

Control de tracción y frenado para motocicleta basado en lógica difusa

Cabrera, J.A., Castillo, J.J., Urbán, C.H., Simón, A.

Dpto. de Ingeniería Mecánica y Mecánica de Fluidos. Universidad de Málaga

jcabrera@uma.es

Los sistemas de control de frenado y tracción son componentes fundamentales de seguridad en vehículos debido a que permite, en el primer caso evitar, el bloqueo de las ruedas manteniendo el control direccional en frenadas de emergencia y, en el segundo caso, evitar el deslizamiento excesivo cuando se ejerce un par elevado en las ruedas motrices. Este artículo presenta el modelo de una motocicleta y la estimación de parámetros necesarios para un posterior desarrollo de un sistema de frenado o tracción inteligentes con el objetivo de controlar el deslizamiento, consiguiendo así una mejora en el comportamiento dinámico en vehículos de dos ruedas. Se incluye también un novedoso algoritmo de control desarrollado mediante lógica difusa.

1. INTRODUCCIÓN

La aparición de los sistemas antibloqueo de frenos (A.B.S. - *Anti-lock Brake System*) y de control de tracción (T.C.S. - *Traction Control System*) han sido una evolución fundamental dentro de la seguridad vial. Estos sistemas han ido evolucionando desde su aparición, siempre manteniendo el mismo objetivo, pero utilizando para ello algoritmos y arquitecturas de sistemas de frenado y de control del par, cada vez más avanzados y complejos.

Todos estos sistemas empezaron su implantación en vehículos de cuatro ruedas, siendo mucho más complejo de desarrollar su implantación en vehículos de dos ruedas. Existe sin embargo un elevado interés en el desarrollo y aplicación de estos sistemas en motocicletas, sobre todo para mejorar la seguridad activa en este tipo de vehículos. En [1] se muestra un diagrama completo de las distintas relaciones existentes entre las unidades que intervienen en el sistema de control.

Una parte fundamental en los sistemas T.C.S. y A.B.S. es el algoritmo de control. El estudio de nuevos algoritmos ha tenido y tiene un gran interés entre los grupos de investigación de dinámica vehicular, existiendo un gran número de trabajos relacionados con el tema. Debido al absoluto secreto de las casas comerciales los algoritmos de control comercializados hasta el momento se comportan desde el punto de vista del usuario como una "caja negra", que tiene como entrada la velocidad angular de cada una de las ruedas y otras variables necesarias para el control de estabilidad y tracción, y que proporcionan como salida la presión de frenado en cada una de las ruedas del vehículo y la posición de la mariposa de los gases de admisión o en su defecto la posición del acelerador.

En la actualidad el desarrollo de modelos de control se basa fundamentalmente en técnicas que permitan un control adaptable a las distintas condiciones en las cuales la motocicleta debe realizar la maniobra de frenado o aceleración.

El principal problema de los sistemas T.C.S. y A.B.S. es poder determinar el grado de deslizamiento que se está produciendo en las ruedas para poder operar dentro de la zona óptima de la curva de adherencia (Figura1) y obtener por tanto el comportamiento adecuado en los procesos de frenado, tracción y estabilidad en curva en una motocicleta. Denominamos la zona óptima, como aquella zona en la que para unas condiciones dadas se obtiene el coeficiente de adhesión máximo. En la Figura 1 está delimitada en las zonas sombreadas.

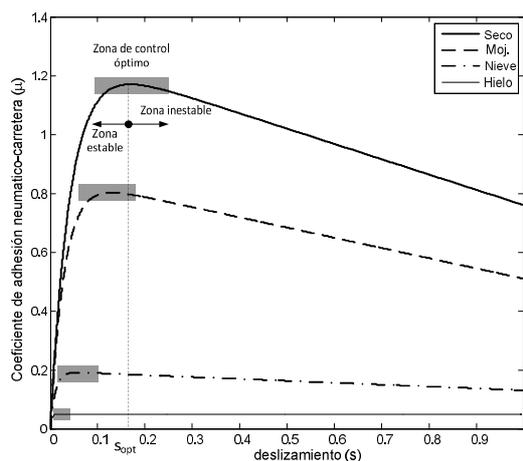


Figura 1.- Curvas coeficiente de fricción

Como se observa en la ecuación (1), para determinar el deslizamiento existente entre la rueda y la carretera es necesario conocer la velocidad lineal del vehículo. Siendo este último parámetro muy costoso de obtener mediante sensores en los vehículos comerciales, por lo que la mayoría de los estudios realizados intentan estimar esta velocidad.

$$s = 1 - \frac{v_x}{\omega R_r} \quad (1)$$

Hasta el momento los trabajos que estiman la velocidad del vehículo y el coeficiente de adhesión se engloban dentro de los vehículos de cuatro ruedas, existiendo poca bibliografía referente al estudio en motocicletas.

Para el funcionamiento de los sistemas de control de tracción y frenada suelen ser necesarios modelos de dinámica de la motocicleta, métodos para la obtención de la velocidad real de desplazamiento y algoritmos que permitan estimar la adherencia entre el asfalto y el neumático.

Una vez obtenido los parámetros dinámicos necesarios en los procesos de tracción, se necesita realizar un control de la presión de frenado y del par ejercido en la rueda tractora. Entre las nuevas técnicas de control para modelar el comportamiento dinámico de los procesos de frenada y tracción, nos encontramos fundamentalmente:

- Técnicas de control basada en Control modo deslizante [2].
- Técnicas de control basada en Lógica Difusa [3][4][5].

El uso de lógica difusa (*Fuzzy Logic* en terminología anglosajona) ha ganado recientemente un gran reconocimiento como metodología para diseñar controladores robustos de sistemas no lineales de alto grado y variables en el tiempo. Existe un gran número de trabajos relacionados con el control difuso de frenado de vehículos. La utilización de esta técnica tiene una gran aceptación debido principalmente a la facilidad de desarrollo y a la robustez del control [5-8], de hecho [1] se describe la lógica difusa como uno de los campos que existen para la mejora los sistemas de control de tracción. También indicar que los filtros de Kalman son otra de las posibilidades de estudio en dichos sistemas.

En este artículo primero se presentan el modelo de control así como la relación entre las variables que participan en la sección 2. El sistema de control de tracción es presentado en la sección 3, donde el bloque fuzzy ha sido ajustado basándose en la experiencia. Por último, las conclusiones son formuladas en la sección 4.

2. MODELO DE CONTROL

El sistema de control de tracción (ver Figura 2) tomará como entradas el deslizamiento que se produce en la rueda trasera, así como el deslizamiento óptimo al que se produce una adherencia máxima. Por lo tanto una componente fundamental del sistema de control de tracción será la estimación de estos parámetros.

Para el control del sistema T.C.S. se ha desarrollado un algoritmo que permite calcular en todo momento el deslizamiento (s) y el coeficiente de adherencia (μ_x) mediante un filtro de Kalman extendido, y posteriormente, mediante técnicas basadas en redes neuronales artificiales, se determinan las características de la superficie por la que está circulando la motocicleta.

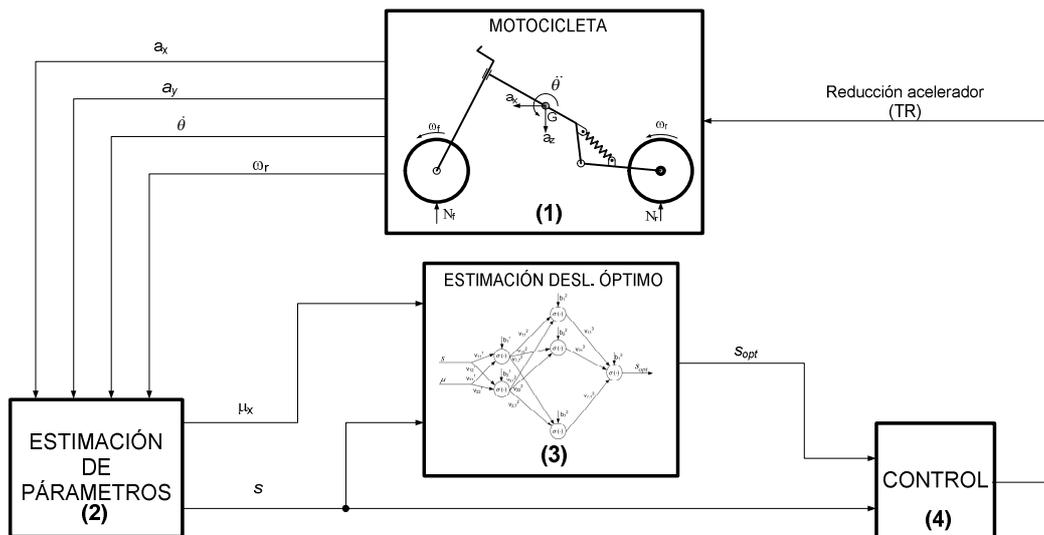


Figura 2.- Sistema de control de tracción

Básicamente, el modelo que se ha utilizado para la motocicleta es el mostrado en la Figura 3. En él consideraremos el desplazamiento longitudinal y vertical, el cabeceo, así como el giro de la rueda trasera.

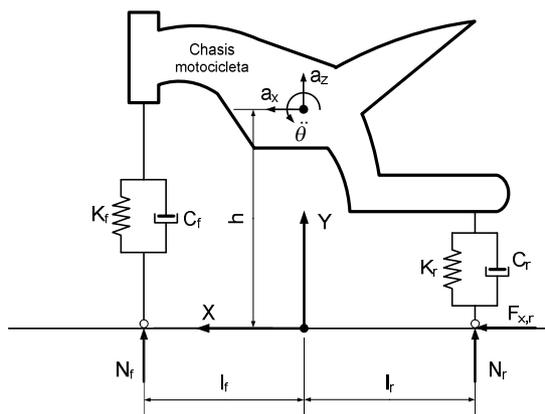


Figura 3.- Modelo motocicleta

Las ecuaciones del modelo, donde M es la masa de la motocicleta, x el desplazamiento longitudinal, z el desplazamiento vertical, θ el ángulo de cabeceo (Eje Y), F_x la fuerza longitudinal sobre la rueda trasera, C un parámetro aerodinámico, N_f y N_r la carga vertical sobre la rueda delantera y trasera respectivamente, I_y el momento de inercia sobre el eje Y, l_f y l_r la semilongitud delantera y trasera, J el momento de inercia de la rueda, ω la

velocidad angular de la rueda trasera, T el par aplicado sobre la rueda trasera y R_r el radio del neumático trasero, son las siguientes:

$$M(a_x + \dot{\theta}v_z) = F_x - Cv_x^2 \quad (2)$$

$$M(a_z - \dot{\theta}v_x + g) = N_f + N_r \quad (3)$$

$$I_y\ddot{\theta} = N_rl_r - N_fl_f - F_xz \quad (4)$$

$$J\dot{\omega} = T - F_xR_r \quad (5)$$

En el modelo vamos a considerar el comportamiento dinámico de las suspensiones traseras y delanteras, por lo tanto las cargas verticales en los neumáticos dependen de los parámetros reducidos de los muelles y de los amortiguadores de las suspensiones. La altura h es la altura del centro de gravedad en equilibrio con la motocicleta parada y el piloto montado. Las ecuaciones que definen las suspensiones de nuestro modelo son las siguientes, donde k_f y k_r son la rigidez de de las suspensiones delantera y trasera y c_f y c_r la amortiguación de las suspensiones delantera y trasera. Debido a que no se conoce la longitud L_0 , longitud natural de los muelles, sino que sólo podemos conocer la longitud h , vamos a transformar la ecuación de forma que la longitud de referencia sea la altura del centro de gravedad con los muelles ya comprimidos debidos al peso de la motocicleta y del piloto. Las ecuaciones quedarían de la siguiente manera.

$$N_f = A_r - k_f(z - h - l_f\theta) - c_r(v_z - l_f\dot{\theta}) \quad (6)$$

$$N_r = A_r - k_r(z - h + l_r\theta) - c_r(v_z + l_r\dot{\theta}) \quad (7)$$

En ellas comprobamos que aparece un término A , este término es debido a que la referencia de longitud para el muelle la estamos tomando en h y no en L_0 . Para hallar dichos términos plantearemos las ecuaciones que definen el comportamiento de las suspensiones en reposo y con el piloto montado ($z = h$). Debido a que nos encontramos en una situación estática, los términos dinámicos son nulos.

$$A_r = \frac{Mg}{L^2k_f}(l_r^2k_r + l_f^2k_f) \quad A_f = \frac{Mg}{L^2k_r}(l_r^2k_r + l_f^2k_f) \quad (8)$$

Además tendremos que considerar que la fuerza longitudinal (F_x) es proporcional a la carga vertical sobre la rueda trasera (N_r) y que el coeficiente de proporcionalidad es el coeficiente de adhesión (μ_x). Dicho coeficiente está relacionado con el índice de deslizamiento (s), existiendo diversos modelos que permiten establecer dicha relación. Para nuestro trabajo usaremos el modelo de Burckhardt [9].

Una vez definido el modelo de motocicleta este es usado para poder estimar los parámetros necesarios para obtener el deslizamiento y el coeficiente de adhesión. Este paso se realiza mediante un filtro de Kalman extendido EKF. Con la estimación de estos dos parámetros y mediante una red neuronal (ver Figura 2), se puede obtener el deslizamiento óptimo. El deslizamiento óptimo depende del tipo de carretera y es el deslizamiento en el que el coeficiente de adhesión es máximo para esa carretera (ver Figura 1). La red neuronal utilizada para conocer el deslizamiento óptimo se compone de tres capas, una capa de entrada con dos neuronas, una capa intermedia con seis neuronas y una capa de salida con una neurona (ver Figura 4).

Conocidos el deslizamiento óptimo y el deslizamiento en cada instante de tiempo, utilizaremos estos parámetros para nuestro control de tracción basado en lógica difusa.

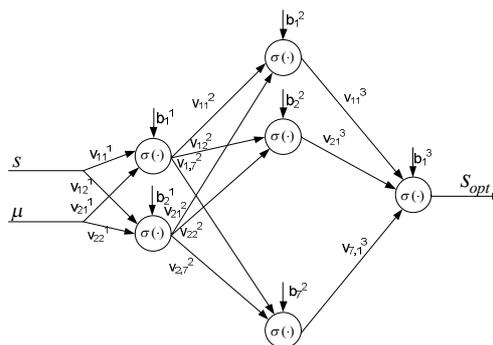


Figura 4.- Red neuronal para obtención deslizamiento óptimo

3. CONTROL DE TRACCIÓN

Una vez es conocido el deslizamiento óptimo, ya estamos en disposición de empezar con el bloque de control. Dicho controlador se ha elegido de lógica difusa ya que este sistema realizará una actuación, que provocará una disminución de par en la rueda trasera, con la consecuente disminución del deslizamiento en la rueda, pero no somos capaces de obtener una relación entre la actuación y la disminución del par, por lo tanto tendremos que basarnos en el conocimiento. Tenemos que tener en cuenta que el proceso sobre el que estamos trabajando es altamente no lineal y muy complejo. Esto es debido a que, como hemos comentado anteriormente, nosotros mediante el control actuaremos sobre el acelerador, lo que propiciará una disminución del par en la rueda y la consecuente disminución del índice de deslizamiento.

Por lo tanto nuestro controlador será un bloque (Figura 5), en el que introduzcamos el error entre el deslizamiento que tenemos y el óptimo (error) y cómo está variando dicho error (diferencia). A partir de estos valores el controlador, devolverá un valor contenido entre 0 y 1. Este valor se corresponderá con la actuación.

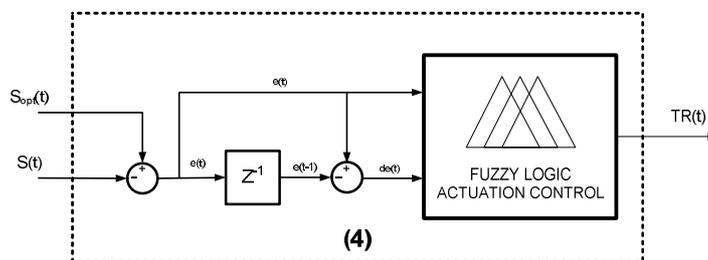


Figura 5.- Diagrama de bloque del control de tracción

Una vez se han comentado las entradas y salidas de las que constará el sistema de control, se tienen que definir los parámetros de la lógica difusa. Hay que definir todas las funciones de pertenencia para las dos entradas y la salida, así como las reglas en las que se basa el mecanismo de inferencia.

Estas funciones de pertenencia y reglas se basan en el conocimiento de un operador experto (ver Figura 6), es decir en nuestro conocimiento de cómo una actuación provocará variaciones en el deslizamiento. Como se observa en la figura las funciones de pertenencia son de forma triangular y trapezoidal. Los valores para cada una de las variables son mostradas en la Tabla 1. Podemos observar como las funciones de pertenencia que se han elegido para la variable *error*, no son simétricas, debido a la propia asimetría de la curva del coeficiente de adhesión en función del índice de deslizamiento. Sin embargo las funciones de pertenencia para la variable *diferencia del error* sí que son simétricas debido a que el rango de esa función sí que es simétrico.

Por último podemos fijarnos en los valores que toman las funciones de pertenencia de la variable *actuación* que están repartidas entre su rango de valores. Se observa como la función de pertenencia de cero *actuación* puede tomar valores menores de cero, y es debido

a que al usar el método del centroide, para poder asegurar que la salida pueda tomar el valor cero, tiene que haber una combinación de entradas cuyo centro de gravedad esté en el cero. Si dicha función de pertenencia no se hubiese hecho simétrica con el cero no sería posible. Igual le ocurre a la máxima actuación posible.

Tabla 1.- Valores de las funciones de pertenencia.

error		Difference error		Actuación	
LN	Error muy negativo	LN	Diferencia error muy negativa	ZP	Cero actuación
N	Error negativo	N	Diferencia error negativa	SSP	Muy poca actuación
ZE	Error cero	ZE	Diferencia error cero	SP	Poca actuación
P	Error positivo	P	Diferencia error positiva	MP	Media actuación
LP	Error muy positivo	LP	Diferencia error muy positiva	LP	Actuación grande
				ELP	Actuación muy grande

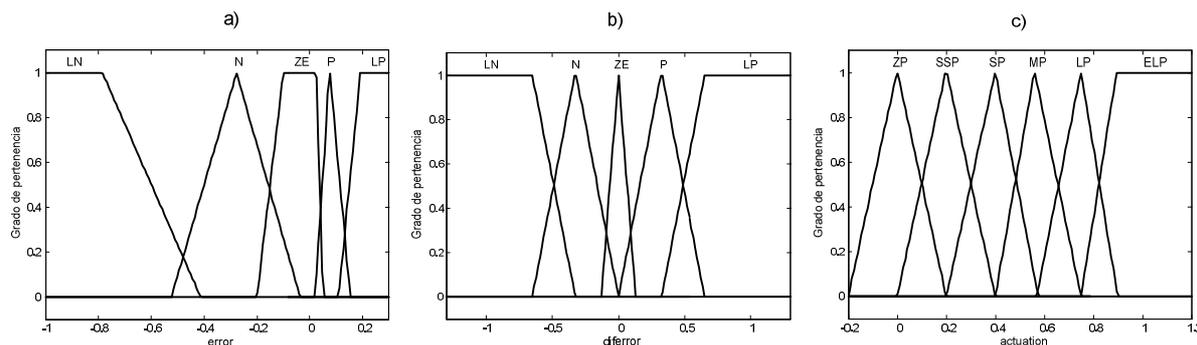


Figura 6.- Funciones de pertenencia

Las reglas usadas en el mecanismo de inferencia son las siguientes

Tabla 2.- Reglas de control

		diferror				
		LN	N	ZE	P	LP
error	LN	ELP	ELP	ELP	LP	LP
	N	ELP	LP	MP	SP	SSP
	ZE	SP	SSP	ZP	ZP	ZP
	P	ZP	ZP	ZP	ZP	ZP
	LP	ZP	ZP	ZP	ZP	ZP

Una vez conocidas las funciones de pertenencia para cada variable y las reglas del mecanismo de inferencia basado en el conocimiento el bloque de lógica difusa genera una superficie de salida en función de las variables de entrada.

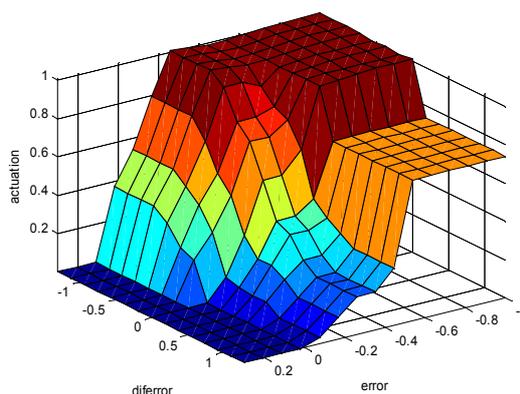


Figura 7.- Superficie de la variable de salida actuación

Para probar el sistema de control de tracción se han realizado simulaciones sobre distintos tipos de carretera mediante el programa BikeSim®, el cual tiene incorporado un control de tracción propio. Como se observa en la siguiente tabla el control de tracción desarrollado mejora el comportamiento con respecto al vehículo sin control y al equipado con el sistema

propuesto por BikeSim®. En el caso de este último control y para la superficie de menor adherencia se observa como la distancia recorrida es incluso menor que en el caso sin control. Este hecho es debido a las fuertes actuaciones que ejerce el sistema sobre los frenos y la gestión del motor.

Tabla 3.- Distancia recorrida por diferentes controles tracción

	Sin control	BikeSim®	Control Fuzzy
Carretera $\mu=0.4$	3.784 m	3.427 m (- 0.357 m / - 9.5 %)	4.691 m (+ 0.95 m / +24 %)
Carretera $\mu=0.6$	6.270 m	7.264 m (+ 0.99 m / +15.8 %)	8.962 m (+ 2.69 m / +43 %)

4. CONCLUSIONES

Se ha desarrollado en este trabajo un sistema de tracción que se ha sido aplicado en motocicletas de calle y/o competición. Se ha abordado el problema de la falta de tracción en motocicletas producido en situaciones de falta de adherencia o aceleraciones bruscas. Se ha determinado que el problema es debido a un aumento en el índice de deslizamiento, por lo que ha sido necesario desarrollar un sistema capaz de controlar esas situaciones en las que el índice de deslizamiento obtiene valores cercanos a 1.

El algoritmo de control ha sido realizado basándose en la experiencia acerca del fenómeno del incremento del deslizamiento. Además se ha desarrollado un sistema que favorece la seguridad y facilita el manejo de la motocicleta, ya que evita que las aceleraciones bruscas provoquen que la rueda trasera derrape con la consiguiente pérdida de control.

Se ha comprobado el satisfactorio funcionamiento del sistema de control de tracción en las simulaciones realizadas, con una mejora evidente.

5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha realizado gracias a la financiación obtenida en el proyecto de investigación TRA2011-23261

6. REFERENCIAS

- [1] Austin, L. and Morrey, D. Recent Advances in Antilock Braking Systems and Traction Control Systems. Proceedings of the IMechE. Vol. 214. (2000).
- [2] Tanelli, M., Vecchio, C., Corno, M., Ferrara, A. and Savaresi, S. Traction Control for Ride-by-Wire Sport Motorcycles: A Second-Order Sliding Mode Approach. IEEE Transactions on Industrial Electronics. Vol. 56, No. 9. (2009)
- [3] Cardinale, P., D'Angelo, C. and Conti, M. A Traction Control System for Motocross and Supermotard. EURASIP Journal on Embedded Systems. (2009).
- [4] Bo-Chiuan C., Chia-Hsing C. and Shih-Jer, H. Fuzzy Sliding Mode Control of Traction Control System for Electric Scooter. International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery. (2010).
- [5] Cabrera, J.A., Ortiz, A., Castillo, J.J. and Simón, A. A Fuzzy logic control for antilock braking system integrated in IMMA tire test bench. IEEE Transactions on Vehicular Technology. Vol. 54, No. 6. (2005).
- [6] Mauer, G.F. A Fuzzy Logic Controller for an ABS Braking System. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, Vol. 3, No. 4, pp.381-388. (1995)
- [7] Rao, M.V.C. and Prahlad V. A tuneable fuzzy logic controller for vehicle-active suspension systems. Fuzzy Sets and Systems, Vol. 85, pp. 11-21. (1997)
- [8] Du, H. and Zhang N. Fuzzy Control for Nonlinear Uncertain Electrohydraulic Active Suspensions with Input Constraint. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, Vol. 17, No. 2, pp. 343-356. (2009).
- [9] Burckhardt, M. Fahrvertechnik: Radschlupfregelsysteme. Vogel-Verlag, Germany. (1993).