

**Robustheitseigenschaften von Reglern  
mit variabler Struktur**

**ABHANDLUNG**

zur Erlangung des Titels eines

**DOKTORS DER TECHNISCHEN WISSENSCHAFTEN**

der

**EIDGENOESSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE ZUERICH**

vorgelegt von

**Lino Guzzella**  
dipl. Masch. Ing. ETH  
geboren am 13. Oktober 1957  
von Italien

Angenommen auf Antrag von  
Prof. Dr. H. P. Geering, Referent  
Prof. Dr. M. Morf, Korreferent

## Kurzfassung :

In dieser Arbeit wird die Klasse der strukturvariablen Regler untersucht, welche mit Gleitzuständen operieren. Diese Regler besitzen die Eigenschaft, gegenüber gewissen Parameterstörungen absolut robust zu sein.

Als erstes wird die Klasse der "idealen" Systeme definiert, welche alle notwendigen Bedingungen erfüllen. Anschliessend wird eine kanonische Formulierung des Systems gegeben, wobei besonderes Gewicht auf die Herleitung der dazu benötigten Koordinaten-Transformationen gelegt wird. Die Aequivalenz zwischen den bekannten Rangbedingungen für die zulässigen Parameterstörungen und der Formulierung mit kanonischen Koordinaten wird gezeigt.

Sowohl für das "Regulator-" wie auch für das "Folgeregelungsproblem" wird die Synthese und Analyse von geeigneten strukturvariablen Reglern gezeigt. Die vorgeschlagenen Regler besitzen eine neue symmetrische Form, welche den eigentlichen Grundmechanismus der strukturvariablen Regler besonders deutlich aufzeigt. Die Synthese wird durch die Wahl orthogonaler Gleitebenen wesentlich erleichtert, weil das gleitende System in diesem Falle in lauter "Single-Input"-Subsysteme aufgespalten wird. Die Vorgehensweise wird bei beiden Problemen durch Beispiele illustriert.

Im nächsten Kapitel werden Systeme untersucht, welche auf irgendeine Art von der "idealen" Form abweichen. Darunter fallen Systeme, deren Störungen die erwähnten Rangbedingungen nicht erfüllen, deren Zustand nicht vollständig messbar oder deren Eingangs- und Ausgangsgrössen verrauscht sind. Für gewisse Abweichungen von der Idealform wird gezeigt, dass sie ohne Einfluss auf das Systemverhalten bleiben. Für andere Nichtidealitäten wird gezeigt, dass sie das System beeinflussen. Diese Einflüsse können mehr oder weniger gravierend sein.

Die bei linearen Systemen gefundenen Resultate lassen sich auf eine gewisse Klasse von nichtlinearen Systemen übertragen. Es wird gezeigt, dass z.B. alle Roboter dieser Klasse angehören. Anhand eines Beispiels ("zylindrischer" Montageroboter) wird das Vorgehen bei einem nichtlinearen System demonstriert.

Anschliessend wird das "erweiterte Gleiten" eingeführt. Hierbei handelt es sich um eine Bewegung, welche nicht mehr nur auf der Gleitebene, sondern in einer kegelförmigen Nachbarschaft derselben stattfindet. Es wird ein Verfahren vorgeschlagen, mit welchem das Kegelgebiet berechnet werden kann. Anschliessend wird gezeigt, dass bei nichtidealen Systemen oft eine erweiterte Gleitbewegung stattfindet, insbesondere dann, wenn die Abweichungen von der idealen Form klein sind.

Das vorletzte Kapitel befasst sich mit den Problemen, welche bei der Anwendung der vorgeschlagenen Regelalgorithmen auftauchen. An einem Gleichstromantrieb wird sowohl das Regulator, wie auch das Folgeregelungsproblem studiert. Die Robustheit des Regelsystems wird untersucht und mit derjenigen von rein linearen Zustandsreglern verglichen. Dabei werden die theoretischen Vorhersagen gut bestätigt und die Anwendbarkeit der strukturvariablen Regler demonstriert.

Im letzten Kapitel wird eine Bewertung der strukturvariablen Regler vorgenommen. Grundsätzlich kann man sagen, dass mit strukturvariablen Reglern in gewissen Fällen, nämlich dann wenn die idealen Voraussetzungen erfüllt sind, absolut robuste Regelsysteme resultieren. Es wäre aber ein Trugschluss in diesen Reglern das Mittel gegen Parameterfehler zu sehen. Ihre sinnvolle Anwendung bleibt auf gewisse, in der Praxis allerdings recht häufig anzutreffende Fälle beschränkt.

## Summary

This work analyses the class of variable structure regulators which operate with sliding planes. These regulators are known to be absolutely robust against some parameter disturbances.

First the class of "ideal systems" is introduced the elements of which are those systems which fulfill all necessary conditions. For these systems a canonical formulation is given. The equivalence between the known rank conditions for the parameter disturbances and the formulation with canonical coordinates is shown.

The synthesis and analysis procedure is shown for both the regulator and the tracking problem. The new proposed regulators have a symmetric form which clearly reflects the basic mechanism of all sliding systems. The synthesis is notably simplified by choosing orthogonal sliding planes, i.e., the resulting sliding closed loop system is separated into single-input subsystems. Examples are given for both problems.

The next chapter analyses those systems which do not belong to the class of the ideal systems. The following nonidealities are analyzed :

- disturbances which do not fulfill the mentioned rank conditions
- state not completely measurable
- noisy inputs and outputs.

Some of these nonidealities do not destroy the absolute robustness but most of them will affect more or less the system behavior.

The results of linear ideal systems can be carried over to a certain class of nonlinear systems. It is shown that all robots fulfill the requirements of this class. For an assembly robot the complete analysis and synthesis procedure is shown.

The next chapter expands the ideal sliding motion to a "generalized sliding" motion. The state isn't fixed anymore on the sliding plane but is allowed to remain in a certain neighborhood of this plane. An explicit procedure for calculating this domain is proposed. These ideas are used to show that some nonidealities will not completely destroy the robustness of the closed-loop systems.

The proposed algorithms are applied to a DC-drive. Both the regulator and the tracking problem are studied. The controllers are implemented using digital computers. The robustness of the proposed controllers is compared with the robustness of linear state feedback controllers. The superiority and feasibility of the variable structure regulators is clearly demonstrated.

The last chapter gives a final evaluation of the variable structure regulators. The main result is that these regulators can produce very robust closed-loop systems but it is certainly not true that they can be used to master all parameter uncertainties.