

DESENVOLVIMENTO DE ESQUEMA DE CONTROLE COM REALIMENTAÇÃO VISUAL PARA UM MANIPULADOR ROBÓTICO

Allan Aminadab André Freire Soares – aminadab@dca.ufrn.br

Pablo Javier Alsina – pablo@dca.ufrn.br

Adelardo Adelino Dantas de Medeiros – adelardo@dca.ufrn.br

DCA-CT-UFRN
CEP 59072-970 - Natal - RN

Resumo Neste trabalho propõe-se um esquema de controle cinemático utilizando realimentação visual para um braço robótico com cinco graus de liberdade. Desenvolveu-se um método, que utiliza técnicas de visão computacional, para determinação da posição e orientação (pose) do braço a partir da imagem do mesmo fornecida por uma câmera CCD.

Um rótulo triangular colorido é disposto na garra do manipulador e regras heurísticas eficientes são utilizadas para obter os vértices desse rótulo na imagem. Métodos numéricos são aplicados para recuperar a pose a partir desses vértices. Um esquema de calibração de cores fundamentado no algoritmo *k-means* foi implementado de modo a garantir a robustez do sistema de visão na presença de variações na iluminação. Os parâmetros extrínsecos da câmera são calibrados usando-se quatro pontos coplanares extraídos da imagem.

Para duas poses distintas da garra, inicial e final, adquiridas através da imagem, interpola-se uma trajetória de referência em espaço Cartesiano. O esquema de controle proposto possui como sinal de erro a diferença entre a pose de referência e a pose atual da garra obtida através da imagem. Após a aplicação de ganhos, o sinal de erro é mapeado em incrementos de junta utilizando-se a pseudoinversa do Jacobiano do manipulador. Esses incrementos são aplicados às juntas do manipulador deslocando-se a garra para a pose de referência.

Palavras Chaves: braço robótico, servo-visão, controle mão-olho.

Abstract: This work proposes a kinematics control using visual feedback for a robot arm with five degrees of freedom. Using computational vision techniques, a method was developed to determine the arm's position and orientation (pose) from robot's image acquired by a CCD camera.

A colored triangular label is fixed above manipulator's tool. Efficient heuristic rules are applied to obtain the label's vertices in the image. The robot's pose is calculated from those vertices using numerical methods. The vision system robustness, in the presence of light variations, is guaranteed through a color calibration scheme based in the *k-means* algorithm. The extrinsic camera parameters are computed from

image coordinates of four coplanar points.

Two distinct poses, initial and final, are interpolated to generate a desired trajectory in Cartesian space to the tool's manipulator. The error signal of the proposed control scheme consists in the difference between desired tool's pose and actual tool's pose supplied by image processing. Proportional gains are applied at the error signal, and the signal result is mapped in joint's increments using manipulator's Jacobian pseudoinverse. These joint's increments move manipulator's tool to the desired pose.

Keywords: robot arm, visual servoing, eye-to-hand control.

1 INTRODUÇÃO

Os métodos convencionais de controle em malha fechada para a posição e orientação de manipuladores robóticos são baseados na realimentação das posições angulares das juntas “ θ ” medidas indiretamente através de codificadores óticos.

No espaço de juntas (Figura 1) a lei de controle “ τ ” para o manipulador é obtida a partir do erro “ $\delta\theta$ ” entre os ângulos de junta realimentados e os ângulos de referência “ θ_r ” obtidos através da aplicação de cinemática inversa às poses de referência “ χ_r ” produzidas por um gerador de trajetória.

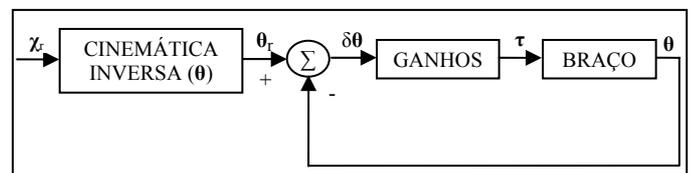


Figura 1. Controle convencional em espaço de juntas

No espaço Cartesiano (Figura 2) a lei de controle é gerada a partir do erro “ $\delta\chi$ ” entre a pose atual, obtida aplicando-se cinemática direta aos ângulos de junta realimentados, e a pose de referência produzida pelo gerador de trajetória.



Figura 2. Controle convencional em espaço Cartesiano

Os métodos convencionais de controle dependem então dos modelos cinemáticos do braço robótico. Se o modelamento cinemático do braço contiver erros, ocorrerá que um erro “ $\delta\theta$ ” nulo no espaço de juntas não representará um erro de pose nulo no espaço Cartesiano real do robô. Da mesma forma que um erro “ $\delta\chi$ ” nulo no espaço Cartesiano não representará um erro de pose nulo no espaço Cartesiano real do robô.

Atualmente inúmeras pesquisas são realizadas na área de controle de manipuladores robóticos utilizando a informação visual como uma alternativa ao controle convencional. Um esquema de controle com realimentação visual realmente trabalha em malha fechada, pois a pose da garra do manipulador não será mais fornecida de maneira indireta por codificadores óticos, mas por um sinal visual digitalizado que, processado, indicará com precisão a pose da garra do robô independente dos modelos cinemáticos do mesmo.

1.1 Proposta de Trabalho

Propõe-se neste trabalho elaborar um esquema de controle cinemático em malha fechada, no espaço Cartesiano 3D, para posicionar e orientar a garra de um manipulador robótico usando realimentação visual (Figura 3).



Figura 3. Esquema de controle proposto

A malha de realimentação recebe como sinal de entrada as imagens do manipulador robótico captadas em tempo real por uma câmera direcionada para o seu espaço de trabalho (configuração mão-olho).

A pose da garra obtida para cada processamento de imagem é usada no cálculo do sinal de controle, isto é, no cálculo do incremento angular “ $\delta\theta$ ” a ser aplicado em cada junta do braço. O símbolo “ K_p ” corresponde ao vetor de ganhos proporcionais aplicados ao sinal de erro “ $\delta\chi$ ”.

1.2 Implementação da Proposta

O braço robótico utilizado na implementação do esquema de controle proposto possui cinco graus de liberdade e todas as juntas são do tipo revolução (Figura 4). O espaço de trabalho do braço é construído em cor neutra (preto) e a iluminação nele incide com intensidade aproximadamente constante e distribuição uniforme (Aires, 2001, p. 6-8).

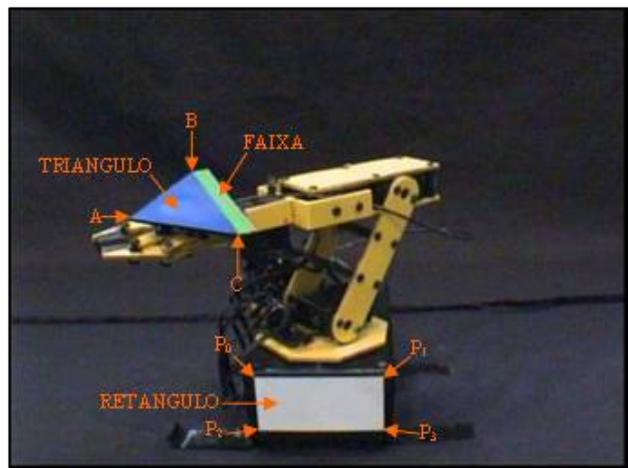


Figura 4. Manipulador robótico e seu espaço de trabalho

Rótulos coloridos são associados ao manipulador robótico e recuperados através da imagem permitindo a calibração dos parâmetros extrínsecos da câmera (retângulo) e a obtenção da pose da garra do manipulador (triângulo e faixa).

2 CALIBRAÇÃO DAS CORES

A Tabela 1 mostra as cores presentes em cada imagem captada pela câmera e o local onde estas são encontradas.

Tabela 1 – Cores e localização

COR	LOCAL
Amarelo	braço robótico
Preto	espaço de trabalho
Azul	triângulo
Verde	faixa
Branco	retângulo

Cada *pixel* da imagem possui associado um padrão de cor composto por três descritores: os parâmetros R, G e B do modelo de cor RGB (Gonzalez e Woods, 1992, p. 226-227). Padrões pertencentes à mesma cor formam uma classe de cor, que possui um centro que a representa. Para identificar a qual classe de cor pertence um *pixel* qualquer da imagem aplica-se a este uma classificação por distância mínima em relação ao centro de cada classe (Gonzalez e Woods, 1992, p. 574-580).

Mudanças na luminosidade sujeitam variações correspondentes nos centros das classes de cores. Por isso, previamente ao controle, é necessário calibrar o sistema de visão computacional, composto pela câmera CCD conectada a uma placa de aquisição e processamento de imagens instalada num computador, determinando os centros das classes de cores para as condições de iluminação do momento.

O método de calibração das cores adotado neste trabalho consiste na aplicação do algoritmo *k-means* ao conjunto de *pixels* de uma imagem do manipulador rotulado no seu espaço de trabalho (Dias, 2002, p. 31-33). O algoritmo calcula os centros para oito classes de cores: quatro classes correspondentes às diferentes tonalidades de amarelo e uma classe para cada cor restante de acordo com a tabela 1.

A calibração das cores permite segmentar corretamente os rótulos fixados no robô (Figura 5). Os *pixels* da figura abaixo estão setados com os parâmetros RGB padrões da classe de cor a qual pertence.

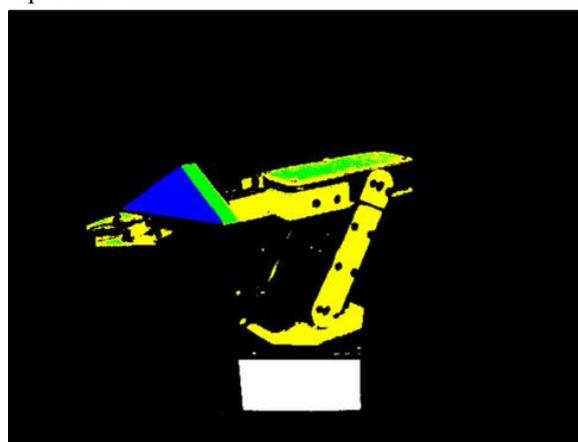


Figura 5. Imagem segmentada usando as cores calibradas

3 CALIBRAÇÃO DA CÂMERA

A calibração da câmera consiste em determinar os valores de um conjunto de grandezas relacionadas com a construção e constituição física da câmera, parâmetros intrínsecos, e com a posição e orientação da câmera no espaço Cartesiano em relação a um referencial global, parâmetros extrínsecos.

3.1 Modelo de Câmera

Neste trabalho é utilizado o modelo de câmera pontual modificado (Gaspar, 1994, p. 17-32) que representa a projeção perspectiva de um ponto 3D no plano da imagem (Figura 6).

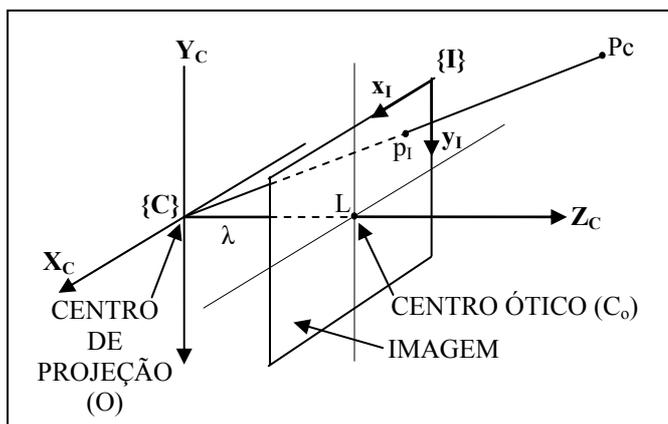


Figura 6. Modelo de câmera

A projeção “ $p_i(x_p, y_p)$ ” na imagem, do ponto “ $P_c(X, Y, Z)$ ” expresso no referencial da câmera $\{C\}$, é determinada pela intersecção do raio de luz proveniente de “ P_c ”, em direção ao centro de projeção “ O ”, com o plano da imagem situado no centro da lente “ L ”. O ponto “ C_o ” corresponde ao centro ótico, ponto no qual o eixo ótico (Z_c) intercepta o plano da imagem.

3.2 Calibração Intrínseca

Para a calibração dos parâmetros intrínsecos da câmera aplicou-se o método proposto por Heikkilä e Silvén (1997). As rotinas computacionais que implementam esse método de calibração intrínseca, e o modelo do rótulo padrão utilizado na mesma, foram obtidas em Bouguet (1999). A Tabela 2 apresenta os parâmetros intrínsecos calibrados, a descrição desses parâmetros e os valores obtidos para cada parâmetro após a execução do método de calibração.

Tabela 2 – Resultados da calibração intrínseca

PARÂMETROS	DESCRIÇÃO	VALOR
λ_x (pixels)	foco na direção “ x_i ”	852
λ_y (pixels)	foco na direção “ y_i ”	853
x_{PCo} (pixel)	centro ótico: coordenada “ x_i ”	335
y_{PCo} (pixel)	centro ótico: coordenada “ y_i ”	181
α_{xy}	inclinação entre “ x_i ” e “ y_i ”	89.9°
k_{r1}	coeficiente: distorção radial	-0.283
k_{r2}	coeficiente: distorção radial	0.125
k_{t1}	coef. de distorção tangencial	-0.002
k_{t2}	coef. de distorção tangencial	0.000333

Neste trabalho a distância focal “ λ ” foi utilizada na forma de suas componentes “ λ_x ” e “ λ_y ”, expressas em *pixels*, e corrigiu-se as distorções radial e tangencial que as lentes provocam na imagem (Brown, 1971).

3.2.1 Equações de projeção

Normalizando-se as coordenadas de “ P_c ”, tem-se que:

$$p_n = \left(\frac{X}{Z}, \frac{Y}{Z} \right) = (x_n, y_n). \quad (1)$$

Considerando-se que:

$$r^2 = x_n^2 + y_n^2. \quad (2)$$

A inclusão das distorções das lentes nas coordenadas de “ p_n ” produzem as coordenadas normalizadas distorcidas “ p_d ”:

$$p_d = (1 + k_{r1}r^2 + k_{r2}r^4)p_n + K_T = (x_d, y_d). \quad (3)$$

O termo “ K_T ” corresponde aos efeitos da distorção tangencial:

$$K_T = (2k_{t1}x_n y_n + k_{t2}(r^2 + 2x_n^2), k_{t1}(r^2 + 2y_n^2) + 2k_{t2}x_n y_n). \quad (4)$$

As coordenadas finais na imagem para a projeção de “ P_c ” são:

$$x_p = \lambda_x(x_d + y_d \cos(\alpha_{xy})) + x_{pc}. \quad (5)$$

$$y_p = \lambda_y x_d + y_{pc}. \quad (6)$$

O mapeamento inverso (normalização) consiste em obter-se as coordenadas normalizadas “ p_n ” correspondente às coordenadas da imagem “ (x_p, y_p) ”.

Devido à não-linearidade das expressões (5) e (6), não existem expressões algébricas que permitam o mapeamento inverso. A solução é aplicar métodos de busca não-lineares às equações (5) e (6) onde a estimativa inicial para “ p_n ” seja o ponto “ p_d ” obtido analiticamente a partir de “ (x_p, y_p) ” (Heikkilä e Silvén, 1997, p. 4-5).

3.3 Calibração Extrínseca

A calibração dos parâmetros extrínsecos é definida através da determinação da matriz de transformação de coordenadas (Yoshikawa, 1990, p.13-28) do referencial da base do robô $\{B\}$ para o referencial da câmera $\{C\}$: ${}^C_B T$.

Neste trabalho utilizou-se o método de calibração extrínseca com solução única desenvolvido por Kamata et al. (1992), onde dois referenciais intermediários são introduzidos entre o referencial da base $\{B\}$ e o referencial da câmera $\{C\}$.

Os referenciais intermediários reduzem para quatro a quantidade de pontos de referência necessários para a calibração extrínseca. Esses quatro pontos são coplanares no espaço 3D e suas coordenadas (P_0, P_1, P_2, P_3) em relação ao referencial da base $\{B\}$ são previamente conhecidas (ver fig. 4). Os pontos de referência correspondem aos vértices do retângulo fixo na base do robô.

Para a extração dos vértices do retângulo na imagem inicialmente segmenta-se a borda do mesmo. Identifica-se como *pixel* da borda de um rótulo, o *pixel* pertencente ao rótulo em que pelo menos um dos vizinhos 8-conectados (Jain, 1989, p. 357-358) não pertence a classe de cor do rótulo.

Determinam-se as equações das retas que contêm os lados do retângulo aplicando-se o método clássico da transformada de

Hough para segmentação de retas numa imagem (Jain, 1989, p. 362) aos *pixels* da borda. A intersecção das retas fornece os vértices.

A Figura 7 mostra a detecção dos lados do retângulo (amarelo) e a extração dos vértices (marcados com um 'x' vermelho).

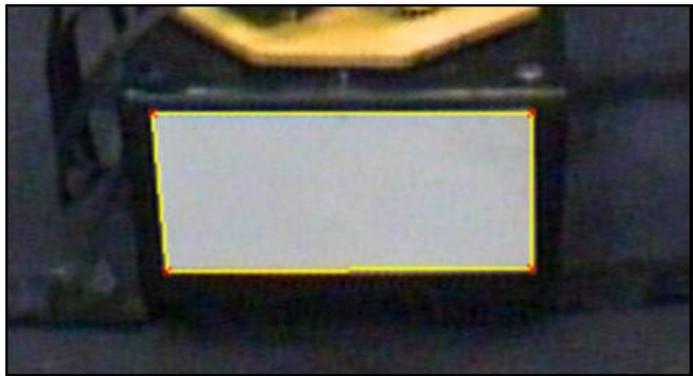


Figura 7. Detalhe da extração dos vértices do retângulo

4 EXTRAÇÃO DOS VÉRTICES E CÁLCULO DA POSE

Nesta seção encontra-se o que realmente há de novo no âmbito científico da proposta inicial para o controle cinemático de um manipulador robótico utilizando realimentação visual (Soares, 2005, p.48-80): o conjunto de regras heurísticas desenvolvidas para a extração e identificação dos vértices do rótulo triângulo na imagem e o método de cálculo da pose da garra a partir das coordenadas desses vértices.

4.1 Regras Heurísticas: Extração dos Vértices

As regras heurísticas descritas a seguir são uma forma eficiente de extrair em tempo real os vértices do triângulo na imagem sem a necessidade de analisar todos os *pixels* da mesma:

- inicialmente percorre-se a imagem em passos fixos quanto ao número de *pixels* até encontrar um *pixel* interno ao triângulo " p_{int} " (Figura 8, em vermelho). O passo de varredura é escolhido o maior possível de modo que pelo menos quatro *pixels* internos ao triângulo sejam analisados quando a garra do manipulador robótico se encontrar na sua posição mais afastada da câmera;

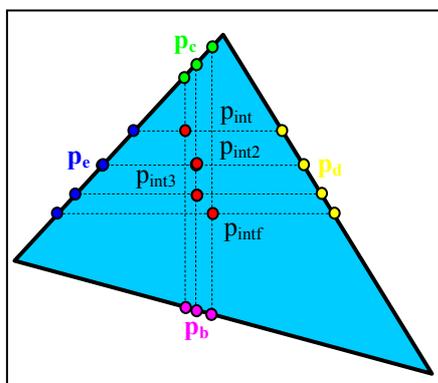


Figura 8. Determinação dos *pixels* internos e de borda

- a partir de " p_{int} ", percorre-se a imagem *pixel a pixel* em quatro direções: para cima " p_c " (Figura 8, em verde), para baixo " p_b " (Figura 8, em magenta), para a direita " p_d " (Figura 8, em amarelo) e para a esquerda " p_e " (Figura 8, em azul escuro) até alcançar-se as bordas do triângulo;

- Calcula-se a média das coordenadas dos *pixels* de borda encontrando-se um novo *pixel* interno " p_{intj} " ($j=2,3,\dots$). Para " p_{intj} " obtêm-se os novos *pixels* de borda (item b). Este passo é repetido enquanto o novo *pixel* interno obtido for diferente do anterior, ou até que um número máximo de iterações, previamente definido, seja alcançado (Figura 8);
- Os *pixels* de borda encontrados nos itens "a" a "c" são armazenados para posterior utilização na etapa de ajuste das equações das retas (passo p). Os passos seguintes serão aplicados sobre o último *pixel* interno obtido " p_{intf} " (*pixel* interno final) e seus respectivos *pixels* de borda (Figura 8);
- na busca pelas bordas do triângulo a partir do *pixel* interno final duas situações podem ocorrer:

- caso 1: dois *pixels* de borda estão num mesmo lado do triângulo, os outros dois estão em lados isolados do triângulo (Figura 8);

- caso 2: dois *pixels* de borda estão num mesmo lado do triângulo, os outros dois estão num outro lado (Figura 9);

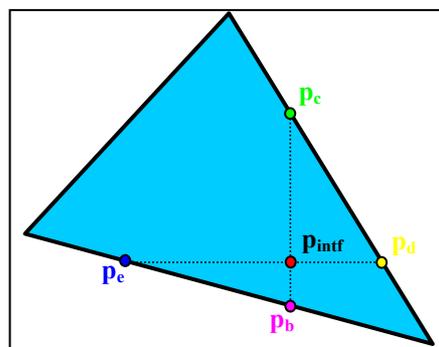


Figura 9. Detecção das bordas: caso 2

- determinam-se os *pixels* de borda que pertencem a um mesmo lado do triângulo, analisando-se os *pixels* em pares: (p_c, p_c), (p_c, p_d), (p_e, p_b) e (p_b, p_d). O par de *pixels* pertence ao mesmo lado se o *pixel* médio do par é um *pixel* da borda;
- para o caso "1" do item "e" é necessário determinar o *pixel* de borda " p_a " (*pixel* auxiliar) num dos lados que contém apenas um *pixel*. O *pixel* auxiliar é encontrado varrendo-se o triângulo em busca da borda, a partir de " p_{intf} ", no sentido diagonal oposto ao lado já detectado (Figura 10);

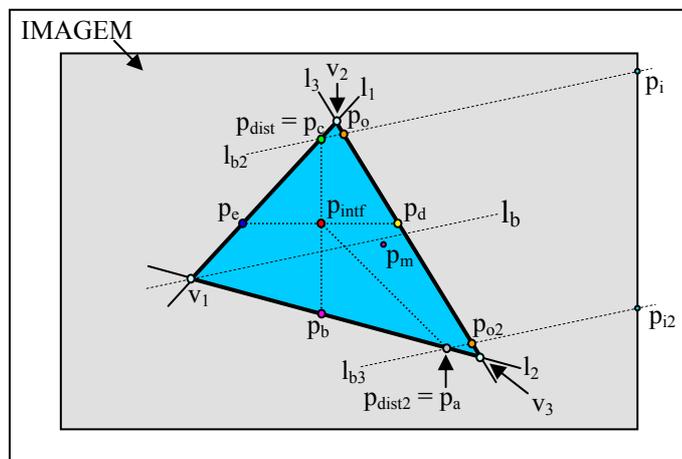


Figura 10. Extração dos vértices

- testa-se qual dos dois *pixels* isolados encontra-se no mesmo lado do triângulo que contém " p_a ". A determinação de " p_a " e do par ordenado que este forma com um dos *pixels* isolados direciona a extração dos vértices do triângulo para o caso "2" do passo "e";

- i) para o caso “2” do passo “e” utilizam-se os pares de *pixels* situados sobre dois lados distintos do triângulo para determinar as equações das retas, “ l_1 ” e “ l_2 ”, que contêm esses lados. A intersecção das retas “ l_1 ” e “ l_2 ” fornece o vértice “ v_1 ” do triângulo (Figura 10);
- j) determina-se para cada uma das retas “ l_1 ” e “ l_2 ”, qual dentre os *pixels* detectados sobre cada uma delas é o mais distantes do vértice “ v_1 ” (p_{dist1}, p_{dist2}). Para o caso da Figura 10: “ $p_{dist} = p_c$ ” e “ $p_{dist2} = p_a$ ”;
- k) determina-se a inclinação da reta “ l_b ”, bissetriz das retas “ l_1 ” e “ l_2 ”, e do ângulo interno ao triângulo em “ v_1 ”. Para determinar qual das retas bissetrizes para “ l_1 ” e “ l_2 ” é a bissetriz desejada, usa-se como ponto de teste o *pixel* médio “ p_m ” para os *pixels* “ p_{dist} ” e “ p_{dist2} ” (Figura 10);
- l) determinam-se as equações de duas retas auxiliares, “ l_{b2} ” e “ l_{b3} ”, cujas inclinações são iguais à da reta “ l_b ”, e que contêm respectivamente os *pixels* “ p_{dist} ” e “ p_{dist2} ” (Figura 10);
- m) encontram-se então os *pixels* “ p_1 ” e “ p_2 ”, correspondentes à intersecção das retas “ l_{b2} ” e “ l_{b3} ” com os extremos da imagem, no sentido oposto ao vértice “ v_1 ” (Figura 10);
- n) aplica-se o algoritmo de Bresenham (1965) aos pares de *pixels* (p_{dist1}, p_1) e (p_{dist2}, p_2), onde “ p_{dist} ” e “ p_{dist2} ” são os *pixels* iniciais. O algoritmo permite varrer-se o triângulo sobre as retas “ l_{b2} ” e “ l_{b3} ” determinando respectivamente dois *pixels* de borda “ p_{o1} ” e “ p_{o2} ” no lado que contém apenas um *pixel* de borda (Figura 10);
- o) os *pixels* “ p_{o1} ” e “ p_{o2} ” determinam a reta “ l_3 ” que contém o lado do triângulo oposto ao vértice “ v_1 ” (Figura 10);
- p) calcula-se as distâncias de cada *pixel* de borda armazenado no passo “d” às retas “ l_1 ”, “ l_2 ” e “ l_3 ”. Cada *pixel* analisado é associado à reta da qual se encontra mais próximo, produzindo três conjuntos de *pixels* que descrevem os lados do triângulo. Aplica-se o método numérico dos mínimos quadrados para ajustar cada conjunto de *pixels* numa única reta (Ruggiero e Lopes, 1996, p. 272-277);
- q) recalcula-se “ v_1 ” para as novas equações das retas;
- r) determina-se o vértice “ v_2 ” do triângulo, contido na intersecção das retas “ l_1 ” e “ l_3 ” (Figura 10);
- s) determina-se o vértice “ v_3 ” do triângulo, contido na intersecção das retas “ l_2 ” e “ l_3 ” (Figura 10).

4.2 Regras Heurísticas: Identificação dos Vértices

Extraídos os vértices na imagem (v_1, v_2, v_3) é necessário determinar a que lados do triângulo real eles pertencem, identificando-os conforme a sua etiquetagem (v_a, v_b, v_c). A identificação dos vértices utiliza a informação fornecida pela faixa adjacente a um dos lados do triângulo (ver Figura 4).

O vértice “ v_a ” é obtido na intersecção dos lados não adjacentes à faixa. Os vértices remanescentes, por exemplo “ v_2 ” e “ v_3 ”, considerando-se que “ v_a ” corresponde à “ v_1 ”, são identificados realizando-se o produto vetorial:

$$(v_2 - v_a) \times (v_3 - v_a). \quad (7)$$

Caso o sinal de (7) seja positivo, faz-se “ $v_b=v_3$ ” e “ $v_c=v_2$ ”, senão, faz-se “ $v_b=v_2$ ” e “ $v_c=v_3$ ”.

4.3 Determinação da Pose

As coordenadas dos vértices do triângulo na imagem e a identificação dos mesmos com os vértices reais (3D) possibilitam calcular a pose da garra, ou seja, obter a posição e orientação da garra do robô manipulador em relação ao referencial da base {B}.

Considerando-se “ $i=a,b,c$ ”, as coordenadas dos vértices extraídos e identificados na imagem são expressas por:

$$v_i(x_i, y_i). \quad (8)$$

As coordenadas dos vértices do triângulo no referencial da câmera {C} são desconhecidas e expressas por:

$$V_i(X_i, Y_i, Z_i). \quad (9)$$

As normalizações das coordenadas dadas por (9) são dadas por:

$$x_{ni} = \frac{X_i}{Z_i}. \quad (10)$$

$$y_{ni} = \frac{Y_i}{Z_i}. \quad (11)$$

Os valores para as variáveis “ x_{ni} ” e “ y_{ni} ” são obtidos a partir do mapeamento inverso das coordenadas dadas por (8).

As distâncias Euclidianas entre os vértices no plano Cartesiano 3D produzem as seguintes equações:

$$(X_a - X_b)^2 + (Y_a - Y_b)^2 + (Z_a - Z_b)^2 = l_T^2. \quad (12)$$

$$(X_a - X_c)^2 + (Y_a - Y_c)^2 + (Z_a - Z_c)^2 = l_T^2. \quad (13)$$

$$(X_b - X_c)^2 + (Y_b - Y_c)^2 + (Z_b - Z_c)^2 = l_T^2. \quad (14)$$

O termo “ l_T ” corresponde ao comprimento do lado do triângulo equilátero. Isolando-se “ X_a ”, “ Y_a ”, “ X_b ”, “ Y_b ”, “ X_c ” e “ Y_c ” nas expressões (10) e (11) e substituindo-se o resultado nas equações (12) a (14), obtêm-se o sistema de equações não-lineares (15) para “ Z_a ”, “ Z_b ” e “ Z_c ”.

$$\begin{cases} \left(x_{na}^2 + y_{na}^2 + 1 \right) \cdot Z_a^2 - \\ \left(x_{na} x_{nb} + y_{na} y_{nb} + 1 \right) \cdot Z_a Z_b + \\ \left(x_{nb}^2 + y_{nb}^2 + 1 \right) \cdot Z_b^2 - l_T^2 = 0 \\ \left(x_{na}^2 + y_{na}^2 + 1 \right) \cdot Z_a^2 - \\ \left(x_{na} x_{nc} + y_{na} y_{nc} + 1 \right) \cdot Z_a Z_c + \\ \left(x_{nc}^2 + y_{nc}^2 + 1 \right) \cdot Z_c^2 - l_T^2 = 0 \\ \left(x_{nb}^2 + y_{nb}^2 + 1 \right) \cdot Z_b^2 - \\ \left(x_{nb} x_{nc} + y_{nb} y_{nc} + 1 \right) \cdot Z_b Z_c + \\ \left(x_{nc}^2 + y_{nc}^2 + 1 \right) \cdot Z_c^2 - l_T^2 = 0 \end{cases} \quad (15)$$

O sistema de equações (15) é resolvido utilizando-se o método de Newton para sistemas de equações não-lineares (Ruggiero e Lopes, 1996, p. 192-200).

Substituindo os valores obtidos para “ Z_a ”, “ Z_b ” e “ Z_c ” nas expressões dadas por (10) e (11) obtêm-se os valores para as demais coordenadas “ X_i ” e “ Y_i ” dos vértices do triângulo no

referencial da câmara {C}. As coordenadas dos vértices em {C} são descritas no referencial da base {B}, “ ${}^B V_i$ ”, aplicando-se a transformação “ ${}^C T$ ” a cada um dos vértices “ V_i ”. Esta transformação corresponde à transformação inversa da transformação de coordenadas fornecida pela etapa de calibração extrínseca da câmara.

4.3.1 Obtenção da orientação da garra em {B}

A partir das coordenadas dos vértices do triângulo em {B} obtêm-se três vetores unitários (X_R, Y_R, Z_R), referencial {R}, que possuem a mesma direção e sentido dos vetores unitários correspondentes aos eixos coordenados (X_g, Y_g, Z_g) do referencial da garra {G} (Figura 11).

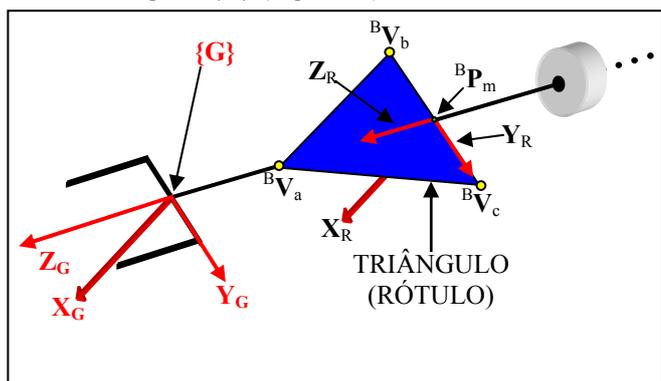


Figura 11. Detalhe da garra: obtenção da orientação

O vetor “ Y_R ” é obtido diretamente da diferença entre “ ${}^B V_c$ ” e “ ${}^B V_b$ ”:

$$Y_R = \frac{{}^B V_c - {}^B V_b}{\|{}^B V_c - {}^B V_b\|} \quad (16)$$

O denominador “ $\|{}^B V_c - {}^B V_b\|$ ” corresponde a aplicação da norma Euclidiana para o vetor “ $({}^B V_c - {}^B V_b)$ ”.

O vetor “ Z_R ” é obtido da diferença entre “ ${}^B V_a$ ” e o ponto médio (${}^B P_m$) para “ ${}^B V_b$ ” e “ ${}^B V_c$ ”:

$${}^B P_m = \frac{{}^B V_b + {}^B V_c}{2} \quad (17)$$

$$Z_R = \frac{{}^B V_a - {}^B P_m}{\|{}^B V_a - {}^B P_m\|} \quad (18)$$

O vetor correspondente a “ X_R ” é obtido a partir do produto vetorial dos vetores calculados em (16) e (18):

$$X_R = Y_R \times Z_R \quad (19)$$

Os vetores “ X_R ”, “ Y_R ” e “ Z_R ” compõem a matriz de orientação da garra em relação ao referencial da base do robô “ ${}^B R_G$ ”.

A representação final da orientação da garra em {B} dar-se na forma do vetor “ ${}^B O_G$ ”, de dimensão “ 3×1 ”, composto pelos ângulos “ γ ”, “ β ” e “ α ” referentes à representação da matriz “ ${}^B R_G$ ” em ângulos fixos X-Y-Z, também denominados *roll*, *pitch* e *yaw* (Yoshikawa, p.22-23, 1990).

4.3.2 Obtenção da posição da garra em {B}

A posição da garra do manipulador em relação ao referencial da base {B} é dada pelo vetor “ ${}^B P_G$ ” calculado e expresso da seguinte forma:

$${}^B P_G = {}^B T^R P_G = [{}^B X_G \ {}^B Y_G \ {}^B Z_G]^T \quad (20)$$

O termo “ ${}^B T^R$ ” é a matriz de transformação homogênea entre os referenciais do rótulo, {R}, e da base, {B}. O termo “ ${}^R P_G$ ” corresponde à posição fixa da garra em {R} para qualquer configuração da mesma. O referencial do rótulo {R} possui a mesma orientação do referencial da garra {G} e sua origem situa-se no ponto médio “ ${}^B P_m$ ” permitindo a determinação de “ ${}^B T^R$ ” (Figura 11).

O cálculo de “ ${}^B P_G$ ” conclui a determinação da pose “ χ ” da garra do manipulador robótico no referencial da base {B}:

$$\chi = [{}^B P_G \ {}^B O_G] = [{}^B X_G \ {}^B Y_G \ {}^B Z_G \ \gamma \ \beta \ \alpha]^T \quad (21)$$

4.4 Resultados

A Figura 12 mostra a aplicação das regras heurísticas para extração e identificação dos vértices numa imagem real. Na figura os *pixels* internos e de borda encontrados antes do *pixel* final são omitidos. Os *pixels* amarelos isolados correspondem aos testes aplicados aos pares ordenados formados pelos *pixels* de borda. Os *pixels* laranja isolados correspondem aos testes aplicados aos pares ordenados (pa,pb) e (pa,pd). Em ciano se destacam as execuções do algoritmo de Bresenham.

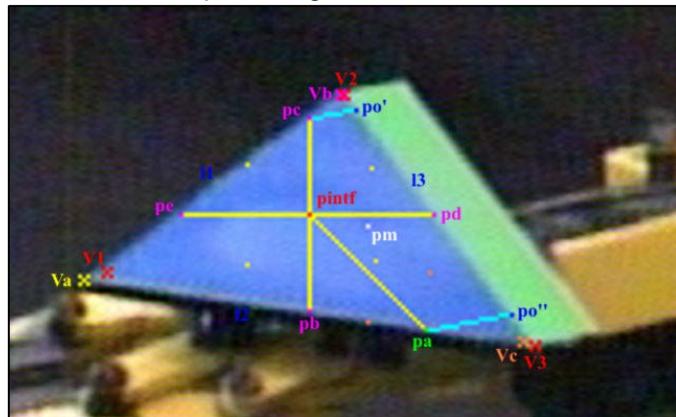


Figura 12. Extração e identificação dos vértices

A Tabela 3 apresenta dez experimentos de captação da pose, para a garra mantida numa pose espacial fixa em relação a {B}. “ ΔM ” corresponde a variação máxima de posição e orientação.

Tabela 3 – Cálculo da pose

POSE OBTIDA	POSIÇÃO (mm)			ORIENTAÇÃO (°)		
	${}^B X_G$	${}^B Y_G$	${}^B Z_G$	γ	β	α
1	50	-120	108	-136	66	-82
2	44	-122	105	-136	68	-82
3	49	-120	107	-136	67	-82
4	47	-121	108	-134	66	-81
5	47	-121	108	-134	66	-81
6	47	-121	108	-134	66	-81
7	47	-120	107	-136	67	-82
8	47	-120	107	-136	67	-82
9	44	-122	105	-136	67	-82
10	47	-121	108	-134	66	-81
ΔM	7			3.2		

A variação máxima para a posição apresentada na tabela 3 corresponde a maior distância Euclidiana encontrada entre os vetores de posição. A variação máxima para a orientação corresponde a maior distância Euclidiana encontrada entre os vetores de orientação.

Outros dez experimentos semelhantes ao da Tabela 3 foram realizados para dez poses fixas diferentes da garra do manipulador no espaço 3D. As variações máximas de posição e orientação fornecidas pelo experimento da Tabela 3 foram as maiores obtidas. Estes valores definem o critério de parada utilizado no algoritmo de controle.

5 O ESQUEMA DE CONTROLE PROPOSTO

Inicialmente, antes da efetiva aplicação do esquema de controle proposto, desloca-se manualmente o manipulador para uma pose desejada, capturando-se essa pose, através da imagem, como sendo a pose inicial. Posteriormente, desloca-se novamente o manipulador de forma manual para uma pose desejada diferente da anterior, capturada, também através da imagem, como sendo a pose final. Capturadas as poses inicial e final gera-se a trajetória desejada para a garra do manipulador em espaço Cartesiano e, finalmente, retorna-se o manipulador robótico para a pose inicial.

Para cada pose de referência (χ_r) fornecida pelo gerador de trajetória geram-se os incrementos de junta necessários para alcançá-la executando-se o seguinte algoritmo referente ao esquema de controle proposto:

- captura-se via da imagem a pose atual da garra " χ ";
- gera-se o sinal de erro " $\delta\chi$ " fazendo-se a diferença entre a pose de referência e a pose atual;
- aplicam-se ganhos proporcionais (K_p) ao sinal de erro;
- calcula-se o Jacobiano da garra do manipulador em relação a $\{B\}$: " ${}^B J_G(\theta)$ ";
- calcula-se a pseudoinversa do Jacobiano;
- aplica-se a pseudoinversa do Jacobiano ao sinal de erro resultante do passo "c" gerando-se os incrementos de junta " $\delta\theta$ ";
- aplica-se os incrementos de junta às juntas do manipulador;
- os passos de "a" a "g" são repetidos até que o sinal de erro encontre-se dentro do limite estabelecido como critério de parada, isto é, até que a pose atual da garra alcance a pose de referência. Alcançar a pose de referência significa obter-se erros de posição e orientação menores que os respectivamente indicados por " ΔM " na Tabela 3.

A execução do controle com realimentação visual para uma trajetória da garra, previamente definida, produziram os seguintes resultados (Figuras 13 e 14) para a pose da garra em relação ao referencial $\{B\}$. Nestas figuras o desempenho do controlador proposto (em azul) foi comparado com o desempenho de um controlador em malha aberta (em vermelho) estando a referência indicada na cor preto.

O controlador em malha aberta implementado é semelhante ao controle com realimentação visual proposto. A diferença de

funcionamento é que para cada pose de referência fornecida pelo gerador de trajetória o algoritmo de controle obtém os ângulos de junta correspondentes através da solução do problema de cinemática inversa do manipulador robótico, processo que está sujeito a erros de modelagem. Esses ângulos são aplicados às juntas do manipulador promovendo o deslocamento do mesmo. Ao término de cada deslocamento da garra capturou-se a pose da mesma através da imagem para a análise comparativa.

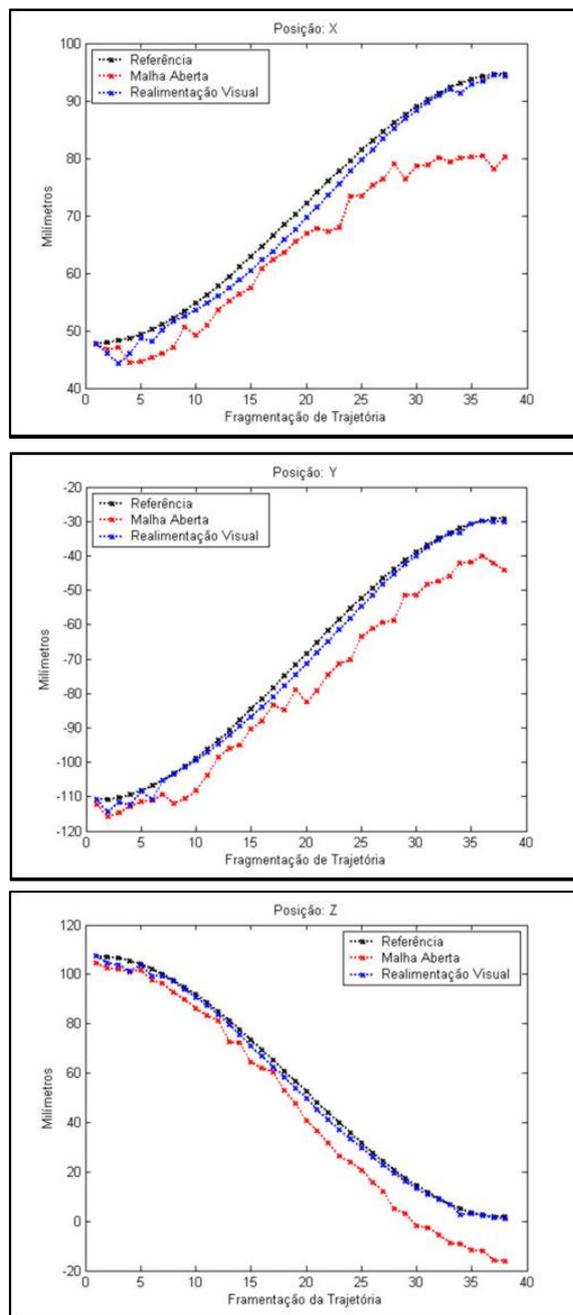


Figura 13. Resultados para a posição: ${}^B X_G$, ${}^B Y_G$ e ${}^B Z_G$

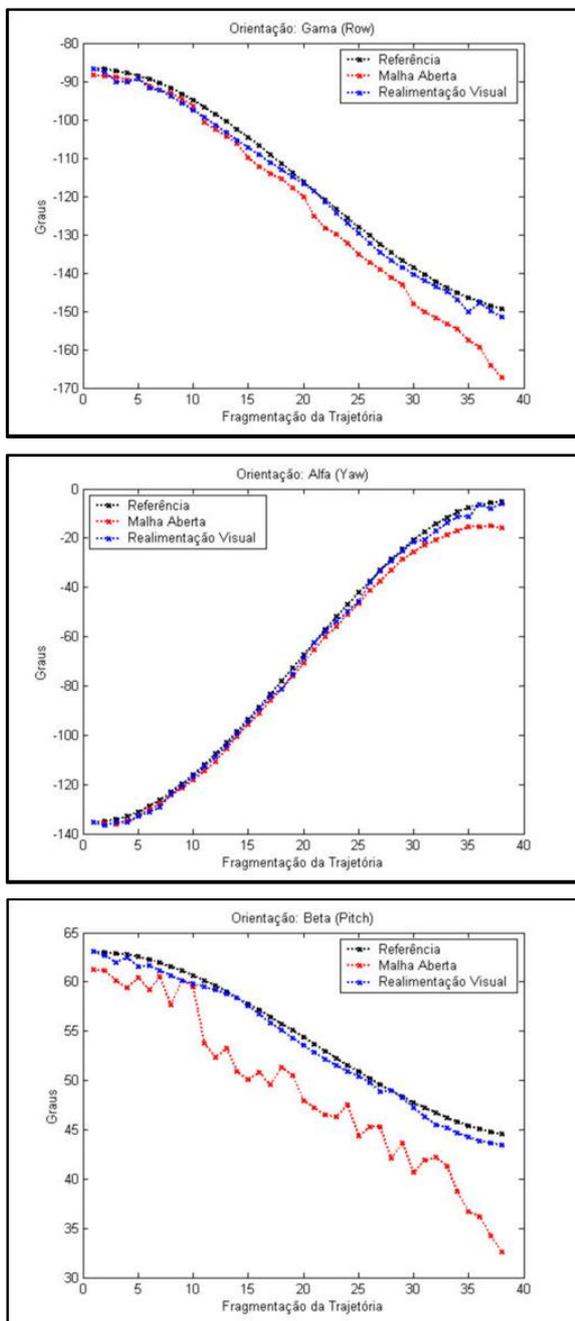


Figura 14. Resultados para a orientação: γ , β e α

6 CONCLUSÃO

Os resultados mostraram que, devido a imprecisão do modelo cinemático usado na cinemática inversa, os erros de posição e orientação para a garra do manipulador aumentam durante a execução do esquema de controle em malha aberta, enquanto que esses erros foram minimizados durante a execução do esquema de controle com realimentação visual proposto, sempre acompanhando de perto a referência. Desta forma, o sistema de controle proposto possui desempenho satisfatório quando comparado ao sistema de controle convencional em malha aberta e a utilização da realimentação visual cumpre com o seu objetivo principal que é melhorar a precisão do sistema de controle convencional.

Os rótulos coloridos, as regras heurísticas para extração/identificação dos vértices do triângulo na imagem e determinação da pose, e a lei de controle simples garantiram a eficiência do esquema de controle cinemático com realimentação visual, proposto para um manipulador robótico didático (de baixo custo).

Como perspectiva futura destaca-se a realização de novos experimentos usando o esquema de controle com realimentação visual proposto, analisando-se os erros de posição e orientação no domínio do tempo. Estes experimentos possibilitarão a comparação de desempenhos entre o esquema de controle proposto e outras técnicas de controle existentes na literatura.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- Aires, K. R. T. (2001). Desenvolvimento de um sistema de visão global para uma frota de mini-robôs móveis. Natal. 59f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- Bouguet, J.-Y. (1999). Camera calibration toolbox for MATLAB. Disponível em: <http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc> Acesso em: 12 ago. 2005.
- Bresenham, J. E. (1965). Algorithm for computer control of Digital Plotter. IBM System Journal, v. 4, pp. 25-30, jan.
- Brown, D. C. (1971). Closed-range camera calibration. Photogrammetric engineering, v. 37, n. 8, p. 855-866.
- Dias, A. M. (2002). Controle de manipulador redundante utilizando realimentação visual. Natal. 92 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- Gaspar, J. A. da C. P. (1994). Visão para robótica móvel: detecção de obstáculos sobre pavimentos planos. Lisboa. 104f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores). Instituto Superior Técnico – Universidade Técnica de Lisboa.
- Gonzalez, R. C.; Woods, R. E. (1983). *Digital image processing*. Addison-Wesley.
- Heikkilä, J.; Silvén O. (1997). A Four-step Camera Calibration Procedure with Implicit Image Correction. IEEE COMPUTER SOCIETY CONFERENCE ON COMPUTER VISION AND PATTERN RECOGNITION. Proceedings... San Juan: 1997. p. 1106-1112.
- Jain, A. K. (1989). *Fundamentals of digital image processing*. New Jersey: Prentice-Hall.
- Kamata, S.-I.; Eason, R. O.; Tsuji, M.; Kawaguchi, E. (1992). A camera calibration using a 4 point-targets. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PATTERN RECOGNITION, 11., Hague. p. 550-553.
- Ruggiero, M. A. G.; Lopes, V. L. da R. (1996). *Cálculo numérico: aspectos teóricos e computacionais*. 2 ed. São Paulo: Makron Books.
- Soares, A. A. A. F. (2005). Desenvolvimento de um esquema de controle com realimentação visual para um robô manipulador. Natal. 126f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- Yoshikawa, T. (1990). *Foundations of robotics: analysis and control*. Massachusetts: The MIT Press.