

YETE – Physikalisch Verteilte Steuerung im Weltraum Schlussbericht (FKZ 50RA1332)



ZE: Zentrum für Telematik e.V., Magdalene-Schoch-Straße 5, 97074 Würzburg

Laufzeit: 01.08.2013 – 31.12.2016

Projektleiter: Prof. Dr. Klaus Schilling

Datum: 20.05.2017

Inhaltsverzeichnis

I. Kurze Darstellung	3
1. Aufgabenstellung.....	3
2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	3
3. Planung und Ablauf des Vorhabens	3
4. Vorarbeiten/ Anknüpfungspunkte/ technischer Stand	4
5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	4
II. Detaillierte Beschreibung	4
1. Verwendung der Zuwendung, erzielte Ergebnisse.....	4
2. Zahlenmäßiger Nachweis	5
3. Notwendigkeit/ Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	5
4. Voraussichtlicher Nutzen, Verwertbarkeit	5
Verwertbarkeit	5
Potenzielle Anschlussfähigkeit	6
5. Bekannt gewordene Fortschritte bei anderen Stellen	6
6. Veröffentlichungen.....	7

I. Kurze Darstellung

Der vorliegende Schlussbericht beschreibt die Aktivitäten und Ergebnisse des DLR-Projektes „YETE-Physikalisch verteilte Steuerung im Weltraum“. Das Projekt wurde im Verbund mit den Lehrstühlen Informatik VII und VIII der Universität Würzburg durchgeführt. Die Projektleitung lag beim Lehrstuhl für Informatik VIII.

Ziel des Projektes war die Entwicklung bzw. Erprobung neuartiger Konzepte zur Steuerung von Weltraumfahrzeugen. Besonderer Fokus lag dabei auf verteilter Regelung und verteiltem Rechnen.

1. Aufgabenstellung

Das ZfT bearbeitete im Rahmen des Projektes den Themenkomplex Kommunikationsprotokolle und verteilte Regelung. Dabei sollten verschiedene Ansätze zur Kommunikation der einzelnen Rechenknoten untereinander erprobt werden, wie auch eine beispielhafte Regelung, welche mehrere Knoten umfasst.

2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

YETE war als Verbundprojekt durchaus von Vorgängerprojekten inspiriert und so konnte man auf einige bestehende Arbeiten zurückgreifen, u.a. Analysen zum Verhalten verschiedener Kommunikationsprotokolle im Bereich von Satellitenschwärmen wie auch Regelungsalgorithmen aus Diplom- und Masterarbeiten von Mitarbeitern, die direkt an YETE gearbeitet haben. Am ZfT war eine Mitarbeiterstelle in Vollzeit sowie eine Stelle für eine wissenschaftliche Hilfskraft für die gesamte Projektdauer vorgesehen. Es waren darüber hinaus kleine Beträge für den Aufbau eines Demonstrators eingeplant, um die entwickelten Ansätze auch auf realer Hardware zeigen zu können. Dies und die Einbindung von Studenten erwies sich als sehr sinnvoll.

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Für das gesamte Projekt waren drei Jahre geplant. Start des Projektes war am 1. August 2013. Zu Beginn des Projektes wurden studienähnliche Arbeiten durchgeführt, um eine gemeinsame Basis für die Systemknoten zu finden. Man hat sich auf ein Entwicklungssystem basierend auf den STM32F4 Mikroprozessoren der Fa. ST Microelectronics geeinigt.

Anschließend begann das ZfT, an Regelungssimulationen zu arbeiten, zunächst noch auf einem einzelnen Knoten basierend. Nach etwa einem dreiviertel Jahr waren die notwendigen Grundstrukturen entwickelt und ein funktionierendes Simulationsmodell lag vor. Nun wurde damit begonnen, das in der Simulation lauffähige Konzept auf die reale Hardware zu übertragen.

Nach ungefähr einem Jahr war dies gelungen. Ebenso gab es zu diesem Zeitpunkt bereits erste Ansätze für die Kommunikation der Knoten untereinander. Studentische Hilfskräfte bauten einen einfachen Demonstrator, der im Laufe des Projektes immer wieder weiterentwickelt wurde und für Tests an den Algorithmen herangezogen werden konnte.

Schließlich wurde ein komplettes System bestehend aus zwei interagierenden Knoten gezeigt.

Das ZfT konnte das Vorhaben kostenneutral bis zum 31. Dezember 2016 verlängern, woraufhin es auch planmäßig abgeschlossen wurde. Die Abschlusspräsentation fand ebenso Ende des Jahres 2016 zusammen mit den Projektpartnern statt.

4. Vorarbeiten/ Anknüpfungspunkte/ technischer Stand

Das ZfT konnte auf bereits vorliegende Erfahrungen aus dem Projekt BayKoSM (Bayerische Kompetenzen für Schwarm-Missionen) zurückgreifen, um schnelle Fortschritte bei der Kommunikation zu erzielen. In diesem Projekt wurden bereits sehr ähnliche Szenarien mittels Software-Simulation realisiert.

Im Bereich der Regelungstechnik waren ebenfalls Vorkenntnisse vorhanden aus Projekten wie FORROST, wo es um On-Orbit Servicing ging.

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das ZfT hat im Rahmen des Projektes mit den beiden Informatiklehrstühlen der Universität Würzburg kooperiert:

- Lehrstuhl für Informatik VII: Robotik und Telematik (Prof. Schilling)
- Lehrstuhl für Informatik VIII: Luft- und Raumfahrttechnik (Prof. Montenegro)

Die Projektleitung lag beim Lehrstuhl für Informatik VIII.

II. Detaillierte Beschreibung

1. Verwendung der Zuwendung, erzielte Ergebnisse

Mit dem durchgeführten Vorhaben wurden in erster Linie Strategien und Methoden des Verteilens von Rechneraufgaben bei Robotern und Weltraumfahrzeugen untersucht, um die durch künftige Missionen aufkommenden Herausforderungen erfüllen zu können.

Besondere Bedeutung haben dabei am Zentrum für Telematik die Untersuchungen mit Hinblick auf Satellitenformationen erhalten. Technischen Limitierungen, die ein einzelner Satellit auf Grund seiner Baugröße unvermeidbar aufweist, können durch gezielte Verteilung von Aufgaben kompensiert werden um dennoch die Missionsanforderungen kostengünstig umzusetzen. In der Raumfahrt lassen sich zukünftig immer mehr Anwendungen durch eine solche Kleinsatellitenformation abdecken.

Basierend auf STM32F4 Mikroprozessoren wurde ein Demonstrator aufgebaut, welcher die unterschiedlichen Regelalgorithmen, die in Zusammenarbeit mit den Lehrstühlen für Informatik VII und Informatik VIII der Universität Würzburg entwickelt wurden, auf ihre praktische Umsetzung getestet. Dieser Demonstrator besteht aus zwei identischen Rotoren, welche jeweils eine Wippe durch den entstehenden Luftdruck umschwenken.

Ausgehend von den bestehenden Erfahrungen im Bereich der Sensorik und Aktuatorik wurden Gyroskop- und Beschleunigungsdaten ausgewertet und mit Hilfe des Mikroprozessors in Steuersignale für den Rotor umgesetzt. Somit war es möglich die Wippen genau auszurichten und zu regeln.

Neben der individuellen Regelung der Wippen wurden zusätzlich verteilte Regeleungsansätze getestet. Hierbei wird ein Mikroprozessor genutzt um die Sensordaten der anderen Wippe auszuwerten und diese zu steuern. Es wurden auch Szenarien betrachtet bei denen die Sensorik ausfallen kann oder der Prozessor überlastet ist. In diesen Fällen war es möglich automatisch auf den funktionsfähigen Teil des jeweils anderen Systems zurückzugreifen um somit eine effiziente Regelung aufrechtzuerhalten. Neben der kabelgebundenen Signalübertragung über eine serielle Schnittstelle

zwischen den Systemen wurde auch die Möglichkeit der kabellosen Übertragung mittels Bluetooth vorgesehen. Dies ermöglicht eine zusätzliche räumliche Trennung und die Möglichkeit weitere Parteien in das verteilte Regelungssystem hinzuzufügen ohne Änderungen an der Verkabelung vorzunehmen.

In diesem Zusammenhang wurde auch eine Mensch-Computer-Schnittstelle integriert, bei der über eine grafische Oberfläche auf die Rotorsteuerung eingegriffen werden kann. Diese GUI erhält relevante Sensor- und Aktuatorendaten über Bluetooth oder UART, aus denen die Berechnung der Regelung auch ohne die Mikroprozessoren durchgeführt werden kann. Zusätzlich bietet die GUI eine Darstellung der gesammelten Daten um somit weitere Auswertungen vorzunehmen.

2. Zahlenmäßiger Nachweis

Mit der Zuwendung wurden am Zentrum für Telematik verschiedene Mitarbeiter über die Zeitdauer vom 01.08.2013 bis 31.12.2016 beschäftigt, deren Fachbereiche sich gegenseitig ergänzen. Zusammen mit weiteren Kollegen, die für spezielle Fragestellungen teilweise hinzu gezogen wurden, wird ein sehr breiter Wissensbereich abgedeckt (Luft- und Raumfahrttechnik, Mathematik, Physik, Informatik, Technische Informatik/ Digitalelektronik). Zusammen mit den anderen Projektpartnern wurden dann Anwendungen mit Hilfe des Demonstrators durchgeführt.

Im Rahmen des Projektes wurde ein Demonstrator für das Testen der verschiedenen Regelungsansätze zusammengebaut. Dieser besteht aus diversen Strukturteilen, zwei Mikroprozessoren und zwei Rotoren sowie zusätzlicher Peripherie. Diese Komponenten wurden aus dem dafür bereitstehenden Projektbudget finanziert.

3. Notwendigkeit/ Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Mit dem gegenwärtigen Trend hin zu Konstellationen und Formationen aus Klein- und Kleinstsatelliten ergibt sich auch ein steigender Bedarf an verteilten Regelungsansätzen. Da bislang kaum konkrete Konzepte erarbeitet wurden, die auf die Autonomie der zukünftigen Satelliten angepasst sind, leistet YETE einen großen Beitrag dazu, diese auch in der Praxis umzusetzen. Die durchgeführten Arbeiten liefern Erkenntnisse um die Limitierungen von räumlich verteilten Systemen zu überbrücken und dessen Möglichkeiten voll auszuschöpfen. Indem robuste Kommunikationsstrecken zwischen den beteiligten Partnern hergestellt werden, bietet sich die Möglichkeit gemeinsame Rechenoperationen optimal zu verteilen. Im Fall von Überlastung und Ausfall von Sensorik, Aktuatorik oder Rechenleistung, können die gewonnenen Ergebnisse dazu beitragen, dass sich zukünftige Satellitensysteme in diesen Situationen untereinander ergänzen und ersetzen.

4. Voraussichtlicher Nutzen, Verwertbarkeit

Verwertbarkeit

Die hier erzielten Ergebnisse werden in konkreten Missionen eingesetzt werden und sollen weiter detailliert werden. Die Ergebnisse bieten unmittelbare Anregung für anstehende und bereits laufende Projekte mit kooperierenden Kleinst-Satelliten wie „NetSat“, das 2018 gestartet werden soll. Außerdem wird im Projekt „TOM“ an einer Mission mit sehr eng kooperierenden Erdbeobachtungssatelliten gearbeitet. Diese sollen auch mittels Inter-Satellitenkommunikation gemeinsame Aufgaben wie photogrammetrische Erdobservationen durchführen. Dazu werden unter anderem auch Ansätze aus YETE verwendet um die verteilten Systeme optimal zu regeln. So wird die

Verwertbarkeit der Projektergebnisse direkt in konkreten Missionen getestet und es wird auch weiterer Handlungsbedarf durch die hier gemachten Erfahrungen angeregt.

Potenzielle Anschlussfähigkeit

Mit einem möglichen YETE2 Projekt soll die verteilte Regelung noch einen Schritt weiter gebracht werden. Bodensegment und Weltraumsegment sollen dabei verschmelzen. Sobald ein Kommunikationslink existiert, wird das Bodensegment mit allen seinen Ressourcen (Software, Rechenleistung, Massenspeicher) in das gesamte System integriert. Laufzeiten der verschiedenen Kommunikationsstrecken müssen dabei berücksichtigt werden. Auch die klare Definition von Schnittstellen ist sehr aufwändig und kritisch und sollte in Folgearbeiten stärker berücksichtigt werden.

Eine weitere Möglichkeit um Schnittstellen im Datenmanagementsystem überflüssig zu machen und somit eine bessere verteilte Regelung zu ermöglichen ist das Prinzip von einer „Building Blocks Execution Platform“ (BBEP). Dies ist eine gemeinsame und dennoch verteilte Plattform, welche die einzelnen Knoten des Netzwerks verbindet. Jede Applikation braucht nur Schnittstellen zur BBEP, welche sehr einfach und klar gehalten werden. Die Verteilte BBEP kümmert sich um den Rest.

Applikationsgetriebene Anschlussfähigkeiten könnten sich in weiteren Weltraumanwendungen wiederfinden. Durch das Konzept des verteilten Roboters werden innovative Konzepte für Explorationsmissionen möglich. Extra-terrestrische Umgebungen können aus verschiedensten Blickwinkeln und durch heterogene Sensorik untersucht werden. Fällt in so einem verteilten System ein einzelner Knoten aus, ist nur ein kleiner Teilaspekt der Mission betroffen. Durch die Vernetzung und verteilte Planung bezüglich der Missionsziele, können die nicht betroffenen Knoten spontan auf Ausfälle reagieren und entsprechende Arbeiten im Netzwerk neu verteilen.

Um konkrete Anwendungen, insbesondere auch in zukünftigen Multisatellitensystemen, zu ermöglichen bedarf es noch an weiterer Forschung, bei der explizit auf die Demonstration der Technologie eingegangen wird. Dazu sollen in YETE2 Demonstratoren für Auto-Assembly und Formationssimulation entstehen. Beim Auto-Assembly wird sich eine physikalische Struktur, welche nicht auf einmal in den Orbit gebracht werden kann, in einem Orbit-Manöver-Labor autonom aus mehreren einzelnen Komponenten selbst aufgebaut. Für die Simulation von mehreren CubeSats in einer Formation werden sowohl Hardware-in-the-Loop als auch Software-in-the-Loop Ansätze verfolgt. Anhand von einer softwarebasierten Steuerung werden Simulatoren für Lageregelung und Orbitmechanik betrieben. Mehrere (reale) Lageregelungssensoren liefern dabei den nötigen Input für die Steuerungssoftware, welche auf einem dediziertem Simulationsrechner läuft.

5. Bekannt gewordene Fortschritte bei anderen Stellen

Es arbeiten weltweit einige Institutionen an Regelungskonzepten, allerdings vorzugsweise auf sehr theoretischer Ebene. Insbesondere das vernetzte und verteilte Regeln mit dezentralen Hard- und Software-Schnittstellen lässt sich nur selten wiederfinden. Die anwendungsorientierte Forschung mit Bezug auf Konstellationen und Formationen von mehreren Kleinstsatelliten, wie es bei YETE der Fall war, liegt bei den meisten Forschungsprojekten noch weit in der Ferne.

Dennoch gibt es bei den YETE-Ansätzen weiteres Potential um alle Aspekte einer auf Formationen aufbauenden Kleinstsatellitenmission abzudecken. Die in diesem Projekt durchgeführten Arbeiten

bereiten den Weg in Neuland und sollten deshalb intensiv fortgesetzt werden, um den entstehenden künftigen Bedarf dann zeitgerecht adressieren zu können.

6. Veröffentlichungen

Im Rahmen des Projekts konnten einige Veröffentlichungen durchgeführt und vorbereitet werden. Dazu zählen:

A Flexible Hardware Test Demonstration Platform for the Fractionated System Architecture YETE. Kempf, Florian; Haber, Roland: 4th IFAC Symposium on Telematics Applications, Porto Alegre, Brazil, 2016.

Reliable Networked Distributed On-Board Data Handling Using a Modular Approach with Heterogeneous Components. Florian Kempf, Alexander Hilgarth, Ali Kheirkhah, Tobias Mikschl, Tristan Tzschichholz, Sergio Montenegro, Klaus Schilling: Small Satellite Systems and Services Symposium, Majorca, Spain, 2014.

AIRTEC2014: Gemeinsamer Stand mit der Uni Würzburg mit Vorstellung des Projektes.

YETE- Distributed communication, computation and control for fractionated spacecraft. Florian Kempf, Alexander Hilgarth, Ali Kheirkhah, Tobias Mikschl, Tristan Tzschichholz, Sergio Montenegro and Klaus Schilling

International Workshop on Fractionated Spacecraft (IWFS), Delft, The Netherlands, 2014.

YETE: Robuste, verteilte Systeme im Automotive- und Aerospacebereich durch eine modulare, flexible Echtzeitplattform. A. Hilgarth, T. Mikschl, S. Montenegro, K. Schilling, F. Kempf, A. Kheirkhah, T. Tzschichholz: Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress (DLRK), Augsburg, 2014.

Robust distributed control for a mechanical-electrical demonstrator considering communication constraints. A. Kheirkhah, F. Kempf, T. Tzschichholz, K. Schilling: 2nd IFAC Conference on Embedded Systems, Computational Intelligence and Telematics in Control (CESCIT), Maribor, Slovenia, 2015.

Resource sharing, communication and control for fractionated spacecraft (YETE). F. Kempf, K. Schilling, S. Montenegro, T. Mikschl, A. Hilgarth, A. Kheirkhah, T. Tzschichholz: IEEE Aerospace Conference, 2015.

Collision Free Protocol for Ultrawideband Links in Distributed Satellite Avionics. Tobias Mikschl, Richard Rauscher, Sergio Montenegro, Klaus Schilling, Florian Kempf, Tristan Tzschichholz: Small Satellite Systems and Services Symposium, Valetta, Malta, 2016.