



Doctoral Thesis

## The F-ILC Algorithm: A Fourier Series Based Iterative Learning Control Algorithm

**Author(s):**

Zsiga, Norbert

**Publication Date:**

2016

**Permanent Link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-010819416> →

**Rights / License:**

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

Diss. ETH No. 24036

# The F-ILC Algorithm: A Fourier Series Based Iterative Learning Control Algorithm

A dissertation submitted to  
ETH ZURICH

for the degree of  
Doctor of Sciences

presented by

**Norbert Zsiga**

MSc ETH ME  
born April 09, 1985  
citizen of Germany

accepted on the recommendation of  
Prof. Dr. Lino Guzzella, examiner  
Prof. Dr. Maarten Steinbuch, co-examiner  
Prof. Dr. Christopher H. Onder, co-examiner

2016

# Abstract

This thesis presents a novel analysis method for iterative learning control (ILC) algorithms. Even though it is expressed in the lifted system representation and hence in the time domain, the convergence rate as a function of the frequency content of the error signal can be determined. Subsequently, based on this analysis method, a novel ILC algorithm (F-ILC) is proposed. The convergence rate at specific frequencies can be set directly in the design process, which allows simple tuning and a priori known convergence rates. Using the F-ILC design, it is shown how to predict the required number of iterations until convergence is reached, depending on the reference trajectory and information on the system repeatability. Numerical examples are given and experimental results obtained on an internal combustion engine test bench are shown for validation.

It is shown how the F-ILC algorithm can be tuned to achieve a fast convergence rate and to avoid instability simultaneously in the presence of system uncertainty. Equations are derived to predict the maximum error in the next iteration for the case when the reference trajectory and/or the disturbance vary from one iteration to another. Based on those findings an example problem is analyzed where the disturbance varies from one iteration to another and the system is subject to a large uncertainty. Unlike in typical ILC applications, the problem is continuous and neither has a break nor an initial resetting between iterations. Both simulation and measurement results show that ILC can be used for this type of problems and how the worst-case error reduction can be determined. With this knowledge an assessment can be made whether ILC is a suitable method to improve the performance in the presence of varying disturbances and/or reference trajectories.

# Zusammenfassung

In der vorliegenden Dissertation wird eine neue Methode zur Analyse von iterativ lernenden Algorithmen (ILC) vorgestellt. Die Methode ist in der Supervektornotation und daher im Zeitbereich beschrieben, dennoch kann die Konvergenzrate in Abhängigkeit der Frequenz bestimmt werden. Im Anschluss wird basierend auf der Analysemethode ein neuer ILC Algorithmus vorgestellt (F-ILC). Die Konvergenzrate spezifischer Frequenzen kann bei der Auslegung vorgegeben werden, was zu einer einfachen Handhabung und zu a priori bekannten Konvergenzraten führt. Es wird gezeigt, wie unter Verwendung des F-ILC Algorithmus die benötigte Anzahl an Iterationen bis die Konvergenz erreicht ist bestimmt werden kann. Dies hängt ab von der Referenztrajektorie und von der Wiederholbarkeitsgrenze des Systems. Numerische Beispiele und Messdaten von einem Verbrennungsmotorenprüfstand werden für die Validation gezeigt.

Es wird gezeigt, wie der F-ILC Algorithmus ausgelegt werden kann, um schnelle Konvergenzraten zu erreichen, wenn grosse Systemunsicherheiten gegeben sind unter gleichzeitiger Vermeidung von Instabilität. Gleichungen werden hergeleitet um den maximalen Fehler in der nächsten Iteration zu bestimmen für den Fall veränderlicher Referenztrajektorien und/oder Störungen. Basierend auf diesen Resultaten wird ein Beispielproblem mit veränderlicher Störung und grosser Systemunsicherheit analysiert. Anders als in typischen ILC-Anwendungen ist dieses Problem kontinuierlich und es gibt weder eine Pause zwischen Iterationen, noch ein Rücksetzen auf die gleichen Startbedingungen. Es wird mit Messungen gezeigt, dass ILC für diese Klasse von Problemen verwendet werden kann. Des Weiteren wird gezeigt, wie die Worst-Case Fehlerreduktion bestimmt werden kann. Mit diesem Wissen ist eine Bewertung möglich, ob ILC eine geeignete Methode ist, um die Performance eines Regelsystems unter veränderlichen Störungen und/oder Referenztrajektorien zu verbessern.