

采掘机器人的规划级控制技术研究¹⁾

冯培恩 孙守迁 杨毅 齐中伟

(浙江大学 CAD & CG 国家重点实验室 杭州 310027)

摘 要

本文以反铲作业为对象,研究了采掘机器人的任务规划、路径规划和轨迹规划。在自行设计研制的一台试验样机上实现了整个作业循环过程、预设路径和力监控挖掘过程的局部自主式规划级控制,并开发了一个三维动态仿真软件作为检验规划级控制理论的辅助手段。

关键词: 采掘机器人,规划级控制,路径规划。

1 前言

液压挖掘机是最典型和最复杂的工程机械之一。它的作业环境恶劣,作业对象多变。因此,司机的劳动强度大,操作技术复杂,作业效率低。研究采掘机器人,也即微机操纵的液压挖掘机对解决上述的问题,推进工程机械的自动化具有重要意义^[1]。

2 采掘机器人反铲作业试验样机的总体方案

作者自行设计研制了一个采掘机器人反铲作业试验样机,如图1所示。它由规划级控制系统、伺服级控制系统、传动装置、执行装置和检测系统五个部分组成。该样机的主要特征是:

1) 采用计算机两级控制技术,规划级由微机完成,伺服级由单片机完成。微机用于规划级控制易于进行人机交互和编程,特别适用于研究和开发阶段;单片机用于伺服级控制,价格低廉、体积小,易于工业化和商品化。此外,由于采用了模块化结构,便于排除故障。

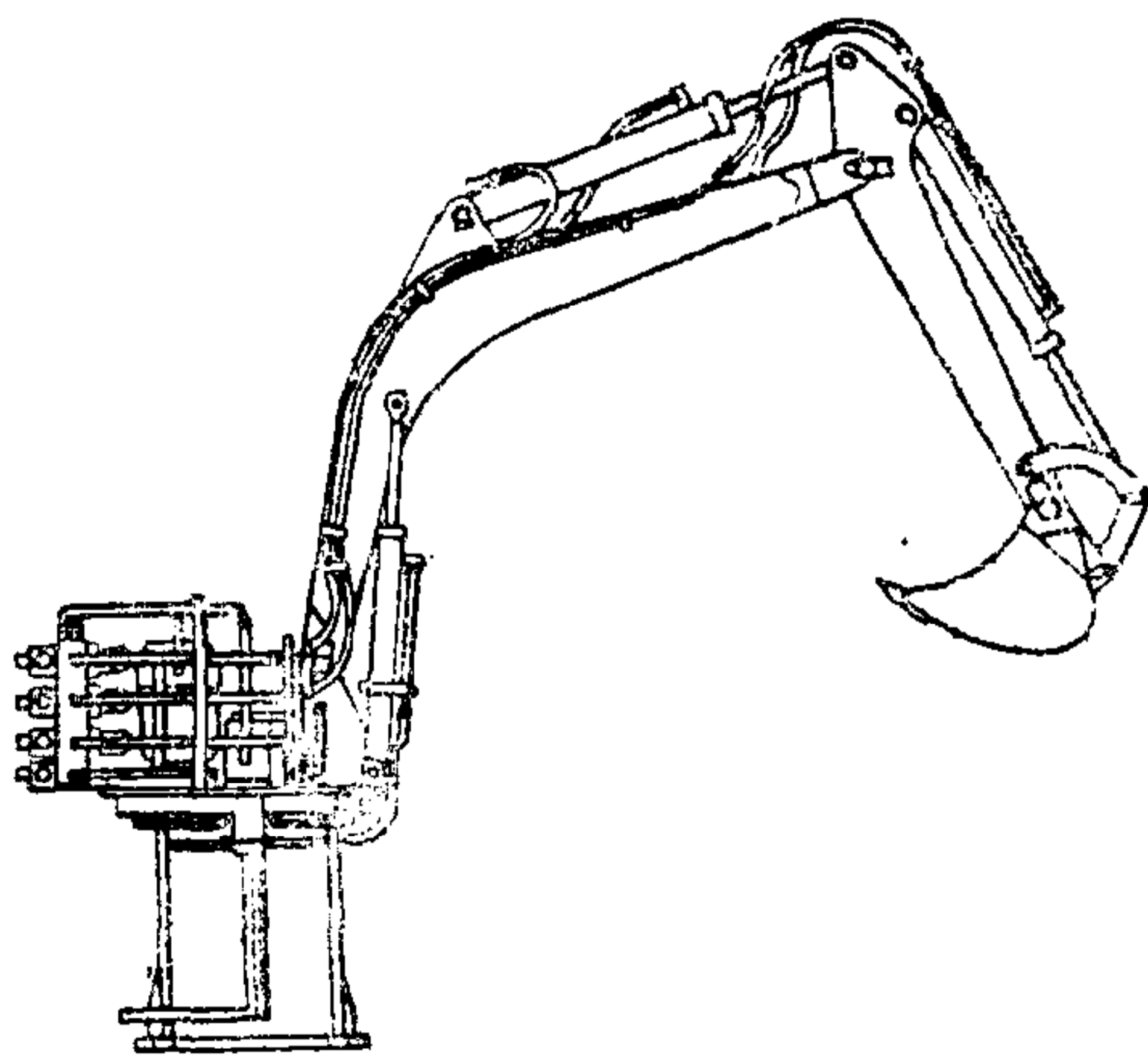


图1 采掘机器人试验样机简图

1) 本课题是国家自然科学基金 69175020 资助项目,也是浙江大学流体传动及控制开放实验室基金资助项目。
本文于 1992 年 12 月 4 日收到

2) 在规划级控制中采用基于规则的控制模型,从而初步实现局部自主控制,为实现智能控制奠定了基础。

3) 在伺服级控制中采用非线性积分分离 PID 控制算法的闭环控制,以提高系统的稳态和动态性能。

4) 采用了电液比例技术,体现了发展方向。

5) 同时开发了一个三维动态仿真软件作为对规划级控制算法有效性的辅助检验手段,并可进一步发展成为实时监控的手段。

3 规划级控制和方法

3.1 规划级控制的机理

这台采掘机器人反铲作业规划级控制的组成如图 2 所示。

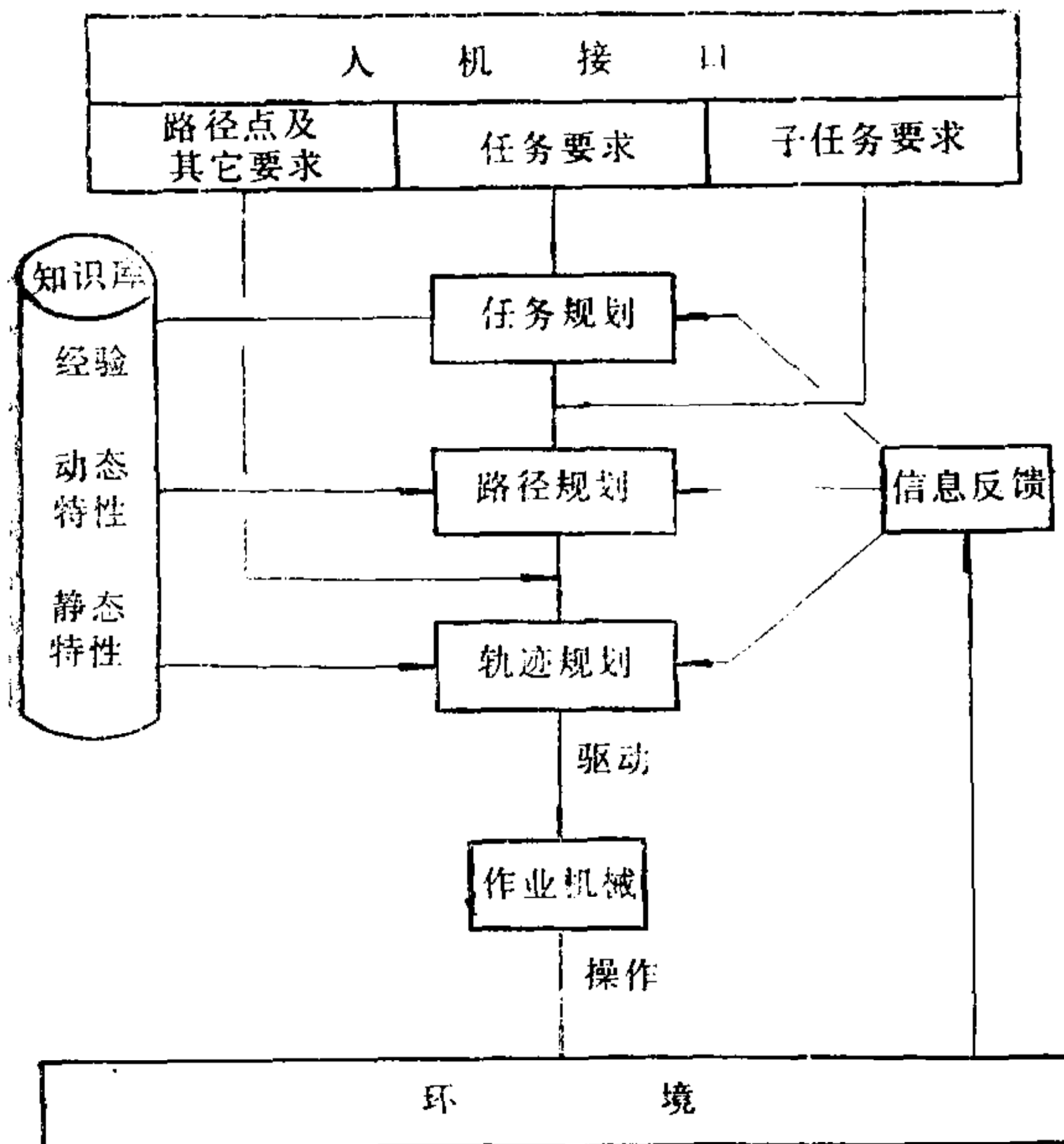


图 2 规划级控制的组成框图

3.3 路径规划

路径规划问题最简单的形式就是从开始状态出发找出一条不与障碍物相撞的可运行路径。已经提出的方法概括起来大致可分为三大类:图、网络和位势场。以上方法对旋转关节构成的机器人都不太适用。况且采掘机器人与一般工业机器人相比,其路径规划方法更有其特殊的一面。首先从作业对象和作业环境来看,土壤性态复杂多变,又无固定尺寸,有时还会遇到硬土甚至石块,并且掌子面形状也复杂多变,这使挖掘过程变得异常复杂。现有的路径规划方法在此难以适用。从驱动方式和动作特点来看,采掘机器人大多采用分散驱动方式,其动作方式繁多,重复性少。这些特殊性决定了它对路径规划系统的智能和柔性的要求。

3.2 任务规划

任务规划研究下列三个方面的问题:

- 1) 建立任务的工作区模型,给出:
 - 任务环境中采掘机器人和掌子面的几何描述;
 - 所有连杆机构的运动学描述;
 - 有关采掘机器人特征如关节限制及传感器特性等的描述。
- 2) 任务说明给出任务的初始和终止状态。
- 3) 作业过程的综合,其中挖掘是一个关键操作,因为它影响到所有后续的操作。一旦完成挖掘任务,任务规划必须综合出使满斗物料可靠达到期望目标的运动。

在路径规划中,知识的合理运用将使规划过程迅速而有效。在此,知识以规则的形式引导路径规划的完成。规则是规划的依据,不同的作业要求就有不同的规则和不同的使用策略。以下将以反铲作业为例,说明规则在路径规划中的应用。

采掘机器人反铲作业循环过程可分解为四个阶段:挖掘、满斗提升和回转、卸载、空斗返回。

挖掘过程的工况繁多,采掘机器人的动作形式也各种各样,但归纳起来其基本动作是铲斗、斗杆、动臂的单动作,以及由这三类动作组合而成的各种复合动作。挖掘方式的选取与掌子面大小、方位;物料硬度、盲位的存在及铲斗后背不能压土等因素有关。在满斗提升、卸载、空斗返回等作业过程中,作业时间是影响规划的主要因素,此外还要考虑周围环境的约束。对满斗提升过程还需满足斗中的物料不倒掉的条件;对卸载过程,其卸载结束点的姿态必须保证斗中的物料被卸净。根据基本要求及典型的动作特征,制定出各阶段的作业规则,进行路径规划。以下例举出从各阶段动作特征中抽取出来的若干规则。

3.3.1 挖掘过程中典型动作的规则

1. 铲斗挖掘

规则 a: 如果铲斗的当前规划点与姿态不在位姿允许范围,则在切削后角的允许范围内调整,形成一个新的当前规划点。

规则 b: 如果铲斗的结束点不能保证满斗或这一过程中存在盲位,则重新确定结束点。

2. 斗杆挖掘、动臂挖掘

它们的规则与铲斗挖掘时类似,并且要保证铲斗后背不能压土。其规则不再赘述。

3.3.2 基于预设路径的挖掘过程的规则

以平整作业为例,其主要规则:

规则 i: 如果任务空间中可行当前规划点的位置就是目标点位置,则平整规划完成。

规则 j: 如果任务空间中可行当前规划点与目标点之间的距离大于一个推进步长,则令当前规划点沿原平整方向增加一个步长,当前姿态角为标准姿态角。

规则 k: 如果任务空间中的当前规划点与姿态不在位姿允许范围内,则在平整精度允许的范围内调整铲斗斗齿尖的位置,保持姿态角为标准姿态角,形成一个新的当前规划点。

3.3.3 具有力监控的挖掘路径的规划

预先规划好的路径常常因为环境中意想不到的因素变得不可行。这就要求规划好的系统能在作业过程中感受到环境的变化,并自主地作相应的调整,以求预期的规划目的得到实现,这就是具有局部自主性的规划。

当挖掘过程中出现过大的阻力或遇上不可逾越的障碍,可以由压力继电器感受到过载现象,此时不再可能按预期路径运动。若采用一定的策略在线地自主地修正路径,则有可能绕过障碍、继续挖掘。为了达到这一目的,规则同样是不可缺少的,其为:

规则 l: 如果压力继电器发出的超压信号超出一定的时间,则认为预设路径上存在障碍。

规则 m: 如果在预设路径某点处出现障碍, 则使斗杆抬起一定的角度 $\Delta\alpha$, 产生一个新的路径点取代原点。

这一策略如图 3 所示。

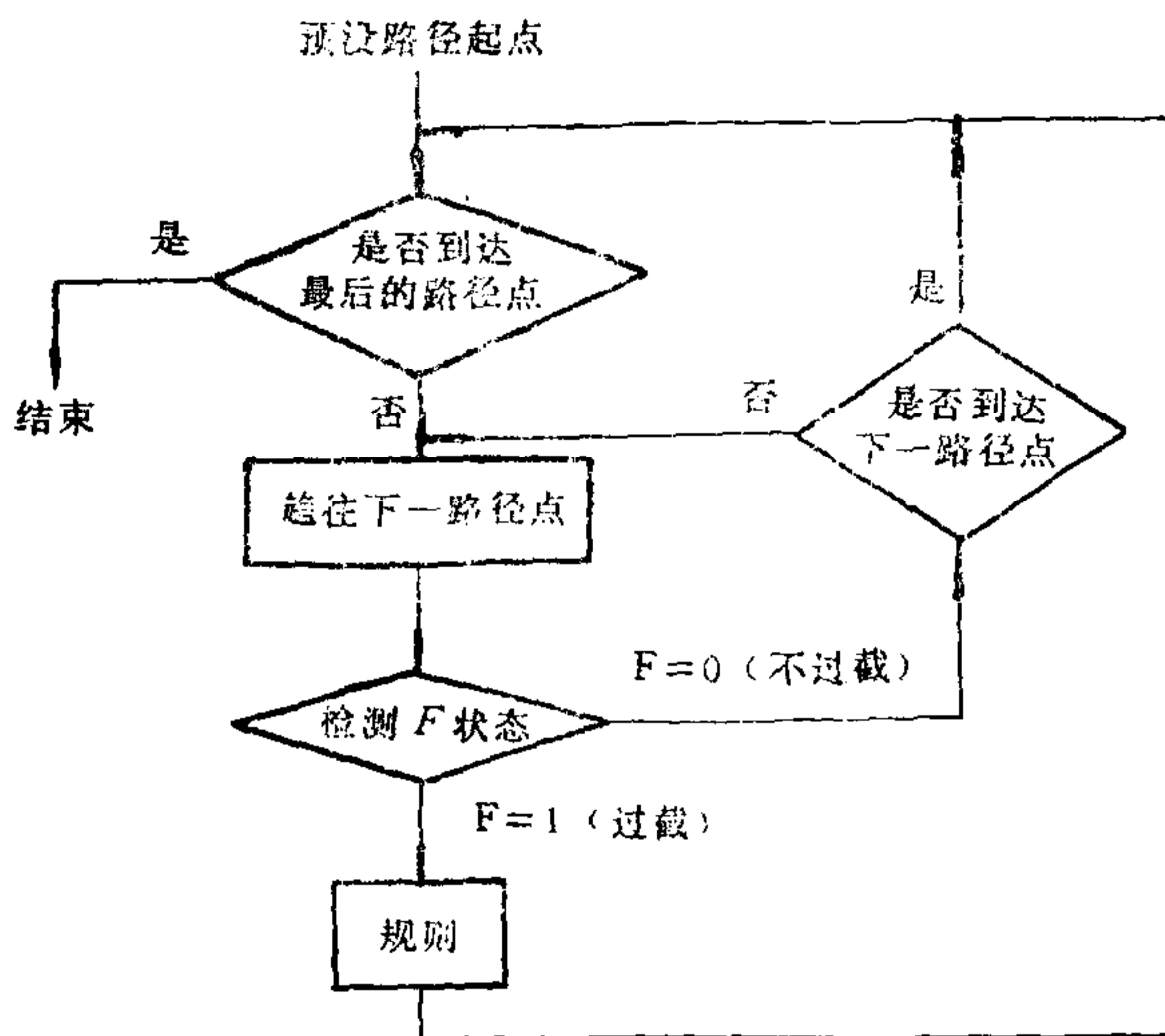


图 3 基于力监控的路径规划策略

图中 F 表示压力继电器的状态

增加一个广义步长。

规则 q: 如果当前规划点的铲斗姿态角不能保证铲斗中物料不撒落, 则调整铲斗转角, 使铲斗趋向水平状态。

规则 q 的优先权低于规则 n、o、p。

3.3.5 卸料过程的路径规划

卸料过程应保证铲斗中的物料彻底卸净。其主要规则:

规则 r: 如果从当前规划点只转动铲斗即可达到倾翻姿态, 则只转动铲斗达到倾翻姿态。

规则 s: 如果从当前规划点不仅要使铲斗油缸缩到最短, 而且还要转动斗杆才能将物料卸净, 则先转动铲斗, 再转动斗杆, 使铲斗达到倾翻姿态。

规则 t: 如果从当前规划点不仅要使铲斗、斗杆油缸缩到最短, 还要转动动臂, 才能将物料卸净, 则先转动铲斗, 再转动斗杆, 最后转动动臂使铲斗达到倾翻姿态。

这三条规则具有相同的优先权, 非此即彼。

3.3.6 返回过程

空斗返回过程的规则与前述的满斗提升过程的各规则相类似, 此略。

3.4 轨迹规划

在试验中采用两种方法:

- 1) 按位移间隔对关节变量进行采样的轨迹规划, 比较适合于挖掘过程。这是由于挖掘过程受载情况复杂, 所需作业时间难以作出估计。
- 2) 基于驱动机构变量空间的轨迹规划是一种按时间进行间隔采样的轨迹规划方法。其

3.3.4 满斗提升的路径规划

提升过程的开始点即为上一阶段的结束点, 提升结束点需根据卸料位置推算。这一过程的主要规则为:

规则 n: 如果当前铲斗的规划点已到达目标点, 则本阶段规划已完成。

规则 o: 如果铲斗的当前规划点与提升目标点之间的广义距离小于一个步长, 则令当前规划点为结束点。

规则 p: 如果当前规划点与目标点之间的广义距离大于或等于一个步长, 则在当前规划点基础上

中：基于两个路径点带有抛物线过渡域的线性轨迹规划方法和基于多个路径点并带有抛物线过渡域的线性轨线规划方法在提升等过程得到应用。

4 采掘机器人的作业仿真和实验验证

基于上述的规划方法,采掘机器人的预期反铲作业循环过程,其中包括预设路径的挖掘过程已都在由作者开发的三维动态仿真软件上得以离线验证。例如图 4 所示的仿真实例。并都在自行开发的采掘机器人样机上得以实现。基于力监控的局部自主规划方法也已在该计算机软件及自行开发的采掘机器人样机得以验证。在实验性作业过程中,当遇到障碍时,采掘机器人自动修正原设的规划路径。根据障碍的大小和方位,通过试探、绕过障碍,继续挖掘、直至完成整个作业过程。图 5 示出了避障实例的计算机仿真结果。

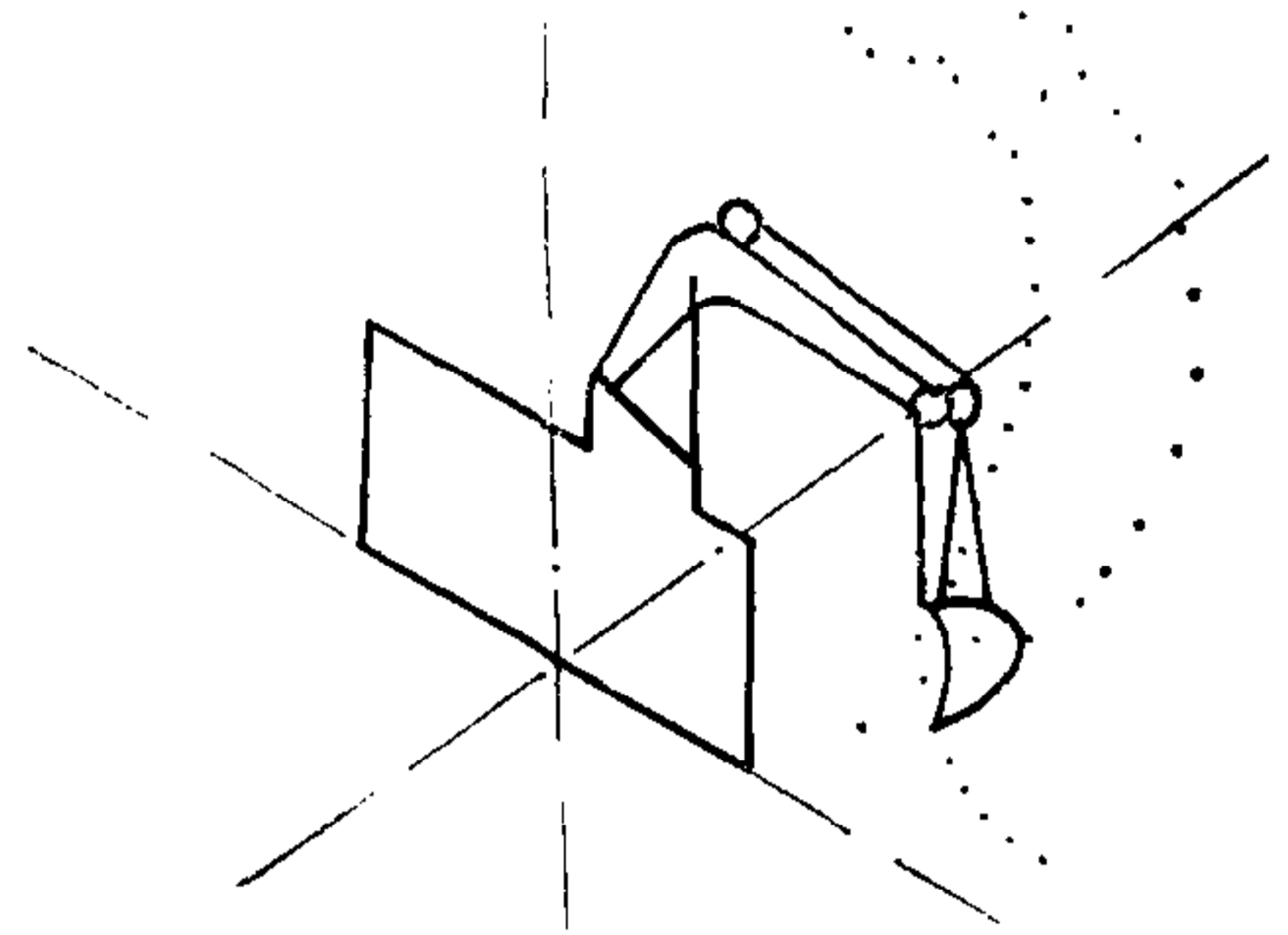
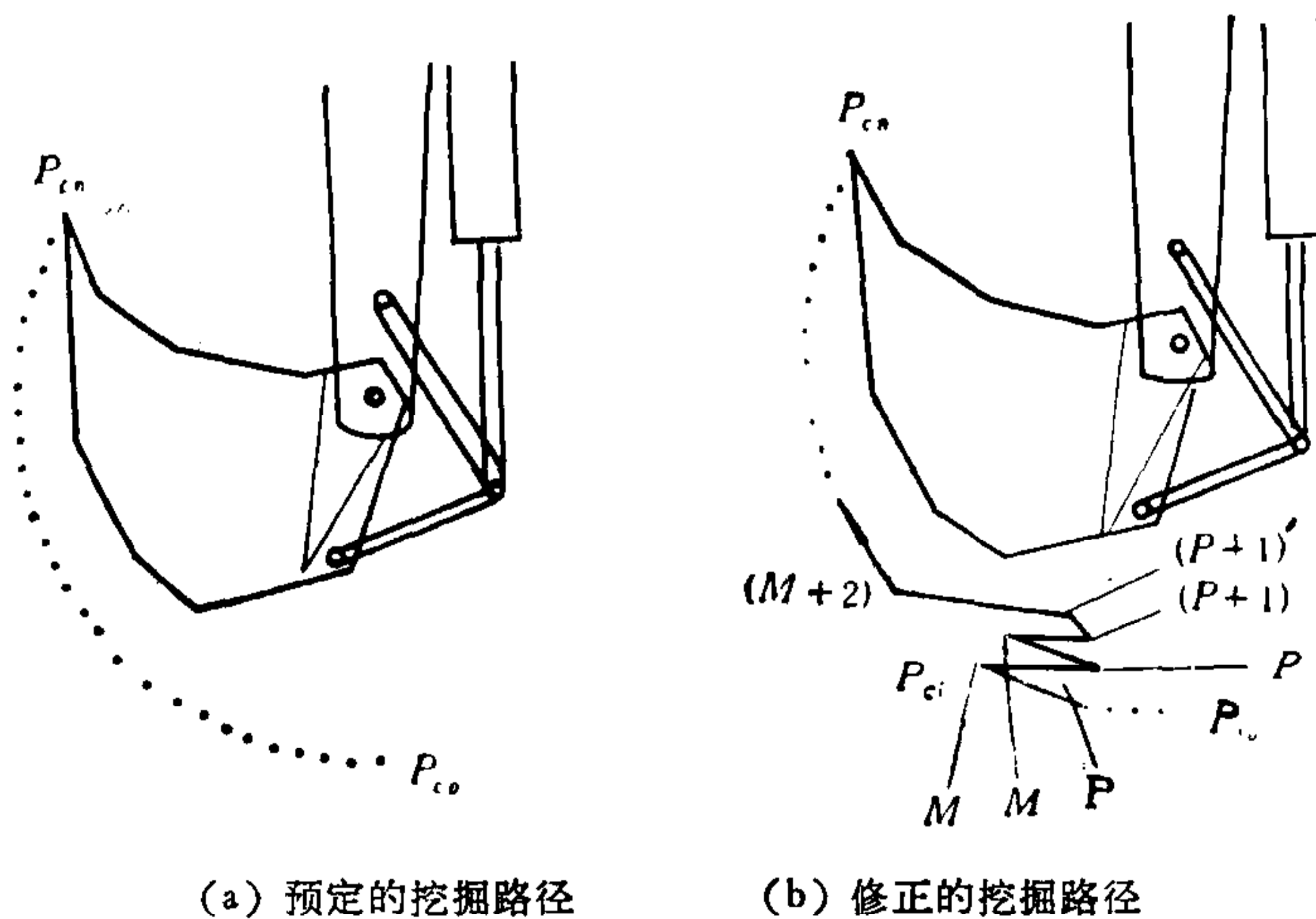


图 4 反铲作业循环过程仿真实例

实验及计算机仿真的结果证明了前述的规划级控制的方法是正确的。



(a) 预定的挖掘路径 (b) 修正的挖掘路径

图 5 基于力监控的路径规划仿真实例

5 结论

作者迄今所开展的工作中最富有特色之处是初步实现了基于规则的路径规划,尤其在采掘机器人反铲挖掘过程中遇障时能基于规则实现局部自主地修正路径,自动克服障碍。这为全面实现智能控制迈出了可喜的一步。下一步的工作重点是建立一个简单而实用的机器视觉系统,借助它来识别作业环境的几何特征,从而实现任务规划的局部自主和

智能化。在这一基础上才可能提高整个作业过程的智能程度,以促进采掘机器人向实用化逼近。

参 考 文 献

- [1] 冯培恩. 工程机械的自动化. 工程机械, 1989, 20(11): 20—22.
- [2] Feng Pei'en, Sun Shou qian, Yang Yi. Research on operation of task process of hydraulic excavator with microcomputer. 8th International Symposium on Automation and Robotics in Construction. Stuttgart, 3—5 June, 1991.
- [3] Feng Pei'en, Yang yi, Qi Zhong wei, Sun Shou qian. Research on control method of planning level for excavating-robot. 9th International Symposium on Automation and Robotics in Construction. Tokyo, 3—5 June, 1992.
- [4] 冯培恩, 齐中伟, 陈文平, 潘双夏. 矿用液压挖掘机作业循环过程的计算机三维动态仿真. 矿山机械, 1991, (3): 17--21.

RESEARCH ON THE TECHNIQUE OF PLANNING LEVEL CONTROL FOR EXCAVATING-ROBOT

FENG PEI'EN SUN SHOUQIAN YANG YI QI ZHONGWEI

(State Key Laboratory of CAD & CG Zhejiang University 310027)

ABSTRACT

The methods of task^o planning, path planning and trajectory planning are studied. The local autonomy mode control of planning level for whole task cycle process, excavating process based on predetermined path and force-monitor is realized on the experimental prototype. And the software of three dimensional dynamic simulation is developed for examining the theory of planning level control.

Key words: Excavating-Robot, planning level control, path planning.



冯培恩 联邦德国柏林工业大学工学博士, 浙江大学机械系教授。1943年10月生于上海, 1965年毕业于同济大学, 1974年来致力于现代设计方法研究, 1986年开始机电信息一体化技术研究。至今共发表著译120种, 其中包括书五本。



孙守迁 浙江大学机械工学博士。曾在浙大计算机系做博士后, 1993年晋升副研究员。目前从事现代工业设计研究。



杨毅 浙江大学机械系副教授、硕士。现在职攻读博士学位。目前的研究方向是机电一体化系统设计。