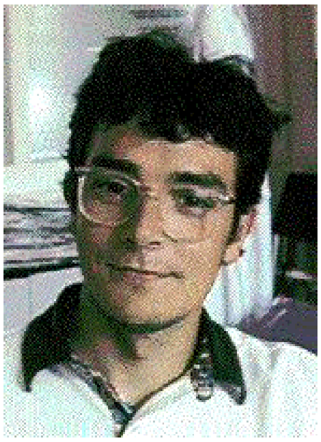
Necesidad del control inteligente



José María Cañas Plaza

email:jmplaza@iai.csic.es

18 de Agosto de 1997.

Controlar un sistema es modificar su comportamiento para que evolucione de una forma determinada. Esa forma determinada constituye el objetivo o los *requisitos de control*. Dentro de este problema aparecen dos actores principales la *planta*, que es el sistema a controlar y el *controlador* propiamente dicho, que interactúa con la planta para conseguir el objetivo de control.

En los siguientes apartados presentaremos someramente las técnicas convencionales que se han utilizado tradicionalmente en control, centrándonos en sus limitaciones generales y justificando así la necesidad y uso de otras técnicas de control, que llamamos inteligente, que citaremos brevemente haciendo hincapié en los controladores borrosos.

I. Límites del control convencional.

Dentro del enfoque tradicional, para controlar una planta, se busca un modelo matemático que la caracteriza, generalmente en términos de ecuaciones diferenciales o en diferencias. Este modelo describe su comportamiento alrededor de un determinado punto de funcionamiento o en un cierto rango de condiciones de trabajo. Además el modelo permite, si no es excesivamente complicado, el diseño del modelo de controlador adecuado y analizar cuestiones tales como los puntos de equilibrio del sistema conjunto, su estabilidad, la convergencia de los puntos de equilibrio, etc. Es conveniente que el modelo sea lo suficientemente preciso como para describir todos los aspectos relevantes del comportamiento dinámico de nuestra planta, y lo suficientemente sencillo como para que se le puedan aplicar las técnicas conocidas de análisis matemático.

A lo largo de los últimos 130 años se han ido acumulando un conjunto de técnicas y métodos desde el análisis en frecuencia, la transformada de Laplace hasta métodos de control estocástico, robusto y adaptativo, pasando por el análisis en el espacio de estados y el control óptimo. Estas herramientas han permitido controlar de modo más preciso sistemas dinámicos cada vez más complicados, no sólo plantas determinísticas lineales e invariantes con el tiempo, que son las más sencillas, también sistemas no lineales e incluso sistemas estocásticos.

Crecimiento de la complejidad de la planta y requisitos más exigentes.

Actualmente el crecimiento de la complejidad en los sistemas a controlar y en las exigencias de control que se requieren desbordan en muchos casos las capacidades de análisis y síntesis de estas técnicas y del enfoque convencional en general. Cuando la complejidad de la planta crece al tener componentes no lineales, estocásticas, o incluso comportamientos variantes con el tiempo la respuesta del enfoque convencional es la búsqueda de modelos matemáticos más elaborados. Sin embargo esto no es siempre posible: hay plantas tan complejas que es imposible analizar su modelo con las técnicas antes mencionadas o incluso es imposible elaborar ese modelo, describir su comportamiento en términos de ecuaciones diferenciales. Por lo tanto no siempre son aplicables las técnicas convencionales.

Ante esta escalada de complejidad cabe echarle un vistazo al entorno natural que nos rodea, por ejemplo al vuelo de una golondrina capturando tal o cual mosquito con su boca. Hoy por hoy plantear un sistema artificial que sea capaz de realizar esa *sencilla* captura a la vez que vuela es inviable, simplemente no se ha conseguido con la tecnología actual. Podemos pensar que los ojos, el cuerpo, la física de los músculos, las alas de la golondrina forman la planta a controlar y que los algoritmos de control están en su sistema nervioso. La naturaleza ha creado un sistema de control que nos resulta inabordable, cabe en el puño de un hombre y logra su objetivo eficientemente. Parece buena una revisión de los sistemas biológicos de control y de cómo abordan ellos la complejidad.

Resulta difícilmente plausible que la golondrina modele de modo explícito la dinámica de sus alas, la cinemática del mosquito, la viscosidad del aire, etc. Además no vemos razón alguna para que la evolución natural como diseñadora de sistemas de control sofisticadísimos se restrinja a utilizar sólo los sistemas cuya estabilidad es demostrable matemáticamente con nuestros conocimientos actuales. Sepamos explicarlas o no hay otras formas de controlar distintas de la convencional. En este sentido las nuevas técnicas de control inteligente están inspiradas en los sistemas biológicos y recogen ideas que aparecen en ellos.

Necesidad de modelar y la incertidumbre.

Un inconveniente fundamental de las técnicas clásicas es la necesidad de modelar el sistema a controlar en términos precisos. Esto las invalida para controlar sistemas tan complicados que no se pueda o no se sepa extraer su modelo matemático. Y lo que es mas importante las invalida para controlar sistemas con incertidumbre, que no se conozcan de modo preciso o que solo se conozcan de modo parcial. Las técnicas convencionales no asimilan bien el conocimiento parcial o la **incertidumbre** en los sistemas.

Desde el punto de vista de la robótica esta necesidad de modelar completamente para controlar ya fue criticada ampliamente por Brooks y los seguidores de su enfoque reactivo. En este punto su argumento sostiene que no es necesario modelar para actuar, que muchas (todas segun ellos) actuaciones animales son meros reflejos de los estímulos adecuados. Así por ejemplo un escarabajo acuático es capaz de cazar una presa porque se le van presentando encadenados los distintos estímulos que disparan los comportamientos de acercamiento, apresamiento, sujección y mordisco. No es necesario modelo alguno, con estos estímulos clave y determinados lazos de realimentación sensorial consiguieron un robot (Herbert) que caminaba sin chocar con nadie recogiendo las latas de refresco que se encontraba en los despachos del MIT.

Sin ser tan extremo como los reactivos puros si nos parece que un modelo preciso explícito y completo del mundo no es necesario para lanzar acciones control acertadas o *inteligentes*. Del mismo modo que la liebre de la fábula no debía esperar a saber si eran galgos o eran podencos para huir y salvar la vida. Los modelos parciales, cualitativos o imprecisos tienen una información útil que el enfoque clásico es incapaz de absorber.

Camino de la autonomía: adaptación a los cambios e imprevistos.

Una manera clásica de controlar plantas no lineales consiste en elaborar un modelo lineal, más sencillo, válido cuando la planta se encuentra en cierto punto de condiciones de funcionamiento y sus alrededores, y diseñar el controlador sólo para esa zona de trabajo. Con esto se pueden aplicar técnicas lineales que son más conocidas y manejables que las no lineales. Este modo de proceder tiene el inconveniente de necesitar ayuda externa humana para situar al sistema en esa zona de trabajo o para controlarlo cuando se sale de ella.

Uno de los requisitos que han aumentado la complejidad del control es la exigencia de amplios rangos de validez para el controlador, de modo que la ayuda externa sea mínima. Así el controlador debe dar respuestas cuando la planta está funcionando en muy distintas condiciones, el rango de validez exigido se ha extendido.

Este requisito se puede englobar dentro de la necesidad de dotar de **autonomía** a los controladores. Se persigue que estos sean capaces de operar sin requerir ayuda humana durante largos periodos llevando a cabo sus objetivos. Una consecuencia de esta autonomía es la necesidad de adaptación a los cambios e imprevistos, de manera que el controlador pueda asumir variaciones en los parámetros de la planta o sus condidicones sin comprometer su objetivo de control y sin necesidad de que un operador humano tenga que ajustarlo o sintonizarlo de nuevo. Incluso se puede requerir que el propio controlador detecte cambios tan relevantes como fallos hardware en la planta y que obre razonablemente, labor que tradicionalmente quedaba en manos de personas.

Con los clásicos controladores fijos por realimentación la adaptación a los cambios de la planta era nula. Si los parámetros del sistema cambiaban el controlador permanecía fijo, pudiendo comprometerse por ejemplo la estabilidad del sistema. Con el control adaptativo se logra que el controlador cambie sus propios parámetros en respuesta a ligeros cambios en los de la planta, para seguir garantizando los objetivos de control. Dentro del enfoque convencional no obstante todavía se está lejos de la requerida adaptación a grandes cambios en la planta, a imprevistos que varían brusca e inopinadamente las condiciones de trabajo. Hoy se exige que el controlador asuma estas variaciones y sea capaz de modificarse para seguir garantizando sus objetivos en ese nuevo punto de funcionamiento.

La necesidad de autonomía se hace patente por ejemplo en problemas como el de la navegación de un robot planetario. Para robots lunares se puede resolver teledirigiendo, esto es, poniendo a un humano detrás de las decisiones de alto nivel. Sin embargo esta posibilidad es inviable si el robot está más lejos pues el retardo en las comunicaciones hace imposible responder en tiempo real (por ejemplo detener la marcha para evitar el choque con una piedra cercana) si la decisión tiene que tomarla un humano en la tierra.

II. Sistemas de control inteligente

Bajo ese nombre se encuadran nuevas técnicas de diseño de controladores inspiradas en los sistemas biológicos que conforman un nuevo modo de resolver el problema del control. Entre ellas cabe destacar el control borroso, los controladores basados en conocimiento, las redes neuronales y los algoritmos genéticos. Estas técnicas recogen ideas presentes en los sistemas biológicos como la generalización, el empleo de conocimiento con incertidumbre y razonamiento simbólico, e incorporan métodos de disciplinas como la inteligencia artificial, la investigación operativa y el control tradicional.

Las técnicas de control inteligente constituyen un esfuerzo por superar los problemas antes reseñados del control clásico. Así por ejemplo suponen un avance en la dirección de la autonomía, al permitir el diseño de controladores con un mayor rango de validez, además hacen uso de conocimiento parcial e impreciso o son capaces de adaptarse a grandes cambios en la planta. En el siguiente apartado haremos hincapié en cómo se materializan algunas de estas ideas con los controladores borrosos.

Controladores borrosos, la incorporación de la incertidumbre.

Un controlador borroso típico consta de cuatro componentes: una base de reglas, un mecanismo de inferencia borrosa, un fuzzificador y un defuzzificador. La base de reglas es un conjunto de sentencias del estilo *si A y/o B entonces C*, que reflejan el conocimiento que se tiene sobre cómo realizar el control. En cada momento el controlador selecciona las reglas que son más adecuadas, esto es, aquellas cuyos antecedentes casen en mayor medida con la situación actual, y aplica sus consecuentes. Los conjuntos o clases borrosas son aquellos en los que la pertenecia de un punto al conjunto no se define binaria, sino gradual a lo largo del dominio de la variable. Así hay puntos que pertenecen más que otros a dicha clase. Es típico el uso de conjuntos cuya función de pertenencia es un triangulo o un trapecio. Además de las reglas se necesita un mecanismo de inferencia que traduce el grado borroso en que se dan los antecedentes a un cierto grado borroso del consecuente.

Estas reglas del controlador manejan conjuntos borrosos tanto en los sensaciones como en las acciones. Sin embargo la entrada al controlador son sensaciones numéricas, puntuales e igualmente los valores concretos que éste emite a los actuadores. Son necesarios un *fuzzificador* que pasa de las sensaciones puntuales a las sensaciones borrosas, y un *defuzzificador* que convierte la salida borrosa de actuación en un valor numérico concreto. En este último punto cabe destacar que cuando varias reglas son aplicables en una situación se realiza una fusión borrosa de lo que todas ellas recomiendan, y así se logra un valor numérico único para los actuadores.

Este tipo de controlador captura con mayor facilidad el conocimiento de los humanos sobre como controlar cierto sistema que el enfoque convencional. Es más fácil extraer del experto humano reglas borrosas sobre como él procede, que la descripción de sus acciones en términos de ecuaciones diferenciales. Son mucho más sencillas, simbólicas, cercanas al hombre. Además incorpora la incertidumbre explícitamente pues los conjuntos borrosos son imprecisos, no exactos. También permite aprovechar modelos parciales o incompletos, por ejemplo una base de reglas no exhaustiva. Para terminar los elogios a los controladore borrosos señalar que permiten controlar con relativa facilidad sistemas altamente no lineales.

Con esta técnica se ha logrado por ejemplo controlar enteramente un pequeño helicóptero con los numerosos sensores, actuadores y problemas de estabilidad y respuesta en tiempo real que ello conlleva. Problema muy complicado de abordar con los enfoques tradicionales.

Para la misma planta pueden integrarse varios controladores de este estilo, cada uno válido para una zona de trabajo y tener un supervisor que elije en cada situación el controlador más adecuado. De este modo se amplía el rango de validez del controlador conjunto. También puede complementarse el controlador borroso con algoritmos genéticos que por ejemplo permitan al controlador adaptarse a los cambios en la planta de modo que se van creando y seleccionando nuevas reglas que se adecúen mejor al modo como la planta se comporte en cada momento.

Queda mucho por hacer.

Dentro de estas técnicas de control inteligente no se han desarrollado aún las herramientas sistemáticas de análisis y/o síntesis que respondan a preguntas como estabilidad del sistema, convergencia del control, etc con la misma precisión que las técnicas análogas en el campo del control tradicional. Estas herramientas de análisis serían muy deseables para la fiabilidad y comercialización de estas nuevas técnicas.

Otra de las asignaturas pendientes es la integración ordenada y armónica de pequeños controladores en una arquitectura, un conjunto más completo, de manera que se mantengan ventajas como el manejo de modelos imprecisos, la adaptabilidad y se dé una respuesta al problema de la coordinación. Por ejemplo a la hora de diseñar un robot móvil hay que dar cuenta de multitud de cuestiones, al menos tantas como posibles actuadores, de un modo coordinado. Hay que recordar que este es un tema no resuelto bajo el enfoque tradicional, al cual se le han apuntado soluciones desde del control inteligente como la integración fuzzy de los resultados de varios controladores sobre la misma variable de control y la supervisión (controladores de controladores).

III. Conclusiones

La primera conclusión es la de la prudencia y el eclecticismo. Quizá sea bueno mirar estas técnicas de control inteligente como un paso más en la evolución de los sistemas de control que ha ideado el hombre, como un enriquecimiento sobre las convencionales que aún siguen siendo vigentes para muchas situaciones. No hay que olvidar que no siempre tenemos problemas inabordables con los métodos clásicos y cuando estos son aplicables dan muy buenos resultados, siendo rápidos y precisos.

Inteligente quizá sea una palabra demasiado ambiciosa para estas nuevas formas de control, pero es innegable que a parte de constituir otra forma radicalmente distinta de pensar el control exhiben muchas ventajas que superan las dificultades del control tradicional para sistemas muy complejos, con incertidumbre, o para el diseño de controladores con alto grado de autonomía.

Por último reseñar que *estas nuevas técnicas están todavía en su infancia* y si bien constituyen un esfuerzo por superar limitaciones, han abierto un enorme campo de necesidades aún por satisfacer como el diseño sistemático de controladores, el estudio de la estabilidad y la convergencia con estos métodos. La tarea de integración de varios controladores en un sistema más completo y su coordinación sigue pendiente de nuevas soluciones.

Referencias

1. Borrador de Paul Miller sobre redes recurrentes aplicadas a movimiento con motores. http://www-psych.stir.ac.uk/~pim/documents/outline1/outline1/outline1.html
2. P.J.Antsaklis, K.M.Passino, S.J.Wang, *"Towards intelligent autonomous control systems: architecture and fundamental issues"*, Journal of intelligent and robotic systems 1, 315-342, 1989. Kluver Academic Publishers.
3. K.M.Passino, *"Intelligent control for autonomous systems"*, IEEE Spectrum ,55-62, June-1995
4. Borrador del informe final del Technical Committee on Intelligent Control. Antsaklis P.J., Albus J.S., Meystel A. and others. Arquitectures for intelligent control system discussion list. December 1993.