Einleitung

In dieser Dissertation wird eine adaptive Sliding-Mode-Regelung (SMC) mit Netzen von Gaußschen radialen Basisfunktionen entwickelt. Eine Sliding-Mode-Regelung ist eine schaltende Regelung mit hoher Frequenz, deren Parameter entsprechend verschiedener Entwurfsverfahren [Utk77][Utk92] gewählt werden. Die Stellgröße schaltet an einer Schaltfläche im Zustandsraum um, welche zuvor vom Benutzer festgelegt wurde. Diese Schaltfläche wird Sliding-Surface genannt. Der Sliding-Mode Regler bewegt das System auf der Zustandstrajektorie zur Schaltfläche und hält dieses dort fest. Die Bewegung, die durch die Schaltfläche bestimmt wird, bezeichnet man als Sliding-Mode. Das Verhalten des Systems hängt vom Entwurf der Sliding-Surface ab, und ist unempfindlich gegenüber begrenzten Systemunsicherheiten.

Zur Regelung von unsicheren dynamischen Systemen wird zwischen zwei Vorgehensweisen unterschieden: der adaptiven Regelung und der robusten Regelung. Ein adaptiver Regler wird durch bestimmte Adaptionsmechanismen so aktualisiert, dass der Einfluß der Unsicherheit durch die Stellgröße ausgeglichen wird. In der sogenannten indirekt adaptiven Regelung wird zunächst die Dynamik der Regelstrecke identifiziert. Basierend auf dem aktualisierten Modell wird der Regler neu entworfen. Bei der direkt adaptiven Regelung wird der Regler direkt mittels bestimmter Entwurfsverfahren aktualisiert, ohne das Systemmodell zu verändern. Andererseits wird ein robuster Regler so entworfen, dass er die Grösse, welche den Einfluß der Unsicherheit beschreibt, möglichst niedrig hält.

Der Reglerentwurf hängt stark von den Eigenschaften der Unsicherheiten ab, welche die additiven, die multiplikativen und die Coprime-Faktor Unsicherheiten umfassen [ZDG96]. Viele Reglerstrukturen wurden für unsichere Systeme vorgeschlagen. Knohl [Kno00] hat beispielsweise die adaptive Regelung für Hammerstein-und Wiener-Systeme studiert, bei denen der Ausgleich der multiplikativen Unsicherheiten eine wichtige Rolle spielt.

Während die Regelung linearer Systeme weitestgehend erforscht ist, sind noch sehr viele Fragen im Bezug auf den Reglerentwurf nichtlinearer unsicherer Systeme offen. In der vorliegenden Arbeit werden Systeme der in (1) beschriebenen affinen Form intensiv studiert:

$$\dot{\boldsymbol{x}}(t) = \boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}, t) + \boldsymbol{B}(\boldsymbol{x}, t)\boldsymbol{u}(t) + \tilde{\boldsymbol{h}}(\boldsymbol{x}, t), \tag{1}$$

wobei $\tilde{\boldsymbol{h}}$ den unbekannten Teil der Systemdynamik bezeichnet. Ein anschauliches Beispiel dazu ist die Zustandsraumgleichung eines invertierten Pendels:

$$\ddot{x} = m \sin(x) + bu. \tag{2}$$

Wenn die Masse des Pendels aus einem konstanten Anteil m_0 und einem unbekannten Anteil Δm besteht, läßt sich (2) leicht durch (1) beschrieben, wobei $\boldsymbol{f} = \begin{bmatrix} x \\ m_0 \sin(x) \end{bmatrix}$ und $\tilde{\boldsymbol{h}} = \begin{bmatrix} 0 \\ \Delta m \sin(x) \end{bmatrix}$. Die robuste Regelung solcher Systeme wurde in Richtung SMC und Ljapunow-Entwurf entwickelt. Diese Reglerstrukturen basieren auf der sogenannten Matching-Condition, die besagt, dass sich alle Unsicherheiten im Eingang der Regelstrecke zusammenfassen lassen. In diesem Fall kann die Dynamik der Regelstrecke durch

$$\dot{\boldsymbol{x}}(t) = \boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}, t) + \boldsymbol{B}(\boldsymbol{x}, t)\boldsymbol{u}(t) + \boldsymbol{B}\boldsymbol{h}(\boldsymbol{x}, t). \tag{3}$$

beschrieben werden. Die Matching-Condition basiert aber auf einer starken Annahme über die Struktur der Systemdynamik, welche die Anwendung obengenannter Regelungsverfahren ziemlich beschränkt. Frühere Forschungsaktivitäten ermöglichen die Matching-Condition zu schwächen [Qu98][BL82][CL87], erfordern aber, dass die Unsicherheiten relativ gering bleiben. Der Durchbruch erfolgte mit dem rekursiven Backstepping-Algorithmus [KKM91][FK96b][KA01], bei dem mit einem systematischen Verfahren eine Regler-Ljapunow-Funktion gebildet wird, welche die Matching-Condition überflüssig macht. Heutzutage wird das Backstepping-Verfahren sehr oft für den Reglerentwurf von Eingrößensystemen verwendet. Die Erweiterung auf Mehrgrößensysteme ist allerdings noch offen.

Die Robustheit eines Systems mit Sliding-Mode ist auf die hochfrequente Stellgröße zurückzuführen. Da auf der Schalfläche die Schaltfunktion gerade Null ist, entspricht diese hochfrequente Stellgröße einer Regelung mit unendlicher Verstärkung, welche zu der klassischen robusten Regelung gehört. Daher ist die Sliding-Mode-Regelung ein etabliertes Verfahren zur robusten Regelung. Die Amplitude der schaltenden Stellgröße spielt eine wichtige Rolle, indem sie höher als die obere Schranke der Größe der Unsicherheiten gewählt wird. Wenn sie die Oberschranke nicht übersteigt, verliert der Regelkreis seine Robustheit. Die Regelgüte wird degradiert. Eventuell wird das System sogar instabil. Eine höhere Amplitude der schaltenden Stellgröße bewirkt die Erhaltung der Robustheit, bringt aber neue Probleme, z.B. einen hohen Energieverbrauch und die Stimulation der parasitischen Dynamik mit sich [YK82].

Das Problem kann gelöst werden, indem man eine adaptive Sliding-Mode-Regelung einführt [You78] [SC86] [KMZ02] [Yao96]. Es ist allerdings zu beachten, dass die klassischen Methoden der Parameterschätzung nur für Systeme gelingen, die in der Linear-in-Parameter-Form beschrieben sind. Darüber hinaus müssen die Nichtlinearitäten bekannt sein. Die adaptive Sliding-Mode-Regelung kann erweitert werden, indem neuronale Netze als Approximator [Hor89] für die Unsicherheiten eingeführt werden.

Der Erfolg des Back-Propagation-Algorithmus (BP-Algorithmus) für Multilayer-Feedforward-Netze war Motivation für zahlreiche Forschungsaktivitäten in den achtziger und den frühen neunziger Jahren, die in den berühmten Übersichtspublikationen von Narendra *et al* [NP90] und Hunt *et al* [HSZG92] zusammengefasst wurden. Unter den vielen Arten neuronaler Netze sind die Netze der Gaußschen radialen Basisfunktionen (GRBF-Netze) besonders interessant [SS92] [SK00] [Kno00]. Die Ausgänge der GRBF-Netze sind Linearkombinationen der Ausgangsgewichtungen und können so durch klassische Methoden der Parameterschätzung trainiert werden. GRBF-Netze besitzen daher neben der besseren Konvergenz auch ein schnelles Lernverhalten verglichen mit Multilayer-Feedforward-Netzen. Die Adaption der GRBF-Netze in dieser Arbeit basiert auf der direkten Methode von Ljapunow.

Die früheren Anwendungen der neuronalen Netze zur adaptiven Regelung führten zur indirekt adaptiven Regelung, bis Sanner und Slotine [SS92] die direkte adaptive Regelung mit GRBF-Netzen vorschlugen. In ihrer Arbeit wurden

GRBF-Netze als ein Stammteil des Reglers eingeführt, der als Linearisierung durch Rückführung die unbekannte nichtlineare Dynamik kompensiert.

Zum Training eines GRBF-Netzes ist die Adaption der Zentren und Ausdehnungen der Gaußschen Basisfunktionen bzw. die Gewichtungen der Ausgangsschicht nötig. Zwei Arten von Algorithmen sind dazu verwendbar [JU96]:

- Training mit festen Strukturen: Hierbei ist die Anzahl der Neuronen festgelegt. Die Parameter werden dann optimiert. Zu dieser Klasse gehören das Gradienten-Verfahren, das Verfahren mit einem regelmäßigen Gitter und das "Clustering"-Verfahren.

- Training mit adaptiven Strukturen: Da die Komplexität der zu approximierenden nichtlinearen Funktion unbekannt ist, werden Anzahl und Parameter der Netze während des Trainings festgestellt. Relevante Methoden sind das Verfahren mit adaptiven Gittern, das "Regression"-Verfahren und das Hybrid-Verfahren.

In [SS92] wird die regelmäßige Verteilung der Basisfunktionen im Eingangsraum vorgeschlagen. Es wurde bewiesen [SS92][LJY99], dass sich der Approximationsfehler eines GRBF-Netzes quantitativ berechnen lässt, wenn seine Basisfunktionen auf einem regelmäßigen Gitter verteilt sind. Der Approximationsfehler kann außerdem beliebig reduziert werden, wenn das Netz genügend Neuronen besitzt. Bei diesem Verfahren sind lediglich die Gewichtungen der Ausgangsschicht zu adaptieren. Die Dichte des Gitters entscheidet über den resultierenden Approximationsfehler. Je dichter das Gitter angeordnet ist, desto kleiner ist der Approximationsfehler den das Netz liefert. Dadurch wird allerdings der Rechenaufwand wesentlich erhöht.

Zwei Aspekte wurden zur Verbesserung vorgeschlagen. Die erste Idee besagt, dass Neuronen, die sich relativ weit entfernt von der Systemtrajektorie befinden, geringe Beiträge zur Approximation liefern, und daher aus dem Netz entfernt werden dürfen. In [FK96a] wurde ein "Hypercube" um die Zustände definiert. Die sich in diesem Hypercube befindenden Neuronen werden dann aktiviert und zum GRBF-Netz hinzugefügt. Die zweite Idee betrifft die Adaption der Dichte des Gitters. In [LKB99a][LKB99b] sind mehrere "Sub-Gitter" verschiedener Dichten für das Netz vorgesehen. Das Netz fängt mit dem lockersten Gitter an zu wachsen. Neue, dichtere Gitter werden nacheinander zum Netz hinzugeführt, um den Approximationsfehler zu reduzieren.

Die Arbeit der vorliegenden Dissertation wird durch die vorangegangene Diskussion motiviert. Die Beiträge zum Thema werden in folgenden Punkten zusammengefasst:

- Im Sinne der Ljapunow-Stabilitätanalyse sind GRBF-Netze in die Sliding-Mode-Regelung integriert. Zur Erfüllung der Matching-Condition der Regelstrecke wird eine Kaskadenregelungsstruktur vorgeschlagen. Ein GRBF-Netz wird parallel mit einem klassischen SMC geschaltet, um die unbekannte Dynamik zu approximieren. Die Aufgabe des Sliding-Mode-Reglers wird erleichtert, da er sich nicht mehr direkt um die unbekannte Dynamik kümmern müssen. Stattdessen dient der Sliding-Mode-Regler ausschließlich dazu, den Approximationsfehler des Netzes zu kompensieren. Die starke, konservative Stellgröße beim klassischen SMC wird deshalb in dieser Regelungsstruktur vermieden. Die Realisierung dieser Idee liefert im Kapitel 3 eine neue Direct Adaptive Sliding-Mode Control (DASMC), welche für die Regelung nichtlinearer Mehrgrößensysteme geeignet ist.

- Während die DASMC unter der Beschränkung durch die Matching-Condition leidet, bietet die Kombination des SMC mit dem Backstepping-Verfahren neue Möglichkeiten. Im Kapitel 4 wird diese Idee für Systeme in der NPPF-Form mit dem ABSMC-Verfahren (Adaptive Backstepping Sliding-Mode Control) realisiert. Eine Sliding-Surface wird im letzten Schritt des Backsteppings eingeführt, welche die Eigenschaften der "virtuellen Fehler" in jedem Schritt enthält. Mehrere GRBF-Netze werden eingesetzt, um die Nichtlinearitäten in jedem Subsystem zu approximieren. Verglichen mit dem DASMC-Verfahren ist die Problematik der Approximation hierbei in mehrere Subprobleme von niedriger Dimension unterteilt. Dieses Verfahren vermeidet die redundante Repräsentation von Fehlern wie in der Literatur erkannt, und liefert einen einfacheren Reglerentwurf.

- Zum Training der GRBF-Netze wird eine neue Strategie für das Wachstum der

Netze vorgeschlagen. Diese ist auf der Erkenntnis begründet, dass der Einsatz von sehr vielen Neuronen weder das Übergangsverhalten verbessert, noch die bleibenden Regelabweichungen reduziert. Im Kapitel 3 wird eine Oberschranke der angemessenen Regelabweichung gebildet. Neue Neuronen werden nur ins Netz eingesetzt, wenn der Fehler die entsprechende Oberschranke übersteigt. Ein schnelles Wachstum des Netzes wird dadurch vermieden.

- Die vorgeschlagenen Reglerstrukturen bzw. die Wachstum-Strategie der GRBF-Netze wurden anhand mehrerer simulierter und experimenteller Beispiele getestet. Als Anwendungsfeld wurden Robotersysteme vorgesehen, die Methoden sind aber auch anderweitig verwendbar. Roboter spielen heutzutage eine immer wichtigere Rolle in der Automobil- und Elektronikindustrie, in der Logistik und in der Raumfahrt. Schnelle, präzise Bewegung ist eine der wichtigsten Anforderungen an Robotersysteme. Roboterarme besitzen eine hohe nichtlineare Dynamik und starke Kopplungen zwischen den Systemzuständen. Deshalb ist die Regelung von Robotersystemen eine herausfordernde regelungstechnische Aufgabe. In den Kapiteln 5 und 6 wird die Folgeregelung für sowohl einen mehrgliedrigen Roboterarm als auch einen Roboterarm mit einem elastischen Gelenk implementiert. Zum Vergleich werden auch die klassische Sliding-Mode-Regelung bzw. die LQ-Regelung in die Experimente miteinbezogen. Während die modell-basierten Reglerstrukturen bei unbekannter Systemdynamik Schwächen zeigen, liefert das vorgeschlagene DASMC- und ABSMC-Verfahren sehr gute Leistungen trotz der starken Nichtlinearitäten und der manchmal sogar zeitvarianten unbekannten Systemdynamik.

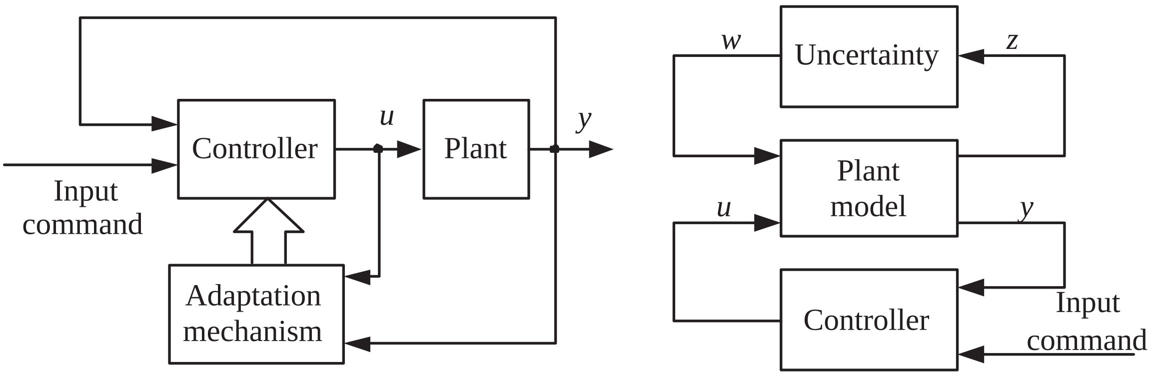
Chapter 1

Introduction

This dissertation is concerned with the sliding-mode control (SMC) problem of nonlinear uncertain dynamic systems. The term "uncertain" denotes the differences between the behavior of the real physical plant and its model. Sliding-mode control is a high-speed switching feedback control, whose feedback parameters are chosen according to various design procedures [Utk77], [Utk92]. The switching activity of the control is performed upon some user-chosen hyperplane in the state space. The hyperplane is called sliding surface, or sliding manifold. Sliding-mode control drives the state trajectory to the sliding surface and maintains it on the surface afterwards. The motion of the state trajectory constrained on the sliding surface is then termed sliding mode. This also delivers the most significant property of a system with sliding mode, namely that the behavior of the system depends on the design of the sliding surface and is insensitive to bounded system uncertainties.

In this chapter, the control problem of uncertain dynamic systems is shortly revisited. This leads to a brief discussion about the sliding-mode control methodology. The discussion concludes with the major motivation of this dissertation: 1. the need for introducing adaptive mechanisms in SMC; 2. the need for extending SMC to a wider class of systems. Based on the discussion about these open questions, the major aims, contributions and the arrangement of the dissertation are presented at the end of this chapter.

Control of uncertain dynamic systems includes two branches, namely adaptive control and robust control as shown in Figure 1.1. With an adaptive control



(a) Adaptive control (b) Robust control

Figure 1.1: Adaptive and robust control for uncertain dynamic systems

scheme, the controller is updated by a certain adaptation mechanism according to the behavior of the closed-loop system, such that the influence of the uncertainties can be compensated by the control u. In so-called indirect adaptive control schemes, the adaptation mechanism seeks to update the system model using some identification methods, which can describe the behavior of the system more precisely. Based on the updated model, the control is redesigned. With the direct adaptive control schemes, the controller parameters are directly updated by means of certain design procedures, without rebuilding the system model. On the other hand, with the robust control, some mapping between the signals z and w related to the uncertainty is explicitly established. The control u has the task of keeping the norm of this mapping as low as possible, such that the influence of the uncertainty on the output y is attenuated.

The control design strongly depends on the characteristics of uncertainties, these include additive uncertainties, multiplicative uncertainties, coprime factor uncertainties, etc [ZDG96]. Different control strategies have been studied for systems with various uncertainties. For example, Knohl [Kno00] investigated the adaptive control problem of systems described by the Hammerstein model and Wiener model, where the compensation of multiplicative uncertainties plays an important role.

While the control of systems represented with linear models and model uncertainties is already quite well understood, the control of nonlinear systems remains an up-to-date topic. In this respect, additive uncertainties have gained a lot of attention. Systems accompanied by additive uncertainties can be described with the following affine form

$$\dot{\boldsymbol{x}}(t) = \boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}, t) + \boldsymbol{B}(\boldsymbol{x}, t)\boldsymbol{u}(t) + \tilde{\boldsymbol{h}}(\boldsymbol{x}, t), \tag{1.1}$$

where $\tilde{\boldsymbol{h}}$ denotes the unknown system dynamics, which are not included in $\boldsymbol{f}$ and $\boldsymbol{B}$. A simple example of this class of systems is the model of an inverted pendulum, whose dynamics can be presented as

$$\ddot{x} = m \sin(x) + bu. \tag{1.2}$$

Considering that the mass of the pendulum is composed of a constant part m_0 and an unknown time-varying part Δm, (1.2) can be easily rewritten in the form of (1.1) with $x = x_1$, $\dot{x} = x_2$, $\boldsymbol{f} = \begin{bmatrix} x \\ m_0 \sin(x) \end{bmatrix}$ and $\tilde{\boldsymbol{h}} = \begin{bmatrix} 0 \\ \Delta m \sin(x) \end{bmatrix}$. Robust control of such systems looks back upon the sliding-mode control (SMC) proposed in the 1960's, the Liapunov design in the 1970's and the backstepping algorithm in the 1990's. All of these are based on the assumption that the norm of the model uncertainty is constrained with some known bounds. With SMC and Liapunov design, the control synthesis is based on finding a Liapunov function for the model of the nominal plant, and then including some knowledge about the uncertainties, i.e. an upper bound of the norm of the uncertainties. The feasibility of these methods is assured under a so-called matching condition, indicating that the uncertainties presented by $\tilde{\boldsymbol{h}}$ can be lumped into the input channel of the system, namely (1.1) can be rewritten as

$$\dot{\boldsymbol{x}}(t) = \boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}, t) + \boldsymbol{B}(\boldsymbol{x}, t)\boldsymbol{u}(t) + \boldsymbol{B}(\boldsymbol{x}, t)\boldsymbol{h}(\boldsymbol{x}, t). \tag{1.3}$$

This delivers a strong assumption about the structure of the system dynamics and seriously clams the application of SMC and Liapunov design. A detailed discussion about the matching condition in linear as well as nonlinear dynamic systems is presented in Appendix A. A lot of research activities have been performed to relax the matching condition [Qu98][BL82][CL87], where the mismatched uncertainties are required to be sufficiently small. The breakthrough arose however in the adaptive nonlinear control [KKM91][FK96b][KA01], where a recursive approach called