



装备科技译著出版基金



先进机器人科技译丛

Introduction to the Mechanics of Space Robots

空间机器人 机械学引论

[意大利] 吉安卡洛·艮塔 (Giancarlo Genta) 著
谭天乐 曾强 袁德虎 侯月阳 张晓彤 等译



国防工业出版社

National Defense Industry Press



Springer



装备科技译著出版基金

先进机器人科技译丛

空间机器人机械学引论

Introduction to the Mechanics of Space Robots

[意]吉安卡洛·艮塔(Giancarlo Genta) 著

谭天乐 曾强 袁德虎 侯月阳 张晓彤 等译

国防工业出版社

·北京·

著作权合同登记 图字:军-2016-081号

图书在版编目(CIP)数据

空间机器人机械学引论/(意)吉安卡落·艮塔
(Giancarlo Genta)著;谭天乐等译. —北京:国防
工业出版社,2017.12

(先进机器人科技译丛)

书名原文:Introduction to the Mechanics of Space
Robots

ISBN 978-7-118-11393-8

I. ①空… II. ①吉… ②谭… III. ①空间机器
人—机械学—研究 IV. ①TP242.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第323917号

Translation from the English language edition:

Introduction to the Mechanics of Space Robots

by Giancarlo Genta

Copyright © Springer Science + Business Media B. V. 2012

Springer is part of Springer Nature

All Rights Reserved

本书简体中文由 Springer 授权国防工业出版社独家出版发行,版权所有,侵权必究。

※

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)

三河市腾飞印务有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 33¼ 字数 633 千字

2017年12月第1版第1次印刷 印数 1—2000册 定价 158.00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

译者序

大多数的外太空环境并不适合人类的生存和活动,在恶劣的条件下探索宇宙空间需要使用机器人延伸和拓展人的活动能力。空间机器人需要适应运输和使用中所遇到的冲击振动、剧烈温差变化、真空或沙尘、崎岖未知的行星表面、微弱不规则的引力场、宇宙电磁辐射等各种极端情况。此外,复杂任务下的空间机器人还需要实现智能自主的环境感知,路径轨迹规划,障碍规避和安全防护。结构机构以及驱动传动系统是空间机器人的重要组成部分,主要包括各种形式的操控执行装置和行走机构,涉及到机械材料、能源动力、信息处理、通信和控制等技术。空间机器人在机械学上面临的很多问题是地面应用中难以出现和预料的。

《空间机器人机械学引论》根据都灵理工大学机械与航空航天工程系教授 Giancarlo Genta 编写,施普林格(Springer)出版社出版,曾获得国际宇航学会图书奖的 *Introduction to the Mechanics of Space Robots* 一书翻译而成。书中讨论了空间环境的影响,对空间机器人的设计进行了较为全面的概述,引用介绍了多款国际上具有代表性的空间机器人,根据不同的机器人构型进行了运动学、动力学建模,初步给出了相应的运动控制方法,并系统地叙述了空间机器人驱动器和传感器的原理以及不同能量形式的能源动力系统。作者在书中提出了很多值得研究和关注的开放性问题,引导读者进一步思考以开拓新的研究领域。

目前,我国各高校和科研院所在空间机器人的研究及工程研制方面尚处在起步阶段。本书提供了对于空间机器人结构设计、机动性分析、运动建模、机构及其控制、驱动器、传感器以及能源动力系统方面的评述,深入浅出,通俗易懂,既包括空间机器人机械学方面的理论方法,也介绍了多种目前得以实现和应用的空間机器人产品,体现了在这一领域的最新研究方法及研究成果,有助于从事空间机器人研究的科技人员追踪了解国外的技术水平、产品研制应用情况以及当前的研究热点,是一份较有价值的参考资料。

该书的翻译工作历时一年多,由以下同志共同完成,分别是:曾强(第1、2

章)、谭天乐(第3章)、袁德虎(第4章)、侯月阳(第5章)、张晓彤(第6、8章)、李新鹏(第7章)、杨浩(附录A)、林书宇(附录B)等。本书的翻译得到了上海航天控制技术研究所、上海市空间智能控制技术重点实验室和国防工业出版社的大力支持与帮助,在此表示衷心的感谢!

由于水平有限,翻译难免有不妥之处,敬请广大读者批评指正。

译者

2017年9月

前言

本书从作者对太空探索与开发系统专业的硕士生所作的有关空间机器人学的演讲集开始。本课程的目标是研究自动机械,即在太空探索与开发任务中既能自主运行又能作为宇航员的支持的机械,本书着重论述了为适用于行星环境(包括小行星、彗星与流星)而设计的各种装置。

本书内容完整且进行了更为系统的论述,希望不仅对于课程的学生而且对于那些对空间机器人学广泛且涉及更多跨学科领域有兴趣的学者有所助益,特别在机械方面。

本书主要关注于空间机器人的机械学。作者清楚地认识到,即便在这一特殊的领域,也远未达到完整,而且就像所有的机电系统一样,机器人系统是如此的统一以至于单独处理一个方面的问题是不够的。

本书的结构组织如下:

- 第1章:对人类与机器人太空探索的简要回顾,强调探索过程中人机合作的必要性,并且简单概括了近地轨道(LEO)、深空探测、行星探测中不同类型的机器人任务以及基本要求。

- 第2章:用综合的方法来讨论空间机器人正面临或未来将要面临的各种环境特性。由于空间环境是一个专业性很强的学科,并在许多著作中探讨过,因此本学科只做简要概述。

- 第3章:描述了机械臂的构造及其设计所需的基本运动学与动力学关系。

- 第4章:着重研究各种行星表面上的机动性,利用不同类型的支承装置,诸如轮子、机器腿以及气体动力学或气体静力学装置。

- 第5章:概述了轮式机器人与载具的基本特性,并在不同的方面研究轮式机器人的特性,诸如纵向、横向与悬架动力学方面。本章详细分析了不同环境中运行轮式机械的各种结果,并通过描述迄今为止唯一在月球表面成功荷载宇航员的载具,即 Apollo 月球车,得出了结论。

- 第6章:描述了固体表面上移动的腿式、轨道式载具与机器人或其他装置。由于许多不同的架构曾被提出甚至过去被使用过,所以本书并不赘述所有可能的结构,只选择那些基于实际应用与未来应用的架构。

- 第7章:简要概述用于空间机器人执行机构与感应的传感器。

● 第8章:简要描述了能被用于空间机器人的能源与蓄能装置。

本书有两个附录,总结了理论公式,这些公式为写出空间机器人的数学模型提供了条件,这些模型包括不同的机械部件,如机械臂、机械腿等。作者认为这些部件的模型是必不可少的,这是因为太空探索与开发系统的课程学员具有不同的知识背景,有些学员很清楚,而对有些学员而言是很困难的。同样,本书一部分读者或许不熟悉文中使用的分析力学的各种概念或者各种变形体的动力学,主要是第3章与第5章。

作者感谢机械学系以及都灵理工大学机电实验室的同行与学生所给出的各种建议、批评与意见交流。学生,特别是研究生,参与本书写作以作为其论文工作,因此他们的问题主要是当场提出的,要求作者必须清楚阐释想法并且给出详细证明。对以上的种种,作者十分感激。

对插图的注释:作者尽了最大努力以得到这些插图持有者的原始版权的许可,如果通过这些插图仍不能达到作者的目的,对此作者表示十分抱歉。特别是那些来自互联网的插图的应用,诸如图 4.10,图 4.35,图 4.36,图 4.40,图 5.2,图 6.1,图 6.15,图 6.17,图 6.21,图 6.23(b),图 6.24,图 6.25(a),图 6.28,图 6.31,图 7.18,图 7.19 以及图 7.21。

吉安卡洛·艮塔
意大利 都灵

符号与缩略语

符号

a	接触面的长;质心与前轴间的加速距离
$\mathbf{a}$	加速度向量
b	接触面的宽;质心与后轴间的距离;臂展
c	黏结承载强度;黏滞阻尼系数;臂弦
c_{cr}	临界阻尼
c_{opt}	最佳阻尼
d	土体变形;直径
$\mathbf{d}$	正压电矩阵
d_i	第二个 DH 参数;偏移
e	能量
ϵ	误差
$\mathbf{e}_i$	第 i 轴的单位向量
f	摩擦系数;滚动摩擦系数
f_0	零速度时滚动摩擦系数
f_r	侧翻系数
f_s	滑动系数
g	重力加速度
$\mathbf{g}$	重力加速度向量
h	陷入地面高度
h_c	对流系数
i	道路坡度;虚数单位($i = \sqrt{-1}$);电流
i_t	道路横向坡度
k	刚度;土体变形模量/系数
k_c	黏性模量/系数
k_ϕ	摩擦系数
l	臂长;轴距
l_i	第三个 DH 参数;长度
m	质量
m_e	等效质量
m_s	簧上质量

m_u	簧下质量
p	压力
$\mathbf{p}$	广义动量
p, q, r	xyz 坐标系中的角速度
p_s	不沉陷土体承载能力
p_0	土体承载能力
q	特征函数
$\mathbf{q}$	广义坐标系向量;特征向量
r	半径
$\mathbf{r}$	向量
s	拉普拉斯变量
t	时间;轨道;轮胎拖距;厚度
u	位移
$\mathbf{u}$	位移向量
u, v, w	xyz 坐标系中的速度
v	体积
v_g	侧滑引起的地面速度
z	下沉;牙数
xyz	身体固定参考坐标系
$\mathbf{x}$	坐标向量
$\mathbf{z}$	状态向量
A	面积
$\mathbf{A}$	状态空间中的动态矩阵
B_r	剩磁
$\mathbf{B}$	输入增益矩阵
C	侧偏刚度;电容
C_D	阻力系数
C_f	力系数
C_L	升力系数
C_S	侧力系数
C_γ	外倾刚度
C_σ	纵向力系数
$\mathbf{C}$	阻尼矩阵;输出增益矩阵
D	气动阻力;位移
$\mathbf{D}$	直接关联矩阵;位形空间中的动态矩阵
E	弹性模量;土体变形模量;气动效率

E	材料刚度矩阵
F	力
F	力向量
F_n	法向力
F_r	弗劳德数
F_t	切向力
G	剪切模量;重力常数
G	陀螺矩阵
H_c	矫顽磁场
$\mathcal{H}$	汉密尔顿函数
H	循环矩阵
I	单位矩阵;惯性矩阵
J	惯性力矩
J	雅克比矩阵
K	刚度
K_B	反电动势常数
K_T	扭矩常数
K	刚度矩阵;控制增益矩阵
K_d	微分增益矩阵
K_i	积分增益矩阵
K_p	比例增益矩阵
L	参考长度;气动升力
$\mathcal{L}$	拉格朗日函数
M	质量
M	质量矩阵;力矩
M	分子量
Ma	马赫数
N	转数
Nu	努赛尔数
N	形状函数矩阵
P	功率
Q	流量
R	轮子半径(空载);轨迹半径;普适气体常数;运动阻力;电阻
$\mathcal{R}$	磁阻
R	旋转矩阵
R_c	轨迹半径(低速条件)

Re	雷诺数
R_e	有效滚动半径
R_l	负载条件下半径
S	一阶质量矩;气动侧向力;基准面
T	温度;力矩
$\mathcal{T}$	扭矩
T	扭矩向量;齐次转换矩阵
$\mathcal{U}$	动能
V	车速;体积;电压
V	速度向量
V_f	足部相对于身体的速度
V_r	相对于大气的速度
V_s	声速
V_B	反电动势
W	功
XYZ	惯性坐标系
α	侧偏角;道路坡度角;攻角
α_i	第四个 DH 参数;扭曲
α_t	道路横向坡度角
β	车辆侧偏角;工作系数
γ	外倾角;侧倾角
δ	转向角;气动侧偏角;电阻率
δ_c	转向角(低速转向)
δL	虚功
$\delta\theta$	虚位移
ε	应变;土体变形
ε	应变向量
ε_f	刹车效率
η	效率;模态坐标
η_i	模态坐标向量
θ	俯仰角
θ_i	第一个 DH 参数;旋转角度
θ	关节处广义坐标系向量
λ	热导率
μ	动态黏滞度
μ_0	真空磁导率

μ^*	摩擦系数
μ_r	相对磁导率
μ_x	纵向力系数
μ_{x_p}	纵向牵引系数
μ_{x_s}	侧滑纵向牵引系数
μ_y	侧偏力系数
μ_{y_p}	横向牵引系数
μ_{y_s}	侧滑牵引系数
ν	泊松比;运动黏度
ρ	密度
σ	标准压力;应力;纵向侧滑
τ	剪应力;传动比;时滞;无量纲时间
ϕ	滚转角;摩擦角($\phi = \arctan(\mu)$)
χ	抗扭刚度
ψ	偏航角
ω	频率;圆频率
ω_n	固有频率
Γ	旋转阻尼系数
Δh	下沉高度的增加值
Π	轴上轮胎的抗扭刚度
Φ	特征向量矩阵
Ω	角速度
$\vec{\Omega}$	角速度向量
$\Im$	虚部
$\Re$	实部
dx	对 x 微分
∇	拉普拉斯算子
下标	
d	导数
i	内部;积分
o	外部
p	比例
t	切向
物理常数值	
G	重力常数 $6.67259 \times 10^{-11} \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$
R	普适气体常数 $8.314510 \text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

μ 真空磁导率 $1.257 \times 10^{-6} \text{H} \cdot \text{m}^{-1}$

缩略词

ACE	要素/同位素成分高级探测器
ACR	异常宇宙射线
AFC	碱性燃料电池
AGV	自动导引车
AI	人工智能
AU	天文单位
BAP	有动力防护装甲
BEMF	反电动势
CRP	碳纤维增强塑料
CVT	无级变速
DC	直流
DH	丹纳维特-哈顿贝格
DMFC	直接甲醇燃料电池
ECU	电控单元
EMF	电动势
EVA	舱外活动
FEM	有限元方法
GCR	银河宇宙射线
GEO	地球同步轨道
GPS	全球定位系统
GRP	玻璃纤维增强塑料/玻璃钢
GTO	地球同步转移轨道
HMI	人机界面
ICE	内燃机
ICME	星际日冕物质抛射
IMF	星际磁场
ISO	国际标准化组织
ISRU	就地取材利用
ISS	国际空间站
KBO	“柯伊伯带”天体
LEO	近地轨道
LRV	月球车
LVDT	线性可变差动变压器
MCFC	熔融碳酸盐燃料电池

MEMD	动态电磁阻尼器
MEMS	微机电系统
MER	火星探测车
MK	自然无阻尼(系统)
NEA	近地小行星
NEC	近地彗星
NEM	近地流星
NEO	近地天体
ODE	常微分方程
PAFC	磷酸燃料电池
PD	比例微分
PDE	偏导数微分方程
PEMFC	质子交换膜燃料电池
PHA	有潜在危险的小行星
PID	比例积分微分
PWM	脉宽调制
RB	摇臂转向架
R/C	无线电操控的
RHU	放射性同位素热源
rms	均方根
RTG	放射性同位素热电发生器
RVDT	旋转可变差动变压器
S/C	航天器
SAA	南大西洋异常区
SAE	美国汽车工程协会
SAR	合成孔径雷达
SCARA	选择顺应性平面关节型/装配机器人臂
SMA	形状记忆合金
SNAP	核辅助电力系统
SOFC	固体氧化物燃料电池
SRG	斯特林放射性同位素发电机
SRMS	航天飞机远程操纵系统
SSRMS	空间站远程操纵系统
TEMD	变压器电磁阻尼器
UAV	无人飞行器
UGV	无人地面车

UV	紫外线
WEB	温暖的电子盒子(车体)
VDC	车辆动态控制
4WD	四轮驱动
4WDS	四轮驱动与转向
4WS	四轮转向

目 录

第 1 章 绪论	001
1.1 空间机器人	001
1.2 人机交互	003
1.3 人工智能	006
1.4 空间机器人与机械臂的任务	010
1.4.1 近地轨道	012
1.4.2 深空	013
1.4.3 行星表面	013
1.5 开放性问题	015
1.5.1 控制	015
1.5.2 机械学	016
1.5.3 转换器	016
1.5.4 动力	016
1.5.5 通信	017
第 2 章 空间与行星环境	018
2.1 近地轨道环境	018
2.2 太阳系空间环境	022
2.3 星际空间环境	023
2.4 月球环境	025
2.5 岩石行星	030
2.5.1 火星	031
2.5.2 水星	035
2.5.3 金星	037
2.6 巨行星	038
2.6.1 木星	039
2.6.2 土星	041

2.6.3	天王星	043
2.6.4	海王星	044
2.7	巨行星的卫星	046
2.7.1	木卫一(Io)	048
2.7.2	木卫二(Europa)	049
2.7.3	木卫三(Ganymede)	049
2.7.4	木卫四(Callisto)	050
2.7.5	土卫二(Enceladus)、土卫三(Tethys)、土卫四(Dione)、 土卫五(Rhea)及土卫八(Iapetus)	050
2.7.6	土卫六(Titan)	051
2.7.7	天卫五(Miranda)、天卫一(Ariel)、天卫二(Umbriel)、 天卫三(Titania)及天卫四(Oberon)	052
2.7.8	海卫一(Triton)	053
2.8	小天体	053
2.8.1	主带小行星	054
2.8.2	“柯伊伯带”天体	057
2.8.3	“特洛伊”小行星	058
2.8.4	其他小行星	059
2.8.5	彗星	060
2.8.6	外形不规则小行星表面上的重力加速度	061
第3章	操控装置	067
3.1	自由度和工作空间	067
3.2	末端执行器	071
3.3	末端执行机构的定位	072
3.4	冗余自由度	073
3.5	臂的设计	075
3.6	刚体在三维空间的位置	076
3.7	齐次坐标	079
3.8	Denavit - Hartenberg 参数(DH 参数)	080
3.9	臂的运动学	082
3.10	速度运动学	091
3.11	力和力矩	093
3.12	刚性臂的动力学	093
3.13	低阶控制	102