

Diss. ETH No. 8170

**Analysis of the Planar Intercept and Tracking Problem
by Application of
Optimal Control and Singular Perturbation Theory**

Doctoral dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH

for the degree of
Doctor of Technical Sciences

presented by
STEPHAN ALBERT RICHARD HEPNER

Dipl. Masch. Ing. ETH
born December 26, 1955
citizen of Germany

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. H. P. Geering, examiner
Prof. Dr. R. Longchamp, co-examiner

1986

Summary

In this thesis the planar intercept and tracking problem involving a short range missile and a highly maneuverable target are analyzed. Optimal control theory and singular perturbation (SP) theory are applied for the derivation of several guidance laws and a tracking filter.

First the structure of guidance laws based on optimal control theory is discussed. As a consequence of the optimal control approach most of these guidance laws require some information about the future target maneuver which is a severe obstacle to their implementation. It turns out that an extended form of proportional navigation (PE) performs better than guidance schemes based on the prediction of the future target maneuver in most short range scenarios.

Implementation of PE requires a tracking filter that produces estimates of the current target maneuver. The tracking filter developed here is based on bearing-rate-only measurements. Scenarios that may yield unstable filter behaviour due to the lack of observability of certain filter states are analyzed. The implications of estimation errors on the performance of PE and guidance schemes that predict the target maneuver are discussed.

Basically, the tracking filter is an extended Kalman filter. Since the target dynamics are unknown the filter has to be adapted in the presence of time-varying target maneuvers. Motivated by the SP-analysis of the intercept problem a time scale separation of the tracking problem is proposed. As a result a low dimensional fast filter operating with a high sampling rate and a higher dimensional slow filter with a low sampling rate are obtained. The fast filter allows tracking fast changes of the target maneuver and may be viewed as a predictor for the target maneuver in the slow time scale. Adaption is carried out by covariance matching with respect to the measurement residuals in the fast time scale.

All of the results are illustrated by a large number of simulations.

Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit werden das ebene Interzeptionsproblem und das zugehörige Trackingproblem für eine Luft-Luft-Lenkwanne und ein manövrierendes Ziel unter Anwendung von Optimal Control Theorie und Singulärer Störungsrechnung untersucht.

Der erste Teil dieser Arbeit befasst sich mit der Herleitung von Lenkgesetzen durch verschiedene Formulierungen des Interzeptionsproblems als Optimal Control Problem. Zwei Vorgehensweisen zur Bestimmung von Näherungslösungen des resultierenden Zweipunkttrandwertproblems werden diskutiert. Als unmittelbare Folge der Behandlung des Interzeptionsproblems im Rahmen der Optimal Control Theorie verlangen die meisten Lösungen die Kenntnis des zukünftigen Zielmanövers. Die Prädiktion des Zielverhaltens ist deshalb Bestandteil vieler "optimaler" Lenkgesetze. Eine Ausnahme bildet eine erweiterte Form der Proportionalnavigation (PE). PE verwendet nur Information über das *momentane* Zielmanöver. Eine implementierbare Version von PE erhält man, wenn es gelingt, diese Information mit einem Tracking-Filter zu schätzen. Da PE der klassischen Proportionalnavigation bei manövrierenden Zielen erheblich überlegen ist, kommt der Entwicklung dieses Filters besondere Bedeutung zu.

Das Filterungsproblem ist Inhalt des zweiten Teiles dieser Arbeit. Bei der Entwicklung des Tracking-Filters ergeben sich zwei grundlegende Schwierigkeiten:

- a) Da als einzige Messung über die Relativbewegung von Lenkwanne und Ziel die Peilwinkelgeschwindigkeit zur Verfügung steht, sind einige Filterzustände in gewissen Interzeptionsszenarios nicht beobachtbar. Daraus ergeben sich Stabilitätsprobleme.
- b) Weil die Zieldynamik unbekannt ist, entstehen Modellfehler, die das Filter ebenfalls destabilisieren können.

In einer Beobachtbarkeitsanalyse werden diejenigen Interzeptionsszenarios isoliert, in denen mit Filterinstabilität zu rechnen ist. Es zeigt sich, dass PE auf gewisse Schätzfehler indifferent reagiert, da dieses Lenkgesetz nur den beobachtbaren Teil des Zielmanövers zurückführt. Dagegen reagieren Lenkgesetze, die eine Prädiktion des Zielverhaltens durchführen äusserst empfindlich auf Schätzfehler, wie anhand von Simulationen verdeutlicht wird.

Das Tracking-Filter basiert auf einem erweiterten Kalman Filter. Wegen der unbekannt Zieldynamik muss das Filter bei zeitvariablen Zielmanövern adaptiert werden. Bei der Entwicklung des Filteralgorithmus ergibt sich ein Konflikt zwischen dem Bedürfnis nach hoher Abtastrate, um eine schnelle Adaption bei raschen Änderungen des Zielmanövers zu erreichen und der Begrenzung der Abtastrate durch die Rechenzeit zur Auswertung der Filtergleichungen. Es wird deshalb eine Skalierung des Trackingproblems vorgenommen, welche die Einführung eines schnellen und eines langsamen Zeitmassstabes erlaubt. Im schnellen Zeitmassstab kann ein niedrigdimensionales und daher schnelles Filter ausgelegt werden, während im langsamen Zeitmassstab ein höherdimensionales Filter mit geringer Abtastrate läuft. Das schnelle Filter kann als Prädiktor für das Targetmanöver im langsamen Zeitmassstab aufgefasst werden. Die Adaption geschieht über ein Kovarianz-Matching bezüglich der Messresiduen des schnellen Filters. Auf diese Weise können die gegensätzlichen Forderungen nach hoher Schätzgenauigkeit (hochdimensionales Filter) und hoher Abtastrate erfüllt werden.

Die Leistungsfähigkeit des Filters wird an verschiedenen Interzeptionsgeometrien für periodische und sprunghafte Zielbeschleunigungsprofile überprüft.