

Control por rechazo activo de perturbaciones de un sistema háptico bidireccional por cable del sistema de dirección de un automóvil real

Miguel Domínguez-Castaño * A. Rodríguez-Angeles **
H. Sira-Ramírez ***

Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto
Politécnico Nacional

* e-mail: ddominguez@cinvestav.mx

** e-mail: aangeles@cinvestav.mx

*** e-mail: hsira@cinvestav.mx

Resumen Este artículo describe un sistema háptico de conducción por cable en un sistema de dirección de un automóvil. Se utiliza Rechazo Activo de Perturbaciones (RAP) basado en observadores del tipo Proporcional Integral Generalizado de alta ganancia. El esquema es el de un sistema maestro-esclavo en el cual el esclavo (la rueda) sigue una referencia angular de giro, definida por el volante del maestro, mientras que la estimación de los esfuerzos de control del esclavo, debidos al torque y no-linealidades no modeladas, son añadidos a las perturbaciones del maestro quien así percibe los efectos de realimentación háptica. Se presentan resultados experimentales llevados a cabo sobre una plataforma real incluyendo una plataforma que posibilita el movimiento de la rueda.

Palabras Clave: Observador Proporcional Integral Generalizado de alta ganancia, realimentación háptica, sistema maestro-esclavo.

1. INTRODUCCIÓN

Debido al desarrollo de la tecnología, el diseño básico de los sistemas de dirección en automóviles ha cambiado substancialmente desde la invención del volante de dirección. La señal de dirección enviada por el conductor pasa a través de una columna de dirección (incluidos uniones universales y cajas de engranes) hacia las llantas delanteras. Un objetivo de los sistemas de dirección asistida (hidráulica) es la reducción de la carga impuesta al conductor al maniobrar el vehículo complementando el esfuerzo requerido por el conductor. Posteriormente, se introdujeron los sistemas de dirección asistida eléctricamente dando asistencia electrohidráulica, o asistencia eléctrica, a la columna de dirección. Los sistemas de dirección asistida se clasifican en tres grupos: sistemas de dirección mecánica, sistemas hidráulicos y electrohidráulicos, y sistemas de dirección asistidos eléctricamente (SDAE). En el último grupo existe una tecnología llamada "Sistemas de dirección por cable" (SDC), y se caracteriza por carecer de algunos componentes mecánicos tales como: eje de dirección, columna, mecanismo de reducción, entre otras. En los SDC, se requiere que el conductor "sienta" los efectos de sus acciones en torques, fuerzas y condiciones de manejo generadas en el sistema de orientación de la rueda en movimiento. El sistema de dirección por cable debe comportarse como un dispositivo "háptico".

En la literatura se encuentran descritos varios SDC. Algunos basados en mediciones de corriente [2], otros en control adaptable [1], ó control por retroalimentación de fuerza [3]. En estos modelos, términos como perturbaciones e incertidumbres aparecen afectando la dinámica y el comportamiento del sistema. Fenómenos tales como fricción, amortiguamiento, inercia, fuerzas de alineación, etc. deben ser considerados en el modelo dinámico. En este trabajo se propone, para la estimación de los efectos de tales perturbaciones desconocidas, el uso de observadores de alta ganancia extendidos [4], [5]. Lo anteriormente descrito hace difícil determinar un modelo matemático preciso y una estrategia de control para los sistemas de dirección por cable robusta respecto de tales perturbaciones desconocidas. Como solución se considera la estimación en línea de los efectos de las perturbaciones de las dinámicas no modeladas y otras perturbaciones exógenas mediante observadores con cancelación correspondiente en la ley de control. En este trabajo se propone un vehículo de dirección por cable basado en observadores Proporcionales Integrales Generalizados de Alta Ganancia (GPI) [6] para un Control por Rechazo Activo de Perturbaciones de los sistemas interconectados. El observador de alta ganancia GPI ayuda a la determinación de los efectos dinámicos de fenómenos inciertos y de las perturbaciones presentes en el subsistema de rack de dirección y la llanta, tales como fricción continua y discontinua, fuerzas de alineación, efectos de inercia, amortiguamiento, etc. El observador de alta ganancia GPI tiene doble propósito: primero ayudar

al controlador PD en el rechazo activo de las perturbaciones dinámicas y segundo provee fuerzas y torques que son retroalimentados al conductor a través del volante de dirección, cerrando de tal manera un lazo háptico. El trabajo propuesto solo se basa en retroalimentar el ángulo de posición, de tal manera, que puede ser implementado con sensores comunes (“encoders”) de bajo costo tal como en la plataforma experimental aquí considerada.

Este artículo está organizado de la siguiente manera: en la Sección 2, se plantea la formulación del problema y resultados principales. En la Sección 3, se realiza la descripción del sistema SDC. En la Sección 4, se presentan los resultados experimentales para verificar la efectividad del método propuesto. Finalmente, las conclusiones son descritas en la sección 5.

2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA Y RESULTADOS PRINCIPALES

Considere el siguiente par de sistemas no lineales de segundo orden, con ganancias constantes, provistos de controles independientes u_m y u_s

$$\begin{aligned}\ddot{\theta}_m &= \phi_m(t, \theta_m, \dot{\theta}_m, \theta_s, \dot{\theta}_s) + \psi_m u_m \\ \ddot{\theta}_s &= \phi_s(t, \theta_s, \dot{\theta}_s, \theta_m, \dot{\theta}_m) + \psi_s u_s\end{aligned}$$

donde los términos aditivos: $\phi_m(\cdot)$, $\phi_s(\cdot)$ contienen de manera agregada, las señales exógenas desconocidas, puramente variantes en el tiempo, las interdependencias lineales y no lineales desconocidas, los pares y fuerzas de interacción así como las dinámicas y no-linealidades no modeladas propias de cada subsistema.

Suponemos que:

- Los valores, como funciones del tiempo, de las perturbaciones agregadas, dependientes de los estados (endógenas) y del ambiente circundante (exógenas): $\phi_m(\cdot)$ y $\phi_s(\cdot)$, son uniformemente, absolutamente acotadas, para toda respuesta acotada de estados de los subsistemas interactuantes, generadas por controles finitos. Es decir:

$$\sup_t |\phi_m(\cdot)| < K_m^0, \quad \sup_t |\phi_s(\cdot)| < K_s^0$$

- Suponemos que para un entero $p > 0$ finito

$$\sup_t |\phi_m^{(p)}(\cdot)| < K_m^p, \quad \sup_t |\phi_s^{(p)}(\cdot)| < K_s^p$$

- Las ganancias constantes: ψ_m y ψ_s son conocidas.

Sea, $\theta_m^*(t)$, una señal de referencia para la salida del sistema maestro, θ_m , y sea esta misma señal, posiblemente escalada en magnitud mediante un factor constante κ , $\theta_s^*(t) = \theta_m^*(t)/\kappa$, una señal de referencia para la salida del sistema esclavo, θ_s . El problema a ser resuelto consiste en: dadas cotas estrictamente positivas y arbitrariamente pequeñas: ϵ_j , $j = m, s$, diseñar leyes de control u_m y u_s de tal manera que, irrespectivamente de las magnitudes acotadas de las perturbaciones desconocidas $\phi_m(\cdot)$, $\phi_s(\cdot)$, los errores de seguimiento en posición y velocidad $e_j = \theta_j - \theta_j^*(t)$, $\dot{e}_j = \dot{\theta}_j - \dot{\theta}_j^*(t)$, $j = m, s$, satisfacen, uniformemente, ultimadamente:

$$(e_m^2 + \dot{e}_m^2) \leq \epsilon_m^2, \quad (e_s^2 + \dot{e}_s^2) \leq \epsilon_s^2$$

Proposition. . Las leyes de control,

$$\begin{aligned}u_m &= \frac{1}{\psi_m} \left[\ddot{\theta}_m^*(t) - \hat{\phi}_m - 2\xi_{(c,m)}\omega_{c,m}\hat{e}_m - \omega_{n(c,m)}^2 e_m \right] \\ u_s &= \frac{1}{\psi_s} \left[\ddot{\theta}_s^*(t) - \hat{\phi}_s - 2\xi_{(c,s)}\omega_{c,s}\hat{e}_s - \omega_{n(c,s)}^2 e_s \right]\end{aligned}\tag{1}$$

donde las señales: $\hat{\phi}_m$, $\hat{\phi}_s$, $\hat{e}_m = \dot{\theta}_m - \dot{\theta}_m^*$, $\hat{e}_s = \dot{\theta}_s - \dot{\theta}_s^*$, se generan a partir de los observadores extendidos GPI de la forma siguiente ($j = m, s$):

$$\begin{aligned}\dot{\hat{x}}_{1j} &= \hat{x}_{2j} + \lambda_{(p+1)j}(x_{1j} - \hat{x}_{1j}) \\ \dot{\hat{x}}_{2j} &= \psi_j u_j + \hat{\varphi}_{1j} + \lambda_{pj}(x_{1j} - \hat{x}_{1j}) \\ \dot{\hat{\varphi}}_{1j} &= \hat{\varphi}_{2j} + \lambda_{(p-1)j}(x_{1j} - \hat{x}_{1j}) \\ &\vdots \\ \dot{\hat{\varphi}}_{pj} &= \lambda_{0j}(x_{1j} - \hat{x}_{1j})\end{aligned}$$

con $\hat{x}_{1j} = \hat{\theta}_j$, $\hat{x}_{2j} = \dot{\hat{\theta}}_j$ y $\hat{\varphi}_{1j} = \hat{\phi}_j$.

La demostración de esta proposición está basada en que las dinámicas inyectadas de los errores de estimación, $\tilde{e}_j = \theta_j - \hat{\theta}_j = \theta_j - x_{1j}$, $j = m, s$, satisfacen dinámicas predominantemente lineales, excitadas por perturbaciones acotadas, de la forma:

$$\tilde{e}_j^{(p+2)} + \lambda_{(p+1)j}\tilde{e}_j^{(p+1)} + \dots + \lambda_{0j}\tilde{e}_j = \phi_m^{(p)}$$

La selección de los coeficientes $\lambda_{i,j}$, $i = 0, \dots, p+1$, $j = m, s$ en un esquema de observación de alta ganancia (raíces del polinomio característico correspondiente suficientemente alejados a la izquierda del eje real del plano complejo) garantiza la evolución de estos errores a permanecer acotados, uniformemente, por una bola (vecindad de convergencia) definida alrededor del origen del espacio de fase del error de observación. Esta vecindad puede hacerse tan pequeña como se requiera. A raíces dominantes con parte real más negativa, se corresponden vecindades de convergencia del error cada vez más pequeñas. (Ver detalles en [7]). Para mayor comprensión se remite al lector a [8], [9], [10].

3. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA SDC

El diseño de la plataforma experimental del mecanismo SDC, se muestra en la Figura 1 y el rack de dirección se muestra en la Figura 3; ambos son muy similares. Por lo tanto, basado en su similitud el modelo dinámico del subsistema esclavo se obtiene, de la misma forma, el del subsistema del volante de dirección, pero en el rack de dirección se incluyen fenómenos dinámicos tales como la interacción entre el suelo y la llanta y las fuerzas de alineación que no están presentes en el sistema maestro.

Primero se presenta el modelo dinámico correspondiente al subsistema de volante de dirección, este modelo está afectado por tres fenómenos físicos que están presentes en tres partes fundamentales: el volante, la caja de reducción y el motor DC. Este último tiene como función en el subsistema maestro reflejar al conductor las fuerzas que son estimadas por el observador de alta ganancia GPI de los fenómenos dinámicos presentes en el rack de dirección y la rueda. Con respecto a la parte eléctrica, los parámetros más relevantes son, V_m voltaje de entrada, L_m corriente de armadura,

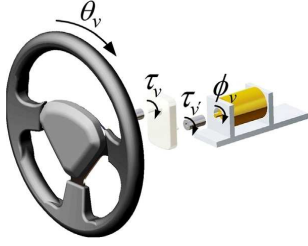


Figura 1. Volante de dirección

R_m resistencia de armadura, I_m corriente de armadura, i_f corriente a través del devanado del motor, e_m fuerza contraelectromotriz, k_2 constante de ganancia de fuerza contraelectromotriz. Ahora los parámetros relevantes con respecto a la parte mecánica son, ϕ_m ángulo de salida del motor, J_1 momento de inercia en la entrada de la caja de reducción, B_1 coeficiente de amortiguamiento en la entrada de la reducción, F_1 coeficiente de fricción de Coulomb a la entrada de la reducción, F_2 coeficiente de fricción de Coulomb a la salida de la reducción, B_2 coeficiente de amortiguamiento en la salida de la reducción, J_2 momento de inercia en la salida de la caja de reducción, k_1 constante de torque del motor, τ'_m torque del motor, F_{Tm} coeficiente de fricción de Coulomb en la caja de reducción, τ_m torque en la salida de la caja de reducción, J_m momento de inercia del volante, C_m coeficiente de fricción de Coulomb en el volante, B_m coeficiente de amortiguamiento del volante, $N_m = \frac{N_{m1}}{N_{m2}}$ proporción de reducción de la caja, N_{m1} número de dientes en la entrada de la caja, N_{m2} número de dientes en la salida de la caja, θ_m posición angular del volante, B_{tm} coeficiente de amortiguamiento en la caja de reducción.

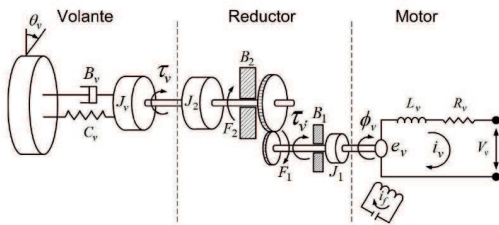


Figura 2. Diagrama electro-mecánico equivalente del subsistema maestro

Para la parte eléctrica del sistema maestro, la relación dinámica entre el torque de salida τ_m y la entrada de voltaje V_m esta dada por la siguiente expresión:

$$\tau_m = \frac{N_m k_1}{R_m} V_m(t) - \frac{N_m^2 k_1 k_2}{R_m} \dot{\theta}_m \quad (2)$$

Ahora, teniendo en cuenta la caja de reducción, la relación dinámica entre τ_m y la posición angular θ_m esta representada por la siguiente expresión:

$$\tau_m = J_{Tm} \ddot{\theta}_m + B_{Tm} \dot{\theta}_m + F_{Tm} \text{sign}(\dot{\theta}_m) \quad (3)$$

Donde,

$$J_{Tm} = \left(\frac{N_{m2}}{N_{m1}} \right)^2 J_1 + J_2 \quad (4)$$

$$B_{Tm} = \left(\frac{N_{m2}}{N_{m1}} \right)^2 B_1 + B_2, \quad F_{Tm} = \left(\frac{N_{m2}}{N_{m1}} \right)^2 F_1 + F_2$$

Finalmente, tomando las Ec. 2 y Ec. 3 y los fenómenos dinámicos en el volante de dirección, se obtiene el modelo dinámico:

$$(J_m + J_{Tm}) \ddot{\theta}_m + (B_m + B_{Tm}) \dot{\theta}_m + (F_{Tm} + C_m) \text{sign}(\dot{\theta}_m) = \frac{N_m K_1}{R_m} V_m(t) - \frac{N_m^2 k_1 k_2}{R_m} \dot{\theta}_m \quad (5)$$



Figura 3. Rack de dirección

Nótese que la similitud entre los dos subsistemas se puede apreciar entre la Figura 2 y la Figura 4. Ahora para el subsistema de rack de dirección, sus componentes principales son: la rueda, caja de reducción y motor DC. Debido a las similitudes entre ambos sistemas, el modelo dinámico se obtiene de la misma forma que para el subsistema maestro. Sin embargo, debido a la interacción de rodadura de la llanta están presentes efectos dinámicos tales como fricción y fuerzas de alineación que deben ser consideradas. Las fuerzas de alineación están representadas por τ_{SAT} . De la misma forma que en el modelo anterior, se consideran las mismas constantes para obtener los modelos de la parte mecánica y eléctrica pero en este caso se tiene como subíndice de cada constante una letra "s" para especificar que se hace referencia al rack de dirección.

$$(J_s + J_{Ts}) \ddot{\theta}_s + (B_s + B_{Ts}) \dot{\theta}_s + (F_{Ts} + C_s) \text{sign}(\dot{\theta}_s) + \tau_{SAT} = \frac{N_s K_1}{R_s} V_s(t) - \frac{N_s^2 k_1 k_2}{R_s} \dot{\theta}_s \quad (6)$$

Donde,

$$J_{Ts} = \left(\frac{N_{s2}}{N_{s1}} \right)^2 J_a + J_b$$

$$B_{Ts} = \left(\frac{N_{s2}}{N_{s1}} \right)^2 B_a + B_b, \quad F_{Ts} = \left(\frac{N_{s2}}{N_{s1}} \right)^2 F_a + F_b \quad (7)$$

El torque de alineación (τ_{SAT}) ocurre por la existencia de los ángulos de las ruedas. Las fuerzas de alineación de la llanta izquierda están modeladas como se presenta en [1]. El modelo del torque de auto-alineación es:

$$\tau_{SAT} = (\xi_c + \xi_p) F_{fl}^y(\alpha_{fl}) \quad (8)$$

Basado en el modelo dinámico obtenido para el subsistema de volante (5), los términos no lineales incluyendo perturbaciones y dinámicas no modeladas, son substituidos por un término de perturbación variante en el tiempo $\varphi(t)$.

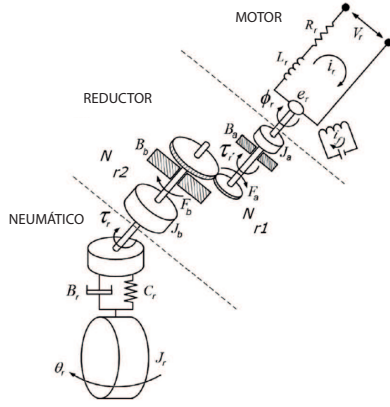


Figura 4. Diagrama electro-mecánico equivalente del sub-sistema esclavo

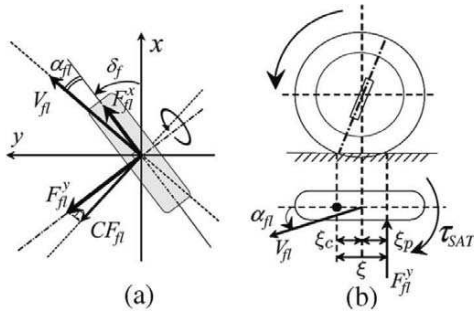


Figura 5. a) Fuerzas en la llanta. b) Torque de Autoalineación

En el espacio de estados se define $x_1 = \theta_m$ y $x_2 = \dot{\theta}_m$, el modelo (5) esta representado como un sistema lineal perturbado, como se muestra a continuación:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= \frac{N_m k_1}{J_{me} R_m} V_m(t) + \varphi(t) \end{aligned} \quad (9)$$

Se asume que $\varphi(t)$ es una función uniformemente, absolutamente, acotada y variante en el tiempo. Sí otros efectos dinámicos o perturbaciones tienen que ser considerados, estos son incluidos en el término $\varphi(t)$. Este último es estimado por el observador de alta ganancia GPI.

$$\begin{aligned} \varphi(t) = -\frac{1}{J_{me}} [(B_{Tm} + B_m) \dot{\theta}_m + (F_{Tm} + C_m) \text{sign}(\dot{\theta}_m) + \\ \frac{N_m^2 k_1 k_2}{R_m} \dot{\theta}_m] \end{aligned} \quad (10)$$

Basado en el espacio de estados se propone un observador de alta ganancia GPI para el sistema lineal perturbado. El número de integradores requeridos en el observador de alta ganancia GPI depende del orden y la complejidad de las no-linealidades representadas en $\varphi(t)$, este puede modelarse localmente como un polinomio en el tiempo, ó polinomio de Taylor, pero en este caso una buena aproximación implicaría una cadena infinita de integradores. El número de integradores fue ajustado basado en prueba y error del valor del error de estimación $\tilde{e}_m = x_1 - \hat{x}_1$ de una serie de experimentos.

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}_1 &= \hat{x}_2 + \lambda_{7m}(x_1 - \hat{x}_1) \\ \dot{\hat{x}}_2 &= \frac{N_m k_1}{J_{me} R_m} V_m(t) + \hat{\varphi}_1 + \lambda_{6m}(x_1 - \hat{x}_1) \\ \dot{\hat{\varphi}}_1 &= \hat{\varphi}_2 + \lambda_{5m}(x_1 - \hat{x}_1) \\ &\vdots \\ \dot{\hat{\varphi}}_6 &= \lambda_{0m}(x_1 - \hat{x}_1) \end{aligned} \quad (11)$$

Noté que el término $\hat{\varphi}_1$ corresponde al término de perturbación estimada $\varphi(t)$. También nótese que el observador de alta ganancia GPI solo requiere la medición del ángulo de posición del volante $x_1 = \theta_m$. El error de estimación ($\tilde{e}_m = x_1 - \hat{x}_1$) del observador de alta ganancia GPI, satisface la siguiente dinámica,

$$\tilde{e}_m^{(8)} + \lambda_{7m} \tilde{e}_m^{(7)} + \dots + \lambda_{2m} \ddot{\tilde{e}}_m + \lambda_{1m} \dot{\tilde{e}}_m + \lambda_{0m} \tilde{e}_m = \varphi^{(6)} \quad (12)$$

Esta última, corresponde a un sistema dinámico lineal no homogéneo, con una entrada dada por una derivada de sexto orden. Para asegurar la convergencia de la dinámica del error a una vecindad pequeña alrededor del origen de coordenadas de fase de error de estimación, las ganancias λ_i , $i = 0, 1, 2, \dots, 7$ se seleccionan, de tal forma que, las raíces del polinomio característico esten suficientemente alejadas hacia la izquierda del eje imaginario, en el plano complejo. Esto implica ganancias de alto valor. Una elección simple de estas ganancias se logra asociando el polinomio característico a un polinomio adecuado con el conocimiento previo de sus raíces. Dado que el orden del observador es un número par, entonces se elige un polinomio de segundo orden con coeficientes $\xi_{obs,m}$ y $\omega_{n(obs,m)}$ relacionados con el amortiguamiento y la frecuencia natural, respectivamente:

$$\begin{aligned} s^{(8)} + \lambda_{7m} s^{(7)} + \dots + \lambda_{2m} s^2 + \lambda_{1m} s + \lambda_{0m} = \\ (s^2 + 2\xi_{obs,m} \omega_{n(obs,m)} s + \omega_{n(obs,m)}^2)^4 \end{aligned} \quad (13)$$

Dado el observador (11), se propone un control PD con rechazo activo de perturbaciones:

$$\begin{aligned} V_m(t) = -\frac{J_{me} R_m}{k_1 N_m} [\hat{\varphi}_1 + \omega_{n(c,m)}^2 (\theta_m - \theta_m^*) + \\ 2\xi_{c,m} \omega_{n(c,m)} (\hat{x}_2 - \dot{\theta}_m^*) - \ddot{\theta}_m^* + K_h \hat{\sigma}_1] \end{aligned} \quad (14)$$

Donde $\dot{\theta}_m^*$ y $\ddot{\theta}_m^*$ son la velocidad y aceleración deseadas, en este caso la impuestas por el usuario a través del volante, las cuales son obtenidas de la posición angular impuesta por θ_m^* . El término $\hat{\sigma}_1$ corresponde a la señal de perturbación estimada en el subsistema de rack de dirección la cual es sopesada por la ganancia K_h y es retroalimentada al volante para cerrar el lazo háptico, recreando la reflexión de fuerza.

Ahora debido a la similitud de los modelos, se presenta el modelo (6) considerando $y_1 = \theta_s$ y $y_2 = \dot{\theta}_s$ el espacio de estados es el siguiente:

$$\begin{aligned} \dot{y}_1 &= y_2 \\ \dot{y}_2 &= \frac{N_s k_1}{J_{sc} R_s} V_s(t) + \sigma(t) \end{aligned} \quad (15)$$

Donde el término variante en el tiempo $\sigma(t)$ agrupa los términos no lineales, incluyendo las perturbaciones y dinámicas no modeladas,

$$\sigma(t) = -\frac{1}{J_{se}}[(B_{Ts} + B_s)\dot{\theta}_s + (F_{Ts} + C_s)\text{sign}(\dot{\theta}_s) + \frac{N_s^2 k_1 k_2}{R_s} \dot{\theta}_s + \tau_{SAT}] \quad (16)$$

El término $J_{se} = J_{Ts} + J_s$. Se asume que $\sigma(t)$ es una función uniformemente, absolutamente, acotada y variante en el tiempo. Sí otros efectos dinámicos o perturbaciones tienen que ser considerados, estos son incluidos en el término $\sigma(t)$. Este último es estimado por el observador de alta ganancia GPI. De igual forma al modelo anterior se presenta un observador de alta ganancia GP. Observe que el observador de alta ganancia solo requiere de la medida del ángulo de posición del volante, minimizando el total de los sensores del sistema.

$$\begin{aligned} \hat{y}_1 &= \hat{y}_2 + \lambda_{7s}(y_1 - \hat{y}_1) \\ \dot{\hat{y}}_2 &= \frac{N_s k_1}{J_{re} R_s} V_s(t) + \hat{\sigma}_1 + \lambda_{6s}(y_1 - \hat{y}_1) \\ \dot{\hat{\sigma}}_1 &= \hat{\sigma}_2 + \lambda_{5s}(y_1 - \hat{y}_1) \\ &\vdots \\ \dot{\hat{\sigma}}_6 &= \lambda_{0s}(y_1 - \hat{y}_1) \end{aligned} \quad (17)$$

Noté que el término $\hat{\sigma}_1$ corresponde al término de perturbación estimada $\sigma(t)$. El error de estimación ($\tilde{e}_s = y_1 - \hat{y}_1$) del observador de alta ganancia GPI, satisface la siguiente dinámica,

$$\tilde{e}_s^{(8)} + \lambda_{7s}\tilde{e}_s^{(7)} + \dots + \lambda_{2s}\tilde{e}_s + \lambda_{1s}\dot{\tilde{e}}_s + \lambda_{0s}\tilde{e}_s = \varphi^{(6)} \quad (18)$$

Esta última, corresponde a un sistema dinámico lineal no homogéneo, con una entrada dada por una derivada de sexto orden. Para asegurar la convergencia de la dinámica del error a una vecindad pequeña alrededor del origen de coordenadas de fase de error de estimación, las ganancias λ_i , $i = 0, 1, 2, \dots, 7$ son seleccionadas de igual forma que para el observador (11). Dado que el orden del observador es un número par, entonces se escoje un polinomio de segundo orden con coeficientes $\xi_{obs,s}$ y $\omega_{n(obs,s)}$ relacionados con el amortiguamiento y la frecuencia natural, respectivamente:

$$s^{(8)} + \lambda_{7s}s^{(7)} + \dots + \lambda_{2s}s^2 + \lambda_{1s}s + \lambda_{0s} = \left(s^2 + 2\xi_{obs,s}\omega_{n(obs,s)}s + \omega_{n(obs,s)}^2\right)^4 \quad (19)$$

Dado el observador (17), se propone un control PD con rechazo activo de perturbaciones:

$$V_s(t) = -\frac{J_{se}R_s}{k_1N_s}[\hat{\sigma}_1 + \omega_{n(c,s)}^2(\theta_s - \theta_m(t)) + 2\xi_{c,s}\omega_{n(c,s)}(\hat{y}_2 - \hat{x}_2) - \dot{\hat{x}}_2] \quad (20)$$

El término $\hat{\sigma}_1$ corresponde a la señal de perturbación estimada en el subsistema de rack de dirección.

4. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Para propósitos experimentales, se desarrolló una plataforma de bajo costo basada en el sistema de dirección de un vehículo VW escarabajo. La plataforma está construida con un volante de dirección convencional como sistema maestro y la mitad del rack de dirección del vehículo VW escarabajo, incluyendo el sistema de suspensión y la llanta, como subsistema esclavo. Adicionalmente se proporciona un mecanismo para darle tracción a la rueda por medio de catarinas y cadenas a través de un motor de scooter de 500 W de la marca Monster Scooter Parts, este motor tiene instalado un regulador de velocidad, para que la rueda gire a diferentes velocidades. La columna de dirección ha sido modificada como se observa en las Figuras 1 y 3, incluyendo dos motores DC y encoders. La comunicación y el control son programados en una computadora con Windows[®] como sistema operativo. Toda la propuesta de control del sistema háptico bilateral SDC, PD y observador de alta ganancia GPI (14,11) para el volante de dirección y (20,17) para el rack de dirección son programados usando bloques generales en Simulink[®] disponible en Matlab[®]. Los componentes electrónicos y mecánicos usados en la plataforma son los siguientes: los ángulos de posición de volante de dirección y del rack de dirección son medidos con encoders incrementales de la marca OMRON, modelo E6B2-CWZ1X, 2000PPR, 0.5M. La computadora está equipada con una tarjeta de adquisición de datos Sensoray Model 626, la cual es programada para trabajar con un periodo de muestreo de 0.0005 segundos. Dos amplificadores DMOS de referencia TDA7293 (120 V - 100 W) son usados para acondicionar el voltaje de control $V_m(t)$ y $V_s(t)$ que son enviados a motores DC NISCA MOTOR, modelo NC5475B. Cada motor está conectado a una caja de reducción, las cuales tienen una relación de reducción $N_m = 16$ para el subsistema maestro y $N_s = 48$ para el subsistema esclavo. Todas las ganancias fueron ajustadas usando la ecuación (13), considerando raíces reales puras y tomando en cuenta el desempeño de los errores de seguimiento e_m y e_s . Para el volante de dirección las ganancias de (14) son $\xi_{c,m} = 1,01$, $\omega_{n(c,m)} = 5,92$ y para su observador GPI (11) $\xi_{obs,m} = 2,2$, $\omega_{n(obs,m)} = 15,2$. Ahora, para el rack de dirección las ganancias de (20) son $\xi_{c,s} = 2,53$, $\omega_{n(c,s)} = 5,92$ y para su observador GPI (17) $\xi_{obs,s} = 10$, $\omega_{n(obs,s)} = 25$. El sistema en lazo cerrado (control y observador) es sensible al ruido, por lo cual se tiene una etapa de filtrado en las señales. Para este trabajo se puso en marcha la tracción en la rueda (9.4 m/s, 33.84 km/hr), se obtuvieron los siguientes resultados al introducir perturbaciones exógenas al sistema por medio de golpes u obstrucción de la rueda con objetos, aproximadamente estos sucesos ocurrieron a los 4, 7, 11, 16 segundos del experimento. A continuación se presenta la gráfica donde se encuentran la trayectoria del subsistema de rack de dirección con respecto a la trayectoria impuesta por el volante.

A pesar de las perturbaciones se puede apreciar un buen seguimiento de la trayectoria del rack de dirección a la impuesta por el volante. En la Figura 7 se observa el error de seguimiento de la trayectoria correspondiente al sistema Maestro-Esclavo implementando un esquema bilateral de fuerza con tracción en la rueda.

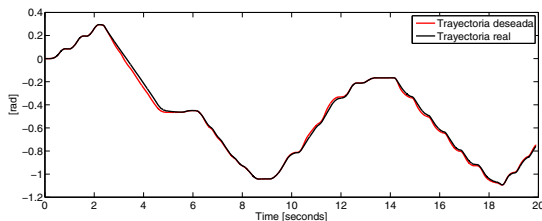


Figura 6. Trayectoria real vs deseada con tracción en la rueda

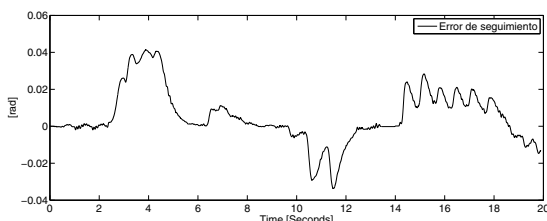


Figura 7. Error de seguimiento de trayectoria e_s

Nótese que los picos mas representativos en el error suceden aproximadamente en los tiempos que anteriormente se mencionaron. El error se encuentra acotado, sus picos no exceden valores cercanos a $\pm 0,04 \text{ rad}$. En la Figura 8 se observa el voltaje de control que es suministrado al actuador ubicado en el rack de dirección.

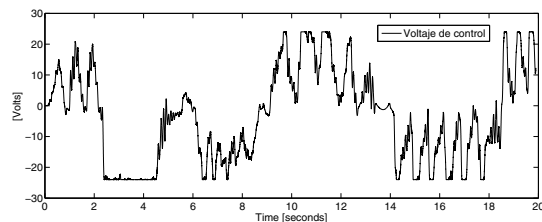


Figura 8. Voltaje de control $V_s(t)$ del subsistema Esclavo

Se observa que tiene un comportamiento similar pero con la señal invertida, a la señal de perturbación estimada en línea por parte del observador. En la Figura 9 se presenta la señal de perturbación estimada en línea por el observador GPI de estados. Para la reflexión de fuerza hacia el dispositivo maestro se uso una ganancia ($K_h = 0,015$) para ajustar el valor de la reflexión de la perturbación.

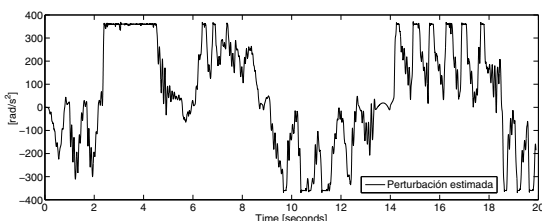


Figura 9. Perturbación estimada $\hat{\sigma}(t)$ retroalimentada al subsistema maestro

En las Figuras 8 y 9 se pueden apreciar algunas saturaciones. Estas fueron implementadas para la protección de la tarjeta de adquisición de datos y de los circuitos electrónicos debido a que el rango de voltaje de salida por parte del amplificador es limitado (-25 a 25 V), por lo cual cuando el sistema necesita mas torque en el rack

de dirección no es posible entregarlo, debido al rango de voltaje.

5. CONCLUSIONES

En este artículo se presenta una dirección háptica por cable basada en observadores de alta ganancia GPI. Para los resultados prácticos se incluyó tracción en la rueda de lo real. La técnica del observador de alta ganancia GPI requiere de un mínimo conocimiento del modelo dinámico, solo se requiere la ganancia del sistema y tan solo se usan encoders como sensores. Esto es una ventaja comparada con otras técnicas usadas en sistemas SDC que requieren sensores especializados. La técnica estima la entrada de perturbación y los términos inciertos que afectan la dinamica del SDC. Para corroborar esta conclusión, como trabajo futuro se instalarán sensores inerciales, lo cual permitirá establecer comparaciones claras entre las perturbaciones estimadas y las medidas en la plataforma experimental.

REFERENCIAS

- [1] Y. Yamaguchi, T. Murakami, Adaptive control for virtual steering characteristics on electric vehicle using steer-by-wire system, *IEEE Transactions on Industrial Electronics* Vol. 56, pp. 1585-1594.
- [2] B. H. Nguyen, J. H. Ryu, Direct current measurements based steer-by wire systems for realistic driving feeling, *IEEE ISIE*, 2009, pp. 1023-1028.
- [3] A. Bertacchini, L. Tamagnini, P. Pavan, Force feedback in steer-by-wire systems: Architecture and experimental results, *IEEE ISIE*, Montreal, Canada 2006, pp. 3050-3055.
- [4] A. Bertacchini, L. Tamagnini, P. Pavan, Force feedback in steer-by-wire systems: Architecture and experimental results, *IEEE ISIE*, Montreal, Canada, 2006, pp. 3050-3055.
- [5] J. S. Im, F. Ozaki, N. Matsunaga, S. Kawaji, Control of steering-bywire system using bilateral control scheme with passivity approach, *Int. Conference on Control, Automation and Systems*, pp. 1488-1493.
- [6] C. S. Kim, K. S. Hong, W. S. Yoo, Y. W. Park, Tire-road friction estimation for a wheel-driven field robot. *SICE Conference*, 2008, pp. 782-787.
- [7] H. Sira-Ramírez, R. Castro-Linares, and G. Puriel-Gil, An Active Disturbance Rejection Approach to Leader-Follower Controlled Formation. *Asian J. of Control*. Vo. 16, No. 2, pp. 382-395.
- [8] Q. Zheng, Linda Q. Gao, and Zhiqiang Gao, On stability analysis of active disturbance rejection control for nonlinear time-varying plants with unknown dynamics, *Proceedings of the 46th IEEE Conference on Decision and Control*. New Orleans, LA, USA.
- [9] B. Z. Guo, Z. L. Zhao, On the convergence of an extended state observer for nonlinear systems with uncertainty, *Systems & Control Letters*, Volume 60, No. 6, June 2011, pp. 420-430.
- [10] B. Z. Guo, Z. L. Zhao, On convergence of nonlinear active disturbance rejection control for MIMO systems, *SIAM J. Control & Optim.* 2013, Vol. 51, No. 2, pp. 1727-1757.