

Weiche strukturvariable Regelungen mit Beobachtern für einen hydraulischen Aktor

Soft Variable-structure Control with Observers for a Hydraulic Actuator

Hendrik Lens und Jürgen Adamy

Für das lineare Modell eines hydraulischen Aktors mit Stellgrößenbeschränkung werden verschiedene weiche strukturvariable Regelungen entworfen, die eine außerordentlich schnelle Ausregelung aufweisen. Es wird gezeigt, wie der Aktor auch bei Verwendung eines linearen Zustandsbeobachters stabil und mit hoher Güte geregelt werden kann. Dabei wird die Regelgüte der weichen strukturvariablen Regelungen mit der zeitoptimalen Steuerung und einer linearen Regelung verglichen sowie der Einfluss des Beobachters auf die Regelgüte betrachtet.

Several soft variable-structure controls are designed for the linear model of a hydraulic actuator with an input constraint. It is shown that the plant can be controlled very fast using output feedback with a linear Luenberger observer. The influence of the observer on the performance of the soft variable-structure controls is examined. The performance is compared to that of a linear and a time-optimal controller.

Schlagwörter: Zustandsbeobachter, weiche strukturvariable Regelung, nahezu zeitoptimale Regelung, Stellgrößenbeschränkung, hydraulisches Stellventil

Keywords: State-space observer, soft variable-structure control, nearly time-optimal control, input constraint, hydraulic motor

1 Einleitung

Weiche strukturvariable Regler, abgekürzt WSVR, sind nichtlineare Zustandsregler für lineare Strecken mit Stellgrößenbeschränkung. WSVR arbeiten mit einer Auswahlstrategie, mittels der die Koeffizienten eines linearen Zustandsreglers kontinuierlich verändert werden. Die Auswahlstrategie verändert den Regler so, dass die Stellgröße ihre Beschränkung einhält und möglichst gut ausnutzt. So erreichen WSVR ein nahezu zeitoptimales Ausregelverhalten. Das Prinzip ist in Bild 1 dargestellt. Eine Übersicht über die WSVR und ihre Implementierung wird in [2] gegeben.

WSVR sind nichtlineare Zustandsregler und benötigen folglich den Zustandsvektor. Dieser steht in der Praxis jedoch oft nicht vollständig zur Verfügung. In [3] wurde bewiesen, dass trotz der Nichtlinearität von WSVR das aus der Theorie linearer Systeme bekannte Separationstheorem

in einer leicht abgewandelten Form gültig bleibt. Es ist demnach möglich, den Zustandsvektor mit einem linearen Beobachter zu schätzen und diesen Schätzvektor für eine WSVR zu verwenden.

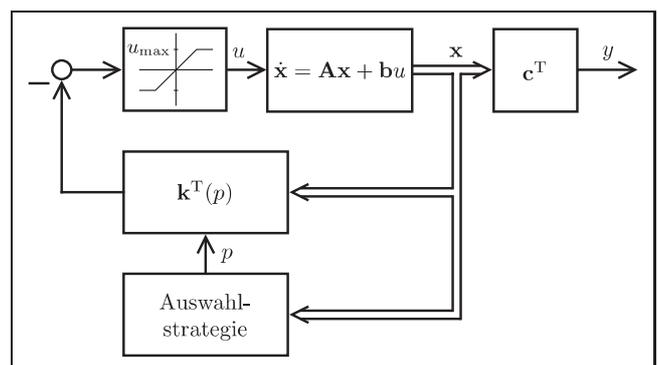


Bild 1: Struktur einer weichen strukturvariablen Regelung.

In diesem Artikel wird eine Illustration der Ergebnisse aus Beitrag [3] an einem Praxisbeispiel vorgenommen. Anhand eines hydraulischen Aktors wird die Leistungsfähigkeit der WSVR unter Einsatz eines Beobachters demonstriert. Ein solcher Aktor wird beispielsweise zur Positionierung eines Werkzeugs verwendet.

2 Modell des hydraulischen Aktors

Im Folgenden wird das Modell eines Aktors [4] betrachtet, dessen Funktion Bild 2 zeigt. Die Eingangsspannung u wird über einen Spannungs-Druck-Wandler in den Druck p_1 gewandelt. Dieser Druck bewirkt über ein Rohr einen Volumenstrom \dot{q} in den Zylinder.

Der Spannungs-Druck Wandler des Aktors kann über den Zusammenhang

$$\tau \dot{p}_1 + p_1 = au \tag{1}$$

modelliert werden. Dabei ist p_1 der erzeugte Druck am Wandler und u die Eingangsspannung. Die Variablen τ und a bezeichnen die Zeitkonstante bzw. den Übertragungsbeiwert des Wandlers. Der Volumenstrom \dot{q} im Zylinder und die Kolbengeschwindigkeit \dot{s} sind gegeben durch

$$\dot{q} = A\dot{s} = b(p_1 - p_2), \tag{2}$$

wobei A die Kolbenfläche ist, p_2 der Druck am Zylinderkolben und b der Übertragungsbeiwert des Rohres. Die Werkzeugbewegung kann über die Differenzialgleichung

$$m\ddot{s} = Ap_2 - cs - d\dot{s} \tag{3}$$

beschrieben werden. Diese verknüpft die Gesamtmasse m des Werkzeugs, des Zylinders und der Kolbenstange mit der Werkzeugposition s , der Federkraft cs sowie der Dämpfungskraft $d\dot{s}$. Mit dem Zustandsvektor

$$\mathbf{x} = [s \quad \dot{s} \quad p_1]^T \tag{4}$$

und den Parametern aus Tabelle 1 ergibt sich das lineare Zustandsraummodell

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{b}u = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -10 & -1,167 & 25 \\ 0 & 0 & -0,8 \end{bmatrix} \mathbf{x} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 2,4 \end{bmatrix} u, \tag{5}$$

$$y = \mathbf{c}^T \mathbf{x} = [1 \quad 0 \quad 0] \mathbf{x}. \tag{6}$$

Die Systemmatrix \mathbf{A} hat die Eigenwerte $\lambda_1 = -0,8$ und $\lambda_{2,3} = -0,584 \pm 3,108i$.

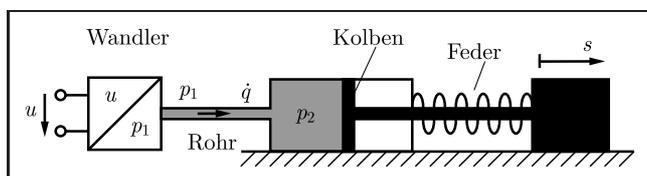


Bild 2: Aufbau des hydraulischen Stellventils.

Tabelle 1: Parameter des hydraulischen Aktors.

Parameter	Zeichen	Wert
Kolbenfläche	A	50 cm ²
Masse	m	2 kg
Federkonstante	c	20 N/cm
Gleitreibungskonstante	d	2 Ns/cm
Übertragungsbeiwert Rohr	b	7500 cm ⁵ /Ns
Übertragungsbeiwert Wandler	a	3 N/cm ² V
Zeitkonstante Wandler	τ	1,25 s

Für die Stellgrößenbeschränkung gilt:

$$|u| \leq u_{\max} = 10,5. \tag{7}$$

Die Menge

$$\mathcal{X}_0 = \{\mathbf{x} \mid |x_1| < 20, |x_2| < 10, |x_3| < 8,5\} \tag{8}$$

enthält die möglichen Anfangsbedingungen \mathbf{x}_0 .

3 Reglerentwurf

Es wurden insgesamt drei WSVR entworfen, nämlich eine WSVR mit impliziter Ljapunov-Funktion, eine WSVR mit variabler Sättigung und eine dynamische WSVR. Die Funktionsweise dieser Regelungen und ihr Entwurf sind in [2; 3] detailliert beschrieben und werden hier daher nicht wiederholt.

Zum Vergleich wurde ein linearer Regler entworfen, der für alle Trajektorien, die in \mathcal{X}_0 starten, die Stellgrößenbeschränkung einhält.

Schließlich wurde numerisch die zeitoptimale Steuerung [5] bestimmt. Die zeitoptimale Steuerung ist gut zum Vergleich geeignet, da sie den unter der vorhandenen Stellgrößenbeschränkung theoretisch schnellstmöglichen Regelvorgang aufzeigt.

3.1 WSVR mit impliziter Ljapunov-Funktion

Das Regelgesetz lautet

$$u = -\mathbf{k}^T(p)\mathbf{x}_{sn}, \tag{9}$$

mit dem vom Auswahlparameter p abhängigen Reglervektor

$$\mathbf{k}(p) = \mathbf{D}^{-1}(p)\hat{\mathbf{a}} - \mathbf{a} \tag{10}$$

und der Auswahlstrategie

$$S(\mathbf{x}_{sn}, p) = e(p)\mathbf{x}_{sn}^T \mathbf{D}^{-1}(p)\mathbf{R}_1 \mathbf{D}^{-1}(p)\mathbf{x}_{sn} - 1 = 0, \tag{11}$$

$$e(p) = \frac{\mathbf{k}^T(p)\mathbf{D}(p)\mathbf{R}_1^{-1}\mathbf{D}(p)\mathbf{k}(p)}{u_{\max}^2}, \tag{12}$$

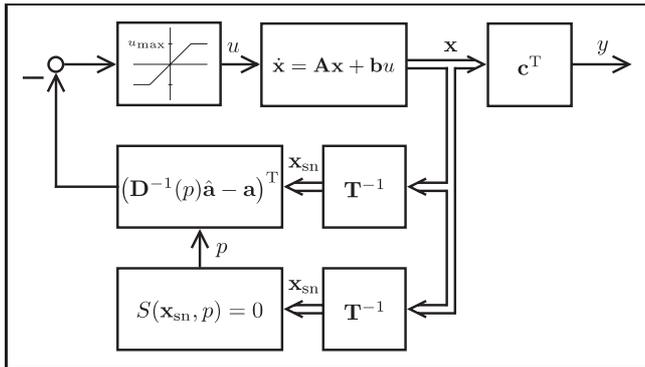


Bild 3: Struktur einer weichen strukturvariablen Regelung mit implizitem Auswahlgesetz.

$$\mathbf{D}(p) = \text{diag}(p^n, \dots, p), \quad (13)$$

$$\underline{p} \leq p \leq 1. \quad (14)$$

Der Vektor $\mathbf{a}^T = [a_0 \dots a_{n-1}]$ enthält die Koeffizienten des charakteristischen Polynoms von \mathbf{A} . Analog enthält der Vektor $\hat{\mathbf{a}}$ die Koeffizienten des charakteristischen Polynoms von $\hat{\mathbf{A}} = \mathbf{A} - \mathbf{b}\mathbf{k}^T(1)$. Der Vektor

$$\mathbf{x}_{sn} = \mathbf{T}^{-1}\mathbf{x} \quad (15)$$

bezeichnet den Zustandsvektor in den Koordinaten der Steuerungsnormform. Dabei ist die Matrix \mathbf{T} die zugehörige Transformationsmatrix. In der Steuerungsnormform lautet die Systemmatrix

$$\mathbf{A}_{sn} = \mathbf{T}^{-1}\mathbf{A}\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \dots & \ddots & \vdots \\ -a_0 & -a_1 & \dots & -a_{n-1} \end{bmatrix}. \quad (16)$$

Gl. (11) der Auswahlstrategie gibt p implizit vor. Diese Gleichung ist immer mit sicherer Konvergenz numerisch nach p lösbar. Die wählbaren Parameter, der Vektor $\hat{\mathbf{a}}$ und die symmetrische, positiv definite Matrix \mathbf{R}_1 , werden so ausgelegt, dass $v = p$ eine Ljapunov-Funktion des Systems ist. Da diese implizit gegeben ist, wird sie als implizite Ljapunov-Funktion bezeichnet [1; 2]. Die Struktur dieser Regelung ist in Bild 3 dargestellt.

Für eine implizite WSVR für den hydraulischen Aktor ergab sich folgender Parametersatz:

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 60 & 0 & 0 \\ 0 & 60 & 0 \\ 24 & 2,8008 & 2,4 \end{bmatrix}, \quad (17)$$

$$\hat{\mathbf{a}} = [22,31 \quad 15,9893 \quad 4,00077]^T, \quad (18)$$

$$\mathbf{R}_1 = \begin{bmatrix} 20,9539 & 7,67929 & 2,27306 \\ 7,67929 & 3,49365 & 0,923347 \\ 2,27306 & 0,923347 & 0,328838 \end{bmatrix}, \quad (19)$$

$$\underline{p} = 0,1. \quad (20)$$

3.2 WSVR mit variabler Sättigung

Das Regelgesetz dieser WSVR lautet

$$u = -(\mathbf{k}_1 + p\mathbf{k}_2)^T \mathbf{x}, \quad (21)$$

mit der Auswahlstrategie

$$p = \begin{cases} \frac{u_{sat}(\mathbf{x})}{\mathbf{k}_2^T \mathbf{x}} & \text{für } \mathbf{k}_2^T \mathbf{x} \geq u_{sat}(\mathbf{x}) \\ 1 & \text{für } |\mathbf{k}_2^T \mathbf{x}| < u_{sat}(\mathbf{x}) \\ -\frac{u_{sat}(\mathbf{x})}{\mathbf{k}_2^T \mathbf{x}} & \text{für } \mathbf{k}_2^T \mathbf{x} \leq -u_{sat}(\mathbf{x}) \end{cases}, \quad (22)$$

$$u_{sat}(\mathbf{x}) = u_{max} - \sqrt{\mathbf{x}^T \mathbf{R}_v \mathbf{x} \cdot \mathbf{k}_1^T \mathbf{R}_v^{-1} \mathbf{k}_1}. \quad (23)$$

Dabei ist \mathbf{R}_v eine symmetrische, positiv definite Matrix.

Im Fall des hydraulischen Aktors hat die WSVR mit variabler Sättigung folgende Parameter:

$$\mathbf{k}_1 = [-0,0137835 \quad 0,11104 \quad 0,852585]^T, \quad (24)$$

$$\mathbf{k}_2 = [0,690035 \quad 0,528821 \quad 2,63092]^T, \quad (25)$$

$$\mathbf{R}_v = \begin{bmatrix} 1,05065 & 0,264204 & -0,394741 \\ 0,264204 & 0,303622 & 1,40287 \\ -0,394741 & 1,40287 & 13,6744 \end{bmatrix}. \quad (26)$$

3.3 Dynamische WSVR

In diesem Fall ist das Regelgesetz gegeben durch

$$u = -(\mathbf{k}_1 + p\mathbf{k}_2)^T \mathbf{x}, \quad (27)$$

mit der dynamischen Auswahlstrategie

$$\dot{p} = \frac{\mathbf{x}^T \mathbf{R}_d \mathbf{b} \mathbf{k}_2^T \mathbf{x} - p \cdot r(p, \mathbf{x})}{q}, \quad (28)$$

$$r(p, \mathbf{x}) = \begin{cases} \mu \left(1 - \frac{\alpha(\mathbf{x})}{p}\right) + \mu_0 \frac{\alpha(\mathbf{x})}{p}, & p \leq \alpha(\mathbf{x}) \\ \mu_0, & \alpha(\mathbf{x}) < p < \beta(\mathbf{x}) \\ \mu \left(1 - \frac{\beta(\mathbf{x})}{p}\right) + \mu_0 \frac{\beta(\mathbf{x})}{p}, & p \geq \beta(\mathbf{x}). \end{cases} \quad (29)$$

Dabei ist \mathbf{R}_d eine symmetrische, positiv definite Matrix, außerdem sind q , μ und μ_0 festzulegende Reglerparameter. Die Funktionen $\alpha(\mathbf{x})$ und $\beta(\mathbf{x})$ sind gegeben durch

$$\alpha(\mathbf{x}) = \begin{cases} \frac{u_{max} - \mathbf{k}_1^T \mathbf{x}}{\mathbf{k}_2^T \mathbf{x}}, & \mathbf{k}_2^T \mathbf{x} \leq \frac{-u_{max} + \mathbf{k}_1^T \mathbf{x}}{p} \\ -P, & \frac{-u_{max} + \mathbf{k}_1^T \mathbf{x}}{p} < \mathbf{k}_2^T \mathbf{x} < \frac{u_{max} + \mathbf{k}_1^T \mathbf{x}}{p} \\ \frac{-u_{max} - \mathbf{k}_1^T \mathbf{x}}{\mathbf{k}_2^T \mathbf{x}}, & \mathbf{k}_2^T \mathbf{x} \geq \frac{u_{max} + \mathbf{k}_1^T \mathbf{x}}{p} \end{cases}, \quad (30)$$

$$\beta(\mathbf{x}) = \begin{cases} \frac{-u_{\max} - \mathbf{k}_1^T \mathbf{x}}{\mathbf{k}_2^T \mathbf{x}}, & \mathbf{k}_2^T \mathbf{x} \leq \frac{-u_{\max} - \mathbf{k}_1^T \mathbf{x}}{P} \\ P, & \frac{-u_{\max} - \mathbf{k}_1^T \mathbf{x}}{P} < \mathbf{k}_2^T \mathbf{x} < \frac{u_{\max} - \mathbf{k}_1^T \mathbf{x}}{P} \\ \frac{u_{\max} - \mathbf{k}_1^T \mathbf{x}}{\mathbf{k}_2^T \mathbf{x}}, & \mathbf{k}_2^T \mathbf{x} \geq \frac{u_{\max} - \mathbf{k}_1^T \mathbf{x}}{P} \end{cases} \quad (31)$$

Auch P ist ein festzulegender Parameter. Die Werte der Parameter für die dynamische WSVR lauten für den hydraulischen Aktor

$$\mathbf{k}_1 = [0,120716 \quad 0,0528027 \quad 0,258303]^T, \quad (32)$$

$$\mathbf{k}_2 = [0,501919 \quad 0,967269 \quad 5,6132]^T, \quad (33)$$

$$\mathbf{R}_d = 10^{-3} \cdot \begin{bmatrix} 3,23818 & 0,403901 & -5,42879 \\ 0,403901 & 0,451815 & 1,36641 \\ -5,42879 & 1,36641 & 24,7312 \end{bmatrix}, \quad (34)$$

$$q = 1,4784, \quad (35)$$

$$P = 100, \quad (36)$$

$$\mu_0 = 10^{-2}, \quad (37)$$

$$\mu = 10^6. \quad (38)$$

4 Beobachterentwurf

4.1 Vollständiger Beobachter

Der geschätzte Zustandsvektor $\tilde{\mathbf{x}}$ wird vom vollständigen Beobachter

$$\dot{\tilde{\mathbf{x}}} = \mathbf{A}\tilde{\mathbf{x}} - \mathbf{b}\mathbf{k}^T(p)\tilde{\mathbf{x}} + \mathbf{l}\mathbf{c}^T(\mathbf{x} - \tilde{\mathbf{x}}) \quad (39)$$

bereitgestellt. In Bild 4 ist die Gesamtstruktur einer WSVR mit Beobachter dargestellt. Für den Entwurf des Beobach-

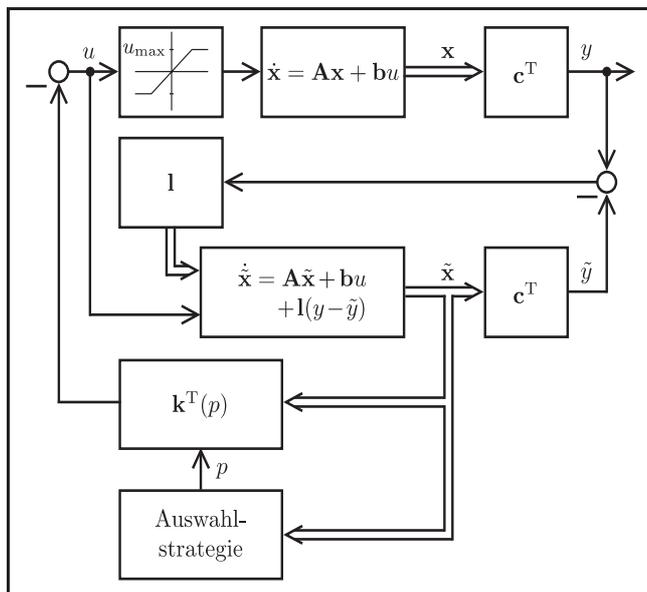


Bild 4: Struktur einer weichen strukturvariablen Regelung mit vollständigem Beobachter.

ters wird der schnellste Pol des linear geregelten Systems mit dem Faktor 5 multipliziert, was $\lambda = -8,5546$ ergibt. Die Pole der Beobachterdynamik werden alle mittels Polplatzierung auf diesen Pol gelegt. Damit ergibt sich der Beobachtervektor

$$\mathbf{l} = [23,6968 \quad 161,999 \quad 18,6526]^T. \quad (40)$$

Alle Regler verwenden den gleichen Beobachtervektor. Der Verlauf des Schätzfehlers $\dot{\mathbf{e}} = (\mathbf{A} - \mathbf{l}\mathbf{c}^T)\mathbf{e}$ ist somit identisch für alle Regelungen, da dessen Dynamik von der Regelung entkoppelt ist [3].

4.2 Reduzierter Beobachter

Als Messwert steht die Position x_1 zur Verfügung. Geschätzt werden die Geschwindigkeit x_2 und der Druck x_3 . Damit ergibt sich ein reduzierter Beobachter zweiter Ordnung:

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{\mathbf{x}}}_2 &= (\mathbf{A}_{22} - \mathbf{l}_{\text{red}}\mathbf{A}_{12})\tilde{\mathbf{x}}_2 + (\mathbf{A}_{22} - \mathbf{l}_{\text{red}}\mathbf{A}_{12})\mathbf{l}_{\text{red}}\mathbf{x}_1 \\ &\quad + (\mathbf{A}_{21} - \mathbf{l}_{\text{red}}\mathbf{A}_{11})\mathbf{x}_1 + (\mathbf{b}_2 - \mathbf{l}_{\text{red}}\mathbf{b}_1)u, \\ \tilde{\mathbf{x}}_2 &= \hat{\mathbf{x}}_2 + \mathbf{l}_{\text{red}}\mathbf{x}_1, \end{aligned} \quad (41)$$

wobei

$$\mathbf{x}_1 = x_1, \quad \tilde{\mathbf{x}}_2 = \begin{bmatrix} \tilde{x}_2 \\ \tilde{x}_3 \end{bmatrix} \quad (42)$$

und

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_{11} &= 0, \quad \mathbf{A}_{12} = [0 \quad 25], \quad \mathbf{A}_{21} = \begin{bmatrix} -10 \\ 0 \end{bmatrix}, \\ \mathbf{A}_{22} &= \begin{bmatrix} -1,167 & 25 \\ 0 & -0,8 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{b}_1 = 0, \quad \mathbf{b}_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 2,4 \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (43)$$

Der Entwurf wurde ebenfalls per Polplatzierung durchgeführt [6]. Dabei wurden die gleichen Pole gewählt wie für den vollständigen Beobachter. Alle Regler verwenden den gleichen reduzierten Beobachtervektor

$$\mathbf{l}_{\text{red}} = [15,1422 \quad 2,40536]^T. \quad (44)$$

5 Ergebnisse

Zunächst wird in Bild 5 ein Simulationsergebnis ohne Beobachter gezeigt für den Anfangszustand

$$\mathbf{x}_0 = [20 \quad 10 \quad 8,5]^T, \quad (45)$$

um die Leistungsfähigkeit der WSVR zu demonstrieren. Der hier zum Vergleich verwendete lineare Reglervektor lautet

$$\mathbf{k} = [-0,0569854 \quad 0,103772 \quad 0,915961]^T. \quad (46)$$

Alle Regler wurden so entworfen, dass für jeden Anfangswert $\mathbf{x}_0 \in \mathcal{X}_0$ die zugehörige Trajektorie $\mathbf{x}(t)$ die Stellgrößenbeschränkung $|u| = |\mathbf{k}^T(p)\mathbf{x}| \leq u_{\max}$ einhält.

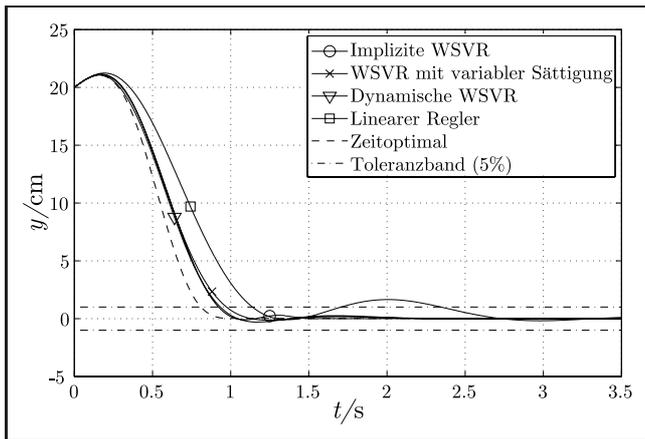


Bild 5: Positionsverläufe ohne Beobachter, Anfangsbedingung (45).

Der Anfangszustand (45) liegt auf einem Eckpunkt von \mathcal{X}_0 . Man erkennt, dass die WSVR eine deutlich bessere Regelgüte aufweisen als der lineare Regler.

Mit einem Beobachter ist nicht mehr gewährleistet, dass die Regler – sowohl die WSVR als auch der lineare Regler – für alle Anfangszustände $\mathbf{x}_0 \in \mathcal{X}_0$ zulässig sind. Wenn man vom trivialen Fall

$$\tilde{\mathbf{x}}_0 = \mathbf{x}_0 \tag{47}$$

absieht, ist nämlich nicht sichergestellt, dass immer eine gültige Stellgröße $|u| \leq u_{\max}$ berechnet wird. Es ist auch möglich, dass $\tilde{\mathbf{x}}$ Werte annimmt, für die die Auswahlstrategie nicht definiert ist.

Gerade bei großen Anfangsschätzfehlern $\mathbf{e}_0 = \mathbf{x}_0 - \tilde{\mathbf{x}}_0$ besteht diese Gefahr. Wenn zum Zeitpunkt $t = 0$ nichts über die zu beobachtenden Zustände bekannt ist, kann man den maximalen Anfangsschätzfehler \mathbf{e}_0 dadurch minimieren, dass man $\tilde{\mathbf{x}}_0 = \mathbf{0}$ wählt. Trotzdem verkleinert sich das Gebiet zulässiger Anfangsbedingungen \mathbf{x}_0 durch Einsetzen eines Beobachters. Leider ist dieses kleinere Gebiet bisher nicht explizit bekannt oder berechenbar.

Es wurde für den hydraulischen Aktor ein Anfangszustand gewählt, für den die Stellgröße bei allen Reglern immer zulässig ist:

$$\mathbf{x}_0 = [10 \quad 5 \quad -2]^T, \tag{48}$$

$$\tilde{\mathbf{x}}_0 = \mathbf{0}.$$

Dabei entspricht die Dimension des Vektors $\tilde{\mathbf{x}}_0$ jeweils der Dimension des vollständigen bzw. des reduzierten Beobachters.

Die Simulationsergebnisse für diese Anfangszustände zeigen Bild 6 und 7. In Bild 6 sind oben die Verläufe für die Regler mit Zustandsrückführung, d.h. ohne Beobachter, dargestellt. Man erkennt, dass die WSVR das System deutlich schneller in die Ruhelage führen als der lineare Regler. Dabei ist der Regler mittels impliziter Lyapunov-Funktion am schnellsten, bezogen auf die Ausregelzeit $T_{5\%}$, gefolgt von der WSVR mittels variabler Sättigung und der dynamischen WSVR.

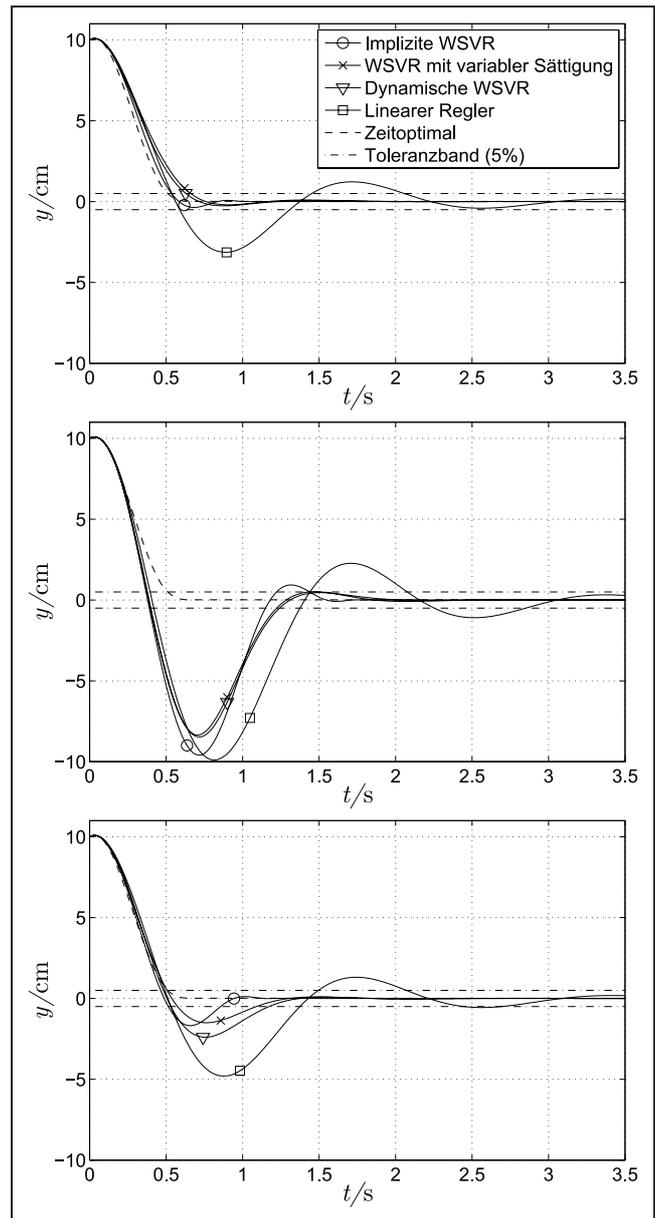


Bild 6: Positionsverläufe ohne Beobachter (oben), mit vollständigem Beobachter (Mitte) und mit reduziertem Beobachter (unten), Anfangsbedingung (48). Die zeitoptimalen Verläufe wurden ohne Beobachter ermittelt.

Dieser Zusammenhang bleibt prinzipiell auch bei der Verwendung eines vollständigen Beobachters erhalten, wie in der Mitte von Bild 6 erkennbar. Wie erwartet ist die Regelgüte schlechter als die der Zustandsrückführung ohne Beobachter. Dies ist aber für alle Regler, auch für den linearen, der Fall. Der Einsatz von WSVR bringt auch bei Verwendung eines Beobachters einen deutlichen Geschwindigkeitsvorteil gegenüber einem linearen Regler.

Im Vergleich zur Regelung mit einem vollständigen Beobachter verbessert sich die Regelgüte – zumindest in diesem Fall – deutlich, wenn ein reduzierter Beobachter eingesetzt wird. Wie Bild 6 unten zeigt, ist die Regelgüte in diesem Fall fast vergleichbar mit der Güte bei Zustandsrückführung ohne Beobachter. Dies ist dadurch zu erklären,

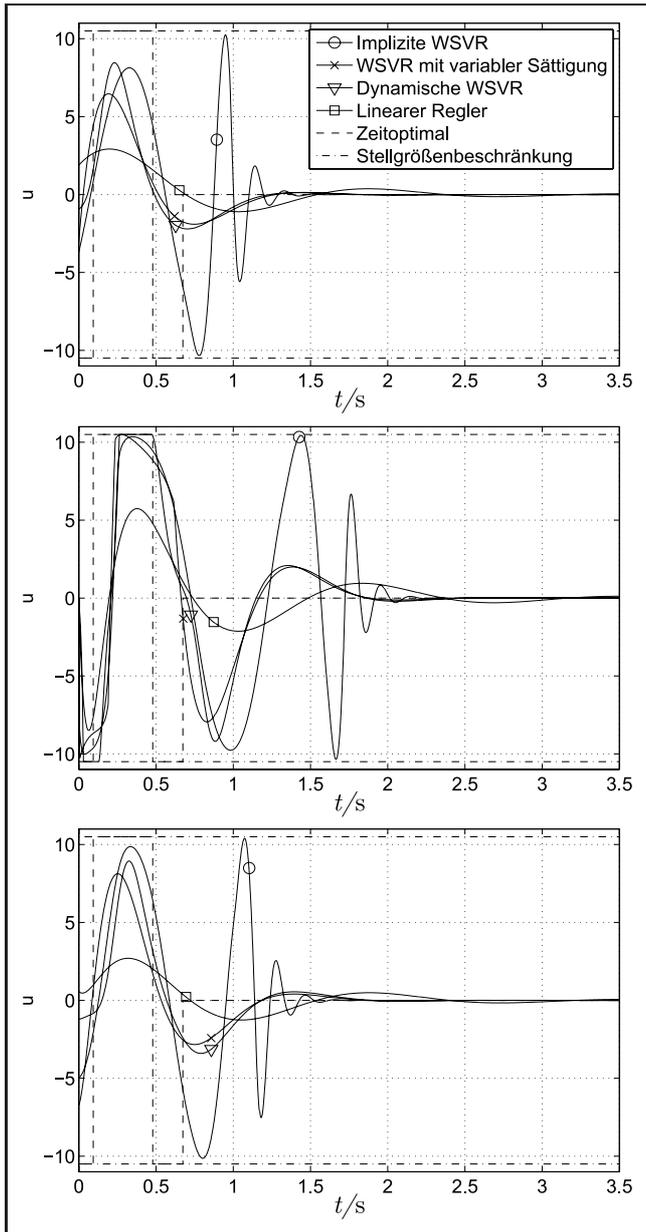


Bild 7: Stellgrößenverläufe ohne Beobachter (oben), mit vollständigem Beobachter (mitte) und mit reduziertem Beobachter (unten), Anfangsbedingung (48).

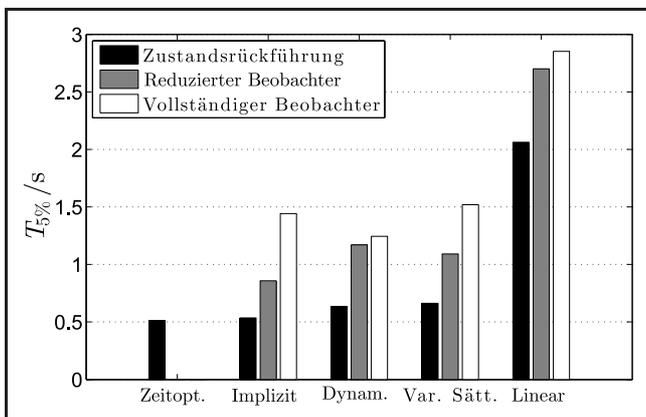


Bild 8: Vergleich der Regler bezogen auf die Ausregelzeit der Position (5%-Toleranzband bezogen auf den Anfangswert).

dass einige Streckenzustände explizit bekannt sind, deren Schätzung durch einen vollständigen Beobachter mit einer Zeitverzögerung verbunden ist. Daher ist die Regelung mit reduziertem Beobachter im allgemeinen Fall schneller als die mit vollständigem Beobachter.

In allen Graphen ist der gleiche Verlauf für die zeitoptimale Steuerung angegeben, denn eine zeitoptimale Steuerung kann nicht sinnvoll mit einem Beobachter betrieben werden. Für eine zeitoptimale Steuerung des Gesamtsystems müssten nämlich neben den Zuständen des Beobachters \hat{x} auch die Zustände der Strecke x zur Regelung verwendet werden, was dem Sinn eines Beobachters widerspricht.

In Bild 7 sind die Stellgrößenverläufe dargestellt. Man erkennt, dass die WSVR die Stellgröße besser ausnutzen als die lineare Regelung. Daraus lässt sich das gute Ausregelverhalten dieser Regler erklären. Die Beschränkung wird dabei eingehalten.

Zum direkten Vergleich der Regelgüte zeigt Bild 8 die Ausregelzeit bezogen auf ein 5%-Toleranzband des Anfangswertes. In dieser Grafik kann man sehr deutlich erkennen, dass die Ausregelzeit sich durch einen Beobachter zwar verschlechtert, die Relationen zwischen den einzelnen Reglern jedoch in etwa gleich bleiben.

6 Zusammenfassung

Für das Modell eines hydraulischen Aktors wurden drei weiche strukturvariable Regler entworfen. Diese wurden mit Zustandsrückführung, mit einem vollständigen Beobachter sowie mit einem reduzierten Beobachter betrieben und mit einem gebietszulässigen linearen Regler sowie einer zeitoptimalen Regelung verglichen. Das Beispiel des Aktors illustriert, dass die weichen strukturvariablen Regler ihre Überlegenheit in Bezug auf die Regelgüte auch bei Verwendung eines Beobachters behaupten. Der Entwurf des Beobachters ist dabei aufgrund seiner linearen Struktur sehr einfach.

Literatur

- [1] ADAMY, J.: Implicit Lyapunov Functions and Isochrones of Linear Systems. In: *IEEE Transactions on Automatic Control* 50 (2005), Nr. 6, S. 874–879.
- [2] ADAMY, J.; FLEMMING, A.: Soft variable-structure controls: a survey. In: *Automatica* 40 (2004), Nr. 11, S. 1821–1844.
- [3] ADAMY, J.; LENS, H.: Stabilitätsnachweis für weiche strukturvariable Regelungen mit Zustandsbeobachter. In: *at – Automatisierungstechnik* 55 (2007), Nr. 3, S. 107–118.
- [4] ALBERS, K.: *Syntheseverfahren für nichtlineare parameter- und strukturvariable Zustandsregler unter Berücksichtigung von Begrenzungen*, Universität Dortmund, Diss., 1983.
- [5] FÖLLINGER, O.: *Optimale Regelung und Steuerung*. 3. Aufl. München: Oldenbourg, 1994.
- [6] LUNZE, J.: *Regelungstechnik* 2. 3. Aufl. Berlin: Springer, 2005.

Manuskripteingang: 5. Dezember 2006.



Dipl.-Ing. Hendrik Lens promoviert am Fachgebiet Regelungstheorie und Robotik, Fachbereich Elektro- und Informationstechnik der TU Darmstadt, im Bereich nichtlinearer Regelungen. Hauptarbeitsgebiet: weiche strukturvariable Regelungen.

Adresse: Technische Universität Darmstadt, Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik, Fachgebiet Regelungstheorie und Robotik, Landgraf-Georg-Str. 4, 64283 Darmstadt, E-Mail: hlens@rtr.tu-darmstadt.de



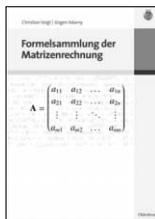
Prof. Dr.-Ing. Jürgen Adamy ist Leiter des Fachgebietes Regelungstheorie und Robotik, Fachbereich Elektro- und Informationstechnik der TU Darmstadt. Hauptarbeitsgebiete: Regelungsverfahren, Computational Intelligence, autonome mobile Roboter.

Adresse: Technische Universität Darmstadt, Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik, Fachgebiet Regelungstheorie und Robotik, Landgraf-Georg-Str. 4, 64283 Darmstadt, Fax: +49-(0)6151 16 2507, E-Mail: adamy@rtr.tu-darmstadt.de

Verfügbar unter
lediglich die vom Gesetz vorgesehenen Nutzungsrechte gemäß UrhG



Matrizenrechnung auf einen Blick



Christian Voigt, Jürgen Adamy
Formelsammlung der Matrizenrechnung

2007 | XIV, 162 Seiten | Broschur

€ 19,80

ISBN 978-3-486-58350-2

Ingenieure, Naturwissenschaftler und Mathematiker in Studium und Praxis erhalten die wichtigsten Sätze und Gleichungen der Matrizenrechnung in überschaubarer und leicht verständlicher Form präsentiert. Um ein kompaktes Format und eine übersichtliche Darstellung zu gewährleisten, wurde bewusst auf die Angabe der zugrunde liegenden Beweise und Hilfssätze verzichtet.

Dank der ausführlichen Angabe der Notation und des umfangreichen Index wird der Leser bestmöglich bei der Suche und dem Verständnis der Formeln unterstützt. Ein Glossar der wichtigsten Fachbegriffe, Literatur- und Fachwörterverzeichnis Deutsch-Englisch sowie eine Übersicht über die Matrizenklassen komplettieren die Formelsammlung.

Bestellen Sie in Ihrer Fachbuchhandlung oder direkt bei uns:

Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH, Rosenheimer Str. 145, 81671 München

Tel: 089/45051-248, Fax: 089/45051-333, verkauf@oldenbourg.de, oldenbourg-wissenschaftsverlag.de