



航天器和导弹制导、导航与控制

# 星图识别

Star Identification

张广军 © 著

张广军 著

# 星图识别

Star Identification

Introduction

Processing of Star Catalog and Star Image

Star Identification Using Modified Triangle Algorithm

Star Identification Using Star Patterns

Star Identification Using Neural Networks

Rapid Star Tracking Using Star Matching Between Adjacent Frames

Hardware Implementation and Performance Test of Star Identification



国防工业出版社  
National Defense Industry Press

## 图书在版编目(CIP)数据

星图识别 / 张广军著. —北京:国防工业出版社,

2011. 8

(航天器和导弹制导、导航与控制丛书)

ISBN 978 - 7 - 118 - 07419 - 2

I. ①星... II. ①张... III. ①星图 - 识别

IV. ①P114.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 171911 号

## 星图识别

著 者 张广军

责任编辑 王 华

出版发行 国防工业出版社(010 - 68428422 010 - 68472764)

地址邮编 北京市海淀区紫竹院南路 23 号,100048

经 售 新华书店

印 刷 北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

开 本 710×960 1/16

印 张 14 $\frac{1}{4}$

印 数 1 - 2000 册


字 数 203 千字

版 印 次 2011 年 8 月第 1 版第 1 次印刷

定 价 56.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

《航天器和导弹制导、  
导航与控制》丛书

Spacecraft   
Guided Missile

顾问

陆元九

屠善澄

梁思礼

主任委员

吴宏鑫

副主任委员

房建成



国防工业出版社

试读结束：需要全本请在线购买：[www.ertongbook.com](http://www.ertongbook.com)

## 致读者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题

和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金  
评审委员会

# 国防科技图书出版基金 第六届评审委员会组成人员

主任委员 刘成海

副主任委员 宋家树 蔡 镭 程洪彬

秘 书 长 程洪彬

副 秘 书 长 邢海鹰 贺 明

## 委员（按姓氏笔画排序）

于景元 才鸿年 马伟明 王小谟 甘茂治  
甘晓华 卢秉恒 邬江兴 刘世参 芮筱亭  
李言荣 李德仁 李德毅 杨 伟 肖志力  
吴有生 吴宏鑫 何新贵 张信威 陈良惠  
陈冀胜 周一宇 赵万生 赵凤起 崔尔杰  
韩祖南 傅惠民 魏炳波



# 《航天器和导弹制导、导航与控制》 丛书编委会

顾 问 陆元九\* 屠善澄\* 梁思礼\*

主任委员 吴宏鑫\*

副主任委员 房建成  
(执行主任)

## 委员 (按姓氏笔画排序)

马广富	王子才*	王 华	王晓东	王 辉
王 巍	史忠科	包为民*	邢海鹰	孙柏林
孙承启	孙敬良*	孙富春	孙增圻	向小丽
任子西	任 章	刘 宇	刘良栋	刘建业
汤国建	严卫钢	李济生*	李俊峰	李铁寿
杨树兴	杨维廉	张广军	张天序	张为华
张春明	张弈群	张履谦*	吴宏鑫*	吴 忠
吴森堂	陆宇平	陈士橹*	陈义庆	陈定昌*

陈祖贵	余梦伦*	孟执中*	周东华	周 军
房建成	段广仁	姚 郁	侯建文	秦子增
夏永江	徐世杰	殷兴良	郭 雷*	郭 雷
唐应恒	高晓颖	黄培康*	黄 琳*	黄瑞松*
曹喜滨	崔平远	梁晋才*	韩 潮	曾广商*
樊尚春	魏春岭			

---

常务委员（按姓氏笔画排序）

孙柏林	任子西	张天序	吴宏鑫*	吴 忠
吴森堂	陈定昌*	孟执中*	周 军	房建成
姚 郁	夏永江	高晓颖	郭 雷	黄瑞松*
魏春岭				
秘 书	全 伟	宁晓琳	崔培玲	孙津济 郑 丹

注：人名有\*者均为院士。

# 总 序

航天器(Spacecraft)是指在地球大气层以外的宇宙空间(太空),按照天体力学的规律运行,执行探索、开发或利用太空及天体等特定任务的飞行器,例如人造地球卫星、飞船、深空探测器等。导弹(Guided Missile)是指携带有效载荷,依靠自身动力装置推进,由制导和导航系统导引控制飞行航迹,导向目标的飞行器,如战略/战术导弹、运载火箭等。

航天器和导弹技术是现代科学技术中发展最快,最引人注目的高新技术之一。它们的出现使人类的活动领域从地球扩展到太空,无论是从军事还是从和平利用空间的角度都使人类的认识发生了极其重大的变化。

制导、导航与控制(Guidance Navigation and Control,GNC)是实现航天器和导弹飞行性能的系统技术,是飞行器技术最复杂的核心技术之一,是集自动控制、计算机、精密机械、仪器仪表以及数学、力学、光学和电子学等多领域于一体的前沿交叉科学技术。

中国航天事业历经 50 多年的努力,在航天器和导弹的制导、导航与控制技术领域取得了辉煌的成就,达到了世界先进水平。这些成就不仅为增强国防实力和促进经济发展起了重大作用,而且也促进了相关领域科学技术的进步和发展。

1987 年出版的《导弹与航天丛书》以工程应用为主,体现了工程的系统性和实用性,是我国航天科技队伍 30 年心血凝聚的精神和智慧成果,是多种专业技术工作者通力合作的产物。此后 20 余年,我国航天器和导弹的制导、导航与控制技术又有了突飞猛进的发展,取得了许多创新性成果,这些成果是航天器和导弹的制导、导航与控制领域的新理论、新方法和新技术的集中体现。为适应新形势的需要,我们决定组织撰写出版《航天器

和导弹制导、导航与控制》丛书。本丛书以基础性、前瞻性和创新性研究成果为主,突出工程应用中的关键技术。这套丛书不仅是新理论、新方法、新技术的总结与提炼,而且希望推动这些理论、方法和技术在工程中推广应用,更希望通过“产、学、研、用”相结合的方式使我国制导、导航与控制技术研究取得更大进步。

本丛书分两个部分:第一部分是制导、导航与控制的理论和方法;第二部分是制导、导航与控制的系统和器部件技术。

本丛书的作者主要来自北京航空航天大学、哈尔滨工业大学、西北工业大学、国防科学技术大学、清华大学、北京理工大学、华中科技大学和南京航空航天大学等高等学校,中国航天科技集团公司和中国航天科工集团公司所属的研究院所,以及“宇航智能控制技术”、“空间智能控制技术”、“飞行控制一体化技术”、“惯性技术”和“航天飞行力学技术”等国家级重点实验室,而且大多为该领域的优秀中青年学术带头人及其创新团队的成员。他们根据丛书编委会总体设计要求,从不同角度将自己研究的创新成果,包括一批获国家和省部级发明奖与科技进步奖的成果撰写成书,每本书均具有鲜明的创新特色和前瞻性。本丛书既可为从事相关专业技术研究和应用领域的工程技术人员提供参考,也可作为相关专业的高年级本科生和研究生的教材及参考书。

为了撰写好该丛书,特别聘请了本领域德高望重的陆元九院士、屠善澄院士和梁思礼院士担任丛书编委会顾问。编委会由本领域各方面的知名专家和学者组成,编著人员在组织和技术工作上付出了很多心血。本丛书得到了中国人民解放军总装备部国防科技图书出版基金资助和国防工业出版社的大力支持。在此一并表示衷心感谢!

期望这套丛书能对我国航天器和导弹的制导、导航与控制技术的人才培养及创新性成果的工程应用发挥积极作用,进一步促进我国航天事业迈向新的更高的目标。

丛书编委会

2010年8月

# 前 言

姿态测量是航天器飞行的重大核心技术,对保证航天器准确入轨和变轨、高性能飞行、可靠对地通信、高精度对地观测,及顺利完成各种空间任务具有重要意义。星敏感器是实现航天器自主姿态测量的核心部件,是通过观测太空中的恒星,以若干个恒星矢量进行航天器在轨飞行阶段的高精度姿态测量。由于星敏感器利用了恒星的天文信息,因此具有自主性好、精度高、工作可靠等特点,在航天飞行中具有广阔应用前景(天文导航)。

一般而言,星敏感器至少包含两个工作模式,即初始姿态捕获(Initial Attitude Establishment)模式和跟踪(Tracking)模式。在星敏感器进入工作状态的初始时刻或者由于故障遇到姿态丢失(Lost in Space)的情况下,星敏感器转入初始姿态捕获模式。在这个阶段,由于完全没有先验的姿态信息,需要进行全天星图识别。一旦获得初始姿态,星敏感器即进入跟踪模式。全天自主的星图识别是星敏感器技术中的一项关键技术,也是研究的重点和难点。

星图识别涉及天文学、图像处理、模式识别、信号与数据处理及计算机技术等诸多学科领域,内容十分广泛。本书总结和提炼了作者研究组 10 多年星图识别的研究成果,共分 7 章,并按照星图识别的基础知识、星表与星图预处理、算法原理与过程、硬件实现及性能测试的顺序来安排。

第 1 章介绍了与星图识别相关的天文基础知识,概述了天文导航原理,并简要介绍了星敏感器和星图识别的基本原理,总结了现有星图识别算法与发展趋势。现有星图识别算法较多,由于篇幅有限,本章仅对代表性的算法进行了介绍,有兴趣的读者可查阅相关文献。第 2 章介绍了星图识别的前期基础性工作,包括星表划分、导航星筛选与双星处理、星图模拟

生成、星点质心细分定位、星点质心误差校准。第3章简要介绍了现有三角形星图识别方法,重点讨论了两种改进的三角形星图识别算法,即采用角距匹配的改进三角形算法和采用 $P$ 向量的星图识别算法。第4章简要介绍了栅格算法,重点讨论了三种采用星模式的星图识别算法,即采用径向和环向分布特征的星图识别算法、采用Log-Polar变换的星图识别算法、无标定参数的星图识别算法。第5章简要介绍了神经网络的基本原理,重点讨论了两种采用神经网络的星图识别算法,即采用星向量矩阵特征的神经网络星图识别算法和采用混合特征的神经网络星图识别算法。第6章介绍了星敏感器的跟踪模式,重点讨论了采用帧间星点匹配的快速星跟踪算法,并给出了仿真实验结果。第7章以RISC处理器为例,介绍了星图识别算法的硬件实现过程,并通过测试实例分别对星图识别算法半实物仿真验证和外场观星测试的内容进行了阐述。

多年来,作者研究组在星图识别研究工作中获得了多项研究基金与计划资助,包括民用航天重大研究项目、国家自然科学基金、国家863计划和航天工程型号项目。作者就对这些研究基金和研究计划给予支持与资助的原国防科工委科技质量司、国家自然科学基金委员会、科技部863计划联合办公室、中国航天科技集团公司八院等有关部门表示感谢。

本书是作者研究组多年来从事星图识别的研究成果的结晶。作者十分感谢研究组的魏新国副教授、江洁教授、樊巧云博士及郝雪涛、杨建、申娟、李霄等同学,本书介绍的许多工作是由他们具体完成的。同时,对国防工业出版社将本书纳入《航天器和导弹制导、导航与控制》丛书并以专著形式出版表示衷心感谢。

本书参考和引用的参考文献与研究成果已在文中列出或说明,对相关内容感兴趣的读者可直接查阅。

星图识别内容广泛,涉及诸多学科领域。由于作者水平有限,经验不足,书中不妥之处在所难免,敬请广大读者、同行与专家批评指正。

张广军

2010年12月于北京航空航天大学

# 目 录

## CONTENTS

<b>第 1 章 概论</b>	1	<b>Chapter 1 Introduction</b>	1
1.1 天文基础知识	2	1.1 Fundamental knowledge of astronomy	2
1.1.1 恒星的特性	2	1.1.1 Characteristics of stars	2
1.1.2 天球及天球坐标系	3	1.1.2 Celestial sphere and its reference frame	3
1.1.3 星表	4	1.1.3 Star catalog	4
1.2 天文导航概述	5	1.2 Celestial navigation	5
1.2.1 天文导航基本原理	6	1.2.1 Principle of celestial navigation	6
1.2.2 天文导航特点及系统组成	9	1.2.2 Characteristics of celestial navigation and its framework	9
1.3 星敏感器简介	10	1.3 Introduction of	10
1.3.1 星敏感器原理及结构	11	1.3.1 Principle of star sensor and its structure	11
1.3.2 星敏感器技术现状	12	1.3.2 Technical status of star sensor	12
1.3.3 星敏感器技术发展趋势	16	1.3.3 Development trends of star sensor	16
1.4 星图识别简介	17	1.4 Introduction of star identification	17
1.4.1 星图识别基本原理	18	1.4.1 Principle of star identification	18
1.4.2 星图识别基本过程	19	1.4.2 General process of star identification	19
1.4.3 星图识别性能评价	21	1.4.3 Evaluation of star identification	21
1.5 星图识别算法与发展趋势	22	1.5 Star identification algorithms and the development trends	22
1.5.1 子图同构类算法	22	1.5.1 Subgraph isomorphism class algorithms	22
1.5.2 模式识别类算法	24	1.5.2 Star pattern class algorithms	24
1.5.3 其他识别算法	27	1.5.3 Other algorithms	27
1.5.4 星图识别算法发展趋势	29	1.5.4 Development trends of star identification algorithms	29
参考文献	29	References	29
<b>第 2 章 星表与星图处理</b>	32	<b>Chapter 2 Processing of star catalog and star image</b>	32
2.1 星表划分	32	2.1 Star catalog partition	32
2.1.1 导航星表	33	2.1.1 Guide star catalog	33

2.1.2	常用星表划分方法	34	2.1.2	Current methods of star catalog partition	34
2.1.3	内接正方体星表划分方法	35	2.1.3	Star catalog partition using inscribed cube method	35
2.2	导航星筛选与双星处理	37	2.2	Guide star selecting and double star processing	37
2.2.1	导航星筛选	37	2.2.1	Guide star selecting	37
2.2.2	双星处理	40	2.2.2	Double star processing	40
2.3	星图模拟生成	42	2.3	Star image simulation	42
2.3.1	星敏传感器成像模型	43	2.3.1	Image model of star sensor	43
2.3.2	星图数字图像合成	47	2.3.2	Composition of digital star image	47
2.4	星点质心细分定位	49	2.4	Star spot centroiding	49
2.4.1	星图图像预处理	49	2.4.1	Pre-processing of star image	49
2.4.2	细分定位方法	51	2.4.2	Centroiding methods	51
2.4.3	仿真实验及结果分析	54	2.4.3	Simulations and results analysis	54
2.5	星点质心误差校准	58	2.5	Calibration of centroiding error	58
2.5.1	星点质心定位的像素频率误差	59	2.5.1	Pixel frequency error of star spot centroiding	59
2.5.2	像素频率误差的建模	61	2.5.2	Modeling of pixel frequency error	61
2.5.3	像素频率误差的校准	62	2.5.3	Calibration of pixel frequency error	62
参考文献		63	References		63
<b>第3章 改进的三角形星图识别</b>			<b>Chapter 3 Star identification using modified triangle algorithm</b>		
3.1	现有三角形星图识别方法	66	3.1	Current triangle algorithm	66
3.1.1	三角形星图识别基本原理	66	3.1.1	Principle of triangle algorithm	66
3.1.2	三角形星图识别存在的问题	68	3.1.2	Problems with triangle algorithm	68
3.2	采用角距匹配的星图识别	70	3.2	Modified triangle algorithm using angular distance matching	70
3.2.1	星对的生成和存储	70	3.2.1	Star pairs generation and storing	70
3.2.2	观测三角形的选取	72	3.2.2	Selecting of measured triangles	72
3.2.3	三角形的识别	74	3.2.3	Identification of measured triangles	74
3.2.4	验证过程	75	3.2.4	Process of verification	75
3.2.5	仿真实验及结果分析	79	3.2.5	Simulations and results analysis	79
3.3	采用 $P$ 向量的星图识别	84	3.3	Modified triangle algorithm using $P$ vector	84
3.3.1	$P$ 向量的生成	85	3.3.1	$P$ vector generation	85
3.3.2	导航数据库的构造	88	3.3.2	Construction of guide database	88
3.3.3	匹配识别	90	3.3.3	Matching and identification	90
3.3.4	仿真实验及结果分析	92	3.3.4	Simulations and results analysis	92
参考文献		96	References		96



<b>第 4 章 采用星模式的星图识别</b>	<b>97</b>	<b>Chapter 4 Star identification using star patterns</b>	<b>97</b>
4.1 栅格算法简介	98	4.1 Introduction of grid algorithm	98
4.1.1 栅格算法基本原理	98	4.1.1 Principle of grid algorithm	98
4.1.2 栅格算法存在的缺点	99	4.1.2 Deficiency of grid algorithm	99
4.2 采用径向和环向特征的星图识别	100	4.2 Star identification using radial and cyclic star patterns	100
4.2.1 特征模式的生成与存储	101	4.2.1 Star patterns generation and storing	101
4.2.2 识别过程	104	4.2.2 Process of identification	104
4.2.3 仿真实验及结果分析	107	4.2.3 Simulations and results analysis	107
4.3 采用 Log-Polar 变换的星图识别	112	4.3 Star identification using Log-Polar transform	112
4.3.1 Log-Polar 变换原理	112	4.3.1 Principle of Log-Polar transform	112
4.3.2 采用 Log-Polar 变换的星图特征提取	114	4.3.2 Star patterns generation using Log-Polar transform	114
4.3.3 星图的特征字符串编码及识别	116	4.3.3 Star pattern string coding and recognition	116
4.3.4 仿真实验及结果分析	121	4.3.4 Simulations and results analysis	121
4.4 无标定参数的星图识别	124	4.4 Star identification without calibration parameters	124
4.4.1 星敏传感器内参数对星图识别的影响	125	4.4.1 Influence of intrinsic parameters of star sensor on star identification	125
4.4.2 与标定参数无关的特征量的提取	126	4.4.2 Generation of star patterns independent of calibration parameters	126
4.4.3 匹配识别	129	4.4.3 Matching and identification	129
4.4.4 仿真实验及结果分析	132	4.4.4 Simulations and results analysis	132
参考文献	138	References	138
<b>第 5 章 采用神经网络的星图识别</b>	<b>139</b>	<b>Chapter 5 Star identification using neural networks</b>	<b>139</b>
5.1 神经网络简介	140	5.1 Introduction of neural networks	140
5.1.1 神经网络基本概念	140	5.1.1 Concepts of neural networks	140
5.1.2 神经网络基本特征	141	5.1.2 Characteristics of neural networks	141
5.1.3 神经网络基本原理	142	5.1.3 Principle of neural networks	142
5.2 采用星向量矩阵特征的神经网络星图识别	144	5.2 Neural networks based star identification using features of star vector matrix	144
5.2.1 自组织竞争神经网络	144	5.2.1 Self organized competitive neural networks	144
5.2.2 导航星特征的提取与存储	146	5.2.2 Star patterns generation and storing	146
5.2.3 自组织竞争神经网络的构建	149	5.2.3 Construction of self organized competitive neural networks	149
5.2.4 仿真实验及结果分析	151	5.2.4 Simulations and results analysis	151