

Raciocínio Adaptativo de Base Emocional em Agentes Inteligentes

Luís Morgado^{1,2}, Graça Gaspar²

¹Instituto Superior de Engenharia de Lisboa
R. Conselheiro Emídio Navarro, 1, 1950-062 Lisboa

lm@isel.ipl.pt

²Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa
Campo Grande, 1749-016 Lisboa

gg@di.fc.ul.pt

O projecto e implementação de agentes inteligentes capazes de comportamento eficaz em ambientes reais, onde a incerteza e o dinamismo são generalizados e onde tempo e recursos são limitados, levanta problemas importantes, relacionados quer com a capacidade adaptativa dos agentes, quer com a complexidade computacional dos processos cognitivos envolvidos, em particular de processos de raciocínio e planeamento. Neste artigo são apresentados mecanismos de base emocional que tornam possível a adaptação a ambientes dinâmicos e um uso controlado de recursos, através da focagem dos processos cognitivos. No sentido de avaliar a abordagem proposta são apresentados resultados experimentais em comparação com resultados de outras abordagens de referência.

Introdução

A investigação na área das neurociências e da psicologia tem vindo a indicar claramente que as emoções desempenham um papel central no que é considerado como comportamento inteligente. Por exemplo, resultados experimentais apresentados por Damásio [5] indicam que uma redução selectiva da emoção é, pelo menos, tão prejudicial para a racionalidade como a emoção excessiva. Por sua vez, Gray *et al.* [8] apresentaram evidências experimentais de interações fortes entre emoção e cognição, com perda de especialização funcional, indicando que emoção e cognição podem estar intrinsecamente ligadas. Por outro lado, a importância dos fenómenos emocionais na aprendizagem e comportamento adaptativo está amplamente documentada (e.g. [13]).

Esta evidência de um papel abrangente dos fenómenos emocionais na actividade cognitiva tem estimulado o desenvolvimento de modelos cognitivos que incorporam aspectos emocionais (e.g. [2; 10]). Mesmo no âmbito da investigação em teoria da decisão clássica os fenómenos emocionais têm ganho relevância, tendo começado a ser incorporados em alguns modelos e teorias como é o caso da teoria afectiva da decisão [18], bem como de outras propostas que incorporam a emoção como um aspecto integrante dos processos de deliberação e raciocínio perante limitação de recursos (e.g. [9; 6]).

No entanto, a integração de fenómenos emocionais com processos deliberativos no contexto da concepção de agentes inteligentes levanta problemas importantes, nomeadamente: (i) a relação estreita e multifacetada entre fenómenos emocionais e cognitivos, a qual é dificilmente compatível com o adicionar de aspectos emocionais apenas como mais um subsistema [1]; (ii) a natureza dinâmica e contínua dos fenómenos emocionais, a qual é fortemente restringida pela noção clássica de um estado emocional discreto, bem como pela sua descrição sob a forma de etiquetas verbais [16].

Na nossa perspectiva, para abordar estes problemas é necessário ir para além da distinção clássica entre emoção e cognição e reconhecer a sua relação simbiótica. Isto é, a emoção é um resultado da actividade cognitiva e actividade cognitiva é modulada pela emoção, num processo dinâmico que se desenrola ao longo do tempo, de acordo com a interacção entre agente e ambiente.

O nosso trabalho explora esta perspectiva, tendo sido desenvolvido um modelo e uma arquitectura de agente que concretizam esta relação simbiótica entre emoção e cognição como duas facetas integradas do comportamento inteligente. Dois aspectos principais estão envolvidos nessa relação entre emoção e cognição: (i) a regulação da actividade cognitiva do agente de acordo com as condições de concretização actuais; (ii) a modulação das alterações na estrutura cognitiva do agente devido a experiências passadas (i.e. a formação de memórias emocionais [3]).

Neste artigo iremos focar o primeiro aspecto, sendo apresentados mecanismos que tornam possível a adaptação a ambientes dinâmicos e um uso controlado de recursos, através da focagem dos processos

cognitivos em duas perspectivas base: uma perspectiva espacial que se refere ao espaço de elementos sobre os quais o processamento pode ocorrer; e uma perspectiva temporal que se refere ao tempo disponível para processamento cognitivo. O artigo encontra-se organizado da seguinte forma: nas secções 2 e 3 é apresentada uma breve perspectiva dos modelos de emoção e de agente que servem de suporte à abordagem proposta; na secção 4 é discutida a regulação da actividade cognitiva de um agente a partir de mecanismos de base emocional; na secção 5 são apresentados resultados experimentais resultantes da concretização da abordagem proposta no contexto do domínio *Tileworld*, sendo feita a comparação com resultados de referência.

O Modelo Emocional de Fluxo

Na abordagem proposta é adoptada uma perspectiva onde os fenómenos emocionais resultam das dinâmicas associadas à actividade cognitiva de um agente. Esta perspectiva é consonante com modelos de emoção propostos por outros autores (e.g. [4, 16]). No entanto, um aspecto distintivo do modelo proposto é o facto dessas dinâmicas serem baseadas em dinâmicas de troca de energia entre um agente e o ambiente. Isto é possível pela modelação da noção de agente como uma estrutura dissipadora [12].

Ao adoptar esta perspectiva, a relação agente-ambiente é determinada pela relação entre o potencial interno do agente, o seu *potencial de concretização*, e a condutância de acoplamento entre agente e ambiente, a *condutância de concretização*. O potencial de concretização representa o potencial de mudança que o agente é capaz de produzir no ambiente no sentido de concretizar o que pretende. A condutância de concretização representa o grau de condutividade ou de resistência a essa mudança. No contexto de uma estrutura dissipadora o potencial de concretização pode ser visto como uma força (P) e a condutância de concretização como uma propriedade de transporte (C). As dinâmicas comportamentais de um agente podem assim ser caracterizadas como um fluxo, designado *fluxo de concretização* (F), que resulta da aplicação de um potencial P sobre uma condutância C . As forças comportamentais que resultam desta relação dinâmica entre potencial de concretização e condutância de concretização, expressas sob a forma de fluxos de energia, geram dinâmicas comportamentais que estão subjacentes à actividade cognitiva de um agente, levando à mudança do seu estado emocional. Essas forças são descritas por um função vectorial DE , designada *disposição emocional*, definida como:

$$DE \equiv (\delta P, \delta F) \text{ onde } \delta P = \frac{dP}{dt} \text{ e } \delta F = \frac{dF}{dt} \quad (1)$$

Tal como se pode observar na figura 1.a, num determinado instante $t = \tau$ um vector de disposição emocional é caracterizado por uma qualidade, definida pela sua orientação (o seu argumento) e uma intensidade definida pelo seu módulo. Cada quadrante do espaço bidimensional $\delta P \times \delta F$ pode ser directamente relacionado com um tipo específico de qualidade da disposição emocional, tal como indicado na figura 1.b. Note-se, no entanto, que a etiqueta emocional associada a cada quadrante (*alegria, zanga, medo, tristeza*) é apenas indicativa da sua natureza principal, uma vez que a disposição emocional é contínua [14]. Como exemplo, o quadrante Q-III ($\delta P < 0$ e $\delta F < 0$) corresponde a situações onde o agente não tem capacidade para lidar com as “adversidades”, o que é típico de situações de medo.

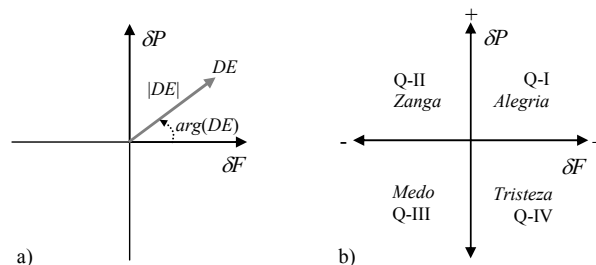


Figura 1. Vector DE como uma função de δP e δF (a); relação entre os quadrantes de DE e as tendências de qualidade emocional (b).

Neste artigo não iremos discutir os aspectos relacionados com a modelação emocional, no entanto é importante notar que a noção de *disposição emocional* é definida como uma disposição ou tendência reguladora de acção, mas não constitui em si o análogo da noção de emoção. A emoção é considerada um fenómeno emergente, resultante das dinâmicas cognitivas de um agente.

O Modelo de Agente de Fluxo

O *modelo emocional de fluxo* define um suporte conceptual para a modelação de fenómenos emocionais como resultado das dinâmicas inerentes à actividade cognitiva. Nesse sentido, serve de suporte a um modelo de agente no qual as noções de potencial e fluxo são concretizadas. Esse modelo foi designado *modelo de agente de fluxo*.

Estrutura Cognitiva de um Agente

No modelo de agente proposto, os fluxos de energia e os potenciais que deles resultam, designados *potenciais cognitivos*, são a base da estrutura cognitiva de um agente. Os potenciais cognitivos resultam quer da interacção entre agente e ambiente, quer da actividade interna do agente. Em ambos os casos, expressam aspectos do ambiente (interno e externo) que o agente é capaz de discriminar e perceber [7]. Formalmente, um potencial cognitivo $p(t)$ é modelado como uma composição de dois tipos de sinais: um sinal base $\varphi(t)$, caracterizado por uma frequência angular ω que identifica o aspecto ou qualidade discriminada; e um sinal quantitativo $\rho(t)$, o qual corresponde ao valor concreto da qualidade discriminada, expresso sob a forma de um desvio de frequência $\Delta\omega$ que resulta na modulação do sinal base $\varphi(t)$. Ou seja:

$$p(t) = \rho(t) \cdot \varphi(t) \quad (2)$$

Através de superposição, os potenciais cognitivos formam agregados que são os elementos base da estrutura cognitiva de um agente, sendo por isso designados *elementos cognitivos*. Para garantir que a superposição ocorre sem perda de informação, considera-se que os sinais qualitativos base $\varphi_i(t)$ são ortogonais entre si e que as frequências base respectivas, Ω_i , estão suficientemente afastadas para que não ocorra interferência entre as bandas espectrais correspondentes a cada sinal qualitativo base. Assim sendo, um elemento cognitivo $\sigma(t)$ é modelado como uma composição de potenciais cognitivos:

$$\sigma(t) = \sum_{i=1}^K p_i(t) \quad (3)$$

onde K é o número de potenciais no agregado.

Espaço Cognitivo e Dinâmicas Cognitivas

Os sinais base que compõem os potenciais e elementos cognitivos formam um espaço de sinais subjacente à estrutura cognitiva de um agente, designado *espaço cognitivo*. O espaço cognitivo é caracterizado como um espaço de sinais multi-dimensional, onde cada sinal base define uma dimensão do espaço. Formalmente, um espaço cognitivo CS_K é definido por um conjunto de K vectores base ortonormais $\Phi = \{\varphi_i: i = 1, 2, \dots, K\}$ com $K \in \mathbb{N}$, onde cada vector φ_i representa um sinal base $\varphi_i(t)$ com uma qualidade específica $\omega = \Omega_i$.

No espaço cognitivo os elementos cognitivos correspondem a posições específicas. Uma vez que os elementos cognitivos são localizados no tempo, num determinado instante $t = \tau$, um elemento cognitivo $\sigma(t)$ é representado num espaço cognitivo CS_K como um vector σ , definido do seguinte modo:

$$\sigma \equiv (\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_K) \quad (4)$$

Os coeficientes dimensionais $\rho_i \in \mathbb{C}$ expressam a intensidade e o desvio de frequência de cada sinal quantitativo $\rho_i(t)$ em relação ao sinal base respectivo $\varphi_i(t)$. Para além de permitir uma descrição concisa da estrutura cognitiva de um agente, o espaço cognitivo permite também a descrição das dinâmicas cognitivas como movimento no espaço cognitivo, tal como é descrito de seguida.

Uma das principais características do comportamento inteligente é a orientação no sentido da concretização de motivações. Nesse processo os elementos cognitivos desempenham diferentes papéis: *motivadores*, representam as situações pretendidas, gerando forças directoras do comportamento do agente; *observações*, representam a situação corrente, resultando de fluxos de interiorização associados a actividades como a percepção; *mediadores*, representam os meios de acção, formando uma interface entre os processos cognitivos e a acção concreta. A actividade cognitiva é conseqüentemente guiada pela maximização dos fluxos que levam à redução da distância entre observações e motivadores. Este processo pode ser descrito como movimento no espaço cognitivo, onde motivadores e observações correspondem a posições específicas e os mediadores definem a direcção de movimento, tal como ilustrado na figura 2.

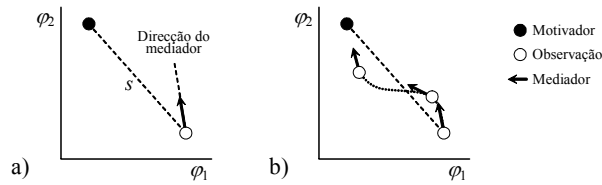


Figura 2. Elementos que participam na concretização de um motivador num espaço cognitivo bidimensional.

Tal como se pode observar na figura 2.a, a direcção dos mediadores seleccionados pode não ser a direcção exacta do motivador. Para além disso, quer os motivadores, quer as dinâmicas inerentes ao ambiente (interno e externo), podem mudar, influenciando o movimento das observações. A figura 2.b mostra uma possível trajectória resultante do ajuste do comportamento do agente por meio da utilização de mediadores diferentes. Independentemente dos processos específicos que estiveram na origem da mudança de mediadores, as forças que levaram a essa mudança estão subjacentes às dinâmicas cognitivas do agente. Na abordagem proposta, os fenómenos emocionais são considerados a expressão dessas forças, caracterizadas sob a forma de *disposições emocionais*. No espaço cognitivo, as disposições emocionais são definidas pela evolução da distância s entre uma observação σ_{obs} e um motivador σ_{mot} , e pela velocidade v do movimento da observação em direcção ao motivador. Ou seja:

$$DE \equiv (\delta s, \delta v) \text{ onde } \delta s = -\frac{ds}{dt} \text{ e } \delta v = \frac{dv}{dt} \quad (5)$$

Estas disposições emocionais representam forças comportamentais que constroem os processos cognitivos de um agente. Ou seja, as dinâmicas que resultam destas forças são, ao mesmo tempo, um resultado da actividade cognitiva e um factor que influencia essa actividade, reflectindo a relação simbiótica entre emoção e cognição, tal como proposto inicialmente.

Mecanismos de Regulação Cognitiva

Uma das áreas onde temos vindo a explorar esta relação estreita entre emoção e cognição é na regulação da actividade cognitiva de um agente. Por *regulação cognitiva* entende-se a capacidade de adaptar a execução dos processos cognitivos de um agente de acordo com as condições de concretização observadas, quer no presente, quer no passado, de modo a obter um compromisso entre tempo e recursos consumidos e a qualidade da solução obtida. No modelo proposto, esse controlo ocorre de acordo com duas perspectivas base: (i) uma perspectiva *espacial*, que se refere ao espaço de elementos cognitivos sobre os quais o processamento pode ocorrer; (ii) uma perspectiva *temporal*, que se refere ao tempo disponível para processamento cognitivo. Estas duas perspectivas de focagem, *espacial* e *temporal*, correspondem a dois mecanismos base, um mecanismo de *focagem de atenção* e um mecanismo de *focagem temporal*. Ambos os mecanismos de focagem dependem dos sinais produzidos por mecanismos de disposição emocional [15]. A figura seguinte ilustra a forma como estes vários mecanismos estão interrelacionados.

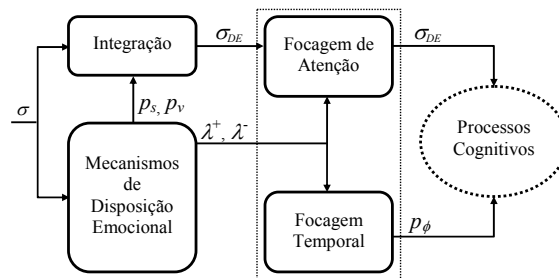


Figura 3. Mecanismos subjacentes à regulação da actividade cognitiva de um agente.

O mecanismo de focagem de atenção restringe a atenção dos processos cognitivos de um agente a certos elementos cognitivos, de acordo com o seu conteúdo de disposição emocional, os potenciais cognitivos p_s e p_v . Este mecanismo actua como uma barreira de depleção, produzindo um *campo de atenção* formado pelos elementos cognitivos capazes de ultrapassar a barreira. Apenas os elementos no campo de atenção são considerados pelos processos cognitivos de alto nível, como é o caso dos processos de raciocínio e de decisão.

O mecanismo de focagem temporal regula o ritmo de actividade cognitiva, fornecendo uma cadência temporal para a actividade cognitiva global. Essa base temporal corresponde a um sinal p_ϕ com uma

frequência ω_ϕ , a qual pode ser usada para determinar o período para processamento cognitivo, isto é, o tempo disponível antes que tenha de ser produzido um comportamento. A regulação da frequência ω_ϕ é determinada pelos sinais afectivos λ^+ e λ^- resultantes dos mecanismos de disposição emocional [15]. Assim, a frequência ω_ϕ expressa o efeito cumulativo dos sinais λ^+ e λ^- , de modo a reflectir o carácter afectivo prevalecente em relação às condições de concretização observadas

Resultados Experimentais

Para ilustrar a acção dos mecanismos de regulação cognitiva propostos, vamos considerar um contexto experimental que é uma implementação do domínio *Tileworld*, um ambiente virtual frequentemente utilizado como cenário de referência para o estudo do desempenho de agentes em condições de elevado dinamismo e limitação de recursos. A implementação que foi realizada segue a especificação deste cenário apresentada por Kinny e Georgeff [11], a qual é uma referência neste domínio. Esta especificação é também a adoptada por Schut, Wooldridge e Parsons [17], cujo trabalho serviu como referência para avaliação de resultados.

Foram medidas duas variáveis distintas : (i) a *eficácia* do agente, definida como a relação percentual entre o resultado obtido pelo agente e o resultado máximo que, em princípio, poderia ter obtido; (ii) o *custo total de planeamento*, definido como a soma dos custos de planeamento para todos os planos gerados durante uma execução. De modo a proporcionar uma base de referência para comparação com os resultados produzidos pela abordagem proposta, também foi implementado um agente puramente deliberativo, tendo por base a melhor política de reconsideração de intenções apresentada por Schut, Wooldridge e Parsons (agente adiante designado por SWP). Esta política de reconsideração é um aperfeiçoamento da melhor política de reconsideração de intenções apresentada por Kinny e Georgeff [11]. As figuras 4.a e 4.b mostram os resultados obtidos para as diferentes experiências realizadas envolvendo quatro agentes: o agente SWP e três agentes correspondentes a diferentes configurações da arquitectura de agente proposta: agente FTA, tem ambos os mecanismos de focagem activos; agente FA, só tem o mecanismo de focagem de atenção activo; agente FT, só tem o mecanismo de focagem temporal activo.

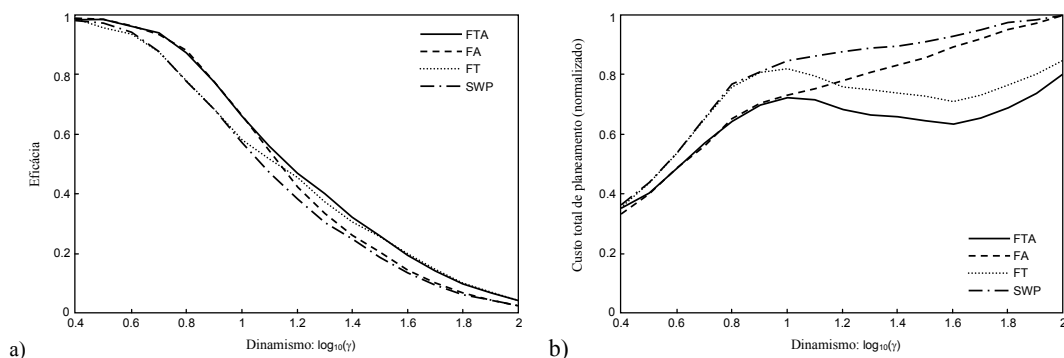


Figura 4. Eficácia dos agentes para diferentes graus de dinamismo do ambiente (a); custo total de planeamento para diferentes graus de dinamismo do ambiente (b).

Tal como se pode observar, os resultados de eficácia do agente FA são melhores que os resultados do agente SWP, em particular para uma gama de valores de dinamismo baixa e média. No caso do agente FT, os resultados de eficácia são também melhores que os do agente SWP, excepto para valores baixos de dinamismo ($\log_{10}(\gamma) < 0.8$). No caso do agente FTA (mecanismo de focagem de atenção e mecanismo de focagem temporal activos), pode observar-se uma melhoria dos resultados em relação ao agente SWP, que é consistente em toda a gama de valores de dinamismo.

Estes resultados podem ser explicados pela operação combinada dos mecanismos de disposição emocional e dos mecanismos de focagem. Os mecanismos de disposição emocional proporcionam a base de suporte para a decisão de quando mudar a intenção corrente, através da modulação da relevância dos elementos cognitivos. Ou seja, através da geração de disposições emocionais que são incorporadas nos elementos cognitivos e que posteriormente vão determinar, ou não, a presença desses elementos cognitivos no campo de atenção. Em simultâneo, são gerados sinais afectivos que regulam a focagem de atenção e a focagem temporal. Por exemplo, quando o dinamismo é baixo ou médio, o agente tem tempo para preencher todos os buracos que aparecem e, por isso, um carácter positivo prevalece, o que resulta numa baixa intensidade de depleção. Assim, a maioria dos motivadores está presente no campo de atenção, incluindo a intenção corrente. Deste modo, enquanto o agente SWP reconsidera sempre que aparece um buraco que seja

mais próximo que o buraco correspondente à intenção corrente, os agentes FA e FTA raramente reconsideram. Isto reduz o dispêndio de tempo em planeamento (custo de planeamento), tal como ilustrado na figura 4.b, aumentando o tempo disponível para a acção. Como resultado o agente consegue uma melhoria da sua eficácia.

Por outro lado, quando o dinamismo é elevado, os agentes não têm tempo para preencher a maior parte dos buracos, prevalecendo, por isso, um carácter afectivo negativo, o qual resulta numa elevada intensidade de depleção e num período de processamento cognitivo curto. Devido à elevada intensidade de depleção, apenas os motivadores correspondentes a novos buracos são capazes de entrar no campo de atenção, o que leva os agentes FA e FTA a reconsiderar mais frequentemente.

No caso de estar activo apenas o mecanismo de focagem de atenção (agente FA), o comportamento global converge para o comportamento do agente SWP, tal como ilustrado na figura 4.a. No entanto, quando o mecanismo de focagem temporal está activo, a diminuição do período de processamento cognitivo leva a uma restrição do tempo de planeamento, mesmo quando o agente selecciona uma nova intenção, aumentando assim a rapidez de resposta do agente à mudança rápida que ocorre no ambiente, produzindo um melhor desempenho dos agentes FT e FTA. Nestas condições os efeitos da focagem temporal tornam-se predominantes, tal como mostra a curva de eficácia do agente FT na figura 4.a. Na figura 4.b é possível observar que ambos os agentes FT e FTA são capazes de regular o tempo dispendido em planeamento de acordo com as condições de concretização, o que é um comportamento claramente adaptativo.

Estes resultados mostram que é possível utilizar mecanismos de base emocional para controlar os processos de raciocínio, produzindo efeitos semelhantes (ou até melhores do que) aqueles obtidos por meio de técnicas de meta-raciocínio, pelo menos no domínio *Tileworld*.

Referências

- [1] Arzi-Gonczarowski, Z. 'AI Emotions: Will One Know Them When One Sees Them?', in *Proc. of the 16th European Meeting on Cybernetics and Systems Research*, 2002.
- [2] Botelho, L., Coelho, H. 'Machinery for artificial emotions', *Cybernetics and Systems*, 32(5):465-506, 2001.
- [3] Bower, G., 'Some Relations Between Emotions and Memory', in *The Nature of Emotion: Fundamental Questions*, eds. P. Ekman, R. Davidson, 303-305, Oxford Univ. Press, 1994.
- [4] Carver, C., Scheier, M. 'Control processes and self-organization as complementary principles underlying behavior', *Personality and Social Psychology Review*, 6:304-315, 2002.
- [5] Damásio, A. 'A Second Chance for Emotion', *Cognitive Neuroscience of Emotion*, eds. R. Lane, L. Nadel, 12-23, Oxford Univ. Press, 2000.
- [6] Doshi, P. Gmytrasiewicz, P. 'Towards Affect-based Approximations to Rational Planning: A Decision-Theoretic Perspective to Emotions', *AAAI Spring Symposium*, ed. E. Hudlicka, L. Cañamero, Technical Report SS-04-02, 33-36, 2004.
- [7] Gärdenfors, P. *Conceptual Spaces: The Geometry of Thought*, MIT Press, 2000.
- [8] Gray, J., Braver, T., Raichle, M. 'Integration of Emotion and Cognition in the Lateral Prefrontal Cortex', *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 99:4115-4120, 2002.
- [9] Hanoch, Y. 'Neither an Angel nor an Ant: Emotion as an Aid to Bounded Rationality', *Journal of Economic Psychology*, 23, 1-25, 2002.
- [10] Hudlicka, E., 'Two Sides of Appraisal: Implementing Appraisal and Its Consequences within a Cognitive Architecture'. In Hudlicka, E., Cañamero, L. (Eds.), *Architectures for Modeling Emotion: Cross-Disciplinary Foundations*, AAAI AAAI Spring Symposium, 70-78.
- [11] Kinny, D., Georgeff, M. 'Commitment and Effectiveness of Situated Agents', *Proc. of the 12th International Joint Conference on Artificial Intelligence*, 1991.
- [12] Kondepudi, D., Prigogine, I. *Modern Thermodynamics: From Heat Engines to Dissipative Structures*, J. Wiley & Sons, 1998.
- [13] LeDoux, J. 'Cognitive-Emotional Interactions: Listen to the Brain', *Cognitive Neuroscience of Emotion*, eds. R. Lane, L. Nadel, 129-155, Oxford Univ. Press, 2000.
- [14] Morgado, L., Gaspar, G. 'Emotion in Intelligent Virtual Agents: The Flow Model of Emotion', in *Intelligent Virtual Agents*, eds. T. Rist et al., LNAI 2792, 31-38, Springer-Verlag, 2003.
- [15] Morgado, L., Gaspar, G. 'Emotion Based Adaptive Reasoning for Resource Bounded Agents', *Proc. of the 4th International Joint Conference on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, 2005.
- [16] Scherer, K. 'Emotions as Episodes of Subsystem Synchronization Driven by Nonlinear Appraisal Processes', in *Emotion, Development, and Self-Organization*, eds. M. Lewis, I. Granic, 70-99, Cambridge Un. Press, 2000.
- [17] Schut, M., Wooldridge, M., Parsons, S., 'The Theory and Practice of Intention Reconsideration', in *J. Expt. Theor. Artificial Intelligence*, 16:4:261-293, 2004.
- [18] B. Mellers, 'Choice and the Relative Pleasure of Consequences', *Psychological Bulletin*, 126, 910-924, 2000.