

Masterarbeit:

Adaptive online MPC Strategie am Beispiel "Luftpfad eines EU5 Dieselmotor"

Autor: Stefan Enzenhofer
Betreuer: Prof. Dr. Luigi del Re, Dr. Harald Waschl
Fertiggestellt: August 2014

Kurzfassung

Bei der modellbasierten prädiktiven Regelung (MPC) wird mit Hilfe eines Modells der Strecke und einer Kostenfunktion, welche die Amplitude der Stellsignale, die Änderung der Stellsignale, die Abweichung des Streckenausganges von der Sollgröße etc. beinhalten kann, in jedem Abtastschritt die nächste Stellgröße mittels Optimierung bestimmt. Der Vorteil eines MPCs liegt darin, dass dieser für MIMO Systeme einfach anwendbar ist, Beschränkungen ohne großen Aufwand berücksichtigt werden können und er eine gute Performance ermöglicht.

Für die Berechnung des zukünftigen Streckenausganges wird ein Modell der Strecke benötigt welches für nichtlineare Strecken natürlich auch nichtlinear sein muss. Für nichtlineare Strecken wird allerdings sowohl die Modellbildung als auch die Lösung der Minimierungsaufgabe komplex. Auf Grund dieser Eigenschaft soll im Rahmen dieser Arbeit eine adaptive, lineare MPC-Strategie entwickelt werden. Die Grundidee dafür besteht darin, am jeweils aktuellen Arbeitspunkt lineare Modelle zu identifizieren und diese für die Regelung zu verwenden. Dies hat den Vorteil, dass weiterhin lineare MPC-Algorithmen verwendet werden können.

Die Entwicklung des adaptiven Ansatzes wurde in dieser Arbeit durch mehrere Zwischenschritte umgesetzt. Zuerst wurden die für den adaptiven MPC benötigten Teilkomponenten, also die Identifikationsroutine, ein Beobachter und die Optimierungsroutine, implementiert und evaluiert und anschließend zu einem Gesamtsystem zusammengesetzt.

Als Identifikationsroutine wird im ersten Versuch ein rekursives Least Squares Verfahren mit exponentiellem Vergessen verwendet um ein ARX Modell zu identifizieren. Um die Arbeitspunkte zu adaptieren werden PT1-Filter verwendet. Später wird dann, anstelle des ARX-Modells, ein Innovationsystem verwendet um das Systemverhalten darzustellen, dabei wird dann dazu übergegangen, die Identifikationsdaten mit dem Kehrwert des Störmodells zu filtern wodurch die Korrektur um die Arbeitspunkte entfallen kann.

Für die Berechnung der Zustände des Systems wird ein Kalmanfilter verwendet das natürlich das identifizierte Modell, bzw. später das Innovationsystem, verwendet.

Für die Ermittlung der zukünftigen Stellgrößen kann das Optimierungsproblem auf die Form eines "Quadratic Programming" gebracht werden. Dazu ist es notwendig, in jedem Schritt erneut die notwendigen Matrizen zu berechnen. Dieses Problem kann anschließend mit einem effizienten, echtzeitfähigem Solver gelöst werden.

Die Performance dieser Strategie wird abschließend am Beispiel des Luftsystems eines Dieselmotors untersucht und mit der Performance eines herkömmlichen MPC Ansatzes verglichen.

Einleitung und Motivation:

Motivation:

Ein linearer MPC-Ansatz bietet viele Vorteile:

- Einfache Kompensation von Totzeiten
- Einfache Kompensation von messbaren Störungen
- Für MIMO Systeme sehr einfach anwendbar
- Beschränkungen können ohne großen Aufwand berücksichtigt werden
- Einfach zu realisieren
- Gute Performance (zumindest solange das Modell gut mit der Strecke übereinstimmt)

Diese Vorteile des linearer MPC sollen auch für

- zeitvariante Systeme
- geeignete nichtlineare Strecken

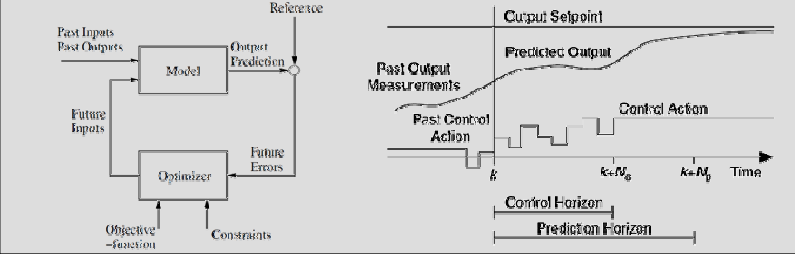
verfügbar gemacht werden.

Allgemeine Grundfunktion des MPC:

Mit Hilfe eines Modells der Strecke, den aktuellen Zuständen und den zukünftigen Stellgrößen können die zukünftigen Systemausgänge berechnet werden. Der MPC berechnet die zukünftigen Stellgrößen, indem er ein Gütefunktional minimiert, welches die quadratische Abweichung von der Solltrajektorie, die Änderung der Systemausgänge und auch die Stellgrößen beinhalten kann:

$$V_k = \sum_{i=1}^{N_{PI}} \|\hat{y}_{k+i|k} - r_{k+i}\|_{Q_i}^2 + \sum_{i=1}^{N_{CH}-1} \|\Delta \hat{u}_{k+i|k}\|_{R_i}^2$$

Die Grundidee der MPC Methode kann durch folgende Abbildungen veranschaulicht werden:

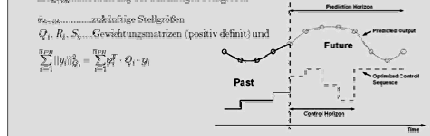


Linearer MPC

Die Aufgabe des MPC ist es folgendes Gütefunktional zu minimieren:

$$V_k = \sum_{i=1}^{N_{PI}} (y_{k+i} - r_{k+i})^2 + \sum_{i=1}^{N_{CH}-1} (\Delta u_{k+i})^2 + \sum_{i=1}^{N_{CH}-1} (\Delta u_{k+i})^2$$

N_{PI}Prädikthorizont bis zu demen wird die Abweichung der zukünftigen Ausgänge von der Solltrajektorie aufsummiert.
 N_{CH}Nottrahorizont, bis zu demen dürfen die Stellsignale variiert werden, danach werden sie bis N_{PI} konstant gehalten.
 αvon aktuellem Zeitpunkt k aus veränderbare (spätere) Streckenausgänge zum Zeitpunkt $k+i$.
 r_{k+i}Referenztrajektorie zum Zeitpunkt $k+i$, da diese in Systemzustand ungewissens bekannt ist, wird sie von aktuellem Zeitpunkt konstant gehalten.
 Δu_{k+i}Änderung der zukünftigen Stellgrößen
 Q_i, R_i, S_iGewichtsmatrizen (positiv definit) und



Identifikation

Für die Identifikation wird als Modellstruktur ein sogenanntes Innovationsystem verwendet, welches Integratoren beinhaltet um die stationären Nichtlinearitäten berücksichtigen zu können:

$$A_k(q^{-1}) \cdot y_{k,k} = B_k(q^{-1}) \cdot u_k + \varepsilon_{k,k}$$

$$\varepsilon_{k,k} = \frac{1 - \alpha_k}{1 - q^{-1}} \cdot \varepsilon_{k,k}$$

Für die Identifikation der Parameter dieser Modellstruktur wird ein rekursives Least Squares Verfahren mit exponentiellem Vergessen gewählt:

$$P_k = \frac{1}{\lambda} \cdot P_{k-1} \cdot (I - \varphi_k^T \cdot (\lambda \cdot I + \varphi_k^T \cdot P_{k-1} \cdot \varphi_k)^{-1} \cdot \varphi_k^T \cdot P_{k-1})$$

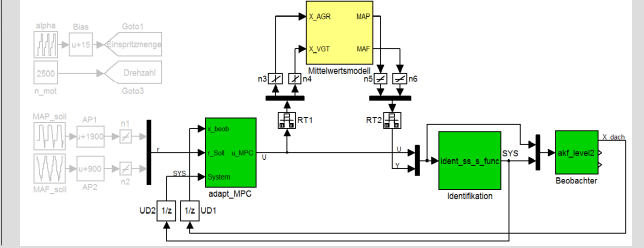
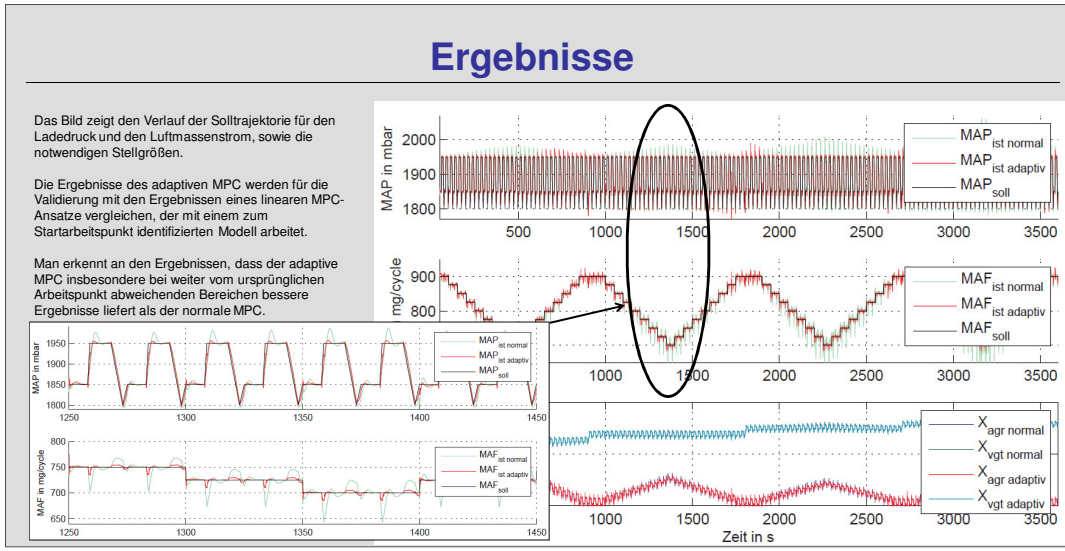
$$K_k = P_k \cdot \varphi_k \cdot (\lambda \cdot I + \varphi_k^T \cdot P_{k-1} \cdot \varphi_k)^{-1} \cdot \varphi_k^T \cdot P_{k-1}$$

$$\hat{\theta}_k = \hat{\theta}_{k-1} + K_k \cdot (y_k - \varphi_k^T \cdot \hat{\theta}_{k-1})$$

Adaptiver MPC

Im Bild erkennt man den Aufbau des geschlossenen Regelkreises mit:

- dem normierten Mittelwertmodell des Luftpfades eines EU Dieselmotors als zu regelnde Strecke
- der Optimierungsroutine
- der Identifikationsroutine
- dem Kalmanfilter, der als Beobachter verwendet wird
- der Solltrajektorie und den Störgrößen

Fazit und Ausblick

Fazit:

Es konnte gezeigt werden, dass der adaptive lineare MPC sowohl für zeitvariante als auch für geeignete nichtlineare Strecken eine bessere Performance ermöglicht als ein linearer MPC Ansatz.

Ausblick:

Für den Einsatz in realen Systemen können noch weitere Verbesserungen der Strategie hilfreich sein, welche in einer Fortführung behandelt werden können:

- Beschränkung der Eigenwerte des identifizierten System
- Anpassung des Vergessensfaktors der Identifikationsroutine bei zu geringer Anregung oder gleichbleibendem Systemverhalten
- Aufschalten eines zusätzlichen Anregungssignals bei zu geringer Anregung
- Erweiterung um „Measured Disturbances“