UM MINI ROBÔ MÓVEL SEGUIDOR DE PISTAS GUIADO POR VISÃO LOCAL

Eduardo R. Costa, Marcel L. Gomes e Reinaldo A. C. Bianchi

Centro Universitário da FEI – Departamento de Engenharia Elétrica
Av. Humberto de A. C. Branco, 3972 – 09850-901
São Bernardo do Campo – SP – Brasil
rbianchi@fei.edu.br

Resumo: Este artigo descreve o projeto e a construção de um mini robô móvel autônomo capaz de seguir um caminho desenhado na superfície sobre a qual se move a partir de imagens capturadas localmente. O mini robô construído é um protótipo cujo tamanho é baseado nas regras da categoria F-180 (*Small Size*) da *RoboCup* e consiste de 2 motores de passo, módulo de potência e uma câmera para obtenção de imagens locais, todos montados sobre uma base metálica. Este robô envia as imagens para um microcomputador e recebe sinais de comando dos motores de um hardware específico para seu controle, implementado em um FPGA Altera. A arquitetura do sistema implementado no microcomputador possui os seguintes módulos: de aquisição de imagens, que recebe as imagens e as digitaliza usando uma placa de captura padrão BT-878; de identificação da pista, que a partir da imagem detecta o centro da pista que o robô deve seguir; e o módulo de controle, que implementa um comportamento reativo – seguir uma linha (pista), baseado nas informações visuais recebidas e envia as informações para o hardware de controle do motor através de uma porta paralela. O sistema foi testado e os resultados experimentais indicaram que o sistema é eficiente, sendo capaz de seguir qualquer caminho desenhado por um usuário.

Palavras Chaves: Robôs Móveis, Robótica Inteligente, Visão Computacional.

Abstract: This paper describes the design and the construction of a autonomous mobile mini-robot capable of following a path drawn in the surface on which it moves, based on visual information from a on-board camera. The robot is a prototype for the RoboCup F-180 (Small Size) league. It consists of 2 stepmotors, a power module and a camera assembled on a metallic base. The robot sends images to a computer and receives command signals for the motors through a control hardware implemented in an Altera Max 7000 FPGA. The software system implemented in the computer is composed of three basic modules: the image acquisition, which captures the images using a standard Bt-878 videoconference board; the path identification, responsible for the detection of the center of the path that the robot must follow; and the control module, which implements a reactive behavior to follow the path and sends the information to the control hardware of the motor through a parallel port. The system was tested and the experimental results indicate that it is capable of following any path drawn by a user.

Keywords: Intelligent Mobile Robots, Computer Vision.

1 INTRODUÇÃO

Os sistemas robóticos móveis autônomos têm conquistado espaço tanto nas universidades quanto na indústria, devido à intensa modernização que os sistemas de automação industriais vem sofrendo nos últimos anos. Entre os fatores que impulsionam esta modernização pode-se incluir a competitividade crescente, a rápida alteração dos produtos oferecidos ao mercado e o avanço tecnológico, entre outros, que visam aumentar a produtividade, a qualidade e a confiabilidade dos produtos. Além da área de manufatura e transporte de materiais, outras aplicações destes sistemas incluem o trabalho em ambientes perigosos ou insalubres e a exploração espacial (Howard e Seraji, 2001).

O objetivo deste trabalho é a descrição do projeto e implementação de um sistema robótico dotado de percepção local, capaz de seguir uma linha (pista). Este comportamento foi definido seguindo o paradigma reativo para robótica móvel inteligente (Ribeiro, Reali-Costa e Romero, 2001) e exige que o robô se mova seguindo uma pista desenhada na superfície sobre a qual ele se encontra. O caminho a seguir não é conhecido previamente, podendo ser desenhado qualquer percurso para o robô executar. Além disso, se por qualquer motivo o caminho for obstruído na imagem, o robô deve parar de se movimentar.

Seguir pistas é um comportamento simples mas importante, que permite o uso de robôs móveis em ambientes estruturados como indústrias. Este tipo de comportamento é bem conhecido, e tem sido implementado com sucesso com o uso sistemas de visão global (Aires, Alsina e Medeiros, 2001; Bianchi, Simões e Reali-Costa, 2001). Além disso, este comportamento é um primeiro passo para a construção de robôs com visão local para participarem da liga F-180 da RoboCup. Visão local começa a ser importante na RoboCup F-180, pois possibilita o controle local usando técnicas de servo visual e esta sendo usado em diversos times para melhorar a execução de comportamentos específicos, como o do goleiro. (Chang, Browning e Wyeth, 2002; Rojas et. al., 2002; Sekimori et. al., 2003).

Para atingir este objetivo foi construído um mini robô cujo tamanho é baseado nas regras da categoria *Small Size* F-180 da *RoboCup* (Kitano, 1997) e consiste de 2 motores de passo, módulo de potência e uma câmera para obtenção de imagens locais, todos montados sobre uma base metálica.

O sistema utiliza o sistema de visão local para, a partir das imagens enviadas para um microcomputador, encontrar a posição do robô em relação a pista e o caminho a seguir. Com base nestes dados, um sistema de controle baseado em regras decide a direção do robô, e envia sinais de comando dos motores para um hardware específico para geração dos sinais de controle dos motores, implementado em um FPGA Altera Max 7000.

O trabalho está organizado da seguinte maneira: a seção 2 descreve a plataforma robótica desenvolvida e a arquitetura do sistema; a seção 3 apresenta o sistema visual do robô; a seção 4 descreve o sistema de controle de direção e a seção 5 o de velocidade dos motores. A seção 6 apresenta os resultados e a seção 7, as conclusões deste trabalho.

2 A PLATAFORMA ROBÓTICA E ARQUITETURA DO SISTEMA

O mini robô utilizado neste trabalho foi construído por alunos de iniciação científica, como protótipo para a construção de um time de cinco mini robôs destinado a competir na liga F-180 (*Small Size*) da *Robocup*. Por este motivo, as medidas do robô (apresentadas na Figura 1) são as máximas permitidas pelas regras da Liga F-180 (Robocup, 2001).

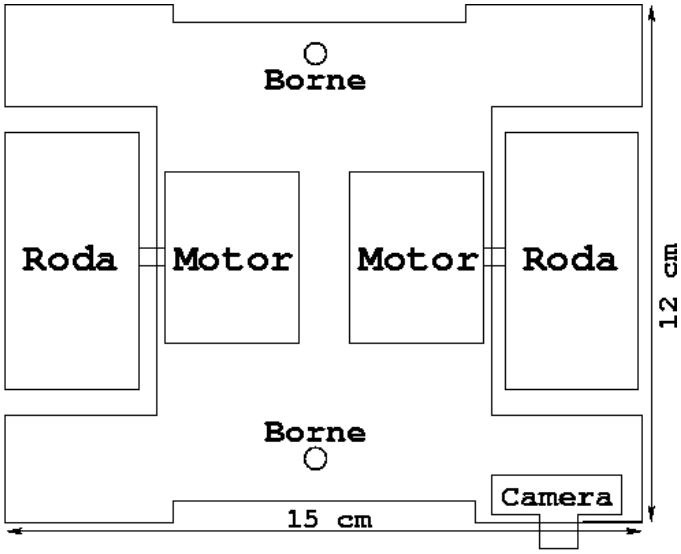

Figura 1 – Dimensões da plataforma robótica.

O robô foi montado em duas plataformas de alumínio paralelas, ligadas por uma estrutura vertical. A distância entre as plataformas é de 7 centímetros. Na plataforma inferior estão afixados os dois motores de passo híbridos (de 200 passos por volta e tamanho 17) e dois pontos de sustentação, montados com parafusos (bornes) ajustáveis para que o robô não oscile ou fique em falso. A afixação dos motores foi feita com parafusos de maneira a permitir o alinhamento destes. As rodas utilizadas são de plástico e os pneus de borracha, usadas em carros de controle remoto escala 1/15. Para ligar o eixo do motor às rodas foram usadas duas luvas de alumínio. A Figura 2 mostra a plataforma inferior com os motores afixados e as rodas.

Este sistema foi construído de maneira que se possa utilizar na plataforma superior diversos módulos que são facilmente trocados. Testes foram realizados com FPGAs embarcados para controle, com um PC 104, sendo que a Figura 3 mostra o

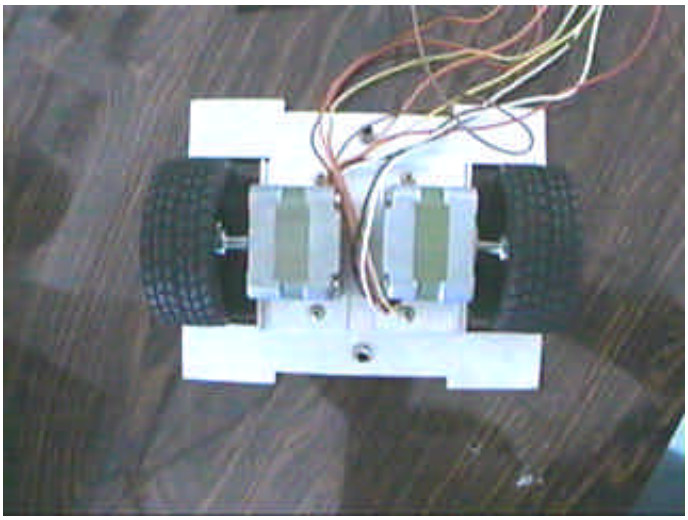

Figura 2 – Plataforma inferior do robô com os motores afixados.

robô completo com uma câmera, módulo de potência e ligações para o módulo de controle externo usado neste trabalho.

A alimentação do robô pode ser feita usando baterias colocadas nos cantos do robô entre as plataformas inferior e superior ou através de um cabo. Uma das vantagens desta plataforma é o baixo custo total, sendo que praticamente todo material usado na sua construção pode ser obtido nos laboratórios didáticos de qualquer instituição de ensino de engenharia.

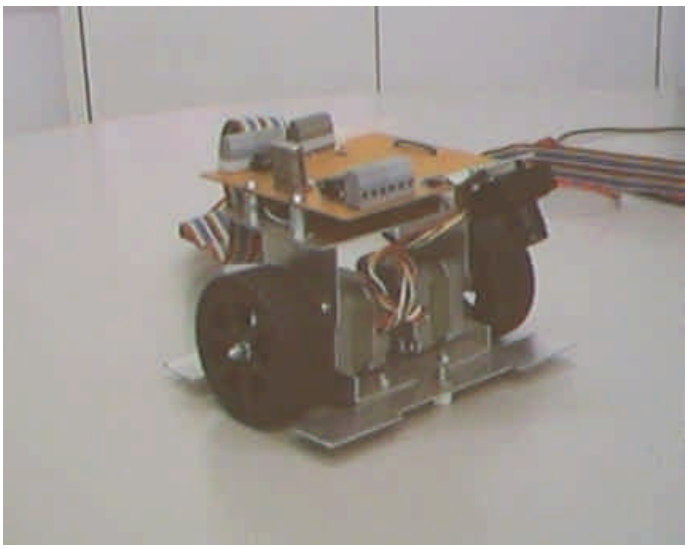

Figura 3 – O mini robô desenvolvido.

No sistema implementado todo processamento foi realizado fora do robô, em um microcomputador padrão IBM-PC (AMD K6 250MHz) e em uma placa didática FPGA da Altera. A arquitetura do sistema é composta dos seguintes módulos:

- Módulo de aquisição e análise de imagens: responsável pela definição da posição da pista em relação ao robô;
- Módulo de controle de direção do robô, responsável por decidir a direção dos motores e a velocidade dos motores;
- Módulo de controle de velocidade em FPGA: responsável pela geração do sinal de controle dos motores.

Os dois primeiros módulos foram implementados em software, usando o Sistema Operacional Microsoft Windows 98 e programados em Visual C++ 6.0 (SDK e Vídeo for Windows). A seguir são descritos cada um destes módulos.

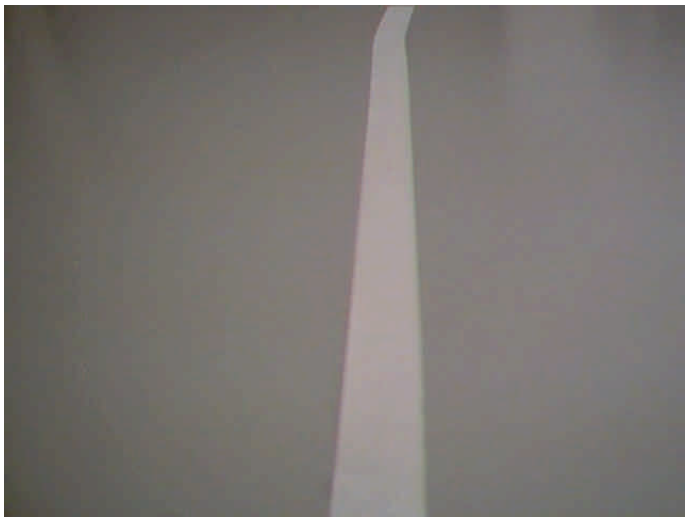

Figura 4 – Imagem capturada pela câmera local do robô, mostrando a pista a seguir.

3 O SISTEMA VISUAL IMPLEMENTADO

O sistema visual implementado é composto por uma micro câmera colorida de 330 linhas de resolução horizontal que se localiza na parte superior do robô (visível na figura 3), conectada à entrada de vídeo composto de uma placa de aquisição de imagens padrão BT-878, comumente usada em kits de videoconferência como o fabricado pela PixelView.

A Figura 4 apresenta uma imagem capturada pela câmera de 320 x 240 pixels de resolução, mostrando a pista que o robô deve seguir.

Para se definir a posição da pista em relação ao robô é usado o seguinte algoritmo:

- Captura-se uma imagem;
- Realiza-se a binarização da linha 170 da imagem, usando um limiar estabelecido durante uma calibração prévia. Esta linha foi escolhida porque se encontra próxima o suficiente do robô sem estar fora de foco (o que ocorre com linhas mais próximas) e porque perto do robô existem áreas de menor luminosidade que diminuem o contraste da pista com o fundo. Esta limiarização gera um vetor binário, onde os valores 1 representam pixels da imagem onde a pista se encontra;
- A partir do vetor com a linha 170 limiarizada é calculado o centro da pista utilizando a fórmula de média ponderada:

$$C_x \quad \frac{\sum_{i=0}^{m} x_i \, i}{\sum_{i=0}^{m} x_i}, \text{ onde:}$$

X_i é o valor do vetor binarizado na posição i;
m é a largura da imagem;
C_x é o centro da pista.

No caso da pista não ser encontrada (por esta ter terminado), o sistema atribui ao valor do centro da pista a coluna zero. Este valor é utilizado para avisar ao módulo de controle que os motores devem ser desligados. A Figura 5 ilustra o funcionamento deste algoritmo.

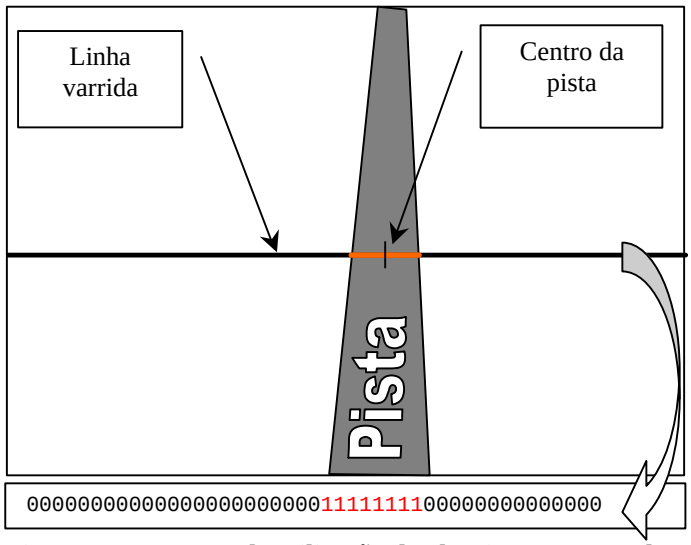

Figura 5 – Esquema de utilização do algoritmo mostrando a linha limiarizada, o vetor binarizado e o centro da pista.

Os limiares utilizados funcionaram bem para a pistas de cor branca (R > 190; G > 190; B >190) ou preta (R < 50; G < 50; B < 50), pois o contraste era suficiente para qualquer fundo testado. Outras cores testadas tem sua eficiência dependente da cor do fundo. A velocidade de análise de imagens do sistema também foi satisfatória.

4 SISTEMA DE CONTROLE DE DIREÇÃO BASEADO EM REGRAS.

Para implementar o comportamento de seguir uma pista é necessário controlar a direção na qual o robô deve se locomover através da relação entre as velocidades dos motores de passo. Com a posição da pista conhecida (foi extraída no módulo anterior), basta modificar as velocidades para que o centro da pista fique no centro da imagem.

Este controle pode ser feito de diversas maneiras, sendo os mais conhecidos as técnicas de *Visual Servoing* (Hager, Hutchinson e Corke, 1996 ou Corke, 1996) e o controle usando lógica nebulosa (Sandi L., Hemerly e Lages, 1998).

Para definir a direção do robô foi utilizado neste trabalho um mecanismo de controle que define a velocidade dos motores utilizando 5 regras, que mapeam a distância entre o centro da pista e o centro da imagem às velocidades dos motores. Para isto a imagem é dividida horizontalmente em 5 partes iguais: Muito a Esquerda (GE), Esquerda (E), Centro (C), Direita (D), Muito a Direita (GD) - Figura 6 - e os motores são acionados dependendo da região da imagem onde o ponto central da pista se encontra.

As regras usadas são:

- Se (centro GE) então acione o motor da direita com a velocidade três vezes maior que o da esquerda.
- Se (centro E), o motor da direita é acionado com a velocidade duas vezes maior que o da esquerda.
- Se (centro C), o motor da direita e o da esquerda têm a mesma velocidade e o robô andará reto.
- Se (centro D), o motor da esquerda é acionado com a velocidade duas vezes maior que o da direita.
- Se (centro GD), o motor da esquerda é acionado com a velocidade três vezes maior que o da direita.
- Se o centro não foi localizado na imagem (tem valor 0) os motores são desligados.

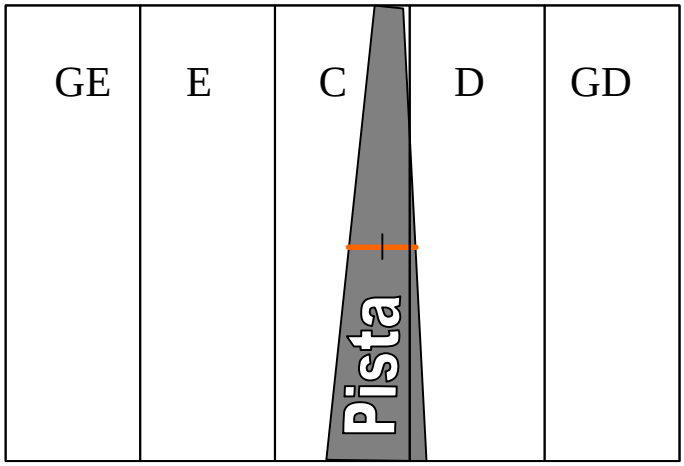

Figura 6 – Áreas definidas na imagem para o controle de direção.

Como a imagem utilizada tem resolução de 320x240, as regiões da imagem foram definidas como:

- Muito a Esquerda: 0 GE < 64.
- Esquerda: 64 E < 128.
- Centro: 128 C < 192.
- Direita: 192 D < 256.
- Muito a Direita: 256 GD < 320.

Após ter definido a velocidade dos motores, esta é enviada para o hardware dedicado de controle através da porta paralela do microcomputador. O byte contendo a instrução é codificada na seguinte forma:

- Bit 0: Direção do motor direito;
- Bits 1, 2 e 3: Velocidade do motor direito;
- Bit 4: Direção do motor esquerdo;
- Bits 5, 6 e 7: Velocidade do motor esquerdo.

5 SISTEMA DE CONTROLE DE VELOCIDADE

O sistema de controle da velocidade dos motores de passo é responsável pela geração dos pulsos de controle destes motores a partir das instruções de controle descritas na seção anterior recebidas via porta paralela.

Existem três tipos básicos de motores de passo: Motor de Passo de Relutância Variável, Motor de Passo de Imã Permanente e Motor de Passo Híbrido. Todos estes motores necessitam receber pulsos em uma ordem correta para se movimentarem. São três os modos básicos para geração de pulsos (figura 7):

- Modo 1: uma fase é alimentada por vez, de modo que a posição de equilíbrio das fases coincida com a posição de equilíbrio dos ímãs, fornecendo passo pleno.
- Modo 2: duas fases são alimentadas simultaneamente e a posição de equilíbrio dos ímãs é diferente do modo 1, fornecendo passo pleno, mas com conjugado 2 maior.
- Modo 3: é obtido combinando-se os modos 1 e 2, ou seja, alternando-se a alimentação de uma única fase com a alimentação simultânea de duas fases. Neste caso o avanço de passo corresponde à metade do passo produzida pelos modos 1 e 2.

O sistema consiste de um circuito lógico digital que gera os sinais de controle dos dois motores de passo e um *driver* de potência que fornece corrente e tensão necessária para alimentá-los. Ele foi implementado usando um hardware reconfigurável do tipo FPGA (*Field Programmable Gate Array*) da Altera, em uma placa de desenvolvimento educacional (Figura 8) do Pacote de Laboratório do Programa Universitário ALTERA, que inclui ainda o software de desenvolvimento MAX+PLUS II.

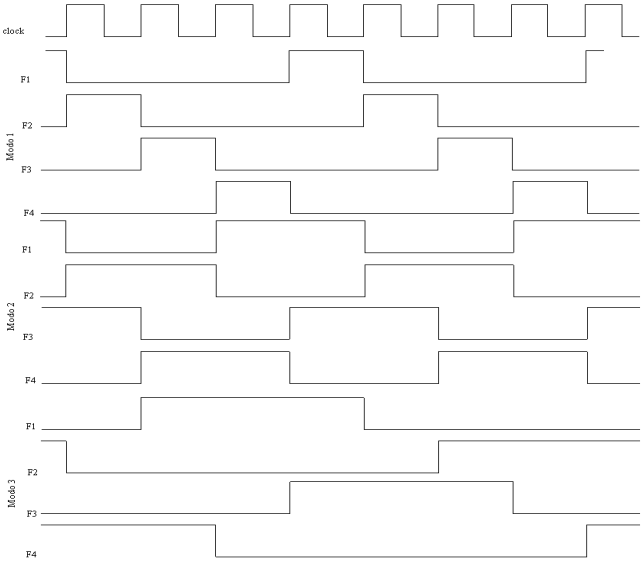

Figura 7 – Modos de trabalho do motor de passo.

O software MAX+PLUS II é um sistema de desenvolvimento que permite o desenvolvimento através de sistemas gráficos ou de uma linguagem de descrição de hardware, compilação e verificação do projeto, e programação de dispositivo. A placa de desenvolvimento educacional possui dois dispositivos lógicos programáveis e reconfiguráveis (*FLEX* 10k e MAX 7000).

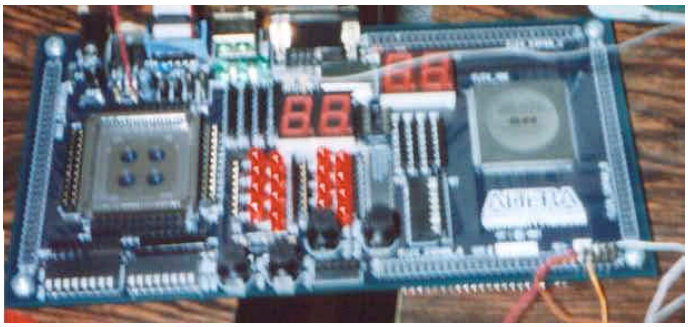

Figura 8 – A placa de desenvolvimento ALTERA onde o controle dos motores foi testado.

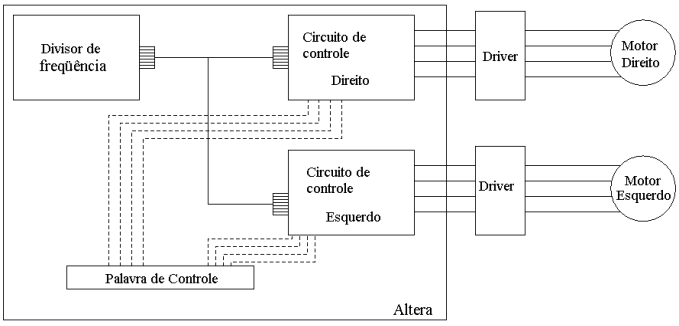

Figura 9 – Diagrama do circuito de velocidade.

O circuito possui 3 blocos: o divisor de freqüência e o circuito de controle dos motores esquerdo e direito (figura 9). O bloco divisor de freqüência tem como entrada um clock de 2,4576 MHz usado para temporizar a seqüência de pulsos gerados pelo

circuito. Este clock é separado em oito clocks adequados à movimentação dos motores de passo. A seguir cada metade da palavra vinda da porta paralela é levada até os circuitos de controle dos motores esquerdo e direito, onde três bits definem a velocidade e um bit a direção do motor.

O circuito de controle é idêntico para os dois motores e pode ser dividido em duas partes: o circuito de escolha, onde escolhe-se o clock adequado para o bloco seguinte usando um multiplexador controlado pelos bits de velocidade; e o circuito de movimentação do motor de passo, que a partir deste clock e do sentido gera as formas de onda para o motor de passo (no modo 2 -*Full-Step*).

Como último passo deste módulo, as formas de onda são amplificadas através do driver ULN 2003 (uma matriz de Darlingtons), chegando assim aos motores de passo.

6 RESULTADOS

Através de simulação foi possível observar o funcionamento do circuito projetado. Na Figura 10 pode-se observar que há aceleração e desaceleração dependendo dos dados enviados ao controle, pois como já visto anteriormente, os motores não podem começar a trabalhar em freqüências altas. A Figura 11 apresenta uma execução do sistema, com o robô seguindo um caminho desenhado sobre uma mesa, cujo fundo é reflexivo e de duas cores (marrom e preto).

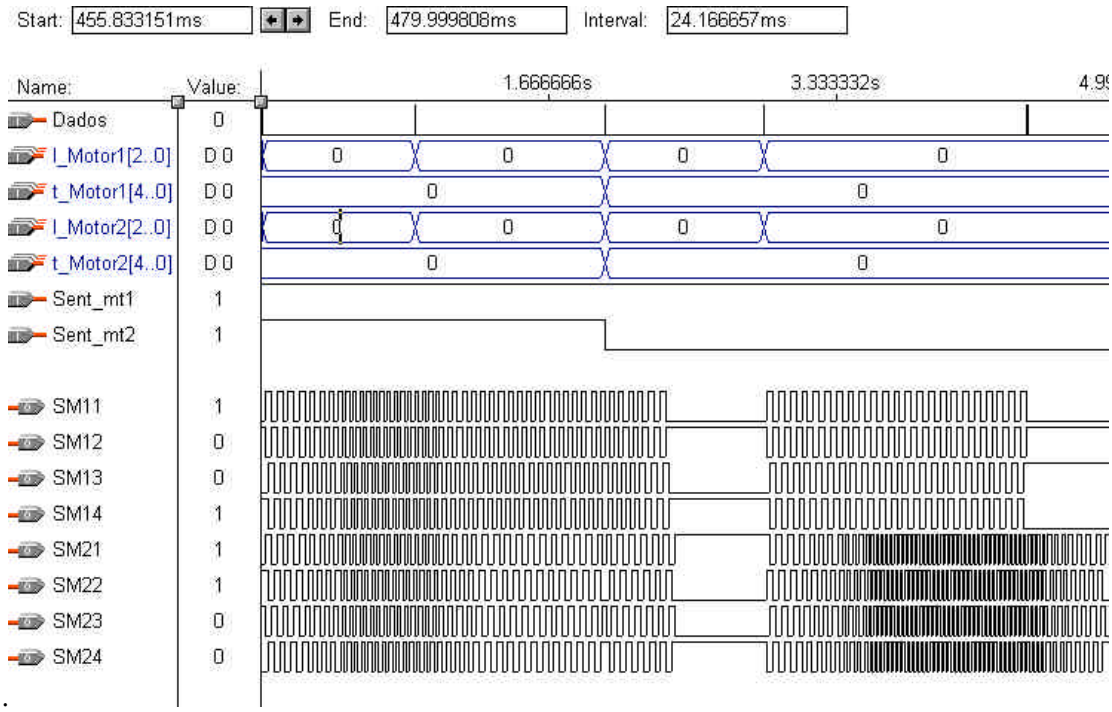

Figura 10 – Simulação do controle dos motores.

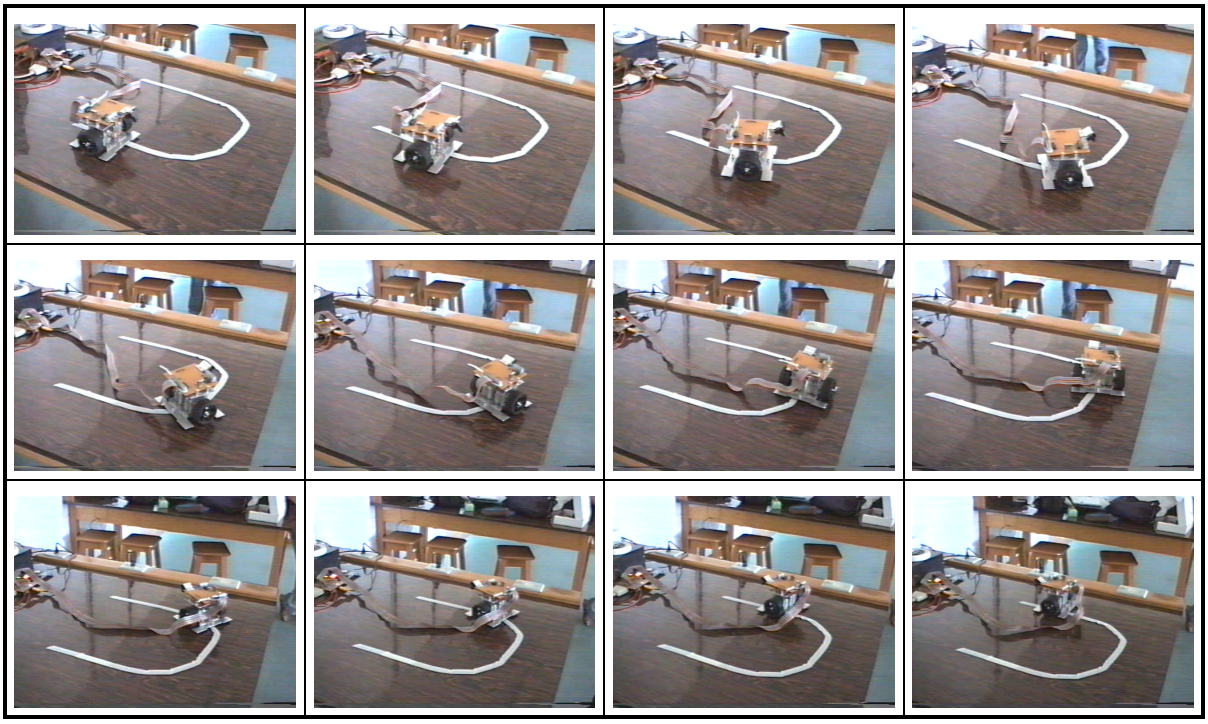

Figura 11 – Robô seguindo um caminho (tempo total 60 segundos).

7 CONCLUSÃO

O sistema foi testado e os resultados experimentais indicaram que o sistema é eficiente, sendo capaz de seguir qualquer caminho desenhado por um usuário.

Entre as vantagens desta plataforma, pode-se citar o seu reduzido tamanho, que facilita as experimentações e diminui o custo de implementação, já que praticamente todo material usado na sua construção pode ser obtido em laboratórios didáticos de escolas de engenharia.

Entre os problemas detectados o mais crítico é o de iluminação. A mudança no nível de iluminação da área de trabalho do robô torna necessário a recalibração do sistema, para dar conta dos novos níveis da cor da pista. Outro problema grave é a cor da linha: quando se utiliza a cor branca e dependendo do material da superfície onde ele se encontra, o reflexo da lâmpada pode ser interpretado como sendo a linha, visto que a câmera está posicionada em cima do robô. Isto pode ser facilmente resolvido com a adoção de uma cor que contraste com o chão, como por exemplo, laranja ou rosa.

Quanto ao algoritmo para detecção do centro da pista, este se apresentou bastante robusto, sendo que foi testado a utilização de ao invés uma linha, três e cinco linhas e cálculo da média entre elas. Este procedimento não apresentou melhorias no resultado, já que o reconhecimento de um (ou alguns) pixels da linha como fundo não origina um erro considerável na localização do robô (devido à grande quantidade de pixels em uma linha).

Entre os trabalhos futuros estão: a implementação de comportamentos relacionados com o futebol de robôs, como seguir bolas e o goleiro; a utilização de controle nebuloso no algoritmo de localização do centro da linha (ou bola). Já se encontra em fase de implementação o controle dos motores embarcado no robô e um módulo de transmissão de dados via RF que, junto com a transmissão de vídeo do robô para o computador usando UHF, permitirão uma maior autonomia do sistema.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

Aires, K. R. T., Alsina, P. J., Medeiros, A. A. D. (2001) A Global Vision System for Mobile Mini-Robots. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE AUTOMAÇÃO INTELIGENTE, 5, Canela, 2001. **Anais.** Canela, Sociedade Brasileira de Automática.

Bianchi, R. A. C., Simões, A. S., Reali-Costa, A. H. (2001). Comportamentos Reativos para Seguir Pistas em um Robô Móvel Guiado por Visão. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE AUTOMAÇÃO INTELIGENTE, 5, Canela, 2001. **Anais.** Canela, Sociedade Brasileira de Automática.

Chang, M., Browning, B, Wyeth, G. (2002) ViperRoos: Developing Low Cost Local Vision Team for the Small Size League. In: Birk, A.; Coradeschi, S.; Tadokoro, S. (Org.). **Lecture Notes in Artificial Intelligence.** RoboCup-01: Robot Soccer World Cup V. Berlin: Springer Verlag, 2002, v. 2377, p. 305-311.

Corke, P. I. (1996) **Visual Control of Robots: High Performance Visual Servoing.** Research Studies Press - John Wiley.

Hager, G.; Hutchinson, S.; Corke, P. (1996) A Tutorial on Visual Servo Control. Tutorial 3 of the IEEE Robotics & Automation Conference.

Howard, A., Seraji, H. (2001) "An Intelligent Terrain-Based Navigation System for Planetary Rovers". **IEEE Robotics & Automatoin Magazine,** v. 8, n. 4, p. 9-17, Dec. 2001.

Kitano, H. et al. (1997) "RoboCup: A Challenge Problem for AI". **AI Magazine**, v. 18, n. 1, p. 73-85, Spring 1997.

Ribeiro, C. H. C.; Reali-Costa, A. H.; Romero, R. A. F. (2001). Robôs Móveis Inteligentes: Princípios e Técnicas. Jornada de Atualização em Inteligência Artificial do Congresso da Sociedade Brasileira de Computação.

Robocup (2001). "RoboCup F-180 League Rules". http://parrotfish.coral.cs.cmu.edu/robocup-small/rules/

Rojas, R., von Hundelshausen, F., Behnke, S., Frötschl, B. (2002) FU-Figters Omni 2001 Team. . In: Birk, A.; Coradeschi, S.; Tadokoro, S. (Org.). **Lecture Notes in Artificial Intelligence.** RoboCup-01: Robot Soccer World Cup V. Berlin: Springer Verlag, 2002, v. 2377, p. 575-578

Sandi L., F. A.; Hemerly, E. M.; Lages, W. F. (1998) "Sistema para Navegação e Guiagem de Robôs Móveis Autônomos". **SBA Controle e Automação**, v. 9, n. 3, Dez/1998.

Sekimori, D., Usui, T., Miyazaki, F. (2003) Evaluation of Self-Localization Performance for a Local-Vision Robot in the Small Size League. In: Kaminka, G; Lima, P.; Rojas, R. (Org.). **Lecture Notes in Artificial Intelligence.** RoboCup-02: Robot Soccer World Cup VI. Berlin: Springer Verlag, 2003 (no prelo)