EFFICIENT LOCALIZATION ALGORITHMS WITH A FOCUS ON ROBUSTNESS, HYBRIDIZATION AND OPTIMAL SENSOR PLACEMENT

KUNTAL PANWAR

CENTRE FOR APPLIED RESEARCH IN ELECTRONICS

INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI

July 2024

Efficient Localization Algorithms with a Focus on Robustness, Hybridization and Optimal Sensor Placement

by

KUNTAL PANWAR

CENTRE FOR APPLIED RESEARCH IN ELECTRONICS

Submitted

in fulfillment of the requirements of the degree of Doctor of Philosophy

to the

INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI

July 2024

Dedicated to my family.

Certificate

This is to certify that the thesis entitled **"Efficient Sensing Methodologies: A Focus on Robustness, Placement, Hybridization, and Other Challenging Aspects"**, submitted by **Kuntal Panwar** to the Indian Institute of Technology Delhi, for the award of the degree of **Doctor of Philosophy** in Signal Processing, is a record of the original, bona fide research work carried out by him under our supervision and guidance. The thesis has reached the standards fulfilling the requirements of the regulations related to the award of the degree.

The results contained in this thesis have not been submitted in part or in full to any other University or Institute for the award of any degree or diploma to the best of our knowledge.

Prof. Prabhu Babu
Thesis Supervisor
Centre for Applied Research in Electronics,
Indian Institute of Technology Delhi.

Acknowledgements

I would like to express my sincere gratitude to all those who have supported and guided me throughout my journey in completing this thesis.

First and foremost, I am deeply thankful to my advisor, *Prof. Prabhu Babu*, for his exceptional mentorship, boundless patience, and constant support. His expertise and dedication have been instrumental in shaping this research.

I also appreciate the contributions of my thesis committee members, *Prof. Arun Kumar, Prof. Monika Aggarwal, and Prof. Lalan Kumar*, whose insightful feedback significantly enriched this work.

My profound thanks to *Prof. Petre Stoica, Prof. Antonia Demaio, Prof. Augusto Aubrey, and Prof. Paulo Braca* for their guidance and supervision in some of my research papers, which greatly contributed to my academic pursuits.

I am grateful to my colleagues and friends, especially *Astha Saini, Ghania Fatima, Jasleen Kaur, Mayur Katwe, Piyush Varshney, and Shweta Pal*, for their support and camaraderie, making the research process enjoyable. I would also like to express my heartfelt gratitude to the CARE office staff for their exceptional support and efficiency in handling my paperwork.

I am indebted to my family for their unwavering belief in my abilities and continuous encouragement during my Ph.D. My parents, *Smt. Geeta and Shri Gopal Panwar*, provided unwavering emotional support, and my sister, *Manisha Panwar*, has been my confidante and cheerleader. Their collective support and love were the cornerstone of my resilience, making this achievement possible.

I am also grateful to my aunt and her family for their unwavering support and hospitality during the initial year of my PhD.

This thesis has been a culmination of collective efforts, and I am sincerely grateful to all those who played a part, whether big or small, in its realization.

Thank you all.

Kuntal Panwar

Abstract

The thesis aims to tackle critical challenges within localization techniques, with the overarching goal of enhancing accuracy, efficiency, and robustness across a wide array of applications. The scope of investigation encompasses multistatic target localization, hybrid localization methods, robust localization in the presence of outliers and Non-Line-of-Sight (NLOS) errors, optimal sensor placement strategies, and novel approaches tailored for scenarios lacking transmitter information. The impetus for this exploration arises from the discernible limitations and gaps prevalent in existing methodologies.

In the initial phase, the thesis provides an introductory overview of localization, exploring its wide-ranging applications and discussing a variety of estimation techniques. Additionally, it offers a concise explanation of multistatic localization, underlining the necessity for hybrid localization methods and robust localization schemes. Furthermore, this segment delves into the importance of optimal sensor placement strategies to improve accuracy in localization techniques.

In the subsequent segment, the thesis introduces a foundational framework for optimization algorithms, notably through the exposition of the Majorization Minimization (MM) architecture. Extensions of this architecture, such as Block Majorization Minimization, significantly contribute to the methodological underpinnings of the research.

The third phase delves into the intricacies of multistatic target localization, confronting various challenging scenarios head-on. Initially, an algorithm designed for joint Maximum Likelihood Estimation (MLE) of both the target position and associated noise variances is introduced, especially when prior knowledge of noise variances is absent. This algorithm demonstrates good performance, substantiated by compelling simulation results. Subsequently, an MM algorithm minimizing the Nonlinear Weighted Least Squares (NLWLS) criterion is proposed, showcasing its robustness in handling NLOS conditions and outliers. Additionally, a localization scheme tailored for scenarios lacking transmitter coordinates and synchronization is presented, leveraging Differential Time Delays (DTDs) from each receiver to enhance applicability and effectiveness in high-noise scenarios. Overall, this phase addresses the inherent

challenges of multistatic localization scenarios through innovative methodologies and rigorous validation.

The fourth segment advances the exploration by seamlessly transitioning into hybrid localization methods, which integrate multiple measurements to enhance accuracy and resilience. Specifically, a unified framework for hybrid localization, encompassing Time of Arrival (TOA), Time Difference of Arrival (TDOA), Received Signal Strength (RSS), and Angle of Arrival (AOA) measurements, is introduced to ensure flexibility and accuracy, particularly in scenarios characterized by NLOS errors. Additionally, a robust hybrid scheme amalgamating TOA and RSS measurements is formulated as a NLWLS problem, demonstrating superior accuracy and computational efficiency.

In the fifth part, the thesis delves into optimal sensor placement strategies, which are essential for enhancing source localization accuracy. Centered on addressing the A-optimal criterion design problem within positioning schemes for hybrid localization, the proposed approach not only improves accuracy but also accommodates D and E optimal criteria. Moreover, it addresses complexities associated with both correlated and uncorrelated noise, thus addressing significant gaps in existing methodologies. Additionally, innovative strategies for optimal sensor placement for 3D AOA measurements and Differential Received Signal Strength (DRSS) measurements are also discussed.

In conclusion, the thesis summarizes its substantial contributions and highlights potential avenues for future research. The innovative methodologies and comprehensive exploration presented significantly contribute to advancing the understanding and practical implementation of localization techniques, particularly in navigating the complexities of various challenging scenarios.

सार

यह थीसिस स्थानीयकरण तकनीकों में महत्वपूर्ण चुनौतियों का सामना करती है जिसका लक्ष्य विभिन्न अनुप्रयोगों में सटीकता, दक्षता, और प्रतिस्थापनशीलता को बढ़ावा देना है। इसमें मल्टिस्टैटिक लक्ष्य स्थानीयकरण, हाइब्रिड विधियाँ, बहुतलम में दृढ स्थानीयकरण त्रुटियों और गैर–रेखीय दोषों के मौजूदगी में, आदि के लिए अध्ययन किया गया है। इस अन्वेषण का प्रेरणा विद्यमान तकनीकों में दोषों के प्रमुख सीमाओं से होता है।

थीसिस शुरुआती अवलोकन प्रदान करती है, स्थानीयकरण का, जिसमें अनुमान तकनीकों की व्यापक जानकारी और मल्टिस्टैटिक स्थानीयकरण, हाइब्रिड स्थानीयकरण विधियों के लिए आवश्यकता की संकेत की गई है। साथ ही, इस सेगमेंट में सटीकता को बढ़ाने के लिए आदर्श सेंसर स्थान रखने की उपयोगिता के बारे में संक्षिप्त व्याख्या भी है।

थीसिस का दूसरा हिस्सा गहरे रूप से बहुस्थल लक्ष्य स्थानीयकरण की ओर बढ़ता है, जिसमें शोर वेरियेंसेस के पूर्वज्ञान की अभाव में एक लक्ष्य को योग्यता से स्थानीयता प्राप्त करने की चुनौती है। इस संदर्भ में, अनुसंधान ने एक ऐतिहासिक एल्गोरिदम प्रस्तुत किया है जो लक्ष्य की स्थानीयता और संबद्ध शोर वेरियेंसेस की संबंधित ध्वनि विभिन्नताओं की संयुक्त अधिकतम लिखुआ अनुमान (एमएलई) के लिए डिज़ाइन किया गया है, जो प्रेरणादायक सिम्युलेशन परिणामों के साक्षात्कारों के रूप में उदाहरण के रूप में प्रकट होता है। इसके अलावा, मजबूत स्थानीयकरण विधियों की आवश्यकता को स्वीकृति प्रदान करते हुए, अनुसंधान समय ऑफ सिग्नल आगमन (टीएसओए) मापों के लिए रोबस्ट विधियों की ओर बढ़ता है। यहां, एक गैर–रैलियन वेटेड लीस्ट स्क्वेयर्स (एनएलडब्ल्यूएलएस) एल्गोरिदम प्रस्तुत किया जाता है, जो संख्यात्मक सिम्युलेशन में उपस्थित है। ट्रांसमीटर कोऑर्डिनेट्स के बिना मल्टिस्टेटिक लक्ष्य स्थानन को संबोधित करता है, अद्वितीय रूप से डिफरेंशियल टाइम डिलेस (डीटीडी) का उपयोग करके उच्च–शोर स्थितियों में न्यून संवेदकों के साथ बेहतर अनुप्रयोग के लिए। यह आंकड़बाज़ एल्गोरिदम संगतता की गारंटी देता है, एक प्रेसिंग समस्या का समाधान प्रस्तुत करता है और वास्तविक दुनिया की चुनौतियों के प्रति समर्पण को जोर देता है।

अन्वेषण को हाइब्रिड स्थानीयकरण विधियों में सहजता से स्थानीयकरण की ओर बढ़ाता है, कई मापों का संयोजन करके सटीकता और सहिष्णुता को बढ़ावा देने के लिए। विशेष रूप से, अनुसंधान एक मजबूत हाइब्रिड योजना प्रस्तुत करता है जिसमें आगमन के समय (टीओए) और प्राप्त सिग्नल स्ट्रेंथ (आरएसएस) मापों का समाहित स्कीम पेश करता है। एक गैर–रैलियन वेटेड लीस्ट स्क्वेयर्स (एनएलडब्ल्यूएलएस) समस्या के रूप में तैयार की गई इस हाइब्रिड दृष्टिकोण का उत्कृष्ट स्थानीयता और संगणकीय कुशलता दोनों में प्रदर्शन करता है, जो वास्तविक दुनिया के अनुप्रयोगों में एक महत्वपूर्ण पहलू है। इसके अलावा, यह अध्याय हाइब्रिड स्थानीयकरण के लिए समेकित ढांचा पेश करता है, जिसमें टीओए, टाइम डिफरेंस ऑफ़ आगमन (टीडीओए), आरएसएस, और एंगल ऑफ आगमन (एओए) मापों को शामिल किया जाता है, जिससे एनएलओएस त्रुटियों के साथ भी लचीलापन और सटीकता सुनिश्चित है।

चौथा अंश उच्चतम संवेदक स्थानन प्लेसमेंट रणनीतियों पर ध्यान केंद्रित करता है, ए–ऑप्टिमल मानचित्र डिज़ाइन समस्या के माध्यम से स्रोत स्थानन यथासंभाव सटीकता को बढ़ाता है। इस दृष्टिकोण को डी और ई ऑप्टिमल मानचित्रिता के साथ समर्थन करता है, मौजूदा विधियों में गैप्स को संबोधित करता है। 3D एओए मापण और डिफरेंशियल रिसीव्ड सिग्नल स्ट्रेंथ (डीआरएसएस) मापण के लिए रणनीतियां नवाचारी समाधान प्रदान करती हैं, संगणन संघटन और बड़े संवेदक नेटवर्क्स में अनुकूलन की चुनौतियों को ध्यान में रखती हैं। पाँचवा सेगमेंट

समापन में, थीसिस अपने योगदानों का संक्षेप करती है और भविष्य के अनुसंधान के लिए संभावित रास्तों की संकेत सूची देती है। प्रस्तुत की गई नवाचारी विधियाँ चुनौतीपूर्ण परिस्थितियों में स्थानन तकनीकों के प्रैक्टिकल अमल को आगे बढ़ाने में सामर्थ्यपूर्ण योगदान प्रदान करती हैं।

Contents

List of Figures

List of Tables

Abbreviations

AOA	**A**ngle of **A**rrival
CFWLS	**C**onventional **F**ast **W**eighted **L**east **S**quares
CRLB	**C**ramér-**R**ao **L**ower **B**ound
DRSS	**D**ifferential **R**eceived **S**ignal **S**trength
DTD	**D**elay-**T**ime **D**ifference
FIM	**F**isher **I**nformation **M**atrix
GTRS	**G**eneralized **T**rust **R**egion **S**ubproblem
LOS	**L**ine of **S**ight
LS	**L**east **S**quares
MCC	**M**atthews **C**orrelation **C**oefficient
MIMO	**M**ultiple **I**nput **M**ultiple **O**utput
MLE	**M**aximum **L**ikelihood **E**stimation
MM	**M**ajorization **M**inimization
MSE	**M**ean **S**quared **E**rror
MUSIC	**MU**ltiple **SI**gnal **C**lassification
NLOS	**N**on-**L**ine of **S**ight
NLWLS	**N**on-**L**inear **W**eighted **L**east **S**quares
PCL	**P**assivet **C**ohere **L**ocalization
RMSE	**R**oot **M**ean **S**quare **E**rror
RSS	**R**eceived **S**ignal **S**trength
SDP	**S**emidefinite **P**rogramming
SOCP	**S**econd **O**rder **C**one **P**rogramming
TDOA	**T**ime **D**ifference **O**f **A**rrival
TOA	**T**ime **O**f **A**rrival
TSOA	**T**ime **S**um of **A**rrival
WLS	**W**eighted **L**east **S**quares

Notations

x	Scalar
$\boldsymbol{x}$	Vector
$\mathbf{X}$	Matrix
x_i	i^{th} element of vector $\mathbf{x}$
$X_{i,j}$	$(i,j)^{\text{th}}$ element of the matrix $\mathbf{X}$
$\mathbb{R}^{m\times 1}$	Set of m dimensional vectors of real numbers
$\mathbb{R}^{m\times m}$	Set of $m \times m$ matrices of real numbers
$\mathbb{N}$	set of natural numbers
$\ln$	natural logarithm
$\log$	logarithm with base 10
$\tan^{-1}(x)$	arctangent value of x
$\cos^{-1}(x)$	arccosine value of x
$\sin^{-1}(x)$	arcsine value of x
$(\cdot)^T$	Transpose
$(\cdot)^{-1}$	Inverse
$\otimes$	Kronecker product
$\lvert\mathbf{X}\rvert$	Determinant of matrix $\mathbf{X}$
$\mathrm{Tr}(\mathbf{X})$	Trace of matrix $\mathbf{X}$
$\mathbf{X}^2$	Square of matrix $\mathbf{X}$
$\mathbf{I}_N$	Identity matrix of size N
$\mathrm{diag}(\boldsymbol{x})$	a diagonal matrix with diagonal values from vector $\boldsymbol{x}$
∇f	Gradient of a function f
$\nabla^2 f$	Hessian of a function f.
$\frac{\partial(\cdot)}{\partial x}$	first-order derivative with respect to x
$\frac{\partial^2(\cdot)}{\partial x^2}$	second-order derivative with respect to x
$\mathbf{X} \succeq 0$	$\mathbf{X}$ is a PSD matrix

$\mathbf{X} \succeq \mathbf{Y}$	matrix $\mathbf{X} - \mathbf{Y}$ is a symmetric positive semi-definite
$\mathbf{X} \succ 0$	$\mathbf{X}$ is a positive definite matrix
$\lambda(\mathbf{X})$	Maximum eigenvalue of matrix $\mathbf{X}$
$\\|\boldsymbol{x}\\|$	Euclidean norm of the vector $\boldsymbol{x}$
$\\|\boldsymbol{x}\\|_1$	ℓ_1 norm of the vector $\boldsymbol{x}$
$\\|\mathbf{X}\\|_F$	Frobenious norm of matrix $\mathbf{X}$
$\mathbf{E}(\cdot)$	Statistical expectation
$\circ$	Element wise multiplication.
$\mathrm{sgn}(\cdot)$	signum (or sign) function
$p\left(\mathbf{x}\right)$	probability density function of the random variable $\mathbf{x}$
$x \sim \mathcal{N}(\mu, \sigma^2)$	x is Gaussian random variable with a mean of μ and variance of σ^2
$\mathcal{U}\left(x, y\right)$	uniform distribution taking values between x and y
$\boldsymbol{x} \in \mathcal{Y}$	$\boldsymbol{x}$ is element of the set $\mathcal{X}$
$\mathbf{x}^t$, $\mathbf{X}_t$	values of the vector $\mathbf{x}$ and matrix $\mathbf{X}$ at the t^{th} iteration, respectively