



华南理工大学  
South China University of Technology

# 博士学位论文

华南理工大学博/硕士学位论文

LaTeX 模板介绍与案例说明

作者姓名 \_\_\_\_\_ 高勇  
学科专业 \_\_\_\_\_ 控制科学与工程  
指导教师 \_\_\_\_\_ 魏武教授  
所在学院 \_\_\_\_\_ 自动化科学与工程学院  
论文提交日期 \_\_\_\_\_ 2022 年 6 月 28 日

**Title Title Title Title Title Title Title Title Title  
Title Title Title Title Title**

A Dissertation Submitted for the Degree of Doctor of Philosophy

**Candidate: Gao Yong**

**Supervisor: Prof. Wei Wu**

South China University of Technology  
Guangzhou, China

分类号：TP242

学校代号：10561

学 号：20\*\*\*\*\*

## 华南理工大学博士学位论文

# 华南理工大学博/硕士学位论文 LaTeX 模板介绍与案例说明

作者姓名：高 勇

指导教师姓名、职称：魏武 教授

申请学位级别：工学博士

学科专业名称：控制科学与工程

研究方向：仿生机器人运动规划与智能控制

论文提交日期：2022 年 6 月 28 日

论文答辩日期：2022 年 \* 月 \* 日

学位授予单位：华南理工大学

学位授予日期：年 月 日

答辩委员会成员：

主席：孙 \*\*

委员：刘 \*\*、马 \*\*、魏 \*、刘 \*\*

# 华南理工大学 学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的论文是本人在导师的指导下独立进行研究所取得的研究成果。除了文中特别加以标注引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写的成果作品。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律后果由本人承担。

作者签名：

日期： 年 月 日

# 学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，即：研究生在校攻读学位期间论文工作的知识产权单位属华南理工大学。学校有权保存并向国家有关部门或机构递交论文的复印件和电子版，允许学位论文被查阅（除在保密期内的保密论文外）；学校可以公布学位论文的全部或部分内容，可以允许采用影印、缩印或其它复制手段保存、汇编学位论文。本人电子文档的内容和纸质论文的内容相一致。

本学位论文属于：

保密（校保密委员会审定为涉密学位论文时间：\_\_\_\_年\_\_\_\_月\_\_\_\_日），于\_\_\_\_年\_\_\_\_月\_\_\_\_日解密后适用本授权书。

不保密，同意在校园网上发布，供校内师生和与学校有共享协议的单位浏览；同意将本人学位论文编入有关数据库进行检索，传播学位论文的全部或部分内容。

（请在以上相应方框内打“√”）

作者签名：

日期：

指导教师签名：

日期：

作者联系电话：

电子邮箱：

联系地址（含邮编）：

## 摘要

本文主要研究内容与创新成果如下。

- (1) 该模板的测试环境为：操作系统 Win10x64，编辑器版本为 WinEdt7.0，MiKTeX 版本为 TeX2.9.3759，编译方式为 XeLaTeX。
- (2) 后缀为.tex 的文件打开方式选择 UTF-8。
- (3) 采用 `includeonly` 指令可以自由选择想要编译的某些章节，从而实现快速查看并核对这些章节的内容与版式是否达标。
- (4) XeLaTeX Compilation Report (Pages: 33)      Errors: 0      Warnings: 2      Bad Boxes: 0

关键词： XeLaTeX; WinEdt7.0; MiKTeX-Tex2.9.3759; Win10x64; 关键词 5

## Abstract

Technology energizes life, and intelligence leads the future.

(1)

(2)

(3)

(4)

**Keywords:** Keyword1; Keyword2; Keyword3; Keyword4; Keyword5

# 目 录

<b>摘要</b> .....	I
<b>Abstract</b> .....	II
<b>目录</b> .....	IV
<b>表格清单</b> .....	V
<b>插图清单</b> .....	VI
<b>第一章 文献引用、图片与表格</b> .....	1
1.1 文献引用示例 .....	1
1.2 图片排版示例 .....	1
1.2.1 国内外研究现状 .....	1
1.2.2 长表格、跨页表格示例 .....	2
1.3 关键科学技术问题概述 .....	5
1.4 本文的研究内容与组织结构 .....	5
1.5 本章小结 .....	5
<b>第二章 数学公式 -数学公式 -数学公式 -数学公式 -数学公式 -数学公式</b> .....	6
2.1 引言 .....	6
2.2 数学公式 .....	6
2.2.1 数学公式数学公式 .....	7
2.2.2 数学公式数学公式数学公式 .....	7
2.3 六足机器人的数学公式 .....	9
2.3.1 六足机器人的数学公式数学公式 .....	9
2.3.2 六足机器人的数学公式数学公式数学公式 .....	11
2.4 注记与序号列表 .....	12
2.5 本章小结 .....	12
<b>第三章 引理、定理、证明、注记</b> .....	13
3.1 引言 .....	13
3.2 定理 .....	13
3.3 本章小结 .....	13

<b>第四章</b>	<b>类定理格式的用法</b>	14
4.1	引言	14
4.2	约定	14
4.3	本章小结	14
<b>第五章</b>	<b>算法 - 算法 - 算法</b>	15
5.1	引言	15
5.2	算法	15
5.3	本章小结	15
<b>结论与展望</b>		16
<b>参考文献</b>		17
<b>攻读博士学位期间取得的研究成果</b>		20
<b>致谢</b>		23

## 表格清单

1-1 长表格跨页表格 . . . . .	3
1-2 对比 . . . . .	4
2-1 单腿支链上四个主动关节的有效旋转范围 . . . . .	7
2-2 DCX22L 型有刷直流电机的参数配置表 . . . . .	8
2-3 机器人 WelCH 的物理样机的尺寸配置表 . . . . .	9
4-1 机体实施俯仰运动过程中的跟踪控制性能对比 . . . . .	14

## 插图清单

1-1	高空玻璃幕墙环境中的 (a) 人工作业与 (b) 机器人作业方式 . . . . .	1
1-2	外墙清洗双足机器人 . . . . .	2
1-3	iCrawl 机器人 . . . . .	2
1-4	双足轮混合式攀爬机器人 . . . . .	2
1-5	仿尺蠖型双足机器人 . . . . .	2
1-6	用于墙体检测和桥梁检测的六足攀爬机器人 . . . . .	3
2-1	吸附式攀爬六足机器人 WelCH 的物理样机模型 . . . . .	6
2-2	吸附式攀爬六足机器人 WelCH 的 SolidWorks 虚拟原型 . . . . .	6
2-3	吸附式攀爬六足机器人 WelCH 的机体平台与单腿支链的结构布局 . . . . .	7
2-4	吸附式攀爬六足机器人 WelCH 的硬件系统架构图 . . . . .	8

# 第一章 文献引用、图片与表格

## 1.1 文献引用示例

研究背景及意义研究背景及意义<sup>[1-3]</sup>。研究背景及意义研究背景及意义<sup>[4, 5]</sup>，研究背景及意义研究背景及意义。

研究背景及意义（图1-1(a)<sup>[6]</sup>），研究背景及意义，如图1-1(b)所示<sup>[7]</sup>。

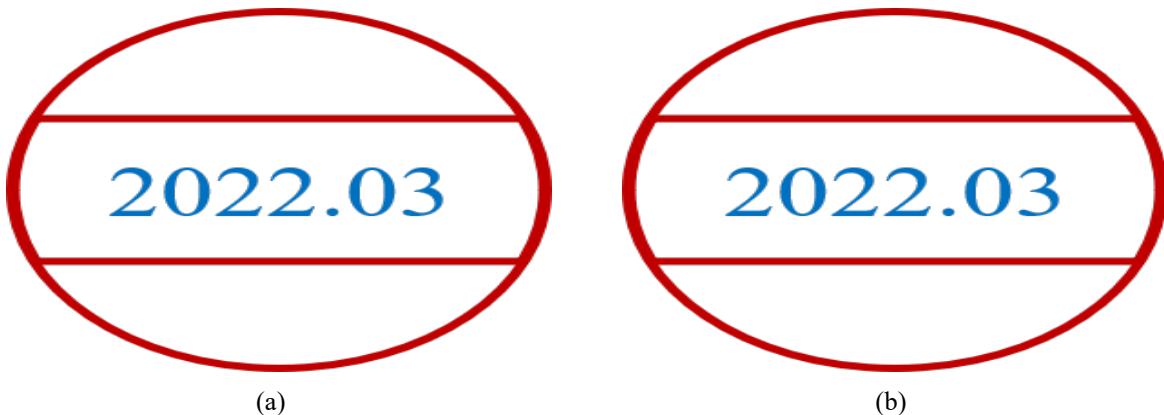


图 1-1 高空玻璃幕墙环境中的 (a) 人工作业<sup>[6]</sup> 与 (b) 机器人作业方式<sup>[7]</sup>

文献 [8–12] 研究背景及意义，文献 [13, 14] 研究背景及意义研究背景及意义<sup>[15–18]</sup>。

## 1.2 图片排版示例

研究现状研究现状。研究现状研究现状。

### 1.2.1 国内外研究现状

#### 1.2.1.1 图片排版

研究现状研究现状（如图1-2所示），研究现状研究现状研究现状研究现状研究现状<sup>[19]</sup>。研究现状研究现状研究现状（如图1-3所示），研究现状研究现状研究现状<sup>[20]</sup>。

研究现状研究现状研究现状（图1-4），研究现状研究现状<sup>[21]</sup>。研究现状研究现状研究现状<sup>[22, 25]</sup>或研究现状研究<sup>[23, 26]</sup>。研究现状<sup>[24, 27]</sup>。研究现状研究现状如图1-5所示。

#### 1.2.1.2 图片排版

现状研究现状研究现状研究现状，如图1-6所示，研究现状研究现状研究现状研究现状<sup>[28–32]</sup>。



图 1-2 外墙清洗双足机器人<sup>[19]</sup>



图 1-3 iCrawl 机器人<sup>[20]</sup>



图 1-4 双足轮混合式攀爬机器人<sup>[21]</sup>

### 1.2.2 长表格、跨页表格示例

长表格跨页表格长表格跨页表格长表格跨页表格长表格跨页表格  
长表格跨页表格长表格跨页表格长表格跨页表格长表格跨页表格长表格  
长表格跨页表格长表格跨页表格长表格跨页表格长表格跨页表格长表格  
长表格跨页表格长表格跨页表格长表格跨页表格长表格跨页表格长表格跨



(a) 吸盘型

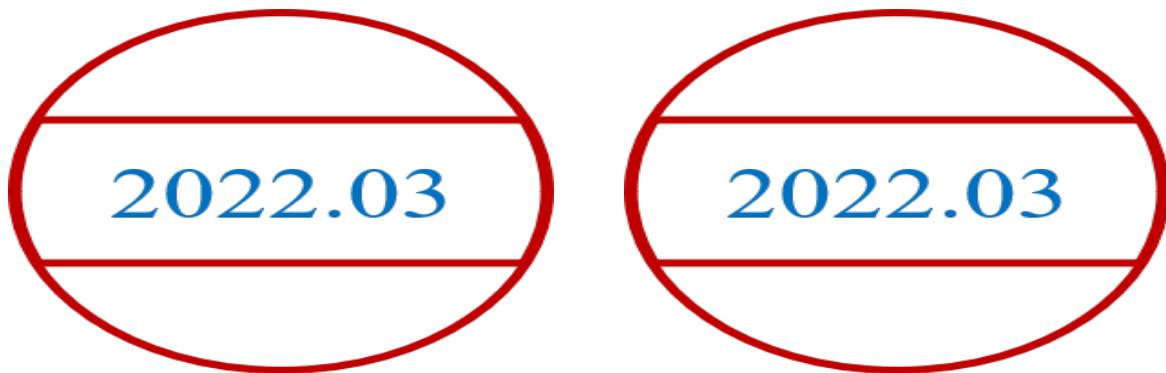


(b) 夹爪型



(c) 软体型

图 1-5 仿尺蠖型双足机器人<sup>[22-24]</sup>

图 1-6 用于墙体检测和桥梁检测的六足攀爬机器人<sup>[28, 31]</sup>

页表格长表格跨页表格长表格跨页表格长表格跨页表格长表格跨页表格长表格跨页表格  
长表格跨页表格长表格跨页表格长表格跨页表格长表格跨页表格长表格跨页表格长表格跨页表格  
长表格跨页表格长表格跨页表格长表格跨页表格长表格跨页表格长表格跨页表格长表格跨页表格  
长表格跨页表格长表格跨页表格长表格跨页表格长表格跨页表格长表格跨页表格长表格跨页表格  
跨页表格长表格跨页表格长表格跨页表格长表格跨页表格。汇总结果如表1-1所示。

表 1-1 长表格跨页表格

机器人名称	支链数目	机体形状	单腿主动副数目	末端装置	应用场景
iCrawl <sup>[20]</sup>	2	仿尺蠖型	2	电磁脚	金属外管道检测
CMBOT	2	仿尺蠖型	2	电磁模块	铁路桥梁检修
MRWALL-SPECT-IV	4	矩形	3	吸盘组	高层建筑维护
CLIBO	4	矩形	4	钩爪	攀岩
UNIclimb	4	矩形	3	干吸附足垫	防水爬行
Magneto	4	矩形	3	永久电磁体	铁质腐蚀检查
HubRobo	4	正方形	3	钩爪	火星探测
Nyxbot	4	矩形	4	干吸附圆盘	斜坡攀爬
SR-CR	4	弹性伸缩管	—	—	平行杆检测
ASTERISK	6	正六边形	4	半球形单元	网状天花板检修
DIGbot	6	附加关节的矩形	3	勾刺	壁一台翻越

表1-1(续)

机器人名称	支链数目	机体形状	单腿主动副数目	末端装置	应用场景
RiSE	6	带尾矩形	2	钩爪	泥砖墙壁攀爬
Abigaille-III	6	正方形	3	仿生足垫	航天器检修
WALKMAN-I	6	柔性气动驱动器	—	真空吸盘	地一壁过渡
SURFY	8	内外框架式	—	真空吸盘	存储罐表面金属质量检测

典型对比典型对比典型对比典型对比典型对比典型对比典型对比典型对比典型对比  
型对比典型对比对比（如表1-2所示）。

表 1-2 对比

吸附方式	优点	缺点	适用环境
*** 吸附	可适应优点优点优点优点优点 点优点优点优点优点优点 点优点优点	缺点缺点缺点缺点缺点 缺点缺点缺点	平整光滑的表 面
*** 抓附	优点优点优点优点优点 优点优	缺点缺点缺点缺点缺点 缺点缺点	杆状建筑，具 有孔洞裂缝的 粗糙墙面
*** 吸附	优点优点优点优点优点 优点	缺点缺点缺点缺点缺点 缺点缺点	导磁材料壁面
*** 吸附	优点优点优点优点优点 优点	缺点缺点缺点缺点缺点 缺点	导磁材料壁面
*** 吸附	优点优点优点优点优点 优点优点	缺点缺点缺点缺点缺点 缺	较平整的表面

典型对比典型对比典型对比典型对比典型对比。

## 1.3 关键科学技术问题概述

### (1) 关键科学技术问题

关键科学技术问题概述关键科学技术问题概述关键科学技术问题概述关键科学技术问题概述  
关键科学技术问题概述关键科学技术问题概述。

### (2) 关键科学技术问题

关键科学技术问题概述关键科学技术问题概述关键科学技术问题概述关键科学技术问题概述  
关键科学技术问题概述关键科学技术问题概述。

## 1.4 本文的研究内容与组织结构

具体来说，本文的主要研究内容如下。各章之间的逻辑联系梳理如下。

## 1.5 本章小结

本章主要。。。。。。

## 第二章 数学公式 -数学公式 -数学公式 -数学公式 -数学公式 式 -数学公式

### 2.1 引言

引言引言引言引言引言引言引言引言引言引言引言引言引言引言引言引言引言  
言引言引言引言引言引言引言引言引言引言引言引言引言引言引言引言引言。

### 2.2 数学公式

机器人的机械结构设计机器人的机械结构设计分别如图2-1与图2-2所示。

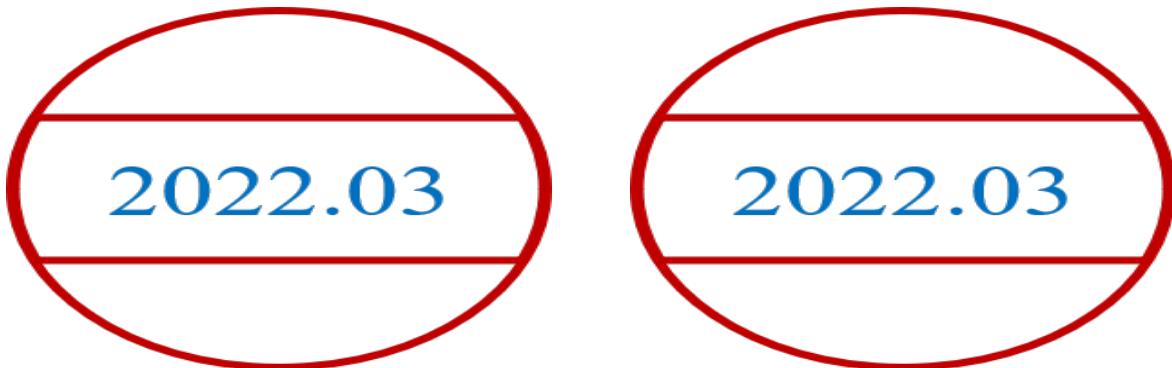


图 2-1 吸附式攀爬六足机器人 WelCH 的物理样机模型

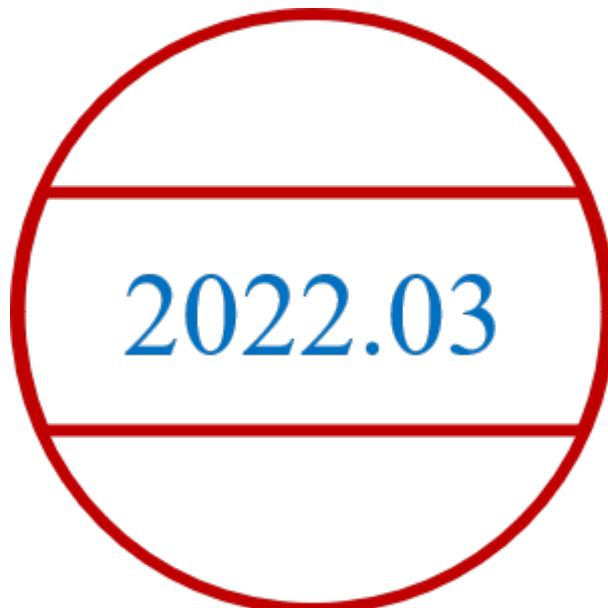


图 2-2 吸附式攀爬六足机器人 WelCH 的 SolidWorks 虚拟原型

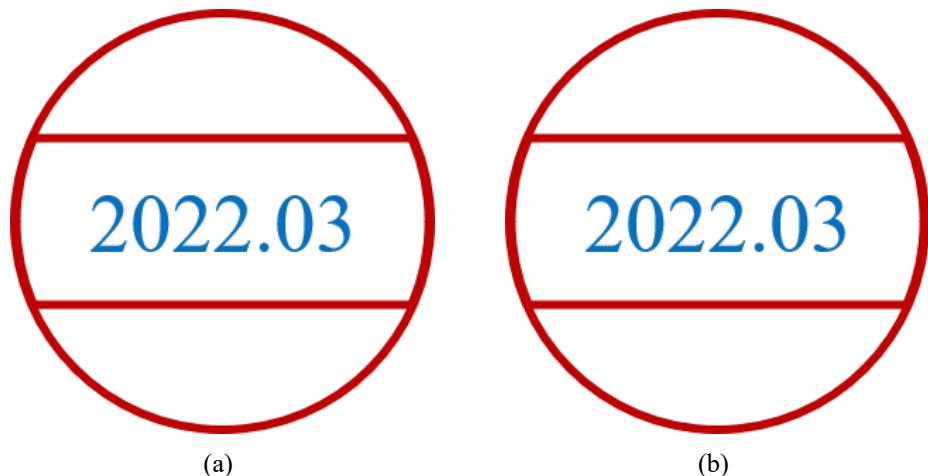


图 2-3 吸附式攀爬六足机器人 WelCH 的机体平台与单腿支链的结构布局

表 2-1 单腿支链上四个主动关节的有效旋转范围

旋转副	关节转动范围	
	角度制 (°)	弧度制 (rad)
髋关节 (关节 1)	[−60, 60]	[− $\frac{\pi}{3}$ , $\frac{\pi}{3}$ ]
胫关节 (关节 2)	[−90, 90]	[− $\frac{\pi}{2}$ , $\frac{\pi}{2}$ ]
膝关节 (关节 3)	[−45, 80]	[− $\frac{\pi}{4}$ , $\frac{4\pi}{9}$ ]
踝关节 (关节 4)	[−90, 90]	[− $\frac{\pi}{2}$ , $\frac{\pi}{2}$ ]

### 2.2.1 数学公式数学公式

机体与支链结构布局 机体与支链结构布局，如图2-3(a)所示。

机体与支链结构布局 机体与支链结构布局（如图2-3(b)所示）。髋关节（记为关节1）的旋转轴线经过连接点  $V_\ell$  且垂直于机体平台平面。。。。。 （对于关节3相对于关节2存在幅值为  $90^\circ$  的初始扭转角），该位形亦称为是六足机器人 WelCH 的标称位形。机体与支链结构布局 机体与支链结构布局如表2-1所列。

### 2.2.2 数学公式数学公式数学公式

机器人的硬件系统设计 机器人的硬件系统设计如图2-4所示。

机器人的硬件系统设计 机器人的硬件系统设计 机器人的硬件系统设计 机器人的硬件系统设计。该型电机兼具转矩特性良好、效率较高、载荷较强、体量轻小等优点，其部分参数配置如表2-2所列。

机器人的硬件系统设计 机器人的硬件系统设计。



图 2-4 吸附式攀爬六足机器人 WelCH 的硬件系统架构图

表 2-2 DCX22L 型有刷直流电机的参数配置表

条目	数值	条目	数值
标称电压	48 V	空载转速	10100 rpm
空载电流	16.2 mA	标称转速	9020 rmp
标称转矩（最大连续转矩）	30.3 mNm	标称电流（最大连续电流）	0.687 A
失速转矩	294 mNm	失速电流	6.5 A
最大效率	89.9%	最大输出功率	45.8 W
最大允许转速	18000 rpm	最大轴向载荷	2.5 N
最大径向载荷	16 N	质量	100 g

## 2.3 六足机器人的数学公式

六足机器人的运动学建模六足机器人的运动学建模六足机器人的运动学建模六足机器人的运动学建模六足机器人的运动学建模。

### 2.3.1 六足机器人的数学公式数学公式

六足机器人的正运动学建模如表2-3所列。

表 2-3 机器人 Welch 的物理样机的尺寸配置表

条目	符号表示	数值	条目	符号表示	数值
机体半径	$R_B$	0.18 m	吸盘半径	$r_S$	0.06 m
连杆 1 长度	$L_1$	0.09 m	连杆 2 长度	$L_2$	0.15 m
连杆 3 长度	$L_3$	0.16 m	连杆 4 长度	$L_4$	0.15 m
整机质量	$M$	25 kg			

六足机器人的正运动学建模六足机器人的正运动学建模，相应的方向向量  $\omega_j$  ( $j = 1, 2, 3, 4$ ) 为

$$\omega_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad \omega_2 = \omega_3 = \omega_4 = \begin{bmatrix} \sin \alpha_\ell \\ -\cos \alpha_\ell \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (2-1)$$

各关节轴线的位置矢量  $r_j$  可取为

$$\begin{aligned} r_1 &= \begin{bmatrix} R_B \cdot \cos \alpha_\ell \\ R_B \cdot \sin \alpha_\ell \\ 0 \end{bmatrix}, & r_2 &= \begin{bmatrix} (R_B + L_1) \cdot \cos \alpha_\ell \\ (R_B + L_1) \cdot \sin \alpha_\ell \\ 0 \end{bmatrix}, \\ r_3 &= \begin{bmatrix} (R_B + L_1 + L_2) \cdot \cos \alpha_\ell \\ (R_B + L_1 + L_2) \cdot \sin \alpha_\ell \\ 0 \end{bmatrix}, & r_4 &= \begin{bmatrix} (R_B + L_1 + L_2) \cdot \cos \alpha_\ell \\ (R_B + L_1 + L_2) \cdot \sin \alpha_\ell \\ -L_3 \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (2-2)$$

则依据如下定义式：

$$\xi_j \triangleq \begin{bmatrix} \omega_j \\ v_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_j \\ r_j \times \omega_j \end{bmatrix}, \quad (2-3)$$

可得各关节的单位运动旋量  $\xi_j$  为

$$\begin{aligned}\boldsymbol{\xi}_1 &= \left[ 0, 0, 1, R_B \cdot \sin \alpha_\ell, -R_B \cdot \cos \alpha_\ell, 0 \right]^T, \\ \boldsymbol{\xi}_2 &= \left[ \sin \alpha_\ell, -\cos \alpha_\ell, 0, 0, 0, -(R_B + L_1) \right]^T, \\ \boldsymbol{\xi}_3 &= \left[ \sin \alpha_\ell, -\cos \alpha_\ell, 0, 0, 0, -(R_B + L_1 + L_2) \right]^T, \\ \boldsymbol{\xi}_4 &= \left[ \sin \alpha_\ell, -\cos \alpha_\ell, 0, -L_3 \cdot \cos \alpha_\ell, -L_3 \cdot \sin \alpha_\ell, -(R_B + L_1 + L_2) \right]^T.\end{aligned}\tag{2-4}$$

而在初始标称位形下，足端系  $\Sigma^{F_\ell}$  相对于机体系  $\Sigma^B$  的齐次变换矩阵为

$$\begin{aligned}\mathbf{g}(\mathbf{0}) &= \text{Rot}(z, \alpha_\ell) \cdot \text{Trans}(R_B, 0, 0) \cdot \text{Rot}(x, \frac{\pi}{2}) \cdot \text{Trans}(L_1 + L_2, 0, 0) \\ &\quad \cdot \text{Rot}(z, -\frac{\pi}{2}) \cdot \text{Trans}(L_3 + L_4, 0, 0) \\ &= \begin{bmatrix} 0 & \cos \alpha_\ell & \sin \alpha_\ell & (R_B + L_1 + L_2) \cdot \cos \alpha_\ell \\ 0 & \sin \alpha_\ell & -\cos \alpha_\ell & (R_B + L_1 + L_2) \cdot \sin \alpha_\ell \\ -1 & 0 & 0 & -(L_3 + L_4) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.\end{aligned}\tag{2-5}$$

其中， $\text{Rot}(\kappa, \phi)$  表示绕着  $\kappa$  轴旋转角度  $\phi$  所对应的齐次旋转变换矩阵； $\text{Trans}(t_x, t_y, t_z)$  表示与向量  $\mathbf{t} \triangleq [t_x, t_y, t_z]^T$  对应的齐次平移变换矩阵。

具体来说，列向量  $\mathbf{t}_j = (\mathbf{I} - e^{q_j \hat{\omega}_j})(\boldsymbol{\omega}_j \times \mathbf{v}_j) + q_j \boldsymbol{\omega}_j \boldsymbol{\omega}_j^T \mathbf{v}_j$  ( $j = 1, 2, 3, 4$ ) 的表达式为

$$\begin{aligned}\mathbf{t}_1 &= \begin{bmatrix} R_B[\cos \alpha_\ell - \cos(\alpha_\ell + q_1)] \\ R_B[\sin \alpha_\ell - \sin(\alpha_\ell + q_1)] \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{t}_2 = \begin{bmatrix} (R_B + L_1)(1 - \cos q_2)\cos \alpha_\ell \\ (R_B + L_1)(1 - \cos q_2)\sin \alpha_\ell \\ -(R_B + L_1)\sin q_2 \end{bmatrix}, \\ \mathbf{t}_3 &= \begin{bmatrix} (R_B + L_1 + L_2)(1 - \cos q_3)\cos \alpha_\ell \\ (R_B + L_1 + L_2)(1 - \cos q_3)\sin \alpha_\ell \\ -(R_B + L_1 + L_2)\sin q_3 \end{bmatrix}, \\ \mathbf{t}_4 &= \begin{bmatrix} [(R_B + L_1 + L_2)(1 - \cos q_4) - L_3 \sin q_4]\cos \alpha_\ell \\ [(R_B + L_1 + L_2)(1 - \cos q_4) - L_3 \sin q_4]\sin \alpha_\ell \\ -(R_B + L_1 + L_2)\sin q_4 - L_3(1 - \cos q_4) \end{bmatrix}.\end{aligned}$$

六足机器人的正运动学建模六足机器人的正运动学建模六足机器人的正运动学建

模..... 其中，机体相对于各足端系  $\Sigma^{F_\ell}$  的瞬时位置坐标为

$$\begin{cases} b_x = -(R_B \cdot \cos q_1 + L_1) \cdot S_{234} - L_2 \cdot S_{34} - L_3 \cdot \cos q_4 - L_4, \\ b_y = -(R_B \cdot \cos q_1 + L_1) \cdot C_{234} - L_2 \cdot C_{34} + L_3 \cdot \sin q_4, \\ b_z = -R_B \cdot \sin q_1. \end{cases} \quad (2-6)$$

上式中各符号的含义与前文一致。

### 2.3.2 六足机器人的数学公式

六足机器人的逆运动学解算..... 其中， $\text{sgn}(\cdot)$  表示

$$\text{符号函数, 即有: } \text{sgn}(x) = \begin{cases} 1, & \text{若 } x > 0, \\ 0, & \text{若 } x = 0, \\ -1, & \text{若 } x < 0. \end{cases}$$

#### 2.3.2.1 基于代数法的数学公式

**引理 2.1:** 基于代数法的逆运动学分析..... 的解为

$$\begin{cases} x = 2 \cdot \arctan \frac{2AC \pm \sqrt{4C^2D^2 - (A^2 + B^2 - C^2 - D^2)^2}}{A^2 + (B + C)^2 - D^2}, \\ y = 2 \cdot \arctan \frac{-2BD \pm \sqrt{4C^2D^2 - (A^2 + B^2 - C^2 - D^2)^2}}{(A + D)^2 + B^2 - C^2}, \end{cases} \quad (2-7)$$

其中,  $A, B, C, D$  均为已知常数。

证明: 基于代数法的逆运动学分析..... 证毕。  $\square$

基于代数法的逆运动学分析.....

$$\begin{cases} A \triangleq p_z + L_4 \cdot \cos(\beta - \text{sgn}(\alpha_\ell) \cdot \varphi), \\ B \triangleq \frac{p_y - R_B \cdot \sin \alpha_\ell}{\sin(\alpha_\ell + q_1)} - L_1 - L_4 \cdot \sin(\beta - \text{sgn}(\alpha_\ell) \cdot \varphi) \quad (\text{若 } \sin(\alpha_\ell + q_1) \neq 0), \\ \text{或 } B \triangleq \frac{p_x - R_B \cdot \cos \alpha_\ell}{\cos(\alpha_\ell + q_1)} - L_1 - L_4 \cdot \sin(\beta - \text{sgn}(\alpha_\ell) \cdot \varphi) \quad (\text{若 } \cos(\alpha_\ell + q_1) \neq 0), \\ C \triangleq L_2, \quad D \triangleq -L_3, \quad x \triangleq q_2, \quad y \triangleq q_2 + q_3. \end{cases} \quad (2-8)$$

基于代数法的逆运动学分析.....

### 2.3.2.2 基于几何法的数学公式

基于几何法的逆运动学分析基于几何法的逆运动学分析基于几何法的逆运动学分析  
析基于几何法的逆运动学分析基于几何法的逆运动学分析：

$$\left\{ \begin{array}{l} \sin(q_2 - \phi) = \frac{|D|}{\sqrt{A^2 + B^2}} \sin(q_3 + \frac{\pi}{2}) = \frac{|D| \cos q_3}{\sqrt{A^2 + B^2}} \quad (\text{正弦定理}) \\ \cos(q_2 - \phi) = \frac{A^2 + B^2 + C^2 - D^2}{2|C|\sqrt{A^2 + B^2}} \quad (\text{余弦定理}) \\ \phi = \text{Atan2}(A, B) \quad (\text{辅助角}) \end{array} \right.$$

$$\Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \tan(q_2 - \phi) = \frac{2|C||D| \cos q_3}{A^2 + B^2 + C^2 - D^2} \\ \phi = \text{Atan2}(A, B) \end{array} \right.$$

基于几何法的逆运动学分析基于几何法的逆运动学分析基于几何法的逆运动学分析  
基  
于几何法的逆运动学分析。

**注 2.1:** 基于几何法的逆运动学分析基于几何法的逆运动学分析基于几何法的逆运  
动学分析基于几何法的逆运动学分析基于几何法的逆运动学分析。

## 2.4 注记与序号列表

速度雅可比矩阵分析速度雅可比矩阵分析速度雅可比矩阵分析速度雅可比矩阵分  
析。

**注 2.2:** 关于速度雅可比矩阵分析速度雅可比矩阵分析速度雅可比矩阵分析速度雅  
可比矩阵分析速度雅可比矩阵分析如下：

- (i) 注记与序号列表注记与序号列表注记与序号列表注记与序号列表注记与序号  
列表注记与序号列表；
- (ii) 注记与序号列表；
- (iii) 注记与序号列表注记与序号列表。

## 2.5 本章小结

本章小结本章小结本章小结本章小结本章小结本章小结本章小结本章小结本章小  
结本章小结本章小结本章小结。

第三章 引理、定理、证明、注记

3.1 引言

3.2 定理

定理定理定理定理定理定理定理定理。

遵循下述定理 3.1 中的结论，它的理论证明需借助引理 3.1 中的结果。

**引理 3.1 ([33]):** 对于一个非线性系统  $\dot{x} = f(x, u)$ , 假设存在一个正定函数  $V(x)$  满足  $\dot{V}(x) \leq -aV^r(x) + b$  (其中  $a > 0$ ,  $b > 0$  且  $0 < r < 1$ ), 那么该系统的轨迹是有限时间实用稳定的 (*Practical Finite-time Stable, PFS*)。即该系统的状态能够在有限时间内收敛到域  $\{x | V^r(x) \leq \frac{b}{(1-\phi)a}\}$  内, 且稳定时间满足  $T \leq \frac{V^{1-r}(x(0))}{\phi(1-r)a}$  ( $0 < \phi < 1$ )。

**定理 3.1:** 稳定性.....

证毕。

1

### 3.3 本章小结

## 第四章 类定理格式的用法

### 4.1 引言

引言引言引言引言引言引言引言引言引言引言引言引言引言引言引言引言引言  
引言引言引言引言引言引言引言引言引言引言引言引言引言引言引言引言引言引言。

### 4.2 约定

自由度分析自由度分析自由度分析自由度分析自由度分析自由度分析。

**约定 4.1:** 自由度分析自由度分析自由度分析自由度分析。

**约定 4.2:** 自由度分析自由度分析自由度分析自由度分析。

表 4-1 机体实施俯仰运动过程中的跟踪控制性能对比

足端序号	SAE-PD			SAE-ASMC		
	$p_y$	$p_z$	$\rho$	$p_y$	$p_z$	$\rho$
足 1	0.242	0.291	0.193	0.042	0.114	0.065
足 2	0.196	0.286	0.196	0.038	0.100	0.066
足 3	0.245	0.296	0.198	0.035	0.110	0.064
足 4	0.192	0.294	0.193	0.048	0.084	0.067
足 5	0.196	0.290	0.197	0.040	0.087	0.064
足 6	0.193	0.281	0.192	0.054	0.091	0.059

自由度分析自由度分析自由度分析自由度分析。

### 4.3 本章小结

本章小结本章小结本章小结本章小结本章小结本章小结。

# 第五章 算法 - 算法 - 算法 - 算法 - 算法 - 算法 - 算法

## - 算法 - 算法 - 算法

### 5.1 引言

引言引言引言引言引言引言。

### 5.2 算法

算法算法算法算法算法，搜索过程如算法5-1所述。

---

#### 算法 5-1: 基于微元法搜索工作空间及其包络算法

---

**Input:** 各关节转动范围, 运动参数上下限 ( $\beta_{\min}$ ,  $\beta_{\max}$ ,  $pd_{\max}$ )

```

1: for 吸盘俯仰角  $\beta := \beta_{\min}$  to  $\beta_{\max}$  do
2:   for 极角  $\gamma := -\pi$  to  $\pi$  do
3:     for 极径  $pd := 0$  to  $pd_{\max}$  do
4:        $x_f = pd \cdot \cos \gamma$ ,  $y_f = pd \cdot \sin \gamma$ ;
5:       基于逆运动学方程计算各关节变量;
6:       检验各关节角度是否满足关节转动约束;
7:       记录有效的极径  $\Omega_p \leftarrow pd$ ;
8:     end
9:     if  $\Omega_p$  非空 then
10:      记录当前有效的极角  $\gamma$ ;
11:      计算并记录有效的  $x_f$ ,  $y_f$ ,  $\beta$ ;
12:      寻找有效极径的最值; 计算并记录有效的  $x_f$  与  $y_f$  的最值;
13:    end
14:  end
15: end
```

**Output:** 有效工作空间及其包络线

---

算法算法算法算法算法算法算法算法。

### 5.3 本章小结

本章小结本章小结本章小结本章小结本章小结本章小结。

## 结论与展望

### 1. 本文工作总结

本文工作总结本文工作总结本文工作总结本文工作总结本文工作总结本文工作总结。

(1) 本文工作总结本文工作总结本文工作总结本文工作总结本文工作总结本文工作总结。

(2) 本文工作总结本文工作总结本文工作总结本文工作总结本文工作总结。

### 2. 未来研究展望

未来研究展望未来研究展望未来研究展望未来研究展望未来研究展望。

(1) 未来研究展望研究

未来研究展望未来研究展望未来研究展望未来研究展望未来研究展望未来研究展望。

(2) 未来研究展望研究

未来研究展望未来研究展望未来研究展望未来研究展望未来研究展望未来研究展望。

## 参考文献

- [1] Lin J., Hong X., Ren Z., *et al.* Scanning laser in-depth heating infrared thermography for deep debonding of glass curtain walls structural adhesive[J]. Measurement, 2022, 192: 1–17.
- [2] 白甲丽. 呼吸式玻璃幕墙建筑室内光热环境调控方法研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2021.
- [3] 许钊. 新型玻璃幕墙光热电能量转化规律研究 [D]. 呼和浩特: 内蒙古工业大学, 2021.
- [4] 闫好萱, 曹一帆, 冯博泉, 等. 异形玻璃幕墙清洗机器人设计研究 [J]. 科技创新与应用, 2021, 11(13): 102–104+107.
- [5] 李雪新, 靳文停, 葛宜元, 等. 玻璃幕墙清洗机器人关键技术综述 [J]. 木材加工机械, 2019, 30(6): 14–20.
- [6] 胡郝君. 基于涵道风扇的玻璃幕墙清洗机器人设计与姿态控制研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- [7] 高楼清洁机器人 [EB/OL]. <https://www.zcool.com.cn/work/ZMTMxNDEyODg=.html>, 2015.
- [8] 《“十四五”机器人产业发展规划》解读 [N]. 人民邮电, 2021 年 12 月 29 日 (第 003 版).
- [9] Nishi A., Wakasugi Y., Watanabe K. Design of a robot capable of moving on a vertical wall[J]. Advanced Robotics, 1986, 1(1): 33–45.
- [10] Alkalla M.G., Fanni M.A., Mohamed A.M., *et al.* Tele-operated propeller-type climbing robot for inspection of petrochemical vessels[J]. Industrial Robot: An International Journal, 2017, 44(2): 166–177.
- [11] Yoshida T., Yamada Y., Warisawa S., *et al.* HanGrawler 2: Super-high-speed and large-payload ceiling mobile robot using crawler[A]. In: 2021 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)[C]. Washington: IEEE, 2021: 2491–2497.

- [12] Yang C.h.J., Paul G., Ward P., *et al.* A path planning approach via task-objective pose selection with application to an inchworm-inspired climbing robot[A]. In: 2016 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)[C]. Washington: IEEE, 2016: 401–406.
- [13] Zhao Y., Chai X., Gao F., *et al.* Obstacle avoidance and motion planning scheme for a hexapod robot Octopus-III[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2018, 103: 199–212.
- [14] 于靖军, 刘辛军, 丁希仑. 机器人机构学的数学基础 [M]. 第 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2015.
- [15] 负超, 王伟. 机器人学导论 [M]. 第 4 版. 北京: 机械工业出版社, 2018.
- [16] Maciejowski J.M. Predictive control: With constraints[M]. London: Pearson education, 2002.
- [17] Hardy G., Littlewood J., Pólya G. Inequalities[M]. Cambridge Mathematical Library. Cambridge: Cambridge University Press, 1988.
- [18] 贾振中, 徐静, 付成龙, 等. 机器人建模和控制 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2016.
- [19] Nansai S., Onodera K., Veerajagadheswar P., *et al.* Design and experiment of a novel façade cleaning robot with a biped mechanism[J]. Applied Sciences, 2018, 8(12): 1–17.
- [20] Khan M.B., Chuthong T., Do C.D., *et al.* iCrawl: An inchworm-inspired crawling robot[J]. IEEE Access, 2020, 8: 200655–200668.
- [21] Jiang Y., Yue Z., Dong W., *et al.* Gait planning of concave transition for a wall-climbing robot[A]. In: 2014 IEEE International Conference on Information and Automation (ICI-A)[C]. Washington: IEEE, 2014: 1284–1288.
- [22] 付紫杨. 双足爬壁机器人空间定位与导航 [D]. 广州: 广东工业大学, 2021.
- [23] Guan Y., Jiang L., Zhu H., *et al.* Climbot: A bio-inspired modular biped climbing robot —system development, climbing gaits, and experiments[J]. Journal of Mechanisms and Robotics, 2016, 8(2): 1–17.
- [24] Zhang Y., Su M., Li M., *et al.* A spatial soft module actuated by SMA coil[A]. In: 2017 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)[C]. Washington:

- ton: IEEE, 2017: 677–682.
- [25] Zhu H., Lu J., Gu S., *et al.* Planning three-dimensional collision-free optimized climbing path for biped wall-climbing robots[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2020, 26(5): 2712–2723.
- [26] Gu S., Zhu H., Li H., *et al.* Optimal collision-free grip planning for biped climbing robots in complex truss environment[J]. Applied Sciences, 2018, 8(12): 1–22.
- [27] 苏满佳. 仿生软体攀爬机器人的建模、分析与实验 [D]. 广州: 广东工业大学, 2020.
- [28] 蔡钊雄. 基于多足爬墙机器人平台的桥梁裂缝检测方法研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2012.
- [29] 谢浩. 多足爬墙机器人运动控制及步态规划研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2015.
- [30] Ye C., Yuan Y., Wei W. Degree of freedom analysis of hexapod wall-climbing robot[A]. In: 6th International Conference on Machinery, Materials, Environment, Biotechnology and Computer (MMEBC)[C]. Paris: Atlantis Press, 2016: 1041–1048.
- [31] 魏武, 叶春台, 袁银龙. 基于群论的六足机器人运动空间研究 [J]. 机器人, 2016, 38(5): 522–539.
- [32] 叶春台. 基于螺旋理论与李群的六足机器人运动分析及步态规划 [D]. 广州: 华南理工大学, 2017.
- [33] Zhu Z., Xia Y., Fu M. Attitude stabilization of rigid spacecraft with finite-time convergence[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2011, 21(6): 686–702.

## 攻读博士学位期间取得的研究成果

一、已发表（包括已接受待发表）的论文，以及已投稿、或已成文打算投稿、或拟成文投稿的论文情况 （只填写与学位论文内容相关的一部分）：

序号	作者（全体作者，按顺序排列）	题 目	发表或投稿刊物名称、级别	发表的卷期、年月、页码	与学位论文哪一部分(章、节)相关	被索引收录情况
1	Yong Gao, Wu Wei, Xinmei Wang, Dongliang Wang, Yanjie Li, Qiuda Yu	Paper Title	Information Sciences	2022, 606: 489–511	第三章， 第六章	SCI, Q1 (IF= 8.233)
2	Yong Gao, Wu Wei, Xinmei Wang, Yanjie Li, Dongliang Wang, Qiuda Yu	Paper Title	A	***	第五章	SCI, Q2 (IF= ***)
3	Yong Gao, Wu Wei, Dongliang Wang, Zhun Fan, Xinmei Wang	Paper Title	IEEE	***	第四章	SCI, Q1 (IF= ***)

序号	作者（全体作者，按顺序排列）	题 目	发表或投稿刊物名称、级别	发表的卷期、年月、页码	与学位论文哪一部分(章、节)相关	被索引收录情况
4	<b>Yong Gao,</b> Dongliang Wang, Wu Wei, Qiuda Yu, Xiongding Liu, Yuhai Wei	Paper Title	D	***	第三章	SCI, Q2 (IF= ***)
5	<b>Yong Gao,</b> Wu Wei, Yuhai Wei, Yanjie Li, Qiuda Yu, Dongliang Wang	Paper Title	N	拟投稿	第六章	SCI, Q1 (IF= ***)

## 二、博士期间获得的其它成果（包括专利、著作、获奖项目等）

### I、论文：

- (1) Zhongbin Cai, **Yong Gao\***, Wu Wei, Tianxiao Gao, Zhijian Xie. Model Design .....  
..... Journal of ..... ...., 2021, 1754(1): 1–6. (EI, 通讯作者)
- (2) Wenyu Xiao, **Yong Gao\***, Wu Wei, Jie Zhang, Xiaoman Tan. Adaptive ..... ....  
Journal of ..... ...., 2021, 1754(1): 1–6. (EI, 通讯作者)

### II、专利：

- (1) 高勇, 魏武, 蔡中斌. 一种。。。。。。, ZL 2020 1 1435837.0. 发明专利, 审定授权.  
授权公告日: 2022.04.22.
- (2) 周翔, 高勇, 魏武, 蔡中斌. 一种。。。。。。, ZL 2020 1 1435802.7. 发明专利, 审定授权. 授权公告日: 2022.08.16.

### III、参与项目：

- (1) 广东省科技计划项目: 建筑墙体。。。。。 (2015B。。。。。), 2015.06–2018.05, 经费: 500 万
- (2) 国家自然科学基金面上项目: 基于。。。。。 (61。。。。。), 2016.01–2019.12, 经费: 74.8 万
- (3) 广东省产学研项目: 人。。。。。 (2019A。。。。。), 2019.11–2022.10, 经费: 100 万

### IV、获奖竞赛：

- (1) ..。。。 大赛, 三等奖, 2019
- (2) ..。。。 大赛, 一等奖, 2020
- (3) ..。。。 大赛, 一等奖, 2021

## 致谢

五载韶华疾渡，万千思绪纷飞。致谢。

高 勇

2022 年 6 月于华园湖心亭