Electro-Optical Ranging for Short Range Applications – Design and Realization Aspects

Fakultät für Ingenieurwissenschaften der

Universität Duisburg-Essen

zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von

Amr Eltaher

aus Giza

Referent: Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Jung Korreferent: Prof. Dr. habil. Dieter Jäger Tag der mündlichen Prüfung: 15.04.2009

Selected Topics in Communications Technologies

Amr Eltaher

Electro-Optical Ranging for Short Range Applications – Design and Realization Aspects

> Shaker Verlag Aachen 2009

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek

The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at http://dnb.d-nb.de.

Zugl.: Duisburg-Essen, Univ., Diss., 2009

Copyright Shaker Verlag 2009 All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior permission of the publishers.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-8262-2 ISSN 1860-2800

Shaker Verlag GmbH • P.O. BOX 101818 • D-52018 Aachen Phone: 0049/2407/9596-0 • Telefax: 0049/2407/9596-9 Internet: www.shaker.de • e-mail: info@shaker.de

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als Stipendiat am Lehrstuhl für Kommunikationstechnik der Fakultät für Ingenieurwissenschaften der Universität Duisburg-Essen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Jung, dem Leiter des Lehrstuhls für Kommunikationstechnik der Fakultät für Ingenieurwissenschaften der Universität Duisburg-Essen, danke ich herzlich für die interessante Aufgabenstellung und die engagierte Betreuung der vorliegenden Arbeit. Seine zahlreichen Anregungen und Vorschläge sowie seine stete Unterstützung bei der Bearbeitung der Aufgabenstellung trugen wesentlich zur Erstellung der vorliegenden Arbeit bei.

Für die Übernahme des Korreferats und die damit verbundenen Mühen möchte ich Herrn Prof. Dr. rer. nat. habil. Dieter Jäger, dem Leiter des Lehrstuhls für Optoelektronik der Fakultät für Ingenieurwissenschaften der Universität Duisburg-Essen, meinen Dank aussprechen. Seine interessanten Anregungen und Verbesserungsvorschläge verliehen dieser Arbeit ein weitaus größeres Gewicht.

Weiterhin danke ich den Mitgliedern meiner Prüfungskommission, Herrn Prof. Dr.-Ing. Andreas Czylwik, Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Gerhard Krost und Herrn Prof. Dr.-Ing. Holger Vogt, für die interessanten fachlichen Diskussionen über diese Arbeit.

Des Weiteren danke ich allen meinen Kolleginnen und Kollegen, Heribert Annen, Zijian Bai, Dr. Guido Bruck, Admir Burnic, Bärbel Clausen, Dr. Arjang Hessamian-Alinejad, Dr. Thomas Faber, Friedhelm Fehr, Sabine Jankowski, Erika Pauli, Dr. Tobias Scholand, Dr. Achim Seebens, Christoph Spiegel, Alexander Vießmann und Andreas Waadt für die sehr angenehme Arbeitsatmosphäre und die ausgezeichnete Zusammenarbeit. Insbesondere möchte ich mich bei den Herren Alexander Vießmann, Dr. Tobias Scholand und Dr. Arjang Hessamian-Alinejad für die in diese Arbeit eingeflossenen fachlichen Diskussionen und Anregungen bedanken. Ebenso möchte ich Frau Bärbel Clausen und Frau Sabine Jankowski für ihre Hilfe beim Korrekturlesen der vorliegenden Arbeit danken. Besonderer Dank geht an meinen Zimmerkollegen Achim Seebens. Dank gilt allen Studierenden, deren Studien- und Diplomarbeiten zur Entstehung dieser Arbeit beitrugen. Insbesondere ist der Herr Ning Ding zu benennen.

Weiterhin bedanke ich mich Misr Elhegaz Co., Kairo-Ägypten, für die finanzielle Unterstützung.

Schließlich bedanke ich mich bei meiner Familie und bei allen meinen Freunden für ihr Verständnis und ihre Unterstützung während der Fertigstellung dieser Arbeit.

Stuttgart, im Mai 2009

Amr Eltaher

Für Gott und meine Eltern

Zusammenfassung

Es gibt eine steigende Nachfrage für drahtlose Systeme, die eine genaue Positionsbestimmung ermöglichen. So wird die Positionierung zur Lokalisierung von Personal und Gegenständen in Laboren, Warenhäusern und Krankenhäusern immer populärer. Die Anwendung drahtloser Positionierungsverfahren in Such-Rettungsoperationen wird wegen des steigenden Interesses und an Sicherheitsdienstleistungen immer wichtiger. Lokalisierungsverfahren für die Roboter werden ausgiebig studiert [2]-[3]. Das Mobilitätskonzept erweitert diese Lokalisierungsverfahren. Mobilität ist nahezu sinnlos ohne die Fähigkeit der zielgerichteten Fortbewegung, d.h. Navigation. Zusätzlich gibt es fundamentale Probleme bei der Anwendung von Navigationssystemen wie Global Positioning System (GPS) innerhalbs von Gebäuden [3].

Prometheus ist der Name eines der laufenden Projekte am Lehrstuhl für Kommunikationstechnik Prometheus besteht hauptsächlich aus drei Subprojekten, nämlich HAWK, FALCON und ARGOS. Die drei Subprojekte basieren auf demselben Plattformkonzept und unterscheiden sich lediglich in der Art der realisierten Übertragungstechnik. Das Plattformkonzept besteht aus einem digitalen Signalprozessor (DSP. Digital Signal Processor). einer Schnittstellenkarte. welche den DSP mit der ieweiligen Übertragungstechnikplatine verbindet.

ARGOS, der Gegenstand dieser Studie zielt auf einfache, billige und genaue Systeme zur Entfernungsmessung für Umgebungen innerhalb von Gebäuden. Besonders Augenmerk liegt auf Fabriken. ARGOS ist ein optisches System zur Entfernungsmessung und wird in dieser Arbeit mit funkbasierten und ultraschalbasierten Systemen verglichen. Es wird erläutert das optische Systeme zur Entfernungsmessung beste Chancen auf preiswerte Realisierungen haben.

Weiterhin diskutiert der Verfasser kriterien für die Auswahl geeigneter Testsignale für die optische Entfernungsmessung. Diese Diskussion erfolgt vor dem Hintergrund geeigneter Schätzverfahren. Der Verfasser stellt schließlich ein neuartiges Schätzverfahren zur Entfernungsmessung vor. Simulationen zeigen die Vor- und Nachteile dieses Algorithmus und seiner Schlüsselparameter. Schließlich präsentiert der Verfasser die von ihm realisierte Version von ARGOS und legt anhand von Messergebnissen die Funktionstüchtigkeit mit dar.

Abstract

There has been a growing need for wireless systems that provide accurate position location. For example, indoor positioning to track personnel or assets in laboratories, warehouses, and hospitals is becoming more popular. Applications of wireless positioning for search-and-rescue operations have become important because of increasing interest in security services. Localization of robots has been studied extensively [2]-[3]. The concept of mobility extends the localization process. However, mobility is almost pointless without the ability of goal-directed motion, i.e. navigation. Furthermore, there are fundamental problems of using navigation systems, as Global Positioning System (GPS), for indoor environments [3].

Prometheus is the name of one of the running projects at Communication Technologies department. Prometheus consists of three main subprojects, HAWK, FALCON and ARGOS. The three subprojects are based on the same platform concept and differ only in the realization type of their transmission techniques. The platform consists of a digital signal processor (DSP) and an interface card which connects the DSP with the respective transmission board.

ARGOS, the subject of this study, aims simple, cheap and accurate ranging systems for indoor environments. It focuses, mainly, on factories. ARGOS is an optical ranging system compared, in this study, with its corresponding radio and ultrasonic systems. It is shown that optical ranging systems have the best chances in terms of economic realizations.

Furthermore, the author discusses criteria in order to select the appropriate test signals for the proposed optical ranging system. The discussion background aims an appropriate estimation process. The author, finally, proposes a novel estimation process for ranging systems. Simulations show the advantages and the disadvantages of such an algorithm and its key parameters. Finally, the author presents his own realization of ARGOS and its functionality based on the measurement results.

List of Common Symbols

с:	Speed Of Light
f:	Frequency
$\lambda_{_0}$:	Wavelength in free space
p_r :	Power Radiated
$P_{\rm a}$:	Power Absorbed
$P_{\rm net}$:	Net Power
e:	Object Emissivity, A Fraction Quantity Between 0 & 1
К:	Universal Constant Called Boltzmann Constant, $\kappa = 5.6703 \times 10^{-8} \text{ W} / (\text{m}^2 \times \text{K}^4)$
<i>S</i> :	Object Area
T:	Object Absolute Temperature
T_0 :	Temperature Of The Source Of The Radiation
<i>B</i> :	Signal Or System Bandwidth
σ_{x}^{2} :	Variance Of The Subscript
au :	Time Delay
$\hat{ au}$:	Estimated Time Delay
Δr :	Radar Range Resolution
Γ:	Fresnel Reflection Coefficient
θ_1 :	Incident Angle

- θ_1^{\prime} : Reflected Angle
- θ_2 : Refracted Angle
- ψ_1 : Grazing Angle
- ε : Material Permittivity
- μ : Material Permeability
- h_c : Critical Height

List of Common Abbreviations

ADC	: Analog-to-digital Converter
Air	: Advanced Infrared
AM	: Amplitude Modulation
AoA	: Angle Of Arrival
APD	: Avalanche Photodiodes
APs	: Access Points
AWGN	: Additive White Gaussian Noise
BAN	: Body Area Network
BER	: Bit Error Ratio
CRLB	: Cramer Rao Lower Bound
CW	: Continuous Wave
DoA	: Direction of Arrival
DP	: Direct Path
EHF	: Extremely High Frequency
EM	: Electromagnetic
FIR	: Far Infrared
FLIR	: Forward-Looking Infrared Receivers
FM	: Frequency Modulation

FOR	: Field-of-Regard
FOV	: Field-of-View
HF	: High Frequency
HIRAN	: High Ranging
IR	: Infrared
I^2R	: Imaging Infrared
IEC	: International Electrotechnical Commission
i.i.d	: Independent, Identically Distributed
IM/DD	: Intensity Modulation with Direct Detection
IrDA	: Infrared Data Association
IRST	: Infrared Search And Track
ISI	: Intersymbol Interference
JPL	: Jet Propulsion Laboratory
LAN	: Local Area Network
LANTIRN	: Low Altitude Navigation and Targeting Infrared System for Night
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
LDR	: Low Data Rate
LED	: Light Emitting Diode
LF	: Low Frequency

LIDAR	: Light Detection And Ranging
LoS	: Line-of-Sight
LPS	: Local Positioning System
LQ	: Link Quality
LWIR	: Longwave Infrared
MF	: Medium Frequency
ML	: Maximum-Likelihood
MLE	: Maximum-Likelihood Estimation
MLEA	: Maximum-Likelihood Estimation Algorithm
MSM	: Multiple-subcarrier Modulation
MWIR	: Midwave Infrared
NASA	: National Aeronautics and Space Administration
NIR	: Near Infrared
NLoS	: Non Line-of-Sight
OLS	: Ordinary Least Squares
PAN	: Personal Area Network
PCB	: Printed Circuit Board
РСМ	: Pulse Code Modulation
PDF	: Probability Density Function
PDP	: Power Delay Profile

РНҮ	:	Physical Layer
PN	:	Pseudo Noise
QAM	:	Quadrature Amplitude Modulation
RADAR	:	Radio detection And Ranging
RF	:	Radio Frequency
RMS	:	Root Mean Squared
RMSE	:	Root Mean Squared Error
RSSI	:	Received Signal Strength Indicator
RX	:	Receiver
SHF	:	Super High Frequency
SNR	:	Signal-to-Noise Ratio
SONAR	:	Sound Navigation and Ranging
SWIR	:	Shortwave Infrared
TADS/PNVS	:	Target Acquisition Designation Sight/Pilot Night Vision System
ТоА	:	Time of Arrival
TX	:	Transmitter
UHF	:	Ultra High Frequency
UWB	:	Ultra-wideband
VHF	:	Very High Frequency

 VLF
 : Very Low Frequency

 WPAN
 : Wireless Personal Area Network

 WPANs
 : Wireless Personal Area Networks

Table of Contents

1	INTI	RODUCTION	4	
	1.1	THE ORIGINS OF SURVEYING – A MOTIVATION	4	
	1.2	PROBLEM DESCRIPTION	6	
	1.3	STATE OF THE ART	9	
	1.3.1	Radio Ranging Systems	9	
	1.3.2	Electro-Optical Ranging Systems	25	
	1.4	THESIS CONTRIBUTION	33	
	1.5	THESIS OUTLINE	35	
2	ELE	CTRO-OPTICAL RANGING SYSTEM		
	2.1	CHAPTER OVERVIEW		
	2.2	INFRARED SIGNALS AND THEIR PROPAGATION	39	
	2.3	System Model	55	
3	SYSTEM PRINCIPLES THEORY		65	
	3.1	CHAPTER OVERVIEW	65	
	3.2	MAXIMUM-LIKELIHOOD ESTIMATION IN ELECTRO-OPTICAL RANGING SYSTEMS	66	
	3.3	DERIVATION OF THE PROPOSED ESTIMATION ALGORITHM	67	
	3.4	ESTIMATION ERRORS AND ACCURACY	72	
	3.5	SIMULATION RESULTS AND CONCLUSIONS	78	
4	DEM	ONSTRATOR REALIZATION	91	
	4.1	OVERVIEW OF THE CHAPTER	91	
	4.2	THE PROMETHEUS AND THE ARGOS CONCEPTS	92	
	4.2.1	Software	95	
	4.2.2	Hardware	100	
	4.3	MEASUREMENTS AND MEASUREMENT ANALYSES	106	
5	CON	CLUSIONS	115	
	Append	IX	117	
	REALIZA	TION OF ARGOS (SOFTWARE CODE)	117	
. /				

List of Figures

FIGURE 1.1: PROBLEM DESCRIPTION SKETCH FIGURE 1.2: UWB – RANGING RESOLUTION FIGURE 1.3: RANGING ERROR BASED ON CRLB FIGURE 1.4: POWER DELAY PROFILE (PDP) OF DIFFERENT IEEE 802.15.3A CHANNEL MODELS [13]. FIGURE 1.5: POWER DELAY PROFILE (PDP) OF DIFFERENT IEEE 802.15.4A CHANNEL MODELS [20] FIGURE 1.6: PATHE DWITE DETAIL A DIPLOCE DEFICIE (ADDEL ADDEL AD	8 11 12 .17].19
FIGURE 1.7: A PRINCIPAL SKETCH OF FOUR SCENARIOS IN A TYPICAL INDODE (LOS) [15] FIGURE 1.7: A PRINCIPAL SKETCH OF FOUR SCENARIOS IN A TYPICAL INDODE ROVIRONMENT FIGURE 1.8: TOA ALGORITHM PRINCIPLE – NS STOP WATCH IS REQUIRED (ADAPTED FROM [40]) FIGURE 2.1: ELECTROMAGNETIC SPECTRUM (ADAPTED FROM [9])	22 32 39
FIGURE 2.2: A SKITCH SHOWS THE DIRECT AND THE DIFFUSE LINKS OF INFRARED FIGURE 2.3: DIFFUSE LINK OF A TYPICAL INFRARED CHANNEL MODEL IN THE FREQUENCY DOMAIN FIGURE 2.4: POWER DELAY PROFILE (PDP) OF A TYPICAL INFRARED CHANNEL MODEL	42 N.45 45 47
FIGURE 2.6: SPACE-FREQUENCY, SPACE-TIME OF THE INFRARED CHANNEL MODEL. FIGURE 2.6: SPACE-FREQUENCY, SPACE-TIME OF THE INFRARED CHANNEL MODEL. FIGURE 2.7: BLOCK DIAGRAM OF TOA SYSTEM BASED ON TRAIN OF PULSES CORRELATION FIGURE 2.8: SIMULATION RESULTS OF TOA ALGORITHM BASED ON TRAIN OF PULSES CORRELATION	47 53 N.
FIGURE 2.9: CLASSIFICATION OF SIMPLE INFRARED LINKS (ADAPTED FROM [22]). FIGURE 3.1: A SKETCH OF THE PROPOSED SYSTEM MODEL (OBJ. = OBJECT) FIGURE 3.2: PROPOSED ALGORITHM ILLUSTRATION	53 57 69 79
Figure 3.3: System performance using $f = 5$ MHz, $f_s = 20$ MHz and no quantization Figure 3.4: System performance using $f = 5$ MHz, $f_s = 20$ MHz and a digital system	N. 81 1
OF 8 BITS ADC RESOLUTION.	83
FIGURE 3.5: RECEIVED VOLTAGE LEVEL EFFECT ON RANGING ACCURACY, EVEN IN NOISE FREE	83
FIGURE 3.6: FREQUENCY EFFECT ON RANGING PERFORMANCE AT SNR = 60DB.	85
FIGURE 3.7: SNR EFFECT ON RANGING PERFORMANCE AT $f = 5$ MHz.	85
FIGURE 3.8: ADC RESOLUTION EFFECT ON RANGING PERFORMANCE AT SNR = 20DB FIGURE 3.9: ADC RESOLUTION EFFECT ON RANGING PERFORMANCE AT SNR = 50DB	86
FIGURE 5.10. REPETITION, 7, EFFECT ON SYSTEM ACCURACY AT SINK – 0DB.	07
FIGURE 3.11: REPETITION, r , EFFECT ON SYSTEM ACCURACY AT SNR = 20DB	8/
FIGURE 3.12: I WO INDEPENDENT CHANNEL EFFECT.	88
FIGURE 5.15: SYSTEM PERFORMANCE IN 5D ENVIRONMENT.	89
FIGURE 4.1. A SIMPLE SKETCH FOR I ROMETHEUS AND ITS SUBPROJECTS.	92
FIGURE 4.3: DSP IS CONNECTED TO SINUSOIDAL SIGNAL GENERATOR THROUGH THE DAUGHTER	R 00
FIGURE 4.4: TRANSMITTER BLOCK DIAGRAM.	100
FIGURE 4.5: RECEIVER BLOCK DIAGRAM.	100
FIGURE 4.6: ELECTRONIC CIRCUIT FABRICATION OF THE TARGET SYSTEM	101
FIGURE 4.7: A SKETCHED SCHEMATIC OF THE TRANSMITTER (FIRST IMPLEMENTATION)	102
FIGURE 4.8: SCHEMATIC-BLOCKDIAGRAM OF THE PROTOTYPING SYSTEM	103
FIGURE 4.9: FREQUENCY RESPONSE OF ARGOS INFRARED RANGING SYSTEM.	104
FIGURE 4.10: ARGOS SETUP.	108

Figure 4.11: Cummulative probability graph of $\{\mathcal{E}_{c1,i}\}$ based on $L_2 = 0.5 \text{m} \dots 110$ Figure 4.12: Cummulative probability graph of $\{\mathcal{E}_{c2,i}\}$ based on $L_2 = 1 \text{m} \dots 111$ Figure 4.13: Cummulative probability graph of $\{\mathcal{E}_{c3,i}\}$ based on $L_2 = 2 \text{m} \dots 113$