

## 目 录

摘要.....	I
ABSTRACT.....	II
第一章 绪论.....	1
§1.1 引言.....	1
§1.2 国内外研究现状.....	1
§1.3 本文研究的主要内容及构成.....	2
第二章 全向运动及全向轮的设计.....	5
§2.1 地面移动机器人运动方式.....	5
§2.1.1.差动运动方式.....	5
§2.1.2.全向运动方式.....	5
§2.1.3.选择全向运动方式的原因.....	6
§2.2 全向轮介绍.....	7
§2.2.1 单个全向轮.....	7
§2.2.2 组合全向轮.....	7
§2.2.3 各种全向轮的优缺点分析.....	10
§2.3 NuBot全向轮的设计.....	11
§2.3.1. 设计要求.....	11
§2.3.2. 结构介绍.....	11
§2.3.4. 全向轮的强度分析.....	12
§2.3.5. NuBot全向轮的效果或特点.....	15
§2.3.6. 附图及具体实施方式.....	15
§2.4 小结.....	16
第三章 全向移动平台的结构设计.....	17
§3.1 全向移动平台的组成.....	17
§3.2 驱动轮系的设计.....	19
§3.2.1 设计要求.....	19
§3.2.2 轮系的设计介绍.....	19
§3.2.3 设计使用时遇到的问题:.....	19
§3.3 底盘的设计.....	20
§3.3.1 设计要求.....	20
§3.3.2 底盘的设计介绍.....	20
§3.4 减振系统的设计.....	21
§3.4.1 设计要求.....	21
§3.4.2 设计思路.....	22
§3.4.3 减振方法、减振部件的选择、实验和开发.....	23
§3.4.4 具体实施方式.....	26
§3.5 全向视觉系统的设计.....	29
§3.5.1 设计要求.....	30
§3.5.2 设计思路.....	30
§3.5.3 具体实现.....	31
§3.6 系统结构的设计.....	32
§3.6.1 设计要求.....	33

§3.6.2 具体实施.....	33
§3.7 结论与实物.....	35
§3.8 小结.....	38
第四章 全向运动控制.....	39
§4.1 全向轮的组合.....	39
§4.1.1 两个全向轮组合使用的情况.....	39
§4.1.2 三个全向轮的使用情况.....	39
§4.1.3 四轮及多轮的使用情况.....	41
§4.2 全向轮布局与系统性能.....	41
§4.2.1 单个轮子对系统的作用.....	41
§4.2.2 轮子布局对系统旋转运动的作用.....	41
§4.2.3 三轮布局的分析.....	42
§4.2.4 其他布局的三轮结构.....	45
§4.2.5 多轮的系统.....	46
§4.3 目前方案的运动、动力学分析.....	47
§4.3.1 运动学分析.....	47
§4.3.2 动力学分析.....	48
§4.3.3 轮系的运动性能.....	50
§4.4 总体控制方案的选择.....	52
§4.4.1 全向移动机器人的主要控制任务.....	52
§4.4.2 全向移动平台的控制方案.....	53
§4.5 全向移动平台的控制系统设计.....	54
§4.5.1 直流电机的速度控制.....	54
§4.5.2 全向移动平台的控制特性.....	55
§4.5.3 基于输入变换解耦的控制器设计.....	55
§4.5.3 轨迹跟踪控制.....	57
§4.6 实验结果及分析.....	58
§4.6.1 电机的控制的具体实施方式.....	58
§4.6.2 姿态稳定控制器的实验结果.....	59
§4.6.3 轨迹跟踪控制器的实验结果.....	59
§4.6.4 实际验证及实验结果.....	61
§4.7 展望.....	62
§4.7.1 问题的产生——全向轮运动失效的现象.....	62
§4.7.2 全向运动控制系统的设计改进.....	63
§4.7.3 电机协调驱动的设置.....	64
§4.8 小结.....	65
第五章 结论与展望.....	66
§5.1 结论.....	66
§5.2 展望.....	67
致谢.....	68
参考文献.....	69

## 摘要

本论文以 RoboCup 中型组机器人足球赛为应用背景，设计并实现了一种具有全向移动功能的运动平台，并在此基础上对全向移动平台的控制算法以及性能进行了详细的描述。

本论文设计并实现了一种较为实用化的全向轮；解决了四轮在平面内驱动存在的四点不能同时着地问题；为全向移动平台设计并实现了多套行之有效的减振装置；为全向移动平台的全向视觉系统设计了一套安装调节装置；将各个功能模块合理整合成为一套性能稳定的全向运动系统；系统地分析了全向运动平台的运动性能；得出了平台的运动学及动力学模型描述；介绍了全向移动平台的基本控制方法。

实践证明，该平台具有非常优秀的运动性能。在中型组机器人的成功应用，使足球机器人具备了在复杂的动态环境中自如、准确的到达目标位置的能力。

**关键词：**移动机器人；全向轮；全向运动；RoboCup 中型组；机器人机构设计；全向机器人控制

## ABSTRACT

The thesis focuses on the design of an omni-directional system for the application in the middle-size league of RoboCup. It covers the mechanical design of an omni-directional mobile robot and shows how to control the omni-directional wheels of the system.

The main works of the thesis are as follows: Design a type of practical omni-directional wheel which is used in the omni-directional system; Resolve the problem that all the four wheels cannot contact with the ground evenly in different terrain locomotion. Several alternative absorbers are designed to absorb the shock brought by the chassis of robot .A device for the installation and adjustment of the omni-vision system has been invented. Then we put all the function parts together to form a steady-going system. In addition, the performance indexes and control methods are also discussed. It covers the analyzation of the system performance, introduction of the vehicle kinematics and dynamic modeling. At last we show how to control the wheels in phase.

This kind of system excels at motional ability. It has been proved to be a platform available in RoboCup middle size, and provides the players some abilities that it can freely travel in confused dynamic circumstance and achieve an accurate positioning in the competition.

**Key word:** Mobile Robot; Omni-directional Wheel; Omni-directional movement; RoboCup Middle size league; Structure Design of Robot; Omni-directional Control;

## 第一章 绪论

### § 1.1 引言

移动机器人由于其在各行业广阔的应用前景, 已经成为机器人领域的一个重要分支。移动机器人动态环境下的研究更是近年来研究的热点, 许多应用场合如军事、危险操作、服务业等都需要一个能够以期望的速度、方向和轨迹灵活自如运动的移动平台进行研究。移动机器人的运动方案多种多样, 有轮式 (Wheeled)、腿式 (Legged)、履带式 (Tracked) 和蜿蜒式 (Serpentine). 其中轮式是机器人出现最早、应用最广的移动方式, 它的结构方式相对简单, 并且可以在一个平面环境里提供平滑、高速、精确的运动效果。全向运动方式是轮式机器人的一种运动方式, 这种方式可以使机器人在平面内获得任意的运动方向, 可以完全控制在平面运动的三个自由度。近年来, 以全向运动机构为平台的机器人以其优异的运动特性, 越来越受到各研究机构的重视, 得到了长足的发展。

机器人足球赛为全向运动平台的研究提供了一个很好的实验环境。机器人足球赛由加拿大大不列颠哥伦比亚大学教授 Alan Mackworth 在 1992 年的一次国际人工智能会议上提出, 为机器人学科的发展提供了一个具有标志性和挑战性的课题。从 1997 年起机器人足球世界杯足球赛 (Robot World Cup 简称 RoboCup) 开始举行, 这是一项世界范围内最高水平的机器人足球竞赛, 其目标是在 2050 年建立一支机器人足球队, 战胜当时的人类世界冠军队。随着比赛的不断发展, 对抗日益激烈, 人们对机器人性能的要求也越来越高。机器人足球赛是在高速动态的环境中进行的, 这就要求足球机器人使用的移动平台必须具备在复杂的动态环境中有自如、准确到达目标位置的能力。

本课题是在基于 RoboCup 比赛要求的基础上, 开发一套运动性能优良的移动机器人平台。该移动平台适用于动态的比赛环境, 具有全向运动的能力, 良好的机动性能。另外考虑到科研工作的需要, 全向移动平台还必须适用于一些条件较差的环境, 如室外硬化地面、公路。由于移动机器人广阔的应用前景, 移动平台的开发成果还可应用于许多场合, 如应用于工厂全方位自动引导车 (AGV)、商场、超市以及医院、餐饮业的货运机器人, 还可以应用在狭窄环境下如坑道、管道机器人中。

### § 1.2 国内外研究现状

全向移动平台的关键结构为全向轮, 目前应用于实际的全向轮种类繁多, 样式各异。本文将按照使用方式, 将其分为单个全向轮和组合全向轮。单个全向轮通过控制一个轮子在平面内拥有完全自由度, 轮型以球型全向轮<sup>[16]</sup>为主。组合全向轮一般由多个轮子组合, 通过运动合成, 达到全向运动的效果。组合全向轮主要类型有麦克纳姆轮<sup>[11]</sup>、瑞士轮<sup>[12][1]</sup>、正交全方位轮<sup>[8][9]</sup>、全向盘<sup>[14]</sup>等, 根据功能特点分别应用在不同的场合。

在全向运动的控制方面, 学者们作了大量的研究。Tamas Kalmar-Nagy<sup>[3]</sup>等人系统提出

了全向系统的运动学及动力学建模方法。Ashmore M<sup>[5]</sup>、Jae-Bok Song<sup>[10]</sup>等人从不同侧重点提出了全向轮布局对系统整体性能如速度、加速度、能量消耗的影响。有关姿态稳定、轨迹跟踪控制和路径跟踪的研究在以往的双轮差动运动中已经很成熟，而全向运动由于其为完整性系统的特点降低了这些方面的难度，使姿态稳定、轨迹跟踪控制等变得相对简单。

有关全向移动平台的研究已经在国外开展了多年，但由于其结构复杂、控制困难、对运行环境要求较为严格，所以应用范围有限。工业领域的应用主要为全方位的工业品传输系统和工厂全方位自动引导车，工作环境较为理想。实验室使用全向移动研究平台，主要完成环境探索，机器人导航定位等方面的研究。

RoboCup 机器人足球比赛为多机器人的协同给对抗提供了一个良好的研究环境，其激烈的对抗性对全向移动平台的使用提出了更苛刻的要求。

全向移动平台应用于足球机器人最早出现在 RoboCup 小型组中，目前几乎所有的小型组球队都采用全向机器人，全向移动平台优秀的性能在 RoboCup 小型组项目上表现的非常突出。但小型组为轻载、比赛环境较为理想，运动控制简单，不能直接应用于中型组。

中型组硬件平台发展较快，综合 RoboCup 历届比赛的结果来看，各队在运动性能、反应速度上逐年都有提高。涌现出许多新颖的结构、独特的样式。从发展趋势来看，越来越多的球队开始使用基于全向运动平台的机器人。2005 年 RoboCup 比赛中已经有 60% 的球队采用全向移动机器人。可以看出全向移动已经成为各个球队设计、研究、发展的热点。

中型组的全向机器人中，以日本 Keio 大学 Eigen 队、Kanazawa 理工大学 Winkit 队，和德国的 Freie 大学 FU-fighter 队、Stuttgart 大学 Cops Stuttgart 队实力较强。以上几个队的全向机器人机构和控制已经达到了很成熟的水平，比赛中以优异的运动性能充分展示了全向移动平台的优势，为众多研究机构所关注。相信随着国内中型组研究的进一步深入，对全向移动平台的开发和使用必将成为今后各研究机构研究的重点。

国内 RoboCup 中型组的比赛虽然刚刚开始，但近年来发展迅速。以上海交大为代表的“交龙队”具备了参加世界大赛的实力。目前国内中型组绝大部分球队采用双轮差动的方式，直到今年才有两支采用全向移动的球队出现。虽然由于技术上的原因采用全向移动方式的球队没有夺冠，但是比赛中所表现出来优异的运动性能让大家达成了全向运动是比赛发展趋势这一共识。相信随着国内中型组研究的进一步深入，今后几年这一趋势将会越来越明显。

国防科技大学足球机器人队猎豹队 (NuBot) 从 2001 年起参加了国内 RoboCup 比赛。积累下较扎实的技术基础和丰富的比赛经验。实验室自主研发了全向移动平台，应用于 2005 中国机器人足球竞赛中型组机器人中，并在比赛中取得了第三名的好成绩。

### § 1.3 本文研究的主要内容及构成

本课题内容为设计一套基于 RoboCup 应用背景的全向移动平台，它使机器人具有全向运动的能力，即可以向任意方向做直线运动，这种运动机构还可以满足一边做直线运动一

边旋转的要求，达到终状态所需要的任意姿态角，具有良好的机动性能。本文研究的成果是使足球机器人具有运动快速灵活、控球稳定、进攻能力强，以及易于控制等优点，使机器人在赛场上更具竞争力。

另外，在课题应用背景之外，对全向移动机构在室外环境下的运动情况进行了一定程度的研究，为提高机器人对环境的适应能力做一些准备工作。

需要解决的问题是：对运动平台的结构设计和全向运动平台控制算法的研究；分析全向轮运动合成的规律和方法；试验和探索机器人在比赛中最佳的运动效果和机动性能。

论文重点将在以下几个方面展开：

- 设计出适合 RoboCup 比赛要求的全向轮，并对全向轮进行效果分析及性能评测，优化全向轮系的方案；
- 考虑比赛以及拓展环境对运动平台的要求，设计其他各个功能模块，对设计方案进行针对性的改造，并将这些功能模块整合成一个有机的整体。对所选的方案进行机构设计，强度校核。根据最终方案做出工程图纸，定制样品。最后制作出移动平台实体；
- 运用理论力学和运动学的方法研究多个全向轮的合成运动，分析轮系布局对运动特性的影响。得出运动平台的控制模型，经过实验确定最佳的运动效果。
- 分析可全向移动平台的控制特性，提出了全向运动系统姿态稳定控制器和轨迹跟踪控制器的设计，并设计仿真和实物实验验证了控制算法的有效性和可行性。

本论文结构组织如下：

第二章是全向运动及全向轮的设计，主要内容为介绍地面移动机器人一般所采用的移动方式，比较全向运动和其他运动方式的优缺点，指出选择全向移动方式的优势和必然性；介绍了由本论文所设计和开发的一种新型的全向轮关键部件全向轮的构成。

第三章阐述全向移动平台的设计，主要内容为介绍该平台的硬件组成，对全向移动平台的构成进行了机械设计方面的详细描述。通过理论分析和实验论证，提出了机器人各机构性能的设计原理与方法。

第四章介绍全向移动平台的运动控制，系统分析了构成全向运动平台的要素——全向轮的使用对系统运动性能的影响。给出了目前采用方案的运动模型描述。分析可全向移动平台的控制特性，提出了全向运动系统姿态稳定控制器和轨迹跟踪控制器的设计，并设计仿真和实物实验验证了控制算法的有效性和可行性。最后展望了提高全向移动平台性能的一些想法。

第五章为论文的总结与展望。

本论文的创新工作主要体现在全向移动平台的机构设计方面：

- (1). 设计并实现了一种较为实用化的全向轮——NuBot 轮，及其驱动轮系。

- (2). 设计了一种四轮中心铰接的方式, 将四点问题演变为两个三点着地的问题。解决了四轮驱动时存在的四点不能同时着地问题。
- (3). 为全向移动平台设计了多套减振装置, 经过多次从不同角度进行的分析和实验, 设计、确定了多套行之有效的方案。
- (4). 为全向移动平台的全向视觉系统设计了一套安装调节装置方便的实现水平调整以及有限的垂直位置调整。
- (5). 将各个功能模块整合成为一套性能稳定的全向运动系统, 使各要素之间的有机联系得到了很好的统一协调, 总系统获得较理想的整体功能。
- (6). 系统分析了构成全向运动平台的要素——全向轮使用对系统运动性能的影响, 为全向轮在全向系统中的合理布局提出了自己的想法。



## 第二章 全向运动及全向轮的设计

### § 2.1 地面移动机器人运动方式

按照移动机器人的移动方式来分, 机器人可以分为以下几种类型: 轮式 (Wheeled)、腿式 (Legged)、履带式 (Tracked) 和蜿蜒式 (Serpentine). 其中轮式是机器人出现最早、应用最广的移动方式, 它的结构方式相对简单, 并且可以在一个平面环境里提供平滑、高速、精确的运动效果。

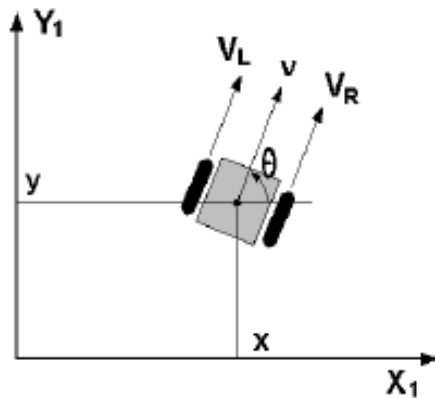


图 2.1.1 差动运动

#### § 2.1.1. 差动运动方式

传统的轮式机器人一般采用差动运动方式<sup>[4]</sup>, 在平面内这是一种非完整约束。差动运动轮系是由两个轴线平行的驱动轮以及一个或多个从动轮组成。通过控制两个驱动轮达到一定的速度, 就可得到差动运动的效果。例如, 当两驱动轮具有相同的速度时, 就能使得机器人进行直线运动。当一个驱动轮的速度为零, 另一个驱动轮速度不为零时, 机器人就会绕前一驱动轮与地面的接触点作旋转运动。当两驱动轮速度出现其他情况时, 机器人的运动将会是这以上两种运动的合成。

差动运动的方式非常普遍, 它的各种衍生形式如: 中心可转向轮 (Centered orientable wheel)、阿卡曼 (Ackerman wheel) 等, 这些方式尤其多应用于交通工具。

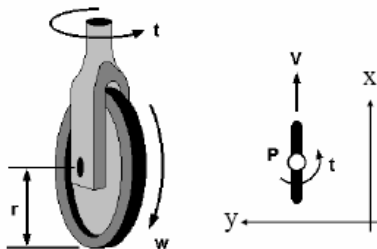


图 2.1.2 中心可转向轮

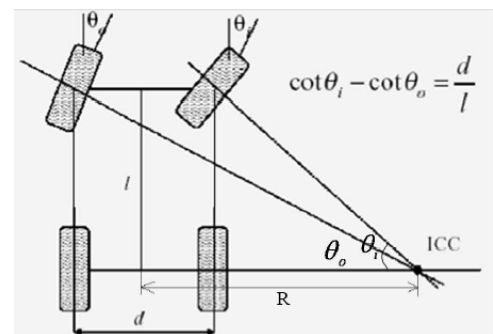


图 2.1.3 阿卡曼轮

#### § 2.1.2. 全向运动方式

全向运动方式是一种可以在平面内获得任意运动方向的运动方式，可以完全控制机器人在平面运动的三个自由度（两个水平运动分量和一个自身姿态旋转分量）。具有全向运动能力的运动系统使机器人可以向任意方向做直线运动，而之前不需要做旋转运动，并且这种轮系可以满足一边做直线运动一边旋转的要求，达到终状态所需要的任意姿态角。

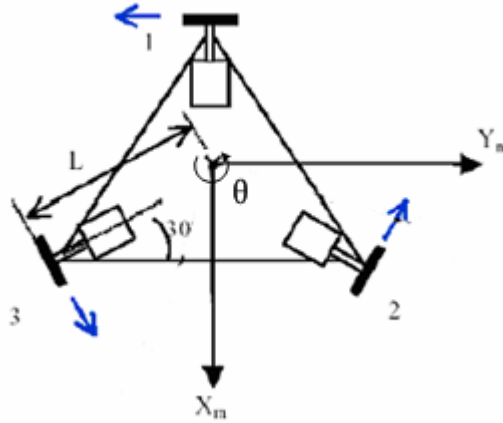


图 2.1.4 一种组合全向移动平台

上图为一种典型的组合全向移动平台的结构示意图<sup>[4]</sup>。这种结构可以实现车体坐标系下  $X_m$ 、 $Y_m$  平面坐标上任意方向的运动以及沿车体中心角度  $\theta$  的旋转。

### § 2.1.3. 选择全向运动方式的原因

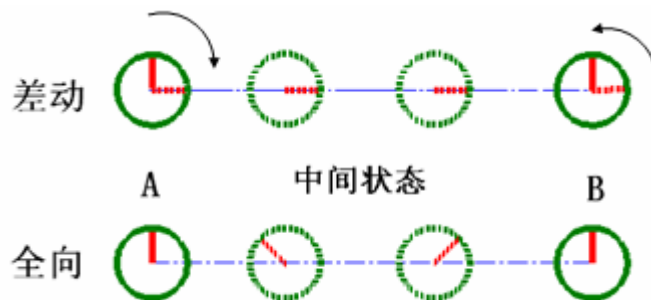


图 2.1.5 差动方式与全向方式的运动比较

如图 2.1.5 所示，圆圈代表机器人的轮廓，圆圈中心向外所引出的连线表示机器人当前的姿态正方向。考虑机器人完成由A点出发，运动到处于它侧向B点，并且仍然恢复先前的姿态角的任务。对于差动机器人来说，机器人必须首先在原地顺时针旋转  $90^\circ$ ，然后才能向B点运动，到达B点之后，再原地逆时针旋转  $90^\circ$ ，机器人完成这样一系列动作之后才能达到我们的要求。而对于全向机器人来说，无论它现处何种状态，都可以直接向B点运动，在完成任务的任一时间段内都可以调整自己的姿态角。

鉴于全向轮优异的动力学和运动学性能，如果将其应用于出现激烈对抗的机器人足球比赛中去，机器人将会更容易跟踪规划的轨迹，在运动的过程中达到我们要求的任一姿态，在诸如控球、射门的状态中提高机器人的灵活性、进攻性，使机器人在赛场上更具竞争力。

基于以上分析，全向移动轮式机器人成为 RoboCup 运动平台最理想的选择。目前全向移动已经成为各个球队设计发展的趋势，如何使全向移动平台性能的更加优异是各球队研

究的热点。

## § 2.2 全向轮介绍

全向运动的关键结构为全向轮，目前应用于实际的全向轮种类繁多，样式各异。本文将按照使用方式，将其分为单个全向轮和组合全向轮。

### § 2.2.1 单个全向轮

单个全向轮即单个轮子就具备全向移动的能力，一般为球型全向轮<sup>[16]</sup>，自由度为三，如下图所示，球形轮轮体为球形，通过控制分布在轮体周围的摩擦轮，实现球轮的驱动。但结构和控制非常复杂，而且应用范围有限，只能在环境比较理想的条件下（如地面平整）使用。

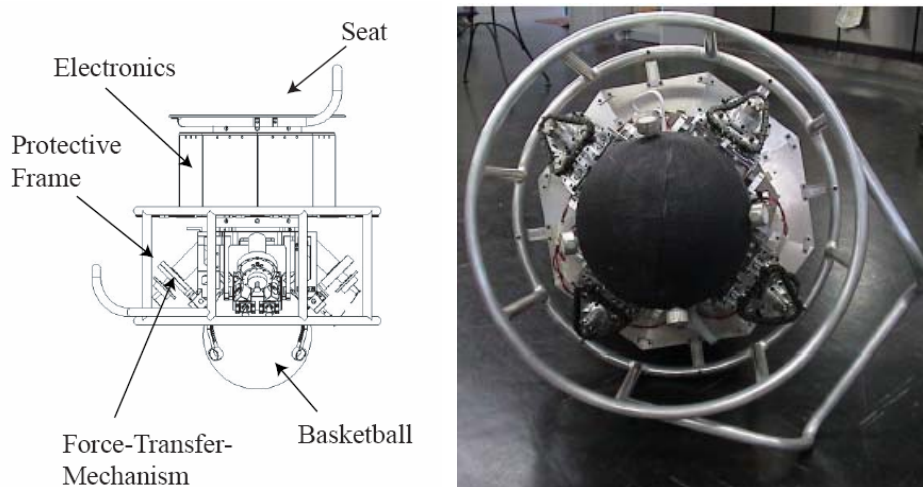


图 2.2.1 球形全向轮

### § 2.2.2 组合全向轮

组合全向轮设计思想是：驱动轮可以在不平行于驱动方向上自由滚动。将几个这样的全向轮组合成一个系统，在这个系统中单个的轮子在一个方向上可以提供扭矩，但在另外一个方向上（通常是轴线方向）能够自由滚动，组合起来的整个系统具有全向运动的功能。

组合全向轮已经在国内外发展应用了很多年，出现了各式各样的类型。下面就几种比较典型的组合全向轮进行简单的介绍。

#### (1) 麦克纳姆轮 (Mecanum wheel)

麦克纳姆轮<sup>[11]</sup>的轮缘上斜向分布着许多纺锤状的小辊子，车轮可以斜横向滑动。将这种轮子组合使用，当轮子绕固定的轴线转动时，各小辊子形成了连续的圆弧状包络线，所以可以使车体实现平滑的全向运动。

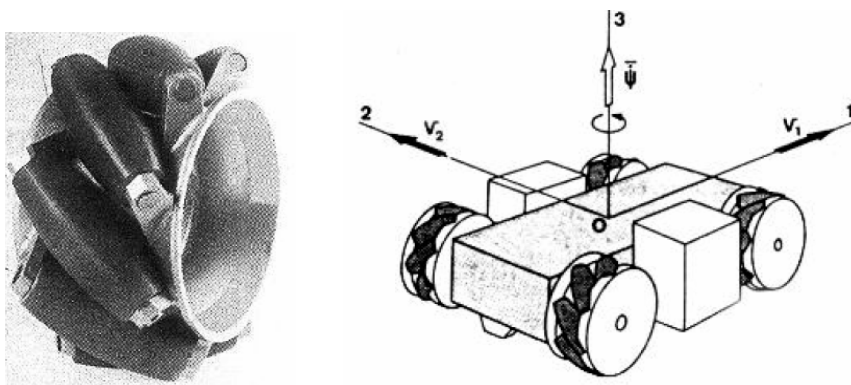


图2.2.2 麦克纳姆轮

## (2) 瑞士轮 (Swedish wheel)

在一个大轮子周围垂直方向上均匀分布若干小轮子，大轮子由电机驱动，小轮子可以自由转动，使机器人在大轮子垂直方向侧滑时没有摩擦。如果将三个或三个以上的这种轮子固连在机器人的底盘，每个轮子就可以提供一个与驱动轴重合的扭矩，这些扭矩的合成可以使机器人具备全向移动的能力。

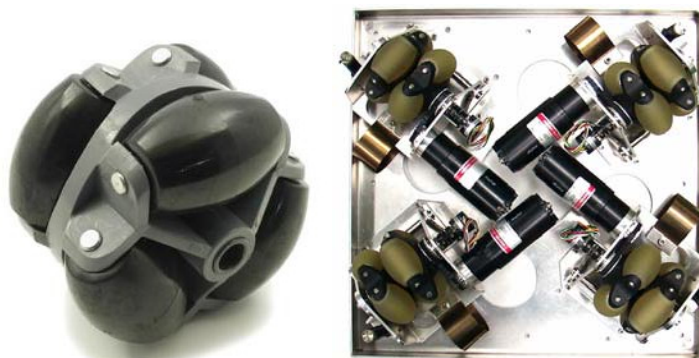


图 2.2.3 瑞士轮 1

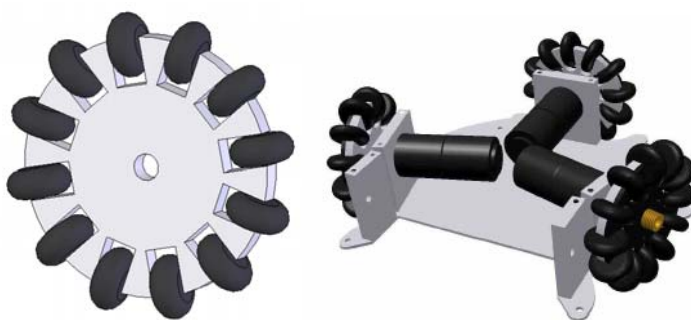


图2.2.4 瑞士轮2

使用以上原理的全向轮主要有图2.2.3<sup>[12]</sup>和图2.2.4<sup>[1]</sup>所示的两种。图2.2.3为两片式的结构，通过内外两层复合轮体与地面的连续接触。图2.2.4为单片式的结构，运动过程中单个小从动轮与地面接触为离散的点接触。

近年来又出现了图2.2.5所示的差补全向轮<sup>[10][13]</sup>。

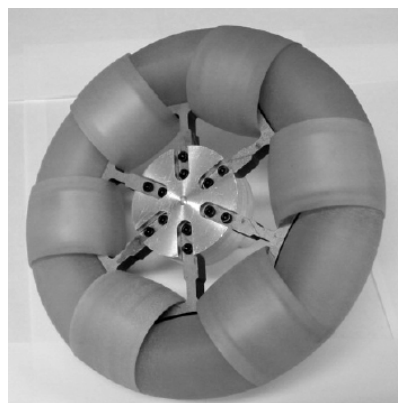
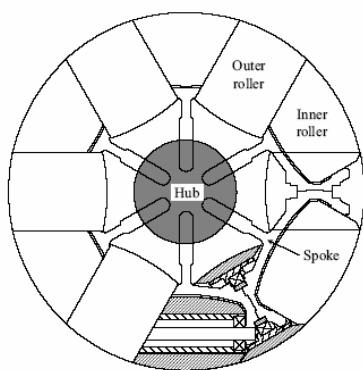


图2.2.5 瑞士轮3

### (3) 正交全方位轮 (Orthogonal wheel)

和瑞士轮的原理基本相同,正交全方位轮<sup>[8][9]</sup>接触地面的从动轮为两个球形的从动轮。如图所示,电机驱动轴为Z,球形从动轮可以绕自身的轴作自由运动,两轮的驱动系统存在 $90^\circ$ 相位的偏差。当电机驱动时,两球形的从动轮就可以交替的接触地面。

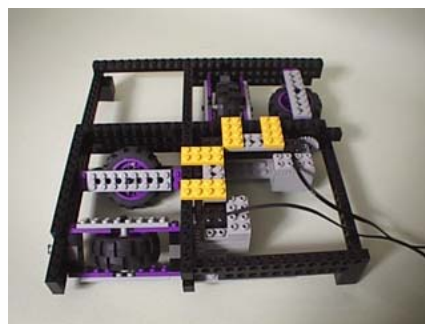
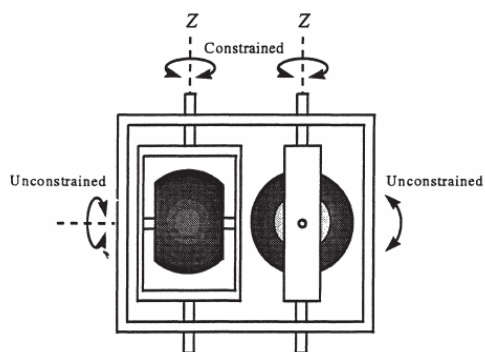


图2.2.6 正交全方位轮

### (4) 全向盘 (Omni-Disc wheel)

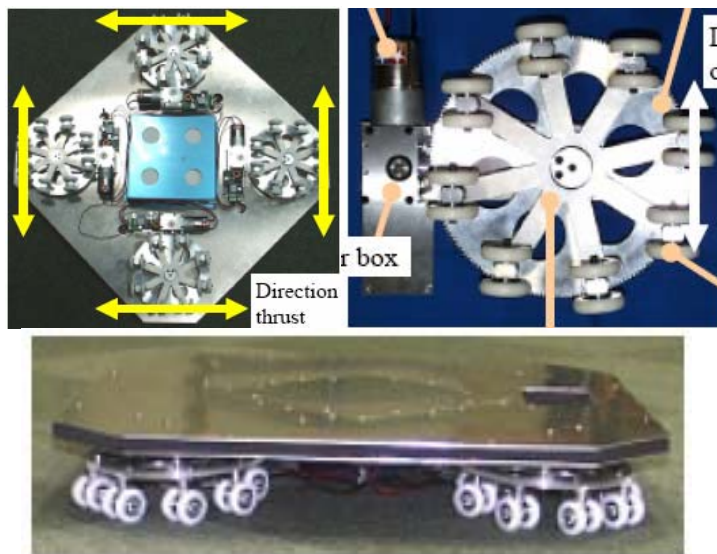


图2.2.7 全向盘

全向盘<sup>[14]</sup>安装着一组均匀分布、方向平行的从动轮组成,从动轮可以自由转动。将三个



或三个以上的全向盘安装在底盘上，并与底盘成一定的小角度（如 $4^\circ$ ），全向盘由电机带动时，靠底盘外侧的接触地面的从动轮就会提供侧向的驱动力，几个全向盘驱动力的合成使底盘实现全向运动。

### § 2.2.3 各种全向轮的优缺点分析

经过查找资料、实验验证，本文对上节介绍的各种全向轮优缺点进行了如下的分析：

表 2.1

名称		优点	缺点
单轮		灵活、可实现平滑的全向运动	结构、控制非常复杂，而且应用范围有限，只能在环境比较理想的条件下（如地面平整）使用
组合全向轮	麦克纳姆轮	可实现平滑的全向运动	加工非常复杂，运动效率低，承载能力比较弱，对起伏地面的适应能力差，而且小辊子容易与地面出现相对滑动，使控制精度变差。
	瑞士轮 1	与地面接触连续	对加工精度要求很高，安装非常复杂，而且由于其结构紧凑，只有在运动地表平面度比较理想的情况下才能实现全向运动的效果。在运动过程中倘若两片轮之间有杂物卷入，更会导致全向运动失效，并且，整套轮系具有较大的质量，运动不灵活。
	瑞士轮 2	工艺相对简单。	运动过程中单个小从动轮与地面接触为离散的点接触，当离散的接触点在轮滚动的过程中，出现多边形效应，造成整个轮体出现幅度较大的颠簸起伏，对运动控制的精度影响很大。
	瑞士轮 3	可实现平滑的全向运动	加工精度要求高，装配过程复杂，成本高昂。
	正交全方位轮	结构简单	鉴于球缺形驱动轮的体积和转动速度限制，正交方位轮目前只用在小型、低速的场合。
	全向盘	提供连续的驱动力，最大的优点是有较大的承载能力	结构复杂，且不能适用于高速的场合，绕自身作旋转运动困难

## § 2.3 NuBot 全向轮的设计

### § 2.3.1. 设计要求

由于参赛时间、以及科研经费的限制，论文设计必须从实际出发，所以设计开发考虑的首要因素就是：简单经济实用。考虑到今后科研的进一步需要还要使其适用范围广。

综合以上分析，全向轮的设计需满足如下要求：

- a. 结构简单
- b. 材料、配件容易购买
- c. 轮子与地面的接触点尽可能地连续变化。
- d. 结实耐用。
- e. 适用于激烈对抗的比赛环境
- f. 可以在条件较差的地面上运动

### § 2.3.2. 结构介绍

最终设计完成的全向轮如下图所示：

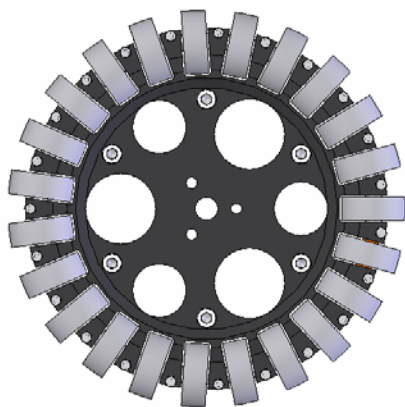


图 2.3.1 NuBot 全向轮 CAD 图

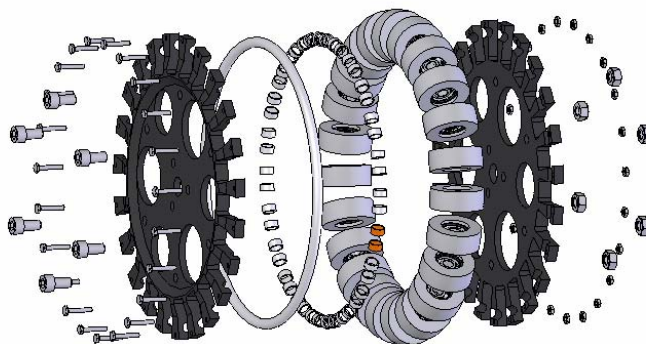


图 2.3.2 NuBot 全向轮 CAD 爆炸图

本文称之为 NuBot 全向轮为单片式结构。

从动轮选用摩擦力系数大、耐磨并且减振性能好的材料，从动轮外缘弧度与全向轮整体外缘弧度相同。从动轮与轴承外圈固连。

使用一根可以弯曲并且具有一定柔性的轴（以下称之为整轴），将若干小从动轮与相应的轴承档圈穿连起来，再将整轴的开口端头连接在一起。

轮轂由结构相同的两片轮轂片对称结合，轮轂片边沿部分均匀分布若干轮轂齿，在轮轂齿最薄弱处设计加强筋进行加固。

将轮轂与从动轮以及整轴装配，使小从动轮与轴承档圈均匀分布在轮轂齿之内，整轴由轮轂中的轴槽夹持。

### § 2.3.3. 全向轮的设计

这种全向轮虽然结构简单，但从动轮之间的过渡不连续，存在一定的间距（如图 2.3.3 所示）。这些间距在轮滚动的过程中，出现多边形效应，造成整个轮体中心颠簸起伏（如

图 2.3.3 所示,虚线就是多变形在滚动过程中,中心划过的轨迹。)。对控制运动精度的影响很大。



图 2.3.3 从动轮之间的过渡

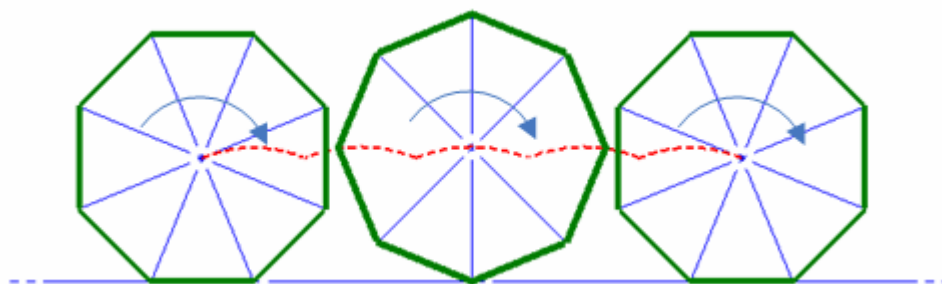


图 2.3.4 多边形效应

设计从减小从动轮间的间距入手。

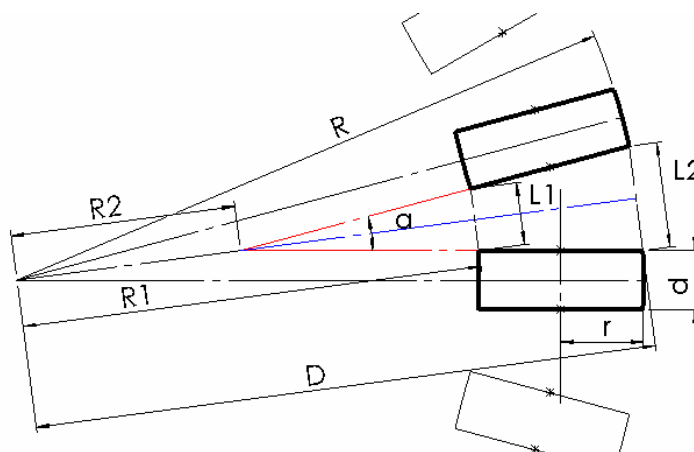


图 2.3.5 全向轮设计尺寸示意图

经过分析可以得出减小动轮间距  $L2$  的方法有：增大整轮轮径  $D$ 、减小从动轮半径  $r$ 、增多从动轮的数目，从动轮外缘弧度与全向轮整体外缘弧度相同等。

但由于客观条件的限制，如从动轮的加工、材料选择、购买困难，平台尺寸的限制，设计必须从实际出发。最后方案确定为，我们选择了市场上可以购买到的直径为 32mm 的旱冰鞋轮作为从动轮，大轮轮径  $R=100\text{mm}$ 。根据这些先决条件，可以通过减小从动轮的厚度  $d$ 、在允许的范围内减小轮毂齿间距  $L1$ ，来改善全向轮的设计性能。

设计完成结果为  $L1=4\text{mm}$ ， $d=12\text{mm}$ ，全轮包含从动轮数目为 23。

#### § 2.3.4. 全向轮的强度分析

为了保证全向轮使用的可靠性，需要对设计的全向轮装配体进行强度分析。本文使用有限元分析软件 COSMOS 对全向轮模型进行静应力分析。



为了降低难度，将模型进行了简化，验证从动轮数目减少为一，整轴与轮毂片固连为一体。主要校核轮毂与整轴的强度。

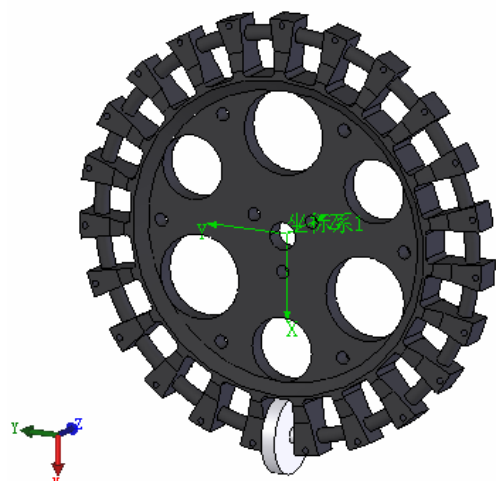


图 2.3.6 整体坐标系

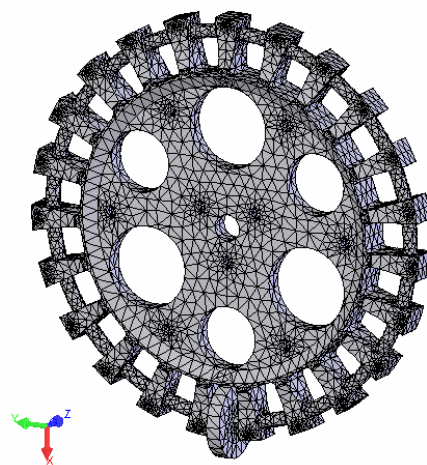


图 2.3.7 有限元模型

#### 1) 整体坐标系的定义

整体坐标系，采用右手法则的直角坐标系，如上图所示。坐标系的中心在轮子中心，X 轴方向向下，轴 Z 为轮子的轴向。

#### 2) 有限元模型

网格类型为实体网格,所用单元均为二阶的 16 节点四面体单元,单元个数为 40345,节点的个数为 69503。如图 2.3.7 所示

#### 3) 材料数据

表 2.2

零件名称	材料	密度 ( $\text{kg/m}^3$ )	热膨胀系数	强度极限 ( $\text{N/m}^2$ )	弹性模量 ( $\text{N/m}^2$ )
轮毂	Nylon 6/10	1400	$3\text{e-}005$	$1.42559\text{e+}008$	$8.3\text{e+}009$
整轴	AISI 1015 steel	7870	$1.2\text{e-}005$	$3.85\text{e+}008$	$2.05\text{e+}011$

#### 4) 载荷

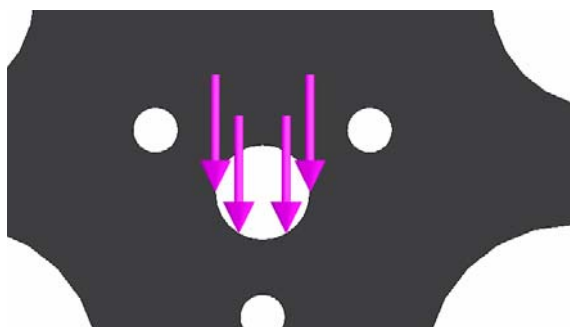


图 2.3.8 载荷

在轮毂轴孔处加入 10kgf 轴承载荷。如图所示

## 5) 结果分析

## a. 形变结果

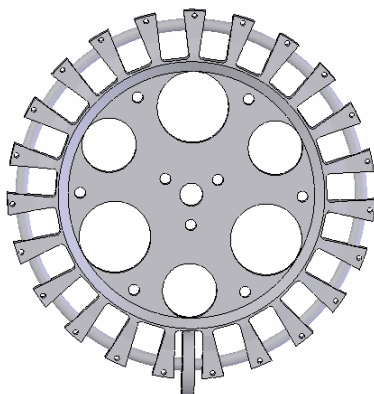


图 2.3.9 整体应力形变图

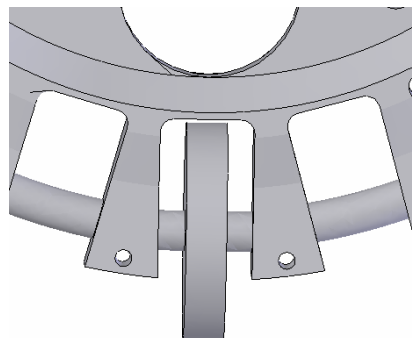


图 2.3.10 放大的局部应力形变图

可以看到整轴与轮毂的形变量非常小，在平台承受 40kgf 的压力下，全向轮形变量满足要求。

## b. 应力结果

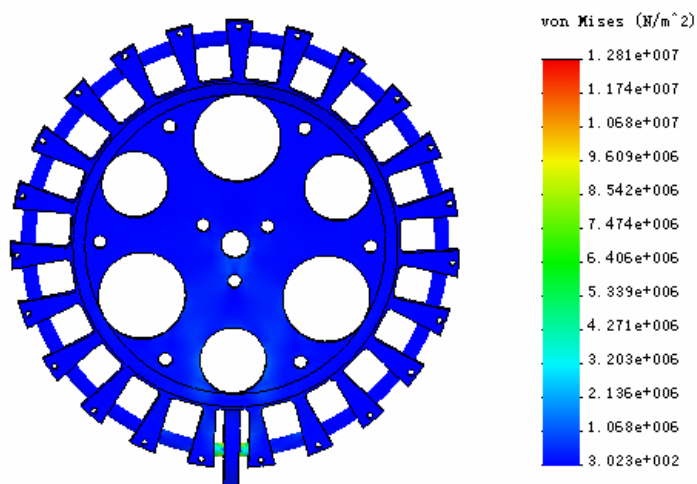


图 2.2.11 整轮的应力分布图

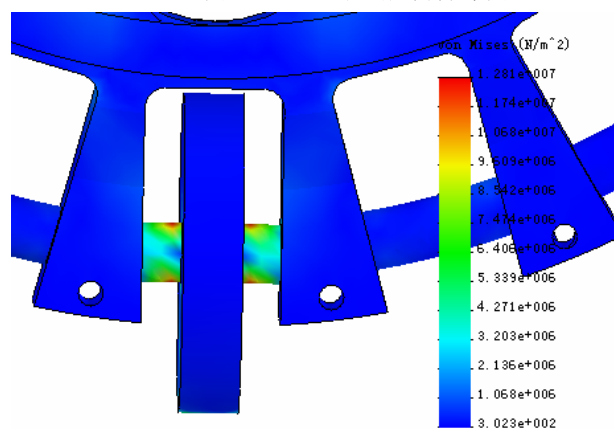


图 2.3.12 放大的局部应力分布图

在图上可以看到装配体的最大应力出现在从动轮、整轴、轮毂的配合处，最大

应力结果为  $1.281\text{e}+007\text{N/m}^2$ , 小于整轴和轮毂的最大需用应力。

c. 结论

根据上述分析, 整轴和轮毂在静载的情况下变形和应力都符合设计和材料强度的要求

### § 2.3.5. NuBot 全向轮的效果或特点

- a. 从动轮外缘与大轮外缘作了相适的弧形设计, 使运动时与地面的接触点变化连续, 降低了多边形效应。
- b. 从动轮中轴承的使用更能使轮子发挥好全向性能。
- c. 在全向轮运行时, 从动轮之间的间隙与地面作用的效果类似于汽车轮胎上用来增强摩擦作用的纹理, 配合从动轮外表面防滑材料的选择使全向轮抓地性能良好, 可适应条件较差的地面
- d. 从动轮之间的连接采用一根单独的整轴, 整轴具有一定的柔性。运动中出现从动轮之间的过渡时, 起到一定的减振效果
- e. 从动轮外表面耐磨、防滑、可以起到一定的减振效果。
- f. 在轮毂的齿根部这个薄弱环节设计了加强筋, 使轮子结构更为坚固, 从而避免了出现由于运动过程产生扭矩力使轮毂齿根断裂或损坏的现象, 延长了全向轮的实用寿命。
- g. 全向轮整体设计简单, 加工, 组装方便, 成本低廉。

### § 2.3.6. 附图及具体实施方式



图 2.3.13 全向轮实物



图 2.3.14 安装于机器人上的全向轮

1. 从动轮选择市场上可以买到的旱冰鞋脚轮。材料为 PU (聚氨酯), 兼具防滑, 耐磨的特性。
2. 轮毂也采用模具铸造的方式, 因为两块轮毂板完全相同, 所以只需要一副模具, 降低了成本。
3. 整轴可选用尼龙棒或钢丝绳, 接头相应使用胶粘或焊接。
4. 按照装配图将各零部件装配成一个整体。

## § 2.4 小结

本章对地面移动机器人运动方式进行了简要的介绍，通过对几种典型方式的比较，阐述了本文选择全向运动方式的原因。结合目前应用于实际的全向轮，本文对其优缺点进行了详细的分析。最后，基于课题需要，本文设计了一种实用性较强的全向轮（NuBot 全向轮），对其结构、强度进行了理论分析和校合，经过大量的试验和改造，实现其结构的优化和工艺的改进，最终完成了实物的制作。经过实践证明该全向轮结构简单、制造方便，能够达到较好的全向运动效果，并且能够适应较差的地面。

### 第三章 全向移动平台的结构设计

本章研究设计了一种应用 RoboCup 中型组机器人足球赛的运动平台, 这个平台具有全向移动的能力。根据不同的功能, 将该平台分成各个不同的模块, 并针对主要模块的设计进行详细介绍。3.6 节主要对整合功能模块的整体设计进行了介绍。

#### § 3.1 全向移动平台的组成

本文设计的全向移动平台系统结构图如图 3.1.4 所示:

按照机构连接关系, 我们将机器人整体分为上下两层。

上层包括笔记本、全向视觉系统、射门模块、电源模块和其他传感器。下层包括驱动电机、电机驱动控制模块。这两层之间通过隔振模块和限位模块进行连接。

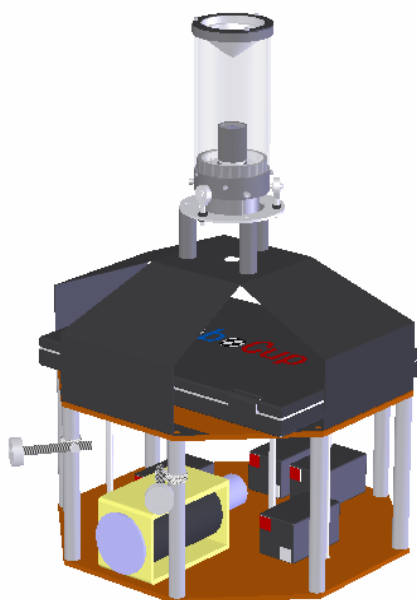


图 3.1.1 上层

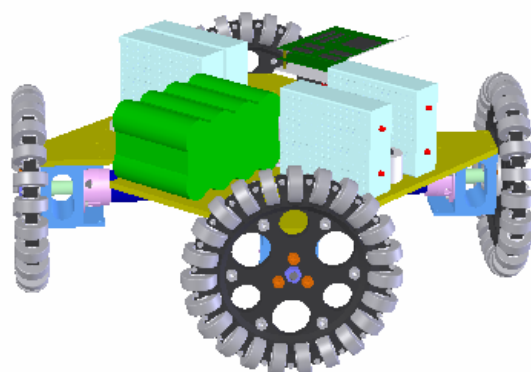


图 3.1.2 下层



图 3.1.3 隔振与限位模块

# The robot of the NuBot team

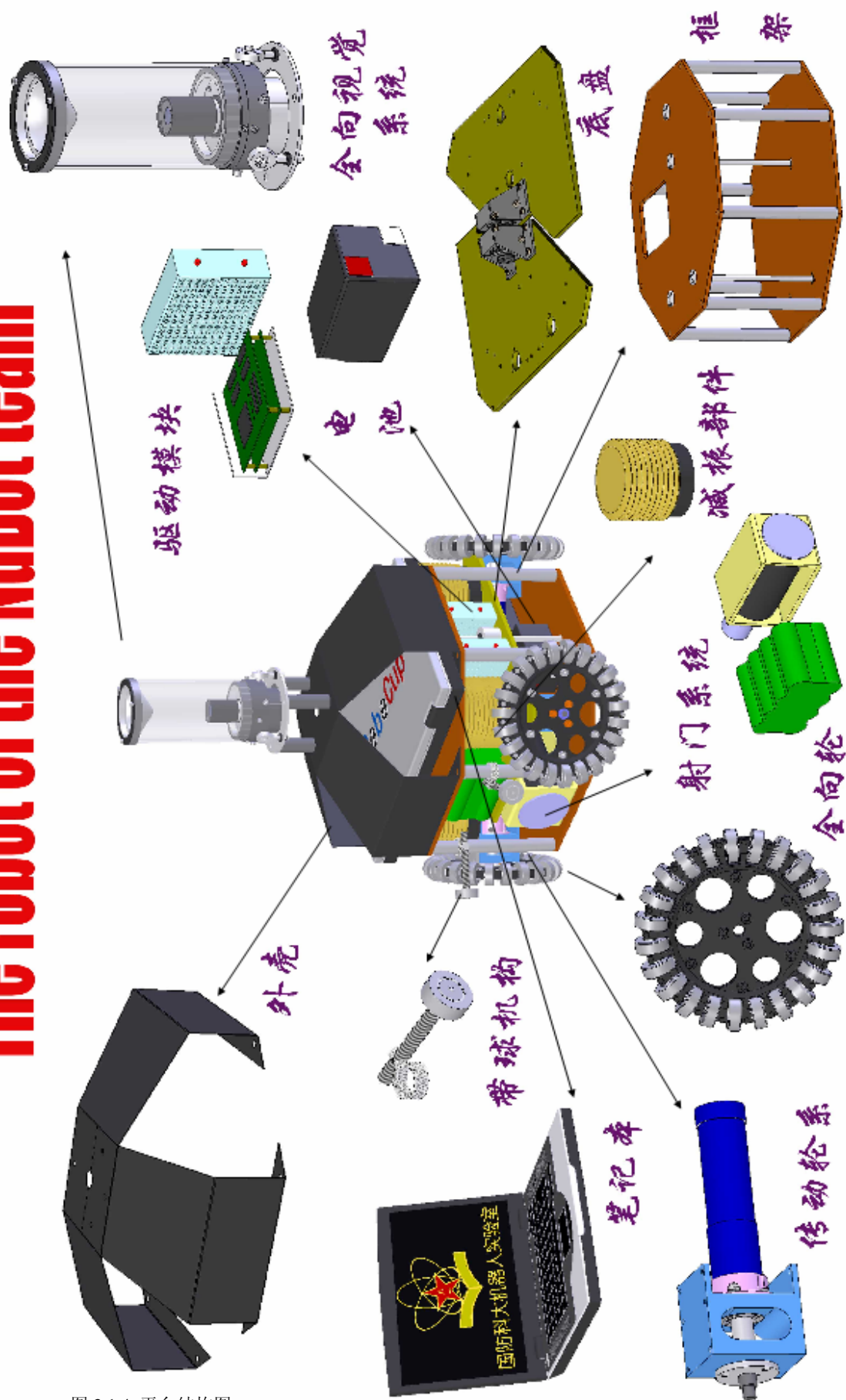


图 3.1.4 平台结构图



## § 3.2 驱动轮系的设计

### § 3.2.1 设计要求

驱动轮系为电机与全向轮之间连接的部分，它的作用是将电机的输出扭矩传递到驱动轮上。

驱动轮系的设计满足如下要求：

- a 尺寸符合比赛对机器人的要求
- b 结构简单、合理，拆装方便
- c 强度及刚度复合要求
- d 保护电机的输出轴，避免连接驱动轮带来的载荷直接作用到电机轴上。
- e 扭矩的有效传递

### § 3.2.2 轮系的设计介绍

考虑以上要求，做出的设计如下图所示：

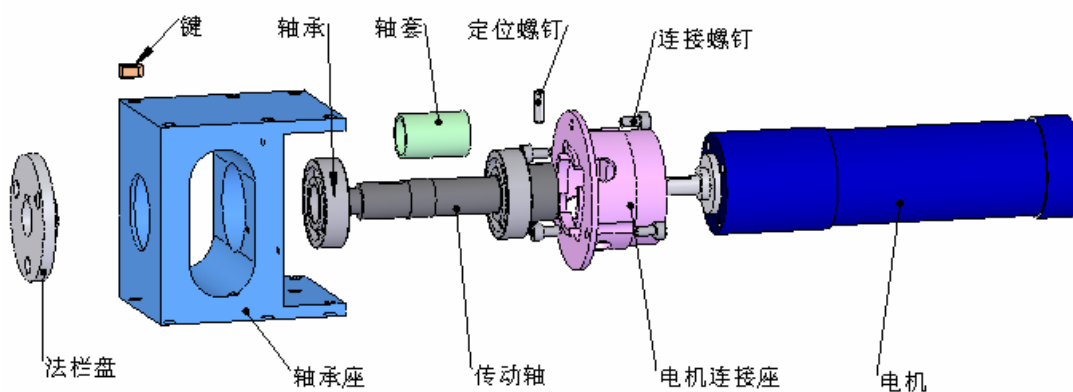


图 3.2.1 轴系爆炸图

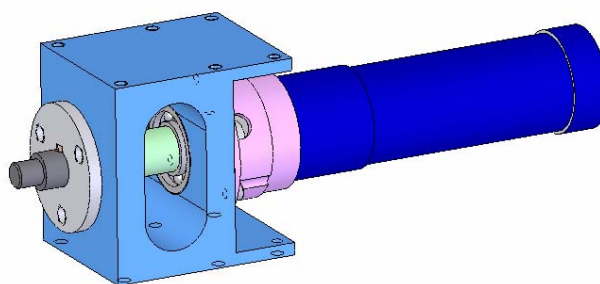


图 3.2.2 轴系装配图

由于规则对机器人尺寸的限制，电机与驱动轮之间的距离要尽可能短，所以采用电机与传动轴直连的方式。其中法兰盘的设计是为了防止全向轮的失稳及传递较大的扭矩。电机连接座设计成与轴承座的中心轴孔配合形式，保证了整个装置的同心度。

### § 3.2.3 设计使用时遇到的问题：

1. 由于电机传递的扭矩过大，传动轴与电机连接采用传统定位螺钉限位的方式容易出现松动滑丝的现象，最后改用 D 型孔配合的方式。

2. 电机工作时出现绕轴线的扭动, 分析后得出是轮、轴、电机体系的不同心的原因, 经过工艺改进, 及增加轴承座中心定位轴孔的配合形式, 问题得以解决。

### § 3.3 底盘的设计

#### § 3.3.1 设计要求

机器人的设计采用四轮驱动的方式, 但在平面内运动时会出现如何保证四点都着地的问题。如果四轮中有驱动轮与地面接触不好, 容易出现打滑、空转的现象, 影响控制精度。虽然可以在机器人组装后进行手动调整, 但效果难以保证。而且由于机器人设计时考虑到室外应用的要求, 机器人底盘的结构必须在较差的地面上仍然保证与地面的良好接触, 简单组装的方法显然不能满足要求。

#### § 3.3.2 底盘的设计介绍

通常四轮着地问题的解决方式是四轮悬挂(如汽车等悬挂装置)。但是结构过于庞大复杂, 成本较高。设计初期曾经设计几种四轮独立悬挂的方案, 但效果都不理想。

最终采用四轮中心铰接的方式, 将四点问题演变为两个三点着地的问题。其中关键的铰接部件, 及与底盘、轮系的装配如图所示。

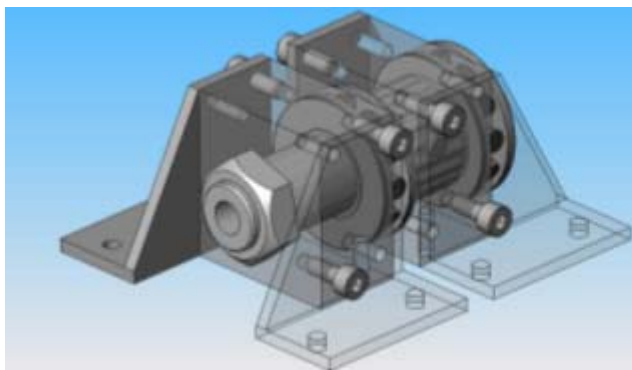


图 3.3.1 铰接装置

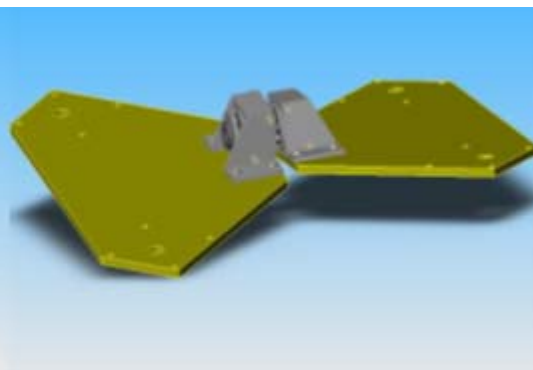


图 3.3.2 底盘结构

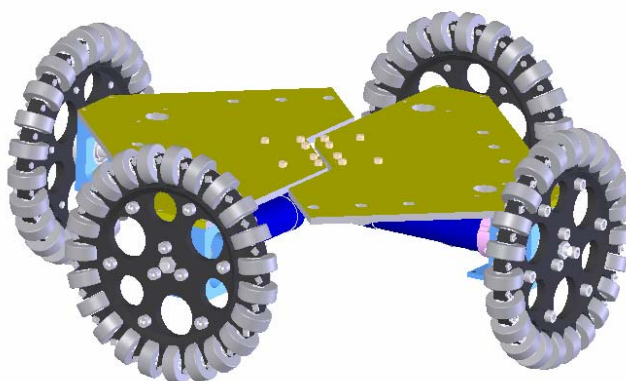


图 3.3.3 底盘与轮系的装配图

铰接处设计采用端面轴承和滚针轴承, 降低底盘在铰接处的摩擦, 使底盘不仅能够在平面内保持各驱动轮紧压地面, 而且还能够适应较大的起伏地面, 满足室外环境的要求。

最终完成的实物如图所示。





图 3.3.4 底盘实物图

### § 3.4 减振系统的设计

由本章第二节介绍可知，全向轮的从动轮之间有一定的间隙，这样由之带来了多边形效应。机器人运动时，出现间隙之间的过渡的情况就会造成轮体质心的起伏，带来一定的冲击和振动。连续的振动和冲击会使系统在某一激振频率作用下产生共振，超过设备的允许响应值，使设备失效或破坏。长期振动或反复冲击使设备疲劳、损坏。

减小或消除的危害有以下主要途径：

- 1) 减小或消除振动源的激励。提高设备的静、动平衡要求；对具有较大辐射表面的结构涂以阻尼层，以减弱激励引起的振动。
- 2) 防止共振，减小动力响应。改变系统的固有频率或扰动频率；防止扰动特征和振动系统的共振特性之间的不良耦合等。
- 3) 采取隔振措施，以减小振动的传递。
- 4) 主动减震。

#### § 3.4.1 设计要求

按照最初的设计，全向轮整轮直径为 200mm，单轮具有 20 个从动轮，正常工作时最大速度设定为 2.5m/s，那么机器人系统是一个中低频的振动系统，激振频率分布在  $0 \sim 91.5 \times 4\text{Hz}$ 。

最初的振动对实验采集图像的影响：



图 3.4.1 正常的图像



图 3.4.2 振动造成的模糊和错位



图 3.4.3 正常的图像

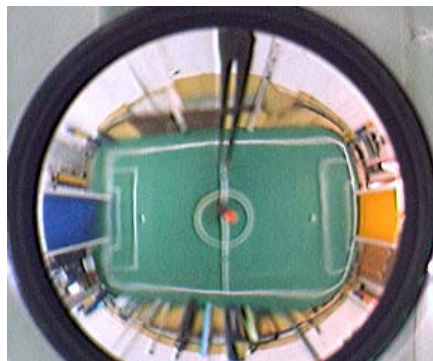


图 3.4.4 平台倾斜造成图像的变形

结合机器人的实际要求，我们对系统的设计提出如下要求：

- 1) 图像采集设备，加速度计，码盘等传感元器件，以及笔记本等处理设备工作在稳定的平台上。
- 2) 运动机构、执行单元多。要求结构稳定，安装位置固定，不会出现零件、线路的松动、脱落甚至被破坏的情况。
- 3) 由于机器人对图像反应的实时性要求很高，加入减震后的，上层系统的运动不能有大的时延性。
- 4) 具有一定的室外活动能力，能够适应有一定起伏地形环境，能够在公路上平稳运行。

### § 3.4.2 设计思路

结合具体实际我们做出如下探索：

#### a. 防止共振和模态控制

方法是从振动系统本身的结构入手，在设计阶段就进行动力计算，使设计的系统振动尽量小，恰当地选择系统的物理参数，如调节它的质量和（或）刚度，用以调整系统的固有频率防止共振，使系统响应在某阶固有模态的幅度减小，抑止主要的振动模态等。

如果振源是有限频带范围内的简谐振动，那就可以修改结构参数，使其固有频率避开激振频率。但我们当前的机器人结构为复杂的体系，又要承受分布很宽频带的随机激励，所以很难用简单的方法进行减振。

#### b. 改变振动的能力分布

改变振动系统的响应分布情况，使关键部位响应在一定幅度之内，不致发生振动过大的情况。在振动体内找到振幅最小的支撑点，在这个基础上构建减震结构。避重就轻可以获得比较好的效果。减震结构的主要防震部件也应该安装在减震结构的低振幅点处。

#### c. 消耗能量，采用阻尼减震器

众所周知，复杂结构的模态响应与模态阻尼比成反比，因而增大阻尼比可以抑止振动。引入阻尼使结构或材料在受循环应变时将动能转变为热能的一种耗散能量的性质。结构受激励之后外力所作之功转换为结构之动能与势能，如果没有能量的损耗，则因能量积累就会引起共振，导致结构破坏。而阻尼耗散能量能够抑止共振、降低噪声水

平，提高控制的稳定性。

d. 安装减震器或隔振器

遇到结构参数已经不能改变或者已经加工定型的部件或是贵重仪器需要减震或隔振时，可采用此被动减震措施，在振动出现的关键部位安装合适的减振和隔振部件。

e. 控制作用载荷

减小激振力可以使振动系统的振动显著减小。车体的减小作用载荷可以从激振发生源逐步向上，按照串连的关系逐级消除。对于上层系统，应考虑质量分布对系统造成的影响，使其作用支点尽量对称分布在质心周围，这样就可以避免运动产生的附加力矩对系统的影响。

### § 3.4.3 减振方法、减振部件的选择、实验和开发

从目前的市场调查来看，市面上常见减震器一般面向大型重载机械、车辆的减震上。体积硕大，结构不紧凑、范围不可选择、调节。不能满足我们这种频带宽，强度变化大的要求。我们可以根据减震器的设计原理针对机器人当前的应用场合作一些适当的修改和简化，下面是一些方案经过实验尝试的方案：

a. 弹簧

弹簧常用来做缓冲和吸振，弹簧可以用来改变机器的自振频率。对与激振频率来说起到了低通滤波的作用。理想的弹簧减震的变形曲线如图所示：

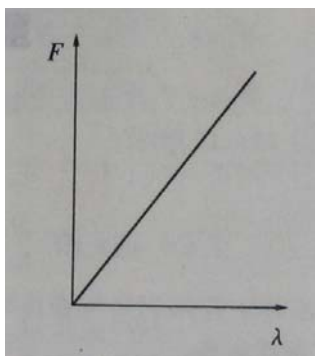


图 3.4.5 理想弹簧的变形曲线

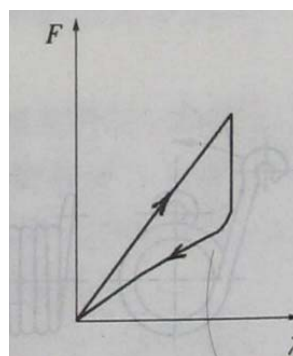


图 3.4.6 阻尼弹簧的变形曲线

在变形后回复没有能量的损失，不能起到减振的效果。为了缓冲和吸振能达到良好的效果我们选择有阻尼的弹簧，回复曲线如图二所示，曲线所围成的面积就是一次振动周期消耗掉的能量。

由于市场上可以买到的现成的阻尼弹簧很少，而且多用于大型机械，过于笨重和庞大，不能选用。所以制作了一种阻尼弹簧进行实验，如图所示



图 3.4.7 试制的阻尼弹簧

外侧是普通弹簧，中间填充了海绵和胶状的粘合物，在弹簧变形时，填充物与弹簧摩

擦消耗能量。经过实验，具有一定的减振效果，但个体差减振性能异较大，阻尼比很难掌握，实际应用较困难。

#### b. 空气弹簧

空气弹簧是利用橡胶气囊内部压缩空气的反力作为弹性恢复力，利用空气的阻尼特性作为阻尼力制造的一种弹性元件。它具有如下特点：①空气弹簧具有非线性特性，可将其特性曲线设计成理想形状；②空气弹簧质量轻，内摩小，对高频振动有很好的隔振消声能力；③空气弹簧的刚度和承载能力可以通过调节橡胶气囊的内压力来调整，利于空气可以达到阻尼的效果；



图 3.4.8 空气弹簧

但空气弹簧的制造工艺复杂，费用高。

根据空气弹簧的设计原理针对机器人当前的应用场合作一些适当的修改和简化。但由于时间的关系只进行了一些尝试性的实验，对冲击和振动还是有比较好的隔离作用。

#### c. 磁铁减震：

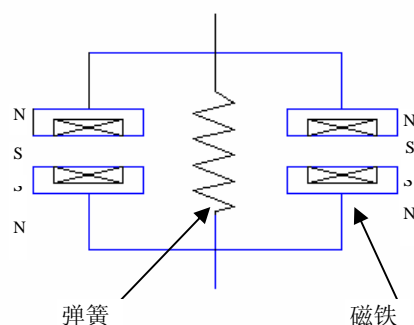


图 3.4.9 磁铁减振器

受到磁铁异极相斥原理的启发我们尝试开发磁铁减振部件。

磁体材料在交变应力场中因为磁畴向量的旋转，有较高的阻尼，特殊的铁磁材料如 NIVCO-10（近似含钴 72%，镍 23%）就是因为具有磁弹性滞后而有比其他金属高的多的阻尼。

但是在开发中遇到了问题，笔记本、电机等器件对磁场非常敏感，由于机器人尺寸的限制，减振部件会和这些器件距离较近，为保证机器人的正常工作，要将需要保护的器件与磁场隔离。但磁场屏蔽通常是对直流或甚低频磁场的屏蔽，其效果比对电场屏蔽和电磁场屏蔽要差得多，因此磁场屏蔽是个棘手的问题。

#### d. 气囊阻尼弹簧：



受打气筒、注射器的启发，结合弹簧的特性。我设计了一种减振器，兼具弹簧和气垫的特性。结构如图所示：

气囊为具有波纹结构可以自由收缩和胀大的橡胶制品，在气囊的内部安装有普通的弹簧。

气囊阻尼弹簧的原理，将气囊上下两个平面作为工作面，当压力变化着作用于这两个面时，气囊和弹簧就会收缩和膨胀，这时气流进出气囊的两个气孔对外界做功产生能量消耗。

选择弹簧的不同刚度可以控制气囊的缩胀程度，在气孔处安装阀门可以调整进出气速度，调节阻尼的大小。

在设计阶段的市场调查中，找到了一种脚踩式打气筒正好可以满足设计需要。经过实践证明这种减振方法减振效果明显，而且简单易用，成本低廉。在打气筒两侧的进、出气安装限流伐，还可以控制气体进出的速度，调节气囊阻尼弹簧的阻尼比。

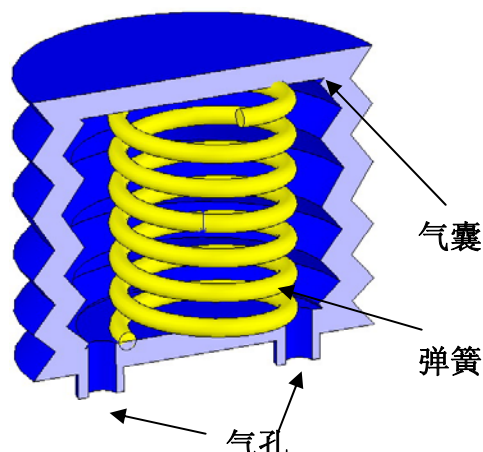


图 3.4.10 气囊阻尼弹簧



图 3.4.11 装有限流伐的打气筒



图 3.4.12 打气筒分解图

#### e. 绳拉结构

分析车体的运动特性，发现在竖直方向上振动分量最大。水平面上的分量较小。这就需要找到什么样的连接部件能够达到不同方向上的不同连接刚度。实现上层结构与底层运动结构连接时使竖直的振动分量消除。

受晾衣服绳现象：挂上衣服后挂绳下垂幅度很大的启发，考虑如下受力情况：

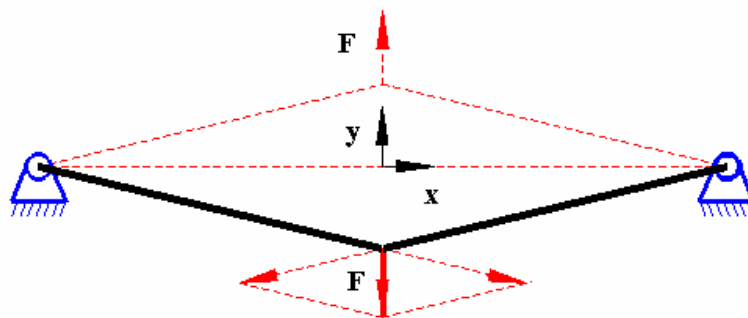


图 3.4.13 竖直方向的力作用

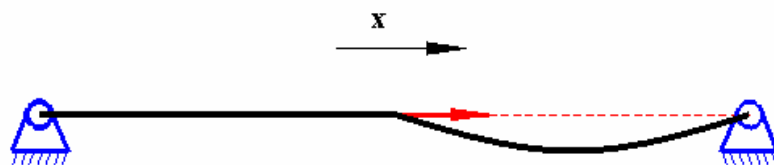


图 3.4.14 水平方向的力作用

如图所示，绳在竖直力  $F$  的作用下在  $Y$  方向上有较大的位移，用同样大小水平力  $F$  的作用下在  $X$  方向上却只能有较小的位移。也就是说绳拉结构在沿绳垂直的方向上刚度小，在沿绳方向上的刚度大。

结合以上分析，可以解释火星车轮子<sup>[15]</sup>要做成旋转镂空型



图 3.4.15 火星车轮的螺旋柔性结构



图 3.4.16 螺旋结构填充阻尼材料

应用上面的原理，设计制作了一个绳拉辐条结构的轮体，（如下图所示）将轮体外缘与中心用钢丝绳拉接，实验显示其刚度显著降低。如果在轮体内再引入阻尼填充物，相信会达到很好的减振效果。



图 3.4.17 绳拉辐条结构的轮体

#### § 3.4.4 具体实施方式

减小车体的作用载荷从激振发生源逐步向上，按照串连的关系逐级消除。

##### A) 在从动轮上减振

要求小轮的表面为弹性阻尼材料，其目的是为了从振源处减振。如德国 FU-Fighter 球队的从动轮采用的就是弹性橡胶做成。考虑到这些，在选择从动轮时就特意选择了表面材料为聚氨酯（PU）这种减振效果较好的轮子。



图 3.4.18 PU 轮

## B) 在轮轴上减震

旋转轴或者轴系为弹性阻尼材料，降低系统的刚性。

### 1. 从动轮轴

由于从动轮轴与轮毂配合间隙只有 1mm，这样细小的距离却要求轴达到需要的柔性比较困难。考虑的软轴效果，设计采用 6mm 尼龙棒，经实验证明可以达到一定的减振效果。

### 2. 轮盘与电机连接轴之间

在轮盘与电机传动轴上引入橡胶垫，隔离来自轮子径向的振动，为了给轮子提供轴向的扭矩，橡胶垫设计成三菱形，通过前后两块盖板压装在轮体中心，其次附带着消除了一部分急启或急停时的轴向冲击扭矩。

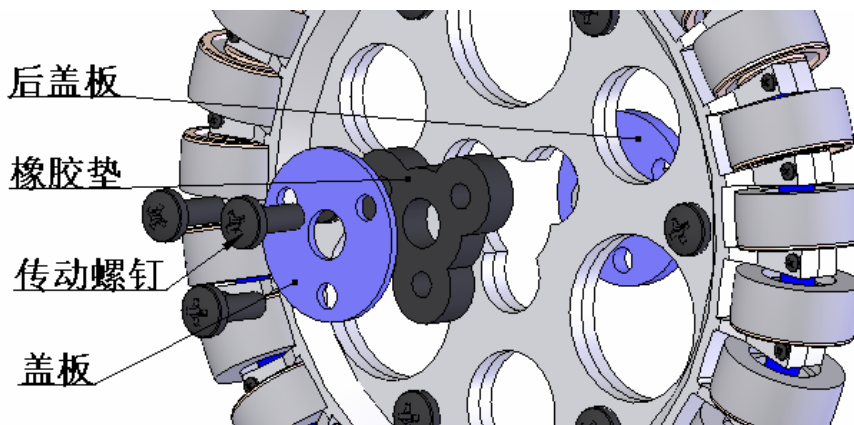


图 3.4.19 在轮盘与电机连接轴之间减振



图 3.4.20 实验模型



在设计之前利用废旧的材料做了一个相似结构的模型进行实验验证。模型如图所示：

通过在机器人上使用和未使用两种不同情况下（如图 3.4.21 与 3.4.22 所示），实验验证橡胶圈的减振效果。实验发现，橡胶确实可以起到一定的隔振效果，但橡胶隔振层要柔软，并且达到一定的厚度，才能较好的减振。

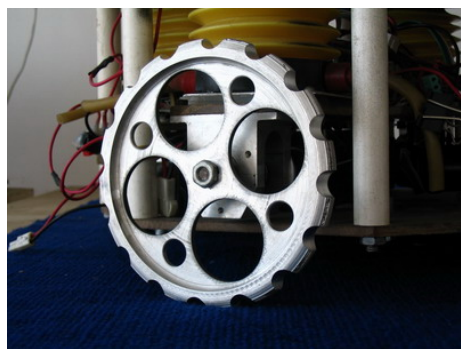


图 3.4.21 未使用橡胶隔振的实验装置



图 3.4.22 使用橡胶隔振后的实验装置

C) 底盘于上层模块之间。

使用气囊阻尼弹簧，实验证实起到一定的减振效果，同时消除地面不平带来的起伏。方法：在最佳限位处限位，在最大位移处引入弹性阻尼功能单元。

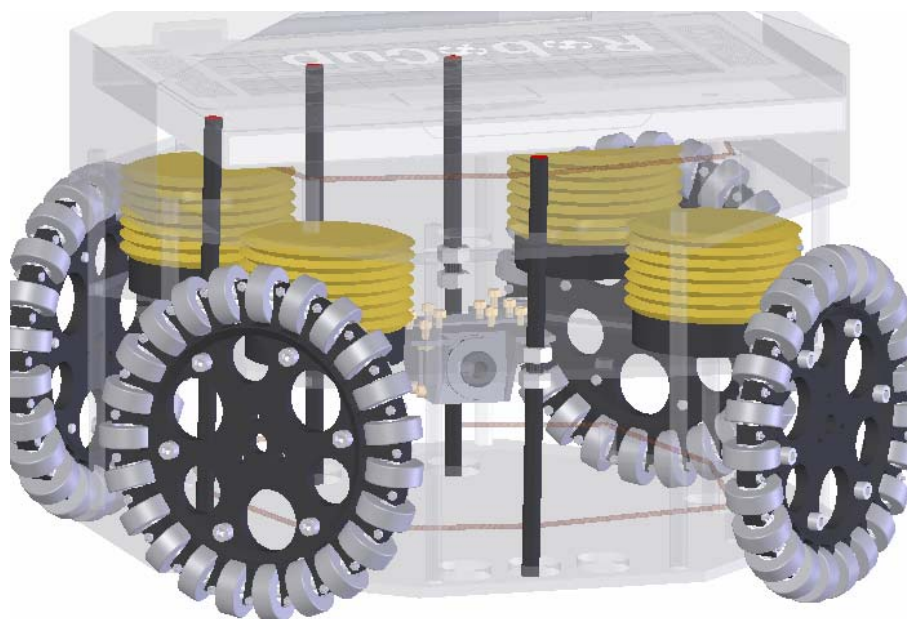


图 3.4.23 底盘与上层模块之间的减振

D) 图像等传感器元件层的单独隔离。

这是一种最直接的一种方法，在位移不敏感方向能够达到很好的隔振效果。而且由于它在基体上不分担压力的缘故，可以将低频段的振动也完全隔离。

具体实施方法是，将传感器单独安装在一个结构层内，这个结构层安装独立的从动轮，直接支撑在地面上。水平方向上用绳拉结构与驱动层连接。这样即能保证传感器层与机器人随动，又能隔离来自垂直方向的振动。实验证明这种结构达到了很好的减振效果，不仅能够有效的隔离了高频段的冲击，而且消除了低频、超低频的振动。



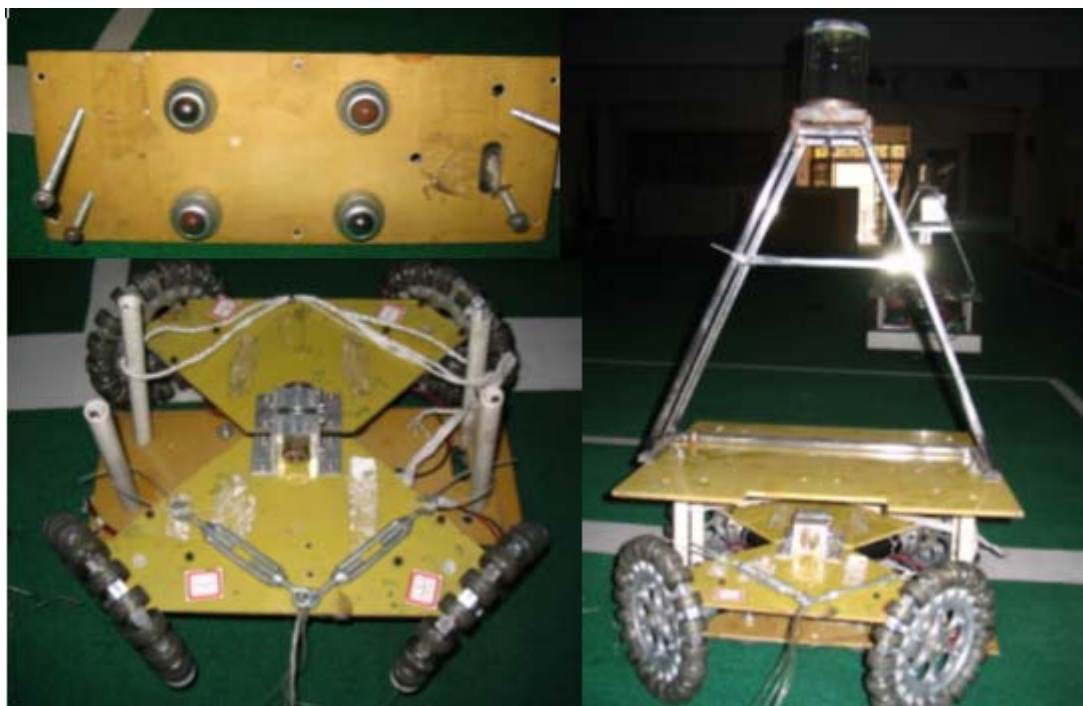


图 3.4.24 传感元件单独隔离的方法

这种结构的缺点就是应用场合只能局限在 RoboCup 比赛场地等较为理想的地面。而且设计上必须考虑对隔离系统绳拉的牵引方式，不能使其头重脚轻，出现离地现象。

以上内容是在平台设计制作初期进行的研究和分析，经过大量的试验验证。虽然一些方法十分有效，但是考虑到制作成本、周期以及应用的范围，最终本文所使用的方法为 A、C，实践证明该方法能够起到很好的减震效果。

### § 3.5 全向视觉系统的设计

全向视觉系统由全向反射镜面和摄像机组成<sup>[37]</sup>，如图 3.52 所示。图中凸镜面即为全向反射镜面，它起着反射光线的作用，而摄像机则通过镜头折射采集全向反射镜面反射的光线，获取全景图像。

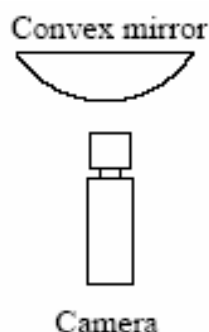


图3.5.1 全向视觉系统的组成

本文的任务是设计一种针对这种全向视觉系统的安装调节机构，具有调节全向视觉系统以及可以应用于动态环境下的可固连于放置面的调平装置。

### § 3.5.1 设计要求

- 1) 为保证采集的图像不变形，摄像机与镜面安装必须保证在同一轴线上。
- 2) 摄像机和镜面之间的距离可调，并且在调节时两轴线仍然保持重合，摄像机姿态不发生变化。
- 3) 系统整体具有水平自由度调节的功能。

### § 3.5.2 设计思路

设计实现的原理：

#### a) 同心度的保证

将摄像机与镜面之间的连接调节部件设计为孔轴配合结构。

#### b) 距离调节

原理如下图所示：

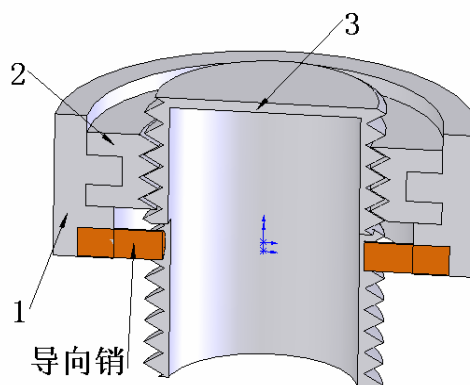


图3.5.2 距离调节原理

1, 2, 3均为环柱状结构。1与安装台固连；2与1配合可以在1内作旋转滑动；2与3通过螺纹配合；导向销固连于1，与3的导向槽配合。当我们旋转2时，3就在导向销的限制下不会发生转动，只作上下运动。

#### c) 水平调节

水平调节装置是具有三自由度姿态调节机构，它可以方便的实现水平调整以及有限的垂直位置调整。

如图3.5.3所示，关节轴承的连接杆部分通过底板过孔与底板配合，关节轴承的球关节与需要调平的调平台相配合。其中调平台结构一般设计成具有三个夹角为120度分布的引脚的结构。通过滑动调节关节轴承连接杆与底板的配合，可以实现调平台的水平调节。而且一旦三个关节轴承连接杆与底板的位置确定后，调平台与底板的姿态就可以保持不变，不会出现于底板脱离的情况。

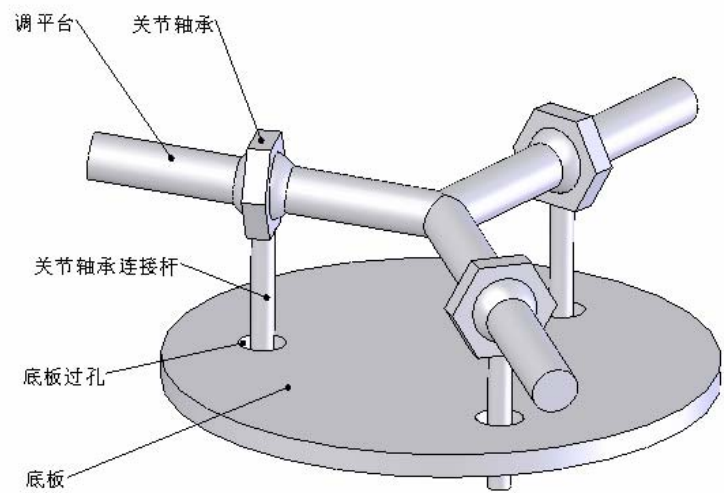


图3.5.3 新型水平调节装置的原理图

§ 3.5.3 具体实现

新型全向视觉系统的结构图和剖视图分别如图 3.5.4 和图 3.5.5 所示。

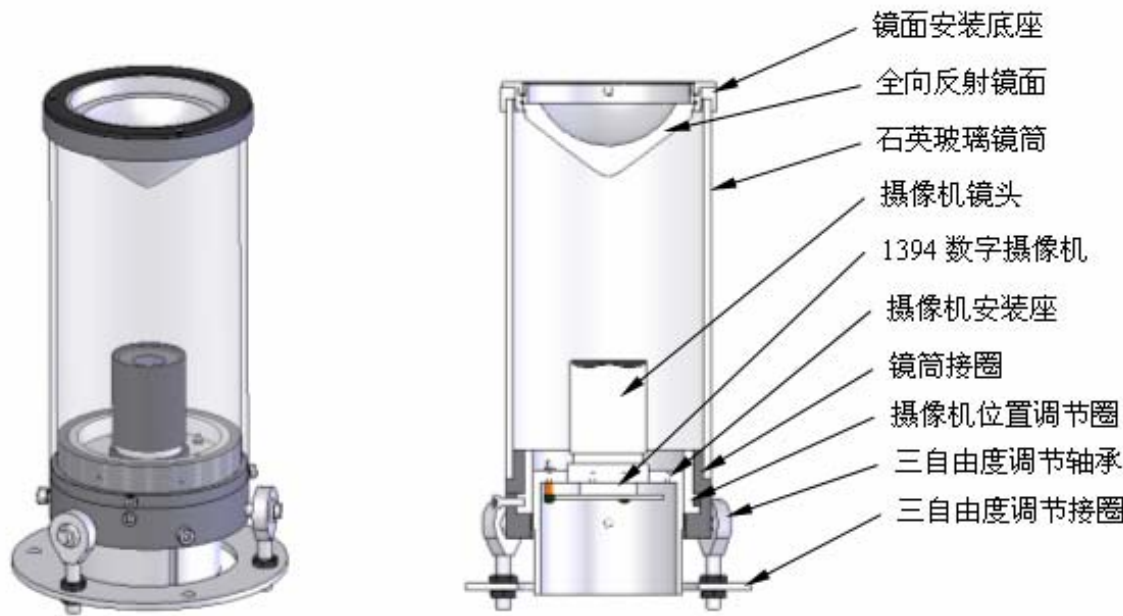


图 3.5.4 新型全向视觉系统结构图

图 3.5.5 新型全向视觉系统剖视图

新型全向视觉系统的实物如图 3.5.6 所示。



图 3.5.6 最终实现的全向视觉系统

设计的全向视觉系统可以方便地实现镜面与摄像机之间距离的粗、微调节，以及系统整体的水平调节。其中水平调节装置具有三自由度姿态调节功能，它可以方便的实现水平调整以及有限的垂直位置调整。

### § 3.6 系统结构的设计

将机器人特定功能的各模块联系集成成一个整体，为系统结构进行设计。组成全向移动平台必要的功能模块都是有机的并以特定的关系联系在一起的，即它们都是具有相关性的，这样当每个要素自身性能发生改变时，就会影响到与此要素相关的其他要素，同时各要素的相互作用和相互影响也会对系统产生影响。但这并不意味着系统中的各个要素的性能都具有最佳性能，各要素之间的有机联系得到了很好的统一协调，也可以使总系统获得较理想的整体功能。



图 3.6.1 各功能模块连接示意图

系统的各功能模块如上图所示，系统的结构设计就变成了他们之间连接关系的设计

### § 3.6.1 设计要求

结合实际的要求我们对系统设计提出如下要求：

- (1) Robocup 对机器人体积质量都有严格的要求：单体机器人平面投影面积不能超过  $50\text{cm} \times 50\text{cm}$ ，高度不能超过  $80\text{cm}$ ，质量不能超过  $80\text{kg}$
- (2) 功能性要求：机器人运动灵活、有利于控球、带球、避障。
- (3) 环境的适应性要求：能承受激烈对抗的比赛，有一定越野能力的全向移动平台，精密机械要求能长期保持其精度并有良好的防震性
- (4) 机械要求使用、安装、维修、拆卸、运输方便。

根据要求，我们进一步将连接关系细化，因为系统中存在减振隔离，为了方便所以我们将系统以隔离层为界分为两层：下层，上层（上、下分别表示是否进行减振）。参见图 3.

下层主要包括：全向轮系，底盘，控制系统。因为振动对这些模块影响不大，所以可以直接用普通的方式连接，这里就不再赘述。全向轮系和底盘的连接涉及到控制方面的内容，有关全向运动系统布局的设计问题会在下一章内详诉，这里就不涉及这方面的内容。这些功能模块安装到一起可以单独构成一个完整的运动系统。

上层主要包括：传感器模块和一些对振动敏感的模块。为了保持系统质量分布均匀以及结构稳定将除运动系统外的其他模块也安装其上。

将上层各功能模块都集成到一个框架内，下层各功能模块集成到底板上，然后再将框架和底板的通过减振和限位部件连接。

### § 3.6.2 具体实施

#### 1. 减振部件的安装布局。

底盘为四点着地的平板结构，我们将这种结构简化成如图所示的力学模型。

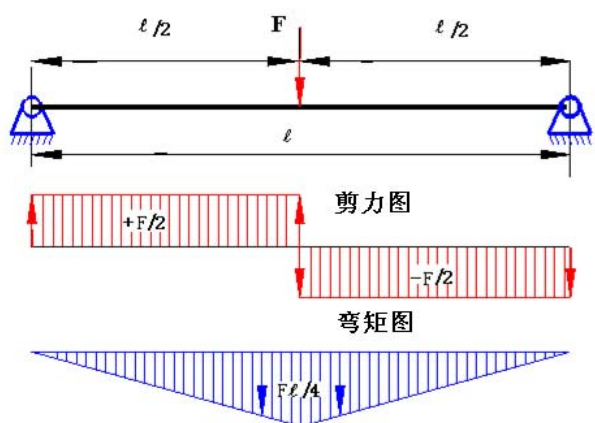


图 3.6.2 作用于底板中心处的载荷图

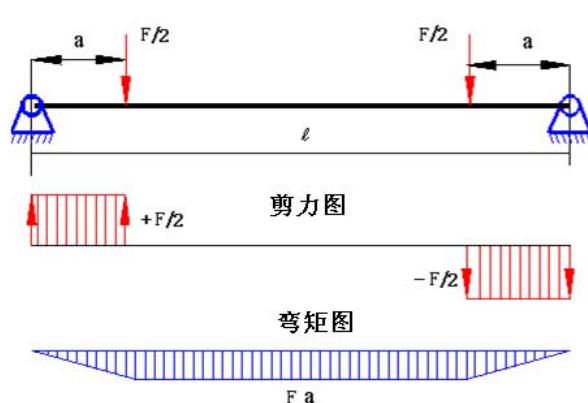


图 3.6.3 作用于底板两端处的载荷图

根据力学原理可知当力的作用点作用于中心点时，中心铰接处受到很大的剪力与弯矩。当



靠近支撑位置时，平板上的应力最小，所以为了保护底板铰接结构，应将减振部件的安装尽量靠近轮与地面的支点。最后的安装位置如图所示。

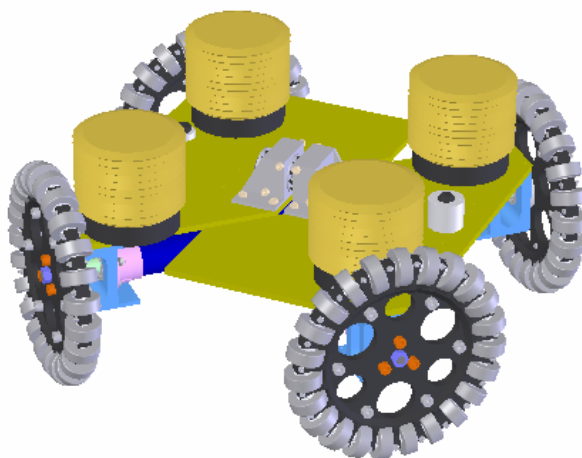


图 3.6.4 减振部件的安装图

## 2. 限位元件的安装布局。

减振部件只能提供一个方向上的减振功能，并不能起到限制上下层位置的作用，两层结构的功能实现连接还需限位元件的连接。根据实验结果及分析，可以得出上层传感元件对水平位置和俯仰位置的偏差敏感，底板传来的振动主要为竖直方向的分量。

根据设计要求，在底盘上竖直安装直线轴承，与固连于上层框架的轴配合，限制上层的水平及俯仰位置。底板与框架直接加入的减振部件又可以起到对垂直振动的作用。如图所示

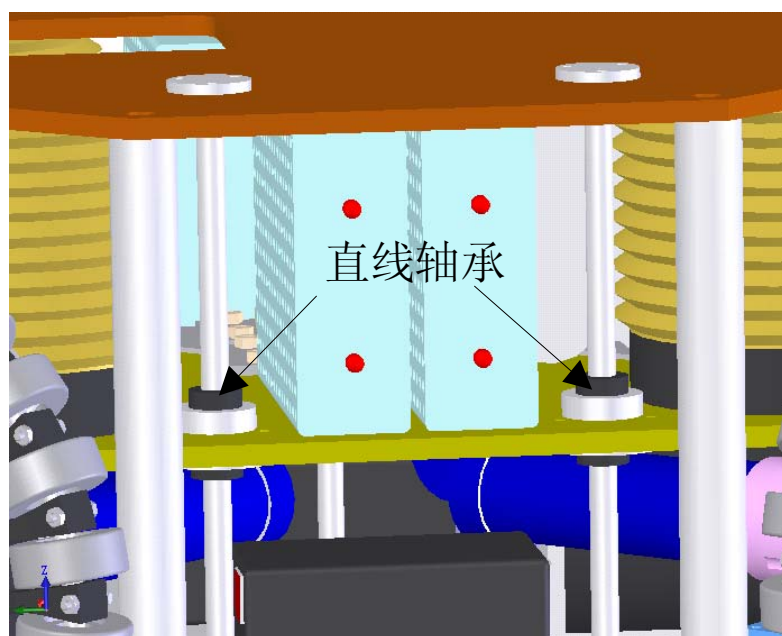


图 3.6.5 直线轴承的安装

底盘设计为中间铰接结构，在限位的同时我们必须保证铰接部分的正常工作。将直线轴承的位置设置成中线布局，为如图所示的结构，两距离固定的平行杆穿过关节轴承后，

就可以将关节轴承的自由度降低为单一的摆动。满足了设计要求。

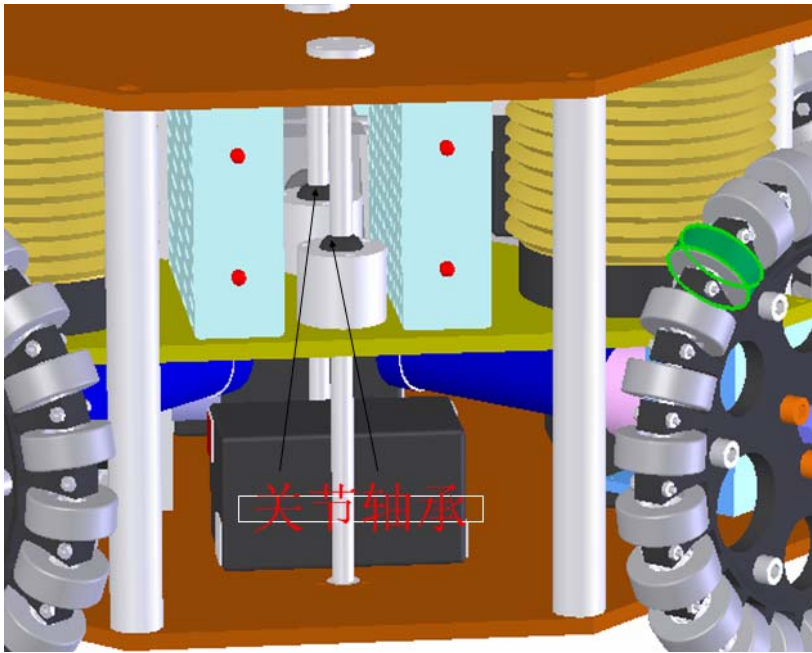


图 3.6.6 关节轴承的安装

3. 其他。

平台内部各个部件的连接充分考虑了操作流程、方法，都做了针对安装、维修、拆卸要求方便的设计。机器人的外形也根据美观和比赛功能作了相应的设计。具体请参见实物。

§ 3.7 结论与实物

1. 全向移动平台机械系统的设计性能和实测结果：

表 3. 1

分类	项目	性能	指标	测试结果
机械系统	1	外形尺寸	50*50*80（W*L*H）	在规则允许范围之内
	2	推力	4. 0kgf	5. 6kgf
	3	负载能力	25kg	40kg
	4	最大速度	2. 5m/s	3. 8m/s
	5	最大加速度	2m/ s <sup>2</sup>	2. 5m/ s <sup>2</sup>
	6	运动方式	全向运动	全向运动
	7	环境适应性	比赛	比赛及一定的越野性能
	8	电池更换	方便	电池更换方便, 可单独拆装
	9	扩展性	机械扩展方便	为扩展各种配件留下了空间

2. 全向移动平台的实物图如下图所示：



图 3.7.1 NuBot 单个机器人的正面图



图 3.7.2 NuBot 单个机器人的侧向图



图 3.7.3 NuBot 机器人的分解图

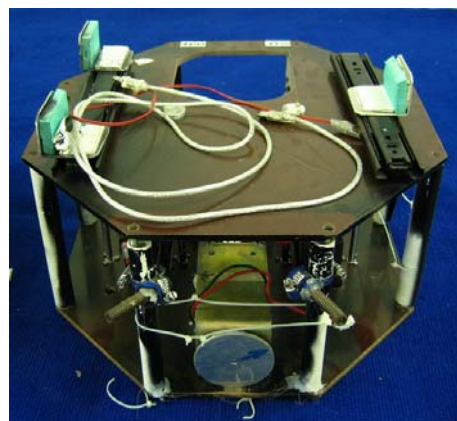


图 3.7.4 上层

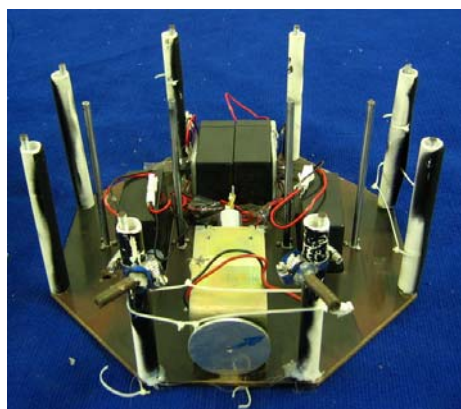


图 3.7.5 上层内部

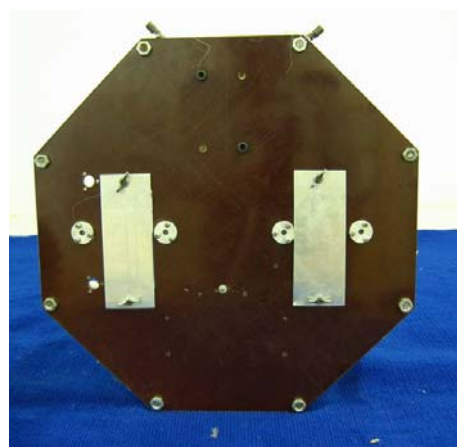


图 3.7.6 上层的底部



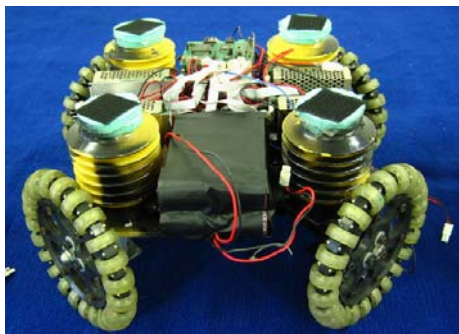


图 3.7.7 下层正面



图 3.7.8 下层侧面

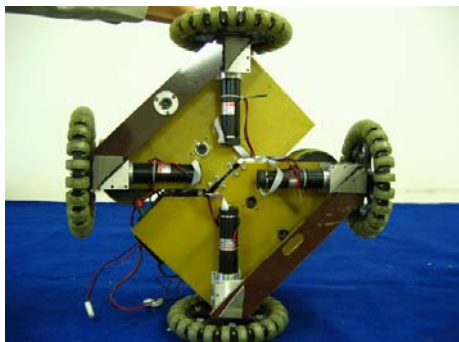


图 3.7.9 下层底部



图 3.7.10 轮系

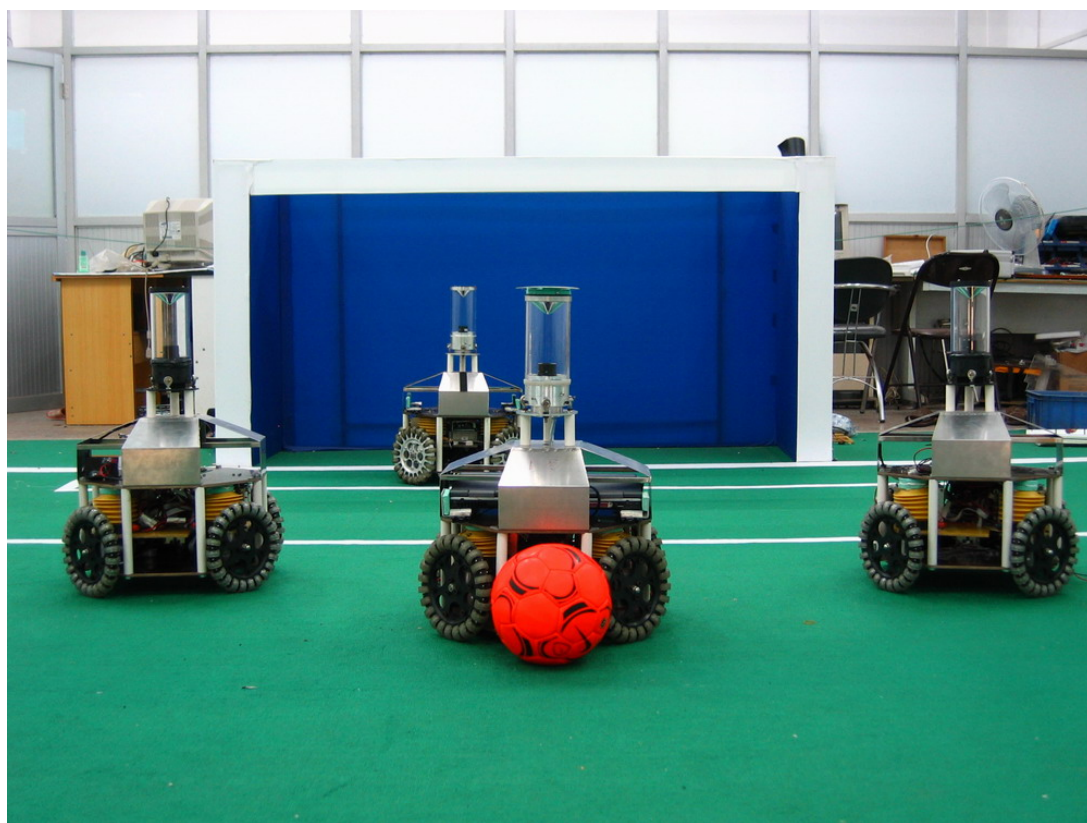


图 3.7.11 NuBot 机器人足球队

### 3. 全向移动平台的越障能力测试:

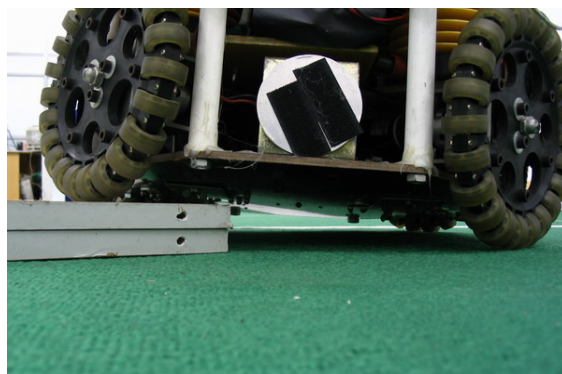


图 4.4.2 机器人翻越 3.5cm 高度障碍时的情形 1

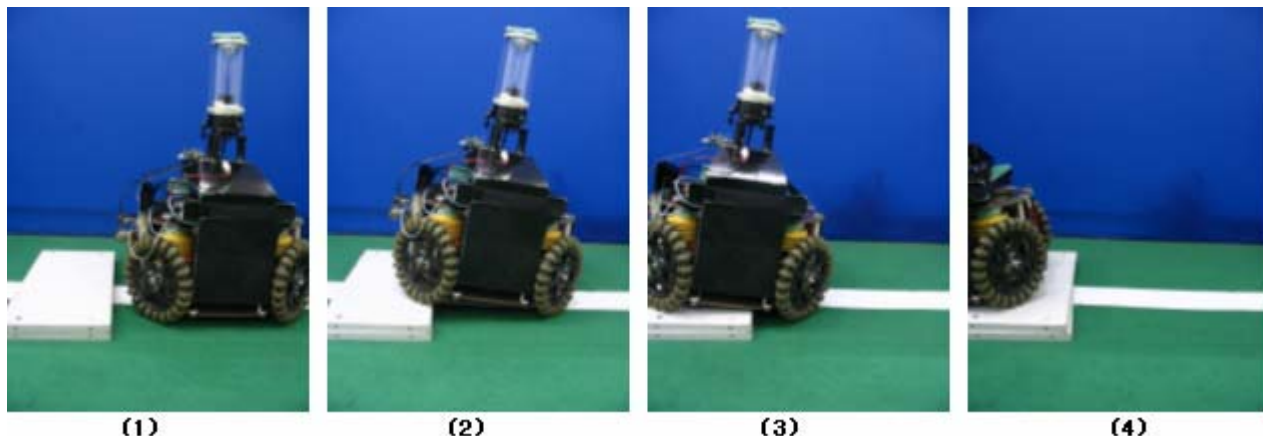


图 4.4.3 机器人翻越 3.5cm 高度障碍时的情形 2

从实验结果我们可以看到，采用全向移动平台的机器人具有一定的越障能力，翻越 3.5cm 障碍时机器人仍能够保持四轮同时接触地面。由于结构的特殊性，全向移动机器人在车体的不同方位表现出不同的越障能力，正方向上的越障能力最强，与正方向成  $45^\circ$  方向上的越障能力最弱。

### § 3.8 小结

本章主要内容为设计一种应用于 RoboCup 中型组机器人足球赛的运动平台，通过理论分析和实验论证，提出了机器人各机构性能的设计原理与方法。文章前期的设计准备阶段经过大量的试验和改进，各功能模块均进行了三版以上的改进，才得到了最终版优异、稳定的性能。后期工作主要集中在将这些功能模块整合到一起，组成了一个完善、稳定的全向运动平台，并成功得应用到 RoboCup 中型组足球机器人上，并收到了良好得效果。

## 第四章 全向运动控制

### § 4.1 全向轮的组合

全向轮是若干可以自由转动的小轮子周围均匀分布组成的。在平面内使用时，通过电机驱动全向轮整轮（以下统一全向轮称为整轮）的转动可以实现一个自由度的控制。即单个轮子在沿轮方向的平动自由度是被限制的，在垂直于轮子方向以及沿轮方向任意点的转动是自由的。

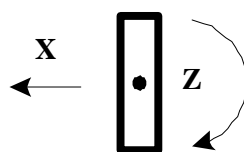


图 4.1.1 单个全向轮

如果我们将几个这样的轮在平面上组合使用会达到如下的使用效果。

#### § 4.1.1 两个全向轮组合使用的情况

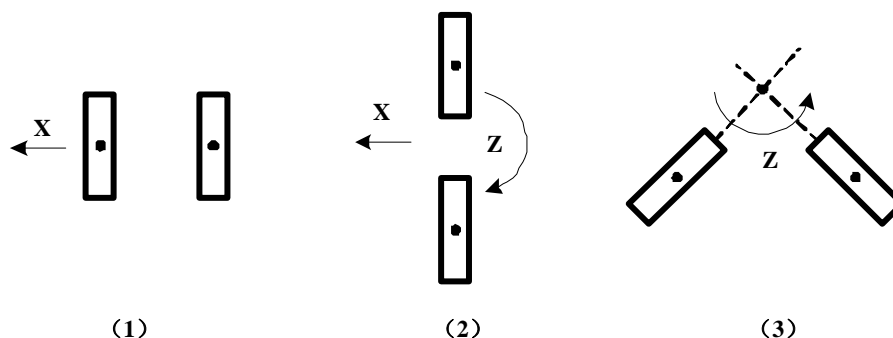


图 4.1.2 两个全向轮组合使用的情况

##### 1) 平行使用

在一条直线上，如图 4.1.2 (2) 所示：相当于一个轮子的作用。

不在一条直线上，如图 4.1.2 (1) 所示：沿轮子垂直方向的平动自由。

##### 2) 不平行使用，如图 4.1.2 (3) 所示：任意的角度放置，沿轮方向交线的转动自由。

**【结论 1】：** 两个全向轮最多可以限制两个自由度。使用时在一条直线上的全向轮，作用相当于一个轮子的效果。

#### § 4.1.2 三个全向轮的使用情况

##### 1) 三个轮平行的情况：

都在一条直线上如图 4.1.3(4)所示：根据上面的结论，仍然相当于一个全向轮，等价于图 4.1.2(2)。

不在一条直线上，如图 4.1.2 (6)、(7)所示：平行的全向轮限制不了与他垂直方向的自由度，等价于图 4.1.2 (1)

只有两个在一条直线上，如图 4.1.2 (5)所示：等价于图 4.1.2(1)

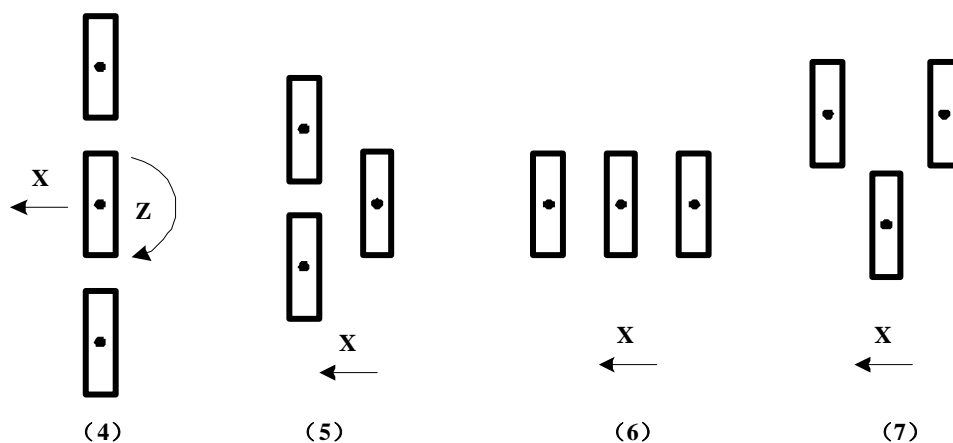


图 4.1.3 三个全向轮平行使用的情况

## 2) 两轮平行的情况:

图 4.1.4 (8) 等价于图 4.1.2(3)。

其他为全约束。

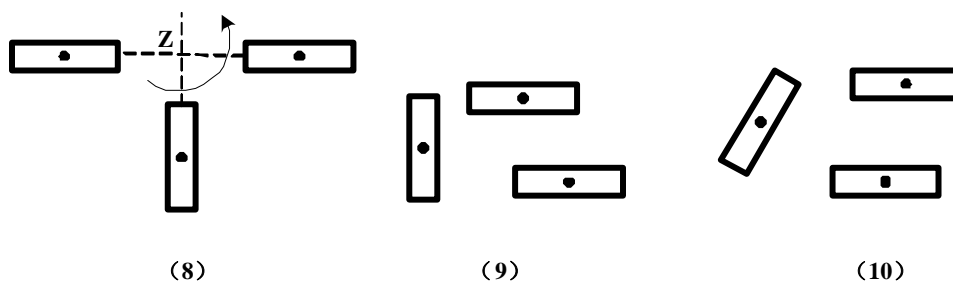


图 4.1.4 两轮平行使用的情况

## 3) 三轮任意放置

轮方向的延长线可以交汇于一点, 如图 4.1.5 (11)所示: 不能限制绕交汇点的转动, 等价于图 4.1.4 (8)。

其他为全约束。

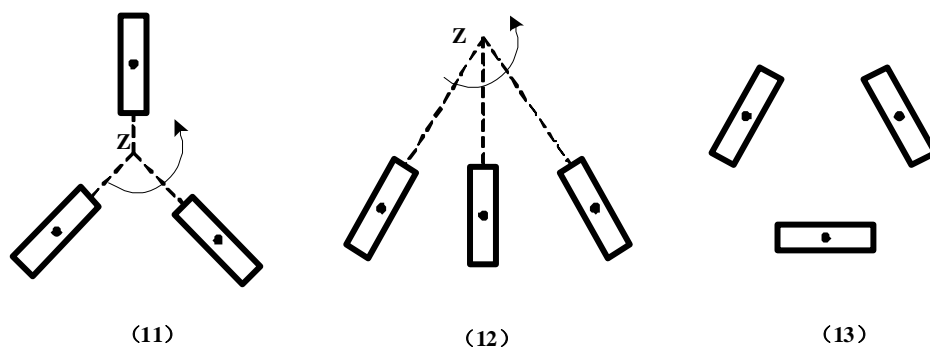


图 4.1.5 三轮任意放置使用的情况

**【结论 2】:** 三个全向轮的某些组合方式可以完全限制在平面内运动的自由度; 平行的全向轮限制不了与他垂直方向的自由度; 两个全向轮组合不能限制绕它们轮方向延长线交汇点的转动。

### § 4.1.3 四轮及多轮的使用情况

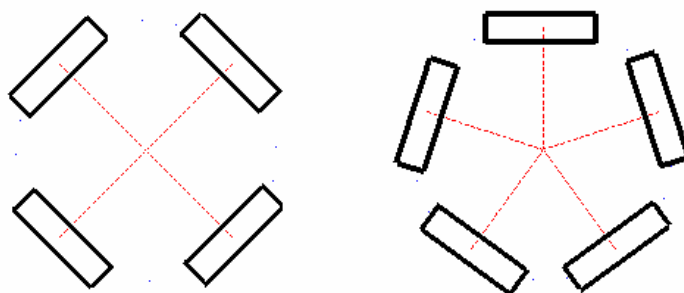


图 4.1.6 四轮及多轮的使用情况

不完全约束的情况可以根据结论 1、2 做出判断，这里就不再赘述。

【结论 3】在自由度约束饱和的情况下引入新的轮子，为过约束。当足够约束系统自由度数目的轮子运动时，其他轮必须作配合的随动，系统才能工作正常。

【推论 1】在加入轮子却没有引入新约束的情况下（包括不完全约束的情况），对于已经产生的自由度这些轮子也可以看作是过约束，它们在做涉及已产生自由度的运动时仍然要作配合随动。

## § 4.2 全向轮布局与系统性能

根据上节的内容，本文可以在全约束条件下，在系统内任意分布安装全向轮，以下将分析全向轮的布局对系统性能产生的影响。

### § 4.2.1 单个轮子对系统的作用

系统在平面上的任意运动可以分为平动和转动和合成。单纯作平动时的速度分解图如下所示：

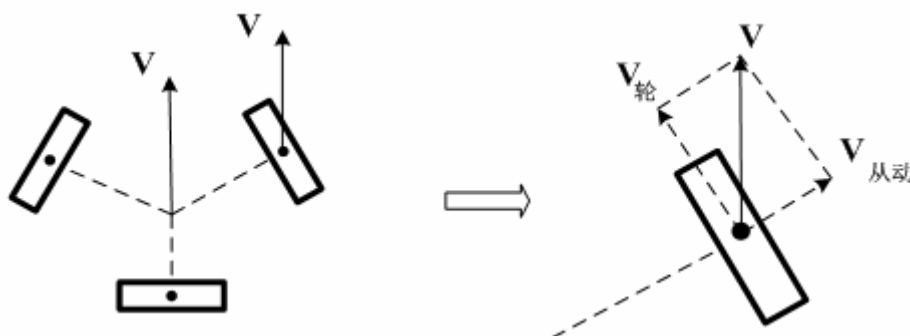


图 4.2.1 平动时系统及单个轮子的运动分解

通过分析可以得出【结论 4】：系统的平动只和单个轮子在系统中的姿态有关，姿态一定时(轮运动方向与系统整体的正方向夹角保持一定),轮子在系统中的位置改变不会对系统的平动功能产生影响。

### § 4.2.2 轮子布局对系统旋转运动的作用

当系统绕系统内某一点的作旋转运动时，系统内部的合力为零，如果各轮子驱动力方向与旋转中心和轮心的连线相垂直时，驱动力产生的效果最优。



如下图，我们可以看到在图示情况，两轮产生的部分驱动力会抵消，电机消耗的部分能量产生了无用功。

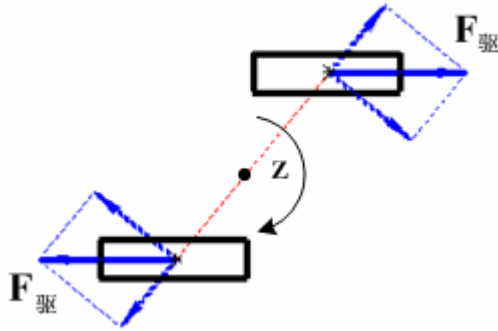


图 4.2.2 轮系布局不合理时旋转运动会产生驱动力抵消

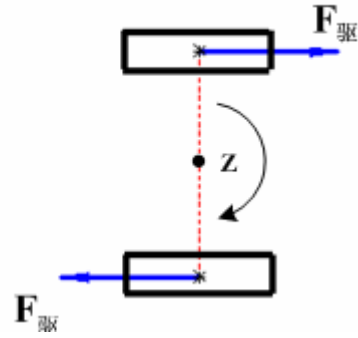


图 4.2.3 合理的布局方式

【结论 5】在安排轮子布局时，在各轮姿态确定的情况下，要尽量做到使轮中心垂线相交与一点，如图 4.9。

### § 4.2.3 三轮布局的分析

为了简化难度，先对具有对称结构的三轮系统进行研究。

全向移动平台的控制就是对组成全向平台驱动电机的速度和加速度的控制。一般为了保证控制的简单性，各电机都为同样的电机。电机的输出扭矩  $T$ ，驱动电压  $U$ ，输出角速度  $\omega$  关系为：

$$T = \bar{\alpha}U - \bar{\beta}\omega \quad (4.1)$$

特性曲线如下图所示：

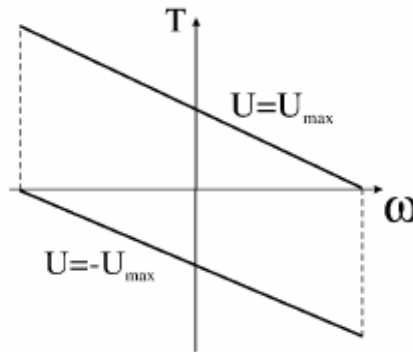


图 4.2.4 电机特性曲线

假设电机带动的轮子不打滑， $T = fR$  其中  $R$  为驱动轮的半径。上式就可简化成

$$f = \alpha U - \beta v \quad (4.2)$$

其中  $v = \omega R$  电机驱动轮系运动时，要克服轮系内应力（如摩擦等原因产生）的系统阻力，而这种系统阻力的大小通常是一定的，设为  $f_{\text{阻}}$ 。所以当驱动电压为  $U_{\text{max}}$ ，运行稳定后出现  $f = f_{\text{阻}}$ ，电机的输出转速可以达到最大，设为  $f = f_{\text{阻}}$ 。

#### 1) 系统只作平动的情况

##### a) 系统的整体速度

当全向系统整体速度达到  $V$  时，设各个轮子速度的正方向为逆时针方向， $V_{Ri}$  为第  $i$  个轮子产生的沿电机驱动方向的速度。

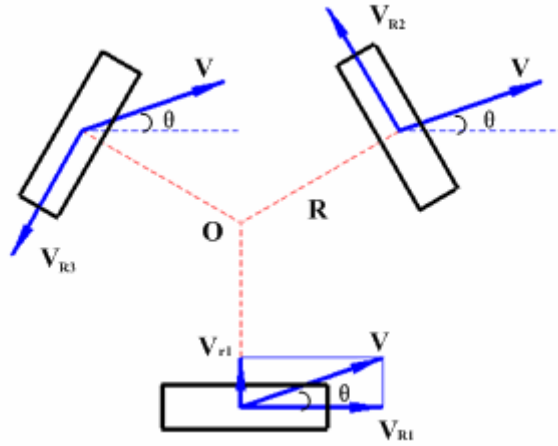


图 4.2.5 对称三轮布局的速度分析图

如图所示，我们可以求得各个轮子的速度：

$$V_{R1} = V \cos \theta \quad V_{R2} = -V \sin(30^\circ - \theta) \quad V_{R3} = -V \cos(60^\circ - \theta)$$

结合  $V_{R1} \in [-V_{\max}, V_{\max}]$ ,  $V_{R2} \in [-V_{\max}, V_{\max}]$ ,  $V_{R3} \in [-V_{\max}, V_{\max}]$

可以解得机器人整体平动速度矢量  $V$  在车体极坐标方向上的分布空间（正六边形包络线范围内的部分）：

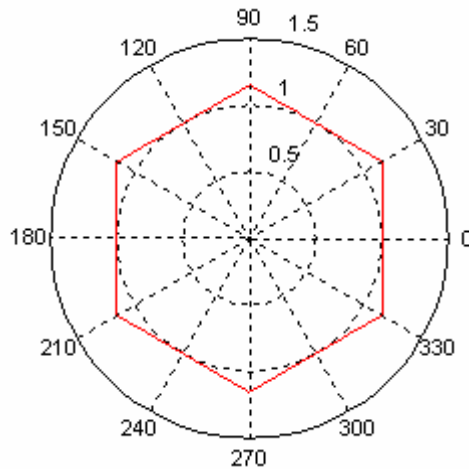


图 4.2.6 对称三轮布局的速度分布空间图

#### b) 系统的加速度

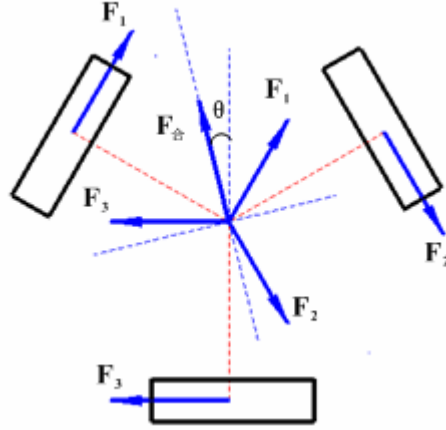


图 4.2.7 对称三轮布局的力分析图

考虑系统由静止开始加速的情况。设系统所受的合外力为  $F_{\text{合}}$ ，轮 1，2，3 所得的地面驱动力为  $F_1$ ， $F_2$ ， $F_3$ 。 $\theta$  是轮的正方向与运动方向的夹角。

$$\text{则: } F = F_1 \cos(30^\circ + \theta) + F_3 \sin \theta - F_2 \cos(30^\circ - \theta) \quad (4.3)$$

又系统在与运动方向垂直的方向合力为零，并且系统不作旋转：

$$\begin{cases} F_1 \sin(30^\circ + \theta) + F_2 \sin(30^\circ - \theta) = F_3 \cos \theta \\ F_1 R + F_2 R + F_3 R = 0 \end{cases} \quad (4.4)$$

其中  $R$  为轮心到系统中心的距离。

结合  $F_1 \in [-F_{\max}, F_{\max}]$ ， $F_2 \in [-F_{\max}, F_{\max}]$ ， $F_3 \in [-F_{\max}, F_{\max}]$

其中  $F_{\max}$  是当时单个轮子所能达到的最大地面驱动力。

可以解得机器人整体平动合力矢量  $F$  在车体极坐标方向上的分布空间：

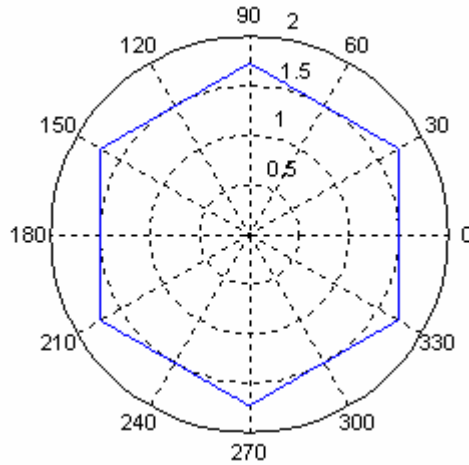


图 4.2.8 对称三轮布局的加速度（合外力）分布空间图

## 2) 系统只作转动

只作转动时，系统各个轮子的速度相同，

$$\text{即} \quad V_{R1} = V_{R2} = V_{R3} \quad (4.5)$$

$$\text{可得} \quad F_1 = F_2 = F_3 \quad (4.6)$$

$$\text{及:} \quad \begin{cases} V_{R1} = J \dot{\theta} \\ 3F_1 = J \ddot{\theta} \end{cases} \quad (4.7)$$

其中  $J$  是系统对中心的转动惯量

我们知道对于一个均质对称的系统  $J = \frac{1}{2}MR^2$ ，对于质量全部分布在边沿的均质环状物  $J = MR^2$

$$\text{那么对于其他质量分布对称的系统 } J = \alpha MR^2, \quad 0 \leq \alpha \leq 1. \quad (4.8)$$

【结论 5】为了达到系统更快速的旋转，系统的质量尽可能集中在中心。

根据驱动速度  $V_{R1} \in [-V_{\max}, V_{\max}]$  及驱动力  $F_1 \in [-F_{\max}, F_{\max}]$ ，

可知  $\dot{\theta}$  的分布为  $[-\frac{V_{\max}}{J}, \frac{V_{\max}}{J}]$  的一维空间，

$\ddot{\theta}$  的分布为  $[-\frac{3F_{\max}}{J}, \frac{3F_{\max}}{J}]$  的一维空间。

### 3) 系统平动与转动同时存在

设  $V_{Ri\text{平}}$  为轮子  $i$  平动的分量， $V_{Ri\text{转}}$  为转动的分量。则存在以下关系：

$$V_{R1\text{转}} = V_{R2\text{转}} = V_{R3\text{转}} \quad (4.9)$$

可以解得机器人整体平动速度分量的分布空间（如图 7 的小正六边形范围以内）：

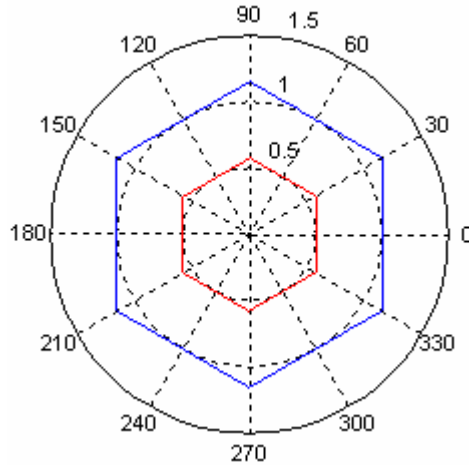


图 4.2.9 对称三轮布局的速度平动分量空间图

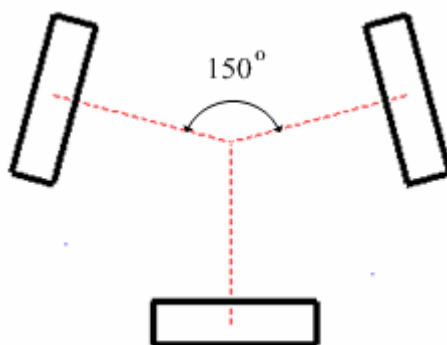
其中中心小正方形的边长为  $2/\sqrt{3}(V_{\max} - J\theta)$ 。此时角速度的空间为  $[-\theta, \theta]$ 。

系统整体的平动加速度以及角加速度空间分布与速度分布类似，本文不再赘述。

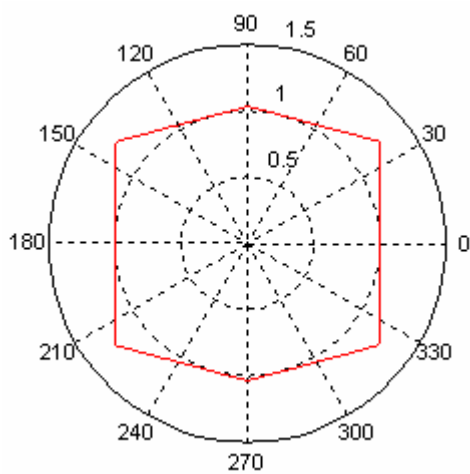
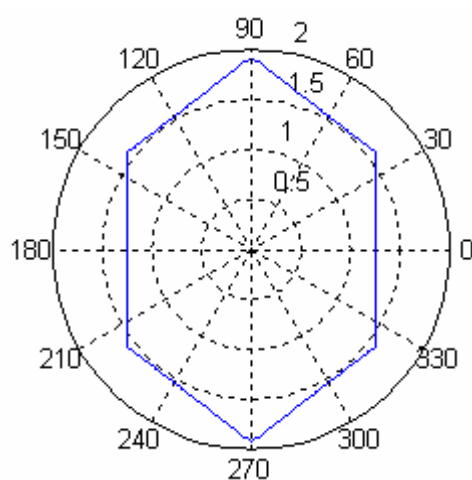
#### § 4.2.4 其他布局的三轮结构

根据使用情况的不同，可以改变轮系的布局以满足不同方向性能的需要。

如图所示，当中间两轮的夹角为  $150^\circ$  时

图 4.2.10 对称 $150^\circ$ 夹角三轮布局图

它的速度空间和加速度空间分别为：

图 4.2.11 对称 $150^\circ$ 夹角三轮速度空间图图 4.2.12 对称 $150^\circ$ 夹角三轮加速度空间图

#### § 4.2.5 多轮的系

用相同的分析方法，可以得到对称的四、五轮结构的性能分布空间，将他们的特性进行比较：

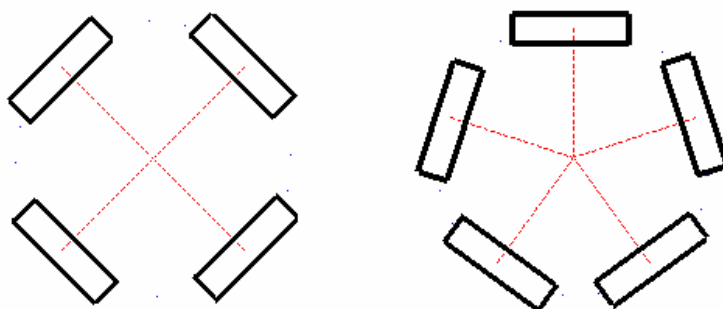
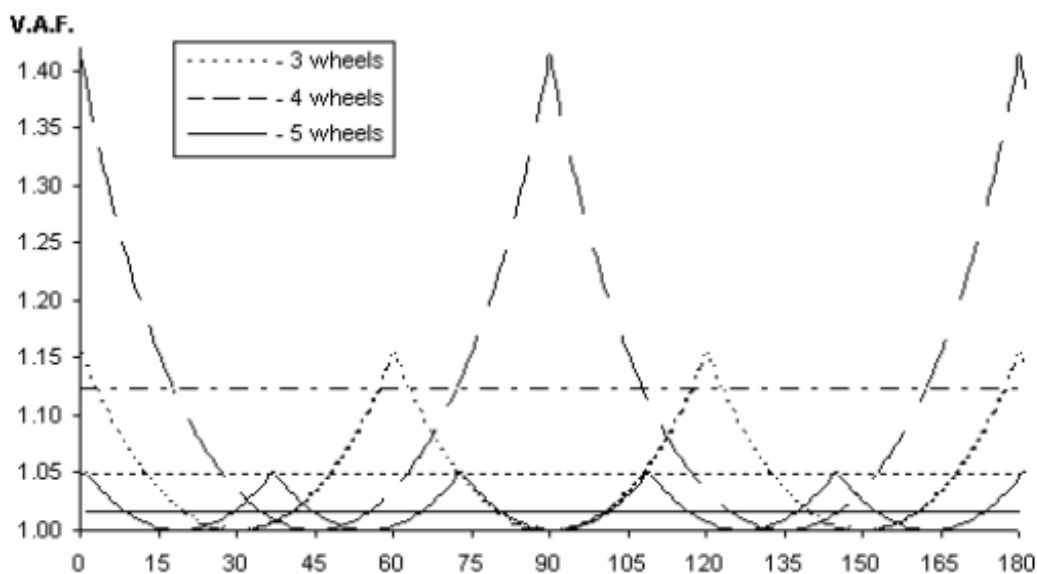


图 4.2.13 四轮与五轮的布局图



图 4.2.14 三轮、四轮与五轮的速度性能比较图<sup>[5]</sup>

实际的情况是由于摩擦力等因素的影响，车体在各个不同的方向还存在一定的运动死区，要使系统朝一个方向运动，必须克服上述的因素才能使车体运动。所以上述曲线不能完全反应一个系统的性能。

实际使用时要对车体各个不同方向的测量，才能比较准确地描述车体的性能。

## § 4.3 目前方案的运动、动力学分析

### § 4.3.1 运动学分析

机器人工作空间为一个平面，建立固连在这个平面的绝对坐标系  $x_w - y_w$ ，以及固连于车体并且原点与机器人中心重合的局部坐标系  $x_m - y_m$ 。如图 4.3.1 所示。其中  $\theta$  为  $x_m$  与  $x_w$  的夹角， $\delta$  为轮子与  $y_m$  的夹角。可求出运动学方程如下：

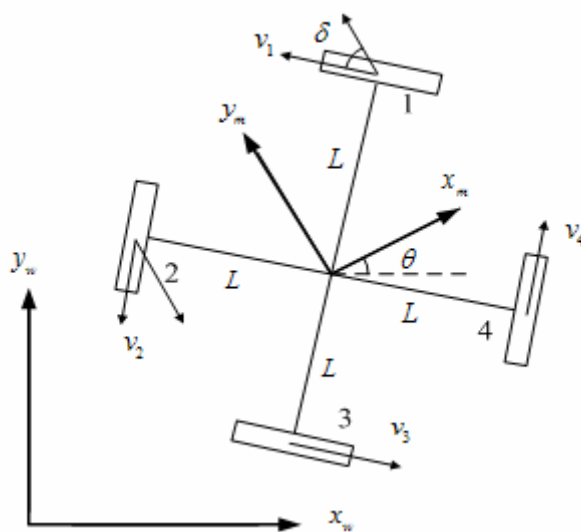


图4.3.1 机器人的运动分析

$$\begin{aligned}
v_1 &= -\sin(\theta + \delta) \dot{x}_w + \cos(\theta + \delta) \dot{y}_w + L \dot{\theta} \\
v_2 &= -\sin(\delta - \theta) \dot{x}_w - \cos(\delta - \theta) \dot{y}_w + L \dot{\theta} \\
v_3 &= \sin(\delta + \theta) \dot{x}_w - \cos(\theta + \delta) \dot{y}_w + L \dot{\theta} \\
v_4 &= \sin(\delta - \theta) \dot{x}_w - \cos(\delta - \theta) \dot{y}_w + L \dot{\theta}
\end{aligned} \tag{4.10}$$

其中  $L$  是机器人中心到轮子中心的距离； $v_i$  为轮子  $i$  提供的沿驱动方向的速度。根据结构代入具体的数值，进一步可得全向移动机器人的运动学模型：

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin(\theta + 45^\circ) & \cos(\theta + 45^\circ) & L \\ -\sin(45^\circ - \theta) & -\cos(45^\circ - \theta) & L \\ \sin(\theta + 45^\circ) & -\cos(\theta + 45^\circ) & L \\ \sin(45^\circ - \theta) & \cos(45^\circ - \theta) & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_w \\ \dot{y}_w \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} \tag{4.11}$$

简写为

$$v = Ps \tag{4.12}$$

其中

$$v = [v_1 \ v_2 \ v_3 \ v_4]^T$$

为轮子的速度，

$$P = \begin{bmatrix} -\sin(\theta + 45^\circ) & \cos(\theta + 45^\circ) & L \\ -\sin(45^\circ - \theta) & -\cos(45^\circ - \theta) & L \\ \sin(\theta + 45^\circ) & -\cos(\theta + 45^\circ) & L \\ \sin(45^\circ - \theta) & \cos(45^\circ - \theta) & L \end{bmatrix}$$

为转换矩阵，

$$s = \begin{bmatrix} \dot{x}_w & \dot{y}_w & \dot{\theta} \end{bmatrix}^T$$

为机器人整体的期望速度。

#### § 4.3.2. 动力学分析

同运动学分析，建立如图 4.3.2 的坐标系。其中  $P_{0i}$  为由机器人中心指向轮  $i$  中心的矢径； $D_i$  为与电机  $i$  提供驱动力方向重合的矢量；引入旋转矩阵

$$R(\theta) = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \tag{4.13}$$

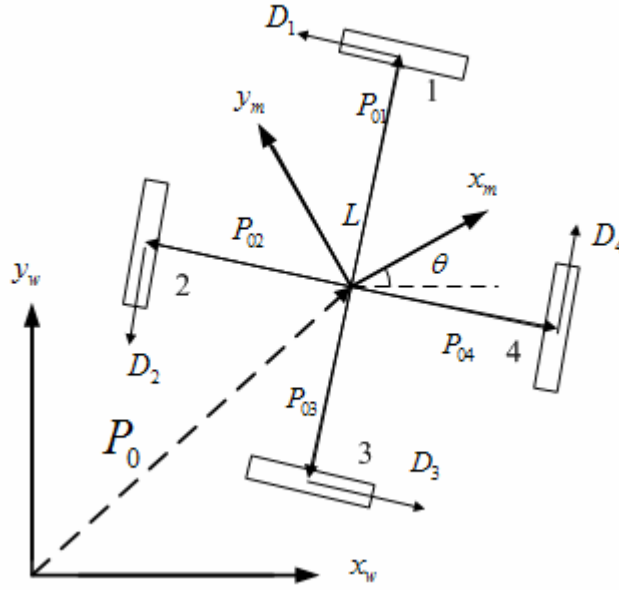


图4.3.2 机器人的动力学分析

可得:

$$P_{01} = R(\pi/4)L \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = L/2 \begin{pmatrix} \sqrt{2} \\ \sqrt{2} \end{pmatrix}; \quad (4.14)$$

$$P_{02} = R(3\pi/4)L \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = L/2 \begin{pmatrix} -\sqrt{2} \\ \sqrt{2} \end{pmatrix};$$

同理可得:

$$P_{03} = L/2 \begin{pmatrix} -\sqrt{2} \\ -\sqrt{2} \end{pmatrix}; \quad P_{04} = L/2 \begin{pmatrix} \sqrt{2} \\ -\sqrt{2} \end{pmatrix};$$

$$D_1 = \frac{1}{L} R(\pi/2) P_{01} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} -\sqrt{2} \\ \sqrt{2} \end{pmatrix} \quad (4.15)$$

同理可得:

$$D_2 = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} -\sqrt{2} \\ -\sqrt{2} \end{pmatrix}; \quad D_3 = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} \sqrt{2} \\ -\sqrt{2} \end{pmatrix}; \quad D_4 = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} \sqrt{2} \\ \sqrt{2} \end{pmatrix}$$

设电机  $i$  沿  $D_i$  方向的驱动力大小为  $f_i$ , 建立如下方程:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^4 f_i R(\theta) D_i = m \ddot{P}_0 \\ L \sum_{i=1}^4 f_i = J \ddot{\theta} \end{cases} \quad (4.17)$$

$J$  为绕车体中心的转动惯量。

电机为车体提供驱动力为  $f = \alpha U - \beta v$ ，其中  $U$  为电机的驱动电压， $v$  为轮子的驱动速度值， $\alpha$ 、 $\beta$  为常数。代入上式可得：

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^4 (\alpha U_i - \beta v_i) R(\theta) D_i = m \ddot{P}_0 \\ L \sum_{i=1}^4 (\alpha U_i - \beta v_i) = J \ddot{\theta} \end{cases} \quad (4.18)$$

整理可得系统的动力学方程为：

$$\begin{pmatrix} m \ddot{x}_w \\ m \ddot{y}_w \\ J \ddot{\theta} \end{pmatrix} = \alpha P(\theta) U(t) - \frac{3\beta}{2} \begin{pmatrix} \dot{x}_w \\ \dot{y}_w \\ 2L^2 \dot{\theta} \end{pmatrix} \quad (4.19)$$

其中

$$P(\theta) = \begin{bmatrix} -\cos(\pi/4 - \theta) & -\cos(\pi/4 + \theta) & \cos(\pi/4 - \theta) & \cos(\pi/4 + \theta) \\ \cos(\pi/4 + \theta) & -\cos(\pi/4 - \theta) & -\cos(\pi/4 + \theta) & -\cos(\pi/4 - \theta) \\ L & L & L & L \end{bmatrix}$$

$$U(t) = (U_1(t) \quad U_2(t) \quad U_3(t) \quad U_4(t))^T$$

#### § 4.3.3 轮系的运动性能

机器人能够达到的速度和加速度是两个非常重要的性能指标，在涉及到路径规划等应用场合，都需要对机器人的性能有清楚的了解。

根据动力学的原理，机器人的运动可以分解为整体的平动和绕中心的转动。分别对这两种运动进行分析，并进行综合考虑。

##### (1) 只做平动

根据平动状态下刚体运动的规律，作进一步分析可得：

$$\begin{aligned} v_1 &= -v_3 \quad ; \quad v_2 = -v_4 \quad ; \\ a_1 &= -a_3 \quad ; \quad a_2 = -a_4 \quad ; \end{aligned}$$

设电机可以提供的驱动速度大小为  $[0, V_{\max}]$ ，可以解得机器人整体速度矢量  $v_w$  在车体极坐标方向上的分布空间（如图 4.3.3 的深色范围以内）：

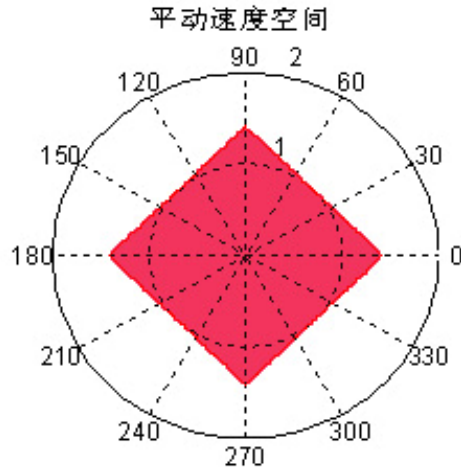


图 4.3.3 四轮对称结构的平动速度空间

考虑到车体运动过程中不能打滑的要求,对加速度作出如下分析:

设地面可以给单独轮子提供的摩擦力为  $f_{\text{摩}}$ , 其方向垂直于轮轴并且平行地面, 最大值为  $f_{\text{MAX}}$ 。

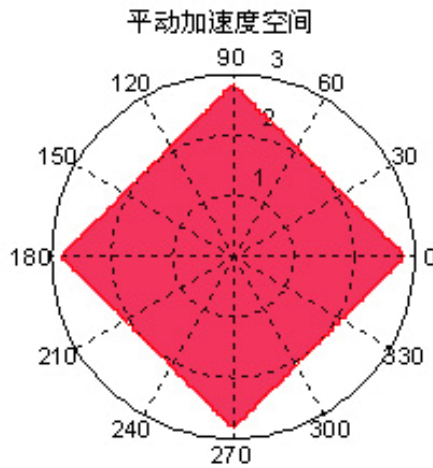


图 4.3.4 四轮对称结构的平动加速度空间

要使其避免打滑, 每个驱动轮作用于地面的驱动力范围应控制在  $[0, f_{\text{MAX}}]$ 。可以解得机器人整体加速度矢量  $a_w$  在车体极坐标方向上的分布空间 (如图 4.3.4 的深色范围以内):

值得注意的是, 由于机器人的运动, 各驱动轮可达到的最大加速能力会随着机器人的状态发生变化。当驱动轮提供的地面驱动力不足以克服  $f_{\text{MAX}}$  时, 加速度空间的实际范围会小于上图所示的区域。因此当运动状态的改变时, 机器人平动的加速度空间也产生相对应的变化。

(2) 只做转动

根据公式:

$$\begin{cases} v = J \dot{\theta} \\ 4f = J \ddot{\theta} \end{cases} \quad (4.20)$$



以及驱动速度和驱动加速度的限制, 可知  $\dot{\theta}$  的分布为  $[0, \frac{v}{J}]$  的一维空间,  $\ddot{\theta}$  的分布为  $[0, \frac{4f}{J}]$  的一维空间。

### (3) 平动与转动同时存在

设  $v_{i\text{平}}$  为轮子  $i$  平动的分量,  $v_{i\text{转}}$  为转动的分量。则存在以下关系:

$$v_{1\text{平}} = -v_{3\text{平}} \quad v_{2\text{平}} = -v_{4\text{平}} \quad (4.21)$$

$$v_{1\text{转}} = v_{2\text{转}} = v_{3\text{转}} = v_{4\text{转}} \quad (4.22)$$

可以解得机器人整体平动速度分量的分布空间 (如图 4.3.5 的小正方形范围以内):

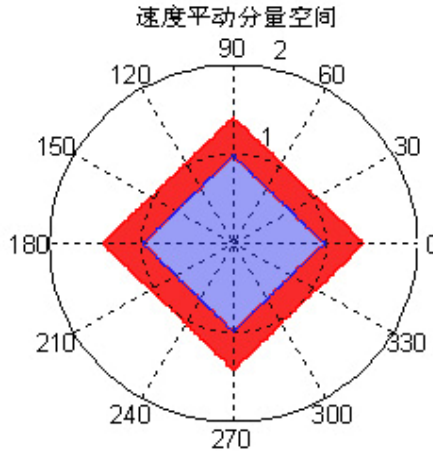


图 4.3.5 对称三轮布局的速度平动分量空间图

其中中心小正方形的边长为  $2 \times (v_{\max} - J\theta)$ 。此时角速度的空间为  $[0, \theta]$ 。

机器人整体的平动加速度以及角加速度空间分布与速度分布类似, 本文不再赘述。

## § 4.4 总体控制方案的选择

上一节建立了全向移动平台的运动学模型和动力学模型, 可以基于上述任意一种模型设计机器人的运动控制器。

### § 4.4.1 全向移动机器人的主要控制任务

对于平面上运动的机器人来说, 控制系统的任务主要为以下三种:

#### A) 姿态稳定

姿态稳定控制是最基本的控制, 要求机器人在任意初始姿态  $q_i = (x_i \ y_i \ \theta_i)^T$  下运动到姿态  $q_f = (x_f \ y_f \ \theta_f)^T$ 。考察一个机械系统的可控性首先就是要考察: 对任意给定的初始姿态  $q_i$  和末姿态  $q_f$  是否存在一条满足约束的轨迹  $q(t)$  连接这两个状态。

#### B) 轨迹跟踪

轨迹跟踪控制要求机器人的某一参考点跟踪一条连续的几何轨迹。轨迹用时间为变量的参数方程描述:  $(x_d(t), y_d(t)), t \in [0, T]$ 。

## C) 路径跟踪

路径跟踪和轨迹跟踪一样,要求机器人跟踪一条给定的几何路径,但要求机器人以固定的速度值运动,路径上没有时间的约束。

结合移动平台的应用背景,在 RoboCup 比赛的对抗中,机器人必须完成占位阻截及曲线进攻的要求,这就需要完成对机器人的姿态稳定控制以及轨迹跟踪。因为轨迹跟踪控制中加入了时间上的约束,使机器人控制更为灵活也容易预测机器人的位置,所以路径跟踪在 RoboCup 比赛中的应用较少。

## § 4.4.2 全向移动平台的控制方案

通常轮式移动机器人的运动控制方案分为两种:基于运动学模型的分层控制和基于动力学模型的控制。

## A) 基于运动学模型的分层控制

基于运动学模型的分层控制分为两层:上层以机器人的运动学模型为基础,控制器输出为轮系的期望速度。下层的电机速度控制器控制电机使其达到期望速度。

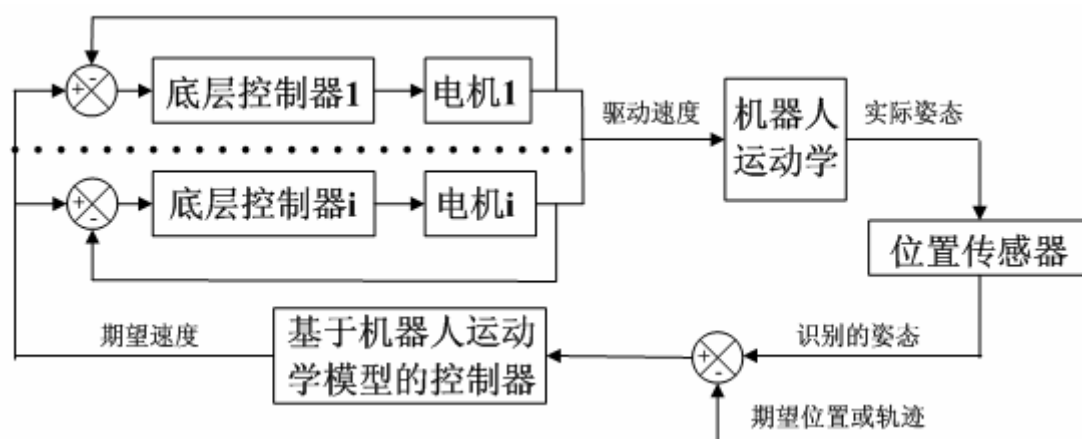


图 4.4.1 基于运动学模型的分层控制系统框图

轮式机器人的运动学模型相对简单,控制器的设计较为容易。而且控制算法对于动力学特性不同,但运动学特性一致的机器人适用,增强了控制器的通用性。但由于其不考虑机器人的动力学特性,底层电机速度不能立刻将电机速度控制到期望速度,将给系统带来延时,如遇到各驱动电动力学不一致的情况,这种缺点会进一步加剧。

## B) 基于动力学模型的控制

基于动力学模型的控制方案直接根据机器人的动力学模型设计机器人的运动控制器,控制器的输出为机器人上驱动电机的驱动电压或者电流。

基于动力学模型的控制方案,不需要对电机进行底层的速度控制,消除了底层速度控制带来的延时。如果模型建立准确,将提高控制精度。但是轮式机器人的动力学模型建立相对于运动学模型来说要复杂得多,而且机器人动力学参数的确定比较困难,很难建立比较精确的动力学模型。

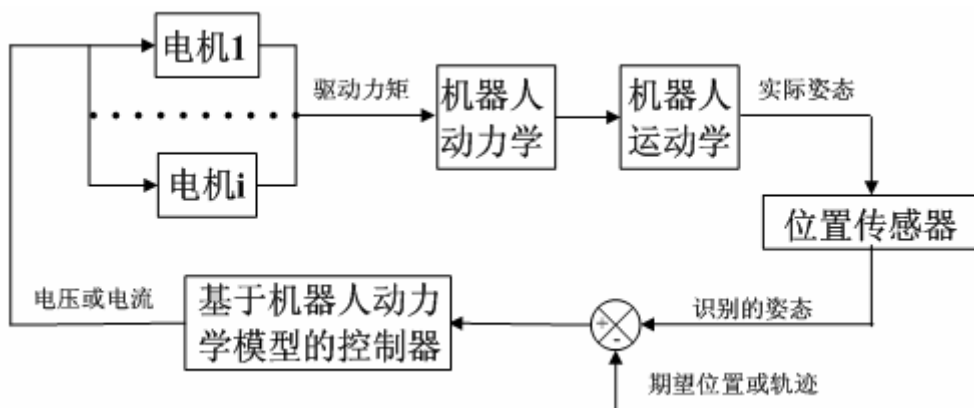


图 4.4.2 基于动力学模型的控制系统框图

### 控制方案的选择:

针对实验室现有情况，综合考虑以上控制方案的优劣。本文选择基于运动学模型的分层控制来实现全向移动平台的运动控制。

原因如下:

- 运动学模型较为简单，控制器设计相对容易，而且也能够基本反映轮式移动平台的主要运动特性。
- 由于加工、安装以及其他因素的影响，移动平台精确动力学模型建立比较困难。
- 实验室现有技术对电机的速度控制具有较好的效果，控制算法成熟，可行度高。
- 平台选用的电机具有非常好的线性度，带有高精度的光电码盘。可以对电机实现较为精确的速度控制。
- 分层控制有利于系统的模块化开发和调试，方便于全向移动平台初期控制算法的实验及改进。

## § 4.5 全向移动平台的控制系统设计

### § 4.5.1 直流电机的速度控制

电枢控制的直流电机的动态模型为二阶<sup>[33]</sup>的

$$G(s) = \frac{w(s)}{U(s)} = \frac{1/K_e}{\tau_m \tau_e s^2 + \tau_m s + 1} \quad (4.23)$$

其中， $\tau_m$ 为电机的机电常数， $\tau_e$ 为电机的电磁时间常数。小型的直流电机的 $\tau_e$ 很小， $1/\tau_e$ 远远超过了控制系统的通频带，其动态模型可简化为

$$G(s) = \frac{w(s)}{U(s)} = \frac{1/K_e}{\tau_m s + 1} \quad (4.24)$$

经过系统辨识的方法，可以得到电机的动态模型<sup>[34]</sup>。

通常小型直流电机的速度控制大多采用 PID 控制算法:

$$u(t) = K_p \left[ e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (4.25)$$

式中  $K_p$ 、 $T_i$ 、 $T_d$  分别为比例系数，积分时间常数，微分时间常数。

实际应用 PID 控制时，需将上式进行离散化处理，并采用增量式控制。

$$\begin{aligned}\Delta u(k) &= K_p \Delta e(k) + K_i e(k) + K_d [\Delta e(k) - \Delta e(k-1)] \\ &= Ae(k) - Be(k-1) + Ce(k-2)\end{aligned}\quad (4.26)$$

#### § 4.5.2 全向移动平台的控制特性

取全向移动平台中心  $P$  为参考点，取广义坐标为  $q = (x \ y \ \theta)^T$ ，其中  $(x, y)$  为平台中心  $O'$  在惯性坐标系  $OXY$  中的坐标， $\theta$  为平台正方向与  $X$  轴的夹角。我们进行坐标转换，可得平台在车体固连坐标系中速度与广义坐标系中速度得关系为：

$$\dot{q} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = [g_1(q) \ g_2(q) \ g_3(q)]U = \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \\ 0 \end{bmatrix} v_{x'} + \begin{bmatrix} -\sin \theta \\ \cos \theta \\ 0 \end{bmatrix} v_{y'} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \omega \quad (4.27)$$

这里输入  $(v_{x'} \ v_{y'} \ \omega)^T$  表示平台在车体固连坐标系中的速度。

结合 4.3 节全向移动平台的运动学模型，可得：

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin 45^\circ & \cos 45^\circ & L \\ -\sin 45^\circ & -\cos 45^\circ & L \\ \sin 45^\circ & -\cos 45^\circ & L \\ \sin 45^\circ & \cos 45^\circ & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{x'} \\ v_{y'} \\ \omega \end{bmatrix} \quad (4.28)$$

系统(4.27)的可控李代数<sup>[35]</sup>为：

$$\bar{\Delta} = \Delta = [g_1 \ g_2 \ g_3] = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.29)$$

因为  $\text{rank} \bar{\Delta} = 3$ ，根据  $W.L.Chow$ <sup>[35]</sup>提出的非线性可控性的判别可知系统(4.27)是可控的。

#### § 4.5.3 基于输入变换解耦的控制器设计

对式(4.27)做如下变换：

$$\text{设} \quad \begin{cases} u_1 = \cos \theta v_{x'} - \sin \theta v_{y'} \\ u_2 = \sin \theta v_{x'} + \cos \theta v_{y'} \\ u_3 = \omega \end{cases} \quad (4.30)$$

代入到系统(4.27)可得

$$\begin{cases} \dot{x} = u_1 \\ \dot{y} = u_2 \\ \dot{\theta} = u_3 \end{cases} \quad (4.31)$$

将  $(u_1 \ u_2 \ u_3)^T$  作为输入，系统方程变为了三个独立的积分器，从而实现了系统的解耦。将(4.31)代入到(4.28)可以得到输入  $u$  和四个轮子的转速间的关系

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin(\theta + 45^\circ) & \cos(\theta + 45^\circ) & L \\ -\sin(45^\circ - \theta) & -\cos(45^\circ - \theta) & L \\ \sin(\theta + 45^\circ) & -\cos(\theta + 45^\circ) & L \\ \sin(45^\circ - \theta) & \cos(45^\circ - \theta) & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} \quad (4.32)$$

设平台的末姿态  $q_e = (x_e \ y_e \ \theta_e)^T$ ，定义系统的姿态误差为  $e = q - q_e = (e_x \ e_y \ e_\theta)^T = (x - x_e \ y - y_e \ \theta - \theta_e)^T$ 。对  $e$  求导并将(4.31)式代入，可得如下的误差系统方程：

$$\begin{cases} \dot{e}_x = u_1 \\ \dot{e}_y = u_2 \\ \dot{e}_\theta = u_3 \end{cases} \quad (4.33)$$

取如下的反馈控制律

$$\begin{cases} u_1 = -k_x e_x \\ u_2 = -k_y e_y \\ u_3 = -k_\theta e_\theta \end{cases} \quad (4.34)$$

其中， $k_x$ 、 $k_y$  和  $k_\theta$  为大于零的常数。将(4.34)代入系统误差方程(4.33)中可以得到闭环系统为：

$$\begin{cases} \dot{e}_x = -k_x e_x \\ \dot{e}_y = -k_y e_y \\ \dot{e}_\theta = -k_\theta e_\theta \end{cases} \quad (4.35)$$

显然该系统在原点处是全局渐近稳定的，并且是指数稳定的。但指数稳定的系统的收敛速度较慢，尤其是在平衡点附件收敛速度更慢。为了加速系统的收敛，可取

$$k_x = \frac{1}{a_x + b_x |e_x|} + c_x, \quad k_y = \frac{1}{a_y + b_y |e_y|} + c_y, \quad k_\theta = \frac{1}{a_\theta + b_\theta |e_\theta|} + c_\theta \quad (4.36)$$

其中， $a_x$ 、 $b_x$ 、 $c_x$ 、 $a_y$ 、 $b_y$ 、 $c_y$ 、 $a_\theta$ 、 $b_\theta$ 、 $c_\theta$  均为大于零的正数。这样在距离平衡



点较远处的反馈控制律的增益较小，可以防止控制输出饱和；在距离平衡点较近处的反馈控制律的增益较大，可以加快系统的收敛。

### § 4.5.3 轨迹跟踪控制

取全向移动平台的中心点  $P$  为参考点。轨迹的参数方程为：

$$q_d(t) = (x_d(t), y_d(t))^T, t \in [0, T] \quad (4.37)$$

且  $x_d(t)$ 、 $y_d(t)$  连续。

由全向运动方式的特点，可以单独规划平台正方向的轨迹。设平台正方向的期望轨迹为  $\theta_d(t)$ ，且  $\theta_d(t)$  连续。 $P$  点沿  $X$  轴、 $Y$  轴的期望速度和平台期望角速度为：

$$v_{x_d} = \dot{x}_d(t), v_{y_d} = \dot{y}_d(t), \omega_d = \dot{\theta}_d(t) \quad (4.38)$$

可以改进上一节中介绍的基于输入变换解耦的全向机器人的姿态控制器实现全向平台的轨迹控制。

平台的跟踪误差为：

$$e(t) = \begin{bmatrix} x(t) - x_d(t) \\ y(t) - y_d(t) \\ \theta(t) - \theta_d(t) \end{bmatrix} \quad (4.39)$$

对  $e$  求导，并将(4.39)和(4.33)式代入，可得

$$\dot{e}(t) = \begin{bmatrix} \dot{e}_x(t) \\ \dot{e}_y(t) \\ \dot{e}_\theta(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_1 - v_{x_d} \\ u_2 - v_{y_d} \\ u_3 - \omega_d \end{bmatrix} \quad (4.40)$$

取如下的反馈控制律

$$\begin{cases} u_1 = -k_x e_x + v_{x_d} \\ u_2 = -k_y e_y + v_{y_d} \\ u_3 = -k_\theta e_\theta + \omega_d \end{cases} \quad (4.41)$$

其中， $k_x$ 、 $k_y$  和  $k_\theta$  均为大于零的常数。将(4.41)式代入(4.40)中可得闭环系统为

$$\begin{cases} \dot{e}_x = -k_x e_x \\ \dot{e}_y = -k_y e_y \\ \dot{e}_\theta = -k_\theta e_\theta \end{cases} \quad (4.42)$$

显然该误差系统在原点处是全局渐近稳定的，并且是指数稳定的。同样可以利用(4.36)式加快系统的收敛速度。

## § 4.6 实验结果及分析

### § 4.6.1 电机的控制的具体实施方式

实验式开发的全向移动平台采用驱动电机为瑞士 Maxon 公司生产的石墨电刷直流电机 RE 30。具体参数如下表 4.1 所示：

表 4.1

参数名称	单位	数据	参数名称	单位	数据
标称功率	W	60	额定电压	V	24
空载转速	Rpm	8640	堵转转矩	mNm	1070
速度/转矩斜率	rmp/mNm	8.29	空载电流	mA	153
堵转电流	A	41.2	电机电阻	Ohm	0.582
最大允许电流	A	4	最大允许转速	rpm	8200
最大效率	%	85	转矩常数	mNm/A	25.9
速度常数	rpm/v	369	机械时间常数	ms	3
转子惯量	gcmm	32.2	电机电感	mh	0.12

电机安装了相配的行星轮减速箱和光电码盘。行星轮减速箱规格为 GP 32C 166935，减速比为 21: 1。光电码盘为每转 500 个脉冲的双相光电码盘。

控制电路的处理器选用 TI 公司的 DSP 芯片—TMS320C240，采用 PWM 信号进行控制。采样时间为 0.01s。

以下为实测的电机闭环响应曲线，控制参数 A、B、C 分别为 3，-4.4，0.4。下图为四个电机分别的闭环阶越响应曲线，响应曲线基本重合，电机的个体差异较小。

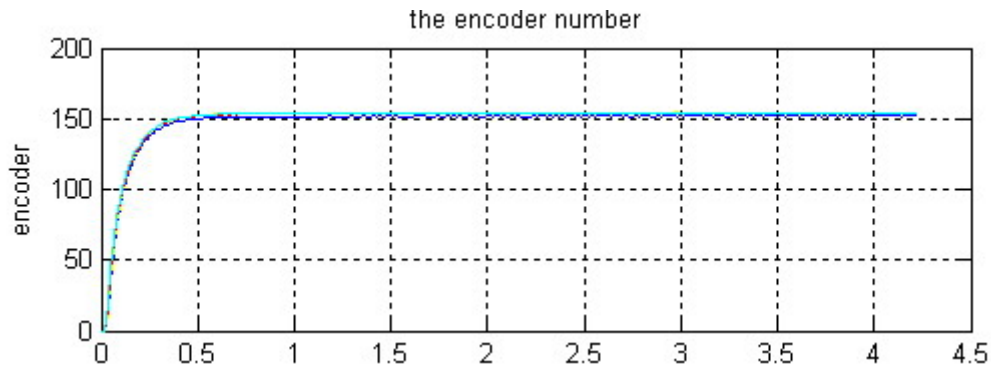


图 4.6.1 四个电机分别的闭环响应曲线

#### § 4.6.2 姿态稳定控制器的实验结果

这里用仿真实验检验控制算法的有效性。取机器人结构与实际结构相同，即驱动四轮对称分布，轮间夹角为  $90^\circ$ ，对角线轮间距为 450mm，采用上节介绍的 PID 控制器控制电机的速度。

取机器人初始姿态为： $(50 \ 150 \ \pi)^T$ ，末姿态为： $(350 \ 300 \ \pi/4)^T$ 。变换解耦控制器  $a_x$ 、 $b_x$ 、 $c_x$ 、 $a_y$ 、 $b_y$ 、 $c_y$ 、 $a_\theta$ 、 $b_\theta$ 、 $c_\theta$  分别取 0.2、0.01、0.2、0.2、0.01、0.2、0.1、0.1、0.4。下图显示了在控制器的作用下，机器人位置变化的轨迹。

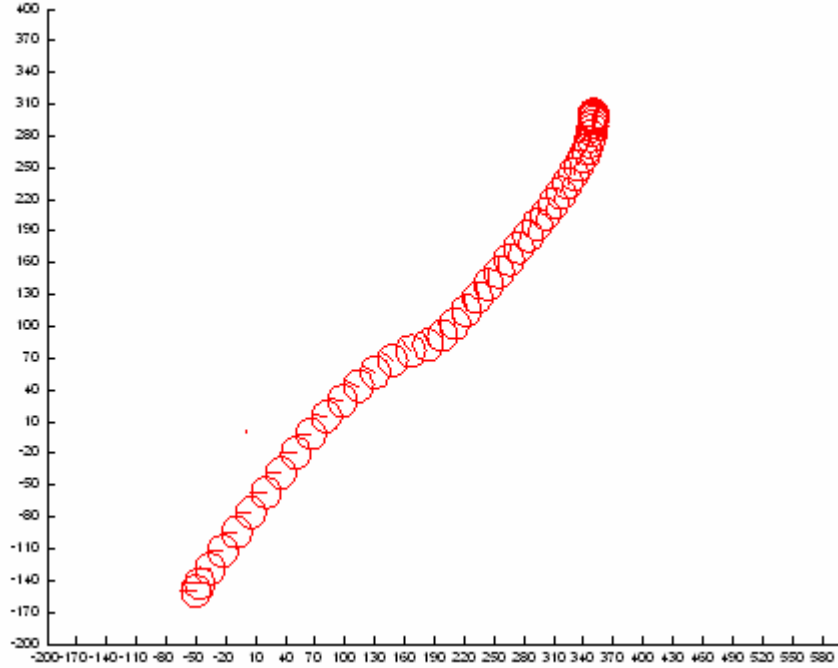


图 4.6.2 机器人在姿态稳定控制器作用下的运动轨迹

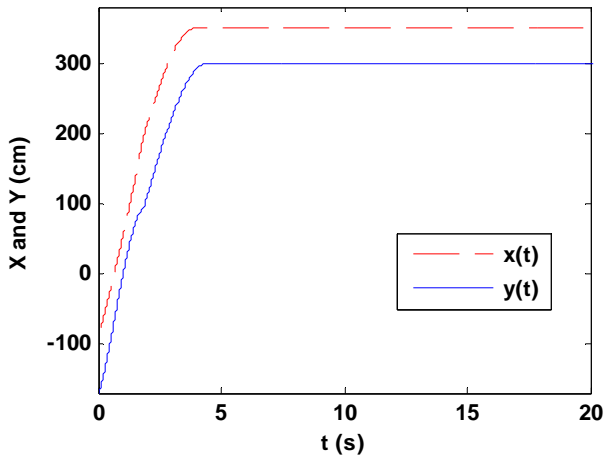


图 4.6.3 平台中心点 X、Y 坐标随时间变化的曲线

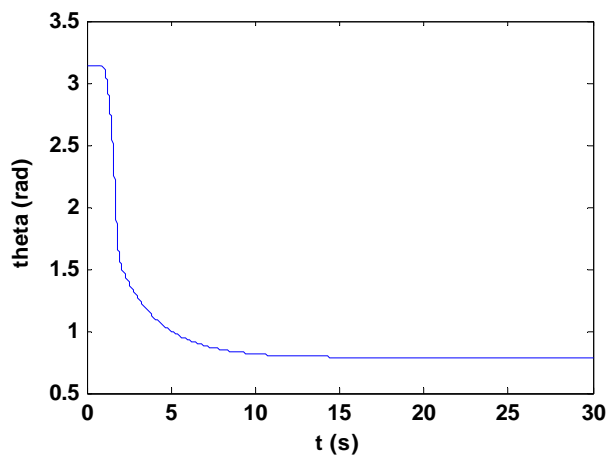


图 4.6.4 平台正方向随时间变化的曲线

#### § 4.6.3 轨迹跟踪控制器的实验结果

仿真实验中平台的性能参数与上一节相同，仍采用相同的 PID 控制器的方案。轨迹跟

踪控制器的参数为：

取机器人初始姿态为： $(-80 \ -170 \ \pi)^T$ ，目标直线： $x=25t-150$ ， $y=25t-150$ ， $\theta=\pi/4$ 。轨迹跟踪控制器 $a_x$ 、 $b_x$ 、 $c_x$ 、 $a_y$ 、 $b_y$ 、 $c_y$ 、 $a_\theta$ 、 $b_\theta$ 、 $c_\theta$ 分别取 0.2、0.01、0.2、0.2、0.01、0.2、0.1、0.1、1.2。下图显示了在控制器的作用下，机器人位置变化的轨迹。

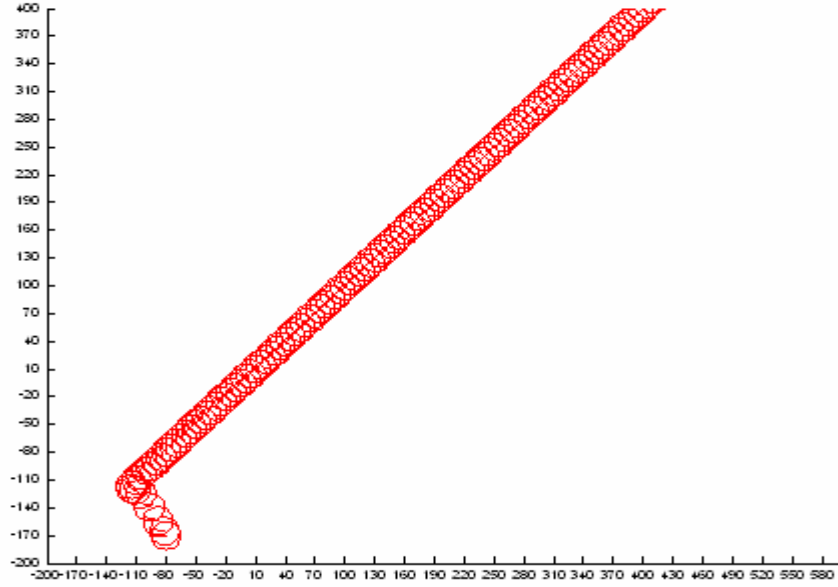


图 4.6.5 机器人跟踪直线的运动轨迹

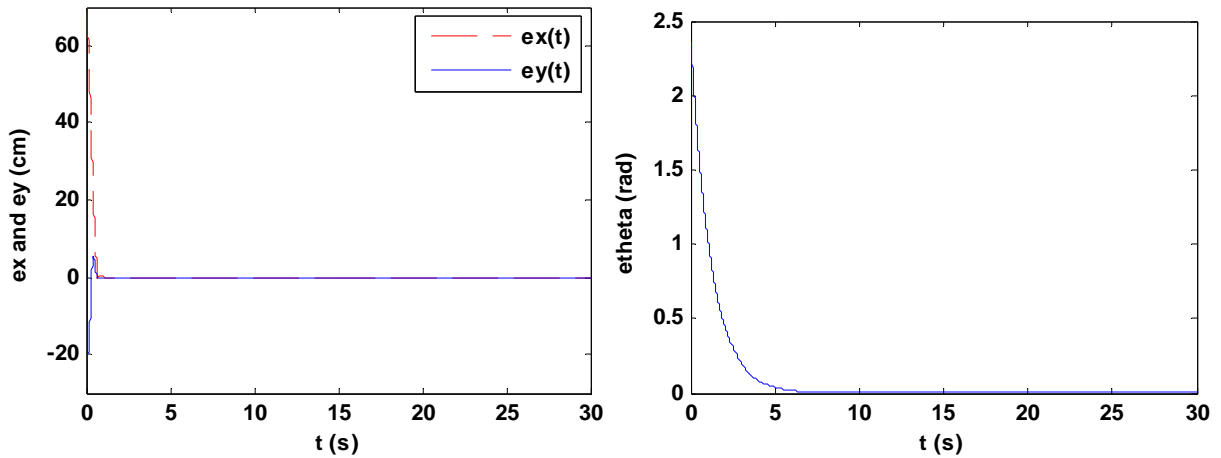


图 4.6.6 平台中心点 X、Y 坐标随时间变化的曲线      图 4.6.7 平台正方向随时间变化的曲线

取机器人初始姿态为： $(460 \ 60 \ \pi)^T$ ，目标圆： $x=250\cos(0.2t)+100$ ， $y=250\sin(0.2t)+100$ ， $\theta=0.2t$ 。轨迹跟踪控制器 $a_x$ 、 $b_x$ 、 $c_x$ 、 $a_y$ 、 $b_y$ 、 $c_y$ 、 $a_\theta$ 、 $b_\theta$ 、 $c_\theta$ 分别取 0.04、0.01、1.0、0.04、0.01、1.0、0、0、0.8。下图显示了在控制器的作用下，机器人位置变化的轨迹。

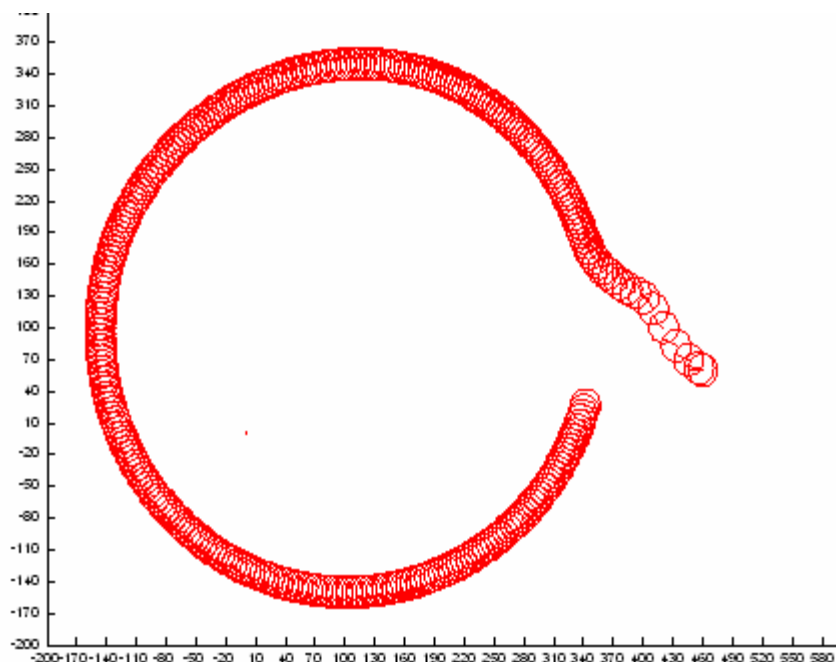


图 4.6.8 机器人跟踪圆形的运动轨迹

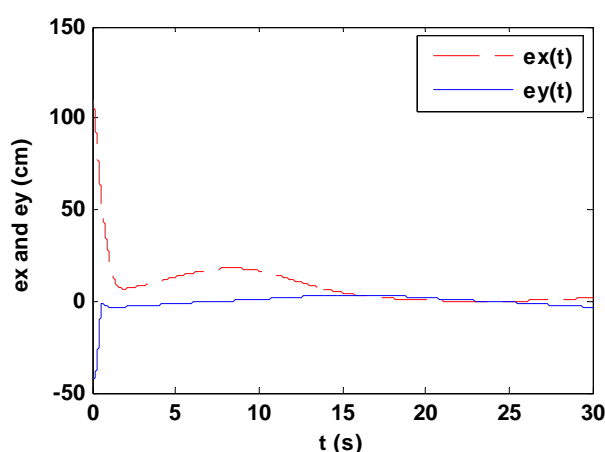


图 4.6.9 平台中心点 X、Y 坐标随时间变化的曲线

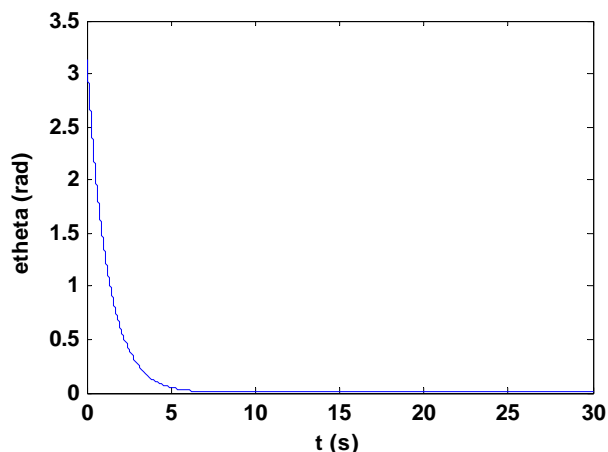


图 4.6.10 平台正方向随时间变化的曲线

#### § 4.6.4 实际验证及实验结果

实验内容为检验机器人在前进方向上遇阻后的避障能力。

如图所示，用白色圆圈圈住的机器人为待检验的机器人，其他机器人为障碍物。设定机器人初始状态位置在 A 点，正方向背对黄色球门，末状态位置为 E，正方向不变。

箭头所指的方向为机器人运动的方向，图号 1、2、3、4 为按时间顺序拍摄下来的机器人位置图。从图上我们可以看出机器人在不改变姿态角的情况下完成从 A→E 的纯平动曲线运动。图 5 为将机器人通过位置进行合成处理后的效果图，白线代表机器人通过的路径。



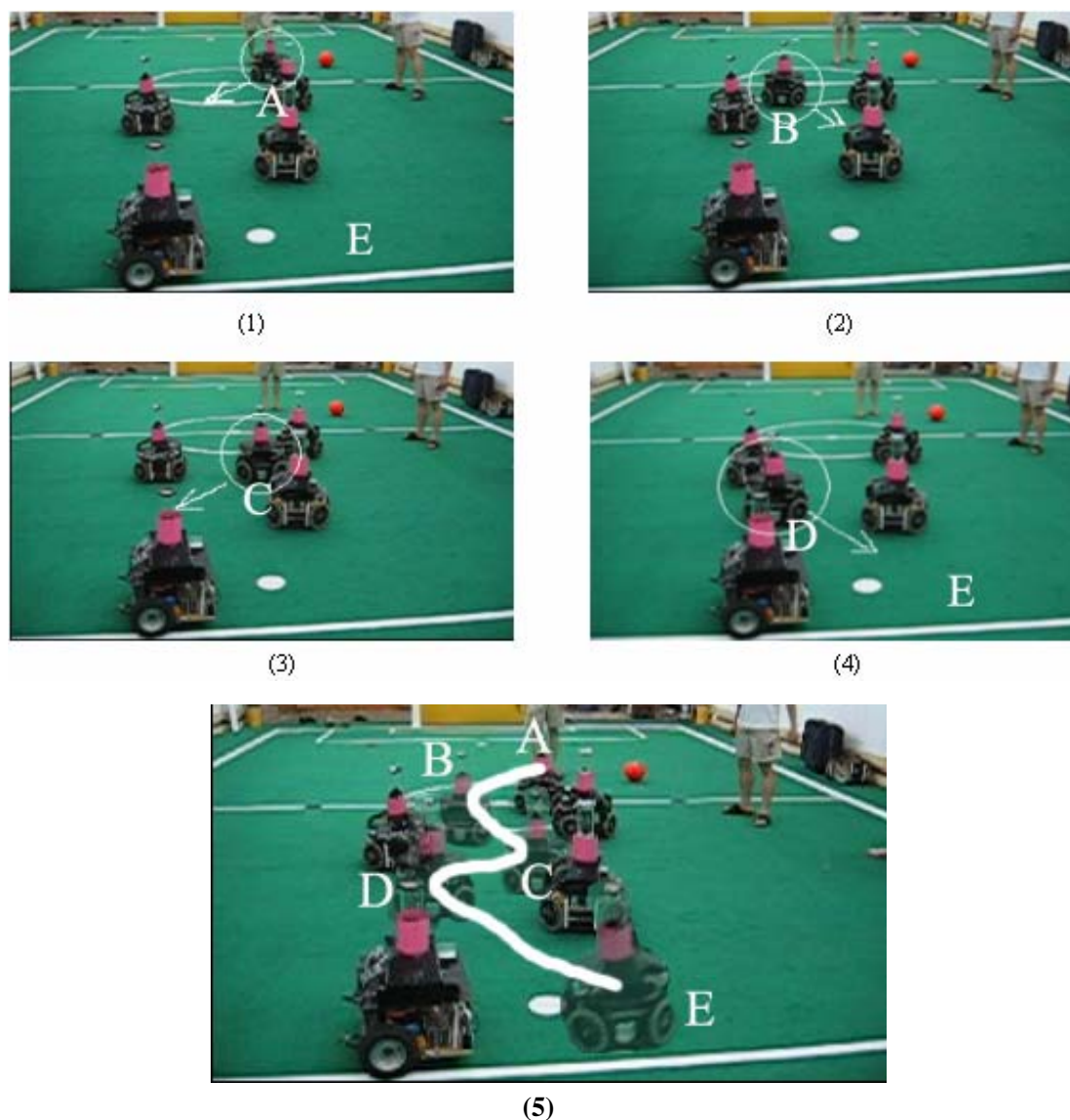


图 4.6.11 实测实验的结果图

## § 4.7 展望

本节内容为对提高平台性能的一些进一步想法，这些在设计全向移动平台过程中产生的想法由于时间所限，没有进行深入研究，本节内容可为今后继续研究全向移动平台的控制方法提供参考。

### § 4.7.1 问题的产生——全向轮运动失效的现象

全向运动的实现是通过控制一组轮子的速度和驱动力，来达到在平面内所需的运动和动力的要求。但由于系统存在过约束，以及各种条件的制约，如外部地面环境，内部的电机性能等，这些会给控制带来一定的难度。如果控制不当，很可能出现全向轮运动失效的现象。因此为了获得整体机器人的控制精度，需要对机器人轮系的协调、整体性能进行深入的了解。

全向轮的运动失效可以分为“抱死”和“打滑”两种。

“抱死”产生是因为运动系统的自由度出现冗余。由于平面内的运动自由度只有三个，引入四轮驱动后，轮子间必然产生约束。如果四个轮子的运动不协调，轮系内部生成的“内应力”将相互抑制，出现电机堵转的现象。

“打滑”是因为地面提供的摩擦力不足以满足轮子所需驱动力，轮面与地面发生相对滑动，造成当前机器人的运动状态不可控。打滑是由四轮的运动不协调，或者车体加速度过大引起的。

由式(4.12) 可得  $v = Ps$ ，其中  $P$  是由整体速度求得各轮子速度的解算矩阵，对  $P$  求伪逆。

可得：

$$P^+ = \begin{bmatrix} \frac{1}{-4\sin(\theta+45^\circ)} & \frac{1}{-4\sin(45^\circ-\theta)} & \frac{1}{4\sin(\theta+45^\circ)} & \frac{1}{-4\sin(45^\circ-\theta)} \\ \frac{1}{4\cos(\theta+45^\circ)} & \frac{1}{-4\cos(45^\circ-\theta)} & \frac{1}{-4\cos(\theta+45^\circ)} & \frac{1}{4\cos(45^\circ-\theta)} \\ \frac{1}{4L} & \frac{1}{4L} & \frac{1}{4L} & \frac{1}{4L} \end{bmatrix} \quad (4.43)$$

进一步，取  $s'$  为机器人经过四轮速度合成后表现出的整体速度， $v'$  为各轮子的实际速度。可推出

$$s' = P^+ v' \quad (4.44)$$

在不出现失效的情况下，满足以下方程： $s = s'$ ， $v = v'$

即

$$v = Ps = Ps' = PP^+ v' \quad (4.45)$$

其中

$$PP^+ = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} 3 & 1 & -1 & 1 \\ 1 & 3 & 1 & -1 \\ -1 & 1 & 3 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & 3 \end{bmatrix}$$

由上式推出

$$4v_1 = 3v_1 + v_2 - v_3 + v_4 \Rightarrow v_1 + v_3 = v_2 + v_4 \quad (4.46)$$

即在具有对称结构的四轮驱动全向轮系统中，相对位置轮的运动速度和等于相邻两轮的速度之和。上式也给出了此过约束系统的约束表达式。应用上式就可以检验在运动过程中，是否存在由轮系运动不协调引起的打滑。

此外，因为  $\Delta v_1 + \Delta v_3 = \Delta v_2 + \Delta v_4$  也成立，可得理想工作状态下需要满足的动力学方程

$$\Delta v_1 + \Delta v_3 = \Delta v_2 + \Delta v_4 \quad (4.47)$$

即：

$$a_1 + a_3 = a_2 + a_4 \quad (4.48)$$

$a_i$  为轮  $i$  作用于地面生成的驱动力在轮心处产生的加速度。

#### § 4.7.2 全向运动控制系统的设计改进

目前采用的单纯基于运动学模型的控制方案不能够完全发挥全向移动平台优越的运动性能,要使运动平台的效能最大化,必须引入动力学模型的控制方案。

例如,让平台向前做加速运动时,最优的运动效果自然是车体以能够实现的最大的加速度完成从启动到运动到目标点这一过程,而且在整个运动过程中不出现运动失效。考虑到地面所能够提供的最大摩擦力限制,平台运动不出现打滑驱动轮的驱动力必须满足:

$$F_{\text{驱}} \leq f_{\text{摩max}} \quad (4.49)$$

所以底层控制部分要将电机输出的驱动加速度限制在一个固定的范围内。

下图为全向移动平台一种基于运动学和动力学的控制方法<sup>[8]</sup>。

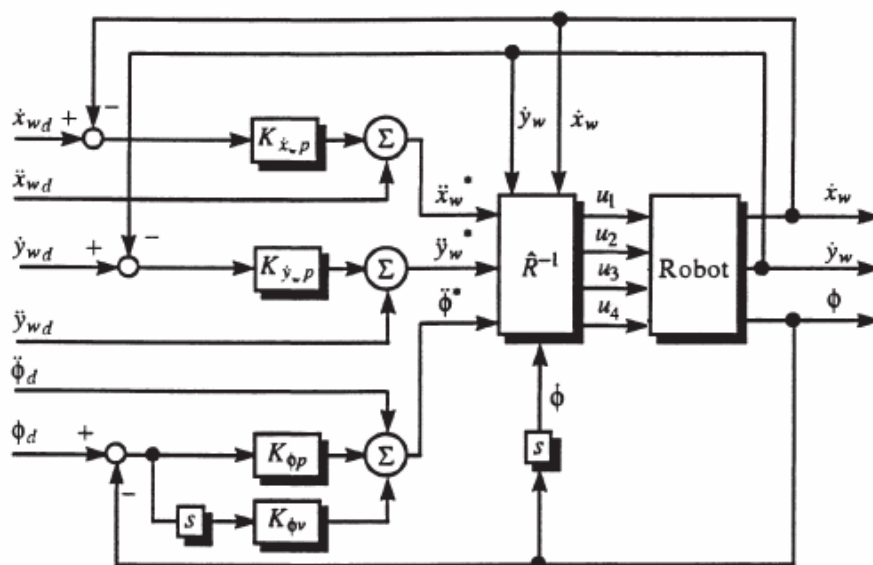


图 4.7.1 改进的系统控制模型

图中 $[x_{wd} \ y_{wd} \ \phi_{wd}]^T$ 是期望系统在世界坐标系中达到的位置,  $[x_w \ y_w \ \phi]^T$ 为系统实际位置,  $[u_1 \ u_2 \ u_3 \ u_4]^T$ 为四个电机的驱动电压。 $\hat{R}^{-1}$ 为动力学解算方程(4.19)。

### § 4.7.3 电机协调驱动的设置

由 4.7.1 节分析可知,全向移动平台为过约束系统,要控制系统处于正常工作的状态,须满足一定的关系,即各驱动轮的加速度必须满足式(4.48)。如果等式(4.48)不成立,驱动轮之间必然产生约束,轮系内部生成的“内应力”将相互抑制,出现电机堵转内耗的现象。

文章[6]提出了一种由机械传动对过约束系统进行改造的方法,但该方法机械结构复杂,加工困难,而且仅适用于四轮布局严格对称分布的情况。

为了使各驱动轮完成协调工作必须对各电机得加速度进行控制,使电机之间加速度相互制约、耦合。未来可以借鉴文章[36]提出的一种力反馈控制系统的控制方法,设计出针对多个电机的速度反馈协调控制方法。

## § 4.8 小结

本章系统分析了构成全向运动平台的要素——全向轮组合使用及在底盘布局对系统运动性能的影响。给出了目前采用方案的运动学及动力学模型描述。分析可全向移动平台的控制特性，提出了全向运动系统姿态稳定控制器和轨迹跟踪控制器的设计，并设计仿真和实物实验验证了控制算法的有效性和可行性。最后展望了提高全向移动平台性能的一些想法。

## 第五章 结论与展望

### § 5.1 结论

本论文以 RoboCup 中型组机器人足球赛为应用背景, 设计并实现了一种具有全向移动功能的运动平台, 并在此基础上对全向移动平台的控制算法以及系统控制方案进行了详细的描述。

综合起来, 本论文主要完成以下工作:

- (1). 设计并实现了一种较为实用化的全向轮——NuBot 轮, 及其驱动轮系。

该全向轮的设计经过大量的实验和分析, 结合比赛的要求和实验室目前所具有的实际条件, 开发了一种简单、经济、实用的全向轮及其驱动轮系。经过比赛和室外环境的验证, 该轮可以实现良好的全向运动效果, 而且适用范围较广。

- (2). 解决了四轮驱动时存在的四点不能同时着地问题。

四轮驱动时如果轮与地面接触不好, 容易出现打滑、空转的现象, 影响控制精度。本文设计了一种四轮中心铰接的方式, 将四点问题演变为两个三点着地的问题。使底盘不仅能够在平面内保持各驱动轮紧压地面, 而且还能够适应较大起伏的地面, 满足室外环境的要求。

- (3). 为全向移动平台设计了多套减振装置

由于初期全向轮的设计方案不理想, 带来很明显的多边形效应。如何解决该平台工作时带来的振动问题, 一直是本文工作的重点。经过大量对减振材料和减振结构的分析和实验, 设计、确定了多套行之有效的减振方法。最后采用了合理的组合方案, 使平台的减振达到了良好的效果。

- (4) 为全向移动平台的全向视觉系统设计了一套安装调节装置

全向视觉调节装置可以方便地实现镜面与摄像机之间距离的粗、微调节, 以及系统整体的水平调节。其中水平调节装置具有三自由度姿态调节功能, 它可以方便的实现水平调整以及有限的垂直位置调整。

- (5) 将各个功能模块整合成为一套性能稳定的全向运动系统

组成全向移动平台必要的功能模块都是有机的并以特定的关系联系在一起的, 经过系统设计, 最终使各要素之间的有机联系得到了很好的统一协调, 使总系统获得较理想的整体功能。

- (6) 全向运动平台控制

系统分析了构成全向运动平台的要素——全向轮的使用对系统运动性能的影响。给出了目前采用方案的运动模型描述。分析全向移动平台的控制特性, 提出了全向运动系统姿态稳定控制器和轨迹跟踪控制器的设计, 并设计仿真和实物实验验证了控制算法的有效性和可行性。最后提出了提高全向移动平台性能的一些想法。



本文所设计的全向移动平台已经应用于 2005 年全国机器人大赛中型组足球机器人。通过大赛的检验,证明该全向移动平台工作稳定,具有良好的运动性能。最终获得了中型组比赛第三名的较好成绩。

本文自主开发的全向移动平台在中型组的应用属于国内首创,论文所取得的成果为其他研究单位进一步研究全向运动提供了有益的借鉴作用。

## § 5.2 展望

全向移动平台的设计虽然取得的一定的成果,但由于时间所限,还存在许多问题有待解决。

(1) 进一步优化全向系统的结构,结合比赛环境使平台的性能更加适合赛场。如改进轮系的布局,加装防撞保护装置;改变平台各模块之间的连接结构,设计出更加轻盈灵活的样式来,增加平台的机动性能。

(2) 全向移动平台的减振系统还不理想,目前采用振动的被动控制控制精度差、控制的频带窄、低频控制差。需要在今后的学习和工作中进行主动减振相关的学习和研究。

(3) 将全向移动平台开发成一个可以成熟应用的平台。目前设计的平台只是实验性质的,结构还不稳定。把它作为一套可供实验科研需要的平台还需要大量的工作要完成、细化。

(4) 全向移动平台的控制算法还需要进一步研究。目前做的控制算法只是完成全向平台最基本的功能,涉及到复杂运动曲线的跟踪还需要更深入的研究控制算法。

(5) 全向移动平台越野性能的研究。目前这套平台虽然具有一定的越野能力,但只是进行了一些有限的实验,没有涉及到复杂路面的算法控制。全向越野不同于一般差动系统的越野,目前在这个领域还没有很多研究,下一步可以考虑作一些空间全向运动的实验和分析。

全向移动平台的开发成功为研究全向运动提供了一个良好的实验平台,今后可在现有平台的基础上进行移动机器人的相关开发和实验。

## 致谢

硕士阶段的学习生活即将结束，回顾这两年多所走过的历程，感慨良多。有太多的人和事值得回忆，也有太多的经验和教训值得我总结和汲取。在这里特别感激那些在我的学习研究中给予过我帮助和鼓励的人。

首先感谢我的导师郑志强教授，郑老师在学习和科研上对我悉心的指导，在生活上给予我亲切的关怀和帮助，使我受益匪浅。郑老师渊博的知识，严谨的治学精神和科研态度为我树立了人生的榜样。

感谢实验室师兄师弟，为实验室营造了一种良好的学术氛围，在这种环境下工作和学习，再枯燥的工作也变成了非常愉快的事情。感谢柳林、刘斐、季秀才，韩大鹏师兄，他们为我的论文提供了很多的意见和建议。特别感谢柳林和刘斐师兄，他们在我课题研究和论文撰写阶段给予了极大的帮助、指导和鼓励，使我顺利地度过了一个又一个难关。师兄们刻苦钻研的精神与深厚的理论素养让我钦佩，是我学习的楷模。感谢并肩学习的刘玉鹏、卢惠民，他们一些天才的想法和绝妙的建议常常令我有豁然开朗的感觉。感谢师弟王祥科、李鹏，他们为本论文的工作提出了许多宝贵意见。在论文完成过程中，大家团结合作，刻苦攻关，和他们在一起的这些经历是一种宝贵的财富，使我终身受益。

感谢工艺室的王师傅和于师傅，他们以丰富的经验、娴熟的技能为平台的设计改进、加工提供了很多有益的建议，承担了大量繁重的加工工作。

本论文的完成还得到了潘存云老师的热心指导，他丰富的科研经验、谦和的态度给我留下了非常深刻的印象。

向那些给过我帮助和关心但没有在本文中提到的朋友道一句：谢谢！

最后感谢我的父母，感谢他们多年来对我的养育之恩，浓浓亲情，无以回报，希望他们永远健康、快乐。

## 参考文献

- [1] Raul Rojas: Omnidirectional Control, FreieUniversityBerlin, Technical Report B-10-03, FU-Berlin, June 2003.
- [2] Brian Carter, Matt Good, Mike Dorohoff, Jae Lew, Robert L. Williams || , Paolo Gallina : Mechanical Design and Modeling of an Omni-directional RoboCup Player. RoboCup. AI Conference[c]. Seattle WA:2001.1-10.
- [3] Tamas Kalmar-Nagy, Raffaello D Andrea, Pritam Ganguly: Near-optimal dynamic trajectory generation and control of an omnidirectional vehicle[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2003, 46:47-64.
- [4] Olaf Diegel, Aparna Badve, Glen Bright, Johan Potgieter, Sylvester Tlale: Improved Mecanum Wheel Design for Omni-directional Robots. 2002 Australasian Conference on Robotics and Automation Auckland, 27-29 November 2002.
- [5] Ashmore M and Barnes N: Omni-drive robot motion on curved paths: The fastest path between two points is not a straight-line. in Proc Australian Joint Conference on Artificial Intelligence, Dec., 2002, 225-236.
- [6] H Asama, M Sato, L Bogoni, H Kaetsu, A. Matsumoto and I. Endo: Development of an Omni-Directional Mobile Robot with 3 DOF Decoupling Drive Mechanism. In IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (1995)
- [7] B Carlisle: An Omni-Direction Mobile Robot. In B. Rooks, (ed.): Developments in Robotics. IFS Publications/North-Holland Publishing Company. (1983) 79-87
- [8] K Watanabe, Y Shiraishi, S G Tzafestas, J Tang, and T Fukuda: Feedback Control of an Omnidirectional Autonomous Platform for Mobile Service Robots. Journ. Intelligent and Robotic Systems, 22 (1998) 315-33
- [9] F G Pin and S M Killough: A New Family of Omnidirectional and Holonomic Wheeled Platforms for Mobile Robots, IEEE Transactions on Robotics and Automation 10(4), Aug (1994) 480-489
- [10] Jae-Bok Song, Kyung-Seok Byun, Design and Control of a Four-Wheeled Omnidirectional Mobile Robot with Steerable Omnidirectional Wheels, Journal of Robotic Systems, Wiley Periodicals, Vol. 21, No. 4, pp. 193-208, 2004.04.
- [11] C Voo: Low Level Driving Routines for the OMNI-Directional Robot, Centre for Intelligent Information Processing Systems, Department of Electrical & Electronic Engineering, The University of Western Australia, Honours Thesis, January (2000)
- [12] Hikari Fujii, Yusuke Ohde, Masayuki Kato, Fumitaka Otsuka, Naoko Sema, eigen team description. Technical Report B-10-03, Eigen-Berlin June 2003
- [13] B Carlisle: An Omni-Direction Mobile Robot. In B. Rooks, (ed.): Developments in Robotics. IFS Publications/North-Holland Publishing Company. (1983) 79
- [14] Riichiro DAMOTO, Wendy CHENG and Shigeo HIROSE: Holonomic Omni-Directional Vehicle with New Omni-Wheel Mechanism. IEEE International Conference on Robotics &

Automation Seoul, Korea • May 21-26, 2001

- [15] 美国国家宇航局 <http://marsrovers.jpl.nasa.gov/gallery/video/hardware.html/>
- [16] Yoshihiko Nakamura ,Tatsuro Endo: An Omnidirectional Vehicle on a Basketball.
- [17] 黄良平 空气弹簧的应用与发展趋势 <http://www.trp.com.cn/tech/jslw.htm>
- [18] 振动与冲击手册 第三卷 国防工业出版社
- [19] B. Carter, M. Good, M. Dorohoff, J. Lew, R. L. Williams II, P. Gallina, Mechanical Design and Modeling of an Omni-directional RoboCup Player, The RoboCup 2001 International Symposium, Seattle
- [20] Kyung-Seok Byun, Sung-Jae Kim, Jae-Bok Song: Design of Continuous Alternate Wheels for Omnidirectional Mobile Robots. ICRA 2001: 767-772
- [21] Lance Wilson, Craig Williams, Justin Yance, Jae Lew, Robert L. Williams II, and Paolo Gallina. Design and modeling of a redundant omni-directional robocup goalie. In Proceedings RoboCup 2001 International Symposium, Seattle, WA, August 2001
- [22] Kyung-Seok Byun, Sung-Jae Kim, Jae-Bok Song: design of a four-wheeled omnidirectional mobile robot with variable wheel arrangement mechanism. IEEE International Conference on Robotics & Automation Washington. DC May 2002.
- [23] John (Jizhong) Xiao: Introduction to Robotics. <http://www.ccny.cuny.edu/jxiao/mobot.pdf>
- [25] 陈盛, 李永新, 朱璐, 皮骄阳, 李尚荣, 孙刚: “全向移动机器人的结构设计与姿态控制研究” 2004 机器人足球赛研讨会会议论文集 P127
- [26] 徐永民, 张培仁, 郑旭东: “四轮 F180 型机器人的设计与控制” 2004 机器人足球赛研讨会会议论文集 P164
- [27] 酒井忠明, 王道义, 陈英俊: “结构力学” 人民教育出版社 1970。
- [28] 成大先: “机械设计手册” 化学工业出版社 2004。
- [29] 祁建城: “磁悬浮技术在汽车工程中的应用分析” <http://www.hzjdw.com/vThesis/ViewThesis.asp?ThesisID=NewMaker1822>
- [30] 白井良明: “机器人工程” 科学出版社, OHM 社 2001。
- [31] 张志涌: “精通 Matlab 6.5” 北京航空航天大学出版社, 2003。
- [32] SolidWorks: “SolidWorks 高级装配体建模” 清华大学出版社, 2003
- [33] 梅晓榕, 兰朴森, 柏桂珍: 自动控制元件及线路. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1993 年 10 月第一版。
- [34] 季秀才: RoboCup 小型组机器人运动控制研究。国防科技大学硕士学位论文, 2003 年。
- [35] 胡跃明: 非线性控制系统理论与应用, 国防工业出版社, 2002 年。
- [36] 邓启文, 韦庆, 李泽湘: 大时延力反馈双边控制系统, 机器人 2005 年第 5 期 P390—395。
- [37] 卢惠民: 机器人全向视觉系统自定位方法研究。国防科技大学硕士学位论文, 2005 年。