

KRT Praktikum: Protokoll 3 - L3 und H3

Kimon Beyer, Yves Gaßmann, Justin Buhl

Abstract: Im folgenden Protokoll werden die Ergebnisse des dritten Labortages sowie der dritten Hausaufgabe im Rahmen des Praktikums Konzepte der Regelungstechnik des IST behandelt. Dabei behandelt das Protokoll die Ausarbeitung und Validierung eines Reglerentwurfs für das aus Protokoll 2 extrahierte Helikoptermodell sowie seine simulative als auch erste praktische Validierung.

1. DRITTER LABORTAG (L3)

Für den folgenden Reglerentwurf wird das aus Protokoll 2 gewonnene lineare Helikoptermodell genutzt. Wichtig ist hierbei zu beachten, dass der Reglerentwurf auf dem linearen Modell basiert und somit bei der Implementierung auf das nichtlineare Modell noch der Arbeitspunkt bzw. Linearisierungspunkt entsprechend verrechnet werden muss. Die Zustände sind zur Erinnerung wie folgt definiert:

$$x = [\alpha \ \beta \ \gamma \ \dot{\alpha} \ \dot{\beta} \ \dot{\gamma}]^T \quad (1)$$

$$u = [U_{\text{vorne}} \ U_{\text{hinten}}]^T \quad (2)$$

$$y = [\alpha \ \beta \ \gamma]^T \quad (3)$$

Für den geschlossenen Regelkreis ergibt sich dann mit Regler unter Berücksichtigung des Arbeitspunktes:

$$\Delta u = -K \Delta x, \quad \Delta x = x - x_0, \quad \Delta u = u - u_0 \quad (4)$$

wobei x_0 und u_0 die Arbeitspunkte sind. Die resultierenden geschlossenen Regelkreise werden in den folgenden Abschnitte noch dargestellt.

Zur Implementierung und Erprobung unseres Regelungsentwurf wurde nun das CAD Modell, das bereits zur Modellierung verwendet wurde ist, in Matlab Simulink exportiert. Dies hat den Vorteil, dass das Modell möglichst nah an den realen Versuchsstand angenähert wird, wodurch eine realistischere Simulation des Systemverhaltens ermöglicht wird. Des Weiteren ist es möglich, innerhalb des gleichen Simulink Modells zwischen dem Modell und der realen Anlage umzuschalten, wodurch eine schnelle Validierung des Reglerentwurfs an der realen Anlage ermöglicht wird.

1.1 Reglerentwurf

Im Wesentlichen bestehen zwei mögliche Reglerentwurfverfahren. Regler im Frequenzbereich und Regler im Zustandsraum. Da es sich um ein MIMO-System handelt, ist ein Reglerentwurf mittels Loopshaping im Frequenzbereich aufwändig und mit schwierigen Stabilitäts-/Gütenachweisen verbunden. Da das System außerdem schon im Zustandsraum entwickelt worden ist, gestaltet sich ein Reglerentwurf im Zustandsraum als bessere alternative. Hier besteht vor allem die Möglichkeit des LQR Reglerentwurfs. Durch Matlab Funktionen und Lösen der

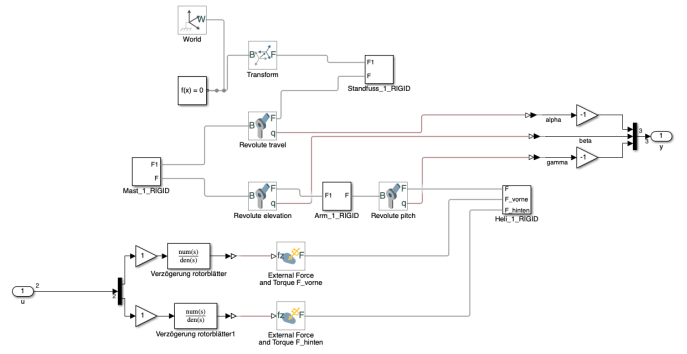


Fig. 1. Nichtlineares CAD Modell zur Simulation in Simulink.

Ricatti-Gleichungen, wird die optimale stabilisierende Zustandsrückführung berechnet. Zu beachten ist jedoch, dass durch die Nutzung eines Beobachters, die garantierten Robustheitseigenschaften des LQR nicht mehr gegeben sind.

Da für die Regelung ebenfalls die Winkelgeschwindigkeiten $\dot{\alpha}$, $\dot{\beta}$ und $\dot{\gamma}$ benötigt werden, der Winkel-Encoder jedoch nur die Winkel α , β und γ misst, müssen die Geschwindigkeiten geschätzt werden. Dies realisieren wir durch einen Luenberger-Beobachter:

$$\Delta \dot{\hat{x}} = A \Delta \hat{x} + B \Delta \hat{u} + L(\Delta y - \Delta \hat{y}), \quad (5)$$

mit

$$\Delta \hat{y} = C \Delta \hat{x}, \quad (6)$$

und der Schätzfehler $\hat{e} = \Delta x - \Delta \hat{x}$ erfüllt

$$\dot{\hat{e}} = (A - LC) \hat{e}. \quad (7)$$

Zur Stabilität und schnellen Konvergenz wählt man die Beobachterpole (Eigenwerte von $A - LC$) deutlich schneller als die Reglerpole (z. B. Faktor 5–10). Die Gewinnmatrix L werden in MATLAB durch Polplacement bestimmt.

Anforderungen an den geschlossenen Kreis bzw. Regler
Gesucht wird selbstverständlich ein stabilisierender Regler, der die gegebenen Modellunsicherheiten möglichst gut kompensiert. Die Performance muss dabei ausreichen gut sein, um die vorgegebene Zeit einzuhalten. Dennoch überwiegt die Anforderung an die Robustheit des Reglers. Denn durch die relativ stark vereinfachte Modellbildung und den gegebenen Beschränkungen für den finalen Flug, müssen unter den gegebenen Unsicherheiten die Beschränkungen in jedem Falle eingehalten werden. Damit die gegebenen Beschränkungen auch eingehalten werden,

* Institute for Systems Theory and Automatic Control, University of Stuttgart, Germany. <http://www.ist.uni-stuttgart.de>

ist neben der robusten Stabilität auch keine bleibende Regelabweichung als wichtigstes Entwurfsziel anzusehen. Denn eine bleibende Regelabweichung könnte schnell zum Verletzten der B-Beschränkungen, z.B. in der Einhaltung der Mindesthöhe führen. Die Stabilität ist im Zustandsraum einfach nachzuweisen, durch Berechnung der Systempole des geschlossenen Regelkreises. Eine bleibende Regelabweichung kann ebenfalls durch hinzufügen eines bzw. mehreren Integratorzuständen erreicht werden. Aussagen über Performance oder Robustheit gestalten sich jedoch schwierig. Analytische Nachweise über Robustheit oder Performance gestalten sich als sehr aufwändig, durch z.B. Entwicklung einer M-Delta Struktur und Überprüfung der Systemnorm gegenüber bestimmten unstrukturierten Delta-Unsicherheiten. Dies ist jedoch sehr aufwändig und zunächst Fehleranfällig, wodurch nur die simulative Validierung, sowie die Validierung am realen Teststand als realisierbare Möglichkeiten übrig bleiben.

LQR Entwurf Im Verlauf des Protokoll wurde bereits vorweg genommen, dass sich für ein LQR-Reglerentwurf entschieden worden ist. Der Vorteil besteht in der vergleichsweise einfachen Implementierung sowie den guten Regelungseigenschaften. Die garantierten Robustheitseigenschaften sind wie bereits erwähnt durch die Nutzung eines Beobachters nicht mehr gegeben.

Für den Entwurf eines LQR-Reglers müssen lediglich die Gewichtungsmatrizen Q und R festgelegt werden. Diese Matrizen bestimmen das Verhalten des Reglers und müssen sorgfältig ausgewählt werden, um die gewünschten Regelungsziele zu erreichen. Diese Matrizen müssen simulativ bzw. experimentell abgestimmt werden. Bei Erprobungsversuchen am realen Teststand hat sich jedoch eine bemerkbare Regelabweichung abgezeichnet. Dadurch ist schnell ersichtlich geworden, dass eine Erweiterung zu einem LQI-Regler notwendig ist, um die erforderlichen Regelungsziele zu erreichen. Daher wird im folgenden der LQI-Regler betrachtet, da dieser lediglich eine Erweiterung des LQR-Reglers darstellt.

LQI Entwurf Wie bereits erwähnt, stellt der LQI-Regler eine Erweiterung des LQR-Reglers dar. Die Erweiterung geschieht hierbei durch hinzunahme von so genannten Integratorzuständen für diejenigen Größen, für die die bleibende Regelabweichung eliminiert werden soll. Zu beachten ist jedoch, dass durch die Nutzung von Integratoren auf jeden Fall darauf geachtet wird, ein aufschwingen des Integrators zu beachten und gegebenenfalls einen Anti-Windup mit zu implementieren. Dadurch ergibt sich ein erweiterter Zustandsraum, der wie folgt aussieht:

$$x = [\alpha \ \beta \ \gamma \ \dot{\alpha} \ \dot{\beta} \ \dot{\gamma} \ \xi_1 \ \xi_2]^T \quad (8)$$

wobei ξ_1 und ξ_2 die Integratorzustände für die Winkel α und β darstellen und folgendermaßen im Zustandsraum gebildet werden:

$$\xi_1 = \xi_{1,\text{ref}} - \int (\alpha_{\text{ref}} - \alpha) dt \quad (9)$$

$$\xi_2 = \xi_{2,\text{ref}} - \int (\beta_{\text{ref}} - \beta) dt \quad (10)$$

wobei $\xi_{1,\text{ref}} = 0$ und $\xi_{2,\text{ref}} = 0$.

Für die Wahl der Gewichtungsmatrizen Q und R hat sich zunächst folgende Wahl, durch experimentelle Abstimmung am realen Versuchsstand ergeben:

$$Q = \text{diag}(50, 5, 0,001, 0,001, 0,001, 0,001, 10, 10) \quad (11)$$

$$R = \text{diag}(10, 10) \quad (12)$$

Mit der Wahl dieser Gewichtungsmatrizen ergeben sich folgende Regler und Beobachtungspole:

$$\text{Reglerpole} = \begin{bmatrix} -0.4472 + 0.0000i \\ -0.5246 + 0.8358i \\ -0.5246 - 0.8358i \\ -0.5625 + 1.3857i \\ -0.5625 - 1.3857i \\ -0.8454 + 0.0000i \\ -1.3553 + 0.5754i \\ -1.3553 - 0.5754i \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\text{Beobachterpole} = \begin{bmatrix} -60 + 0.0000i \\ -61 + 0.0000i \\ -62 + 0.0000i \\ -63 + 0.0000i \\ -64 + 0.0000i \\ -65 + 0.0000i \end{bmatrix} \quad (14)$$

Die Wahl der Pole kann sich jedoch noch Ändern, es ist bekannt, dass zu schnelle Beobachterpole ebenfalls zu Problemen führen kann.

Reglerimplementierung Im folgenden wird nun die Implementierung des LQI-Reglers im Simulink Modell beschrieben. In Abbildung 2 ist das Gesamtsystem dargestellt. In 3 ist der Reglerblock dargestellt. Hier ist ebenfalls die Implementierung des Anti-Windups zu sehen. In 4 ist der Beobachterblock dargestellt.

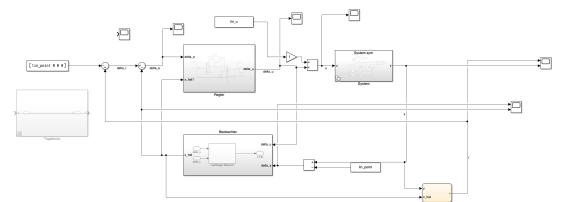


Fig. 2. Übersicht: Simulink-Implementierung des Gesamtsystems.

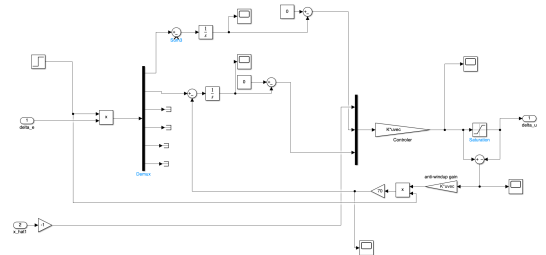


Fig. 3. Übersicht: Simulink-Implementierung des Reglers.

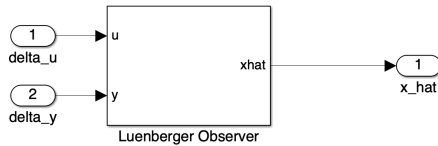


Fig. 4. Übersicht: Simulink-Implementierung des Beobachters.

1.2 Simulationsergebnisse

TODO: Simulativ wurde erstmal LQR validiert. TODO: Ergebnisse zeigen. da dies funktioniert, sind wir direkt zur realen Plant über gegangen, dort mussten wir aber die Gains für R anpassen.

1.3 Praktische Validierung

Aufgrund unseres schnellen Vorankommens war es uns möglich den Reglerentwurf direkt an der realen Anlage zu validieren. Nachdem wie bereits beschrieben der LQR-Ansatz simulativ validiert wurde, wurde der LQR auch an der realen Anlage implementiert und validiert. Im Anschluss folgte die Erweiterung auf den LQI-Regler, welcher ebenfalls direkt an der realen Anlage implementiert und validiert worden ist. Der LQI-Regler zeichnete sich direkt durch die Eliminierung der bleibenden Regelabweichung aus. Auch erste Referenzpunktwechsel wurden durchgeführt, was der Regler ausgesprochen gut handhabte. Die Referenzpunktwechsel wurden durch Sprünge in den Referenzwerten durchgeführt, was die denkbar schlechteste Vorgehensweise darstellt. Hier wird nun im Verlauf noch eine Referenzwertsteuerung mittels Trajektorie oder ähnlichen Verfahren implementiert.

2. DRITTE HAUSAUFGABE (H3)

Aus dem vorangegangenen Protokoll wird ersichtlich, dass das entwickelte Reglerentwurfsverfahren bereits ausgiebig durchdacht und an der realen Anlage validiert worden ist. Daher ergab sich für die dritte Hausaufgabe keinen weiteren Aufwand, da wir die Aufgaben bereits größtenteils erledigt hatten. Die Validierung an der realen Anlage stellten zur Schau, dass die Definierten Regelungsziele zu unserer Zufriedenheit erfüllt worden sind. Das extrahierte Modell scheint ausreichend genau zu sein und liefert mittels LQI-Regler ebenfalls soweit eine ausreichend gute Performance sowie zumindest experimentelle Robustheit.

3. KOMMENTARE UND AUSBLICK AUF L4

Es existiert bereits ein gut funktionierender Regler, der nun nur noch um eine Vorsteuerung und Trajektorien-generierung für die finale Flugaufgabe erweitert werden muss. Daher haben wir für den nächsten Labortag bereits einige Ideen gesammelt, wie wir die Trajektorienplanung und -verfolgung weiter verbessern können. Diese können nun in L4 umgesetzt und getestet werden.