

COORDENAÇÃO SENSORIO-MOTORA PARA NAVEGAÇÃO DE ROBÔS BASEADO EM REDES DE NEURÔNIOS PULSANTES: RESULTADOS PRELIMINARES

BRUNO ANDRÉ SANTOS*, JEFERSON FIGUEIREDO CHAVES*, HENRIQUE ELIAS BORGES*, JOSÉ LUIZ ACEBAL*

**Laboratório de Sistemas Inteligentes - LSI
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET-MG
Av. Amazonas, 7675 - Nova Gameleira
Belo Horizonte, MG, Brasil*

Emails: bruno@lsi.cefetmg.br, jeferson@lsi.cefetmg.br, henrique@lsi.cefetmg.br, acebal@dppg.cefetmg.br

Abstract— This paper presents a sensory-motor coordination system for robot navigation by using spiking neurons networks as a implementation technique. One of the reasons for using this technique is the high level of biological plausibility. As the system behaves similarly to biological neurons, it exhibits a particular dynamic, making possible distinct behaviour patterns. Moreover, this technique shows high computational efficiency, allowing best performance of the necessary real-time operation. The technique validation was made through the development of a simulated environment for navigation, which consisted in a circuit where the robot had to avoid collision. The obtained results allowed the analysis of the robot's internal dynamics and behaviour, inspiring possible enhancements in future works.

Keywords— Spiking neurons, sensory-motor coordination, robot navigation.

Resumo— Este trabalho apresenta um sistema de coordenação sensorio-motora para navegação de robôs que utiliza redes de neurônios pulsantes como técnica de implementação. A justificativa parcial para o uso desta técnica é o alto grau de plausibilidade biológica. Ao mimetizar o comportamento dos neurônios biológicos, o sistema apresenta uma dinâmica particular, possibilitando padrões de comportamentos variados. A justificativa adicional se deve à necessidade de operação em tempo real, pois a técnica apresenta baixo custo computacional. Para validação do mecanismo foi construída uma aplicação, em um ambiente simulado, onde o robô deve navegar em um circuito evitando a colisão com os limites da pista. Os resultados obtidos nos experimentos permitiram uma análise do comportamento, da dinâmica interna e indicaram aperfeiçoamentos e trabalhos futuros.

Palavras-chave— Neurônios pulsantes, coordenação sensorio-motora, navegação de robôs.

1 Introdução

O problema de navegação de robôs tem despertado interesse da comunidade científica por ser um problema complexo. Os ambientes nos quais o robô deve operar são dinâmicos e com alto grau de imprevisibilidade o que implica a necessidade de um mecanismo de coordenação sensorio-motora com alto grau de adaptabilidade. Uma tendência nesta área de pesquisa é a busca de técnicas para implementação deste mecanismo que possuam plausibilidade biológica.

(Reeve and Hallam, 2005) realizaram um análise de modelos de redes neurais adequadas para a coordenação motora de robôs e concluíram que o realismo biológico é desejável mas conflita com o custo computacional. Através desta análise, eles concluíram que modelos de neurônios com dinâmica interna possibilitam um repertório amplo com um menor número de neurônios em relação as outras implementações que utilizam modelos mais tradicionais, como o de (McCulloch and Pitts, 1943) e modelos de neurônios sigmoidais.

(Floreano et al., 2006) trabalharam na construção de um sistema de coordenação para navegação de robôs autônomos. O sistema proposto é composto por neurônios pulsantes, porém utilizando um modelo de neurônio sem dinâmica pró-

pria. Além disso, o circuito de neurônios foi obtido através do uso da técnica de algoritmos genéticos, onde cada gene representa a presença ou ausência de uma ligação sináptica.

(Florian, 2006) também propôs um mecanismo de coordenação baseado em redes de neurônios pulsantes capaz de apresentar um comportamento cognitivo minimalista. Porém, o agente simulado realiza uma tarefa diferente de desviar de obstáculos. O agente em questão possui um reflexo de busca-puxa-libera. Em virtude do reflexo embutido no agente, ele interage com os objetos existentes no mundo artificial e, mediante estas interações, apresenta uma pequena evolução no comportamento, caracterizada pela diferenciação do tamanho relativo dos objetos com que interage e pela escolha, em função do contexto, de um entre três sub-comportamentos possíveis.

A proposta deste trabalho é o uso de redes de neurônios pulsantes como técnica de implementação do mecanismo de coordenação sensorio-motora. Estes modelos matemáticos de neurônios apresentam um boa fidelidade com as medições de neurônios *in vitro* e *in vivo*, e por isso descrevem de maneira mais fiel a atividade do cérebro (Gerstner and Kistler, 2002).

Há uma série de modelos pertencentes a esta classe, desde os compartimentalizados (modelos

que tratam de cada uma das estruturas do neurônio), até os que tratam o neurônio como uma estrutura homogênea. Para uma revisão dos modelos de neurônios pulsantes veja (Gerstner and Kistler, 2002), (Bohte, 2003), (de Berredo, 2005), (Izhikevich, 2007). Visto que, neste trabalho, se deseja um sistema que opera em tempo real, é fundamental a escolha de um modelo que apresente um nível tão alto quanto possível de plausibilidade biológica com um baixo custo computacional. Em vista disso, e baseado nas comparações feitas por (Izhikevich, 2004), foi escolhido o modelo de Izhikevich para implementação do mecanismo de coordenação sensório-motora.

Um visão geral a respeito do modelo de Izhikevich será apresentado na seção 2. A seguir, na seção 3, é apresentada uma proposta inicial de implementação do mecanismo de coordenação sensório-motora para navegação de robôs que utiliza o modelo de Izhikevich. Na seção 4 são apresentados os experimentos que validam o mecanismo e os resultados obtidos. Na última seção são apresentadas as conclusões e propostas de trabalhos futuros.

2 Neurônios pulsantes

(Izhikevich, 2003) desenvolveu um modelo de neurônio que tem como mérito apresentar várias características de neurônios reais aliado a um baixo custo computacional.

Além disto, redes que utilizam este modelo de neurônio são capazes de reproduzir uma ampla gama de fenômenos, *e.g.*, plasticidade neuronal e auto-organização de grupos neuronais "síncronos" (Izhikevich et al., 2004).

O modelo em questão, obtido com a redução de ordem de modelos da família de (Hodgkin and Huxley, 1952) através de metodologias de bifurcação, é representado por um sistema de equações diferenciais da seguinte forma:

$$\frac{dv}{dt} = 0.04v^2 + 5v + 140 - u + I, \quad (1)$$

$$\frac{du}{dt} = a(bv - u), \quad (2)$$

com um *reset* auxiliar depois do pulso dado por

$$\text{se } v = +30\text{mV, então } \begin{cases} v \leftarrow c, \\ u \leftarrow u + d, \end{cases} \quad (3)$$

onde:

- A variável v representa o potencial de membrana do neurônio, que tem como valor típico -65mV no repouso;
- u contabiliza a ativação da corrente iônica do canal de K^+ e a inativação da corrente so canal de Na^+ , além de prover uma realimentação negativa para v ;

- O parâmetro a determina a escala de tempo da variável u ;
- O parâmetro b descreve a sensibilidade da variável u , além de influenciar na bifurcação juntamente com a variável I ;
- Os parâmetros c e d tratam, respectivamente, dos valores impostos a v e u após um pulso.
- O parâmetro I é o estímulo de corrente que o neurônio recebe em decorrência da atividade dos seus neurônios pré-sinápticos.

É relevante destacar que o conjunto de parâmetros (a, b, c, d) para um dado neurônio são constantes. Este conjunto estabelece qual tipo de neurônio deseja-se simular. Através desta reparametrização é possível simular vários padrões de disparo de um neurônio real (Izhikevich, 2004).

Uma descrição básica da operação deste modelo pode ser feita com o auxílio da Figura 1 que mostra a evolução do neurônio no espaço de estados. Porém, antes disto, é preciso estabelecer algumas definições: *v-nullcline* e *u-nullcline* são as curvas que contém todos os estados quando $dv/dt=0$ e $du/dt=0$, respectivamente.

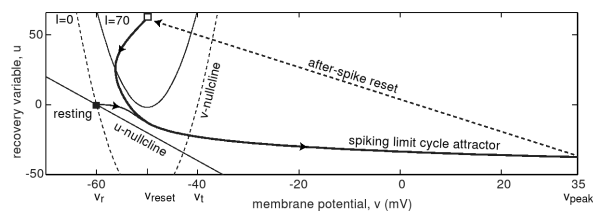


Figura 1:

Fonte: (Izhikevich, 2007).

Observando a Figura 1 pode-se ver que quando $I=0$ a nuliclinal de v , curva tracejada, tem dois pontos em comum com a nuliclinal de u , sendo um deles um ponto de equilíbrio estável, denotado por *resting*. Porém, quando o neurônio recebe algum estímulo via variável I , o modelo matemático pode sofrer uma bifurcação, *i.e.*, o espaço de estados mudará qualitativamente. Isso acontece quando $I=70$, o ponto de equilíbrio estável desaparece e surge uma órbita periódica, denotada por *spiking limit cycle attractor*. Atingindo o valor máximo de v é feito o *after-spike reset*, que impõe para v e u os valores c e d , respectivamente. O neurônio permanece então pulsando enquanto o estímulo (*i.e.*, o valor de I) for suficientemente grande.

A despeito deste modelo apresentar várias propriedades, *i.e.*, vários modos de operação, neste trabalho foram utilizados neurônios do tipo regular spiking e integradores. Em vista disto, será apresentado o *modus operandi* destes dois tipos somente.

O neurônio integrador pode ser obtido ajustando os parâmetros do sistema de equações para

(0.02, 0.1, -55, 6). Este neurônio realiza uma integração espaço-temporal dos estímulos recebidos. Estes estímulos provocam uma variação no potencial de membrana do integrador, se estes forem suficientemente próximos e dependendo da tensão prévia do neurônio, ele pode disparar um potencial de ação caso seja atingido um limiar, como mostra a Figura 2 - A.

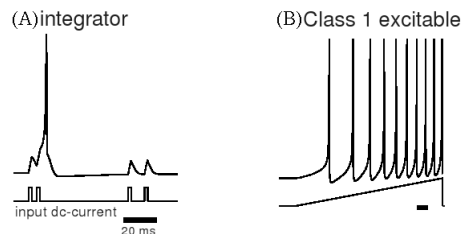


Figura 2:
Fonte: (Izhikevich, 2004).

O regular spiking pode ser obtido ajustando os parâmetros do sistema de equações para (0.02, 0.2, -65, 6). Este neurônio, na ausência de corrente, pulsa em uma frequência pré-estabelecida. A medida que a corrente contínua de entrada aumenta, a frequência de disparo também aumenta de maneira não linear. Desta maneira, este modelo opera de acordo com a classe 1 de excitação (*Class 1 excitable*) proposta por Hodgkin (1948). A característica que determina se um neurônio pertence ou não a esta classe é a capacidade de disparar em baixas frequências quando a excitação é fraca. Neurônios dessa classe codificam a corrente de excitação na frequência de disparo (Figura 2 - B).

3 Mecanismo de coordenação sensório-motora

Nesta seção é discutida a proposta de implementação do mecanismo de coordenação sensório-motora para navegação de robôs baseado em uma rede de neurônios que utiliza o modelo de Izhikevich. Como o mecanismo proposto é dependente do domínio de aplicação e do hardware utilizado, inicialmente será descrito o problema de navegação em questão e o robô utilizado.

O problema de navegação em questão consiste em um circuito que pode apresentar diferentes traçados alguns estreitamentos e obstáculos na pista. Neste circuito, o robô deverá apresentar um comportamento de navegação evitando a colisão com os limites da pista. Além disso, deverá se ajustar de maneira que, quanto mais próximo dos limites menor deverá ser sua velocidade.

Para se projetar o mecanismo de coordenação sensório-motora que atenda ao problema apresentado, deve-se definir qual robô será utilizado na navegação. Esta definição implica na estratégia de implementação do mecanismo, ou seja, a exis-

tência ou não de alguns sensores e motores determina como a coordenação será realizada e quanto rico será o comportamento exibido pelo robô.

Neste trabalho, foi utilizado o robô Pioneer, num ambiente simulado, com sua superfície sensorial composta de quatro sensores do tipo sonar, sendo dois laterais e dois frontais (Figura 3). Já a superfície motora foi composta de um motor que recebe estímulos de rotação e translação. Este conjunto mínimo de sensores e motor, foi suficiente para se obter o comportamento desejado.

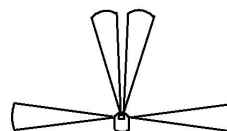


Figura 3: Robô com seus sonares frontais e laterais.

Os quatro sonares do robô compõem seu sistema sensorial. Este sistema tem a função de realizar a transdução dos estímulos do ambiente para valores de corrente que serão fornecidos aos respectivos elementos S_L (sensor lateral) e S_F (sensor frontal) que estão na superfície sensorial do mecanismo de coordenação (Figura 4). O motor do robô, responsável por realizar a translação e rotação, compõe o sistema motor. Este sistema também realiza a transdução, porém no sentido inverso do sistema sensorial. Os sinais de corrente internos, advindos dos elementos M_T (motor de translação) e M_R (motor de rotação), são convertidos para valores que serão enviados ao motor propriamente dito.

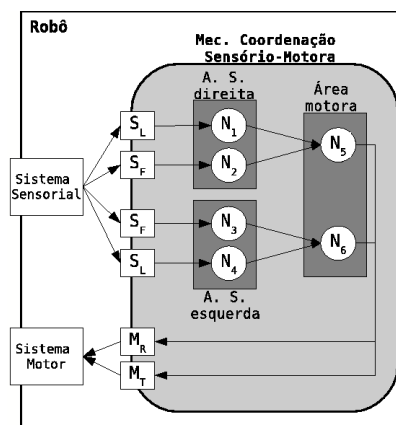


Figura 4: Esquema do mecanismo de coordenação sensório-motora.

Como componentes internos do mecanismo de coordenação sensório-motora, foram propostos dois conjuntos de neurônios. O primeiro recebe estímulos dos sonares por meio dos elementos que estão na superfície sensorial do mecanismo de coordenação. Já o segundo conjunto de neurônio estimula o motor, via os elementos M_T e M_R , com

sinais que são interpretados como ângulo de rotação e velocidade de translação.

Os dois conjuntos de neurônios sensoriais foram agrupados de acordo com a localização do sonar pelo qual é estimulado. Os neurônios N_1 e N_2 recebem estímulos dos sonares que se encontram do lado direito do robô e os neurônios N_3 e N_4 recebem estímulos dos sonares do lado esquerdo. Por este motivo, o primeiro conjunto é denominado área sensora da direita e o segundo área sensora da esquerda.

O conjunto de neurônios motores formam a área motora e é composto por dois neurônios, N_5 e N_6 . Cada um destes possui um par neurônios pré-sinápticos pertencentes a uma das áreas sensoriais. Este agrupamento em áreas funcionais e as funções do sistemas sensoriais e motor advém da analogia feita com o sistemas nervoso e periférico dos seres humanos.

Os neurônios existentes nas áreas sensoriais foram implementados de acordo com o modelo *Regular Spiking* de Izhikevich. A frequência de disparos destes neurônios diminui a medida que o robô se aproxima dos limites de pista e aumenta caso contrário. Os neurônios da área motora são do tipo *Integrator* e foram implementados para integrar os disparos dos neurônios de cada uma regiões sensoras com as quais fazem sinapses. Assim, quando o robô se aproxima dos limites da pista pelo lado direito, por exemplo, o neurônio motor N_5 pulsa em uma frequência inferior ao neurônio N_6 .

O elemento M_R , responsável por enviar estímulos de rotação ao *sistema motor*, opera realizando a diferenciação entre a frequência de disparos dos neurônios motores N_5 e N_6 . Já o elemento M_T , que envia estímulos de translação ao *sistema motor*, realiza a integração dos disparos de N_5 e N_6 . Quanto maior o estímulo enviado por este elemento ao sistema motor, maior será a velocidade de translação do robô.

Como os elementos M_R e M_T operam em função da frequência dos seus pré-sinápticos, foi estabelecida uma janela de tempo de 100ms. Assim, dado um estímulo no sistema sensorial, somente após alguns instantes que o sistema motor modifica seu estado influenciado por aquele estímulo do sistema sensorial. Considerando que o passo de tempo de cada neurônio é de 1ms e que todos neurônios têm uma lei de evolução que contempla um tempo refratário, *i.e.*, período no qual o neurônio não é capaz de pulsar, são necessárias 100 iterações na dinâmica dos neurônios para se obter uma taxa razoável de disparo. Esta implementação está em conformidade com a dinâmica do sistema nervoso dos organismos vivos pois nestes o tempo de resposta aos estímulos externos ocorre após algumas centenas de milissegundos da perturbação do sistema.

4 Experimento e análise dos resultados

Para se realizar o experimento foi utilizado o ambiente de simulação Player/Stage ((Gerkey et al., 2003)) e o circuito apresentado na Figura 5. As posições iniciais e finais do robô foram definidas no canto inferior esquerdo do circuito. Durante o deslocamento do robô foram marcados retângulos para indicar sua posição. Como estes retângulos são marcados, pelo simulador, em intervalos de tempo constantes, eles também podem ser utilizados para se observar a velocidade. Para uma análise da dinâmica interna, foi registrado durante todo percurso o estado dos sensores, dos neurônios e do motor.

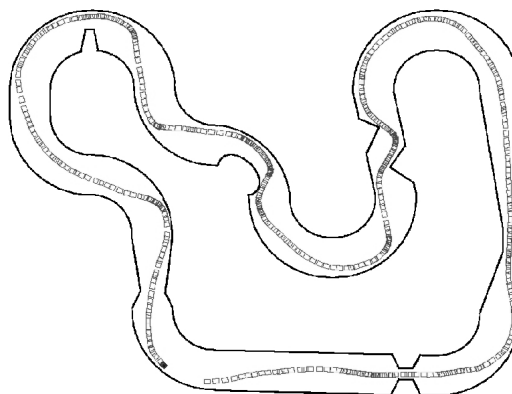


Figura 5: Circuito com o trajeto realizado pelo robô.

Analisando o comportamento do robô por meio dos retângulos marcados na pista pode se fazer algumas considerações. No início do deslocamento, na região inferior do circuito, o robô buscou se posicionar no centro da pista. Este comportamento era esperado pois o robô procura equilibrar as frequências dos sonares da região esquerda com os da região direita. Em outros pontos do circuito pode ser constatado que o robô quase colidiu com os limites da pista, principalmente quando houve estreitamentos. Isso ocorreu pois o tempo que o robô leva para ajustar sua posição equilibrando as frequências dos sonares é relativamente grande quando comparado com sua velocidade. Na curva existente no canto superior esquerdo, por exemplo, o robô realiza a rotação tentando se posicionar no centro da pista, porém, como a curva é fechada sua rotação não é suficiente para mantê-lo no centro.

Com relação a velocidade, pode ser observado, pela proximidade dos retângulo, que há um ajuste da mesma a medida que aumenta a proximidade dos limites da pista. Este ajuste não ocorre de maneira linear e é mais intenso em pontos bem próximos dos limites. Para uma análise mais detalhada da velocidade, do comportamento e da dinâmica interna do robô, foi tomada apenas a região inferior do circuito, mostrada na Figura 6.

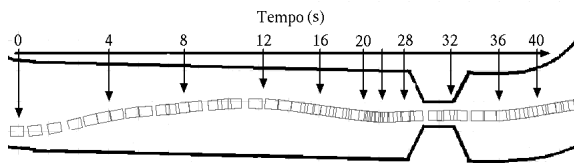


Figura 6: Região inferior do circuito.

Nesta figura há uma marcação indicando o instante de tempo, em segundos, que o robô se encontrava nas posições indicadas pelas setas. Para uma análise da velocidade e do estado dos sensores neste percurso, foram construídos os gráficos apresentados na Figura 7.

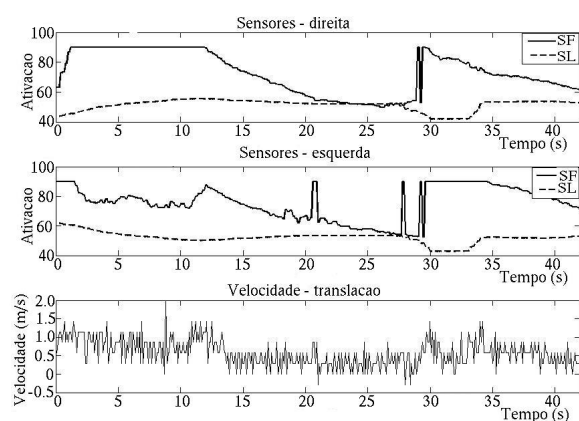


Figura 7: Ativação dos sensores e velocidade.

Os valores dos elementos S_L e S_F apresentados nos gráficos correspondentes aos sensores da direita e da esquerda, variam entre 40, quando há algum objeto muito próximo, e 90, quando não detecta nenhum obstáculo. Assim, pode ser observado no gráfico do sensor da direita que no intervalo de tempo entre 0 e 8 segundos, a medida que o robô se aproxima do centro da pista, o sonar lateral direito atinge um valor próximo de 53 e se mantém estável até aproximadamente aos 28 segundos, onde se inicia o estreitamento. Durante o estreitamento, aproximadamente no intervalo de 28 a 34 segundos, os sonares frontais possuem um valor alto pois os limites da pista se encontram somente nas laterais. Após o estreitamento os sonares frontais iniciam a detecção da curva existente no final do trecho, por isso seus valores diminuem. Os dois picos existentes no sonar frontal da esquerda, um por volta de 21 segundos e outro por volta de 28 segundos, ocorreram pois durante a rotação do robô o sonar passou entre os limites do estreitamento.

A velocidade do robô oscila entre os menores valores no intervalo entre 21 e 28 segundos. Isso ocorre pois este intervalo possui a menor média entre os valores dos sonares. Durante o estreitamento a velocidade aumenta pois os sonares frontais possuem um valor alto. Esta velocidade volta

a diminuir no final do percurso, 35 a 40 segundos, quando o robô se aproxima da curva. A maior velocidade média ocorre por volta dos 12 segundos, quando o robô se encontra no centro da pista e os sonares frontais ainda não detectaram o estreitamento.

A Figura 7 apresenta o gráfico com a dinâmica dos elementos que se encontram nas superfícies sensorial e motora do mecanismo de coordenação. Quanto a dinâmica dos neurônios, seria inviável apresentar um gráfico para todo o trecho da Figura 6 pois ocorrem 40000 interações em 40 segundos. Por isso, foi escolhido o intervalo pequeno de 20.02 a 20.08 segundos para apresentar a dinâmica dos neurônios N_1 , N_2 e N_5 .

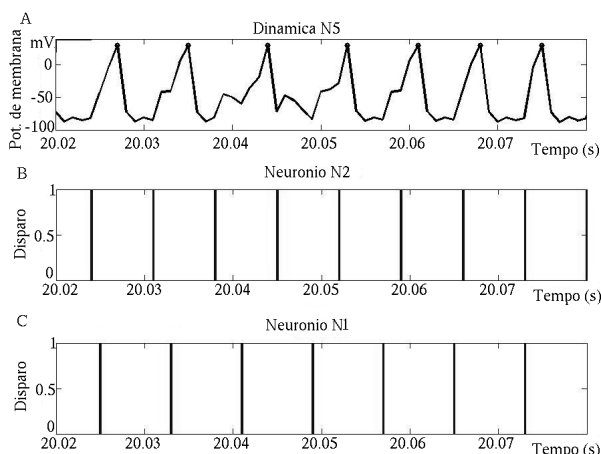


Figura 8: Neurônios.

No intervalo de tempo apresentado os neurônios N_1 e N_2 pulsam em uma frequência constante. Como pode ser observado no Gráfico A da Figura 7, aproximadamente em 20 segundos o valor do sonar frontal é maior do que o lateral. Por este motivo a frequência de N_2 é ligeiramente maior do que N_1 , o que pode ser constatado nos Gráficos B e C da Figura 8.

O gráfico A da Figura 8 apresenta a dinâmica do neurônio N_5 . Considerando a região do gráfico A em torno do instante 20.04 segundos, tem-se que o potencial de membrana de N_5 estava baixo (aproximadamente, -70 mV) quando o neurônio recebeu um pulso de seu pré-sináptico N_2 . Este pulso elevou o potencial de membrana (aproximadamente, -45 mV), porém ainda não foi suficiente para provocar um disparo. No instante 20.04 segundos, como o neurônio N_5 não recebeu outro pulso, seu potencial estava decaindo. Isso continuou ocorrendo até logo após 20.04 segundos quando o neurônio N_1 disparou e elevou o potencial N_5 até o limiar de disparo.

5 Conclusões

Este trabalho apresentou os resultados preliminares da implementação de um mecanismo de coordenação.

denação sensório-motora para navegação que utiliza redes de neurônios pulsantes. Apesar do mecanismo implementado ser minimalista obteve-se êxito na solução do problema de navegação proposto.

O sistema apresentado é flexível o suficiente para permitir a incorporação futura de mecanismos que melhorem a adaptabilidade. Um destes é mecanismo é o de plasticidade, *e.g.*, STDP (Song et al., 2000), onde a rede, por meio de sua operação, fortalece ligações sinápticas e por consequência seus padrões de disparo. Assim, espera-se que uma vez que o robô já tenha percorrido pelo menos uma vez o ambiente, seu comportamento melhore em função de sua própria experiência.

Na implementação do mecanismo foi utilizado um conjunto mínimo de sensores e motores no robô, o que foi suficiente para se obter o comportamento desejado. Caso sejam utilizados mais elementos nas superfícies sensoriais e motoras, haverá uma maior possibilidade de coordenações internas o que implica em um comportamento mais elaborado. Assim, para o aperfeiçoamento do mecanismo, sugere-se adição de novos sonares e sensores do tipo laser para que se tenha uma maior possibilidade de correlações e uma redundância dos estímulos sensoriais.

Este trabalho faz parte de um projeto de pesquisa maior onde se pretende construir robôs cognitivos emocionais. Alguns trabalhos neste sentido já foram desenvolvidos ((Santos, 2003), (Pires, 2005), (de Assis Campos, 2006)), porém o foco não era a técnica de implementação dos blocos funcionais de um agente mas sim processos como o de percepção-em-ação e o cognitivo-emocional. Os resultados obtidos até o momento demonstram a viabilidade de se utilizar este tipo de técnica na implementação desses processos.

Referências

- Bohte, S. (2003). *Spiking Neural Networks*, PhD thesis, Academieggebouw of Leiden University.
- de Assis Campos, L. M. (2006). *Modelagem do processo cognitivo-emocional de um organismo artificial numa perspectiva dinâmico-interacionista*, Master's thesis, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais.
- de Berredo, R. C. (2005). *A review of spiking neuron models and applications*, Master's thesis, Universidade Federal de Minas Gerais.
- Floreano, D., Epars, Y., Zufferey, J. and Mattiussi, C. (2006). Evolution of Spiking Neural Circuits in Autonomous Mobile Robots, *International Journal of Intelligent Systems* **21**(9): 1005–1024.
- Florian, R. V. (2006). Spiking neural controllers for pushing objects around., in S. N. et al. (ed.), *Lecture Notes in Artificial Intelligence*, number 4095, Springer-Verlag, Berlin, pp. 570–581.
- Gerkey, B. P., T.Vaughan, R. and Howard, A. (2003). The player/stage project, *Proceedings of the International Conference on Advanced Robotics (ICAR 2003)*, Coimbra, Portugal, pp. 317–323.
- Gerstner, W. and Kistler, W. (2002). *Spiking Neuron Models: Single Neurons, Populations, Plasticity*, Cambridge University Press.
- Hodgkin, A. and Huxley, A. (1952). A quantitative description of ion currents and its applications to conduction and excitation in nerve membranes, *J. Physiol.(London)* **117**: 500–544.
- Izhikevich, E. (2003). Simple model of spiking neurons, *IEEE Transactions on Neural Networks* **14**(6): 1569–1572.
- Izhikevich, E. (2004). Which Model to Use for Cortical Spiking Neurons?, *IEEE Transactions on Neural Networks* **15**(5): 1063.
- Izhikevich, E. (2007). *Dynamical Systems in Neuroscience: The Geometry of Excitability and Bursting*, The MIT Press.
- Izhikevich, E., Gally, J. and Edelman, G. (2004). Spike-timing Dynamics of Neuronal Groups, *Cerebral Cortex* **14**: 933–944.
- McCulloch, W. and Pitts, W. (1943). A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity, *Bulletin of Mathematical Biology* **5**(4): 115–133.
- Pires, A. G. (2005). *Modelagem de um mecanismo de percepção-em-ação para os agentes de software cognitivos situados e extensão da arquitetura artificial*, Master's thesis, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais.
- Reeve, R. and Hallam, J. (2005). An analysis of neural models for walking control, *Neural Networks, IEEE Transactions on* **16**(3): 733–742.
- Santos, B. A. (2003). *Aspectos conceituais e arquiteturas para a criação de linhagens de agentes de software cognitivos e situados*, Master's thesis, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais.
- Song, S., Miller, K. and Abbott, L. (2000). Competitive Hebbian learning through spike-timing-dependent synaptic plasticity, *Nature Neuroscience* **3**: 919–926.