

Supervisión de controladores heterogéneos para sistemas dinámicos no lineales.

Trabajo de investigación del:
**Programa de Doctorado en Ingeniería en Informática Industrial/
Tecnologías Avanzadas de Control.**

Realizado por: **Albert Figueras Coma.**

Dirigido por: **J.L. de la Rosa y J. Colomer.**

**Departament d'Electrònica, Informàtica i Automàtica.
Universitat de Girona.
Julio 2001**

Índice General

1	Introducción	2
2	Motivación	4
3	Estado del arte	6
3.1	Inicios	6
3.2	Supervisión	7
3.3	Estado actual	8
3.4	Situación del trabajo	13
4	Propuesta	14
5	Aplicación	19
5.1	Introducción	19
5.2	Plataforma de ensayo	22
6	Resultados	26
7	Conclusiones	29
8	Trabajo futuro	32
	Bibliografía	34

Capítulo 1

Introducción

La finalidad del control es conseguir el valor deseado de la variable de salida de un proceso mediante la variación de la señal de entrada en el mismo proceso, siguiendo unos criterios definidos (estabilidad, precisión, rapidez, etc). La teoría de control clásica ha estado ampliamente desarrollada y usada para el desarrollo de controladores para modelos lineales invariantes en el tiempo (LTI). Si en la práctica nos encontramos con que los sistemas LTI tienen pequeñas incertidumbres en un amplio margen de trabajo, se puede aplicar dicha teoría clásica utilizando un solo controlador lineal. El diseño de dicho controlador puede hacerse mediante distintas técnicas, muchas de ellas basadas en una representación matemática precisa del sistema (modelo).

El controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID) es en la práctica el controlador más usado, resolviendo acerca del 90% de los problemas de control, adoptando gran variedad de formas de implementación dependiendo del sistema y de los objetivos requeridos.

Sin embargo, en la mayoría de los casos, los sistemas que nos encontramos son variables en el tiempo, y no lineales, con lo que encontrar un modelo matemático preciso que describa todo el régimen de funcionamiento es muy difícil o imposible, debiendo optar por nuevas teorías de control. Diferentes tipos de modelos han estado investigados para incrementar la potencialidad del control: parámetros variables en el tiempo, ecuaciones no lineales, etc. Sin embargo las técnicas adaptativas necesitan que los parámetros no varíen de forma veloz para que los algoritmos de control sean válidos. Además los métodos de control no lineal son poco frecuentes debido a la necesidad de un modelo muy preciso del proceso.

Cuando en los sistemas las incertidumbres son grandes, los sistemas son no lineales y variantes, debido a cambios en la dinámica de la planta, y a cambios continuos en las especificaciones del controlador, un solo controlador

lineal con parámetros fijos no es idóneo para una regulación satisfactoria.

En estos casos, una buena solución es una estructura de control cambiante en respuesta a los cambios dinámicos de la planta. Si los cambios de la planta pueden predecirse con anterioridad o pueden detectarse cuando ocurren, un controlador "gain scheduling" a menudo es suficiente. En el "gain scheduling" se utiliza una estructura de control donde un conjunto de controladores lineales homogéneos son conmutados entre ellos a medida que el sistema no lineal se mueve por los distintos estados. El "gain scheduling" ha estado ampliamente estudiado por distintos autores. Un trabajo en este sentido fue desarrollado por Morse [38], el cual estableció las condiciones de conmutación para garantizar la estabilidad del sistema. Si los cambios en la planta no pueden ser predichos o no se pueden detectar, la selección o la sintonización "on-line" de controladores puede ser una solución. El problema de la sintonización "on-line" radica en que necesita un tiempo relativamente demasiado grande respecto a la dinámica del sistema cuando su aplicación es en sistemas muy dinámicos y cambiantes.

Este trabajo está estructurado de la siguiente forma, en el capítulo 2 se explica la motivación de realizar este trabajo, que es aplicar una estructura de control a un entorno muy dinámico como es el juego de fútbol robotizado. El capítulo 3 trata del estado del arte de la supervisión de controladores, desde sus inicios, hasta el estado actual. En el capítulo 4 está descrita la propuesta de tesis, en el capítulo 5 una aplicación de dicha propuesta, siguiendo el capítulo 6 con los resultados obtenidos. En el capítulo 7 están las conclusiones y en el capítulo 8 se plantea el trabajo futuro a seguir.

Capítulo 2

Motivación

Existe una plataforma de experimentación llamada RoboCup (Robot World Cup Initiative) cuya finalidad en su creación fue dotar a los científicos de una plataforma para promover la investigación en robótica y en técnicas IA. La idea de los robots jugando a fútbol fue propuesta por primera vez por el profesor Alan Mackworth de la universidad británica de Columbia (Canada) en 1992 llamándose dicho proyecto [41] [42] [43]. De dicho proyecto surgieron las ideas iniciales que llevaron a la creación de la RoboCup. Hoy en día el profesor Mackworth sigue trabajando en temas relacionados con el fútbol robótico [44].

Independientemente un grupo de investigadores japoneses organizaron en Tokio un "workshop" en octubre de 1992 llamado "Grand Challenge in Artificial Intelligence" para discutir posibles plataformas para usar como test en Inteligencia Artificial. En junio de 1993 fue propuesto seriamente el fútbol para promover la ciencia y la tecnología. Los principales investigadores que propusieron tal evento fueron Minoru Asada, Yasuo Kuniyoshi y Hiroaki Kitano los cuales además decidieron extender tal evento internacionalmente llamándolo RoboCup. La primera iniciativa de la RoboCup fue una competición de 8 equipos en simulación en noviembre de 1996 en la "International Conference On Intelligence Robotics and Systems" (IROS-96) en Osaka. Los primeros juegos oficiales de la RoboCup y la primera conferencia fue en 1997 en Nagoya donde 40 equipos en distintas categorías compitieron entre si (equipos de juego real y de simulación). Luego vinieron las competiciones de RoboCup-98 en París, RoboCup-99 en Stocolmo y RoboCup-00 en Melbourne y la próxima RoboCup-01 en Seattle.

Esta plataforma actualmente mueve proyectos con alrededor de 1000 investigadores de 20 países. La función principal de la fundación RoboCup es organizar conferencias y competiciones anuales para fomentar la discusión

y la colaboración entre los distintos laboratorios y corporaciones científicas participantes.

La competición de fútbol robótico RoboCup consiste en un torneo las normas del cual se basan en el fútbol real pero donde los jugadores son robots móviles. Dicha competición es una plataforma idónea para trabajar en diferentes tecnologías que envuelven la robótica y la IA, incluyendo diseño de agentes autónomos, estructuras multi-agente, colaboración multi-agente, razonamiento en tiempo real, inteligencia en robots, nuevas estructuras de control, sensorización, etc. Los detalles de dicha competición se pueden ver en la página oficial de la RoboCup: (<http://WWW.robocup.org>).

El control de los robots móviles en este escenario es un caso específico de control dinámico donde se requiere una estructura de control adecuada al entorno. En recientes competiciones diferentes equipos han aplicado diferentes estructuras jerárquicas de control. RogiTeam [36][37] es un equipo desarrollado en la Universitat de Girona que usa una estructura distribuida de control, desde el control a nivel local hasta un supervisor agente a un nivel superior.

Capítulo 3

Estado del arte

3.1 Inicios

Hace unos cuarenta años T.B. Sheridan [1] introdujo el concepto de "Supervisory Control" en el cual el control es ejercido por un controlador inteligente bajo la supervisión de una persona en un proceso de control continuo, en lugar de una persona ejerciendo sola el control manual. En el control manual a igual que en el control supervisado, el operador tiene que disponer de información interna del sistema para controlar las tareas a realizar y las perturbaciones a compensar.

Los primeros pasos en control supervisado se dirigieron básicamente en servir de soporte al operador en la toma de decisiones respecto a cambios en la planta o sistema, dando la información necesaria cuantitativa y después cualitativa del sistema, siendo aun la persona indispensable en las tareas de supervisión, sobre todo en lo que refiere a la seguridad de los procesos industriales[2][3]. El hecho de que la supervisión no presentara un modelo matemático, como en el caso del control automático donde gracias al modelo del sistema diferentes técnicas de control han aparecido, hacía imposible la supervisión automática de un proceso, sin la presencia de una persona.

Hoy en día el control supervisado *automático* puede ser modelado y estudiado dentro de un contexto general de control, con lo que es apto para tratar situaciones que conlleven detección de fallos, diagnosis de mal funcionamiento, y decidir en consecuencia cambios correctores en la estructura del control. La finalidad última de la supervisión es reemplazar totalmente a la persona en las tareas de control. Técnicas IA basadas en sistemas expertos se valen del conocimiento del sistema a supervisar, para generar reglas, para suplir al operador en las tareas de supervisión. En los trabajos hechos por M. Samaan[4]y M. Martínez [5] se habla de supervisión de control adaptativo, donde se implementa un sistema experto que supervisa un control

adaptativo, en un tercer nivel por encima del primero, asociado al bucle de control tradicional y del segundo asociado al control adaptativo.

Bajo esta premisa de reemplazar al operador humano de las tareas de supervisión se sitúa la supervisión de controladores, donde un supervisor decide si un objetivo de control bajo unas especificaciones se puede conseguir o no, con anterioridad a su ejecución para agilizar el control.

3.2 Supervisión

Este trabajo de investigación trata de la supervisión de controladores y está orientado a la parte del conocimiento de las capacidades de los controladores a nivel local para los robots móviles.

Entendemos por supervisión de procesos el aprovechamiento de toda información disponible para detectar y diagnosticar situaciones de comportamiento de un proceso y actuar en consecuencia con el propósito de mantenerlo dentro de sus especificaciones.

Como proceso se entiende una planta (conjunto de variables) controlada con el propósito de responder a unos objetivos concretos. Los procesos se clasifican según la naturaleza de sus variables:

Procesos a Eventos Discretos son aquellos en que todas sus variables son discretas, como por ejemplo células de producción con una organización secuencial de tareas activadas por dichas variables.

Procesos Continuos en los que las variables son todas continuas es decir son lecturas de magnitudes físicas que definen el comportamiento del proceso y son utilizadas para su regulación. Se miden de forma continua y permiten actuar de forma continua sobre el proceso de acuerdo con leyes de control pre-establecidas.

Procesos Híbridos son los procesos que tienen variables continuas y discretas. Las interacciones entre unas y otras son constantes y forman parte del proceso.

En un proceso industrial los PLC, y reguladores ejecutan sus tareas de control mientras que en un nivel superior el ordenador de supervisión se encarga de la vigilancia y seguimiento del proceso y de los controladores.

Así pues el objetivo de la supervisión es el mantener el funcionamiento del proceso dentro de los objetivos de producción incluso en situaciones de anomalía. Para ello se parte del aprovechamiento de todo conocimiento disponible sobre un proceso con el fin de verificar su correcto funcionamiento y corregir las posibles divergencias[6][7][8].

La supervisión comprende tres etapas básicas:

- Detección de fallos, para detectar la presencia de una situación anormal respecto al funcionamiento correcto del proceso.
- Diagnóstico, para determinar el origen de la situación del fallo.
- Reconfiguración, que conlleva acciones correctoras (cambio de consignas, ajuste de parámetros, órdenes de actuación, cambio de estructuras de control, maniobras, etc.) y su seguimiento para preservar los objetivos de funcionamiento del proceso.

Es a partir de este punto en que se habla de reconfiguración hecha por el supervisor donde se sitúa este trabajo. Esta reconfiguración conllevará un cambio de consigna para el controlador. En la mayoría de las veces no necesariamente este cambio de consigna será debido a un fallo, sino que vendrá impuesto por la dinámica del proceso a controlar, el cual necesitará de cambios frecuentes en la consigna. Además este trabajo se centrará en la supervisión de controladores aplicados en procesos continuos, analizando la capacidad de dichos controladores.

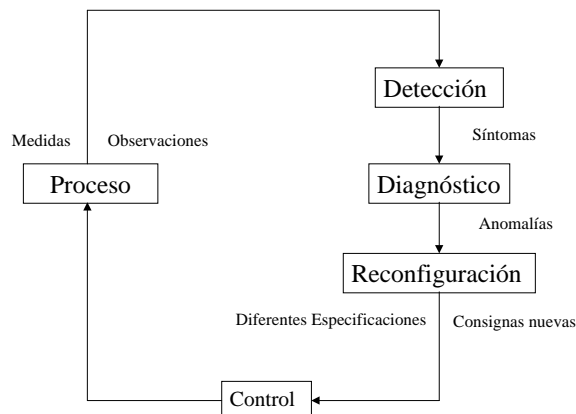


Figura 3.1: Supervisión de procesos.

3.3 Estado actual

En la teoría clásica para conseguir establecer el sistema a la consigna requerida por una persona o por un programa informático (supervisor) se utiliza un solo controlador que cumpla con las distintas especificaciones. Esto conlleva a un compromiso entre las distintas especificaciones en el momento de sintonizar el controlador, con lo cual no se consigue cumplir enteramente con la función de coste representativa de las especificaciones. En los últimos años

han aparecido distintas técnicas de control que se basan en utilizar varios controladores, conmutando entre ellos, para el control de la planta, ya sea para minimizar una función de coste según una especificación, o varias según diferentes especificaciones, consiguiendo un mejor rendimiento en el sistema.

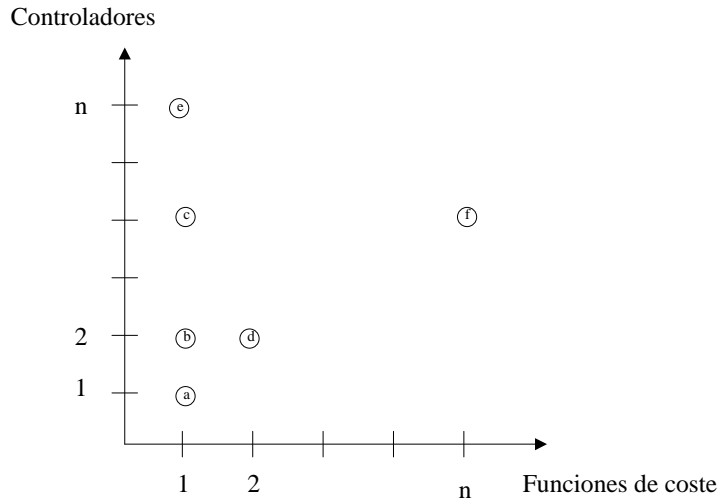


Figura 3.2: Clasificación según número de controladores y funciones de coste.

Una clasificación de las distintas estructuras de control utilizadas, donde se puede encontrar un supervisor de controladores, es según el número de controladores y las distintas funciones de coste a minimizar, ver figura 3.2.

Grupo a. Es el que concierne a un solo controlador y una sola función de coste (3.1). Aquí entrarían las técnicas clásicas de control, donde un solo controlador se sintoniza para cumplir con una especificación de control.

$$J(c, T) = x^*(T)Px(T) + \int_0^T x^*(t)Q(t)x(t)dt + \int_0^T u^*(t)R(t)u(t)dt \quad (3.1)$$

Otras técnicas especiales utilizan el control óptimo para minimizar una determinada función de coste. Por ejemplo minimizar la función de coste de tiempo mínimo puede dar lugar a un controlador bang-bang, el cual aplica el valor máximo de la variable de control posible, y cambia el signo de la señal de control en función de una curva llamada curva de conmutación. Otros ejemplos dan lugar al control llamado "sliding mode", en el artículo [9] W. Gao realiza un tutorial de dicho control. En [10] W. Gao lo aplica

en sistemas no lineales, y analiza su característica de robustez respecto a la variación de parámetros del sistema y a perturbaciones externas. Dicho control para sistemas de segundo orden es parecido al control bang-bang, dando lugar a dos valores de la variable de control de distinto signo, conmutando en función de una curva de conmutación. Para sistemas de segundo orden el método del plano de fase es adecuado para encontrar la curva de conmutación en la cual debe cambiarse el signo de la señal de control.

Grupo b. Concierne a dos controladores y a una función de coste a minimizar. El control bang-bang [12] se puede considerar también como si de dos controladores constantes de distinto signo se tratara (+U y -U) siendo un controlador de tiempo óptimo. La ventaja respecto a un proporcional (P) está en que el sistema es accionado con toda la potencia disponible, en un signo o en otro, desplazando así el sistema de un estado a otro en un tiempo mínimo y no de manera proporcional como haría un P.

Grupo c. Se utilizan varios controladores con una sola función de coste a minimizar, Kolmanovsky y Gilbert [17][18] y T.Zanma [19] trabajan con sistemas en los que se tienen restricciones en el estado y en la señal de control. En este caso con un solo controlador que no viole las restricciones no se consigue un buen rendimiento del sistema. Como ejemplo de esta situación, sea cualquier sistema donde el actuador tiene un límite natural en la señal de control. Por ejemplo supongamos que una válvula de control de líquidos tiene un límite de velocidad de abertura (dv/dt) del cual no se puede exceder. Si solo hay un controlador este se sintonizará para que cumpla con esta restricción, dándole una ganancia pequeña al controlador. Pero con esta limitación cuando el error es pequeño la dinámica del sistema se vuelve lenta. Por contra varios controladores con distintas ganancias como en el "gain scheduling" y conmutando de controlador dependiendo del error, se consigue un mejor rendimiento total del sistema.

Grupo d. Otro grupo muy común es cuando se tienen dos funciones de coste a minimizar junto con dos controladores. Cada controlador está sintonizado con una función de coste, y se conmuta de un controlador a otro dependiendo de que función de coste es la prioritaria en ese momento dependiendo del estado de la planta.

Un ejemplo de estructura de control basada en este principio muy utilizado en la práctica industrial, es cuando se quiere rapidez y precisión en la realización de un objetivo. Tradicionalmente el operador conmuta a un

control manual cuando se empieza el control del proceso o frente a cambios de la consigna y luego conmuta a control automático cuando el sistema está cerca del valor deseado. Una mejora de este principio consiste en una estructura de dos controladores, que se conmutan entre ellos dependiendo de la distancia del estado de la planta respecto al valor final deseado. Uno sirve para acercar la variable controlada rápidamente al valor deseado por ejemplo mediante un controlador Proporcional o un controlador óptimo de tiempo mínimo y el otro para trabajar cerca del valor deseado mediante un controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID), consiguiendo de esta manera rapidez frente a los cambios de consigna y precisión en el valor final deseado. En [40] se utiliza esta técnica diseñando dos controladores, un controlador óptimo de tiempo mínimo y un controlador PID para la regulación de un proceso de calefacción/ventilación.

Grupo e. Que trabajen con una sola función de coste a minimizar pero trabajando con muchos controladores hay varios grupos clasificados según el objetivo a conseguir.

En plantas con perturbaciones y incertidumbres, varios controladores se utilizan en control adaptativo. Diferentes autores trabajan con conmutación de controladores entendiéndola como una variante del control adaptativo clásico. Destaca por su amplio trabajo en el tema de la conmutación de controladores A.S. Morse [38][22][23][24]. Utiliza estructuras de varios controladores similares y normalmente lineales, la conmutación entre ellos está gobernada por un controlador de un nivel superior llamado supervisor. Éste orquesta la conmutación comparando continuamente en tiempo real la estimación del error en cada controlador mediante predictores individuales para cada uno y colocando al que tenga menos error en la predicción en el bucle cerrado. Este tipo de control tiene cierta semejanza al control adaptativo de parámetros. Los mismos autores prueban la robustez con sistemas con incertidumbres y con perturbaciones. En [25][26][27] también se trata el tema de la conmutación de controladores desde el punto de vista de control adaptativo.

Muchos autores han estudiado la estabilidad en sistemas con conmutación de controladores. D. Liberzon en [28] busca dar estabilidad a sistemas con perturbaciones no lineales mediante la conmutación entre diferentes controladores. En este artículo se trata el problema de la estabilidad en tres puntos: estabilidad para una secuencia de conmutación arbitraria, estabilidad para una secuencia de conmutación particular, y la construcción de una secuencia de conmutación que vuelva estable a un sistema inestable de

por si. Especial interés tiene este último punto ya que demuestra la gran utilidad de trabajar con varios controladores en lugar de la teoría tradicional de un solo controlador. En [29] R.A. Freeman utiliza una estrategia para sistemas no lineales, la cual selecciona un controlador de entre una familia parametrizada de controladores basados en funciones de Lyapunov, acercándose a la respuesta óptima respecto a una específica medida de coste escalar garantizando además la estabilidad. En [30] y [31] también se utilizan múltiples funciones de Lyapunov como herramientas para analizar la estabilidad en sistemas híbridos y conmutados. En [32] se utiliza el criterio de Popov para analizar la estabilidad del control conmutado de una planta. En [33] se derivan resultados concernientes a la estabilidad asintótica y a la convergencia exponencial al origen en un sistema "nonholonomic" usando la lógica en la conmutación entre controladores.

En otros trabajos como en [11] se utiliza la conmutación de varios controladores con la especificación de conseguir robustez en sistemas de control no lineales respecto a perturbaciones no lineales. J.P. Hespanha junto con Morse [21] utilizan la idea de la conmutación, con el objetivo de tener robustez junto con buen rendimiento. Aplicando dicha idea en el control de un misil, con varios controladores donde mayor rendimiento significa menor robustez. Se selecciona en todo momento al de mejor rendimiento posible, junto con la mayor robustez enfrente de la incertidumbre.

En sistemas de control no lineales también se utiliza la conmutación de controladores para conseguir aumentar el dominio de atracción. Esta idea se puede ver en [11][13] donde se tienen varios controladores cada uno localmente asintóticamente estable. Cada punto de equilibrio tiene un controlador y un dominio de atracción asociado con el bucle de control y no es posible ir con un simple controlador, de un punto de equilibrio a otro, ya que en el dominio de atracción del punto final no está incluido el punto inicial de equilibrio. La solución es conmutar entre controladores y así crear una trayectoria entre puntos de equilibrio cercanos.

También se puede considerar la linealización por trozos de sistemas no lineales utilizando distintos controladores, cada uno para una zona linealizada. Luego la conmutación entre los distintos controladores se hará en función del estado del sistema [14][15][16].

Otro tipo de control ya comentado es el "Gain Sheduling" utilizado en sistemas no lineales el cual utiliza varios controladores teniendo éstos diferentes ganancias [20]. La conmutación entre ganancias es utilizada cuando se trabaja con diferentes condiciones de operación analizadas por ejemplo con la señal de entrada. La problemática está en hacer bien la transición entre

controladores ya que sino puede traer como consecuencia largos transitorios, discontinuidades no deseadas y inestabilidad al sistema.

3.4 Situación del trabajo

Grupo f. Utilizar varios controladores junto con varias especificaciones de control, no se encuentra en la literatura y es la finalidad de este trabajo. La estructura de control podrá ser similar a los trabajos de Morse [38], Kolmanovsky [18] o a Narendra [39], donde hay un conjunto de controladores homogéneos y un supervisor que orquesta su conmutación. Una característica en común es el utilizar varios controladores, como en el caso del "gain scheduling" [20] por ejemplo cada uno para cumplir con las especificaciones en una región particular del sistema o en control adaptativo de sistemas no completamente identificables [38][39]. La mayor diferencia estará en trabajar con múltiples controladores heterogéneos, y en pedirles a éstos distintas especificaciones.

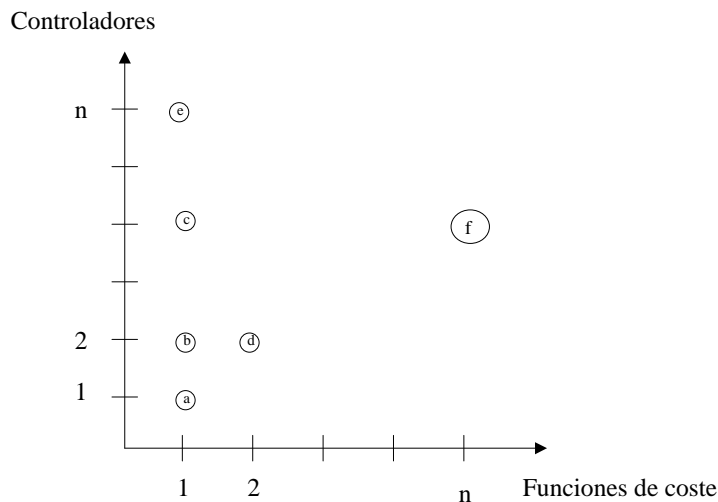


Figura 3.3: Situación del trabajo respecto el estado del arte.

Capítulo 4

Propuesta

Un sistema dinámico implica que los controladores tengan que cambiar de consigna con suma frecuencia y con especificaciones variadas y no predecibles con anterioridad. Dicho sistema tiene que moverse con diferentes trayectorias en el plano de fase, con diferentes especificaciones, pedidas por un supervisor encargado de la generación de las trayectorias.

Cuando se tienen sistemas dinámicos y complejos se necesita crear una estructura de control adecuada al entorno.

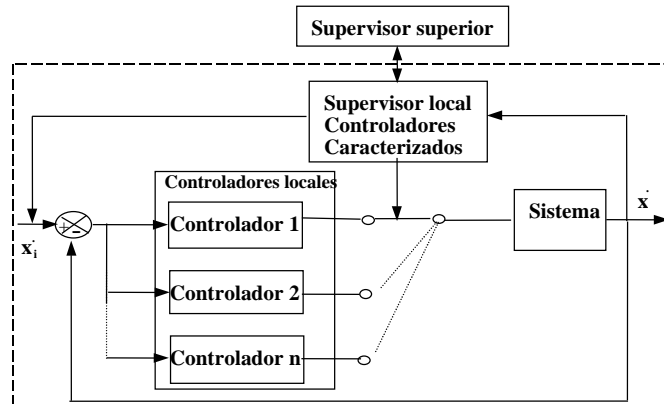


Figura 4.1: Estructura de control jerárquica.

Para solucionar tales requerimientos, se propone organizar la estructura de control de manera jerárquica desde los controladores locales hasta el agente supervisor (supervisor superior), tal como se puede ver en la figura 4.1. En dicha estructura jerárquica habrá un supervisor en un nivel superior encargado de la planificación de las trayectorias $x^* - x$. A nivel local, en el sistema compuesto por varios controladores, habrá otro supervisor el cual

tendrá los controladores caracterizados.

El supervisor del nivel superior sugiere una trayectoria con unas especificaciones dependiendo del objetivo requerido sobre el sistema a controlar. Un protocolo entre este supervisor del nivel superior y el supervisor local es necesario para validar la ejecución de la trayectoria deseada. Una serie de controladores son necesarios para controlar el sistema bajo diferentes especificaciones.

$$\sum_{con} = [c_1 \ c_2 \ \dots \ c_n] \quad (4.1)$$

Donde c_1, c_2, \dots, c_n sean un grupo de controladores diseñados con diferentes especificaciones, como por ejemplo tiempo mínimo, mínimo coste energético, precisión final y otras especificaciones compuestas por éstas.

Estas funciones de coste pueden describirse como:

1. Tiempo mínimo de ejecución de una trayectoria.

Función de coste aplicada:

$$J(t) = \int_{t_0}^{t_f} dt \text{ Donde } t_f \text{ es el tiempo a llegar al punto final.}$$

2. Tiempo fijo a ejecutar una trayectoria.

Función de coste aplicada:

$$J(t) = \int (t - t_f)^2 dt \text{ Tiempo exacto a llegar al punto final.}$$

3. Precisión en el punto final de la trayectoria a ejecutar.

Función de coste aplicada:

$$J = \int_{t_0}^{t_f} X_f^T Q X_f dt \text{ Donde } Q \text{ es una matriz semi-definida positiva.}$$

4. Precisión en la ejecución de la totalidad de una trayectoria.

$$\|e(\omega)\|_{\infty} = \text{Sup } |e(\omega)|, \|e(\omega)\| \leq k$$

Donde $e(\omega)$ es el error de la trayectoria de referencia y Sup es el supremo del error.

La aplicación de estas cuatro funciones de coste proporciona un mínimo de cuatro controladores. Otros controladores de que dispondrá cada robot serán combinaciones de entre dos funciones de coste con diferentes pesos, resultando un mínimo de seis nuevos controladores.

A priori no hay posibilidad de tener conocimiento de las especificaciones de control pedidas por el supervisor, ya que serán combinaciones de las

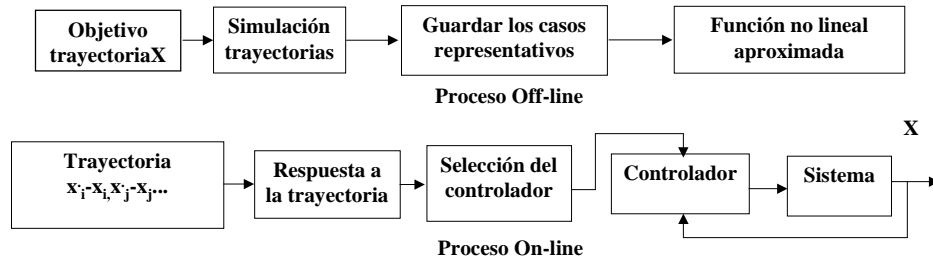


Figura 4.2: Metodología de trabajo.

cuatro clásicas mencionadas anteriormente y con peso proporcional variable entre ellas. Esto imposibilita una sintonización de los controladores a priori para cada especificación. Además la no linealidad del sistema impide extrapolar el comportamiento del sistema en puntos no analizados, por lo que se requiere una gran cantidad de puntos representativos a analizar. El esfuerzo computacional grande que lleva el analizar tan gran cantidad de datos además de los requerimientos de tiempo real que se necesitan fuerzan a realizar un análisis previo a su ejecución.

Con tales premisas se propone una metodología que se base en un estudio previo " off-line " para la caracterización de cada controlador, de tal manera que cuando se esté " on-line " se pueda aplicar tal caracterización para la supervisión de los controladores. La metodología a seguir es la descrita en la figura 4.2.

Las subtareas a realizar son las siguientes:

Off-line:

1. *Objetivo trayectoria X:*

Los objetivos son propuestos para identificar el comportamiento del sistema.

2. *Simulación de trayectorias:*

Una cuadrícula uniforme con condiciones iniciales y finales es generada para simular todas las posibles condiciones.

3. *Guardar los casos representativos:*

La gran cantidad de resultados generados son filtrados para tener solamente los límites espaciales de las áreas positivas y negativas de realización de las trayectorias, para así guardar la menor información posible.

4. *Función descriptiva:*

Todos los casos afirmativos son aproximados mediante una función descriptiva.

On-line:

5 *Trayectoria $x_i-x_i, x_j-x_j...$:*

El supervisor superior decide ejecutar una trayectoria bajo X especificaciones. Para tal, los parámetros $x_i-x_i, x_j-x_j...$ son enviados al sistema.

6 *Respuesta a la trayectoria:*

El supervisor local busca el caso propuesto en el mapa espacial generado para responder afirmativamente si hay algún controlador capacitado para ejecutar tal trayectoria.

7 *Selección del controlador:*

Los controladores son evaluados con su función descriptiva encontrada en el punto 4, para determinar a priori su respuesta. Esto significará seleccionar la mejor respuesta y por lo tanto al mejor controlador.

8 *Controlador:*

Se aplicará en el sistema el mejor controlador para cada acción propuesta.

Este proceso " on-line " será repetido, para cada acción necesitada.

La metodología a aplicar tiene cierto paralelismo con la conmutación de controladores por la estructura de control como en [38]. Las diferencias

están en que éstos se basan en una estructura con un conjunto de controladores similares y la conmutación es dinámica en función del error actual predicho para conseguir el objetivo deseado ya sea estabilidad, robustez, adaptabilidad, etc.

Por el contrario los requerimientos deseados en este trabajo, implican varias funciones de coste: tiempo mínimo, tiempo exacto, precisión en el punto final, pero además combinaciones de éstas, como por ejemplo que el sistema vaya de un punto inicial $x_{i0} - x_{i0}$ a otro punto final $x_{if} - x_{if}$, en un tiempo mínimo de 5 segundos y con una precisión no menor del 10% de error final. Con lo que los controladores serán diferentes y además la conmutación entre controladores será debida a los cambios de consignas que impondrá el supervisor del nivel superior, debido a las condiciones del entorno dinámico y no como en [38] al error actual predicho para cada controlador.

Capítulo 5

Aplicación

5.1 Introducción

Tal como se ha dicho con anterioridad la robótica móvil en escenarios dinámicos es un caso típico de dominio de control donde se necesitan varios controladores con distintas especificaciones. La metodología descrita en el capítulo anterior se aplicará por lo tanto a los robots móviles y en concreto en el equipo RogiTeam de la Universitat de Girona participante en la RoboCup.

Para aplicar la metodología, donde la primera fase se basa en una caracterización " off-line " de los controladores locales en los robots móviles, se trabaja con un modelo dinámico del robot.

Descripción del robot: Consideramos el robot móvil que está constituido por una plataforma rígida con dos ruedas idénticas de radio R tal como se ve en la figura 5.1. Estas dos ruedas están fijadas en medio de la plataforma con el mismo eje de rotación y están gobernadas por dos motores de CC. Hay una tercera rueda, la cual no tiene ningún motor que la gobierne, pudiendo ser una rueda libre o una esfera, y se asumirá que el efecto dinámico de esta rueda es despreciable.

El modelo dinámico ha sido derivado de la ecuación de LaGrange y de la teoría de sistemas mecánicos "nonholonomic".

El robot móvil está completamente descrito por el siguiente modelo [34][35]:

$$M\dot{q} + h(q)\dot{q} + F_{fr}(\dot{q}) = T \quad (5.1)$$

donde $q = [q_1 \ q_2^T]$, es la posición rotacional de las ruedas, \dot{q}, \ddot{q} son dos vectores de (2×1) de la velocidad rotacional y de la aceleración rotacional respectivamente y

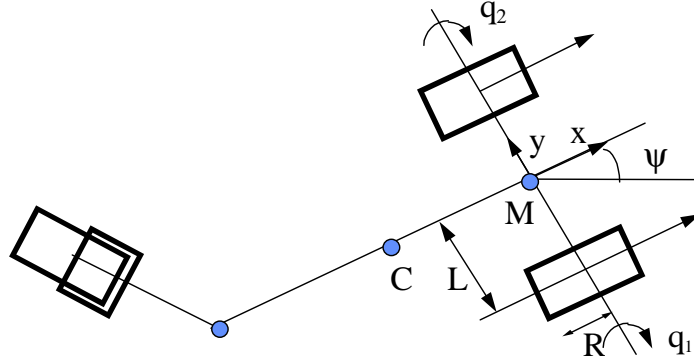


Figura 5.1: Robot móvil.

$T=[T_1 \ T_2]^T$, son los vectores del par motor.

M es una matriz simétrica positiva (2x2) definida por:

$$\begin{aligned}
 M_{11} &= \frac{R^2}{4}m_p + \frac{R^2}{4L^2}I + R^2m_w - \frac{R^2}{2L}m_p y_c + I_{rw} \\
 M_{12} &= \frac{R^2}{4}m_p - \frac{R^2}{4L^2}I + \frac{R^2}{2}m_w \\
 M_{22} &= \frac{R^2}{4}m_p + \frac{R^2}{4L^2}I + R^2m_w + \frac{R^2}{2L}m_p y_c + I_{rw}
 \end{aligned} \tag{5.2}$$

y $I=I_0+2m_wL^2+m_p(X_c^2+Y_c^2)$

$h(q)$ es una matriz (2x2) definida por:

$$\begin{aligned}
 h_{11} &= h_{22} = 0 \\
 h_{12} &= -h_{21} = (q_1 - q_2) \frac{R^3}{2L}m_p Y_c
 \end{aligned} \tag{5.3}$$

Los coeficientes de las matrices M y h dependen de los siguientes parámetros:

m_p : masa de la plataforma incluyendo motores, baterías y tarjeta de control,

m_w : masa de las ruedas ($j=1,2$),

x_c, y_c : coordenadas del centro de masas de la plataforma en coordenadas locales,

I_0 : momento de inercia de la plataforma incluyendo motores, baterías y tarjeta de control,

I_{rw} : momento de inercia de las ruedas j alrededor de su eje de rotación,

$F_{fr}(q) = F_v q + F_s \text{sign}(q)$: es un vector del par de fricción debido a las ruedas.

F_v i F_s son matrices diagonales, donde los elementos de su diagonal F_{vj} y F_{sj} son respectivamente el coeficiente de la fricción viscosa y el coeficiente de la fricción de Coulomb de las ruedas $j(j=1,2)$.

Como resultado para nuestro robot se tiene el modelo:

- Modelo dinámico.

$$\begin{pmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & h_1 \\ h_2 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} F_{v1} \\ F_{v2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} q_1 & q_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} F_{s1} \\ F_{s2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Gamma_1 \\ \Gamma_2 \end{pmatrix} \quad (5.4)$$

Y el modelo cinemático del robot se puede escribir de la siguiente forma:

$$P = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & 0 \\ \sin(\psi) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V \\ \psi \end{bmatrix} = B(\psi)U \quad (5.5)$$

$$U = \begin{bmatrix} \frac{R}{2L} & \frac{R}{2L} \\ \frac{R}{2L} & \frac{R}{2L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \end{bmatrix} = Dq \quad (5.6)$$

donde $P=(x, y, \psi)$

La identificación de los parámetros del robot:

$$\begin{aligned}
 F_{v1} &= F_{v2} = 0.04Nm/rad/s \\
 F_{s1} &= F_{s2} = 0.25NM \\
 M_{11} &= M_{22} = 0.5Kgm^2 \\
 M_{12} &= M_{21} = -0.1Kgm^2 \\
 x_c &= y_c = 0 \\
 R &= 1.5cm \\
 L &= 3.5cm
 \end{aligned}
 \tag{5.7}$$

5.2 Plataforma de ensayo

El escenario de juego es muy dinámico, ya que diferentes objetivos son requeridos continuamente durante un partido, como se ve en la figura 5.2.

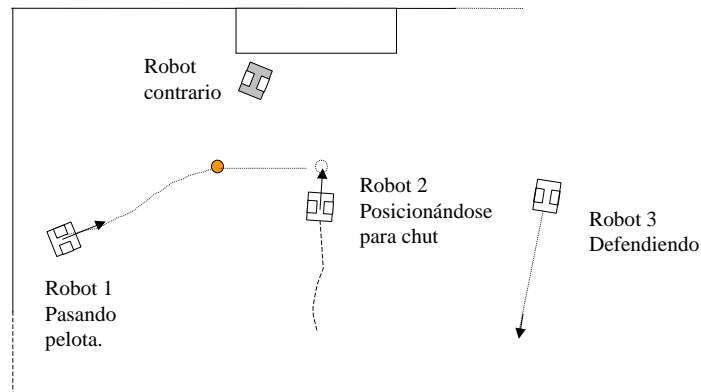


Figura 5.2: Plataforma dinámica de ensayo.

Diferentes trayectorias con diferentes especificaciones de control son pedidas por el supervisor a realizar por los robots:

- Un robot que chute a gol aplica una trayectoria concreta con las especificaciones de mínimo tiempo y de mínimo error de posición final.
- Un robot que se sitúe en un punto del campo conlleva una trayectoria con las especificaciones de tiempo exacto y mínimo error de posición final.
- Una acción en el juego robótico es el pase de la pelota a un compañero, esto conlleva una trayectoria con las especificaciones de tiempo exacto y mínimo error de posición final.

Como aplicación de la metodología general se ensaya sobre el objetivo de tiempo mínimo.

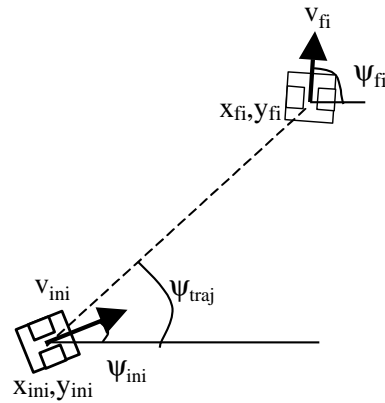


Figura 5.3: Ejemplo tiempo mínimo.

1. Objetivo trayectoria X:

Siguiendo la metodología descrita en la propuesta, se aplica a modo de ejemplo sobre el único objetivo de tiempo mínimo en ejecutar una trayectoria en el campo de juego (figura 5.3).

El controlador de posición ensayado es:

$$\begin{aligned}
 V_{lin} &= V_{ref} + k_1 * \sqrt{x_error^2 + y_error^2} \\
 V_{ang} &= \sqrt{x_error^2 + y_error^2} * k_2 * error_psi_{traj} + \\
 &\quad + (1 - \sqrt{x_error^2 + y_error^2}) * k_3 * error_psi_{fi} \quad (5.8)
 \end{aligned}$$

Donde: $x_error = X_{fi} - X$; $y_error = Y_{fi} - Y$; $error_psi_{traj} = psi_{traj} - psi$; $error_psi_{fi} = psi_{fi} - psi$; V_{lin} , V_{ang} son las consignas para el controlador PI de velocidad.

2. Simulación de trayectorias:

Una completa cuadrícula de trayectorias simuladas es realizada con el Matlab-Simulink utilizando el modelo dinámico del robot, cambiando los estados iniciales y finales. Una cuadrícula con los seis parámetros V_{ini} , V_{fi} , X_{fi} , Y_{fi} , psi_{ini} , psi_{fi} variando dentro de los valores posibles

Tabla 5.1: Intervalos de los seis parámetros para crear la cuadrícula de resultados

Parámetros	Intervalos
V_{ini}	0–32cm/s
V_{fi}	0–32cm/s
X_{fi}	25mm–300mm
Y_{fi}	25mm–200mm
ψ_{ini}	0–pi/2rad
ψ_{fi}	0–pi/2rad

dan un total de 104000 simulaciones sobre el modelo especificado y con el controlador no lineal. Los valores en que varían los seis parámetros y con los que se ha creado la cuadrícula se pueden ver en la tabla 5.1.

3. Guardar los casos representativos:

Un filtro espacial es aplicado sobre los 104000 resultados generados en el paso anterior, para guardar sólo las zonas representativas de posibilidad positiva o negativa de realizar la trayectoria. Dicho filtro consiste en eliminar por zonas los casos redundantes y quedarse así solamente con los límites de las áreas representativas. El filtro reduce el número de casos aproximadamente a 10000.

4. Función no lineal aproximada:

A partir de todos los casos afirmativos de ejecución de trayectoria simulados, se obtiene una función descriptiva del tiempo a ejecutarla. Esta función no lineal es obtenida mediante el método de mínimos cuadrados no lineal. *Lsqnonlin* es una función de Matlab, la cual ajusta los parámetros de la función para que de el mínimo error cuadrático.

La función no lineal para predecir el tiempo es:

$$\hat{T} = a1 * \log(V_{ini} + 0.2) + a2 * \log(V_{fi} + 0.2) + a3 * X_{fi} + a4 * Y_{fi} + a5 * \sqrt{X_{fi}^2 + Y_{fi}^2} + a6 * \psi_{ini} + a7 * \psi_{fi} + a8 * \sin(\psi_{traj}) \quad (5.9)$$

5. *Trayectoria $V_{ini}, V_{fi}, X_{fi}, Y_{fi}, \psi_{ini}, \psi_{fi}$:*

El supervisor superior pide ejecutar la trayectoria $V_{ini}, V_{fi}, X_{fi}, Y_{fi}, \psi_{ini}, \psi_{fi}$ con lo que estos parámetros son enviados al robot.

6. *Respuesta a la trayectoria:*

Con los parámetros anteriores el supervisor local del robot aplica el mapa espacial de casos, y comunica a priori al supervisor superior si dicha trayectoria se podrá ejecutar. Si la respuesta es negativa el supervisor superior decidirá cambiar de trayectoria o de especificación.

7. *Selección del controlador*

Si la respuesta es afirmativa el supervisor local utilizará la función no lineal descriptiva del tiempo a realizar la trayectoria, para responder al supervisor superior con el tiempo predicho para un determinado controlador. En el caso de que se tenga más de un controlador posible para ejecutar dicha trayectoria, el supervisor superior escogerá el más adecuado según el objetivo requerido.

Capítulo 6

Resultados

La gran cantidad de datos guardados en cada simulación correspondientes a los seis parámetros V_{ini} , V_{fi} , X_{fi} , Y_{fi} , ψ_{ini} , ψ_{fi} y en caso afirmativo el tiempo o en caso contrario la conclusión negativa, fuerza a aplicar un filtro espacial sobre las 104000 simulaciones para guardar solo con los casos más representativos. El resultado es que se reducen el número de simulaciones a cerca de 10000 casos, que marcan los límites de las áreas, con lo que determinan la posibilidad positiva o negativa de realizar la trayectoria. La certidumbre de aplicar estos representativos casos es cerca del 95% para todas las situaciones.

Todos los casos afirmativos son aproximados por una función no lineal. Esta función no lineal es obtenida mediante el método de mínimos cuadrados no lineal. *Lsqnonlin* es una función de Matlab, la cual ajusta los parámetros de la función para que de el mínimo error cuadrático.

La función no lineal para predecir el tiempo es:

$$\begin{aligned} \hat{T} = & -0.22 * \log(V_{ini} + 0.2) - 1.72 * \log(V_{fi} + 0.2) + 0.55 * X_{fi} \\ & -0.81 * Y_{fi} + 5.42 * \sqrt{X_{fi}^2 + Y_{fi}^2} - 0.22 * \psi_{ini} - 3.5 * 10^{-5} * \psi_{fi} \\ & -0.9 * \sin(\psi_{traj}) \end{aligned} \quad (6.1)$$

Esta función aproxima el tiempo necesitado para ejecutar la trayectoria con un 0.11% de error medio mínimo cuadrático para todas las trayectorias simuladas. Cuando es afirmativa la posibilidad de realizar la acción requerida, esta función calcula " on-line " el tiempo aproximado en ejecutarla con los seis parámetros de entrada V_{ini} , V_{fi} , X_{fi} , Y_{fi} , ψ_{ini} , (condiciones iniciales y finales).

Diferentes trayectorias representativas son testeadas con este método para analizar su efectividad. Un ejemplo con ocho casos permite su representación en gráficos 2-D, agrupándolos de dos a dos componentes de los seis parámetros utilizados V_{ini} , V_{fi} , X_{fi} , Y_{fi} , ψ_{ini} , ψ_{fi} . En estos mismos gráficos son representados los casos reales y los predichos.

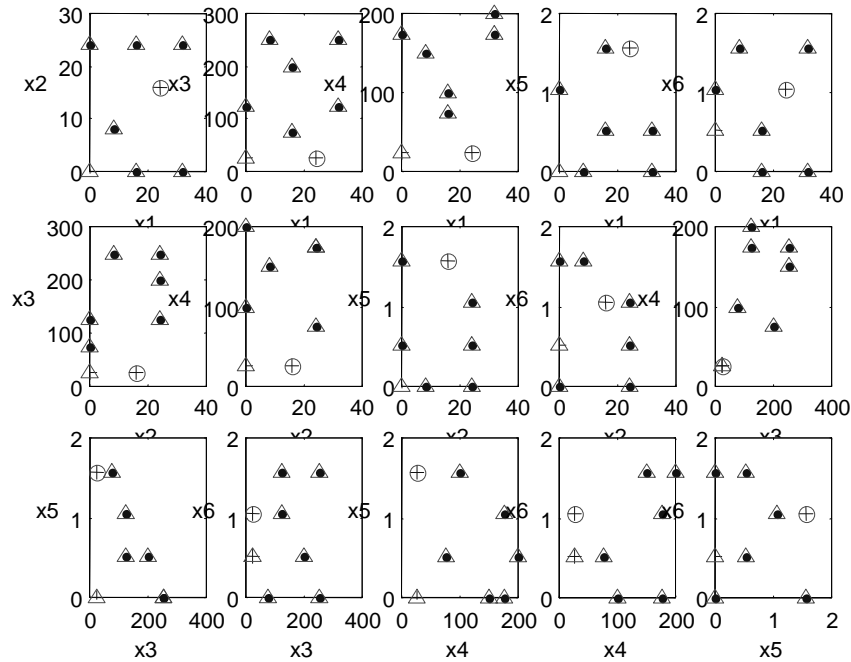


Figura 6.1: 8 trayectorias: Posibilidad de ejecución y predicción.

En la figura 6.1 los componentes x_i son los componentes i de: V_{ini} , V_{fi} , X_{fi} , Y_{fi} , ψ_{ini} , ψ_{fi} . Los símbolos punto y cruz representan respectivamente la posibilidad positiva y negativa de realizar la trayectoria con el tiempo T impuesto. Círculos y triángulos representan respectivamente la estimación positiva y negativa de realizar la trayectoria propuesta bajo las restricciones finales de precisión y de tiempo. En susodicho gráfico se puede observar un caso erróneo, un triángulo encima de una cruz indica una predicción errónea, es una realización no posible pero indicada como posible por la predicción.

En la tabla 6.1 se pueden leer los tiempos de los siete casos donde se ha predicho afirmativamente la posibilidad de realizar la trayectoria. El primer caso es la predicción errónea comentada, puesto que se puede ver que la precisión final no se logra.

Los otros seis casos son realizables, el tiempo, el ángulo final y la posición se cumplen según las especificaciones del controlador que implican que el

Casos Posición ($V_{ini}, V_{fi}, X_{fi}, Y_{fi}, \psi_{ini}, \psi_{fi}$)	trayectorias deseada	Pred.	Tiempo Ejecu- ción	Tiempo Esti- mado	Posición final ($V_{fi}, X_{fi}, Y_{fi}, \psi_{fi}$)
1. (0 0 25 25 0 0.52)		SI	3.3	3.03	(3.5 38 22.06 0.7)
2. (0 24 125 175 1.04 1.04)		SI	4.17	4.42	(23.1 118.07 167.80 0.96)
3. (8 8 250 150 0 1.57)		SI	7.23	6.80	(7.23 240.72 147.21 1.51)
4. (16 0 75 100 1.57 0)		SI	4.25	4.89	(1.25 68.49 92.48 0.04)
5. (16 24 200 75 0.52 0.52)		SI	3.91	3.95	(23.9 190.13 73.66 0.47)
6. (32 0 125 200 0.52 1.57)		SI	7.15	7.11	(0.21 119.1 191.99 1.45)
7. (32 24 250 175 0 0)		SI	5.49	5.60	(22.4 241.02 171.15 0.08)
8. (24 16 25 25 1.57 1.04)		NO			

Tabla 6.1: Tiempos de trayectorias: Tiempos reales y tiempos calculados en los casos afirmativos.

error sea menor del 10% de precisión final. Las siete trayectorias ejecutadas se pueden ver en la figura 6.2.

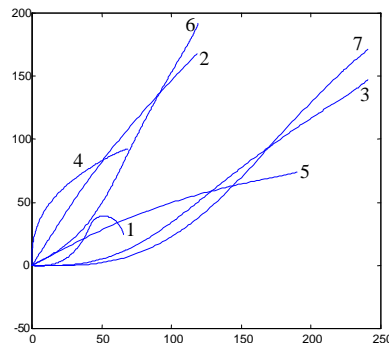


Figura 6.2: Trayectorias realizables por el robot.

La primera trayectoria es la predicción errónea la cual es imposible de ejecutar por el robot con las especificaciones de precisión en el punto final.

Con estos resultados aplicados a la plataforma de fútbol robótico, y a un controlador con la especificación de tiempo mínimo, se ha querido comprobar la validez del método general expuesto en la propuesta, ya que como se ha comentado anteriormente el entorno del fútbol robótico es muy dinámico, y los robots son sistemas no lineales.

Capítulo 7

Conclusiones

En este trabajo se ha propuesto una nueva estructura de control que conlleva una estructura jerárquica y una metodología de control especial, para aplicar a sistemas donde la dinámica sea muy importante, entendiendo por sistema dinámico aquel donde se necesite cambiar con suma frecuencia de consigna de control, sea debido por el mismo entorno físico o como corrección ante fallos en el mismo sistema.

La estructura jerárquica de control estará compuesta por un supervisor superior planificador de trayectorias y de un supervisor de controladores en el mismo sistema a controlar. El supervisor de controladores analizará de entre los controladores de que dispone el sistema, cual se ajusta más a las especificaciones pedidas por el supervisor superior. Tales especificaciones no son simples, impidiendo que a priori se tenga o se sintonice un controlador óptimo para una especificación concreta. Las especificaciones conllevan diferentes funciones de coste a minimizar y en diferente proporción, con lo que no se puede saber a priori los criterios totales de las especificaciones. Además el sistema es no lineal, con lo que no se pueden extrapolar los parámetros de un controlador en función de la proporciones deseadas de las especificaciones. Una sintonización " on-line " de los controladores conlleva un tiempo muy grande respecto a la dinámica del entorno, haciendo no operable tal método.

Se propone como alternativa un método de trabajo basado en un estudio previo " off-line " de cada controlador disponible en el sistema, dividiéndolo en varias partes:

1. La primera consiste en crear una gran cantidad de casos representativos del comportamiento del sistema con el controlador estudiado, mediante simulación.
2. Acto seguido aplicar un filtro espacial para reducir el número de casos

representativos, creando así un mapa de casos que definirá por zonas, si se puede o no realizar tal trayectoria en el plano de fase, con la especificación o especificaciones de control deseadas.

3. Con los casos afirmativos de realización de la trayectoria, se crea una función no lineal descriptiva del controlador con las especificaciones deseadas.

Luego con la ayuda de este trabajo previo, " on-line " se seguirán estos otros pasos:

1. Primero se propondrá al supervisor local una trayectoria con unas especificaciones de control. Éste mediante el mapa de casos representativos para cada controlador, contestará si se puede o no realizar dicha trayectoria.
2. Si la respuesta a la petición de trayectoria es negativa, el supervisor superior cambiará de trayectoria y o de consigna y se repetirá el paso anterior.
3. Cuando la respuesta es positiva, habrá uno o más de un controlador capaz de realizar la trayectoria, con lo que el supervisor local aplicará la función no lineal descriptiva a cada controlador capaz de realizarla.
4. Después el supervisor local escogerá al mejor controlador en función del resultado de aplicar las funciones descriptivas.

La finalidad de esta metodología es disminuir el tiempo de decisión " on-line " de escoger al controlador mejor para la especificación requerida o por el contrario avisar de que esta consigna no se puede realizar, reconfigurando si es el caso luego el supervisor superior la trayectoria y finalmente la consigna pedida al control.

La validez de dicha metodología se ha demostrado en simulación con su aplicación al fútbol robótico. Los resultados obtenidos en la aplicación desarrollada para probar la metodología propuesta se centran en realizar trayectorias con una sola función de coste, la de tiempo mínimo. Dichos resultados son esperanzadores y abren una continuidad de trabajo futuro. Un alto porcentaje de situaciones evaluadas por el mapa de casos, cerca del 95%, coinciden con la simulación, sirviendo para confirmar si se puede realizar la trayectoria desde el punto inicial (X_0, Y_0, ψ_{ini}) al punto final $(X_{fi}, Y_{fi}, \psi_{fi})$,

con la velocidad inicial (V_{ini}) y final (V_{fi}). El inconveniente de dichos resultados está en que el número de casos resultantes después de aplicar el filtro espacial es demasiado grande. En el futuro se deberá reducir dicho número de casos o aplicar otro método. Los mejores resultados están en el cálculo previo del tiempo a ejecutar la trayectoria, donde la función no lineal aproxima con una precisión del 0.11% de error medio mínimo cuadrático el tiempo real requerido para ejecutarla y además dicha función no implica un coste computacional muy grande.

Capítulo 8

Trabajo futuro

Después de los buenos resultados obtenidos en la aplicación mediante simulación de la metodología propuesta, en la plataforma de robots futbolistas, se seguirán aplicando los pasos de dicha metodología.

Lo primero a realizar consistirá en comprobar las pruebas hechas en simulación mediante experimentación. Para tal fin se utilizará el equipo robótico RogiTeam, donde se realizarán primero unas trayectorias representativas de ensayo para comprobar el tiempo y la precisión en su ejecución y poder validar mediante su comparación, la cuadrícula de resultados obtenida en simulación sobre la especificación de tiempo mínimo.

Acto seguido se deberá comprobar la aplicabilidad del método. Cuando se hayan validado los resultados obtenidos en simulación, o en caso negativo se hayan rehecho, se implementará el supervisor de controladores con una jerarquía como la expuesta en la figura 4.1, y se realizarán una serie de experimentos con los robots reales. El supervisor superior pedirá realizar unas trayectorias representativas con la especificación de tiempo mínimo a los robots, y éstos mediante su supervisor local, donde estará implementado el mapa de casos junto con la función no lineal descriptiva del tiempo predicho, decidirá primero si se puede hacer y después en caso afirmativo en que tiempo lo realizará. Un protocolo entre este supervisor del nivel superior y el supervisor local será necesario para validar la ejecución de la trayectoria deseada.

Siguiendo con la metodología propuesta se seguirá con otras funciones de coste distintas a las de tiempo mínimo, como son las de precisión al punto final y mínimo coste energético, junto con distintas combinaciones de éstas. Por ejemplo el supervisor de nivel superior pedirá al robot una trayectoria con unos valores iniciales $(V_{ini}, X_{ini}, Y_{ini}, \psi_{ini})$ y unos valores finales $(V_{fi}, X_{fi}, Y_{fi}, \psi_{fi})$ con las especificaciones de precisión en el punto final y de llegar

con un tiempo exacto.

Como conjunto de controladores para cada robot, se escogerán de otros equipos robóticos que participan en la RoboCup para comprobar el mejor resultado que implica la utilización de varios controladores y la supervisión a priori de ellos, para utilizar el mejor en todo momento. La aplicabilidad total del método deberá comprobarse finalmente en el juego robótico en la competición RoboCup.

Otro paso a realizar de suma importancia será el extender la metodología de control a otros sistemas distintos a los robots móviles, para generalizar el método y no restringirlo al fútbol robótico. Un paso previo a su extensibilidad, será aplicarlo en otros equipos robóticos diferentes del equipo robótico de Girona, para comprobar la transportabilidad del método.

Bibliografía

- [1] Sheridan, T.B. and W.R. Ferrell.: Man-Machine systems: Information, Control and Decision Models of Human Performance. *MIT Press, Mass, USA*. 1974.
- [2] M.B. Mendel and Sheridan, T.B.: Filtering Information from human experts. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*. **V. 36** 1989 6–16.
- [3] Charny, L. and Sheridan, T.B.: Adaptive goal setting in tasks with multiple criteria . *Proc. of IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*. **V. 1** 1989 237–243.
- [4] Samaan, M.: Synthèse et supervision des lois de commande adaptative. *These. LAG* 1989.
- [5] M. Martinez.: Indicadores para la supervisión del control adaptativo. Implementación mediante metodología de sistema experto. *Tesis. UPV. Dept.ISCA* 1991.
- [6] Sohlberg, B.: Supervision and control for industrial processes. *Advances in Industrial Control. Springer-Verlag*. 1998
- [7] Rakoto-Ravalontslama, N. Joseph Aguilar-Martin.: Supervision de processus a l'aide du système expert G2. *Hermès, Paris*. 1995.
- [8] Patton R. Frank P. and Clark, R.: Fault diagnosis in dynamic systems. Theory and applications. *Prentice Hall*. 1989.
- [9] J.Y. Hung, W. Gao, and J. C. Hung. : Variable structure control. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. **V. 40** 1993 2–22.
- [10] W. Gao.: Variable structure control of nonlinear system: a new approach. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. **V. 40** 1993 45–55.

- [11] J.H. Braslavsky and R.H. Middleton.: Global and semi-global stabilizability in certain cascade nonlinear systems. *IEEE Transaction on Automatic Control*. **vol. 41** 1996 876–881
- [12] Chang, S.Y. Huang, T.L. and Huang, T.Y.: Fuzzy bang-bang controller for servo systems via optimal path estimation method. *Proc. of IEEE International Conference on Power Electronics and Drive Systems*. **V. 1** 1995 208–211.
- [13] J. Guckenheimer.: A robust hybrid stabilization strategy for equilibria, *IEEE Transaction on Automatic Control*. **vol. 40** 1995 321–326 .
- [14] E.D. Sontag.: Nonlinear regulation: The piecewise linear approach. *IEEE Transaction on Automatic Control*. **vol. 26** 1981 346–358 .
- [15] M. Johansson and A. Rantzer.: Computation of piecewise quadratic Lyapunov functions for hybrid systems. *IEEE Transaction on Automatic Control*. **vol. 43 no 4** 1998 555–559 .
- [16] T.A. Johansen, K.J. Hunt and H. Fritz, "A software environment for gain scheduled controller design," *IEEE Control System*. **vol. 18** 1998 48-60 .
- [17] I. Kolmanovsky and E.G. Gilbert.: Multimode Regulators for Systems with State and Control Constraints and Disturbance Inputs. in *Proceedings of the Block Island Workshop on Control Using Logic-Based Switching, ser. Lecture Notes in Control and Information Systems*. Berlin, Germany: Springer 1996 104–117.
- [18] I. Kolmanovsky, E.G. Gilbert, N.H. McClamroch and T.L. Maizenbergb.: Toward Less Conservative Designs of Multimode Controllers for Systems with State and Control Constraints. *Proc. of the 37th IEEE Conference on Decision and control*. Tampa, Florida USA. 1998 1647–1652 .
- [19] Tadanao Zamma, Tatsuya Suzuki and Shigru Okuma.: A Design of Switched Controllers for Force Control System. *IEEE AMC2000-NAGOYA*. 2000 258–263 .
- [20] S.-H. Lee and J.-T. Lim.: Switching control of H_∞ gain scheduled controllers in uncertain nonlinear systems. *Automatica*. **vol. 36** 2000 1067–1074.

- [21] J. P. Hespanha and A.S. Morse.: Supervision of families of nonlinear controllers. *Proc. IEEE Conference on Decision and control.* 1996 3772–3773 .
- [22] A.S. Morse.: Supervisory control of families of linear set-point controllers–Part 1: Exact Matching. *IEEE Transaction on Automatic Control*.vol. **41** 1996 1413–1431 .
- [23] A.S. Morse.: Supervisory control of families of linear set-point controllers–Part 2: Robustness. *IEEE Transaction on Automatic Control*. vol. **41** 1997 1500–1515 .
- [24] J. P. Hespanha, Daniel Liberzon, A.S. Morse, Brian D.O. Anderson, Thomas S. Brinsmead and Franky de Bruyne.: Multiple model adaptive control. Part 2:switching. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*. 2001 479–496.
- [25] S. Kulkarni and P. Ramadge.: Model and controller selection policies based on output prediction errors. *IEEE Transaction on Automatic Control*. vol. **41** 1996 1594–1604.
- [26] Kumpati S. Narendra and Jeyendran Balakrishnan.: Improving Transient Response of Adaptive Control Systems using Multiple Models and Switching. *IEEE Transaction on Automatic Control*. vol. **39** 1994 1861–1866 .
- [27] M. Fu and B. R. Barmish.: Adaptive linearization of linear systems via switching control. *IEEE Transaction on Automatic Control*. vol. **31** 1986 1097–1103 .
- [28] Daniel Liberzon and A.S. Morse.: Basic Problems in Stability and Design of Switched Systems. *IEEE Control Systems* 1999 59–70.
- [29] R.A. Freeman.: An adaptive approach to Lyapunov Design in Nonlinear Optimal Stabilization Problems. *Proc. of the 36th IEEE Conference on Decision and Control. San Diego, California USA* 1997 2339–2344 .
- [30] M.S. Branicky.: Stability of switched and hybrid systems. *Proc. of the 33rd IEEE Conference on Decision and Control.* (1994) 3498–3503.
- [31] M.A. Wicks, P. Peleties and R.A. DeCarlo.: Construction of piecewise Lyapunov functions for stabilizing switched systems. *Proc. of the 33rd Conference on Decision and Control.* (1994) 3492–3497 .

- [32] Fabio G. Jota and Graham C. Goodwin.: Switching Control: Some stability results. *Proc. of the 36th IEEE Conference on Decision and Control. San Diego, California USA* (1997) 2209–2210 .
- [33] J.P. Hespanha and A.S. Morse.: Stabilization of nonholonomic integrators via logic-based switching. *Automatica* **vol. 35** 1999 385–393.
- [34] Mohammed Tounsi, Guy Lebret and Maxime Gautier.: Dynamic Control of a Nonholonomic Mobile Robot in Cartesian Space , *Proc. Of the 34th Conference on Decision and Control New Orleans, LA.* 1995 3825–3830.
- [35] D'Andréa-Novel B., Bastin G. and Campion G.: Modeling and Control of Nonholonomic Wheeled Mobile Robots. *Proc. Int. Conf. On Robotics and Automation, Sacramento, California.* 1991 1130–1135.
- [36] Oller A., García R., Ramon J. A., Figueras A., Esteva S., De la Rosa J. Ll., Humet J. M., And del Acebo E.: Description Of RogiTeam,. *ON robocup-97: Robot Soccer World Cup I* 1998 286–294 .
- [37] Oller A., De la Rosa J.Ll., García R, Ramon JA, and Figueras A.: A Micro-Robots Playing Soccer Games: A Real Implementation Based On A Multi-Agent Decision-Making Structure. *International Journal of Intelligent Automation and Soft Computing.* **Vol. 6, No. 1.** 2000.
- [38] A.S. Morse.: Supervisory control of families of linear set-point controllers. *Proc. of the 32nd Conference on Decision and Control. San Antonio, Texas.* 1993 1055–1060 .
- [39] J. Balakrishnan and K.S. Narendra .: Adaptive control using multiple models. *IEEE Transaction on Automatatic Control.* **vol. 42** 1997 171–187.
- [40] J. Eker and J. Malmberg.: Design and implemantation of a hybrid control strategy. *IEEE Control Systems.* 1999 12–21 .
- [41] R. Barman, S. Kingdon, J.J. Little, A.K. Mackworth, D.K. Pai, M. Sahota, H. Wilkinson, and Y. Zhang.: Dynamo: Real-time Experiments With Multiple Mobile Robots . *IEEE Intelligent Vehicles '93 Symposium , 1993.* 1993 261–266.
- [42] Y. Zhang, A.K. Mackworth, S.J. Kingdon and R. A. Barman.: Real-time control of soccer-playing robots using off-board vision: the dynamite tesbed . *IEEE International Conference on Systems Man and Cybernetics.* **vol. 4** 1995 3690–3693.

- [43] Y. Zhang and A.K. Mackworth.:A constraint-based controller for soccer-playing robots. *Proc. of the IEEE Conf. on Intelligent Robots and Systems*. 1998 1290–1295.
- [44] Y. Zhang and A.K. Mackworth.:Synthesis of hybrid constraint-based controllers. *IEEE Control Systems*. 1999 12–21.