

# Abordagens ao Controlo Visual de Robôs Manipuladores

P.J. Sequeira Gonçalves\* e J.R. Caldas Pinto\*\*

\* Departamento de Engenharia Industrial

Instituto Politécnico de Castelo Branco

Av. do Empresário – 6000-767 Castelo Branco

Telf: +351 272 339 300; fax: +351 272 339 399; e-mail: [pgoncalves@est.ipcb.pt](mailto:pgoncalves@est.ipcb.pt)

\*\* Departamento de Engenharia Mecânica

Instituto Superior Técnico

Av. Rovisco Pais – 1049-001 Lisboa

Telf: +351 218 417 000; fax: +351 218 417 187; e-mail: [jcpinto@dem.ist.utl.pt](mailto:jcpinto@dem.ist.utl.pt)

**Resumo** — No presente artigo é utilizada a visão por computador para controlar um robô manipulador. A inclusão da visão em sistemas robóticos tem como principal objectivo o aumento da flexibilidade e precisão destes sistemas. São apresentadas três abordagens ao problema: controlo visual cinemático baseado na imagem, controlo visual cinemático híbrido, controlo visual dinâmico. Com base em resultados experimentais obtidos através da aplicação das diferentes abordagens, é realizado um estudo comparativo da sua aplicação ao controlo de um robô de dois graus de liberdade.

## 1. Introdução

A utilização de visão por computador para controlar um robô é denominada na literatura [1] como visual servoing, controlo visual de robôs. A inclusão da visão em sistemas robóticos tem como principal objectivo o aumento da flexibilidade e precisão destes sistemas. O papel da visão por computador é o de fornecer ao robô o estado do seu ambiente de trabalho, para que esta informação possa ser utilizada no seu controlo.

A informação sobre o ambiente de trabalho do robô obtida através da imagem, informação visual, é utilizada directa ou indirectamente na lei de controlo. Neste caso, é usualmente utilizado um controlo interno do robô, com retroacção das variáveis de junta para estabilizar o robô em torno da acção de comando vinda do anel exterior de visão. A esmagadora maioria dos sistemas existentes na bibliografia seguem esta segunda abordagem [1]. A utilização directa de informação visual implica ter como variáveis controladas as coordenadas 2D do plano da imagem, enquanto a utilização indirecta de informação visual implica a extracção de características relevantes do objecto a partir das coordenadas 2D do plano da imagem. Como exemplo desta última abordagem temos a pose 3D do objecto relativamente à câmara.

As aplicações típicas de controlo visual de robôs podem ser classificadas como: i) posicionamento do robô ou do seu elemento terminal relativamente a um determinado objecto; ii) seguimento de um objecto em movimento, mantendo uma relação constante entre este e o robô. O

objecto em causa é parte fundamental do processo, pois é relativamente a este e à forma como é caracterizado, através da imagem, que a formulação do problema é obtida. É portanto fundamental obter informação visual que caracterize o objecto, sendo esta utilizada para medir o erro entre a posição actual do robô e a sua posição desejada. Esta informação visual, pode ser obtida por uma ou mais câmaras em que esta(s) pode(m) estar colocada(s) no espaço (visualizando o objecto e o elemento terminal do robô) ou no elemento terminal (visualizando o objecto). A caracterização do objecto através da imagem pode ser realizada i) utilizando informação bi-dimensional expressa directamente nas coordenadas do plano da imagem ou ii) utilizando informação tri-dimensional em que os modelos da câmara e objecto são utilizados para determinar a pose do objecto relativamente aos referenciais da câmara, robot ou do mundo [1]. Actualmente esta caracterização pode também englobar as duas abordagens anteriores, por forma a melhorar o desempenho global do sistema. Esta última abordagem tem sido denominada na literatura como controlo visual híbrido [2], tendo o primeiro trabalho nesta área sido apresentado por Malis [3].

Para utilizar as características do objecto na imagem por forma a controlar robôs, é necessário estabelecer a relação entre estas e as coordenadas da câmara, relativamente ao referencial do mundo ou do elemento terminal do robô. Esta relação, modelo de interacção, tem sido objecto da esmagadora maioria dos trabalhos na área de controlo visual de robôs, existindo três abordagens consideradas como as mais importantes, por motivos históricos, ao problema. As abordagens denominam-se controlo visual 2D, controlo visual 3D e controlo visual híbrido.

A literatura existente sobre controlo visual de robôs cresceu substancialmente, ao longo dos anos, em torno dos problemas relacionados com a cinemática da lei de controlo. Neste tipo de controlo, controlo visual cinemático, o robô é considerado como um posicionador perfeito. Na realidade o modelo de um robô tem não-linearidades associadas, sendo pois vantajoso tê-las em consideração na obtenção da lei de controlo. Este último tipo de controlo é denominado controlo visual dinâmico [4], podendo também ter em consideração problemas

relacionados com o atraso gerado pelo anel de visão. Quando o controlo visual dinâmico calcula directamente os binários para os actuadores do robô, este é denominado, direct visual servoing [1].

São apresentados resultados experimentais obtidos numa plataforma experimental [5] desenvolvida no Laboratório de Automação e Robótica do Departamento de Engenharia Mecânica do Instituto Superior Técnico, e que é baseada num robô planar com dois graus de liberdade.

O artigo está organizado da seguinte forma. Na secção 2 são brevemente descritos os conceitos em que assentam as abordagens ao controlo visual de robôs utilizadas. Na secção 3 são apresentados e discutidos os resultados experimentais obtidos. Na secção 4 são apresentadas as conclusões.

## 2. Controlo Visual de Robôs Manipuladores

Três abordagens diferentes ao controlo visual de robôs manipuladores são apresentadas na presente secção, pois o controlo destes pode ser dependente de vários requisitos de funcionamento. Assim, caso se pretendam aplicações em que a rapidez do robô seja um requisito é necessário ter em conta efeitos dinâmicos e utilizar um controlador visual dinâmico. A informação visual necessária para caracterizar um objecto é factor preponderante na escolha do controlador, pois a esta informação pode ser obtida directamente (coordenadas de pontos do objecto na imagem) ou indirectamente (pose 3D do objecto), resultando no controlo visual cinemático na imagem ou em posição, respectivamente. No caso de na mesma lei de controlo se utilizarem ambos os casos anteriores o controlo é denominado híbrido. Um estado da arte recente sobre o controlo visual de robôs manipuladores é apresentado em [6].

### A. Controlo Visual Cinemático na Imagem

No controlo visual cinemático baseado na imagem, as características de um determinado objecto são extraídas directamente da imagem, sem que para tal seja necessário interpretar a imagem. Apenas são utilizados algoritmos para extracção de características do(s) objecto(s) na imagem definidas, por exemplo, através das seguintes primitivas: pontos, linhas e elipses. Um exemplo mais recente de características do objecto na imagem são os seus momentos [7], sendo que os mais utilizados em toda a literatura são os pontos.

Durante o controlo é calculada a diferença entre as características do objecto na imagem desejadas e as actuais, sendo que esta diferença é a responsável pela acção de controlo que irá mover o robô para a posição desejada, ver Fig.1.

A acção de controlo atrás referida, tursor de velocidade ou velocidade de juntas, é determinada através do erro entre as características do objecto na imagem, com base numa matriz que estabelece o modelo de interacção. Esta matriz é definida como jacobiano da imagem, [1]. Para o caso em que a característica do objecto na imagem  $s$ , é um ponto descrito pelas suas coordenadas métricas  $x$  e  $y$ , tem-se a equação (1).

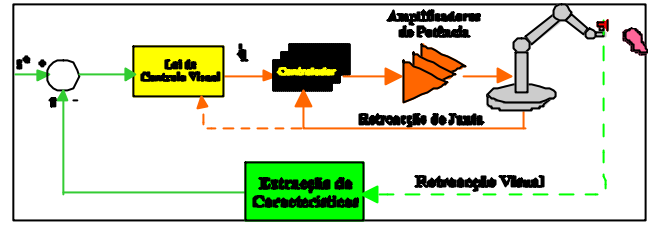


Fig. 1. Controlo Visual Cinemático na Imagem

$$J_i(x, y, Z) = \begin{bmatrix} -\frac{1}{Z} & 0 & \frac{x}{Z} & x \cdot y & -(1+x^2) & y \\ 0 & -\frac{1}{Z} & \frac{y}{Z} & 1+y^2 & -x \cdot y & -x \end{bmatrix} \quad (1)$$

em que  $Z$  é a distância entre o plano do objecto e o plano da imagem. Como descrito em [8] a lei de controlo visual cinemático baseado na imagem é definida em coordenadas de junta  $q$ , por:

$$\dot{q} = -K_p \cdot \hat{J}^{-1}(x, y, Z, q) \cdot (s - s^*) \quad (2)$$

em que:

$$J(x, y, Z, q) = J_i(x, y, Z) \cdot {}^c W_e \cdot {}^e J_R(q) \quad (3)$$

Considerando  $r_e$ , a pose (rotação e translação) do elemento terminal no referencial do mundo e  $r_c$ , a pose da câmara no referencial do mundo, a relação entre as respectivas velocidades, é definida por:

$$\dot{r}_c = {}^c W_e \cdot \dot{r}_e \quad (4)$$

onde,

$${}^c W_e = \begin{bmatrix} {}^c R_e & S({}^c t_e) \cdot {}^c R_e \\ 0_{3 \times 3} & {}^c R_e \end{bmatrix} \quad (5)$$

é a transformação entre os referenciais da câmara e do elemento terminal, em que,  $S({}^c t_e)$ , é a matriz anti-simétrica associada ao vector de translação  ${}^c t_e$ .

O jacobiano do robô relaciona:

$$\dot{r}_e = {}^e J_R(q) \cdot \dot{q} \quad (6)$$

e é dado por:

$${}^e J_R(q) = \begin{bmatrix} l_1 \cdot \sin(q_2) & l_2 + l_1 \cdot \cos(q_2) & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & l_2 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T \quad (7)$$

Em anel fechado, o erro das características da imagem diminui se (8) for satisfeita, se o jacobiano for não-singular e se  $\dim(s) = \dim(q)$ . No presente artigo e como o robô tem dois graus de liberdade, é considerado um ponto na imagem, sendo as suas duas coordenadas as características necessárias. Um estudo sobre as singularidades do aparato experimental é apresentado em [8].

$$J \cdot \hat{J}^{-1} > 0 \quad (8)$$

## B. Controlo Visual Híbrido

O controlo visual baseado na imagem, visto anteriormente, é robusto a erros na modelação da cinemática do robô, da câmara e ainda da forma do objecto. Contudo o seu domínio de estabilidade é local [9]. Com o intuito de solucionar o problema dos mínimos locais, a comunidade científica tem procurado novas metodologias para o controlo visual baseadas na construção de modelos analíticos. Estas novas metodologias englobam características do controlo visual baseado na imagem e do controlo baseado em posição, como tal são denominadas na literatura como controlo visual híbrido [3].

A primeira metodologia de controlo visual híbrido foi proposta por Malis [3], controlo visual 2,5D, e é baseada na utilização de seis características do objecto na imagem. As duas primeiras dizem respeito a um ponto do objecto na imagem, a terceira refere-se à profundidade  $Z$ , e as três coordenadas seguintes referem-se à orientação. No presente caso e como o robô é planar e não tem punho não faz sentido controlar a rotação. Assim, o erro a levar a zero entre as características actuais e desejadas do objecto na imagem, vem dado por:

$$e = \begin{bmatrix} x - x^* & y - y^* & \log\left(\frac{Z}{Z^*}\right) \end{bmatrix}^T \quad (9)$$

O jacobiano da imagem [3], utilizando (9) vem dado por:

$$J_i(x, y, Z) = \begin{bmatrix} -\frac{1}{Z} & 0 & \frac{x}{Z} & x \cdot y & -(1+x^2) & y \\ 0 & -\frac{1}{Z} & \frac{y}{Z} & 1+y^2 & -x \cdot y & x \\ 0 & 0 & -\frac{1}{Z} & y & -x & 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

Para recuperar a relação de profundidades expressa em (9) é utilizada a expressão [3]:

$$\frac{Z}{Z^*} = \frac{\|S(t) \cdot R \cdot m^*\|}{\|S(t) \cdot m\|} \quad (11)$$

em que  $m = [x \ y]^T$  e  $t$  e  $R$  são respectivamente o vector e a matriz de rotação entre a pose actual e desejada. Estas grandezas são estimadas utilizando a matriz de homografia [10].

A lei de controlo é análoga a (2), estando a diferença na matriz jacobiana da imagem.

## C. Controlo Visual Dinâmico

O controlo visual de robôs manipuladores tem vindo a ser abordado pela comunidade científica no que respeita somente à cinemática do movimento do robô (controlo visual cinemático). É assumido que as velocidades de junta do robô são calculadas através de uma lei de controlo visual. Estas velocidades são posteriormente utilizadas como referência de velocidade para um controlo de velocidade interno, que é responsável pelo movimento do robô. A lei de controlo visual é determinada considerando que o robô é um posicionador perfeito. Conclui-se portanto

que este tipo de controlo visual, cinemático, não tem em linha de conta a dinâmica do robô, não sendo assim a melhor solução para movimentos rápidos deste. Considerando a dinâmica do robô, é possível projectar outro tipo de controladores que calculam directamente o binário a fornecer aos motores das juntas do robô, por forma a que este realize uma determinada tarefa utilizando informação visual. Este tipo de controlo será definido como Controlo Visual Dinâmico em contraponto com o Controlo Visual Cinemático, descrito nas sub-seções anteriores. Na Fig.2 é apresentado o diagrama de blocos referente ao Controlo Visual Dinâmico.

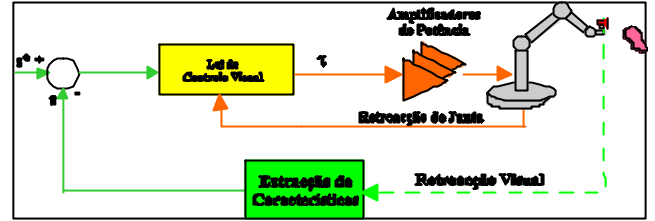


Fig. 2. Controlo Visual Dinâmico

Em [4] Kelly propôs um controlador assintoticamente estável projectado especificamente para um robô planar de dois graus de liberdade com uma câmara fixa, colocada a olhar o robô e o objecto, tendo o seu eixo óptico perpendicular ao plano do robô:

$$\dot{t} = J_R(q)^T \cdot K_p \cdot R(q)^T \cdot e - K_d \cdot \dot{q} + g(q) \quad (12)$$

A abordagem de Kelly [4], pode ser estendida para o caso da configuração do robô com a câmara no elemento terminal sendo necessário ter em consideração que a câmara agora está em movimento, solidária com o robô, i.e. colocada no elemento terminal deste. Assim, a anterior matriz de rotação  $R(q)$  descrita em (12) terá que ser redefinida para relacionar os referenciais da câmara e do objecto,  ${}^cR_o$ . Com esta nova abordagem a matriz de rotação deixa de ser constante e deverá ser calculada on-line, através de um dos dois métodos descritos em seguida:

- conhecendo a matriz rotação entre os referenciais do mundo e do objecto,  ${}^cR_o$  pode ser calculado através de

$${}^cR_o = ({}^0R_e \cdot {}^eR_c)^{-1} \cdot {}^0R_o \quad (13)$$

em que  ${}^0R_e$  é calculada utilizando a cinemática directa do robô, e  ${}^eR_c$  é conhecida a-priori.

- conhecendo o modelo tridimensional do objecto,  ${}^cR_o$  pode ser estimado através de algoritmos de estimação da pose [11].

A extensão ao algoritmo de Kelly [4], proposta nesta sub-seção, assegura todas as vantagens do método original, mas necessita do conhecimento on-line da matriz de rotação devido ao movimento da câmara.

## 3. Resultados

Na presente secção são apresentados e discutidos os resultados obtidos através da aplicação das abordagens aos controlos visual de robôs manipuladores expostas na secção

2. Para tal foi utilizado o aparato experimental, apresentado na Fig. 3, que foi desenvolvido pelos autores [5]. Este aparato é composto por um sistema de visão e um robô manipulador com dois graus de liberdade. A interligação entre estes dois sistemas é concretizada através da ferramenta MatLab xPC, que permite um rápido desenvolvimento da componente experimental a partir do modelo de simulação do sistema de controlo.



Fig. 3. Aparato experimental. Robô manipulador com câmara no elemento terminal, a olhar para cima.

#### A. Controlo Visual Cinemático na Imagem

Na presente sub-secção são apresentados os resultados obtidos experimentalmente durante o controlo visual cinemático baseado na imagem do robô manipulador presente no aparato experimental. A tarefa a realizar pelo controlador consiste em movimentar o robô entre as seguintes posições no espaço de junta  $q_i=[0 \ 0]^T$ ,  $q^*=[-\pi/6 \ \pi/6]^T$  e no plano da imagem,  $s_i=[143 \ -27]^T$  e  $s^*=[0 \ 0]^T$ .

Apresentam-se nas figuras 4 e 5 os resultados obtidos pelo controlador proporcional (2) com ganho  $K_p=0,95$  e com um ponto como característica do objecto na imagem.

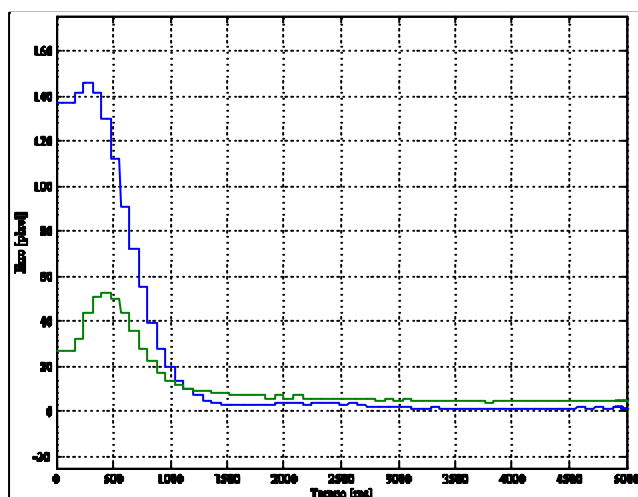


Fig. 4. Erro das características do objecto na imagens, no plano da imagem, com o controlador visual cinemático baseado na imagem

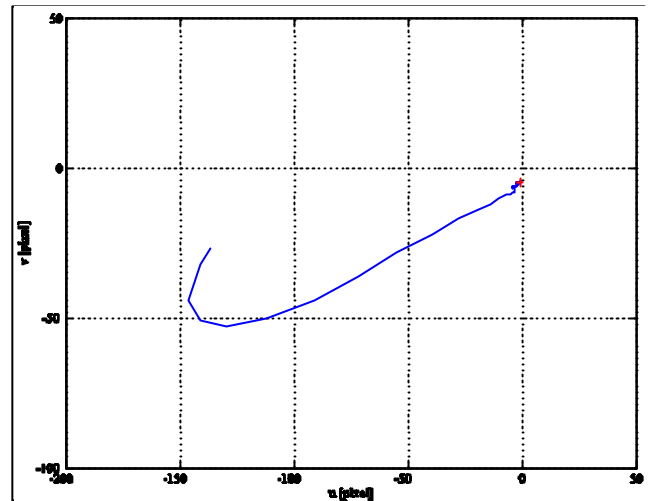


Fig. 5. Trajectória das características do objecto na imagens, no plano da imagem, com o controlador visual cinemático baseado na imagem. '+' posição final

Na Fig. 4 é apresentado o erro das características do objecto na imagem, durante o controlo efectuado pelo controlador visual cinemático baseado na imagem. Verifica-se que existe um decaimento exponencial do erro, após um sobre-impulso inicial. Depois do sobre-impulso a trajectória das características no plano da imagem aproxima-se a uma linha recta, Fig. 5, como é característica deste tipo de controlador. O erro verificado nas características da imagem é na ordem dos 5 pixels, em valor absoluto.

#### B. Controlo Visual Híbrido

Na presente sub-secção é apresentado o resultado obtido para a aplicação do controlo visual híbrido ao robô planar descrito anteriormente. A lei de controlo visual híbrido utilizada foi a desenvolvida por Malis, 2,5D visual servoing [3]. Por forma a ser possível obter resultados para este tipo de controlador foi necessário alterar a configuração do sistema robô-câmara, i.e. a câmara está a olhar para a frente e colocada no seguimento do segundo elo do robô. Assim a profundidade  $Z$  deixa de ser constante, como o foi na configuração utilizada no aparato experimental. Os resultados apresentados neste artigo dizem respeito aos obtidos pela matriz de homografia, visto que o objecto utilizado é planar. Uma vez que o robô não tem punho não é necessário controlar o movimento rotação, sendo que o vector de erro se resume às três primeiras coordenadas de (9), i.e. as coordenadas do ponto e a relação de profundidades.

A posição desejada dos pontos na imagem em coordenadas da imagem é definida por:

$$s^*=[-13 \ -156 \ -13 \ 156 \ 295 \ -160 \ 295 \ 160]$$

sendo que a posição inicial é definida por:

$$s_i=[-53 \ -163 \ -56 \ 163 \ 258 \ -163 \ 258 \ 163]$$

Verifica-se que utilizando a lei de controlo híbrido 2,5D, o robô atinge a posição desejada com um decaimento exponencial das características do objecto na imagem,

como se pode verificar na Fig. 6. Na Fig. 7 pode-se confirmar uma trajectória linear dos quatro pontos utilizados para estimar a homografia, pois apenas pode existir movimento na direcção horizontal da imagem, devido à configuração da câmara. O erro verificado na direcção vertical deve-se aos erros aleatórios na captura da imagem.

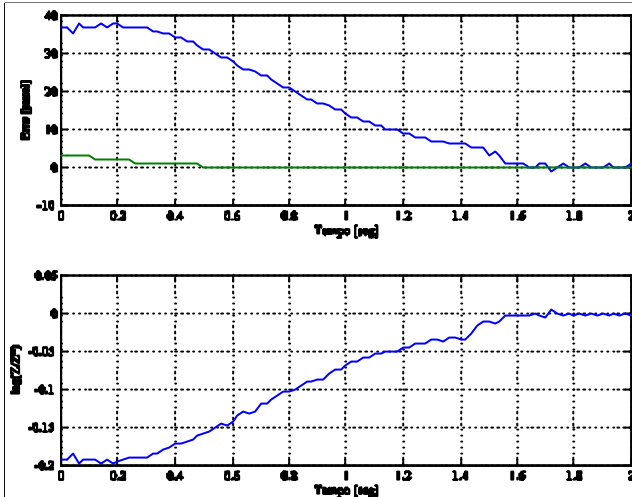


Fig. 6. Erro das características do objecto na imagens, no plano da imagem, com o controlador visual híbrido

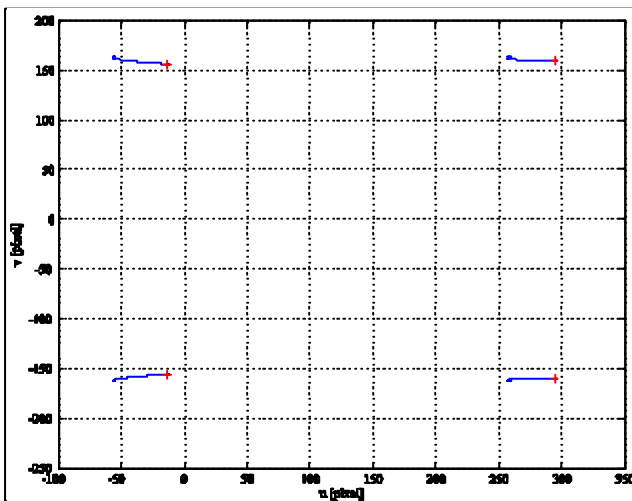


Fig. 7. Trajectória das características do objecto na imagens, no plano da imagem, com o controlador visual híbrido. '+' posição final

Quando o robô se aproxima da posição desejada as velocidades tomam valores oscilatórios, uma vez que a estimação da matriz de homografia piora a sua performance. A forma de obviar este problema é, quando o robô se aproximar da posição desejada, i.e. dentro de uma vizinhança pré-definida, comutar o controlo para o controlo visual cinemático baseado na imagem. Assim evita-se a instabilidade na estimação da matriz de homografia, junto da posição desejada. Note-se que como o robô está próximo da posição desejada, o controlo visual cinemático baseado na imagem pode ser utilizado com garantias de convergência.

### C. Controlo Visual Dinâmico

A extensão ao controlador proposto por Kelly [4], foi especialmente projectada para um robô planar de dois graus de liberdade, sendo que apenas um ponto do objecto na imagem é necessário ao controlo. Na experiência apresentada nesta sub-secção, a matriz de rotação é calculada utilizando a expressão (13), em que  ${}^0R_e$  é calculada utilizando a cinemática directa do robô, e as duas matrizes de rotação seguintes foram determinadas através de procedimento manual:

$${}^eR_c = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad {}^0R_v = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Na experiência apresentada foram escolhidos os ganhos  $K_p=0.115$  e  $K_d=2$  por forma a minimizar o sobre-impulso da resposta. Ao aumentar  $K_p$  a resposta é mais rápida mas com maior sobre-impulso. Esta escolha melhora ainda a trajectória na imagem, uma vez que o sobre-impulso não é elevado.

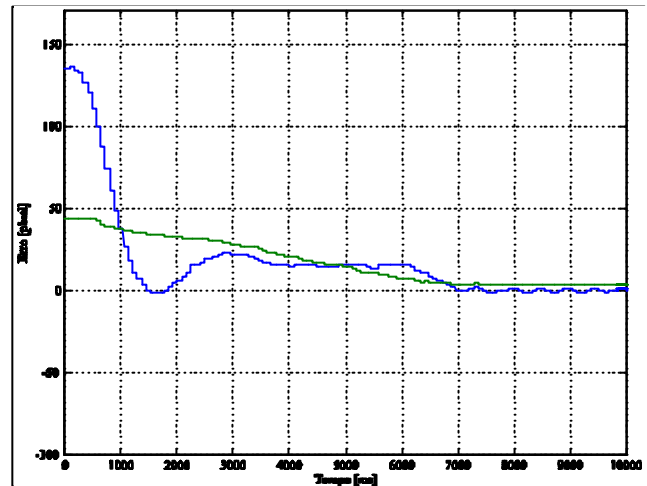


Fig. 8. Erro das características do objecto na imagens, no plano da imagem, com o controlador dinâmico

Na Fig. 8 é apresentado o erro das características do objecto na imagem  $s$ , no plano da imagem, em que não se verifica sobre-impulso. A correspondente trajectória na imagem é apresentada na Fig. 9, sendo que o erro perto da posição final é de três pixels, em valor absoluto.

## 4. Conclusões

No presente artigo foram apresentadas três abordagens ao controlo visual de robôs manipuladores: Controlo visual cinemático baseado na imagem, controlo visual híbrido e controlo visual dinâmico. Os controladores referidos foram implementados num aparato experimental especialmente desenvolvido para a implementação rápida e eficiente de leis de controlo baseadas em visão por computador. Os resultados obtidos demonstram a validade dos três controladores apresentados, sendo que embora estes difiram entre si na formulação teórica, apresentam



resultados comparáveis em termos de convergência e desempenho nas experiências realizadas.

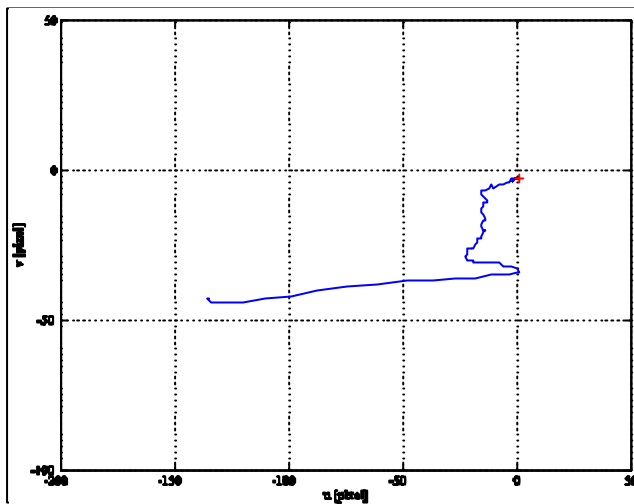


Fig .9. Trajectória das características do objecto na imagens, no plano da imagem, com o controlador dinâmico. '+' posição final

A formulação dos vários controladores apresentados varia segundo a informação visual disponível para que se possa efectuar a retroacção, assim como com a saída da lei de controlo visual, se em velocidade ou binário. Nos casos em que as tarefas requeridas ao robô necessitem de movimentos rápidos e consequentemente de compensação dinâmica dever-se-à utilizar o controlador visual dinâmico. Este tem como principal vantagem, relativamente ao controlo visual cinemático, o facto de o jacobiano não ter que ser invertido. Apenas é utilizado o jacobiano transposto na lei de controlo. Uma desvantagem da aplicação do controlo visual dinâmico aos robôs actualmente existentes no mercado, é o facto de que nestes robôs não estar disponível o acesso aos binários dos robôs para que se possa actuar directamente nos motores.

Dependendo da informação visual disponível ou possível de ser determinada, poder-se-à utilizar os vários tipos de controlo visual cinemático: imagem, posição ou híbrido. Verificou-se que as várias arquitecturas de controlo visual, têm características e especificidades próprias. Actualmente, tem crescido o interesse em construir uma lei de controlo híbrida capaz de aumentar a região de estabilidade global e a convergência para a solução desejada, através da comutação entre os controladores quando um deles tende a divergir, i.e. encontra um mínimo local ou o objecto sai da imagem. Pode ainda ser útil, escolher uma determinada característica da imagem para

realizar uma tarefa e a meio do controlo ser necessário mudar de característica, por exemplo devido a oclusões ou instabilidade no sistema de controlo. Assim uma direcção futura de elevado interesse prático é a de aplicar a teoria do controlo de sistemas híbridos, para obter uma metodologia capaz de mudar de controlador e/ou de informação visual automaticamente durante o controlo, de forma a ser possível provar a estabilidade assimpótica global.

## Agradecimentos

Ao Fundo Social Europeu, através da acção 5.3 (formação avançada de docentes do ensino superior) do programa PRODEP III, no âmbito do III Quadro Comunitário de Apoio. À Fundação para a Ciência e Tecnologia pelo apoio através do projecto POCTI/EME/39946/2001.

## Referências

- [1] S. Hutchinson, G. Hager e P. Corke, "A tutorial on visual servo control", *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 12, no. 5, pp. 651-670, 1996
- [2] K. Hashimoto, "A review on vision-based control of robot manipulators", *Advanced Robotics*, Vol. 17, No. 10, pp. 969-991, 2003
- [3] E. Malis, F. Chaumette e S. Boudet, "2,5d visual servoing" *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 15, No. 2, pp. 238-250, 1999
- [4] R. Kelly, "Robust asymptotically visual servoing of planar robots", *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 12, No. 5, pp. 759-766, 1996
- [5] P.J. Sequeira Gonçalves e J.R. Caldas Pinto, "An Experimental Testbed for Visual Servo Control of Robotic Manipulators", *Proceedings of the IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation'2003*, Lisbon, Portugal, pp. 377-382
- [6] P.J. Sequeira Gonçalves, "Controlo Visual de Robôs Manipuladores", Tese de Doutoramento, Instituto Superior Técnico, Abril 2005
- [7] F. Chaumette, "Image moments: a general and useful set of features for visual servoing" *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 20, no. 4, pp. 713-723, Agosto 2004
- [8] P.J. Sequeira Gonçalves, J.R. Caldas Pinto, "Camera configurations of a visual servoing setup, for a 2 dof planar robot", *Proceedings of the 7th International IFAC Symposium on Robot Control'2003*, Wroclaw, Poland, pp. 181-187
- [9] K. Hashimoto e T. Noritsugu, "Potential Switching Control in Visual Servo", *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation'2000*, San Francisco, USA, pp. 2765-2770
- [10] P.J. Sequeira Gonçalves, J.R. Caldas Pinto, "2,5d visual servoing applied to a planar robot", *Proceedings of the 5th Portuguese Conference on Control'2002*, Aveiro, Portugal, pp. 183-188.
- [11] D. DeMenthon e L. Davis, "Model-based object pose in 25 lines of code", *International Journal of Computer Vision*, Vol. 15, pp. 123-141, 1995