Sistema de Visão Estéreo para Inspeção Submarina de Tubulações e Equipamentos de Petróleo em Águas Profundas

Lenildo C. Silva [1], Antonio Petraglia [2], Mariane R. Petraglia [2]

Copyright 1998, Brazilian Petroleum Institute - IBP

This paper was prepared for presentation at the Seminário de Instrumentação e Automação held in Rio de Janeiro, Brazil, 5-8 October, 1998.

This paper was selected for presentation by the Event Technical Committee following review of information contained in an abstract submitted by the author(s). Contents of the paper, as presented, have not been reviewed by the IBP. ***Organizers will neither translate nor correct texts received***. The material, as presented, does not necessarily reflect any position of the Brazilian Petroleum Institute, its officers, or members.

Abstract

This work presents a three-dimensional measurement system for inspection activities of submarine petroleum installations by remotely operated vehicles. A real-time stereo vision system is used for the aquisition of stereo pairs of images that, after preprocessing, by applying methods of image processing such as histogram equalization and edge detection, are submitted for dimensioning of objects throught stereophotogrammetric computations using non-linear least-squares algorithms to obtain three-dimensional coordinates.

Resumo

Este trabalho apresenta um sistema de visão tridimensional desenvolvido para ser utilizado em atividades de inspeção visual de instalações submarinas de petróleo por veículos remotamente operados. Um sistema de visão estéreo em tempo real é utilizado para a aquisição de pares estéreo de imagens que, depois de pré-processadas com o objetivo de melhorar a precisão dos parâmetros a serem extraídos (através de métodos de processamento de imagens como equalização de histograma e detecção de envoltória), são submetidas ao dimensionamento por meio de métodos estereofotogramétricos, com o uso de algoritmos *least-squares* não-lineares para a obtenção de coordenadas tridimensionais.

Introdução

A atividade de inspeção de equipamentos tem como objetivos acompanhar as condições físicas dos equipamentos durante sua vida útil, investigar as causas de possíveis acidentes e propor soluções para evitá-los. O uso de métodos de inspeção torna-se necessário em atividades nas quais há riscos elevados à segurança dos equipamentos e de vidas humanas. As atividades voltadas para inspeção de equipamentos procuram atuar com os objetivos de controlar as condições físicas dos equipamentos, identificar causas de deteriorações, e controlar a qualidade dos reparos executados. Este é o caso da inspeção submarina, onde é necessária a monitoração de equipamentos, tubulações e estruturas trabalhando sob condições hostis, por vezes em altas profundidades. Para a inspeção destas instalações, têm sido desenvolvidas diversas técnicas de ensaios não destrutivos, dentre as quais(1):

- Ultra-som: a grande velocidade de propagação do som no aço, em torno de 5,9 km/s, permite a utilização desta técnica, onde uma alta velocidade de ensaio é mandatória.
- Medição de potencial eletroquímico: a proteção anticorrosiva de dutos é realizada principalmente pelos revestimentos de pintura e os sistemas de proteção catódica, sendo que neste caso o valor do potencial eletroquímico é o principal parâmetro a ser medido e controlado.
- Correntes parasitas: a inspeção por correntes parasitas é uma técnica de inspeção baseada na introdução da corrente elétrica no material a inspecionar e na observação da interação entre correntes e materiais.
- Partícula magnética: baseia-se na detecção de descontinuidades em materiais ferromagnéticos, com a aplicação de um campo magnético sobre uma estrutura coberta por partículas magnéticas.
- Inspeções visuais: consiste na utilização de aparelhos fotográficos e de filmagem para monitorar dutos e equipamentos, e para aumentar a eficiência das operações de intervenção submarina.

[1] Msc. Engenharia Elétrica, Programa de Engenharia Elétrica, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.
[2] Ph.D. Engenharia Elétrica, Escola de Engenharia/UFRJ, Programa de Engenharia Elétrica, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

Destes métodos, o método de inspeções visuais foi o adotado no presente estudo. Sua metodologia consiste em, a partir de imagens da estrutura a avaliar, suprimir objetos que não são de interesse, e realizar um pré-processamento na imagem de forma a dar maior confiabilidade aos parâmetros a serem extraídos; em seguida, através de técnicas de fotogrametria analítica, conseguir o dimensionamento do objeto de interesse. Baseado nesta metodologia, foi desenvolvido um sistema modular integrado (software e hardware) de visão tridimensional para aquisição e processamento de imagens, a ser aplicado na inspeção visual submarina de dutos e equipamentos.

O sistema de visão tridimensional abordado no presente estudo pode ser dividido em três estágios distintos. O ***sistema de visão*** consiste de um par de câmeras de vídeo conectadas a placas digitalizadoras, que adquirem imagens submarinas em tempo real para serem mostradas em três dimensões. Imagens de interesse são digitalizadas e gravadas em arquivo sob a forma de pares estéreo (duas imagens, cada qual de uma câmera, da mesma cena, obtidas no mesmo instante). As imagens digitalizadas, antes de serem efetivamente utilizadas, são submetidas a um ***pré-processamento***, de forma a adequá-las ao processo de dimensionamento, o que inclui técnicas de processamento de imagens tais como a equalização de histograma e a detecção de envoltórias, com o objetivo de melhorar a precisão dos parâmetros a serem extraídos das imagens. Finalmente, as imagens processadas são submetidas ao ***dimensionamento***, com o uso de um algoritmo que utiliza métodos fotogramétricos para a obtenção de coordenadas tridimensionais, a partir de pontos correspondentes nos planos bidimensionais das duas imagens do par estéreo. As dimensões de objetos (ou falhas) tridimensionais podem então ser obtidas a partir dessas coordenadas.

Sistema de Visão Estéreo

A aquisição das imagens necessárias ao processo de dimensionamento é feita por um sistema de visão estéreo adequado para atividades submarinas, que possibilita a visualização em tempo real das cenas a serem investigadas. O sistema, baseado em um computador pessoal, utiliza câmeras eletrônicas e placas digitalizadoras para permitir a visualização e gravação de imagens em arquivo. Esta seção descreve brevemente o sistema de visão utilizado, e seus componentes principais.

Arquitetura

A arquitetura do sistema de visão estéreo (2) é ilustrada na Fig. 1. Os principais componentes desta arquitetura são descritos a seguir.

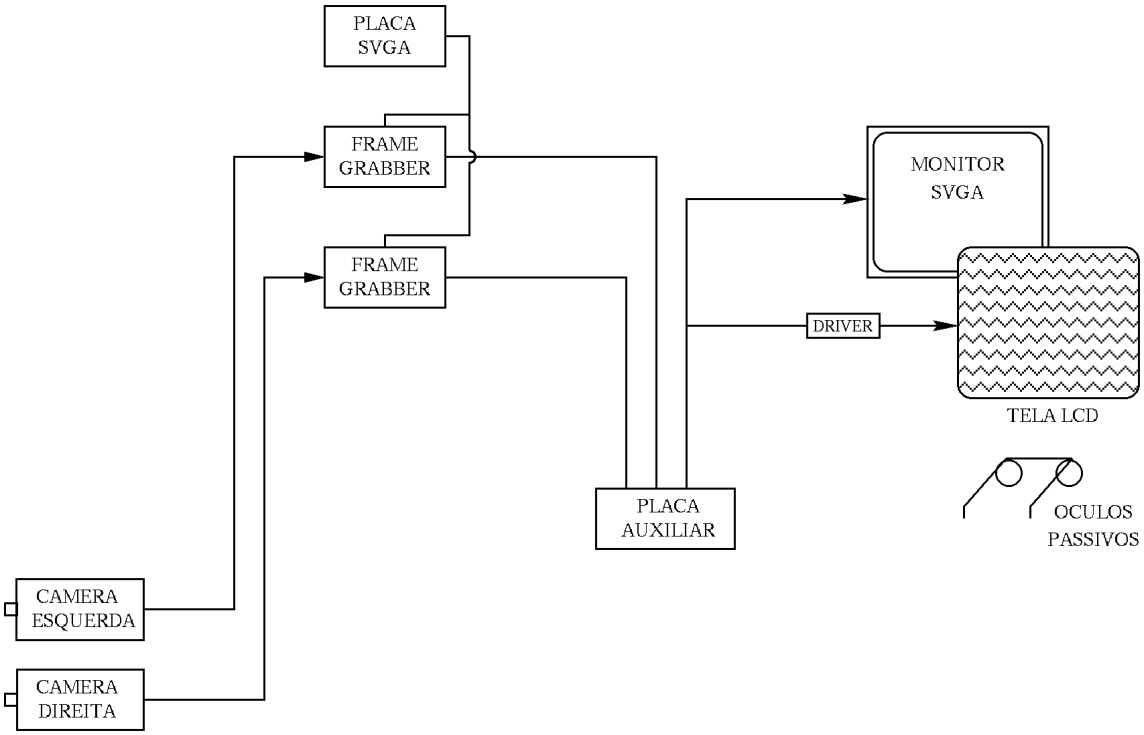

Figura 1: Arquitetura do Sistema de Visão Estéreo.

Câmeras

A aquisição das imagens é feita por um par de câmeras eletrônicas digitais. Existem vários tipos de câmeras digitais, mas as mais usadas (e as adotadas neste sistema) são as que utilizam a tecnologia CCD (*Charge-Coupled Device*). Trata-se de um conjunto de receptores de luz enfileirados, capazes de detectar variações na intensidade e na freqüência (cor) da luz. Estes receptores são densamente dispostos lado a lado: quanto maior o número deles, maior a resolução. O uso de câmeras digitais representa uma vantagem em relação ao uso de câmeras fotográficas, utilizadas em alguns sistemas que utilizam técnicas de inspeções visuais, por permitir a visualização em tempo real das imagens, e uma melhor qualidade, devido ao fato de a resolução de uma câmera CCD ser bem maior do que a resolução de uma fotografia comum. As câmeras foram montadas sobre uma base fixa, alinhadas horizontalmente e espaçadas de uma distância que corresponde aproximadamente à separação entre os olhos de um ser humano adulto (tipicamente, cerca de 5,5 centímetros), para dar a sensação de visão estéreo real ao usuário do sistema. Cada câmera gera um sinal de vídeo em cores padrão NTSC, e corresponde a um canal (esquerdo ou direito) na arquitetura.

Placas Digitalizadoras

As placas digitalizadoras têm a finalidade de digitalizar o sinal de vídeo proveniente das câmeras CCD, transformando-o em um sinal que possa ser exibido no monitor SVGA do microcomputador. As placas são do tipo *Frame Grabber*, dispostas em paralelo, cada qual recebendo o sinal da respectiva câmera. Ambas as placas são ligadas a uma placa auxiliar, que realiza o chaveamento entre as imagens direita e esquerda. Uma vez que o chaveamento é realizado externamente às placas digitalizadoras, podem-se fazer alterações na configuração via software, o que não seria possível se o chaveamento fosse realizado internamente às placas digitalizadoras.

Dispositivo de Visualização

O dispositivo de visualização estereoscópico, constituído de uma tela de cristal líquido (LCD), e com o uso auxiliar de óculos passivos, permite a visualização das imagens tridimensionais a partir da composição de duas imagens bidimensionais, tendo-se com isso a noção de profundidade.

Operação do Sistema

A função básica do sistema de visão é permitir a visualização das imagens em tempo real. As imagens, depois de captadas pelo par de câmeras digitais, são enviadas às duas placas digitalizadoras (cada câmera está ligada a uma placa). Cada placa converte a informação do sinal NTSC proveniente da câmera para um sinal VGA, que é enviado à placa auxiliar, que realiza o chaveamento entre as imagens dos canais esquerdo e direito, permitindo a visualização das duas imagens como se fossem uma só imagem tridimensional, com o auxílio da placa LCD e dos óculos passivos. Como as placas digitalizadoras estão ligadas à placa de vídeo SVGA do computador, é possível a operação de *overlay,* ou seja, o sinal proveniente das câmeras pode ser enviado diretamente à saída da placa de vídeo, permitindo a utilização de um único monitor tanto para a operação do computador quanto para a operação do software do sistema de visão. Além da visualização e aquisição de imagens, o software permite a realização de outras operações, como *zoom*, alinhamento horizontal, e convergência.

Pré-processamento

As imagens, depois de aquisitadas pelo sistema de visão descrito no capítulo anterior, devem ser submetidas a um pré-processamento, que tem por finalidade obter uma melhoria de qualidade, e adequá-las ao processo de dimensionamento. O melhoramento da qualidade inclui técnicas como a equalização do histograma e a filtragem das imagens; já o uso de técnicas de detecção de envoltórias permite uma melhor caracterização dos limites de uma imagem, o que auxilia na determinação de suas coordenadas 2D. Nesta seção discutir-se-ão algumas destas técnicas, principalmente a detecção de envoltórias.

Operações Pontuais

Operações pontuais (3) são operações de memória zero onde um dado nível de cinza $u \in [0;L]$ é mapeado em um outro nível de cinza $v \in [0;L]$, tal que $v = f(u)$. Exemplos de operações pontuais são a transformação negativa, onde uma imagem negativa pode ser obtida escalando-se reversamente os níveis de cinza de acordo com a transformação $v = L - u$, e a equalização de histograma, que permite a modelagem do histograma de uma imagem de forma a obter um histograma uniforme para a imagem resultante.

Operações Espaciais

As operações espaciais (3) em uma imagem são realizadas em vizinhanças locais dos pixels, através da convolução da imagem com um filtro de resposta ao impulso finita chamado máscara espacial. Exemplos de operações espaciais são a filtragem passa-baixa (uma operação de filtragem por média espacial, usada para suavização de ruído), a filtragem passa-alta (usada na extração de envoltórias), e a filtragem passa-faixa (usada no melhoramento de contornos).

Detecção de Envoltória

Um problema de fundamental importância no processamento de uma imagem é a detecção de envoltórias (3,4) Envoltórias caracterizam fronteiras de objetos e, portanto, são usuais para segmentação, reconhecimento e identificação de objetos em imagens digitais, já que o processo de detecção de envoltórias permite a caracterização das fronteiras destes objetos.

O paradigma geral no processo de detecção de envoltórias é um método que consiste de dois passos. O primeiro consiste em acentuar a presença de envoltórias na imagem original *f(x,y)*, criando assim uma nova imagem *g(x,y)*, onde as envoltórias são mais destacadas. Valores maiores de *g(x,y)* indicam um aumento de probabilidade da presença de uma envoltória. O segundo passo consiste em aplicar um limiar a *g(x,y)*, de forma a realizar uma decisão "envoltória ou não-envoltória", produzindo um mapa de envoltórias binário.

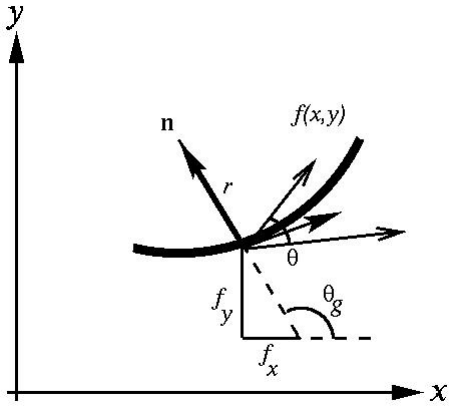

Figura 2: Gradiente de f(x,y) na direção r.

Para uma imagem contínua *f(x,y)* sua derivada assume um máximo local na direção da envoltória. Portanto, uma técnica de detecção de envoltória é medir o gradiente de *f* dentro de um raio *r* em uma direção θ (vide Fig. 2).

Em uma imagem, os pontos de envoltórias podem ser definidos como localidades onde ocorrem mudanças abruptas nas tonalidades de cinza da imagem. Por exemplo, podem ser definidos pontos de envoltória em uma imagem digital como pixels de tom preto com no mínimo um pixel de tom branco na vizinhança. Pode-se considerar também a envoltória como sendo constituída das localidades entre duas regiões homogêneas da imagem onde há diferentes intensidades de iluminação. Esta definição implica que uma envoltória corresponde a uma variação local de iluminação, mas não necessariamente o contrário.

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 o que comumente são chamados de máscaras de convolução discreta. Os operadores mais comuns são os operadores de gradiente, que são representados por um par de máscaras que medem o gradiente da imagem *f(x,y)* nas direções ortogonais, e os operadores de direção, que possuem a propriedade de medir o gradiente de uma imagem em uma determinada direção.

Dimensionamento Tridimensional

Depois de serem aquisitadas e posteriormente processadas, as imagens são submetidas à análise, para o dimensionamento de possíveis falhas e/ou defeitos na estrutura avaliada. O dimensionamento é feito através de um algoritmo de obtenção de coordenadas tridimensionais, baseado em métodos estereofotogramétricos.

A fotogrametria analítica (5,6,7) inclui um conjunto de técnicas pelas quais, a partir de coordenadas das projeções em perspectiva 2D, são feitas inferências sobre a posição 3D, orientação e dimensões de partes do objeto 3D observado em um referencial global. A Fig. 3 ilustra os referenciais global e da câmera, mostrando o ponto no espaço tridimensional e sua projeção nos planos bidimensionais de cada câmera. Estes problemas de inferência podem ser modelados como problemas *least-squares* não-lineares. A partir de uma dada solução aproximada, o algoritmo lineariza iterativamente as funções não-lineares em torno da solução aproximada corrente, e resolve o problema linearizado que fornece os ajustes para a solução corrente.

A orientação exterior de uma câmera é especificada por todos os parâmetros que determinam a pose da câmera no referencial global. Os parâmetros consistem da posição do centro de perspectiva e a direção do eixo óptico. A especificação da orientação exterior é feita a partir das coordenadas 3D de alguns pontos de controle, cujas posições correspondentes na imagem são conhecidas, e resulta na obtenção de três ângulos de rotação e três parâmetros de translação. A orientação interior de uma câmera é especificada por todos os parâmetros que determinam a geometria de um feixe de raios 3D das coordenadas medidas da imagem. Os parâmetros de orientação interior relacionam a geometria da projeção em perspectiva ideal à geometria física de uma câmera, e incluem 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 completa especificação da orientação de uma câmera é dada pela orientação interior e pela orientação exterior.

A orientação relativa e uma câmera em relação a 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 3D, como indica a Fig. 3. O processo de determinação da orientação relativa assume que a orientação interior de cada câmera é conhecida. A orientação absoluta envolve a orientação de um modelo estéreo em um referencial global, e requer a obtenção de sete parâmetros: um fator de escala (que é considerado unitário neste caso), os três parâmetros de translação, e os três parâmetros de rotação. A orientação absoluta é feita a partir de coordenadas 3D de alguns pontos centrais cuja posição na imagem estéreo pode ser determinada. A completa especificação da orientação de um par de câmeras é dada pela especificação dos parâmetros determinados pela orientação relativa e pela orientação absoluta.

Um procedimento de triangulação estéreo é usado para a inferência de um ponto no espaço 3D dadas as projeções em perspectiva deste ponto em cada imagem de um par estéreo (5). O procedimento de triangulação é um caso especial da determinação de um ponto 3D a partir da interseção de mais de dois raios. O procedimento de triangulação faz uso da paralaxe, que é o deslocamento na projeção em perspectiva de um ponto causado por uma variação translacional na posição de observação.

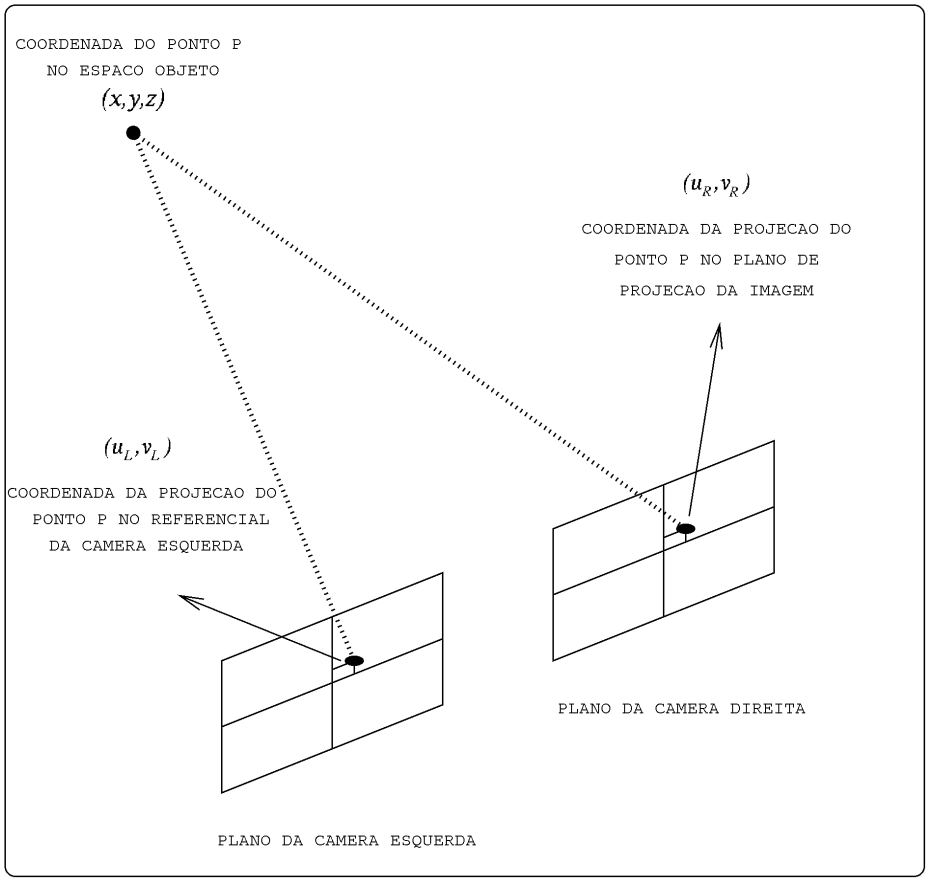

Figura 3: Referenciais global e da câmera.

Aplicação

Esta seção ilustra uma aplicação do sistema de visão tridimensional no dimensionamento de peças metálicas submarinas. Para tal foram realizados alguns testes com imagens de peças aquisitadas em um tanque de prova simulando a condição real de uso. Os testes consistem no cálculo de coordenadas tridimensionais, e o posterior cálculo de dimensões de arestas das peças metálicas utilizadas. Os resultados obtidos serão apresentados, bem como o erro obtido nas medidas.

Imagens Aquisitadas

As imagens a serem utilizadas para a execução dos testes com os algoritmos desenvolvidos para o dimensionamento de objetos 3D são inicialmente aquisitadas com o uso do sistema de visão estéreo descrito anteriormente. Os testes foram feitos em um tanque de prova, no qual foram submersas alguma peças metálicas retangulares em posições variadas, com o objetivo de simular condições submarinas reais com pouca luminosidade. Foram coletadas várias imagens pelo par de câmeras CCD, e para o presente estudo foi selecionado um par estéreo (resultados com outros pares estéreo podem ser obtidos em (8)). As imagens, mostradas na Fig. 4, mostram duas peças metálicas idênticas, de dimensão 100x30x20 (em milímetros). As imagens originalmente possuem resolução de 640x512 pixels; contudo, são apresentadas em escala reduzida, e em tons de cinza.

Pré-processamento

O pré-processamento, como já visto, consiste em, através de técnicas de processamento de imagens, obter uma melhoria da qualidade da imagem, de forma a adequá-la ao processo de dimensionamento tridimensional. No caso das imagens aquisitadas para os testes, será necessária a aplicação de técnicas de detecção de envoltórias, que visam a obter uma maior nitidez na visualização das bordas das peças metálicas utilizadas nos testes, de forma a obter-se uma maior exatidão na aquisição de coordenadas bidimensionais das imagens. Dentre os vários operadores citados anteriormente, os operadores de gradiente apresentaram os melhores resultados, sendo por isso os utilizados neste experimento. Os operadores de direção também apresentaram bons resultados na detecção de envoltórias em determinada direção, o que pode ser útil em certos casos, quando se desejar realçar os limites em uma direção apenas.

Aplicação Prática

Serão mostrados, nesta seção, os resultados dos testes realizados nas imagens aquisitadas. Os resultados de diversas medidas feitas de arestas das peças metálicas das imagens são mostrados na Tab. 1, sendo comparadas as dimensões reais e as calculadas de cada aresta, bem como o erro obtido (absoluto e relativo) em cada medida. Os pontos utilizados em cada imagem para os cálculos são vértices das peças metálicas, e são indicados na Fig. 4 por letras maiúsculas. A medida de cada aresta foi feita a partir das coordenadas tridimensionais dos vértices que a delimitam. Por exemplo, no cálculo da dimensão da aresta AF, inicialmente foram calculadas as coordenadas dos vértices A e F e em seguida foi calculada a distância entre esses vértices.

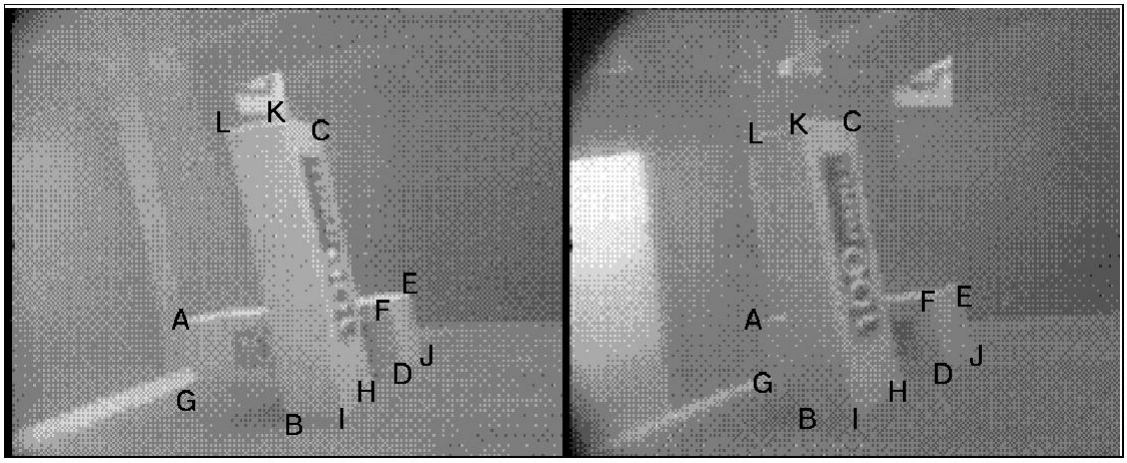

Figura 4: Exemplo de par estéreo aquisitado.

Tabela 1: Resultados dos testes de dimensionamento.

Aresta	Dimensão (mm)		Erro Obtido	
	Calculada	Real	Absoluto	Relativo
$\overline{AE}$	92,773	101,980	9,207	9,028%
$\overline{AF}$	30,377	30,000	0,377	1,257%
$\overline{AG}$	98,078	101,980	3,902	3,826%
$\overline{BC}$	106,310	106,301	0,000	0,000%
$\overline{BI}$	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%
$\overline{CH}$	101,132	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	30,000	5,068	4,969%
$\overline{HK}$	106,896	104,403	2,493	2,388%
$\overline{HL}$	107,145	106,301	0,843	0,793%

Conclusão

O presente estudo desenvolveu um sistema de medição tridimensional a ser utilizado em atividades de inspeção submarina de tubos e equipamentos de petróleo. O sistema, como visto anteriormente, é dividido em três blocos: visão estéreo, pré-processamento, e dimensionamento tridimensional. O sistema de visão estéreo utilizado permitiu a visualização das imagens em tempo real, com noção de profundidade, através de um software de interface amigável. O pré-processamento, através de técnicas de processamento de imagens, tem o objetivo de efetuar uma melhoria na qualidade da imagem, de forma a adequá-la ao processo de dimensionamento. A técnica de detecção de envoltórias aplicada às imagens aquisitadas evidenciou limites dos objetos presentes na imagem, permitindo uma melhor definição na obtenção dos pontos necessários ao processo de dimensionamento. Para a detecção de envoltórias, foram utilizados em vários experimentos operadores de gradiente, que apresentaram melhores resultados na definição dos limites.

O método de dimensionamento permitiu a obtenção de coordenadas tridimensionais de pontos no espaço 3D, a partir de coordenadas bidimensionais aquisitadas do plano de cada imagem de um par estéreo, através de um programa desenvolvido em linguagem C, com o uso de algoritmos de fotogrametria analítica. A partir destas coordenadas tridimensionais foram feitas, para efeito de teste do algoritmo desenvolvido, medições de distâncias entre pontos nas imagens (no caso dos testes, medições das dimensões de arestas de peças metálicas presentes nas imagens), sendo comparadas as dimensões reais de cada aresta com as dimensões calculadas, bem como o erro obtido em cada medição. Os erros obtidos nos testes foram, em média, entre 3% e 6 % com relação à dimensão real de cada aresta. Estes valores são considerados pequenos para a aplicação em vista, que é a inspeção de dutos e equipamentos submarinos de petróleo.

O cálculo das coordenadas apresenta ainda uma certa sensibilidade à variação de alguns pixels no valor das coordenadas bidimensionais. A escolha dos pontos necessários ao processo de determinação da orientação exterior também pode influenciar no cálculo das coordenadas. O dimensionamento de profundidades em imagens essencialmente planas, por exemplo, pode ocasionar erros maiores. Estes aspectos estão sendo investigados de forma a tornar o sistema menos sensível à operação técnica.

Embora o sistema aqui descrito tenha sido desenvolvido para aplicações em atividades submarinas, suas características de baixo custo, confiabilidade e operação remota em tempo real com sensação de telepresença, permitem estender sua utilização em várias instâncias em que seja necessária a automação de tarefas, principalmente em situações de perigo para os técnicos envolvidos.

Agradecimentos

Gostaríamos de agradecer aos Engenheiros Antonio Carlos Jacques da Hydratec Tecnologia Submarina e Marcus Vinicius Maciel Martins do CENPES/PETROBRÁS, pelas frutíferas discussões técnicas sobre vários aspectos do projeto, e pela cessão de alguns módulos que compõem o sistema desenvolvido.

Referências

1 PETRAGLIA, Antonio & PETRAGLIA Mariane R. In: Sistema de Aquisição e Processamento de Sinais para Ensaios não Destrutivos. Rio de Janeiro, COPPETEC, 1995.

2 JACQUES, Antonio C. et Alli. In: Sistema de Medição Tridimensional para Aplicações Submarinas – Sistema TV3D Submarino sem Cintilação (TV3D System Flickerless). 1º Relatório Parcial. Rio de Janeiro, CENPES, 1994.

3 JAIN, Anil K. Fundamentals of Digital Image Processing. Prentice-Hall Inc., 1989. 569 p.

4 FAUGERAS, Olivier. Three-Dimensional Computer Vision:a Geometric Viewpoint. The MIT Press, 1993. 663 p.

5 HARALICK, Robert M. & SHAPIRO, Linda G. Computer and Robot Vision. Addison-Wesley Publishing Co., 1993. Vol. 2.

6 MOFFIT, Francisc H. & MIKHAIL, Edward M., Photogrammetry. 2ª ed. Har & Row Publishers, 1980.

7 TURNER, John et Alli. In:Real Time Photogrammetry – A Technique for Today or Tomorrow? Subtech'91, Society for underwater Technology, 1991. Pp.319-331.

8 SILVA, Lenildo C. Sistema de Visão Tridimensional para Inspeção e Dimensionamento. Tese de Mestrado. Rio de Janeiro, Programa de Engenharia Elétrica, COPPE/UFRJ, 1998. 87 p.