

普通高等教育“十三五”规划教材

机器人学基础

Fundamentals of Robotics

蒋志宏 ◎ 编著

 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

普通高等教育“十三五”规划教材

机器人学基础

蒋志宏 编著



 **北京理工大学出版社**
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

版权专有 侵权必究

图书在版编目 (CIP) 数据

机器人学基础/蒋志宏编著. —北京: 北京理工大学出版社, 2018. 4

ISBN 978-7-5682-5512-7

I. ①机… II. ①蒋… III. ①机器人学-基本知识 IV. ①TP24

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 073222 号

机器人学基础

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)

(010) 82562903 (教材售后服务热线)

(010) 68948351 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 /

开 本 / 787 毫米×1092 毫米 1/16

印 张 / 14.25

彩 插 / 1

字 数 / 332 千字

版 次 / 2018 年 4 月第 1 版 2018 年 4 月第 1 次印刷

定 价 / 46.00 元

责任编辑 / 张慧峰

文案编辑 / 张慧峰

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 王美丽

图书出现印装质量问题, 请拨打售后服务热线, 本社负责调换

本书编写组

主 编 蒋志宏

副主编 李 辉 莫 洋

徐 乾（中国人民大学附属中学）

参编者 宋真子 孙泽源 周伟刚 徐佳锋

王 鑫 章强兵 曹晓磊 付政权

机器人学集机械学、计算机科学与工程、控制理论与控制工程学、电子工程学、人工智能、智能传感、仿生学等多学科之大成，是一门高度综合和交叉的前沿学科，是目前和未来的研究热点。机器人技术是涉及国家未来产业和前沿科技的核心力量。国务院发布了《中国制造 2025》《新一代人工智能发展规划》，科学技术部高技术研究发展中心发布了《智能机器人重点研发计划》，国家自然科学基金委推出了《共融机器人基础理论与关键技术重大研究计划》，等等。这些重要政策和计划的出台，表明机器人技术、高端智能制造及人工智能等已经成为我国重要的科技战略发展领域。

笔者有着近 10 年的“机器人学”相关课程的教学经历和经验，同时，在国家 863 高科技计划、国家自然科学基金、国防基础科研和航天 921 等项目支持下，笔者所在团队对机器人相关技术进行了 10 多年的研究，积累了丰富的多种机器人系统平台的研究经验。本书的初衷，是想把团队多年的机器人技术研究，通过翔实具体的机器人基础理论知识推导和典型研究范例系统地展示给机器人技术的学习者，特别是广大的本科生和研究生机器人爱好者，为他们提供系统和范例式的机器人技术学习帮助，使得他们机器人技术的学习和研究变得更加实效。

本书可作为机械电子工程专业、控制理论与控制工程专业等高年级本科生、硕士研究生及博士研究生的教学参考书，同时，也可从事机器人和自动化装备等应用研发工作的技术人员提供详细参考。

由于作者水平有限，不足之处在所难免。欢迎读者提出批评改进意见。作者的电子邮件地址为：jiangzhihong@bit.edu.cn

本书配套电子资料请在出版社网站 www.bitpress.com.cn 下载。

作者

基 础 篇

第 1 章 绪论

- 1.1 机器人发展趋势
- 1.2 机器人系统组成与分类
- 1.3 本书概要
- 习题

第 2 章 机器人数学基础

- 2.1 刚体的位姿描述
- 2.2 坐标系的齐次变换
- 2.3 姿态的其他表示方法
- 习题

第 3 章 机器人正运动学

- 3.1 坐标系的建立方法
- 3.2 坐标系建立的特殊情况
- 3.3 典型机器人的正运动举例
- 3.4 坐标系的命名
- 习题

第 4 章 机器人逆运动学

- 4.1 逆运动学解的存在性与多重解
- 4.2 三个相邻关节轴线交于一点的逆运动学求解
- 4.3 逆运动学的几何解法
- 4.4 逆运动学的代数解法
- 4.5 典型机器人的逆运动学举例
- 4.6 逆运动学对机器人的设计约束

习题

第5章 速度与雅可比矩阵

- 5.1 速度与角速度
- 5.2 角速度的特性
- 5.3 机器人连杆间速度的传递
- 5.4 雅可比矩阵的求解
- 5.5 雅可比矩阵的特性
- 5.6 力域中的雅可比

习题

第6章 轨迹规划

- 6.1 轨迹规划概述
- 6.2 一般轨迹规划方法
- 6.3 关节空间与笛卡尔空间轨迹规划方法
- 6.4 冗余自由度机器人的规划
- 6.5 应用实例

习题

提高篇

第7章 机器人关节伺服运动控制

- 7.1 机器人关节伺服系统组成
- 7.2 伺服电机驱动控制原理
- 7.3 关节伺服多环路控制器设计
- 7.4 应用实例

习题

第8章 机器人动力学

- 8.1 刚体的加速度
- 8.2 牛顿方程
- 8.3 欧拉方程
- 8.4 牛顿-欧拉迭代动力学方程
- 8.5 其他动力学求解方法
- 8.6 应用实例

习题

第9章 机器人的柔顺控制

- 9.1 位置控制和力控制
- 9.2 力控制的发展
- 9.3 阻抗控制
- 9.4 力/位混合控制
- 9.5 应用实例

习题

第 10 章 机器人运动学参数辨识

- 10.1 背景
- 10.2 坐标系微分运动学
- 10.3 相邻关节间运动学误差模型
- 10.4 机器人末端运动学误差模型
- 10.5 机器人运动学参数辨识计算

习题

第 11 章 机器视觉识别与定位

- 11.1 摄像头参数标定
- 11.2 机器人视觉识别
- 11.3 机器人视觉定位
- 11.4 机器人视觉伺服
- 11.5 应用实例

习题

第 12 章 基于 Adams/Matlab 机器人动力学联合仿真

- 12.1 机器人 Adams 仿真模型搭建
- 12.2 基于 S-Function 的控制程序编写
- 12.3 联合仿真流程
- 12.4 后数据处理
- 12.5 应用实例

习题

附录 应用实例与算法程序

- 第 3 章 机器人正运动学
- 第 4 章 机器人逆运动学
- 第 5 章 速度与雅可比矩阵
- 第 6 章 轨迹规划
- 第 7 章 机器人关节伺服运动控制
- 第 8 章 机器人动力学
- 第 9 章 机器人的柔顺控制
- 第 12 章 基于 Adams/Matlab 机器人动力学联合仿真

参考文献

基础篇



第 1 章

绪 论

习近平总书记在 2015 年两院院士大会上指出：机器人是“制造业皇冠顶端的明珠”，其研发、制造、应用是衡量一个国家科技创新和高端制造业水平的重要标志。自从吐着腾腾白烟的蒸汽机打开了工业之门，现代化的目的就是解放人的身体。机器人将不仅取代人的体力劳动，更会延伸人的精神世界。目前，机器人技术处于高速发展黄金期，在工业生产、助老助残、医疗康复、家庭服务、空间及海洋探测、核环境等应用领域得到了广泛应用与发展，对人类的生产和生活产生了广阔而深远的影响。

1.1 机器人发展趋势

机器人是一种自动执行任务的机器装置。它既可以接受人类指挥，又可以运行预先编置的程序，也可以根据以人工智能技术制定的规则自主执行任务。它的任务是协助或代替人类进行工作，例如在工业生产、危险行业等场合工作。

1920 年，捷克作家 K·凯比克在一科幻剧本中首次提出了 Robot（汉语前译为“劳伯”）这个名词，现在已被人们作为“机器人”的专用名词。1950 年美国作家 I·阿西莫夫提出了机器人学（Robotics）这一概念，并提出了所谓的“机器人三原则”，后来，人们不断提出对机器人三原则的补充、修正和发展，形成了以下机器人原则：

元原则：机器人不得实施行为，除非该行为符合机器人原则；

第零原则：机器人不得伤害人类整体，或者因不作为致使人类整体受到伤害；

第一原则：机器人不得伤害人类，或坐视人类受到伤害；

第二原则：除非违背第一原则，机器人必须服从人类的命令；

第三原则：在不违背第一及第二原则下，机器人必须保护自己；

第四原则：除非违反高阶原则，机器人必须执行内置程序赋予的职能；

繁殖原则：机器人不得参与机器人的设计和制造，除非新机器人行为符合机器人原则。

有了以上的机器人原则，机器人就不再是“欺师灭祖”“犯上作乱”的反面角色，而是人类忠实的奴仆和朋友。同时，为了维持国家或者世界的整体秩序，如若有个机器人为保护人类整体，必须杀害一个人或一群人，机器人的内置程序为了人类整体利益着想就会同意这种谋杀行为。

1959 年，美国发明家德沃尔与约瑟夫·英格伯格联手制造了世界上第一台工业机器人（图 1.1）。这个机器人共有 4 个自由度，外形有点像坦克炮塔，基座上有一个大机械臂，大臂可绕轴在基座上转动，大臂上又伸出一个机械臂，它相对大臂可以伸出或缩回。小臂顶

有一个手腕，可绕小臂转动，进行俯仰和侧摆。这个机器人的功能和人手臂功能相似，手腕前侧是手，即机器人末端操作器。此后，英格伯格和德沃尔成立了 Unimation 公司，兴办了世界上第一家机器人制造工厂。第一批工业机器人被称为“尤尼梅特（UNIMATE）”，意思是“万能自动”。

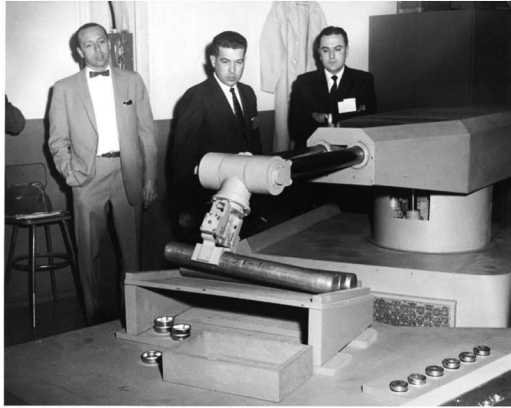


图 1.1 第一台工业机器人

20 世纪 70 年代，随着计算机、现代控制、传感技术、人工智能技术的发展，机器人得到了迅速发展。1979 年，Unimation 公司推出了 PUMA 机器人（图 1.2），它有 6 个自由度、全电动驱动、多 CPU 控制，可配置视觉、触觉、力觉传感器，是当时一种非常先进的工业机器人，而且，现在的工业机器人结构基本上都是以此为基础的。但是，这一时期的机器人属于“示教再现”型机器人：只具有记忆、存储能力，按相应编置的程序重复作业，对周围环境基本没有感知与反馈控制能力。这种机器人被称作第一代机器人。

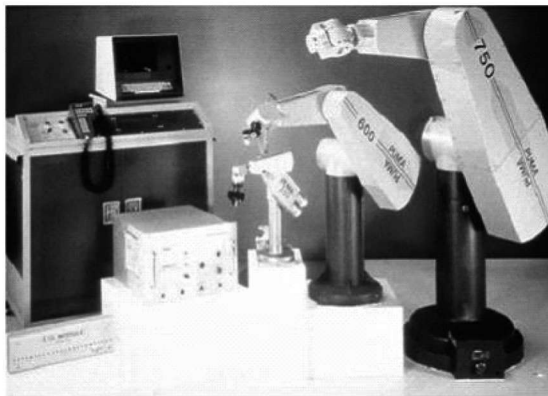


图 1.2 PUMA 工业机器人

进入 80 年代，随着传感技术，包括视觉传感器、非视觉传感器（力觉、触觉、接近觉等）以及信息处理技术的发展，出现了第二代机器人，即有感觉的机器人。它能够获得作业环境和作业对象的部分有关信息，并进行一定的实时处理，引导机器人进行作业。第二代机器人已进入了实用化，主要代表是工业机器人（图 1.3），在汽车、飞机、钢铁冶炼、电子、通信等核心工业生产中发挥了重要作用。第三代机器人是目前正在研究与发展的“智

能机器人”，以达芬奇“内窥镜手术器械控制系统”手术机器人和 iRobot 扫地机器人等为代表（图 1.4），在医疗/康复和家庭服务等领域得到了成功应用。随着人工智能理论与技术的发展，它不仅具有比第二代机器人更加完善的环境感知能力，而且还具有逻辑思维、判断、学习、推理和决策能力，可根据作业要求与环境信息进行自主工作。出现了以 ASIMO、Atlas、Robonaut2、Yume、BigDog 等为代表的智能机器人与系统（图 1.5），其可提升人类的生活质量，并能够在复杂危险的环境中代替人类进行作业。



图 1.3 工业机器人



图 1.4 医疗/康复和家庭服务机器人

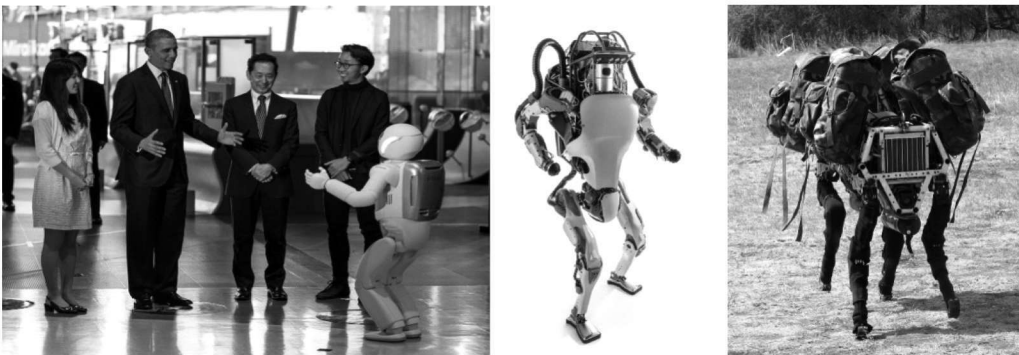


图 1.5 智能机器人与系统

1.2 机器人系统组成与分类

机器人是一种典型的机电一体化系统，集机构学、计算机科学、自动控制理论、传感器技术、人工智能、仿生学等众多学科于一身，是人类科学技术发展与应用的重大成就。机器人作为一种自动执行任务的机器装置，为人类服务过程中，需要针对作业目标及环境进行运动控制。在运动控制过程中，机器人需要计算其运动学和动力学模型，根据力觉、视觉等传感器实现作业信息反馈，对其关节进行伺服控制，完成机器人末端及特定关节的运动规划。

机器人执行任务时，其控制系统需要利用众多的传感数据，对其路径进行规划，控制其关节进行运动，适应作业环境，最终实现所赋予的任务。

1.2.1 机器人系统组成

机器人典型的控制系统与结构，如图 1.6 所示，包括任务控制终端、任务通信总线、中央运动控制、伺服通信总线、伺服驱动单元和数据传感采集等核心部分。

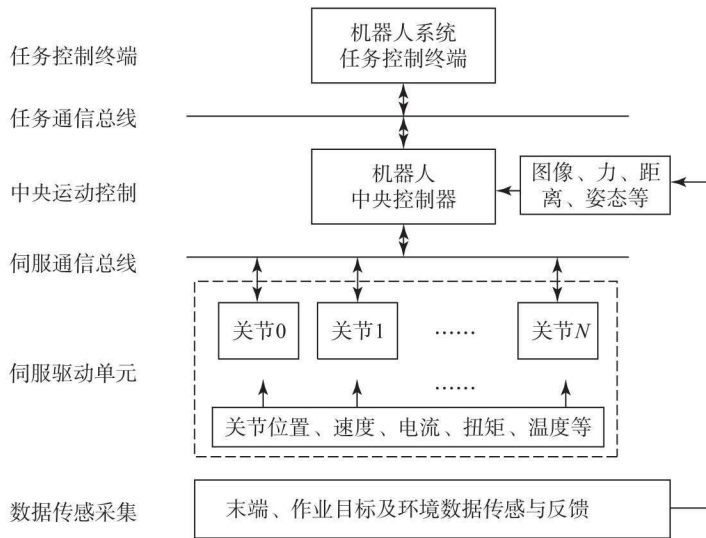


图 1.6 机器人控制系统与结构

1. 任务控制终端

任务控制终端的主要功能是实现机器人任务指令的下发、任务仿真、状态数据显示与分析等，为用户提供直观的控制与应用程控界面。该终端通常是一种软件界面系统，类似工业机器人的示教盒。

2. 任务通信总线

任务通信总线的主要功能是实现任务控制终端与中央控制器间的指令与状态数据交互。目前，在机器人控制系统中常用的任务通信总线有 CAN、EtherCAT、以太网等。

3. 中央运动控制

机器人的中央运动控制类似人类大脑，主要功能是实现机器人复杂传感数据结算、复杂的运动控制与规划算法，如机器人的运动学、动力学、力控、视觉引导、运动规划等算法，

是机器人的大脑。目前,用于机器人中央运动控制的硬件主要有工业控制计算机、DSP (Digital Signal Processing, 数字信号处理)+FPGA (Field Programmable Gate Array, 现场可编程门阵列)、ARM 等嵌入式控制器。操作系统主要有 Windows, Linux (Ubuntu), Android 等。为了提高控制的实时性,出现了 Vxworks, QNX, RT-Linux, Xenomai 等实时操作系统。针对机器人控制,还有专门的 ROS 机器人操作系统。

4. 伺服通信总线

伺服通信总线的主要功能是实现机器人各运动关节与中央控制器间的控制与状态数据的交互。目前,在机器人控制系统中常用的伺服通信总线有 CAN、EtherCAT、以太网等。

5. 伺服驱动单元

伺服驱动单元是实现机器人运动作业的核心单元,即机器人的运动关节。机器人运动关节一般由动力源、关节结构、位置/电流/扭矩传感器等核心部分组成。按照动力源不同,可以分为电动关节、气动关节、液压驱动关节等。

6. 数据传感采集系统

数据传感采集系统是机器人系统自身定位和任务执行的导航器,类似于人的眼睛等各感觉器官。目前,在机器人控制系统中常用的传感数据有两种:一种是关节控制传感器,主要有位置、电流、扭矩、温度等传感器;一种是系统控制与作业传感器,主要有视觉、力/触觉、姿态等传感器。

1.2.2 机器人的分类

机器人按照可移动性可分为固定式机器人和移动式机器人。固定式机器人是指机器人工作时不可移动,即基座是固定不动的,其中生产中应用的工业机器人为固定式机器人的典型代表。移动式机器人是指机器人工作时是可移动的。移动式机器人的种类很多,如轮式机器人、履带式机器人、腿式机器人,其中腿式机器人又可分为单足、双足(仿人机器人)、四足(大狗机器人)、六足和八足等机器人。机器人按照用途可分为工业机器人、军用机器人、服务机器人、医疗机器人、特种机器人等。工业机器人目前在汽车、飞机等工业场合得到了广泛的应用,如装配机器人、焊接机器人、喷漆机器人等,提高了产品的生产效率、质量和一致性。军用机器人是一种用于军事领域的自动化机器装备,其功能包含物资运输、战场信息感知以及实战进攻等,目前军用机器人在战场使用范围非常广泛。机器人按照工作区域可分为空间机器人、空中机器人、地面机器人、水下机器人。另外,按机器人拓扑可分为仿人机器人、仿生机器人、机械臂、模块机器人、微纳机器人等。

1.3 本书概要

本书根据机器人运动控制技术需求,对其内容及结构进行了系统设置,全书内容分为基础篇和提高篇,并以作者实验室6自由度机器人运动控制为例设计了足够的学习范例,以满足读者对机器人运动控制技术的学习需求。

全书共12章。第1章到第6章为机器人技术的基础篇,内容包括绪论、机器人数学基础、机器人正运动学、机器人逆运动学、速度与雅可比矩阵、轨迹规划。第7章到第12章为机器人技术的提高篇,内容包括机器人关节伺服运动控制、机器人动力学、机器人的柔顺

控制、机器人运动学参数辨识、机器人视觉识别与定位、基于 Adams/Matlab 机器人动力学联合仿真。本书以作者实验室现有一套 6 自由度机器人实验教学系统为对象，在本书的每一个核心知识点里都将提供一个机器人典型算例，对每一个核心知识点的应用关键点进行实践、分析和总结，为践行理论与实践深度耦合的理念提供支撑。

第 1 章 绪论，主要介绍了机器人的定义、发展趋势、系统组成以及本书的目标与各章的主要内容。

第 2 章 机器人数学基础，介绍了刚体在空间的描述方法，以及刚体在不同坐标系间的齐次变换方法，为后续的机器人运动学、动力学提供理论基础。

第 3 章 机器人正运动学，介绍了机器人连杆参数的定义、连杆坐标系的建立方法和正运动学方程的推导。

第 4 章 机器人逆运动学，介绍了逆运动学的可解性、解的多重性和典型的求解逆运动学解析解的方法。

第 5 章 速度与雅可比矩阵，介绍了机器人角速度的特性以及机器人连杆间速度的传递规律，通过雅可比矩阵可以实现机器人末端与关节速度力矩的映射。

第 6 章 轨迹规划，介绍了几种不同的运动规划方法，能够实现机器人关节空间与笛卡尔空间运动轨迹规划。

第 7 章 机器人关节伺服运动控制，详细介绍了机器人关节直流电动机、直流无刷电动机、永磁同步电动机伺服驱动原理，以及伺服系统多环路 PID 驱动控制原理。

第 8 章 机器人动力学，介绍了机械臂末端运动与关节驱动力矩之间的关系，能够根据关节位置、速度、加速度实时计算关节运动所需要的驱动力矩。

第 9 章 机器人的柔顺控制，介绍了基于阻抗控制的机器人主动柔顺控制策略。

第 10 章 机器人运动学参数辨识，介绍了机器人运动学参数标定的意义与背景，并且基于运动学原理推导了机器人运动学线性误差模型，最后采用基于最小二乘参数辨识算法对机器人运动学参数进行辨识。

第 11 章 机器视觉识别与定位，介绍了机器视觉识别与定位的相关知识，通过对摄像头参数标定、图像预处理、图像识别以及视觉定位的介绍与实现。

第 12 章 基于 Adams/Matlab 机器人动力学联合仿真，介绍了机器人动力学联合仿真的手段和方法，并结合前面讲解的动力学，在 Simulink 中搭建了具有力前馈控制的联合仿真系统，对工业 6 自由度机器人进行了仿真测试。

习 题

- 1.1 简述机器人定义。
- 1.2 机器人原则有哪些？如何理解其含义？
- 1.3 简述机器人分类方法。
- 1.4 简述机器人系统组成及功能。
- 1.5 如何定义工业机器人与智能机器人的联系与区别？
- 1.6 简述机器人未来发展趋势和形式。

第 2 章

机器人数学基础

机器人的首要功能是通过自动控制完成各种作业的操作，进行作业操作的前提是描述机器人末端执行器和操作目标的空间位置和姿态。本章主要讲述刚体在空间中的描述方法，以及不同坐标系相互间转化的齐次变换方法，为后续的机器人运动学、动力学提供理论基础。

2.1 刚体的位姿描述

描述刚体的空间状态，首先要确定描述刚体所在的坐标系，即确定需要在哪个坐标系下描述刚体的空间状态，一个刚体在某一瞬时其空间状态是唯一的，但是在不同的坐标系下其描述是不同的。一个坐标系由原点和 3 个相互垂直的单位矢量组成，本书中坐标系均为右手系，如图 2.1 所示。

刚体上的任何一点可以通过与其固连的坐标系描述，因此通过与刚体固连的坐标系可以完整地描述刚体的空间状态，如图 2.2 所示。图中的四面体可以通过与之固连的坐标系 $\{B\}$ 描述。

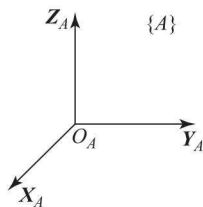


图 2.1 标准坐标系

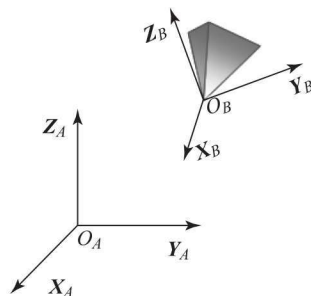


图 2.2 刚体的位置和姿态描述

根据前述的坐标系的四个元素，坐标系 $\{B\}$ 的原点 O_B 在坐标系 $\{A\}$ 中的描述即为坐标系 $\{B\}$ 在坐标系 $\{A\}$ 中的位置。在本书中位置用矢量表示，如图 2.2 所示， O_B 点在坐标系 $\{A\}$ 的位置矢量 ${}^A O_B$ 可以表示为其在坐标系 $\{A\}$ 三个坐标轴上的投影矢量和。

$${}^A O_B = {}^A O_B \cdot X_A + {}^A O_B \cdot Y_A + {}^A O_B \cdot Z_A \quad (2-1)$$

其中， X_A 、 Y_A 和 Z_A 分别代表坐标系 $\{A\}$ 的三个坐标轴。 ${}^A O_B$ 中的下标 B 代表坐标系 $\{B\}$ ，上标 A 代表在坐标系 $\{A\}$ 下的描述。

坐标系 $\{B\}$ 中三个坐标轴是三个单位矢量，在坐标系 $\{A\}$ 三个坐标轴上的投影分别为