

Diplomarbeit: Robuste Fahrzustandsregelung eines Kraftfahrzeuges mit Einzelradlenkung und -antrieb

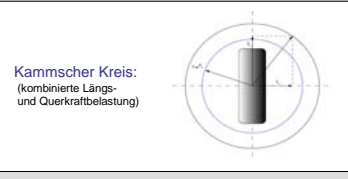
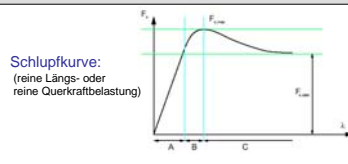
Author: Daniel Mader
Supervisors: Prof. Dr. Luigi del Re, Dr. Engelbert Grünbacher, Dr. Alfred Pruckner
Partner: BMW Forschung und Technik GmbH
Abgabe: März 2006

Abstract

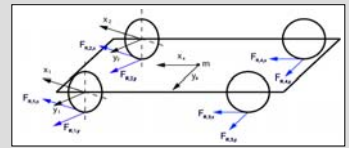
Betrachtet wird ein Fahrzeugmodell mit 3 Zuständen (ebene Freiheitsgrade) und 8 Eingängen (Antriebs- und Lenkgriffe). Um die Nichtlinearität des Reifens invertieren zu können ist es notwendig ein Reifenmodell zu finden. Es wurden neben dem bekannten Pacejka Reifenmodell noch ein HSRI und bilineares Reifenmodell betrachtet, wobei sich aufgrund der guten Invertierbarkeit für das bilineare Reifenmodell entschieden wurde.

Auf das verbleibende mechanische System werden 2 LQR Regler und ein Regler mit Eingangs- Ausgangslinearisierung entworfen. Die Regler wurden in Standardfahrmövern (Lenkwinkelsprung, stationäre Kreisfahrt) getestet und verglichen. Es wird untersucht welche Nebenziele mit einem Regler verwirklicht werden können und ob der Regelkreis robust bezüglich Aktuatorausfällen ist.

Der Reifen



Fahrzeugmodell



Jedes Rad kann getrennt angetrieben und gelenkt werden. Durch den erzeugten Schlupf und Schräglaufwinkel kann an jedem Rad eine separate Längs- und Querkraft eingepreßt werden. Es ergeben sich 8 Eingänge für die 3 Freiheitsgrade des ebenen Fahrzeugmodells, weshalb für die Regelung 5 Nebenbedingungen gefunden werden müssen um den Eingangsraum eindeutig auf den Steuerbarkeitsraum abzubilden. Simuliert wird ein ADAMS Modell mit folgenden Freiheitsgraden:

- 4 x Lenken
- 4 x Bremsen
- 4 x Vertikaldynamik
- 6 x Karosserie

Reifenmodelle

1.) Pacejka Reifenmodell

reine Längskraft / reine Querkraft:

$$F = D \sin(\text{Catan}(Bx))$$

Wahl der Parameter

$$D = F_{x,\text{max}}$$

$$C = 1 \pm \left(1 - \frac{2}{\pi} \arcsin\left(\frac{F_{\text{stat}}}{F_{\text{max}}}\right)\right)$$

$$B = \frac{\Delta y}{\Delta x CD}$$

Kombinierte Längs- und Querkraft:

$$F_x = D_{p,\lambda} \sin(C_{p,\lambda} \text{atan}(B_{p,\lambda} \lambda)) \cos(C_{c,\lambda} \text{atan}(B_{c,\lambda} \alpha))$$

$$F_y = D_{p,\lambda} \sin(C_{p,\lambda} \text{atan}(B_{p,\lambda} \alpha)) \cos(C_{c,\lambda} \text{atan}(B_{c,\lambda} \lambda))$$

2.) HSRI Reifenmodell

Originalmodell:

$$F_y = \frac{c_{\alpha}}{1 - \lambda} \left(\frac{1}{H} - \frac{1}{4H^2} \right) \tan(\alpha)$$

$$F_x = \frac{c_{\lambda}}{1 - \lambda} \left(\frac{1}{H} - \frac{1}{4H^2} \right) \lambda$$

Angepasstes Modell:

$$F_x = \left(\frac{1}{H} - \frac{1}{4H^2} \right) c_{\lambda} \lambda (q_{\lambda} \lambda^2 - k_{\lambda} |\lambda| + d_{\lambda})$$

$$F_y = \left(\frac{1}{H} - \frac{1}{4H^2} \right) c_{\alpha} \alpha (q_{\alpha} \alpha^2 - k_{\alpha} |\alpha| + d_{\alpha})$$

mit

$$H = \sqrt{\frac{1}{(\mu F_{z,r})^2} ((c_{\lambda} \lambda)^2 + (c_{\alpha} \alpha)^2) + c_H}$$

$$H_{\lambda} = \sqrt{\frac{1}{(\mu F_{z,r})^2} ((c_{\lambda} \lambda)^2 + (c_{\alpha} \alpha)^2) + c_H}$$

3.) Bilineares Reifenmodell

Es wird um alle Punkte

$$[\lambda_{\text{max}}, F_{x,\text{max}}] \quad [\alpha_{\text{max}}, F_{y,\text{max}}]$$

darstellen zu können, eine Abhängigkeit von der Radlast gesucht

$$F_{x,\text{max,pure}} = f_1(F_z) \quad \lambda_{\text{max,pure}} = f_2(F_z)$$

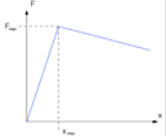
$$F_{y,\text{max,pure}} = g_1(F_z) \quad \alpha_{\text{max,pure}} = g_2(F_z)$$

und dann mit der jeweils anderen Schlupfkomponente korrigiert

$$F_{x,\text{max}} = F_{x,\text{max,pure}} f_3(\alpha) \quad \lambda_{\text{max}} = \lambda_{\text{max,pure}} f_1(\alpha)$$

$$F_{y,\text{max}} = F_{y,\text{max,pure}} g_3(\lambda) \quad \alpha_{\text{max}} = \alpha_{\text{max,pure}} g_1(\lambda)$$

1.) Bilineares Modell



2.) Inverses bilineares Modell



Regelung

A.) LQR Regler mit linearisiertem η

Gütekfunktional:

$$J = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^{\infty} (x_{F,i}^T Q x_{F,i} + u_i^T R u_i)$$

Nebenbedingung: Optimierung des Kraftschlusses

$$\eta = \frac{\sqrt{F_{x,i}^2 + F_{y,i}^2}}{\mu F_{z,i}}$$

$$\cong \eta_{i,0} + M_i \Delta F_{x,i} + N_i \Delta F_{y,i}$$

$$M_i = \frac{\partial \eta_i}{\partial F_{x,i}} \Big|_{x=x_{F,i}, u=u_{F,i}}$$

$$N_i = \frac{\partial \eta_i}{\partial F_{y,i}} \Big|_{x=x_{F,i}, u=u_{F,i}}$$

B.) LQR Regler mit analytischen Nebenbedingungen

Nebenbedingungen:

Es wird nicht der Kraftschluss im Gütekfunktional optimiert, sondern der Eingangsraum mit analytischen Nebenbedingungen beschränkt.

$$\frac{F_{x,i}}{F_{z,i}} = \frac{F_{x,j}}{F_{z,j}}$$

$$\frac{F_{y,i}}{F_{z,i}} = \frac{F_{y,j}}{F_{z,j}}$$

Spezielle Wahl der Nebenbedingungen:

$$\frac{F_{x,1}}{F_{z,1}} = \frac{F_{x,2}}{F_{z,2}} \quad \frac{F_{x,3}}{F_{z,3}} = \frac{F_{x,4}}{F_{z,4}} \quad \frac{F_{y,1}}{F_{z,1}} = \frac{F_{y,3}}{F_{z,3}}$$

$$\frac{F_{y,1}}{F_{z,1}} = \frac{F_{y,2}}{F_{z,2}} \quad \frac{F_{y,3}}{F_{z,3}} = \frac{F_{y,4}}{F_{z,4}}$$

C.) Eingangs – Ausgangslinearisierung

Strecke:

$$\dot{x} = f(x, u)$$

$$y = h(x)$$

Ausgangslinearisierung:

$$y = h(x)$$

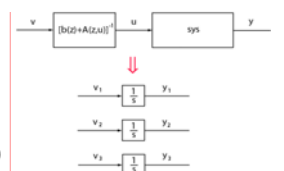
$$\frac{dy}{dt} = \frac{dh(x)}{dt}$$

$$\frac{d^2 y}{dt^2} = \dots$$

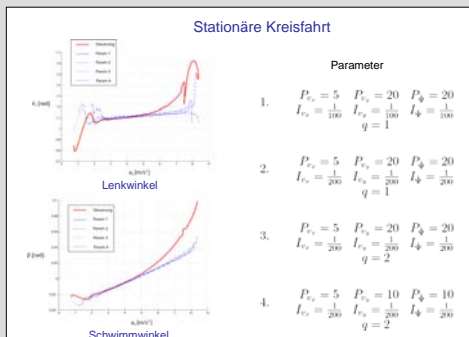
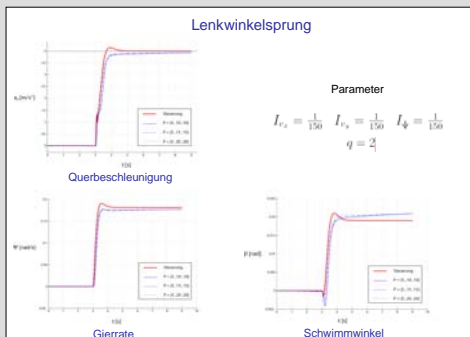
$$v_n = \frac{d^{(n)} y}{dt^{(n)}} = A(x, u)$$

Neuer Eingang:

$$u = g(v_n, x)$$



Bestes Ergebnis mit bilinearem Reifenmodell und Eingangs- Ausgangslinearisierung



Zusammenfassung

- Pacejka und HSRI besitzen gute Modellqualität, jedoch nur numerische Invertierung mit mehreren Lösungen
- Bilineares Reifenmodell ist ausreichend genau und kann analytisch invertiert werden
- LQR Regler mit Kraftschlussoptimierung arbeitet sehr schlecht, da Kraftschluss für Nebenbedingungen linearisiert wurde
- LQR Regler mit analytischen Nebenbedingungen arbeitet besser, nutzt jedoch das Kraftschlusspotential nicht aus.
- Eingangs- Ausgangslinearisierung liefert die besten Ergebnisse und ist sehr flexibel bezüglich der Berücksichtigung von Ausfällen oder Haftschlussgrenzen.
- Alle Regler sind echtzeitfähig
- Grenzbereich ist mit Steuerung vergleichbar
- Bei der Feedbacklinearisierung können Schwimmwinkel und Lenkwinkel beliebig vorgeben werden

Ausblick

- Nebenbedingungen können besser an Fahrsituationen angepaßt werden
- Erprobung von Hybridregelsystemen
- Berücksichtigung von Aktuatordynamik
- Bei $\eta=1$ schaltende Nebenbedingungen