

CONTROL AUTORECONFIGURABLE PARA FALLOS EN SENSORES Y ACTUADORES EN EL MODELO DE VUELO (RESUMEN EN ESPAÑOL)

Daniel Rowe Serrano

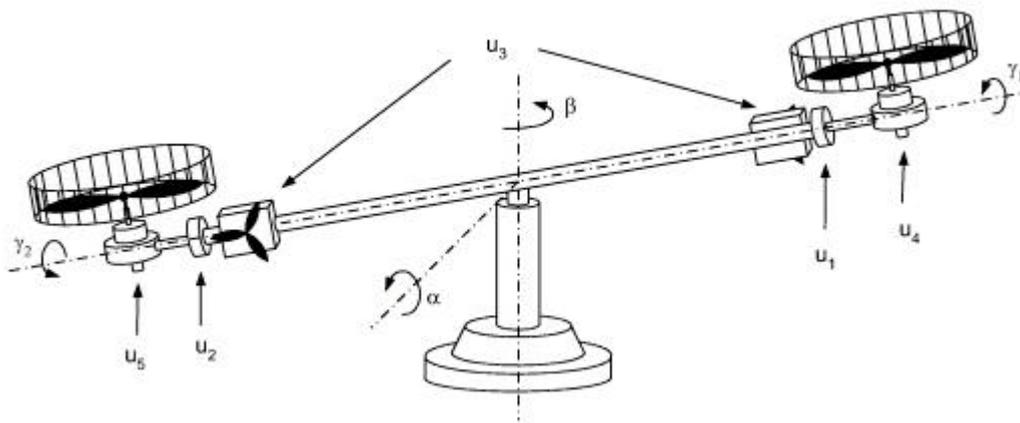


TABLA DE CONTENIDOS

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 1 | INTRODUCCIÓN..... | 5 |
| 1.1 | GENERALIDADES..... | 5 |
| 1.2 | DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA..... | 5 |
| 1.3 | SOLUCIONES ACTUALES | 5 |
| 2 | OBJETIVO DEL PROYECTO..... | 6 |
| 3 | SOLUCIÓN PROPUESTA..... | 7 |
| 4 | DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA PLANTA..... | 10 |
| 5 | SISTEMA EN TIEMPO REAL | 12 |
| 5.1 | INTRODUCCIÓN | 12 |
| 5.2 | IMPLEMENTACIÓN DEL HARDWARE | 12 |
| 5.3 | INTERFAZ SOFTWARE | 13 |
| 6 | PROCESO DE DISEÑO..... | 14 |
| 7 | MODELADO..... | 15 |
| 8 | BUCLE DE CONTROL NOMINAL | 16 |
| 8.1 | INTRODUCCIÓN | 16 |
| 8.2 | DISEÑO DEL CONTROLADOR | 16 |
| 9 | RECONFIGURACIÓN TRAS LA DETECCIÓN DE UN FALLO EN UN ACTUADOR | 17 |
| 9.1 | INTRODUCCIÓN | 17 |
| 9.2 | DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA..... | 17 |
| 9.3 | SOLUCIÓN PROPUESTA..... | 17 |
| 9.4 | DEFICIENCIA EN EL RANGO | 17 |
| 9.5 | ALGORITMO DE RECONFIGURACIÓN | 18 |
| 10 | RECONFIGURACIÓN TRAS DETECTAR UN FALLO EN UN SENSOR | 19 |
| 10.1 | INTRODUCCIÓN | 19 |
| 10.2 | DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA..... | 19 |
| 10.3 | SOLUCIÓN PROPUESTA..... | 19 |
| 10.4 | DETECCIÓN DE FALLOS..... | 20 |
| 10.5 | ALGORITMO DE RECONFIGURACIÓN | 21 |
| 11 | EXPERIMENTOS EN LA PLANTA..... | 22 |
| 12 | EVOLUCIÓN DEL PROYECTO | 24 |
| 13 | CONCLUSIONES..... | 25 |

TABLA DE ILUSTRACIONES

| | |
|--|----|
| ILUSTRACIÓN 1: BUCLE DE CONTROL | 7 |
| ILUSTRACIÓN 2: ESTRUCTURA DE RECONFIGURACIÓN | 8 |
| ILUSTRACIÓN 3: PLANTA..... | 10 |
| ILUSTRACIÓN 4: ESQUEMA DE LA PLANTA..... | 11 |
| ILUSTRACIÓN 5: ESQUEMA DE CONEXIONADO..... | 12 |
| ILUSTRACIÓN 6: INTERFAZ SOFTWARE..... | 13 |
| ILUSTRACIÓN 7: MODELO DE LA PLANTA..... | 15 |
| ILUSTRACIÓN 8: COMPENSADOR | 16 |
| ILUSTRACIÓN 9 INTERFAZ Y ESTRUCTURA DE CONTROL | 22 |

1 Introducción

1.1 Generalidades

El presente proyecto ha sido llevado a cabo en el Departamento de Automática y Control por Computador de la Universidad del Ruhr en Bochum, Alemania. Durante su desarrollo, ha sido supervisado por el profesor Ing. Thomas Steffen y el catedrático Dr. Ing. Jan Lunze.

Este departamento ha desarrollado diferentes iniciativas para encontrar una solución al problema de la reconfiguración del bucle de control, incluyendo el presente proyecto sobre *control autoreconfigurable* y otros estudios sobre *control reconfigurable híbrido* [LuSt02]. Se han llevado a cabo varios experimentos para verificar el desarrollo de dichas teorías entre los que se encuentran el Modelo de Vuelo y el Sistema de Tres Tanques, ambos con hardware redundante.

1.2 Descripción del Problema

Cualquier sistema real está sujeto a la posibilidad de que se presenten fallos. Un fallo en un único componente puede afectar al funcionamiento del sistema completo. Algunos fallos críticos, como la pérdida total de un sensor o un actuador, rompen el bucle de control. En respuesta al fallo, es necesario introducir algunas modificaciones en el bucle de control de forma que el sistema se mantenga operativo. Se denomina reconfiguración al conjunto de cambios en el sistema de control originados por la necesidad de solventar el fallo, manteniendo el sistema estable y operativo.

1.3 Soluciones Actuales

En la actualidad, existen principalmente tres enfoques que aportan distintas soluciones al problema de la reconfiguración del bucle de control. El primero está orientado a sistemas en los cuales los cambios no son estructurales. En este caso, se consideran cambios en el sistema tales como la degradación de las prestaciones de los actuadores o un incremento del ruido en los sensores. Se han utilizado técnicas de control adaptativo para ajustar los parámetros de la planta a la nueva situación.

Un segundo enfoque soluciona la reconfiguración mediante el rediseño del controlador. Normalmente, se diseña manualmente un conjunto de controladores dedicados para cada posible situación. En un nivel de supervisión, se diseña una lógica capaz de detectar el fallo, aislarlo y proceder a la selección del controlador adecuado automáticamente.

El tercer enfoque se basa en el uso de un bloque de reconfiguración que trabaja como interfaz entre la planta y el controlador. Así se permite el uso del controlador nominal sea cual sea el tipo de fallo.

2 Objetivo del Proyecto

El objetivo del proyecto es implementar y verificar experimentalmente una nueva estructura de control que permita reconfigurar el sistema al producirse un fallo crítico. Así, se modifica la estructura de control en respuesta a dicho fallo. Se pretende conseguir un nuevo bucle de control tal que el sistema sea estabilizado y se mantenga operativo conservando unas prestaciones aceptables.

La tarea que conlleva la reconfiguración es, en cierto sentido, similar al diseño de un nuevo bucle de control para el sistema en fallo. Sin embargo, existen otros requisitos adicionales. En primer lugar la reconfiguración se debe llevar a cabo de forma totalmente automática mientras el sistema se encuentra en funcionamiento. En segundo lugar, entre los objetivos de la reconfiguración se haya el minimizar los cambios sobre la estructura nominal de control.

En este caso, el primer enfoque clásico no es válido debido a que el presente proyecto considera una serie de fallos críticos que implican profundos cambios estructurales en la planta. Por otro lado, se sigue la idea general del segundo enfoque. Sin embargo, no se prediseña un conjunto de controladores sino que se pretende el diseño automático del controlador más adecuado a la nueva situación mientras el sistema se encuentra en funcionamiento. En referencia a la tercera opción indicar que este departamento se encuentra actualmente trabajando en esa línea con idea de minimizar los posibles cambios en la estructura de control una vez se ha producido un fallo y comparar las prestaciones de ambos enfoques.

variables llevan asociadas unas matrices de costes que definen la importancia de cada una. Así, este método permite utilizar las mismas matrices de costes durante la reconfiguración. El nuevo controlador se descarga en el sistema en tiempo real mientras éste se encuentra en funcionamiento.

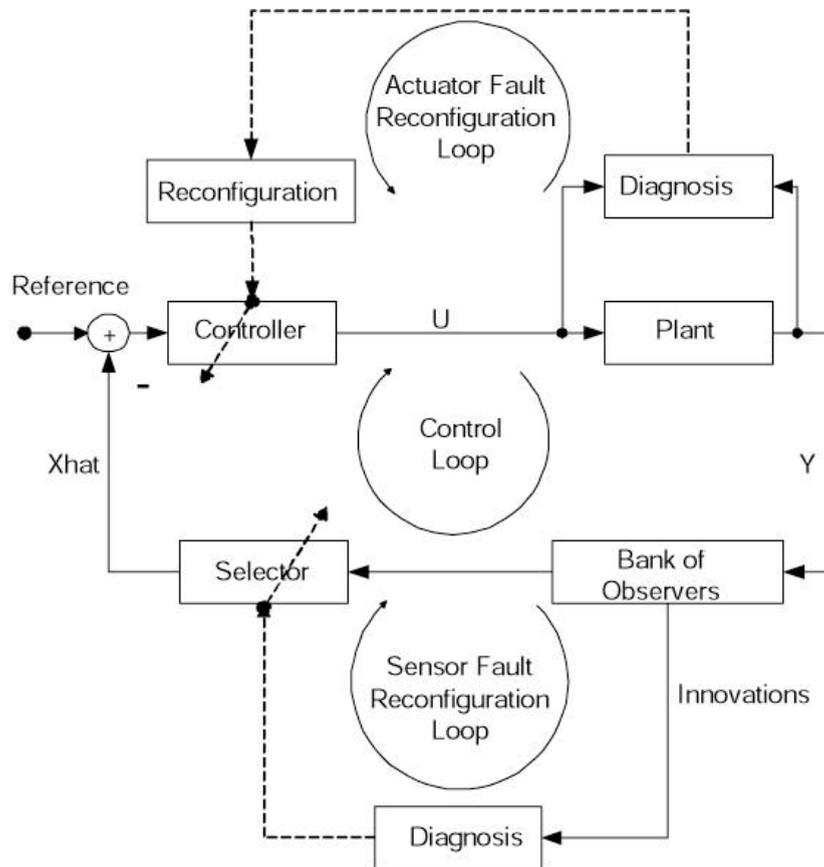


Ilustración 2: Estructura de reconfiguración

Para solucionar la pérdida de un sensor se ha diseñado un banco de observadores. Este incluye un observador nominal y tantos observadores adicionales como fallos en sensores se contemplen. El observador específico para un fallo no depende de la salida del sensor asociado, no viéndose así la observación del conjunto de estados afectada por éste. Esta estructura es denominada Configuración de Observadores Dedicados. Se asume que la pérdida de los sensores considerados no implican que el sistema sea no observable pudiendo derivarse el estado del sistema de la observación de los restantes sensores.

Un fallo en un sensor es detectado evaluando la diferencia entre los valores leídos de los sensores y los obtenidos mediante la observación realizada por los distintos observadores. Esta diferencia es denominada innovación. Cuando la innovación del Observador Nominal supera un cierto umbral una lógica de detección resuelve el fallo aislándolo al comparar las innovaciones de los restantes observadores. Aquel que presente una innovación menor es presumiblemente aquel que no depende del sensor que ha fallado. Por tanto,

un selector automático seleccionara la salida de dicho observador como la entrada al controlador de realimentación del vector de estados. Todos los observadores son diseñados utilizando de nuevo técnicas LQG. Sin embargo, en lugar de matrices de coste se presentan estimaciones de la confianza en los valores obtenidos por los sensores y los estados calculados por los observadores. Así, el diseño de los observadores no es más que un problema dual al diseño del controlador.

Aplicando este método no es necesario utilizar controladores prediseñados. Tampoco es requerida ninguna intervención manual para llevar a cabo la reconfiguración. El sistema detecta el fallo en un sensor, lo aísla y procede a la reconfiguración automáticamente mientras el sistema se encuentra en funcionamiento consiguiendo un nuevo bucle de control estable. Por otro lado, dado que el propósito del presente proyecto era la reconfiguración en sí y no la detección y aislamiento de fallos, sobre la que existen ya numerosos estudios, no se ha diseñado ningún módulo de detección y aislamiento de fallos (FDI) en los actuadores, siendo necesaria su inclusión para un funcionamiento totalmente automático. Sin embargo, el cálculo de la nueva matriz de ganancia del controlador sí se realiza sin ningún tipo de intervención manual una vez que se ha informado al sistema de que se ha producido un fallo en el actuador indicado. Por otro lado, el método óptimo cuadrático asegura unas prestaciones razonables bajo cualquier tipo de fallo. Finalmente, indicar que los cambios en la estructura de control han quedado restringidos exclusivamente al área afectada y éstos consisten únicamente en seleccionar el observador adecuado o recalcular la matriz de ganancias del controlador usando los mismos pesos.

4 Descripción General de la Planta

Se ha seleccionado un modelo de vuelo con dos grados de libertad para llevar a cabo la verificación experimental de las soluciones propuestas un (ver Ilustración 3). Esta planta fue elegida debida a las redundancias que presenta en su hardware que posibilitan la reconfiguración. Dichas redundancias permiten que el sistema continúe siendo controlable y observable tras la pérdida de un sensor o actuador.



Ilustración 3: Planta

El sistema cuenta con dos ejes que le permiten alcanzar distintos ángulos tanto de elevación como de orientación. El ángulo de elevación se denomina α mientras que el de orientación es denominado β . En ambos extremos del primer eje se encuentran dos rotores principales capaces de variar velocidad y su ángulo de ataque. Estos, denominados respectivamente γ_1 y γ_2 , se controlan mediante sendos servomotores. Otros dos rotores laterales, que funcionan simultáneamente a la velocidad deseada, proporcionan una mayor redundancia en el hardware. El esquema del sistema se muestra en la Ilustración 4.

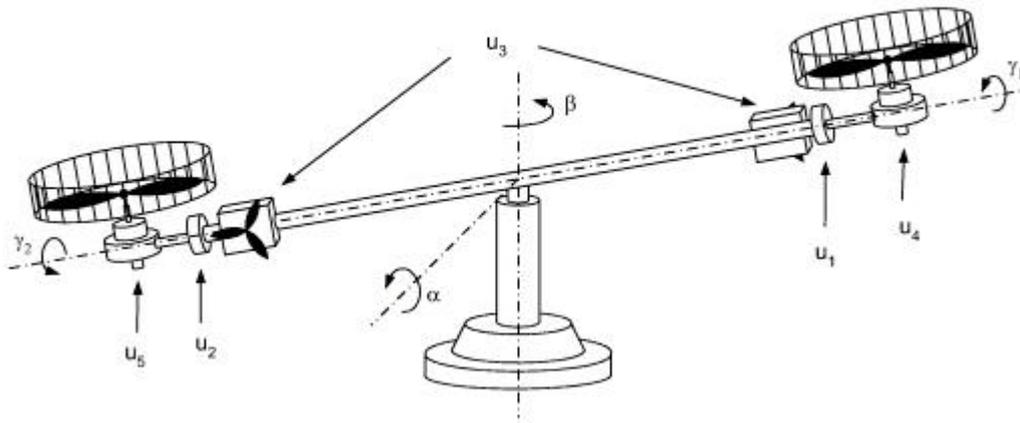


Ilustración 4: Esquema de la planta

Las entradas al sistema son las tensiones aplicadas a cada motor: ambos servomotores u_1 y u_2 , los rotores laterales u_3 y los rotores principales u_4 y u_5 . Como salidas, el sistema cuenta con la lectura de cuatro potenciómetros que indican las posiciones angulares de α , β , γ_1 y γ_2 .

Por tanto, no es necesario utilizar todos los actuadores para conseguir el control del sistema, pudiéndose reconfigurar un sistema que sigue siendo controlable una vez el fallo se ha producido. Tampoco son necesarios todos los sensores para conseguir observar el estado del sistema.

El ángulo de inclinación α se encuentra ya estabilizado, alrededor de la posición 0° , mediante un controlador proporcional que actúa sobre la velocidad de los rotores principales. Por lo tanto, tanto las entradas u_4 y u_5 como el ángulo de inclinación α se consideran constantes y no formarán parte de este estudio.

Se han considerado fallos en los actuadores que controlan los servomotores que orientan los rotores principales así como en el actuador de los rotores laterales. Debido a las redundancias, debería ser posible llevar a cabo una reconfiguración con éxito tras perder uno de dichos actuadores. Sin embargo, un fallo en los actuadores que controlan la velocidad de los rotores principales conduciría a un sistema no controlable. También se considera la pérdida de algún sensor durante el funcionamiento de la planta. En este caso, sería posible observar el estado del sistema al perder uno de los dos sensores que miden ambos ángulos de ataque pero la pérdida de los sensores que informan sobre el ángulo de elevación o de orientación de la planta conduce a un sistema no observable.

5 Sistema en Tiempo Real

5.1 Introducción

La planta es controlada digitalmente utilizando aplicaciones software para el modelado de sistemas. Para convertir las señales de control digital en analógicas y adquirir la información proporcionada por los sensores, se hace necesario el uso de un sistema en tiempo real. Se ha implementado para este fin una configuración hardware así como una interfaz software.

5.2 Implementación del Hardware

La solución escogida se conoce como configuración Host-Target para la que MathWorks proporciona el software denominado xPC Target [xP01]. Esta configuración necesita dos ordenadores. El primero de ellos se utiliza para crear los modelos, implementar el bucle de control y llevar a cabo las simulaciones. El segundo carga mediante un disco de arranque el núcleo de la aplicación xPC Target que controlará la planta en tiempo real. El bucle de control desarrollado se descarga del ordenador Host al Target utilizando una conexión de red. El esquema de conexiones se muestra en la Ilustración 5.

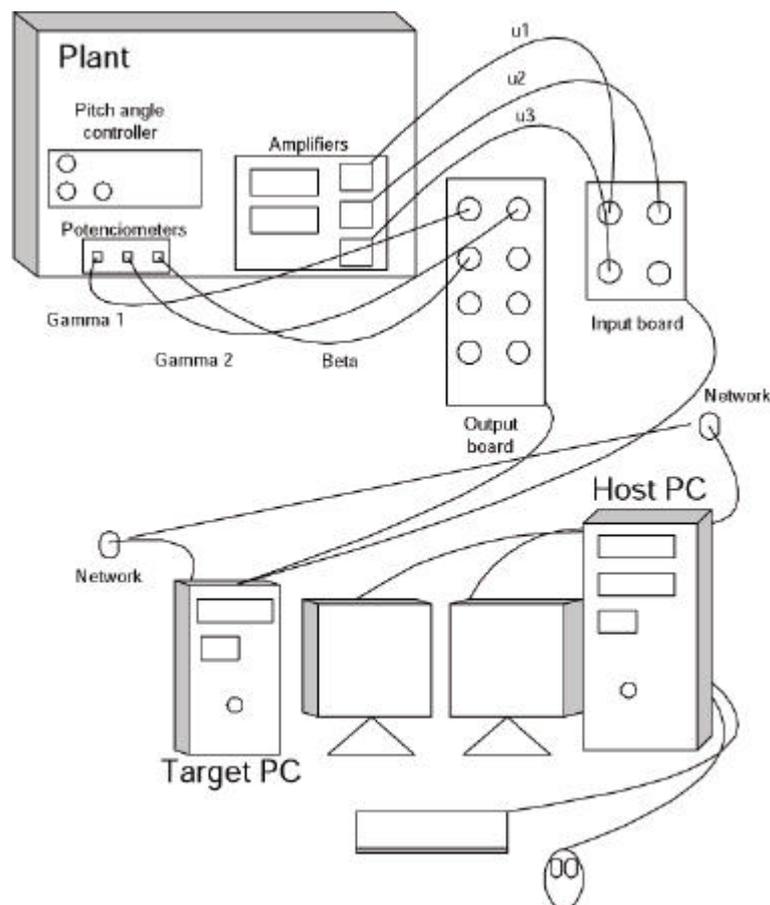


Ilustración 5: Esquema de conexionado

5.3 Interfaz Software

Para comunicar la planta con el ordenador Target es necesario implementar una interfaz software que configure los puertos del sistema en tiempo real. Éstos conectan los convertidores analógico-digitales y digital-analógicos con los actuadores y sensores de la planta. Esta interfaz se compila en C y se descarga en el ordenador Target. Los bloques que representan los puertos se encuentran en las librerías *Simulink* proporcionadas por el fabricante del sistema en tiempo real. *Simulink* será también utilizado para implementar el bucle de control y llevar a cabo las simulaciones.

En la misma interfaz se han introducido una serie de amplificadores con el objetivo de convertir los rangos de las señales utilizadas. Así, visto desde el controlador, el rango de los actuadores estará entre -1 y 1 y el de los sensores será medido en grados sexagesimales. Por otro lado se han introducido una serie de signos en los mismos amplificadores teniendo en cuenta el criterio de signo utilizado en la conexión de las diferentes señales y la lectura de los respectivos ángulos.

La Ilustración 6 muestra el diagrama de bloques de la interfaz software.

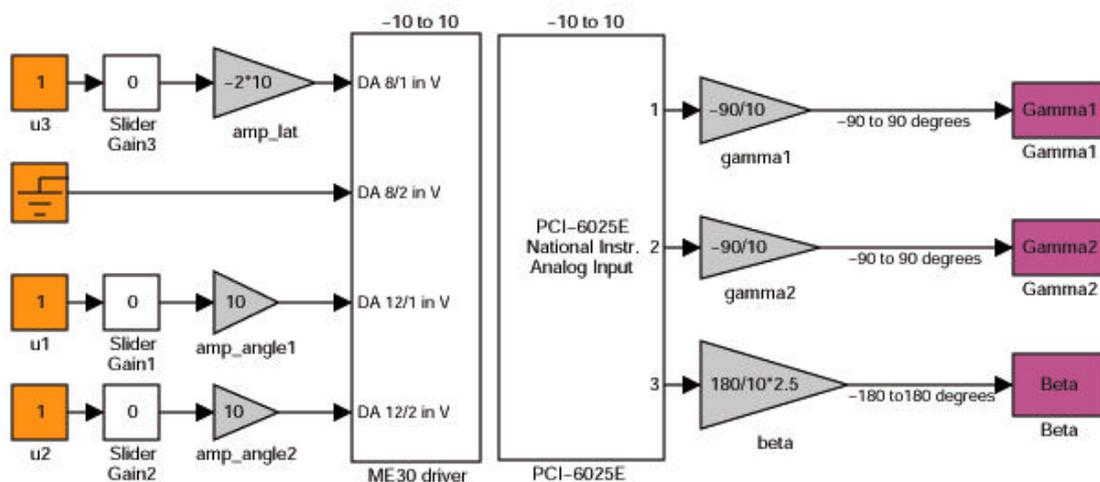


Ilustración 6: Interfaz software

6 Proceso de diseño

Para desarrollar una estructura de reconfiguración es necesario llevar a cabo un estudio previo sobre el sistema. En primer lugar, se implementa un modelo detallado de la planta. Mediante una serie de experimentos y el uso de rutinas diseñadas para tal fin se procede a la identificación de los parámetros del modelo. Una vez se ha desarrollado el modelo, éste se lineariza y se obtiene su representación en el espacio de estados. Finalmente, se diseña un bucle de control que permita la estabilización del sistema obteniendo unas prestaciones aceptables cuando la planta se encuentra funcionando en el escenario nominal, aquel que no presenta ningún fallo en sus sensores o actuadores.

La reconfiguración se lleva a cabo en tres pasos. En primer lugar se rediseña el controlador de forma que se autoreconfigure al detectarse un fallo. En un segundo paso, se implementa un banco de observadores dedicados para los fallos en los sensores considerados. En último lugar, se desarrolla una lógica de detección y aislamiento de fallos en los sensores que selecciona el observador más adecuado.

Ambos bucles de control nominal y reconfigurado se han desarrollado realizando simulaciones de su comportamiento en los diferentes escenarios y luego han sido ajustados para un funcionamiento real.

7 Modelado

En primer lugar, la planta se modela como un sistema lineal [Fr94]. Este modelo es empleado para el diseño de un compensador compuesto por un controlador y un observador nominal. Para llevar a cabo las simulaciones se realiza un modelo detallado no lineal. Este último incluye zonas muertas y saturaciones en los actuadores, retrasos en el proceso de adquisición y tratamiento de datos y rozamientos en el sistema de orientación.

El sistema (ver Ilustración 7) consta de múltiples entradas y múltiples salidas (MIMO). Las entradas corresponden a la tensión aplicada a ambos servomotores, u_1 y u_2 , y a los rotores laterales u_3 . Las salidas son ambos ángulos de ataque, γ_1 y γ_2 , y la posición angular del sistema, β . El modelo lineal contiene siete estados que serán ambos ángulos de ataque, las velocidades de dichos ángulos, la fuerza aplicada por los rotores laterales, la posición angular y la velocidad angular del sistema.

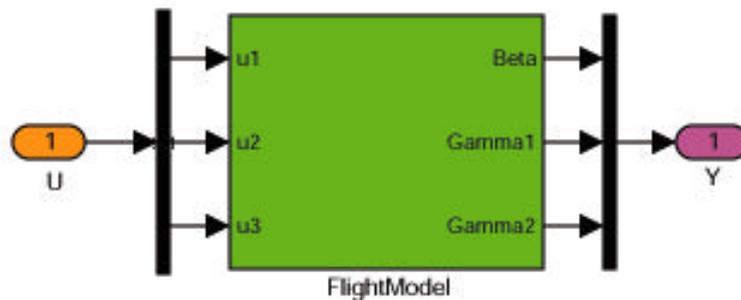


Ilustración 7: Modelo de la planta

El modelo se implementa mediante Simulink [Si99]. Tras su implementación se procede a realizar los experimentos necesarios para identificar los parámetros del mismo y se desarrollan una serie de rutinas en *Matlab* para procesar los datos obtenidos en dichos experimentos.

El modelo es linealizado alrededor del punto cero para todas las variables, construyendo así el espacio de estados. Debido a que el orden asignado de los estados por parte de Simulink es desconocido, es necesario localizar dichos estados y proceder a su reordenación. El orden viene dado por el siguiente vector y toda futura referencia al espacio de estados se hará de acuerdo a dicho orden exclusivamente: $(\dot{g}_1, \dot{g}_2, g_1, g_2, F_l, \mathbf{b}, \mathbf{b})$.

8 Bucle de Control Nominal

8.1 Introducción

Para controlar el proceso nominal se diseña un compensador estándar compuesto de un controlador proporcional de realimentación del vector de estados y un observador de dichos estados (ver Ilustración 8). Ambos son diseñados utilizando el método LQG (Linear Quadratic Gaussian) [Le98]. Se ha elegido dicho método dadas las buenas prestaciones que proporciona así como la posibilidad de realizar un rediseño de forma automática.

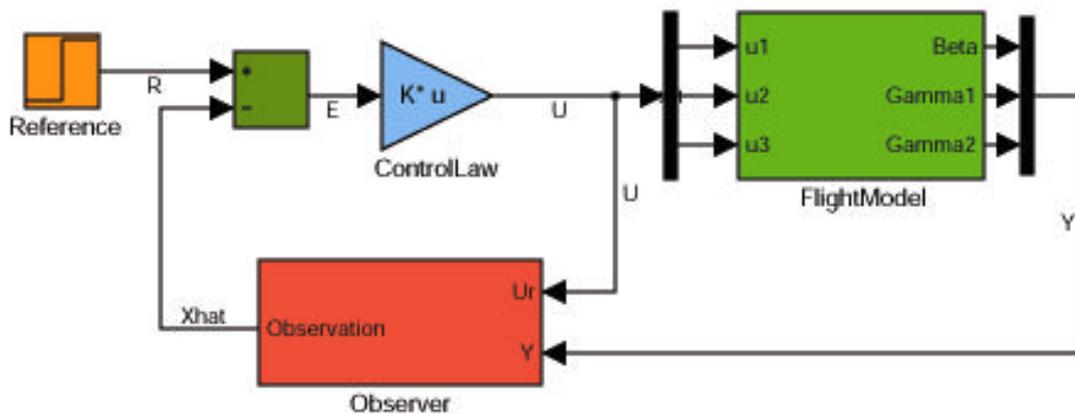


Ilustración 8: Compensador

8.2 Diseño del Controlador

Para llevar a cabo la implementación del controlador se utiliza el método LQG (Linear Quadratic Gaussian). Este es un método efectivo y bien conocido en el control moderno. Representa la generalización estocástica del Regulador Cuadrático Lineal (LQR).

El diseño encuentra la ley de control óptima que minimiza un índice dependiente de los estados y las entradas del sistema. Estas variables llevan asociadas matrices de peso que ponderan la importancia de cada una. Dicho índice viene dado por la ecuación:

$$J^* = \min E \left[\int_0^{\infty} (\mathbf{x}^T \mathbf{Q} \mathbf{x} + \mathbf{u} \mathbf{R} \mathbf{u}) dt \right]$$

Utilizando esta técnica es posible diseñar el controlador automáticamente sin necesidad de localizar el lugar deseado para las raíces del sistema.

9 Reconfiguración tras la Detección de un Fallo en un Actuador

9.1 Introducción

El objetivo fundamental del proyecto es desarrollar una estructura de control capaz de reconfigurarse al detectar un fallo en el proceso. Se pretende así estabilizar el sistema logrando las mejores prestaciones posibles manteniendo el sistema operativo a pesar de que se produzca un fallo crítico en un sensor o un actuador. Se asume, sin embargo, que el sistema en fallo continúa siendo controlable y observable ya que de otra manera no sería posible su reconfiguración. Ya que se pretende que dicha reconfiguración se realice de forma automática, se utiliza el mismo método usado para el diseño del controlador nominal, manteniendo las mismas matrices de coste.

9.2 Descripción del Problema

Un fallo en un actuador modifica única y exclusivamente la matriz de entradas del sistema **B**. El fallo provoca una columna de ceros que representa la desconexión de dicha entrada. El resto de matrices del sistema permanece inalterado.

Como respuesta al fallo, siempre que el sistema siga siendo controlable, es necesario recalcular la ley de control.

9.3 Solución Propuesta

Se pretende recalcular la matriz de realimentación del controlador utilizando de nuevo el método LQG. En el rediseño se utilizan los mismos pesos que en el diseño primario del controlador nominal, permitiéndose así que el proceso se realice de forma totalmente automática. Debido al Principio de Separación, no es necesario introducir ningún cambio en el observador. Una vez el controlador es rediseñado, la nueva matriz de realimentación se descarga en el ordenador en tiempo real.

9.4 Deficiencia en el Rango

Desgraciadamente, la implementación del diseño LQG en Matlab falla debido a los problemas numéricos ocasionados por las singularidades introducidas por el fallo. La columna de ceros de la matriz **B** provoca que ciertos estados no sean accesibles desde las entradas. Además, aquellos estados que únicamente dependan de los primeros quedarán también incontrolables.

Para solucionar este problema es necesario reducir el sistema. Así, se eliminan los estados no controlables y las entradas no conectadas así como las matrices de coste asociadas. Con el sistema reducido se procede al cálculo de la matriz de realimentación. Una vez ésta es obtenida, se expande, rellenado con ceros, para adecuarla a las dimensiones del sistema y se descarga en el ordenador Target.

9.5 Algoritmo de Reconfiguración

Para el caso de un fallo en un actuador se sigue el siguiente algoritmo:

1. El fallo debe ser detectado e identificado.
2. Se actualiza el modelo de la planta y se lineariza.
3. Las matrices del sistema son reducidas eliminando los estados no controlables y las entradas no conectadas.
4. Se calcula una nueva ley de control según el método LQG
5. Esta matriz es expandida para adecuarla a las dimensiones del sistema.
6. El nuevo controlador es descargado en el sistema en tiempo real.

Todos estos pasos son llevados a cabo de forma automática mientras el sistema se encuentra en funcionamiento. Una vez se completa el algoritmo, el bucle de control reconfigurado estabiliza la planta a pesar del fallo.

10 Reconfiguración tras Detectar un Fallo en un Sensor

10.1 Introducción

Como en el caso de presentarse un fallo en un actuador, el objetivo tras la pérdida de un sensor es estabilizar el sistema logrando las mejores prestaciones posibles manteniendo el sistema operativo. Para ello, el sistema en fallo debe seguir siendo observable. Esto implica que no se consideren fallos en los sensores que leen los valores de los ángulos de inclinación, α , o de orientación, β .

10.2 Descripción del Problema

Una que se produce un fallo en un sensor, el observador obtiene lecturas erróneas de las salidas del sistema. El error se extiende al controlador pudiendo provocar la desestabilización de la planta dejándola inoperativa.

En este caso, únicamente la matriz de salidas del sistema, \mathbf{C} , se ve afectada, manteniéndose el resto sin cambios. La aparición del fallo provoca que una fila de dicha matriz sea cero.

10.3 Solución Propuesta

Se pretende usar un observador diferente para cada tipo de fallo. Para ello se diseña un banco de observadores dedicados (ver Ilustración 9), uno para el proceso nominal y otros tantos adicionales como fallos se contemplan. Cuando se detecta un fallo se conmuta al observador correspondiente que proporcionará la observación de los estados más adecuada. Se asume, por tanto, que para cada fallo la planta es completamente observable. En caso de que se produzca un fallo múltiple en los sensores o que falle en el sensor de orientación β el sistema deja de ser observable. Así, estos fallos no serán considerados.

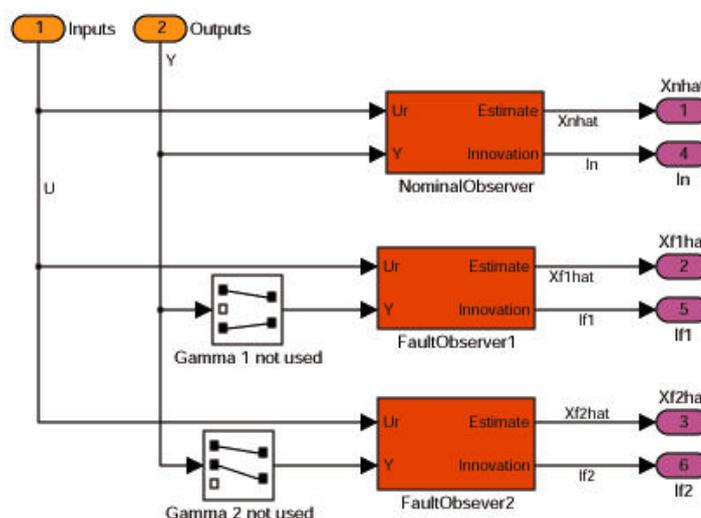


Ilustración 9: Banco de Observadores dedicados

Cada observador para una situación de fallo utiliza todas las entradas y salidas de la planta excepto aquella salida correspondiente al fallo considerado. De esta manera, al menos un observador no queda afectado cuando se produce el fallo y puede ser utilizado para proporcionar la observación del vector de estados necesaria para el control del sistema. Este observador produce una observación válida tanto si se produce el fallo como si no. De esta forma se reconfigura el sistema de forma que pueda ser controlado incluso tras la pérdida de un sensor. En este caso no es necesario introducir ningún cambio en el controlador. La estructura de control completa para llevar a cabo la reconfiguración se muestra en la Ilustración 10.

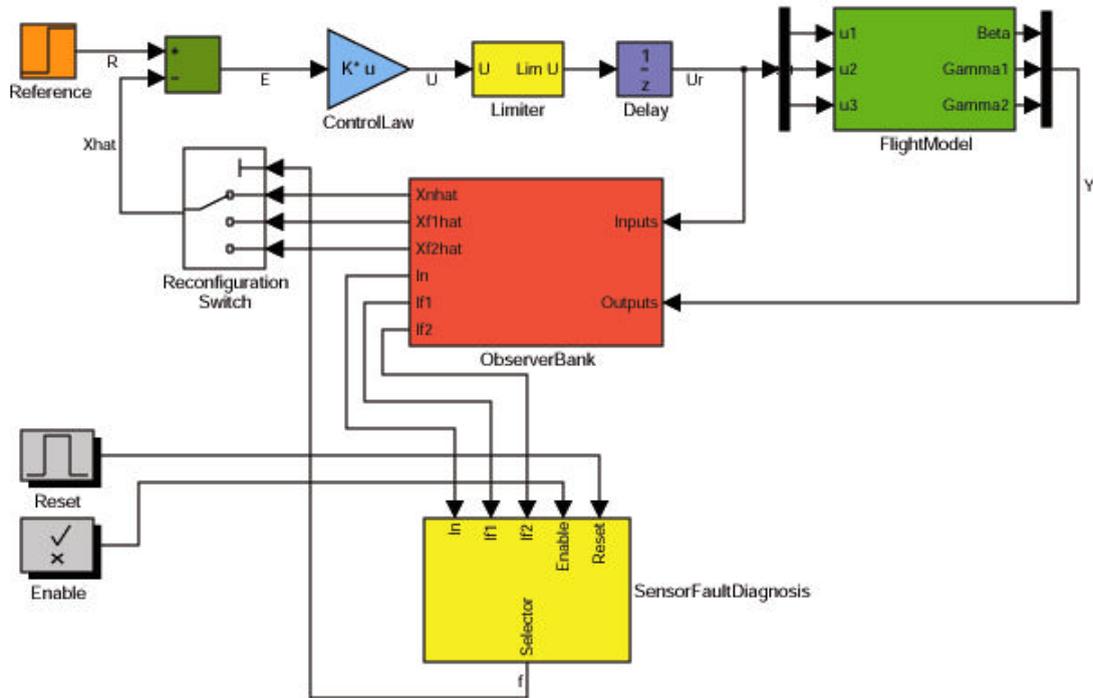


Ilustración 10: Bucle de control reconfigurable

10.4 Detección de Fallos

Para realizar la detección de fallo en los sensores del sistema se aprovecha el diseño del banco de observadores. La detección radica en el concepto de innovación entendida como la diferencia entre la lectura de un determinado sensor y el valor correspondiente observado. Es de suponer que aquel observador que no usa el sensor en fallo deberá tener la menor innovación. De esta forma, una lógica de diagnosis se encarga de seleccionar al mejor observador.

Para llevar a cabo la detección del fallo, la lógica de diagnosis compara la norma de la innovación del observador nominal con un determinado umbral establecido experimentalmente. En caso que sea superior, se procede al aislamiento del fallo comparando las innovaciones de los restantes observadores. Aquel que tenga una menor innovación es seleccionado para proporcionar el vector de estados al controlador.

10.5 Algoritmo de Reconfiguración

Se utiliza el siguiente algoritmo para llevar a cabo la reconfiguración del sistema tras producirse un fallo en un sensor. Los tres primeros puntos se realizan durante el proceso de diseño de la estructura de control, ejecutándose únicamente los dos últimos en tiempo real al producirse el fallo.

1. Se diseña un observador nominal.
2. Reduciendo el problema de diseño del observador nominal, se implementan los observadores dedicados a cada fallo.
3. Se desarrolla una lógica de diagnóstico para la detección y aislamiento de fallos.
4. Los fallos en los sensores son identificados mediante el procesado de las innovaciones por dicha lógica.
5. El observador correspondiente es seleccionado proporcionando el vector de estados al controlador.

Como resultado de la ejecución de este algoritmo, la planta es estabilizada y el sistema se mantiene operativo a pesar del fallo.

11 Experimentos en la Planta

El bucle de control ha sido simulado con éxito en diversas situaciones generadas al producirse un fallo en un sensor o un actuador. Sin embargo, el control debe ser ajustado a una situación real. Para ello se realizan una serie de experimentos en la planta.

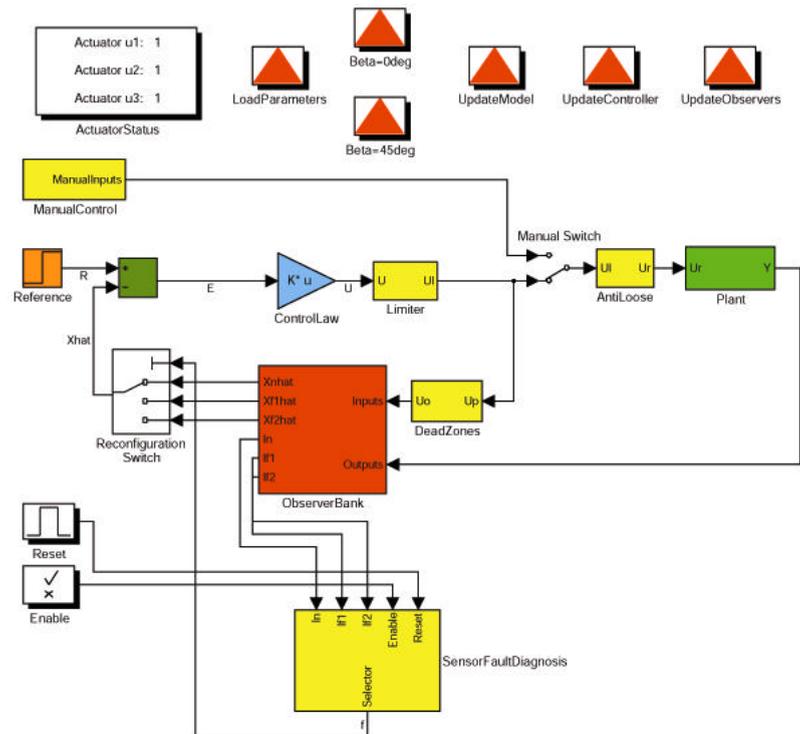


Ilustración 11 Interfaz de diseño y bucle de control

Con este objetivo, se desarrolla un nuevo modelo Simulink que incluye el bucle de control, previamente desarrollado y la interfaz necesaria para adquirir los datos del sistema y ejecutar el control (ver Ilustración 11). En dicho bucle se han introducido algunos cambios para mejorar el bucle de control una vez constadas las desviaciones entre las simulaciones y el comportamiento real. Ha sido necesario variar el umbral de detección así como las matrices de pesos empleadas en el diseño del observador para hacer frente al ruido presente en el sistema. Las matrices de coste del controlador también han sido modificadas. Se ha introducido un bloque que modela las zonas muertas de los actuadores para que el observador obtenga unos valores lo más cercano posible a los reales.

Sin embargo, la modificación más importante puede ser la implementación de un módulo que minimiza el efecto de las holguras en las ruedas dentadas empleadas por los potenciómetros para obtener la lectura de los ángulos de ataque. Estas holguras ocasionaban oscilaciones en torno al punto de equilibrio impidiendo la estabilización del sistema.

Por otro lado, se ha desarrollado una mínima interfaz entre el sistema y el operador para facilitar el proceso de diseño y ajuste.

El test ideado para verificar la validez de la reconfiguración consiste en una función escalón que provoca un salto en la referencia de β desde los 0 hasta los 45 grados. De esta forma, todos los sensores y actuadores se ven comprometidos.

12 Evolución del proyecto

La primera parte del estudio ha consistido en el modelado de la planta y la ejecución de los experimentos necesarios para la identificación de los parámetros del modelo. Tras esto, se ha construido un modelo lineal basado en el espacio de estados. Además, han sido identificadas diversas no linealidades para refinar las simulaciones del sistema.

El siguiente paso ha consistido en la implementación de un bucle de control nominal calculando un controlador proporcional de realimentación del vector de estados y un observador de dicho vector. Para calcular la matriz de realimentación se han utilizado las conocidas técnicas del método LQG. El diseño consiste en un proceso iterativo en el que se han probado diversos pesos para las matrices de coste. Como resultado de este proceso se han obtenido las matrices óptimas **K** y **L**. Las simulaciones se han llevado a cabo usando el modelo no lineal detallado.

Tras implementar el bucle de control nominal, se ha desarrollado un algoritmo para la reconfiguración de fallos en los actuadores. Dicho algoritmo actualiza el modelo del sistema, lo lineariza y calcula la nueva matriz de control que será descargada en el sistema en tiempo real. Debido a los problemas numéricos ocasionados por las singularidades introducidas cuando se produce un fallo, se han implementado diversas rutinas que proceden a reducir y posteriormente expandir el sistema.

Para solventar la reconfiguración cuando se produce un fallo en un sensor, se ha diseñado un banco de observadores que consiste en un observador nominal y tantos observadores dedicados como fallos se contemplan. Las matrices de realimentación de dichos observadores se han calculado usando también el método LQG una vez el sistema ha sido reducido para evitar problemas de rango. No es necesario descargar al sistema en tiempo real dichas matrices mientras éste se encuentra en funcionamiento ya que todo el conjunto de observadores funciona en paralelo desde el comienzo. Para seleccionar el observador más adecuado se ha implementado una lógica de diagnóstico basada en las innovaciones dadas por los observadores. Tras concluir el proceso de diseño se han llevado a cabo numerosas simulaciones contemplando fallos simples, múltiples y combinados entre sensores y actuadores.

La estructura de control ha sido verificada en la planta introduciendo varias modificaciones para ajustar su comportamiento. También se ha implementado un módulo de control manual y una interfaz básica para modificar los parámetros del sistema durante su diseño. En esta fase, se han realizado numerosos experimentos para verificar el comportamiento del sistema en una variada casuística de fallos que incluye fallos múltiples y combinados entre sensores y actuadores.

13 Conclusiones

Se ha demostrado que la solución propuesta lleva a cabo la reconfiguración con éxito. El sistema se mantiene operativo con unas prestaciones razonables para toda la casuística de fallos simples e incluso de múltiples actuadores y distintas combinaciones de sensores y actuadores. Los algoritmos implementados son eficientes y completamente automáticos.

Se ha verificado como el método LQG utilizado en el diseño del bucle de control nominal puede ser empleado para el diseño del controlador una vez se ha producido un fallo manteniendo las mismas matrices de pesos. Esto permite realizar la reconfiguración de forma totalmente automática mientras el sistema se encuentra en funcionamiento. Los problemas numéricos derivados de la deficiencia en el rango en sistemas en fallo han sido solucionados con éxito mediante la reducción y posterior expansión del sistema.

El uso de un banco de observadores dedicados permite la reconfiguración del sistema tras producirse un fallo en un sensor. Por otro lado, esta misma configuración puede ser empleada para llevar a cabo la detección y el posterior aislamiento del fallo. Así se permite que el proceso completo se realice de forma automática mientras el sistema se encuentra en funcionamiento. Sin embargo, el fallo sólo se detecta cuando la planta está en movimiento ya que, de otra forma, no se obtiene la información necesaria para llevar a cabo dicho proceso. Aunque la detección y aislamiento de fallos no era el objetivo del proyecto, se ha implementado una lógica que lleva a cabo tales tareas con éxito.

Los cambios en la estructura de control son mínimos y se limitan a la parte afectada: en caso de un fallo en un sensor se selecciona el observador adecuado y cuando se produce un fallo en un actuador se recalcula el controlador utilizando las mismas matrices de pesos y se descarga al sistema en tiempo real.

Problemas prácticos derivados de las holguras entre los dientes de los engranajes utilizados por los potenciómetros y otras no linealidades han sido solventados mediante el diseño de los módulos adecuados.

BIBLIOGRAFÍA

[Fr94]: D. F. Franklin: Feedback Control of Dynamic Systems, Addison Wesley, 1994.

[LuSt02]: J. Lunze, Th. Steffen: Hybrid Reconfigurable Control, in S.Engell, G. Frese, E. Schneider: Modelling, Analysis and design of Hybrid Systems. Spinger Verlag Berlin, 2002.

[Le98]: F.L.Lewis: Linear Quadratic Regulator (LQR) State Feedback Design, lecture of the Avanced Controls, Sensors and MEMS Group, Automation and Robotics Research Institute, 1998.

[Si99]: The MathWorks: Using Simulink, Version 3, Modelling, Simulation, Implementation, 1999.

[xP01]: The MathWorks: xPC Target User's Guide, 2001.