

MEDIÇÃO DE ALVOS CIRCULARES COM QUALIDADE SUBPIXEL

RENATO CÉSAR DOS SANTOS⁽¹⁾

MAURÍCIO GALO⁽²⁾

JÚLIO KIYOSHI HASEGAWA⁽²⁾

Universidade Estadual Paulista - Unesp

Faculdade de Ciências e Tecnologia - FCT

⁽²⁾ Departamento de Cartografia, Presidente Prudente – SP

⁽¹⁾ Bolsista de IC, PIBIC/CNPq

renato_cstos@hotmail.com, {galo, hasegawa}@fct.unesp.br

RESUMO – Nas aplicações da Fotogrametria Digital e Visão Computacional cujo objetivo é a obtenção de informações de natureza geométrica, através de um conjunto de imagens, torna-se relevante a medição de entidades pontuais com qualidade e, se possível, de modo automático ou semi-automático. Em algumas aplicações Fotogramétricas estas medidas devem possuir uma acurácia com qualidade de subpixel, como é o caso da calibração de câmaras digitais, dentre outras. Visando a determinação da posição de alvos circulares com acurácia subpixel, este artigo abordará o método que ajusta uma elipse aos alvos, bem como a análise dos procedimentos incorporados a este método de forma a eliminar pontos ruidosos decorrentes de problemas no dimensionamento das sub-janelas no entorno dos alvos ou devido à presença de eventuais descontinuidades nas bordas. Experimentos com alvos reais foram realizadas a partir de imagens capturadas no campo de calibração da FCT-Unesp.

Palavras chave: medição de alvos circulares com qualidade subpixel, calibração de câmaras, Fotogrametria Digital.

ABSTRACT – In applications of Digital Photogrammetry and Computer Vision whose objective is the obtaining information of geometric nature through a collection of images, it becomes relevant the measurement of punctual entities with quality and, if possible, in an automatic or semi-automatic way. In some Photogrammetric applications, as camera calibration for example, these measures should present accuracy with subpixel quality. In order to determine the position of circular targets with subpixel accuracy, this article will discuss the method which fits an ellipse to the targets and the analysis of the procedures incorporated into this method in order to remove noisy points due to problems in the design of the sub-windows surrounding the target or due to the presence of possible discontinuities at the edges. Experiments with real targets were performed through images captured in the camera calibration test field of FCT-Unesp.

Key words: subpixel estimation of circular targets, camera calibration, Digital Photogrammetry.

1 INTRODUÇÃO

Nas aplicações da Fotogrametria Digital e Visão Computacional cujo objetivo consiste na obtenção de informações de natureza geométrica, através de um conjunto de imagens, é frequente a necessidade da determinação da posição das entidades pontuais. Em grande parte das aplicações, a posição de entidades pontuais é expressa por valores inteiros (linha; coluna) (GALO e TOZZI, 2002). No entanto, em algumas aplicações Fotogramétricas, como a calibração de câmaras digitais, a determinação de pontos com acurácia subpixel é relevante, como destacam Tang e Heipke (1996). A fim de proporcionar a estimativa da posição de pontos sobre imagens digitais com qualidade subpixel,

torna-se necessário a utilização de ferramentas semi-automáticas ou automáticas.

Considerando a necessidade de medidas com qualidade subpixel e que os alvos circulares ao serem fotografados com certa inclinação passam a ser elípticos, no plano imagem (OPTEKA, 2004), neste trabalho é avaliada a determinação do centro do alvo a partir do ajuste de elipses, sendo incorporada, a eliminação de pontos ruidosos, de modo automático.

2 OBJETIVO

O principal objetivo deste artigo é apresentar algumas otimizações ao método que ajusta uma elipse ao contorno de alvos circulares. Com este propósito foram

desenvolvidos, implementados e avaliados procedimentos de eliminação de pontos ruidosos decorrentes de problemas no dimensionamento das sub-janelas no entorno dos alvos ou devido à presença de eventual descontinuidade nas bordas.

3 AJUSTE DA ELIPSE E DETECÇÃO DE ERRO GROSSEIRO

Quando se realiza a captura de um alvo circular, seja usando uma câmara analógica ou digital, ocorre à formação de um cone, o qual envolve o alvo fotografado. A Figura 1 mostra a geometria envolvida na geração da elipse, correspondente a um objeto circular, devido à inclinação e projeção perspectiva.

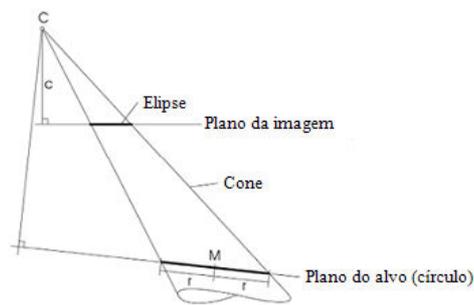


Figura 1 – Cone formado no momento da captura da imagem
Fonte: Adaptado de Opteka (2004).

A intersecção do cone com o plano da imagem gera uma elipse (Figura 1), podendo esta ser determinada com base na equação geral das cônicas ou até mesmo na equação geral do segundo grau (OPTEKA, 2004). No caso deste trabalho utilizou-se a equação geral do segundo grau, como modelo funcional:

$$a_1 x^2 + a_2 xy + a_3 y^2 + a_4 x + a_5 y = 1 \quad (1)$$

onde:

a_1, a_2, a_3, a_4 e a_5 são os coeficientes do polinômio geral do segundo grau.

3.1 Ajuste de uma Elipse

Partindo da Equação 1, a estimação dos coeficientes pode ser feita, com algumas considerações sobre o modelo estocástico, através do método paramétrico, o qual se baseia no princípio do MMQ (Método dos Mínimos Quadrados). A utilização deste possibilita escrever equações de observações lineares, eliminando a necessidade de iterações para determinar os parâmetros, simplificando a solução.

Os coeficientes do polinômio do segundo grau podem ser estimados pela seguinte expressão (GEMAEL, 1994):

$$X_a = (A^T P A)^{-1} (A^T P L_b) \quad (2)$$

onde:

L_b – vetor das observações ($n \times 1$);

P – matriz peso ($n \times n$);

A – matriz Jacobiana ($n \times u$).

É importante salientar que ao utilizar a Equação 1, como modelo funcional no ajustamento, assume-se que o vetor L_b é composto por pseudo-observações, nesse caso específico por valores unitários. Além disso, as coordenadas x e y dos pontos do contorno do alvo, são consideradas livres de erro, possibilitando a aplicação do método paramétrico.

Considerando que as coordenadas de n pontos “pertencentes” ao contorno da elipse são conhecidas, é possível escrever as equações de observações para os n pontos observados. Lembrado que o modelo matemático para este método é $F(X_a) = L_a$ tem-se que as equações de observações são construídas da seguinte maneira:

$$\begin{cases} a_1 x_1^2 + a_2 x_1 + a_3 y_1^2 + a_4 x_1 + a_5 y_1 = 1 \\ a_1 x_2^2 + a_2 x_2 + a_3 y_2^2 + a_4 x_2 + a_5 y_2 = 1 \\ \vdots \\ a_1 x_n^2 + a_2 x_n + a_3 y_n^2 + a_4 x_n + a_5 y_n = 1 \end{cases} \quad (3)$$

A partir das equações de observações (3), a matriz $A = \frac{\partial F}{\partial X_a} \Big|_{X_0}$ pode ser expressa da seguinte forma:

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial a_1} \Big|_{X_0} & \dots & \frac{\partial F_1}{\partial a_5} \Big|_{X_0} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial F_n}{\partial a_1} \Big|_{X_0} & \dots & \frac{\partial F_n}{\partial a_5} \Big|_{X_0} \end{bmatrix}_{n \times 5} \quad (4)$$

Fazendo as derivadas indicadas tem-se:

$$A = \begin{bmatrix} x_1^2 & x_1 y_1 & y_1^2 & x_1 & y_1 \\ x_2^2 & x_2 y_2 & y_2^2 & x_2 & y_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n^2 & x_n y_n & y_n^2 & x_n & y_n \end{bmatrix}_{n \times 5} \quad (5)$$

O vetor das observações é composto por um conjunto de n elementos, que pode ser escrito por $L_b = [1 \ 1 \ \dots \ 1]^T$.

Quando se realiza a estimativa de um valor ou de um conjunto de valores (parâmetros), estes devem estar acompanhados de um indicador da qualidade. No caso do método paramétrico este indicador é representado pela matriz de variância e covariância (MVC), que é dada por $\Sigma_{X_a} = \hat{\sigma}_0^2 (A^T P A)^{-1}$ onde $\hat{\sigma}_0^2$ é o fator de variância a posteriori, podendo ser calculado pela seguinte expressão (GEMAEL, 1994):

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{V^T P V}{n-u} \quad (6)$$

sendo V é o vetor dos resíduos ($V=AX_a-L_b$).

3.2 Determinação do centro da elipse

Considerando o caso particular do método que ajusta uma elipse ao alvo, pode-se provar que a posição central da elipse (x_c, y_c) é dada por (OPTEKA, 2004):

$$\begin{cases} x_c = \frac{a_1 a_5 - 2a_3 a_4}{4a_1 a_3 - a_2^2} \\ y_c = \frac{a_2 a_4 - 2a_1 a_5}{4a_1 a_3 - a_2^2} \end{cases} \quad (7)$$

A precisão das componentes do ponto central estimado pelas Equações 7 pode ser determinada, utilizando o conceito de propagação de variância e covariância (Equação 8), como pode-se ver em Santos (2011), uma vez que cada um dos coeficientes utilizados no cálculo da posição central do alvo é acompanhado pela sua respectiva precisão.

$$\Sigma_Y = D \Sigma_X D^T \quad (8)$$

onde:

Σ_Y - MVC dos parâmetros estimados;

Σ_X - MVC das quantidades medidas;

$$D = \left. \frac{\partial F}{\partial X} \right|_{X_0} \Rightarrow \text{Matriz Jacobiana.}$$

3.3 Teste estatístico para a detecção de erros grosseiros nas observações

A estimação dos parâmetros pelo MMQ proporciona resíduos que possuem uma mistura de todos os tipos de erros, sendo impossível separá-los de acordo com sua classificação. Algumas propriedades estatísticas dos resíduos são requeridas para resolver o problema. Um *outlier* é definido como um resíduo que contradiz tal propriedade estatística. Independente da diferença entre a definição de erro grosseiro e *outlier*, assume-se que os *outliers* detectados são causados por erros grosseiros (CAMARGO, 2000).

Segundo Camargo (2000) existem diversos métodos para identificação de erros grosseiros (*outliers*), entre os quais se destacam: o método de *Pope* e o método de *Baarda*.

Os dois métodos baseiam-se em uma hipótese básica ($v_i=0$) e outra alternativa ($v_i \neq 0$), sendo que a hipótese básica só será aceita caso o resíduo padronizado (w_i) satisfaça: $-N_{\alpha_0/2} < w_i < N_{\alpha_0/2}$ para o método de *Pope*, ou $-\tau_{\alpha_0/2, gl} < w_i < \tau_{\alpha_0/2, gl}$ para o método de *Baarda*. Neste teste $N_{\alpha_0/2}$ é o valor da tabela Normal com nível de

significância de $\frac{\alpha_0}{2}$, enquanto que $\tau_{\alpha_0/2, gl}$ corresponde ao valor da tabela *Tau* com nível de significância de $\frac{\alpha_0}{2}$, e com gl graus de liberdade.

4 MATERIAL E MÉTODO

4.1 Material

Na execução das atividades, que estão sendo abordadas neste artigo, foram utilizados os seguintes materiais e sistemas:

- Software Scilab 4.1.2;
- Software Matlab 7.0;
- Compilador C/C++ Code::Blocks 10.05;
- Software IrfanView 4.27;
- Imagens capturadas no campo de calibração da FCT-Unesp;
- A biblioteca UPTK (TOMMASELLI et al, 2005);
- A rotina K_OTSU, desenvolvida na linguagem C (OLIVEIRA, 2010).

4.2 Método

No método que ajusta uma elipse ao alvo deve-se inicialmente selecionar os pixels que supostamente pertencem à borda do alvo. Para tanto, aplica-se um operador que possibilita a detecção de bordas, como por exemplo, o operador de Sobel. Em seguida normalizam-se os valores resultantes da aplicação deste operador entre 0 e 255 (8 bits) e determina-se, de modo automático, um limiar através do método de Otsu (Otsu, 1979). Ao aplicar este método, pressupõe-se que a região onde o alvo se localiza tenha duas cores predominantes, ou seja, duas classes, o que permite a aplicação deste método para a escolha automática do limiar. Os pixels que possuem tons de cinza superior a este limiar são considerados pertencentes à borda. As coordenadas destes pixels de borda são aplicadas nas equações de observação (Equação 3), com o objetivo de estimar os parâmetros (a_1, a_2, a_3, a_4 e a_5) de uma elipse (OPTEKA, 2004) pelo MMQ. Em seguida a posição do centro do alvo (x_c, y_c), bem como as suas respectivas precisões ($\sigma_{x_c}, \sigma_{y_c}$), são determinadas utilizando as Equações 7 e 8, respectivamente.

5 OTIMIZAÇÕES APLICADAS AO MÉTODO QUE AJUSTA UMA ELIPSE AO ALVO

Com o intuito de realizar a medição das coordenadas do centro de alvos circulares da forma mais automática possível e com precisão de subpixel, foram aplicadas algumas otimizações ao método descrito. Alguns detalhes deste processo estão disponíveis em Santos (2011) e essas melhorias basearam-se nas informações inferidas dos dados produzidos no ajustamento, como por exemplo, o vetor dos resíduos e a MVC dos parâmetros.

5.1 Adoção do gradiente como peso para as observáveis

Quando se aplica o operador de Sobel a tendência é que os pixels que possuem maior gradiente dos tons cinza tenham uma maior probabilidade de pertencerem ao limite entre as classes e, portanto às bordas. Considerando o caso onde a feição de interesse é um alvo circular (Figura 2), esses pixels delimitaram o contorno da elipse.

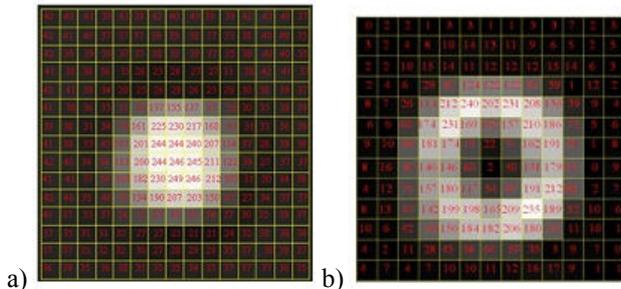


Figura 2 – Imagem de um alvo (a) e resultado da aplicação do operador de Sobel (b).

Com isso, pode-se montar uma matriz peso constituída por valores de gradientes em sua diagonal principal (Equação 9), os quais serão gerados após a normalização dos valores obtidos pelo operador de Sobel e selecionados levando em consideração um limiar estimado pelo método de Otsu.

$$P = \begin{bmatrix} g_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & g_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & . & 0 & 0 \\ . & . & . & . & . \\ 0 & 0 & . & 0 & g_{nn} \end{bmatrix} \quad (9)$$

Para verificar o efeito proporcionado, ao considerar como peso os gradientes relacionados aos pixels pertencentes ao contorno da elipse, realizou-se a propagação de variância e covariância sobre o modelo funcional apresentado na Equação 7, permitindo obter a estimativa da qualidade da posição do centro geométrico da elipse (Equação 8). Em seguida aplicou-se o método que ajusta uma elipse a alguns dos alvos presentes na imagem apresentada na Figura 3, levando em consideração duas situações: uma onde a matriz peso é igual à identidade e a outra onde a matriz peso é constituída pelos valores de gradientes (Equação 9).



Figura 3 – Imagem do campo de calibração da FCT-Unesp.

O gráfico mostrado na Figura 4 apresenta o desvio padrão resultante, ou seja $\sigma = \sqrt{\sigma_{x_c}^2 + \sigma_{y_c}^2}$, para diferentes alvos presentes na Figura 3, para as duas situações.

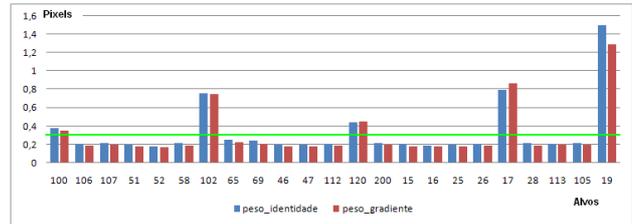


Figura 4 – Desvio padrão resultante para os diferentes alvos.

Através do gráfico da Figura 4 percebe-se que para todos os alvos, com desvio padrão resultante menor que 0,3 pixels nas duas situações, a utilização do gradiente como peso produziu um melhor resultado, apesar das diferenças serem pequenas. Já para os alvos que possuem um desvio padrão resultante superior a 0,3 pixels, percebe-se uma oscilação nos resultados, ou seja, para alguns alvos a primeira situação produziu melhores resultados, enquanto que para outros ocorreu à situação inversa.

Os alvos que apresentaram um desvio padrão resultante maior que 0,3 pixels, apresentam algum tipo de “deficiência”, ou seja, presença de ruídos, como pode ser visto nas Figuras 5 e 6.

5.2 Exclusão dos ruídos (outliers)

Para identificar a observação eivada de erro pode-se utilizar testes estatísticos, como os métodos mencionados (Pope e de Baarda) ou considerar apenas a análise do vetor dos resíduos. Neste trabalho, será utilizada essa última técnica.

A análise dos resíduos é extremamente intuitiva, uma vez que o maior resíduo normalmente está associado à observação que supostamente possui o maior erro.

A decisão de exclusão ou não da observável deve levar em conta um critério objetivo previamente estabelecido, o qual possibilita retirar do ajustamento as observáveis que realmente deterioram a precisão final do ajustamento.

Para isso é definida uma tolerância ϵ , que leva em consideração que o máximo erro permitido em cada componente seja de 0,5 pixels. Sendo assim, enquanto a igualdade da Equação 10 não for verificada, será excluída a observação (c, l) que possui o maior resíduo.

$$\begin{cases} \sigma_{x_c} < \epsilon \\ e \\ \sigma_{y_c} < \epsilon \end{cases} \quad (10)$$

Na Figura 5 são apresentados os alvos, da Figura 3, que não satisfizeram a igualdade da Equação 10, mesmo após a exclusão dos outliers, portanto não tiveram as suas coordenadas centrais determinadas pelo método, de acordo com o critério considerado. Nota-se que estes 4

alvos apresentam algum tipo de deficiência seja ela relacionada com o desgaste da pintura ou oclusão do alvo, ou objetos próximos ao alvo.

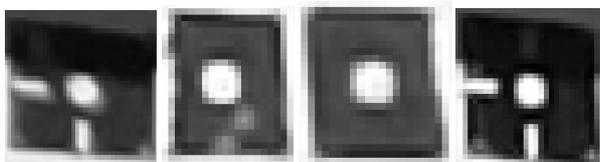


Figura 5 – Alvos 100, 17, 19 e 102, respectivamente, que não tiveram suas coordenadas centrais estimadas.

Na Figura 6a é apresentada uma subimagem com o alvo 120 e uma feição que não faz parte do alvo, na parte inferior esquerda. Pode-se observar que ao aplicar o processo de exclusão dos outliers os pontos na cor verde relacionados à feição, foram eliminados (Figura 6b). Sendo assim, a estimação da elipse e o centro da mesma, foi realizada sem a influência dos erros grosseiros.

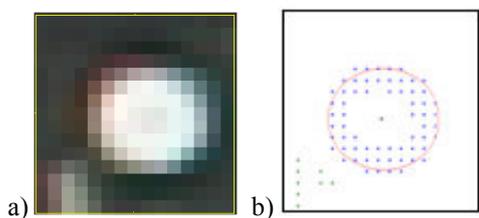


Figura 6 - Subimagem contendo o alvo 120 (a); pontos considerados como pertencentes ao alvo, bem como os excluídos (cor verde) (b).

Desta forma, a exclusão dos outliers possibilita eliminar do ajustamento às equações de observações que influenciam negativamente este processo, além de possibilitar a identificação de alvos que possuem algum tipo de “deficiência”.

6 EXPERIMENTOS UTILIZANDO IMAGENS COM DIFERENTES PONTOS DE VISTA

Para verificar a consistência dos resultados produzidos pelo método que ajusta uma elipse ao alvo, após os melhoramentos apresentados, aplicou-se este método e o da média após binarização automática por Otsu sobre um conjunto de imagens. Posteriormente foi feita a representação gráfica das discrepâncias dos respectivos resultados obtidos pelos dois métodos.

A adoção do método da média após binarização automática por Otsu como referência, para análise e verificação da consistência dos resultados obtidos após as otimizações, se deu pelo fato desse método ter apresentado bons resultados sobre diferentes situações, como por exemplo, a falta de iluminação e diferentes orientações dos alvos (SANTOS, 2011). Este método baseia-se na média ponderada dos elementos que possuem um valor de tom de cinza superior ao limiar determinado automaticamente, através da técnica de Otsu.

A Figura 7 ilustra as posições das estações, bem como as imagens utilizadas neste experimento.

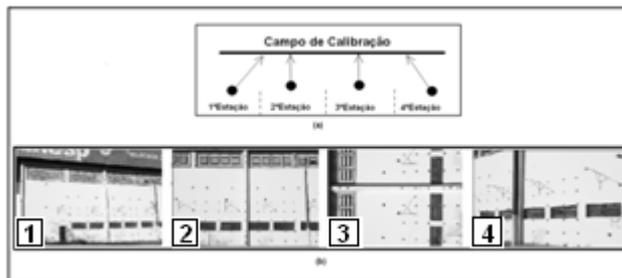


Figura 7 – Posições das estações (a) e as fotografias adquiridas no campo de calibração da FCT-Unesp (b).

Considerando os resultados proporcionados pelo método da média após binarização automática por Otsu como referência, na sequência será apresentada a discrepância resultante, referentes a alguns dos diferentes alvos medidos, nas distintas imagens, como mostra a Figura 8.

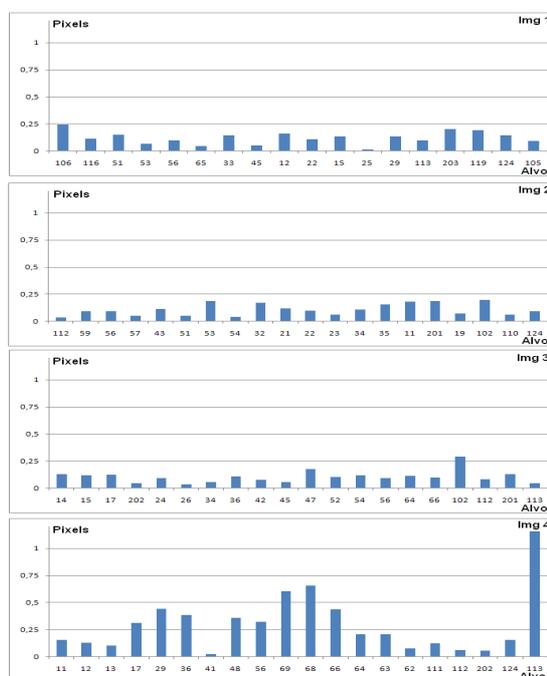


Figura 8 - Discrepância resultante em diferentes pontos e imagens.

Através da Figura 8 é possível observar que a discrepância resultante, para os diferentes alvos, é menor que 0,5 pixels para a grande maioria dos pontos analisados e que apenas na imagem 4 alguns alvos apresentaram uma discrepância maior que 0,5 pixel. Isto ocorreu devido à presença de sombra nos alvos (Figuras 8a e 8b), decorrente da posição e inclinação da câmara; e desgaste na pintura do alvo (Figura 8c).

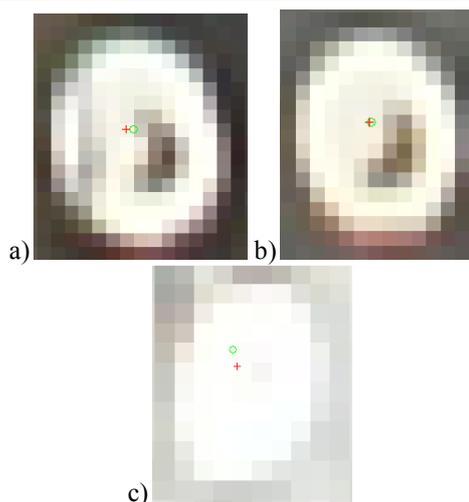


Figura 9 – Representação do centro dos Alvos 68 (a), 69 (b) e 113 (c), estimados pelo método do limiar (pequeno círculo verde) e o que ajusta uma elipse ao alvo (cruz vermelha).

7 CONCLUSÕES

Tendo como meta a determinação do centro das feições pontuais, neste caso específico alvos circulares, com precisão subpixel e de forma semi-automática, neste trabalho aplicou-se algumas otimizações sobre o método que ajusta uma elipse ao contorno do alvo. Tais melhoramentos basearam-se na consideração dos gradientes como peso, e uso da MVC dos parâmetros e, vetor dos resíduos. No primeiro caso adotou-se uma matriz peso diagonal, composta pelos gradientes dos tons de cinza, gerados após aplicação do operador de Sobel. No segundo caso, o desvio-padrão das componentes do centro, estimadas por propagação a partir da MVC, foi comparado com um limiar pré-definido, sendo excluídos os pontos com maiores resíduos conforme o resultado desta comparação.

Ao realizar a verificação da consistência dos resultados obtidos após as otimizações e tomando como referência o método da média após binarização automática por Otsu, foi possível concluir que as otimizações aplicadas produziram resultados similares para a maioria dos alvos e melhores em alguns alvos, principalmente aqueles que apresentam alguma deficiência.

Para etapas posteriores pretende-se realizar um estudo voltado à determinação automática (ou semi-automática) das sub-imagens onde os alvos são localizados, bem como a exclusão dos *outliers* baseando em testes estatísticos como o método de *Pope* ou o método de *Baarda*.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o CNPQ, pelo apoio na realização deste projeto de Iniciação Científica (PIBIC/CNPq), bem como a FCT-UNESP de Presidente Prudente onde os estudos foram desenvolvidos.

REFERÊNCIAS

CAMARGO, P. O. **Ajustamento de observações**. Notas de aula de Ajustamento de Observações – Curso de Graduação em Engenharia Cartográfica, FCT-UNESP. Presidente Prudente. 2000.

GALO, M.; TOZZI, C. L. Extração de pontos com acurácia subpixel em imagens digitais. Série em Ciências Geodésicas. In: MITISHITA, E. A. (Org.). **Série em Ciências Geodésicas – Pesquisa em Ciências Geodésicas**. Curitiba, 2002, v.2, p. 289-313. ISBN: 8588783037.

GEMAEL, C. **Introdução ao ajustamento de observações: aplicações geodésicas**. Curitiba: Ed. UFPR, 1994.

OLIVEIRA, H. C. Combinação de dados obtidos por sensores ópticos e dados de varredura a LASER, visando à extração de edificações. Projeto de Pesquisa de Iniciação Científica PIBIC/CNPq/UNESP-2009/2010. Presidente Prudente/SP.

OTEPKA, J. O. **Precision target mensuration in vision metrology**. 2004. 86f. Dissertation. Technische Universität Wien Studienrichtung Vermessungswesen und Geoinformation, Vienna.

OTSU, N. A threshold selection method from gray-level histogram. **IEEE Transactions on System Man Cybernetics**, Vol. SMC-9, nº 1, 1979, PP. 62-66.

SANTOS, R. C. **Avaliação da Influência Térmica nos Parâmetros de Orientação Interior de Câmaras Digitais**. Relatório do Projeto de Pesquisa de Iniciação Científica PIBIC/CNPq/UNESP – 2010/2011. Presidente Prudente/SP.

TANG, L; HEIPKE, C. Automatic Relative Orientation of Aerial Imagens. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, Vol. 62, No. 1, January, p. 47-55, 1996.