

Resumen de Tesis Doctoral

Estudios sobre sistemas adaptativos con aplicaciones en la robótica autónoma y los agentes inteligentes

José Antonio Martín H.

Arq. de Computadores y Automática, Universidad Complutense de Madrid

Resumen

Inteligencia, Racionalidad, Aprendizaje, Anticipación y Adaptación son términos que han estado y permanecen aún en el foco principal de las ciencias de la computación. Cada término busca delimitar un determinado fenómeno, sin embargo las complicadas interrelaciones no lineales entre estos procesos hace que sus fronteras sean difusas y en ocasiones se visualicen como distintos vértices de un mismo fenómeno. En este trabajo se presenta un modelo para su estudio: se propone una división según su complejidad. Se comienza con el estudio de la Adaptación como fenómeno más básico y se muestra tanto su potencial como sus limitaciones inherentes. Se sigue una línea ascendente de complejidad con el estudio de la Anticipación para lo cual se estudia la teoría de la expectación y se propone que el estudio de los sistemas anticipatorios y los fenómenos de aprendizaje complejo deben enfocarse hacia la teoría estadística de la expectación o esperanza matemática. Finalmente, se aborda el estudio de la Racionalidad y la Inteligencia como los fenómenos donde la complejidad se manifiesta en mayor grado. A lo largo de las diferentes partes de esta tesis se presentan una serie de contribuciones tanto teóricas como tecnológicas que representan la aplicación práctica en el campo de la robótica autónoma y los agentes inteligentes del presente estudio. Este trabajo de investigación, visto como un todo, representa un modelo sistémico de los fenómenos complejos que se manifiestan en los sistemas tanto naturales como artificiales a los cuales de forma explícita o implícita se les atribuye una finalidad (al menos metafórica) u objetivo.

Copyright © 2011 CEA.

Palabras Clave: Sistemas Adaptativos, Robots Autónomos, Control Inteligente, Aprendizaje por Refuerzo

1. Introducción

El estudio de los sistemas adaptativos tiene innumerables aplicaciones en muy diversas disciplinas tanto científicas como tecnológicas. Por citar sólo unas pocas tenemos: la robótica, la sociología, la economía, la inteligencia artificial, la psicología, la etología, la biología, la física y las matemáticas. Esta gran aplicabilidad no es fortuita sino que está completamente justificada por la misma estructura de los modelos de solución de problemas en matemáticas, donde generalmente el problema consiste en conseguir un número, un vector, una matriz o una función que represente la solución a un problema, sujeto a un número de restricciones dadas. Pues bien, para alcanzar este “estado final solución” es necesario buscar o “recorrer” parte del espacio de búsqueda evitando las zonas no factibles y viajando de un estado a otro intentando mejorar la solución

a cada paso. Es evidente que, a simple vista, es un problema de navegación de un móvil en un espacio de búsqueda. Si a todo esto le agregamos múltiples objetivos cambiantes en el tiempo y restricciones complejas también cambiantes en el tiempo tendremos un problema de navegación dinámico multiobjetivo o, en terminología matemática, un problema de optimización dinámica multiobjetivo. La investigación que se presenta está orientada al estudio, experimentación y desarrollo de modelos computacionales para el estudio de la conducta adaptativa y sus aplicaciones en el campo de los robots autónomos y los agentes inteligentes, proponiendo un modelo de estudio y un conjunto de métodos cuya aplicación práctica resulte viable.

Siguiendo el modelo propuesto, este trabajo está dividido en tres partes fundamentales donde se establecen las aportaciones de esta tesis:

- Adaptación.
- Anticipación.
- Racionalidad e Inteligencia.

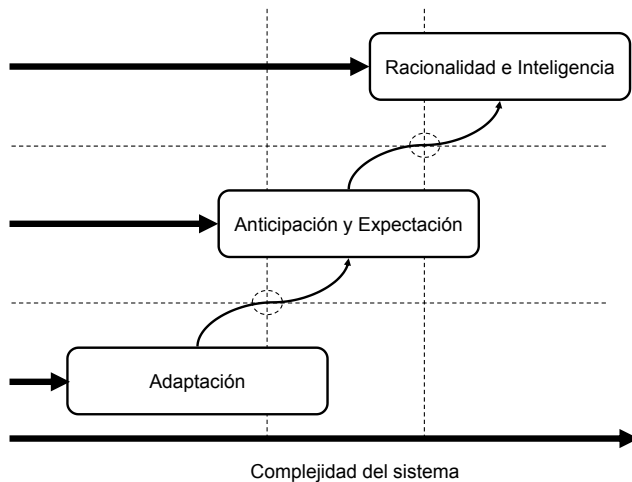


Figura 1: Modelo vertical sobre complejidad y fenómenos observables en los sistemas.

Este modelo puede apreciarse en la Figura 1, donde se describen los diferentes fenómenos observables en función de la complejidad del sistema. Como puede verse existe una línea ascendente y un punto de corte donde se da un salto cualitativo en los fenómenos observables.

De esta forma, se parte de la Adaptación como fenómeno más básico y se muestra tanto su potencialidad en cuanto a la complejidad que aporta a la conducta como sus limitaciones inherentes. Se sigue una línea ascendente de complejidad con el estudio de la Anticipación para lo cual se estudia la expectativa como fenómeno que rige la conducta de anticipación y se propone que el estudio de los sistemas anticipatorios y los fenómenos de aprendizaje complejo deben enfocarse hacia la teoría estadística de la predicción como fenómeno rector de un tipo de conducta que comienza a destacar en términos de complejidad. Finalmente, se aborda el estudio de la Racionalidad y la Inteligencia como los fenómenos donde la complejidad se manifiesta en mayor grado.

2. Persistencia e Inmunidad: Adaptación

El término adaptación surge principalmente en el ámbito biológico como un intento por estudiar la relación que hay entre las características (estructura anatómica, procesos fisiológicos o rasgos del comportamiento) de los seres vivos y su medio ambiente, es decir, la adaptación biológica es un proceso por medio del cual un ser vivo incrementa la correlación entre su estructura y el ambiente resultando en un incremento de sus probabilidades de supervivencia y reproducción.

Supongamos que un organismo X , adaptado a su entorno, tiene unos sensores determinados y que éstos están recibiendo información del ambiente continuamente y que el organismo está en equilibrio con el ambiente¹, es decir, o está oculto o no está en peligro alguno. Permitámonos además atribuir a este

¹Cuando se habla de equilibrio en sistemas complejos hay que diferenciar dos tipos de equilibrios: el equilibrio estático y el equilibrio dinámico. Suele

hecho que el cambio en la lectura de los sensores es constante o muy suave.

Entonces, para nuestro organismo X , serán necesarias algunas motivaciones externas o internas para cambiar de conducta, por ejemplo algún cambio brusco en el ambiente o la necesidad de buscar agua o alimento; entonces su equilibrio cambia y debe reaccionar para mantener el equilibrio, así por ejemplo, si ya se estaba moviendo, el movimiento que haga debe mantener el equilibrio dinámico que posee con el entorno.

En este caso una estrategia trivial es intentar minimizar el cambio sensorial al moverse para que así se mantuviera el “equilibrio” con el ambiente o mantenerse “a salvo”: por ejemplo, aplicando estas ideas a pequeños animales con poca inteligencia, este proceso puede observarse en el modo en que algunos animales mantienen una ruta segura al bordeando una pared tratando de mantener la misma referencia perceptual a lo largo de todo el camino (seguimiento de paredes).

Ahora bien, la relación entre la seguridad y la constancia parte de una observación intuitiva sobre la adaptación, pues un sistema determinado sólo podrá adaptarse cuando exista una constante, de lo contrario no podrá adaptarse pues no puede “converger” hacia la nada. El organismo o agente que interactúa con su ambiente mediante su sistema perceptivo necesita de un “suelo” (base sólida o una constante) sobre el cual caminar, tanto en sentido estricto como metafórico, y ésta es una ley de los sistemas tanto adaptativos como evolutivos. Así, esta relación se formaliza mediante la siguiente ley:

Ley 1 (Ley de la Constancia). *Todo sistema adaptativo requiere de una fuente de constancia para converger y tiende hacia esa fuente de constancia.*

Una consecuencia de esta ley es que los sistemas adaptativos “huirán” de todo entorno ruidoso y con perturbaciones hacia zonas de su ambiente más constantes, lo que podría interpretarse como un principio básico para la formación del instinto de conservación.

Para formalizar esta idea se propone un nuevo principio: “*El Principio de la Persistencia Justificada*”. Este principio expresa lo siguiente:

Principio 1 (Principio de la Persistencia Justificada). *Si un organismo o sistema existe en un estado determinado de su ambiente, entonces, la máxima probabilidad a priori para sobrevivir (evitar la extinción) se obtiene cuando el estado de su ambiente es constante o el cambio en dicho estado es muy suave.*

En palabras simples, si estás vivo, entonces no hagas nada!. De hecho, si posees un sistema perceptivo y detectas algún cambio en el ambiente trata de revertir ese cambio tan pronto como sea posible.

hacerse esta distinción para entender mejor los mecanismos de equilibrio que actúan en entes vivos e inertes siendo la principal diferencia que el equilibrio estático puede conseguirse sin consumo energético, mientras que para lograr el equilibrio dinámico es necesario un consumo o gasto de energía según los principios de la termodinámica. Por este motivo suele decirse que un ente biológico está en un estado estable en vez de en equilibrio.

Así, es muy razonable que, siguiendo esta mecánica, conductas como la homeostasis (Cannon, 1932) hayan sido seleccionadas por la evolución natural.

Proposición 1 (Ley de Adaptación). *Todo sistema adaptativo converge hacia un estado donde cesa todo tipo de estimulación.*

Una marea de formalizar la ley de adaptación es la siguiente:

Dado un sistema S , decimos que un evento (E) es un estímulo para el sistema S si y sólo si la probabilidad $P(S \rightarrow S')$ de que el sistema sufra algún cambio (en sus elementos o en sus procesos) cuando ocurre el evento (E) es mayor que la probabilidad a priori de que S cambie de forma independiente de E .

$$P(S \rightarrow S'|E) > P(S \rightarrow S'), \quad (1)$$

Sea S un sistema arbitrario sujeto a cambios en el tiempo (t) y sea E un evento arbitrario que es un estímulo para el sistema S : decimos que S es un Sistema Adaptativo si y solo si cuando t tiene al infinito ($t \rightarrow \infty$) la probabilidad de que el sistema S cambie de estado ($S \rightarrow S'$) en un instante de tiempo (t) dado el evento E es igual a la probabilidad de que el sistema S cambie de estado $S \rightarrow S'$ en un instante de tiempo t de forma independiente del evento E .

La ecuación (2) formaliza la definición de un sistema adaptativo.

$$P_{t_0}(S \rightarrow S'|E) > P_{t_0}(S \rightarrow S') > 0 \quad (2)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} P_t(S \rightarrow S'|E) = P_t(S \rightarrow S') \quad (3)$$

Ahora, podemos definir entonces algunas medidas relevantes:

Definición 1 (Excitabilidad). *Dado un evento físico E y un sistema S , the excitabilidad $\chi_t(S, E)$, de S con respecto a E , es la cantidad dada por la expresión (4), en el instante particular de tiempo t .*

$$\chi_t(S, E) = P_t(S \rightarrow S'|E) - P_t(S \rightarrow S') \quad (4)$$

Así, para cada instante de tiempo t existirá un intervalo temporal h tal que:

$$\chi_t(S, E) = P_t(S \rightarrow S'|E) - P_t(S \rightarrow S') \quad (5)$$

$$\chi_{t+h}(S, E) = P_{t+h}(S \rightarrow S'|E) - P_{t+h}(S \rightarrow S') \quad (6)$$

$$\chi_{t+h}(S, E) < \chi_t(S, E) \quad (7)$$

Y así, podemos definir entonces la adaptación como una cantidad:

Definición 2 (Adaptation). *Dado un evento físico E y un sistema S , la adaptación $\mathcal{A}_{t+h}(S, E)$, de S con respecto a E , es la diferencia entre la excitabilidad $\chi_t(S, E)$ y la excitabilidad $\chi_{t+h}(S, E)$, según la expresión (8), entre los instantes particulares de tiempo t y, t más un intervalo de tiempo h , $t + h$.*

$$\mathcal{A}_{t+h}(S, E) = \chi_t(S, E) - \chi_{t+h}(S, E) \quad (8)$$

Y así, la ley de adaptación se puede expresar cómo:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \mathcal{A}_t(S, E) = 0 \quad (9)$$

3. Expectaciones y Predicciones: Anticipación

La conducta de anticipación puede ser definida como todo tipo de conducta que está influenciada por algún tipo de conocimiento, expectación, creencia o intuición acerca del futuro. Pero el concepto de futuro puede ser entendido y/o expresado de muy diversas formas, por ejemplo en términos de recompensa futura, eventos futuros, acciones futuras etc. De hecho no está claro a que nivel de la evolución animal el concepto o al menos alguna vaga noción acerca del futuro ha emergido. Los humanos manejamos un concepto de tiempo muy sofisticado que incluye pasado, presente y futuro, pero la interrelación entre la evolución cultural y el concepto humano de tiempo no es bien conocida. Así, afirmar que animales tales como las ratas, los pájaros, los perros entre otros poseen una noción sofisticada de tiempo es una hipótesis muy difícil de sustentar; incluso lo más común de la conducta humana no depende estrictamente de una planificación temporal analítica. Tomando esto en consideración todo modelo de conducta predictiva que sea desarrollado con la intención de servir como modelo general con gran aplicabilidad no debería definirse en los términos de la muy refinada noción cultural humana de pasado, presente y futuro. En la actualidad hay un cuerpo de investigaciones que está en continuo crecimiento acerca de la Conducta Anticipatoria con los trabajos seminales de Rosen (1985) y Davidsson (1997) hasta trabajos más recientes (Butz et al., 2003) enfocados sobre metodologías más específicas. La Anticipación vista como proceso predictivo juega un papel preponderante en cualquier conducta inteligente, por ejemplo: para tomar buenas decisiones es necesario predecir o anticipar -en algún sentido- las consecuencias de tales decisiones.

Si consideramos por ejemplo la "Ley del efecto" de Thorndike (1927) (y la definición de Reforzador), nos damos cuenta que se consideran las llamadas "consecuencias reforzantes" (p.e. placer). Esta ley (del efecto) considera que el sistema es capaz de diferenciar entre clases de estímulos, por ejemplo, placer y aversión.

La "Ley del Efecto" considera las consecuencias reforzantes (placer) de la conducta de un organismo como estímulos que aumentan la probabilidad de que una conducta sea exhibida y esto a su vez incrementa la probabilidad de percibir estos estímulos reforzadores. Es aquí donde hay un salto entre consecuencias inmediatas y consecuencias a largo plazo.

Rosen (1985) define los Sistemas Anticipatorios como: un sistema que contiene un modelo predictivo de sí mismo y/o de su ambiente, que le permite cambiar de estado en un instante de acuerdo con las predicciones del modelo que pertenecen a un instante posterior. Estrictamente hablando un Sistema Anticipatorio es un sistema en el cual el cambio en el estado presente está influenciado por circunstancias futuras más que meramente por el presente o el pasado.

Siguiendo esta línea vemos que el concepto de consecuencia emerge de forma natural.

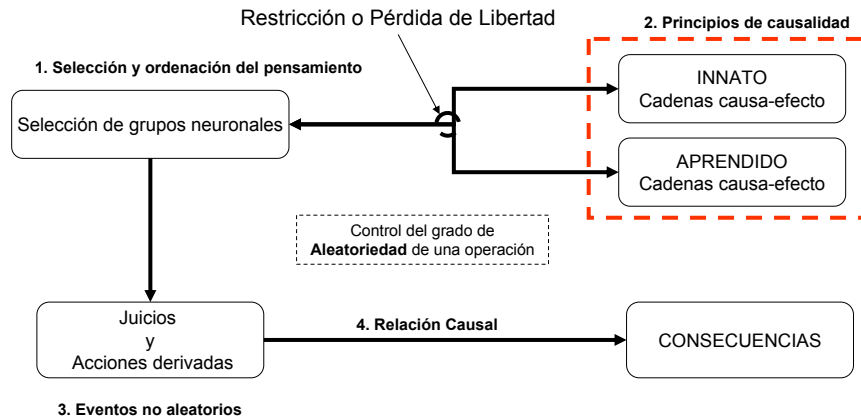


Figura 2: Diagrama del Modelo de Racionalidad.

4. Racionalidad e Inteligencia

Una de las primeras características de la conducta humana que los investigadores en Inteligencia Artificial trataron de emular fue la Racionalidad. Sin embargo ¿qué es la Racionalidad? Sin entrar en profundidades filosóficas se puede decir simplemente que la Racionalidad consiste en un problema de opciones. En economía, por ejemplo, la noción de racionalidad se refiere al hecho de que un agente económico debe conducirse estricta y permanentemente de forma tal que maximice cierta cantidad en términos de dinero dentro de un proceso económico, y cualquier desvío de esta forma de conducta, obligaría a catalogar al ente como una entidad irracional dentro del juego económico.

Más cercano al enfoque Animat presentado por Wilson (1991) se dice que la racionalidad trata sobre selección de acciones y toma de decisiones. Maes (1989) elabora y presenta una lista de características relevantes de la conducta racional en un sentido amplio.

1. Es orientada a objetivos.
2. Explora las oportunidades.
3. Anticipa.
4. Es altamente adaptativa a situaciones cambiantes e impredecibles.
5. Puede lograr objetivos que obran recíprocamente y que están en conflicto.
6. Hay una degradación inherente del funcionamiento cuando ciertos componentes fallan.
7. Todas las condiciones anteriores se deben alcanzar con recursos e información limitados (experiencia y conocimiento limitados).

Siguiendo esta línea se propone una nueva definición descriptiva y operacional de Racionalidad:

Definición 3 (Racionalidad). *La Racionalidad es una restricción del pensamiento y consecuentemente elimina cierta libertad. Esta restricción o pérdida de libertad es el resultado de un proceso de adaptación evolutiva que está orientado a seleccionar y ordenar el pensamiento (procesamiento de información) de forma tal que los principios de causa y efecto, tanto*

innatos como aprendidos, sean satisfechos de tal manera que el individuo opere con al menos una indicación consciente (justificación) de que sus juicios y sus acciones derivadas NO sean eventos aleatorios o carezcan de relación causal con las consecuencias de sus acciones o futuros juicios.

Puede verse a partir de esta definición que hay algunos factores que contribuyen al grado de Racionalidad; por ejemplo el arousal como factor que afecta al nivel de conciencia de un organismo vivo y que es gradual y fluctúa entre diversas especies, incluso en el mismo individuo bajo diferentes situaciones.

Se puede ver un diagrama de esta definición en la figura 2.

Otro factor gradual de la Racionalidad se deriva de la naturaleza estadística de la definición. Siguiendo la teoría del Núcleo Dinámico y la teoría de la Selección de Grupos Neuronales (Edelman, 1987; Tononi and Edelman, 1998), el hecho de la clara diferenciación de la aleatoriedad depende directamente de la entropía del microsistema de estados asociado al momento contextual preciso donde ocurre un pensamiento, es decir, en un grupo neuronal especializado.

También el aprendizaje y el repertorio de conocimiento son factores importantes, ya que permiten almacenar relaciones causales que finalmente son utilizadas para decidir sobre el grado de aleatoriedad de una operación (conducta, selección de acciones o cadenas de pensamiento); así, a mayor cantidad de relaciones causa-efecto (mayor experiencia) mayor Racionalidad en potencia tendrá el organismo. De esta forma el grado de conciencia, el repertorio de conocimiento y la entropía del contexto determinarán el grado de racionalidad de un individuo.

Como puede verse esta definición es más general que la definición en las ciencias económicas, ya que la condición relevante es la no aleatoriedad, sea ventajosa o no. Es decir, un agente puede ser racional aunque esté perdiendo continuamente su dinero.

La idea que se defiende es que la Racionalidad debe ser estudiada como un proceso independiente de una finalidad u objetivo, aunque este pueda agregarse siempre en sentido metafórico.

En este sentido la Racionalidad pierde su componente teleológico y pasa a ser un proceso sin una finalidad o intencionalidad.

dad en sentido estricto; es decir, es un mecanismo que restringe las acciones de un sistema a la condición fundamental de que exista una relación causal aprendida por medio de la experiencia (interacción con el ambiente) entre los eventos que afectan a un sistema, las acciones que realiza ese sistema y las predicción de las consecuencias de estas acciones.

Así, la racionalidad es un componente fundamental de los sistemas anticipatorios, pues es la encargada de proporcionar el soporte de la expectación mediante relaciones causa-efecto.

4.1. Conducta Activa Orientada a Objetivos -Inteligencia-

Recordemos que tradicionalmente el paradigma dominante en Inteligencia Artificial fue el enfoque clásico, basado en deliberación, razonamiento simbólico e inferencia lógica. Incluso en psicología la Inteligencia ha estado altamente correlacionada a la capacidad de abstracción y razonamiento lógico, no sin suficientes críticas a esta aproximación que ha llevado a una medida que ha sido llamada incluso Cociente Intelectual (IQ).

En esta sección exploramos un tipo de conducta que intenta ir más allá de los paradigmas tradicionales proponiendo un nuevo tipo de conducta a la que llamamos “Conducta Activa Orientada a Objetivos” y a la que relacionamos directamente con la inteligencia y con la que se propone un tipo de conducta Adaptativa, Impredecible, No Aleatoria, Efectiva y Orientada a Objetivos.

De la teoría de la información de Shannon (1948); Shannon and Weaver (1949) sabemos que la medida de la información contenida en un mensaje o sistema puede ser interpretada como una medida de cuan *inesperado*, *impredecible* y *original* es el mensaje. Shannon definió una medida del contenido de información llamada “self-information” (auto-información) o “*surprisal*” (lo sorpresivo) de un mensaje (m):

$$I(m) = -\log p(m), \quad (10)$$

donde $p(m) = Pr(M = m)$ es la probabilidad de que el mensaje (m) sea elegido de entre todas las posibles opciones en el espacio de mensajes M .

La ecuación (10) puntúa a los mensajes poco probables de forma alta en su contribución al valor total de $I(m)$. En otras palabras, los mensajes que ocurren de forma infrecuente son en cierto sentido más valiosos y por supuesto más inesperados y sorpresivos.

Habiendo estudiado el concepto de cantidad de información se propone ahora una medida de la “Conducta Activa Orientada a Objetivos” de un agente de una forma más natural, midiendo los componentes adaptativos y creativos de su conducta. De esta forma se expone la siguiente proposición:

Proposición 2 (Sustitución de Mensaje por Conducta). *Si interpretamos un mensaje m como una acción (a) tomada por un Agente (e.g. robot) se puede medir la cantidad de información en a , es decir, qué tan inesperada, impredecible y original es la acción (a) de un Agente.*

La hipótesis que se defiende es que esta proposición implica una medida de la Creatividad, la Inteligencia y finalmente de la Conducta Activa de un sistema.

Así, se define la “Cantidad de Conducta Activa” de un Agente en un cierto intervalo de tiempo t para cumplir un objetivo fijado a priori J en una situación x dada de la siguiente forma:

Definición 4 (Cantidad de Conducta Activa). *Es la cantidad de información de las acciones de un Agente ponderada por la efectividad de éstas, es decir lo inesperado, impredecible y original en sus acciones, ponderado por el grado de satisfacción de sus objetivos.*

Esto es: dados dos agentes, demostrará mayor evidencia de Conducta Activa aquél para el cual el producto entre la efectividad y la cantidad de información de sus acciones sea mayor. Una consecuencia inmediata de esta definición es la siguiente:

Proposición 3 (Impredictibilidad y Conducta Activa). *Ya que una acción completamente predecible no demuestra mucha Conducta Activa, incluso siendo muy efectiva. Entonces una acción efectiva no necesariamente demuestra Conducta Activa ni Inteligencia, ya que podría ser simplemente la acción más probable del sistema.*

La forma de medir la Conducta Activa Orientada a Objetivos es de hecho medir su demostración, es decir la originalidad ponderada por la efectividad.

De forma más simple, se puede definir la medida como:

$$\chi(a) = I(a) \times J(a), \quad (11)$$

donde $I(a)$ es la cantidad de información de la acción (a) emitida por el agente y $J(a)$ la efectividad de dicha acción.

5. Conclusiones y Resultados

El resultado fundamental de esta tesis es la integración de una diversidad de fenómenos, métodos y paradigmas de solución de problemas, tanto en inteligencia artificial como en otras disciplinas afines como la automática y la teoría de sistemas complejos, en un modelo sistémico que comprende los fenómenos adaptativos, anticipatorios, racionales e inteligentes.

Dentro de este modelo fue formalizado un cuerpo de teoría que aporta soluciones a diversos problemas tecnológicos. La formalización teórica desarrollada proporciona una serie de herramientas que permiten definir un problema práctico en términos sencillos y bien diferenciados de forma tal que puedan solucionarse de forma más eficiente y/o sencilla.

5.1. Conclusiones y resultados a nivel teórico

A nivel teórico y dentro del modelo conceptual propuesto una vez evaluados los resultados experimentales y haber realizado los análisis correspondientes las conclusiones y resultados fundamentales de esta tesis son las siguientes:

Se introdujo la “ley de adaptación” que dicta que todo sistema adaptativo converge hacia un estado donde cesa todo tipo de estimulación y se formuló el “principio de la persistencia justificada” que dicta que si un organismo o sistema existe en un estado determinado de su ambiente, entonces la máxima probabilidad a priori para sobrevivir (evitar la extinción) se obtiene

cuando el estado de su ambiente es constante, o el cambio en dicho estado es muy suave. De esta forma, se afirma que estas proposiciones formales son los principios fundamentales que subyacen y rigen el fenómeno de la adaptación. Así, mediante el control externo de los estímulos sobre un sistema adaptativo, se puede controlar su comportamiento.

Se ha establecido que la ley del efecto sólo es válida en sistemas anticipatorios, es decir, en sistemas que contienen un modelo predictivo de su ambiente. Así, aunque un sistema adaptativo converge hacia un estado donde cesa todo tipo de estimulación (Ley de Adaptación), un sistema adaptativo con anticipación puede tender hacia el incremento de su estimulación de forma temporal haciendo que el valor esperado de la estimulación futura predicha por su modelo interno se minimice. Se determinó a su vez que la relación entre la estimulación y la extinción está implicada por el "Principio de Persistencia Justificada", mientras que la relación entre la estimulación y la no extinción sólo es posible mediante un modelo predictivo de expectativas. La conclusión fundamental es que hay determinados fenómenos presentes en los sistemas complejos que solo pueden ser explicados si se admite la tesis de la introducción de un modelo predictivo o cognición, es decir, un modelo que comprenda un mecanismo de memoria para almacenar un modelo de entorno basado en expectativas sobre futuro.

Se presentó una definición operacional del fenómeno de la Racionalidad que se fundamenta en la hipótesis de la No Aleatoriedad. Se estableció que la racionalidad es un componente fundamental de los sistemas anticipatorios, pues es la encargada de proporcionar el soporte de la expectativa haciendo posible el mantenimiento de las relaciones de causa-efecto. De igual forma se presenta un modelo formal sobre este fenómeno de forma ilustrada en la Figura 2.

Se propuso un nuevo concepto en forma de magnitud que define la "Cantidad de Conducta Activa" de un Agente como la cantidad de información de sus acciones ponderada por la efectividad de estas, es decir, lo inesperado, impredecible y original en sus acciones ponderado por el grado de satisfacción de sus objetivos. Entonces, dados dos agentes, demostrará mayor evidencia de Conducta Activa aquél para el cual el producto entre la efectividad y la cantidad de información de sus acciones sea mayor. Una consecuencia inmediata de esta definición es que una acción completamente predecible no demuestra mucha Conducta Activa, incluso siendo muy efectiva y una acción efectiva no necesariamente demuestra Conducta Activa ni Inteligencia, ya que podría ser simplemente la acción más probable del sistema.

5.2. Conclusiones y resultados a nivel tecnológico

El modelo k NN-TD para representación y aprendizaje de Expectaciones. Se ha presentado una solución a los problemas de aproximación de funciones y generalización para problemas de aprendizaje por refuerzo en espacios de estado continuos basada en la técnica de clasificación de los k -vecinos más próximos (k -NN). El método presentado produce resultados excepcionalmente buenos, la calidad del algoritmo k -NNQ(λ) sobrepasa con creces al comportamiento del método simple k -NNQ (sin trazas de elegibilidad). Así, se afirma que el método

k -NNQ(λ) es un método de alto rendimiento. Incluso mediante la introducción del método k -NNQ(λ)-C(a) se mostró cómo el método k -NNQ(λ) puede ser extendido para operar con acciones continuas. Los resultados experimentales son muy significativos ya que se obtienen políticas de control suaves y óptimas en muy pocas iteraciones.

(*) Dicho modelo (k NN-TD) fue puesto a prueba rigurosa en la Segunda y Tercera Competición Internacional de Aprendizaje por Refuerzo (RL2008, RL2009)² llevadas a cabo en el marco del 25º y 26º Congreso Internacional de Aprendizaje en Máquinas (ICML2008, ICML2009) celebrados en Helsinki (2008) y Montreal (2009) respectivamente, y organizadas por prestigiosos investigadores de diversas universidades de todo el mundo. El algoritmo fue ganador en ambas ocasiones.

Se presentó un experimento de simulación de un sistema multi-robot. Mediante este experimento se evaluó y analizó como actúan de forma integrada los conceptos y principios propuestos dentro del marco teórico de esta tesis conjuntamente con los métodos de solución de problemas desarrollados igualmente en la presente tesis. Los objetivos planteados en este experimento han sido logrados satisfactoriamente.

Agradecimientos

Se agradece y reconoce el apoyo recibido del proyecto de investigación CICYT DPI2009-14552-C02-01 para la presentación de esta comunicación en el VII Simposio CEA de Control Inteligente, Logroño 2 y 3 de Junio, 2011. Quiero agradecer también a Doña Matilde Santos y a Don Jesús Manuel de la Cruz por el apoyo y la invitación a este Simposio.

Referencias

- Butz, M., Sigaud, O., Gérard, P. (Eds.), 2003. Anticipatory Behavior in Adaptive Learning Systems, Foundations, Theories, and Systems. Vol. 2684 of LNCS. Springer.
- Cannon, W., 1932. The wisdom of the body. W.W. Norton & Company, Inc.
- Davidsson, P., 1997. Linearly anticipatory autonomous agents. In: Agents. pp. 490-491.
- Edelman, G. M., 1987. Neural Darwinism – The Theory of Neuronal Group Selection. Basic Books.
- Maes, P., 1989. The dynamics of action selection. In: Proceedings of the Eleventh International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-89). Detroit, MI, pp. 991-997.
- Rosen, R., 1985. Anticipatory Systems. Pergamon Press, Oxford.
- Shannon, C. E., 1948. A mathematical theory of communication. The Bell System Technical Journal 27 (3), 379-423.
- Shannon, C. E., Weaver, W., 1949. The Mathematical Theory of Communication. University of Illinois Press.
- Thorndike, E. L., 1927. The law of effect. American Journal of Psychology 39, 212-222.
- Tononi, G., Edelman, G. M., 1998. Consciousness and complexity. Science 282 (5395), 1846-1851.
URL <http://www.sciencemag.org/cgi/content/abstract/282/5395/1846>
- Wilson, S., 1991. The animat path to AI. In: Meyer, J.-A., Wilson, S. W. (Eds.), From animals to animats. pp. 15-21.
URL citeseer.ist.psu.edu/wilson91animat.html

²<http://rl-competition.org/>