

SUPERVISÃO E DIMENSIONAMENTO REMOTOS UTILIZANDO VISÃO ESTÉREO

LENILDO C. SILVA, ANTONIO PETRAGLIA, MARIANE R. PETRAGLIA

*Programa de Engenharia Elétrica, COPPE/PEE, Universidade Federal do Rio de Janeiro
Caixa Postal 68504, 21945-970 Rio de Janeiro, RJ, BRASIL*

E-mails: lenildo@pads.ufrj.br, apetr@pads.ufrj.br, mariane@lps.ufrj.br

Resumo — Este trabalho apresenta um sistema de visão estéreo desenvolvido para ser utilizado em atividades de inspeção visual por veículos remotamente operados. Um sistema de visão tridimensional é utilizado para a aquisição de pares estéreo de imagens que, depois de pré-processadas através da aplicação de métodos de processamento de imagens como equalização de histograma e detecção de envoltórias, são submetidas ao dimensionamento de objetos por meio de métodos estereofotogramétricos com o uso de algoritmos *least-squares* não-lineares para a obtenção das coordenadas tridimensionais. Um exemplo de aplicação em inspeção submarina é mostrado.

Abstract — This work presents a stereo measurement system for visual inspection activities by remotely operated vehicles. A three-dimensional vision system is used for the acquisition of stereo pairs of images that, after preprocessing by applying methods of image processing such as histogram equalization and edge detection, are submitted to dimensioning of objects through stereophotogrammetric computations using nonlinear least-squares algorithms to obtain three-dimensional coordinates. An example of application in submarine inspection is shown.

Key Words — Stereo vision; image processing; photogrammetry; robot vision; automation.

1 Introdução

A atividade de inspeção de equipamentos tem como objetivo acompanhar as condições físicas dos equipamentos durante sua vida útil, com o propósito de investigar causas de possíveis acidentes e soluções para preveni-las. O uso de métodos de inspeção torna-se necessário em atividades nas quais haja altos riscos para a segurança de seres humanos e equipamentos e riscos de danos ao meio-ambiente, como é o caso da inspeção submarina, onde o monitoramento de tubulações e estruturas trabalhando sob condições hostis é necessário (Petraglia and Petraglia, 1996).

Para a inspeção destas instalações, várias técnicas de ensaios não-destrutivos têm sido desenvolvidas, dentre as quais a técnica de inspeções visuais, que consiste na utilização de dispositivos fotográficos e de filmagem para monitorar dutos e equipamentos, e para aumentar a eficiência das operações de intervenção.

A metodologia da técnica de inspeções visuais consiste em suprimir objetos que não são de interesse das imagens da estrutura a ser avaliada, realizando-se um pré-processamento da imagem para se obter, com grande confiabilidade, os parâmetros a serem extraídos. Neste trabalho, o dimensionamento dos objetos de interesse, e/ou distâncias entre objetos, são obtidos através de técnicas de fotogrametria analítica. Baseado nesta metodologia, um sistema modular integrado (*software* e *hardware*), para aquisição e processamento de pares de imagens estéreo foi desenvolvido (Silva et al., 1998).

O sistema de visão estéreo apresentado pode ser dividido em três estágios, como ilustrado na Fig. 1. O estágio de aquisição consiste de um par de câmeras de vídeo conectadas a placas

digitalizadoras, que adquirem imagens a serem mostradas em tempo real em três dimensões. Imagens de interesse são digitalizadas e gravadas em pares estéreo. As imagens digitalizadas são em seguida submetidas a um estágio de pré-processamento, com o objetivo de melhorar a precisão dos parâmetros a serem extraídos. Finalmente, as imagens processadas são submetidas ao estágio de dimensionamento, com o uso de um algoritmo que utiliza métodos fotogramétricos para a obtenção de coordenadas tridimensionais, a partir de pontos correspondentes nos sistemas de coordenadas bidimensionais de cada imagem do par estéreo. As dimensões dos objetos podem ser então obtidas a partir dessas coordenadas tridimensionais.

2 Aquisição de Imagens Estéreo

A aquisição de imagens para dimensionamento é feita por um sistema de visão tridimensional adequado para atividades submarinas (Jacques et al., 1994), de forma a tornar possível a visualização em tempo real das cenas a serem investigadas. O sistema, baseado em um computador pessoal, utiliza câmeras de vídeo eletrônicas e placas digitalizadoras para permitir a visualização das imagens. Sua arquitetura é apresentada na Fig. 2. As imagens que formam cada par estéreo são adquiridas no mesmo instante de tempo e salvas em arquivos no computador (cada imagem em um arquivo diferente).

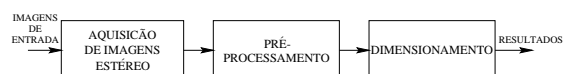


Figura 1. Diagrama em blocos do sistema de visão estéreo.

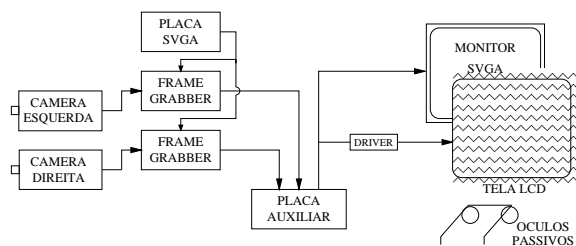


Figura 2. Arquitetura do sistema de aquisição de imagens.

A aquisição das imagens é feita por um par de câmeras de vídeo CCD, possibilitando inspeção visual de alta qualidade devido às suas características de boa resolução. As câmeras geram sinais no padrão NTSC e foram montadas sobre uma base fixa, de forma a ficarem alinhadas horizontalmente, e espaçadas de uma distância que corresponde à separação entre os olhos de um ser humano adulto (tipicamente, em torno de 5,5 centímetros), para dar ao usuário do sistema a sensação de visão estéreo real. Este espaçamento entre as câmeras recebe o nome de linha-base. Todavia, para efeitos de dimensionamento o espaçamento escolhido para a linha-base é considerado reduzido, podendo conduzir a uma estimação menos precisa das dimensões tridimensionais, devido à triangulação estreita (Okutomi and Kanade, 1993). O sinal gerado por cada câmera corresponde a um canal (direito ou esquerdo) na arquitetura.

As placas digitalizadoras são dispositivos do tipo *frame grabber* que transformam os sinais de vídeo provenientes das câmeras, de forma que possam ser mostrados em um monitor SVGA. Ambas as placas são conectadas a uma placa auxiliar, cuja função é realizar o chaveamento entre as imagens esquerda e direita, a uma taxa de 120 Hz, escolhida de forma a garantir que cada imagem seja mostrada ao olho humano a cada 1/60 segundos; isto elimina o cintilamento que poderia ocorrer ao mostrar-se as duas imagens alternadamente. Uma vez que este chaveamento é realizado externamente às placas digitalizadoras, modificações podem ser facilmente incorporadas via *software* à configuração original, o que não seria possível caso o chaveamento fosse executado internamente às placas digitalizadoras.

O dispositivo de visualização estereoscópica é formado por uma tela de cristal líquido (LCD) que age como obturador e óculos passivos, de forma a realizar a visualização das cenas tridimensionais a partir da composição de duas imagens bidimensionais, permitindo a noção de profundidade.

Como o sinal proveniente das câmeras pode ser enviado diretamente à saída da placa de vídeo SVGA, operações de *overlay* são possíveis, permitindo o uso de apenas um monitor tanto para a operação do computador quanto para a operação do *software* do sistema de visão. Além da visua-

lização e aquisição de imagens, o *software* implementa operações tais como *zooming*, alinhamento horizontal, e convergência.

3 Pré-processamento

O estágio de pré-processamento tem como finalidade obter uma melhoria de qualidade das imagens aquiridas e adequá-las ao processo de dimensionamento. Este procedimento inclui técnicas de processamento de imagens baseadas em operações pontuais e espaciais (Jain, 1989), tais como equalização de histograma, que permite o modelamento do histograma de uma imagem de forma a obter um histograma uniforme para a imagem resultante, e filtragem, o que inclui filtragem passa-baixa, usada para suavização de ruído e interpolação, e filtragem passa-banda, usada no melhoramento de contornos.

O uso de técnicas de detecção de envoltórias (Jain, 1989; Faugeras, 1993) permite uma melhor caracterização dos contornos em uma imagem, que é usual para a determinação das coordenadas bidimensionais. O paradigma geral no processo de detecção de envoltórias envolve dois passos. O primeiro passo consiste em melhorar a presença de envoltórias na imagem original, assim criando uma nova imagem na qual as envoltórias são mais destacadas; pixels com valores altos nesta nova imagem indicam um aumento de probabilidade da presença de uma envoltória. O segundo passo consiste em aplicar um limiar à nova imagem de forma a realizar uma decisão “envoltória ou não envoltória”, produzindo um mapa de envoltória binário. Para uma imagem contínua, sua derivada assume um máximo local na direção da envoltória. Portanto, uma técnica comum de detecção de envoltórias consiste em medir o gradiente da imagem. Para imagens digitais, os detectores de envoltória geralmente usam aproximações discretas de derivadas contínuas com diferenças finitas, que são considerados operadores lineares e invariantes no tempo, constituindo as chamadas máscaras de convolução discreta.

4 Dimensionamento

Depois de serem aquiridas e processadas, as imagens são submetidas ao estágio de dimensionamento tridimensional, que consiste no dimensionamento de objetos de interesse, ou de possíveis falhas e/ou defeitos na estrutura a ser avaliada. O procedimento de dimensionamento é feito por um algoritmo que calcula coordenadas tridimensionais, baseado em métodos estereofotogramétricos.

A fotogrametria analítica (Moffit and Mikhail, 1980; Turner et al., 1991) inclui um conjunto de técnicas que permite, a partir de medições de uma ou mais projeções em perspectiva bidimensionais de um objeto tridimensional, fazer inferências

sobre a posição tridimensional, orientação e dimensões dos objetos observados em um sistema de coordenadas global. A Fig. 3 ilustra os referenciais global e da câmera, mostrando um ponto no espaço tridimensional e sua projeção no plano bidimensional de cada câmera.

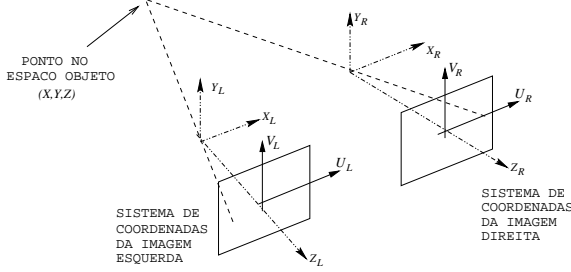


Figura 3. Referenciais global e da câmera.

A completa especificação da orientação de uma câmera é dada pela orientação interior e pela orientação exterior (Haralick and Shapiro, 1993). Esta última é especificada por todos os parâmetros que determinam a pose da câmera no referencial global. A especificação da orientação exterior é feita a partir das coordenadas tridimensionais de alguns pontos de controle, cujas posições correspondentes na imagem sejam conhecidas, e resulta na obtenção de três ângulos de rotação e três parâmetros de translação. A orientação interior é especificada por todos os parâmetros que determinam a geometria de um feixe de raios tridimensionais a partir das coordenadas medidas, relacionando a geometria da projeção em perspectiva ideal à geometria física da câmera. Incluídas nesta caracterização estão a constante da câmera, o ponto principal (que é o ponto onde o eixo do referencial global intersecta o plano da imagem), e a distorção da lente.

A orientação relativa de um par de câmeras, que é a orientação de uma câmera em relação à outra, constitui um modelo estéreo e é especificada por cinco parâmetros: três ângulos de rotação e dois parâmetros de translação. Quando duas câmeras estão em orientação relativa, cada par de raios correspondentes às duas câmeras intersectam-se no espaço tridimensional. O procedimento de determinar a orientação relativa assume que a orientação interior de cada câmera seja conhecida. A orientação absoluta envolve a orientação de um modelo estéreo em um referencial global, e requer o conhecimento de sete parâmetros: um fator de escala (considerado unitário neste caso), três parâmetros de translação e três parâmetros de rotação. A orientação absoluta é obtida de coordenadas tridimensionais de alguns pontos centrais de controle cujas posições na imagem estéreo sejam dadas. A completa orientação de um par de câmeras é obtida da especificação dos parâmetros determinados das orientações relativa e absoluta (Haralick and Shapiro, 1993).

A relação entre o referencial de uma câmera e o referencial global é dada por uma translação e uma rotação. Um ponto $\mathbf{x} = (x, y, z)^t$ no referencial global precisa ser expresso com respeito à posição $\mathbf{t} = (x_0, y_0, z_0)^t$ da lente da câmera. Assim, o ponto \mathbf{x} tem coordenadas

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

com relação à origem (que coincide com a lente da câmera).

A projeção em perspectiva da câmera é obtida com respeito ao eixo z , que é o eixo óptico da câmera. Contudo, a direção dos eixos x , y , e z do referencial da câmera diferem da direção dos eixos do referencial global. A rotação pela qual o referencial global é posicionado em correspondência com o referencial da câmera pode ser representada como uma seqüência de três rotações, cada qual em volta de cada um dos três eixos e sendo representadas por três ângulos: ω , ϕ e κ . A rotação é expressa por uma matriz de rotação \mathbf{R} , que é uma matriz 3×3 .

Um ponto $\mathbf{x} = (x, y, z)^t$ do referencial do objeto é então representado pelo ponto $\mathbf{x}' = (p, q, s)^t$ do referencial da câmera, onde

$$\begin{pmatrix} p \\ q \\ s \end{pmatrix} = \mathbf{R}(\omega, \phi, \kappa) \begin{pmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ z - z_0 \end{pmatrix} \quad (2)$$

A partir desta representação para o ponto tridimensional no referencial da câmera, pode-se obter sua projeção em perspectiva. As coordenadas de projeção são dadas por

$$\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_0 \\ v_0 \end{pmatrix} + \frac{f}{s} \begin{pmatrix} p \\ q \end{pmatrix} \quad (3)$$

onde f é a distância do plano de projeção da imagem para a lente da câmera, e (u_0, v_0) são as coordenadas do ponto principal.

A Eq. (3) pode ser reescrita como

$$\frac{u - u_0}{f} = \frac{r_{11}(x - x_0) + r_{12}(y - y_0) + r_{13}(z - z_0)}{r_{31}(x - x_0) + r_{32}(y - y_0) + r_{33}(z - z_0)} \quad (4)$$

$$\frac{v - v_0}{f} = \frac{r_{21}(x - x_0) + r_{22}(y - y_0) + r_{23}(z - z_0)}{r_{31}(x - x_0) + r_{32}(y - y_0) + r_{33}(z - z_0)} \quad (5)$$

Este par de equações expressa uma taxa de coordenadas da câmera em termos de uma taxa de coordenadas globais, sendo conhecido como a equação da projeção em perspectiva fundamental ou como a equação de colinearidade. Este par pode ser invertido, com mostrado abaixo:

$$\frac{x - x_0}{z - z_0} = \frac{r_{11}(u - u_0) + r_{21}(v - v_0) + r_{31}f}{r_{13}(u - u_0) + r_{23}(v - v_0) + r_{33}f} \quad (6)$$

$$\frac{y - y_0}{z - z_0} = \frac{r_{12}(u - u_0) + r_{22}(v - v_0) + r_{32}f}{r_{13}(u - u_0) + r_{23}(v - v_0) + r_{33}f} \quad (7)$$

As equações (6) e (7) são chamadas de equações da projeção em perspectiva fundamental geral, e mostram como a relação entre as coordenadas de projeção bidimensionais medidas e as coordenadas tridimensionais é uma função não-linear dos parâmetros $u_0, v_0, x_0, y_0, z_0, \omega, \phi$ e κ . Caso um número suficiente de pontos correspondentes e uma solução inicial aproximada sejam dadas, pode-se obter os parâmetros desconhecidos acima através de uma técnica *least-squares* não linear (Haralick and Shapiro, 1993; Tommaselli, 1994).

4.1 Orientação Exterior

Em um problema de orientação exterior (Haralick and Shapiro, 1993), os N pontos tridimensionais (x_n, y_n, z_n) , $n = 1, \dots, N$, no referencial do objeto e os pontos bidimensionais correspondentes tendo posições (u_n, v_n) no referencial da imagem são utilizados para obter a rotação e a translação desconhecidas que posicionam o referencial da câmera no referencial global (vide Fig. 4).

Seja a translação desconhecida dada pelo vetor $\mathbf{t} = (x_0, y_0, z_0)^t$. O ponto (x_n, y_n, z_n) do referencial do objeto torna-se o ponto (p_n, q_n, s_n) do referencial da câmera, onde

$$\begin{pmatrix} p_n \\ q_n \\ s_n \end{pmatrix} = \mathbf{R}(\omega, \phi, \kappa) \begin{pmatrix} x_n - x_0 \\ y_n - y_0 \\ z_n - z_0 \end{pmatrix}, \quad n = 1, \dots, N \quad (8)$$

A projeção em perspectiva é então dada por

$$\begin{pmatrix} u_n \\ v_n \end{pmatrix} = \frac{f}{s_n} \begin{pmatrix} p_n \\ q_n \end{pmatrix}, \quad n = 1, \dots, N \quad (9)$$

Este problema pode ser formulado como um problema *least-squares* não-linear, que pode ser resolvido assumindo-se uma solução inicial aproximada com o propósito de linearizar o problema. O procedimento *least-squares* pode ser aplicado da seguinte maneira: sejam $\beta = (x_0, y_0, z_0, \omega, \phi, \kappa)^t$ e $\Delta\beta = (\Delta x_0, \Delta y_0, \Delta z_0, \Delta\omega, \Delta\phi, \Delta\kappa)^t$. Então $\beta^{\ell+1} = \beta^\ell + \Delta\beta$ representa a atualização dos parâmetros na iteração $\ell + 1$, e $\Delta\beta$ é o vetor de ajustes no critério *least-squares*, definido por

$$\Delta\beta = (\mathbf{G}^\ell)^{-1}(\alpha - \gamma^\ell) \quad (10)$$

onde α e γ são dados por

$$\alpha = [u_1, v_1, \dots, u_N, v_N]^t \quad (11)$$

$$\gamma = [u_1^\ell, v_1^\ell, \dots, u_N^\ell, v_N^\ell]^t \quad (12)$$

e \mathbf{G} é o jacobiano da transformação.

4.2 Triangulação Estéreo

Um procedimento de triangulação é utilizado para a inferência de um ponto no espaço tridimensional a partir das projeções em perspectiva deste ponto em cada imagem de um par estéreo (Haralick

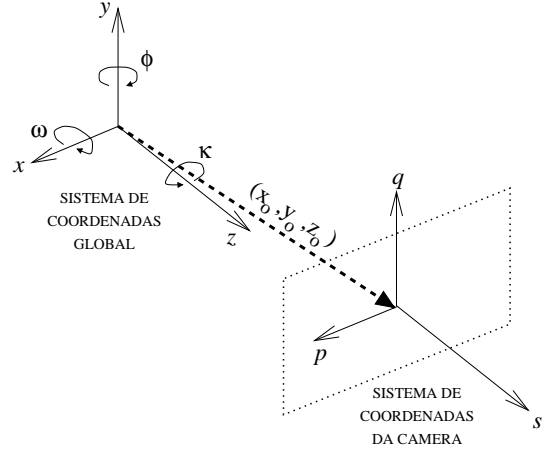


Figura 4. Orientação exterior.

and Shapiro, 1993). O procedimento faz uso do paralaxe, que é o deslocamento na projeção em perspectiva de um ponto causada por uma variação translacional na posição de observação. O procedimento de triangulação é um caso especial da determinação de um ponto tridimensional (x, y, z) dadas as projeções em perspectiva (u_L, v_L) e (u_R, v_R) nas imagens esquerda e direita de um par estéreo. Assume-se que (u_L, v_L) e (u_R, v_R) sejam referidos ao ponto principal, e que qualquer distorção geométrica da lente tenha sido compensada.

A estimação do ponto tridimensional (x, y, z) é obtida aplicando-se a seguinte fórmula:

$$\left\{ \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \middle| \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_L \\ y_L \\ z_L \end{pmatrix} + \lambda_L \mathbf{Q}_L \begin{pmatrix} u_L \\ v_L \\ f_L \end{pmatrix} \right\} \quad (13)$$

$$\left\{ \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \middle| \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_R \\ y_R \\ z_R \end{pmatrix} + \lambda_R \mathbf{Q}_R \begin{pmatrix} u_R \\ v_R \\ f_R \end{pmatrix} \right\} \quad (14)$$

onde f_L e f_R são as constantes das câmeras esquerda e direita, e λ_L e λ_R são fatores de minimização obtidos ao minimizar-se o erro quadrático

$$\epsilon^2 = \left\| \begin{pmatrix} x_L \\ y_L \\ z_L \end{pmatrix} + \lambda_L \begin{pmatrix} p_L \\ q_L \\ s_L \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} x_R \\ y_R \\ z_R \end{pmatrix} - \lambda_R \begin{pmatrix} p_R \\ q_R \\ s_R \end{pmatrix} \right\|^2 \quad (15)$$

Os minimizantes λ_L e λ_R são dados por

$$\begin{pmatrix} \lambda_L \\ \lambda_R \end{pmatrix} = \mathbf{A}_\lambda \mathbf{B}_\lambda \quad (16)$$

onde \mathbf{A}_λ e \mathbf{B}_λ são funções dos parâmetros de orientação exterior calculados para cada imagem do par estéreo (Haralick and Shapiro, 1993; Silva, 1998).

Idealmente, os resultados obtidos a partir de (13) e de (14) deveriam ser iguais; contudo, os resultados podem ser levemente diferentes, devido ao fato dos cálculos de λ_L e de λ_R não serem exatos, devido a erros de medição.

Tabela 1. Coordenadas dos Pontos Usados na Determinação dos Parâmetros de Orientação Exterior.

Ponto	x_0	y_0	z_0	u_L	v_L	u_R	v_R
A	0,000	30,000	180,000	206	352	225	354
B	70,000	0,000	130,000	322	455	283	455
C	90,000	100,000	160,000	358	142	330	137

Tabela 2. Parâmetros de Orientação Exterior.

Imagem	Parâmetros					
	x_0	y_0	z_0	ω	ϕ	κ
L	468,192	126,207	-358,137	0,110	-0,655	-0,174
R	546,831	79,340	-274,672	-6,255	-0,826	-6,494

5 Resultados Experimentais

Esta seção ilustra uma aplicação do sistema desenvolvido para o dimensionamento de objetos submarinos. Vários experimentos com imagens de peças metálicas foram realizados em um tanque cheio de água, simulando condições submarinas reais com pouca luminosidade (Silva, 1998), para verificar a robustez do algoritmo de fotogrametria proposto. O teste consistiu no cálculo de coordenadas tridimensionais, e o posterior cálculo de dimensões de arestas. O par estéreo utilizado, apresentado na Fig. 5, mostra duas peças metálicas de dimensões $100 \times 30 \times 20$ (em milímetros). As imagens têm originalmente resolução de 640×512 pixels, e são apresentadas em escala reduzida e em tons de cinza.

Dentre os operadores testados para a detecção de envoltória, o operador de gradiente apresentou os melhores resultados, sendo portanto o utilizado neste experimento (vide Fig. 6). O operador de direção também apresentou bons resultados em determinadas direções, que podem ser usuais em certos casos, quando se desejar obter uma melhoria das envoltórias.

A Tabela 1 mostra as coordenadas dos pontos utilizados na determinação da orientação exterior em cada imagem, sendo mostradas as coordenadas de três pontos no espaço tridimensional, e suas projeções nos referenciais das câmeras esquerda e direita. As coordenadas tridimensionais são representadas em milímetros, enquanto as coordenadas bidimensionais são representadas em pixels. Os resultados da orientação exterior são mostrados

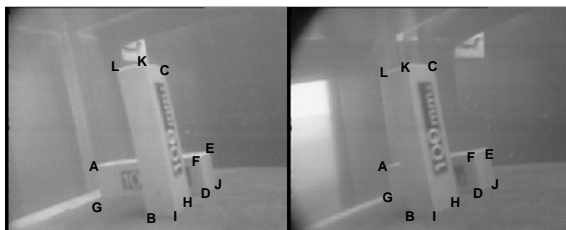


Figura 5. Par estéreo e pontos usados nas medições.

Tabela 3. Resultados Experimentais.

Aresta	Dimensão (mm)		Erro	
	Calculada	Real	Absoluto	Relativo
\overline{AE}	92,773	101,980	9,207	9,028 %
\overline{AF}	98,078	101,980	3,902	3,826 %
\overline{AG}	30,377	30,000	0,377	1,257 %
\overline{BI}	21,496	20,000	1,496	7,480 %
\overline{BK}	106,457	101,980	4,477	4,390 %
\overline{BL}	104,579	100,000	4,579	4,579 %
\overline{CH}	102,132	100,000	2,132	2,132 %
\overline{CI}	105,117	104,403	0,713	0,683 %
\overline{DF}	31,922	30,000	1,922	6,407 %
\overline{DG}	100,516	100,000	0,516	0,516 %
\overline{EF}	20,922	20,000	0,922	4,610 %
\overline{EG}	108,152	106,301	1,851	1,741 %
\overline{EJ}	27,999	30,000	2,001	6,671 %
\overline{GJ}	96,913	101,980	5,068	4,969 %
\overline{HI}	27,628	30,000	2,372	7,906 %
\overline{HK}	106,896	104,403	2,493	2,388 %
\overline{HL}	107,145	106,301	0,843	0,793 %

na Tabela 2. São indicados os seis parâmetros calculados para cada imagem, esquerda (L) e direita (R), do par estéreo: os três parâmetros de translação e os três parâmetros de rotação.

Os resultados de várias medições são mostrados na Tabela 3, onde as dimensões reais e as dimensões calculadas são comparadas, bem como os erros obtidos para cada medida. Os pontos utilizados em cada imagem para os cálculos correspondem a vértices das peças metálicas. As medições das arestas foram estimadas das coordenadas tridimensionais dos vértices que a delimitam.

As diversas distâncias estimadas mostradas na Tabela 3 foram obtidas pelo cálculo da média dos resultados das equações (13) e (14). Estas são solucionadas usando-se coordenadas projetivas (u_L, v_L) e (u_R, v_R) dos pontos tridimensionais em cada plano da imagem e os parâmetros obtidos, resolvendo os problemas de orientação. Os erros observados são satisfatórios para a aplicação em vista, que é a inspeção de equipamentos submarinos e tubulações, e são comparáveis aos obtidos com outros algoritmos conhecidos (Sheer, 1998). Para outras aplicações, maior precisão pode ser alcançada pelo aumento do valor da linha-base, conforme mencionado na Sec. 2.



Figura 6. Detecção de envoltória aplicada ao par estéreo.

6 Conclusão

Este artigo apresentou um sistema de visão estéreo projetado para atividades de supervisão e dimensionamento. O sistema foi dividido em três estágios: visão tridimensional, pré-processamento e dimensionamento. O sistema de visão permitiu a visualização de imagens em tempo real, com a noção de profundidade, através de uma interface amigável. O uso de algoritmos de detecção de envoltória permitiu uma melhor definição na obtenção dos pontos necessários para o processo de dimensionamento *least-squares*.

Embora o sistema descrito aqui tenha sido desenvolvido para aplicações em atividades submarinas, suas características de baixo custo, adequabilidade e portabilidade permitem operações remotas em tempo real com sensação de telepresença, estendendo seu uso em algumas situações nas quais a automação de tarefas seja necessária, principalmente em ambientes hostis para os técnicos envolvidos. É também adequado para servir como um sistema de visão artificial para o controle de veículos autônomos. Pode assim ser de relevante assistência em operações de posicionamento de equipamentos em sítios remotos. Estas questões estão atualmente sob investigação pelos autores.

Referências

- Faugeras, O. (1993). *Three-Dimensional Computer Vision: a Geometric Viewpoint*, The MIT Press.
- Haralick, R. and Shapiro, L. G. (1993). *Computer and Robot Vision*, Addison-Wesley Publishing Co.
- Jacques, A. C., Borges, J. L. P., Henrique, P. C. F. and Sperandio, A. G. (1994). Sistema de medição tridimensional para aplicações submarinas - sistema TV3D sem cintilação (TV3D system flickerless), *Technical report*, Cenpes, Petrobrás, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Jain, A. K. (1989). *Fundamentals of Digital Image Processing*, Prentice-Hall Inc.
- Moffit, F. H. and Mikhail, E. M. (1980). *Photogrammetry*, segunda edn, Har & Row Publishers.
- Okutomi, M. and Kanade, T. (1993). A multiple baseline stereo, *IEEE Trans. Patt. Anal. Machine Intell.* **15**(4): 353-363.
- Petraglia, A. and Petraglia, M. R. (1996). Sistema de aquisição e processamento de sinais para ensaios não destrutivos, *Technical report*, Coppetec, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Sheer, P. (1998). *A software assistant for manual stereo photogrammetry*, Master's thesis, Faculty of Engineering, University of the Witwatersrand, Johannesburg, África do Sul.
- Silva, L. C. (1998). *Sistema de visão tridimensional para inspeção e dimensionamento*, Master's thesis, PEE/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Silva, L. C., Petraglia, A. and Petraglia, M. R. (1998). Stereo vision system for live submarine inspection of oil pipelines and equipments in deep sea, *Proceedings of the 1998 IEEE Int. Conf. on Intelligent Vehicles*, Stuttgart, Alemanha, pp. 593-598.
- Tommaselli, A. M. G. (1994). Intersecção fotogramétrica - desenvolvimento de funções em C, *Technical report*, UNESP, São Paulo, SP, Brasil.
- Turner, J., Yule, D. J. and Zanre, J. (1991). Real time photogrammetry - a technique for today or tomorrow?, *Subtech 91* **27**: 319-331.