

INTEGRANDO TECNOLOGIAS EM SISTEMA DE CONTROLE DE MOVIMENTAÇÃO DE ROBÔ HUMANOIDE COM CÂMERA EMBARCADA

Raphael Ballet ¹; Alessandra Dutra Coelho ²; Wânderson de Oliveira Assis ²

¹ Aluno de Iniciação Científica da Escola de Engenharia Mauá (EEM-CEUN-IMT);

² Professor(a) da Escola de Engenharia Mauá (EEM-CEUN-IMT).

Resumo. *Este trabalho tem o objetivo principal de possibilitar um robô humanoide autônomo se movimentar com o auxílio de uma câmera embarcada de forma semelhante ao sistema de visão humana. O desenvolvimento do projeto será voltado para a criação de um sistema de sensoriamento baseado em uma câmera embarcada, com movimentação pan-tilt, que permita ao robô uma movimentação, reconhecimento do ambiente e decidir qual será sua ação para alcançar seus objetivos. Para isso, o sistema de movimentação do robô será baseado em um processamento de imagens e o uso de sensores como acelerômetros e giroscópios, que deverão dar estabilidade e movimentação precisa ao robô. Apesar de ter um objetivo simples de uma competição de futebol de robôs (a Robocup), o conceito de movimentação de um robô autônomo utilizando câmeras embarcadas é de grande importância e objeto de muitas pesquisas na atualidade, já que permite a proximidade de um sistema conhecidamente eficiente de sensoriamento, que é a visão humana.*

Introdução

A utilização de câmeras embarcadas em robôs autônomos vem se tornando uma prática comum em pesquisas ou mesmo na indústria atual. É muito comum ver faculdades do mundo inteiro e mesmo empresas investindo em tecnologias de automação através de sistema de processamento de imagens através de câmeras embarcadas e outros sensores. Sua utilização também pode ser usada para rastrear superfícies, como câmeras acopladas em aviões ou helicópteros autônomos ou mesmo em carros autônomos. Outro grande uso é o uso em veículos submarinos, como o feito por Crétual e Chaumette (2000), ou mesmo na medicina com cirurgias não presenciais (Palep, 2009).

A possibilidade de movimentação de um robô remotamente é de grande avanço em situações de perigo ou de condições não favoráveis a seres humanos. Com isso, há sempre a necessidade de se evitar acidentes e perigos, o que traz a vantagem de se utilizar robôs autônomos. Pode ser na utilização de robôs para explorar territórios não conhecidos, como Marte, ou mesmo situações de perigo iminente, como um robô usado para desarmar uma bomba ou resgatar feridos em um incêndio.

Visto suas utilidades, o nosso enfoque será no uso de robôs autônomos, ou seja, robôs que não tem nenhuma interferência humana. Eles devem ser capazes de “perceber” o ambiente e atuar conforme o objetivo a ele designado. Para se relacionar com o ambiente, o robô deve ter sensores que devem informar ao robô a situação em que ele se encontra. Por exemplo, se um braço robótico é usado para encontrar um objeto a certa distância, podem ser usados sensores acústicos, como os sonares, ou mesmo os sensores infravermelhos, que são sensores óticos. Mas, podem também serem usadas câmeras, que identificam formas e cores específicas. A distância pode ser calculada e o braço robótico pode agir conforme a movimentação do objeto.

Como visto, o robô autônomo deve interagir com o ambiente na forma desejada e saber agir conforme seus objetivos. O nosso objetivo principal será o de utilizar uma câmera embarcada para encontrar uma bola laranja do tamanho de uma bola de golfe e agir de tal forma que seja capaz de se aproximar dela, chutá-la e segui-la em campo. Há diversos fatores limitantes ao

projeto, o que não permite integrar um processo de grande complexidade. Um dos principais fatores limitantes ao projeto é o fato de o robô ser um humanoide, ou seja, ele tem apenas dois apoios, sendo que em movimentação ele apenas se apoia em uma perna. Isso apresenta um grande desafio, porque o robô deve sempre manter seu equilíbrio a cada movimento e alterar qualquer peso em local não desejado pode mudar o centro de gravidade e deixar o robô instável. Outro fator limitante é o espaço reduzido no robô. O robô apresenta pequenas dimensões e não há espaços disponíveis para grandes alterações.

O trabalho indicado a seguir apresenta o objetivo de obter um melhor controle e percepção do robô com uma câmera embarcada. O robô apresenta grandes limitações de programação e deverá haver uma integração entre a câmera, o processamento de imagens e a tomada de decisões. Após tentativas e erros, foi escolhida uma nova forma de controle baseada na descentralização das atividades do robô, com três níveis de controle. O primeiro nível é a partir da CMUCAM4, uma placa que contém um sensor CMOS de câmera e com um processador da Parallax P8X32A. Essa placa tem a função de capturar a imagem, realizar o processamento de imagens e mandar para o segundo e mais importante nível. O segundo nível é composto por uma placa *Arduino*, um hardware livre com o qual há diversos projetos e bibliotecas presentes, o que torna rápido e fácil o trabalho de programação. O *Arduino* será o comando central do robô. Através dos comandos indicados pelo *Arduino*, o terceiro nível é acionado e ele corresponde ao sistema já existente no robô. A placa MRC-3024, presente no robô, recebe a ação desejada pelo *Arduino* e realiza os movimentos existentes.

Materiais e Métodos

Materiais utilizados

O robô humanoide utilizado é o Robonova-1 (figura 1) produzido pela *HiTec*. O robô contém 16 servomotores do tipo HSR-8498 e uma placa de controle MRC-3024 (figura 2). A placa MRC-3024 contém um microcontrolador do tipo ATMEL ATMEGA 128 e é programada por uma interface em linguagem específica do Robonova-1, o *RoboBasic*, que é uma linguagem simples e com poucos recursos. Através desta limitação de programação, houve a necessidade de obter alternativas para um melhor controle de ações e inteligência.

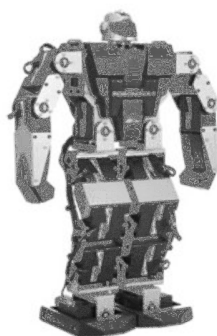


Figura 1 – Robonova-1.

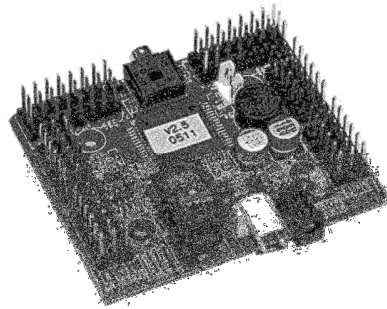


Figura 2 – MRC-3024.

O sistema de visão utilizado no projeto é composto por uma câmera embarcada CMUCam4(figura 3) e foi implantado um sistema de movimentação com 2 graus de liberdade, sistema *pan-tilt*, que pode ser visto na figura 4. Este sistema é utilizado para movimentação nos três eixos, o que permite a liberdade de movimentação necessária para a ação desejada. A CMUCam4 apresenta um módulo de sensor de câmera CMOS 9665 com um processador Parallax P8X32A. A placa é *open-source* e pode ser reprogramada de diversas maneiras. A maneira que será utilizada para esse projeto será através da biblioteca existente da CMUCam4 para o Arduino. A placa CMUCam4 será a responsável por todo o processamento de imagens e cálculo dos parâmetros da imagem observada. Como se deseja perseguir uma bola laranja, então é necessário o envio dos parâmetros RGB que corresponde à cor laranja. Esses parâmetros são enviados a partir de um intervalo de valores, para garantir que a câmera consiga visualizar toda a bola mesmo com níveis diferentes de luminosidade. Após essa análise de cores, a CMUCam4 envia pacotes de dados(tipo T) contendo diversos parâmetros como:

- mx = valor médio (centro geométrico) horizontal;
- my = valor médio (centro geométrico) vertical;
- x1 = coordenada superior horizontal esquerda da caixa que contém a imagem;
- y1 = coordenada superior vertical esquerda da caixa que contém a imagem;
- x2 = coordenada inferior horizontal direita da caixa que contém a imagem;
- y2 = coordenada inferior vertical direita da caixa que contém a imagem;
- pixels = A porcentagem de pixels encontrados com os parâmetros desejados na imagem;
- confidence = A densidade de pixels reunidos em uma parte da imagem (usado para determinar se há uma região de certa cor, como uma bola, por exemplo).

Essas informações são enviadas continuamente para o Arduino e é a partir delas que é feita toda a lógica desejada.

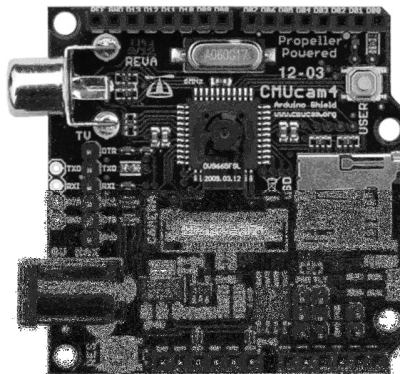


Figura 3 – CMUCam4.

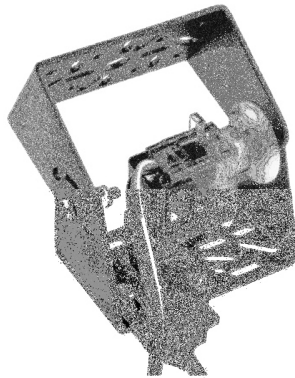


Figura 4 – Sistema Pan-Tilt com servomotores.

O sistema de controle foi definido a partir da necessidade de prover maior nível de inteligência ao robô, podendo haver uma melhor programação e controle das atividades necessárias. O robô apresenta uma placa MRC-3024 que apresenta um microcontrolador ATMEL ATMEGA 128 que é programada com uma linguagem específica para o Robonova-1 que é a *ROBOBASIC*. Essa linguagem tem grandes limitações, como a não existência de variáveis tipo indexada e a necessidade de chamadas de estruturas condicionais serem limitadas. Por essas limitações, foram realizadas pesquisas para a substituição da placa de controle por uma que pudesse ser programada em C. O desenvolvimento de uma nova placa de controle foi tema de pesquisas passadas, mas houve problemas na utilização, o que levou a busca de novos métodos de controle. Uma das alternativas encontradas foi a introdução de uma placa Arduino ao sistema de controle já existente, o que trouxe grandes benefícios em programação e com baixo custo. Com essa placa, houve a possibilidade de retirar da MRC-3024 a necessidade de decisão de movimentos, que era limitada, e manter apenas as rotinas de movimentação do Robonova-1. As rotinas de movimentação da placa MRC-3024 apresentam importantes características, as quais não seriam possíveis serem reproduzidas no Arduino, como o Grupo de Movimentos, que tem a função de garantir que todos os servomotores terminem um movimento ao mesmo tempo e também o controle de posições dos servomotores, o que garante a correta posição do robô a certo comando. Outro ponto importante de manter a placa MRC-3024 em conjunto com o Arduino é a grande quantidade de servomotores necessários para a movimentação do robô. O Arduino não suporta 16 servomotores e não tem a capacidade de suprir internamente a quantidade de corrente necessária para movimentar esses servos.

A placa Arduino utilizada é modelo Arduino Nano(figura 5) e apresenta as seguintes características:

-Microcontrolador	-Atmel ATmega328
-Voltagem de operação (nível logico)	-5 V
-Voltagem de entrada (recomendada)	-7-12 V
-Voltagem de entrada (limites)	-6-20 V
-Pinos digitais I/O	-14 (dos quais 6 podem ser saídas PWM)
-Pinos de entrada analógica	-8
-Corrente contínua por pino I/O	-40 mA
-Memória Flash	-16 KB (dos quais 2KB são utilizados pelo bootloader)

-SRAM	-1 KB
-EEPROM	-512 bytes
-Velocidade de Clock	-16 MHz
-Dimensões	-0.73" x 1.70"



Figura 5 – Arduino Nano.

O Arduino Nano é programado através de um cabo Mini-B USB, que também pode ser usado para comunicação serial e portas Rx/Tx, que são usadas para comunicação serial TTL. Há também a possibilidade de comunicação SPI e I²C. O Arduino possui diversas bibliotecas disponíveis para diversas situações, o que torna mais rápida a criação de códigos mais complexos. Por ser um hardware *open-source*, ou seja, todo seu esquema eletrônico é aberto ao público, existe uma grande variedade de cópias e *Shields* no mercado. Os *Shields* são placas com elementos adicionais que podem ser montadas em cima de outra placa Arduino, aumentando a quantidade de funções presentes, como relés, controladores de motor, LCD, GPS e até mesmo a própria CMUCam4.

Os sensores adicionais usados no robô são os acelerômetros e giroscópios. Os acelerômetros medem as acelerações em um eixo específico, o que permite obter informações sobre impactos, forças ou até a queda livre de um objeto. Através dele podemos analisar quais forças estão agindo sobre o robô e obter um melhor equilíbrio quando houver um movimento não desejado. Há diversos tipos de acelerômetros existentes, mas os mais utilizados são os acelerômetros de material piezoelétricos e os de capacitância. Os acelerômetros de material piezoelétricos são formados por uma massa presente no interior de uma caixa e um material piezoelétrico. A característica de um material piezoelétrico é a de que quando ele é comprimido, surge uma voltagem elétrica e através dessa voltagem pode-se analisar quanto a massa comprime esse material através do seu movimento. Nos acelerômetros de capacitância, há outra propriedade envolvida que é a distância entre duas placas inversamente polarizadas, como a de um capacitor. Quando se utiliza um acelerômetro de capacitância, uma das placas é fixa e a outra é movimentada em relação à outra placa. Essa placa móvel é presa a uma mola e a outra extremidade da mola é fixada na caixa do acelerômetro. Quando há aceleração, há uma pequena deformação na mola com a placa. Com essa deformação, há uma aproximação entre a placa móvel e a placa fixa, o que gera uma diferença de potencial no capacitor proporcional à distância

de separação das duas placas. Essa diferença de potencial é analisada e pode-se observar a aceleração produzida.

Os giroscópios são muito importantes, principalmente em sistemas de navegação de aeronaves, navios, piloto automático, voos espaciais e etc. Ele se baseia em dois conceitos importantes da física que são a inércia e a precessão. O giroscópio é constituído basicamente de um rotor suspenso com um eixo em rotação. Esse rotor mantém uma posição fixa mesmo após ser forçada em uma determinada direção não paralela à roda. Através desse sistema pode se observar a direção do objeto em relação ao rotor, o que permite a correta orientação do corpo. Para se obter as orientações em um espaço tridimensional é necessário que haja 3 giroscópios em posições perpendiculares. Já nos equipamentos eletrônicos, o giroscópio usado é da categoria MEMS (*Microelectromechanical systems*) ou até mesmo NEMS (*Nanoelectromechanical systems*), que são dispositivos extremamente pequenos (nanotecnologia) e que são muito utilizados em equipamentos de eletrônica embarcada, como automóveis e aviões. Os giroscópios do tipo MEMS utilizam o conceito de Pêndulo de Foucault e usam elementos vibratórios.

Em conjunto, o giroscópio e o acelerômetro constituem a base do IMU (*Inercial Measurement Unit*), que são equipamentos eletrônicos capazes de medir a aceleração, orientação e direção do movimento. Às vezes podem ser integrados GPS, magnetômetros e até tubos de Pitot, para um completo controle de movimento no espaço. No Robonova-1, o giroscópio e o acelerômetro serão responsáveis pelo equilíbrio do robô e a correta percepção do seu estado em relação ao desejado. Outro aspecto importante é perceber quando o robô está caído e como ele está caído. Através dos dois sensores poderemos determinar sua posição e agir para levantá-lo de forma adequada.

Projeto e testes

Como já dito, o projeto consiste em tornar possível um robô humanoide se orientar através de uma câmera embarcada e demais sensores e através disso ser possível realizar operações simples, como andar, dar um passo para o lado, chutar, levantar, sentar, virar e etc. O controle será baseado em níveis de controle bem definidos, nos quais são necessárias comunicações bilaterais, de forma a tornar o sistema o mais robusto possível. Abaixo está esquematizado o sistema de controle através da figura 6:

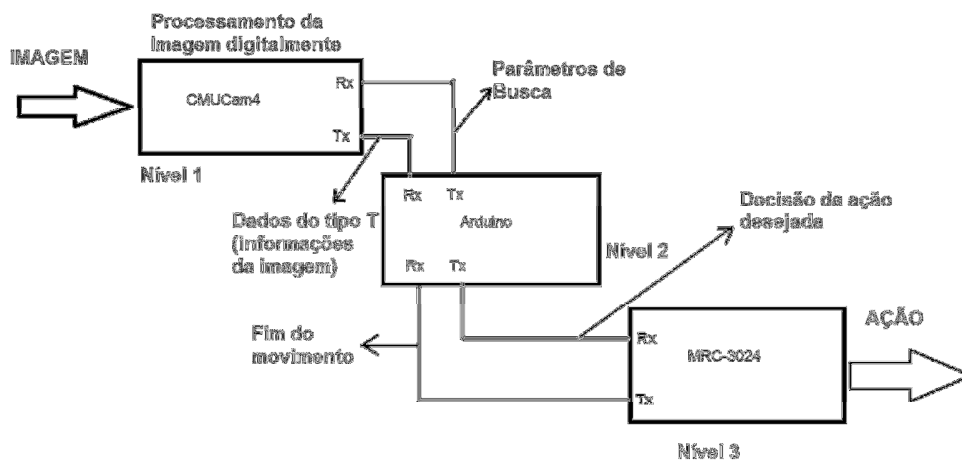


Figura 6 – Esquema de controle do robô.

A CMUCam4 é responsável por todo o processamento e envio de dados sobre o posicionamento do objeto desejado e através desses dados o Arduino realiza, primeiramente, o ajuste do sistema pan-tilt até que o centro geométrico da imagem fique exatamente alinhado com o centro da câmera. Isso é possível através de um algoritmo de controle proporcional-derivativo (PD) desenvolvido no Arduino e que possibilita um movimento estável ao seguir um objeto. O mesmo algoritmo é utilizado tanto para o movimento de “Pan” (rotação no eixo y), quando para o movimento de “Tilt” (rotação no eixo x). Quando a câmera não consegue mais observar o objeto, a câmera volta à posição inicial e começa a procurar o objeto e, se ainda não achar, é enviado um código para o robô girar para o lado até achar o objeto.

Como o Arduino Nano apresenta apenas um par Rx/Tx e precisa se comunicar com dois dispositivos, é necessário haver uma forma de multiplexar as comunicações seriais. Isso é feito através do circuito integrado 74HC4052, que é um Multiplexador/Demultiplexador analógico de 4 canais, o que é o ideal para a aplicação do projeto, já que é necessário multiplexar dois sinais Tx para a entrada Rx do Arduino e demultiplexar o sinal Tx para um dos dispositivos. Isso é feito através de um sinal de controle do Arduino, sendo que quando o sinal é zero o Arduino se comunica com a CMUCam4 e quando o sinal é 1 o Arduino se comunica com o MRC-3024.

O sistema de decisão de comando se baseia em regras de movimentação definidas. Quando o nível 2, ou nível de comando, decide uma ação ele envia um byte para MRC-3024 que representa a ação desejada. Esse código é representado pelo código ASCII de 0 a 8, como visto a seguir pela Tabela 1.

Os códigos são recebidos pela MRC-3024 e definem o movimento desejado. Esse movimento é realizado uma única vez e envia de volta um sinal, informando que o movimento acabou e que precisa de novas informações. Isso é necessário para que seja possível um controle e estabilidade de movimentos do robô e não execute movimentos não desejados. O conjunto de movimentos está presente na placa MRC-3024 de fábrica pela *Hitec*, o que facilita o trabalho de movimentação, já que deve ser definido o ângulo de cada motor para cada tipo de movimento, o que seria um trabalho iterativo, exaustivo e com poucos resultados desejados. Para desenvolver um correto sistema de movimentação para o robô deveria ser feito um modelo completo de todo o sistema dinâmico do robô e é tema de pesquisas de muitas universidades e empresas. É um

processo complexo e que seria tema para pesquisas avançadas, o que não é o objetivo principal desse projeto.

Tabela 1 – Códigos de movimentação.

Ação	ASCII	Decimal	Binário
Posição inicial	0	48	0011 0000
Andar para Frente	1	49	0011 0001
Andar para Trás	2	50	0011 0010
Virar para Direita	3	51	0011 0011
Virar para Esquerda	4	52	0011 0100
Passo para Direita	5	53	0011 0101
Passo para Esquerda	6	54	0011 0110
Levanta(Costas)	7	55	0011 0111
Levanta(Frente)	8	56	0011 1000

Resultados e Discussão

Através de todas as modificações houve um grande avanço nas funcionalidades do Robonova-1, transformando-o em um robô inteiramente autônomo e capaz de realizar ações complexas para um robô humanoide. A introdução de uma câmera embarcada e o desenvolvimento do novo sistema de controle, baseado na subdivisão de tarefas, trouxeram amplas possibilidades de controle e ações, sendo que os resultados podem ser usados muito além da capacidade de jogar futebol de robôs.

Apesar das importantes melhorias, houve também problemas devido à quantidade de equipamentos adicionados na estrutura do robô. O peso adicional transladou o centro de gravidade do robô para diferentes posições, o que gerou instabilidade em certos movimentos bruscos. O robô deve se movimentar de uma maneira mais lenta para não ocorrerem quedas e danificá-lo. Há também a necessidade futura de haver proteções para a câmera e as placas eletrônicas da parte de trás do Robonova-1, já que, com a adição de componentes como o Arduino e o circuito integrado 74HC4052, a proteção original não pode mais ser utilizada.

Outro problema existente foi a dificuldade de a câmera encontrar a bola laranja a uma distância maior do que um metro. Ela tem boa precisão ao encontrar e seguir uma bola até uma distância de 30 centímetros, mas se torna instável conforme se aumenta a distância entre a câmera e a bola. Além da distância, há também o problema de luminosidade do ambiente. Os parâmetros RGB enviados para a câmera devem ser alterados toda vez em que há variação de luminosidade, o que não é desejado.

O sistema de controle mostrou-se muito eficiente em condições ideais, mas muito instável quando havia a necessidade de mudanças bruscas de movimentação, o que gera a necessidade de se aprimorar o controle e os equipamentos utilizados para o projeto. Apesar disso, o robô aproximou-se corretamente da bola e realizou corretamente algumas ações de busca quando necessário. O sistema Pan-Tilt também funcionou corretamente e obteve resultados melhores do que o esperado, obtendo velocidades altas ao perseguir o objeto em movimento.

Conclusões

O projeto apresentou resultados positivos e conseguiu o seu objetivo de propiciar um robô humanoide de utilizar uma câmera embarcada para sua movimentação e, através disso, conseguiu desenvolver um sistema mais eficiente de controle. Não houve, porém, uma preocupação em estratégia e desenvolvimento de melhorias para a prática de futebol de robôs, o que deve ser desenvolvido futuramente através dessas ferramentas. Há, também, o estudo da implementação da placa BotBoarduino da Lynxmotion, que poderia substituir tanto o Arduino como a placa MRC-3024, o que tornaria o robô mais leve e sem a necessidade de haver o circuito integrado 74HC4052.

A nova forma de controle mostrou-se muito confiável e com grande potencial de melhorias pela sua capacidade de programação e de sensoriamento. A mudança de linguagem de programação e a maior memória disponível tornam-se importantes ferramentas para o desenvolvimento de um controle de qualidade e a possibilidade de aprimoramentos.

Há diversos pontos importantes a serem melhorados tanto na estrutura quanto na programação do robô, mas houve um grande avanço nas capacidades do Robonova-1. A melhoria na estabilidade, proteção e aprimoramento do controle do robô devem ser temas futuros importantes para aumentar a capacidade do robô. A inserção de sensores adicionais como acelerômetros e giroscópios e a pesquisa de novos meios de visão para o melhor controle devem ser os pontos principais a serem analisados.

Através do desenvolvimento deste projeto, foi de grande importância a pesquisa de controle e movimentação de robôs humanóides, sendo que há sempre a necessidade de manter equilíbrio e estabilidade ao movimentar-se um robô bípede. Outro ponto importante deste projeto foi o estudo de meios eficientes de obter visão computacional para o robô, já que é através dele que todas as ações são tomadas. Quanto mais eficiente o processamento da imagem e percepção do ambiente, maior será a quantidade de informações disponíveis para um controle melhor.

O projeto desenvolveu-se através de muitas limitações e entre erros e acertos, mas, apesar de todos os obstáculos, o objetivo foi alcançado de forma positiva e foi possível obter uma alternativa de controle de relativo baixo custo e com boa eficiência. Por isso, considera-se que o projeto aprimorou as possibilidades de estudos futuros com robôs humanóides e o conhecimento adquirido através desta pesquisa pode ser levado a áreas importantes na robótica autônoma e até em desenvolvimentos de pesquisas de movimentos de bípedes.

Referências Bibliográficas

- Assis, W.O.; Genova, W.J.; Gomes, M.M.; Coelho, A.D. (2007) Aplicação de Tecnologias de Controle de Processos Contínuos e Processamento de Imagens no Futebol de Robôs. *Anais do SBAI 2007 – Simpósio Brasileiro de Automação Inteligentes*, Florianópolis, SC, Brasil.
- Crétual, A.; Chaumette, F. (2000). Dynamic stabilization of a pan and tilt camera for submarine image visualization. *Computer Vision and Image Understanding*, **79**, 47-65
- Gonzales, R. C., Woods, R. E. (2000) *Processamento de Imagens Digitais*. Edgard Blücher Ltda.

- Kikuchi, D. Y. (2007). Sistema de controle servo visual de uma câmera pan-tilt com rastreamento de uma região de referência. Tese (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP.
- Nicholls, E. (1998). Bipedal Dynamic Walking in Robotics. Honours Thesis – The University of Western Australia; Department of Electrical and Electronic Engineering.
- Palep, J. H. (2009). Robotic Assisted Minimally Invasive Surgery. *Journal of Minimal Access Surgery*, **5**, 1-7.
- Rowe, A. (2003) ROBONOVA-I – 16 Servo Entertainment Robot Box Kit – Introduction Manual. Edited by Charles Rosenberg and IllahNourbakhsh, Carnegie Mellon University.