SHIJUE SIFU FANKUI DE FEIWANZHENG JIQIREN BAOHE KONGZHI YANJIU

视觉伺服反馈的非完整机器人饱和控制研究

陈华 著



江苏大学出版社
JIANGSU UNIVERSITY PRESS

视觉伺服反馈的非完整机器人饱和控制研究

陈 华 著

Saturated Control for Nonholonomic Robots with Visual Servoing Feedback

江苏大学出版社
JIANGSU UNIVERSITY PRESS
镇 江

图书在版编目(CIP)数据

视觉伺服反馈的非完整机器人饱和控制研究/陈华著.—镇江：江苏大学出版社，2012.11
ISBN 978-7-81130-409-1

Ⅰ.①视… Ⅱ.①陈… Ⅲ.①移动式机器人—机器人视觉—机器人控制—研究 Ⅳ.①TP242.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 283367 号

视觉伺服反馈的非完整机器人饱和控制研究

著　　者/陈　华
责任编辑/吴昌兴　郑晨晖
出版发行/江苏大学出版社
地　　址/江苏省镇江市梦溪园巷 30 号(邮编：212003)
电　　话/0511-84446464(传真)
网　　址/http://press.ujs.edu.cn
排　　版/镇江文苑制版印刷有限责任公司
印　　刷/丹阳市兴华印刷厂
经　　销/江苏省新华书店
开　　本/890 mm×1 240 mm　1/32
印　　张/4.625
字　　数/140 千字
版　　次/2012 年 11 月第 1 版　2012 年 11 月第 1 次印刷
书　　号/ISBN 978-7-81130-409-1
定　　价/26.00 元

如有印装质量问题请与本社营销部联系(电话：0511-84440882)

前　言

随着科学技术的进步和社会需求的扩大，机器人技术得到了迅速的发展，其应用已逐渐拓展到人类社会的各个领域，对我们的生产生活产生了深远的影响. 各式各样的机器人不仅广泛应用于工业生产和制造部门，而且在深海探测、航空航天、军事作战等极具危险性的特殊领域中也获得了大量的应用，并且正逐步扩展到娱乐、服务、医疗等日常生活领域. 轮式移动机器人是其中一类应用非常广泛的机器人，多数学者在轮式移动机器人运动控制的理论研究中，通常都假设车轮只发生纯滚动而不打滑（包括侧向和纵向都不滑动），即移动机器人的运动受到约束，这种理想约束本质上是一种非完整约束，这也使得轮式移动机器人成为非完整系统的典型实例，很多有关非完整系统控制的文献都是以轮式移动机器人为研究对象的.

近几十年来，非完整系统的反馈设计问题一直备受关注，且已成为非线性控制领域中的一个热门课题. 其主要原因就在于：一是从实际出发，客观世界中我们经常能看到非完整力学系统的原型，例如力学系统著名的冰刀问题，许多带有滚动轮子的系统（如轮式移动机器人、自行车、汽车、摩托车、飞机起落架、火车车厢），还有一些太空机器人系统等都能描述为非完整控制系统；二是非完整控制系统是一类典型的非线性系统，一阶近似或反馈线性化方法对这类系统并不适用，所以需要特别的“非线性”分析综合方法才能处理；三是 Brockett 曾从理论角度指出，非完整控制系统即便是完全能控，也不能由任何的时不变连续状态反馈镇定.

然而，现有的研究不论是对于非完整机器人运动学（动力学）系

统，还是对不确定的非完整链式系统，都假定系统的状态可以直接量测.但许多实际情况并非如此，像无人驾驶的飞行器控制、随机目标跟踪以及机器人编队等，在复杂的非结构环境下事先很难确定系统的任务和可用于反馈的状态量.而利用视觉系统直接获得控制器所需要的反馈信息是解决这一状态量测问题的有效途径，由此产生了视觉伺服反馈问题.视觉反馈可以在无接触量测和环境不确定的情形下模拟人类的视觉感官，从而提高控制的性能.视觉伺服的一个关键问题是从三维空间到二维图像空间的未知的时变非线性变换(未知深度)，由此派生出新的视觉平面内系统的鲁棒镇定问题.

此外，由于物理的限制和安全的需要，几乎所有的系统都受到了输入饱和的限制，例如在过程控制中，典型的饱和约束以压力和温度的受限形式出现.执行器物理装置上的限制也会造成控制受限，例如，阀门不能无限打开，驱动机器人的电机(马达)只能输出有限速度等.系统含有饱和特性如果被忽略或者不恰当地处理，轻者影响到控制系统的性能，重者危及系统安全，甚至会导致重大事故.20 世纪 80 年代以来，控制系统输入饱和问题就引发了一系列重大事故，包括前苏联切尔诺贝利核电站的灾难性事故以及美国一系列高性能战机的坠毁.但是对于不确定环境下非完整系统的饱和控制问题至今还只有很少的研究涉及.

本书尝试针对一类典型的非完整系统——轮式移动机器人在实际速度输入饱和约束下，利用视觉量测信息，从控制理论的角度将量测和控制结合起来，研究在视觉坐标系下或同时在视觉坐标系和惯性系下考虑非完整移动机器人运动学系统的控制问题的理论和方法.

2009 年 9 月，笔者在上海理工大学开始进行非完整系统控制问题的系统学习与研究，并进入到输入饱和约束下的不确定视觉伺服反馈机器人的课题研究，时时得到导师王朝立教授和师母刘晓娟老师的鼓励和帮助，在此致以崇高的敬意！我也要感谢我的妻子张颖，我们的女儿即将出生时，我正处于研究的最关键时刻，是妻子的理解和支持才让我的研究工作顺利进行.还要感谢我的父母和岳父

岳母，孩子出生以后一直是他们在悉心照顾，才让我得以安心地学习、研究！

本书的完成，不仅丰富了非完整控制理论的内容，而且为进一步从理论和实际相结合的角度研究非完整控制系统开拓了新的思路，为先进的非完整控制系统理论用于实际提供了一定的理论支撑，这也是笔者在输入受限的非完整机器人运动控制研究方面的一个阶段性总结.为了进一步完善现有的研究成果，还有大量的工作需要去做.由于水平有限，有些研究内容及成果还很粗浅，不妥之处恳请专家批评指正.

陈　华

于河海大学常州校区

2012 年 6 月 20 日

目　录

1　绪　论 001

1.1　研究背景和意义 001

1.1.1　非完整约束 002

1.1.2　非完整移动机器人控制系统 003

1.2　非完整控制系统的控制方法与研究现状 007

1.2.1　非完整系统的控制方法 007

1.2.2　输入饱和的非完整系统研究进展 011

1.2.3　视觉伺服反馈的不确定非完整机器人研究进展 012

1.3　本书研究的主要内容 013

2　一类非完整机器人运动学系统动态反馈的半全局饱和镇定 017

2.1　引言 017

2.2　动态反馈的非完整移动机器人半全局饱和镇定 018

2.2.1　问题的提出 018

2.2.2　主要结论 020

2.2.3　仿真研究 029

2.3　本章小结 031

3　一类非完整机器人运动学系统动态反馈的饱和跟踪控制 032

3.1　引言 032

3.2　动态反馈的非完整移动机器人饱和跟踪控制 033

3.2.1 问题的提出 033
3.2.2 主要结论 035
3.2.3 仿真研究 049
3.3 本章小结 052

4 几类视觉伺服反馈的不确定非完整机器人运动学系统饱和镇定 053
4.1 基于视觉伺服的(2,0)型非完整机器人有限时间饱和镇定 054
4.1.1 预备知识 055
4.1.2 主要结论 056
4.1.3 仿真研究 060
4.1.4 在一类不确定机器人运动学中的应用 062
4.2 基于视觉伺服的(2,0)型非完整移动机器人鲁棒实际镇定 063
4.2.1 问题的提出 063
4.2.2 控制器设计及稳定性分析 065
4.2.3 一类具有参数不确定和角度量测扰动下的机器人控制 072
4.2.4 仿真研究 073
4.3 基于视觉伺服的(1,1)型非完整移动机器人有限时间饱和镇定 075
4.3.1 问题的提出 075
4.3.2 控制器设计 076
4.3.3 仿真研究 080
4.4 基于视觉伺服的(1,2)型非完整移动机器人输入饱和的实际镇定 082
4.4.1 问题的提出 082

4.4.2 控制器设计 083
4.4.3 仿真研究 087
4.5 本章小结 090

5 一类视觉反馈的机器人动态反馈的饱和镇定 091
5.1 基于动态反馈的不确定非完整移动机器人饱和镇定 091
5.1.1 问题的提出 091
5.1.2 运动学系统的饱和控制器设计 092
5.1.3 动态反馈的饱和控制器设计 095
5.1.4 仿真研究 104
5.2 动态反馈的一类机器人有限时间饱和镇定 106
5.2.1 问题的提出 106
5.2.2 预备知识 107
5.2.3 主要结论 113
5.2.4 仿真研究 115
5.3 本章小结 117

参考文献 119

1 绪 论

1.1 研究背景和意义

近几十年来，机器人已经从作为科幻电影的素材发展到成为在工业领域和日常生活中广泛应用的（由计算机集成控制的）机电装置. 随着科学技术的进步和社会需求的增加，机器人技术得到了迅速的发展，其应用已逐渐拓展到人类社会的各个领域，对我们的生产生活产生了深远的影响. 各式各样的机器人不仅广泛应用于工业生产和制造部门，并且被应用到娱乐、服务、医疗等日常生活领域. 此外，在深海探测、航空航天、军事作战等极具危险性的特殊领域中也获得了大量的应用.

移动机器人是一种在复杂环境下工作的，具有自行组织、自主运行、自主规划的智能机电装置，其中融合了传感器技术、信息处理、电子工程、计算机工程、自动化控制工程以及人工智能等多学科的研究成果，代表了机电一体化的最高成就，其研究是目前科学技术发展最活跃的领域之一. 移动机器人最常见的移动机构包括轮式、履带式、腿足式等. 与其他移动机构相比，轮式移动机器人具有机械结构简单，运动灵活度大，操作性能好，能量利用率高等优点，因此轮式移动机器人应用极为广泛，是最重要也是最常见的一类移动机器人.

美国国防部高级研究计划局（DARPA）曾投资 6 亿美元研究自主式地面车辆（ALV）. 其中最引人注目的是 Carnegie-Mellon 大学研制的采用多传感器信息处理和理解系统的 NAVLAB 自主车，其系统包括声呐、激光测距、双彩色摄像机平台及目标识别摄像机等

多种传感器.此外,还有地面轮式移动排爆机器人,例如,法国Alsetex公司研制的SAE MC800机器人,法国DM Development公司研制的RM35型爆炸物处理机器人和加拿大Pedsco公司研制的MURV-100小型排爆机器人、RMI-10中型排爆机器人等.国内的移动机器人研究起步较晚,在"863计划"的支持下,也取得了不少研究成果[1],如清华大学于1994年通过鉴定的智能移动机器人,中科院沈阳自动化研究所的AGV和防爆机器人,哈尔滨工业大学于1996年研制成功的导游机器人,香港城市大学智能设计、自动化及制造研究中心的自动导航车和服务机器人等.最近,由中南大学、国防科技大学和吉林大学合作完成的国家自然科学基金重点项目"未知环境中移动机器人导航控制的理论与方法研究"(60234030)也取得了一批最新的研究成果[2].

在轮式移动机器人运动控制的理论研究中,通常都假设车轮只发生纯滚动而不打滑(包括侧向和纵向都不滑动),即移动机器人的运动受到约束,这种理想约束本质上是一种非完整约束,这也使得轮式移动机器人成为非完整系统的典型实例,很多有关非完整系统控制的文献都以轮式移动机器人为研究对象[3-35].

1.1.1 非完整约束

非完整约束是指对受控系统运动速度或加速度的约束,该约束不能通过积分的方法表示成纯几何约束的形式,空间自由度没有减少.长期以来,非完整系统的反馈设计问题备受关注并且已成为非线性控制领域中的一个热门课题,这有3个方面的原因:一是从实际出发,客观世界中我们经常能看到非完整力学系统的原型,例如力学系统著名的冰刀问题,许多带有滚动轮子的系统(如轮式移动机器人、自行车、汽车、摩托车、飞机起落架,还有一些太空机器人系统等都能描述为非完整控制系统;二是非完整控制系统是一类典型的非线性系统,一阶近似或反馈线性化方法对这类系统不适用,所以需要特别的"非线性"分析综合方法才能处理;三是Brockett[36]曾从理论角度指出,非完整控制系统即便是完全能控,也不能由任何的时不变连续的纯状态反馈镇定.

1.1.2 非完整移动机器人控制系统

一个具有一阶非完整约束的广义机械系统通常可描述为[37]

$$\boldsymbol{M}(\boldsymbol{q})\ddot{\boldsymbol{q}}+\boldsymbol{V}_{\mathrm{m}}(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}})\dot{\boldsymbol{q}}+\boldsymbol{F}(\dot{\boldsymbol{q}})+\boldsymbol{G}(\boldsymbol{q})+\boldsymbol{\tau}_{\mathrm{d}}=\boldsymbol{B}(\boldsymbol{q})\boldsymbol{\tau}-\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{q})\boldsymbol{\lambda}, \tag{1.1}$$

$$\boldsymbol{A}(\boldsymbol{q})\dot{\boldsymbol{q}}=\boldsymbol{0}, \tag{1.2}$$

式中，$\boldsymbol{q}\in\mathbf{R}^n$ 为 n 维广义坐标向量；$\boldsymbol{M}(\boldsymbol{q})\in\mathbf{R}^{n\times n}$ 为对称正定矩阵；$\boldsymbol{V}_{\mathrm{m}}(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}})$、$\dot{\boldsymbol{q}}\in\mathbf{R}^n$ 表示系统受到的向心力和哥氏力；$\boldsymbol{F}(\dot{\boldsymbol{q}})\in\mathbf{R}^n$ 和 $\boldsymbol{G}(\boldsymbol{q})\in\mathbf{R}^n$ 分别表示摩擦项和重力项，对于平面移动机器人 $\boldsymbol{G}(\boldsymbol{q})=\boldsymbol{0}$；$\boldsymbol{\tau}_{\mathrm{d}}$ 为有界的未知扰动和未建模动力学；$\boldsymbol{A}(\boldsymbol{q})\in\mathbf{R}^{m\times n}$ 为约束矩阵；$\boldsymbol{\lambda}\in\mathbf{R}^m$ 为用于描述约束反力的 Lagrange 乘子向量；$\boldsymbol{B}(\boldsymbol{q})\tau$ 为施加于系统上的广义力向量，$\boldsymbol{B}(\boldsymbol{q})\in\mathbf{R}^{n\times r}$ 为输入矩阵，$\boldsymbol{\tau}$ 为控制输入.

假设 $\boldsymbol{\xi}(\boldsymbol{q})=(\boldsymbol{\xi}_1(\boldsymbol{q}),\boldsymbol{\xi}_2(\boldsymbol{q}),\cdots,\boldsymbol{\xi}_{n-m}(\boldsymbol{q}))$ 为 $\boldsymbol{A}(\boldsymbol{q})$ 零空间的基矩阵，则非完整约束式(1.2)可表示为

$$\dot{\boldsymbol{q}}=\boldsymbol{\xi}(\boldsymbol{q})\mu=\boldsymbol{\xi}_1(\boldsymbol{q})\mu_1+\boldsymbol{\xi}_2(\boldsymbol{q})\mu_2+\cdots+\boldsymbol{\xi}_{n-m}(\boldsymbol{q})\mu_{n-m},$$

其中，$\boldsymbol{\mu}=(\mu_1,\mu_2,\cdots,\mu_{n-m})^{\mathrm{T}}$ 表示新的速度控制输入向量. 对上式两边求导可得

$$\ddot{\boldsymbol{q}}=\dot{\boldsymbol{\xi}}(\boldsymbol{q})\boldsymbol{\mu}+\boldsymbol{\xi}(\boldsymbol{q})\dot{\boldsymbol{\mu}}.$$

将其代入式(1.1)，并在方程两边同乘以 $\boldsymbol{\xi}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{q})$ 以消去 $\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{q})\boldsymbol{\lambda}$，可以将系统(1.1)和(1.2)改写成如下形式：

$$\dot{\boldsymbol{q}}=\boldsymbol{\xi}(\boldsymbol{q})\boldsymbol{\mu}, \tag{1.3}$$

$$\boldsymbol{\xi}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{M}\boldsymbol{\xi}\dot{\boldsymbol{\mu}}+\boldsymbol{\xi}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{M}\dot{\boldsymbol{\xi}}+\boldsymbol{V}_{\mathrm{m}}\boldsymbol{\xi})\boldsymbol{\mu}+\boldsymbol{f}(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}})=\boldsymbol{\xi}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B}\boldsymbol{\tau}, \tag{1.4}$$

其中，$\boldsymbol{f}(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}})=\boldsymbol{\xi}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{F}(\dot{\boldsymbol{q}})+\boldsymbol{G}(\boldsymbol{q})+\boldsymbol{\tau}_{\mathrm{d}})$. 式(1.3)和(1.4)分别为系统的运动学和动力学模型. 这里，$\boldsymbol{\xi}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{M}\boldsymbol{\xi}\in\mathbf{R}^{r\times r}$ 仍然为一对称矩阵，$\boldsymbol{\xi}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B}$ 是一个关于系统结构参数的常矩阵，不妨假设是可逆的[38-39]，则式(1.4)可以进一步转化为

$$\dot{\boldsymbol{\mu}}=-(\boldsymbol{\xi}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{M}\boldsymbol{\xi})^{-1}\boldsymbol{\xi}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{M}\dot{\boldsymbol{\xi}}+\boldsymbol{V}_{\mathrm{m}}\boldsymbol{\xi})\boldsymbol{\mu}+(\boldsymbol{\xi}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{M}\boldsymbol{\xi})^{-1}(-\boldsymbol{f}(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}})+\boldsymbol{\xi}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B}\boldsymbol{\tau}), \tag{1.5}$$

再定义一个辅助控制输入向量 $\bar{\boldsymbol{\tau}}$，满足下面的非线性反馈：

$$\tau=(\boldsymbol{\xi}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B})^{-1}[\boldsymbol{\xi}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{M}\boldsymbol{\xi}\bar{\tau}+\boldsymbol{\xi}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{M}\dot{\boldsymbol{\xi}}+\boldsymbol{V}_{\mathrm{m}}\boldsymbol{\xi})\mu+\boldsymbol{f}(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}})].$$

根据式(1.3)～(1.5)，可以将非完整系统的动力学系统转化为

如下简化的形式：

$$\begin{cases}\dot{\boldsymbol{q}}=\boldsymbol{\xi}(\boldsymbol{q})\boldsymbol{\mu},\\ \boldsymbol{\mu}=\boldsymbol{\tau}.\end{cases}\tag{1.6}$$

对于一类研究极为广泛[3-35]的非完整轮式移动机器人如图 1-1 所示，两个固定的后轮是独立的驱动轮，前轮是导向轮.

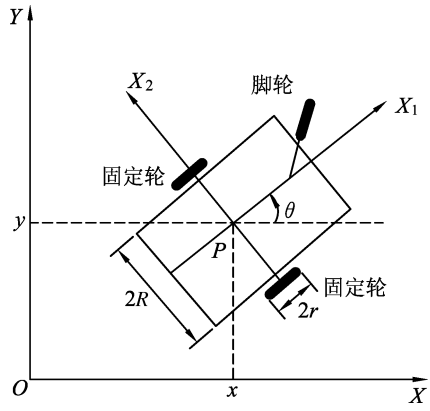


图 1-1　一类平面非完整轮式移动机器人

假设用(x,y)表示机器人质心位置，θ表示其前进方向与水平轴的夹角，v和ω分别表示前向线速度和转向角速度，这类机器人的非完整约束可表示为

$$\dot{\boldsymbol{x}}\sin\theta-\dot{\boldsymbol{y}}\cos\theta=\boldsymbol{0}.\tag{1.7}$$

若记$\boldsymbol{q}=(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y},\theta)^{\mathrm{T}}$，则根据式(1.2)和(1.7)，可得$\boldsymbol{A}=(-\sin\theta,\cos\theta,0)$，选择$\boldsymbol{A}$的零空间的基矩阵为

$$\boldsymbol{\xi}(\boldsymbol{q})=\begin{pmatrix}\cos\theta & 0\\ \sin\theta & 0\\ 0 & 1\end{pmatrix}.$$

再由式(1.3)可知，机器人的运动学方程可以描述为

$$\dot{\boldsymbol{q}}=\boldsymbol{\xi}(\boldsymbol{q})\boldsymbol{\mu}=\begin{pmatrix}\cos\theta & 0\\ \sin\theta & 0\\ 0 & 1\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\mu_1\\ \mu_2\end{pmatrix}.$$

在机器人运动学系统中，v 和 ω 通常是作为两个速度输入量来设计控制器的，即 $\mu_1=v$，$\mu_2=\omega$，上述运动学系统可以表示为

$$\begin{cases}\dot{x}=v\cos\theta,\\ \dot{y}=v\sin\theta,\\ \dot{\theta}=\omega.\end{cases}\tag{1.8}$$

为便于讨论，假设机器人质量、摩擦力、重力以及外部扰动等均为已知量，且其质心与几何中心重合. 类似于系统式(1.5)的右边可以作一个输入变换

$-(\boldsymbol{\xi}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{M}\boldsymbol{\xi})^{-1}\boldsymbol{\xi}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{M}\dot{\boldsymbol{\xi}}+\boldsymbol{V}_{\mathrm{m}}\boldsymbol{\xi})\boldsymbol{\mu}+(\boldsymbol{\xi}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{M}\boldsymbol{\xi})^{-1}(-\boldsymbol{f}(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}})+\boldsymbol{\xi}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B}\boldsymbol{\tau})=\bar{\boldsymbol{\tau}}$，则式(1.5)就可简化为 $\boldsymbol{\mu}=\bar{\boldsymbol{\tau}}$，$\bar{\boldsymbol{\tau}}$ 为新的输入. 类似地，引入新的力或力矩形式的输入 $(\boldsymbol{\tau}_1,\boldsymbol{\tau}_2)^{\mathrm{T}}\in\mathbf{R}^2$ 使得 $\dot{\boldsymbol{v}}=\boldsymbol{\tau}_1$，$\dot{\boldsymbol{\omega}}=\boldsymbol{\tau}_2$，则机器人运动学系统(1.8)对应的动力学系统可表示为

$$\begin{cases}\dot{\boldsymbol{x}}=\boldsymbol{v}\cos\theta,\\ \dot{\boldsymbol{y}}=\boldsymbol{v}\sin\theta,\\ \dot{\theta}=\omega,\\ \dot{\boldsymbol{v}}=\boldsymbol{\tau}_1,\\ \dot{\boldsymbol{\omega}}=\boldsymbol{\tau}_2.\end{cases}\tag{1.9}$$

此外，具有无漂移项形式的非完整链式系统和其等价标准形幂式系统也常用于描述非完整系统的运动学模型. 这是因为非完整系统总可以通过全局或局部的状态和输入变换转化为标准链式系统[40-42]. 文献[43]给出系统(1.3)可化为链式系统的一个充分条件，文献[44]给出将系统(1.3)化为带有高阶扰动项的链式系统的状态和输入变换，而文献[45]则得到将系统(1.3)转化为幂式系统的一个充分条件. 最简单的非完整链式系统是一类两个输入 n 维的单链系统

$$\begin{cases}\dot{\boldsymbol{x}}_1=\boldsymbol{u}_1,\\ \dot{\boldsymbol{x}}_2=\boldsymbol{x}_3\boldsymbol{u}_1,\\ \dot{\boldsymbol{x}}_3=\boldsymbol{x}_4\boldsymbol{u}_1,\\ \quad\vdots\\ \dot{\boldsymbol{x}}_n=\boldsymbol{u}_2,\end{cases}\tag{1.10}$$

其中，$\boldsymbol{x}_i \in \mathbf{R}^1 (i=1,2,3,\cdots,n)$为系统的状态量，$(\boldsymbol{u}_1,\boldsymbol{u}_2)^{\mathrm{T}} \in \mathbf{R}^2$ 为控制输入.在光滑的状态变换下，与其等价的幂式系统是下面的链式系统

$$\begin{cases} \dot{\boldsymbol{x}}_1 = \boldsymbol{u}_1, \\ \dot{\boldsymbol{x}}_2 = \boldsymbol{x}_1 \boldsymbol{u}_2, \\ \dot{\boldsymbol{x}}_3 = \dfrac{1}{2!}\boldsymbol{x}_1^2\, \boldsymbol{u}_2, \\ \quad \vdots \\ \dot{\boldsymbol{x}}_{n-1} = \dfrac{1}{(n-2)!}\boldsymbol{x}_1^{n-2}\, \boldsymbol{u}_2, \\ \dot{\boldsymbol{x}}_n = \boldsymbol{u}_2. \end{cases}$$

对于非完整移动机器人系统(1.8)，取一个局部的状态和输入变换

$$\boldsymbol{x}_1 = \boldsymbol{x},\ \boldsymbol{x}_2 = \boldsymbol{y},\ \boldsymbol{x}_3 = \tan\theta,\ \boldsymbol{u}_1 = \boldsymbol{v}\cos\theta,\ \boldsymbol{u}_2 = \boldsymbol{\omega}\sec^2\theta, \tag{1.11}$$

可将式(1.8)转化为一个三维的非完整链式系统

$$\dot{\boldsymbol{x}}_1 = \boldsymbol{u}_1,\ \dot{\boldsymbol{x}}_2 = \boldsymbol{x}_3\boldsymbol{u}_1,\ \dot{\boldsymbol{x}}_3 = \boldsymbol{u}_2.$$

其动力学系统(1.9)相应地变换为扩展的链式系统

$$\begin{cases} \dot{\boldsymbol{x}}_1 = \boldsymbol{u}_1, \\ \dot{\boldsymbol{x}}_2 = \boldsymbol{x}_3\boldsymbol{u}_1, \\ \dot{\boldsymbol{x}}_3 = \boldsymbol{u}_2, \\ \dot{\boldsymbol{u}}_1 = \boldsymbol{\tau}_1, \\ \dot{\boldsymbol{u}}_2 = \boldsymbol{\tau}_2. \end{cases} \tag{1.12}$$

在(1.10)标准非完整链式系统和(1.12)扩展的链式系统基础上，许多学者从理论的角度研究了一大批更广泛的带有不确定参数(常数或时变的)和非线性三角结构形式漂移项的链式系统的鲁棒控制问题，例如，最近 Ju G L，Wu Y Q，Sun W H[46] 以及 Zheng X Y，Wu Y Q[47] 分别讨论了带有不确定或强非线性漂移项非完整链式系统的自适应输出反馈镇定问题；文献[48]则考虑带有强非线性漂移项的高阶非完整链式系统的自适应镇定问题.

1.2 非完整控制系统的控制方法与研究现状

非完整系统控制主要包括点镇定、运动规划和轨迹跟踪控制3类基本控制问题.对于模型精确已知的或含有未知参数的和外部扰动的不确定非完整机器人系统或链式系统控制问题,已经有了非常多的研究结果[3-35,46-84].

点镇定是指寻求某种控制律,使得系统能从给定的初始位置运动到目标位置,即各状态的平衡点.但是,由于非完整系统不满足Brockett[36]关于光滑反馈镇定的必要条件,即不存在光滑的(甚至是连续的)纯状态反馈律使其镇定,为克服这个困难,这类问题的研究已成为非完整系统控制中最具挑战性的热点问题之一.

通常意义上的运动规划是一个开环控制问题,并且在很多领域中被广泛、深入地研究过,研究目的主要是寻找有界的控制输入序列使系统能够在有限的时间内从任意初始状态到达任意期望状态.非完整系统的可控性使其运动规划的解确实存在,但与完整系统不同的是,非完整系统不能用一组独立的广义坐标表示,并不是任意的运动规划都是可行的,只有那些满足非完整约束的运动才是能够实现的.

轨迹跟踪是指设计控制律,使得非完整系统能从任意给定的初始状态出发,按给定的参考轨迹运动,并且该轨迹对于所研究的非完整系统是可行的.Thuilot 等[85]指出如果被跟踪的参考轨迹不包含停止运动,就不会遇到不满足 Brockett 必要条件的情况,因此经典的非线性控制方法可以用于解决非完整系统的轨迹跟踪控制问题.这也是理论上将点镇定与轨迹跟踪问题分开研究的原因.

1.2.1 非完整系统的控制方法

从控制理论的角度,非完整系统的控制策略主要包括:自适应控制[22-23,32-33,79,86-87],变结构控制[6,32,55-56,88-89],反步控制[40,65,70,78,90],H^{∞}控制[34,91],最优控制[92]和神经网络、学习控制、模糊控制等智能控制策略[93-99]等.而从3类基本控制问题来看,非完整系统的镇定