

DISS. ETH NO. 21157

The Distributed Flight Array

A dissertation submitted to

ETH ZURICH

for the degree of

Doctor of Sciences

presented by

RAYMOND OUNG

M.Sc. in Mechanical Engineering, ETH Zurich

B.A.Sc. in Electrical Engineering, University of Toronto

born May 10, 1983

citizen of Canada

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Raffaello D'Andrea, ETH Zurich, examiner

Prof. Dr. Roland Siegwart, ETH Zurich, co-examiner

Prof. Dr. Daniela Rus, MIT, co-examiner

Abstract

Information processing, sensing, and communication technologies have been advancing at a phenomenal rate. It is quickly becoming economically viable to embed powerful computers, sensors, and communication technology into almost any physical device. For the field of control systems and robotics, this has made it possible to envision a system-level architecture in which many relatively simple components coordinate and cooperate in order to perform a joint task. This distributed architecture promises much in terms of performance, reliability, and design simplicity. However, it requires new concepts in system-level design, and a unified picture of control, communication, and computation.

This dissertation aims to develop a state-of-the-art mobile robotics testbed that abstracts many of the challenging, real world issues that are likely to be encountered when developing the next generation of controllable distributed dynamic systems. Doing so will require novel concepts in systems engineering and an understanding of the effects in which communication plays in such systems. It will force us to develop new algorithms and/or extend existing ones, as well as to examine their limits and potential.

Our mobile modular robotics platform, the Distributed Flight Array, consists of multiple autonomous units that are able to drive, dock with its peers, and coordinate with one another in order to drive and fly together. It is a combination of two advancing fields in robotics – modular robotics and micro aerial vehicles – drawing research and design challenges existing in both areas.

The first part of this dissertation primarily details the hardware platform. It presents the feasibility study, which initiated the project, the design revisions that followed, and how it has evolved into what it currently is today. The second part of this dissertation describes algorithms that were motivated in part by the development of this testbed, namely: a distributed tilt estimation strategy that employs a network of distance measurement sensors, which led to the development of a robust distributed average consensus algorithm; and a decentralized control strategy fit for any flight-feasible configuration of a multi-rotor vertical take-off and landing vehicle.

Zusammenfassung

Informationsverarbeitung, Sensorik und Kommunikationstechnik haben innerhalb von kurzer Zeit grosse Fortschritte gemacht. Aus ökonomischer Sicht wird es immer einfacher Recheneinheiten, Sensoren und Kommunikationseinheiten in nahezu jedes Endgerät einzubetten. Im Bezug auf die Regelungstechnik und Robotik sind daher Systemarchitekturen vorstellbar, in denen sich viele relativ einfache Komponenten koordinieren und miteinander kooperieren um eine gemeinsame Aufgabe zu erfüllen. Eine solche verteilte Systemarchitektur bietet viele Vorteile: erhöhte Rechenleistung und Zuverlässigkeit sowie ein einfacheres Design. Es bedarf allerdings neuer Konzepte im Systemaufbau und eines Gesamtbildes der Regelungs-, Kommunikations- und Computertechnologie.

Der Zweck dieser Arbeit ist es, eine mobile Roboterplattform nach aktuellstem Stand der Technik zu entwickeln. Diese Plattform abstrahiert herausfordernde Probleme, von denen zu erwarten ist, dass sie in ähnlicher Form bei der Entwicklung der nächsten Generation von regelbaren verteilten dynamischen Systemen auftreten werden. Dieses bedarf neuartiger Konzepte im Systementwurf und eines besseren Verständnis der Kommunikation der einzelnen Systemkomponenten untereinander. Dies wird von uns verlangen, neue Algorithmen zu entwickeln und existierende Algorithmen zu erweitern.

Unsere mobile modulare Roboterplattform, das Distributed Flight Array (DFA), besteht aus mehreren autonomen Robotern, die sich am Boden bewegen und in einer Vielzahl von Konfigurationen fahren und fliegen können. Es ist eine Kombination von zwei sich schnell entwickelnden Forschungsgebieten der Robotik – *modular robotics* und *micro aerial vehicles*. Die Herausforderungen beider Forschungsgebiete finden sich im DFA vereint.

Der erste Teil dieser Dissertation beschreibt die Hardware-Plattform. Er enthält die Machbarkeitsstudie, welche zu diesem Projekt geführt hat, die darauf folgenden Design-Änderungen und den aktuellen Stand der Plattform. Der zweite Teil dieser Dissertation beschreibt Algorithmen, die durch die Entwicklung dieser Plattform entstanden sind. Dies ist zum einen eine Verteilte-Drehwinkel-Schätz-Strategie zum Auswerten eines Netzwerkes von Abstandssensoren, die zur Entwicklung eines robusten *distributed average consensus* Algorithmus führte. Zum anderen handelt es sich um eine dezentrale Regelungsstrategie, die in der Lage ist eine beliebige Konfiguration von Modulen zu fliegen.