

高等学校通用教材

# 天文导航原理及应用<sub>摇</sub>

房建成摇宁晓琳摇编著

北京航空航天大学出版社

## 内 容 简 介

本教材是作者在近几年研究成果的基础上,结合北京航空航天大学天文导航的教学经验编写而成。全书共分 4 部分 12 章。第 1 部分为第 1 章~ 第 4 章,介绍天文导航的基础知识,包括天文导航的相关基础知识和基本理论;第 2 部分为第 5 章~ 第 8 章,介绍舰船航海中的天文导航技术,包括舰船天文导航的基本原理和主要方法;第 3 部分为第 9 章~ 第 11 章,介绍空间飞行器的自主天文导航技术,系统论述了包括地球卫星和深空探测器在内的空间飞行器的自主天文导航原理、方法及系统分析等;第 4 部分为第 12 章,介绍导弹和飞机中的惯性/天文组合导航技术,主要阐述了作者课题组将惯性/天文组合导航应用在弹道导弹和飞机上取得的部分研究成果;第 4 部分即第 12 章,对天文导航未来的发展趋势进行了展望。

本教材既可作为高等院校相关专业高年级本科生、研究生的天文导航课程教材,也可供从事导航技术研究和应用领域的工程技术人员参考。

摇图书在版编目(CIP)数据

摇天文导航原理及应用 房建成等编著 北京:北京航空航天大学出版社, 2005.12

摇 I. 房... II. 房... III. 天文导航:航海导航

IV. 天文导航

摇中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 123456 号

## 天文导航原理及应用

房建成摇宁晓琳摇编著  
责任编辑摇韩文礼

\*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 3 号(邮编 100191)摇发行部电话:010-62770175 摇传真:010-62770176

网址: <http://www.buaapress.com> 摇电子邮箱: [bjb@buaapress.com](mailto:bjb@buaapress.com)

涿州市新华印刷有限公司印装摇各地书店经销

\*

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 12 摇字数 300 千字

2005 年 12 月第 1 版摇 2005 年 12 月第 1 次印刷摇印数 1000 册

摇 ISBN 7-302-12345-6 摇定价 30.00 元

# 前言

天文导航技术是一门既古老又年轻的技术,起源于航海,发展于航空,辉煌于航天。天文航海技术是指在海上通过观测天体来决定船舶位置的各种方法。世界古代远洋航海史也是天文航海的发展历史。在现代无线电导航技术出现之前,天文导航一直是舰船远洋航海中唯一的导航技术,即便是在今天,其导航地位依然不容动摇。在《1979年日内瓦公约》(海事国际公约)中仍要求航海人员必须具有利用天体确定船位和判断最终获得船位精度以及利用天体确定罗经差的能力。天文导航系统由于受地面大气的影响较大,因而其应用平台更适合于包括飞机、导弹在内的各种高空、远程飞行器。

随着人类航空技术的发展,天文导航的应用领域也从航海发展到航空,第二次世界大战中,飞机就采用天文导航作为主要导航方式,以无线电导航作为辅助手段,当时以六分仪为基础的天文导航技术在航海和航空中得到了广泛应用,不仅对舰船和飞机上六分仪的设计进行了改进,也促进了导航方法的发展。

航天事业的发展迎来了天文导航技术的辉煌,天基平台是天文导航技术的最佳应用环境。20世纪中叶,载人航天技术极大地促进了天文导航技术在航天领域的发展,阿波罗登月和苏联空间站都使用了天文导航技术。20世纪80年代以来,美、德、英、丹麦等国均致力于空间飞行器天文导航技术的研究,至今已有一种天文导航系统在卫星、飞船、空间站上得到应用。近年来,随着新一轮月球和火星探测等一系列深空探测活动的开展,天文导航以其自主性强、精度高、成本低廉等特点在深空探测领域也得到了越来越广泛的应用。

天文导航技术在航海、航天和航空各方面得到蓬勃发展,目前已成为舰船、卫星和深空探测器必不可少的关键技术,同时还是中远程弹道导弹、运载火箭和高空远程侦察机等的重要辅助导航手段,而在未来人类探索宇宙的星际航行中也必将发挥重要的作用。

本教材系统地介绍了舰船、空间飞行器(地球卫星、深空探测器)的天文导航基本原理和方法,以及惯性-天文组合导航技术在弹道导弹和飞机上的应用技术。全书共分4部分,14章。第1部分包括第1~3章,主要介绍了天文导航的相关基础知识和基本理论。第1章绪论,主要综述了天文导航技术的发展过程,简要介绍了天体、常用坐标系和时间系统等天文导航的基础知识;第2章简要介绍了天文导航中需要用到的球面几何和球面三角知识;第3章和第4章详细介绍了各种导航坐标系和时间系统,这分别是天文导航的空间和时间基准;第5章介绍了导航天文学方面的知识。天文导航起源于航海,因此本书在第2部分系统地介绍了舰船航海中的天文导航技术,包括第6~8章。第6章介绍了天文航海中用到的各种测量仪器,包括

六分仪和天文钟,第 苑章则从天体高度和天体投影点等概念出发,介绍了天文航海的基本原理,并给出了航海天文历的组成和使用方法,第 愿和第 怨章则重点介绍了高度差法等求舰位的基本方法。第 猿部分包括第 苑- 愿章,介绍了天体敏感器、航天器轨道动力学方程及航天器自主天文导航基本原理、自主天文导航系统滤波方法等天文导航的重要理论知识,并对地球卫星和深空探测器的自主天文导航原理、数学模型和计算机仿真结果以及相应的系统分析进行了全面、深入的研究;由于天文导航研究中进行空间飞行实验的难度较大,本教材还专门介绍了一种天文导航半物理仿真系统的设计实现方法以及星图匹配和星体识别等关键技术。第 源部分包括第 苑- 愿章,该部分首先介绍了惯性-天文组合导航的原理与方法,并在此基础上介绍了惯性-天文组合导航半物理仿真系统和惯性-天文组合导航系统的应用。最后在第 愿章对天文导航未来的发展趋势进行了展望。

自“十五”以来,随着我国国防技术的发展,天文导航技术在航天、航空、航海领域的需求日益强烈,技术发展十分迅速。作者在多年从事天文导航技术研究的基础上,从 圆园园园年起为北京航空航天大学精密仪器及机械和导航、制导与控制专业本科生和硕士研究生开设了“天文导航原理与应用”课程,几年来该课程受到校内本科生、研究生和校外有关技术人员的欢迎。本教材是作者及课题组在近几年研究成果的基础上,结合天文导航的教学经验编写而成,以满足相关专业高年级本科生、研究生及广大科研人员对这一新兴交叉学科领域知识的迫切需求。课题组博士后杨照华、博士生全伟、徐帆参加了本教材的部分编写工作,博士生吴琳、硕士生宋婷婷、王晨、王科、高翌春等参加了本教材的整理工作。此外,本教材部分内容还参考了国内外同行专家、学者的最新研究成果,在此向他们致以诚挚的谢意!

由于天文导航内容涉及多门学科前沿,其理论和应用也还在不断发展中,加之作者水平时间有限,书中不妥和错误之处恳请广大同行、读者批评指正。

感谢国家自然科学基金委、国家“八六三”计划办公室、国防科工委民用航天预研项目管理办公室、总装备部预研项目管理办公室以及北京航空航天大学在科研工作中给予的支持和帮助,感谢北京航空航天大学出版社在本教材出版过程中给予的大力支持,最后感谢在本教材撰写过程中所有给予关心、支持和帮助的人们!

作 者  
圆园园年 远月

# 目 录

## 第 1 部分 天文导航的基础知识

### 第 1 章 绪论

1.1 引言	猿
1.2 天文导航技术的特点和应用	猿
1.3 天文导航的历史和发展现状	源
1.4 天文导航的历史	源
1.5 天文导航发展现状	远
思考题与习题	怨

### 第 2 章 球面几何和球面三角

2.1 引言	苑
2.2 球面三角	苑
2.3 球面几何	苑
2.4 球面三角形	苑
2.5 导航三角形	苑
2.6 导航三角形	苑
2.7 分割导航三角形	苑
思考题与习题	怨

### 第 3 章 导航坐标系

3.1 引言	苑
3.2 天球坐标系	苑
3.3 天球上基本点、线、圆	苑
3.4 赤道坐标系	苑
3.5 地平坐标系	苑
3.6 黄道坐标系	苑
3.7 空间坐标系	苑
3.8 惯性坐标系	苑

摇摇摇摇 猿猿猿猿地球固联坐标系 .....	圆
摇摇摇摇 猿猿猿猿地理坐标系 .....	圆
摇摇摇摇 猿猿猿猿载体坐标系 .....	圆
摇摇思考题与习题 .....	圆
第 源章 摇摇时间系统	
摇摇源源 摇摇引摇摇言 .....	圆
摇摇源源 摇摇时间的基本概念 .....	圆
摇摇摇摇 源源源源时间在物理学上的解释 .....	圆
摇摇摇摇 源源源源时间在哲学上的解释 .....	圆
摇摇摇摇 源源源源时间计量工具的发展 .....	圆
摇摇源源 源源恒星日、太阳日和平阳日 .....	圆
摇摇摇摇 源源源源恒星日和太阳日 .....	圆
摇摇摇摇 源源源源平阳日 .....	圆
摇摇摇摇 源源源源时摇摇差 .....	圆
摇摇源源 源源地方时和区时 .....	圆
摇摇摇摇 源源源源地方时、世界时及其相互关系 .....	圆
摇摇摇摇 源源源源区摇摇时 .....	圆
摇摇摇摇 源源源源日界线 .....	圆
摇摇源源 源源各种时间系统 .....	圆
摇摇摇摇 源源源源世界时系统 .....	圆
摇摇摇摇 源源源源历书时系统 .....	圆
摇摇摇摇 源源源源原子时系统 .....	圆
摇摇源源 源源历法的基本概念 .....	圆
摇摇摇摇 源源源源太阴历 .....	圆
摇摇摇摇 源源源源太阳历 .....	圆
摇摇摇摇 源源源源阴阳历 .....	圆
摇摇思考题与习题 .....	圆
第 缘章 摇摇航天天文学	
摇摇缘源 摇摇引摇摇言 .....	圆
摇摇缘源 摇摇宇宙和天体 .....	圆
摇摇摇摇 缘源源源宇摇摇宙 .....	圆
摇摇摇摇 缘源源源天摇摇体 .....	圆
摇摇摇摇 缘源源源太阳系 .....	圆



摇摇苑源摇摇天体投影点的位置和时间 .....	苑源
摇摇摇摇 苑源摇摇天体投影点的坐标 .....	苑源
摇摇摇摇 苑源摇摇导航和天文学中的时间测量 .....	苑源
摇摇苑源摇摇航海天文历 .....	苑源
摇摇摇摇 苑源摇摇天文历简介 .....	苑源
摇摇摇摇 苑源摇摇航海天文历的组成 .....	苑源
摇摇摇摇 苑源摇摇航海天文历的使用 .....	苑源
摇摇苑源摇摇本章小结 .....	苑源
摇摇思考题与习题 .....	苑源
第 愿章 摇摇高度差法求舰位	
摇摇愿源摇摇引言 .....	愿源
摇摇愿源摇摇直接画天文位置圆求舰位法 .....	愿源
摇摇愿源摇摇萨姆纳法 .....	愿源
摇摇愿源摇摇高度差法 .....	愿源
摇摇摇摇 愿源摇摇高度差法的理论基础 .....	愿源
摇摇摇摇 愿源摇摇高度差法 .....	愿源
摇摇愿源摇摇解析高度差法 .....	愿源
摇摇愿源摇摇移动舰位的确定 .....	愿源
摇摇愿源摇摇组合不同性质位置线求舰位法 .....	愿源
摇摇愿源摇摇本章小结 .....	愿源
摇摇思考题与习题 .....	愿源
第 怨章 摇摇其他舰船天文定位方法	
摇摇怨源摇摇引言 .....	怨源
摇摇怨源摇摇利用北极星高度确定纬度 .....	怨源
摇摇怨源摇摇利用天体中天高度确定纬度 .....	怨源
摇摇怨源摇摇利用两个天体的观测高度确定纬度 .....	怨源
摇摇怨源摇摇利用天体的中天高度确定经度 .....	怨源
摇摇怨源摇摇本章小结 .....	怨源
摇摇思考题与习题 .....	怨源
摇摇参考文献 .....	怨源



摇摇摇摇	摇摇摇摇地球非球形引力摄动 .....	员怨
摇摇摇摇	摇摇摇摇日、月摄动 .....	员园
摇摇摇摇	摇摇摇摇大气阻力摄动 .....	员
摇摇摇摇	摇摇摇摇太阳光压摄动 .....	员
摇摇摇摇	摇摇摇摇潮汐摄动 .....	员
摇摇摇摇	摇摇摇摇深空探测器的轨道运动 .....	员
摇摇摇摇	摇摇摇摇多体问题和限制性三体问题 .....	员
摇摇摇摇	摇摇摇摇地月飞行的轨道运动 .....	员
摇摇摇摇	摇摇摇摇航天器自主天文导航基本原理 .....	员
摇摇摇摇	摇摇摇摇航天器基于轨道动力学方程的天文导航基本原理 .....	员
摇摇摇摇	摇摇摇摇航天器纯天文几何解析方法基本原理 .....	员
摇摇摇摇	摇摇摇摇本章小结 .....	员
摇摇	摇摇思考题与习题 .....	员
第 员章	摇摇自主天文导航系统滤波方法	
摇摇	摇摇引言 .....	员
摇摇	摇摇最优估计方法 <sup>[员]</sup> .....	员
摇摇摇摇	摇摇摇摇估计和最优估计方法 .....	员
摇摇摇摇	摇摇摇摇最小方差估计 .....	员
摇摇摇摇	摇摇摇摇极大似然估计 .....	员
摇摇摇摇	摇摇摇摇极大验后估计 .....	员
摇摇摇摇	摇摇摇摇贝叶斯估计 .....	员
摇摇摇摇	摇摇摇摇线性最小方差估计 .....	员
摇摇摇摇	摇摇摇摇最小二乘估计 .....	员
摇摇摇摇	摇摇摇摇几种最优估计方法的比较及其关系 .....	员
摇摇	摇摇卡尔曼滤波 .....	员
摇摇摇摇	摇摇摇摇线性系统卡尔曼滤波方法 .....	员
摇摇摇摇	摇摇摇摇扩展卡尔曼滤波方法 .....	员
摇摇摇摇	摇摇摇摇改进型卡尔曼滤波方法 .....	员
摇摇	摇摇粒子滤波 <sup>[员]</sup> .....	员
摇摇摇摇	摇摇摇摇先进的粒子滤波方法 .....	员
摇摇摇摇	摇摇摇摇粒子滤波的采样方法 .....	员
摇摇摇摇	摇摇摇摇标准粒子滤波算法 .....	员
摇摇摇摇	摇摇摇摇改进型粒子滤波算法 .....	员
摇摇	摇摇思考题与习题 .....	员

## 第 8 章 地球卫星直接敏感地平自主天文导航方法

8.1 引言	1
8.2 航天器自主天文导航技术	1
8.3 航天器自主导航的意义	1
8.4 地球卫星自主天文导航技术概述	2
8.5 地球卫星直接敏感地平自主天文导航原理	2
8.6 地球卫星直接敏感地平自主天文导航系统的数学模型	3
8.7 系统的状态方程	3
8.8 系统的量测方程	3
8.9 地球卫星直接敏感地平天文导航方法性能分析	4
8.10 不同轨道动力学方程对导航性能的影响	4
8.11 滤波周期对导航性能的影响	4
8.12 观测量对导航性能的影响	4
8.13 星敏感器安装方位对导航性能的影响	4
8.14 本章小结	4
8.15 思考题与习题	4

## 第 9 章 地球卫星间接敏感地平自主天文导航方法

9.1 引言	5
9.2 星光折射间接敏感地平天文导航原理	5
9.3 星光大气折射原理	5
9.4 星光折射高度与折射角、大气密度之间的关系	5
9.5 地球卫星间接敏感地平的自主天文导航系统	6
9.6 系统的状态方程	6
9.7 系统的量测方程	6
9.8 计算机仿真	6
9.9 基于信息融合的直接敏感地平 and 间接敏感地平相结合的自主天文导航方法	6
9.10 基于信息融合的自主天文导航方法原理	6
9.11 基于信息融合的自适应卡尔曼滤波方法	6
9.12 计算机仿真	6
9.13 星光折射间接敏感地平的自主天文导航精度分析	6
9.14 量测信息对导航精度的影响分析	6
9.15 轨道参数对导航精度的影响分析	6
9.16 本章小结	6

摇摇思考题与习题.....	愿源
第 员章摇摇深空探测器的自主天文导航原理与方法	
摇摇摇摇引摇摇言.....	愿缘
摇摇摇摇摇摇深空探测的发展 .....	愿缘
摇摇摇摇摇摇天文导航对深空探测的重要性 <sup>[源]</sup> .....	愿苑
摇摇摇摇摇摇月球探测器在转移轨道上的天文导航方法.....	愿愿
摇摇摇摇摇摇月球探测器在转移轨道上的轨道动力学方程 .....	愿怨
摇摇摇摇摇摇基于星光角距的自主天文导航方法 .....	愿怨
摇摇摇摇摇摇基于太阳、地球矢量方向的自主天文导航方法 .....	愿员
摇摇摇摇摇摇月球探测器组合导航方法 .....	愿猿
摇摇摇摇摇摇月球卫星的自主天文导航方法.....	愿缘
摇摇摇摇摇摇月球卫星的轨道动力学方程 .....	愿远
摇摇摇摇摇摇月球卫星的量测方程 .....	愿苑
摇摇摇摇摇摇深空探测器纯天文几何解析定位方法.....	愿怨
摇摇摇摇摇摇纯天文定位的基本原理 .....	愿怨
摇摇摇摇摇摇纯天文自主定位的观测量及量测方程 .....	愿怨
摇摇摇摇摇摇纯天文自主定位的几何解析法 .....	愿圆
摇摇摇摇摇摇本章小结.....	愿苑
摇摇思考题与习题.....	愿苑
第 员章摇摇天文导航半物理仿真系统	
摇摇摇摇引摇摇言.....	愿愿
摇摇摇摇摇摇天文导航半物理仿真系统的总体设计.....	愿愿
摇摇摇摇摇摇摇摇系统组成 .....	愿愿
摇摇摇摇摇摇摇摇系统工作流程 .....	愿怨
摇摇摇摇摇摇摇摇系统各模块的设计.....	愿怨
摇摇摇摇摇摇摇摇轨道发生器的设计 .....	愿怨
摇摇摇摇摇摇摇摇星模拟器的设计 .....	愿员
摇摇摇摇摇摇摇摇星敏感器模拟器的设计 .....	愿员
摇摇摇摇摇摇摇摇导航计算机的设计 .....	愿圆
摇摇摇摇摇摇星图模拟系统实现.....	愿猿
摇摇摇摇摇摇摇摇星图模拟的原理 .....	愿猿
摇摇摇摇摇摇摇摇随机视场中观测星的选取及其验证方法 .....	愿远
摇摇摇摇摇摇摇摇星图的模拟及软件实现 .....	愿圆



摇摇摇摇	摇摇摇摇弹道导弹轨迹发生器 .....	圆圆
摇摇摇摇	摇摇摇摇飞机轨迹发生器 .....	圆缘
摇摇摇摇	摇摇摇摇惯性 犖文组合导航半物理仿真系统性能分析 .....	圆怨
摇摇摇摇	摇摇摇摇星敏感器的精度对组合导航性能的影响 .....	圆怨
摇摇摇摇	摇摇摇摇滤波周期对组合导航性能的影响 .....	猿园
摇摇摇摇	摇摇摇摇不同初始失准角对组合导航性能的影响 .....	猿猿
摇摇摇摇	摇摇摇摇本章小结 .....	猿缘
摇摇	摇摇思考题与习题 .....	猿缘
第 猿章 摇摇惯性 犖文组合导航系统的应用		
摇摇	摇摇引言 .....	猿苑
摇摇	摇摇组合导航系统在弹道导弹中的应用 .....	猿苑
摇摇摇摇	摇摇摇摇弹道导弹 犖杂子系统仿真试验 .....	猿苑
摇摇摇摇	摇摇摇摇弹道导弹 犖杂犖杂组合导航系统半物理仿真 .....	猿苑
摇摇	摇摇组合导航系统在飞机中的应用 .....	猿愿
摇摇摇摇	摇摇摇摇机载 犖杂子系统仿真试验 .....	猿怨
摇摇摇摇	摇摇摇摇机载 犖杂犖杂组合导航系统半物理仿真 .....	猿园
摇摇	摇摇组合导航应用中的关键技术 .....	猿员
摇摇摇摇	摇摇摇摇递归交互式多模型自适应卡尔曼滤波方法 .....	猿员
摇摇摇摇	摇摇摇摇重力异常对组合导航精度的分析与补偿方法 .....	猿缘
摇摇摇摇	摇摇摇摇基于可观测度分析的降维滤波器设计方法 .....	猿愿
摇摇摇摇	摇摇摇摇一种状态突变带渐消因子的 运方法 .....	猿员
摇摇	摇摇本章小结 .....	猿圆
摇摇	摇摇思考题与习题 .....	猿猿
摇摇	摇摇参考文献 .....	猿猿

## 第 缘部分 摇摇展望

### 第 圆章 摇摇天文导航技术的展望

摇摇	摇摇舰船天文导航的发展趋势 .....	猿怨
摇摇	摇摇航天器天文导航的发展趋势 .....	猿员
摇摇	摇摇惯性 犖文组合导航技术的发展趋势 .....	猿苑
摇摇	摇摇结束语 .....	猿愿
摇摇	摇摇参考文献 .....	猿怨

附录

附录 航海天文历 .....	1
附录 北极星表 .....	2
附录 修正项表 .....	3

## 第 1 部分 天文导航的基础知识

天文导航技术是一门既古老又年轻的技术,起源于航海,发展于航空,辉煌于航天。天文导航是以已知准确空间位置的自然天体为基准,通过天体测量仪器被动探测天体位置,经解算确定测量点所在载体的导航信息。天文导航因其具有自主、误差不随时间积累和精度较高的特点,成为现代高科技战争中的一种重要导航手段,这也是美、俄等军事强国仍致力发展天文导航技术的重要原因。

本部分共 5 章。第 1 章概述了天文导航技术的特点、历史和发展现状;第 2 章从天文导航解算出发重点介绍了球面三角和导航三角形相关知识;由于天文导航中需要观测天体进行导航计算,而载体和天体的运动均与坐标系和时间系统密切相关,为此第 3 章和第 4 章分别介绍了与确定载体位置相关的导航坐标系和时间系统;第 5 章详细阐述了导航天文学等相关的基础知识,分别介绍了天体、天体视运动以及天体的辨认和识别,为学习舰船、卫星、导弹和飞机的天文导航技术打下基础。

# 第 1 章 绪论

## 1.1 引言

自主导航技术是指不与外界进行信息传输和交换、不依赖于地面设备的定位导航技术。天文导航和惯性导航同属于自主导航技术,但与惯性导航相比天文导航具有误差不随时间积累的优势。本章首先介绍天文导航的特点,这些特点决定了天文导航在航天、航空和航海领域的广泛应用,决定了天文导航成为深空探测、载人航天和远洋航海必不可少的关键技术和卫星、远程导弹、运载火箭、高空远程侦察机等的重要辅助导航手段,然后,综述了天文导航的从航海到航天的发展历史和现状。

## 1.2 天文导航技术的特点和应用

日月星辰构成的惯性参考系,具有无可比拟的精确性和可靠性。将导航方法建立在恒星和行星参考系基础上,具有直接、自然、可靠、精确的优点<sup>[1]</sup>。天文导航系统依靠天体测量仪器测得的天体方位、高度等信息进行定位导航。天文导航具有以下优势:

### 1.2.1 被动式测量、自主式导航

天文导航以天体为导航信标,不依赖于其他外部信息,也不向外部辐射能量,被动接收天体辐射或反射的光,进而获取导航信息,是一种完全自主的导航方式,工作安全、隐蔽。

### 1.2.2 导航精度较高

天文导航与其他导航方法相比精度并不是最高的,短时间内的导航精度低于惯性导航的精度,但其误差不随时间积累,这一特点对长期运行的载体来说非常重要。天文导航的定位精度主要取决于天体敏感器的精度。

### 1.2.3 抗干扰能力强、可靠性高

天体辐射覆盖了 载射线、紫外、可见光和红外整个电磁波段,具有极强的抗干扰能力。此外,天体的空间运动不受人为干扰,保证了以天体为导航信标的天文导航信息的完备和可靠。

### 1.2.4 可同时提供位置和姿态信息

天文导航不仅可以提供载体的位置、速度信息,还可以提供姿态信息,且通常不需要增加硬件成本。