

Entwurf von robusten Telemanipulationssystemen mit Parameterraumverfahren

Design of Robust Master-Slave Systems in Parameter Space

Naim Bajcinca und Ralf Koeppel

Herrn Prof. Dr.-Ing. Jürgen Ackermann zum 65. Geburtstag gewidmet

Telemanipulationssysteme mit kinästhetischer Rückkopplung durch bidirektionale Regelkreise erweitern die Fertigkeit eines Bedieners bei der Durchführung von komplexen Manipulationsaufgaben. Dieser Beitrag stellt ein Parameterraumverfahren zum regelungstechnischen Entwurf robuster bidirektionaler Regelkreise vor. Der Entwurf basiert auf den bekannten Parametern des Bedien- und Teleoperator-systems, sowie den als unsicher angenommenen bediener- und teleoperatorseitigen Parametern der Kontaktsteifigkeit und der zur bidirektionalen Datenübertragung erforderlichen Totzeit. Mit dem Ansatz der singulären Frequenzen wird ein Entwurfsverfahren für Hurwitz- und Γ -stabile bidirektionale Regler entwickelt und dessen Anwendung anhand von Simulationen gezeigt.

Master-slave systems with kinesthetic feedback using bidirectional controllers enhance the dexterity of an operator performing manipulation tasks. This article proposes a method for the syntheses of robust bidirectional controllers in parameter space. The synthesis is based on known parameters of the master and slave manipulation systems, and on uncertain parameters such as the operator and environment contact stiffness and the bidirectional communication dead time. Using the approach of singular frequencies, a method for the synthesis of Hurwitz- and Γ -stable bidirectional controllers is developed and its application is shown by simulation.

1 Einleitung

Telemanipulationssysteme mit kinästhetischer Rückkopplung durch bidirektionale Regelkreise erweitern die Fertigkeit eines Bedieners bei der Durchführung von Manipulationsaufgaben. Neue Anwendungen dieser Technologie haben eine möglichst wirklichkeitsnahe, multimodale und transparente Telepräsenz und Teleaktion zum Ziel, die dem Bediener einen hohen Immersionsgrad auf der entfernten, nicht zugänglichen oder skalierten teleoperatorseitigen Umgebung ermöglichen.

Die zunehmende Bedeutung dieses Gebiets und aktuelle F&E-Aktivitäten und Anwendungen in der Teleautomation und Telerobotik wurden bereits in einem eigenen at-Schwerpunktheft vorgestellt [6]. Die Entwicklung von

Methoden wird insbesondere auch im Rahmen des DFG-Sonderforschungsbereichs „Wirklichkeitsnahe Telepräsenz und Teleaktion“ verfolgt. Dessen Aktivitäten sowie weitere internationale Arbeiten sind in [7] beschrieben.

Systeme zur Steuerung von Robotern über große Entfernungen wurden vor allem in der Weltraumrobotik entwickelt [8]. Operative Systeme verwenden eine aufgabenorientierte Programmiermethodik unter Einsatz prädiktiver Computergrafik, die auch die Simulation von Sensoren und Regelkreise beinhaltet [4]. Diese Systeme ermöglichen eine intuitive Programmierung und Bedienung von sensorgeführten Robotern. Gleichzeitig ist mit diesem Ansatz die Kompensation von Signallaufzeiten möglich. Eine optionale haptische Rückkopplung basiert auf bedienerseitigen, lokalen Modellen [16]. Zukünftig sollen operative Systeme

für Anwendungen in der erdnahen oder geostationären Umlaufbahn auch eine direkte Telepräsenzverbindung mit kinästhetischer Rückkopplung ermöglichen. Aber auch in der Medizintechnik sind bei einer langfristig zu erwartenden Verbreitung der robotergestützten minimal-invasiven Chirurgie Telechirurgie und Telekooperationsszenarien denkbar. Eine wichtige Voraussetzung ist diesbezüglich die sichere kinästhetische Kopplung von Bediener und Teleoperatorsystem unter Berücksichtigung von Parameterunsicherheiten.

Dieser Beitrag stellt hierzu ein Syntheseverfahren für bidirektionale Regelkreise vor. Dabei werden Parameterraumverfahren der robusten Regelung [1] angewandt und die Bediener- und Umgebungssteifigkeit sowie die Totzeit als unsichere Parameter berücksichtigt. Die Betrachtung der Totzeit erfordert dabei die Weiterentwicklung der Verfahren der robusten Regelung im Hinblick auf Totzeitsysteme.

Eine Übersicht über die bisher entwickelten regelungstechnischen Ansätze ist in [5; 14] zu finden. Zur Beherrschung von bidirektionalen Reglern mit Übertragungstotzeiten in der Regelstrecke können zwei Verfahren angewendet werden.

Das erste Verfahren basiert auf der Übertragung von Leistungswellengrößen [2; 11]. Es wird das Modell einer verlustlosen und passiven Leistungsübertragung angewandt. Hierbei wird von den realistischen Annahmen ausgegangen, dass der Bediener und das Teleoperatorsystem selbst passives Verhalten aufweisen. Die Ansätze gehen zunächst von einer konstanten Totzeit aus, können aber auch zur Behandlung von Systemen mit variabler Totzeit erweitert werden.

Ein zweites Verfahren basiert auf bidirektionalen PD-Positionsreglern [10; 12]. Mit zunehmender Totzeit wird zur Stabilisierung die Dämpfung des Systems verstärkt. Im Gegensatz zu den Verfahren der passiven Leistungsübertragung bleibt die auf der Bedienerseite empfundene, scheinbare Trägheit konstant. Eine stabile bilaterale Kopplung mit PD-Reglern zur kraftrückkoppelnden Steuerung eines Roboters auf dem japanischen ETS-VII Satelliten wurde in [10] vorgestellt. Die Totzeit zwischen der Bodenstation in Tokio und dem Satelliten betrug durch die Kommunikationstechnologie bedingt mehrere Sekunden. Die Bedienbarkeit des Telemanipulationssystems war dadurch erheblich eingeschränkt. Mit zunehmender Totzeit muss somit zusätzlich zur Stabilität die Bedienbarkeit, auch Manövrierbarkeit genannt, berücksichtigt werden. In diesem Beitrag beschränken wir uns auf die Entwicklung von Parameterraumverfahren in Bezug auf die Stabilität eines Systems.

In [15] wird ein Eigenwertansatz zur Synthese von Reglern eines Telemanipulationssystems im 2-dimensionalen Parameterraum unter Berücksichtigung der Γ -Stabilität vorgestellt. Der im Folgenden vorgestellte Ansatz bietet unter Verwendung der Methode der singulären Frequenzen eine allgemeinere Vorgehensweise, indem er eine symbolische Lösung für Hurwitz- und Γ -Stabilität ermöglicht.

Im Abschnitt 2 werden die Systemgleichungen des Modells und des bilateralen Positionsreglers beschrieben. Im Abschnitt 3 wird die Methode der singulären Frequenzen dargelegt. Abschnitt 4 zeigt die Behandlung des vorgestellten Verfahrens bei bilinearer Parameterabhängigkeit, wie sie bei der Struktur eines Telemanipulationssystems vorliegt. In Abschnitt 5 wird anhand eines Beispiels die Synthese eines robust stabilisierenden Satzes von Parametern für Hurwitz und Γ -Stabilität im 3-dimensionalen (3D) Parameterraum berechnet.

2 Modell und Reglerstruktur eines Telemanipulationssystems

2.1 Modell

In diesem Beitrag werden die Untersuchungen auf Telemanipulationssysteme mit einem Freiheitsgrad eingeschränkt, d. h. die Signale¹ des Regelsystems, Position, Geschwindigkeit und Kraft sind skalare Größen (Bild 1).

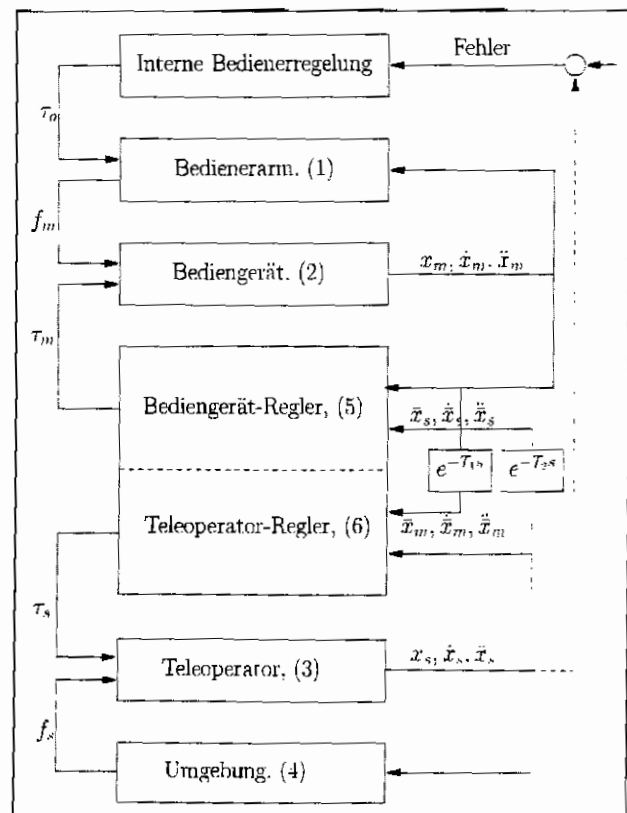


Bild 1: Struktur eines Telemanipulationssystems.

Der Bediener erzeugt aus dem Vergleich der Istposition des Teleoperators mit einer von ihm vorausgedachten Trajektorie ein Kommando τ_o an das Muskelsystem des Armes. Über den Arm des Bedieners wird dadurch eine externe Kraft f_m auf das Bediengerät ausgeübt. Durch die eingepägten Kräfte τ_m und τ_s der bilateralen Regler werden

¹ Die Benennung der Indizes der Variablen beziehen sich auf die im englischen Sprachgebrauch üblichen Bezeichnungen (o)perator, (m)aster, (s)lave und (e)nvironment.

das Bediengerät und der Teleoperator gekoppelt. Zwischen dem Teleoperator und der Umgebung wird die Kraft f_s über die Position des Teleoperators x_s und die Umgebungsteifigkeit erzeugt. Wie in Bild 1 gezeigt, werden dabei Bediener und Umgebung als Impedanz, d.h. die entsprechende Kraft als Funktion der Bewegung, dargestellt.

Der Arm des Bedieners wird durch ein lineares Masse-Dämpfer-Feder-System modelliert,

$$\tau_o - f_m = m_o \ddot{x}_m + b_o \dot{x}_m + c_o x_m, \quad (1)$$

wobei angenommen wird, dass der Bediener das Bediengerät festhält. Der Arm des Bedieners kann, wie in [9] gezeigt, als passives System angenommen werden. Die Dämpfung b_o und Steifigkeit c_o kann dabei je nach Kontraktion des Muskelapparates in gewissen Bereichen variieren.

Das Bediengerät und der Teleoperator wird mit einem Masse-Dämpfer-System,

$$f_m - \tau_m = m_m \ddot{x}_m + b_m \dot{x}_m \quad (2)$$

$$\tau_s - f_s = m_s \ddot{x}_s + b_s \dot{x}_s \quad (3)$$

modelliert, und die Umgebungsdynamik als Masse-Dämpfer-Feder-System

$$f_s = m_e \ddot{x}_s + b_e \dot{x}_s + c_e x_s. \quad (4)$$

2.2 Reglerstruktur

Der Regler in Bild 1 besteht aus dem Bediengerät- und dem Teleoperator-Regler. Des Weiteren werden die Signallaufzeiten (Totzeiten) T_1 und T_2 zwischen den beiden Systemen berücksichtigt, d. h.

$$\bar{x}_m(t) = x_m(t - T_1) \quad \bar{x}_s(t) = x_s(t - T_2)$$

$$\dot{\bar{x}}_m(t) = \dot{x}_m(t - T_1) \quad \dot{\bar{x}}_s(t) = \dot{x}_s(t - T_2)$$

$$\ddot{\bar{x}}_m(t) = \ddot{x}_m(t - T_1) \quad \ddot{\bar{x}}_s(t) = \ddot{x}_s(t - T_2)$$

$$\bar{f}_m(t) = f_m(t - T_1) \quad \bar{f}_s(t) = f_s(t - T_2).$$

Wie bereits erwähnt soll in dieser Arbeit von einer gekoppelten Reglerstruktur bestehend aus vier PD-Reglern ausgegangen werden,

$$\tau_m = -k_{mn} x_m - d_{mn} \dot{x}_m + k_{sm} \bar{x}_s + d_{sm} \dot{\bar{x}}_s, \quad (5)$$

$$\tau_s = -k_{ss} x_s - d_{ss} \dot{x}_s + k_{ms} \bar{x}_m + d_{ms} \dot{\bar{x}}_m \quad (6)$$

mit k_{mn} , d_{mn} , k_{sm} , d_{sm} und k_{ss} , d_{ss} , k_{ms} , d_{ms} den bediengerät- und teleoperatorseitigen Reglerparametern.

3 Methode der singulären Frequenzen

3.1 Parameterraumverfahren der robusten Regelung

Gegeben sei eine Polynomfamilie $p(s, q, k)$ eines Systems, wobei $q = [q_1, q_2, \dots, q_p]^T$ der Vektor der unsicheren Parameter des Systems und $k = [k_1, k_2, \dots, k_c]^T$ der Vektor

der Reglerparameter ist. Die Parameterunsicherheiten werden durch die jeweiligen unteren und oberen Grenzen q_i^- und q_i^+ des unsicheren Parameters q_i durch die sogenannte Q-Box

$$q_i^- < q_i < q_i^+, \quad i = 1, 2, \dots, p$$

beschrieben.

Die dem robusten Reglerentwurf zu Grunde gelegte Fragestellung beinhaltet die Bestimmung der Menge der Reglerparameter K_Γ , welche die Polynomfamilie $p(s, q, k)$ robust Γ -stabilisiert:

$$K_\Gamma = \{k : p(s, q, k) \text{ ist robust } \Gamma\text{-stabil}\}.$$

Es wird gefordert, dass die Eigenwerte der Polynomfamilie innerhalb eines Γ -Gebiets in der s -Ebene liegen. Das Γ -Gebiet wird durch eine Polgebietsvorgabe spezifiziert.

Das Entwurfsverfahren mit robuster Eigenwertvorgabe bildet die Berandung $\partial\Gamma$ des Γ -Gebiets in der s -Ebene auf den Reglerparameterraum K ab. Streng genommen sollte man jede Strecke q^* auf das die Strecke stabilisierende Gebiet K_Γ^* abbilden, um anschließend für alle K_Γ^* die stabilisierende Schnittmenge $K_\Gamma = \bigcap K_\Gamma^*$ zu bilden. Jedoch ist dies nicht praktikabel. Es wird daher der sogenannte Multimodellansatz angewendet, bei dem der Entwurf nur für einen endlichen Satz von Streckenparameterwerten, typischerweise für die Eckrepräsentanten $q^{(v)}$ der Q-Box durchgeführt wird. Dies erfolgt unter der Annahme, dass die sich so ergebende simultan stabilisierende Schnittmenge $K_\Gamma = \bigcap K_\Gamma^{(v)}$ auch die ganze Q-Box stabilisiert [1].

3.2 Singuläre Frequenzen

Bei der Anwendung der Methode der singulären Frequenzen bedarf es einer Parametertransformation des k -Raums auf einen r -Raum, der die sogenannte Rankbedingung erfüllt. In dem hier vorgestellten Ansatz beschränken wir uns auf zwei transformierte Reglerparameter, r_1 und r_2 .

Eine nicht singuläre Frequenz auf der Berandung $\partial\Gamma$ wird genau auf einen Punkt (r_1, r_2) der Parameterebene abgebildet. Bei sogenannten singulären Frequenzen $s^o = \sigma^o + j\omega^o$ ist die Rankbedingung

$$\text{rank} \frac{\partial(h, g)}{\partial(r_1, r_2)} = 1 \quad (7)$$

erfüllt, mit $h(\cdot)$ und $g(\cdot)$ dem Real- bzw. Imaginärteil des Polynomes $p(s, q^{(v)}, r_1, r_2)$. Dabei wird die singuläre Frequenz auf eine Gerade, der sogenannten singulären Geraden, in der Parameterebene (r_1, r_2) abgebildet.

Die Rankbedingung (7) ist eine notwendige Bedingung für die Bestimmung der singulären Frequenzen. Für eine notwendige und hinreichende Bedingung muss zusätzlich die Wurzelbedingung

$$p(s^o, q^{(v)}, r_1, r_2) = 0 \quad (8)$$

erfüllt sein. Es gilt: Ist s^o eine singuläre Frequenz, so ist die konjugierte Frequenz $(s^o)^*$ auch singulär.

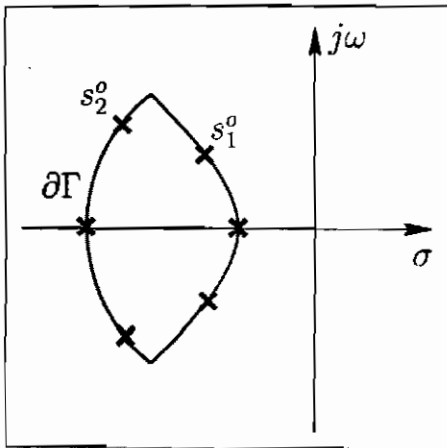


Bild 2: Ein singuläres Γ -Gebiet mit zwei komplexen und zwei reellen singulären Frequenzen.

Eine besondere Klasse der Γ -Gebiete wird von den sog. *singulären Γ -Gebieten* gebildet. Auf der Berandung eines singulären Γ -Gebietes ist die Rankbedingung (7) überall erfüllt, d. h.

$$\text{rank} \frac{\partial(h, g)}{\partial(r_1, r_2)} = 1. \tag{9}$$

Jede Frequenz s auf der Berandung $\partial\Gamma$, $s \in \partial\Gamma$, wird durch die Rankbedingung über die charakteristische Gleichung

$$\begin{aligned} h(s, q^{(v)}, r_1, r_2) &= 0, \\ g(s, q^{(v)}, r_1, r_2) &= 0 \end{aligned}$$

auf zwei parallele Geraden in der (r_1, r_2) -Ebene abgebildet. An den singulären Frequenzen s^o , d. h. bei gleichzeitiger Erfüllung der Wurzelbedingung auf der Berandung $\partial\Gamma$, sind diese Geraden identisch. Die Eigenwerte des Systems können das singuläre Gebiet Γ nur an den singulären Frequenzen betreten bzw. verlassen (Bild 2). Somit ist nur eine Abbildung der singulären Frequenzen und nicht der ganzen Berandung $\partial\Gamma$ auf die Parameterebene (r_1, r_2) notwendig. Der Parameterraum wird durch die singulären Geraden aufgeteilt und wird als *singulärer Parameterraum* bezeichnet.

3.3 Transformation des Reglerparameterraums auf einen singulären Parameterraum

Im Folgenden werden die allgemeinen Bedingungen für die Transformation eines Reglerparameterraums auf einen singulären Parameterraum hergeleitet. Es sei,

$$a = a(k_1, k_2, k_3, q^{(v)})$$

der Vektor der Koeffizienten a_0, a_1, \dots, a_n des charakteristischen Polynoms und (k_1, k_2, k_3) drei freie Regelparameter, wobei die Unsicherheiten und die anderen, festen Regelparameter durch $q^{(v)}$ beschrieben werden.

Es wird eine Transformation

$$\begin{aligned} k_1 &= k_1(r_1, r_2, r_3), \\ k_2 &= k_2(r_1, r_2, r_3), \\ k_3 &= k_3(r_1, r_2, r_3), \end{aligned} \tag{10}$$

auf einen r -Parameterraum gesucht, für den die Rankbedingung erfüllt ist.

Da wegen der Beziehung $g(\cdot) = \omega g'(\cdot)$ die Rankbedingung überall auf der σ -Achse ($\omega = 0$) erfüllt wird, ist es sinnvoll $g(\cdot)$ in der Rankbedingung mit $\frac{1}{\omega}g(\cdot)$ zu ersetzen. Somit ergibt sich,

$$\frac{\partial(h, \frac{1}{\omega}g)}{\partial(r_1, r_2)} = \eta(\sigma, \omega) \frac{\partial a}{\partial(r_1, r_2)} \tag{11}$$

mit

$$\eta(\sigma, \omega) = \begin{bmatrix} 1 & \sigma & \sigma^2 - \omega^2 & \dots & \Re s^n \\ 0 & 1 & 2\sigma & \dots & \frac{1}{\omega} \Im s^n \end{bmatrix} \tag{12}$$

und

$$\frac{\partial a}{\partial(r_1, r_2)} = \frac{\partial a}{\partial(k_1, k_2, k_3)} \frac{\partial(k_1, k_2, k_3)}{\partial(r_1, r_2)}. \tag{13}$$

Setzt man (11) in die Rankbedingung ein, ergibt sich eine Kurvenfamilie in der s -Ebene, die auch Familie der *singulären Kurven* genannt wird. Diese Kurven legen die Berandung $\partial\Gamma$ eines singulären Γ -Gebiets fest.

Die Familie der singulären Kurven lässt sich durch die folgende Gleichung beschreiben,

$$\frac{\partial a}{\partial r_1} + \lambda \frac{\partial a}{\partial r_2} = \varphi_1 \gamma_1 + \varphi_2 \gamma_2 + \dots + \varphi_{n-1} \gamma_{n-1}, \tag{14}$$

wobei $\lambda = \lambda(\alpha)$ und $\varphi_i = \varphi_i(\alpha)$, $i = 1, 2, \dots, n-1$ beliebige Funktionen auf der Berandung $\partial\Gamma$ sind und α ein Parameter der singulären Kurven $\partial\Gamma$ ist. Die Vektoren

$$\gamma_i = \begin{bmatrix} \frac{\sigma}{\omega} \Im s^{i+1} - \Re s^{i+1} \\ -\frac{1}{\omega} \Im s^{i+1} \\ 0 \\ \vdots \\ 1 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}, \quad i = 1, 2, \dots, n-1 \tag{15}$$

beschreiben den Null-Raum der Matrix η , der auch γ -Raum genannt wird. Um die explizite Form der singulären Kurve herleiten zu können, muss man die Funktionen λ und φ aus (14) eliminieren. Dabei ist Γ ein singuläres Gebiet, das sich aus einem bestimmten Satz von γ -Vektoren, z. B. γ_1 und γ_2 ergibt. Hierbei spricht man auch davon, dass γ_1 und γ_2 die Kurve $\partial\Gamma$ singularisieren. Des Weiteren kann gezeigt werden, dass eine singuläre Kurve genau von einem Satz γ -Vektoren singularisiert wird. Für den in diesem Zusammenhang zu entwickelnden Entwurf des Telemanipulationssystems ist nur die Familie der Kurven relevant, die vom Vektor γ_1 singularisiert wird. Andere singuläre Kurvenfamilien wurden in [3] analysiert.

Um die γ_1 -Familie berechnen zu können, setzt man $\varphi_i = 0$, $i = 2, 3, \dots, n-1$ in (14) ein und erhält nach Eliminierung von λ und φ_1 ,

$$A(\sigma^2 + \omega^2) + 2B\sigma + C = 0 \tag{16}$$

mit

$$\begin{aligned} A &= \frac{\partial a_1}{\partial r_1} \frac{\partial a_2}{\partial r_2} - \frac{\partial a_2}{\partial r_1} \frac{\partial a_1}{\partial r_2}, \\ B &= \frac{\partial a_0}{\partial a_2} \frac{\partial a_2}{\partial a_1} - \frac{\partial a_2}{\partial a_0} \frac{\partial a_1}{\partial a_0}, \\ C &= \frac{\partial a_0}{\partial r_1} \frac{\partial a_1}{\partial r_2} - \frac{\partial a_1}{\partial r_1} \frac{\partial a_0}{\partial r_2}. \end{aligned} \tag{17}$$

Aus Gleichung (16) wird ersichtlich, dass γ_1 die Familie der Kreise mit einem beliebigen Radius und Zentrum auf der reellen Achse ($A \neq 0$, Kreisstabilität), bzw. die Geraden parallel zur imaginären Achse ($A = 0$, σ -Stabilität) singularisiert. Für $A = 0$ und $C = 0$ erhält man Hurwitz-Stabilität.

Setzt man (13) in (17) ein, ergibt sich

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial(a_1, a_2)}{\partial(k_1, k_2)} & \frac{\partial(a_1, a_2)}{\partial(k_1, k_3)} & \frac{\partial(a_1, a_2)}{\partial(a_0, a_2)} \\ \frac{\partial(a_1, a_2)}{\partial(k_1, k_2)} & \frac{\partial(a_1, a_2)}{\partial(k_1, k_3)} & \frac{\partial(a_1, a_2)}{\partial(a_0, a_2)} \\ \frac{\partial(a_1, a_2)}{\partial(k_1, k_2)} & \frac{\partial(a_1, a_2)}{\partial(k_1, k_3)} & \frac{\partial(a_1, a_2)}{\partial(a_0, a_2)} \\ \frac{\partial(a_1, a_2)}{\partial(k_1, k_2)} & \frac{\partial(a_1, a_2)}{\partial(k_1, k_3)} & \frac{\partial(a_1, a_2)}{\partial(a_0, a_2)} \\ \frac{\partial(a_1, a_2)}{\partial(k_1, k_2)} & \frac{\partial(a_1, a_2)}{\partial(k_1, k_3)} & \frac{\partial(a_1, a_2)}{\partial(a_0, a_2)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial(k_1, k_2)}{\partial(r_1, r_2)} \\ \frac{\partial(k_1, k_3)}{\partial(r_1, r_2)} \\ \frac{\partial(k_2, k_3)}{\partial(r_1, r_2)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix}$$

Ist die Systemmatrix nichtsingulär, kann das System gelöst werden. Man erhält

$$\begin{aligned} \frac{\partial(k_1, k_2)}{\partial(r_1, r_2)} &= F(k_1, k_2, k_3), \\ \frac{\partial(k_1, k_3)}{\partial(r_1, r_2)} &= G(k_1, k_2, k_3), \\ \frac{\partial(k_2, k_3)}{\partial(r_1, r_2)} &= H(k_1, k_2, k_3), \end{aligned} \tag{18}$$

ein System partieller Differentialgleichungen, dessen Lösung (10) einen singulären Parameterraum definiert. In diesem neuen r -Parameterraum ist die Kurvenfamilie (16) singulär.

Die Lösung des Systems (18) hängt stark von den Funktionen F , G und H ab. Jedoch interessiert uns nur eine partikuläre Lösung dieses Systems. Für den betrachteten Fall des Telemanipulationssystems wird (18) in eine einfachere Form gebracht, die sich besonders hilfreich erweist:

$$\frac{\partial k_1}{\partial r_1} \frac{\partial k_2}{\partial r_2} - \frac{\partial k_2}{\partial r_1} \frac{\partial k_1}{\partial r_2} = F, \tag{19}$$

$$H \frac{\partial k_1}{\partial r_1} - G \frac{\partial k_2}{\partial r_1} + F \frac{\partial k_3}{\partial r_1} = 0, \tag{20}$$

$$H \frac{\partial k_1}{\partial r_2} - G \frac{\partial k_2}{\partial r_2} + F \frac{\partial k_3}{\partial r_2} = 0. \tag{21}$$

3.4 Robustheit

Das charakteristische Polynom des Systems sei von der Form

$$p(s, q, k) = A(s, q) a(s, k) + B(s, q). \tag{22}$$

Die Streckenparameter q können beliebig in den Polynomen $A(s, q)$ und $B(s, q)$ auftreten. Außerdem können $A(s, q)$ wie auch $B(s, q)$ Quasipolynome sein, d. h. auch exponentielle Terme der Totzeit können darin enthalten sein. Unter Verwendung der Sylvester Ungleichung des Ranks eines Produktes von zwei Matrizen kann

$$\text{rank} \frac{\partial p}{\partial r} = \text{rank} \eta \frac{\partial a}{\partial k} \frac{\partial k}{\partial r} \tag{23}$$

gezeigt werden. Hierbei zeigt sich, dass die Unsicherheiten q des Systems (22) keine Wirkung auf die Rankbedingung (23) haben, d. h. die Unsicherheiten q eines Systems beeinflussen nicht die Singularität eines Γ Gebiets, sondern nur die Position der singulären Frequenzen auf der $\partial\Gamma$ Berandung.

4 Transformation bei bilinearer Parameterabhängigkeit

Das charakteristische Polynom des linearisierten Telemanipulationssystems mit der Reglerstruktur (5) und (6) ist

$$p(s, q, k) = a(s, k') e^{-(T_1+T_2)s} + b(s, q, k''), \tag{24}$$

mit

$$a(s, k') = a_0 + a_1 s + a_2 s^2 \tag{25}$$

$$b(s, q, k'') = b_0 + b_1 s + b_2 s^2 + b_3 s^3 + b_4 s^4. \tag{26}$$

In diesem Fall besteht der γ -Raum nur aus dem Vektor γ_1 , d. h. es kann wie im Abschnitt 3.3 gezeigt eine robuste Kreis- und σ - bzw. Hurwitzstabilität implementiert werden.

In k' sind die gekoppelten Reglerparameter k_{sm}, k_{ms}, d_{sm} und d_{ms} , in k'' die lokalen k_{mm}, k_{ss}, d_{mm} und d_{ss} enthalten. q ist der Vektor der Streckenparameter, darunter auch die unsicheren Parameter der Arm- und Umgebungssteifigkeit, c_o und c_e . Ist k'' der Vektor der festen Reglerparameter, dann entspricht (24) der typischen Form (22) und die Methode der singulären Frequenzen kann für den robusten Entwurf einfach angewendet werden. Unter Einführung der Notation $k_1 = k_{sm}, k_2 = d_{sm}, k_3 = d_{sm}$ und Fixierung des Reglerparameters $d_{ms} = d_{ms}^*$ ist

$$\begin{aligned} a_0 &= k_1 k_3, \\ a_1 &= k_1 d_{ms}^* + k_2 k_3, \\ a_2 &= k_2 d_{ms}^*. \end{aligned} \tag{27}$$

Die Funktionen F , G und H in (18) können nach dem charakteristischen Polynom (24) gelöst werden. Durch Einsetzen dieser Funktionen in (20) und (21) erhält man

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial r_1} (B k_2 k_3 - A k_1 k_3 + B d_{ms}^* k_1 - C d_{ms}^* k_2) &= 0, \\ \frac{\partial}{\partial r_2} (B k_2 k_3 - A k_1 k_3 + B d_{ms}^* k_1 - C d_{ms}^* k_2) &= 0. \end{aligned} \tag{28}$$

Die Lösung dieses Gleichungssystems ist

$$B k_2 k_3 - A k_1 k_3 + B d_{ms}^* k_1 - C d_{ms}^* k_2 = U(r_3), \tag{29}$$

wobei $U(r_3)$ eine beliebige Funktion von r_3 ist. Da uns nur eine partikuläre Lösung interessiert, setzen wir $U(r_3) = r_3$. Zur Vereinfachung sei die Lösung $k_2 = \frac{1}{d_{ms}^*} r_2$ angenommen. Jetzt kann (29) nach k_3 aufgelöst werden und in (19) eingesetzt werden.

Somit ergibt sich die analytisch lösbare, partielle Differentialgleichung

$$\frac{\partial k_1}{\partial r_1} = \frac{(Br_2 - Ad_{ms}^* k_1)^2}{d_{ms}^* (-r_2 r_3 + 2Bd_{ms}^* r_2 k_1 - Cr_2^2 - Ad_{ms}^{*2} k_1^2)} \quad (30)$$

Die Parameter A , B und C bestimmen das singuläre Γ -Gebiet. Der Parameterraum mit Hurwitz-Stabilität ($\sigma < 0$) ergibt sich für ($A = C = 0, B = 1$) und den Parametern der Transformation (10)

$$\begin{aligned} k_1 &= (r_3 + \sqrt{f})/2d_{ms}^*, \\ k_2 &= r_2/d_{ms}^*, \\ k_3 &= d_{ms}^* (r_3 - \sqrt{f})/2r_2, \\ f &= r_3^2 - 4r_1 r_2. \end{aligned} \quad (31)$$

σ -Stabilität ($\sigma < -\sigma_0 < 0$) erhält man für ($A = 0, B = 1/2, C = \sigma_0$) und

$$\begin{aligned} k_1 &= (r_3 + \sigma_0 r_2 - \sqrt{f})/d_{ms}^*, \\ k_2 &= r_2/d_{ms}^*, \\ k_3 &= (r_3 + \sigma_0 r_2 + \sqrt{f})d_{ms}^*/r_2, \\ f &= r_3^2 + 2\sigma_0 r_2 r_3 + \sigma_0^2 r_2^2 - r_1 r_2/2. \end{aligned} \quad (32)$$

Zu beachten ist, dass der für den Entwurf zur Verfügung stehende r -Parameterraum durch die Bedingung $f \geq 0$ eingeschränkt ist.

5 Erkennung von aktiven Gebieten im Parameterraum

In diesem Abschnitt wird ein Verfahren zur Erkennung von Γ -stabilen Regionen, den sogenannten aktiven Gebieten im Parameterraum entwickelt.

Wir betrachten einen singulären r -Parameterraum² eines Systems mit der singulären Kurve (Bild 3)

$$F(\sigma, \omega) = 0. \quad (33)$$

Es kann gezeigt werden, dass die Bedingung für eine Ebene $r_3 = const$ einen Satz $\mathcal{S} = \{s_1^0, s_2^0, \dots\}$ von singulären Frequenzen generiert.

Jede singuläre Frequenz beschreibt dabei eine singuläre Gerade in der (r_1, r_2) -Ebene. Somit entsteht ein Netz von konvexen Polygonen für $r_3 = const$. Rastert man r_3 über die (r_1, r_2) -Ebenen, bewegen sich die singulären Frequenzen auf der singulären Kurve $F(\sigma, \omega) = 0$. In bestimmten Ebenen $r_3 = const$ entstehen oder verschwinden dabei Paare von singulären Frequenzen. Dies geschieht genau an den lokalen Minima bzw. Maxima. Entsprechend werden bei

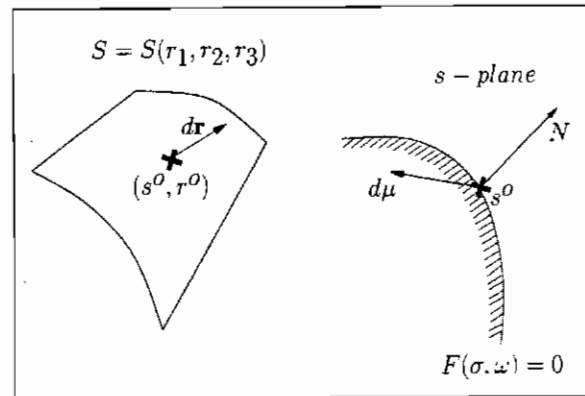


Bild 3: Zusammenhang zwischen einer inkrementellen Bewegung im Parameterraum und der entsprechenden Bewegung von Eigenwerten.

der Variation des Parameters r_3 um $r_3 = const$, 3D Gebiete geschlossen oder neue geöffnet. Somit wird der ganze r -Parameterraum in 3D Regionen aufgeteilt. Wir suchen nun nach den aktiven Regionen, d. h. den Regionen, für die eine maximale Anzahl von Eigenwerten in der Γ -Region liegen.

Die Grenzfläche zwischen zwei Nachbarregionen

$$S(r_1, r_2, r_3) = 0 \quad (34)$$

wird als singuläre Fläche bezeichnet (Bild 3).

Satz 1 Es sei (34) eine singuläre Grenzfläche und $r^0 = (r_1^0, r_2^0, r_3^0)^T$ ein Punkt auf der Fläche, dem eine bestimmte singuläre Frequenz s^0 auf der singulären Kurve (33) entspricht. Wird die singuläre Fläche (34) an r^0 überschritten, mit

$$dr = \left(\frac{\partial r_1}{\partial \rho}, \frac{\partial r_2}{\partial \rho}, \frac{\partial r_3}{\partial \rho} \right)^T_{r^0} d\rho$$

und $d\rho > 0$, überschreitet ein Paar von Eigenwerten die singuläre Kurve $\partial\Gamma$ an der singulären Frequenz s^0 , mit

$$\mu = \left(\frac{d\sigma}{d\rho}, \frac{d\omega}{d\rho} \right)^T_{s^0, r^0} \quad (35)$$

wobei

$$\begin{aligned} \frac{d\sigma}{d\rho} \Big|_{s^0, r^0} &= \sum_{i=1}^3 \left| \frac{\partial(h, g)}{\partial(\omega, r_i)} \Big|_{s^0} \frac{\partial r_i}{\partial \rho} \Big|_{r^0}, \\ \frac{d\omega}{d\rho} \Big|_{s^0, r^0} &= \sum_{i=1}^3 \left| \frac{\partial(h, g)}{\partial(r_i, \sigma)} \Big|_{s^0} \frac{\partial r_i}{\partial \rho} \Big|_{r^0} \end{aligned} \quad (36)$$

ist.

Um festzustellen ob die Eigenwerte in der s -Ebene in das Γ -Gebiet eintreten oder es verlassen, muss das Vorzeichen von

$$e = \text{sign} (\mu^T \cdot N) \quad (37)$$

berechnet werden, wobei $N = \left(\frac{\partial F}{\partial \sigma}, \frac{\partial F}{\partial \omega} \right)_{s^0}$ die Normale auf der singulären Kurve $\partial\Gamma$ an der singulären Frequenz s^0 ist. Für $e = +1$ verlassen die Eigenwerte das Γ -Gebiet und für $e = -1$ treten sie in dieses ein.

² Dabei wird angenommen, dass die Parameter r_1, r_2, r_3 linear in das umgeformte charakteristische Polynom eingehen.

6 Entwurf des Reglers und Validierung

Ziel dieses Kapitels ist es, den robust stabilisierenden Satz der r -Regelparameter im 3D Raum für das Telemanipulationssystem (24) zu berechnen. Wie im Abschnitt 4 gezeigt wurde, kann mit der Methode der singulären Frequenzen ein robuster Entwurf unter Berücksichtigung der bestehenden Parameterunsicherheiten des System durchgeführt werden. Mit den bereits erwähnten Unsicherheiten in den Parametern. Totzeit $T = T_1 + T_2$, Steifigkeit des Bedienerarms c_o und der Umgebung c_e und allen anderen Parametern als konstant angenommen, wählen wir beispielhaft folgende Parameterwerte:

Bediener: $m_o = 0, d_o = 0, c_o = \text{unsicher}$
 Bediengerät: $m_M = 1.5 \text{ kg}, b_M = 16.5 \text{ N/m/s}$
 Teleoperator: $m_S = 1.5 \text{ kg}, b_S = 16.5 \text{ N/m/s}$
 Umgebung: $m_e = 0, d_e = 5 \text{ N/m/s}, c_e = \text{unsicher},$

und als Q-Box der Unsicherheiten:

Totzeit $T = 0.1 \text{ s} \dots 0.5 \text{ s}$
 Bedienersteifigkeit: $c_o = 50 \text{ N/m} \dots 500 \text{ N/m}$
 Umgebungssteifigkeit: $c_e = 1000 \text{ N/m} \dots 10\,000 \text{ N/m}.$

Die lokalen Reglerparameter werden mit $K_m = K_s = 20 \text{ N/m}$ und $D_m = D_s = 5 \text{ N/m/s}$ festgelegt.

6.1 Hurwitz-Stabilität

Im letzten Kapitel wurde gezeigt, dass die nichtlineare Parametertransformation (31) das Hurwitz Γ -Gebiet, $\sigma < 0$ singularisiert. Das entsprechende charakteristische Polynom ist ein Quasipolynom der Form,

$$p(s, r) = (r_2 s^2 + r_3 s + r_1) + b(s)e^{Ts}, \quad (38)$$

das die Haupttermbedingung erfüllt, da $b(s)$ ein Polynom mit Grad 4 ist. Liegt das charakteristische Polynom in dieser Form vor, ist eine Analyse besonders anschaulich, da der Imaginärteil des Quasipolynoms

$$r_3 = -\frac{A(\omega)}{\omega} \sin(\omega T + \phi(\omega)) \quad (39)$$

die singulären Frequenzen generiert und der Realteil

$$r_1 - \omega^2 r_2 = -A(\omega) \cos(\omega T + \phi(\omega)) \quad (40)$$

die entsprechenden singulären Geraden beschreibt, mit $A(\omega) = |b(j\omega)|$ und $\phi(\omega) = \arg b(j\omega)$. Man beachte, dass auf einer Ebene $r_3 = \text{const}$ unendlich viele singuläre Frequenzen bzw. Geraden generiert werden können. Jeder Betriebspunkt des Teleoperatorsystems generiert ein eigenes Spektrum von singulären Frequenzen. Ziel ist es, das 3D Gebiet im Parameterraum (r_1, r_2, r_3) zu finden, das die Betriebspunkte, repräsentiert durch die Ecken der Q-Box des Teleoperatorsystems, simultan (robust) stabilisiert. Mit der Ausführung des Algorithmus auf den Bereich $-20\,000 < r_3 < +20\,000$ und $\omega < 100$ ergibt sich das in Bild 4 gezeigte Gebiet. Äquistabile³ robuste Regler liegen im Intervall $-11\,492,48239 < r_3 < 11\,480,43529$.

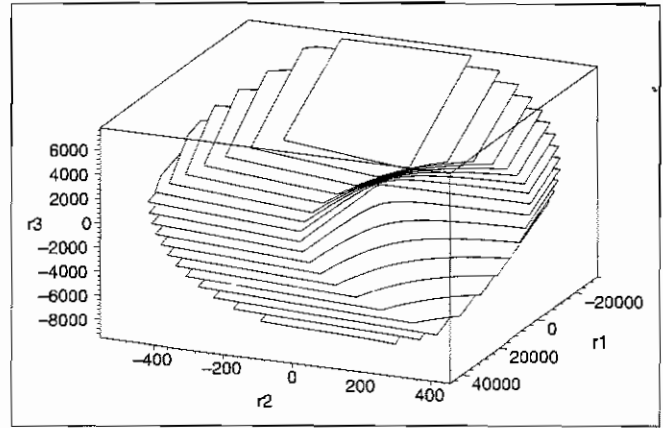


Bild 4: Robuster Hurwitz-Stabilitätsbereich im Parameterraum.

Die Stabilität eines beliebigen Reglers aus diesem Gebiet muss nun analysiert werden. Der Einfachheit halber wird der Regler $r_1 = 0, r_2 = 0, r_3 = 1$ untersucht. Dazu wird der folgende Satz von Pontryagin verwendet [13]:

Satz 2 Es sei $p(j\omega) = h(\omega) + jg(\omega)$ ein Quasipolynom mit einem Hauptterm. Falls alle Wurzeln $\{\omega_o\}$ von $h(\omega)$ reell sind und an jeder Wurzel ω_o

$$g(\omega) \frac{dh}{d\omega} \Big|_{\omega_o} < 0 \quad (41)$$

gilt, ist das Quasipolynom $p(j\omega)$ stabil.

Setzt man den gewählten Regler in (38) ein, so ergibt sich,

$$h(\omega) = A(\omega) \cos(\omega T + \phi(\omega)), \\ g(\omega) = \omega + A(\omega) \sin(\omega T + \phi(\omega)).$$

Man kann einfach zeigen, dass $A(\omega)$ für keinen Betriebspunkt reelle Wurzeln hat und $d\phi/d\omega > 0, \forall \omega > 0$. Somit hat $h(\omega)$ nur reelle Wurzeln, die durch die Bedingung $\phi(\omega) = (k + 1/2)\pi, k = 0, 1, 2, \dots$ bestimmt sind. Für jede Wurzel ω_o gilt

$$g(\omega) \frac{dh}{d\omega} \Big|_{\omega_o} = -\alpha_k(\omega_o) \left(T + \frac{d\phi}{d\omega} \right) (\omega_o + \alpha_k(\omega_o)),$$

mit $\alpha_k(\omega_o) = \alpha(\omega_o) \sin(k + 1/2)\pi$. Da für jeden Betriebspunkt des Systems, $\alpha(\omega) > \omega, \forall \omega > 0$ gilt, ist die Bedingung (41) an jeder Wurzel erfüllt, d.h. der Regler $r_1 = r_2 = 0, r_3 = 1$ ist stabil. Damit ist bewiesen, dass der ganze Bereich im Bild 4 alle Ecken der Q-Box des Telemanipulationssystems simultan stabilisiert.

Im Allgemeinen ist die Tatsache, dass ein Regler die Ecken einer Q-Box stabilisiert, kein Beweis dafür, dass derselbe Regler die ganze Q-Box stabilisiert. Jedoch ist es sehr wahrscheinlich, dass die Γ -Instabilität zuerst an einer der Ecken der Q-Box auftritt. Deshalb ist ein Regler, der die Ecken der Q-Box simultan stabilisiert, in der Praxis ein guter Kandidat für eine weitere Robustheitsanalyse [1].

An dieser Stelle wollen wir nicht die Analyse der Robustheit in einem strengen Sinne behandeln [1]. Statt dessen wird die Robustheit bei einem endlichen Satz von Betriebspunkten analysiert. Betrachten wir die Ebene $r_3 =$

³ Stabilität eines Reglers ist äquivalent mit der Stabilität des ganzen entsprechenden Bereichs.

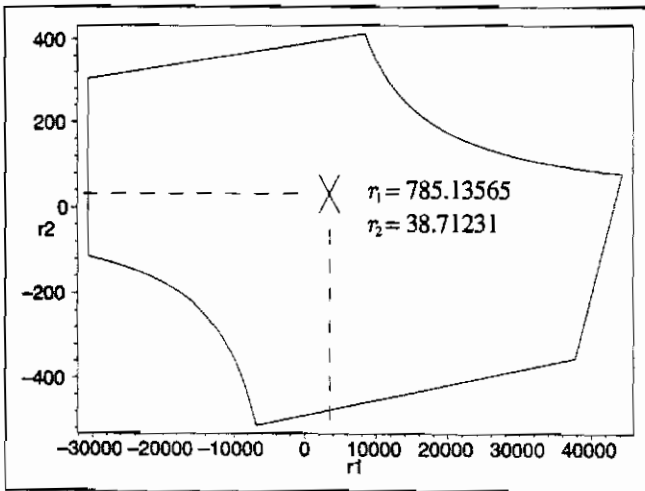


Bild 5: Robust-stabile Gebiet auf der Ebene ($r_3 = 3751,86992$).

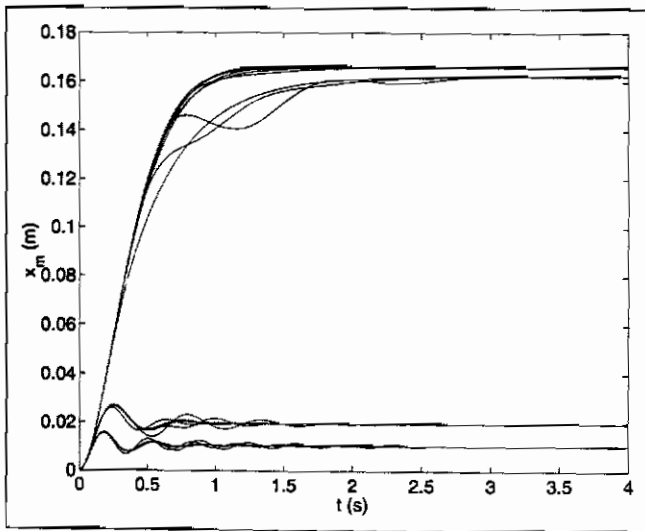


Bild 6: Sprungantwort x_m von 24 Betriebspunkten der Q-Box, $\tau_0 = 5$ (N).

3751,86992 des Reglergebietes (Bild 5) und einen auf ihr liegenden Regler $r_1 = 785,13565, r_2 = 38,71231$.

Bild 6 zeigt die Sprungantwort des Signals x_m der 24 Betriebspunkte. Diese entsprechen den Ecken, den Zentren der Flächen und Kanten der Q-Box.

6.2 σ -Stabilität

Eine gewisse Stabilitätsreserve und kleinere Einschwingzeit des Systems lässt sich durch σ -Stabilität erreichen, d.h. der Realteil von allen Eigenwerten soll kleiner als $-\sigma_0$ sein. Es wurde bereits oben gezeigt, dass in diesem Fall durch die Parametertransformation (32) das charakteristische Polynom des Systems die Form

$$p(s, r) = r_2 s^2 + 2(r_3 + \sigma_0 r_2) s + \frac{r_1}{2} + b(s) e^{T s} \quad (42)$$

erhält.

Der gleiche Algorithmus wie bei Hurwitz-Stabilität kann auch hier verwendet werden. Im Bild 7 wird für $\sigma_0 = 2$

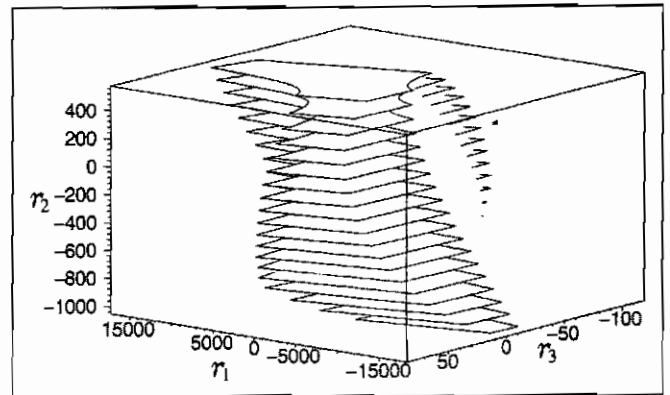


Bild 7: Robuster σ -Stabilitätsbereich im Parameterraum.

das stabile Gebiet dargestellt, das die Ecken der Q-Box simultan σ -stabilisiert.

Wie zu erwarten war, ist das σ -stabile Gebiet im Vergleich zum Hurwitz stabilen Gebiet erheblich reduziert.

7 Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurde ein Verfahren zur Synthese robuster bidirektionaler Positionsregler eines totzeitbehafteten Telemanipulationssystems entwickelt. Die Totzeit und die Bediener- und Umgebungssteifigkeit wurden als unsichere Parameter angenommen. Mit dem Ansatz der singulären Frequenzen wurde ein Entwurfsverfahren zur Synthese des Parameterraums für Hurwitz- und Γ -stabile Totzeitsysteme vorgestellt und dessen Anwendung anhand von Simulationen gezeigt.

Der Vorteil des Parameterraumverfahrens ist, dass alle einer vorgegebenen Stabilitätsspezifikation entsprechenden Regler gefunden werden und somit ein robust stabiler Satz an Reglerparametern gewählt werden kann. Die Leistungsfähigkeit des Reglers entspricht dem in [10] vorgestellten Regler, da dieser auf der gleichen Struktur aufbaut.

In einem nächsten Schritt soll das vorgestellte Verfahren zur Behandlung von Kriterien der Passivität und Manövrierbarkeit weiterentwickelt werden und dann als Werkzeug für den Systementwurf von zukünftigen Telepräsenz- und Tele-Steering-Systemen zur Verfügung stehen.

Literatur

- [1] J. Ackermann, A. Bartlett, D. Kaesbauer, W. Sienel und R. Steinhauser, *Robuste Regelung, Systeme mit unsicheren physikalischen Parametern*. Springer, Berlin, 1993.
- [2] R. Anderson und M. Spong, „Bilateral control of teleoperators with time delay“, *IEEE Trans. on Automatic Control*, Bd. 34, Nr. 5, S. 494–501, 1989.
- [3] N. Bajcinca, „The method of singular frequencies for robust design in an affine parameter space“, *9th Mediterranean Conference on Control and Automation, Dubrovnik*, 2001.
- [4] B. Brunner, J. Vogel und G. Hirzinger, „Aufgabenorientierte Fernprogrammierung von Robotern“, *at-Automatisierungstechnik*, Bd. 49, Nr. 7, S. 312–319, 2001.

[5] M. Buss und G. Schmidt, „Control problems in multi-modal telepresence systems“, in *Advances in Control: Highlights of the 5th European Control Conference ECC'99 in Karlsruhe, Germany* (P. Frank, ed.), S. 65–101, Springer, 1999.

[6] M. Buss und G. Schmidt, „Editorial: Teleautomation im Kraftfeld von Kommunikation und Multimedia“, *at-Automatisierungstechnik*, Bd. 49, Nr. 7, S. 293–294, 2001.

[7] G. Färber and J. Hoogen, ed., *Workshop Proceedings: Advances in Interactive Multimodal Telepresence Systems, Technical University Munich, March 29–30, 2001*. Collaborative Research Center SFB 453, High-Fidelity Telepresence and Telection, 2001.

[8] G. Hirzinger, B. Brunner, J. Dietrich und J. Heindl, „Sensor-Based Space Robotics - ROTEX and its Telerobotic Features“, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Bd. 9, S. 649–663, oct 1993.

[9] N. Hogan, „Controlling impedance at the man/machine interface“, *Proc. of the IEEE Int. Conference on Robotics and Automation*, 1989.

[10] T. Imaida, Y. Yokokohji, T. Doi, M. Oda und T. Yoshikawa, „Ground-space bilateral teleoperation experiment using seven robot arm with direct kinesthetic coupling“, *Int. Conf. on Robotics and Automation*, 2001.

[11] G. Niemeyer und J. Slotine, „Stable adaptive teleoperation“, *IEEE J. of Oceanic Engineering*, Bd. 16, Nr. 16, S. 152–162, 1991.

[12] R. Oboe und P. Fiorini, „A design and control environment for internet-based telerobotics“, *Int. J. Robotics Research*, Bd. 17, Nr. 4, S. 433–449, 1998.

[13] L. Pontryagin, „On the zeros of some elementary transcendental functions“, *American Mathematical Society Translations*, Bd. 1, Nr. 2, S. 95–110, 1955.

[14] S. Salcudean, „Control for teleoperation and haptic interfaces“, in *Lecture Notes in Control and Information Sciences 230: Control Problems in Robotics and Automation* (B. Siciliano und K. Valavanis, eds.), S. 51–66, Springer, 1998.

[15] W. Thompson, A. Vacroux und C. Hoffman, „Application of pontryagin's time lag stability criterion to force-reflection servomechanisms“, *9-th Joint Automatic Control Conference, Arbor, Mich.*, S. 432–443, 1968.

[16] Y. Tsumaki, T. Goshozono, K. Abe, M. Uchiyama, R. Koepe und G. Hirzinger, „Experimental verification on an advanced space teleoperation system using internet“, *Journal of Robotics and Mechatronics*, Bd. 12, Nr. 4, 2000.

Manuskripteingang: 17. September 2001.



Dipl.-Ing. Naim Bajcinca ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Robotik und Mechatronik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR). Hauptarbeitsgebiete: Entwicklung von Methoden der robusten Regelungstechnik und deren Anwendung auf Steer-by-Wire Systeme.


Adresse: Institut für Robotik und Mechatronik, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, D-82205 Oberpfaffenhofen, E-Mail: naim.bajcinca@dlr.de



Dipl.-Ing. Ralf Koepe ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Robotik und Mechatronik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR). Hauptarbeitsgebiete: Intelligente Regelung und Steuerung in der Robotik und Mechatronik, insbesondere Kraftregelung, Haptik und Entwicklung von Systemen zur wirklichkeitsnahen multimodalen Telepräsenz und Teleaktion.


Adresse: Institut für Robotik und Mechatronik, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, D-82205 Oberpfaffenhofen, E-Mail: ralf.koepe@dlr.de

Die UML bei Oldenbourg!



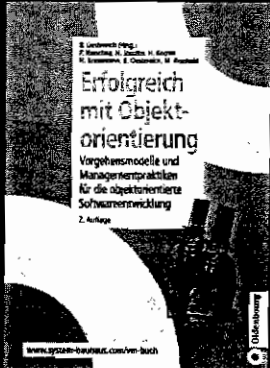
Die UML-Kurzreferenz für die Praxis
kurz, bündig, ballastfrei

Bernd Oestereich
Objektorientierte Softwareentwicklung
Analyse und Design mit der Unified Modeling Language
5., völlig überarbeitete Auflage 2001
€ 44,80
DM 87,52
ISBN 3-486-25573-8



Objektorientierte Softwareentwicklung
Analyse und Design mit der Unified Modeling Language
5., völlig überarbeitete Auflage 2001

1. Preis
Lehrstuhl
Objekt-Sprachen
und Sp-Strukturen




Erfolgreich mit Objektorientierung
Vorgehensmodelle und Managementpraktiken für die objektorientierte Softwareentwicklung
2. Auflage

Bernd Oestereich (Hrsg.)
Peter Hruschka
Nicolai Josuttis
Hartmut Kocher
Hartmut Krasemann
Bernd Oestereich
Markus Reinhold

Erfolgreich mit Objektorientierung
Vorgehensmodelle und Managementpraktiken für die objektorientierte Softwareentwicklung
2., aktualisierte und ergänzte Auflage 2001, 392 Seiten
€ 49,80
DM 97,40
ISBN 3-486-25565-7

Oldenbourg



at

Automatisierungstechnik

**Methoden und
Anwendungen
der Steuerungs-,
Regelungs- und
Informations-
technik**

G. Looye

Design of Robust Autopilot Control Laws with
Nonlinear Dynamic Inversion

R. Geblein, Ch. Stamm

Erstellung einer Workbench am Beispiel
Ordnungsreduktion

Ch. Preuße, H. Keller, K. J. Hunt

Fahrzeugführung durch ein Fahrermodell

T. Bünte

Die Anwendung des Parameterraumverfahrens
auf Ortskurvenkriterien

N. Bajcinca, R. Koepe

Entwurf von robusten Telemanipulationssystemen
mit Parameterraumverfahren

J. Grabowski, E. Rudolph, M. Schmitt

Die Spezifikationssprachen MSC und SDL
Teil 1: Message Sequence Chart (MSC)