

5º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



POSICIONAMENTO DE UM VEÍCULO AÉREO AUTÔNOMO PARA DETECÇÃO DE CORROSÕES EM DUTOS

Tania Luna Laura, Pablo Javier Alsina, Adelardo Dantas de Medeiros

Departamento de Engenharia de Computação e Automação, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

Este Trabalho foi preparado para apresentação no 5º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás- 5º PDPETRO, realizado pela a Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás-ABPG, no período de 15 a 22 de outubro de 2009, em Fortaleza-CE. Esse Trabalho foi selecionado pelo Comitê Científico do evento para apresentação, seguindo as informações contidas no documento submetido pelo(s) autor(es). O conteúdo do Trabalho, como apresentado, não foi revisado pela ABPG. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões da Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás. O(s) autor(es) tem conhecimento e aprovação de que este Trabalho seja publicado nos Anais do 5ºPDPETRO.

**POSICIONAMENTO DE UM VEÍCULO AÉREO AUTÔNOMO PARA
DETECÇÃO DE CORROSÕES EM DUTOS**

Abstract

This work is part of a large project: *Detection of corrosion in pipelines through continuous supervision of an Unmanned Aerial Vehicle*. To achieve this end, it is necessary preliminary steps, such as the implementation of a dynamic and graphic simulator of the helicopter, the camera calibration and the algorithm to extraction of features of a sequence of images. This will enable the implementation of a high-level controller based on images that must control the positioning of a camera, thus controlling the pose of the helicopter in our own platform for simulation. The results are computer programs to capture and store points in sequences of images appropriate to the stage of high-level control in a helicopter.

Introdução

Uma das características básicas de processos na indústria petroquímica é o uso de substâncias inflamáveis em elevada pressão que normalmente são transportadas e/ou armazenadas em sistemas de tanques e dutos equipados com a mais alta tecnologia garantindo assim, elevados níveis de segurança. Alguns fatores de difícil controle, na maioria das vezes associados à deterioração do material (corrosão e fadiga mecânica) ou à falha humana deixam vulneráveis até os mais confiáveis sistemas que, em última instância, acabam por apresentar derramamento de produto por vazamento e explosões que acabam provocando incêndios colocando em risco a vida de seres humanos, além de causar prejuízos com perdas de produtos, tempo fora de operação, gastos com reparo; e principalmente com a contaminação do meio ambiente.

Exigências estritas dos órgãos reguladores e pressão das entidades ambientalistas, aliadas ainda aos prejuízos e conseqüências ambientais econômicas geradas por ditos vazamentos exigem sistemas de inspeção e monitoramento constante e detalhado de todos os sistemas de dutos. Para este fim, exige-se que os métodos de monitoramento executem de forma rápida e eficiente tais tarefas.

Por outro lado, a detecção e localização de vazamentos desempenham um papel importante na gestão de uma rede de gasodutos. Os métodos e técnicas para detecção de vazamentos, tais como, monitoramento acústico, monitoramento óptico, amostragem de gás, monitoramento de solo, monitoramento de fluxo, fuga de fluxo magnético e os métodos dinâmicos baseados em modelo, com suas respectivas vantagens e restrições, são propostos em aplicações específicas prevenindo fortes perdas e danos ambientais. De fato, não existe solução genérica e universal quando se trata de detecção e localização de vazamentos.

Em particular se considerarmos o transporte dutoviário como referência, um dos limites tecnológicos é, a detecção de pequenos vazamentos, causados por corrosão, desgaste ou fadiga de material. Sistemas capazes de detectar este tipo de vazamento são uma das principais demandas atuais dos operadores de dutos. Medidas preventivas, como rondas de supervisão e inspeção aliadas com instrumentação, programas computacionais e hardwares apropriados para análise e detecção de

5º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS

corrosões podem minimizar vazamentos nos gasodutos. Rápidos avanços em teorias de controle, assim como em tecnologias de comunicação e sensoriamento permitiram que as mesmas pudessem ser embarcadas em veículos aéreos não tripulados de pequeno porte, criando a possibilidade de seu uso em missões de supervisão e inspeção de dutos. O veículo mais apropriado para desempenhar missões de supervisão e inspeção de gasodutos com muita eficiência é o helicóptero, por voar com grande eficiência e alta precisão próximo dos alvos [tanques e dutos], por possuir habilidades de voo longo e baixa velocidade, voo estacionário [pairado] e por não precisar de muito espaço para pousar e decolar em ambientes desconhecidos.

“Técnicas de controle por servovisão são apropriadas para resolver tarefas que exigem vãos de alta precisão e próximo dos alvos, desde que o controle por servovisão faz uso de informação capturada por sensores de visão artificial (câmeras) para controlar movimentos de um robô” (Hutchinson; Hager; Corke, 1996, p. 651). Assim, a partir de dados visuais adquiridos por câmaras embarcadas no helicóptero é possível estimar movimentos nas câmeras, conseqüentemente no helicóptero.

O helicóptero [VANT- Veículo Aéreo Não Tripulado] deve movimentar-se mediante controle por servovisão com a finalidade de capturar seqüências de imagens com baixa distorção e baixo ruído, que posteriormente por meio de um processamento nas seqüências de imagens, possibilitarão a detecção de corrosões e presença de defeitos nos dutos. A utilização de um VANT para supervisão proporciona algumas vantagens sobre os métodos de inspeção tradicionais, tais como, reduzir acidentes de trabalho ariscados, a possibilidade de usar técnicas não destrutivas [termo-infravermelha, infravermelha] para detecção de corrosões.

Neste trabalho descreve-se uma das técnicas de controle por servovisão mais apropriadas para o controle de voo estacionário [pairado] de um helicóptero, que servirá como uma justificativa dos algoritmos computacionais implementados, simulador do quadrirotor, calibração de câmera e extração de características.

Metodologia

A principal questão que surge naturalmente enquanto se utiliza visão em aplicações de controle é: *Como a informação vinda dos sensores de visão podem ser utilizadas para proposito de controle de um robô?*

A realimentação visual na malha de controle foi introduzida com a finalidade de incrementar a flexibilidade e exatidão dos sistemas robóticos. O controle por servovisão (ver figura 1) regula o posicionamento de um robô com relação a um alvo, fazendo uso de informações extraídas de seqüências de imagens capturadas desde uma câmera embarcada (configuração câmera em mão). O objetivo dos esquemas de controle por servovisão é para minimizar um erro $e(t)$, o qual é tipicamente definido por:

$$e(t) = s(m(t), a) - s^*$$

onde, o vetor $m(t)$ é um conjunto de medições da imagem [ou seja, coordenadas de pontos de interesse na imagem ou coordenadas do centróide de um objeto na imagem]. Estas medições da imagem são utilizadas para calcular um vetor de k características visuais, $s(m(t), a)$, no qual a é um conjunto de parâmetros que representa conhecimento adicional sobre o sistema, ou seja, parâmetros intrínsecos da câmera ou modelos de objetos 3D. O vetor s^* contém valores desejados das características que usualmente, geram-se utilizando uma aproximação conhecida como *teach by showing*, que consiste em

5º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS

mover o robô à posição desejada, calcular e armazenar as coordenadas das posições das características de interesse no plano da imagem.

Esquemas de controle por servovisão diferem principalmente na forma em que s é projetado. O controle por servovisão baseado em imagem (2D) no qual s consiste de um conjunto de características que são imediatamente disponíveis nos dados da imagem. Já no controle por servovisão baseado em posição (3D), s consiste de um conjunto de parâmetros 3D, os quais devem ser estimados a partir de medições da imagem.

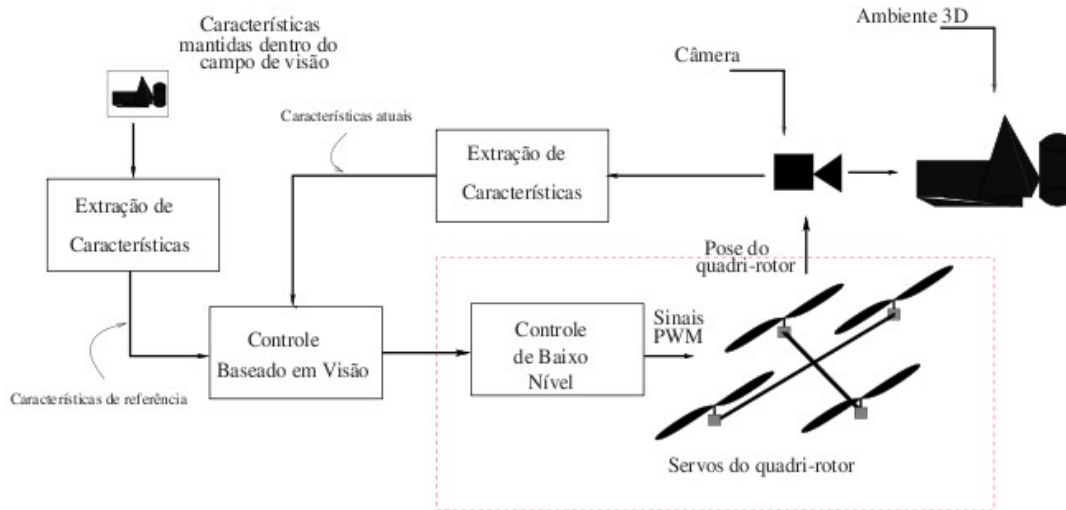


Figura 1: Diagrama de blocos das técnicas de controle por servovisão.

Uma vez que s é escolhido, procede-se ao projeto do esquema de controle. Uma abordagem direta é para projetar um controlador de velocidade. Para isto, exige-se a relação entre a variação de s respeito do tempo e a velocidade da câmera. Seja a velocidade espacial da câmera $\mathbf{V}_c = (V_c, W_c)$, com V_c que indica velocidade linear instantânea da origem do frame da câmera e W_c que indica a velocidade angular instantânea do frame da câmera. A relação entre $\dot{s}$ e V_c é dada por

$$\dot{s} = L_s V_c$$

onde, L_s é chamada de matriz de interação relacionada a s . Conseqüentemente, obtêm-se a relação entre a velocidade da câmera e o erro respeito do tempo:

$$\dot{e} = L_e V_c$$

onde, $L_e = L_s$. Considerando V_c como a entrada para o controlador do robô e se, por exemplo, deseja-se tentar garantir um decaimento exponencial desacoplado do erro, obtêm-se,

$$\mathbf{V}_c = -\lambda \mathbf{L}_e^+ e$$

Mas em um sistema real é impossível de se conhecer a pseudoinversa da matriz de interação, por isso é necessário uma aproximação da pseudo-inversa da matriz de interação. Assim, o projeto básico implementado por muitos controladores por servovisão é:

$$\mathbf{V}_c = -\lambda \widehat{\mathbf{L}_e^+} e$$

A) Controle por servovisão baseado em homografia ou 2½D

O Controle por servovisão baseado em homografia ou controle por servovisão 2½D (ver figura 2), este método combina as vantagens dos métodos 3D e 2D e evita suas desvantagens. A entrada deste método é expressa uma parte no espaço cartesiano e outra no espaço de imagem. Mais precisamente, este método é baseado na estimação do deslocamento da câmera (rotação e translação escalada da câmera) entre as vistas atual e desejada de um objeto. Deve-se enfatizar que, ao contrário do controle por servovisão 3D, a estimação do deslocamento parcial da câmera, não precisa de nenhum modelo do alvo, o que incrementa a versatilidade e a área de aplicação do controle por servovisão .

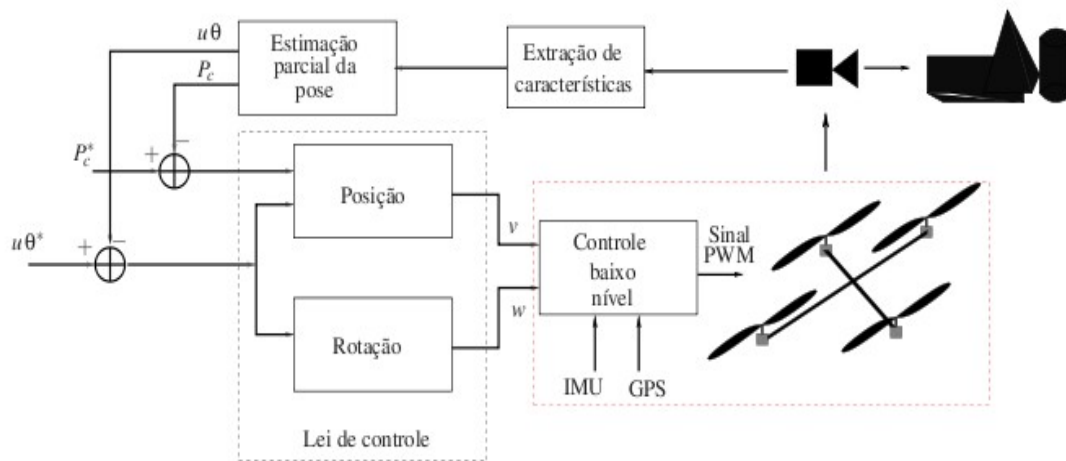


Figura 2. Diagrama de blocos do controle por servovisão 2½D.

Considere três pontos p_i no alvo de 3D que definem um plano de referência Π (ver figura 3). Sabe-se que os pontos p_i no frame atual da câmera F , estão relacionados aos pontos p_{id} no frame desejado da câmera por uma matriz de homografia projetiva $\mathbf{G}$, tal que $p_i = \mathbf{G}p_{id}$ ($i=1,2,3$). Se o alvo é planar, $\mathbf{G}$ pode ser estimada solucionando um sistema linear, usando mínimo 4 pontos deste plano. Se o alvo não é planar, a estimação de $\mathbf{G}$ é um problema não linear. Se estão disponíveis como mínimo 8 pontos (3 para definir Π e 5 pontos não pertencentes a Π) é possível estimar a matriz de homografia. Na literatura existem inúmeras técnicas para tal estimação (Malis; Chaumette; Boudet, 1999, p. 240). Diferentes métodos foram recentemente utilizados no controle baseado em visão.

Seja $\mathbf{A}$ a matriz de parâmetros intrínsecos da câmera,

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} fk_u & -fk_u \cot(\phi) & u_0 \\ 0 & -fk_v / \sin(\phi) & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_u & \alpha_{uv} & u_0 \\ 0 & \alpha_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

onde, u_0 e v_0 são as coordenadas dos pixels do ponto principal, k_u e k_v é um fator escalar ao longo dos eixos $\vec{x}$ e $\vec{y}$ (em pixels/metro), ϕ é o ângulo entre os eixos e f é a distância focal. $\mathbf{A}$ é a

5º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS

matriz de transformação entre as coordenadas de pixel $\mathbf{p}$ e as coordenadas normalizadas $\mathbf{m}$ de um ponto na imagem,

$$\mathbf{p} = \mathbf{A}\mathbf{m}$$

Suponha que a calibração da câmera é (ou seja, $\mathbf{A}$ é conhecida) a homografia Euclidiana $\mathbf{H}$ é calculada da seguinte forma:

$$\mathbf{H} = \mathbf{A}^{-1} \mathbf{G} \mathbf{A}$$

Depois $\mathbf{H}$ é calculada, pode ser decomposto como uma soma da matriz de rotação e da matriz de posto 1,

$$\mathbf{H} = \mathbf{R} + \mathbf{t}_d \mathbf{n}^{*T}$$

onde $\mathbf{R}$ é a matriz de rotação entre os frames atual e desejado, $\mathbf{n}^*$ é o vetor normal de valor unitário para expressar Π no frame desejado F_d , $\mathbf{t}_d$ é definido como $\mathbf{t}/d^*$, $\mathbf{t}$ é o vetor de translação entre o frame atual e o desejado, d^* é a distância de Π a F_d . A partir de $\mathbf{H}$ e as características de imagem é possível determinar os parâmetros de movimentos e a estrutura do plano de referência. Por exemplo d e d^* são desconhecidos (onde d é a distância atual entre F e Π), mas a relação $r=d/d^*$ pode ser facilmente estimada.

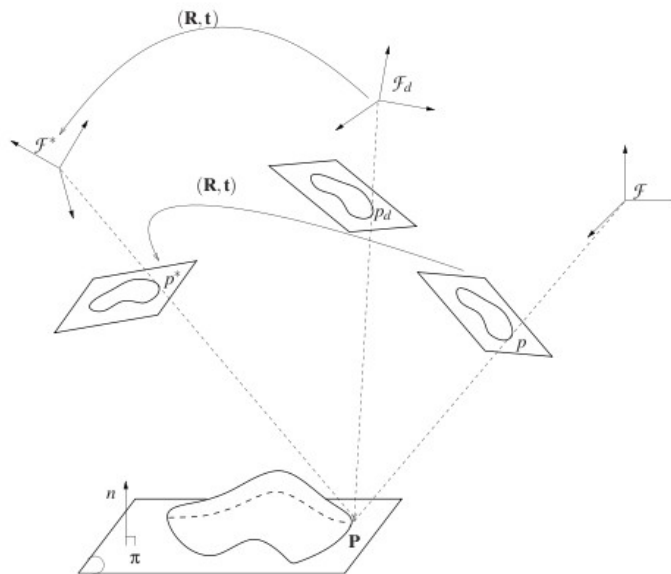


Figura 3. Controle por servovisão 2D/2D.

B) Extração de características

Hutchinson et al. (1996) definiram uma característica de uma imagem como “ qualquer característica estrutural que pode ser extraída de uma imagem, estas podem ser linhas e quinas, área e cor, bordas, curvas e/ou contornos”. Tipicamente características de imagens correspondem a projeções das características físicas dos objetos no plano da imagem da câmera [Veja a figura 3, considera-se o ponto $\mathbf{P}$ do objeto em 3D projetado no plano da imagem como um ponto p em 2D].

5º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS

Características relevantes, são aquelas que podem ser detectadas inequivocamente desde diferentes vistas da cena (ver figura 3). A escolha depende do contexto e da aplicação final (Silveira; Malis; Rives, 2006). Algumas características usualmente têm propriedades que são mais diferenciadas que outras em diferentes situações, por esta razão, o algoritmo de extração de características deve ser capaz de escolher, dentre as disponíveis, a melhor característica para o rastreamento (Mejias, 2006, p. 113).

Uma técnica muito utilizada para detectar características relevantes em ambientes externos é o *Detector de Harris* que baseado em operadores diferenciais de primeira ordem dado uma janela retangular, calcula-se a variação da intensidade da imagem quando deslocando-se ligeiramente esta janela. Uma quina é caracterizada por elevadas mudanças de intensidade. O detector de Harris (Harris; Stephen, 1988) é um popular detector de pontos de interesse, devido a sua forte invariância a, rotação, escala e variação de iluminação e também por ser menos sensível a perturbações.

Resultados e Discussão

Conforme mostrado na descrição da técnica de controle por servovisão baseado em homografia, requer-se algumas etapas preliminares para poder implementar esta técnica. Assim, a primeira etapa preliminar é implementar um simulador dinâmico- gráfico do helicóptero que servirá como plataforma virtual para simulações de voo (ver figura 4).



Figura 4: Simulador visual do quadricóptero.

A segunda etapa é a implementação de um algoritmo para calibração da câmera com o objetivo de calcular a matriz de parâmetros intrínsecos da câmera A .

$$A = \begin{bmatrix} -1.06414 & 0 & 1.78510 \\ 0 & -2.90862 & -1.90601 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Finalmente, a implementação de um algoritmo para detecção e extração de características relevantes de uma sequência de imagem. Para isto, coletaram-se dados de um ambiente modelo em pequena

5º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS

escala (LAMP – Laboratório de Avaliação e Medição de Petróleo) para testar tal algoritmo. Resultados visuais, podem ser observados nas figura 5 e 6.

O algoritmo de extração de características foi testado com variação de iluminação (céu nublado, sol radiante) e percebeu-se, que este é pouco sensível a mudanças de iluminação (não há perda de características).

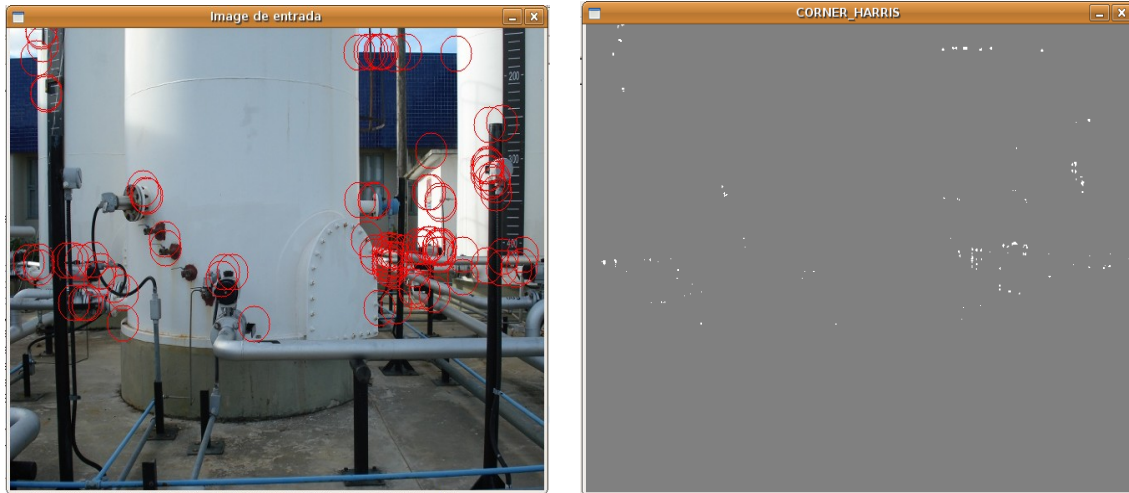


Figura 5: Tela da imagem de entrada e tela das características extraídas.

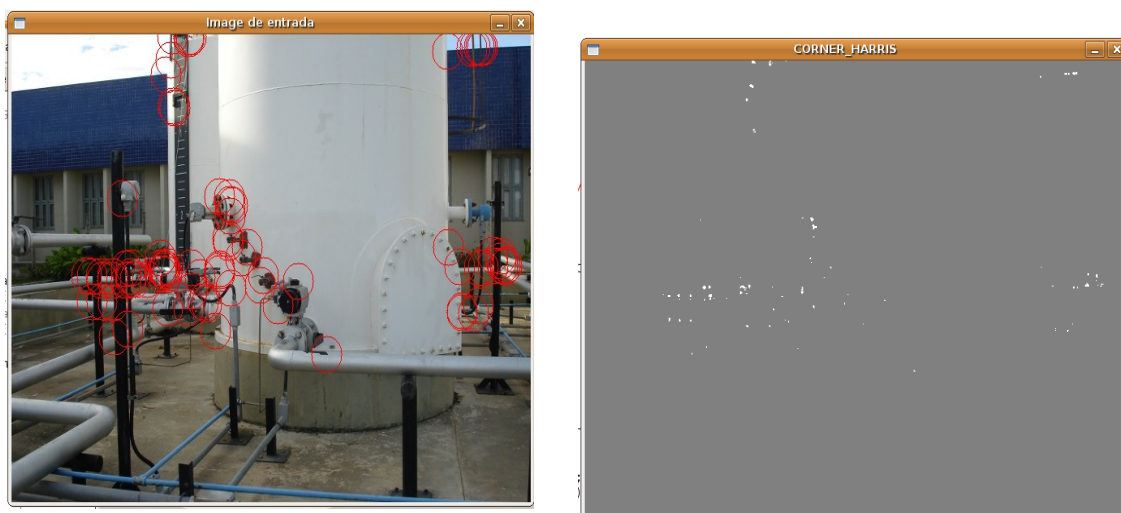


Figura 6: Tela da imagem de entrada e tela das características extraídas.

Conclusões

As implementações do simulador dinâmico-gráfico, calibração da câmera e extração de características facilitarão a implementação de um controlador de posicionamento em alto nível baseado em visão para nosso helicóptero, consequentemente, tarefas de inspeção serão possíveis.

5º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS

Agradecimentos

À Agência Nacional de Petróleo e Gás Natural e Biocombustíveis- ANP, ao Programa de Recursos Humanos PRH-14, por fim, ao laboratório de Robótica do DCA- UFRN.

Referências Bibliográficas

Alvarez, Luis O. Mejías, Control visual de un vehículo aéreo autónomo usando detección y seguimiento de características en espacios exteriores, Tese de doutorado, Escuela técnica Superior de Ingenieros Industriales de la Universidad Politécnica de Madrid, 2006.

Harris, C.; Stephens, M.J. A combined corner and edge detector, Alvey Vision Conference, pp. 147–152, 1988.

Hutchinson, S.; Hager, D.; Corke, P. A Tutorial on Visual Servo Control. IEEE Transaction on Robotics and Automation, v. 12, n. 5, p. 651-670, 1996.

Malis, E.; Chaumette, F.; Boudet S. 2 ½ D Visual Servoing. IEEE Transactions on Robotics and Automation, v. 15 , n. 2 , p. 238-250 , 1999.

Silveira, G.; Malis E.; Rives P. Visual servoing over unknown, unstructured large-scale scenes. Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automatio,, Orlando, Florida, pp. 4142–4147, 2006.