

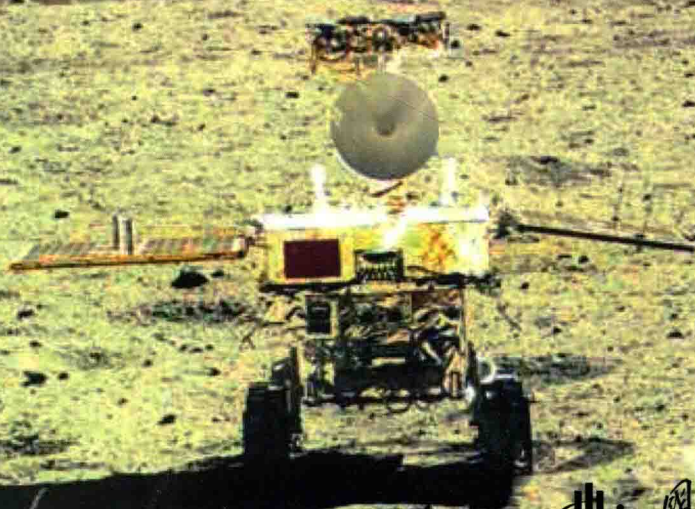


国防科技图书出版基金

周建亮 吴风雷 高薇 著

Teleoperation of Lunar Rover

月面遥操作技术



国防工业出版社
National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

月面遥操作技术

Teleoperation of Lunar Rover

周建亮 吴风雷 高 薇 著



国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

月面遥操作技术 / 周建亮, 吴风雷, 高薇著. —北京: 国防工业出版社, 2017. 4

ISBN 978 - 7 - 118 - 11146 - 0

I. ①月… II. ①周… ②吴… ③高… III. ①月球探测器 - 飞行控制 IV. ①V476.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 111173 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

腾飞印务有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 710 × 1000 1/16 印张 17½ 字数 315 千字

2017 年 4 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 86.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010)88540777

发行邮购: (010)88540776

发行传真: (010)88540755

发行业务: (010)88540717

致 读 者

本书由中央军委装备发展部国防科技图书出版基金资助出版。

为了促进国防科技和武器装备发展,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。这是一项具有深远意义的创举。

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中央军委装备发展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,由中央军委装备发展部国防工业出版社出版发行。

国防科技和武器装备发展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。开展好评审工作,使有限的基金发挥出巨大的效能,需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,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 第七届评审委员会组成人员

主任委员 潘银喜

副主任委员 吴有生 傅兴男 赵伯桥

秘书长 赵伯桥

副秘书长 邢海鹰 谢晓阳

委员 才鸿年 马伟明 王小谟 王群书

(按姓氏笔画排序)

甘茂治 甘晓华 卢秉恒 巩水利

刘泽金 孙秀冬 芮筱亭 李言荣

李德仁 李德毅 杨伟 肖志力

吴宏鑫 张文栋 张信威 陆军

陈良惠 房建成 赵万生 赵凤起

郭云飞 唐志共 陶西平 韩祖南

傅惠民 魏炳波

前 言

世界各国的探月活动一般以飞行探测为先导,进而开展在月球表面的巡视探测。传统的飞行探测以轨道力学为基础,其飞行控制过程具有很强的可预知性,而月球表面的巡视探测以巡视器所处的局部月面环境为基础,在完成远程环境感知和地形重构后,由地面控制人员实时确定巡视器巡视勘察的路线和具体探测行为。我国在成功完成“嫦娥”一号、“嫦娥”二号的绕月探测任务后,落月并开展月面巡视探测成为月球探测工程实践的另一热点。控制巡视器月面探测的遥操作过程由于有别于以前大家熟知的以可预报轨道为基础的飞行控制过程,也成为当前航天测控研究的前沿。

本书第1章概要的介绍了月面巡视器遥操作任务概况以及所涉及的关键技术,并归纳了国内外巡视器遥操作现状;第2章详述地形重构过程中的图像数据解析、预处理、特征点匹配、三维解算、地形图产品生成的方法,以及采用计算机视觉相关原理实现巡视器在月面行进中导航点精确定位以及机械臂探测目标点的定位方法;第3章重点介绍三层规划(任务整体规划、探测周期规划和导航单元规划)的规划内容和规划方法;第4章分析月面环境因素对路径规划的影响,依据月面综合环境图,比较路径搜索方法,寻求满足工程实施需求的优化的路径;第5章详细介绍了机械臂控制涉及的工作环境建模、安全工作区间分析和运动路径规划等;第6章主要介绍了通过图像数据来实现落月后的着陆点定位、行进停泊点定位和机械臂探测点定位的理论基础,然后根据模式分工介绍定位流程,并分析探测点定位的精度;第7章重点介绍如何通过建立地球和月球之间的相对运动关系,实现对巡视器精确定位的方法,并详细介绍与月面巡视器高精度无线电测量密切相关的VLBI宽带相关处理、窄带DOR/DOD相关处理、SBI相关处理、PCAL信号相位校正、测量模型与介质修正、干涉测量观测纲要等内容;第8章以“嫦娥”三号任务巡视器为例,描述其在月球表面进行巡视勘察的遥操作过程。

本书完成过程中,国防科工局探月与航天工程中心、航天科技集团五院、原总装备部机关、有关基地、研究所及北京航天飞行控制中心的领导和专家提出了许多宝贵意见,在此致以深深的感谢。同时感谢北京航天飞行控制中心李立春、高宇辉、程肖、谢圆、王保丰、张宇、陈略、张彦等在编写过程中提供的宝贵材料。

由于本书涉及的学科范围广、数学模型及算法较多,技术难度大,加上编写时间仓促,谬误之处恳请读者批评指正。

编者

目 录

第1章 概论	1
1.1 月面巡视器遥操作现状	2
1.1.1 国外研究现状	2
1.1.2 国内研究现状	4
1.2 月面巡视器遥操作	5
1.2.1 月面环境介绍	5
1.2.2 月面巡视器的作用及组成	6
1.2.3 月面巡视器遥操作概念及模式	7
1.3 月面巡视器遥操作系统	9
1.3.1 硬件系统	10
1.3.2 软件系统	11
1.4 本书内容概况	12
参考文献	13
第2章 地形重构	14
2.1 成像测量基础	14
2.1.1 坐标系定义	14
2.1.2 数字图像成像理论	18
2.1.3 月面探测成像模型	23
2.2 图像预处理	25
2.2.1 图像解析与组织	25
2.2.2 图像处理	27
2.3 图像匹配	30
2.3.1 图像校正	30
2.3.2 特征点提取	32
2.3.3 图像匹配算法	35
2.3.4 立体图像匹配	42

2.3.5 序列图像匹配	44
2.4 地形构建	50
2.4.1 点云解算	50
2.4.2 网格剖分	54
2.4.3 数字高程	55
2.4.4 正射影像	56
2.4.5 融合与截取	58
2.5 小结	58
参考文献	59
第3章 任务规划	60
3.1 分层规划和约束	60
3.1.1 分层规划	61
3.1.2 规划约束	62
3.2 任务规划的概念模型	68
3.2.1 时态规划的基本概念与术语	68
3.2.2 时态规划概念的运用	70
3.3 规划任务描述语言	72
3.3.1 任务描述的结构	73
3.3.2 状态的描述方法	74
3.3.3 动作的描述方法	75
3.4 任务规划的建模与描述	76
3.4.1 操作建模	77
3.4.2 任务实例建模	80
3.5 规划求解方法	81
3.5.1 任务规划的内容	81
3.5.2 任务规划算法	82
3.5.3 启发函数设计	83
3.6 小结	84
参考文献	85
第4章 路径规划	86
4.1 月球表面环境图	88
4.1.1 坡度坡向计算	88
4.1.2 粗糙度计算	93

4.1.3	阶梯边缘检测计算	97
4.1.4	通视性计算	101
4.1.5	导引/排斥代价计算	105
4.2	路径搜索	108
4.2.1	搜索算法	110
4.2.2	代价计算	113
4.2.3	优化目标	113
4.3	路径优化	115
4.3.1	关键路径点提取	115
4.3.2	路径点曲线拟合	116
4.4	小结	118
	参考文献	119
第5章	机械臂控制	121
5.1	机械臂运动学	122
5.1.1	D-H 参数规则	123
5.1.2	坐标系定义	124
5.1.3	机械臂运动学方程	125
5.1.4	机械臂运动学的应用	133
5.2	机械臂逆运动学	137
5.2.1	代数解法	138
5.2.2	几何解法	139
5.3	轨迹规划与生成	143
5.3.1	关节空间规划	144
5.3.2	笛卡儿空间规划	147
5.4	无碰撞路径规划	150
5.4.1	问题描述	150
5.4.2	基于随机采样的路径规划	151
5.4.3	碰撞检测	153
5.4.4	路径平滑	155
5.5	小结	155
	参考文献	156
第6章	视觉导航定位	157
6.1	理论基础	157
6.1.1	动态序列图像定位	157

6.1.2	静态立体图像定位	164
6.1.3	鱼眼立体图像定位	167
6.2	模式分工	169
6.2.1	着陆点定位	169
6.2.2	导航点定位算法	171
6.2.3	机械臂探测目标点定位算法	174
6.3	小结	177
	参考文献	177
第7章	无线电定位与导航	180
7.1	时空参考框架	181
7.1.1	时间系统的定义	181
7.1.2	时间系统的转换	183
7.1.3	坐标系统的定义	185
7.1.4	坐标系统转换	186
7.2	无线电测量原理	191
7.2.1	USB/UXB 测量	191
7.2.2	干涉测量	204
7.3	无线电测量观测模型	211
7.3.1	观测方程定义	211
7.3.2	观测方程及偏导数	212
7.4	无线电测量误差修正	218
7.4.1	传播介质修正	218
7.4.2	设备零值修正	222
7.4.3	数据时标修正	224
7.4.4	测距解模糊	225
7.4.5	站间钟差修正	225
7.5	无线电定位估值理论	226
7.5.1	定位估值方法	226
7.5.2	单目标定位算法	227
7.5.3	多目标定位算法	229
7.6	小结	231
	参考文献	231
第8章	“玉兔”号巡视器的遥操作	233
8.1	“玉兔”号巡视器概况	233
8.1.1	“玉兔”号巡视器的组成及功能	233

8.1.2	“玉兔”号巡视器工作能力	235
8.1.3	“玉兔”号巡视器工作模式	236
8.2	“玉兔”号巡视器月面工作约束条件分析	237
8.2.1	地形约束	238
8.2.2	光照约束	238
8.2.3	测控约束	238
8.2.4	热控约束	238
8.2.5	工作模式约束	239
8.3	“玉兔”号巡视器与着陆器分离控制过程	239
8.3.1	分离条件约束	239
8.3.2	分离过程	239
8.3.3	分离控制	240
8.4	“玉兔”号巡视器月面遥操作工作过程	242
8.4.1	巡视器遥操作工作流程	243
8.4.2	任务整体规划	244
8.4.3	探测周期规划	247
8.4.4	导航单元规划	252
8.5	“玉兔”号巡视器月食前后控制过程	260
8.5.1	月食前控制过程	260
8.5.2	月食后控制过程	261
8.6	“玉兔”号巡视器月夜休眠唤醒控制过程	261
8.6.1	寻找休眠点过程	262
8.6.2	月夜休眠设置过程	263
8.6.3	休眠唤醒控制过程	263
8.7	小结	263
	参考文献	263

CONTENTS

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Teleoperation Status of Lunar Rover	2
1.1.1 Foreign Research Status	2
1.1.2 Domestic Research Status	4
1.2 Teleoperation of Lunar Rover	5
1.2.1 Introduction of Lunar Environment	5
1.2.2 Concept and Composition of Lunar Rover	6
1.2.3 Teleoperation Concept and Pattern of Lunar Rover	7
1.3 Teleoperation System of Lunar Rover	9
1.3.1 The Hardware System	10
1.3.2 The Software System	11
1.4 Profile of the Book	12
References	13
Chapter 2 Terrain Reconstrction	14
2.1 Principle of Measurement Based on Image	14
2.1.1 Coordinates Definition	14
2.1.2 Principle of Digital Imaging	18
2.1.3 Imaging Model of Lunar Surface Exploring	23
2.2 Image Processing	25
2.2.1 Image Decoding and Organizing	25
2.2.2 Image Preprocessing	27
2.3 Image Matching	30
2.3.1 Image Rectification	30
2.3.2 Features Extraction*	32
2.3.3 Image Matching Algorithm	35
2.3.4 Stereo Images Matching	42

2.3.5	Image Sequence Matching	44
2.4	Terrain Construction	50
2.4.1	Point Cloud Calculation	50
2.4.2	Mesh Generation	54
2.4.3	Digital Elevation	55
2.4.4	Digital Orthogonal	56
2.4.5	Mergence and Splitting	58
2.5	Summary	58
	References	59
Chapter 3	Mission Planning	60
3.1	Hierarchical Planning and Constraints	60
3.1.1	Hierarchical Planning	61
3.1.2	Planning Constraints	62
3.2	Conceptual Model of Mission Planning	68
3.2.1	Basic Concepts and Terminology of Temporal Planning	68
3.2.2	The Use of Temporal Planning Concepts	70
3.3	Planning Mission Description Language	72
3.3.1	Mission Description Structure	73
3.3.2	Status Description Method	74
3.3.3	Operation Description Method	75
3.4	Modeling and Description of Mission Planning	76
3.4.1	Operation Model	77
3.4.2	Modeling Mission Instance	80
3.5	Planning Solution	81
3.5.1	The content of Mission Planning	81
3.5.2	Mission Planning Algorithm	82
3.5.3	Design of Heuristic Function	83
3.6	Summary	84
	References	85
Chapter 4	Path Planning	86
4.1	Environment Map of Lunar Surface	88
4.1.1	Algorithm of Slope and Aspect	88
4.1.2	Algorithm of Roughness	93

4. 1. 3	Algorithm of Edge Detection	97
4. 1. 4	Algorithm of Inter – Visibility	101
4. 1. 5	Algorithm of Attraction/Rejection Cost	105
4. 2	Path Searching	108
4. 2. 1	Algorithm of Path Searching	110
4. 2. 2	Calculation of Cost	113
4. 2. 3	Optimization Objective	113
4. 3	Optimization of the Searched Path	115
4. 3. 1	Extracting of the Key Path Points	115
4. 3. 2	Curve Fitting of Path Points	116
4. 4	Summary	118
	References	119
Chapter 5	Manipulator Control	121
5. 1	Manipulator Kinematics	122
5. 1. 1	D – H Kinematic Notation	123
5. 1. 2	Coordinates Definition	124
5. 1. 3	Kinematic Equations of Manipulator	125
5. 1. 4	Application of Manipulator Kinematics	133
5. 2	Inverse Kinematics for Manipulator	137
5. 2. 1	Algebraic Solution	138
5. 2. 2	Geometric Solution	139
5. 3	Trajectory Planning and Generation	143
5. 3. 1	Joint Space Planning	144
5. 3. 2	Cartesian Space Panning	147
5. 4	Collision – free Path Planning	150
5. 4. 1	Problem Description	150
5. 4. 2	Random Sampling Based Path Planning	151
5. 4. 3	Collision Detection	153
5. 4. 4	Path Smoothing	155
5. 5	Summary	155
	References	156
Chapter 6	Visual Navigation and Positioning	157
6. 1	Principle of Visual Positioning	157

6.1.1	Dynamic Sequence Image Positioning	157
6.1.2	Static Stereo Image Positioning	164
6.1.3	Fisheye Static Stereo Image Positioning	167
6.2	Positioning Mode	169
6.2.1	Landing Point Positioning	169
6.2.2	Mooring Point Positioning	171
6.2.3	Manipulator Arm's Detection Point Positioning	174
6.3	Summary	177
	References	177

Chapter 7 Positioning and Navigation of Radio

	Measurement	180
7.1	Space - time Reference Frame	181
7.1.1	Definition of Time Systems	181
7.1.2	Time Systems Transformation	183
7.1.3	Definition of Coordinate Systems	185
7.1.4	Coordinate Systems Transformation	186
7.2	Radio Measurement Technique	191
7.2.1	UXB/USB Measurement	191
7.2.2	Interferometry	204
7.3	Observation Model of Radio Measurement	211
7.3.1	Definition of Observation Equation	211
7.3.2	Observation Equation and Partial Derivatives	212
7.4	Error Correction of Radio Measurement	218
7.4.1	Correction of Propagation Medium	218
7.4.2	Error Correction of Device Zero	222
7.4.3	Time Scale Correction	224
7.4.4	Ranging Solving Ambiguity	225
7.4.5	Clock Error Correction	225
7.5	Valuation Theory of Radio Positioning	226
7.5.1	Valuation Method of Positioning	226
7.5.2	Positioning Algorithm of Simple Object	227
7.5.3	Positioning Algorithm of Multiple Object	229
7.6	Summary	231
	References	231

Chapter 8 Teleoperation of “Jade Rabbit”	233
8.1 “Jade Rabbit” Profile	233
8.1.1 Composition and Function of “Jade Rabbit”	233
8.1.2 Ability of “Jade Rabbit” to Work	235
8.1.3 Working Mode of “Jade Rabbit”	236
8.2 Lunar Surface Constraints Analysis of “Jade Rabbit”	237
8.2.1 Terrain Constraints	238
8.2.2 Light Constraints	238
8.2.3 Measurement and Control Constraints	238
8.2.4 Thermal Control Constraints	238
8.2.5 Working Mode Constraints	239
8.3 “Jade Rabbit” and Lander Separation Control Process	239
8.3.1 The Separation Conditions	239
8.3.2 The Separation Process	239
8.3.3 The Separation Control	240
8.4 Working Process of “Jade Rabbit”	242
8.4.1 Working Process	243
8.4.2 Task Overall Planning	244
8.4.3 Detection Cycle Planning	247
8.4.4 Navigation Unit Planning	252
8.5 Control Process of “Jade Rabbit” During the Eclipse	260
8.5.1 Control Process Before Eclipse	260
8.5.2 Control Process after Eclipse	261
8.6 Lunar Night Dormancy/Wakingup Control Process	261
8.6.1 Searching for Dormancy Site	262
8.6.2 Lunar Night Dormancy Control Process	263
8.6.3 Waking Control Process	263
8.7 Summary	263
References	263