

PROJETO DE CONTROLE DE UM RASTREADOR SOLAR BASEADO EM SERVOVISÃO

Alan Tavares Miranda, alancefet@hotmail.com¹

Aline Gesualdi Manhães, alinegesualdi@gmail.com¹

Alessandro Rosa Lopes Zachi, zachi@cefet-rj.br¹

¹Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca - CEFET/RJ, Avenida Maracanã 229, 20.271-110 - Maracanã - Rio de Janeiro - Brasil.

Resumo: Neste trabalho, desenvolve-se um algoritmo de controle com realimentação visual para aplicações na área de rastreamento solar. O problema de rastreamento solar, isto é, o de orientar o painel solar na direção do sol, é formulado como um problema de rastreamento visual de alvos móveis utilizando controle por servovisão. O esquema apresentado é desenvolvido para um sistema composto por uma única câmera de base fixa com controle baseado nas informações da imagem. Neste contexto, a câmera não possui movimento de translação. Assim, a ideia central consiste em orientar a câmera (painel) de forma automática, segundo os ângulos de pan e tilt da base, a fim de que a imagem do Sol permaneça focalizada sobre um ponto fixo desejado na imagem. A abordagem do trabalho concentra a atenção no projeto das leis de controle para os atuadores de pan e tilt. Do ponto de vista teórico, a eficiência do algoritmo de controle é garantida pela demonstração rigorosa de propriedades de estabilidade local e convergência exponencial dos erros de posição na imagem e de orientação da câmera. Do ponto de vista de prático, demonstra-se que a equação de controle proposta não necessita das informações dos ângulos de pan e tilt, e nem do conhecimento exato dos parâmetros do sistema para a sua implementação. O funcionamento do algoritmo em malha fechada é verificado através de simulações computacionais e análises gráficas.

Palavras-chave: Rastreamento solar, servovisão, câmera pan-tilt

1. INTRODUÇÃO

A energia solar é limpa, renovável e abundante na maior parte do mundo e pode ser convertida em energia elétrica por meio de painéis fotovoltaicos (Bayod-Rújula *et al.*, 2011). A quantidade de energia produzida por um painel fotovoltaico depende da quantidade de radiação que incide sobre ele. Como a posição do sol no céu varia ao longo do dia, isto é, em relação a um referencial fixo no solo, a orientação e/ou posicionamento do sistema fotovoltaico têm que ser ajustados de modo a mantê-lo sempre apontado na direção de maior incidência luminosa, visando o aumento da geração de energia elétrica (Ozcelik *et al.*, 2011; Koussa *et al.*, 2011). Na literatura, existem algumas classificações do sistema de rastreamento de sol que estão relacionados ao tipo e a capacidade de movimentação do sistema de painéis. Neste contexto, alguns sistemas de rastreamento são projetados para acompanhar o sol em um único eixo (de acordo com o ângulo de azimute do sol) ou para seguir o sol em ambos os eixos (de acordo com os ângulos de azimute e elevação do sol) (Eke and Senturk, 2012). Em relação ao sistema de controle, segundo a literatura, dois paradigmas são normalmente adotados: o baseado em dados astronômicos; e o baseado em sensores (Lee *et al.*, 2009). Neste trabalho, adota-se o paradigma de controle baseado em sensores visuais (servovisão). O esquema que será apresentado é desenvolvido para um sistema composto por uma única câmera de base fixa com controle baseado nas informações da imagem. Neste contexto, a câmera não possui movimento de translação. Assim, a ideia central consiste em orientar a câmera (painel) de forma automática, segundo os ângulos de pan e tilt da base, a fim de que a imagem do Sol permaneça focalizada sobre um ponto fixo desejado na imagem.

2. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

O problema de rastreamento solar será tratado neste trabalho como um problema de rastreamento visual de um objeto que se move no espaço 3D. Nesta abordagem, considera-se a utilização de uma câmera de base fixa com movimentos de orientação dados pelos ângulos de *pan* e *tilt* (Hsia *et al.*, 2013) conforme a ilustração da Figura 1. A ideia central consiste em orientar a câmera (painel) de forma automática, controlando os ângulos dos motores de *pan* e *tilt* da base, a fim de que a imagem projetada do Sol permaneça focalizada sobre um ponto fixo desejado na tela.

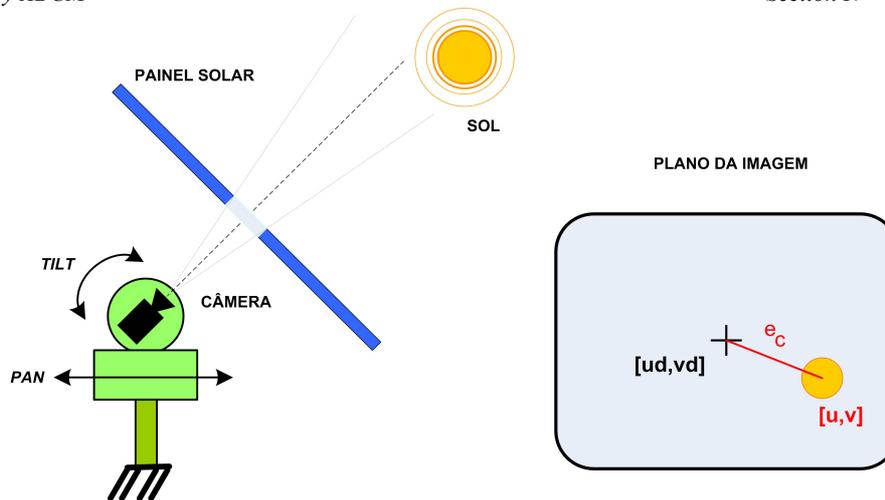


Figura 1: Diagrama ilustrativo do rastreamento solar baseado em servovisão.

3. MOTIVAÇÃO

Sistemas de rastreamento visual de alvos têm vasta aplicação tanto no meio militar como no civil. Tais sistemas possuem geralmente câmeras digitais e são comumente empregados em sistemas de segurança, monitoramento de veículos no trânsito, robótica, vigilância aérea, etc. No meio militar são empregados, ainda, em bombas inteligentes, sistemas de mira de armamentos e em mísseis (Gruzman *et al.*, 2012). No entanto, como as câmeras possuem ângulos de visão limitados, é necessário movê-las de modo que o alvo seja mantido dentro de seu campo de visão. Neste contexto, torna-se necessário o uso de mecanismos baseados em atuadores eletromecânicos para movimentá-las. O mais comum dentre estes aparatos é o mecanismo de movimento tipo *pan-tilt* (Figura 2).

O objetivo deste trabalho é fornecer um estudo teórico rigoroso acerca de um sistema de rastreamento solar baseado em servovisão. Espera-se com isso, que os conhecimentos adquiridos com a aplicação das leis de controle propostas, e seus desdobramentos, possam ser utilizados como base para futuras aplicações práticas com vistas ao desenvolvimento de sistemas eletrônicos mais baratos e menos dependentes de *hardwares* sofisticados.

4. METODOLOGIA

A solução inicialmente pensada para resolver o problema formulado anteriormente, era utilizar a estratégia do controle em cascata descrita na referência (Leite *et al.*, 2011), na qual projeta-se uma lei de controle para a malha de servovisão (puramente cinemático) a fim de alcançar o rastreamento ideal e, depois, utiliza-se a lei de controle projetada como sinal de referência para a malha de controle dos motores (dinâmica completa), visando garantir as propriedades de estabilidade e convergência do sistema físico como um todo. Entretanto, adota-se aqui uma outra estratégia, baseada apenas nas informações visuais, motivada por uma propriedade algébrica do modelo câmera-motor. Tal propriedade torna mais simples o desenvolvimento matemático do controlador e a análise de estabilidade do sistema em malha fechada.

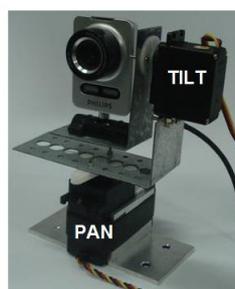


Figura 2: Exemplo de um mecanismo *pan-tilt* (Gruzman *et al.*, 2012).

A estratégia de controle baseada em informações astronômicas com aplicações em seguidores solares também foi proposta na referência (Rubio *et al.*, 2007). Nesta, os autores propõem um sistema de seguimento híbrido onde se combinam modelos de movimento do Sol (dados astronômicos) e estratégias de controle do rastreador em malha fechada. A principal característica da solução de rastreamento proposta é a dependência do conhecimento exato das equações do movimento do Sol ao longo do ano (Eke and Senturk, 2012). Do ponto de vista prático, uma abordagem interessante é apresentada na referência (Mastromauro *et al.*, 2012). Nesta referência, autores utilizam *hardwares* baseados em microcontroladores e

dispositivos de lógica programável tipo FPGA para codificar as leis de controle de ação Proporcional-Integral mencionadas. Apesar de apresentarem uma discussão teórica acerca da modelagem de todo o sistema dinâmico e dos controladores adotados, não há uma demonstração explícita da estabilidade do sistema em malha fechada.

5. MODELAGEM DO SISTEMA

Um modelo matemático generalizado de servovisão que descreve as relações cinemáticas entre as coordenadas da câmera e as coordenadas do alvo, já foi proposto em (Hutchinson *et al.*, 1996):

$$\begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{f}{z} & 0 & \frac{-u}{z} & \frac{-uv}{f} & \frac{u^2+f^2}{f} & -v \\ 0 & \frac{f}{z} & \frac{-v}{z} & \frac{-v^2-f^2}{f} & \frac{uv}{f} & u \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \\ \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix}, \quad (1)$$

sendo $[u, v]^T$ o vetor de coordenadas na imagem, em *pixels*, f a distância focal da câmera, em metros, z a profundidade relativa entre o objeto e a câmera, em metros, medida na direção de seu eixo ótico, $[T_x, T_y, T_z]^T$ o vetor das velocidades de translação da câmera nos eixos x, y, z de um sistema de coordenadas de referência fixo e $[\omega_x, \omega_y, \omega_z]^T$ o vetor de velocidades de rotação da câmera em torno dos eixos x, y, z deste mesmo sistema de referência.

Considerando que a origem do sistema de coordenadas de referência foi fixado no centro de rotação da câmera, coincidindo com os eixos de rotação *pan* (eixo X), *tilt* (eixo Y) e o eixo ótico da câmera (eixo Z), conforme mostra a Figura 2, é fácil observar que $[T_x, T_y, T_z] = [0, 0, 0]$. Além disso, note-se ainda que, nesta configuração, os ângulos de Euler da representação de orientação (Sciavicco and Siciliano, 2000) coincidem com os ângulos de rotação dos atuadores (motores). Assim, o modelo de servovisão *pan-tilt* adotado neste trabalho, pode ser obtido a partir de (1):

$$\begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-uv}{f} & \frac{u^2+f^2}{f} \\ \frac{-v^2-f^2}{f} & \frac{uv}{f} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Destaca-se aqui que a rotação da câmera em torno do eixo Z não será considerada ($\omega_z = 0, \forall t$).

A modelagem matemática do comportamento do rastreador fica completa quando se considera a dinâmica de movimento do atuadores. Neste caso, considera-se que estes atuadores de *pan* e *tilt* são motores de corrente contínua (DC) acionados pela tensão da armadura. A equação dinâmica generalizada para estes atuadores é bastante conhecida na literatura pode ser encontrada em vários livros texto (Ogata, 2010):

$$\tau_m \dot{\omega}_m = -\omega_m + K_m V_m, \quad (3)$$

sendo $\omega_m = d\theta_m/dt$ a velocidade de rotação do motor, em *rad/s*, V_m é a tensão elétrica aplicada ao motor, em Volts, K_m a constante do motor e τ_m a constante de tempo mecânica. Cabe ressaltar que a maioria dos parâmetros do modelo podem ser obtidos diretamente da folha de dados do motor. Entretanto, alguns destes parâmetros não são exatamente conhecidos e necessitam de ensaios experimntais para serem determinados. No caso das constantes K_m, τ_m , existem fórmulas que as relacionam aos parâmetros da folha de especificação. Por exemplo, alguns tipos de motores DC comerciais apresentam o valor para τ_m da ordem de alguns milissegundos. No sistema de rastreamento solar, em geral, a dinâmica do motor será bem mais rápida do que a dinâmica do alvo (sol) que se pretende rastrear, de forma que Equação descrita em (3) pode ser dada simplesmente por:

$$\omega_m = K_m V_m, \quad (4)$$

ou, em outras palavras, a relação entre a posição angular θ_m do eixo do motor e a tensão de entrada V_m pode ser modelada por um ganho K_m seguido de um integrador.

Substituindo a Eq. (4) na Eq. (2) e utilizando os sub-índices P e T para denotar os motores de *pan* e *tilt*, respectivamente, obtém-se então o modelo da dinâmica completa do rastreador solar por servovisão deste trabalho:

$$\begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-uv}{f} & \frac{u^2+f^2}{f} \\ \frac{-v^2-f^2}{f} & \frac{uv}{f} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{K}_P & 0 \\ 0 & \bar{K}_T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}_P \\ \bar{V}_T \end{bmatrix}. \quad (5)$$

6. PROJETO DE CONTROLE

Nesta seção, será apresentada uma solução para o problema de rastreamento solar baseado em servovisão. Como será vista mais adiante neste texto, a principal característica da solução proposta consiste no projeto de uma lei de controle que não requer a medida dos ângulos dos motores e nem a medida da profundidade relativa entre o alvo (sol) e a câmera (painel solar).

6.1 Mudança de Variável

Antes de seguir com a síntese do controlador, considere-se a seguinte mudança estratégica de variável :

$$K_P V_P = -\bar{K}_P \bar{V}_P, \quad K_T V_T = \bar{K}_T \bar{V}_T. \quad (6)$$

Substituindo as novas variáveis de controle V_P, V_T na Eq. (5), tem-se:

$$\begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{uv}{f} & \frac{u^2+f^2}{f} \\ \frac{v^2+f^2}{f} & \frac{uv}{f} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_P & 0 \\ 0 & K_T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_P \\ V_T \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Além disso, permutando-se as posições de V_P, V_T em (7), revela-se uma propriedade algébrica deste sistema de equações que será bastante útil no projeto das leis de controle.

$$\begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{v} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{u^2+f^2}{f} & \frac{uv}{f} \\ \frac{uv}{f} & \frac{v^2+f^2}{f} \end{bmatrix}}_{G(u,v)} \underbrace{\begin{bmatrix} K_T & 0 \\ 0 & K_P \end{bmatrix}}_K \begin{bmatrix} V_T \\ V_P \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Note-se na Eq. (8) que as matrizes $G(u, v)$ e K são simétricas e positiva definidas (no caso de $G(u, v)$, esta propriedade vale $\forall u, v, t$).

6.2 Síntese das leis de Controle

Assumindo que se deseja posicionar a imagem projetada do Sol na tela sobre o ponto fixo $[u_d, v_d]^T$, então é plausível definir-se o vetor de erros de rastreamento por

$$e_c = \begin{bmatrix} e_u \\ e_v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u - u_d \\ v - v_d \end{bmatrix}, \quad (9)$$

cuja equação dinâmica pode ser obtida a partir da Eq.(8), resultando em

$$\dot{e}_c = \begin{bmatrix} \dot{e}_u \\ \dot{e}_v \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{u^2+f^2}{f} & \frac{uv}{f} \\ \frac{uv}{f} & \frac{v^2+f^2}{f} \end{bmatrix}}_{G(u,v)} \underbrace{\begin{bmatrix} K_T & 0 \\ 0 & K_P \end{bmatrix}}_K \begin{bmatrix} V_T \\ V_P \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Diante da propriedade algébrica do sistema dinâmico do erro em dado na Eq.(10), as leis de controle propostas são:

$$\begin{bmatrix} V_T \\ V_P \end{bmatrix} = -\alpha \begin{bmatrix} e_u \\ e_v \end{bmatrix}. \quad (11)$$

6.3 Análise de Estabilidade

Para analisar a estabilidade do sistema em malha fechada da Eq. (11), considere-se a seguinte função de Lyapunov candidata:

$$\mathcal{V}(e_c) = \frac{e_c^T P e_c}{2} > 0, \quad P = P^T > 0. \quad (12)$$

A derivada temporal de $\mathcal{V}(e_c)$, de acordo com as Eqs. (10),(11), é dada por

$$\dot{\mathcal{V}}(e_c) = e_c^T P \dot{e}_c = -\alpha e_c^T P G(u, v) K e_c. \quad (13)$$

Aqui, para que a origem $e_c = [0, 0]^T$ seja globalmente assintoticamente estável, a forma quadrática do segundo membro de (13) tem que ser negativa definida. De fato, ao se testar a condição $P = K^T = K$, a forma quadrática resultante será

$$-\alpha e_c^T K^T G(u, v) K e_c = -\alpha \eta^T G(u, v) \eta < 0, \quad \eta = K e_c. \quad (14)$$

Baseado nas Funções de Lyapunov (12) e (13), é possível afirmar que os elementos do vetor de erro $e_c(t)$ são uniformemente limitados em malha fechada. A partir das Eqs. (9), (11), é possível concluir que as coordenadas $[u(t), v(t)]^T$ na imagem e os sinais de controle $[V_T, V_P]^T$ aplicados aos motores também são uniformemente limitadas. Além disso, pelas propriedades de convergência das Funções de Lyapunov (Slotine and Li, 1991), é possível afirmar que os elementos do vetor de erro $e_c(t)$ convergem exponencialmente para zero. O Teorema a seguir reúne as principais características da lei de controle proposta.

Teorema 1 Considere o modelo de servovisão descrito pela equação dinâmica em (8). Se a lei de controle definida em (11) for aplicada ao modelo em (8), então o sistema em malha fechada apresentará as seguintes propriedades:

- (1) Todos os sinais são uniformemente limitados em amplitudes;
- (2) A origem do vetor de erro e_c é globalmente exponencialmente estável, isto é, $\lim_{t \rightarrow \infty} e_c(t) \rightarrow 0$.

7. SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

Nesta seção, são apresentados os resultados obtidos na simulação computacional do sistema de controle em estudo. Os parâmetros utilizados na simulação do sistema composto pelas Eqs. (8),(11), foram: $f = 1 m$, $K_p, K_T = 2$, $\alpha = -0.1$, $[u(0), v(0)] = [158, 242]$ $[u_d, v_d] = [160, 240]$.

Os erros de rastreamento nos eixos u e v do sistema de coordenadas da câmera são ilustrados no gráfico da Fig. 7. . Observa-se que a partir da condição inicial, as trajetórias convergem exponencialmente para zero. Os sinais de controle também seguem ilustrados na Fig. 7. Na Figura 7, tem-se a trajetória da projeção do alvo no plano da imagem.

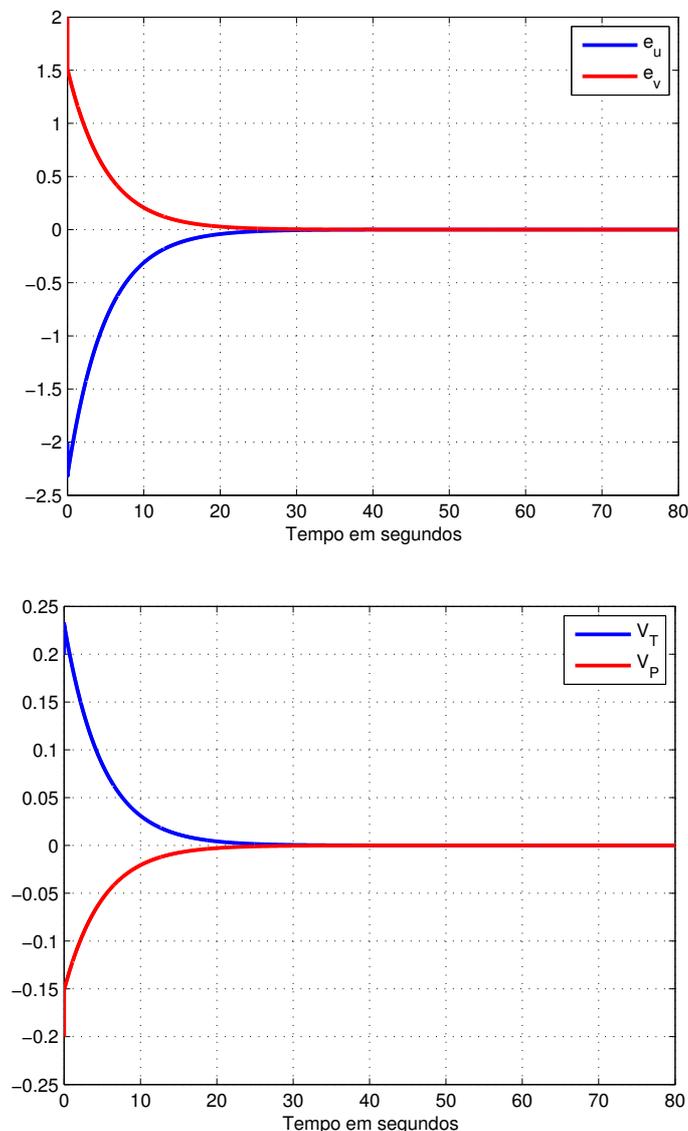


Figura 3: Simulação. Sinais de erro no sistema de coordenadas da imagem e sinais de controle para os motores de *pan* e *tilt*.

8. CONCLUSÃO

Neste trabalho, desenvolveu-se um algoritmo de controle com realimentação visual para aplicações na área de rastreamento solar. Este desafio foi formulado como um problema de rastreamento visual de alvos móveis no qual a ideia central foi orientar a câmera (painel) de forma automática, segundo os ângulos de *pan* e *tilt* da base, a fim de que a imagem do Sol permanecesse focalizada sobre um ponto fixo desejado na imagem. Com a inserção das equações dos atuadores de *pan* e *tilt* foi possível representar a dinâmica completa do sistema câmera-motores. Neste caso, demonstrou-se que uma simples lei de controle proporcional nos erros de imagem foi necessária para garantir as propriedades de estabilidade global e convergência exponencial para zero. Uma outra característica importante que merece ser mencionada é o fato de que a solução proposta não requer a medida dos ângulos de *pan* e *tilt* no projeto da leis de controle e não depende do conhecimento exato da profundidade relativa entre a câmera e o alvo, o que revela um certo grau de robustez desta estratégia na presença de possíveis incertezas paramétricas do modelo. O funcionamento do algoritmo em malha fechada

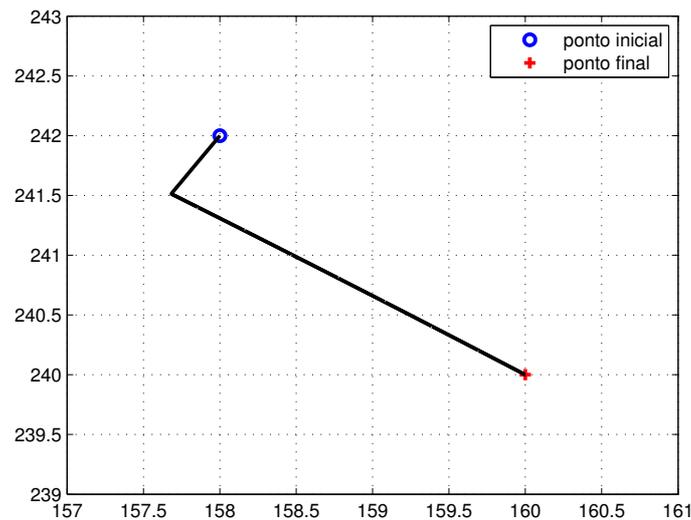


Figura 4: Simulação. Trajetória no plano da imagem.

foi verificado através de simulações computacionais e análises gráficas.

9. REFERÊNCIAS

- Bayod-Rújula, A.A., Lorente-Lafuente, A.M. and Cirez-Oto, F., 2011. “Environmental assessment of grid connected photovoltaic plants with”. *Energy*, Vol. 36, pp. 3148–3158.
- Eke, R. and Senturk, A., 2012. “Performance comparison of a double-axis sun tracking versus fixed pv system”. *Solar Energy*, Vol. 86, pp. 2665–2672.
- Gruzman, M., Tagawa, D.B., Weber, H.I. and Sampaio, R., 2012. “Arquitetura de controle otimizada para rastreamento visual de alvos”. In *Anais do XIX Congresso Brasileiro de Automática*. pp. 890–897.
- Hsia, K., S., L. and J., S., 2013. “Moving target tracking based on camshift approach and kalman filter”. *Applied Mathematics and Information Sciences, An International Journal*, Vol. 7, pp. 193–200.
- Hutchinson, S., Hager, G. and Corke, P., 1996. “A tutorial on visual servo control”. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 12, No. 5, pp. 651–670.
- Koussa, M., Chekane, A., Hadji, S., Haddadi, M. and Noureddine, S., 2011. “Measured and modeled improvement in solar energy yield from flat plate photovoltaic systems utilizing different tracking systems and under a range of environmental conditions”. *Applied Energy*, Vol. 88, pp. 1756–1771.
- Lee, C.Y., Chou, P.C., Chiang, C.M. and Lin, C.F., 2009. “Sun tracking systems: a review”. *Sensors*, Vol. 9, pp. 3875–3890.
- Leite, A.C., Zachi, A.R.L., Lizarralde, F. and Hsu, L., 2011. “Adaptive 3d visual servoing without image velocity measurement for uncertain manipulators.” In *IFAC World Congress, Milan (Italy)*. pp. 14584–14589.
- Mastromauro, R.A., Liserre, M. and Dell’Aquila, A., 2012. “Control issues in single-stage photovoltaic systems: Mppt, current and voltage control”. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, Vol. 8, No. 2, pp. 241–254.
- Ogata, K., 2010. *Engenharia de Controle Moderno*. Pearson Education do Brasil, 5th edition. ISBN 8576058103.
- Ozcelik, S., Prakash, H. and Chaloo, R., 2011. “Two-axis solar tracker analysis and control for maximum power generation”. *Procedia Computer Science*, Vol. 6, pp. 457–462.
- Rubio, F.R., Ortega, M.G., Gordillo, F. and López-Martínez, M., 2007. “Application of new control strategy for sun tracking”. *Energy Conversion and Management*, Vol. 48, pp. 2174–2184.
- Sciavicco, L. and Siciliano, B., 2000. *Modeling and Control of Robot Manipulators*. Springer-Verlag, 2nd edition.
- Slotine, J.J. and Li, W., 1991. *Applied Nonlinear Control*. Prentice Hall.

A SOLAR TRACKER CONTROL DESIGN BASED ON VISUAL SERVOING

Alan Tavares Miranda, alancefet@hotmail.com¹

Aline Gesualdi Manhães, alinegesualdi@gmail.com¹

Alessandro Rosa Lopes zachi, zachi@cefet-rj.br¹

¹Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca - CEFET/RJ, Avenida Maracanã 229, 20.271-110 - Maracanã - Rio de Janeiro - Brasil.

Abstract: *In this work an algorithm of control with visual feedback for applications in the field of solar tracking is developed. The solar tracking problem, ie , to guide the solar panel towards the sun, is formulated as a problem of visual tracking of moving targets by using visual servoing control. The scheme presented is designed for systems composed by a single camera with fixed basis control based on image information. In this context, the camera does not have translational movement. Thus, the main idea is to guide the camera's (panel's) orientation automatically, i.e. according to its basis pan and tilt angles, so that the captured image of the sun remains focused on a desired fixed point in the image. The approach of the work focuses attention on the design of control laws for the pan and tilt actuators. From the theoretical point of view, the efficiency of the control algorithm is guaranteed by the rigorous demonstration of properties of local stability and exponential convergence of position errors in the image and camera orientation. From a practical point of view, it is shown that the proposed control law does not require the information of the pan and tilt angles in its implementation. The efficiency of closed-loop algorithm is verified through computer simulations and graphical analysis.*

Keywords: *Solar tracking, visual servoing, pan-tilt camera*