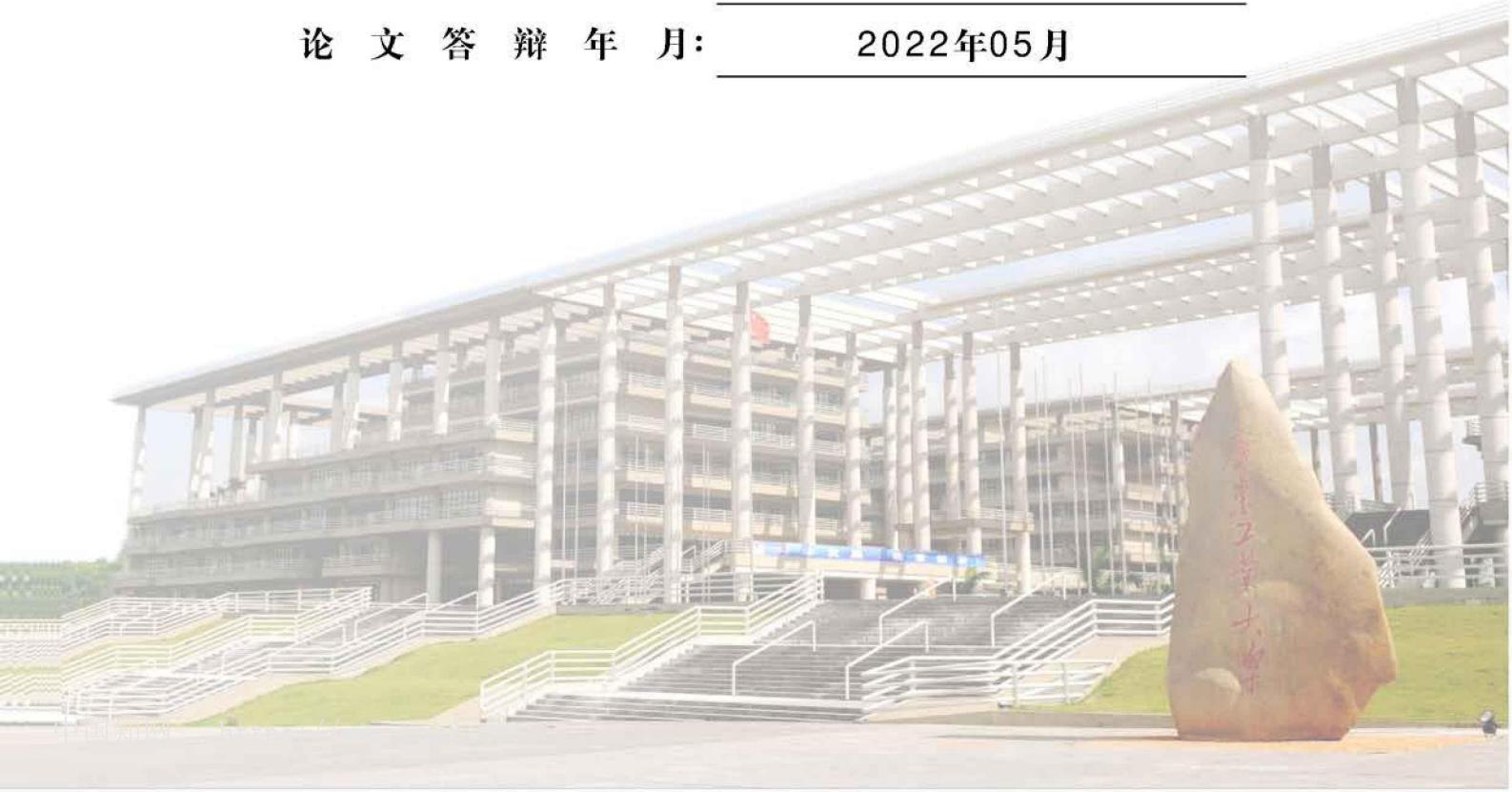




硕士学位论文

面向仿人机器人的触壁空翻动作规划及控制方法研究

作 者 姓 名: 李森
导 师 姓 名: 黄之峰
学科(专业)或领域名称: 控制科学与工程
论 文 答 辩 年 月: 2022年05月



分类号： 学校代号： 11845
UDC： 密级： 学号： 2111904039

广东工业大学硕士学位论文
(工学硕士)

面向仿人机器人的触壁空翻动作规划及控制方
法研究

李森

导师姓名(职称): 黄之峰 副教授
学科(专业)或领域名称: 控制科学与工程
学生所属学院: 自动化学院
答辩委员会主席: 刘治 教授
论文答辩日期: 2022年5月27日

A Dissertation Submitted to Guangdong University of Technology
for the Degree of Master
(Master of Engineering Science)

Research on the Planning and Control Method of Wall-Flip Maneuver for Humanoid Robot

Candidate: Li Sen

Supervisor: Associate Prof. Huang Zhifeng

May 2022
School of Automation
Guangdong University of Technology
Guangzhou, Guangdong, P. R. China, 510006

摘要

仿人机器人机动的构型使得它具有开阔的应用价值。随着仿人机器人技术的成熟和完善，机器人逐渐掌握了从爬动、行走、跳动到奔跑、空翻的运动能力。在自然界中，许多动物善于运用环境改变自身的运动状态，比如转身或者减速急停。机器人在运动过程中如果来不及减速很有可能会直接与障碍物发生剧烈撞击。因此，如果运动的机器人在面对环境中的壁面障碍物时能够模仿其他动物通过规划和控制自身动作及运动策略让自身转向或者停下，将能够极大地提高机器人的移动效率。为此，本文结合广东省基础与应用基础研究基金项目“面向复杂地形的足式移动机器人全身平衡控制关键技术研究”，通过观察和分析人类跑酷者的触壁空翻运动，开展面向仿人机器人的触壁空翻动作规划及控制方法的研究，提高了仿人机器人利用环境转向的能力。本研究的贡献在于研究运动过程中的运动时序、接触力、摩擦力的等效力矩、触壁高度和运动状态对机器人触壁空翻的影响，通过利用环境的接触特性使得机器人能够通过壁面调整自身的方向，避免直接与壁面障碍物相撞，提高机器人在复杂环境中的环境适应性和移动效率。主要内容如下：

(1) 从观察人类跑酷者的触壁空翻运动出发，应用光学运动捕捉系统及接触力测量系统采集跑酷者进行触壁空翻的运动数据，通过对人体模型进行简化并对运动数据进行分析，计算了多刚体模型的运动序列，并归纳了简化模型触壁空翻的运动学时序及触壁空翻过程中的接触力变化规律。通过总结真人跑酷者触壁空翻的运动规律，为仿人机器人触壁空翻任务的动作规划与控制提供了数据依据。

(2) 为了求解触壁空翻机器人系统中未知的内力，本研究保留了跑酷者原始物理系统的基本特征，提出了双质量触壁空翻动力学模型。在双质量触壁空翻动力学模型上结合触壁空翻运动时序进行轨迹跟踪控制，令简化模型顺利完成触壁空翻动作动力学仿真。针对仿人机器人的触壁空翻的动力学仿真，分析了机器人模型腰关节受力，并给出了理论的等效力矩范围条件。针对仿人机器人的触壁接触力进行分析，给出了在简化模型仿真中理论上壁面法向力的数值范围，为进行第四章的动力学仿真提供相应的控制策略的依据。

(3) 在物理引擎 Pybullet 动力学仿真平台环境中采用仿人机器人 Atlas 模型通过动力学实验对比了等效力矩和关键肢体对触壁空翻的影响。通过对机器人 Atlas 进行了动

力学仿真环境中的运动实验分析，得出了机器人触壁空翻成功的关键因素摩擦力等效力矩和非接触腿的影响作用，并估计了触壁过程中摩擦力的大小。实验结果表明，接触壁面时摩擦力产生的正向等效力矩有助于机器人完成触壁空翻动作，并且非接触腿的运动也是必要的。通过了触壁空翻的运动对比实验，证实了本文基于摩擦力等效力矩和运动时序的动作规划及控制方法是可行的。

关键词：仿生机器人；触壁空翻运动策略；动作规划；轨迹跟踪；动力学

ABSTRACT

The flexible configuration of a humanoid robot makes it broadly applicable in practical scenarios. With improvements in humanoid robot technology, robot mobility has gradually evolved from crawling, walking, and jumping to running and flipping. In nature, many animals are adept at using the environment to shape their movements, such as turning around or slowing down to a sharp stop. A robot in motion is likely to collide violently with an obstacle if it is too late to slow down. Therefore, if a moving robot can imitate animals by planning and controlling its own movements and motion strategies to turn or stop when facing wall-like obstacles in the environment, the robotic movement efficiency will be greatly improved. Therefore, if a humanoid robot can master the ability to use the environment to shape its own motion state, it will be able to greatly improve its movement efficiency. In this study, we combine the project conducted by the Guangdong Basic and Applied Basic Research Fund called "Research on the key technology of whole-body balance control of footed mobile robots for complex terrain," and conduct research on the planning and control method regarding the wall-flip movement for humanoid robots. Our approach comprises observing and analyzing the wall-flip maneuver of parkour athletes and improving the ability of humanoid robots to use the environment to turn.

The contribution of this study is to investigate the effects of motion sequence, contact force, equivalent moment of friction, height of the contact point, and robot motion state during the wall-flip. By exploiting the contact properties of the environment, the environmental adaptation capability and motion efficiency of the robot in complex environments is improved, enabling the robot to adjust its orientation using walls and avoid direct impact on wall obstacles. The main contents are the following:

(1) In this study, the movement sequences and contact force during the wall-flip are calculated by simplifying a human model and analyzing the kinematic data. The kinematic movement sequence of the simplified model and contact force of the wall-flip are summarized. Combining the kinematic law governing the human wall-flip motion with robot dynamics provides a basis for the motion planning and control of the humanoid robot wall-flip task.

(2) To solve the unknown internal forces in a wall-flip robot system, this study preserves

the basic features of the original physical system of the parkour and proposes a dual-mass wall-flip dynamics model. The two-mass wall-flip dynamics model was combined with the wall-flip motion timing for trajectory tracking control so that the simplified model could successfully complete the wall-flip motion dynamics simulation. For the dynamic simulation of the humanoid robot wall-flip task, the forces on the waist joint of the robot model are analyzed, then, the theoretical equivalent moment range conditions are given. The wall contact forces of the humanoid robot are analyzed. Accordingly, the theoretical range of the wall-normal forces in the simplified model simulation is given to provide the basis for the control strategy described in Chapter 4.

(3) The effects of equivalent torque and key limbs on the wall-flip are compared via a dynamics experiment using the Atlas model in the Pybullet dynamics simulation environment to further verify the validity of the wall-flip maneuver planning and control. Through an experimental analysis of robot motion in a multi-degree-of-freedom robot dynamics simulation environment, the effects of frictional non-contacting legs are derived, which are the key factors for successfully completing the robot wall-flip task. Subsequently, the magnitude of frictional forces during wall-touching is estimated. The results of the simulation are discussed, and the corresponding parameters are obtained to enable the humanoid robot Atlas to perform a wall-flip.

Key words: Biologically-Inspired Robots; Wall-Flip Maneuver; Action Planning; Trajectory Tracking Control; Dynamics

物理量名称及符号表

$b.w.$	体重
ω	旋转的单位矢量
θ_i	转动角度
R	旋转矩阵
$SO(3)$	三维旋转群
E	能量
F	推力
L_0	支撑腿原长
L_b	支撑腿腿长
${}^b x = L_0 - L_b$	腿长压缩量
k_k	腿部弹簧系数
b_k	阻尼系数
c_1	腿部中心位置
m	腰部以下的质量
c_2	躯干中心位置
M	腰部以上的质量
θ	接触腿部与壁面夹角
ϕ	躯干与支撑腿夹角
L_1	躯干长度
h_0	触壁高度
s_0	起步距壁距离
s_e	落地距壁距离
(v_{f_x}, v_{f_z})	脚掌的瞬时速度
(v_{h_x}, v_{h_z})	头部的瞬时速度
\bar{v}_x	触壁水平速度
\bar{v}_z	触壁竖直速度
F_n	接触面法向力
T	系统的动能
V	系统的势能
q_i	系统的广义坐标
f_i	沿广义坐标系所受的外力或力矩

M_c	跑酷者总质量
H_0	跑酷者身高
$^h x$	身高压缩量
q_1	所有的被动关节
q_2	所有的主动关节
R^p	任务空间
y_d	期望轨迹
J_1	$J_1 = \frac{\partial j}{\partial q_1}$
J_2	$J_2 = \frac{\partial j}{\partial q_2}$
J	$J = [J_1, J_2]$
\bar{J}^+	\bar{J} 矩阵的 Moore 逆
b_i	轨迹跟踪控制器 D 参数
k_i	轨迹跟踪控制器 P 参数

目录

摘要	1
ABSTRACT	III
物理量名称及符号表	V
目录	VII
CONTENTS	IX
第一章 绪论	1
1.1 课题研究背景与意义	1
1.2 国内外研究现状	4
1.2.1 国内外触壁运动的发展和研究现状	4
1.2.2 国内外空翻机器人的发展和研究现状	6
1.2.3 国内外翻转着陆机器人的发展和研究现状	7
1.3 国内外研究现状分析	8
1.4 课题来源及主要内容	10
1.4.1 课题来源	10
1.4.2 主要研究内容	10
1.5 论文章节安排	11
第二章 触壁空翻动作数据采集与处理分析	13
2.1 实验目的	13
2.1.1 触壁空翻动作定性分析	13
2.2 触壁空翻数据采集	15
2.2.1 光学运动捕捉系统	15
2.2.2 接触面反力测量系统	16
2.2.3 实验采集方案	17
2.3 人体触壁空翻运动数据分析	19
2.3.1 多刚体模型	19
2.3.2 多刚体模型的动作序列解算	21
2.3.3 双质量简化模型	23

2.3.4 简化模型的运动学实验数据分析.....	25
2.3.5 接触面法向力实验数据分析.....	42
2.4 本章小结.....	49
第三章 触壁空翻动力学建模与分析.....	51
3.1 实验目的.....	51
3.2 基于简化模型的触壁空翻动作规划与控制.....	51
3.2.1 双质量触壁空翻动力学模型.....	51
3.2.2 简化模型触壁空翻动作规划.....	54
3.2.3 轨迹跟踪控制.....	54
3.3 仿真环境构建与结果分析.....	56
3.3.1 触壁空翻轨迹跟踪仿真结果.....	56
3.3.2 触壁空翻等效力矩.....	59
3.3.3 触壁空翻壁面法向力仿真结果分析.....	62
3.4 本章小结.....	64
第四章 动力学仿真环境中的仿人机器人运动实验.....	65
4.1 实验目的.....	65
4.2 机器人及实验平台	65
4.3 实验条件.....	68
4.4 实验验证.....	69
4.4.1 等效力矩对比实验.....	69
4.4.2 关键肢体对比实验.....	74
4.5 讨论与结论	77
4.6 本章小结.....	78
结论与展望	79
参考文献.....	81
攻读学位期间取得与学位论文相关的成果	86
学位论文独创性声明及学位论文版权使用授权声明	87
致谢.....	88

CONTENTS

ABSTRACT(IN CHINESE)	I
ABSTRACT(IN ENGLISH)	III
Table of physical quantity names and symbols	V
CONTENTS(IN CHINESE)	VII
CONTENTS(IN ENGLISH)	IX
Chapter 1 Introduction	1
1.1 Background and significance of research.....	1
1.2 Analysis of the research status at home and abroad	4
1.2.1 The development and research status of wall-touched movement.....	4
1.2.2 The development and research status of somersault robots.....	6
1.2.3 Development and research status of robotic flip strategy for perching	7
1.3 Analysis of the research status at home and abroad	8
1.4 Project source and main content of the project.....	10
1.4.1 Project source.....	10
1.4.2 The main contents of this subject.....	10
1.5 Outlines	11
Chapter 2 Analysis of the data of wall-flip maneuver	13
2.1 Experimental purposes	13
2.1.1 Qualitative analysis of wall-flip maneuver	13
2.2 Wall-flip data collection	15
2.2.1 Optical motion capture system.....	15
2.2.2 Contact force measurement system.....	16
2.2.3 Experimental protocol and data acquisition.....	17
2.3 Motion Data Analysis of human wall-flip motion.....	19
2.3.1 Multi-link model	19
2.3.2 Movement sequences solution for multi-rigid body models.....	21
2.3.3 Simplified Model	23

2.3.4 Kinematic experimental data analysis	25
2.3.5 Experimental data analysis of normal force.....	42
2.4 Chapter summary.....	49
Chapter 3 Dynamic modeling and analysis of wall-flip	51
3.1 Experimental purpose	51
3.2 Planning and control of simplified model	51
3.2.1 Dynamics of simplified model	51
3.2.2 Action planning of simplified model	54
3.2.3 Trajectory tracking control	54
3.3 Simulation environment construction and analysis	56
3.3.1 Simulation results of the trajectory tracking	56
3.3.2 Analysis of simulation results of equivalent torque	59
3.3.3 Analysis of the simulation results of the normal force on the wall surface ..	62
3.4 Chapter summary.....	64
Chapter 4 Experimental simulation in a dynamical environment.....	65
4.1 Experimental purpose	65
4.2 Robot and experimental platform	65
4.3 Experimental conditions.....	68
4.4 Experimental verification	69
4.4.1 Contrast experiments of equivalent torque	69
4.4.2 Contrast experiments of key limb	74
4.5 Discussions and summary	77
4.6 Chapter summary	78
Conclusion and prospect	79
References	81
Publication and patents during study	86
Statement of original authorship and copyright licensing declaration.....	87
Acknowlegements	88

第一章 绪论

1.1 课题研究背景与意义

仿人机器人灵活的构型使得它具有开阔的应用场景和价值，仿人机器人技术一直是研究者的研究热点。随着仿人机器人技术的成熟并趋于完善，机器人逐渐掌握了从爬动、行走、跳动到奔跑、空翻的运动能力。机器人在运动过程中如果来不及减速会直接与障碍物发生剧烈撞击。传统的机器人大多数通过提前减速，需要通过手动遥控或使用传感器来估计障碍物和机器人之间的距离。也就是说，能够进行状态估计的传感器对提前减速来说是非常必要的。然而，状态估计在复杂的环境中不一定有用，因为 a) 光学运动捕捉系统不一定适用于开放的室外环境，b) 视觉传感器的性能容易受到遮挡和光照条件的影响，c) 雷达探测需要避免镜面反射。因此，不提前减速进行转向避障的规划及控制方法是有价值的，值得进一步研究。在自然界中，许多动物善于运用环境中改变自身的运动状态，比如转身或者减速急停。如果仿人机器人能够掌握利用环境改变自身的运动状态的能力，将能够极大地提高机器人的移动效率。

因此，本研究希望通过提出一个不需要提前减速的运动策略能够使机器人在面对垂直壁面的时候通过规划和控制自身动作让自身转向或者停下，将可以有效地改善与障碍物相撞的问题。即使不提前减速，也能够通过翻转等运动策略实现控制落地的方向而安全落地。这种转向避障的运动策略是以前的其他提前减速避障方法的补充，有助于提高在来不及减速的场景中转向避障的成功率，提高机器人的移动效率。

在生物界中，一些低等动物，如家蝇，它的视觉敏锐度很差，导致它降落时往往来

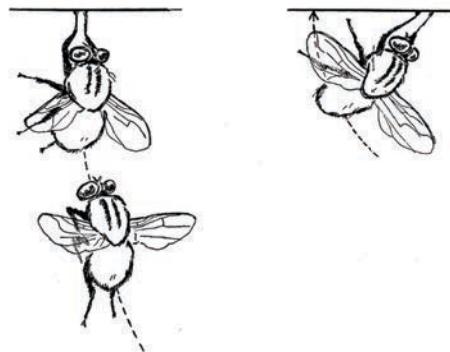


图 1-1 家蝇不减速壁面着陆^[1]

Fig.1-1 Operation of *Musca domestica* without speed-reducing before touchdown

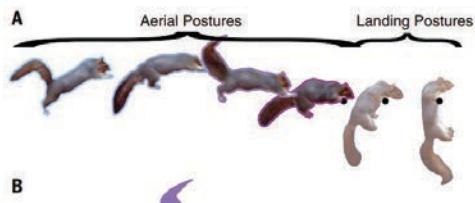
图 1-2 松鼠跑酷栖息着陆^[3]

Fig.1-2 Parkour motion of squirrel for perching

不及减速^[1]，但是它们依然能够利用翻转策略实现安全稳定地着陆。作为低等动物的家蝇，它的翻转策略基于外部刺激和条件反射的结合。它们善于根据简单的外部刺激作出条件反射反应，利用它们的前肢和翅膀进行翻转（图1-1），这使它们的壁面着陆变得更加安全和稳定。翻转策略不仅在动物中常见，在人类的运动中也有很广泛的应用，比如在体操跳马^[2]、体操单双杠、跳水、滑雪等项目中，运动员能够利用环境的接触，他们以一定的翻转策略在正确的时间改变身体姿势，调整落地平衡状态和控制重心稳定，使自己达到完美的落地方向。松鼠^[3]也常常为了躲避天敌而在错乱复杂且容易形变的树枝间跳跃，使用跑酷策略（图1-2）协调生物力学能力与物理环境感知的相互作用能力。因此，本文提出一个科学问题：当视觉等感知能力不能够支持机器人提前减速时，机器人如何借助环境壁面通过翻转等运动策略实现控制落地的方向而安全落地。

在高速移动的运动中，利用环境寻求最佳的运动策略是跑酷的定义。跑酷的动作大多数是利用环境的特性提升运动性能，有很多的动作直接与壁面接触配合。本研究从杰出的跑酷运动员获得灵感，以触壁空翻为实验动作，研究人类如何通过触壁空翻运动策略实现控制落地的方向以安全落地。人类跑酷者的触壁空翻运动需要通过快速面向墙奔跑，然后以单脚屈腿的姿势，并给予墙壁一个有力的蹬步冲击，通过利用垂直壁面给予脚掌的反作用力，随后人类在离开壁面后在空中进行空翻。如图1-3所示，在本研究以一步触壁空翻进行研究。在竖直平面内，以跑酷者脚掌与壁面的接触落脚点为轴，水平方向上的动能会转化到竖直方向上，将撞击壁面的冲击转化为推动自己向上的接触力，通过壁面接触获取空翻初始角动量、垂直加速度和垂直高度。通过触壁空翻运动策略，跑酷者将原本要消耗掉的水平动能尽可能地转换到竖直方向上并借力进行空翻实现人体转向，因此，跑酷者可以利用壁面环境实现转向，调整为正确的落地平衡状态。

触壁空翻虽然可以实现触壁转向的实际意义，但是存在重大的难度和科学技术意



图 1-3 人类触壁空翻运动

Fig.1-3 Parkour motion of human

义。触壁空翻是一个多变量权衡相互制约的复杂运动策略，研究这一个复杂的运动策略存在一些主要的困难。第一，根据触壁空翻受力情况的定性分析只能够预估运动的受力情况，而运动过程中的接触力变化情况和运动时序具体信息都是未知的。第二，通过动捕和接触力测量只能够获取运动序列和运动的外力信息，而运动系统的内力和摩擦力力矩没有办法通过实验直接测得。

针对现有的问题，我们提出面向仿人机器人的触壁空翻的动作规划及控制方法，通过该方法对获取触壁空翻运动的接触力变化情况和运动时序具体信息以及运动系统的内力和摩擦力等效力矩。通过空翻等翻转调整机器人的落地姿态，能够实现仿人机器人能够掌握利用环境改变自身的运动状态，将初始水平撞击壁面的冲量转化为竖直向下的冲量并将能量均匀分配到足端，并在落地瞬间屈膝降低身体重心进行缓冲。本研究提供的运动策略使得机器人在不可避免撞击壁面时能够以接近垂直的姿态安全落地，提高机器人的移动效率。本课题将主要研究仿人机器人系统进行触壁空翻运动的规划与控制问题，分别以机器人模型与壁面环境组成的仿人机器人系统作为被控对象，综合考虑躯干与腿部的动力学模型、运动约束等问题，设计行之有效的运动控制策略及具体的运动学指标，实现仿人机器人系统的触壁空翻，探究成功触壁空翻的关键因素及权衡关系。因此，研究人类触壁空翻动作的运动原理和机器人触壁空翻的运动策略对仿人机器人在复杂环境下实现类人的敏捷避障运动具有深远的实际意义和重要的技术理论价值。

1.2 国内外研究现状

在机器人领域和人类运动科学领域中，作为跑酷运动中最流行的动作之一的触壁空翻仅有分离阶段的研究，包括了人类或者机器人接触壁面的研究、空翻的研究以及利用机器人翻转策略着陆的研究。因此，相关文献按照人类或者机器人与环境的动态接触、腾空空翻、翻转着陆三个方面的前人研究进行介绍。

1.2.1 国内外触壁运动的发展和研究现状

触壁动作的研究主要集中在壁面接触力以及其他运动学参数上。接触力是一个重要的参数，包括了壁面接触力和地面接触力。先前的研究者对步行、跑步、跳跃过程中地面接接触力开展了研究，研究者们做出的努力得到了一系列可靠的实验结果。Mal-donado^[4] 指出人类从 2 米的高度往下跳的着陆地面接触力峰值约为 1400N。Nilsson^[5] 在这项研究中指出步行和跑步的垂直反作用力的峰值振幅分别为 1.0 到 1.5b.w. 和 2.0 到 2.9b.w.。Keller^[6] 记录了 13 名男性和 10 名女性休闲运动员的垂直地面反作用力的时间和速度等信息后指出，男性和女性受试者有着类似的垂直地面反作用力数据和速度关系，步行和跑步的垂直反作用力的峰值振幅分别从 1.2b.w. 和 2.5b.w.。Peter^[7] 研究了跑酷运动者触壁蹬墙过程中触壁动作对跳高高度的贡献，并指出人类质心竖直方向上的速度在跃向壁面前为 2.93 ± 1.08 m/s，地面起跳对质心高度的贡献为 1.45 ± 0.33 m，

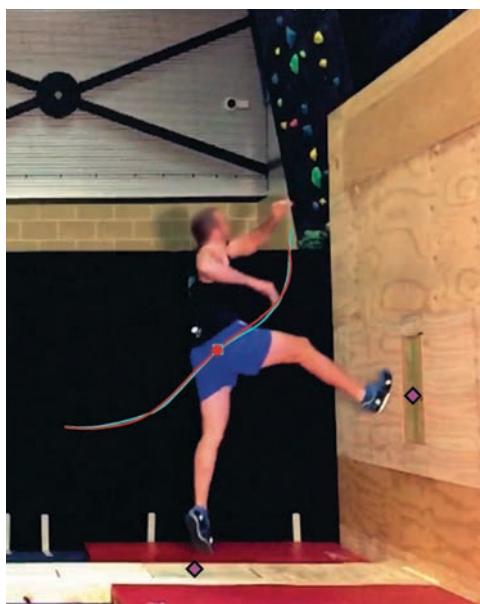


图 1-4 跑酷者触壁运动

Fig.1-4 An example trial of wall climb

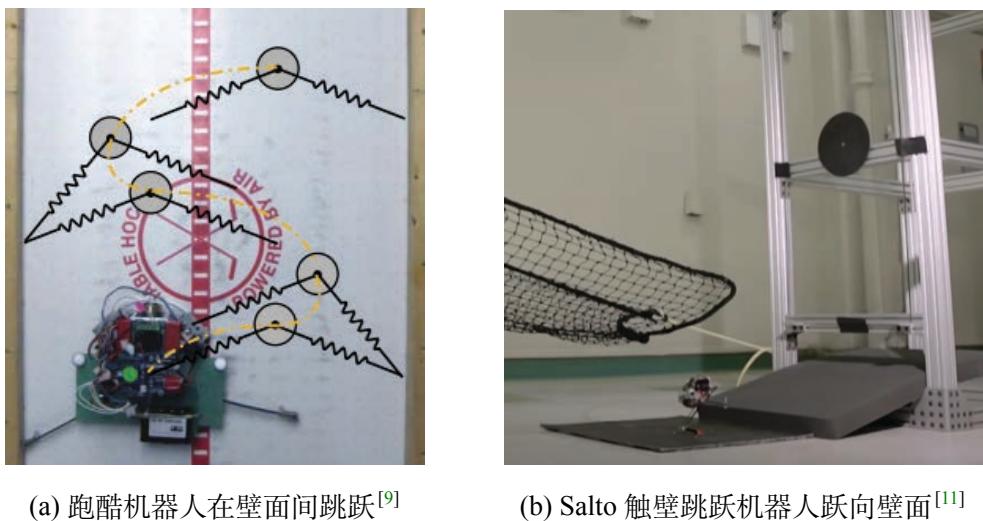


图 1-5 跑酷触壁机器人

Fig.1-5 Parkour robot

壁面对质心高度的贡献为 0.73 ± 0.22 m。图 1-4 展示了 Croft^[8] 进行跑酷者触壁实验的实验环境，该研究一方面对跑酷运动员进行触壁阶段进行地反力测量，通过录像计算出质心轨迹，再用控制优化模型预测质心轨迹，随后进行两者对比。另一方面，放宽初始速度和脚与地面和墙面的接触点探究策略的成本关系。在先前研究者对人类触壁动作的研究中，可以继承其中对墙面接触力以及其他运动学参数对研究方法和研究结果，对本研究的数据分析具有重要的指导意义。

机器人的触壁动作也吸引了许多研究者对研究，但是主要集中在墙面攀爬和跳跃机器人的研究中。在接触地面或者墙面等环境的情况下，机器人可以与环境接触以改变自身的角动量，机器人系统角动量不守恒。因此触壁运动可以提供额外的运动能量。Degani^[9] 是利用墙面环境增加系统角动量在两堵墙体间跳跃上升，如图 (1-5(a))。该研究的创新性体现在以往的墙面攀爬机器人都是准静态的而且依赖于夹持装置或者粘合剂，而该研究结合了跑酷运动利用环境实现更好的运动性能，可以实现不同的攀爬任务。Hyon^[10] 提出能够在接触阶段机器人能够主动地在地面接触阶段增加角动量。Haldane 提出的 Salto 机器人^[11] 通过一步触壁实验验证了机器人通过从地面上跳到墙上再通过蹬墙能够提高系统的角动量，达到的高度超过单次跳跃的净高度 (图 1-5(b))。更多的高度意味着更多的落地时间，这对于很多运动来说都是非常有价值的，比如空翻运动。

1.2.2 国内外空翻机器人的发展和研究现状

机器人常利用“落猫原理”^[12]进行在空中的姿态调整，比如太空中的哈勃望远镜基于落猫原理设计反作用轮按照科学家指令运动对准任意方向。在空翻阶段系统角动量守恒，只能通过肢体和躯干的相对运动和有限的控制来影响旋转轴以实现调整空中姿态。空翻的机器人也需要利用角动量守恒定律调整转动惯量以调整空翻过程中的角速度。

对于空翻机器人，1992年美国麻省理工大学的 Raibert 设计的双足机器人^[13]（图1-6）能够模仿袋鼠进行一些跨、跳前进的动作，然后用最大的力矩控制机身后倾，在前倾时用最大的动力起跳进入空翻阶段，利用反馈算法控制调节腿的长度，在空中收腿减小转动惯量调整方向，完成前空翻阶段，然后以目标角度着陆。Weng^[14]对“猫机器人”的控制进行了理论研究，该机器人使用上下两连杆之间的扭矩在仿真中来控制最终的方向。而 Papadopoulos^[15]指出在空翻阶段不考虑初始角动量的研究中就常常预先给定非零初始角动量。2016年，Atlas 阿特拉斯^[16]可以进行后空翻。2017年，迪士尼研究中心^[17]设计了一个三连杆的体操机器人，它可以在摇摆的钟摆上完成完美的着陆，如图1-7。通过估计机器人的高度和最终时间，控制器可以在适当的时间对机器人进行“折叠”和“展开”，从而控制机器人的转动惯量，实现期望姿态的着陆。2020年的 Xiong^[18]提出了一种利用飞轮 flywheel 的方法进行空翻。研究者设计了装备了飞轮装置的 Cassie 机器人（如图1-8），利用飞轮装置增加了机器人上半身的惯性，用飞轮力矩来调节控制空中的姿态。通过该控制策略，机器人可以在仿真中完成原地前空翻与后空翻。2021年，人形的猎豹机器人^[19]进行后空翻（如图1-9），研究者提出了一套运动规划和控制方法将猎豹机器人应用于仿人机器人。Iizuka^[20]提出一种通过设定的借助与身体部分的惯性矩成比例的权重优化问题来分配机器人所需角动量，以生成杂技运动的方法。结合相对角加速度控制器实现对骨盆、躯干和手臂的控制。Chuang^[21]设计并验证一种双连杆自由飞行杂技机器人的运动规划算法，该算法能够使机器人在空中自由飞行后准确地降落在另一个悬吊物上。具体方案是设计了一种非线性约束优化方法对机器人进行轨迹规划，然后实现反馈控制器以稳定姿态。

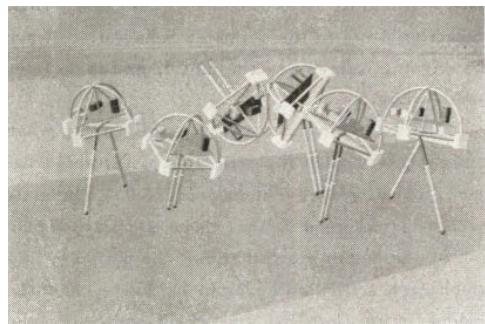
图 1-6 MIT 空翻机器人^[13]

Fig. 1-6 MIT somersault robot

1.2.3 国内外翻转着陆机器人的发展和研究现状

本研究的灵感来自于家蝇不减速的着陆策略和人类触壁空翻的动作策略，家蝇对翻转策略能够使其不减速降落在接近垂直表面上的，利用仿生的翻转策略着陆一直吸引着大量研究者的研究。特别是在飞行物体的栖息着陆策略的研究中，研究者采用了不同的身体侧倾动作，如俯仰、直接撞击和上翻。这些策略主要通过状态估计、控制算法和附带的夹持装置来实现。俯仰策略^{[22]-[23]}集中于在能够感知机器人的绝对姿态，机器人通过减速着陆，这意味着机器人的状态由运动捕捉系统、计算机视觉、测距传感器或惯性测量单元（IMU）估计。直接撞击^{[24]-[25]}有助于降低机器人所需的姿态感知，但需要解决较大的俯仰力矩。上翻策略^{[26][27]}是通过将机器人机头向下旋转成一个倒置的构型来完成的。在另外一些研究中，Robert^[28]通过模仿壁虎不减速着陆设计装备尾部的机器人，通过由前脚接触墙面后向后翻转，如图1-10。在该翻转策略的作用下，机器人所需的较低的脚吸附力较小，提高了机器人的着陆成功率。而模仿家蝇的“Flip-and-Flap”触壁翻转运动策略^[29]也能够实现飞行机器人在垂直墙面和倾斜墙面上的栖息着陆。

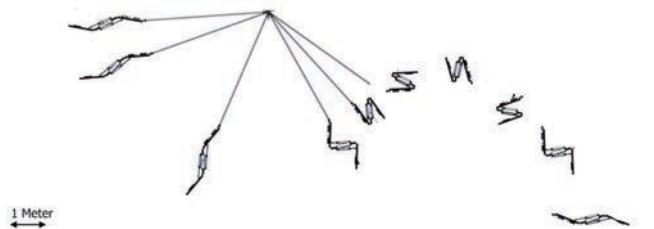
图 1-7 迪士尼体操机器人^[17]

Fig.1-7 Stickman robot

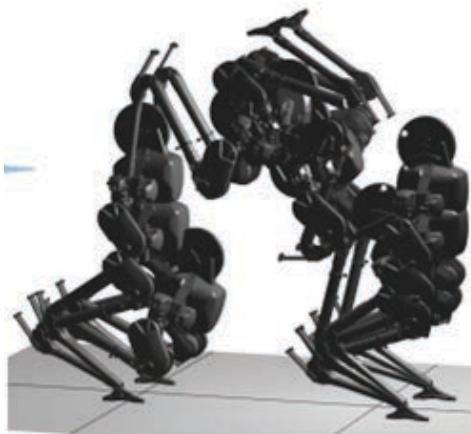
图 1-8 Cassie 空翻机器人^[18]

Fig.1-8 Cassie robot

总的来说，大多数研究者的着陆方法需要预先减速，需要手动遥控或使用传感器来估计墙壁和机器人之间的距离。然而，在复杂环境中，预先进行状态估计的减速不一定有用，因为 a) 运动捕捉系统不一定适用于开放的室外环境，b) 视觉传感器的性能容易受到遮挡和照明条件的影响，c) 雷达探测需要避免镜面反射。因此，对于不减速的着陆进行研究是有价值的，值得进一步研究。

1.3 国内外研究现状分析

针对空翻机器人先前研究对接触面环境、模型和控制方法等归纳总结如表1-1所示。尽管取得了上述成就，但基于多自由度模型仿真机器人的类人运动的动作规划和控制仍然是一个未被完全解决的问题。对触壁空翻的运动策略和触壁转向处理上缺乏深入研究，无法应对与障碍物直接快速碰撞时产生的冲量；环境接触面适应能力单一，只能

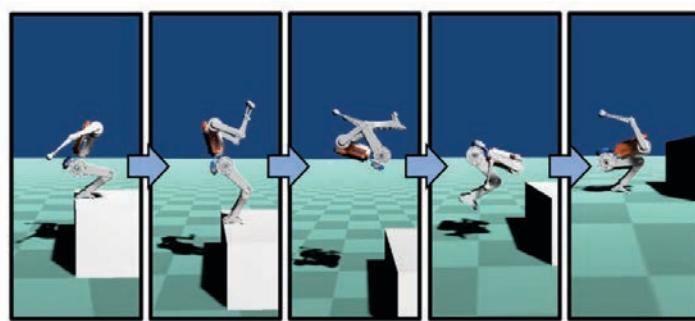
图 1-9 MIT 空翻仿人机器人^[19]

Fig.1-9 MIT humanoid robot

表 1-1 空翻机器人研究对比

Table 1-1 Comparison of somersault robot

先前研究	环境	模型	控制方法	构型	动作类型	机器人性质
Raibert ^[13]	水平地面	简化模型	数学建模	下半身	前空翻	实际机器人
Atlas ^[16]	水平地面	-	-	全身	后空翻	实际机器人
Stickman ^[17]	摆动	简化模型	数学建模	三连杆	摆动翻转	实际机器人
Cassie ^[18]	水平地面	简化模型	轨迹跟踪	下半身、飞轮	前、后空翻	仿真机器人
MIT Humanoid ^[19]	水平地面	全身模型	模型预测	全身	后空翻	仿真机器人
Lizuka ^[20]	水平地面	全身模型	轨迹跟踪	全身	前、后空翻	仿真机器人
Chuang ^[21]	摆动	简化模型	轨迹跟踪	二连杆	摆动翻转	仿真机器人

在水平地面进行原地空翻。而当以一定接触高度、以一定接触角度、以一定角速度与壁面接触时，应该如何产生足够的初始角动量进行触壁空翻实现转向，如何如何借助环境壁面通过翻转等运动策略实现控制落地的方向而安全落地。针对现有的问题，我们提出面向仿人机器人的触壁空翻的动作规划及控制方法。该控制方法通过空翻等翻转调整机器人的着陆姿态，使得机器人在不可避免撞击壁面的情况下，能够以接近垂直的姿态落地，提高机器人的移动效率。

图 1-10 仿生机器人不减速着陆^[28]

Fig.1-10 Bionic robot landing without speed reduction before touchdown

1.4 课题来源及主要内容

1.4.1 课题来源

本课题来源于广东省基础与应用基础研究基金项目“面向复杂地形的足式移动机器人全身平衡关键技术研究”(广东省基础与应用基础研究基金项目，项目批准号：2021A1515011829)资助。

1.4.2 主要研究内容

本文的主要研究内容有：

- (1) 通过对光学动作捕捉系统和接触力测量系统采集跑酷者触壁空翻运动的处理和分析，获得跑酷者触壁空翻的接触力变化规律和多刚体模型的触壁空翻运动序列，并通过简化机器人模型探究触壁空翻的运动规律。
- (2) 通过简化机器人模型进行动力学建模和分析，根据第二章得出的简化模型运动序列进行轨迹跟踪控制，得出接触力、关节内力和等效力矩的理论值。
- (3) 采用第二章规划的多刚体的运动动作序列的前提下，进行摩擦力等效力矩对机器人触壁空翻转向的作用进行验证以及探究关键肢体中非接触腿的动作对机器人完成空翻和调整转向姿态落地的作用和影响。

第一点对应的挑战点为：根据触壁空翻受力情况的定性分析只能够预估运动的受力情况，而运动过程中的接触力变化情况和运动时序信息都是未知的。在接触力和运动时序未知的情况下，如何获取触壁空翻运动数据；如何探索触壁空翻实现不提前减速转向的关键参数；以及如何归纳使跑酷者能够触壁后平稳落在地面上的运动规律。

第二个对应的挑战点为：通过动捕和接触力测量只能够获取运动序列和运动的外力信息，而运动的内力和力矩没有办法通过实验直接测得。因此针对机器人系统进行触壁空翻运动的控制问题，分别以仿人机器人的腰关节、腿部与壁面的夹角与腿部的长度组成的仿人机器人系统作为被控对象。综合考虑躯干与腿部的动力学模型和运动约束等问题，设计行之有效的运动控制模型及具体的运动学指标，实现简化模型系统的触壁空翻，探究摩擦力等效力矩等理论数值。

第三个对应的挑战点为：需要在动力学环境中进行仿人机器人的运动试验，通过仿人机器人运动试验分析，验证多刚体运动时序、摩擦力等效力矩以及关键肢体的作用。

1.5 论文章节安排

本文主要以仿人机器人系统为研究对象，针对人类跑酷者触壁空翻运动和机器人进行触壁空翻两个方面进行研究，全文遵循从采集和分析跑酷者触壁空翻的实验数据出发，到触壁空翻动力学建模分析，再到动力学环境中仿人机器人运动试验验证的思路，论文的结构如图1-11所示，论文各章节安排如下：

第一章介绍了课题研究背景及意义，以及触壁与空翻机器人在国内外的发展现状，并重点介绍了触壁的研究方法、空翻控制方法以及现有的利用翻转策略降落的策略以及存在的问题。针对目前利用环境转向的控制方法中能够继续发展和前进的地方，本文提出了面向仿人机器人的触壁空翻的动作规划及控制方法。该控制方法通过空翻等动作调整机器人的落地姿态，将水平冲击壁面的冲量转化为竖直向下的冲量，将能量平均分配到足端，着陆瞬间屈膝降低身体重心进行缓冲。触壁空翻的运动方法提供一种运动策略使得机器人在不可避免撞击壁面时，能够以接近垂直的姿态着陆，提高机器人的移动效率。

第二章采集并处理了触壁空翻动作数据。首先针对触壁空翻运动应用光学运动捕捉系统、接触力测量系统对人体运动数据进行；其次，建立了多刚体模型和双质量简化模型，解算了多刚体模型的运动序列，并分析简化模型在触壁空翻过程中的运动学序列以及跑酷者在触壁空翻运动过程中受到法向接触力的运动规律，为仿人机器人触壁空翻动作规划与控制提供数据依据。

第三章是触壁空翻动力学建模与分析。根据第二章得到的运动学序列中，选取其

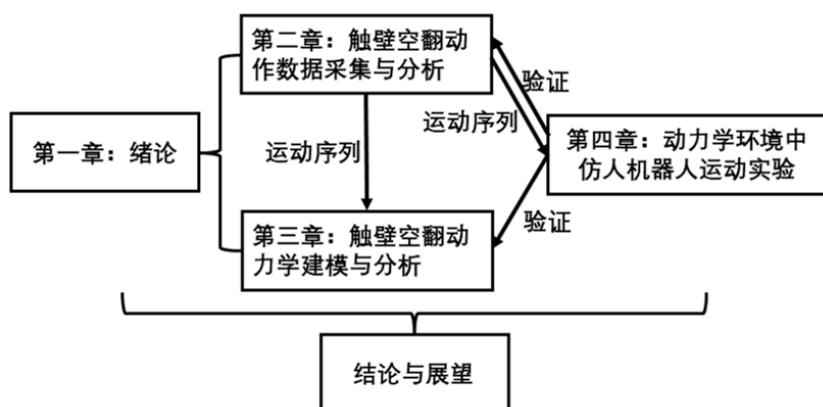


图 1-11 论文章节结构

Fig.1-11 Structure of thesis

中三组特征相似的三组成功样本。针对触壁空翻过程的躯体角、腰关节与接触腿腿长变化量及其对应速度与加速度的运动序列进行轨迹跟踪控制，分析简化模型在触壁空翻过程中所受力和力矩的运动规律。进一步基于仿真数据阐述触壁空翻完成的基本原理，为进行第四章的动力学仿真提供相应的理论数据依据。

第四章进行了动力学仿真环境中仿人机器人运动实验。本章将结合物理引擎 Pybullet 动力学仿真平台进行仿人机器人触壁空翻实验，通过动力学实验可以对机器人模型触壁空翻关键性指标进行理论验证。本章主要通过仿人机器人触壁空翻实验，分别以不同的等效力矩和关键肢体进行触壁空翻对比实验验证。通过仿真实验验证了摩擦力等效力矩和动作中关键肢体的有效性并实现了触壁空翻，分析了摩擦力等效力矩和动作中关键肢体对仿人机器人触壁空翻的影响。

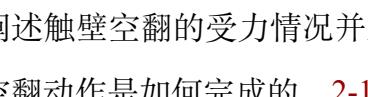
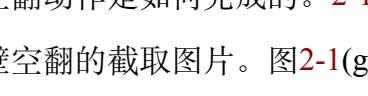
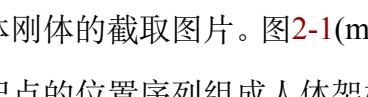
最后，对本文工作进行总结，并对后续工作进行展望。

第二章 触壁空翻动作数据采集与处理分析

2.1 实验目的

进行对人类跑酷者触壁空翻的研究可以为本文仿人机器人触壁空翻的动作规划与控制提供行之有效的借鉴意义。本文的研究思路主要有两个，第一个是思路是通过简化机器人模型探究行触壁空翻的运动规律；第二个思路是通过多刚体的仿人机器人模型进行动力学仿真环境中的机器人运动实验。根据运动的受力情况可以预估触壁空翻动作是如何完成的，但是实际运动过程中的接触力变化情况和运动关节时序等信息都是未知的。本章的目的是通过应用光学运动捕捉系统采集并获取多刚体模型和简化模型的运动时序。并且通过接触力测量系统对接触力进行采集与分析，归纳总结人体进行触壁空翻中接触力的运动规律。因此，本章贡献的多刚体模型和简化模型的运动时序以及接触力规律能够为仿人机器人触壁空翻动作规划与控制提供数据依据。

2.1.1 触壁空翻动作定性分析

首先阐述触壁空翻的受力情况并对动作进行定性分析，根据运动的受力情况可以预估触壁空翻动作是如何完成的。图2-1(a)至图2-1(f)给出了触壁空翻实验中摄像机记录跑酷者触壁空翻的截取图片。图2-1(g)至图2-1(l)给出了触壁空翻实验对应的运动捕捉系统中人体刚体的截取图片。图2-1(m)至图2-1(r)给出了触壁空翻实验对应的运动捕捉系统中标记点的位置序列组成人体架构的截取图片。如图2-1(a)至2-1(f)所示，跑酷者跃向壁面，随后与壁面开始接触。在触壁阶段 ($a \rightarrow b$)，跑酷者身体躯干以右脚为触壁支点由离心力作用向壁面运动，在接触阶段，跑酷者受支持力、重力与摩擦力，当时间间隔足够小时，静摩擦力与重力组成一对力偶能够产生离心运动的效果。离心运动的趋势增加了跑酷者在壁面停留的持续时间。触壁的脚与壁面充分接触。在这个过程中，接触腿与壁面夹角（躯干角度： θ ）略微减小，上半身与下半身的夹角（腰关节角度： ϕ ）随着躯干角度的减小而逐渐相对减小；接触腿的腿部膝盖弯曲以至于接触腿腿长在这个阶段逐渐减小。在蹬壁阶段 ($b \rightarrow c$)，跑酷者右腿向壁面发力，这个接触力可以分解为壁面法向力和切向力；跑酷者有向下运动的趋势，即摩擦力竖直于壁面向上且与重力反向。在接触壁面的过程中，摩擦力作用在接触点，在质心处产生一个等效力矩。在这个运动过程中，接触腿与壁面夹角基本保持在一定范围内；跑酷者上半身趋于挺直，腰关节角度逐渐减小；接触腿腿长先逐渐减小，随后由于腿部接近离壁的

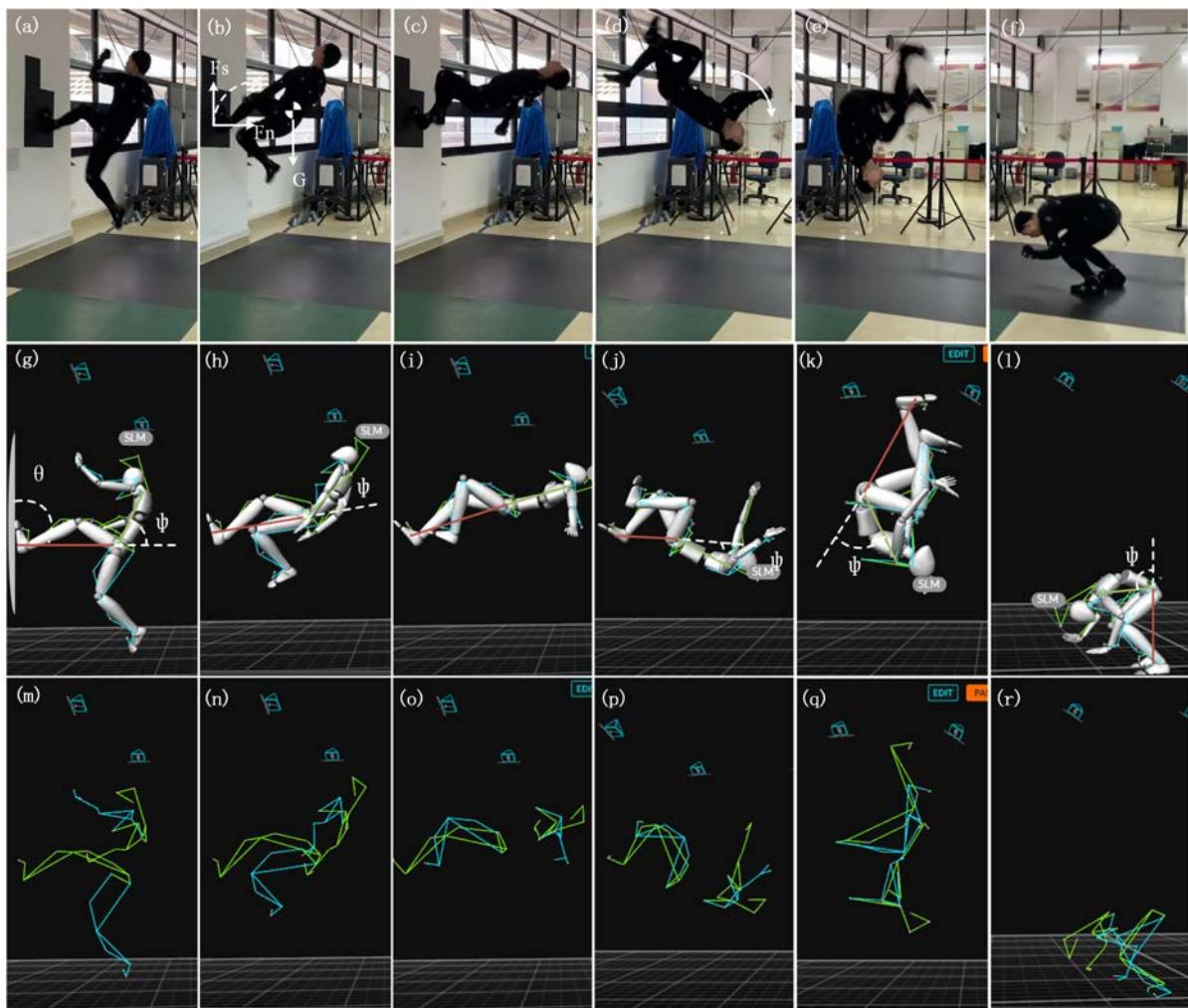


图 2-1 触壁空翻运动序列截取图片

Fig.2-1 Snapshot of wall-flip movement

临界状态，腿部开始舒展，接触腿腿长略微增大。当腿部先压缩后舒展到接近离壁的临界状态时，进入离壁阶段（c→f），在跑酷者壁面积累足够的初始角动量后离开壁面，上半身保持后仰，左腿迅速上抬，配合顶腰、非接触腿与手臂改变转动惯量。膝盖尽可能地向胸前收缩，直至落地时刻；由于角动量守恒，膝盖尽量往胸前收缩有利于减小转动惯量，增大角速度的作用；随后，腿部慢慢舒展，增大转动惯量，减小角速度，以便平稳着陆。在这个过程中，上半身保持后仰，腰关节角度先逐渐减小，但是由于膝盖尽可能地向胸前收缩，导致相对角度腰关节角度逐渐增大，随后腰关节角度略微减小；由于膝盖尽量往胸前收缩的运动趋势，所以接触腿腿长会先逐渐减小；随后，腿部慢慢舒展，接触腿腿长后逐渐增大，与地面接触身体会保持向下运动的趋势，腿部压缩会导致接触腿腿长会减小。

表 2-1 动作捕捉系统相关参数

Table 2-1 Parameters of motion capture system

技术指标	具体参数
型号	Prime 13
定位精度	0.1mm
图像分辨率	1.3MP(1280 x1024)
帧数	40- 240 FPS
水平视场角	42°
垂直视场角	56°
延时	4.2ms

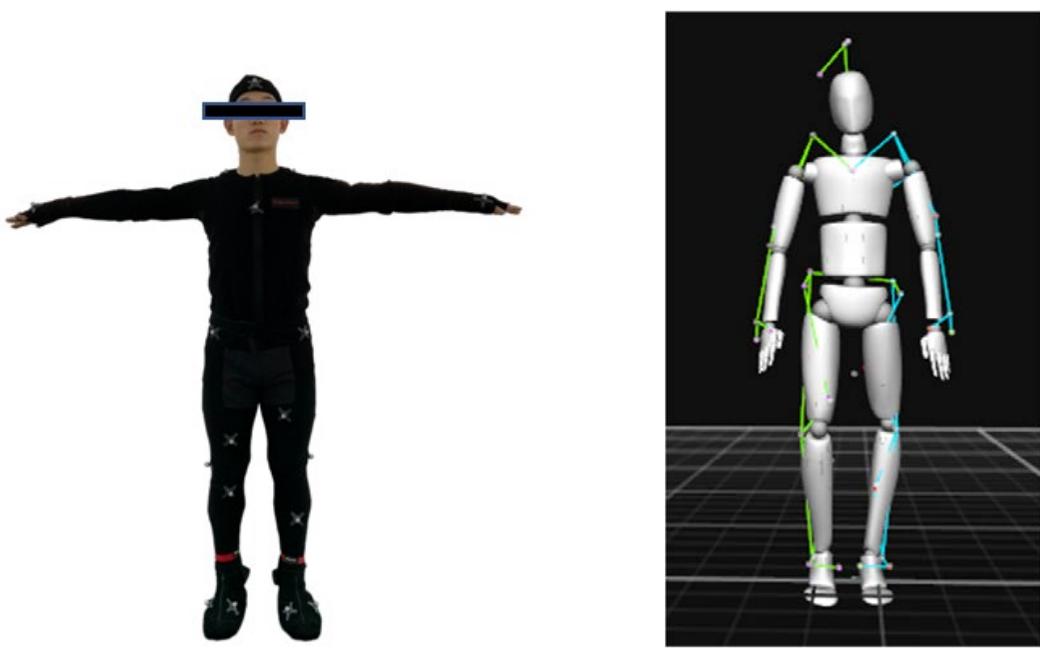
2.2 触壁空翻数据采集

为了研究人体触壁空翻的运动规律，本文使用了光学运动捕捉系统对人体运动中的各个刚体的位姿和关节角进行测量，使用力测量系统对整个运动过程中的足端与接触面接触受力进行测量。

2.2.1 光学运动捕捉系统

动作捕捉设备根据原理的区别可以分为，机械式、声学式、电磁式、光学式和惯性式。目前的主流动作捕捉设备主要是光学式和惯性式。光学运动捕捉系统技术完善可靠，且具有精度相对较高和采样率高的优点，使用灵活快捷，相比于其它四种方式，光学式动作捕捉系统适用范围较广。光学运动捕捉技术是以计算机视觉为工作原理的一门技术，该技术能够通过多个高速红外相机从不同角度对目标标记点的跟踪以完成动作捕捉的技术。对于工作空间内的任意一个标记点，只要它能够同时被两部红外相机共同捕捉到，就能够确定这一时刻该标记点在工作空间中的位置信息。对于工作空间内存在能够被捕捉的任意三个标记点，就能够确定这一时刻该标记点组成的刚体在工作空间中的位置和姿态信息。当红外相机以足够高的速率连续录制时，从运动序列中就可以得到该标记点群的运动轨迹序列信息。

本文采用 Optitrack 动作捕捉系统，该系统最高能够以每秒 240 帧的速率记录下标记点的位置和姿态信息，定位精度可以达到 0.1mm。动捕系统参数如表2-1所示，动作捕捉系统包括 1 部包含计算系统的上位机、红外 LED 灯、12 台红外光学相机和若干光



(a) 被摄跑酷者穿戴光学标记点

(b) 光学动作捕捉系统中刚体结构

图 2-2 跑酷者及其动作捕捉系统中刚体结构

Fig.2-2 Parkour runner with corresponding motion capture system model

学标记点。光学标记点是一种带有反光膜的精密球体，标记点必须牢固地固定在被捕捉物体的表面，主要根据动作捕捉系统的 Skeleton 骨架信息放置于人体各主要关节部位。红外 LED 灯发出的红外照射光经反光精密球体反射至红外光学相机，将红外相机拍摄捕捉到的图像数据传送给上位机。最后在上位机上进行标记点运动序列的精确检测并结合标定结果进行空间定位。

根据上节人体多刚体模型结合动作捕捉系统的 Skeleton 骨架信息，本研究在跑酷者重要的关节和肢体制贴上 37 个标记点。其中头部以 3 个标记点标示，胸腹腰部共 3 个，背部脊椎共 3 个，左右肩各 2 个，左右胯部各 1 个，左右肘部各 2 个、左右膝部各 1 个、左右大腿各 1 个、左右小腿各 1 个、手（腕）部、脚（踝）部各以 3 个标记点进行标示，如图2-2(a) 所示。在计算机中对人体标记点进行建模，得到具有人体特征的多刚体结构，如图2-2(b) 所示。

2.2.2 接触面反力测量系统

人体在运动的过程是人体各个关节间的肌肉收缩产生的内力以及接触面对人体施加的外力的共同作用的结果。因此，研究人体在运动过程中受到的接触力规律是研究人体运动过程的重要元素。因此需要凭借一套可靠的硬件设备对接触力的作用进行测

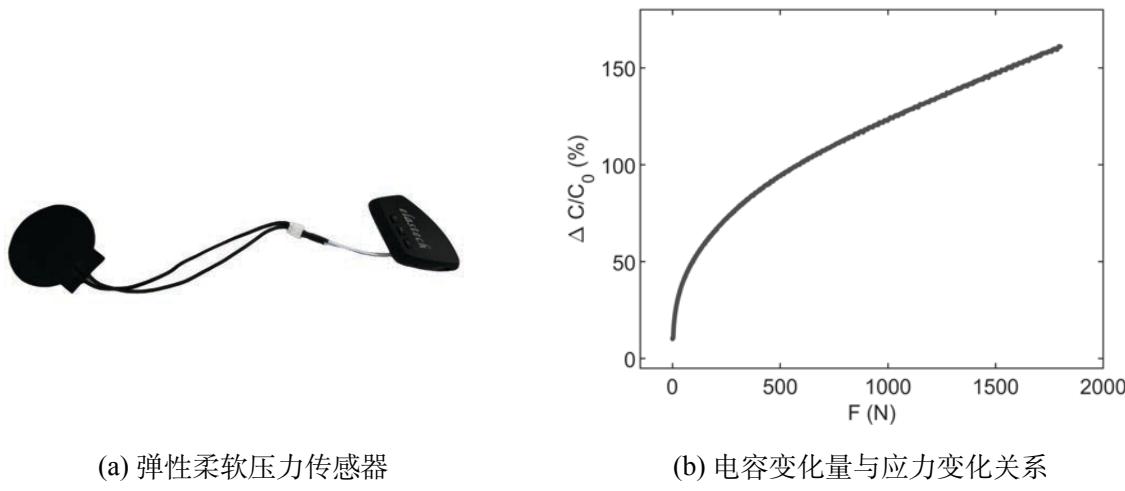


图 2-3 弹性柔软压力传感器与应力变化关系

Fig.2-3 Elastic soft pressure sensor with stress variation relationship

量。目前的主流的测力设备有六维测力平台和压力传感器，六维测力平台虽然具有采样频率高和测试精度高的优点，但是如果在本实验中使用六维测力平台，则需要定制安装在墙壁上，时间和人力成本较高。而压力传感器具有体积小，可以比较轻便地佩戴在跑酷者的脚掌，使用灵活快捷，时间和人力成本较低。因此，本研究采用压力传感器用于实现接触面反作用力的测量。

本文研究跑酷者触壁空翻的运动规律采用弹性柔软压力传感器，如图2-3(a)。该弹性柔软压力传感器的测力平面为直径 5cm 的圆形，具有 100Hz 的采样频率。测量原理为应力引发传感器形变，形变引起传感器电容值变化，读取电容大小反应应力变化，其对应关系如图2-3(b)。电容差值与压力之间的关系是非线性的，对应关系为: $F = 0.080 \cdot \Delta C^2 - 2.808 \cdot \Delta C + 27.345$ 。整个测力系统的由主控计算机、信号采集装置和弹性拉伸应力传感元件组成。被摄跑酷者在脚掌位置佩戴该压力传感器后，收集采集信号的主控计算机可以实时读取人体触壁空翻运动过程的力信号。

2.2.3 实验采集方案

本研究的采集实验被设计为重复测量触壁空翻运动过程，将最终落地的人体的姿态划分为成功和不成功两个数据组。被摄跑酷者为 1 名熟练的男子体操运动员，年龄 22 岁，身高 173cm，体重 65kg，运动史 15 年。被摄跑酷者被要求像在触壁空翻那样借助壁面进行后空翻。被摄跑酷者进行充分的热身，使用 Optitrack 光学动作捕捉系统指南在被摄跑酷者的关节和四肢上安装光学标记点（图2-4）。我们在被摄跑酷者的手肘、

肩部、臀部、背部、头部、膝盖、脚踝和前脚上等安装光学标记点。被摄跑酷者进行触壁空翻的环境中，使用了一个长 3.0 米、宽 2.0 米、高 0.02 米的防滑体操垫进行保护。使用三台摄影机进行拍摄记录。第一台摄像机放置在被摄跑酷者正后方侧，距离运动场地 3.0 米；第二台摄像机放置在被摄跑酷者左后侧，距离运动场地 2.5 米，放置在三脚架上；第三台摄影机放置在被摄跑酷者左前侧，距离运动场地 1.5 米。选择合适的相机视野和焦距，以便在触壁空翻的各个阶段都能看到被摄跑酷者的全身运动姿态。从被摄跑酷者起跑开始拍摄，一直持续到每个运动员落地结束。由于运动速度较快，为了获得清晰的图像进行以动作的定性分析，本研究选择每秒 120 帧的录制速率。被摄跑酷者被要求进行 9 组触壁空翻动作演示。被摄跑酷者在每组触壁空翻之间休息大约 5 分钟，保证动作的标准性和安全性。完整的触壁空翻运动如第二章开头的图2-1所示。

所有的触壁空翻实验都由是否能够平稳落地进行评估，往后倾倒或者往前倾倒的实验被分类不成功的触壁空翻，而能够在落地时稳定身体并且不倾倒的实验被归类为成功触壁空翻。最终获取的数据中，根据被摄跑酷者的落地状态是否倾倒被归类为成功的有六组，被归类为失败的有三组。所有录制的标记点坐标在 Motive 运动分析软件版本中逐帧数字化提取；所有视频利用 KMplayer 软件进行逐帧分解；在 MATLAB 软件中编写程序代码提取所需的关节、位置等后，利用数学方程计算关节角度及相关运动学参数。最后使用 Excel 软件对提取的变量及相关的值进行统计和分类，计算该数据的均值和标准差。



图 2-4 光学运动捕捉系统模型标记点位置示意图

Fig.2-4 Location of the marker of motion capture system

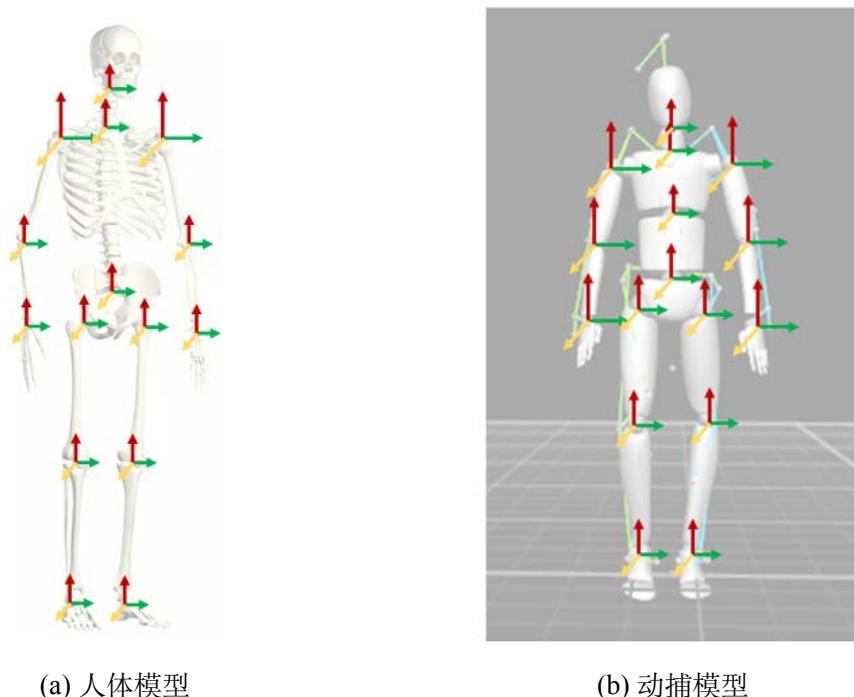


图 2-5 人体模型与动捕模型主要关节对比

Fig.2-5 Contrast between parkour runner and motion capture system model

2.3 人体触壁空翻运动数据分析

2.3.1 多刚体模型

为了对光学动作捕捉系统采集的运动数据进行多刚体模型运动学解算，本研究首先对比人体模型和动捕系统中骨段信息，建立多刚体模型。

人体的骨段模型和动捕系统中骨段信息分别如图2-5(a) 和 (b)。根据人体构造解剖学^[30]可知，人类躯体具有多关节、多自由度的特点，全身上下共有 206 块骨头，结合肌肉有上百个关节，即使舍去一些没有明确命名的关节，也还有 78 个。这既是人类能够做出许多复杂动作的基础，同时也是阻碍机器人模仿人类运动的一大原因。由于机器人设计上的物理限制和多自由度运动学求解的复杂性，无法在同一体积下将如此多的关节设计进去。因此需要进行简化为多刚体模型，采用在人体运动时使用较多、变化明显的关节来表示人类全身运动情况。从动捕系统的人体捕捉功能下输出的动作捕捉骨架骨段信息以及来看，一共有 19 个骨段，包括：躯干的 3 个骨段（胸部，腹部，骨盆），上肢的 8 个骨段（左肩，左上臂，左小臂，左手，右肩，右上臂，右小臂，右手），下肢的 6 个骨段（左大腿，左小腿，左足，右大腿，右小腿，右足）和头颈部的 2 个骨段（头和颈）。而在光学动作捕捉系统中，我们仅能获取到是标记点、刚体或骨

架骨段的位置和姿态信息，而不能直接得到关节的转动情况。

为了求解关节的相对姿态变换情况，需要为关节选定合适的父子级刚体骨段，建立合适的多刚体模型。根据对人体骨段模型和动捕系统中骨段信息的分析，本研究采用的多刚体模型各关节对应采用的父子级刚体骨段如表2-2。

表 2-2 各关节对应采用的父子级刚体骨段

Table 2-2 The parent-child level rigid bone segment corresponding to each joint

关节及其命名	父级刚体骨段	子级刚体骨段
颈 Neck	胸部 Chest	头 Head
左肩 LShoulder	胸部 Chest	左上臂 LUarm
右肩 RShoulder	胸部 Chest	右上臂 RUarm
胸-腹 Chest	腹部 Abdomen	胸部 Chest
腹-腰 Abdomen	骨盆 Pelvis	腹部 Abdomen
左肘 LElbow	左上臂 LUarm	左小臂 LFarm
右肘 RElbow	右上臂 RUarm	右小臂 RFarm
左腕 LWrist	左小臂 LFarm	左手 Lhand
右腕 RWrist	右小臂 RFarm	右手 Rhand
左髋 LHip	骨盆 Pelvis	左大腿 Lthigh
右髋 RHip	骨盆 Pelvis	右大腿 Rthigh
左膝 LKnee	左大腿 Lthigh	左小腿 Lshin
右膝 RKnee	右大腿 Rthigh	右小腿 Rshin
左踝 LAnkle	左小腿 Lshin	左足 Lfoot
右踝 Rankle	右小腿 Rshin	右足 Rfoot

在多刚体模型的建模方面，本研究将头、躯干、四肢等看作不同刚体，关节等连接方式主要包括旋转关节和球形关节。通过此种方法，人就可以被看作成一个多刚体力学系统。根据多刚体模型各关节对应采用的父子级刚体骨段关系，本文建立的多刚体模型如图2-6所示，具体的骨段与关节的定义与表2-2一致。本文建立的多刚体模型包括躯干、上肢和下肢。躯干包括胸部和腹部两个刚体，通过腰关节连接而成。其中腰关节具有偏摆自由度。上肢部分则视为由大臂、小臂两部分组成，由肘关节相连，肩关节则为上肢与胸部的连接关节。下肢包括大腿、小腿和足部三个刚体，它们通过髋、

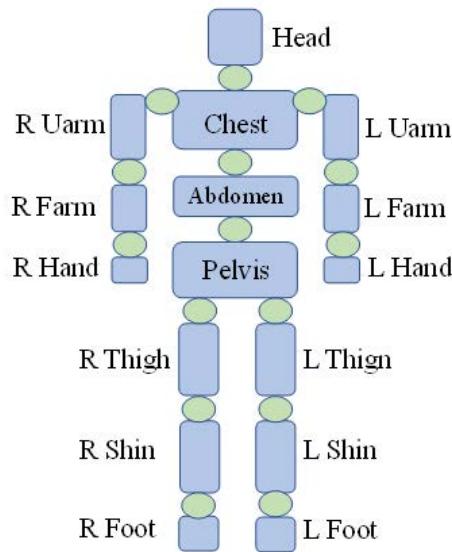


图 2-6 多刚体模型

Fig.2-6 Multi-link model

膝和踝三个球关节连接而成。经过简化的多刚体模型满足人体运动时主要关节和主要部位的运动特点。

2.3.2 多刚体模型的动作序列解算

仿真动作序列规划的输入轨迹首先需要进行动作序列旋转变化量解算，得到目标的关节空间轨迹序列。简言之，想要做出一定的动作，必不可少的便是维系人体各段肢体的关节转动配合。而这里从光学动作捕捉系统中，仅能输出标记点、刚体或骨架骨段的位置和姿态信息，而不能直接得到关节的转动情况。为解决这个问题，需要对刚体的姿态信息进行相对姿态变换。从光学动作捕捉系统可以捕获骨段刚体的位置和姿态信息，其中姿态信息以单位四元数 $q = [q_x \ q_y \ q_z \ q_w]'$ 的形式输出。结合机器人学可知，单轴关节的转动一般无法观测，需要表现为相邻两个刚体之间绕某个轴向旋转的相对变化。那么扩展到三轴自由度关节的转动，即表现为其相邻两个刚体之间姿态的相对变化。

首先，把各个刚体相对于世界坐标系的姿态表示的单位四元数 q 转换为旋转矩阵 R ，变换公式为：

$$R = \begin{bmatrix} q_w^2 + q_x^2 - q_y^2 - q_z^2 & 2(q_x q_y - q_w q_z) & 2(q_x q_z + q_w q_y) \\ 2(q_x q_y + q_w q_z) & q_w^2 - q_x^2 + q_y^2 - q_z^2 & 2(q_y q_z - q_w q_x) \\ 2(q_x q_z - q_w q_y) & 2(q_y q_z + q_w q_x) & q_w^2 - q_x^2 - q_y^2 + q_z^2 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

其次，分别求相邻的两个刚体的相对旋转变化量，把父级刚体的旋转矩阵 R_0 求逆后左乘以子级的关节旋转矩阵 R_1 ，获得该父子刚体之间的相对的旋转变化量 R_e ，即该关节的旋转情况。由于 $R_1 = R_e R_0 = R_1 R_0^{-1} R_0$ ，所以旋转时的矩阵偏差值^[31]为：

$$R_e = R_1 R_0^{-1} \quad (2.2)$$

定义旋转矩阵的元素为：

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

根据罗德里格斯 (Rodrigues) 公式(2.4)可知，旋转矩阵可以转化为指数形式的映射关系，由旋转方向的单位矢量 $\omega \in R^3 (|\omega| = 1)$ 和旋转角度 θ_i 一对—映射到 $SO(3)$ 。

$$R = e^{\hat{\omega}\theta_i} = I + \hat{\omega} \sin \theta + \hat{\omega}^2 (1 - \cos \theta) \quad (2.4)$$

当 $\omega = [\omega_1, \omega_2, \omega_3]'$ 时， ω 的 Hat 运算为：

$$\hat{\omega} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_3 & \omega_2 \\ \omega_3 & 0 & -\omega_1 \\ -\omega_2 & \omega_1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

而 Vee 运算为 Hat 运算的逆运算。

当该旋转矩阵 R 的迹满足条件： $-1 \leq \text{trace}(R) \leq 3$ ，可以通过旋转矩阵求出对这个相对关节角旋转角度的阵转成欧拉角即为所求角度，变换公式为：

$$\theta_i = \cos^{-1}\left(\frac{\text{trace}(R) - 1}{2}\right) \quad (2.6)$$

当 $\theta \neq 0$ 时，则根据公式(2.7)

$$\hat{\omega} = \frac{1}{2 \sin \theta} (R_e R_e^T) \quad (2.7)$$

再对 $\hat{\omega}$ 进行 Vee 运算，即可求出相对关节角旋转角度：

$$\omega = \text{Vee}(\hat{\omega}) \quad (2.8)$$

从而可以得到旋转矩阵差值 R_e 对应的旋转轴和相对关节角旋转角度，即关节旋转变化量。

在此给出一个算例，取父刚体的姿态四元数为 $[-0.0675 0.7303 0.0695 0.6761]'$ ，子刚体的姿态四元数为 $[-0.1055 0.7394 0.1105 0.6558]'$ ，单位化后根据公式(2.1)可得父刚体的旋转矩阵 R_0 ：

$$R_0 = \begin{bmatrix} -0.077 & -0.193 & 0.978 \\ -0.005 & 0.981 & 0.193 \\ -0.997 & 0.010 & -0.076 \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

同理可得，子刚体的旋转矩阵 R_1 ：

$$R_1 = \begin{bmatrix} -0.118 & -0.301 & 0.946 \\ -0.011 & 0.953 & 0.302 \\ -0.993 & 0.025 & -0.116 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

根据(2.2)可以求得矩阵差为：

$$R_e = \begin{bmatrix} 0.993 & -0.112 & 0.042 \\ 0.112 & 0.994 & -0.002 \\ -0.042 & 0.007 & 0.999 \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

矩阵 R_e 的迹等于 2.986，根据公式(2.6)可以求得该相对关节角旋转角度为 0.1202 Rad，单位旋转矢量 $\omega = [0.0379, 0.3507, 0.9357]'$ 。同理可以迭代求出其余父子级刚体间的相对关节角旋转角度。

2.3.3 双质量简化模型

虽然多刚体模型已经对庞杂的人体结构做了较大幅度的简化，然而在该模型中各刚体均以球形关节连接，会带给与触壁空翻运动并无关联的冗余自由度。为了便于采集人体运动关键数据以应用到机器人规划控制中，本研究保留人体触壁空翻的基本物理特性，进一步提出建立一个适合分析基本的触壁空翻运动并且能够与仿人机器人模型建立良好对应关系的简化模型。

本研究提出的双质量模型如图2-7. 连杆 pb 代表人体腿部，连杆 be 代表人体躯干，连杆 pb 和连杆 be 在 XZ 平面上，通过旋转关节串联构成一个三自由度的结构。模型基于以下假设条件：1) 腿部为弹性支撑腿，原始长度为 L_0 ，腿部弹簧系数 k_k ，阻尼系数 b_k ，弹簧压缩量 ${}^b x = L_0 - L_b$ ；腰部以下的质量集中在腿部中心位置 c_1 ，记为 m 。2) 腿部末端与壁面接触高度记为 p ，触壁阶段腿部与壁面夹角 θ ，3) 腰部转动关节处记为 b ，躯干与腿部夹角 ϕ . 4) 躯干末端记为 e ，躯干长度为 L_1 。模型腰部以上的质心等效

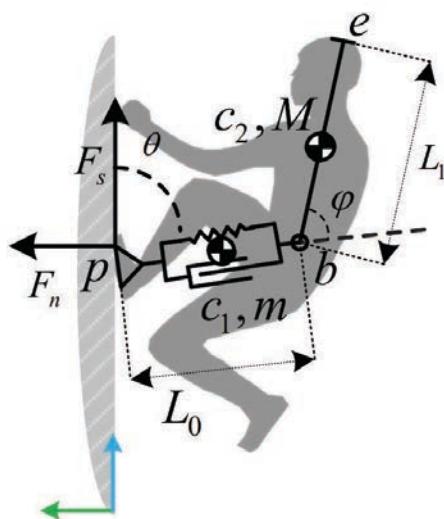


图 2-7 双质量简化模型

Fig.2-7 Simplify Model of wall-flip

位置为躯干中心处 c_2 , 记其质量大小为 M 。5) 重力加速度垂直向下。

该模型保留了腰关节、接触腿及其他基本的物理特性和运动参数。在进行人体数据采集与分析时, 以竖直平面内的运动数据为主, 主要研究机器人在竖直平面内的运动。以腰关节、腿长变化量、与壁面接触角度等运动学参数探究对触壁空翻运动的影响。

选取实验 3 的成功触壁空翻实验样本进行分析。在第二章章首图2-1(a) 至图2-1(f) 给出了触壁空翻实验 3 对应的第二台摄像机记录跑酷者触壁空翻的截取图片。图2-1(g) 至图2-1(l) 给出了触壁空翻实验 3 对应的运动捕捉系统中人体刚体的截取图片。图2-1(m) 至图2-1(r) 给出了触壁空翻实验 3 对应的运动捕捉系统中标记点的位置序列组成人体架构的截取图片。由于本小节选取了触壁阶段腿部与壁面夹角 θ 、躯干与腿部夹角 ϕ 以及接触腿腿部长度 L_b 以及触壁临界的一些运动状态比如速度与接触点等参数进行分析, 并在图2-1(g) 至图2-1(l) 中标注出了角度示意图。通过实验发现, 不同实验样本虽然脚掌触壁落脚点、身体的俯仰角、腰部运动、腿部运动和地壁反力变化的幅值有所不同, 但运动规律大致相同。

根据触壁运动的运动轨迹, 简化为以下模型轨迹如图2-8, 采用弹簧倒立摆一步接触壁面。弹簧倒立摆模型以一定的初始能量跃向壁面, 其腿部与壁面接触 (时刻 1), 处于单腿接触。接触后, 弹簧开始压缩, 直到弹簧压缩量达到最大时 (时刻 2), 随后弹

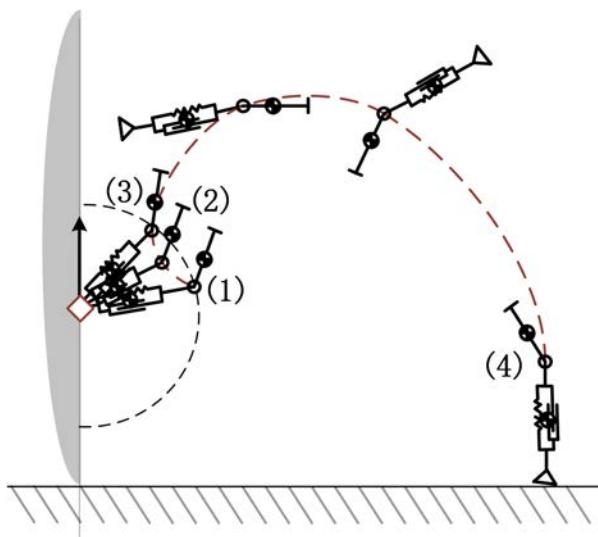


图 2-8 简化模型触壁空翻

Fig.2-8 Simplify model of wall-flip

离壁面（时刻 3）进行空翻，最后落地（时刻 4）。将此过程化为 4 个状态（记为 1, 2, 3, 4），分别为触壁时刻、蹬壁时刻、离壁时刻和落地时刻。

这四个临界时刻将整个运动过程划分为三个阶段 ($1 \rightarrow 2$, $2 \rightarrow 3$, $3 \rightarrow 4$)。第一个阶段定义为机器人以一定的初始能量与壁面接触的阶段。这个阶段是图2-8中的从 1 到 2，机器人与壁面接触，定义在腿部与墙体接触和弹簧压缩量达到最大之间，模型受支持力、重力、摩擦力。第二个阶段是定义在腿部弹簧压缩量达到最大时和离开接触点之间，这个阶段是图中的从 2 到 3。第三个阶段的定义是空翻阶段，即将要离开壁面后，与壁面无接触的阶段，属于无支撑足接触阶段。这个阶段是图中的从 3 到 4。腾空模型只受重力。

2.3.4 简化模型的运动学实验数据分析

在运动学实验数据中，选取了触壁阶段腿部与壁面夹角 θ 、躯干与腿部夹角 ϕ 以及接触腿腿部长度 L_b 以及触壁临界的一些运动状态比如速度与接触点等参数进行分析。

在光学动作捕捉系统下，选取肩部四个标记点 (RShoulderBack, LShoulderBack, RShoulderTop, LShoulderTop) 的中心点 S ，腰部四个点 (WaistRBack, WaistLBack, WaistR-Front, WaistLBack) 的中心点 W ，以及接触脚右脚脚掌三个点 (RAngleOut, RToeIn, RToeOut) 的中心点 F ，标记点的位置示意图如图2-4。以这肩部与腰部中心点组成的向量代表上半身的方向，以这右脚脚掌与腰部中心点组成的向量代表下半身的方向，以此计算出触壁阶段腿部与壁面夹角 θ 、躯干与腿部夹角 ϕ 以及接触腿腿部长度 L_b 。

实验 1 是成功的样本，其躯体角、腰关节与接触腿腿长变化图像如图2-9。跑酷者跃向壁面，随后与壁面开始接触。在接触壁面阶段 ($1 \rightarrow 2$)，跑酷者身体躯干以右脚为触壁支点由离心力作用向壁面运动，躯体角度 θ 略微减小，腰关节角度随着躯干角度的减小而 ϕ 逐渐相对减小；接触腿的腿部膝盖弯曲以至于接触腿腿长 L_b 在这个阶段逐渐减小。在蹬壁阶段 ($2 \rightarrow 3$)，腿与壁面夹角 θ 基本保持在一定范围内；跑酷者上半身趋于挺直， ϕ 逐渐减小；腿部往壁面方向用力蹬，接触腿腿长 L_b 逐渐减小。在离壁阶段 ($3 \rightarrow 4$)，在跑酷者壁面积累足够的初始角动量后离开壁面，腿与壁面夹角 θ 开始明显增大，直至落地接近转一周 (353.86°)；上半身保持后仰， ϕ 先逐渐减小到接近 -0.46rad ，但是由于膝盖尽可能地向胸前收缩，导致相对角度 ϕ 逐渐增大到 1.89rad ，直至落地时刻；同理，由于膝盖尽量往胸前收缩的运动趋势，所以 L_b 会先逐渐减小，

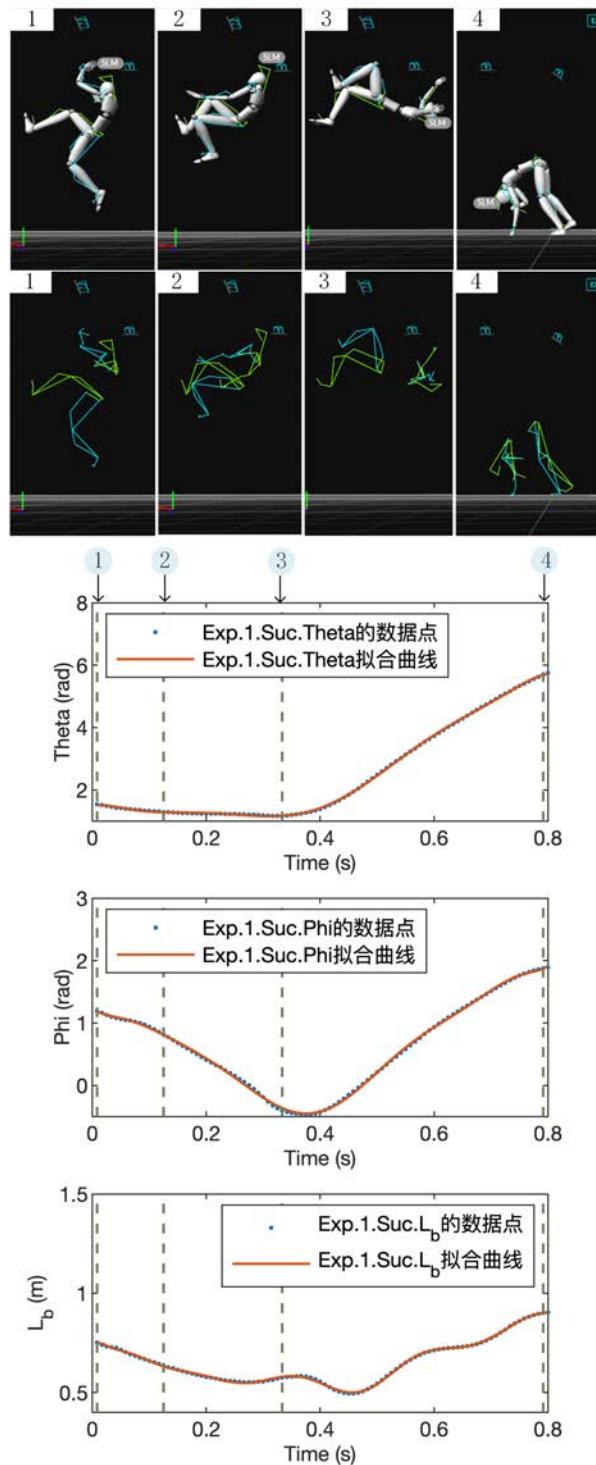


图 2-9 实验 1 触壁空翻简化模型数据

Fig.2-9 Experiment 1 wall-flip simplified model data

达到减小转动惯量，增大角速度的作用；随后，腿部慢慢舒展， L_b 后逐渐增大，增大转动惯量，减小角速度，以便平稳着陆。

实验 2 是失败的样本，其躯体角、腰关节与接触腿腿长变化图像如图2-10。在接触

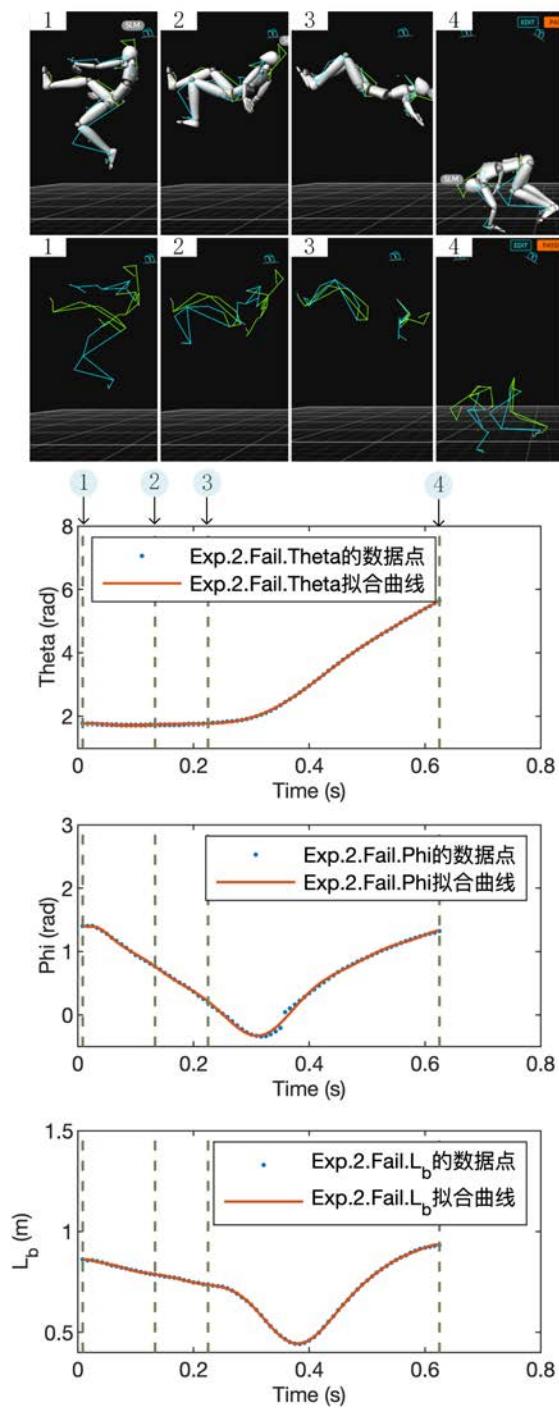


图 2-10 实验 2 触壁空翻简化模型数据

Fig.2-10 Experiment 2 wall-flip simplified model data

壁面阶段（1→2），跑酷者身体躯干以右脚为触壁支点由离心力作用向壁面运动，躯体角度 θ 略微减小，腰关节角度随着躯干角度的减小而 ϕ 逐渐相对减小；接触腿的膝盖弯曲以至于接触腿腿长 L_b 在这个阶段逐渐减小。在蹬壁阶段（2→3），腿与壁面夹角 θ 基本保持在一定范围内；跑酷者上半身趋于挺直， ϕ 逐渐减小；腿部并未舒展，

保持屈膝，接触腿腿长 L_b 逐渐减小。在离壁阶段（3→4），在跑酷者壁面积累足够的初始角动量后离开壁面，腿与壁面夹角 θ 开始明显增大，直至落地接近转 338.81° ；上半身保持后仰， ϕ 先逐渐减小到接近 -0.34rad ，但是由于膝盖尽可能地向胸前收缩，导致相对角度 ϕ 逐渐增大到 1.40rad ，直至落地时刻；同理，由于膝盖尽量往胸前收缩的运动趋势，所以 L_b 会先逐渐减小，达到减小转动惯量，增大角速度的作用；随后，腿部慢慢舒展， L_b 后逐渐增大，增大转动惯量，减小角速度。

实验 3 是成功的样本，其躯体角、腰关节与接触腿腿长变化图像如图2-11。跑酷者跃向壁面，随后与壁面开始接触。在接触壁面阶段（1→2），跑酷者身体躯干以右脚为触壁支点由离心力作用向壁面运动，躯体角度 θ 略微减小，腰关节角度随着躯干角度的减小而 ϕ 逐渐相对减小；接触腿的腿部膝盖弯曲以至于接触腿腿长 L_b 在这个阶段逐渐减小。在蹬壁阶段（2→3），腿与壁面夹角 θ 基本保持在一定范围内；跑酷者上半身趋于挺直， ϕ 逐渐减小；接触腿腿长 L_b 先逐渐减小，随后由于腿部接近离壁的临界状态，腿部开始舒展， L_b 略微增大。在离壁阶段（3→4），在跑酷者壁面积累足够的初始角动量后离开壁面，腿与壁面夹角 θ 开始明显增大，直至落地接近转一周 (356.38°)；上半身保持后仰， ϕ 先逐渐减小到 -0.04rad ，但是由于膝盖尽可能地向胸前收缩，导致相对角度 ϕ 逐渐增大到 1.81rad ，随后 ϕ 略微减小；由于膝盖尽量往胸前收缩的运动趋势，所以 L_b 会先逐渐减小，达到减小转动惯量，增大角速度的作用；随后，腿部慢慢舒展， L_b 后逐渐增大，与地面接触身体会保持向下运动的趋势，腿部压缩会导致 L_b 会减小。

实验 4 是成功的样本，其躯体角、腰关节与接触腿腿长变化图像如图2-12。跑酷者跃向壁面，随后与壁面开始接触。在接触壁面阶段（1→2），跑酷者身体躯干以右脚为触壁支点由离心力作用向壁面运动，躯体角度 θ 略微减小，腰关节角度随着躯干角度的减小而 ϕ 逐渐相对减小；接触腿的腿部膝盖弯曲以至于接触腿腿长 L_b 在这个阶段逐渐减小。在蹬壁阶段（2→3），腿与壁面夹角 θ 基本保持在一定范围内；跑酷者上半身趋于挺直， ϕ 逐渐减小；接触腿腿长 L_b 逐渐减小。在离壁阶段（3→4），在跑酷者壁面积累足够的初始角动量后离开壁面，腿与壁面夹角 θ 开始明显增大，直至落地接近转一周 (359.54°)；上半身保持后仰， ϕ 先逐渐减小至 -0.13rad ，但是由于膝盖尽可能地向胸前收缩，导致相对角度 ϕ 逐渐增大到 1.67rad ，随后 ϕ 略微减小；由于膝盖尽

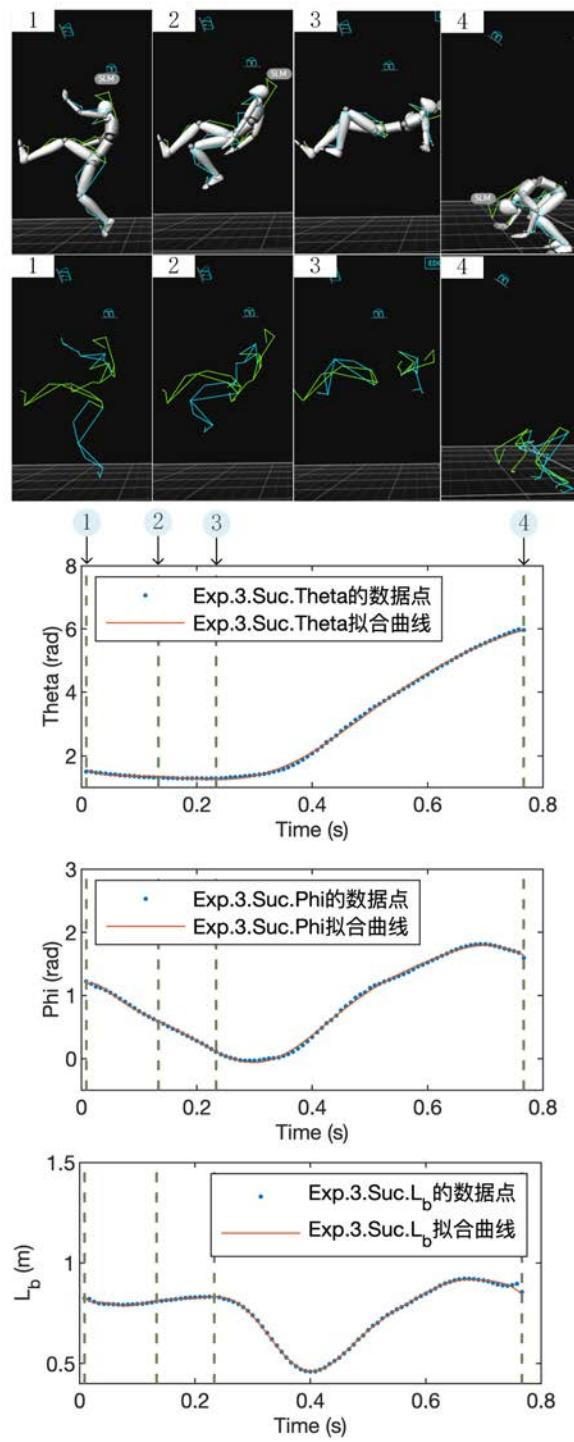


图 2-11 实验 3 触壁空翻简化模型数据

Fig.2-11 Experiment 3 wall-flip simplified model data

量往胸前收缩的运动趋势，所以 L_b 会先逐渐减小，达到减小转动惯量，增大角速度的作用；随后，腿部慢慢舒展， L_b 后逐渐增大，与地面接触身体会保持向下运动的趋势，腿部压缩会导致 L_b 会减小。

实验 5 是失败的样本，其躯体角、腰关节与接触腿腿长变化图像如图2-13。跑酷者

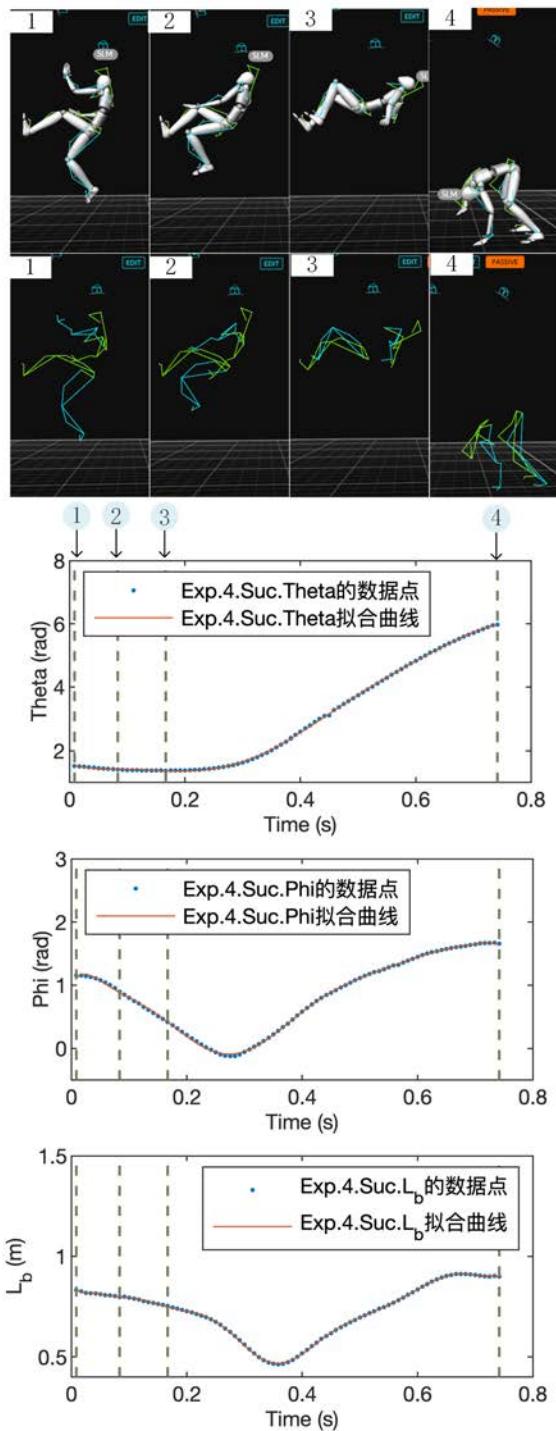


图 2-12 实验 4 触壁空翻简化模型数据

Fig.2-12 Experiment 4 wall-flip simplified model data

跃向壁面，随后与壁面开始接触。在接触壁面阶段（1→2），跑酷者身体躯干以右脚为触壁支点由离心力作用向壁面运动，躯体角度 θ 略微减小，腰关节角度随着躯干角度的减小而 ϕ 逐渐相对减小；接触腿的腿部膝盖弯曲以至于接触腿腿长 L_b 在这个阶段略微减小。在蹬壁阶段（2→3），腿与壁面夹角 θ 基本保持在一定范围内；跑酷者上半身

趋于挺直， ϕ 逐渐减小；接触腿逐渐撑直，腿长 L_b 略微增大。在离壁阶段（3→4），在跑酷者壁面积累足够的初始角动量后离开壁面，腿与壁面夹角 θ 开始明显增大，直至落地转过 404.88° ，跑酷者呈往后倒的运动趋势；由于上半身保持后仰， ϕ 先逐渐减小至 -0.27rad ，但是由于膝盖尽可能地向胸前收缩，导致相对角度 ϕ 逐渐增大到 1.98rad ，随后 ϕ 略微减小；由于膝盖尽量往胸前收缩的运动趋势，所以 L_b 会先逐渐减小，达到减小转动惯量，增大角速度的作用；随后，腿部慢慢舒展， L_b 后逐渐增大，与地面接触身体会保持向下运动的趋势，腿部压缩会导致 L_b 会减小。

实验 6 是成功的样本，其躯体角、腰关节与接触腿腿长变化图像如图2-14。跑酷者跃向壁面，随后与壁面开始接触。在接触壁面阶段（1→2），跑酷者身体躯干以右脚为触壁支点由离心力作用向壁面运动，躯体角度 θ 略微减小，腰关节角度随着躯干角度的减小而 ϕ 逐渐相对减小；接触腿的腿部膝盖弯曲以至于接触腿腿长 L_b 在这个阶段略微减小。在蹬壁阶段（2→3），腿与壁面夹角 θ 基本保持在一定范围内；跑酷者上半身趋于挺直， ϕ 逐渐减小；接触腿腿长 L_b 略微增大。在离壁阶段（3→4），在跑酷者壁面积累足够的初始角动量后离开壁面，腿与壁面夹角 θ 开始明显增大，直至落地接近转一周 (359.53°)；上半身保持后仰， ϕ 先逐渐减小至 -0.48rad ，但是由于膝盖尽可能地向胸前收缩，导致相对角度 ϕ 逐渐增大到 1.77rad ，随后 ϕ 略微减小；由于膝盖尽量往胸前收缩的运动趋势，所以 L_b 会先逐渐减小，达到减小转动惯量，增大角速度的作用；随后，腿部慢慢舒展， L_b 后逐渐增大，与地面接触身体会保持向下运动的趋势，腿部压缩会导致 L_b 会减小。

实验 7 是失败的样本，其躯体角、腰关节与接触腿腿长变化图像如图2-15。在接触壁面阶段（1→2），跑酷者身体躯干以右脚为触壁支点由离心力作用向壁面运动，躯体角度 θ 略微减小，腰关节角度随着躯干角度的减小而 ϕ 逐渐相对减小；接触腿的腿部膝盖弯曲以至于接触腿腿长 L_b 在这个阶段逐渐减小。在蹬壁阶段（2→3），腿与壁面夹角 θ 基本保持在一定范围内；跑酷者上半身趋于挺直， ϕ 逐渐减小；接触腿腿长 L_b 先逐渐减小，随后由于腿部接近离壁的临界状态，腿部开始舒展， L_b 略微增大。在离壁阶段（3→4），在跑酷者壁面积累足够的初始角动量后离开壁面，腿与壁面夹角 θ 开始明显增大，直至落地接近转 325.99° ；上半身保持后仰， ϕ 先逐渐减小到接近 -0.38rad ，但是由于膝盖尽可能地向胸前收缩，导致相对角度 ϕ 逐渐增大到 1.64rad ，直至落地时

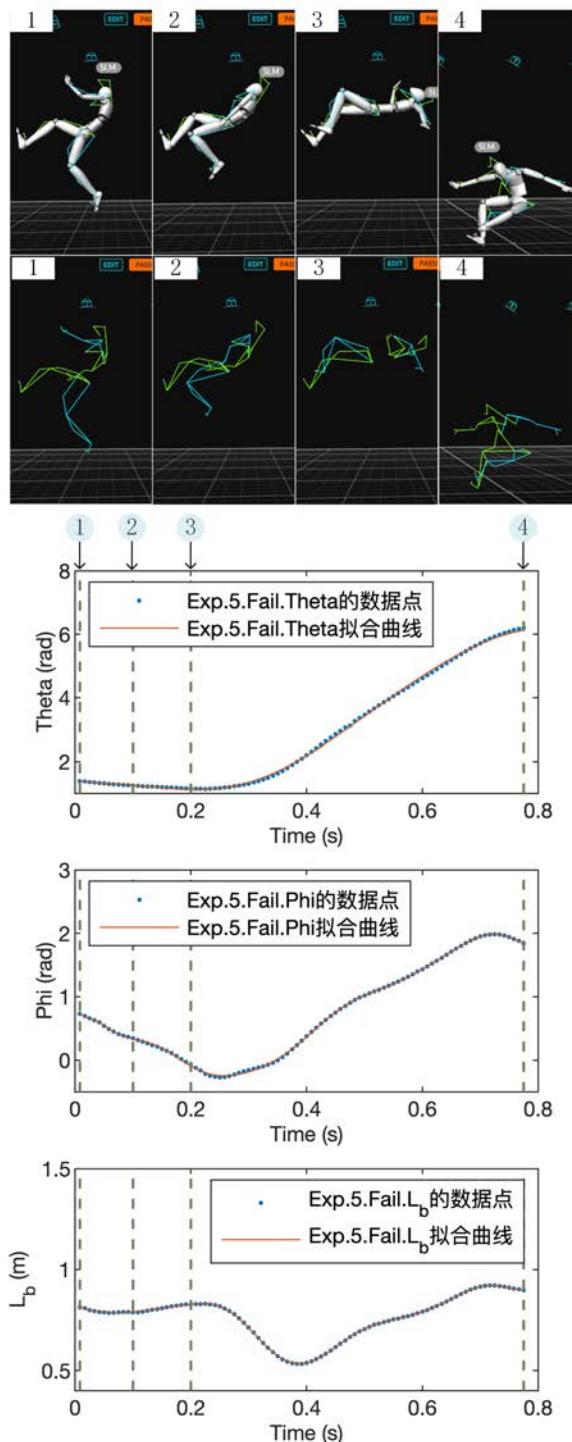


图 2-13 实验 5 触壁空翻简化模型数据

Fig.2-13 Experiment 5 wall-flip simplified model data

刻；同理，由于膝盖尽量往胸前收缩的运动趋势，所以 L_b 会先逐渐减小，达到减小转动惯量，增大角速度的作用；随后，腿部慢慢舒展， L_b 后逐渐增大，增大转动惯量，减小角速度。

实验 8 是成功的样本，其躯体角、腰关节与接触腿腿长变化图像为2-16。跑酷者跃

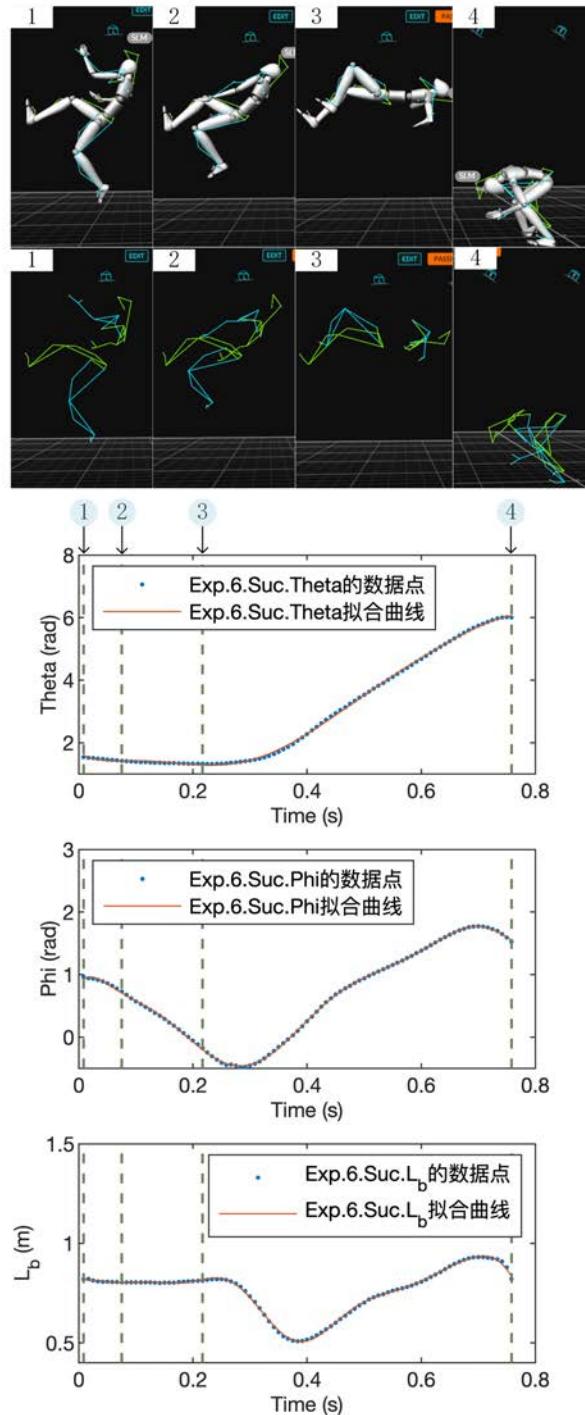


图 2-14 实验 6 触壁空翻简化模型数据

Fig.2-14 Experiment 6 wall-flip simplified model data

向壁面，随后与壁面开始接触。在接触壁面阶段（1→2），跑酷者身体躯干以右脚为触壁支点由离心力作用向壁面运动，躯体角度 θ 略微减小，腰关节角度随着躯干角度的减小而 ϕ 逐渐相对减小；接触腿的膝盖弯曲以至于接触腿腿长 L_b 在这个阶段逐渐减小，随后由于腿部接近离壁的临界状态，腿部开始舒展， L_b 略微增大。在蹬壁阶

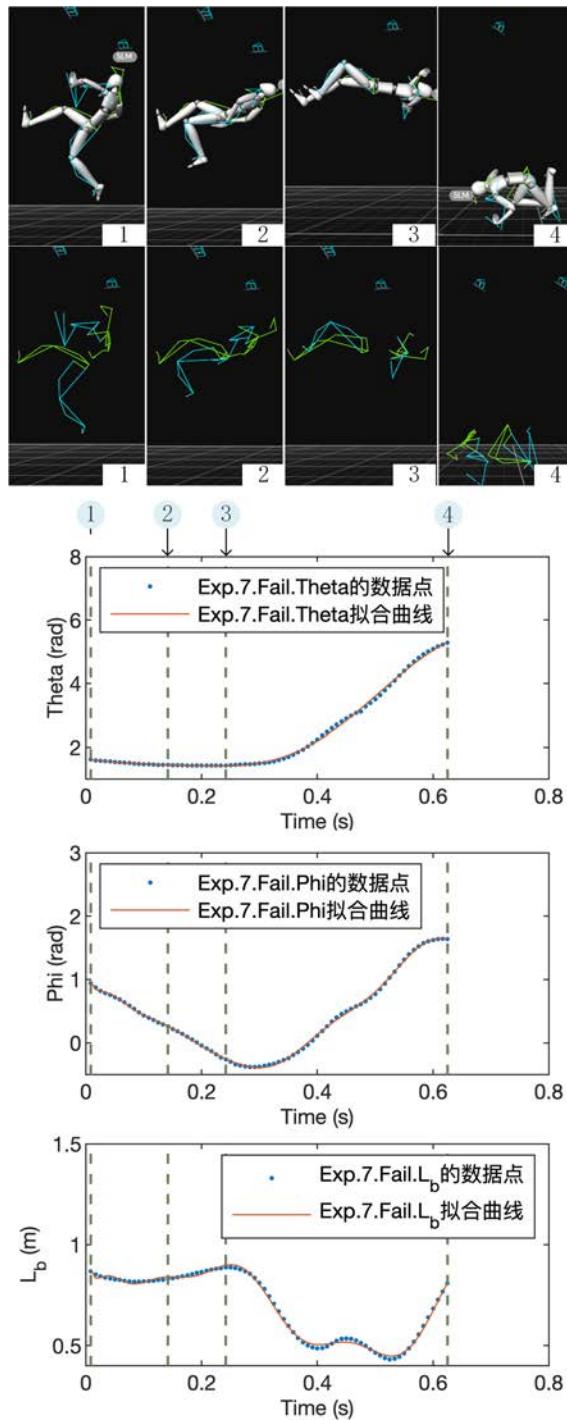


图 2-15 实验 7 触壁空翻简化模型数据

Fig.2-15 Experiment 7 wall-flip simplified model data

段 ($2 \rightarrow 3$)，腿与壁面夹角 θ 基本保持在一定范围内；跑酷者上半身趋于挺直， ϕ 逐渐减小；接触腿腿长 L_b 逐渐减小。在离壁阶段 ($3 \rightarrow 4$)，在跑酷者壁面积累足够的初始角动量后离开壁面，腿与壁面夹角 θ 开始明显增大，直至落地接近转一周 (347.94°)；上半身保持后仰， ϕ 先逐渐减小至 -0.43rad ，但是由于膝盖尽可能地向胸前收缩，导致相

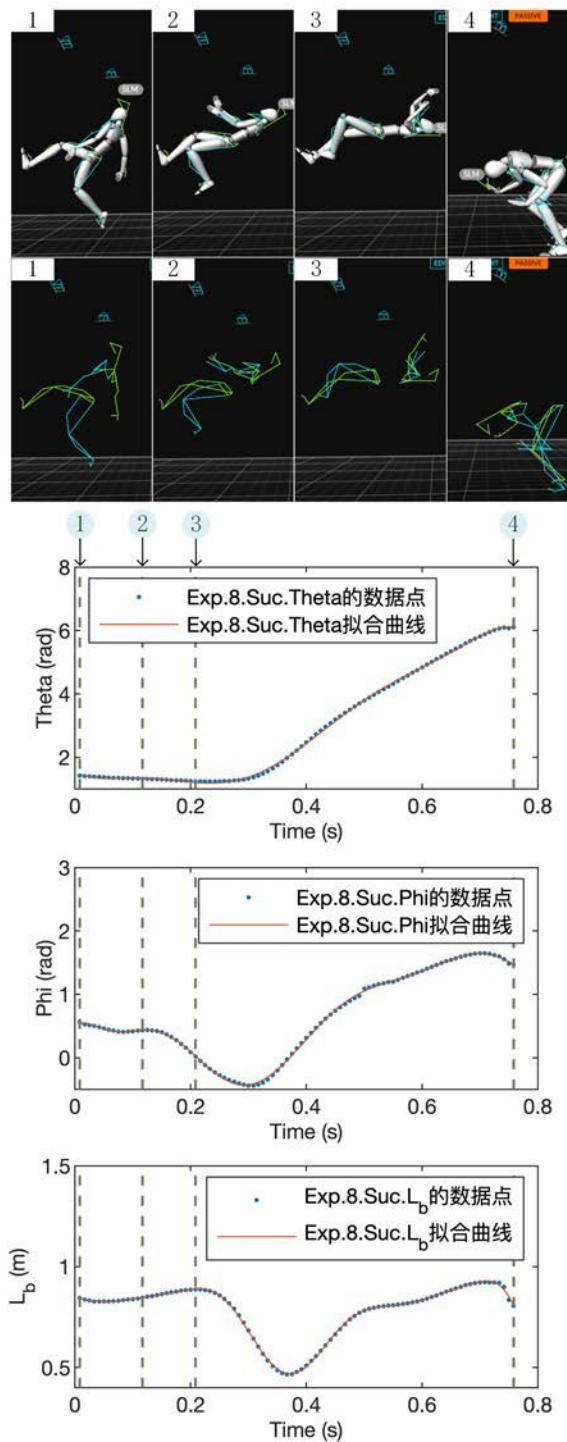


图 2-16 实验 8 触壁空翻简化模型数据

Fig.2-16 Experiment 8 wall-flip simplified model data

对角度 ϕ 逐渐增大到 1.65rad , 随后 ϕ 略微减小; 由于膝盖尽量往胸前收缩的运动趋势, 所以 L_b 会先逐渐减小, 达到减小转动惯量, 增大角速度的作用; 随后, 腿部慢慢舒展, L_b 后逐渐增大, 与地面接触身体会保持向下运动的趋势, 腿部压缩会导致 L_b 会减小。

实验 9 是成功的样本, 其躯体角、腰关节与接触腿腿长变化图像见下图2-17。跑酷

者跃向壁面，随后与壁面开始接触。在接触壁面阶段（1→2），跑酷者身体躯干以右脚为触壁支点由离心力作用向壁面运动，躯体角度 θ 略微减小，腰关节角度随着躯干角度的减小而 ϕ 逐渐相对减小；接触腿的腿部膝盖弯曲以至于接触腿腿长 L_b 在这个阶段逐渐减小。在蹬壁阶段（2→3），腿与壁面夹角 θ 在一定范围内略微减小；跑酷者上半身趋于挺直， ϕ 逐渐减小；由于腿部接近离壁的临界状态，腿部开始舒展，接触腿腿长 L_b 略微增大。在离壁阶段（3→4），在跑酷者壁面积累足够的初始角动量后离开壁面，腿与壁面夹角 θ 开始明显增大，直至落地接近转一周（357.31°）；上半身保持后仰， ϕ 先逐渐减小至-0.32rad，但是由于膝盖尽可能地向胸前收缩，导致相对角度 ϕ 逐渐增大到 1.68rad，随后 ϕ 略微减小；由于膝盖尽量往胸前收缩的运动趋势，所以 L_b 会先逐渐减小，达到减小转动惯量，增大角速度的作用；随后，腿部慢慢舒展， L_b 后逐渐增大，与地面接触身体会保持向下运动的趋势，腿部压缩会导致 L_b 会减小。

根据实验的数据可以得到九次实验的触壁时刻、蹬壁时刻、离壁时刻和落地时刻的躯体角度大小如下表2-3所示：

表 2-3 触壁空翻运动学参数：躯体角角度 (θ)Table 2-3 Kinematic parameters of wall-flip: body angle, (θ)

实验编号	θ_1 (°)	θ_2 (°)	θ_3 (°)	θ_4 (°)
Exp 1-Suc	76.97	71.64	90.93	353.86
Exp 2-Fail	99.35	104.46	117.31	338.81
Exp 3-Suc	84.21	75.19	77.67	356.38
Exp 4-Suc	89.44	78.72	81.79	359.54
Exp 5-Fail	76.17	71.42	65.67	404.88
Exp 6-Suc	89.12	77.78	75.92	359.53
Exp 7-Fail	82.48	81.68	94.16	325.99
Exp 8-Suc	75.06	70.97	89.04	347.94
Exp 9-Suc	74.08	67.47	72.15	357.31

其中最关心的是触壁时刻与落地时刻的躯体角度大小。从结果可知，(1) 在失败的样本中，实验 2 与实验 7 为落地时刻没有转至能够稳定重心的角度，表现为躯体角过小，跑酷者向前倾倒；实验 5 落地时刻躯体角过大，跑酷者落地向后倾倒；(2) 实验 2

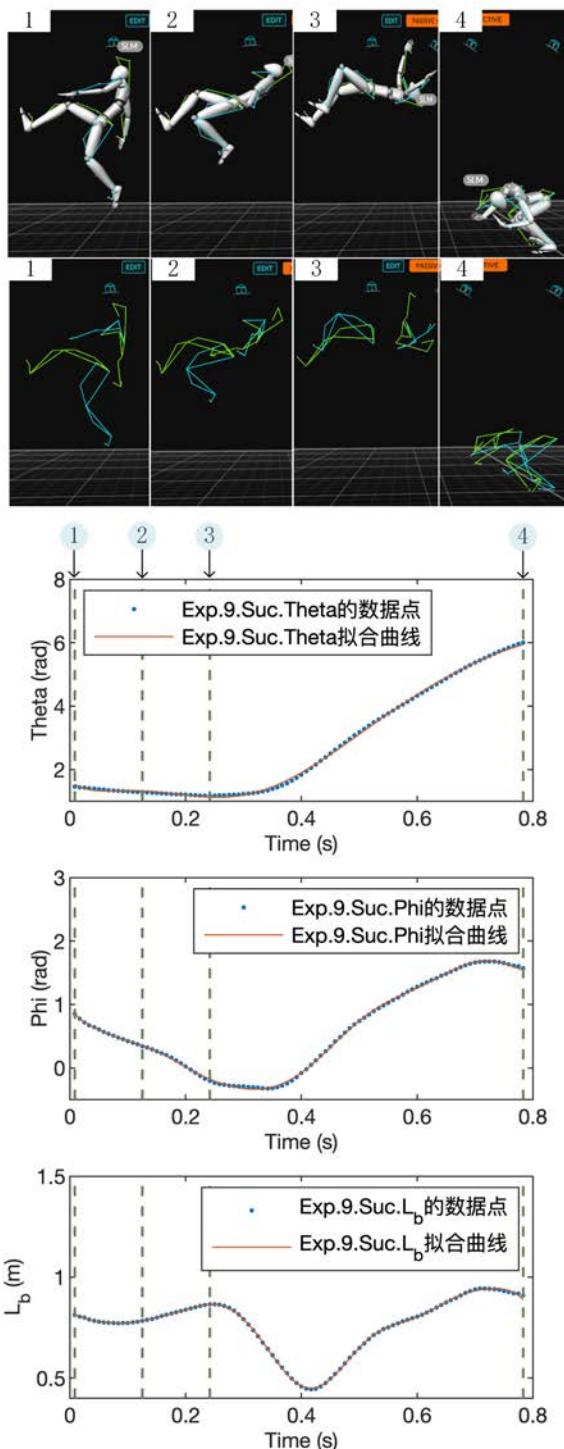


图 2-17 实验 9 触壁空翻简化模型数据

Fig.2-17 Experiment 9 wall-flip simplified model data

的触壁时刻的躯体角远高于其他实验中的躯体角度；在提出猜想，躯体角可以选择的最大角度范围与触壁时刻落脚点高度紧密相关。

根据实验的数据可以得到九次实验的触壁时刻、蹬壁时刻、离壁时刻和落地时刻

的腰关节角度大小如表格2-4:

表 2-4 触壁空翻运动学参数: 腰关节角度 (ϕ)

Table 2-4 Kinematic parameters of the wall-flip: waist angle, (ϕ)

实验编号	$\phi_1(^{\circ})$	$\phi_2(^{\circ})$	$\phi_3(^{\circ})$	$\phi_4(^{\circ})$
Exp 1-Suc	55.74	31.38	-18.19	108.34
Exp 2-Fail	66.98	-1.73	-19.59	77.85
Exp 3-Suc	73.70	50.43	-1.24	96.01
Exp 4-Suc	78.82	39.60	-8.28	86.49
Exp 5-Fail	47.14	24.56	-5.01	89.37
Exp 6-Suc	67.44	32.44	-0.93	89.16
Exp 7-Fail	12.45	-10.35	-15.46	78.22
Exp 8-Suc	24.80	-6.77	-19.76	89.08
Exp 9-Suc	21.28	-9.80	-17.41	90.17

其中(1)在触壁时刻, 腰关节角度均为正值, 表现为跑酷者与壁面接触时刻上半身往前微倾; (2)触壁时刻与蹬壁时刻和离壁时刻的角度差值代表了运动过程中腰关节角度的变化程度; (3)在离壁时刻腰关节角度均为负值, 即腰部与接触腿的延长线夹角为负值, 表现为跑酷者往后顶腰, 提供一定的转动力矩。

为了获取腿与壁面夹角、腰关节角度和接触腿腿长变化量的速度和加速度运动时序以进行第三章的仿真, 本研究通过多项式拟合求导, 再进行离散处理, 得出腿与壁面夹角、腰关节角度和接触腿腿长变化量的速度和加速度。根据实验的数据可以得到九次实验的触壁时刻、蹬壁时刻、离壁时刻和落地时刻的躯体角度、腰关节角度、接触腿腿长及其对应的角速度与角加速度均值与标准偏差如表2-5所示:

表2-5分别显示了腿与壁面夹角、腰关节在竖直平面中的角度在初始接触阶段、接触压缩阶段、与壁面分离阶段和空翻阶段分界时刻的平均角速度和平均角加速度。可以看出, 1) 成功触壁空翻中腰关节和腿与壁面夹角的平均角加速度明显高于未成功触壁空翻的腰关节和腿与壁面夹角的平均角加速度。2) 成功触壁空翻中腿长变化的平均速度明显低于未成功触壁空翻中腿长变化的平均速度。

跑酷者在正常触壁空翻中, 利用地面蹬步跃向壁面, 初动能斜向上, 触壁后, 利用

表 2-5 触壁空翻垂直面角速度与角加速度的均值(标准偏差)

Table.2-5 Mean values (standard deviation) of angular velocity and acceleration

阶段	变量	成功	失败	时刻 (s)
触壁时刻的角速度 ($^{\circ}/s$)				
	$\dot{\theta}$	-114.00(7.01)	-60.59(29.03)	0.0083(0)
	$\dot{\phi}$	370.17(508.80)	-732.23(114.55)	0.0083(0)
	\dot{b}_x	-0.51(0.062)	-0.93(0.027)	0.0083(0)
触壁时刻的角加速度 ($^{\circ}/s^2$)				
	$\ddot{\theta}$	-9.56(424.97)	-307.37(115.74)	0.0083(0)
	$\ddot{\phi}$	1.22e4(2.15e3)	-5.97e3(4.07e2)	0.0083(0)
	\ddot{b}_x	33.67(8.55)	164.72(45.46)	0.0083(0)
蹬壁时刻的角速度 ($^{\circ}/s$)				
	$\dot{\theta}$	-67.86(26.49)	-15.03(43.28)	0.1217(0.027)
	$\dot{\phi}$	-151.28(737.83)	-28.74(768.40)	0.1217(0.027)
	\dot{b}_x	-0.114(0.78)	-0.0072(0.54)	0.1217(0.027)
蹬壁时刻的角加速度 ($^{\circ}/s^2$)				
	$\ddot{\theta}$	-183.18(136.70)	-255.97(98.18)	0.1217(0.027)
	$\ddot{\phi}$	-4.06e3(3.51e3)	9.59e2(3.72e3)	0.1217(0.027)
	\ddot{b}_x	12.28(11.69)	5.67(1.43)	0.1217(0.027)
离壁时刻的角速度 ($^{\circ}/s$)				
	$\dot{\theta}$	13.06(21.64)	69.31(13.77)	0.2717(0.041)
	$\dot{\phi}$	847.95(945.46)	1312.22(1179.41)	0.2717(0.041)
	\dot{b}_x	-0.095(0.60)	-0.353(0.22)	0.2717(0.041)
离壁时刻的角加速度 ($^{\circ}/s^2$)				
	$\ddot{\theta}$	1.15e3(2.49e3)	-294.92(163.26)	0.2717(0.041)
	$\ddot{\phi}$	5.62e3(1.46e3)	3.56e3(3.09e3)	0.2717(0.041)
	\ddot{b}_x	-30.86(22.13)	-35.67(22.68)	0.2717(0.041)
落地时刻的角速度 ($^{\circ}/s$)				
	$\dot{\theta}$	365.78(89.81)	393.41(49.36)	0.7800(0.105)
	$\dot{\phi}$	-814.67(1.58e3)	1.08e3(3693.67)	0.7800(0.105)
	\dot{b}_x	0.037(0.38)	1.012(0.52)	0.7800(0.105)
落地时刻的角加速度 ($^{\circ}/s^2$)				
	$\ddot{\theta}$	-261.22(387.46)	-5.39(510.38)	0.7800(0.105)
	$\ddot{\phi}$	-4.41e3(1.12e3)	-5.56e3(1.31e2)	0.7800(0.105)
	\ddot{b}_x	-40.33(28.42)	-81.47(12.96)	0.7800(0.105)

壁面作为支点将水平方向的动能更多的转移到竖直方向上，竖直方向上的能量利于跑酷者向上运动。一般成年人的步行速度约为 1.0 至 1.6m/s，跑步速度约为 1.5 至 6.0m/s。

本研究首先对被摄跑酷者的触壁前的临界初速度进行采集（表2-6），其中符号定义如下： h_0 : 触壁高度； s_0 : 起步距壁距离； s_e : 落地距壁距离；脚掌的瞬时速度(v_{f_x}, v_{f_z})；头部的瞬时速度(v_{h_x}, v_{h_z})； \bar{v}_x : 触壁水平速度； \bar{v}_z : 触壁竖直速度。选取脚掌的瞬时速度(v_{f_x}, v_{f_z})与头部的瞬时速度(v_{h_x}, v_{h_z})的平均值作为躯体的瞬时速度(\bar{v}_x, \bar{v}_z)。根据实验的数据可以得到九次实验的触壁高度、起跳前起步距离壁面的距离、落地时落地点距离壁面的距离以及触壁之前的临界水平速度和数值速度如表2-6所示。

通过对上述的实验数据进行总结可得到触壁空翻垂直面关键参数的均值(标准偏差)的统计数据如表2-7。表2-7显示了腰关节、腿与壁面夹角在竖直平面中的角度在初始接触阶段、接触压缩阶段、与壁面分离阶段和空翻阶段分界时刻的平均值和标准偏差，以及与壁面接触时的初始速度与落脚点高度的平均值和标准偏差。在成功和不成功的触壁空翻实验中可以看出：1) 在最初接触的瞬间，成功触壁空翻的平均腿与壁面夹角较小；2) 成功表演的腰关节角度在不同阶段都比不成功的触壁空翻高；3) 在初始接触和脚掌脱离壁面的瞬间，接触腿腿长变化量明显高于失败的触壁空翻；4) 成功触壁空翻的平均接触壁面前速度较大；5) 在初始接触时，脚尖在接触阶段落脚点与地面的距离比失败的要低。

综上所述，人体触壁空翻在运动学参数方面的运动规律最关键的指标罗列如下：

表 2-6 触壁空翻运动学参数

Table 2-6 Kinematic parameters of wall-flip

实验编号	h_0 (m)	s_0 (m)	s_e (m)	v_{f_x} (m/s)	v_{f_z} (m/s)	v_{h_x} (m/s)	v_{h_z} (m/s)	\bar{v}_x (m/s)	\bar{v}_z (m/s)
Exp 1-Suc	1.312	0.852	2.008	3.36	7.56	1.68	2.16	2.52	4.86
Exp 2-Fail	1.606	0.982	1.927	2.40	7.80	1.92	2.40	2.16	5.10
Exp 3-Suc	1.366	0.873	2.337	2.64	8.04	1.92	2.28	2.28	5.16
Exp 4-Suc	1.370	0.910	2.029	2.52	8.16	2.16	2.16	2.34	5.16
Exp 5-Fail	1.349	0.857	2.135	2.40	6.60	1.08	1.64	1.74	4.12
Exp 6-Suc	1.378	0.815	2.326	2.36	7.20	1.32	2.40	1.84	4.80
Exp 7-Fail	1.456	0.804	2.574	2.04	7.92	1.44	2.16	1.74	5.04
Exp 8-Suc	1.385	0.893	2.366	2.52	7.44	1.44	1.80	1.98	4.62
Exp 9-Suc	1.399	0.790	2.398	2.88	7.32	1.32	2.28	2.10	4.80

表 2-7 触壁空翻垂直面关键参数的均值(标准偏差)

Table 2-7 Mean value (standard deviation) of key parameters of the wall-flip

阶段	关键帧	成功	失败	时刻(s)
腿与壁面夹角 θ (°)	触壁时刻	81.98(6.72)	86.00(11.98)	0.0083(0)
	蹬壁时刻	73.63(4.34)	85.85(16.91)	0.1217(0.027)
	离壁时刻	81.25(7.46)	92.38(25.86)	0.2717(0.041)
	落地时刻	355.76(4.38)	356.56(42.33)	0.7800(0.105)
腰关节角 ϕ (°)	触壁时刻	63.63(11.30)	55.74(10.27)	0.0083(0)
	蹬壁时刻	33.40(5.47)	11.98(19.39)	0.1217(0.027)
	离壁时刻	-16.14(3.61)	-13.35(7.51)	0.2717(0.041)
	落地时刻	93.20(8.06)	81.81(6.55)	0.7800(0.105)
接触腿腿长 (m)	触壁时刻	0.79(0.07)	0.81(0.02)	0.0083(0)
	蹬壁时刻	0.78(0.10)	0.79(0.08)	0.1217(0.027)
	离壁时刻	0.67(0.13)	0.68(0.13)	0.2717(0.041)
	落地时刻	0.81(0.05)	0.84(0.05)	0.7800(0.105)
接触壁面前初始速度	-	(2.18,4.90)(0.25,0.22)	(1.88,4.75)(0.24,0.54))	-
接触壁面落脚点高度	-	1.368(0.03)	1.47(0.13)	-

(1) 接触壁面前的临界速度是与壁面接触前最起始的运动状态，也是最基本的指标。通过分析跑酷者的运动数据可知（表2-6与表2-7），在成功完成触壁空翻的样本中，接触壁面前的临界速度的平均值为水平方向上 2.18m/s，竖直方向上 4.90m/s；在失败的触壁空翻的样本中，接触壁面前的临界速度的平均值为水平方向上 1.88m/s，竖直方向上 4.75m/s。接触壁面前的临界速度如果太大，跑酷者由于离心力过大将很难离开墙壁；如果接触壁面前的临界速度太小，跑酷者将可能会很快从壁面上下来。接触壁面前的临界速度会跟加速距离相关联，根据运动数据可知，成功触壁空翻的最后一步应在距离墙壁 (s_0) 约为 0.8 到 0.9 米之间。成功触壁空翻的最后一步会影响触壁的高度 h_0 ，当 s_0 太小时，会导致触壁加速空间过窄，躯体角 (θ) 太小；当 s_0 太大时，加速距离过长，落脚点太高，导致躯体角过大，分解到水平方向上的能量过多，竖直方向上的能量减小，导致空翻失败。因此，要完成触壁空翻运动，跑酷者触壁前，跑向墙壁的速度不能太慢。

(2) 躯体角也是非常重要的指标。躯体角角度应该控制在 81° 左右。但是躯体角与壁面接触的落脚点是关联的。在成功触壁空翻的样本中，与壁面接触的落脚点 (h_0) 在 1.312 米 (约为跑酷者身高的 75%) 到 1.399 米 (约为跑酷者身高的 80%) 之间。成功触壁空翻的六次样本的平均值为 1.238 米。触壁空翻失败的样本 (实验 2, 实验 5 与实验 7) 也具有价值，由表格2-3中的 θ_3 可知，实验 2 与实验 7 跑酷者落地时表现为向前倾倒，而实验 5 跑酷者表现为向后倾倒。由表格2-6可以看出，实验 2 与实验 7 相比较实验 5 来说，上墙时的距离过高，特别是实验 2 达到了 $h_0 = 1.606$ 米，比成功触壁空翻的六次样本的平均值高出了 0.238 米。通过数据可以看出，落脚点的高度与躯体角 (θ_0) 相关 (如被摄跑酷者的触壁空翻过程的躯体角 (θ) 数据表2-3所示)，根据运动数据可知， h_0 越大，躯干角的角度会越大， h_0 越小，躯干角的角度会越小。躯体角是直接与发力方向相关的因素，因此选择合适高度的落脚点非常重要。发力方向会直接影响跑酷者施加在壁面上的法向力大小。因此，要完成触壁空翻运动，跑酷者不要跳得很高，也不要跳得太低。理想的壁面接触的落脚点范围应该在约为跑酷者身高的 75% 到 80% 之间。

2.3.5 接触面法向力实验数据分析

人体在运动的过程是人体各个关节间的肌肉收缩产生的内力以及接触面对人体施加的外力的共同作用的结果。研究人体在运动过程中受到的接触力规律是研究人体运动过程的重要元素。本小节将介绍由接触面反力测量系统得出的外力实验数据。

实验 1 是成功的样本。由跑酷者右脚弹性柔软压力传感器的壁面法向力结果图2-18可知，在接触壁面阶段 (1→2)，跑酷者身体躯干以右脚为触壁支点由离心力作用向壁面运动，在接触阶段，跑酷者的右腿脚掌在与壁面接触时产生压力，第一个较小的峰值为 490.35N，随后因为身体有向上运动的趋势，脚掌受到的压力略微减小。在蹬壁阶段 (2→3)，跑酷者右腿向壁面发力，达到第二个较小的峰值为 412.29N，随后逐渐减小，至离开壁面，减小为接近 0N。在离壁阶段 (3→4)，在跑酷者壁面积累足够的初始角动量后离开壁面，在腾空过程中，脚掌接触力接近 0N，直至落地时刻。在落地阶段，最大的接触力为 994.72N，等于 1.53 b.w.。

实验 2 是往前倾倒的失败样本。由跑酷者右脚弹性柔软压力传感器的壁面法向力结果图2-19可知，在接触壁面阶段 (1→2)，跑酷者身体躯干以右脚为触壁支点由离心力作用向壁面运动，在接触阶段，跑酷者的右腿脚掌在与壁面接触时产生压力，第一个

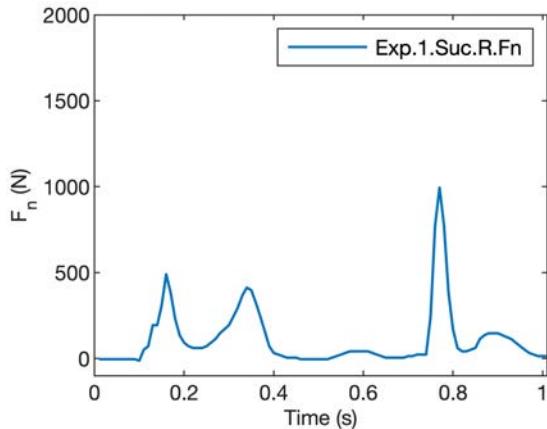


图 2-18 实验 1 壁面法向力实验数据

Fig.2-18 Experiment 1 Experimental data of normal force on the wall

较小的峰值为 367.71N，随后因为身体有向上运动的趋势，脚掌受到的压力略微减小。在蹬壁阶段（2→3），跑酷者右腿向壁面发力，达到第二个较小的峰值为 397.25N，随后逐渐减小，至离开壁面，减小为接近 0N。在本实验中，蹬壁法向力的峰值远小于其他八次实验，这与落脚点的高度有关。由表格2-6可以看出，实验 2 与实验 7 相比较实验 5 来说，上墙时的距离过高，特别是实验 2 达到了 $h_0 = 1.606$ 米，比成功触壁空翻的六次样本的平均值高出了 0.238 米。通过数据可以看出，落脚点的高度与躯体角 (θ_0) 相关（如被摄跑酷者的触壁空翻过程的躯体角 (θ) 数据表2-3所示），根据运动数据可知， h_0 越大，躯干角的角度会越大， h_0 越小，躯干角的角度会越小。躯体角是直接与发力方向相关的因素，因此选择合适高度的落脚点非常重要。发力方向会直接影响跑酷者施加在壁面上的法向力大小。在离壁阶段（3→4），在跑酷者壁面积累足够的初始角动量后离开壁面，在腾空过程中，脚掌接触力接近 0N，直至落地时刻。在落地阶段，最大的接触力为 556.21N，等于 0.86 b.w.。这个接触力偏小，根据录制的视频可知，本次实验落地时刻，跑酷者左脚略早于右脚与地面接触，身体前倾摔倒，右脚脚掌未完全以面的形式与地面接触，导致处于右脚脚掌的弹性柔软压力传感器测得的地面法向力比较小。

实验 3 是成功的样本。由跑酷者右脚弹性柔软压力传感器的壁面法向力结果图2-20可知，在接触壁面阶段（1→2），跑酷者身体躯干以右脚为触壁支点由离心力作用向壁面运动，在接触阶段，跑酷者的右腿脚掌在与壁面接触时产生压力，脚掌受到的压力逐渐增大。在蹬壁阶段（2→3），跑酷者右腿向壁面发力，达到峰值为 734.26N，随

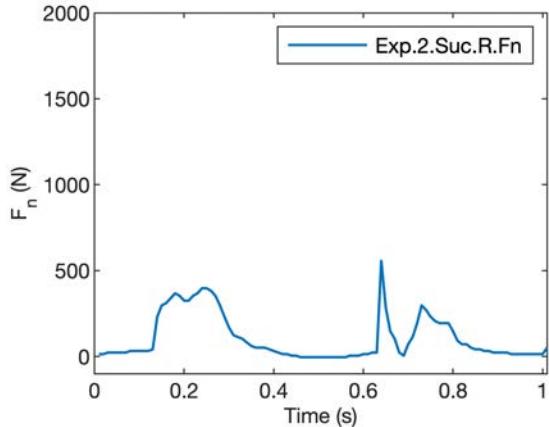


图 2-19 实验 2 壁面法向力实验数据

Fig.2-19 Experiment 2 Experimental data of normal force on the wall

后逐渐减小，至离开壁面，减小为接近 0N。在离壁阶段（3→4），在跑酷者壁面积累足够的初始角动量后离开壁面，在腾空过程中，脚掌接触力接近 0N，直至落地时刻。在落地阶段，最大的接触力为 1148.74N，等于 1.76 b.w.。

实验 4 是成功的样本。由跑酷者右脚弹性柔软压力传感器的壁面法向力结果图2-21可知，在接触壁面阶段（1→2），跑酷者身体躯干以右脚为触壁支点由离心力作用向壁面运动，在接触阶段，跑酷者的右腿脚掌在与壁面接触时产生压力，脚掌受到的压力逐渐增大。在蹬壁阶段（2→3），跑酷者右腿向壁面发力，达到峰值为 539.45N，随后逐渐减小，至离开壁面，减小为接近 0N。在离壁阶段（3→4），在跑酷者壁面积累足够的初始角动量后离开壁面，在腾空过程中，脚掌接触力接近 0N，直至落地时刻。在

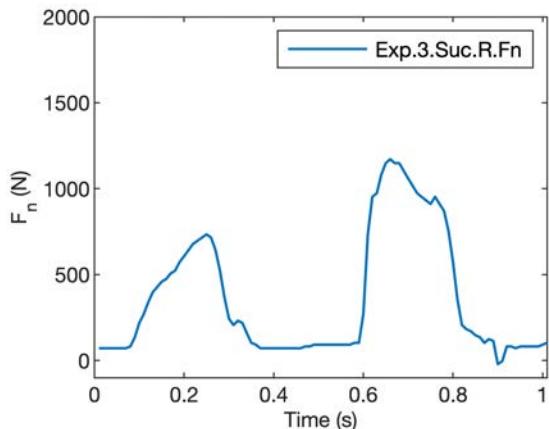


图 2-20 实验 3 壁面法向力实验数据

Fig.2-20 Experiment 3 Experimental data of normal force on the wall

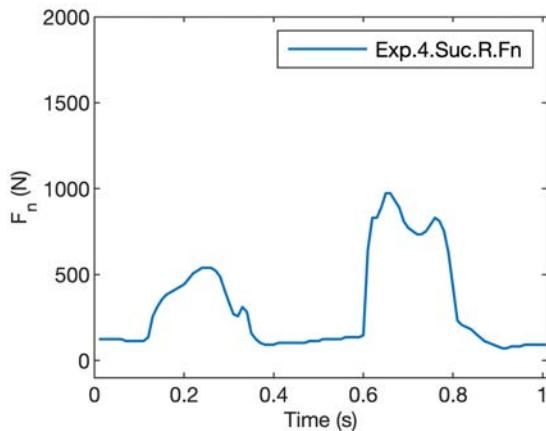


图 2-21 实验 4 壁面法向力实验数据

Fig.2-21 Experiment 4 Experimental data of normal force on the wall

落地阶段，最大的接触力为 973.51N，等于 1.50 b.w.。

实验 5 是往后倾倒的失败样本。由跑酷者右脚弹性柔软压力传感器的壁面法向力结果2-22可知，在接触壁面阶段（1→2），跑酷者身体躯干以右脚为触壁支点由离心力作用向壁面运动，在接触阶段，跑酷者的右腿脚掌在与壁面接触时产生压力，脚掌受到的压力逐渐增大。在蹬壁阶段（2→3），跑酷者右腿向壁面发力，达到峰值为 678.82N，随后逐渐减小，至离开壁面，减小为接近 0N。在离壁阶段（3→4），在跑酷者壁面积累足够的初始角动量后离开壁面，在腾空过程中，脚掌接触力接近 0N，直至落地时刻。在落地阶段，最大的接触力为 1460.74N，等于 2.25 b.w.。

实验 6 是成功的样本。由跑酷者右脚弹性柔软压力传感器的壁面法向力结果图2-

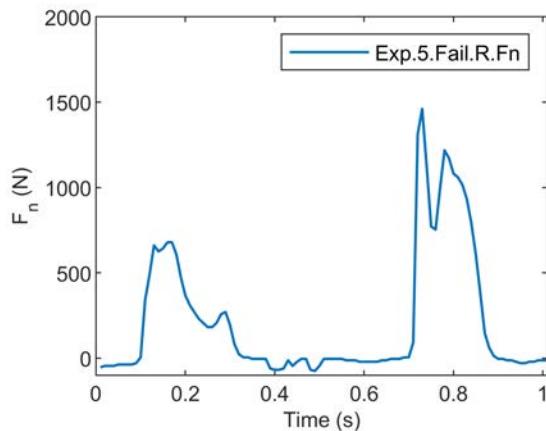


图 2-22 实验 5 壁面法向力实验数据

Fig.2-22 Experiment 5 Experimental data of normal force on the wall

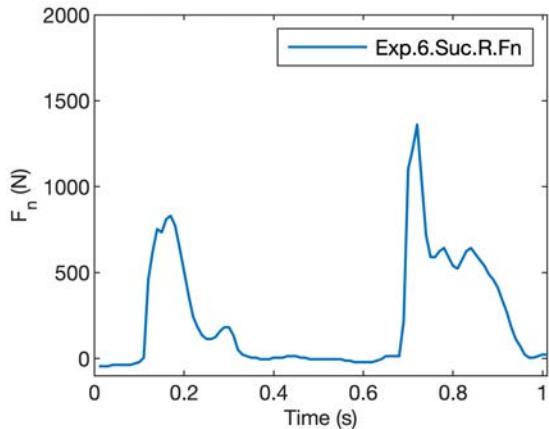


图 2-23 实验 6 壁面法向力实验数据

Fig.2-23 Experiment 6 Experimental data of normal force on the wall

23可知，在接触壁面阶段（1→2），跑酷者身体躯干以右脚为触壁支点由离心力作用向壁面运动，在接触阶段，跑酷者的右腿脚掌在与壁面接触时产生压力，脚掌受到的压力逐渐增大。在蹬壁阶段（2→3），跑酷者右腿向壁面发力，达到峰值为830.52N，随后逐渐减小，至离开壁面，减小为接近0N。在离壁阶段（3→4），在跑酷者壁面积累足够的初始角动量后离开壁面，在腾空过程中，脚掌接触力接近0N，直至落地时刻。在落地阶段，最大的接触力为1361.12N，等于2.09 b.w.。

实验7是往前倾倒的失败样本。由跑酷者右脚弹性柔软压力传感器的壁面法向力结果图2-24可知，在接触壁面阶段（1→2），跑酷者身体躯干以右脚为触壁支点由离心力作用向壁面运动，在接触阶段，跑酷者的右腿脚掌在与壁面接触时产生压力，脚掌受到的压力逐渐增大。在蹬壁阶段（2→3），跑酷者右腿向壁面发力，达到峰值为660.73N，随后逐渐减小，至离开壁面，减小为接近0N。在离壁阶段（3→4），在跑酷者壁面积累足够的初始角动量后离开壁面，在腾空过程中，脚掌接触力接近0N，直至落地时刻。在落地阶段，最大的接触力为1037.74N，等于1.60 b.w.。

实验8是成功的样本。由跑酷者右脚弹性柔软压力传感器的壁面法向力结果图2-25可知，在接触壁面阶段（1→2），跑酷者身体躯干以右脚为触壁支点由离心力作用向壁面运动，在接触阶段，跑酷者的右腿脚掌在与壁面接触时产生压力，脚掌受到的压力逐渐增大。在蹬壁阶段（2→3），跑酷者右腿向壁面发力，达到峰值为678.82N，随后逐渐减小，至离开壁面，减小为接近0N。在离壁阶段（3→4），在跑酷者壁面积累足够的初始角动量后离开壁面，在腾空过程中，脚掌接触力接近0N，直至落地时刻。在

落地阶段，最大的接触力为 1148.74N，等于 1.77 b.w.。

实验 9 是成功的样本。由跑酷者右脚弹性柔软压力传感器的壁面法向力结果图2-26可知，在接触壁面阶段（1→2），跑酷者身体躯干以右脚为触壁支点由离心力作用向壁面运动，在接触阶段，跑酷者的右腿脚掌在与壁面接触时产生压力，脚掌受到的压力逐渐增大。在蹬壁阶段（2→3），跑酷者右腿向壁面发力，达到峰值为 715.58N，随后逐渐减小，至离开壁面，减小为接近 0N。在离壁阶段（3→4），在跑酷者壁面积累足够的初始角动量后离开壁面，在腾空过程中，脚掌接触力接近 0N，直至落地时刻。在落地阶段，最大的接触力为 1059.54N，等于 1.63 b.w.。

根据实验的数据可以得到九次实验的蹬壁时刻和落地时刻的法向力大小总结如表格2-9所示：

通过对以上的数据进行总结可得到壁面与地面法向力均值(标准偏差)的统计数据如下表：

根据表格可知，跑酷者在触壁时刻的壁面法向力在成功触壁空翻的实验中大于失败的实验样本 0.11 b.w.，而跑酷者在落地时刻的地面法向力在成功触壁空翻的实验中大于失败的实验样本 0.115b.w.。在成功触壁空翻中，蹬壁的法向力范围是 412.29N-830.52N，落地时刻的法向力范围是 973.51-1361.12N；在失败触壁空翻中，蹬壁的法向力范围是 397.25N-678.82N，落地时刻的法向力范围是 556.21-1460.74N。其中失败样本的落地时刻的标准偏差较大是因为由于在被定义为失败的三次样本（实验 2、实验 5 和实验 7）中，实验 2 由于落地时旋转角动量过小，地面法向力偏小；而实验 5 是由于落

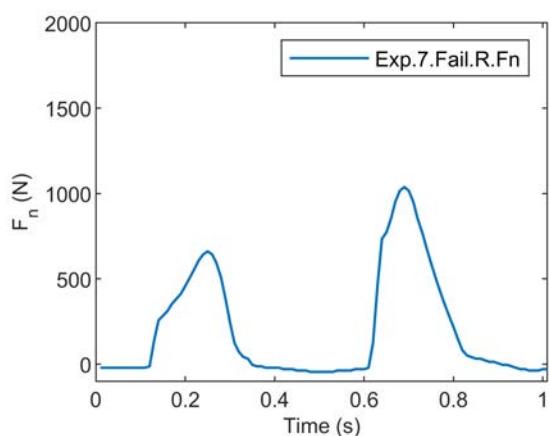


图 2-24 实验 7 壁面法向力实验数据

Fig.2-24 Experiment 7 Experimental data of normal force on the wall

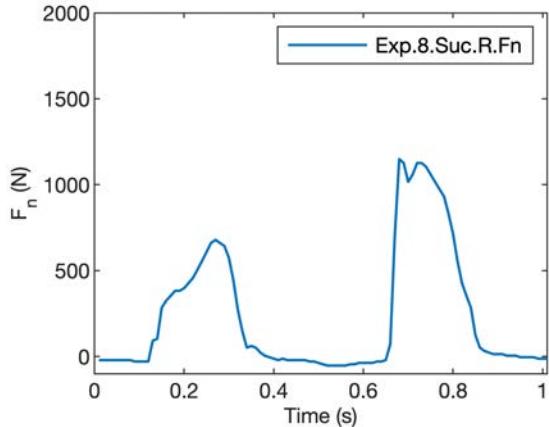


图 2-25 实验 8 壁面法向力实验数据

Fig.2-25 Experiment 8 Experimental data of normal force on the wall

地时旋转角动量过大，身体往后倾倒，地面法向力偏大。二者偏差导致了失败样本的落地时刻的标准偏差较大。

综上所述，人体触壁空翻在动力学参数方面的运动规律最关键的指标罗列如下：

(1) 跑酷者与壁面的接触力是非常重要的外力指标，蹬壁的法向力范围是 397.25N-678.82N。机器人在触壁阶段，接触力作用在接触点上，跑酷者右腿向壁面发力，这个接触力在关联变量躯体角的作用下可以分解为壁面法向力和切向力，当躯体角越小时，法向力会越小而切向力越大，跑酷者向上运动的趋势越大。但是根据运动数据可知， h_0 越大，躯干角的角度会越大， h_0 越小，躯干角的角度会越小。而 h_0 越小意味着空翻开始的高度太小，空翻的时间会随着减小。所以这三个变量总是需要权衡。

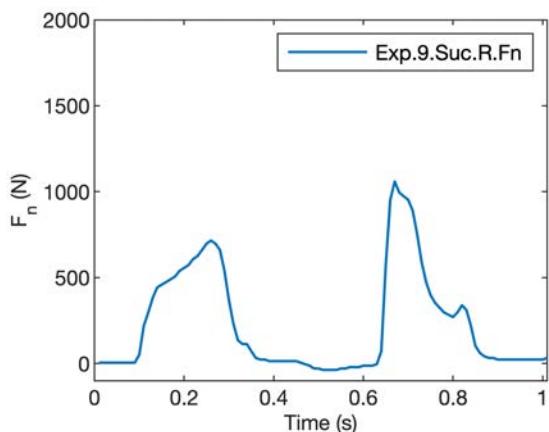


图 2-26 实验 9 壁面法向力实验数据

Fig.2-26 Experiment 9 Experimental data of normal force on the wall

表 2-8 触壁空翻力学参数: 接触力

Table 2-8 Wall-flip parameters: contact force

实验编号	蹬壁时刻 N(b.w.)	落地时刻 N(b.w.)
Exp 1-Suc	419.29(0.65)	994.72(1.56)
Exp 2-Fail	397.25(0.62)	556.21(0.87)
Exp 3-Suc	734.26(1.15)	1148.74(1.80)
Exp 4-Suc	539.45(0.85)	973.51(1.53)
Exp 5-Fail	678.82(1.07)	1460.74(2.29)
Exp 6-Suc	830.52(1.30)	1361.12(2.14)
Exp 7-Fail	660.73(1.04)	1037.74(1.63)
Exp 8-Suc	678.82(1.07)	1148.74(1.80)
Exp 9-Suc	715.58(1.12)	1059.54(1.66)

表 2-9 壁面与地面法向力均值 (标准偏差)

Table 2-9 Contact normal force mean value (standard deviation)

实验编号	成功 (b.w.)	失败 (b.w.)
蹬壁时刻	1.02(0.24)	0.91(0.25)
落地时刻	1.75(0.22)	1.60(0.71)

(2) 腰关节的等效力矩是非常重要的内力指标, 通过对跑酷者触壁空翻的动作定性分析可知, 在跑酷者壁面积累足够的初始角动量后离开壁面, 上半身保持后仰, 左腿迅速上抬, 配合顶腰和非接触腿上提等动作减小转动惯量。本研究将壁面接触过程中摩擦力提供旋转力矩等效到腰关节的腰部扭矩提供一部分旋转的动力, 但是这个内力没有办法通过实验直接测得, 因此我们在第三章通过简化模型对实验时序的动力学仿真计算得出。

2.4 本章小结

本章通过观察人类跑酷者的触壁空翻运动并应用光学运动捕捉系统及接触力测量系统采集了跑酷者进行触壁空翻的运动数据。通过对人体模型进行简化并对运动数据进行分析, 解算了多刚体模型的运动序列, 并归纳了简化模型触壁空翻的运动学时序

及触壁空翻过程中的接触力变化规律。得出了跑酷者进行触壁空翻的运动学指标范围和耦合关系，包括了对接触壁面前的临界速度、触壁高度、躯体角与发力方向等运动学参数的讨论，为本文仿人机器人触壁空翻动作规划与控制提供了数据依据。

第三章 触壁空翻动力学建模与分析

3.1 实验目的

在第二章完成了触壁空翻动作的数据采集和处理，但是通过动捕和接触力测量只能够获取运动序列和运动的外力信息，而运动的内力和力矩没有办法通过采集实验直接测得。本章的目的是要通过触壁空翻动力学建模与分析获取运动的内力和力矩以及对外力信息进行验证。本章根据第二章得到的数据中，选取其中三组特征相似的三组成功样本，在 MATLAB SIMULINK 动力学仿真环境中，针对触壁空翻过程的躯体角、腰关节与接触腿腿长变化量及其对应速度与加速度组成的运动序列进行轨迹跟踪控制。并对轨迹跟踪控制结果、壁面法向力和腰关节发力情况进行观察与分析，分析关节内力和接触外力。进一步基于仿真数据阐述简化模型触壁空翻完成的原理，为进行第三章的动力学仿真提供相应的控制策略的理论依据。

3.2 基于简化模型的触壁空翻动作规划与控制

3.2.1 双质量触壁空翻动力学模型

本研究提出一个双质量简化模型，如图3-1。其中，连杆 pb 代表人体腿部，连杆 be 代表人体躯干，连杆 pb 和连杆 be 在 XZ 竖直平面上 (Sagittal Plane)，通过旋转关节串联构成一个三自由度的结构。模型基于以下假设条件：1) 腿部为弹性支撑腿，原始长度为 L_0 ，腿部弹簧系数 k_k ，阻尼系数 b_k ，弹簧压缩量 ${}^b x = L_0 - L_b$ ；腰部以下的质量集中在腿部中心位置 c_1 ，记为 m 。2) 腿部末端与壁面接触高度记为 p ，触壁阶段腿部与壁面夹角 θ ，3) 腰部转动关节处记为 b ，躯干与腿部夹角 ϕ 。4) 躯干末端记为 e ，躯干长度为 L_1 。模型腰部以上的质心等效位置为躯干中心处 c_2 ，记其质量大小为 M 。5) 重力加速度垂直向下。

根据第二章的光学动作捕捉系统录制的运动数据中可知，跑酷者在触壁阶段，右脚与壁面接触，身体躯干以右脚为触壁支点先向壁面略微转动，接触腿的腿部膝盖弯曲以至于接触腿腿长 L_b 在逐渐减小，直至蹬壁阶段跑酷者右腿向壁面发力，腿部开始舒展， L_b 略微增大，躯体逐渐远离壁面，腿与壁面夹角 θ 逐渐增大。

建立系统模型的拉格朗日模型，动能可以分解为径向和切向部分：

$$T_1 = \frac{1}{2}m({}^b x) + (L_0 - {}^b x)^2 \dot{\theta}^2 \quad (3.1)$$

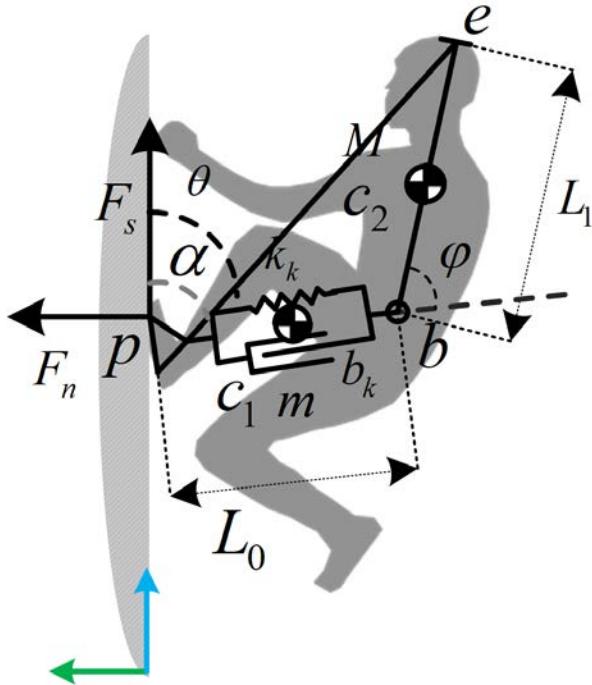


图 3-1 双质量触壁空翻动力学模型

Fig.3-1 Wall-flip simplified model

$$T_2 = \frac{1}{2}M(\dot{x}_2^2 + \dot{y}_2^2) \quad (3.2)$$

其中，

$$x_2 = (L_0 - b)x \sin(\theta) + \frac{1}{2}L_2 \sin(\theta - \phi) \quad (3.3)$$

$$y_2 = (L_0 - b)x \cos(\theta) + \frac{1}{2}L_2 \cos(\theta - \phi) \quad (3.4)$$

势能来自重力和弹簧，所以有：

$$V = mg(p + \frac{(L_0 - b)x \cos(\theta)}{2}) + Mg(p + (L_0 - b)x \cos(\theta) + \frac{L_1 \cos(\theta - \phi)}{2}) + \frac{1}{2}k_k^b x^2 \quad (3.5)$$

拉格朗日算子为：

$$L = T(q_i, \dot{q}_i) - V(q_i, \dot{q}_i) \quad (3.6)$$

其中， T ：系统的动能； V ：系统的势能； q_i ：系统的广义坐标。由拉格朗日方程可得：

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial q_i} - \frac{\partial V}{\partial q_i} = f_i \quad (3.7)$$

f_i 即为沿广义坐标系所受的外力或力矩。

通过求解可以得到动力学方程为：

$$\bar{F} = M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})$$

其中，

$$M(q) = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

$$C(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} C_1(q, \dot{q}) \\ C_2(q, \dot{q}) \\ C_3(q, \dot{q}) \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

其中, $M_{11} = M + m$, $M_{12} = M_{21} = \frac{L_1 M \sin(\phi)}{2}$, $M_{13} = M_{31} = \frac{L_1 M \sin(\phi)}{2}$, $M_{23} = \frac{L_1 M \sin(\phi)}{2}$, $M_{33} = \frac{L_1^2 M}{4}$,

$$\begin{aligned} M_{22} &= \frac{m^b x^2 + mL_0^2}{4} + M(L_0^2 + {}^b x^2) - \frac{L_0 {}^b x(4M + m)}{2} \\ &\quad + \frac{L_0 L_2 M \cos(\phi)}{2} - \frac{L_2 M {}^b x \cos(\phi)}{2} + \frac{L_1^2 M}{4} \\ M_{32} &= \frac{L_1 M(-L_1 + 2{}^b x \cos(\phi) - 2L_0 \cos(\phi))}{4} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_1 &= k^b x - \frac{\dot{\theta}^2 m^b x}{4} - \frac{gm \cos(\theta)}{2} + L_0 M \dot{\theta}^2 + \frac{L_0 \dot{\theta}^2 m}{4} - M \dot{\theta}^2 {}^b x \\ &\quad - Mg \cos(\theta) + \frac{L_1 M(\dot{\theta}^2 + \dot{\phi}^2) \cos(\phi)}{2} - L_1 M \dot{\theta} \dot{\phi} \cos(\phi) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_2 &= \frac{\dot{\theta} {}^b x m({}^b x - L_0)}{2} - \frac{L_0 g \sin(\theta)(2M - m)}{2} + \frac{g {}^b x \sin(\theta)(2M + m)}{2} + \frac{L_1 M g \sin(\phi - \theta)}{2} - \\ &\quad 2M \dot{\theta} {}^b x (L_0 - {}^b x) - \frac{L_1 M \dot{\theta} {}^b x \sin(\phi)(\dot{\phi} - 2\dot{\theta})}{2} - L_1 M \dot{\theta} {}^b x \cos(\phi) + (L_0 L_1 M \sin(\phi) \dot{\phi} (\frac{\dot{\phi}}{2} - \dot{\theta})) \end{aligned}$$

$$C_3 = \frac{L_1 M(-2g \sin(\phi - \theta) + 4\dot{\theta} {}^b x \cos(\phi) + 2L_0 \dot{\theta}^2 \sin(\phi) - 2\dot{\theta}^2 {}^b x \sin(\phi))}{4}$$

为了表示壁面法向力, 我们对模型进行进一步简化, 将跑酷者看成一个整体, 如图3-1。以连杆 pe 代表人体全身, 身高 pe 的高度为 H_0 , 身高压缩量 ${}^h x = H_0 - H_b$, 身体与壁面夹角 α , 人体总质量为 M_c , 在接触点的法向反弹力 F_n 可以表述为:

$$F_n = (-M_c H_b \ddot{\alpha}) \cos \alpha + M_c \dot{\alpha}^2 H_b \sin \alpha \quad (3.10)$$

法向反弹力是向心力和惯性力的结果。为了获得更多的数值向上的动量, 这个力应该在一定范围内尽可能的小。

在触壁过程中, 跑酷者受到壁面接触力和重力的作用, 重力作用在每个连杆的质量中心; 在空翻过程中, 跑酷者受到空气动力和重力的作用。空气动力阻力被认为是忽略的。随后对触壁阶段和空翻阶段进行建模和仿真, 通过实验仿真验证触壁空翻策略的控制效果, 并对相关仿真结果进行分析讨论。

3.2.2 简化模型触壁空翻动作规划

本文使用光学动作捕捉系统对人体运动中的各个关节角度进行测量记录，保留了腰关节、接触腿及其他基本的物理运动参数后进一步对对人体模型进行简化，提出双质量模型。针对提出的双质量模型进行数据生成，得到了腰关节、腿长变化量、与壁面接触角度等运动学参数。

为了生成稳定可靠的简化机器人运动轨迹，本文首先分别对腰关节、腿长变化量、与壁面接触角度的采样样本进行多项式拟合，将采样样本视为自变量，得到以采样样本函数，再进行一次求导得到速度函数以及二次求导得到加速度函数，最后通过采样频率 120Hz 对生成的速度函数与加速度函数进行采样，得到触壁空翻过程的躯体角、腰关节与接触腿腿长变化量及其对应速度与加速度的运动序列。并且将这一组序列作为轨迹跟踪控制任务空间的期望运动轨迹 y_d 。

3.2.3 轨迹跟踪控制

由上一节可知，该系统的动力学方程为：

$$\bar{F} = M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q}) \quad (3.11)$$

在触壁阶段是全驱动系统，令期望轨迹 y_d 为 θ, ϕ 与 ${}^b x$ 的集合，将动力学方程(3.11)进行整理，等式右边化简后把包含加速度的项提取出来，含加速度的项的系数就是 H ，其余不含加速度的项就是 B 。令 $u = [F, \tau_1, \tau_2]$, F 是接触腿发力大小， τ_1 是接触足驱动力矩， τ_2 是腰关节等效驱动力矩。

$$f = H\ddot{y}^d + B \quad (3.12)$$

如果系统采样时间无限小，期望加速度输入后产生的力和力矩会产生跟期望轨迹一模一样的加速度曲线，那么位置和角速度的误差就会为 0。但是实际中，采样时间并不是无限小，控制器产生的期望角加速度的轨迹其实是期望轨迹加速度曲线的一系列采样点，所以随着仿真时间的增长，会产生角度误差和角速度的误差。所以增加角度误差和角速度误差项，可以在产生角度误差和角速度误差时进行补偿，增加系统鲁棒性。

为了跟踪任务空间的轨迹 $\ddot{y} = \ddot{y}^d$ ，因此可以设置：

$$\ddot{y}^d = \ddot{y}^d + b_i (\dot{y}^d - \dot{y}) + k_i (y^d - y) \quad (3.13)$$

再更新正动力学(3.14), 控制框图如图3-2所示。

$$\ddot{y} = H^{-1}(f - B) \quad (3.14)$$

期望运动轨迹 y_d 成为控制输入, 该控制器被用来调整主动关节以完成轨迹跟踪。只要 $b_i, k_i > 0^{[32]}$, 那么轨迹跟踪的误差会逐渐收敛。

在简化模型触壁空翻过程中, 在触壁阶段是全驱动系统, 在离壁后的空翻阶段是欠驱动系统, 定义 q_1 代表所有的被动关节, q_2 代表所有的主动关节, 定义任务空间为其中一部分的主动关节以及被动关节, 可得输出方程(3.15)^[33]:

$$y = j(q) \quad (3.15)$$

其中 $y \in R^p$, R^p 为任务空间, 并且包括 θ, ϕ 和 ${}^b x$ 。定义 $J_1 = \frac{\partial j}{\partial q_1}$, $J_2 = \frac{\partial j}{\partial q_2}$, $J = [J_1, J_2]$ 。

对输出方程求导可得:

$$\dot{y} = J \dot{q} \quad (3.16)$$

$$\ddot{y} = J \ddot{q} + J_1 \ddot{q}_1 + J_2 \ddot{q}_2 \quad (3.17)$$

动力学方程可以将系统重新组织为如下的形式:

$$N_{11} \ddot{q}_1 + N_{12} \ddot{q}_2 = \tau_a \quad (3.18)$$

$$N_{21} \ddot{q}_1 + N_{22} \ddot{q}_2 = \tau_b + u \quad (3.19)$$

其中, q_1 代表被动关节 (θ), q_2 代表所有的主动关节 (ϕ 和 ${}^b x$), 令期望轨迹 y_d 为 θ , τ 代表重力矩和科氏力项, $N_{11} = M_{11}, N_{12} = [M_{12} \ M_{13}]$, $N_{21} = [M_{21} \ M_{31}]'$, $N_{22} = [M_{22} \ M_{23} \ M_{32} \ M_{33}]$ 。并且:

$$N(q) = \begin{bmatrix} N_{11} & N_{12} \\ N_{21} & N_{22} \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

由于矩阵 N 是正定矩阵, 因此, N_{11} 与 N_{22} 为正定矩阵, 并且有逆。

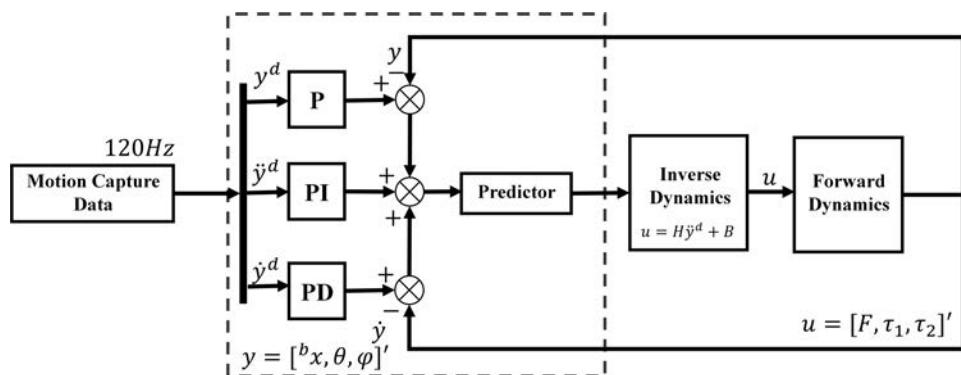


图 3-2 轨迹跟踪控制框图

Fig.3-2 Control Block Diagram

对方程(3.18)左乘 N_{11}^{-1} , 可得:

$$\ddot{q}_1 = N_{11}^{-1}[\tau_a - N_{12}\ddot{q}_2] \quad (3.21)$$

将方程(3.21)代入方程(3.19)中, 整理可得:

$$(N_{22} - N_{21}N_{11}^{-1}N_{12})\ddot{q}_2 - \tau_b + N_{21}N_{11}^{-1}\tau_a = u \quad (3.22)$$

因此, 将(3.21)代入(3.17)可得:

$$\ddot{y} = \dot{J}(\dot{q}) + J_1N_{11}^{-1}[\tau_a - N_{12}\ddot{q}_2] + J_2\ddot{q}_2 \quad (3.23)$$

定义 $\bar{J} = J_2 - J_1N_1^{-1}N_{12}$, 则方程(3.23)可以化简为:

$$\ddot{y} = \dot{J}(\dot{q}) + \bar{J}\ddot{q}_2 + J_1N_{11}^{-1}\tau_a \quad (3.24)$$

定义 \bar{J} 矩阵的 Moore 逆为 \bar{J}^+ , 有:

$$\bar{J}^+ = \bar{J}^T(\bar{J}\bar{J}^T)^{-1}$$

为了使 $\ddot{y} = \ddot{y}^d$, 需要满足:

$$\ddot{q}_2 = \bar{J}^+(\ddot{y}^d - \dot{J}(\dot{q}) - J_1N_{11}^{-1}\tau_a) \quad (3.25)$$

因此, 只需要令 \ddot{q}_2 趋近于 $\bar{J}^+(\ddot{y}^d - \dot{J}(\dot{q}) - J_1N_{11}^{-1}\tau_a)$ 的形式, 则可以满足期望的反馈线性化目的令 $\ddot{y} = \ddot{y}^d$ 。

3.3 仿真环境构建与结果分析

为了验证触壁空翻数据的有效性, 同时计算壁面法向力与腰关节的等效力矩, 本研究需要进行 MATLAB 仿真实验并进行运动学和动力学仿真分析。本文选择了 MATLAB SIMULINK 作为仿真基本环境, MATLAB SIMULINK 是一款可自定义的模块库以及求解器, 能够进行动态系统建模和仿真的软件, 应用于仿真机器人系统的真实运动。

为了评价仿人机器人的运动性能, 需要创建了一个与第一章采集实验环境尽量等同的仿真平台。并为了便于采集人体运动关键数据以应用到仿人机器人规划控制中, 本研究保留了跑酷者原始物理系统的基本特征, 提出了双质量触壁空翻动力学模型。如图3-1, 以腰关节为轴将仿真简化模型分为上下半身共两段。该模型是即保留了腰关节运动状态同时又能够精简描述触壁空翻运动的简化模型。并在建模时在质量与腿长、身高等运动学配置等各部分参数进行赋值时, 采用了被摄跑酷者的实测参数, 使简化双质量仿真模型与实际跑酷者参数尽可能保持一致。

3.3.1 触壁空翻轨迹跟踪仿真结果

根据第二章的运动数据分析可知, 实验 3、实验 8、实验 9 三组触壁空翻数据均取自成功样本, 并且通过观察对比图2-11、2-16和2-17可知其相似度较高。因此选择这三组数据进行轨迹跟踪分析。

在第一组实验选取了实验 3 进行仿真，在动力学仿真中完成轨迹跟踪。图3-3是对实验 3 样本在动力学仿真中进行轨迹跟踪控制的结果，包含了躯体角、腰关节与接触腿腿长变化图像。实验的仿真参数为 $h_0=1.366 \text{ m}$, $v_{x0}=2.28 \text{ m/s}$, $M=32.5 \text{ kg}$, $m=32.5 \text{ kg}$, $L_0=0.90 \text{ m}$, $L_1=0.83 \text{ m}$, $K_k=3.50\text{e}4$, $D_k=1.0\text{e}0$, $k_i=[1.0\text{e}3, 2.0\text{e}3, 1.2\text{e}3]$, $b_i=[1.0\text{e}0, 1.7\text{e}2, 7.7\text{e}1]$, and $i \in [1,2,3]$. 实验的仿真是输入是由躯体角、腰关节与接触腿腿长变化量及其对应速度与加速度共九个运动序列组成的。根据对期望运动序列的轨迹跟踪，从图中跟踪效果可以看出期望轨迹与实际轨迹跟踪平滑，不存在较大的抖动，跟踪性能很好。可以近似认为简化模型做的运动就是实验 3 的触壁空翻运动。

选取了实验 8 进行仿真，在动力学仿真中完成轨迹跟踪。图3-4是对实验 3 样本在动力学仿真中进行轨迹跟踪控制的结果，包括了躯体角、腰关节与接触腿腿长变化图

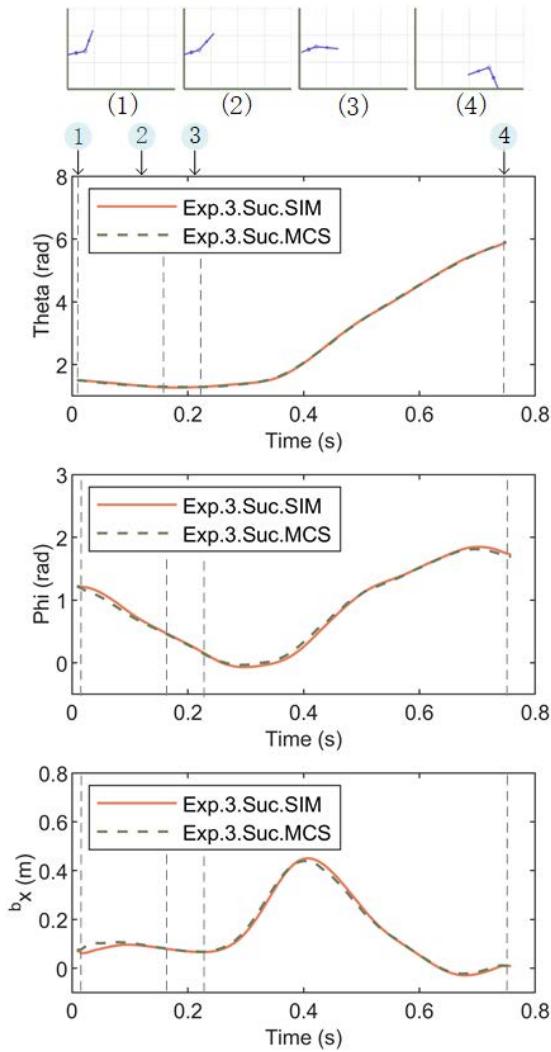


图 3-3 实验 3 轨迹跟踪仿真结果

Fig.3-3 Exp.3 Trajectory tracking simulation results

像。实验的参数为 $h_0=1.385 \text{ m}$, $v_{x0}=1.98 \text{ m/s}$, $M=32.5 \text{ kg}$, $m=32.5 \text{ kg}$, $L_0=0.90 \text{ m}$, $L_1=0.83 \text{ m}$, $K_k=3.50e4$, $D_k=1.0e0$, $k_i=[1.0e3, 2.0e3, 1.2e3]$, $b_i=[1.0e0, 1.7e2, 7.7e1]$, and $i \in [1,2,3]$. 根据对期望运动序列的轨迹跟踪, 从图中跟踪效果可以看出稳态误差变得非常小, 能够很好地跟踪期望轨迹。可以近似认为简化模型做的运动就是实验 8 的触壁空翻运动。

选取了实验 9 进行仿真, 在动力学仿真中完成轨迹跟踪。对实验 3 样本在动力学仿真中进行轨迹跟踪控制, 其躯体角、腰关节与接触腿腿长变化图像如图3-5。实验的参数为 $h_0=1.399 \text{ m}$, $v_{x0}=2.10 \text{ m/s}$, $M=32.5 \text{ kg}$, $m=32.5 \text{ kg}$, $L_0=0.90 \text{ m}$, $L_1=0.83 \text{ m}$, $K_k=3.50e4$, $D_k=1.0e0$, $k_i=[1.0e3, 2.0e3, 1.2e3]$, $b_i=[1.0e0, 1.7e2, 7.7e1]$, and $i \in [1,2,3]$. 根据对期望运动序列的轨迹跟踪, 从图中跟踪效果可以看出在与壁面接触阶段和腰关节往后仰屈膝

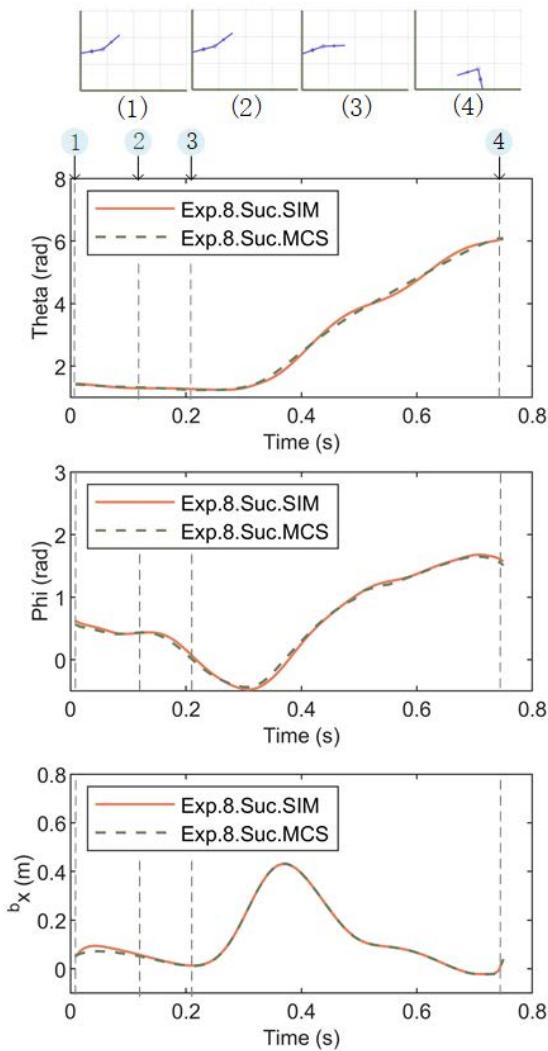


图 3-4 实验 8 轨迹跟踪仿真结果

Fig.3-4 Exp.8 Trajectory tracking simulation results

的阶段中，腿长压缩量和腰关节图像出现了小的波动和误差，但是最终稳态误差还是比较小。这可能是因为期望轨迹的加速度较大，导致跟踪性能偏差。由于稳态误差比较小，可以近似认为简化模型做的运动就是实验 9 的触壁空翻运动。

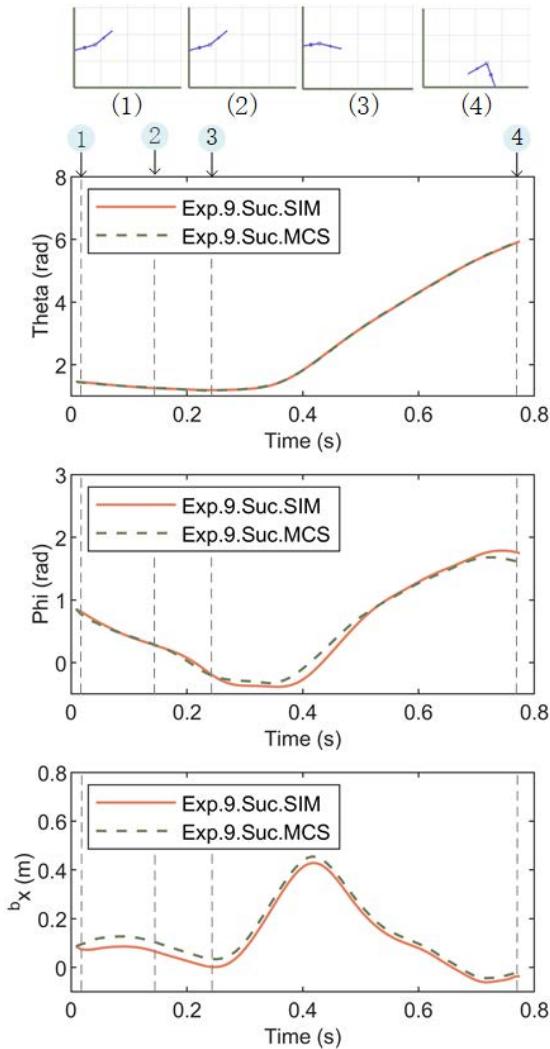


图 3-5 实验 9 轨迹跟踪仿真结果

Fig.3-5 Exp.9 Trajectory tracking simulation results

3.3.2 触壁空翻等效力矩

摩擦力的等效力矩是非常重要的运动指标。通过对跑酷者触壁空翻的动作定性分析可知，在跑酷者壁面积累足够的初始角动量后离开壁面，在壁面积累初始角动量期间内摩擦力作用在质心上的力矩提供空翻起始的旋转力矩。跑酷者照壁面积累足够的初始角动量后离开壁面，上半身保持后仰，非接触腿迅速上抬，配合顶腰动作调整系统的角动量完成空翻。我们将积累初始角动量期间内摩擦力等效到作用在质心上的

力及相应的等效力矩提供一部分旋转的动力，但是这个力没有办法通过实验直接测得，因此计划通过简化模型对实验时序进行轨迹跟踪的动力学仿真计算得出。

图3-6给出了实验3的等效力矩在离壁阶段的图像。在蹬壁时，腰关节角度 ϕ 是正值，而离壁瞬间，身体后仰的动作是展开的，此时腰关节角度 ϕ 接近0，所以在离壁瞬间，腰关节角度 ϕ 是减小的，所以 τ 是负的，对应图中第一个负峰值，负方向力矩最小值为-394.44 Nm。而离壁后，由于膝盖尽可能地向胸前收缩，导致相对角度 ϕ 逐渐增大，所以离壁后有一个比较大的正方向力矩，表现为机器人顶腰的动作，对应图中第一个正峰值，该正方向力矩的最大值为922.15 Nm。

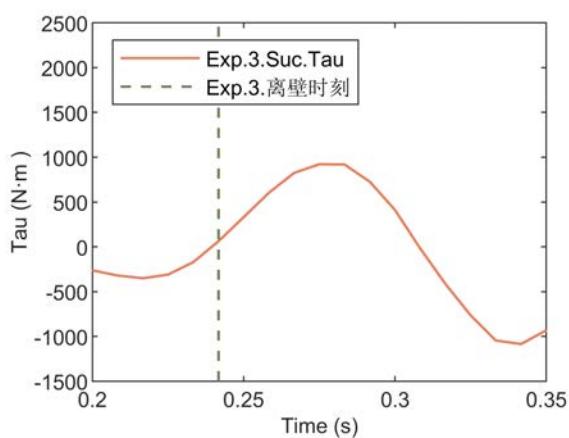


图 3-6 实验 3 腰关节发力仿真结果

Fig.3-6 Simulation results of Experiment 3 of lumbar joint force

图3-7给出了实验8的等效力矩在离壁阶段的图像。在蹬壁时，腰关节角度 ϕ 是正值，离壁瞬间，身体后仰的动作是舒展开的，此时腰关节角度 ϕ 接近0，所以在离壁瞬间，腰关节角度 ϕ 是减小的，所以 τ 是负的，负方向力矩最小值为-1049.99 Nm。而离壁后，由于膝盖尽可能地向胸前收缩，导致相对角度 ϕ 逐渐增大，所以离壁后有一个比较大的正方向力矩，该正方向力矩的最大值为2260.71 Nm。

图3-8给出了实验9的等效力矩在离壁阶段的图像。在蹬壁时，腰关节角度 ϕ 是正值，离壁瞬间，身体后仰的动作是展开的，此时腰关节角度 ϕ 接近0，所以在离壁瞬间，腰关节角度 ϕ 是减小的，所以 τ 是负的，负方向力矩最小值为-515.97 Nm。而离壁后，由于膝盖尽可能地向胸前收缩，导致相对角度 ϕ 逐渐增大，所以离壁后有一个比较大的正方向力矩，该正方向力矩的最大值为383.73 Nm。

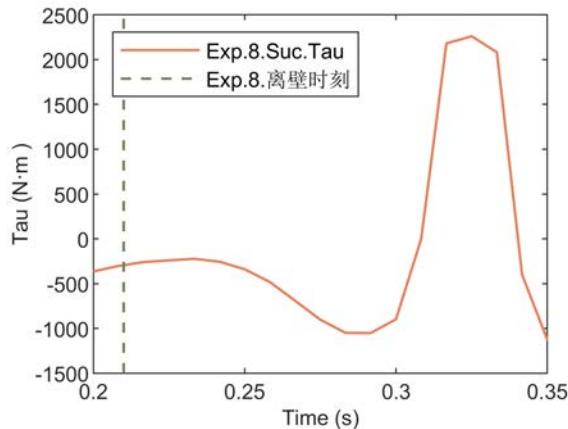


图 3-7 实验 8 腰关节发力仿真结果

Fig.3-7 Simulation results of Experiment 8 of lumbar joint force

从图的曲线中对比峰值可以看出，仿人机器人收腰的动作正方向力矩相较于后仰的动作受到的负方向力矩要大很多，则说明腰关节动作的正方向力矩更大时，机器人更容易产生顺时针仿真的空翻旋转运动。

除了腰关节的作用之外，在接触壁面后，非接触腿迅速抬起至接触腿高度，摩擦力作用在质心的的旋转力矩与腰关节正方向力矩作用效果一致。根据仿真的实验结果可知，在成功触壁空翻中，等效力矩为正方向力矩，平均值为 1188.86 Nm。因为摩擦力作用在脚掌与壁面的接触点上，通过在接触壁面过程中积累的初始角动量，产生使人往上运动的作用。所以该正方向力矩就是摩擦力作用在腿上的等效力矩，通过动作捕捉实验可知跑酷者在等效力矩作用期间的等效力臂的均值为 0.801m，因此可以通过

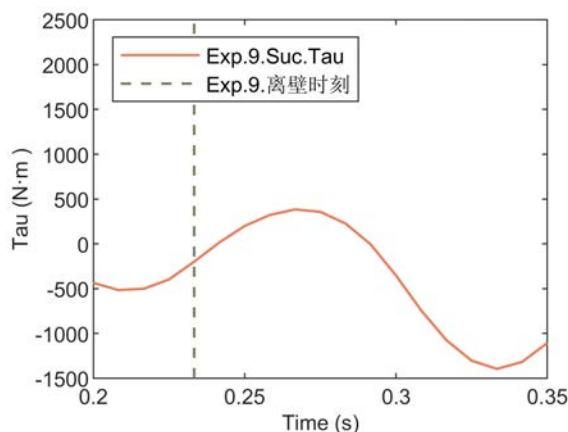


图 3-8 实验 9 腰关节发力仿真结果

Fig.3-8 Simulation results of Experiment 9 of lumbar joint force

该正方向等效力矩反推出摩擦力的理想数值是 1484.22N。

3.3.3 触壁空翻壁面法向力仿真结果分析

跑酷者与壁面的接触力是非常重要的外力指标，在使用接触面反力测量系统获得的蹬壁的法向力范围是 397.25N 至 678.82N。通过简化模型对实验时序进行轨迹跟踪的动力学仿真也能够获取一个简化模型估计的壁面法向力数据。

在实验 3 中，触壁高度为 1.366 米，初始躯体角为 84.21°。简化模型估计的壁面法向力数据如图3-9所示。跑酷者跃向壁面，随后与壁面开始接触。跑酷者以斜向上的动量冲击壁面，该冲击力垂直于接触面，其壁面法向力的峰值为 296.42 N；随后跑酷者以接触脚为支点向壁面转动，将身体的运动从水平方向上转到竖直方向上，间隔约 0.091 s 后，脚掌向壁面施加压力，出现第二个峰值，峰值力为 889.14 N。

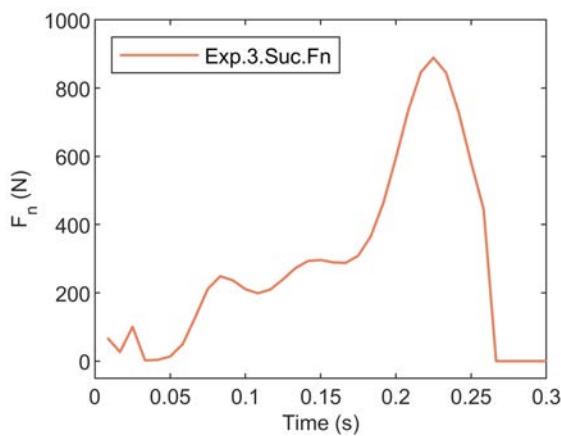


图 3-9 实验 3 壁面法向力仿真结果

Fig.3-9 Exp. 3 wall normal force simulation results

对实验 8 进行仿真后，简化模型估计的壁面法向力数据如图3-10所示。在实验 8 中，触壁高度为 1.385 米，初始躯体角为 75.06°。跑酷者跃向壁面，随后与壁面开始接触。跑酷者以斜向上的动量冲击壁面，该冲击力垂直于接触面，其壁面法向力的峰值为 514.36 N；随后跑酷者以接触脚为支点向壁面转动，将身体的运动从水平方向上转到竖直方向上，间隔约后 0.13s，脚掌向壁面施加压力，出现第二个峰值，峰值力为 911.17 N。

在实验 9 中，触壁高度为 1.399 米，初始躯体角为 74.08°。跑酷者跃向壁面，随后与壁面开始接触。跑酷者以斜向上的动量冲击壁面，该冲击力垂直于接触面，其壁面

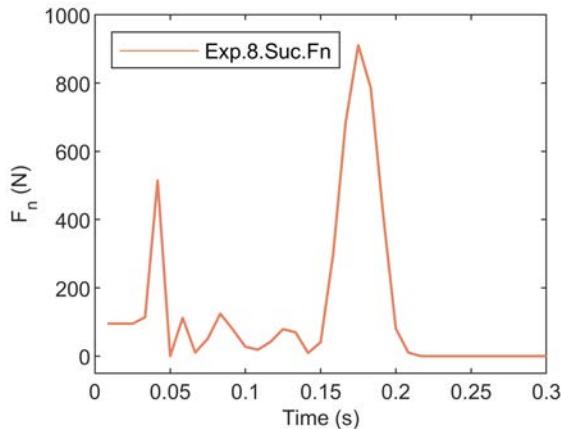


图 3-10 实验 8 壁面法向力仿真结果

Fig.3-10 Exp. 8 wall normal force simulation results

法向力的峰值为 441.18 N；随后跑酷者以接触脚为支点向壁面转动，将身体的运动从水平方向上转到竖直方向上，间隔约 0.19 s 后，脚掌向壁面施加压力，出现第二个峰值，峰值力为 947.66 N。具体的简化模型估计的壁面法向力数据如图3-11所示。

在起始于壁面接触时会有一个初始的峰值，该冲击力垂直于接触面，从三组数据的结果可知，第一个峰值范围在 296.42-514.36N 之间。随后跑酷者以接触脚为支点向壁面转动，将身体的运动从水平方向上转到竖直方向上，由于离心力的作用，在实验 8 和 9 中的压力不是连续的，间隔约 0.16s 后，脚掌向壁面施加压力，出现第二个峰值，峰值力范围在 889.14 至 947.66 N 之间。

从三组数据的结果可知，蹬壁法向力峰值的范围是 889.14 至 947.66 N。平均值为

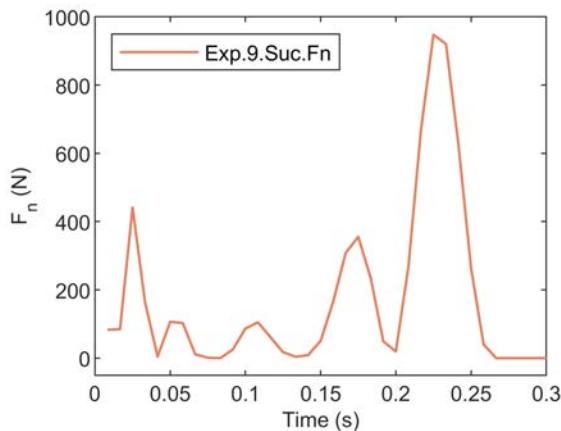


图 3-11 实验 9 壁面法向力仿真结果

Fig.3-11 Exp. 9 wall normal force simulation results

915.99 N，标准偏差为 29.55。要保证尽量减少壁面法向反弹力，尽可能提高壁面切向力。因此，身体与壁面的夹角 α 被用来调整法向反弹力。此外， α 被用来增加机器人的空翻初始角动量。身体与壁面的夹角 α 最直观的是通过触壁高度来直接调整，减少壁面法向反弹力，尽可能提高壁面切向力。但是如果身体与壁面的夹角过小的话，触壁高度注定不会太高，使得空翻的起始高度过低，容易导致空翻时间不够，容易出现前倾失败。所以需要合理地利用触壁高度和躯体角找到合适的壁面接触力。

3.4 本章小结

本章通过双质量触壁空翻动力学模型结合触壁空翻运动时序进行轨迹跟踪控制，对简化模型进行触壁空翻动作动力学仿真分析。根据动力学仿真分析得出了等效力矩为正方向力矩范围与平均值，并针对仿人机器人的触壁接触力进行分析，给出了在简化模型仿真中理论上计算估计的壁面法向力的数值范围，为进行第四章的动力学仿真提供相应的控制策略的理论数据依据。

第四章 动力学仿真环境中的仿人机器人运动实验

4.1 实验目的

本章将结合物理引擎 Pybullet 动力学仿真平台进行仿人机器人触壁空翻实验，通过动力学仿真可以对机器人简化模型触壁空翻规划与控制算法进行理论验证。本章采用第二章规划的运动序列的前提条件，第一个目的是验证摩擦力等效力矩影响机器人完成空翻和调整转向姿态落地，并与第三章计算出的理论等效力矩做对比验证。第二个目的探索关键肢体中非接触腿对机器人完成空翻和调整转向姿态落地的作用和影响。本章的触壁空翻实验机器人的模型采用的是波士顿动力自主研制的仿人机器人 Atlas 模型，使用该模型进行动力学仿真实验，并在物理引擎 Pybullet 仿真环境中运行动力学仿真实验。

4.2 机器人及实验平台

机器人触壁空翻需要选择具备足够动力能够在壁面上产生足够的动量使得全身旋转完成空翻阶段的机器人。目前的资料显示只有 Atlas 的液压驱动能够产生较大的垂直加速度，并且具备能够完成空翻的能力。本研究的关键关节为腰关节需要产生较大的力矩模拟接触腿在壁面接触过程中产生作用在质心的旋转力矩。根据第三章计算出的正方向力矩的最大值为 2260.71 Nm，结合 Atlas 的模型的质量考虑，机器人的腰关节需要产生范围预计为 2000~3000Nm 的正方向力矩。因此，本研究的触壁空翻实验采用波士顿动力仿人机器人 Atlas 的模型进行动力学仿真实验。动力学仿真采用的是 Atlas 机器人模型如图4-1(a) 所示。所有仿真均在相同的工作站环境下进行，仿真均在物理引擎 Pybullet 上进行，版本号为 2.6.6。在物理引擎 Pybullet 中的 Atlas 模型与原参数保持一致，即运动学参数，质量和惯性张量等参数保持一致。

实验使用的 Atlas 模型的 urdf 文件是由 Pybullet 官方模型库提供的，基本的物理参数方面是根据 Toro 官方提供的。仿人机器人 Atlas 总重量为 182.41kg，总高度为 2.0m 以及腰关节高度 0.95m。在关节自由度方面，Atlas 机器人模型包括头、躯干和四肢等部分，全身上下共包括 30 个关节自由度。Atlas 机器人模型腰关节以上各关节和腰关节以下对应采用的父子级刚体骨段关系及其质量分布信息分别如表4-1和4-2。

为了更仔细地观察 Atlas 模型与动作捕捉实验中模型质量的差异，表格4-3给出了机器人 Atlas 模型与跑酷者的质量对比关系。二者的质量百分比比较接近。以躯干为例，

表 4-1 Atlas 腰关节以上各关节对应采用的父子级刚体骨段

Table 4-1 The parent-child rigid bone corresponding to each joint (upper body)

关节自由度命名	父级刚体骨段（骨段质量: kg）	子级刚体骨段（骨段质量: kg）
back _{bky}	下躯干 ltorso (2.270)	中躯干 mtorso (0.799)
back _{bkz}	盆骨 pelvis (9.509)	下躯干 ltorso (2.270)
back _{bkx}	中躯干 mtorso (0.799)	上躯干 utorso (84.409)
neck _{ry}	上躯干 utorso (84.409)	头 head (1.420)
Larm _{shz}	上躯干 utorso (84.409)	锁骨 Lclav (4.466)
Larm _{shx}	锁骨 Lclav (4.466)	肩胛骨 Lscap (3.899)
Larm _{ely}	肩胛骨 Lscap (3.899)	左上臂 Luarm (4.386)
Larm _{elx}	左上臂 Luarm (4.386)	左下臂 Llarm (3.248)
Larm _{wry}	左下臂 Llarm (3.248)	左小上臂 Lufarm (4.386)
Larm _{wrx}	左小上臂 Lufarm (4.386)	左小下臂 Llfarm (2.509)
Larm _{wry2}	左小下臂 Llfarm (2.509)	左手 Lhand (1.000)
Rarm _{shz}	躯干 utorso (84.409)	锁骨 Rclav (4.466)
Rarm _{shx}	锁骨 Rclav (4.466)	肩胛骨 Rscap (3.899)
Rarm _{ely}	肩胛骨 Rscap (3.899)	右上臂 Ruarm (4.386)
Rarm _{elx}	右上臂 Ruarm (4.386)	右下臂 Rlarm (3.248)
Rarm _{wry}	右下臂 Rlarm (3.248)	右小上臂 Rufarm (4.386)
Rarm _{wrx}	右小上臂 Rufarm (4.386)	右小下臂 Rlfarm (2.509)
Rarm _{wry2}	右小下臂 Rlfarm (2.509)	右手 Rhand (1.000)

从该表格可以看出机器人的上躯干、中躯干和下躯干的躯干百分比总和为 53.17%，跑酷者对应的百分比总和为 42.6±7.55%。因此，跑酷者在动作捕捉实验中的运动序列从一定程度来说是适合应用在 Atlas 模型上的。

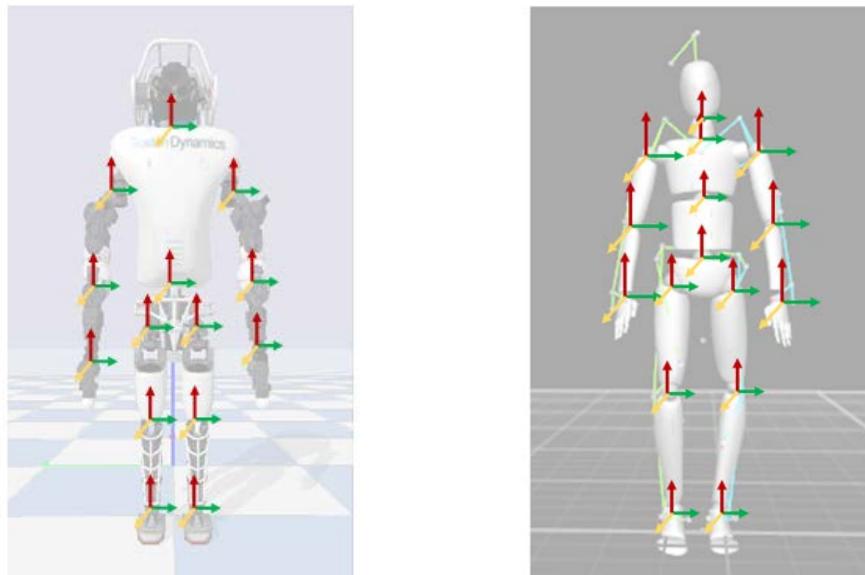
为了更仔细地观察 Atlas 模型与动作捕捉实验中模型关节的差异，图 4-1 给出了机器人模型与光学动作捕捉系统模型的关节对比关系图。从动捕系统的人体捕捉功能下输出的动作捕捉骨架骨段信息在关节自由度方面，动作捕捉模型具有 15 个关节及最多可以对应 45 个关节自由度。而 Atlas 模型中，在关节自由度方面，Atlas 机器人模型包括头、躯干和四肢等部分，全身上下共包括 30 个关节自由度。两个模型的关节自由度数的差异是因为在实际的机器人中不是所有的关节都是球形关节，而是有些关节像膝

表 4-2 Atlas 腰关节以下各关节对应采用的父子级刚体骨段

Table 4-2 The parent-child rigid bone corresponding to each joint (lower body)

关节自由度命名	父级刚体骨段（骨段质量:kg）	子级刚体骨段（骨段质量:kg）
Lleg _{hpz}	骨盆 pelvis (9.509)	尾骨 Luglut (1.959)
Lleg _{hpx}	尾骨 Luglut (1.959)	尾骨 Llglut (0.898)
Lleg _{hpy}	尾骨 Llglut (0.898)	左大腿 Luleg (8.204)
Lleg _{kny}	左大腿 Luleg (8.204)	左小腿 Llleg (4.515)
Lleg _{aky}	左小腿 Llleg (4.515)	左脚踝 Ltalus (0.125)
Lleg _{akx}	左脚踝 Ltalus (0.125)	左足 Lfoot (2.41)
Rleg _{hpz}	骨盆 pelvis (9.509)	尾骨 Ruglut (1.959)
Rleg _{hpx}	尾骨 Ruglut (1.959)	尾骨 Rulglut (0.898)
Rleg _{hpy}	尾骨 Rulglut (0.898)	右大腿 Ruleg (8.204)
Rleg _{kny}	右大腿 Ruleg (8.204)	右小腿 Rlleg (4.515)
Rleg _{aky}	右小腿 Rlleg (4.515)	右脚踝 Rtalus (0.125)
Rleg _{akx}	右脚踝 Rtalus (0.125)	右足 Rfoot (2.41)

关节仅为单轴的旋转关节。



(a) Atlas 模型

(b) 动捕模型

图 4-1 Atlas 模型与动捕模型对比

Fig. 4-1 Comparison between Atlas and motion capture system model

表 4-3 Atlas 机器人模型与真人的质量对比

Table 4-3 Mass comparison between Atlas and human

身体部位	机器人质量 (kg)	机器人相对质量 (%)	跑酷者质量 (kg)	跑酷者相对质量 (%)
头颈	1.42	0.78	6.045±0.936	9.30±1.44
上躯干	84.41	46.27	11.05±2.392	17.00±3.68
中躯干	0.80	0.44	8.94±1.12	13.75±1.72
下躯干	11.78	6.46	7.70±1.40	11.85±2.15
上臂	31.99	17.54	1.69±0.35	2.60±0.54
前臂	13.79	7.56	0.85±0.18	1.30±0.28
手	2.00	1.10	0.42±0.08	0.64±0.13
大腿	22.12	12.13	9.10±1.66	14.00±2.56
小腿	9.03	4.95	2.60±0.55	4.00±0.85
足	5.07	2.78	0.98±0.18	1.50±0.27
整体	182.41	100	65±0.04	100.00±0.06

4.3 实验条件

本章的研究目的是验证摩擦力等效力矩关键肢体中提非接触腿对机器人完成空翻和调整转向姿态落地的作用和影响。研究的关键关节首先选择腰关节。腰关节需要产生较大的力矩模拟接触腿在壁面接触过程中产生作用在质心的旋转力矩。其次研究非接触腿对机器人完成空翻和调整转向姿态落地的作用和影响需要选择机器人下半身的腿部的髋关节、膝关节和踝关节共 6 个关节自由度。因此，本研究的关键关节只集中要腿部和腰部，仿真模型只展现机器人腿部及腰部共 7 个关节自由度特征。

机器人在物理引擎中的 30 个关节自由度的关节运动使用 Pybullet 提供的位置控制模式，关节力矩和关节角速度的最大值均与实际相同，关节控制力最大值为 500N。关键的机器人腿部及腰部共 7 个关节自由度特征根据第二章的动作解算得出的关节空间的动作在位置控制模式下运动，机器人腿部及腰部共 7 个关节自由度的运动角度范围表格如表 4-4。其余不关键的 23 个关节自由度控制输入为 0，工作模式为位置控制模式，在该工作模式下保持目标位置和姿态。

表 4-4 Atlas 部分关节自由度

Table 4-4 The partial freedom of degrees of Atlas robot

名称	符号	转动方向	范围 (Rad)
腰关节	back _{bky}	Y	[-0.219,0.539]
左髋关节	L leg _{hpy}	Y	[-1.612,0.658]
左膝关节	L leg _{kny}	Y	[0.000,2.356]
左踝关节	L leg _{aky}	Y	[-1.000,0.700]
右髋关节	R leg _{hpy}	Y	[-1.612,0.658]
右膝关节	R leg _{kny}	Y	[0.000,2.356]
右踝关节	R leg _{aky}	Y	[-1.000,0.700]

4.4 实验验证

4.4.1 等效力矩对比实验

本研究的动作规划来源于动捕数据的支撑，第二章中多刚体运动序列结算的数据结果将会在本章的动力学环境中进行仿人机器人运动实验使用。结合期望轨迹输入，本研究第二章对动作规划的要求机器人依次进行：右腿触壁、提左腿、顶腰、蹬腿发力、空翻收腿、接近落地放腿。跑酷机器人脚掌与壁面接触的落脚点 (h_0) 在跑酷机器人身高的 75% 到跑酷机器人身高的 80% 之间；触壁高度为 1.54m，机器人躯体角 θ 为 81°。

由于研究的关键关节首先选择腰关节，腰关节需要产生较大的力矩模拟接触腿在壁面接触过程中产生作用在质心的等效力矩。其次研究非接触腿对机器人完成空翻和调整转向姿态落地的作用和影响需要选择机器人下半身的腿部的髋关节、膝关节和踝关节共 6 个关节自由度。因此，本研究的关键关节只集中要腿部和腰部，仿真模型只展现机器人腿部及腰部共 7 个关节自由度特征。选取其中的腰关节、左髋关节、右髋关节、左膝关节、右膝关节、左踝关节、右踝关节的运动序列作为期望轨迹输入。运动实验中运动序列轨迹如图 4-2 所示。

在第二章规划的运动序列都数据支撑前提条件下，离壁时刻在机器人腰关节施加触壁摩擦力等效力矩。由第二章可知，跑酷者的脚掌与壁面接触的作用持续时间是 0.216s。为了证实所摩擦力等效力矩影响机器人完成空翻和调整转向姿态落地的作用，本研究首先根据动捕实验数据假设该等效力矩作用持续时间是 0.216s，对所选的仿人

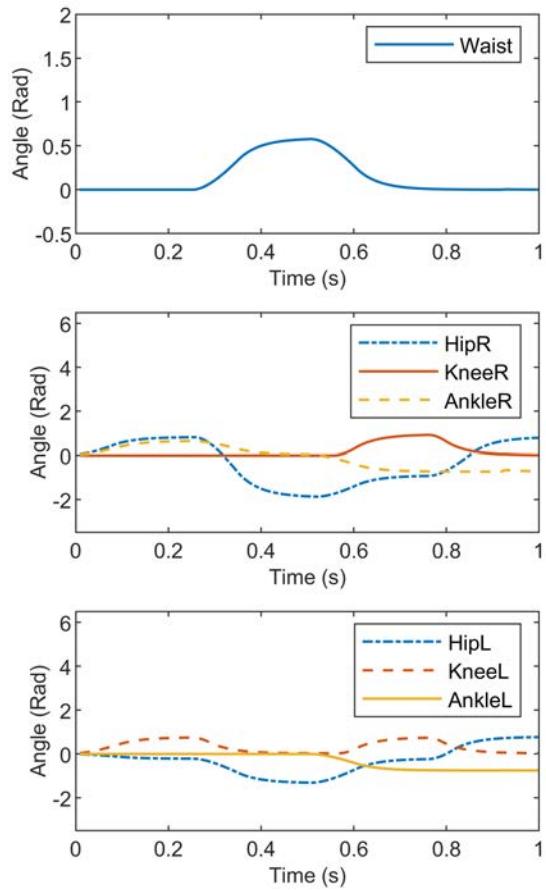


图 4-2 动作规划关节运动曲线

Fig.4-2 Motion planning joint movement curve

机器人Atlas进行了三次不同大小正向等效力矩的比较实验，实验仿真频率1/120s，初始离壁速度为水平速度1.28m/s，竖直速度1.54m/s，质心高度1.70 m。实验1-1、实验1-2和实验1-3三次实验的对比量正方向力矩的大小。实验1-1的正方向等效力矩为2000Nm，实验1-2的正方向等效力矩为2500Nm，实验1-3的正方向等效力矩为3000Nm，在等效力矩作用时间内应用摩擦力的等效力矩。

图4-3显示了触壁空翻实验1中机器人上半身倾角变化图像，机器人的离开壁面的起始上半身倾角为65°，即倾角角度为1.13 rad。在作用等效力矩持续时间是0.216s的前提下，实验1-1应用正方向等效力矩为2000Nm只能够使机器人翻转达到5.38rad，表现为者往前倾倒而导致触壁空翻失败，不能够以垂直地面的转向姿态降落在地面上。实验1-2应用正方向等效力矩为2500Nm，倾角角度逐渐增加知道6.28rad。该实验结果表明该正方向等效力矩能够使机器人成功地以垂直地面的转向姿态降落在地面上。实验1-3应用正方向等效力矩为3000Nm的仿真结果会发生机器人向后倾倒而导致触壁

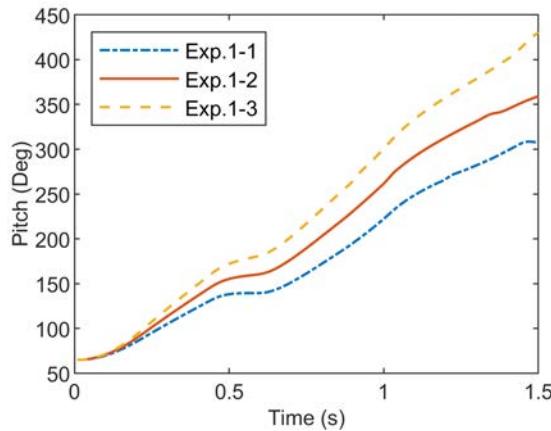


图 4-3 触壁空翻实验 1 中机器人上半身倾角变化图像

Fig.4-3 Experimental pitch angle of the Atlas robot in the wall-flip Exp.1 trails

空翻失败。因此，本研究选择正方向等效力矩为 2500Nm 为合理的等效力矩数据能够使机器人触壁空翻后以垂直地面的转向姿态落地。

实验 1-1、1-2 和 1-3 都是以一定的初始运动状态在离壁后，在动作规划下的关节运动改变转动惯量，离开墙面之后只受等效力矩和重力的作用。三次实验的仿真截图如图4-4、4-5和4-6所示，其中图4-5显示了在离开垂直墙面后成功完成空翻的机器人仿真连续截取图片。(1) 是右腿触壁后将要离开墙面时刻，腿与墙面相互作用后系统具

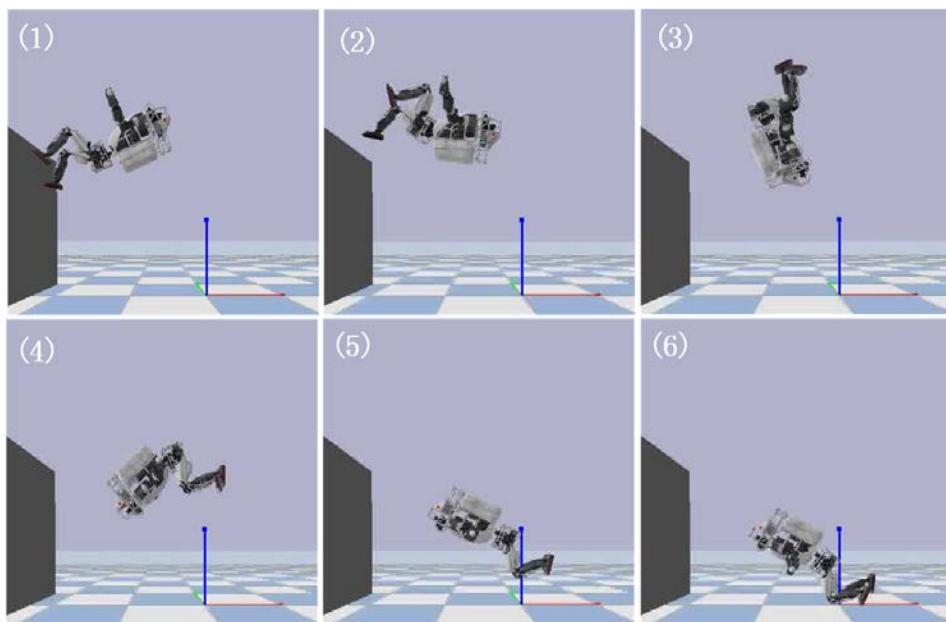


图 4-4 触壁空翻实验 1-1

Fig.4-4 Wall-flip experiment 1-1

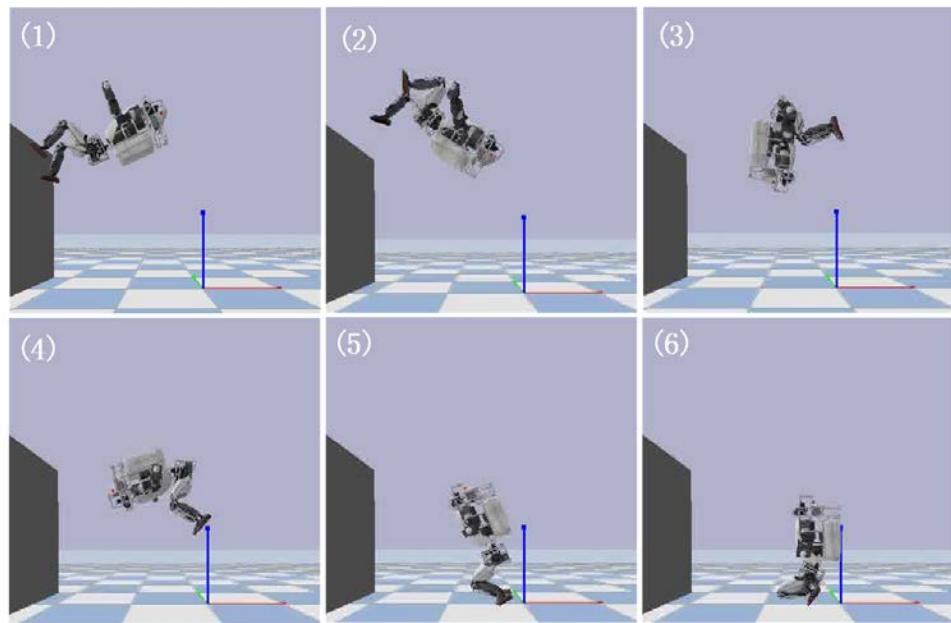


图 4-5 触壁空翻实验 1-2

Fig.4-5 Wall-flip experiment 1-2

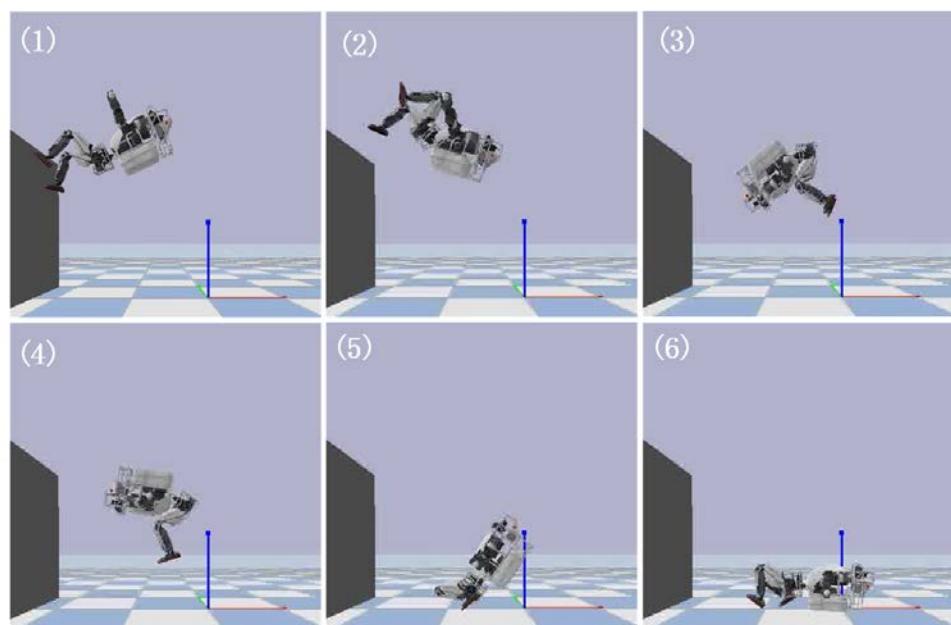


图 4-6 触壁空翻实验 1-3

Fig.4-6 Wall-flip experiment 1-3

有初始角动量提供正方向力矩，准备进入空翻阶段；在（1→2）中，左腿迅速提起，腰关节往后绷直；随着整个机器人离开壁面翻转起来，由于空中机器人系统的角动量守恒，通过在（2→3）空翻过程中收腿，膝盖尽可能地向胸前收缩，达到减小转动惯量，增大角速度的作用；随后，在（3→4）腿部慢慢舒展，增大转动惯量，减小角速度。在

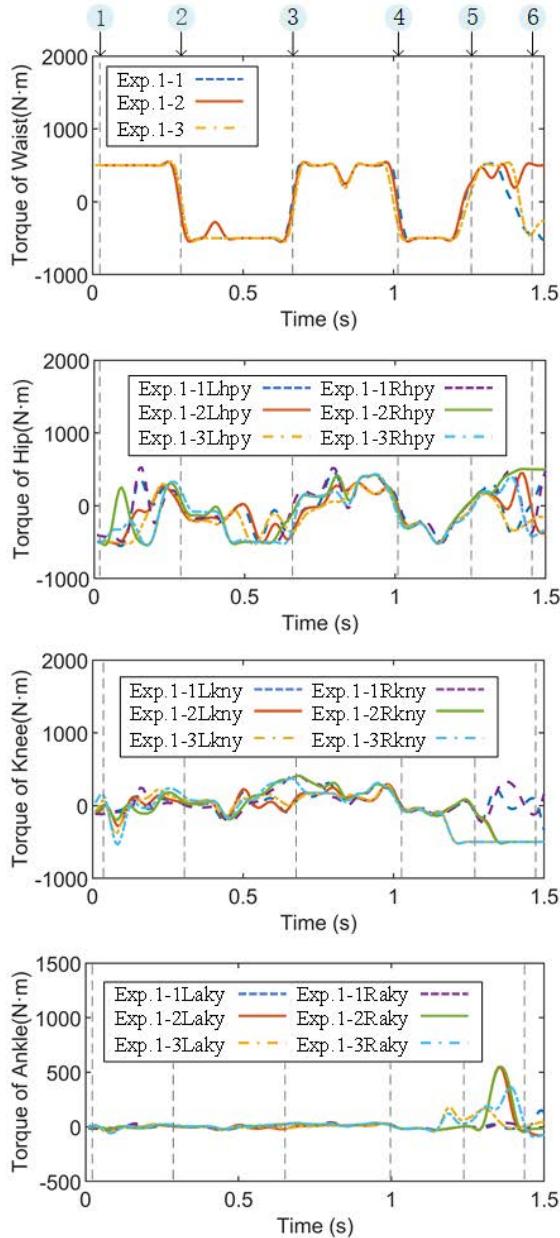


图 4-7 触壁空翻实验 1 中机器关节力矩图像

Fig.4-7 Experimental torque of the Atlas robot in the wall-flip Exp.1 trails

(5) 中, 空翻阶段终止, 进入落地阶段; 在 (6) 中机器人膝关节在垂直加速度的作用下呈下蹲姿势, 但上半身的姿态满足与地面垂直, 因此认为该实验条件能够使仿人机器人成功触壁空翻。

为了更仔细地观察运动的差异, 图4-7给出了实验 1-1、实验 1-2 和实验 1-3 中 Atlas 关节力矩在离壁空翻阶段的图像。实验结果表明, 由于控制变量法保证关节空间运动的一致性, 三次实验中力矩变化的趋势是一致的。以腰关节为例, 在 (1→2) 时间内, 机器人在等效力矩在作用下, 腰关节力矩为正值, 正向的力矩有利于机器人身体后仰,

有助于机器人往后翻。在 (2→3) 之间，三次实验的腰关节力矩均为负值，负方向的力矩有助于膝盖尽可能地向胸前收缩，达到减小转动惯量，增大空翻角速度的作用。在 (3→4) 之间等效力矩均为正值，正向的力矩有利于机器人慢慢舒展，增大转动惯量，减小角速度。在 (4→5) 之间三次实验的腰关节力矩均为负值，负方向的力矩有助于膝盖尽可能地向胸前收缩，增大缓冲的作用。在 (5) 之后，实验 1-2 的腰关节力矩为正值，而实验 1-1 和实验 1-3 的腰关节力矩先为正值后为负值，这是因为实验 1-2 机器人膝关节在垂直加速度的作用下呈下蹲姿势，但上半身的姿态满足与地面垂直，该运动使得大腿与腰夹角变小，腰关节力矩仍然为正值。而实验 1-1 因为角速度不足以完成空翻而导致机器人向前扑倒在地和实验 1-3 因为角速度过大导致导致机器人向后倾倒在地，倒地的撞击使得身体展开，腰关节力矩先为正值后为负值。

由于该等效力矩是模拟摩擦力与壁面产生的，通过 Pybullet 的仿真数值可知机器人在等效力矩作用期间的等效力臂的均值为 0.813m，因此可以通过该正方向等效力矩反推出摩擦力的理想数值是 3075.03N。

通过本实验可以得出第一个结论，在作用等效力矩持续时间是 0.216s 的前提条件下，正方向等效力矩为 2500Nm 为合理的等效力矩数据能够使机器人触壁空翻后以竖直的姿态落地。切向摩擦力要产生 2500Nm 的等效力矩需要 3075.03N 的摩擦力分力，这个数值相比于先前文献研究人体在地面上跑步大，因此得出推论触壁运动能够产生更大的摩擦力。

4.4.2 关键肢体对比实验

为了证实对比关键肢体中提非接触腿对机器人完成空翻和调整转向姿态落地的作用和影响，本研究首先根据动捕实验数据设置该等效力矩作用持续时间是 0.216s，对所选的仿人机器人 Atlas 进行了两次不同非接触腿动作规划的比较实验。两次实验都是以一定的初始运动状态在离壁后，在动作规划下的关节运动改变转动惯量，离开壁面之后只受等效力矩和重力的作用。由于实验 1 得出结论选择正方向等效力矩为 2500Nm 为合理的等效力矩数据能够使机器人触壁空翻后以竖直的姿态落地。因此，实验 2 的基本的实验 2-1 是保持沿用了实验 1-2 的实验条件，以一定的初始运动状态在离壁后，在动作规划下的关节运动改变转动惯量，正方向等效力矩为 2500Nm。因此，两次实验的等效力矩作用时间均为 0.216s，正方向等效力矩为 2500Nm。另一次实验 2-2 是在基本

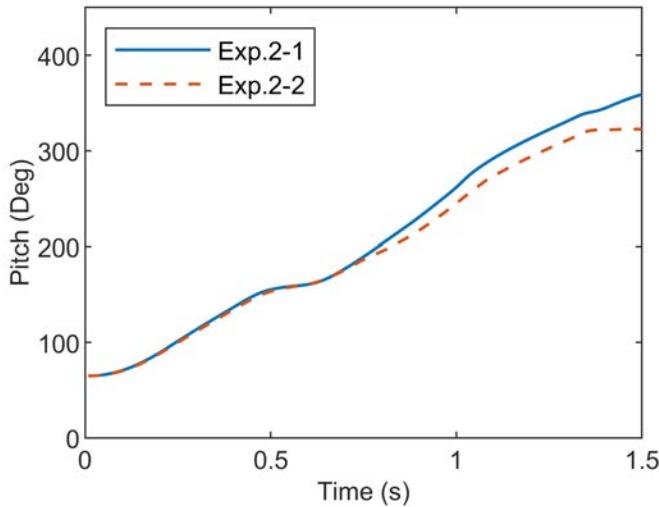


图 4-8 触壁空翻实验 2 中机器人上半身倾角变化图像

Fig.4-8 Experimental pitch angle of the Atlas robot in the wall-flip Exp.2 trails

的实验的基础上采用控制变量法，只改变了动作规划的非接触腿的髋关节运动，即阻止了左腿上抬的提腿动作。两次实验的对比量是否有非接触腿的抬腿动作序列，实验 2-1 采用第二章生成的正常动作序列，实验 2-2 是在第二章生成的正常动作序列的基础上去掉了非接触腿抬腿动作。

图4-8显示了触壁空翻实验 1 中机器人上半身倾角变化图像，机器人的离开壁面的起始上半身倾角角度为 1.13rad 。在作用等效力矩持续时间是 0.216s 的前提条件下，在实验 2-1 中，机器人上半身倾角角度逐渐增加直到 6.28rad 。该实验结果表明有非接触腿的抬腿动作序列能够使机器人成功地以垂直地面的转向姿态降落在地面上。而在实验 2-2 中，机器人上半身倾角角度只能增加到 5.61rad ，表现为者往前倾倒而导致触壁空翻失败，不能够以垂直地面的转向姿态降落在地面上。因此，非接触腿的髋关节提腿运动能够影响机器人触壁空翻的结果，没有进行非接触腿的抬腿动作容易导致机器人往前倾倒导致触壁空翻失败。

实验 2-1 和 2-2 以一定的初始运动状态在离壁后，在不同动作规划的关节运动下改变转动惯量，离开壁面之后只受等效力矩和重力的作用。两次实验的仿真截取图片如图4-9和4-10所示。以实验 2-1 为例，图4-9显示了在离开垂直壁面后能够成功完成空翻的实验 2-1 的运动截取图片。(1) 是右腿触壁后将要离开壁面时刻，腿与墙面相互作用后系统具有初始角动量准备进入空翻阶段；在 (1→2) 中，左腿迅速提起，腰关节往后

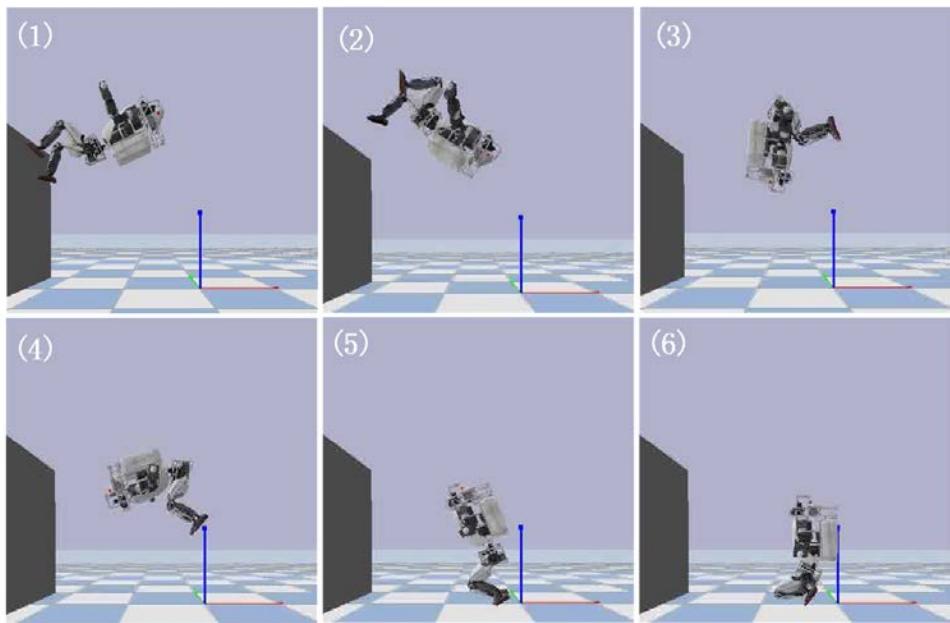


图 4-9 触壁空翻对比关键肢体实验 2-1

Fig.4-9 Wall-flip experiment 2-1

绷直；在（2→3），随着整个机器人离开墙面翻转起来，机器人系统的角动量守恒，通过在空翻过程中收腿，膝盖尽可能地向胸前收缩，达到减小转动惯量，增大角速度的作用；随后在（3→4），腿部慢慢舒展，增大转动惯量，减小角速度。在（5）时刻，空翻阶段终止，进入着陆阶段。在（6）中机器人膝关节在垂直加速度的作用下呈下蹲姿势，但上半身的姿态满足与地面垂直，因此认为该实验条件能够使仿人机器人成功触壁空翻。根据还对比试验可知，提腿动作不仅在这个运动过程中能够帮助膝盖尽可能地向胸前收缩，改变系统的转动惯量，还能够增加系统的运动惯性。因此，非接触腿的髋关节提腿运动非常重要，它能够影响机器人触壁空翻的结果，没有进行非接触腿的抬腿动作容易导致机器人空翻旋转速度不够而往前倾倒导致触壁空翻失败。

为了更仔细地观察运动的差异，图4-11给出了实验 2-1 和实验 2-2 中 Atlas 关节力矩在离壁空翻阶段的图像。实验结果表明，由于控制变量法保证等效力矩和作用时间的一致性，两次实验中力矩变化的趋势是一致的。以腰关节为例，在（1→2）时间内，机器人在等效力矩在作用下，腰关节力矩为正值，正向的力矩有利于机器人身体后仰，有助于机器人往后翻。在（2→3）之间，三次实验的腰关节力矩均为负值，负方向的力矩助于膝盖尽可能地向胸前收缩，达到减小转动惯量，增大空翻角速度的作用。在（3→4）之间等效力矩均为正值，正向的力矩有利于机器人慢慢舒展，增大转动惯量，减

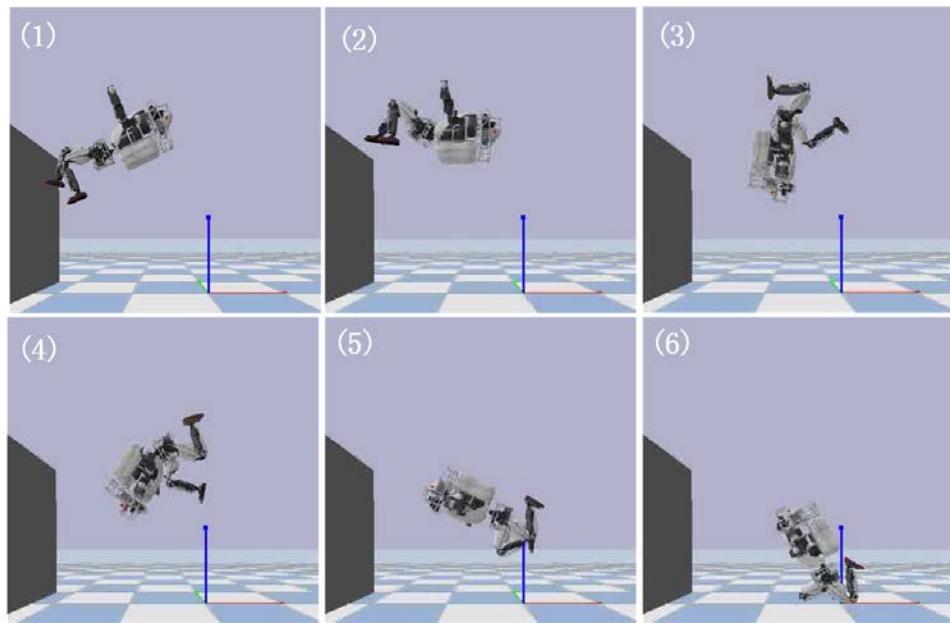


图 4-10 触壁空翻对比关键肢体实验 2-2

Fig.4-10 Wall-flip experiment 2-2

小角速度。在 (4→5) 之间三次实验的腰关节力矩均为负值，负方向的力矩助于膝盖尽可能地向胸前收缩，增大缓冲的作用。在 (5) 之后，实验 2-1 腰关节力矩为正值，而实验 2-2 的腰关节力矩先为正值后为负值，这是因为实验 2-1 机器人膝关节在垂直加速度的作用下呈下蹲姿势，但上半身的姿态满足与地面垂直，该运动使得大腿与腰夹角变小，腰关节力矩仍然为正值。而实验 2-2 因为角速度不足以完成空翻而导致机器人向前扑倒在地，倒地的撞击冲量使得身体展开，腰关节力矩先为正值后为负值。

通过本实验可以得出第二个结论，在触壁空翻中非接触腿的运动也非常重要，从减小正向力矩的角度上来说，该运动要求一定要进行非接触腿的提腿动作。

4.5 讨论与结论

通过本实验可以得出第一个结论，在作用等效力矩持续时间是 0.216s 的前提条件下，正方向等效力矩为 2500Nm 为合理的等效力矩数据能够使机器人触壁空翻后以竖直的姿态落地。切向摩擦力要产生 2500Nm 的等效力矩需要 3075.03N 的摩擦力分力，这个数值相比于先前文献研究人体在地面上跑步大，因此得出推论触壁运动能够产生更大的摩擦力。通过本实验可以得出第二个结论，在触壁空翻中非接触腿的运动也非常重要，从减小正向力矩的角度上来说，该运动要求一定要进行非接触腿的提腿动作。

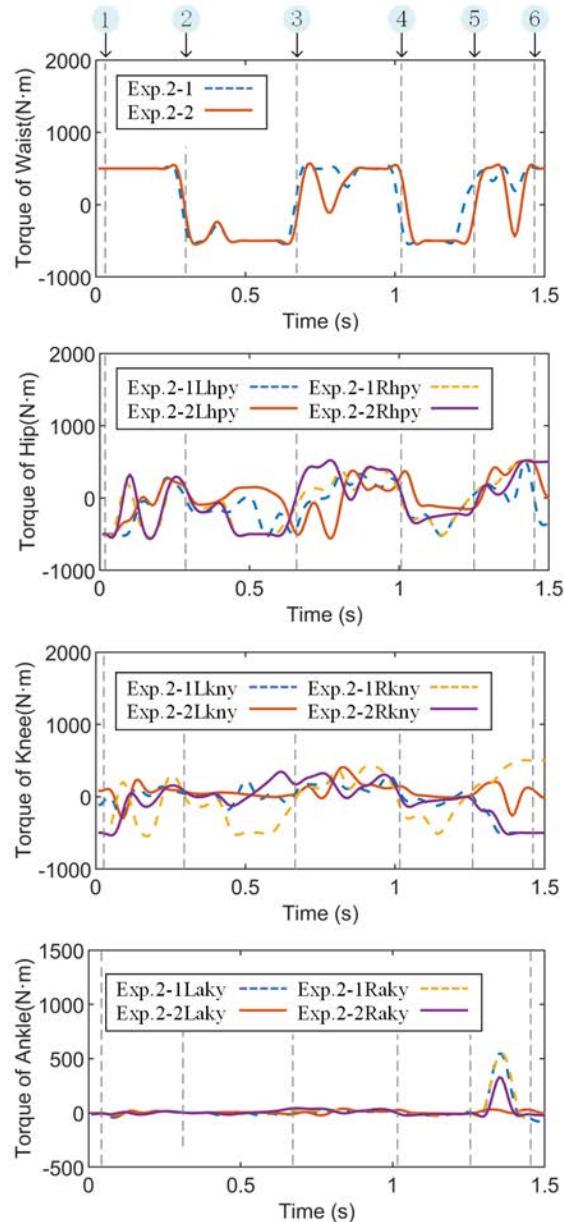


图 4-11 触壁空翻实验 2 中机器关节力矩图像

Fig.4-11 Experimental torque of the Atlas robot in the wall-flip Exp.2 trails

4.6 本章小结

本章通过物理引擎 Pybullet 环境中进行仿人机器人 Atlas 模型运动实验对比了等效力矩对触壁空翻的影响，并通过对机器人 Atlas 模型所需的正方向等效力矩反推出摩擦力的理想数值。此外还对触壁空翻运动过程中的非接触腿的作用进行对比实验和讨论，得出非接触腿的必要性，进一步探索了触壁空翻动作规划与控制的决定性因素。

结论与展望

研究结论

本研究针对当视觉等感知能力不能够支持机器人提前减速时，机器人如何通过触壁空翻借助环境壁面通过翻转等运动策略实现控制落地的方向而安全落地的科学问题，展开了面向仿人机器人触壁空翻动作规划及控制方法的研究，本文完成的主要工作如下：

(1) 通过观察人类跑酷者的触壁空翻运动并应用光学运动捕捉系统及接触力测量系统采集了跑酷者进行触壁空翻的运动数据。通过对人体模型进行简化并对运动数据进行分析，解算了多刚体模型的运动序列，并归纳了简化模型触壁空翻的运动学时序及触壁空翻过程中的接触力变化规律。得出了跑酷者进行触壁空翻的运动学指标范围和耦合关系，包括了对接触面前的临界速度、触壁高度、躯体角与发力方向等运动学参数的讨论。

(2) 通过双质量触壁空翻动力学模型结合触壁空翻运动时序进行轨迹跟踪控制，对简化模型进行触壁空翻动作动力学仿真分析。根据动力学仿真分析得出了等效力矩为正方向力矩范围与平均值和蹬壁法向力峰值的范围于平均值，进一步探索了触壁空翻运动过程中的内外力因素。

(3) 通过物理引擎 Pybullet 环境中进行仿人机器人 Atlas 模型运动实验对比了等效力矩对触壁空翻的影响，并通过对机器人 Atlas 模型所需的正方向等效力矩反推出摩擦力的理想数值。此外还对触壁空翻运动过程中的非接触腿的作用进行对比实验和讨论，得出非接触腿的必要性，进一步探索了触壁空翻动作规划与控制的决定性因素。

未来研究展望

本文针对仿人机器人的触壁空翻动作规划及控制方法进行了初步的数据采集分析和实验研究，由于本课题涉及知识层面比较广，本人时间和精力有限，对于机器人触壁空翻的数据分析和运动实验验证还不够充分与完善，很遗憾未能进行更加系统和细致的研究。下一步的研究工作可以从以下几点继续开展：

(1) 针对触壁阶段，根据目前研究工作取得的成果与进展，还可以针对触壁空翻切向力力的采集、触壁前的动作进行规划以及与触壁接触力与初始角动量的权衡关系进行分析，探索在壁面如何产生足够的摩擦力使得系统具备足够的角动量完成触壁空翻。

(2) 针对空翻阶段，可以针对等效力矩不足够或者太大的情况下，全身的动作在触壁空翻中应该如何规划以调整转动惯量，进一步提高机器人腾空的机动能力。

参考文献

- [1] HYZER W G. Flight behavior of a fly alighting on a ceiling[J]. Science, 1962, 137(3530): 609-610.
- [2] 吴成亮, 向家俊, 徐波, 等. 跳马落地速度与角度对落地稳定性影响的仿真研究[J]. 首都体育学院学报, 2015, 27(5): 469-473.
- [3] HUNT N H, JINN J, JACOBS L F, et al. Acrobatic squirrels learn to leap and land on tree branches without falling[J]. Science, 2021, 373(6555): 697-700.
- [4] MALDONADO G, BAILLY F, SOUÈRES P, et al. On the coordination of highly dynamic human movements: an extension of the uncontrolled manifold approach applied to precision jump in parkour[J]. Scientific reports, 2018, 8(1): 1-14.
- [5] NILSSON J, THORSTENSSON A. Ground reaction forces at different speeds of human walking and running[J]. Acta Physiologica Scandinavica, 1989, 136(2): 217-227.
- [6] KELLER T S, WEISBERGER A, RAY J, et al. Relationship between vertical ground reaction force and speed during walking, slow jogging, and running[J]. Clinical biomechanics, 1996, 11(5): 253-259.
- [7] LAWSON P. Biomechanics of parkour: The vertical wall-run technique[J]. 2015.
- [8] CROFT J L, SCHROEDER R T, BERTRAM J E. Determinants of optimal leg use strategy: horizontal to vertical transition in the parkour wall climb[J]. Journal of Experimental Biology, 2019, 222(1): jeb190983.
- [9] DEGANI A, FENG S, BROWN H B, et al. The parkourbot-a dynamic bowleg climbing robot[C]//2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2011: 795-801.
- [10] HYON S H, YOKOYAMA N, EMURA T. Back handspring of a multi-link gymnastic robot—reference model approach[J]. Advanced Robotics, 2006, 20(1): 93-113.

- [11] HALDANE D W, PLECNIK M M, YIM J K, et al. Robotic vertical jumping agility via series-elastic power modulation[J]. *Science Robotics*, 2016, 1(1).
- [12] KANE T, SCHER M. A dynamical explanation of the falling cat phenomenon[J]. *International journal of solids and structures*, 1969, 5(7): 663-670.
- [13] PLAYTER R R, RAIBERT M H. Control of a biped somersault in 3d[C]//Proceedings of the IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems: volume 1. IEEE, 1992: 582-589.
- [14] WENG Z, NISHIMURA H. Final-state control of a two-link cat robot by feedforward torque inputs[C]//6th International Workshop on Advanced Motion Control. Proceedings (Cat. No. 00TH8494). IEEE, 2000: 264-269.
- [15] PAPADOPOULOS E, FRAGKOS I, TORTOPIDIS I. On robot gymnastics planning with non-zero angular momentum[C]//Proceedings 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2007: 1443-1448.
- [16] KUINDERSMA S, DEITS R, FALLON M, et al. Optimization-based locomotion planning, estimation, and control design for the atlas humanoid robot[J]. *Autonomous robots*, 2016, 40(3): 429-455.
- [17] POPE M T, CHRISTENSEN S, CHRISTENSEN D, et al. Stickman: Towards a human scale acrobatic robot[C]//2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, 2018: 2134-2140.
- [18] XIONG X, AMES A D. Sequential motion planning for bipedal somersault via flywheel slip and momentum transmission with task space control[C]//2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, 2020: 3510-3517.
- [19] CHIGNOLI M, KIM D, STANGER-JONES E, et al. The mit humanoid robot: Design, motion planning, and control for acrobatic behaviors[J]. arXiv preprint arXiv:2104.09025, 2021.

- [20] IIZUKA R, NENCHEV D N, SATO D. Motion generation and control of acrobatic motion synergies emerging from the momentum equilibrium principle[C]//2020 IEEE-RAS 20th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids). IEEE, 2021: 362-369.
- [21] CHUANGYANYONG T, CHINSAKULJAROEN P, KETRUNGSRI W, et al. Flying trapeze act motion planning algorithm for two-link free-flying acrobatic robot[J]. arXiv preprint arXiv:2111.03823, 2021.
- [22] MEHANOVIC D, RANCOURT D, DESBIENS A L. Fast and efficient aerial climbing of vertical surfaces using fixed-wing uavs[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2018, 4(1): 97-104.
- [23] MEHANOVIC D, BASS J, COURTEAU T, et al. Autonomous thrust-assisted perching of a fixed-wing uav on vertical surfaces[C]//Conference on Biomimetic and Biohybrid Systems. Springer, 2017: 302-314.
- [24] DALER L, KlaptoCz A, BRIOD A, et al. A perching mechanism for flying robots using a fibre-based adhesive[C]//2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2013: 4433-4438.
- [25] GRAULE M, CHIRARATTANANON P, FULLER S, et al. Perching and takeoff of a robotic insect on overhangs using switchable electrostatic adhesion[J]. Science, 2016, 352(6288): 978-982.
- [26] POPE M T, KIMES C W, JIANG H, et al. A multimodal robot for perching and climbing on vertical outdoor surfaces[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2016, 33(1): 38-48.
- [27] TSUKAGOSHI H, WATANABE M, HAMADA T, et al. Aerial manipulator with perching and door-opening capability[C]//2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, 2015: 4663-4668.
- [28] SIDDALL R, BYRNES G, FULL R J, et al. Tails stabilize landing of gliding geckos crashing head-first into tree trunks[J]. Communications biology, 2021, 4(1): 1-12.

- [29] HUANG Z, LI S, JIANG J, et al. Biomimetic flip-and-flap strategy of flying objects for perching on inclined surfaces[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2021, 6(3): 5199-5206.
- [30] 邹锦慧. 人体解剖学第四版[M]. 人体解剖学第四版, 2012.
- [31] YU Y, YANG S, WANG M, et al. High performance full attitude control of a quadrotor on so (3)[C]//2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, 2015: 1698-1703.
- [32] KHALIL H K. Nonlinear systems[J]. 2002.
- [33] TEDRAKE R. Underactuated robotics: Learning, planning, and control for efficient and agile machines course notes for mit 6.832[J]. Working draft edition, 2009, 3.
- [34] MELLINGER D, SHOMIN M, KUMAR V. Control of quadrotors for robust perching and landing[C]//Proceedings of the International Powered Lift Conference. 2010: 205-225.
- [35] LUSSIER DESBIENS A, ASBECK A T, CUTKOSKY M R. Landing, perching and taking off from vertical surfaces[J]. The International Journal of Robotics Research, 2011, 30(3): 355-370.
- [36] CHIRARATTANANON P, MA K Y, WOOD R J. Fly on the wall[C]//5th IEEE RAS/EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics. IEEE, 2014: 1001-1008.
- [37] CUTKOWSKY M, DESBIENS A. Bio-inspired perching and crawling air vehicles[J]. White paper, Stanford University, October, 2008.
- [38] JIANG H, POPE M T, HAWKES E W, et al. Modeling the dynamics of perching with opposed-grip mechanisms[C]//2014 IEEE international conference on robotics and automation (ICRA). IEEE, 2014: 3102-3108.

- [39] JIANG H, POPE M T, ESTRADA M A, et al. Perching failure detection and recovery with onboard sensing[C]//2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, 2015: 1264-1270.
- [40] KALANTARI A, MAHAJAN K, RUFFATTO D, et al. Autonomous perching and take-off on vertical walls for a quadrotor micro air vehicle[C]//2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, 2015: 4669-4674.
- [41] WOPEREIS H W, VAN DER MOLEN T, POST T, et al. Mechanism for perching on smooth surfaces using aerial impacts[C]//2016 IEEE international symposium on safety, security, and rescue robotics (SSRR). IEEE, 2016: 154-159.
- [42] SLOTINE J J E, LI W, et al. Applied nonlinear control: volume 199[M]. Prentice hall Englewood Cliffs, NJ, 1991.

攻读学位期间取得与学位论文相关的成果

发表和投稿与学位论文相关学术论文

- [1] Zhifeng HUANG, **Sem LI**, *et al.* Biomimetic Flip-and-Flap Strategy of Flying Objects for Perching on Inclined Surfaces[J]. IEEE Robotics and Automation Letters. 021, 6(3): 5199-5206. (SCI Impact Factor 3.741, WOS:000645056800014)

致谢

通过这段时间的学习，加深了生物界的通过翻转策略的相关知识的理解及触壁空翻相关知识的理解，由此出发学习和设计了机器人触壁空翻相关实验方法。这个课题加深了我对运动控制和仿生运动的理解，提高了我对物理模型分析和进行动力学仿真设计的能力。

本毕业设计是在导师黄之峰副教授的指导下完成的。感谢黄之峰老师对我的指导，给予了我悉心的指导与不懈的支持。黄之峰老师知识渊博、治学严谨。在研究生期间的课题进展中，黄之峰老师总能够提出启发性的建议。黄之峰老师对于我提出的问题，不管难易程度，都进行一一详细地解答。让我在学业上收获颇丰，这对我以后的工作与生活中也必然影响深远。

感谢父母和家人对我学业的支持和鼓励，让我能够全身心在校园里安心学习和提升自己。感谢广东工业大学喷气动力实验室提供的学习资源和实验设备。感谢吴颖、张子睿和陈宝桔对我的实验和论文的帮助，感谢实验室中的蒋俊高、李骏晟、王东、王梓俊、连轶群、顾谢平、周经纶在研究生期间对我生活上和课题上的帮助。

感谢陪伴我走过研究生三年的辅导员老师和授课老师，感谢王哲男老师对我在学习和生活上的鼓励和帮助！感谢罗逸浩老师对我在为人处事上的帮助和指导！是老师们潜移默化的教导与支持，让我在大学收获了知识的同时，也懂得了许多人生的道理。感谢所有关心和帮助过我的亲人，老师和同学们！

