

基于二维位置敏感探测器的空间对接过程研究

张力平^{1,2}, 张政¹, 曹秉刚¹, 马书根³, 李斌³

(1. 西安交通大学机械工程学院, 710049, 西安; 2. 长安大学工程机械学院, 710064, 西安;

3. 中国科学院沈阳自动化研究所机器人学开放实验室, 110016, 沈阳)

摘要: 为了准确地捕捉机器人空间对接的传感器信息,从对接机构的设计入手,研究了空间对接中传感器的选择、改制和基于传感器信息的空间对接问题。考虑到安装空间的限制和处理的信息量太多,提出了利用二维位置敏感探测器(PSD)配合红外发光器阵列的方法完成机器人的空间对接。通过对位置敏感探测器工作原理的分析和对传感器特性的试验,提出了在PSD光敏面上增加光学装置的方法以扩大它的探测范围和精度,同时大大减小了它对光信号的依赖程度。把该方法应用于可重构模块化探测机器人系统中,提出了基于传感器信息的轨迹规划方法,对子机器人空间对接过程的仿真试验验证了轨迹规划和空间对接的可行性。

关键词: 可重构;模块化;位置敏感探测器;空间对接

中图分类号: TP224 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2007)09-1110-05

Study on Space Docking Technique Based on Two-Dimension Position Sensing Detector

Zhang Liping^{1,2}, Zhang Zheng¹, Cao Binggang¹, Ma Shugen³, Li Bin³

(1. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. School of Construction

Machinery, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 3. Robotics Laboratory, Shenyang Institute of

Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

Abstract: The difficulty of robots space docking is to snatch sensor information exactly. Following the docking mechanism design, the sensor selection, modification and robot space docking based on sensor information are investigated. Considering the restriction of installing space and huge processing information, the method for space docking with two-dimensional position sensing detector (PSD) and light-emitting diode (LED) array is put forward. The PSD operating principle is analyzed, and the corresponding characteristics are tested, furthermore the method adding the optical device to PSD light-sensitive surface is suggested to enlarge the detecting extension and reduce the dependence of lighting signal. In a self-Reconfiguration modular exploration robots system (RMERS), the trajectory planning based on sensor information is carried out to validate the feasibility of space docking.

Keywords: reconfigurable; modular; position sensing detector; space docking

目前,可重构和模块化是机器人研究领域2个很活跃的研究方向:模块化是指构件具有由一系列可以替换的标准模块组成的特性,可以指机构的具体部件,也可以指整个机构,模块化增强了部件的可

替换性,有利于整体系统的维护^[1];可重构包括手动可重构和自动可重构,可重构机器人由许多功能简单并具有一定感知能力的模块化机器人有机连接而成,自动可重构机器人系统在非结构化环境中

可以通过自动变形获得自主适应能力,即可以根据变化的环境和任务要求动态调整自己的结构,自动优化构型以适应环境和任务。

机器人的对接是指机器人系统的2部分或2个机器人在传感器信息的引导下连在一起,成为一个整体的过程。因此,对接是自动重构的基础和关键技术,本文把模块化和可重构的概念统一到探测机器人系统中,着重研究可重构模块化探测机器人系统(RMERS)的空间自动对接方法。

1 子机器人对接机构设计

RMERS如图1所示,它包括一个主体和6个轮子,其中每个轮子都是一个子机器人。每个子机器人包括一个用于移动的三角形轮子和一个用于操作的机械手臂。该系统的特征为^[2]:

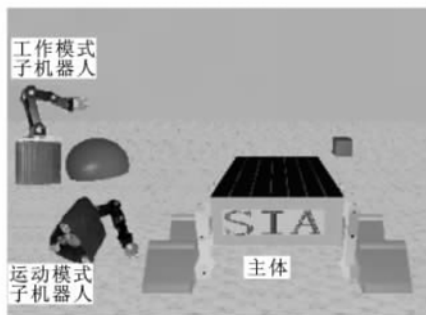


图1 可重构模块化探测机器人系统

(1)在RMERS中,可重构包括2个含意:一个是有领导者(主体)的分散自律异构机器人之间的可重构,即子机器人与主体之间的可重构;另一个是子机器人之间的可重构,即相同结构的子机器人之间的可重构;

(2)RMERS的主体不能自己移动,子机器人通过末端操作器与主体相连并充当主体运动的轮子。在必要的时候,每个子机器人都可以从主体上分离并四处搜寻目标,从而承担不同的工作任务,子机器人也可以互相连接构成不同的构型以通过复杂的地形。

可重构模块化探测机器人系统为了通过非结构化环境,需要频繁变化自己的构型,这就需要经常完成对接和分离的动作,因此对接机构的设计是非常关键的,需要结合机构的性能和变形要求来设计。许多研究自动变形机器人系统的学者研究了这方面的问题,迄今为止,机器人系统中所出现的基本对接结构主要有销-孔-插销结构、磁铁型结构、滑动销的形

状匹配以及抓取型三维形状匹配^[3]。在RMERS中,对接机构连接的是2个移动机器人,连接部件必须允许有较大的对准误差和适当的运动裕度,因此这里采用三维形状匹配对接机构。如图2所示,利用一个有着环状凹槽的圆柱形凸台为连接面,在圆柱形凸台的圆柱面正中间放置一个装着红外发光器阵列的发射板,手爪采用带3个手指的立体机构,手指的底板上安装着用于感测红外发射器的传感器,以引导2个子机器人或者子机器人与主体完成自动对接,当一个子机器人的手爪卡住另一个子机器人的发射板的凹槽时,自动对接成功。在完成对接的基础上,适当调节2个子机器人的关节角度,就会使子机器人之间形成不同的构型。

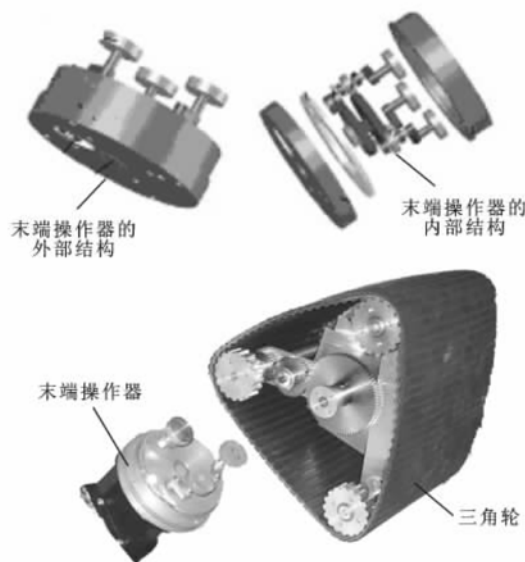


图2 子机器人对接机构示意图

2 传感器的选取及工作过程分析

在自动重构机器人研究领域,大型系统根据其特点所选用的传感器差别很大,比如飞船在太空中对接可以用通讯卫星传递相对位置信号,海洋中船只的对接可以采用声纳导航,而这些条件对于本文研究的机构都不适合。极小型系统一般采用红外线发射、接收装置,再附加以别的传感器,如倾斜度传感器、接触传感器等^[3-4]。红外发射、接收装置感测距离相对较小,由于较小型系统通过控制轨迹可以将对接面控制在很小的范围内,并且设计使得2个对接面在相对于地面的高度正好处于同一高度,理论上属于平面对接。综合以上分析,对于处理一般机器人之间的对接,需要寻找更适合于它的规模和安装空间的传感器。

2.1 传感器的选取

对接过程是2个模块的连接面不断靠近并对齐最后连接起来的过程,在对接过程中需要不断地修正各个自由度上的位置偏差和转动偏差。一般情况下,转动偏差可以通过位置的测量而估测,因此需要在相互连接的2个面上放置距离传感器。这里选用二维位置敏感传感器(PSD)和红外发光器组成的发射板通过巧妙的设计对接算法,引导2个移动机器人完成空间对接。

PSD是一种具有特殊结构的大光敏面光电二极管,当点光源照射在感光面上不同位置时,所得到的电信号也不同,从输出的电信号中可以确定入射光点在器件感光面上的位置。对二维PSD四端输出信号进行采样,可以实现很高的采样频率,有利于采样的实时化。这里要求所选用的PSD体积尽量小、有效面积尽量大,为了使X和Y轴方向等价,要求选用有效面积为正方形的PSD,因此这里选取了HAMAMATSU公司的S1743型PSD,其光敏面有效面积是4.1 mm×4.1 mm,视角为60°。

红外发光器用来模拟点光源,要求直径尽量小,

同时为了提高传感器的检测范围,要求视角尽量大,因此选取直径为3 mm的Hewlett Pachard标准漫射LED,其视角为60°,体长4.45 mm。

2.2 传感器的特性试验

为了测试传感器的性质,首先必须采集到信号,为此,作者设计了PSD的信号处理电路,如图3所示(图中C₁、C₂为电容),在一个采样周期内,A/D采集一次信号所得的一个LED的像点坐标为

$$X = \Delta X_2 / \sum X_2; \quad Y = \Delta Y_2 / \sum Y_2 \quad (1)$$

为了验证信号处理电路的正确性,把2个电阻用电压U_i来模拟光点与传感器两边所形成的光电电压值,这样给U_i加不同的电压,利用万用表分别检测电路中X和Y方向的U₁、U₂、U₀₁和U₀₂的值,根据图3,当R_a=R_b=R₁时有

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= U_2 = U_i \\ U_{01} &= U_1 - U_2 \\ U_{02} &= U_1 + U_2 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

表1为当R_a=R_b时,给定一组变化的U_i值,分别测得的X和Y方向上的5组值。由表1可知,在电路的

表1 电路验证测量值

方向	R _a /Ω	R _b /Ω	U _i /V	U ₁ /V	U ₂ /V	U ₀₁ /V	U ₀₂ /V	(U ₁ +U ₂)/V	η ₀₂ /%
X	10	10	1.018	1.008	1.001	0.3	2.02	2.009	0.75
	10	10	2.033	2.016	2.019	1.1	4.00	4.035	0.87
	10	10	3.032	3.007	3.012	2.9	5.98	6.019	0.35
	10	10	4.030	4.000	4.000	4.5	8.00	8.000	0.00
	10	10	5.040	4.990	5.000	6.4	9.99	9.990	0.00
Y	10	10	1.008	1.004	1.001	0.1	2.01	2.005	0.30
	10	10	2.033	2.027	2.022	1.7	4.03	4.049	0.47
	10	10	3.032	3.024	3.017	2.2	6.00	6.041	0.68
	10	10	4.030	4.020	4.010	3.0	8.04	8.030	0.12
	10	10	5.040	5.020	5.010	4.9	10.04	10.030	0.09

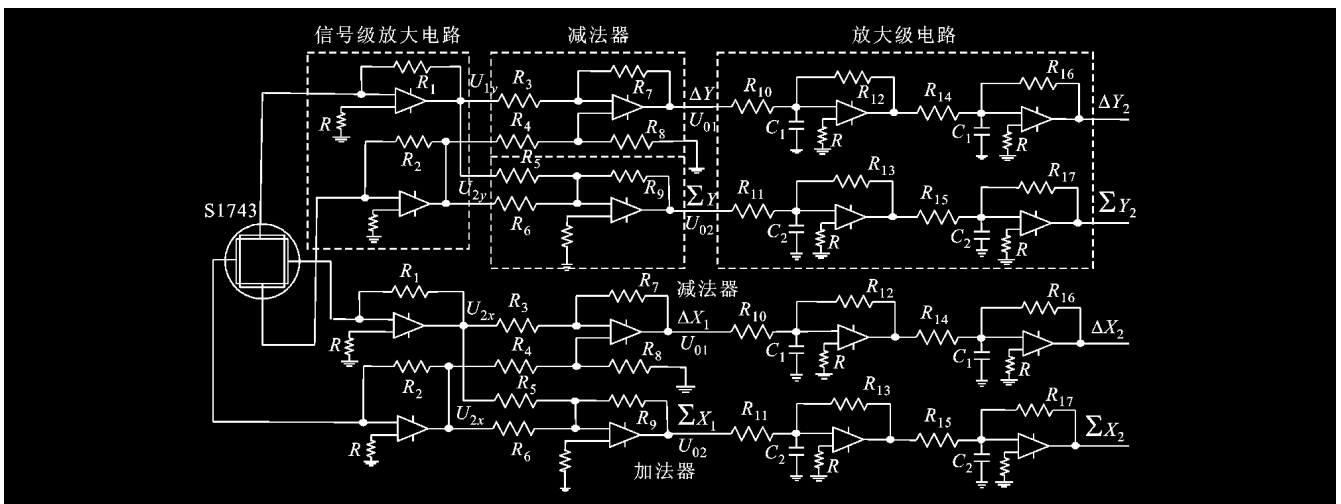


图3 信号处理电路图

X和Y方向上,随着 U_i 的增大, U_{01} 的误差增大,当 U_i 增大到5V时,在检测所得的10组值中, U_{02} 误差的变化范围为0~0.87%,这说明2条支路的误差都已经足够小.由于感应电流、电压很小,放大级电路只起把微小电压放大到正常范围的作用,利用软件计算实现的除法运算与用硬件电路实现时相比,误差几乎可以忽略,仅仅是小数点后末尾数字4舍5入的微小误差,因此公式(1)中的计算用软件除法来代替硬件电路.图3所示的电路在处理PSD信息时,完全可以满足实际应用的需要.试验中,通过示波器来观察 ΔY_2 、 $\sum Y_2$ 、 ΔX_2 和 $\sum X_2$ 四路信号的变化趋势,打开模拟发射板上的一个开关,使其对应的LED发光,再移动模拟发射板,同时观察示波器上的波形变化.结果发现:当发射板跟PSD对正时,波形到达一个稳定值,向一边移动发射板,波形随着移动方向单调变化,直到到达一个极值;向反方向移动发射板时,波形会在反方向单调变化到一个极值.图4中 ΔY_2 的2个极值分布在0刻度线的两边,而 $\sum Y_2$ 的两个极值有一个在0刻度线上.这说明,当光线在PSD的中点入射时, $\sum Y_2$ 的值在0刻度线附近($\sum Y_2$ 在整个区间上为负),而 ΔY_2 在正中间.这样, $\Delta Y_2/\sum Y_2$ 的值既有正负变化,又有单调的大小变化, $\Delta X_2/\sum X_2$ 的值同理,因此数组 $\Delta X_2/\sum X_2$ 、 $\Delta Y_2/\sum Y_2$ 能很好地区分出PSD平面上的4个区间.

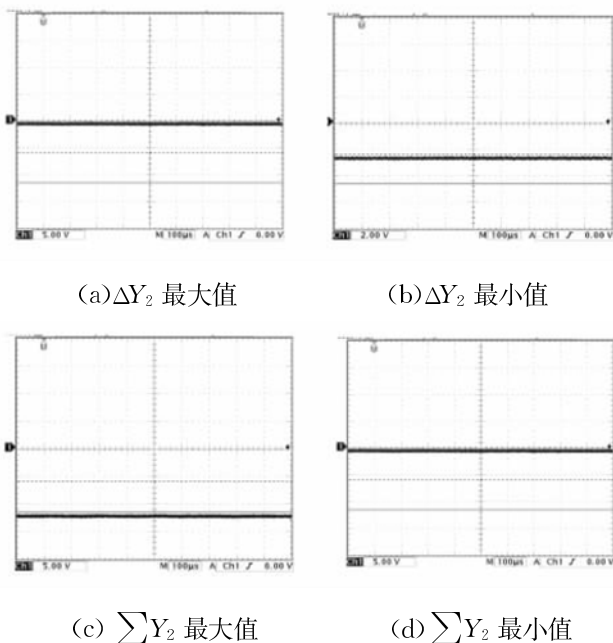


图4 示波器上采集到的极值

同时,试验中还可以观察到,LED到PSD的距离会影响电压值的大小,当到PSD的距离大于10mm时,PSD感觉不到光信号.这有2个原因:一个是近距离内用LED模仿点光源的误差十分大;另一个是随着距离的增大,LED入射到PSD光敏面上的光线会大大减少.因此,要提高传感器的检测范围、距离和精度,必须对PDS的测量装置进行改制.

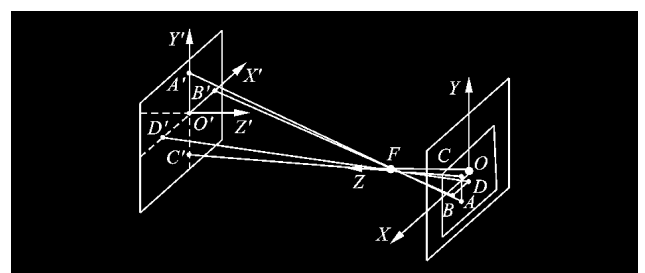
2.3 改制后的传感器工作原理

本文采取了为PSD添加类似照相机镜头的光学装置的方法.该光学装置与照相机镜头的工作原理相同,能把来自发光二极管的部分光线汇聚成PSD光敏面上的一点,也就是说,能使每个发光二极管都在PSD的光敏面上有一个清晰的像点.

图5为由红外发射器发出的光经该光学装置聚焦后,将光点成像于PSD光敏面上的原理图,其中PSD的放置必须使得光敏面正好位于该光学装置的焦平面位置,PSD光敏面的中心正好位于该光学装置的焦点处,且有 $O'A'=O'B'=O'C'=O'D'$.发射板安装在子机器人三角轮子一侧的中心圆柱形端面上,接收器安装在子机器人的末端操作器上.由空间几何投影关系可知,如果发射板的 Z' 轴和接收板的 Z 轴对正时,可以得到

$$A'O'/OF = AO/OF \Rightarrow OF = A'O'OF/AO \quad (3)$$

由式(3)可以求出 OF 的长度,即发射板和接收板之间的距离.因此,要测量2个连接板之间的距离,关键问题是要调整接收板的 Z 轴与发射板的 Z' 轴,使其精确对准.



A', B', C', D' :发光二极管; A, B, C, D : A', B', C', D' 在光敏面上的像点; F :PSD焦点位置

图5 改制后的PSD测量原理图

3 基于PSD信息的轨迹规划

机器人的运动学建模、反解的求解是对接过程中基于传感器信息进行轨迹规划的基础.由于篇幅所限,运动学建模及求解参见文献[5].

如果开始时子机器人的末端操作器相对于基座的关系表示为 0_1T ,按照固定步长运动一步后,它们

之间的相对关系变为 ${}^{02}_6T$,则有

$${}^{02}_6T = {}^{01}_6T \cdot T \quad (4)$$

式中: T 为基本动作对应的变化因子矩阵. 具体的轨迹规划方法参见文献[5].

4 仿真实验研究

由文献[5]的分析可知,子机器人的手臂在对接工作空间内运行时,系统在静力学上是平衡的. 处于对接工作空间内的2个子机器人,在位置敏感传感器的引导下,可以自动完成空间对接,本文从运动学角度进行了仿真,准坐标系的建立参见文献[5]. 运动模式和工作模式子机器人的初始位姿见图6a. 利用OpenGL得到的试验结果如图6所示.

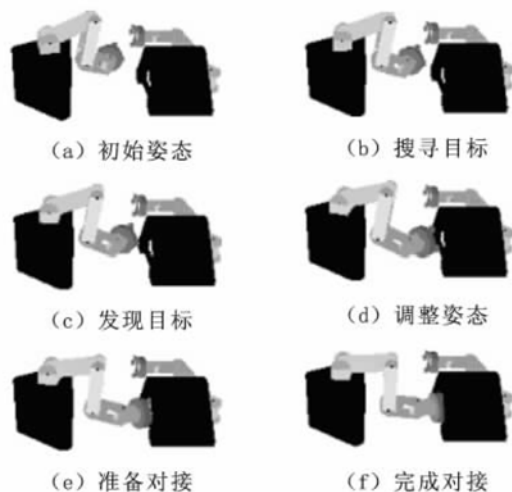


图6 子机器人对接过程示意图

图7是末端操作器按照给定的搜索算法,寻找并完成空间对接的整个过程所走过的空间轨迹,其中的 $a-f$ 与图6a的三维仿真结果相对应. 图7a中: $a-b$ 为末端操作器偏离平衡位置向上 60° 搜寻目标的过程; $b-c$ 为在没有找到目标的情况下,处于工作模式的子机器人在调整姿态的过程中所对应的末端操作器的空间轨迹; $c-d$ 为末端操作器偏离平衡位置向下 60° 搜寻目标的过程; $d-e$ 为发现目标后的对

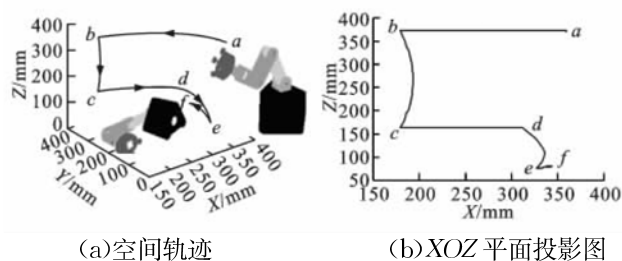


图7 对接过程末端操作器轨迹图

齐过程; $e-f$ 为对齐后抓住对方连接板的过程. 图7b为空间轨迹在XOZ面上的投影图,其中的曲线 $a-f$ 与图7a中的曲线 $a-f$ 相对应,很明显 $e-f$ 为平行于XOY平面的曲线,表示工作模式子机器人的末端操作器在Z轴方向大概80 mm的地方开始向前运动抓住对方连接板的过程,80 mm正好是三角轮子另一侧的连接板距离地面的高度,由此可见,这时需要完成对接的2个子机器人处于同一水平面上.

5 结 论

本文提出了以二维位置敏感传感器(PSD)来引导机器人完成空间对接的方法,并分析了它的工作原理和可行性. 由于单纯的PSD对点光源的要求太高,而试验中用红外发光器来代替点光源远远不能满足试验条件的要求,因此为了扩大PSD的测量范围和精度,本文提出对PSD进行改制的方法并给出其工作原理,同时在运动学建模、封闭解的求解和轨迹规划的基础上,给出了基于传感器信息的轨迹规划方法,仿真试验也证明了空间对接的可行性.

致谢:感谢日本东京工业大学 Shigeo Hirose 教授及其研究小组在第一代子机器人机构设计及运动调试中的合作.

参考文献:

- [1] Mark Y. Locomotion with a unit modular reconfigurable robot [D]. Stanford: Stanford University, 1994.
- [2] Hirose S, Damoto R, Kawakami A. Study of super-mechano-colony (design of experimental model and its fundamental experiments) [J]. Proc COE Workshop, 2000, 12(3): 83-89.
- [3] Mondada F, Bonani M, Magnenat S, et al. Physical connections and cooperation in swarm robotics [C]// Proceedings of the 8th Conference on Intelligent Autonomous Systems. New York: IEEE, 2004: 53-60.
- [4] Hanumant S, Steve L, Keith V. An intelligent dock for an autonomous ocean sampling network [C]// Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation. New York: IEEE, 1998: 556-560.
- [5] 张力平. 可重构模块化探测机器人系统的空间对接及协调运动研究[D]. 西安: 西安交通大学机械工程学院, 2006.

(编辑 王焕雪 管咏梅)