

电子信息与电气工程技术丛书 E&E

本书英文版由Springer出版发行

ROBOT CONTROL SYSTEM
DESIGN AND MATLAB
SIMULATION
THE ADVANCED DESIGN METHOD



机器人控制系统的设计
与MATLAB仿真
先进设计方法

刘金琨 著

Liu Jinkun

清华大学出版社



电子信息与电气工程技术丛书 (E&E)

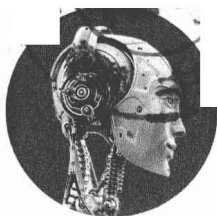
ROBOT CONTROL SYSTEM DESIGN
AND MATLAB SIMULATION
THE ADVANCED DESIGN METHOD

机器人控制系统的设计 与MATLAB仿真

先进设计方法

刘金焜 著

Liu Jinkun



清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书系统地介绍了机械手为主的先进控制器的设计和分析方法,是作者多年从事机器人控制系统教学和科研工作的结晶,同时融入了国内外同行近年来所取得的最新成果。

本书是在原有《机器人控制系统的设计与 MATLAB 仿真》基础上撰写而成的。全书分为上下两册,作为下册,本册以电机、机械手、倒立摆、移动机器人和四旋翼飞行器为对象,共分 13 章,包括控制系统输出受限控制、控制输入受限控制、基于轨迹规划的机械手控制、机械手模糊自适应反演控制、机械手迭代学习控制、柔性机械手反演及动态面控制、柔性机械臂分布式参数边界控制、移动机器人的轨迹跟踪控制、移动机器人双环轨迹跟踪控制、四旋翼飞行器轨迹控制、基于 LMI 的控制系统设计、基于线性矩阵不等式的倒立摆 T-S 模糊控制和执行器容错控制。每种控制方法都给出了算法推导、实例分析和相应的 MATLAB 仿真设计程序。

本书各部分内容既相互联系又相互独立,读者可根据自己需要选择学习。本书适用于从事生产过程自动化、计算机应用、机械电子和电气自动化领域工作的工程技术人员阅读,也可作为高等院校工业自动化、自动控制、机械电子、自动化仪表、计算机应用等专业的教学参考书。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。
版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

机器人控制系统的设计与 MATLAB 仿真:先进设计方法/刘金琨著. —北京:清华大学出版社, 2017(2018.6 重印)

(电子信息与电气工程技术丛书)

ISBN 978-7-302-47008-3

I. ①机… II. ①刘… III. ①机器人控制—控制系统设计 ②机器人控制—系统仿真—Matlab 软件 IV. ①TP24 ②TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 102011 号

责任编辑:盛东亮
封面设计:李召霞
责任校对:时翠兰
责任印制:李红英

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社总机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

课件下载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印 装 者:北京九州迅驰传媒文化有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:31.5 字 数:743 千字

版 次:2017 年 11 月第 1 版 印 次:2018 年 6 月第 2 次印刷

印 数:2001~2600

定 价:99.00 元

产品编号:071505-01

有关机器人控制理论及其工程应用,近年来已有大量的论文发表。作者多年来一直从事控制理论及应用方面的教学和研究工作,为了促进机器人控制和自动化技术的进步,反映机器人控制设计与应用中的最新研究成果,并使广大研究人员和工程技术人员能够了解、掌握和应用这一领域的最新技术,学会用 MATLAB 语言进行各种机器人控制算法的分析和设计,作者编写了这本书,以抛砖引玉,供广大读者学习参考。

本书是作者在总结多年研究成果的基础上,进一步理论化、系统化、规范化、实用化而成的,其特点是:

(1) 控制算法取材新颖,内容先进,重点置于学科交叉部分的前沿研究和介绍有潜力的新思想、新方法和新技术,取材着重于基本概念、基本理论和基本方法。

(2) 针对每种控制算法,给出了完整的 MATLAB 仿真程序,并给出了程序的说明和仿真结果,具有很强的可读性。

(3) 着重从应用领域角度出发,突出理论联系实际,面向广大工程技术人员,具有很强的工程性和实用性。书中有大量应用实例及其结果分析,为读者提供了有益的借鉴。

(4) 所给出的各种控制算法完整,程序结构设计力求简单明了,便于自学和进一步开发。

(5) 书中介绍的方法不局限于机械手的控制,同时也适合于解决运动控制领域其他背景的控制问题。

本书主要以机械手为被控对象,此外,为了介绍一些新的运动控制方法,本书还以机械系统、电机、倒立摆和四旋翼飞行器为被控对象来辅助说明。

本书是在原有《机器人控制系统的设计与 MATLAB 仿真》基础上撰写而成的。本书以电机、机械手、倒立摆、移动机器人和四旋翼飞行器为对象,共分 13 章,其中第 1~第 2 章以单入单出的电机为被控对象,其中第 1 章介绍了控制系统输出受限的设计方法,第 2 章介绍了控制系统输入受限的设计方法,第 3 章介绍了基于轨迹规划的双关节机械手控制的设计方法,第 4 章介绍了机械手模糊自适应反演控制的设计方法,第 5 章介绍了基于迭代学习算法的机械手控制方法,第 6 章介绍了柔性机械手反演及动态面控制的设计方法,第 7 章介绍了柔性机械臂分布式参数建模和边界控制设计方法,第 8 章介绍了基于反演控制和迭代学习理论的移动机器人轨迹跟踪控制方法,第 9 章和第 10 章介绍了基于双闭环控制系统的设计方法,其中第 9 章介绍了移动机器人双环轨迹跟踪控制方法,第 10 章介绍了四旋翼飞行器轨迹控制方法,第 11 章和第 12 章分别介绍了基于线性矩阵不等式的控制系统设计方法和倒立摆 T-S 模糊控制方法,第 13 章介绍了执行器容错控制方法。

书中介绍的控制方法有些选自于高水平国际杂志和著作中的经典控制方法,并对其的一些算法进行了修正或补充。通过对一些典型控制器设计方法较详细的理论分析

前言

和仿真分析,使一些深奥的控制理论易于掌握,为读者的深入研究打下基础。

本书是基于当前的 MATLAB 环境^①下开发的,各个章节的内容具有很强的独立性,读者可以结合自己的方向深入地进行研究。

由于作者水平有限,书中难免存在一些不足和错误之处,真诚欢迎广大读者批评指正。若读者有指正或需与作者商讨,或对控制算法及仿真程序有疑问,可通过电子邮件 ljk@buaa.edu.cn 与作者联系。相信通过与广大同行的交流,作者会得到许多新的有益的建议,从而将本书写得更好。

刘金琨

2017年7月于北京航空航天大学

^① 本书采用的 MATLAB 为英文版,故书中仿真图为英文。

仿真程序使用说明

1. 所有仿真算法按章归类,下载的程序名与书中一一对应。
2. 将下载的仿真程序复制到硬盘里 MATLAB 运行的路径中,便可仿真运行。
3. 本书算法在 MATLAB 2015 版本下运行成功,并适用于其他更高版本。
4. 假如对仿真程序有疑问,可及时通过 E-mail 与本书的编辑或作者本人联系。

编辑 E-mail 地址: shengdl@tup. tsinghua. edu. cn

作者 E-mail 地址: ljk@buaa. edu. cn

5. 仿真程序下载网址:

北京航空航天大学作者页面: <http://shi.buaa.edu.cn/liujinkun>

清华大学出版社网站本书页面: www.tup.com.cn

第 1 章 控制系统输出受限控制	1
1.1 输出受限引理	1
1.2 位置输出受限控制	2
1.2.1 系统描述	2
1.2.2 控制器设计	2
1.2.3 仿真实例	4
1.3 位置及速度输出受限控制	8
1.3.1 多状态输出受限引理	8
1.3.2 系统描述	9
1.3.3 控制器设计与分析	9
1.3.4 仿真实例	10
1.4 按设定误差性能指标收敛控制	14
1.4.1 问题描述	14
1.4.2 跟踪误差性能函数设计	15
1.4.3 收敛性分析	15
1.4.4 仿真实例	17
参考文献	22
第 2 章 控制系统输入受限控制	23
2.1 基于双曲正切的控制输入受限控制	23
2.1.1 定理及分析	23
2.1.2 基于双曲正切的控制输入受限控制	24
2.1.3 仿真实例	25
2.2 负载未知下的控制输入受限控制	28
2.2.1 问题的提出	28
2.2.2 自适应控制律设计	28
2.2.3 闭环系统稳定性分析	29
2.2.4 仿真实例	30
2.3 带扰动的控制输入受限控制	35
2.3.1 系统描述	35
2.3.2 指数收敛干扰观测器设计	35
2.3.3 控制器的设计及分析	35
2.3.4 仿真实例	37
2.4 基于反演的非线性系统控制输入受限控制	42

目录

2.4.1	系统描述	42
2.4.2	双曲正切光滑函数特点	42
2.4.3	控制输入受限方法	43
2.4.4	基于反演的控制算法设计	43
2.4.5	仿真实例	46
2.5	基于输出受限和输入受限的控制	51
2.5.1	系统描述	51
2.5.2	控制器设计	51
2.5.3	基于反演的控制算法设计	52
2.5.4	仿真实例	54
2.6	基于反演的控制输入及变化率受限控制	60
2.6.1	系统描述	60
2.6.2	控制输入受限方法	60
2.6.3	基于反演的控制算法设计	61
2.6.4	仿真实例	63
2.7	基于反演的控制输入及变化率受限轨迹跟踪控制	68
2.7.1	系统描述	68
2.7.2	控制输入受限方法	68
2.7.3	基于反演的控制算法设计	69
2.7.4	仿真实例	71
2.8	基于反演的控制输入及变化率受限鲁棒控制	76
2.8.1	系统描述	76
2.8.2	控制输入受限方法	76
2.8.3	基于反演的控制算法设计	77
2.9	基于 Nussbaum 函数的控制输入受限控制	80
2.9.1	系统描述	80
2.9.2	输入受限控制方法	81
2.9.3	基于反演的输入受限控制算法设计	81
2.9.4	仿真实例	83
	附录	89
	参考文献	91
第 3 章	基于轨迹规划的机械手控制	92
3.1	差分进化算法	92
3.1.1	差分进化算法的提出	92

3.1.2	标准差分进化算法	93
3.1.3	差分进化算法的基本流程	93
3.1.4	差分进化算法的参数设置	94
3.1.5	基于差分进化算法的函数优化	95
3.2	轨迹规划算法的设计	99
3.2.1	一个简单的样条插值实例	99
3.2.2	轨迹规划算法介绍	100
3.2.3	最优轨迹的设计	101
3.3	单关节机械手最优轨迹控制	101
3.3.1	问题的提出	101
3.3.2	最优轨迹的优化	102
3.3.3	仿真实例	102
3.4	双关节机械手最优轨迹控制	108
3.4.1	系统描述	108
3.4.2	规划器设计	108
3.4.3	仿真实例	109
	参考文献	117
第 4 章	机械手模糊自适应反演控制	118
4.1	基于反演方法的单关节机器人自适应模糊控制	118
4.1.1	系统描述	118
4.1.2	Backstepping 控制器设计	119
4.1.3	基于 Backstepping 的自适应模糊控制	121
4.1.4	仿真实例	124
4.2	双关节机械臂的自适应模糊反演控制	131
4.2.1	系统描述	131
4.2.2	传统 Backstepping 控制器设计及稳定性分析	132
4.2.3	仿真实例	135
	参考文献	143
第 5 章	机械手自适应迭代学习控制	144
5.1	控制器增益自适应整定的机械手迭代学习控制	144
5.1.1	问题的提出	144
5.1.2	控制器设计	145
5.1.3	收敛性分析	146
5.1.4	仿真实例	150

目录

5.2	基于增益自适应整定的机械手迭代学习控制的改进	156
5.2.1	算法的改进	156
5.2.2	仿真实例	157
5.3	基于切换增益的单关节机械手迭代学习控制	165
5.3.1	问题描述	165
5.3.2	自适应迭代学习控制器设计	165
5.3.3	收敛性分析	166
5.3.4	仿真实例	168
5.4	基于切换增益的多关节机械手迭代学习控制	175
5.4.1	问题的提出	175
5.4.2	三个定理及收敛性分析	176
5.4.3	仿真实例	177
	附录	193
	参考文献	193
第6章	柔性机械手反演及动态面控制	194
6.1	柔性机械手的反演控制	194
6.1.1	系统描述	194
6.1.2	反演控制器设计	195
6.1.3	仿真实例	198
6.2	柔性机械手动态面控制	203
6.2.1	系统描述	203
6.2.2	控制律设计	204
6.2.3	稳定性分析	205
6.2.4	仿真实例	208
6.3	柔性关节机械手 K-观测器设计及分析	216
6.3.1	K-观测器设计原理	216
6.3.2	柔性关节机械手模型描述与变换	218
6.3.3	柔性关节机械手 K-观测器设计与分析	219
6.3.4	按 A_0 为 Hurwitz 进行 K 的设计	221
6.3.5	仿真实例	222
6.4	基于 K-观测器的柔性关节机械手动态面控制	227
6.4.1	控制算法设计	227
6.4.2	稳定性分析	228
6.4.3	仿真实例	231

6.5	柔性机械手神经网络反演控制	241
6.5.1	系统描述	241
6.5.2	反演控制器设计	241
6.5.3	仿真实例	246
	参考文献	253
第 7 章	柔性机械臂分布式参数边界控制	254
7.1	柔性机械臂的偏微分方程动力学建模	254
7.1.1	柔性机械臂的控制问题	254
7.1.2	柔性机械臂的偏微分方程建模	254
7.2	柔性机械臂分布式参数边界控制——指数收敛方法	258
7.2.1	引理	258
7.2.2	边界控制律的设计	259
7.2.3	仿真实例	265
7.3	柔性机械臂分布式参数边界控制-LaSalle 分析方法	271
7.3.1	模型描述	271
7.3.2	模型的空间转换	272
7.3.3	闭环系统耗散性分析	273
7.3.4	半群和紧凑性分析	275
7.3.5	收敛性分析	276
7.3.6	仿真实例	277
	附录	281
	参考文献	286
第 8 章	移动机器人的轨迹跟踪控制	287
8.1	移动机器人运动学反演控制	287
8.1.1	运动学模型的建立	287
8.1.2	反演控制器设计	288
8.1.3	仿真实例	289
8.2	移动机器人动力学反演控制	295
8.2.1	动力学模型的建立	295
8.2.2	反演控制器设计	296
8.2.3	仿真实例	298
8.3	移动机器人轨迹跟踪迭代学习控制	303
8.3.1	数学基础	304
8.3.2	系统描述	304

目录

8.3.3	控制律设计及收敛性分析	306
8.3.4	仿真实例	309
	参考文献	312
第9章	移动机器人双环轨迹跟踪控制	313
9.1	移动机器人的滑模轨迹跟踪控制	313
9.1.1	移动机器人运动学模型	313
9.1.2	位置控制律设计(外环)	314
9.1.3	姿态控制律设计(内环)	315
9.1.4	闭环系统的设计关键	315
9.1.5	仿真实例	316
9.2	基于全局稳定的移动机器人双环轨迹跟踪控制	323
9.2.1	移动机器人运动学模型	323
9.2.2	动态系统全局渐近稳定定理	324
9.2.3	控制系统设计	324
9.2.4	整个闭环稳定性分析	326
9.2.5	仿真实例	327
9.3	移动机器人双环编队控制	334
9.3.1	移动机器人运动学模型	334
9.3.2	控制系统设计	334
9.3.3	整个闭环稳定性分析	337
9.3.4	仿真实例	337
	参考文献	345
第10章	四旋翼飞行器轨迹控制	346
10.1	基于内外环的四旋翼飞行器的PD控制	346
10.1.1	四旋翼飞行器动力学模型	346
10.1.2	位置控制律设计	347
10.1.3	虚拟姿态角度求解	347
10.1.4	姿态控制律设计	348
10.1.5	闭环系统的设计关键	349
10.1.6	仿真实例	350
10.2	基于双闭环的四旋翼飞行器速度控制	359
10.2.1	四旋翼飞行器动力学模型	359
10.2.2	四旋翼飞行器速度控制	360
10.2.3	虚拟姿态角度求解	361

10.2.4	姿态控制律设计	361
10.2.5	闭环系统的设计关键	362
10.2.6	仿真实例	363
10.3	基于双闭环的四旋翼飞行器编队控制	370
10.3.1	四旋翼飞行器动力学模型	370
10.3.2	四旋翼飞行器编队控制	371
10.3.3	虚拟姿态角度求解	372
10.3.4	姿态控制律设计	373
10.3.5	闭环系统的设计关键	374
10.3.6	仿真实例	374
	参考文献	386
第 11 章	基于 LMI 的控制系统设计	387
11.1	控制系统 LMI 控制算法设计	387
11.1.1	系统描述	387
11.1.2	控制器设计与分析	387
11.1.3	仿真实例	388
11.2	位置跟踪控制系统 LMI 算法设计	392
11.2.1	系统描述	392
11.2.2	控制器设计	392
11.2.3	控制器设计与分析	393
11.2.4	仿真实例	393
11.3	带扰动的控制系统 LMI 控制算法设计	397
11.3.1	系统描述	397
11.3.2	基于 H_∞ 指标控制器设计与分析	398
11.3.3	LMI 设计	399
11.3.4	仿真实例	400
11.4	带扰动的控制系统 LMI 跟踪控制算法设计	403
11.4.1	系统描述	403
11.4.2	仿真实例	404
11.5	控制输入受限下的 LMI 控制算法设计	408
11.5.1	系统描述	408
11.5.2	控制器的设计与分析	408
11.5.3	LMI 设计	409
11.5.4	仿真实例	410

目录

11.6	控制输入受限下位置跟踪 LMI 控制算法	414
11.6.1	系统描述	414
11.6.2	控制器设计	414
11.6.3	控制器设计与分析	415
11.6.4	仿真实例	416
11.7	控制输入受限下的 LMI 倒立摆系统镇定	420
11.7.1	系统描述	421
11.7.2	控制器设计与分析	421
11.7.3	仿真实例	423
11.8	基于 LMI 的控制输入及其变化率受限控制算法	427
11.8.1	系统描述	428
11.8.2	控制器的设计与分析	428
11.8.3	仿真实例	430
	附录	434
	参考文献	434
第 12 章	基于 LMI 的倒立摆 T-S 模糊控制	435
12.1	单级倒立摆的 T-S 模糊建模	435
12.1.1	T-S 型模糊系统	435
12.1.2	倒立摆系统的控制问题	436
12.1.3	基于 2 条模糊规则的设计	436
12.1.4	基于 4 条模糊规则的设计	437
12.2	基于极点配置的单级倒立摆 T-S 模糊控制	440
12.2.1	基于 2 条模糊规则的控制器设计	440
12.2.2	基于 4 条模糊规则的控制器设计	441
12.3	基于 LMI 的单级倒立摆 T-S 模糊控制	447
12.3.1	LMI 不等式的设计及分析	448
12.3.2	不等式的转换	450
12.3.3	LMI 的设计实例	450
12.3.4	基于 LMI 的单级倒立摆 T-S 模糊控制	451
	参考文献	460
第 13 章	执行器自适应容错控制	461
13.1	SISO 系统执行器自适应容错控制	462
13.1.1	控制问题描述	462
13.1.2	控制律的设计与分析	462

13.1.3	仿真实例	463
13.2	MISO 系统执行器自适应容错控制	467
13.2.1	控制问题描述	467
13.2.2	控制律的设计与分析	467
13.2.3	仿真实例	468
13.3	带执行器卡死的 MISO 系统自适应容错控制	472
13.3.1	控制问题描述	472
13.3.2	控制律的设计与分析	473
13.3.3	仿真实例	475
13.4	基于状态输出受限性能的切换容错控制	479
13.4.1	多状态输出受限引理	479
13.4.2	系统描述	479
13.4.3	基于 Barrier Lyapunov 的状态输出受限控制	479
13.4.4	监控函数设计	480
13.4.5	仿真实例	481
	附录	484
	参考文献	484

受限系统的控制问题一直是控制理论及其工程应用中备受关注的领域之一。在实际控制系统中,为保证系统的安全性,通常会对系统输出值的上下界做出严格限制,或要求系统输出超调量在一定范围内,超调量过大往往意味着系统处于不理想的运行状态,某些情况下会对该系统本身产生不可预知的影响。

本章以机械手的执行电机为被控对象,讨论控制系统输出受限下的控制器设计方法。

1.1 输出受限引理

引理 1.1^[1] 针对误差系统

$$\dot{z} = f(t, z), \quad z = [z_1 \quad z_2]^T \quad (1.1)$$

存在连续可微的正定函数 V_1 和 V_2 , $k_b > 0$, 位置输出为 x_1 , 定义位置误差 $z_1 = x_1 - y_d$, 满足

(1) 当 $z_1 \rightarrow -k_b$ 或 $z_1 \rightarrow k_b$ 时, 有 $V_1(z_1) \rightarrow \infty$;

(2) $\gamma_1(\|z_2\|) \leq V_2(z_2) \leq \gamma_2(\|z_2\|)$, γ_1 和 γ_2 为 K_∞ 类函数。

假设 $|z_1(0)| < k_b$, 取 $V(z) = V_1(z_1) + V_2(z_2)$, 如果满足

$$\dot{V} = \frac{\partial V}{\partial x} f \leq 0$$

则 $|z_1(t)| < k_b, t \in [0, \infty)$ 。

考虑如下对称 Barrier Lyapunov 函数

$$V = \frac{1}{2} \ln \frac{k_b^2}{k_b^2 - z_1^2} \quad (1.2)$$

该函数满足 $V(0) = 0, V(x) > 0 (x \neq 0)$ 的 Lyapunov 设计原理。

取 $z_1(0) = 0.5$, 由 $|z_1(0)| < k_b$, 可取 $k_b = 0.51$, 对称 Barrier Lyapunov 函数的输入输出结果如图 1.1 所示。

仿真程序: chap1_1.m

```
clear all;
close all;
ts = 0.001;
kb = 0.501;

for k = 1:1:1001;
```

```

z(k) = (k - 1) * ts - 0.50;
V(k) = 0.5 * log(kb ^ 2 / (kb ^ 2 - z(k) ^ 2));
end

figure(1);
plot(z,V,'r','linewidth',2);
xlabel('z');ylabel('V');
legend('Barrier Lyapunov function');
hold on;
plot(-kb,[0:0.001:3],'k',kb,[0:0.001:3],'k');

XMIN = -0.6;XMAX = 0.6;
YMIN = 0;YMAX = 3;
axis([XMIN XMAX YMIN YMAX]);
    
```

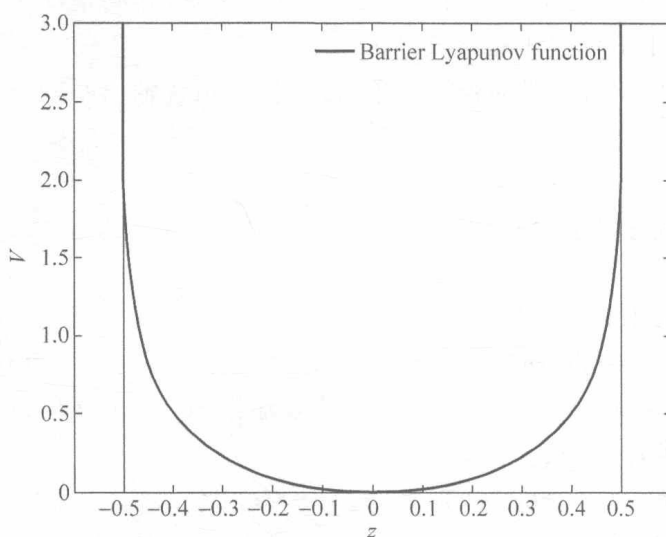


图 1.1 对称 Barrier Lyapunov 函数

1.2 位置输出受限控制

1.2.1 系统描述

被控对象为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = f(x) + bu \end{cases} \quad (1.3)$$

控制任务为通过控制律的设计,实现 $|x_1(t)| < k_c, t \geq 0$ 。

1.2.2 控制器设计

定义位置误差为

$$z_1 = x_1 - y_d \quad (1.4)$$