

BASE GIRATÓRIA PARA SENSOR *KINECT* EM UMA APLICAÇÃO DE ROBÔ GUIA

LUCIO ANDRÉ AMORIM*, MILTON CÉSAR PAES SANTOS*, FABRICIO BORTOLINI DE SÁ*, RAQUEL FRIZERA VASSALLO*

**Laboratório de Automação Inteligente
Universidade Federal do Espírito Santos
Vitória, Espírito Santo, Brasil*

Emails: lucioamorim@gmail.com, miltoncps@gmail.com, fabborto@gmail.com, raquel@ele.ufes.br

Abstract— The main goal of this project is to develop a spinning base to expand the visual field of a guide robot. To achieve that, a Kinect sensor is assembled to a mobile base that turns and allows to keep robot's follower (a person) in the center of its field of view. The angular error between the person's position and the vision sensor center is used by a non-linear controller to set the angular velocity of a stepper motor, commanded by a micro-controller through a serial communication. Thus, every time the robot turns, if necessary, the Kinect sensor is rotated in order to minimize the angular error between the person and the sensor center. The asymptotic stability of the proposed control system is proved and validated by Lyapunov method and practical experiments.

Keywords— Depth Camera, Nonlinear Control, People-tracking

Resumo— Criação de uma base giratória para ampliar o campo visual de um robô guia. Para que ocorra esse aumento do campo visual, o sensor *Kinect* deverá girar mantendo o seguidor (pessoa) sempre no centro do campo de visão. Através do erro de orientação entre a pessoa e o centro de visão do sensor, um controlador não linear enviará a velocidade angular desejada a um microcontrolador, através de uma comunicação serial, o qual acionará o motor de passo girando a base do sensor, com o objetivo de minimizar o erro. A estabilidade assintótica do sistema de controle proposto é provada e verificada, respectivamente, por Lyapunov e experimentos a serem mostrados.

Palavras-chave— Sensor de profundidade, Controle não linear, Robô Guia, Rastreamento de pessoa

1 Introdução

Recentemente muitas pesquisas em robótica direcionam-se para aplicações relacionadas ao cotidiano das pessoas, onde é necessário que os robôs interajam com uma ou mais pessoas para executar uma tarefa ou meramente auxiliá-las. Essa categoria, conhecida como robótica de serviço (Pransky, 1996), vem ganhando visibilidade nas últimas décadas, devido ao grande número de aplicações.

Robôs de serviço são projetados para atender pessoas em vários locais, tais como hospitais, casas, restaurantes, museus ou escritórios. Normalmente o objetivo é realizar tarefas como transporte de cargas, busca por pessoas, indicação de caminhos, apoio a idosos, crianças ou pessoas portadoras de deficiência. Devido à necessidade de interagir diretamente com pessoas, estes robôs devem ser capazes de detectar e rastrear o movimento de indivíduos.

No que tange à detecção de pessoas, os sensores mais utilizados são os sistemas de visão (Pszczokowski, 2007; Munder et al., 2008; Chen and Chen, 2008). Há, porém, alguns trabalhos que utilizam sensores laser para realizar essa detecção (Bellotto and Hu, 2009; Carballo et al., 2009) e, recentemente, os sensores de profundidade também começaram ser utilizados (Machida et al., 2012).

Os sensores de profundidade fornecem uma espécie de união das informações de sensores de distância com sensores de visão. Isso pode represen-

tar uma vantagem na sua utilização para detecção de pessoas.

Nesse contexto, pretende-se usar um sensor de profundidade, tipo *Kinect* (Microsoft, 2010), montado sobre um robô móvel, para a detecção de pessoas e rastreamento do seu movimento. Entretanto, o campo de visão desses sensores é reduzido e, quando o robô se move, é comum ocorrer a perda da pessoa ou grupo que está sendo rastreado.

Assim, o objetivo deste trabalho foi desenvolver uma plataforma giratória que permite acoplar um sensor *Kinect* a um robô móvel, ampliando o seu campo visual para 360°. O controle da plataforma assim como testes experimentais para validar o seu desempenho são apresentados e discutidos. Além disso, um exemplo de sua utilização em um trabalho de condução de pessoas em um ambiente é apresentado.

1.1 Motivação

O Laboratório de Automação Inteligente (LAI) da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) desenvolve, entre outras, pesquisas na área de Robôs Guias, utilizando um robô do modelo *Pioneer 3 AT*. O robô possui sensor laser para navegar no ambiente, o qual é normalmente usado para desviar de objetos posicionados entre a posição atual do robô e seu destino final. Para interagir com as pessoas, entre outros sistemas, é utilizado um sensor *Kinect* que é classificado como um

sensor de profundidade (Oliver Wulf and Bernardo Wagner, 2003), capaz de localizar um objeto fornecendo suas coordenadas X, Y, Z em uma grade.

Por causa da limitação de visão horizontal de $58,7^\circ$ do sensor *Kinect*, aliada à distância mínima de funcionamento de 1,2m e máxima de 3,5m entre o sensor e o objeto, encontram-se algumas dificuldades quando busca-se interação do robô com um grupo de pessoas dispersas.

Devido aos movimentos de giro do *Pioneer*, quando em desvio de obstáculos ou em mudança de trajetórias para atingir seu destino, por diversas vezes a pessoa guiada fica fora do campo de visão do sensor. Esse campo de visão está voltado para a parte posterior e centralizado em um eixo imaginário perpendicular ao eixo das rodas do robô, passando pelo seu centro geométrico (Figura 1). Na tarefa de condução, é importante que o rastreamento da pessoa conduzida seja mantido durante toda a navegação pois a falha na detecção pode ocasionar a parada do robô ou falha no sistema.

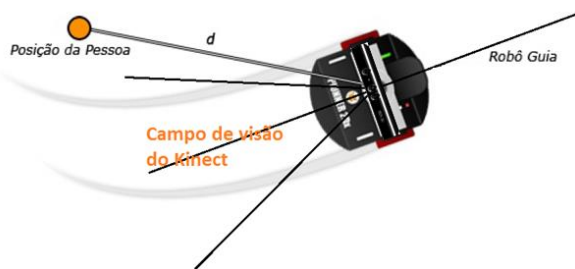


Figura 1: Campo de visão com o *Kinect* fixo.

1.2 Objetivo

O objetivo resume-se em girar o sensor em um eixo vertical de forma que o giro fique limitado apenas pelos cabos de conexão, ampliando assim seu campo de visão horizontal para 360° .

1.3 Metodologia

O projeto está dividido em três módulos: o controlador, que fica hospedado no robô; o microcontrolador, que realizará a comunicação com o robô e controlará o motor de passo e o motor de passo propriamente dito, o qual está acoplado no eixo de sustentação do *Kinect*, sendo acionado pelo seu *driver*. O funcionamento consiste em informar ao controlador qual é o erro de orientação ($\tilde{\theta}$) entre o centro do campo visual do sensor e a linha imaginária que liga o sensor à pessoa guiada. De posse deste ângulo, o controlador informa ao microcontrolador qual a velocidade angular que deve ser aplicada ao motor, girando assim o *Kinect*, minimizando $\tilde{\theta}$ a um valor aceitável.

2 Sistema proposto

O sistema proposto neste projeto é composto por uma plataforma de acrílico, contendo em seu interior um motor de passo, um microcontrolador, um driver para o motor de passo, um circuito regulador de tensão, conectores, além de um suporte para o *Kinect* ligado ao motor através de duas engrenagens e um eixo. A plataforma é inteligida ao robô através de um cabo USB que faz a alimentação do microcontrolador além de realizar a comunicação serial.

2.1 Sistema de atuação

No sistema de atuação, foi utilizado um motor de passo unipolar com alimentação de 5 V, e 4 fases. O dispositivo possui redução de giro interna de 1/64, torque máximo de 22 Kgfc_m e um ângulo $0,88^\circ$ por passo, já considerando a redução de 1/64. Sua impedância por fase é de 60 ohms, exigindo, assim, 83,33 mA para alimentar uma fase. A escolha do motor de passo se deu pelo fato de o sistema exigir um posicionamento preciso. E, caso haja erro, este deve ser não cumulativo, não comprometendo os movimentos robóticos. Outro ponto que contribuiu para sua escolha foi sua resposta rápida à aceleração e desaceleração.

A fim de não sobrecarregar o microcontrolador, é utilizado para alimentação do motor de passo, um *driver*. Este *driver* é baseado no CI ULN2003, que nada mais é do que um *array* de transistores *Darlington*, podendo fornecer uma corrente de até 500 mA, e suportando uma tensão de entrada de até 50 V, o que é suficiente para o sistema.

2.2 Eletrônica de controle/processamento

A eletrônica de controle e processamento está baseada no microcontrolador MSP430G2553. Este componente usa a arquitetura RISC de 16 bits, trabalha com uma faixa de tensão de 1,8 V a 3,6 V. Possui ainda dois *timers* de 16 bits, um conversor analógico-digital de 10 bits, além de um oscilador interno de 16 MHz. Ele se destaca por possuir um baixo consumo de operação (230 mA) e de espera (0,5 mA), o que é muito importante quando se trata de equipamento embarcado. O MSP430G2553 possui uma UART que trabalha com uma taxa de comunicação de 9600 *baud*.

Suas duas portas I/O (do inglês, *input/output*), uma de 8 bits e outra de 6 bits (opção escolhida foi um CI de vinte pinos), facilitam a interligação do chip com os demais componentes do projeto. O equipamento foi utilizado acoplado a uma *Launchpad*, do mesmo fabricante, o que facilita ainda mais as conexões.

2.3 Estrutura mecânica

Para acomodar todos os equipamentos e suportar o *Kinect* foi desenvolvida uma plataforma de acrílico (10 mm de espessura) com altura de 100 mm, largura de 130 mm e profundidade de 110 mm, de forma a acomodar todos os componentes mecânicos e eletrônicos.

A fim de calibrar o sistema no início de seu funcionamento, foram inseridas na face superior da plataforma duas chaves de fim de curso. Tal calibração fez-se necessária para manter a plataforma voltada para uma determinada posição, toda vez que o sistema for iniciado. Acima do eixo foi inserido um suporte especial para *Kinect*, facilitando sua fixação à plataforma. Na Figura 2 (a) tem-se o esquema de conexão entre o motor e o eixo, através de duas engrenagens com razão 1:1, pois a redução já é feita pelas engrenagens internas do motor. Na Figura 2 (b) tem-se a montagem final da plataforma.

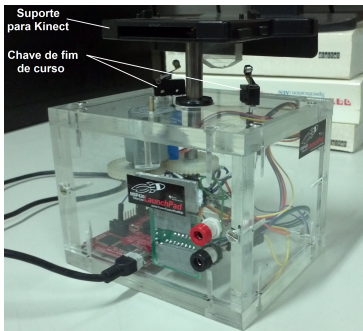
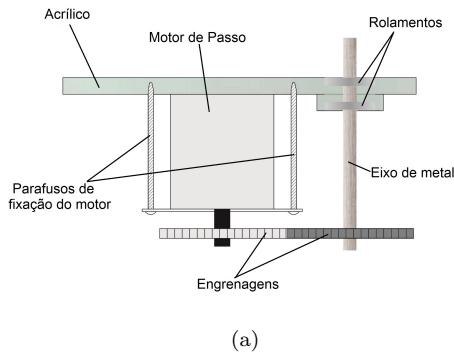


Figura 2: Plataforma em acrílico.

3 Desenvolvimento

3.1 Programação do Microcontrolador

O Microcontrolador MSP430 foi programado em linguagem C. A programação consistiu em implementar a comunicação serial (por parte do microcontrolador), o tratamento de interrupção de tempo para o *Timer A* e *B*, com o objetivo de acionamento do motor para controlar sua velocidade, e realizar a leitura das portas de entrada

ligadas às chaves, além de operar o controlador dos pulsos que são enviados ao *driver* do motor de passo para sua movimentação.

3.2 Controle de orientação não linear

3.2.1 Controlador e sua estabilidade

Para definir qual velocidade deve ser aplicada ao motor de passo da plataforma, foi escolhido um controlador não linear. A escolha deste controlador se deu pelo fato de que o robô-guia, que utilizará a plataforma, já calcula suas ações de controle para uma movimentação segura através de controladores não-lineares, mantendo assim um padrão nos controladores.

Encontram-se nos trabalhos (Toibero, J. M et al., 2008) e (Secchi, 1998) a base do controlador utilizado. A Figura 3 demonstra o problema enunciado.

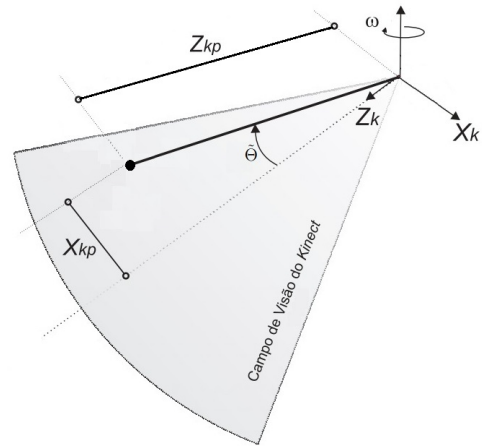


Figura 3: Campo de visão do *Kinect*.

O controle tem como objetivo reduzir o erro de orientação do centro do campo visual do sensor à pessoa $\tilde{\Theta}$, ou seja fazer com que o

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{\Theta} = 0. \quad (1)$$

Tal erro $\tilde{\Theta}$ é calculado como:

$$\tilde{\Theta} = \tan^{-1} \left(\frac{X_{kp}}{Z_{kp}} \right), \quad (2)$$

onde X_{kp} é a posição X e Z_{kp} é a posição Z da pessoa, ambas no referencial do sensor. Para o projeto do controlador, que deverá comandar o motor da plataforma, a variável de controle será o erro de orientação $\tilde{\Theta}$.

A seguir, será provada a estabilidade assintótica para o erro de orientação, ou seja, $\tilde{\Theta} \rightarrow 0$ quando $t \rightarrow \infty$. Para isso, é definida uma lei de controle para a velocidade angular

$$\omega = K_{\tilde{\Theta}} \tanh(k_{\tilde{\Theta}} \tilde{\Theta}). \quad (3)$$

Na Equação 3, $K_{\tilde{\Theta}} > 0$ é uma constante que satura a velocidade angular máxima que a plataforma pode admitir; enquanto $k_{\tilde{\Theta}} > 0$ é outra constante selecionada para determinar o quão rápido a velocidade angular atingirá seu valor máximo. Na Figura 3 vemos que a evolução do erro angular $\tilde{\Theta}$ é dada pela velocidade angular, ou seja, $\dot{\tilde{\Theta}} = -\omega$. Assim, para o sistema em malha fechada, a evolução do erro de orientação pode ser apresentada da seguinte maneira:

$$\dot{\tilde{\Theta}} = -K_{\tilde{\Theta}} \tanh(k_{\tilde{\Theta}}\tilde{\Theta}). \quad (4)$$

Considerando a seguinte função candidata de *Lyapunov* e sua derivada ao longo de toda a trajetória, tem-se:

$$V_{\tilde{\Theta}} = \frac{\tilde{\Theta}^2}{2}, \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \dot{V}_{\tilde{\Theta}} &= \tilde{\Theta} \dot{\tilde{\Theta}} \\ &= -\tilde{\Theta} K_{\tilde{\Theta}} \tanh(k_{\tilde{\Theta}}\tilde{\Theta}) < 0. \end{aligned} \quad (6)$$

A função da Equação 6 mostra que a derivada $\dot{V}_{\tilde{\Theta}}$ é sempre negativa enquanto a função $V_{\tilde{\Theta}}$ é sempre positiva. Isto garante que $\tilde{\Theta} \rightarrow 0$ quando $t \rightarrow \infty$. Assim, conclui-se a estabilidade assintótica do erro angular. Dessa forma, garante-se que $\tilde{\Theta} \rightarrow 0$ com $t \rightarrow \infty$.

3.2.2 Programação

A programação do controlador foi feita na linguagem C++ e ele é executado no computador de bordo do robô. Para isto foram criadas duas classes (Motor e Serial) facilitando assim a programação. A classe Serial cuida da comunicação serial implementando métodos que escrevem e leem na porta serial. Já a classe Motor implementa as funcionalidades de envio de velocidades e de solicitação de posição angular do motor e para isto, faz-se uso dos recursos fornecidos pela classe Serial.

4 Experimentos

4.1 Experimentos da plataforma com o controlador

Neste tipo de experimento, foi fornecido ao controlador um ângulo Θ de referência. Depois observam-se o comportamento da plataforma e os dados obtidos. Na Figura 4 tem-se os resultados do comportamento da plataforma iniciando-a em 0° e mudando sequencialmente as referências para 45° , 90° , 10° , -45° e -135° . Para as experiências, foram escolhidos os parâmetros do controlador $K_{\tilde{\Theta}} = 45$ e $k_{\tilde{\Theta}} = 8,86$ e o $\tilde{\Theta}$ máximo de $0,3^\circ$, todos escolhidos de forma empírica.

O gráfico de ‘ Θ ’ refere-se ao passo do motor, convertido em graus, informado pelo microcontrolador. Já o ‘ Θ Calculado’ se refere ao ângulo obtido pela integração da velocidade angular enviada para a plataforma. Ainda na Figura 4, pode-se observar o ‘Erro de orientação’ e a ‘Velocidade angular da plataforma’. O comportamento da plataforma obtido na experiência nos mostra que o controlador realmente atende os objetivos desejados pois, o ângulo da plataforma segue o ângulo de referência tornando o erro próximo de zero durante toda experiência.

4.2 Experimentos para aferição da plataforma

Para calibração foi utilizado um transferidor de 180° acoplado ao topo da plataforma. Foram fornecidos como referência para o controlador os ângulos 10° , 30° , 60° , 90° , 0° e 45° , obtendo na resposta da plataforma resultados satisfatórios. Foi observado neste experimento um erro visual de aproximadamente 2° . O erro apresentado é explicado pela folga no acoplamento do motor com o eixo da plataforma.

5 Experimentos de rastreamento de uma pessoa com o robô parado

Para validação da plataforma em uso prático foi realizada uma experiência utilizando o sensor *Kinect* acoplado à mesma (Figura 5), porém, com o robô parado. Neste experimento foi fornecido para o controlador o ângulo $\tilde{\Theta}$ do centro de massa da pessoa (Figura 3), obtido a partir das coordenadas capturadas pelo *Kinect*. A Figura 6 mostra o comportamento da posição da plataforma ‘ Θ atual’, o erro de orientação e sua velocidade angular. Tais dados são obtidos a partir da contagem dos passos dados pelo motor. Vale ressaltar que para o cálculo da velocidade angular, derivou-se a informação da posição angular da plataforma.

Observe que a plataforma conseguiu acompanhar a pessoa rastreada, tentando levar a todo instante o erro para próximo de zero. Pode-se observar ainda que a velocidade angular da plataforma acompanhou o erro. Tal comportamento é justificado pela tentativa do controlador de conduzir o erro a zero.



Figura 5: Sensor acoplado à Plataforma Giratória.

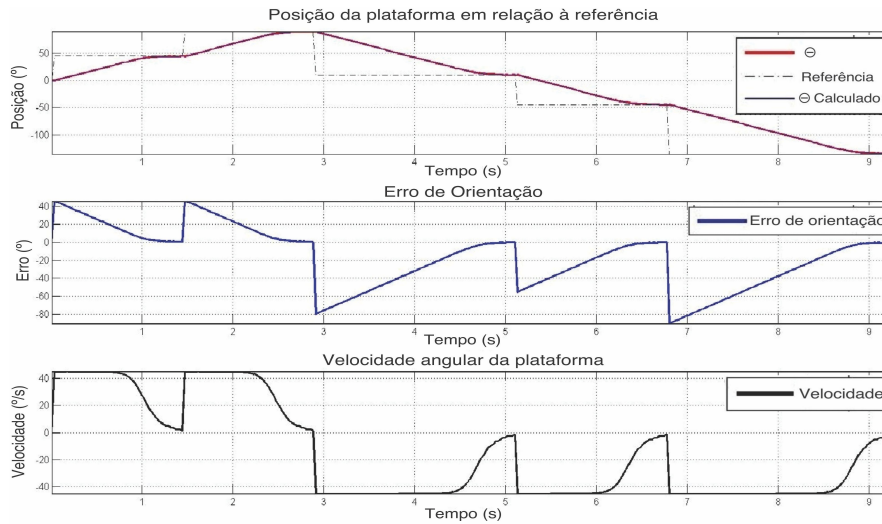


Figura 4: Controle de Orientação para plataforma giratória.

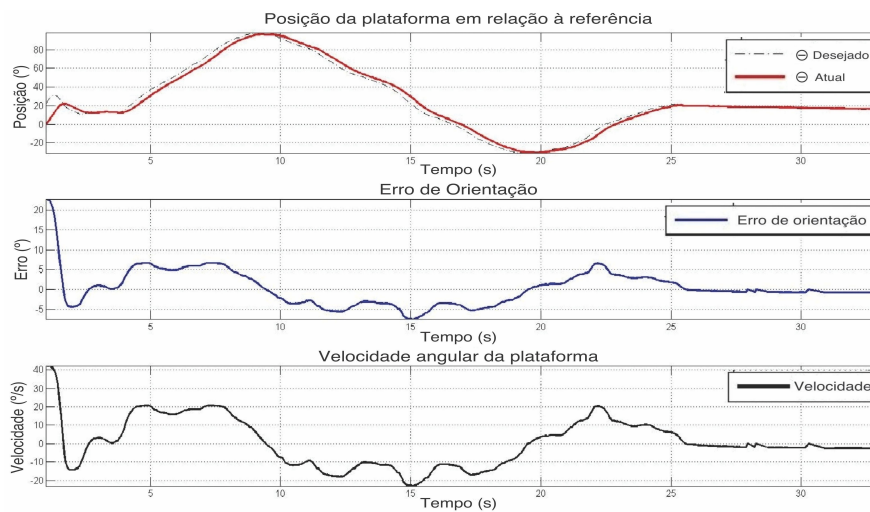


Figura 6: Experimento da Plataforma utilizando o sensor *Kinect*.

5.1 Experimentos de rastreamento de uma pessoa com o robô em movimento

Um segundo experimento prático de rastreamento de pessoa foi realizado com o robô *Pioneer 3AT* em movimento. Para este experimento o robô foi controlado remotamente e guiado por um percurso com alguns obstáculos. Durante o experimento o laser do robô mapeou todo o ambiente para que posteriormente fosse gerado um gráfico mostrando o percurso, não só do robô, como também da pessoa que o estava seguindo. Na Figura 7 tem-se o gráfico gerado. Nela pode-se observar que, a curva do *Pioneer* é suave, enquanto a curva da pessoa seguidora possui várias oscilações. Estas oscilações são geradas em sua totalidade, pelo movimento do robô e pela distância entre o seu centro e o centro da Plataforma Giratória. Tal distância não foi compensada no momento da geração do gráfico.

Na Figura 8 tem-se o gráfico da variação do

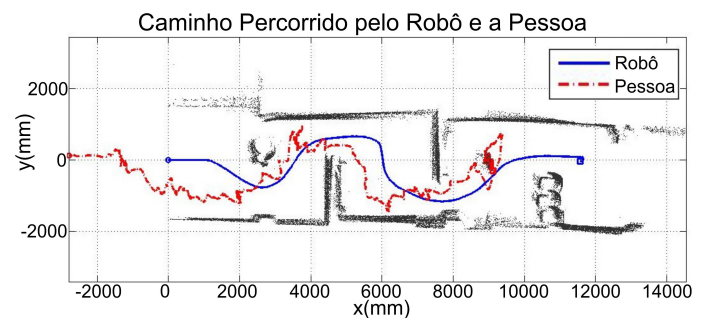


Figura 7: Percurso realizado pelo robô e a pessoa seguidora no experimento.

ângulo da Plataforma Giratória bem como a referência (ângulo da pessoa detectada pelo *Kinect*) desejada, onde observa-se um erro de orientação já esperado, porém amplificado pelo movimento do robô. No experimento também é possível no-

tar que a plataforma atinge seu objetivo, mesmo apresentando pequenos deslocamentos entre o ângulo da plataforma e sua referência. Devido à utilização da plataforma, durante todo o percurso, não ocorreu a perda do rastreamento da pessoa. Mesmo com o ângulo da pessoa, em referência ao eixo do robô, ultrapassando o campo de visão do *Kinect*, a plataforma garantiu que o robô detectasse a pessoa todo o tempo.

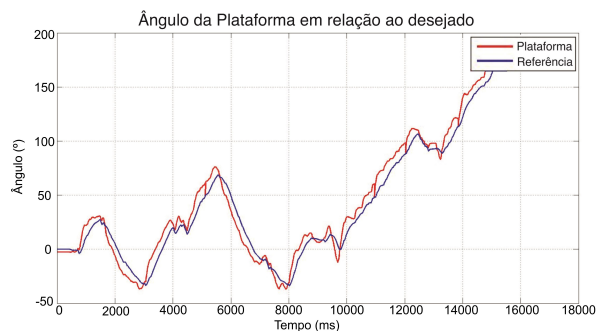


Figura 8: Ângulo desejado da plataforma e o ângulo real.

Na Figura 9 foi isolado o ângulo da pessoa que está seguindo o robô em relação ao seu eixo. No gráfico também foi marcado o ângulo de $-29,35^\circ$ e $29,35^\circ$ para delimitar o campo visual do *Kinect* caso não fosse utilizada a Plataforma Giratória. Em vários pontos a pessoa não seria visualizada pelo robô, forçando-o a parar até que o seguidor entrasse novamente em seu campo de visão.

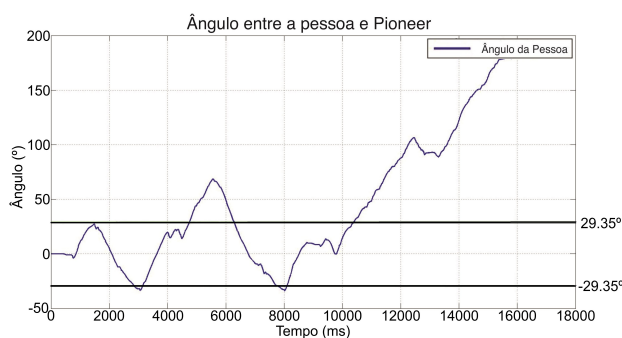


Figura 9: Ângulo da pessoa em relação ao eixo do *Pioneer*.

6 Conclusões

Os resultados obtidos através dos experimentos com a análise dos dados e gráficos obtidos, validam o sistema proposto. Nos experimentos onde era fornecido um ângulo de referência, a plataforma mostrou-se eficiente, atingindo seu objetivo em tempo adequado. Nos experimentos onde o sensor *Kinect* foi usado, porém com o robô parado, foi realizado o rastreamento de uma pessoa de forma adequada, sendo possível seguir a pessoa

com uma velocidade angular razoável. Foi verificado ainda que, durante todo o experimento, o erro de orientação tendia a zero. Já nos experimentos com o robô em movimento, o aumento do campo visual do *Kinect* foi atingindo, expandindo-o de $58,7^\circ$ para os desejáveis 360° . Os testes práticos do sistema mostraram que a plataforma foi útil para o LAI, abrindo um leque de opções para sua aplicação em outros trabalhos que envolvam sensores que precisam ampliar o seu campo de percepção.

Referências

- Bellotto, N. and Hu, H. (2009). Multisensor-based human detection and tracking for mobile service robots, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics* **39**(1): 167–181.
- Carballo, A., Ohya, A. and Yuta, S. (2009). Multiple people detection from a mobile robot using a double layered laser range finder, *IEEE ICRA 2009 Workshop on People Detection and Tracking*, Kobe, Japan.
- Chen, Y. and Chen, C. (2008). Fast human detection using a novel boosted cascading structure with meta stages, *IP* **17**(8): 1452–1464.
- Machida, E., Cao, M., Murao, T. and Hashimoto, H. (2012). Human motion tracking of mobile robot with kinect 3d sensor, *SICE Annual Conference (SICE), 2012 Proceedings of*, pp. 2207–2211.
- Microsoft (2010). Xbox 360 kinect sensor manual.
- Munder, S., Schnorr, C. and Gavrila, D. (2008). Pedestrian detection and tracking using a mixture of view-based shape-texture models, *ITS* **9**(2): 333–343.
- Oliver Wulf and Bernardo Wagner (2003). ast 3d scanning methods for laser measurement systems, *International Conference on Control Systems and Computer Science*.
- Pransky, J. (1996). Service robots - how should we define them?, *Service Robot: An International Journal* **2**(1): 4–5.
- Pszczokowski, S. (2007). *Human Detection in Indoor Environments Using Multiple Visual Cues and a Mobile Robot*, PhD thesis.
- Secchi, H. A. (1998). Control de vehículos autoguiados con realimentación sensorial.
- Toibero, J. M., Roberti, F., Carelli, R. and Fiorini, P. (2008). Formation control for non-holonomic mobile robots: A hybrid approach, em: *Advances in multi-robot systems, I-Tech Education and Publishing*.