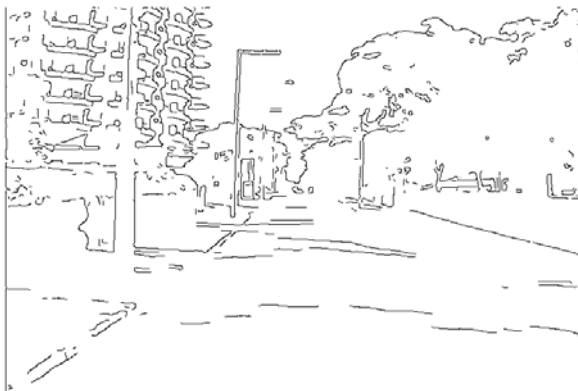
Quanto maior o valor de σ , mais borrada será a imagem e, como consequência, mais intensamente serão atenuados ou eliminados os ruídos e as bordas mais fracas. Ao passo que, quanto menor o valor de σ , maior a quantidade de informações detectadas, neste caso desnecessárias. Do mesmo modo, um valor alto de T_a selecionará somente as bordas mais intensas. Entenda-se por informação desnecessária, tudo aquilo que não tiver interesse para o mapeamento, como sombras, nuvens, janelas de prédios, carros, pessoas etc. As imagens obtidas pela UMMD e, em geral, as de qualquer sistema de mapeamento móvel, estão freqüentemente sujeitas a esse tipo de problema.



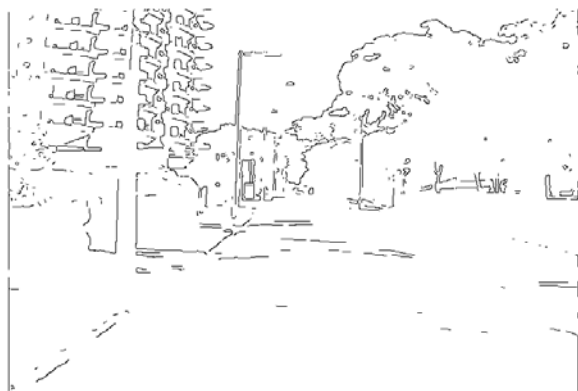
(a) Imagem em tons de cinza;



(b) $\sigma = 1,0$; $T_a = 80\%$;



(c) $\sigma = 1,5$; $T_a = 85\%$;



(d) $\sigma = 1,0$; $T_a = 90\%$;

Fig. 2 – Teste em uma imagem com sombra e variação dos parâmetros.

A fig. 2a mostra um teste realizado para diferentes valores de σ e de T_a em uma via urbana com uma sombra ocupando grande parte da imagem (considerada mal iluminada). Percebe-se que σ igual a 1,5 e T_a igual a 85% (fig. 2c) atenuam de maneira visualmente satisfatória os ruídos e as informações desnecessárias. Valores como 90% para T_a fragmentam várias feições de interesse para o mapeamento, como o limite da sarjeta, os postes e os muros (fig. 2d). Nesse exemplo, os valores ideais são $\sigma=1,5$ e $T_a=85\%$.

A figura 3 mostra outro teste em uma imagem de rodovia. A imagem de entrada, ao contrário da fig. 2a, possui boas condições de iluminação (ausência de sombras). Neste caso, é possível perceber claramente a diferença no resultado ao se variar o desvio-padrão e o limiar alto. Em virtude das melhores condições de iluminação, os valores ideais dos parâmetros podem ser maiores que os do exemplo anterior ($\sigma = 2,0$ e $T_a = 90\%$).

Foram realizados vários testes com diferentes imagens e diferentes valores para os parâmetros. Levando em conta todos os testes realizados, chegou-se empiricamente a um conjunto de valores ideais dos parâmetros do detector de Canny para as imagens do sistema móvel de mapeamento, conforme apresentados na tabela 1. Os parâmetros do conjunto 1 apresentaram melhores resultados para imagens mal iluminadas e os parâmetros do conjunto 2 são melhores para imagens bem iluminadas.

TABELA 1 – VALORES DOS PARÂMETROS DO DETECTOR DE CANNY PARA AS IMAGENS DO SISTEMA MÓVEL DE MAPEAMENTO.

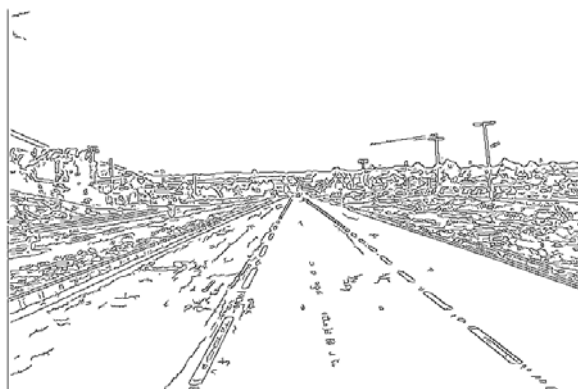
PARÂMETROS	Imagens Urbanas ou de Rodovias	
	Conjunto 1	Conjunto 2
Desvio-padrão (σ)	1,5	2,0
Limiar alto (T_a)	85%	90%
Limiar baixo (T_b)	40%	40%

Após os valores dos parâmetros terem sido definidos empiricamente, foram então realizados experimentos com seqüências de estéreo-pares de imagens, tomadas com intervalo de um segundo, com o intuito de detectar bordas automaticamente.

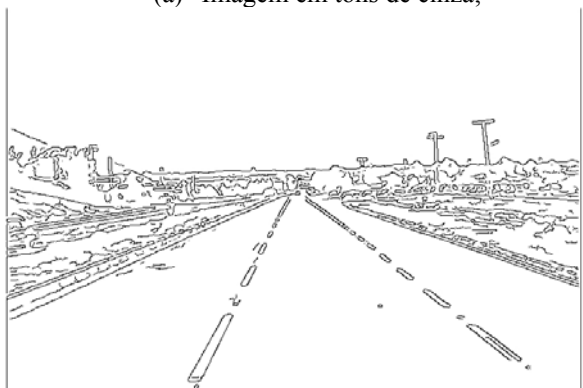
A fig. 4 apresenta as bordas detectadas com os parâmetros do conjunto 1 de dois estéreo-pares de imagens em uma seqüência. De uma análise preliminar e visual percebe-se que feições detectadas na imagem da esquerda também aparecem (na região de sobreposição) na imagem da direita. É importante observar que as bordas detectadas em um par também aparecem no par seqüente, como é o caso da fig. 4. É possível notar que bordas detectadas na fig. 4g e fig. 4h também aparecem nas fig. 4c e fig. 4d, que são anteriores.



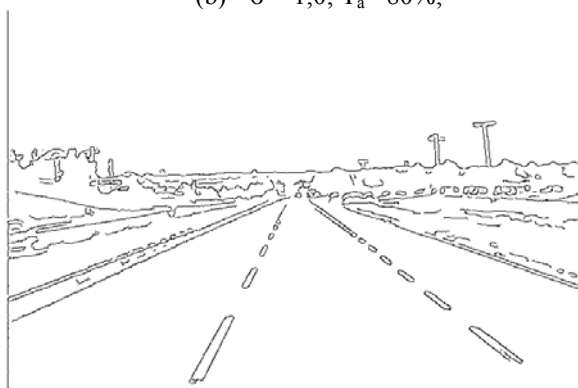
(a) Imagem em tons de cinza;



(b) $\sigma = 1,0$; $T_a = 80\%$;



(c) $\sigma = 1,5$ $T_a = 85\%$;



(d) $\sigma = 2,0$ $T_a = 90\%$;

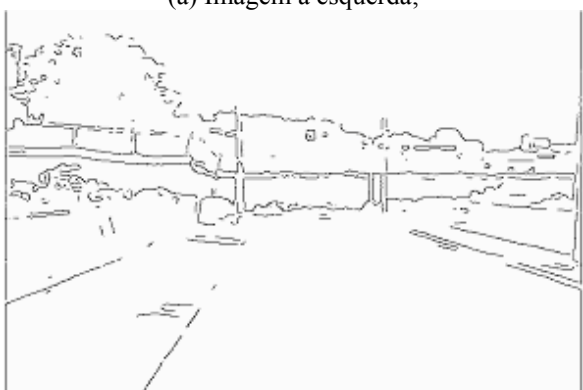
Fig. 3 – Testes em uma imagem bem iluminada de uma rodovia com variação dos parâmetros.



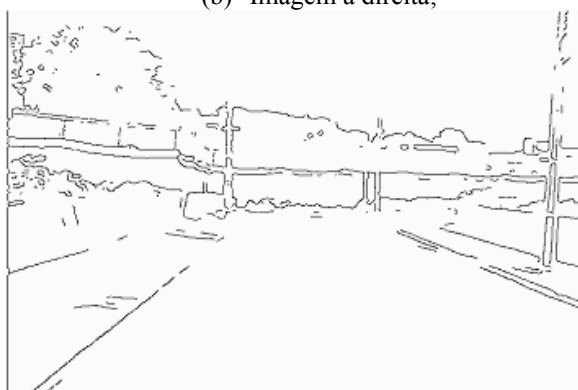
(a) Imagem à esquerda;



(b) Imagem à direita;



(c) Bordas detectadas de (a);



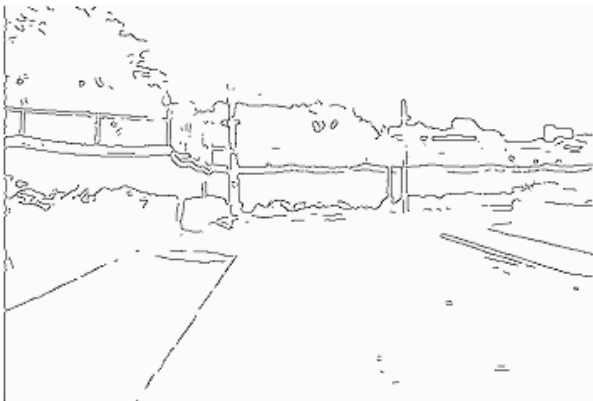
(d) Bordas detectadas de (b);



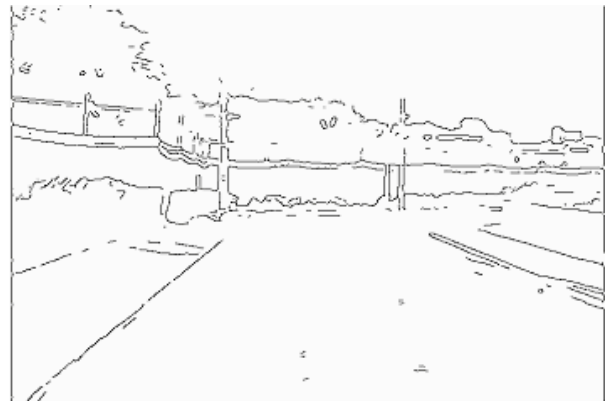
(e) Imagem à esquerda após 1 s;



(f) Imagem à direita após 1 s;



(g) Bordas detectadas de (e);



(h) Bordas detectadas de (f);

Fig. 4 – Bordas detectadas em dois estéreos-pares de uma seqüência de imagens com os valores da tabela 1.

Outra observação particularmente importante é que as bordas que correspondem a feições retas também ficam definidas. Em trabalhos futuros, essas feições serão utilizadas para o controle da qualidade do detector (inclinação e intercepto dos segmentos de retas) e para a dupla interseção fotogramétrica.

4. CONTROLE DE QUALIDADE

Para avaliar quantitativamente a qualidade das bordas detectadas automaticamente, com os parâmetros definidos empiricamente, foram extraídas manualmente (visualmente) feições por um operador que marcava dois pontos em uma feição, que eram ligados por uma reta, utilizando um programa de edição de imagens.

Foram selecionadas manualmente feições em uma seqüência de sete estéreos-pares de imagens de cidade e outra seqüência de sete estéreos-pares de imagens de rodovia. As imagens utilizadas são oriundas de um mesmo levantamento e foram selecionadas de maneira a representar diferentes configurações da via, como por exemplo, um trecho da rua em linha reta, um outro trecho curvo, uma rotatória, um cruzamento etc. As feições dessas imagens formam o conjunto das imagens de referência e foram classificadas como bem iluminadas. Um exemplo de uma imagem de referência é ilustrado na fig. 5b.

A extração manual de feições não é um processo completamente eficiente, pois é possível que alguns pixels selecionados não coincidam perfeitamente

com a borda. Além disso, o algoritmo de traçado da reta, entre os dois pontos de uma feição, não leva em consideração a mudança de intensidade, apenas a geometria da reta. Essa opção foi feita em função da extração manual de pontos (pixels) em uma feição ser muito demorada e exaustiva para o operador e conseqüentemente de confiabilidade menor ou duvidosa. De qualquer modo, a detecção manual de feições parece ser a maneira mais viável de se estabelecer um padrão de comparação, sobretudo quando as imagens são de ambientes não controlados.

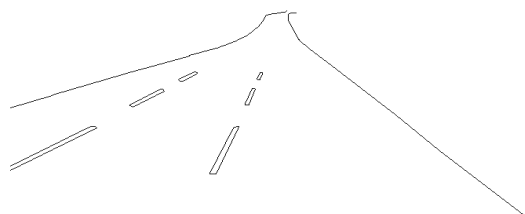
Com as feições marcadas nas imagens, as mesmas foram separadas do fundo (pois tinha-se o controle do valor da luminância destas feições). Dessa maneira, as posições (i, j) de todos os pixels das feições de referência eram conhecidos.

Os dois conjuntos de parâmetros escolhidos como ideais (conjunto 1: $\sigma=1,5$; $T_a=85\%$; $T_b=40\%$; conjunto 2: $\sigma=2,0$; $T_a=90\%$; $T_b=40\%$) foram aplicados em ambas as seqüências. Em cada imagem da seqüência, a partir de um pixel da feição de referência na posição (i,j), comparou-se com as bordas detectadas automaticamente na respectiva imagem. Ocorrendo coincidência entre o pixel de referência e o detectado automaticamente, o mesmo era classificado como de ótima qualidade. Se não houvesse pixel na posição (i, j), buscava-se na vizinhança-8, na imagem com detecção automática, se havia ou não pixel detectado. No caso de existir um pixel na vizinhança-8, o mesmo era classificado como de boa qualidade e era marcado para

evitar mais do que uma comparação com o mesmo pixel. Não existindo pixel na vizinhança-8, era computado um erro. A busca na vizinhança-8 foi feita, considerando que o algoritmo de Canny desloca a borda.



(a)



(b)

Fig. 5 – Imagem original (a); Feições extraídas manualmente usando segmentos de retas (b).

Para visualização da comparação foi construída uma imagem mostrando o resultado. Na imagem resultante (fig. 6), os pixels representados em vermelho correspondem aos pixels de referência; os pixels em verde correspondem àqueles que foram detectados apenas pelo método automático; e os de cor azul são aqueles que aparecem exatamente na mesma posição tanto na imagem de referência quanto na imagem extraída (ótima qualidade).

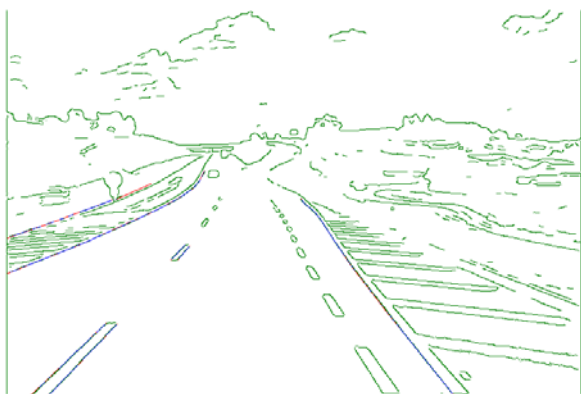


Fig. 6 – Imagem comparativa utilizada no controle de qualidade.

Uma vez estabelecidas as cores para cada possível ocorrência, a contagem dos pixels detectados com boa qualidade consiste em procurar, nas imagens comparativas, pixels de cor verde na vizinhança-8 dos vermelhos, pois, como é possível perceber pela fig. 6, as feições vermelhas, que não foram detectadas, estão bem próximas às verdes, que foram detectadas pelo algoritmo. A contagem do pixel presente na vizinhança-8 foi feita de maneira que ele fosse contado apenas uma vez.

As tabelas 2 e 3 apresentam os resultados do controle de qualidade com as frequências relativas de detecção de ótima e boa qualidade, bem como o erro obtido para as amostras de imagens.

TABELA 2 – CONTROLE DE QUALIDADE PARA AS IMAGENS DE CIDADE.

Parâmetros	Ótima qualidade	Boa qualidade	Erro
Conjunto 1	44,5 %	35,0 %	20,5 %
Conjunto 2	36,7 %	27,6 %	35,7 %

TABELA 3 – CONTROLE DE QUALIDADE PARA AS IMAGENS DE RODOVIA.

Parâmetros	Ótima qualidade	Boa qualidade	Erro
Conjunto 1	53,0 %	29,8 %	17,2 %
Conjunto 2	36,4 %	24,2 %	39,4 %

(conjunto 1: $\sigma=1,5$; $T_a=85\%$; $T_b=40\%$;
conjunto 2: $\sigma=2,0$; $T_a=90\%$; $T_b=40\%$).

Percebe-se das tabelas 2 e 3 que os parâmetros do conjunto 1 apresentaram menor percentagem de erro. A realização do teste estatístico t-pareado confirmou diferenças significativas nas duas médias ($p < 0,05$). Ou seja, a taxa de acerto usando os parâmetros do conjunto 1 é melhor do que a taxa de acerto usando os parâmetros do conjunto 2, considerando os dois tipos de imagens (de cidade e de rodovia), ao contrário da análise visual feita anteriormente. O conjunto 2 elimina mais ruídos e mais informações desnecessárias, mas, por outro lado, elimina também algumas feições importantes para o mapeamento.

5. CONCLUSÃO

Buscou-se estabelecer os parâmetros para a detecção automática de bordas com o algoritmo de Canny em pares de seqüências de imagens obtidas com câmaras de vídeo digital de um sistema móvel de mapeamento.

Inicialmente, foram estimados empiricamente dois conjuntos de parâmetros mediante observação visual (tab. 1) necessários para a aplicação do algoritmo, sobretudo porque as imagens são de ambientes não controlados. Posteriormente, um controle de qualidade, que tem por base a contagem das coincidências dos pixels das feições de referência (manual ou visual) e extraídas (algoritmo), verificou que os valores do

conjunto I correspondem melhor tanto para as imagens de cidade quanto de rodovia.

Levando-se em consideração que a detecção automática estimou exata ou aproximadamente (vizinhança-8) cerca de 80% dos pixels, é possível afirmar que os resultados são satisfatórios. Depreende-se que a percentagem de erro da ordem de 20% é devida em parte à falha do algoritmo de Canny (bordas fragmentadas) e em parte ao deslocamento da borda em quantidade superior a um pixel.

Em trabalhos futuros, pretende-se fazer um controle de qualidade, que à primeira vista parece ser mais rigoroso do que a simples contagem de coincidências (acertos) e não coincidências (erros) de pixels. O método utilizará a inclinação (a) e o intercepto (b) das feições retas de referência e as detectadas de forma automática, cujos parâmetros serão estimados por meio de uma regressão linear com as posições (coordenadas da imagem) dos pixels detectados. Também está sendo desenvolvida a implementação de uma melhoria do algoritmo de Canny, revisado de acordo com Ding & Goshtasby (2001), juntamente com o estabelecimento da correspondência entre as feições em um estéreo-par de imagens para a triangulação automática.

Finalmente, os processos de automação fotogramétrica implementados sobre imagens terrestres horizontais obtidas por um sistema móvel de mapeamento têm grande dificuldade de lidar com a geometria em perspectiva (variação continuada da escala) e também com as condições de iluminação natural. O artigo, em suma, mostra avanços no domínio das técnicas de extração de bordas nessas condições e, sobretudo, demonstra que os resultados, apurados sob um método de controle de qualidade, são aceitáveis, mas passíveis de alguma melhoria, conforme se espera das modificações e adaptações mencionadas no parágrafo anterior.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPESP, pelo suporte, sob a forma de bolsa de iniciação científica (Processo FAPESP 03/01296-9) e financiamento à pesquisa (Processo FAPESP 03/00552-1).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CANNY, J. A. Computational approach to edge detection. **IEEE Trans. On Pattern Analysis and Machine Intelligence**, v. PAMI-8(6), p. 679-698, 1986.
- DELGADO, F. F. O., GALLIS, R. B. A., MATSUOKA, M. T. Mapeamento de rodovias utilizando a Unidade Móvel de Mapeamento Digital, **Trabalho de Graduação do Curso de Engenharia Cartográfica**. Presidente Prudente, 2000. 72 p.
- DING, L., GOSHTASBY, A. On the Canny edge detector. **Pattern Recognition**, v. 34, p.721-725, 2001.
- GONZALEZ, R. C., WOODS, R. E. **Digital image processing**. New York, Addison -Wesley, 1992. 716p.
- GUARDIA, M. C., REISS, M. L. L., SILVA, R. A. C. Levantamento topográfico usando o Sistema Móvel de Mapeamento Digital. **Trabalho de Graduação do Curso de Engenharia Cartográfica**. Presidente Prudente, 1999, 111 p.
- PARKER, J. R. **Algorithms for image processing and computer vision**. New York, John Wiley & Sons, 1997. 417p.
- SILVA, J. F. C., CAMARGO, P. O., GALLIS, R. B. A. Development of a low-cost mobile mapping system: a south american experience. **Photogrammetric Record**, v. 18, n. 101, p.5-26, 2003.
- TAO, C., CHAPMAN, M. A., CHAPLIN, B. A. Automated processing of mobile mapping image sequences. **Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, v. 55, p. 330-346, 2001.
- VALE, G. M., DAL POZ, A. P. O processo de detecção de bordas de Canny: fundamentos, algoritmos e avaliação experimental. In: Simpósio Brasileiro de Geomática, Presidente Prudente, 2002. **Anais**. p.292-303, 2002.

Recebido em 30 de agosto de 2004 – Aceito em 20 de dezembro de 2004.