

SEMINARIO DE AUTOMATAS

Participantes: A. Cristóbal, E. García Camarero, I. Fernández Flórez, J. Mira, J. A. Martínez Carrillo, I. Ramos.

Coordinador: J. Mira Mira.

Sesiones: días 6 y 20 de noviembre y 4 y 18 de diciembre.

BASES PARA EL ESTUDIO DEL APRENDIZAJE EN AUTOMATAS (I)

Por J. Mira Mira

Intención:

Estas notas pretenden ser un "first draft", unos comentarios previos sobre el concepto de aprendizaje, en vistas a elegir una línea de investigación sobre Procesos de Aprendizaje en Automatas y Redes Neuronales.

El concepto de aprendizaje se ha usado en muchos campos. Vamos a repasar en "extenso", qué se entiende por aprendizaje en alguno de estos campos, y en qué sentido se han desarrollado los trabajos propios.

Introducción

La necesidad de una teoría de autómatas más realística que la algebraica es patente (1). Los intentos de solución del problema pueden clasificarse en dos tipos:

1) Aquellas realizaciones que pretenden extender el concepto de autómeta finito y determinístico; tales como los dispositivos de cálculo en paralelo, tipo perceptron (2), que incluyen procesos de adaptación como modificación de pesos I/O umbrales; las máquinas probabilísticas de Uttley (3) y Von Neumann (4); los autómetas que crecen (5), o se autorreparan (5) y las consideraciones estadísticas sobre las redes neuronales.

2) Aquellas otras realizaciones que pretenden no extender, sino crear una nueva teoría de autómetas, integrada en el campo de los sistemas de inteligencia artificial (6), mediante el desarrollo de sistemas para el proceso de datos que muestren características de aprendizaje, memoria o adaptación semejantes a las que muestra el auténtico autómeta natural: el ser vivo.

A nivel de realizabilidad física de sistemas de control, de cálculo o de reconocimiento de caracteres, que aprendan o se adapten, donde las consecuciones han sido más fructíferas y abundantes, los conceptos de aprendizaje y adaptación se han usado en su sentido más pobre, tratándose en muchos casos de procesos de clasificación, ajuste por mínimos cuadrados o sistemas reguladores (7).

Creemos que las realizaciones en este sentido son conceptualmente redundantes y que se ha llegado a un cierto estado de saturación, apistemológicamente justificable por la carencia de elementos físicos con la plasticidad (versatibilidad funcional y estructural) necesaria para soportar los procesos de adaptación y aprendizaje. Vamos a analizar los conceptos de aprendizaje y adaptación tal como se entienden en control, teoría de filtros y calculadoras, para después volver a la neurofisiología y sicología experimental en busca de las bases que nos permitan afirmar bajo qué definición y en qué sentido tales procesos son físicamente realizables, o algorítmicamente programables, o al menos cómo podrían ser modelados por métodos heurísticos. Es decir, buscando qué lista de propiedades o características deben mostrar las estructuras o el comportamiento externo de un sistema para afirmar del mismo que aprende o se adapta.

Aprendizaje en sistemas tecnológicos

En campos tales como Calculadoras, Control y Teoría de Filtros, la necesidad de disponer de sistemas más flexibles, tales que las condiciones impuestas sobre su dinámica sean lo menos rígidas posible para que se puedan adaptar a distintos tipos de medios, ha llevado al estudio de los procesos de aprendizaje. De este modo, mediante la introducción de un bloque de aprendizaje en el lazo adaptivo, el sistema puede hacer uso de la experiencia pasada en vistas a realizar un proceso

(optimización o identificación) o una tarea específica, en menos tiempo y con menos errores o menos consumo.

Los sistemas realizados con estas miras han recibido nombres tales como:

1. Optimización dinámica.
2. Sistemas que se autoajustan.
3. Sistemas que se autoorganizan.
4. Sistemas de control adaptativo (título éste el más general de la serie).
5. Sistemas de Cálculo de estructura variable.
6. Filtros adaptativos, de aprendizaje y de predicción.

En control se ha empezado por el concepto de adaptación. Se entiende aquí por adaptación al proceso mediante el cual se ajustan ciertos parámetros del sistema (ganancia, anchura de banda ...) en vistas a "seguir" a un modelo específico (sistema de referencia) que presenta las características que deseamos para el sistema real, simplemente comparando las respuestas del sistema con las del modelo, o bien se trata de procesos de ajuste dinámico en que constantemente se está calculando un cierto índice de "performance", y modificando los parámetros para que tal índice cumpla unas determinadas especificaciones, (por ejemplo ser mínimo) (7).

Aparece el aprendizaje cuando se dota al sistema de la posibilidad, a la vista de la eficacia (costo, tiempo de respuesta, o de ajuste ...), de cambiar los criterios de ajuste, dando, por ejemplo, más importancia a un factor que a otros debido a que en experiencias pasadas se ha observado que tal factor tenía mayor influencia.

Un método, conceptualmente trivial, de llevar esto a efecto, es introducir en el sistema en paralelo, todas las funciones posibles. El proceso de adaptación y aprendizaje queda entonces reducido a concretar una u otra de las "funciones de transferencia" posibles.

Esta idea de sistemas que admiten modificaciones estructurales o funcionales, condicionadas por la experiencia o por las necesidades del usuario ha encontrado realizaciones en el campo de las Calculadoras en el concepto de "Sistemas de Cálculo de estructura variable" (ESTRIN, CANTOR, TURN) (8). Su propuesta consta de un sistema base de estructura fija (F), un inventario de hardware variable (V), y una unidad de control supervisora, (U.C), que decide las reestructuraciones electrónicas y mecánicas del hardware en V, para obtener distintas configuraciones de cálculo orientadas a la solución de problemas específicos. En definitiva, se proyecta el sistema general en un sistema de cálculo de propósito especial altamente eficiente. Si las decisiones de U.C. están condicionadas por la

eficacia observada en decisiones anteriores, tenemos un sistema que aprende en el siguiente sentido: La meta de su aprendizaje es realizar una serie de Cálculos o resolver problemas de ciertos tipos. En principio las órdenes de U. C. que deciden el hardware operante son aleatorias. La U. C. tiene noticia del resultado de su decisión. Finalmente, un sistema probabilístico se proyecta en uno determinístico. Enfrentado con un problema de cierto tipo, decide las operaciones parciales y su secuencia de conexión de forma única.

En síntesis, si la forma del trabajo del sistema consiste en almacenar los programas que realizan las modificaciones estructurales en los subsistemas V, y en la decisión acerca del programa realmente operante influye el comportamiento pasado, se puede afirmar que este sistema aprende.

En la teoría de filtros de predicción lineales (Wiener, Kolmogoroff), y no lineales (Wiener, Gabor) es otro de los campos donde se emplea el concepto de aprendizaje (9). Gabor usa un subsistema que aprende para optimizar un filtro no lineal entendiendo por aprendizaje el proceso de ajuste de una función por un polinomio. En la modificación de los coeficientes del polinomio sigue el criterio del error cuadrático medio tras la comparación de resultados.

En teoría de la información ha sido D. McKay quien ha introducido el concepto de aprendizaje, el cual viene dado en respuesta a la información recibida. Su discusión se centra en el concepto de redundancia (10).

Mención especial merecen también los llamados "Multilevel multigoal systems" y todos los sistemas de reconocimiento de caracteres, los cuales pueden ser considerados como sistemas que aprenden a clasificar configuraciones. En la modificación de los pesos asociados a determinadas características influye la experiencia.

Veamos ahora si la neurofisiología o la psicología experimental nos pueden proporcionar nuevas ideas para el diseño de sistemas que aprendan.

Bases

Los fenómenos de aprendizaje no están lo suficientemente estructurados como para admitir una definición única. Inicialmente podemos afirmar que un sistema aprende cuando, en función de la experiencia es capaz de modificar sus reglas de decisión de acuerdo con ciertos criterios de utilidad impuestos por nosotros o abstraídos del medio por el propio sistema tras una etapa de entrenamiento. La forma en que se realicen estas modificaciones estructurales o las condiciones necesarias para

que se presenten (condicionamiento clásico, ley del efecto (Thorndike), generalización de estímulos o mediante procesamiento simbólico), dará lugar a los diferentes tipos de aprendizaje.

El aprendizaje, al igual que otros fenómenos tales como los de memoria y adaptación, se presenta a distintos niveles de integración que van del macromolecular (D.N.A.), al sistema nervioso, tanto central como periférico, pasando por el celular (neuronal), quedando además el nivel subjetivo o de comportamiento. Tomando en cuenta el carácter todo-nada de la actividad neuronal, estos niveles podrían clasificarse en tres principales: Biológico, Lógico y Sicológico.

En sus manifestaciones más sencillas, comunes a hombres y animales, y correspondientes a los niveles de integración más bajos, los procesos de aprendizaje son condicionamiento en el sentido clásico, en que la formación del reflejo condicionado se debe al establecimiento de relaciones funcionales nuevas entre los grupos de células que son excitadas (Konorski). Se forman nuevas uniones sinápticas en las terminaciones de axones, en cuerpo celular o en dendritas o simplemente se modifican las uniones sinápticas ya existentes. Análogamente a la hipótesis de Eccles acerca de los procesos de facilitación por aumento del contacto sináptico.

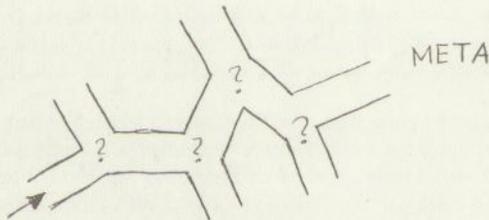
En lo referente a la actividad del sistema nervioso como método, Gastant demostró que en los procesos de condicionamiento se habrían vías no especificadas a través del tálamo que permitían el acceso a la zona de proyección correspondiente al estímulo propio, de los estímulos condicionados. Se interpreta aquí el aprendizaje como posibilitado por la convergencia de aferencias sensoriales no específicas (11).

Hasta que no aparece la necesidad de admitir procesamiento simbólico para expresar los fenómenos de aprendizaje, éste se identifica con reflejos condicionados por lo que habrá tantos tipos de aprendizaje como de reflejos. Lo mismo ocurre a nivel de comportamiento animal donde podemos establecer la clasificación teniendo en cuenta tres procesos básicos: Adquisición, Trasferencia y Retención. En cuanto al fenómeno de Adquisición del aprendizaje cabe distinguir los siguientes tipos (12):

1. Aprendizaje de datos (de memoria y por repetición).
2. Adaptación negativa o habituación, proceso por el cual un sistema deja de reaccionar ante estímulos que se repiten de forma frecuente.
3. Condicionamiento clásico (Paulov, Konorski). En que el proceso de asociación entre estímulos y respuestas se establece por la simple coincidencia espacio-temporal debidamente repetida, de un estímulo propio y otro neutro. Este proceso elemental de aprendizaje admite varias

complicaciones posteriores, tales como 3.1. procesos de generalización del estímulo (se produce la asociación con un estímulo, pero permanece para toda una clase de estímulos análogos). O bien 3.2. un estímulo condicionado se puede convertir en incondicionado de otro arco. 3.3. dos estímulos neutros asociados temporalmente con uno incondicional quedan asociados entre sí. Condicionamiento sensorio-sensorial (Brogden y Karn).

4. Condicionamiento operante o instrumental. Skinner (1938-1948), Hull (1943) en que cuando el sistema da una respuesta de la clase seleccionada por el experimentador, se produce una modificación en su estructura funcional de forma que aumenta la probabilidad de tal respuesta. Son ejemplos típicos de situaciones de aprendizaje de este estilo, los experimentos de la rata que aprende a presionar A para que en B aparezca alimento.
5. Aprendizaje de problemas tipo caja rompecabezas. Tal como los gatos que Thorndike introducía en un laberinto del que tenían que salir para encontrar la comida. En todos los casos se trata de aprender un movimiento o una determinada combinación de movimientos en orden a resolver un problema. También aquí se da gran importancia al esfuerzo.
6. Aprendizaje de decisiones, en que al sistema se le presenta ante una disyuntiva simple y sucesiva y se pretende induzca una ley:



Siempre a la derecha, siempre a la izquierda o una vez a la derecha y otra a la izquierda (por ejemplo). Este tipo de decisiones sencillas o múltiples dan lugar al aprendizaje de Relaciones espacio-temporales de estímulos.

Estos 6 tipos se refieren a comportamiento animal y en lo concerniente al proceso de adquisición. Los procesos de transferencia del aprendizaje pueden considerarse como fenómenos de adaptación y los procesos de retención, en general, siguen la ley de la "inercia". Lo aprendido de forma regular y

lenta perdura más. Aun en comportamiento animal, al intentar explicar los fenómenos de transferencia del aprendizaje ha de suponerse cierto tipo de procesamiento simbólico que permita abstraer la estructura relacional de una serie de situaciones concretas. Este es el punto de ruptura entre reflejos condicionados y procesos de aprendizaje de nivel superior, que si en animales puede existir, en el hombre existe de forma obvia. A partir de aquí, aprendizaje está fuertemente relacionado con los fenómenos de decisión, solución de problemas, formación de conceptos y toda la amplia gama de procesos cognitivos desde percepción a las distintas formas de razonamiento. Ya no son datos objetivos, como los que podría suministrar experimentos del tipo de Paulov, lo que se obtiene en estos campos, sino teorías más o menos lógicamente razonables que pueden sugerir posibles algoritmos que actúen de forma análoga a los procesos simbólicos mediante los cuales se realiza el aprendizaje.

Cabe hacer notar que en muchos de los tipos de aprendizaje aquí enumerados, se trata de procesos descriptivos, de ciertos aspectos del comportamiento de un sistema. Sólo en algunos casos existen hipótesis acerca de la relación entre las manifestaciones externas del fenómeno y las leyes que lo gobiernan y salvo para reflejos condicionados a nivel neuro-fisiológico, nada se dice acerca de los mecanismos que lo realizan.

Así, por ejemplo, en los fenómenos de retención selectiva o teoría del refuerzo, lo máximo que nos dice Skinner (13, II) podría reducirse a la siguiente lista de propiedades:

- 1) El refuerzo aumenta la probabilidad de que ocurra una respuesta.
- 2) Los refuerzos deben seguir a las respuestas. Son consecuencias de determinados esquemas de comportamiento.
- 3) Al reforzar una respuesta, se aumenta también la probabilidad de respuestas "contiguas", y se disminuye, automáticamente la probabilidad de otras respuestas. Equivalente a suponer $\sum p_i = 1$ donde p_i es la probabilidad de la respuesta R_i .
- 4) Es esencial distinguir entre refuerzos periódicos y aperiódicos. Sus efectos sobre el comportamiento del sistema son claramente distinguibles. Es decir, los refuerzos controlan la dinámica del sistema a través de su organización temporal.
- 5) La velocidad de aprendizaje es función de la magnitud del cambio exigido en la estructura o en el esquema funcional del sistema, y de la frecuencia de presentación (para refuerzos periódicos) del refuerzo. Cuanto mayor sea el cambio exigido ("esfuerzo") y menos la frecuencia del refuerzo, el aprendizaje es más lento, pero presenta mayor inercia a la extinción.

Esta lista de propiedades o características podría describir con bastante aproximación el fenómeno de aprendizaje pro refuerzo, ahora bien, ¿cuál es el mecanismo neuronal capaz de llevar a efecto ese refuerzo? No conocemos la respuesta a esta pregunta, por lo que, si la descripción es completa, la única posibilidad es usarla de base para la síntesis y diseño de una serie de modelos que presenten el mismo comportamiento observable y sólo hipótesis lógicamente razonables se pueden hacer acerca de la bondad del modelo en cuanto que sea él realmente operante en el ser vivo.

Interpretaciones teóricas

En el apartado anterior se han descrito algunos de los fenómenos de aprendizaje a nivel neurofisiológico y de comportamiento animal. Los datos procedentes de una descripción deben ordenarse, estructurarse, buscando relaciones funcionales o leyes empíricas. Esto es hacer una teoría.

De forma general, todos estos procesos de aprendizaje se pueden entender como modificaciones estructurales, o cambios en el estado funcional del sistema provocado por refuerzos, asociaciones, espacio temporales, etc. Lo que las diferencia son las condiciones necesarias para que se produzcan esas modificaciones y en qué es lo que se modifica.

Gran parte de las interpretaciones teóricas del aprendizaje (14) pertenecen a uno de estos dos grupos:

1. Teorías S-S (Signo-Significado). Donde aprendizaje se entiende como un proceso simbólico de organización (o reorganización) del sistema perceptual del individuo y/o de su espacio de representación interno (modelo del medio y de sí mismo). Algo así como modificación de las reglas del codificador semántico de entrada. Se dan muchos significados (se asocian nuevos modos de oscilación ...), a unos mismos sucesos del medio en función de la experiencia. Si se admite como necesario para el aprendizaje el refuerzo, entonces lo que se refuerza no es una conexión estímulo-respuesta sino un cierto criterio de codificación. Esta codificación podría entenderse como un proceso de inducción en su sentido más pobre: como clasificación altamente convergente.

2. Teorías E-R (Estímulo-Respuesta). Donde se concibe el aprendizaje en términos de estímulos, respuestas y una red de conexiones asociativas de pesos modificables. La modificación de asociaciones se concibe como un concepto teórico, definido en términos de condiciones experimentadas (variables y factor de aprendizaje de Hull y Thorndike) (14), o como un proceso neuronal realmente operante a nivel biológico.

Bibliografía

- (1) W. S. McCulloch.
"What's in the Brain that ink my character?".
en Embodiments of Mind. MIT Press. Cambridge, Mass. (1965).
- (2) Frank Rosenblatt.
"Principles of Neurodinamics".
Spartan Books (1962).
- (3) Albert M. Uttley.
"Conditional probability machines and conditioned reflexes".
en Automatas Studies, ed. by C.E. Shannon and J.McCarthy.
Princeton University Press (1956).
- (4) J. von Neumann.
"Probabilistic Logics and the synthesis of reliable orga-
nisms from unreliable components".
en Automatas Studies, ed. by C.E. Shannon and J.McCarthy.
Princeton University Press (1956).
- (5) 5.1.- J. von Neumann.
"Theory of Self reproducings Automata".
Collected and edited by Arthur W. Burks. University of
Illinois Press.
5.2. Arthur W. Burks.
"The logic of fixed and growing Automata".
The University of Michigan.
5.3. Lars Lofgren.
"Self-repair automatras".
en Proceeding of the Symposium on Mathematical Theory of
Automata. Pol. Ins. of Brooklin. New York (1962).
- (6) M. Minsky.
"Steps toward Artificial Intelligence".
Proceedings of the IRE. Vol. 49, 1961.
- (7) Mishkin and Braun.
"Adaptive Control Systems".
McGraw-Hill (1961).
- (8) No disponemos ahora de los trabajos de Estrin y Cantor.
- (9) D. Gabor, W. P. L. Wilby and R. Woodcock.
"A universal Non-linear Filter, Predictor and Simulator
which optimices itself by a learning process".
The Institution of Electrical Engineer. Paper N° 3270 M.
(1960).
- (10) D. M. Mackay.
"Information and Learning".
University of Keele. England.
- (11) Estos datos no son directos, sino obtenidos de la obra:
"Bases neuronais da vida Psiquica". de J. Simoes da Fon-
seca. Facultad de Medicina de Lisboa (1969).
- (12) Ernest R. Hilgard.
"Methods and Procedures in the study of Learning".
en Handbook of experimental Psychology. ed. by S.S. Ste-
vens. J. Wiley (1966).

- (13) B. F. Skinner.
"Two types of conditioned Reflex and a Pseudotype".
J. Gen. Psychol. (1935).
B. F. Skinner.
"Verbal behavior".
1957, Appleton-Century. New York.
- (14) K. H. Spence.
"Theoretical interpretations of learning".
In Handbook of experimental Psychology. Ed. by S.S. Ste-
vens. J. Wiley (1966).