



Control Tolerante a Fallas en una Suspensión Automotriz Semi-Activa

Juan C. Tudón-Martínez^{a,*}, Sébastien Varrier^b, Ruben Morales-Menendez^a, Olivier Sename^b

^aTecnológico de Monterrey, Escuela de Ingeniería y Ciencias, Av. E. Garza Sada 2501, 64849 Monterrey N.L., México

^bGIPSA-lab, INPG, Université Grenoble Alpes, 11 rue des mathématiques, 38402 Grenoble, Francia

Resumen

Un nuevo controlador tolerante a fallas (*FTC* por sus siglas en inglés, *Fault Tolerant Controller*) activo es propuesto para una suspensión automotriz semi-activa, considerando un modelo de un cuarto de vehículo. El diseño está compuesto por: (1) un controlador no-lineal robusto utilizado para aislar las vibraciones en el vehículo causadas por perturbaciones externas y (2) un mecanismo de compensación usado para acomodar fallas aditivas en la fuerza de amortiguamiento. El mecanismo de compensación utiliza un módulo de detección y estimación de fallas robusto, basado en ecuaciones de paridad, para reconstruir la falla; esta información permite calcular la señal de compensación por medio de un modelo inverso del amortiguador para reducir el efecto de la falla en la dinámica vertical de la suspensión. Mientras que el controlador no-lineal, basado en la técnica de control de parámetros variantes lineales (*LPV* por sus siglas en inglés, *Linear Parameter-Varying*) está diseñado para aumentar el confort del pasajero y mantener el contacto llanta-suelo. Ante una falla en la fuerza de amortiguamiento, el *FTC* activo debe asegurar los desempeños de confort y seguridad utilizando la interacción entre el controlador *LPV* y el compensador. Resultados de simulación en *CarSim*TM muestran la efectividad del *FTC* activo respecto a un *FTC* pasivo y un amortiguador no controlado; el *FTC* pasivo depende del diseño para su capacidad tolerante, mientras que el *FTC* activo propuesto mejoró un 50.4 % en confort y un 42.4 % en agarre de superficie cuando ocurre una falla, en contraste con el amortiguador no-controlado que pierde totalmente su efectividad.

Palabras Clave:

Control tolerante a fallas, detección de fallas, suspensión semi-activa automotriz, espacio de paridad, control *LPV*.

1. Introducción

Constantemente, la industria automotriz es más sofisticada y compleja por la demanda creciente de producción de vehículos más seguros y con mayor confort. Dentro de este crecimiento de innovación tecnológica automotriz, el desarrollo de sistemas de suspensión inteligente ha sido de gran interés para la comunidad científica en ingeniería de control con el fin de mejorar el compromiso entre confort y estabilidad del vehículo. Dos tecnologías de amortiguamiento han sido estudiadas, las suspensiones activas tienen mejor rendimiento pero son excesivamente caras para su implementación, mientras que las semi-activas ofrecen un buen balance entre costo y desempeño (Hurel-Ezeta et al., 2013).

Con la adición de nuevos sensores, la coordinación con otros sistemas (por ejemplo, el frenado, la dirección, etc.) y/o la im-

plementación de amortiguadores variables, el monitoreo y control de un sistema de suspensión inteligente es de mayor complejidad, pero permite desarrollar nuevas técnicas con tolerancia a fallas para asegurar en todo momento la confiabilidad del proceso ante situaciones anormales, por ejemplo, en suspensiones automotrices las situaciones anómalas pueden ser: fallas en acelerómetros, fallas en el regulador de corriente del amortiguador inteligente o fugas de aceite en el amortiguador.

Un controlador tolerante a fallas (*FTC* por sus siglas en inglés, *Fault Tolerant Controller*) está diseñado para mantener el desempeño deseado del sistema de control por un cierto periodo de tiempo ante la presencia de fallas, es decir, cuando una falla ha sido detectada y desplegada al conductor se asume que éste puede continuar conduciendo con ayuda del *FTC* (Manzone et al., 2001). Existen dos grandes grupos de *FTC* (Zhang y Jiang, 2008): los sistemas pasivos cuya tolerancia a fallas es robusta y diseñada fuera de línea, y los sistemas activos que cuentan con un mecanismo de reconfiguración del algoritmo de control en forma automática.

La principal limitante de un *FTC* pasivo es que puede resultar conservador cuando se contemplan numerosos escenarios de

* Autor en correspondencia.

Correos electrónicos: jc.tudon.phd.mty@itesm.mx (Juan C. Tudón-Martínez), sebastien.varrier@gipsa-lab.grenoble-inp.fr (Sébastien Varrier), rmm@itesm.mx (Ruben Morales-Menendez), olivier.sename@gipsa-lab.grenoble-inp.fr (Olivier Sename)

falla en el diseño del controlador; mientras que el *FTC* activo utiliza información de la falla en línea para compensar su efecto a lo largo del proceso. La información de la falla es obtenida por un módulo de detección y diagnóstico de fallas (*FDD* por sus siglas en inglés, *Fault Detection and Diagnosis*), el cual puede estar basado en un modelo matemático o utilizar datos históricos para generar una redundancia analítica.

Existen diferentes mecanismos de reconfiguración en un controlador *FTC* activo: compensación, conmutación, optimización, etc. Los sistemas de compensación son útiles cuando la magnitud de la falla puede ser estimada en línea (Zhang y Jiang, 2008); por ejemplo, utilizando un módulo *FDD* de generación residual.

El método de *espacio de paridad* propuesto por Chow y Willsky (1984) es considerado como uno de los métodos *FDD* de generación residual más importantes en la comunidad internacional de control automático, íntimamente relacionado con la estimación paramétrica y observadores (Zhang y Jiang, 2008). Las principales ventajas del método de espacio de paridad son (Ding, 2008): (a) fácil diseño en el marco de álgebra lineal, sin necesidad de tener un conocimiento avanzado en teoría de control; (b) baja complejidad computacional, una serie de algoritmos matemáticos facilita su implementación en un sistema de control embebido; (c) plataforma de nuevas ideas por su relación con la estimación paramétrica; (d) diseños *FDD* robustos y (e) alta velocidad de detección y/o estimación de falla. Una de las principales limitantes es el requisito de un estructura de modelo en espacio de estados con alta fiabilidad, cuya tarea puede llegar a ser complicada en una suspensión automotriz dependiendo de los grados de libertad que se consideren.

En suspensiones automotrices, el trabajo publicado de *FDD* se ha centralizado en generación residual con espacios de paridad. Börner et al. (2002) y Fischer e Isermann (2004) presentan una metodología de estimación paramétrica de un modelo de amortiguador semi-activo para crear una firma de fallas utilizando ecuaciones de paridad. Los residuos junto con la desviación paramétrica pueden ser utilizados en un sistema de reconfiguración de compensación usando métodos de inteligencia artificial (Fischer et al., 2007). Similarmente, Kim (2011) utiliza ecuaciones de paridad en la dinámica vertical del chasis para detectar fallas de sensor (acelerómetro) en un vehículo.

Durante los últimos años, la modelación y control de sistemas de parámetros variantes lineales (*LPV* por sus siglas en inglés, *Linear Parameter-Varying*) ha ganado importancia como una solución para extender la teoría de control robusto en el control de sistemas complejos no-lineales, como lo es la dinámica vertical no-lineal del vehículo (Poussot-Vassal et al., 2012). Desde su introducción (Shamma, 1988), el método *LPV* se ha adaptado para manejar las no-linealidades del sistema utilizando un conjunto de parámetros no estacionarios exógenos y hacer el desempeño del controlador adaptable a través de la variación lineal delimitada de estos parámetros. Shamma (2012) resalta las propiedades de los sistemas *LPV* para el diseño y síntesis del controlador, asumiendo que los parámetros pueden ser medidos o estimados en tiempo real, en contraste con los sistemas lineales de tiempo variable (*LTV* por sus siglas en inglés, *Linear Time-Varying*) cuyos valores de control dependen de los

valores de los parámetros futuros, violando así la restricción de causalidad en el control. El *conservadurismo* y complejidad de cómputo pueden llegar a ser desventajas del control *LPV* cuando el número de parámetros variantes es muy grande.

Cuando la técnica de control *LPV* se extiende al diseño de un *FTC* donde el parámetro variante asociado a la falla proviene de un módulo *FDD*, el sistema de lazo-cerrado sólo es robusto al tipo y magnitud de fallas consideradas en el diseño del controlador, es decir, el *FTC* activo y robusto está limitado a las fallas englobadas por el conjunto variante tal como se propone en (Gáspár et al., 2012) para asegurar la estabilidad del vehículo utilizando un sistema de suspensión activa. Recientemente, se han propuesto interesantes sistemas *LPV-FTC* para compensar la pérdida de efectividad de un amortiguador semi-activo (a causa de una fuga de aceite del amortiguador), utilizando el resto de los amortiguadores para equilibrar la transferencia de carga en el chasis (Tudón-Martínez et al., 2013b; Fergani et al., 2014). Este tipo de control tolerante, basado en *LPV*, utiliza el método de reconfiguración por conmutación (Zhang y Jiang, 2008).

Otros diseños de *FTC* activos que utilizan el método de reconfiguración por conmutación han sido propuestos para suspensiones activas; por ejemplo, en (Chamseddine y Noura, 2008; Noura et al., 2009), el *FTC* está basado en la técnica de control de modo deslizante (*SMFTC* por sus siglas en inglés, *Sliding Mode Fault-Tolerant Controller*) donde la falla es estimada por un observador de modo deslizante. En (Kim y Lee, 2011) se propone también un *SMFTC* con un módulo *FDD* basado en un modelo matemático del sensor y actuador para la generación residual. Por otro lado, en (Qiu et al., 2011) se propone un *FTC* activo con reconfiguración por optimización, es decir, una desigualdad matricial lineal (*LMI* por sus siglas en inglés, *Linear Matrix Inequality*) se utiliza para diseñar un observador y controlador \mathcal{H}_∞ que asegure la estabilidad del sistema de control ante una falla en el actuador. Las propuestas antes mencionadas muestran resultados prometedores para una implementación; sin embargo, el sistema de reconfiguración por conmutación u optimización puede limitar la capacidad tolerante del controlador, es decir, el desempeño está sujeto al signo, la magnitud y el comportamiento de la falla aditiva y/o multiplicativa que se utilizó en el diseño del controlador.

En este artículo se propone un *FTC* activo con reconfiguración por compensación que permite eliminar el efecto de una falla aditiva en el sistema de actuación, sin limitar el desempeño a la forma de la falla. El sistema *FTC* propuesto es implementado en una suspensión semi-activa de un modelo de cuarto de vehículo (*QoV* por sus siglas en inglés, *Quarter of Vehicle*), cuyo diseño está compuesto por tres módulos: (1) un módulo *FDD* basado en ecuaciones de paridad para estimar la falla en línea con robustez a dinámicas no modeladas, (2) un controlador *LPV* con desempeño robusto a incertidumbres del modelo y perturbaciones de camino y, (3) el sistema de reconfiguración por compensación que utiliza la falla estimada para calcular la corriente eléctrica necesaria para mitigar el efecto de la falla en la dinámica vertical del modelo *QoV*. Este trabajo es una extensión de (Tudón-Martínez et al., 2013a), resaltando el beneficio de implementar un *FTC* activo en comparación con su versión

Download English Version:

<https://daneshyari.com/en/article/1701772>

Download Persian Version:

<https://daneshyari.com/article/1701772>

[Daneshyari.com](https://daneshyari.com)