

CONTROLE DA ESTABILIDADE DE EQUILÍBRIO PARA UM ROBÔ QUADRÚPEDE COM USO DE LÓGICA NEBULOSA

Luis E. M. Lima, Paulo F. S. Amaral, Antônio B. Filho

Laboratório de Controle e Instrumentação (LCI), Departamento de Engenharia Elétrica (DEL), Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), Av Fernando Ferrari, s/n, CEP 29060-900, Vitória-ES, Brasil.

E-mails: luisedu@cefetes.br, paulo@ele.ufes.br, abento@ele.ufes.br

Resumo — Este artigo apresenta uma arquitetura de controle hierárquico, com comportamento reflexivo de estabilidade para um robô móvel quadrúpede, com uso de lógica nebulosa e sensoriamento por um acelerômetro de dois eixos. Esta proposta mescla controle convencional com a aplicação da lógica nebulosa para gerar o comportamento reflexivo capaz de garantir reação do robô à instabilidade de equilíbrio, melhorando sua performance de navegação.

Palavras-chave — Robô quadrúpede, comportamento reflexivo, lógica nebulosa, acelerômetro.

Abstract – This article presents hierarchic control architecture, with stability reflexives behavior for a four-legged mobile robot, by using fuzzy controllers and a dual-axis accelerometer. This article blends the conventional control application with fuzzy logic to get reflexives behaviors which enables the robot to react to the balance instability, improving its performance to navigate.

Keywords – Four-legged robot, reflexive behaviors, fuzzy logic, dual accelerometer.

I. INTRODUÇÃO

Na atualidade muitas pesquisas em robótica móvel têm sido desenvolvidas com a meta de proporcionar a adaptação de robôs móveis a ambientes desestruturados. O objetivo destas pesquisas é permitir uma interação dinâmica destes robôs com obstáculos em sua trajetória, outros robôs em uma comunidade, seres vivos da natureza e inclusive o homem [1][2]. Assim, evoluem as contribuições para a aplicação de robôs às tarefas como exploração espacial, agricultura, fins militares, e também o lazer.

Para que se possa, dotar os robôs da capacidade de interação com ambientes desestruturados torna-se necessário que ações comportamentais destes robôs sejam definidas em tempo de execução das tarefas. Estas ações denominam-se

“reflexos”, e são utilizadas com a finalidade de proporcionar melhoria de desempenho na realização das tarefas e até mesmo preservar a integridade física do robô.

O controle da estabilidade de equilíbrio para robôs móveis quadrúpedes tem como regra geral, a busca da postura que anule o momento de balanço do corpo do robô em relação aos pontos de apoio das patas sobre o plano de navegação. Esta estratégia também conhecida por ZMP (*Zero Momentum Point*) se traduz em corrigir a postura do robô durante a andadura, de modo a manter a projeção do centro de gravidade (CG) do robô dentro do polígono de apoio das patas sobre o plano de locomoção, ou em caso de equilíbrio dinâmico manter a projeção do CG sobre a linha definida pelas patas de apoio [4].

Os reflexos para a correção de postura de um robô quadrúpede, na obtenção de equilíbrio no decorrer da andadura, são obtidos através de movimentos de balanço do corpo do robô e manipulação de suas pernas.

O uso de comportamentos reflexivos em robôs quadrúpedes exige uma camada de controle hierarquicamente mais alta na composição da arquitetura de controle do robô. Esta estrutura de controle é exigida pelo fato de que no nível dos comportamentos reflexivos não necessariamente são processados modelos para definição dos movimentos a serem executados, e algoritmos para sincronismo de movimentos das pernas, pelo objetivo de redução do custo computacional e ganho na velocidade de resposta [6].

Esta topologia para a arquitetura de controle vem sendo explorada por pesquisas que fazem uso da analogia com o sistema biológico animal (cães, gatos e outros quadrúpedes), e estruturam arquiteturas com um nível de controle hierarquicamente superior responsável por supervisão e planejamento, e um nível inferior responsável pelos reflexos. Neste enfoque atualmente duas estratégias se destacam, que são:

o controle clássico com uso da modelagem cinemática e dinâmica para a tomada de decisão sobre qualquer tarefa a ser executada [8];

o uso de um gerador central de padrões de comportamentos integrado a um sistema de controle reflexivo com aplicação de redes neurais artificiais e lógica nebulosa [7].

O uso de modelos matemáticos para a definição de padrões de comportamento e reflexos de estabilidade apresenta-se como uma solução de alto custo computacional e sofre diversas influências de sua parametrização [8]. O custo computacional é função da necessidade de processamento de relações não-lineares (cinemáticas e dinâmicas), além desta solução sofrer a influência das mudanças de parâmetros dos modelos utilizados (como momentos de inércia, torques resistentes), a depender dos movimentos realizados e também a depender do tempo de uso do robô.

Quanto à aplicação de técnicas de inteligência artificial (uso de redes neurais artificiais e lógica nebulosa), há a vantagem na independência de modelos matemáticos, e na redução de custo computacional, porém como consequência aumenta o custo de sintonia dos algoritmos de controle (treinamento das redes neurais, ajuste de funções de pertinência e regras comportamentais) com uma exigência mais intensa de experimentação prática para o aprimoramento do grau de desempenho do controle [3].

As divergências de desempenho existentes entre as técnicas disponíveis para a geração de comportamentos reflexivos, motivam pesquisas em busca do aprimoramento destas estratégias de controle. A solução proposta para a geração de reflexos de estabilidade do Guará explora a mescla de controle convencional para geração da andadura e aplicação da lógica nebulosa para geração dos reflexos processados no níveis hierárquicos inferiores da arquitetura de controle.

No projeto do Guará as condições vigentes são as execuções de trajetórias retilíneas e curvilíneas, e as transposições de obstáculos do tipo saliências e depressões retangulares.

Para suprir informações ao controle de equilíbrio de robôs destinados a esta classe de tarefas, é comum o uso de integração de sensores como giroscópios, inclinômetros e acelerômetros.

Para a geração dos reflexos de estabilidade de equilíbrio do Guará o sensor escolhido foi um acelerômetro de dois eixos. Este acelerômetro fornece em sua saída a variação da aceleração na direção de seus eixos, como resultado de movimentação da plataforma nestas direções, e ainda, fornece a inclinação de mergulho ou rolagem da plataforma (acelerações decompostas da aceleração da gravidade).

Estas informações são suficientes para a detecção da tendência de desequilíbrio na realização das tarefas propostas, e disparo das regras comportamentais (reflexos) definidas pelos controladores nebulosos em cada perna. Esta metodologia não necessariamente exige o tratamento de integração do sinal do acelerômetro na geração dos reflexos, reduzindo a influência do *drift* sobre a solução adotada.

Como consequência desta escolha, obtém-se a redução de custo e complexidade para implementação da solução, se comparada ao sensoriamento que integra informações de diversos tipos de sensores.

Neste artigo, está descrita a arquitetura de controle implementada para o Guará, a obtenção do comportamento reflexivo, e os resultados de desempenho da solução proposta.

II. A ARQUITETURA DE CONTROLE PROPOSTA

Antes de iniciarmos a abordagem da estratégia de geração dos reflexos de estabilidade, é importante ressaltar características construtivas do Guará, bem como, características gerais da arquitetura de controle deste robô.

2.1 Aspectos construtivos do Guará

O Guará é um robô móvel quadrúpede, com quatro graus de liberdade em cada perna, sendo juntas rotacionais acionadas por moto-redutores de corrente contínua alimentados por 24 (Vcc), e com corrente máxima de 2 (A). Quanto às dimensões físicas, as pernas do Guará são constituídas de 2 *links* de 150 mm, as patas possuem área de 1000 mm² (10x100), e a plataforma tem dimensão de 1000 x 400 mm. O Guará só faz uso de sensores internos não-visuais, que são potenciômetros de realimentação de posição para cada junta das pernas, quatro micro-chaves para detecção de contato das patas com a superfície de navegação ou obstáculos, e um acelerômetro de dois eixos fixo ao centro de gravidade da plataforma. A Figura 1 ilustra a estrutura física do Guará.

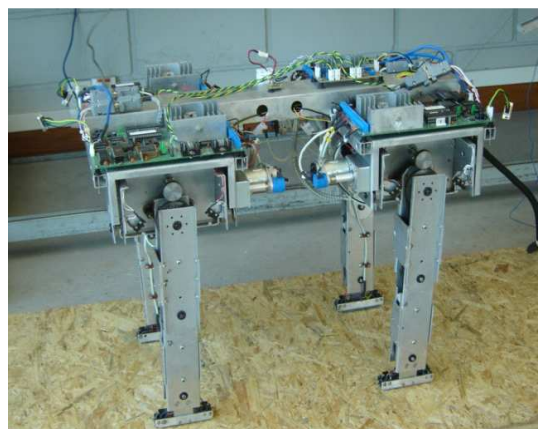


Fig. 1. Vista lateral do robô com hardware embarcado.

2.2 Arquitetura de controle do Guará.

O Guará faz uso de uma arquitetura hierárquica de controle com três camadas que foram denominadas de nível supervisor, nível coordenador e nível atuador de controle. No nível supervisor de controle é utilizado um *notebook* padrão Pentium (32 bits) com 1,6 GHz de relógio, no nível coordenador de controle são utilizados microcontroladores INTEL 80C196KB (16 bits) com frequência de relógio de 10 MHz, e no nível atuador de controle são utilizados microcontroladores MICROCHIP PIC16F877 (8 bits) também com 10 MHz de relógio.

No nível supervisor de controle é processada a geração das trajetórias a serem realizadas, a observação dos estados de equilíbrio e colisão das patas com obstáculos do plano de navegação, com respectivo disparo do comportamento para transposição de obstáculos. No nível coordenador de controle é realizada a distribuição das referências geradas no nível supervisor, para o sincronismo de movimento das pernas, o processamento dos reflexos de estabilidade, bem como, a realimentação ao nível supervisor de controle das posições atuais das juntas de cada perna, do estado de apoio do robô sobre a superfície de navegação e o estado de equilíbrio da plataforma obtido com o acelerômetro.

Entre os níveis supervisor e coordenador de controle é utilizada uma rede CAN (*Controller Area Network*) para a comunicação de dados. O uso da rede CAN foi adotado em função de suas características de alta velocidade de comunicação (1Mb/s), eficiente controle de erros e arquitetura multi-mestre com comunicação em broadcast, o que favorece o sincronismo em tempo real dos movimentos das pernas [5].

No nível hierárquico mais baixo, que é o nível atuador de controle, são processados os algoritmos de controle PID para acionamento das quatro juntas de cada perna, assim como é processado o estado de apoio das patas sobre a superfície de navegação com uso das chaves de toque.

III. CONTROLE DOS REFLEXOS DE ESTABILIDADE

Com o objetivo de aproveitar as melhores características das estratégias de controle, encontradas na pesquisa bibliográfica, a estratégia escolhida para geração dos comportamentos reflexivos de estabilidade do Guará, mescla o controle clássico com a aplicação da lógica nebulosa.

Nesta estratégia usa-se a modelagem cinemática para a geração da andadura (com balanço transversal) no traçado de trajetórias retilíneas e trajetórias curvilíneas, a observação e o controle da margem de estabilidade. As reações para manutenção da estabilidade de equilíbrio são definidas a partir da observação do estado de apoio do Guará, da observação dos limites cinemáticos de cada junta das pernas, e da leitura de um acelerômetro de dois eixos com o qual detecta-se a tendência de desequilíbrio por inclinação da plataforma (mergulho ou rolagem).

A partir da integração destas três informações são gerados com uso de controladores nebulosos os reflexos de estabilidade. A Figura 2 apresenta a estratégia utilizada no Guará para controle da estabilidade de equilíbrio.

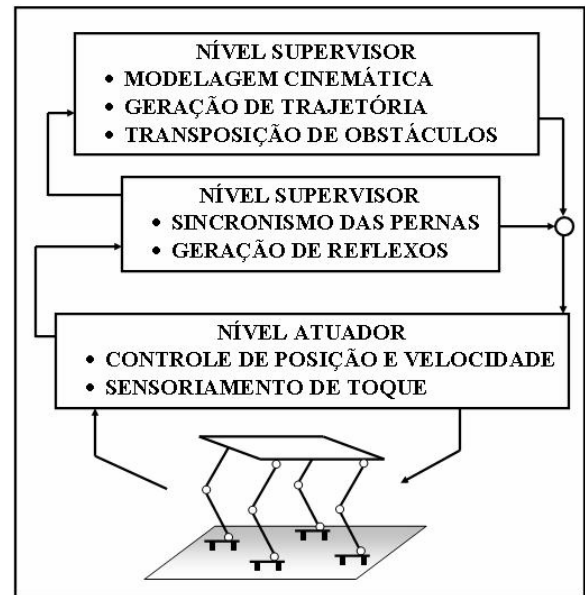


Fig. 2. Estratégia de controle da estabilidade de equilíbrio.

3.1 Uso de controladores nebulosos para geração dos reflexos do Guará.

Os reflexos de estabilidade implementados para o Guará são disparados a partir das informações providas pelo acelerômetro quanto à inclinação da plataforma. Estes reflexos são denominados avanço, recuo, balanço à esquerda, balanço à direita, agachar e levantar.

Cada um destes reflexos é obtido a partir dos seguintes movimentos das pernas:

- a) **avanço**, pernas inclinando e projetando o robô para frente;
- b) **recuo**, pernas inclinando e projetando o robô para trás;
- c) **balanço à esquerda**, pernas inclinando para a lateral esquerda do robô;
- d) **balanço à direita**, pernas inclinando para a lateral direita do robô;
- e) **encolher**, pernas flexionando e (as quatro ou duas a duas) abaixando o corpo do robô;
- f) **esticar**, pernas esticando e (as quatro ou duas a duas) levantando o corpo do robô.

Para os reflexos agachar e levantar pode-se acionar as quatro pernas ou duas delas, com isto obtém-se o mergulho frontal, o mergulho traseiro, a inclinação lateral direita e a inclinação lateral esquerda. A Figura 3 ilustra a postura do robô quando submetido a alguns dos reflexos implementados.

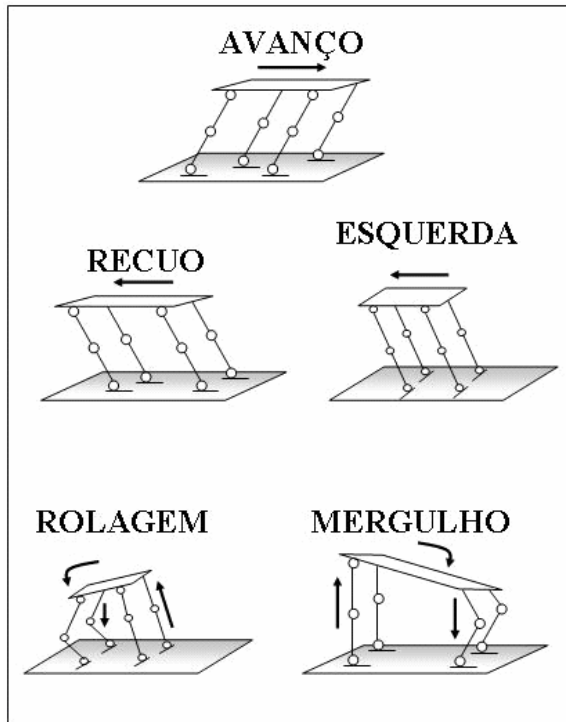


Fig. 3. Movimentos de reflexo à instabilidades de equilíbrio.

Cada um destes reflexos, ou uma composição deles, responde a distintas informações obtidas do acelerômetro. Esta relação entre a natureza do sinal obtido do acelerômetro e o reflexo disparado, está definida na Tabela I.

Tabela I
Relação estímulos – reflexos.

Estímulos	Reflexos
Suspensão dianteira / Inclinação em mergulho traseiro.	Encolher pernas dianteiras e esticar pernas traseiras e avançar.
Suspensão traseira / Inclinação em mergulho dianteiro.	Esticar pernas dianteiras e encolher pernas traseiras e recuar.
Tombamento lateral à esquerda / Inclinação de rolagem à esquerda.	Esticar lateral esquerda, encolher lateral direita e balanço à direita.
Tombamento lateral à direita / Inclinação de rolagem à direita.	Esticar lateral direita, encolher lateral esquerda e balanço à esquerda.

A Figuras 4 e 5 ilustram reações do Guará a instabilidades de equilíbrio tanto em mergulho quanto em rolagem. Pode-se observar que os reflexos executados estabelecem aumento da margem de estabilidade (menor distância entre a projeção do CG sobre o plano de locomoção e o polígono de apoio do robô) o que conseqüentemente define a retomada de uma postura equilibrada. Também é importante ressaltar a significativa diferença da influência sobre a margem de estabilidade (variação desta) do desequilíbrio em mergulho para desequilíbrio em rolagem.

Esta diferença de instabilidade é causada pela diferença entre as dimensões de largura e comprimento da plataforma do Guará.

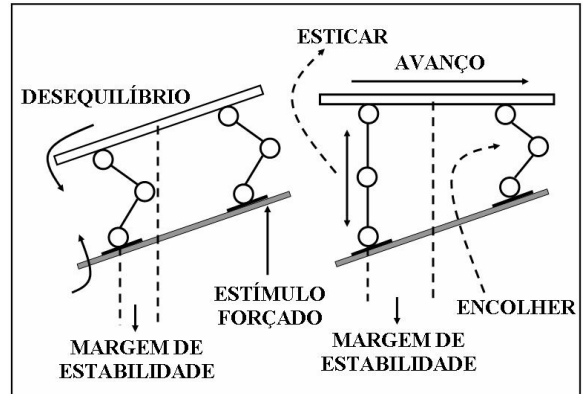


Fig. 4. Reflexo de estabilidade para recuperação de postura em mergulho.

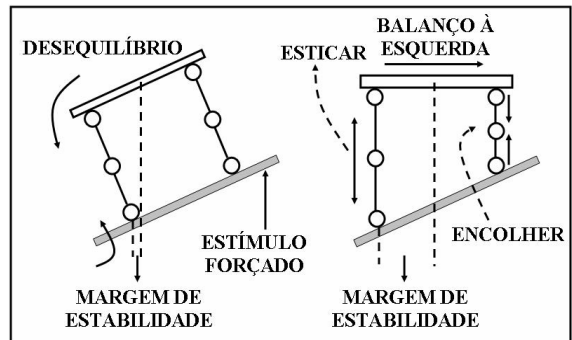


Fig. 5. Reflexo de estabilidade para recuperação de postura em rolagem.

A partir da definição dos reflexos a serem implementados, torna-se possível a descrição do projeto dos controladores nebulosos com os quais serão gerados estes reflexos.

Estão implementados quatro controladores nebulosos utilizados no Guará, sendo um para cada perna. Estes controladores recebem simultaneamente a informação gerada pelo acelerômetro, e por inferência em suas bases de regras (que são distintas por perna, para que se consiga compor uma reação coerente de postura) geram o sinal de controle responsável pelo movimento de reflexo das pernas.

O método de inferência utilizado é denominado Método de Mandani, também conhecido como método Máx-Min, por utilizar estes operadores nas funções de implicação e agregação das regras. Este método é indicado na bibliografia pesquisada como sendo muito utilizado em sistemas para os quais a quantificação do comportamento (especificação de parâmetros, descrição numérica das relações físicas) é restrita ou não desejável, principalmente, pelo custo computacional necessário ao processamento de relações matemáticas não-lineares [3].

A obtenção do sinal de controle (saída do processo de inferência) é obtida pelo uso do método do Centro de Área sobre os conjuntos nebulosos de saída.

A primeira etapa na elaboração do controlador nebuloso foi, a escolha dos conjuntos nebulosos de entrada e de saída, de modo a obter-se reflexos com a velocidade e suavidade compatível ao equilíbrio do robô.

Os conjuntos nebulosos de entrada estão denominados com os seguintes termos lingüísticos, negativo grande (NG), negativo pequeno (NP), zero (ZE), positivo pequeno (PP) e positivo grande (PG). Esta escolha permite que sejam filtrados valores de ruído gerados sobre o sinal do acelerômetro em função das oscilações de andadura do robô (filtro com o conjunto nebuloso zero), e ainda, consegue-se distinguir dois níveis de aceleração ou inclinação (positivo ou negativo pequeno e grande), para a definição de reflexos com intensidade adequada.

Como a resposta do acelerômetro é a variável de entrada do controlador nebuloso, obtida a partir de uma conversão analógica/digital, a escala das acelerações lidas a_x (na direção longitudinal da plataforma do robô) e a_y (na direção transversal da plataforma do robô) é expressa na faixa de 0 a 1023, pois está sendo utilizada uma conversão A/D de 10 bits.

Os termos lingüísticos usados para os conjuntos nebulosos de saída foram definidos como reação pequena (RP), reação média (RM) e reação grande (RG), em uma referência à intensidade do reflexo necessário em cada perna para correção da postura do Guará, e retomada do equilíbrio. Estes três níveis de reação permitem que os reflexos estabeleçam suavidade nos movimentos do robô, a depender do grau de instabilidade detectado pelo acelerômetro.

IV. IMPLEMENTAÇÃO E TESTES

O sincronismo de reflexos para a recuperação de postura do robô obtido a partir das bases de regras pode ser exemplificado para a instabilidade ilustrada na Figura 4. As regras disparadas nesta situação são:

Perna 0:

Se Mergulho é Negativo Grande e Rolagem é Zero então Encolher Grande e Avançar Grande.

Perna 1:

Se Mergulho é Negativo Grande e Rolagem é Zero então Esticar Grande e Avançar Grande.

Perna 2:

Se Mergulho é Negativo Grande e Rolagem é Zero então Encolher Grande e Avançar Grande.

Perna 3:

Se Mergulho é Negativo Grande e Rolagem é Zero então Esticar Grande e Avançar Grande.

As funções de pertinência adotadas, para cada conjunto nebuloso de entrada e saída, estão ilustradas na Figura 6.

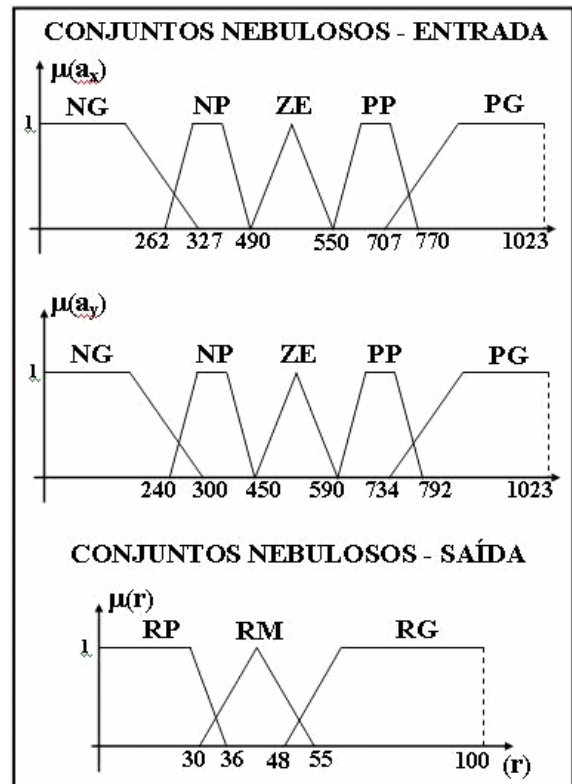


Fig. 6. Conjuntos nebulosos utilizados pelos controladores de cada perna para geração dos reflexos.

O teste realizado com o Guará na condição de instabilidades geradas por mergulho forçado está ilustrado nas Figuras 7 e 8. Na Figura 7 é imposto ao robô o mergulho forçado para trás (negativo), e pode-se observar que as regras disparadas no controlador nebuloso corrigem a postura do Guará esticando as pernas traseiras e flexionando as pernas dianteiras.

Já na Figura 8 é ilustrado o teste dos reflexos do Guará para a condição de mergulho forçado para frente (positivo). Nesta figura pode-se observar que a reação conjuga extensão das pernas dianteiras, flexão das pernas traseiras e recuo.

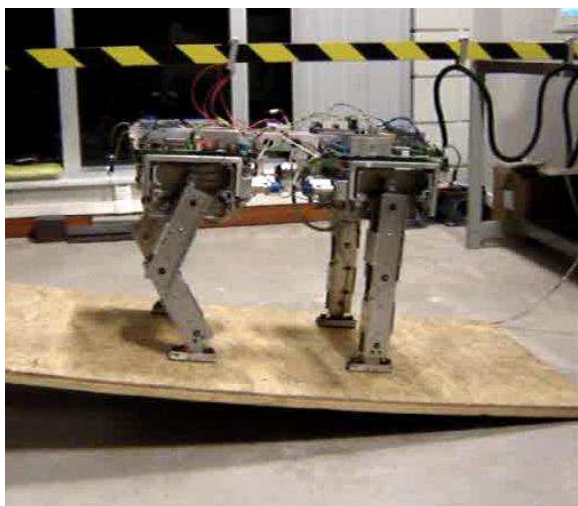


Fig. 7. Reação ao mergulho forçado para trás (mergulho negativo).

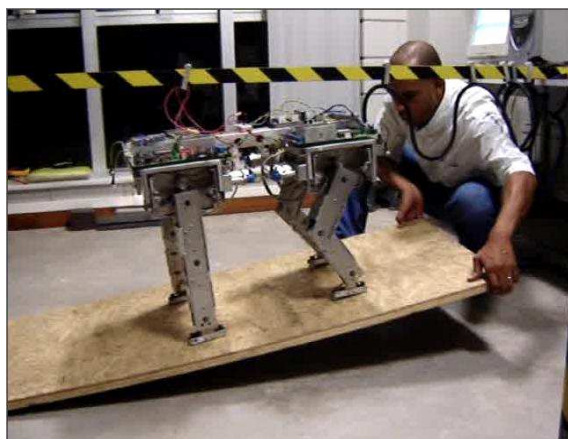


Fig. 8. Reação ao mergulho forçado para frente (mergulho positivo)

V. CONCLUSÕES

O uso de controladores nebulosos para a geração dos reflexos, fecha a malha de controle da estabilidade de equilíbrio, com a contribuição de tornar a solução proposta independente de análise numérica cinemática ou dinâmica, para obtenção dos comportamentos reflexivos. Esta contribuição complementa o sensoriamento com acelerômetro no sentido de reduzir custo computacional, e permite flexibilidade de adaptação das ações de controle às condições de instabilidade de equilíbrio, pelo ajuste dos conjuntos nebulosos.

A inclusão de reflexos de estabilidade, processados pelos níveis inferiores de controle, em uma arquitetura de controle hierárquica para um robô quadrúpede, se confirma neste projeto como uma estratégia válida. Esta estratégia integra ações de camadas de controle viabilizando a interação (reatividade) do robô com o ambiente de navegação, na ausência do processamento de um modelo deste ambiente. Esta solução também permite o controle de coordenação dos

movimentos para execução de uma andadura, a recuperação e postura após execução de reflexos e a possibilidade de planejamento de tarefas no nível supervisor de controle.

Como proposta de continuidade deste trabalho surgem a partir dos resultados obtidos dois desafios, a identificação de instabilidades causadas por impactos sobre o Guará e a geração de reflexos conjugada a execução da andadura. Na condição atual o Guará interrompe a andadura para execução dos reflexos e recuperação de postura, entretanto pretende-se obter a retomada de equilíbrio simultaneamente a execução da andadura, por correção das referências geradas e conseqüentemente com ganho na velocidade de execução de tarefas.

AGRADECIMENTO

Agradecemos à Automática Tecnologia S/A pelo apoio ao desenvolvimento deste projeto.

REFERÊNCIAS

- [1] Fukuoka, Y.; Kimura, H.; Cohen, A. H. Adaptive dynamic walking of a quadruped robot on irregular terrain based on biological concepts", *IJRR – International Journal of Robotics Research*, Sage Publications, v.22, n.3-4, p.187-202, USA, 2003.
- [2] Hu, H.; Gu, D. A multi-agent systems for cooperative quadruped walking robots, *Proceedings of IASTED International Conference Robotics and Applications*, Hawaii, p. 5, 2000.
- [3] Kulitz, H.R. Modelagem e controle fuzzy de robôs e veículos multi-articulados, Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2004.
- [4] Kurazume, R.; Hirose, S.; Yoneda, K. Feedforward and feedback dynamic trot gait control for a quadruped walking vehicle, *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, v.3, p. 3172-3180, Seul, Nov. 2001.
- [5] Lima, L.E.M; Amaral, P.F.S. Architecture to control a four-legged robot with the use of the CAN bus, *VI Induscon – Conferência Internacional de Aplicações Industriais*, em CDROM, Joinville, Set. 2004.
- [6] Murphy, R.R. Introduction to AI robotics, MIT Press, USA, 2000.
- [7] Peng, S.; Lam, C.P.; Cole, G.R. A biologically inspired four-legged walking robot, *Proceedings of IEEE International Conference of Robotics and Automation*, v.2, p. 2024 – 2030, Taiwan, Set. 2003.
- [8] Ridderström, C. Legged locomotion: balance, control and tools – from equation to action, Tese (Doutorado em Robótica), *Department of Machine Design Royal Institute of Technology*, Stockholm, 2003.

BIOGRAFIAS

Luis Eduardo M. Lima graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Espírito Santo - UFES (1992), mestrado e doutorado em Engenharia Elétrica pela UFES em (1995) e (2007) respectivamente. Professor efetivo do Centro Federal de Educação Tecnológica do Espírito Santo - CEFETES desde de (1996) fazendo parte do corpo docente das Coordenadorias de Eletrotécnica e Engenharia Elétrica. Atua na linha de pesquisa de robótica móvel com ênfase nos temas controle de locomoção e reflexos de estabilidade para robôs a rodas e quadrúpedes.

Paulo F.S. Amaral graduado em Engenharia Eletrônica pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica (1976), mestrado em Engenharia Eletrônica Sistemas Digitais e Analógicos pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (1979), doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade de São Paulo (1985) e pós-doutorado em robótica no Laboratoire de Robotique de Paris (UP VI). Atualmente é professor associado I da Universidade Federal do Espírito Santo. Tem experiência na área de Engenharia Eletrônica, com ênfase em Robótica, atuando principalmente nos seguintes temas: instrumentação digital, robôs industriais e móveis, arquitetura de controle para robôs, microcontroladores e controle de ensaio de qualidade.

Antônio B. Filho graduado em Engenharia Mecânica pela UFES (1976) e mestrado em Engenharia Mecânica pela UFSC (1980) e doutorado em Engenharia Elétrica pela UFES (2007). Atualmente, é professor de Engenharia Mecânica na UFES. Tem experiência na área de Engenharia Mecânica, com ênfase em Robótica Móvel a Pernas, CAD/CAM e Controle de Sistemas Mecânicos.