

激光作业的宏-微机器人及其控制系统

陈启军 王月娟 蒋平 陈辉堂 王耀亮

(同济大学电气工程系 上海 200092)

摘要 一小机械手附在一大机械手的末端构成的机器人系统被称为宏-微机器人系统. 本文详细介绍了我们研制的采用激光作业的宏-微机器人本体和控制系统的结构和工作原理, 以及在连续轨迹跟踪和汉字雕刻方面的实验结果.

关键词 宏-微机器人, 控制系统, 激光作业

1 引言

进一步提高机器人的综合工作能力是机器人需要继续研究的问题. 就机器人运动性能来看, 一些性能指标存在着相互制约的因素, 比如机器人用于连续轨迹跟踪, 在提高速度的同时轨线跟踪精度要受到影响; 应用于飞行器上的机器人要减小自重, 最好选用轻质材料柔性连接, 但这种结构在高速运动时产生的形变又会影响机器人的性能. 在过去的研究中, 一些高级控制策略被提出来解决机器人的各种控制问题. 应用中发现单纯从控制策略的角度来提高机器人的性能有局限性. 有必要从更广的角度探索提高机器人的综合性能.

80 年代末 90 年代初, 宏-微结构机器人^[1,2] (Macro-Micro Manipulator System 或 Macro-Mini Manipulator System) 被建议用来提高机器人综合性能. 宏-微机器人是指一个小机械手附在一个大的机械手的末端构成的机器人系统, 大的机械手以地面作为参考, 称为宏机械手 (Macro Manipulator), 小的机械手以大的机械手为参考, 拥有完全的自由度, 称为微机械手 (Micro Manipulator). 一般情况下, 通过宏机械手实现机器人的运动范围, 通过微机械手实现机器人高速精确的运动. 宏机械手、微机械手构成宏-微机器人系统, 协同完成机器人高性能的作业. 宏-微机器人有减小末端有效惯性、扩充系统频带的特性^[1,2].

许多学者在宏-微结构机器人的理论与应用方面进行了研究. T. Narikiyo^[3] 研究了宏-微机器人精密定位控制问题; O. Egeland^[4] 研究了空间应用的宏-微机器人; T. Yoshikawa^[5] 研究了采用柔性长臂的宏-微机器人. 本文以机器人高速高精度连续轨迹控制为背景, 设计了激光作业的宏-微机器人及控制系统, 这一机器人将可以应用于高速高精度异型切割、绘图、雕刻等作业.

2 宏-微机器人本体

图 1(a) 是我们研制的宏-微机器人本体示意图. 宏机械手为直接驱动的两关节平面机械手, 采用细杆式双平行四边形传动机构, 可以在 $1.7\text{m} \times 0.7\text{m}$ 的水平面内运动; 微机械手固定在宏机械手的末端, 其核心是两个振镜扫描器. 作业的实现通过激光驱动. 调整振镜的位置及初始角度(参看图 1(b)), 按照镜面反射的原理, 两个振镜的协调运动可以使作业点 A 在平面

上运动. 微机械手镜面反射的工作原理如图 1(b) 所示, 图中振镜的位置为初始位置, 振镜 1 在空间里侧, 垂直于水平面, 其初始位置在水平面投影与 X_m 夹角为 45° ; 振镜 2 在空间外侧, 垂直于侧面, 其初始位置在侧面的投影与 X_m 夹角为 45° ; 激光从两个振镜之间水平射到振镜 1, 然后反射到振镜 2, 振镜 2 反射激光到工作台. 振镜 2 不动, 振镜 1 绕轴正负偏转, 激光输出到工作台上的位置将在 X_m 轴上移动(参看图 1(c)), 振镜 1 不动, 振镜 2 正负偏转, 激光输出到工作台上的位置将在 Y_m 方向移动. 以 X_m 方向移动为例, 如图 1(c) 所示, 振镜在初始位置 P

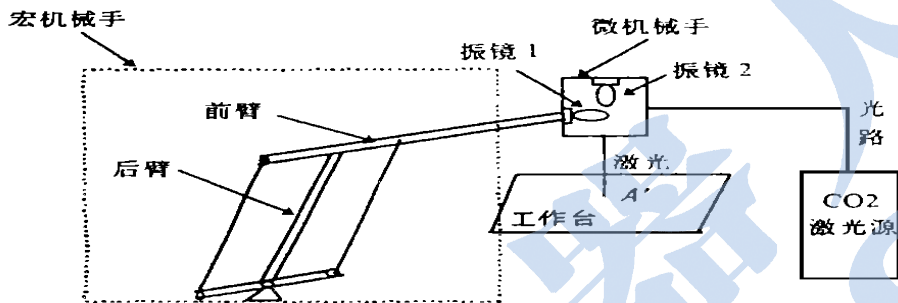


图 1(a) 宏微机器人本体示意图

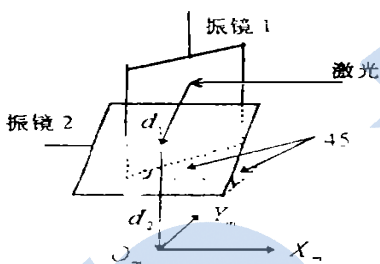


图 1(b) 微机械手工作原理

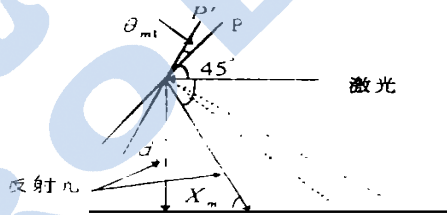


图 1(c) 振镜偏转与空间位移

时, 激光入射角 = 出射角 = 45° ; 振镜旋转角度 m_1 到位置 P' , 作业点移动 X_m , 激光入射角 = 出射角 = $(90^\circ - (45^\circ + m_1))$, 入射光与反射光之间夹角: $2(90^\circ - (45^\circ + m_1))$, 射入激光束平行于水平面, 则振镜偏转角度与位置关系:

$$X_m = d_1 \cot(90^\circ - 2m_1) = d_1 \tan 2m_1$$

d_1 为振镜 1 轴和振镜 2 轴间的距离. 同理:

$$Y_m = d_2 \cot(90^\circ - 2m_2) = d_2 \tan 2m_2$$

d_2 为振镜 2 轴与工作台平面垂直距离; m_i 为振镜偏转角度(参看图 1(c)), 定位 $d_1 = d_2 = 35\text{mm}$, 振镜偏转角度限制在 $\pm 15^\circ$, 则微机械手的工作范围为 $40.4\text{mm} \times 40.4\text{mm}$.

振镜 2 的轴与前臂的方向一致. 可用图 2 所示坐标系描述宏-微机器人的运动方程.

(O_M, X_M, Y_M) 为宏机械手的参考坐标, (O_m, X_m, Y_m) 为微机械手的参考坐标, 基础坐标 (O, X, Y) 与宏机械手参考坐标重叠. 振镜扫描器处于初始状态时, 激光与工作台垂直(参看图 1), 宏-微机器人的运动可以简化为两个平面运动的合成. 运动学方程:

$$X = l_1 \cos M_1 + l_2 \cos M_2 + X_m \cos M_2 - Y_m \sin M_2$$

$$Y = l_1 \sin M_1 + l_2 \sin M_2 + X_m \sin M_2 - Y_m \cos M_2$$

式中 l_1 为后臂的臂长, l_2 为前臂的有效臂长(参看图 2), M_1 为后臂与 X_M 夹角, 逆时针为正,

M_2 为前臂与 X_M 夹角。

3 控制系统

3.1 宏-微机器人控制系统整体结构

宏-微机器人控制系统整体结构如图3所示。

宏机械手前、后臂驱动电机各有一个独立的控制回路，微机械手的两个振镜电机也各有一个独立的控制回

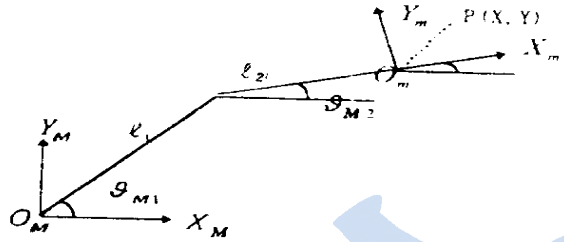


图2 宏-微机器人坐标系

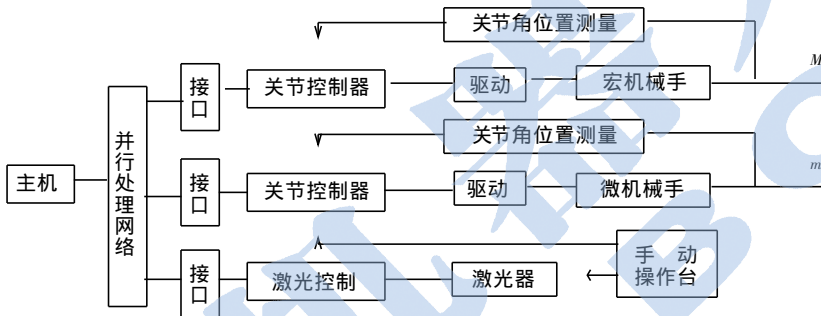


图3 宏-微机器人控制系统整体结构图

路。宏机械手的位置检测选用30对极的多级旋转变压器，分辨率为1/122880转，关节角的活动范围限制在180°以内，用16位数字量来表示关节位置，12位来自精级，4位来自粗级；驱动电机选用最大力矩为20N·m的直流力矩电机，PWM驱动。

微机械手的位置测量采用小惯量测量的电容式位置传感器，分辨率为 0.5×10^{-5} 弧度。电容式位置传感器与电机集成装配，工作原理如图4所示。移动电极随转子正负运动时，固定电极与移动电极间重叠面积发生变化，电极电容发生相应变化。用 ϵ 表示介电常数， A_n 表示电极间重叠区域， g_n 表示电极间距离，则电极总电容可以表示为

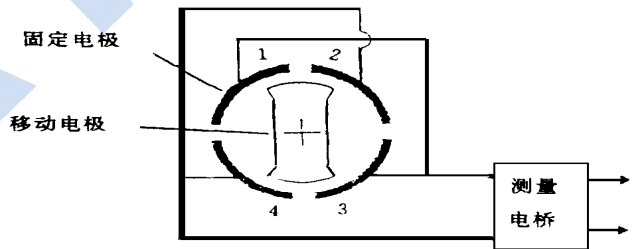


图4 电容传感器工作原理

$$C = \epsilon \left(\frac{A_1}{g_1} + \frac{A_3}{g_3} - \frac{A_2}{g_2} - \frac{A_4}{g_4} \right)$$

用电桥测量电容变化，这种电容式位置传感器可以测量 $\pm 45^\circ$ 位置变化。振镜偏转角度限制在 $\pm 15^\circ$ 内，用8位数字量表示微机械手振镜位置；振镜驱动电机采用动圈式直流微型电机。激光器为50W的CO₂激光源。

3.2 关节控制器

宏机械手每个关节控制器的核心是一片INTEL8098单片机，利用内部A/D转换器检测

电机电流,完成电流环的 PI 调节率计算,通过接口与并行处理网络进行数据交换:将关节位置测量值送到并行处理网络,从并行处理网络接受关节控制量。

微机械手每个关节控制器的核心也是一片单片机。为了便于配合手动操作台进行微机械手的标定,微机械手关节控制器上设计了一个模拟 PID 控制器,如图 5 所示。

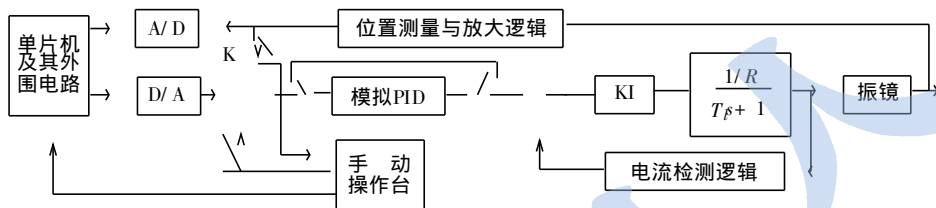


图5 微机械手关节控制器及有关逻辑

对微机械手离线初始标定(调整振镜初始位置、偏转角度、激光聚焦点)时,开关 K 闭合,单片机作为信号发生器,通过手动操作台选择波形(锯齿波或正弦波),通过模拟 PID 控制器控制振镜跟随选择的输入波形。传感器信号接到操作台,便于用示波器观察输出波形。标定时期望输入信号也可以通过操作台由外部输入。模拟 PID 的调节参数可以通过手动操作台调节,激光的通断、功率也由手动操作台控制。

宏-微机器人的精度主要通过微机械手精确运动实现,对微机械手正确标定是很重要的。比如激光在工作台扫描的结果正负不对称,表明振镜的“零”位需要调整;如果观察到传感器输出有死区,有可能信号幅值需要调整;如果红光模糊或 Y_m 方向位移与期望值不一致,需要适当调整 d_2 。

微机械手在线控制时,单片机及外围电路采样振镜位置测量值、通过接口与并行处理网络交换信息及完成部分控制率计算。控制量通过 8 位 D/A 转换器输出。在线控制时模拟控制器可以短接,也可以根据需要保留;在线控制时,激光器由并行处理网络通过接口控制(参看图 3),激光器的输出功率大小与宏机械手末端速度成正比。

3.3 并行处理网络

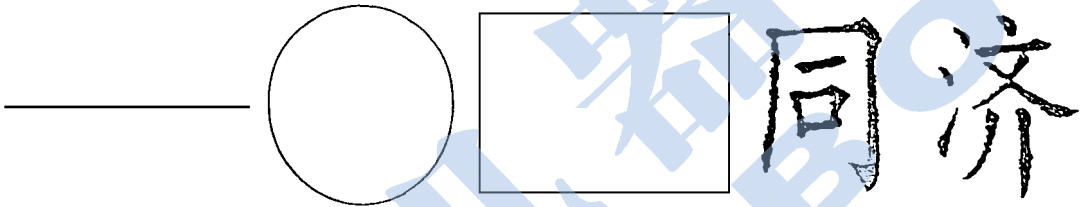
系统采样周期设计为 2ms,为了保证计算时间,由 4 片 TRANSPUTER(T0, T1, T2, T3) 构建并行处理网络,每片 TRANSPUTER 有一个 32 位微处理器、4kRAM、及 64bit 浮点处理单元。不同的 TRANSPUTER 上的任务之间的通讯通过 LINK 链路来实现,每片 TRANSPUTER 提供了 4 对 LINK: LINK0~LINK3, LINK2、LINK1 用于 TRANSPUTER 之间硬线(WIRE)互联, T0 的 LINK0 用于接受主机的调度, T3 的 LINK0、LINK3 用于控制激光的功率及通断, T2 的 LINK0、LINK3 用于微机械手的控制, T1 的 LINK0、LINK3 用于宏机械手的控制。并行处理网络与关节控制器之间的通信通过接口实现,接口逻辑主要完成串并转换及时序控制,我们使用了与 TRANSPUTER T800 配套的芯片 C011。并行处理网络完成宏-微机器人逆运动学计算、控制律的计算、在线轨迹规划、激光功率计算、误差存储及其需要的在线计算。离线轨迹规划、参数辨识、误差显示、图形 CAD 及其他数据处理将由主机完成。

4 实验结果与结论

我们让宏-微机器人以 0.2m/s 速度跟踪 40cm × 28cm 矩形,以 0.5m/s 跟踪直径 25cm

圆,以 1m/s 的速度跟踪 50cm 直线.控制方法采用直接补偿的控制方法,即由宏机械手跟踪轨迹轮廓,由微机械手对宏机械手的运动误差直接补偿,控制算法均为 PID 控制;轨迹规划采用梯形规划,矩形直角处不作任何平滑处理,有 3 个角处在匀速段(传统规划直角处要作减速).图 6(a) 是跟踪结果,轨迹误差均小于 1mm .

我们还进行了宏-微机器人汉字激光雕刻的实验:在 UC DOS 环境下,利用 UC DOS 特殊显示功能显示矢量汉字,直接抓取显示缓冲区的汉字点阵信息存入数据文件,汉字点阵数据和期望雕刻的位置坐标通过主机传到 TRANSPUTER 内存,通过宏机械手完成点到点的位置移动,微机械手完成单个汉字激光雕刻,图 6(b) 是雕刻结果.宏机械手和微机械手配合可以完成工作范围任意位置、任意大小汉字雕刻,如果汉字大小超过了微机械手工作范围,可以将汉字分割,由宏机械手位置移动配合完成.由于直接使用矢量汉字,以及微机械手的精确定位,雕刻效果和显示效果基本一致.



(a) 缩小的直线、圆、矩形激光轨迹

(b) 256×256 点阵汉字

图 6 轨迹跟踪及汉字雕刻实验结果

基于本文的工作和实验.

(1) 连续轨迹跟踪及汉字雕刻实验的成功验证了宏-微机器人本体及其控制系统原理和硬件设计的正确性.从使用情况看,测角系统、关节控制器、TRANSPUTER 并行处理网络工作稳定.

(2) 微机械手一般都是小惯量、宽频带系统,宏-微机器人精度将主要由微机械手实现,微机械手需要正确标定,系统配置的模拟 PID 控制器和手动操作台为初始标定带来了极大的方便.实际上,基于本文的思想,微机械手控制器有 3 种选择:模拟 PID、单片机计算控制率、TRANSPUTER 并行处理网络计算控制率,这给我们分配任务提供了方便,比如,微机械手要作在线轨迹规划,可以由单片机计算控制率,减轻并行处理网络的任务量.

(3) 并行处理网络给研究、实验复杂的控制算法提供了很好的实验环境. TRANSPUTER 计算速度快,又可以任务分解,解决了一些复杂控制算法的计算速度问题;TRANSPUTER 使用的语言是并行 C,调试较方便.

(4) 激光作业避免了与工件的直接接触,可以较好地控制避免对工件的损害;同时,机器人作业时不与环境接触,不存在接触力的影响,机器人的控制性能可以得到改善.

(5) 通过方法的改变提高机器人的性能是有效的.本文的实验:采用常规的控制率(PID)和一般规划方法(梯形规划)取得了较好的结果表明,宏-微机器人有很好的应用和研究价值.

参 考 文 献

279 ~ 284

- 2 Sharon A, Hogen N, Hardt D E. High Bandwidth Force and Inertia Reduction Using a Macro/Micro Manipulator System. In Proc IEEE Int Conf on Robotics and Automation, 1988: 126 ~ 132
- 3 Narikiyo T, Nakane H, Akuta T, Mohri N, Saito N. Control System Design for Macro/Micro Manipulator with Application to Electrodischarge Machining. In Proc IEEE/RSJ/GI, 1994: 1454 ~ 1460
- 4 Egeland O, Sagli J R. Kinematics and Control of a Space Manipulator Using Macro-micro Manipulator Concept. In Proc IEEE Conference on Decision and Control, 1990: 3096 ~ 3101
- 5 Yoshikawa T, Harada K, Mats A. Hybrid Position/Force Control of Flexible-macro-micro Manipulator Systems. IEEE Trans on Robot and Automation, 1996, 12(4): 633 ~ 640
- 6 杨巍. Macro-micro 机器人系统的实现及其原理和方法的研究. 同济大学硕士论文

MACRO/MICRO MANIPULATOR AND CONTROL SYSTEM DRIVEN BY LASER

CHEN Qijun WANG Yuejuan JIANG Ping CHEN Huitang WANG Yaoliang
(Electrical Engineering Department, Tongji University, Shanghai 200092)

Abstract A small manipulator is attached at the tip of a large manipulator, this kind of system can be regard as Macro/Micro manipulator system. This paper presents a kind of Macro/Micro manipulator system driven by laser, its structure and principle will be talked. Experiment results on continuous trajectory tracking and carving are given.

Key words Macro/micro manipulator system, control system, laser

作者简介

陈启军: 男, 33 岁, 副教授. 研究领域: 机器人控制与智能控制.

王月娟: 女, 62 岁, 博士生导师. 研究领域: 机器人控制与智能控制.

蒋平: 男, 35 岁, 教授. 研究领域: 机器人控制与智能控制.

(上接第 127 页)

征文范围

- 神经网络
- 模糊系统
- 进化计算
- 计算智能及软计算
- 基于知识的控制
- 分层递阶智能控制
- 自适应、自组织、自学习及变结构等先进控制方法和技术
- 智能过程控制
- 机器人
- 人工智能及应用
- 智能管理与智能决策
- 智能信息处理
- 规划、调度与优化
- 智能设计
- 智能建模与仿真
- 智能制造
- 智能故障诊断
- 智能技术在通信与信息网络中的应用
- 智能人机界面及多媒体技术
- 虚拟现实技术
- 计算机视觉
- 模式识别与图像处理
- 智能测量及多传感器信息融合
- 智能自动化装置
- 智能交通系统
- 智能自动化系统及应用

(下转第 138 页)