

基于手眼视觉的空间末端操作器的轨迹规划^{*}

朱映远,倪风雷,史士财,刘 宏

(哈尔滨工业大学 机器人研究所,黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:空间机器人将用于对空间目标的跟踪、接近、包络和抓捕,由于机器人和抓捕目标均处于无约束自由飘浮状态,因此顺利进入捕获区并完成抓捕较为困难。针对漂浮机器人和漂浮目标对接困难的问题,利用末端操作器上的手眼视觉作为传感器系统对末端操作器的运行轨迹加以控制;利用动量守恒和动量矩守恒两大基本定理,推导了手眼视觉引导下空间机器人末端操作器为达到期望捕获位姿的轨迹规划,使得末端操作器可以规避末端操作器手指外形实现对目标的无接触跟踪和包络;利用气浮平台、被动 6 自由度模拟器实现了地面模拟空间失重环境,并在该试验平台上试验了机器人末端操作器对漂浮目标的跟踪和捕获。研究结果表明,基于视觉的轨迹规划可以协助机器人完成对漂浮目标的跟踪和抓捕。

关键词:末端操作器;轨迹规划;视觉;抓捕

中图分类号:TP224;TM93;TH7

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2012)07-0759-06

Movement programming of space robot's end-effector based on vision

ZHU Ying-yuan, NI Feng-lei, SHI Shi-cai, LIU Hong

(Robot Research Institute, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: The space robot should be used to track, close and capture the target. It is difficult for the robot to reach the capture range because the robot and the aim object are floating all. In order to help the robot to do the complicated movement and connect the floating object, the vision was fixed on the end-effector to control the robot's movement track. The movement programming of the end-effector needed to move to capture the target was concluded with the lead by vision based on the conservation of momentum. So the fingers of the space effector could avoid touch with the target during the robot tracked and closed the aid. The zero gravity environment which the tracking and capture of robot could be examined in, was simulated by the air-foot and 6-dof simulator. The results indicate that the robot can track and capture the floating object by the help of the movement planning based the vision.

Key words: end-effector; movement programming; vision; capture

0 引 言

随着人类对太空的不断开发,以及航天飞机、宇宙飞船和空间站的建立,大量的空间生产、空间加工、空间装配、空间维护和修理操作需要完成。具有对漂浮目标捕获对接能力的机器人及机器人末端操作器可以大大减小宇航员从事危险工作的代价和成本^[1]。因此空间背景下具有视觉反馈的机器人抓捕成为当今机器人研究的新领域。日本 ETS-VII 是世界上第 1 个成功演示自主交汇对接的空间机器人^[2-3]。

空间机器人运动学及动力学方程是本研究内容的理论基础,这方面的重要研究成果参见文献[4-6]。空

间机器人末端操作器本身不具备跟踪和监视目标器的能力,当机械臂沿着规划好的轨迹运动时,作为捕获目标的目标器的位姿和速度会变化,这就会导致机械臂捕获跟踪精度下降^[7],必须采用手眼相机作为视觉反馈系统来引导末端操作器按一定轨迹进入捕获区。

为了解决空间机器人对漂浮目标的接近、跟踪和捕获问题,基于研制成功的空间末端操作器、空间机器人以及测试平台,本研究对空间机器人运动学和动力学以及基于视觉反馈的轨迹规划进行研究。

1 建立末端操作器模型

在空间环境中,机器人本体和目标器均处于失重

收稿日期:2011-12-01

基金项目:国家高技术研究发展计划(“863”计划)资助项目(2009AA * * * * *)

作者简介:朱映远(1977-),男,山西大同人,讲师,博士,主要从事空间机器人技术方面的研究. E-mail:dirzhuyy@yahoo.com.cn

状态,相互之间的位姿并不固定。为了能完成对目标器的捕获,机器人基座装有全局相机。全局相机作为概略反馈视觉系统,可以确定目标器相对卫星本体的位置和姿态并引导机器人末端操作器接近目标器,使得目标器上的光标进入手眼视觉系统视场。机器人末端操作器两侧装有手眼相机。手眼相机作为精确反馈视觉系统,可以得到目标器相对末端操作器的位姿、线速度和角速度。为了便于分析,本研究做如下定义:

(1)跟踪点。在视觉反馈下,机器人可以到达的捕获接口前方但并未和捕获接口发生接触碰撞的位置。

(2)捕获点。机器人运动到使得捕获接口把柄位于V形槽前方手指包络范围中心处,该处位置即是捕获点。一旦进入这个位置,末端操作器开始抓握,由于在3个方向都有足够的冗余,末端操作器可以完成对捕获接口的包络而不至于碰撞捕获接口导致目标的逃逸。

(3)进入轨迹。末端操作器从跟踪点沿一定的轨迹到达预捕获点叫做进入轨迹。

根据分析,跟踪点和预捕获点位于末端操作器轴线上,这样进入轨迹应该是一条直线。机器人为了跟踪目标星,末端操作器必须具备一个速度。本研究在这个速度上叠加一个进入速度,使末端操作器能够沿着进入轨迹到达预捕获点,并且在这一过程中末端操作器和捕获接口不得有碰撞和接触。手眼视觉系统就是要引导末端操作器到达跟踪点并在该点保持和目标器相同的线速度和角速度,然后按照一定的轨迹从跟踪点进入捕获点。

本研究假设 $\{T\}$ 是目标器捕获接口坐标系,具有和目标器相同的速度,是固化在目标器上的一个坐标系; $\{E\}$ 是末端操作器坐标系,跟踪目标就是让末端操作器坐标系和跟踪点坐标系位姿重合并具有相同的速度; $\{C\}$ 是手眼视觉系统坐标系。

本研究在目标器上面装有三点式荧光目标板,手眼相机可以获得捕获接口相对于相机的位姿、速度信息。因为跟踪点不是光标而是目标器以外的一个虚拟点,需要计算得到跟踪点在相机坐标系中的位置和姿态。

本研究假设 e'_i 是相机测得的光标到相机的位置和姿态误差,可以在每次采样中得到; e_i^H 是跟踪点相对光标的位置和姿态关系,是固定值。这样,可以得到跟踪点在相机坐标系的位姿偏差:

$$e_i = e'_i + e_i^H \quad (1)$$

式中: e_i —相机光心和跟踪点的位姿误差。

且:

$$U_c^c = \begin{pmatrix} {}^c\omega_c \\ {}^c v_c \end{pmatrix} = K_p e_i + K_I \int e_i \quad (2)$$

式中: U_c^c —手眼相机在手眼相机坐标系中的6维速

度; ${}^c\omega_c$ —相机光心的角速度; ${}^c v_c$ —相机光心的线速度; K_p, K_I —增益和积分项系数。

根据相机速度推出空间末端操作器速度,有:

$$\begin{cases} \omega = {}^c A_c {}^c \omega_c \\ v = {}^c A_c {}^c v_c - \omega \times P \end{cases} \quad (3)$$

式中: ${}^c A_c$ —光心到末端操作器坐标系变换矩阵, P —末端操作器坐标系原点到光心的矢量。

2 从初始点到捕获点的一阶轨迹规划

在接近过程,机器人运动轨迹受到来自捕获接口的约束,因此末端操作器必须从跟踪点沿一定的轨迹进入捕获点才能防止和目标发生碰撞。为了防止碰撞,本研究制造了一条轨迹。它是一条固化在目标器上的直线,处于捕获接口的中心位置,在轨迹上面所有的位置点都要和目标器具有相同的姿态,即在理想的末端操作器进入过程中,末端操作器相对目标器只有平动没有转动。

和地面机器人不同的是,接近过程的轨迹规划有3个显著特点:①速度低,无论是目标器相对机器人的速度还是机器人关节转速都很低;②由于空间机器人逆运动学的计算困难,造成接近过程中很难进行末端操作器的位置控制,只能通过广义雅哥比矩阵控制末端操作器的6维速度;③机器人的卫星基座具有陀螺仪等传感器,虽然不能提供精确的位移信号,但可以提供3维姿态反馈信号。

由于关节位置控制周期远小于基于手眼视觉系统的控制周期,轨迹规划任务分为3层:最上层是基于视觉系统的宏观层,中间层是末端操作器控制层,最下层是关节实际运动状态。宏观层提供空间中的目标点;末端操作器控制层根据提供的目标点得到连续的末端操作器6维速度,并将这个速度解耦到各个关节上,成为各关节的目标点;由于惯性影响,关节实际运动状态和控制层提供的目标并不一致,但因为关节转速、加速度都很低,这个误差可以忽略。

在跟踪阶段,可以根据手眼相机的视觉反馈,建立如式(3)的末端操作器速度轨迹。但是在接近阶段,这个方程显然是不行的。因此本研究对它进行了改进,将末端操作器速度分解成角速度和线速度两部分来解决。

根据视觉系统反馈得到的信息不同,分为有速度反馈的轨迹规划和没有速度反馈的轨迹规划。根据进入要求不同,又分为角速度轨迹规划和线速度轨迹规划。

2.1 无速度反馈情况分析

在无速度反馈情况下,视觉系统能够提供目标器相对末端操作器的位姿,即末端操作器要到达的捕获

点的位姿。通过关节位置传感器得到各关节的速度,经过正运动学计算得到末端操作器笛卡儿坐标系中的初始速度 $\xi_s = [\omega_s, v_s]^T$, 初始位姿为 $\delta_s = [\theta_s, p_s]^T$ 。

角速度规划:在进入过程中,机器人根据目标器坐标系在惯性坐标系的位置以及目标器的姿态来控制末端操作器工具坐标系的位置,使得末端操作器和目标器保持一定的位姿关系;机器人还控制末端操作器坐标系保持一定的姿态使得相机能够保持指向目标器以防止目标器逃出相机视场,考虑到进入过程没有时间限制,因此本研究建立了基于姿态角的宏观层角速度规划模型,如下式:

$$\omega_T = \begin{pmatrix} \omega_{1T} \\ \omega_{2T} \\ \omega_{3T} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K_p e_{\theta 1} + K_I \sum e_{\theta 1} \\ K_p e_{\theta 2} + K_I \sum e_{\theta 2} \\ K_p e_{\theta 3} + K_I \sum e_{\theta 3} \end{pmatrix} \quad (4)$$

式中: $e_{\theta i}$ —末端操作器姿态和光标到工作坐标系原点角度之间的 i 向误差; K_p, K_I —调整系数。

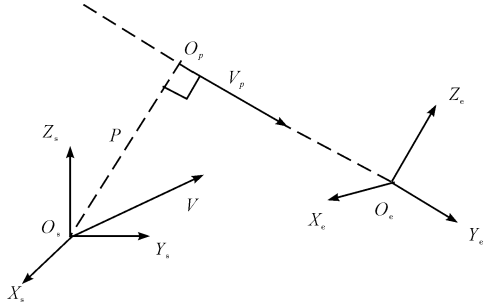


图1 合作目标位置的轨迹规划

O_s —末端操作器坐标系原点; V —初始速度,由该时刻机器人关节速度正运算得到; O_e —捕获点以及根据目标器形成的坐标系原点; $O_p O_e$ —末端操作器进入轨迹,在空间中是一条直线; p —末端操作器坐标和进入轨迹的偏移

线速度规划:在进入过程中,末端操作器必须沿一定轨迹(即,一条相对目标器发生平移的路径)才能不和目标器发生碰撞,因此必须引入对末端操作器工具坐标系和进入轨迹之间偏移的判断。合作目标位置的轨迹规划如图1所示,这里,如果偏移 p 过大,就会发生末端操作器尚未到达捕获点就和目标器发生碰撞的事故。

本研究将空间机器人末端操作器的线速度 v 分解成3个分速度:一个是和进入轨迹 v_p 平行的速度 v_1 并以 v_p 方向为正方向;一个是垂直于进入轨迹并相交的速度 v_2 ;第3个分速度是分别和 v_1 、 v_2 垂直的 v_3 ,由于它们和进入轨迹的方向不同,有不同的目标速度。同样,可以把末端操作器位置和捕获点位置偏差 e_s 分解成3个向量:一个是和进入轨迹 v_p 平行的偏移 e_{s1} ,一个是垂直于进入轨迹并相交的偏移 $e_{s2} = p$;第3个向量是分别和 e_{s1} 、 e_{s2} 垂直的 e_{s3} 。

假设 L 是根据交点 O_p 和质心的距离决定的最大偏差。当 $|p| < L$ 时,认为末端操作器已经处于进入轨迹,考虑到进入过程没有时间限制,因此本研究建立了如下目标速度:

$$v_T = \begin{pmatrix} v_{1T} \\ v_{2T} \\ v_{3T} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K_p e_{s1} + K_I \int e_{s1} \\ K_p e_{s2} + K_I \int e_{s2} \\ K_p e_{s3} + K_I \int e_{s3} \end{pmatrix} \quad (5)$$

式中: e_{si} —目标点和末端操作器坐标系的 i 向位置误差; K_p, K_I —调整系数。

当 $|p| > L$ 时,认为末端操作器偏离进入轨迹,应该停止 v_1 ,否则可能发生碰撞事故,笔者建立了如下目标速度:

$$v_T = \begin{pmatrix} v_{1T} \\ v_{2T} \\ v_{3T} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ K_p e_{s2} + K_I \sum e_{s2} \\ K_p e_{s3} + K_I \sum e_{s3} \end{pmatrix} \quad (6)$$

综合式(4~6),得到末端操作器坐标系目标速度 ξ_T 和加速度 ζ :

$$\begin{aligned} \xi_T &= \begin{bmatrix} \omega_T \\ v_T \end{bmatrix} \\ \zeta &= \frac{\xi_T - \xi_s}{T} \end{aligned} \quad (7)$$

本研究将宏观初始速度 ξ_s 和目标速度 ξ_T 以及加速度 ζ 作为机械臂各关节轨迹规划的约束条件,利用空间机器人逆运动学,对视觉系统采样周期内各点进行插值,将插值点的位置、速度、加速度求逆解,可得到机械臂各关节在每个插值点的目标位置、速度和加速度。

但是这个目标速度和加速度关节可能超出关节的最大速度和加速度而无法达到,所以本研究引入一个对速度加速度超限问题的处理。在第 i 插值点上,末端操作器目标速度和加速度分别为 ξ_i 和 ζ_i ,将这个速度、加速度通过逆运动学解算到各关节上得到各关节速度 $\dot{\theta}$ 和加速度 $\ddot{\theta}$,如果第 j 关节的最大速度或加速度超过关节极限速度 $\dot{\theta}_{jmax}$ 或极限加速度 $\ddot{\theta}_{jmax}$,那么假设第 j 关节的目标速度和加速度为 $\dot{\theta}_j$ 和 $\ddot{\theta}_j$,可建立如下关系:

$$\ddot{\theta}_{j,i+1} = \ddot{\theta}_{j,i} + \ddot{\theta}_{j,i} \cdot t \quad (8)$$

$$\dot{\theta}_{j,i} = f(\ddot{\theta}_{j,i}, \dot{\theta}_{j,i}) \quad (9)$$

式中: $\ddot{\theta}_{j,i}$ —第 i 点 j 关节的理想加速度, $\dot{\theta}_{j,i}$ —第 i 点 j 关节的理想速度。

函数关系 f 如表1所示。

表 1 关节实际目标加速度

理想 加速度	$ \ddot{\theta}_{j,i} < \ddot{\theta}_{jmax}$				$ \ddot{\theta}_{j,i} > \ddot{\theta}_{jmax}$			
理想 速度	$ \dot{\theta}_{j,i} < \dot{\theta}_{jmax}$	$ \dot{\theta}_{j,i} > \dot{\theta}_{jmax}$	$ \dot{\theta}_{j,i} < \dot{\theta}_{jmax}$	$ \dot{\theta}_{j,i} > \dot{\theta}_{jmax}$	$ \dot{\theta}_{j,i} < \dot{\theta}_{jmax}$	$ \dot{\theta}_{j,i} > \dot{\theta}_{jmax}$	$ \dot{\theta}_{j,i} < \dot{\theta}_{jmax}$	$ \dot{\theta}_{j,i} > \dot{\theta}_{jmax}$
方向	+	-	+	-	+	-	+	-
	$\ddot{\theta}_{j,i}$	$\ddot{\theta}_{j,i}$	$\ddot{\theta}_{j,i}$	0	$\ddot{\theta}_{j,i}$	$\ddot{\theta}_{jmax}$	$-\ddot{\theta}_{jmax}$	0
	$\ddot{\theta}_{j,i}$	$\ddot{\theta}_{j,i}$	$\ddot{\theta}_{j,i}$	0	$\ddot{\theta}_{j,i}$	$\ddot{\theta}_{jmax}$	$-\ddot{\theta}_{jmax}$	0

2.2 有速度反馈情况分析

一般的机器人轨迹规划中采用连续规划导引法或者分段标准路径法^[8],最大的缺点在于每次的轨迹规划只用到了目标运动当前位姿信息。那么机器人在跟踪、进入有自身角速度和线速度目标的过程中可能产生碰撞。

在有速度反馈情况下,视觉系统能够提供目标器相对末端操作器的位姿和线速度、角速度信息,即运动目标点的位姿和速度。目标器在没有受到外界扰动的情况下,仅有速度和角速度,因此有速度反馈相对于没有速度反馈情况,可以根据目标器的速度预知下一采样时刻的位置。捕获点相对于目标器的质心位置是一个固定值 R ,是从质心指向捕获点的向量。由于目标器具有角速度, R 是一个关于时间 t 的函数。这样,通过手眼视觉系统得到的捕获点绝对速度 V 、牵连角速度 ω 可以分解出目标器的相对平动速度 V_0 :

$$V = V_0 + \omega \times R \Rightarrow V_0 = V - \omega \times R \quad (10)$$

由此可以预测出下一时刻捕获点和末端操作器坐标系的位置误差以及下一时刻捕获点和末端操作器坐标系的位置误差和姿态误差:

$$\begin{cases} e_s^{2T} = e_s^T + V_0 T + \int_0^T \omega \times R dt \\ e_\theta^{2T} = e_\theta^T + \omega T \end{cases} \quad (11)$$

式中: e_s^{2T} —下一时刻,即两个采样周期之后捕获点和当前末端操作器坐标系的位置误差; e_θ^{2T} —下一时刻,即两个采样周期之后捕获点的姿态和当前末端操作器坐标系的误差; T —采样周期; e_s —当前时刻目标点和末端操作器坐标系的位置误差; e_θ —当前时刻目标点和末端操作器坐标系的姿态误差,可以由视觉系统测得。

角速度规划:根据预测得到的下一时刻捕获点的姿态建立当前规划的目标姿态,计算结果如下:

$$2\omega_s T + 2kT^2 = e_\theta^{2T} \quad (12)$$

式中: k —角加速度, ω_s —初始速度。

根据建立的目标方程就可以规划出末端操作器目标角速度 ω_T :

$$\omega_T = \frac{e_\theta^{2T}}{T} \quad (13)$$

线速度规划:根据式(10),可以预测出下一时刻捕获点的位姿。基于预测目标的轨迹规划如图2所示,建立了坐标系 O_{e2} 以及当前时刻坐标系 O_{e1} 。

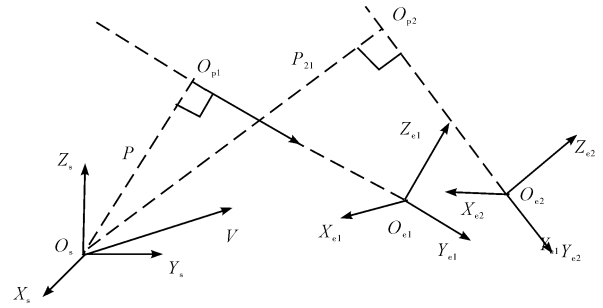


图 2 基于预测目标的轨迹规划

根据这个预测坐标系将空间机器人末端操作器的速度 v 分解成 3 个分速度:一个是和进入轨迹 v_p 平行的速度 v_1 并以 v_p 方向为正方向;一个是垂直于进入轨迹并相交的速度 v_2 ;第 3 个分速度是分别和 v_1 、 v_2 垂直的 v_3 ; p 是末端操作器坐标和当前时刻进入轨迹的偏移。这里,如果偏移 p 过大,就会发生末端操作器尚未到达捕获点就和目标器发生碰撞的事故。

假设 P 是根据交点 O_{p1} 和质心的距离决定的最大偏差。当 $|p| < P$ 时,认为末端操作器处于进入轨迹上,只需控制速度 v_2 即可:

$$v_{2T} = \begin{pmatrix} v_1^{2T} \\ v_2^{2T} \\ v_3^{2T} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K_p e_s^{2T} + K_1 \sum e_s^{2T} \\ \frac{p^{2T}}{T} - v_2 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (14)$$

式中: e_s^{2T} —目标点和末端操作器坐标系的位置误差; K_p, K_1 —调整系数; p^{2T} —预测的末端操作器坐标系和下一时刻进入轨迹的距离。

当 $|p| > P$ 时,认为末端操作器偏离进入轨迹,应该停止 v_1 ,否则可能发生碰撞事故,本研究建立了如下目标速度:

$$v_{2T} = \begin{pmatrix} v_1^{2T} \\ v_2^{2T} \\ v_3^{2T} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{p^{2T}}{T} - v_2 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (15)$$

根据得到的预测目标速度,可以得到加速度,进而得到当前时刻的目标速度 v_T :

$$v_T = v + \frac{v_{2T} - v}{2T} \cdot T = v + \frac{v_{2T} - v}{2} = \frac{v_{2T} + v}{2} \quad (16)$$

综合式(13~15),得到末端操作器坐标系目标速

度 ξ_T 和加速度 ζ :

$$\xi_T = \begin{bmatrix} \omega_T \\ v_T \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$\zeta = \frac{\xi_T - \xi_s}{T}$$

根据初始速度 ξ_s 和目标速度 ξ_T 以及加速度 ζ , 经过插值, 可得到一系列的末端操作器坐标系速度。

3 视觉引导下的末端操作器进入

本研究利用气浮平台和被动式 6 自由度模拟器以及相应的视觉设备, 对 3 自由度机器人进行了地面视觉引导试验。

3.1 试验装置设计

试验装置如图 3 所示, 包括气浮平台、6 自由度模拟器、机械臂和末端操作器以及固定在末端操作器上面的摄像机。其中由于地面重力环境约束, 6 自由度模拟器只具有 X 、 Y 方向的平动和绕 Z 轴转动 3 个自由度。在捕获接口装有光标, 摄像机固定在末端操作器上, 反馈到中央控制器的全部测量数据都是相对末端操作器坐标系的距离和角度。

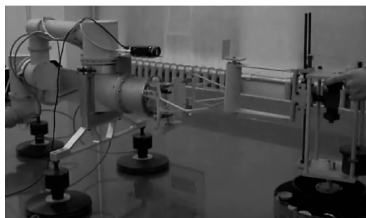


图3 视觉轨迹规划试验装置

3.2 基于视觉反馈的试验研究

试验一: 笔者首先做了一个未加任何规划的视觉反馈试验, 末端操作器从起点开始, 沿一条直线向捕获接口逼近。最终虽然进入捕获区, 但是和模拟器发生碰撞, 无法完成对捕获接口的进入。

试验二: 在视觉引导下, 末端操作器向跟踪点运动, 如图 4 所示。在图 4 中, 横、纵轴分别是 X 、 Y 轴, 左侧轨迹是末端操作器运行轨迹, 试验开始时捕获接口保持静止状态。末端的圆形是捕获区, 认为末端操作器只要进入捕获区, 就成功完成一次试验。折线是末端操作器坐标原点的运行轨迹。右边“*”号代表捕获接口位置; 下面的直线穿过捕获接口位置, 表示捕获接口的姿态以及在该姿态下的延长线, 即理想进入轨迹; 左边“*”号代表跟踪点位置, 在姿态方向延长线上; 上面的直线表示末端操作器可以允许的最大误差, 即小于这个偏移量进入捕获接口才不会发生碰撞。

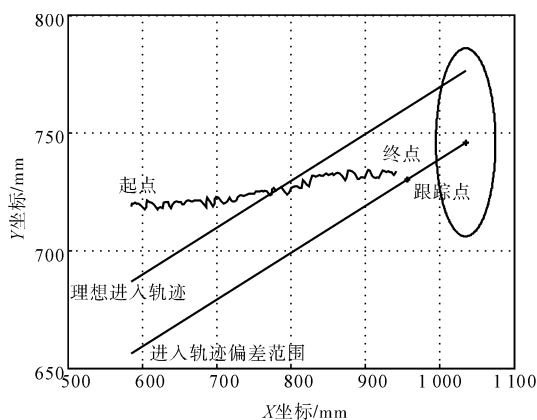


图4 末端操作器向跟踪点的运动

由图 4 可以看出, 在轨迹规划下, 机器人启动后末端操作器不再直接向捕获接口运动。机器人首先根据视觉反馈确定跟踪点位置, 然后沿一条轨迹向跟踪点运动。

试验三: 视觉引导下, 末端操作器经过跟踪点进入捕获区。如图 5 所示, 下面的直线表示沿该姿态下的最大误差, 当末端操作器坐标原点进入误差范围以内, 即末端操作器轨迹高于下面直线后, 末端操作器目标转向捕获接口位置, 最终在误差范围以内无碰撞地进入捕获区, 完成对捕获接口的抓握。在宏观上, 末端操作器首先从初始位置到达跟踪点, 然后再到捕获区, 在这个过程中末端操作器避开了捕获接口以及模拟器, 实现了基于手眼视觉的末端操作器对捕获接口的进入。

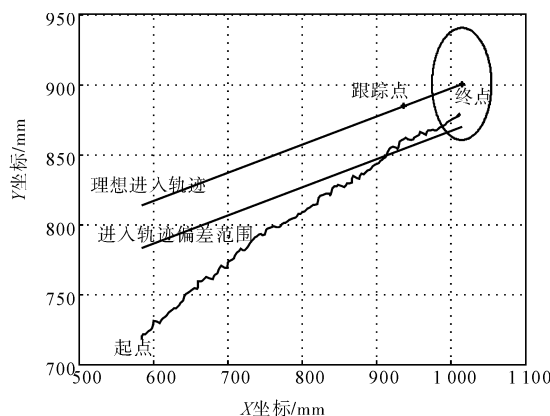


图5 末端操作器向捕获点的运动

在本次试验中, 笔者还记录了末端操作器姿态、捕获接口姿态以及末端操作器坐标原点和捕获接口位置连线和坐标系的夹角, 如图 6 所示。图中, 横坐标是时间轴, 和行程以及采样周期有关; 纵坐标是姿态角度, 主要记录了捕获接口的姿态角、末端操作器坐标原点和捕获接口位置连线的夹角(镜头夹角)和末端操作器姿态角三者的情况。

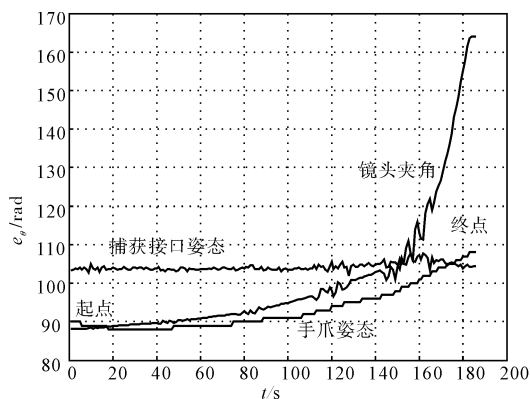


图 6 末端操作器姿态轨迹

由图 6 可知,由于捕获接口静止,姿态保持不变。末端操作器坐标原点和捕获接口位置连线的夹角主要和末端操作器坐标原点位置以及捕获点位置有关,随着位置变化,末端操作器始终保持指向光标的姿态以确保光标在视场内;随着末端操作器偏差减小,该夹角趋向于和捕获接口姿态一致;在进入轨迹末端,末端操作器坐标原点和捕获点距离变得很小,较小的位置偏移都会造成较大的夹角变化,在图 6 中显示为轨迹末端夹角出现了剧烈的上扬。末端操作器姿态角跟随连线夹角变化,随着连线夹角的增大趋同于捕获接口姿态,末端操作器姿态也逐渐接近捕获接口姿态,在捕获轨迹末端,没有连线夹角那样剧烈的变化。在宏观上,末端操作器姿态表现为始终指向捕获点,但只在捕获轨迹末端才趋近重合。

试验四:视觉引导下,末端操作器实时自主轨迹规划如图 7 所示。在本次试验中,目标器不是静止而是有一个较小的线速度和角速度,随着目标器的运动,末端操作器的位置和姿态随之发生变化。

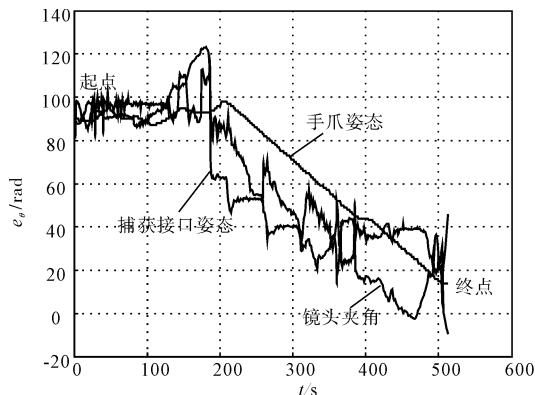


图 7 末端操作器姿态轨迹

4 结束语

本研究通过空间机器人在自由漂浮状态和自由飞

行状态下运动学的建模和机器人运动学、动力学分析,得到了空间机器人杆件雅克比矩阵、基座雅克比矩阵的数学表达式。在此基础上,笔者研究了在手眼视觉引导下,末端操作器跟踪、进入捕获区的轨迹规划,进而通过试验得到了如下结论:

(1)根据视觉反馈信息经过相应的动力学、运动学规划,手爪可以按照一定轨迹完成对多自由度漂浮目标器的接近和进入,能够避免出现末端操作器和捕获接口之间发生碰撞从而导致目标器被撞飞和机器人基座卫星的翻滚事故。

(2)视觉引导的机器人和末端操作器可以实时根据目标器位姿变化改变轨迹以实现目标器的跟踪,并根据目标器的轨迹变化叠加理想轨迹,实现末端操作器对目标器捕获接口的无接触包络。

(3)该试验平台设计合理可行,能够模拟空间失重状态下目标器多自由度漂浮工况以及机器人在视觉引导下的位姿改变。

参考文献 (References):

- [1] 李 成, 梁 斌. 空间机器人的遥操作 [J]. 宇航学报, 2001, 22(1): 95-98.
- [2] YOSHIDA K. ETS-VII flight Experiments for space robot dynamics and control-theories on laboratory test beds ten years ago, now in orbit [J]. **Experimental Robotics VII**, 2001, 27(1): 209-218.
- [3] 林 平. 日本工程试验卫星-7 的空间自动交会对接试验 [J]. 中国航天, 1997(1): 70-79.
- [4] XU Y, KANADE T. Space Robotics: Dynamics and Control [M]. Norwell, Massachusetts, Kluwer Academic Publishers, 1992: 3-27.
- [5] YOSHIDA K. Experimental study on the dynamics and control of a space robot with experimental free-floating robot satellite simulators [J]. **Advanced Robotics**, 1995, 9(6): 583-602.
- [6] SHIBLI M M. Modeling and Control of a Free-flying Space Robot Interacting with a Target Satellite [D]. Montreal Quebec, Canada. Concordia University, 2005: 5-17.
- [7] PAPANIKOLOPOULOS N P, KHOSLA P K. Adaptive robotic visual tracking-theory and experiments [J]. **IEEE Transactions on Automatic Control**, 1993, 38(3): 429-445.
- [8] 蒋再男. 基于虚拟现实与局部自主的空间机器人遥操作技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学机电工程学院, 2009: 8-15

[编辑: 张 翔]