

文章编号: 1001-0920(2009)06-0825-07

## 空间机器人视觉伺服半物理仿真的原理与实现

徐文福<sup>a</sup>, 强文义<sup>b</sup>, 梁斌<sup>a</sup>, 李成<sup>a</sup>, 刘宇<sup>a</sup>

(哈尔滨工业大学 a. 空间智能系统研究所, b. 控制科学与工程系, 哈尔滨 150001)

**摘要:** 针对在地面很难对空间机器人目标捕获过程进行微重力环境下的真实实验问题, 建立了半物理仿真系统, 以对图像处理、路径规划以及控制等关键算法进行验证. 该系统的关键在于将“虚拟环境”与“真实环境”结合起来, 利用真实视觉对虚拟环境进行 3D 重构, 以计算目标的相对位置和姿态, 实现对视觉伺服控制的闭环仿真. 从理论上推导了半物理仿真的原理, 并提出了等效投影模型的标定方法. 仿真结果表明了该方法的有效性.

**关键词:** 空间机器人; 视觉伺服; 半物理仿真; 路径规划; 控制

中图分类号: TP24

文献标识码: A

## Concept and realization of semi-physical simulation for space robotic visual servoing

XU Wen-fu<sup>a</sup>, QIANG Wen-yi<sup>b</sup>, LIANG Bin<sup>a</sup>, LI Cheng<sup>a</sup>, LIU Yu<sup>a</sup>

(a. Institute of Space Intelligent System, b. Department of Control Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China. Correspondent: XU Wen-fu, E-mail: wfxu@robotsat.com)

**Abstract:** It is very difficult to experiment the target capturing process of space robot in real micro-gravity environment on the earth. Therefore, a semi-physical simulation system is proposed to verify the key algorithms, including the image processing, path planning and control of space robot. The core of the system is combining the “virtual environment” with the “physical environment”. The real visual measurement system is used to reconstruct the virtual environment in three dimensions, and compute the relative position and attitude of the target. Then the visual servoing control is simulated in closed loop. The theoretical equations of the equivalent projection model are deduced and the corresponding calibration algorithm is proposed. The simulated experiment results show the effectiveness of the method.

**Key words:** Space robot; Visual servoing; Semi-physical simulation; Path planning; Control

### 1 引言

卫星因故障、完全失效或任务结束而被放弃后, 将停留在太空成为太空垃圾, 不但占用了宝贵的轨道资源, 而且可能危及其他航天器的安全. 为了尽可能挽回损失或净化轨道环境, 各国正在研究以空间机器人为手段, 以卫星维修、生命延长及太空垃圾清除为目的的在轨服务技术<sup>[1-4]</sup>. 一个具有重要里程碑意义的空间机器人演示系统是美国的轨道快车, 在轨成功演示了自主交会对接、卫星抓捕及燃料的加注等技术. 这些技术将使卫星延长 5 年、10 年甚至 15 年的寿命, 其经济效益、社会效益甚至军事效益非常可观<sup>[5]</sup>.

为确保在轨任务的成功执行, 需要在地面进行

充分的仿真实验以验证和评估空间机器人的路径规划和控制算法<sup>[6-8]</sup>. 根据所介入的模型不同, 通常将仿真技术分为数学仿真、半物理仿真以及全物理仿真<sup>[9]</sup>. 数学仿真在系统分析与设计阶段十分重要, 具有实现简单、投资少、灵活性高的优点, 但某些部分难以用精确的数学模型进行描述. 物理仿真的真实性最好, 实验结果具有较高的可信度, 但进行物理仿真所用的设备很复杂, 有些条件还无法模拟, 且需要相当高的经费投入. 半物理仿真兼有数学仿真和物理仿真的优点, 是目前广泛采用的一种仿真方式<sup>[10]</sup>. 张正忠等<sup>[11]</sup>提出了基于 OpenGL 的半物理仿真实验方法, 以验证基于视觉的位姿测量算法. Li 等<sup>[12]</sup>提出了空间机器人目标捕获的自主路径规划

收稿日期: 2008-05-27; 修回日期: 2008-09-25.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60805033).

作者简介: 徐文福(1979—), 男, 贵州安顺人, 讲师, 从事空间机器人路径规划、视觉伺服控制的研究; 强文义(1938—), 男, 江苏无锡人, 教授, 博士生导师, 从事智能机器人、智能控制等研究.

方法,并开发了半物理仿真系统以进行闭环仿真实验.张瀚等<sup>[13]</sup>也建立了类似的半物理仿真系统,对空间机器人的视觉伺服控制方法进行了仿真验证.

上述3种方法的共同点都是利用计算机图像技术,将目标的3D模型通过投影仪投到幕布上,再利用真实视觉测量系统对目标图像进行采集、处理等.虽然这些方法在实验中均取得了较好的结果,但没有人对该方法的实现原理进行深入研究,以给出可信的理论依据.同时,也没有对采用投影仪后的相机标定方法进行讨论和分析.本文将从理论上解决以上问题,即提供半物理仿真实验系统的实现原理,并提出相应的相机标定方法,最后给出仿真实验结果.

## 2 空间机器人半物理仿真实验系统的建立

### 2.1 典型的空机器人系统

典型的空机器人系统由一飞行基座和空间机械手组成,如图1所示.其中,空间机械手包括6DOF机械臂、末端抓捕手爪及手眼相机.待捕获目标上安装了合作标志器(3个特征光标).空间机器人将根据手眼测量信息,自主规划对目标进行捕获的路径,因此基于视觉的测量、规划及控制方法至关重要<sup>[14]</sup>.

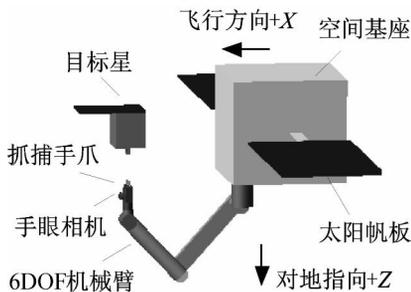


图1 典型的空机器人系统

### 2.2 空间机器人半物理仿真系统

#### 2.2.1 系统组成

空间机器人视觉伺服控制半物理仿真系统如图2所示,由两台PC机(视觉伺服控制仿真计算机及图像生成计算机)、一台投影仪、一个真实相机以及投影屏组成.各部分之间的信息流如图3所示.其中:视觉伺服控制仿真计算机主要完成图像采集与处理、视觉伺服控制算法、动力学模型计算、全局图像实时显示等功能;图像生成计算机则根据空间机器人系统动力学模型计算结果和手眼相机参数,生成虚拟环境中的手眼相机所观察到的图像.该图像经过投影仪投到屏幕上,再利用真实相机对屏幕上的目标进行成像,然后由视觉伺服控制仿真计算机对相机图像进行采集、处理,并对空间机器人进行路径规划、控制,产生驱动力矩,作用于动力学模型,进而输出整个系统下一个时刻的状态.

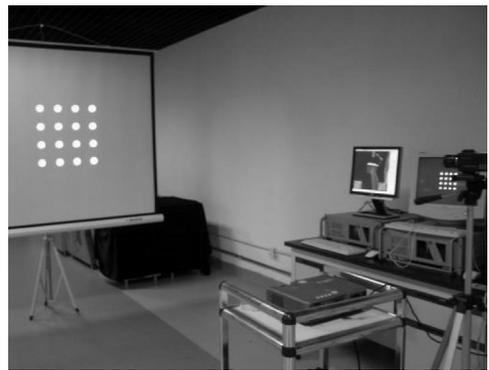


图2 半物理仿真系统实物图(相机标定时刻)

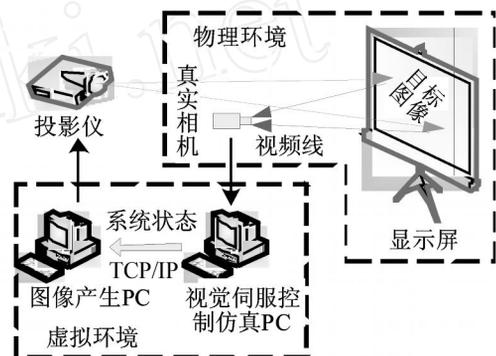


图3 空间机器人视觉伺服控制半物理仿真系统硬件组成

视觉伺服控制计算机与图像生成计算机构成空间机器人的数学仿真环境——“虚拟环境”,而真实相机与投影出来的图像构成“物理环境”,连接虚拟环境与物理环境的桥梁为投影仪.

#### 2.2.2 真实相机

真实相机采用敏通公司的MTV-23X11HC 1/3英寸的黑白CCD短机身型摄像机,CCD总像素为798(水平)×584(垂直).

#### 2.2.3 投影设备

投影仪采用东芝TDP-T90,其最大特点是采用了DLP显示技术,标准分辨率为1024×768(dpi).

#### 2.2.4 图像生成计算机

图像生成计算机的功能主要是生成虚拟相机所观察到的图像,即根据空间机器人系统的几何参数及来自视觉伺服控制仿真计算机的数据,建立系统的3D模型,再采用透视投影的方式,将虚拟相机所观察到的图像(设定观察点于虚拟相机的光心坐标系上)显示到计算机屏幕.建模软件采用OpenGL,透视投影函数为<sup>[15]</sup>

```
void gluPerspective ( GLdouble fovy,
GLdouble aspect, GLdouble zNear, GLdouble zFar).
```

上述函数创建了一个对称透视视景物,参数fovy为视野在X-Z平面的角度,aspect是投影平面宽度与高度的比率;zNear和zFar分别是近、远裁

剪面到视点的距离。

### 2.2.5 视觉伺服控制仿真计算机

视觉伺服控制仿真计算机由一台工控机实现，具有如下功能：真实相机图像的实时采集；图像处理与相对位姿计算；空间机器人路径规划与控制；空间机器人动力学模型计算等。

### 3 半物理仿真实验系统的实现原理

从以上分析可知，半物理仿真实验系统是通过投影设备将“虚拟环境”与“物理环境”连接在一起，形成包含了“虚拟环境”与“物理环境”的实时闭环。在物理环境中可模拟轨道光照条件和星空背景等，由此检验在该环境下图像处理与特征提取、路径规划、控制等关键算法的有效性和鲁棒性，比全数学仿真更加真实有效（全数学仿真无法真实反映光照条件、星空背景、实际图像采集存在的暗电流噪声等条件下的成像情况）。

另外，要在地面实现空间微重力环境非常复杂且困难，因为需要克服重力环境的影响，还要允许空间机械臂和基座具有足够的自由度和运动空间。因此，采用半物理仿真实验，能在有限的实验室条件下实现关键算法的验证和评估，是一种经济有效且合理可行的方法。

#### 3.1 相机成像模型

线性投影模型（或称针孔模型）是最常用的相机成像模型，具有如下形式：

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{1}{Z_c} \begin{bmatrix} x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{1}{Z_c} \begin{bmatrix} x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} {}^c T_w \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中： ${}^c P = [X_c, Y_c, Z_c]^T$  为空间某点  $P$  在相机坐标系下的位置； ${}^w P = [X_w, Y_w, Z_w]^T$  为该点在世界坐标系中的坐标； $(u, v)$  是以像素为单位的图像坐标； $x, y, u_0, v_0$  为相机内参数；齐次变换矩阵  ${}^c T_w$  为相机的外参数。

#### 3.2 半物理仿真系统的投影等效原理

半物理仿真实验系统的实现原理可通过图 4 进行说明。

设虚拟环境中的 3D 点为  $P$ ，其在虚拟相机坐标系中的坐标为  ${}^v P = [X_v, Y_v, Z_v]^T$ ，在虚拟相机像平面的投影为  ${}^v p = [u_v, v_v]^T$ ，则根据相机模型有

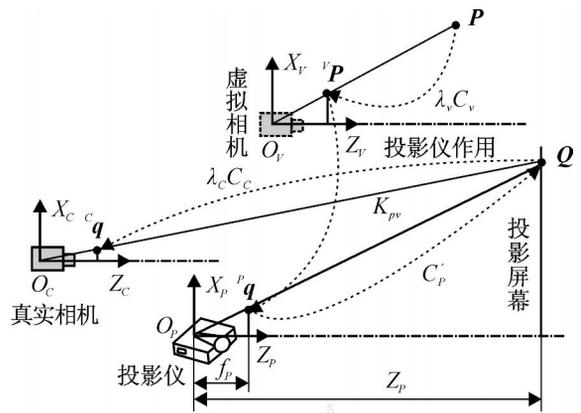


图 4 虚拟环境中 3D 点到真实相机的投影等效过程

$$\begin{bmatrix} u_v \\ v_v \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{1}{Z_v} \begin{bmatrix} v_x & 0 & u_{v0} & 0 \\ 0 & v_y & v_{v0} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_v \\ Y_v \\ Z_v \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中  $v_x, v_y, u_{v0}, v_{v0}$  为虚拟相机的内参数。

投影仪将虚拟相机的图像（显示在电脑屏幕上的图像）投影到幕布上，因此，投影仪像平面上的点与虚拟相机像平面上对应点之间有固定关系，即

$$\begin{bmatrix} u_p \\ v_p \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_u u_v \\ k_v v_v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_u & 0 & 0 \\ 0 & k_v & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_v \\ v_v \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中：投影仪像平面上的点  ${}^p q = [u_p, v_p]^T$  对应于虚拟相机像平面上的点  ${}^v p = [u_v, v_v]^T$ ； $k_u$  和  $k_v$  为比例常数，由虚拟相机的分辨率与投影仪分辨率之比决定。若虚拟相机分辨率为  $U_v \times V_v$ ，投影仪分辨率为  $U_p \times V_p$ ，则

$$\begin{cases} k_u = U_p / U_v, \\ k_v = V_p / V_v. \end{cases} \quad (4)$$

对于投影仪，其成像平面上点的  $xy$  坐标与  $uv$  坐标之间的关系为  $(d_{px} = 1/p_x, d_{py} = 1/p_y)$

$$\begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{px} & 0 & -u_{p0} d_{px} \\ 0 & d_{py} & -v_{p0} d_{py} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_p \\ v_p \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

投影到幕布上之后，等价于将  $x_p, y_p$  放大，则有

$$\begin{bmatrix} X_p \\ Y_p \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_p \\ f_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_p x_p \\ m_p y_p \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

经过投影仪之后，虚拟环境中的 3D 点  $P$  投影到了物理环境中的 3D 点  $Q$ 。 $Q$  点在投影仪坐标系和真实相机坐标系中的坐标分别为  ${}^p Q = [X_p, Y_p, Z_p]^T$  和  ${}^c Q = [X_c, Y_c, Z_c]^T$ 。

根据式(2), (3), (5), (6) 可得

$$\begin{bmatrix} X_P \\ Y_P \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{1}{Z_V} \begin{bmatrix} k_u m_p d_{px} v_x & 0 & k_u d_{px} u_{V0} - u_{p0} d_{px} & 0 \\ 0 & k_v m_p d_{py} v_y & k_v d_{py} v_{V0} - v_{p0} d_{py} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_V \\ Y_V \\ Z_V \\ 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

进一步, 有

$$\begin{bmatrix} X_P \\ Y_P \\ Z_P \\ 1 \end{bmatrix} = {}^P T_V \begin{bmatrix} X_V \\ Y_V \\ Z_V \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

其中

$${}^P T_V = \frac{1}{Z_V} \begin{bmatrix} k_u m_p d_{px} v_x & 0 & k_u d_{px} u_{V0} - u_{p0} d_{px} & 0 \\ 0 & k_v m_p d_{py} v_y & k_v d_{py} v_{V0} - v_{p0} d_{py} & 0 \\ 0 & 0 & Z_p & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

式(8)建立了虚拟环境中3D点的坐标与物理环境中3D点的坐标之间的关系. 矩阵 ${}^P T_V$ 为常数矩阵(在投影仪、投影幕布以及虚拟相机参数固定的情况下), 是虚拟相机坐标系到投影仪坐标系的变换矩阵. 值得一提的是, 虽然 ${}^P T_V$ 为 $4 \times 4$ 的矩阵, 但并不是真正意义上的齐次变换矩阵(从该矩阵的前3行表达式即可得知).

另一方面, 在物理环境中, 有

$$\begin{bmatrix} X_C \\ Y_C \\ Z_C \\ 1 \end{bmatrix} = {}^C T_P \begin{bmatrix} X_P \\ Y_P \\ Z_P \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

其中:  ${}^C Q = [X_C, Y_C, Z_C]^T$ 为 $Q$ 点在投影仪坐标系中的坐标;  ${}^C T_P$ 为真实相机坐标系到投影仪坐标系的齐次变换矩阵, 可表示为

$${}^C T_P = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & t_x \\ n_y & o_y & a_y & t_y \\ n_z & o_z & a_z & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (11)$$

所以

$$\begin{bmatrix} X_C \\ Y_C \\ Z_C \\ 1 \end{bmatrix} = {}^C T_P \begin{bmatrix} X_P \\ Y_P \\ Z_P \\ 1 \end{bmatrix} = {}^C T_P {}^P T_V \begin{bmatrix} X_V \\ Y_V \\ Z_V \\ 1 \end{bmatrix} = {}^C T_V \begin{bmatrix} X_V \\ Y_V \\ Z_V \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (12)$$

式(12)为虚拟相机中3D点到真实相机中3D点的坐标变换方程. 相应的变换矩阵为

$${}^C T_V = {}^C T_P {}^P T_V = \frac{1}{Z_V} \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & t_x \\ n_y & o_y & a_y & t_y \\ n_z & o_z & a_z & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_u m_p d_{px} v_x & 0 & k_u d_{px} u_{V0} - u_{p0} d_{px} & 0 \\ 0 & k_v m_p d_{py} v_y & k_v d_{py} v_{V0} - v_{p0} d_{py} & 0 \\ 0 & 0 & Z_p & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} = \frac{1}{Z_V} \begin{bmatrix} {}^C C_V & 0 \\ [0, 0, 1] & 0 \end{bmatrix}, \quad (13)$$

其中 ${}^C C_V$ 为 $3 \times 3$ 的分块矩阵. 从式(13)可知, 真实相机到虚拟相机的坐标变换矩阵并不是齐次变换矩阵, 这是由于投影仪的作用只能将2D平面信息进行放大, 而深度信息则与投影仪离投影幕布的距离有关. 另一方面, 对于真实相机, 有

$$Z_C \begin{bmatrix} u_c \\ v_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_x & 0 & u_{c0} & 0 \\ 0 & c_y & v_{c0} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_C \\ Y_C \\ Z_C \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (14)$$

其中 $c_x, c_y, u_{c0}, v_{c0}$ 为真实相机的内参数.  ${}^C q = [u_c, v_c]^T$ 为投影幕布上的3D点 $Q$ 在真实相机像平面的坐标. 根据式(13)和(14), 有

$$Z_C Z_V \begin{bmatrix} u_c \\ v_c \\ 1 \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} X_V \\ Y_V \\ Z_V \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (15)$$

其中

$$M = \begin{bmatrix} c_x & 0 & u_{c0} & 0 \\ 0 & c_y & v_{c0} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^C C_V & 0 \\ [0, 0, 1] & 0 \end{bmatrix}. \quad (16)$$

式(15)两边同时除以一个常数, 可得等效的相机投影模型为

$$\begin{bmatrix} u_c \\ v_c \\ 1 \end{bmatrix} = M_{\text{equ}} \begin{bmatrix} X_V \\ Y_V \\ Z_V \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (17)$$

式(17)极其重要, 它建立了虚拟环境中的3D

点到真实相机像平面的投影关系(等效过程如图 4 所示).由式(17)可知,通过对投影图像进行采集和处理,可以对虚拟环境的点进行 3D 重构,从而计算虚拟环境中目标卫星相对于手爪的位置和姿态,这便是本文所采用的半物理仿真系统的理论依据.式(17)称为等效投影模型.

### 3.3 等效投影模型的标定

如上所述,式(17)建立了从虚拟环境的 3D 空间到物理环境的 2D 空间的等效投影关系,是本文所采用的半物理仿真系统的理论依据.为了利用真实相机实现对虚拟环境的 3D 重构,需要标定等效投影矩阵  $M_{equ}$ .理论上,目前用于实际相机标定的一般方法均可采用<sup>[16]</sup>,但由于半物理仿真系统的特殊性,可进一步简化标定过程.

由式(16)可知,矩阵  $M$  具有如下形式:

$$M = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & 0 \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & 0 \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & 0 \end{bmatrix}. \quad (18)$$

由于  $M$  最后一列为 0,式(15)可简化为

$$Z_c Z_v \begin{bmatrix} u_c \\ v_c \\ 1 \end{bmatrix} = \tilde{M} \begin{bmatrix} X_v \\ Y_v \\ Z_v \end{bmatrix}, \quad (19)$$

其中

$$\tilde{M} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix}. \quad (20)$$

式(17)两侧同时除以常数  $m_{11}$ ,有

$$\begin{bmatrix} u_c \\ v_c \\ 1 \end{bmatrix} = \tilde{M} = \begin{bmatrix} X_v \\ Y_v \\ Z_v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_v \\ Y_v \\ Z_v \end{bmatrix}. \quad (21)$$

其中

$$= \frac{Z_c Z_v}{m_{11}}, \quad m_{i,j} = \frac{m_{i,j}}{m_{11}}. \quad (22)$$

式(21)是与(17)等价的等效投影模型,且表达式比(17)更简洁,需要标定的参数也从  $M_{equ}$  的 11 个转换成  $\tilde{M}$  的 8 个.

对于多个点的情况(假设有  $N$  个点),有

$$\begin{cases} i u_i = X_{v_i} + m_{12} Y_{v_i} + m_{13} Z_{v_i}, \\ i v_i = m_{21} X_{v_i} + m_{22} Y_{v_i} + m_{23} Z_{v_i}, \\ i = m_{31} X_{v_i} + m_{32} Y_{v_i} + m_{33} Z_{v_i}, \\ i = 1, 2, \dots, N. \end{cases} \quad (23)$$

其中  $[X_{v_i}, Y_{v_i}, Z_{v_i}]^T$  和  $[u_i, v_i]^T$  分别为虚拟环境中的第  $i$  个点  $P_i$  的 3D 坐标,及其在真实相机中的图像坐标.

式(23)中的第 1 式、第 2 式分别除以第 3 式后,可得到关于  $m_{ij}$  的方程组

$$\begin{cases} (m_{31} X_{v_i} + m_{32} Y_{v_i} + m_{33} Z_{v_i}) u_i = \\ X_{v_i} + m_{12} Y_{v_i} + m_{13} Z_{v_i}, \\ (m_{31} X_{v_i} + m_{32} Y_{v_i} + m_{33} Z_{v_i}) v_i = \\ m_{21} X_{v_i} + m_{22} Y_{v_i} + m_{23} Z_{v_i}. \end{cases} \quad (24)$$

进一步化简,有

$$\begin{cases} - Y_{v_i} m_{12} - Z_{v_i} m_{13} + u_i X_{v_i} m_{31} + \\ u_i Y_{v_i} m_{32} + u_i Z_{v_i} m_{33} = X_{v_i}, \\ - X_{v_i} m_{21} - Y_{v_i} m_{22} - Z_{v_i} m_{23} + \\ v_i X_{v_i} m_{31} + v_i Y_{v_i} m_{32} + v_i Z_{v_i} m_{33} = 0. \end{cases} \quad (25)$$

上式表示,如果标定块上有  $N$  个已知点,并已知它们在虚拟环境中的 3D 坐标  $(X_{v_i}, Y_{v_i}, Z_{v_i})$  和在实际相机中的图像坐标  $(u_i, v_i)$ ,则有  $2N$  个关于  $\tilde{M}$  矩阵元素的线性方程,用矩阵形式表示为

$$K m = U. \quad (26)$$

其中

$$K = \begin{bmatrix} - Y_{v_1} & - Z_{v_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & - X_{v_1} & - Y_{v_1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ - Y_{v_i} & - Z_{v_i} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & - X_{v_i} & - Y_{v_i} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ - Y_{v_N} & - Z_{v_N} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & - X_{v_N} & - Y_{v_N} \\ 0 & u_1 X_{v_1} & u_1 Y_{v_1} & u_1 Z_{v_1} \\ - Z_{v_1} & v_1 X_{v_1} & v_1 Y_{v_1} & v_1 Z_{v_1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & u_i X_{v_i} & u_i Y_{v_i} & u_i Z_{v_i} \\ - Z_{v_i} & v_i X_{v_i} & v_i Y_{v_i} & v_i Z_{v_i} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & u_N X_{v_N} & u_N Y_{v_N} & u_N Z_{v_N} \\ - Z_{v_N} & v_N X_{v_N} & v_N Y_{v_N} & v_N Z_{v_N} \end{bmatrix}, \quad (27)$$

$$m = [m_{12}, m_{13}, m_{21}, m_{22}, m_{23}, m_{31}, m_{32}, m_{33}]^T, \quad (28)$$

$$U = [X_{v_1}, 0, \dots, X_{v_i}, 0, \dots, X_{v_N}, 0]^T. \quad (29)$$

方程组(26)共有  $2N$  个方程,8 个未知数; $K$  和  $U$  为已知向量.当  $2N > 8$  时,可用最小二乘法求出上述线性方程组的解为

$$m = (K^T K)^{-1} K^T U. \quad (30)$$

当  $m$  求解出后,便可得到式(21)的矩阵  $\tilde{M}$ ,于是完成了等效投影模型的标定.

## 4 仿真实验研究

利用图2所示的半物理仿真实验系统,进行了

表1 空间机器人系统的质量特性

	Sat	$B_1$	$B_2$	$B_3$	$B_4$	$B_5$	$B_6$		
							Pre-Capture	Post-Capture	
Mass/ kg	400	6	5	5	4	2	2	30	
$a_i$ / mm	598.10	0	415	0	0	0	0	76.1336	
	1.066	0	0	0	71.813	0	0	-40.1672	
	-76.24	57.5	-148.96	57.5	-397.96	-57.5	100	416.21	
$b_i$ / mm	278.90	-57.5	415	-57.5	0	0	0		
	-10.59	0	0	0	-14.31	-57.5	0		
	737.73	0	148.96	0	-244.54	0	177		
$I_{ij}$ / kg·m <sup>2</sup>	$I_{xx}$	200	0.15	0.0926	0.105	0.2498	0.033	0.0515	0.8714
	$I_{yy}$	98	0.15	0.9053	0.105	0.2498	0.017	0.0515	0.9649
	$I_{zz}$	190	0.075	0.8451	0.029	0.0196	0.026	0.0219	0.4684
	$I_{xy}$	0	0	0	0	0	0	0	-0.0002
	$I_{xz}$	0	0	0.1315	0	0	0	0	-0.0090
	$I_{yz}$	0	0	0	0	0	0	0	0.0033

大量的实验研究.限于篇幅,在此仅给出部分结果.

#### 4.1 等效投影模型的标定结果

首先对等效相机的投影矩阵进行标定.通过计算机生成3幅具有不同深度信息的虚拟相机图像(两幅用于标定,一幅用于对标定精度进行评估),图像中每个特征点在虚拟相机坐标系中的3D坐标已知.标定结果如下:

$$\tilde{M} = \begin{bmatrix} 1 & 0.01289 & 0.4624 \\ -0.0344 & 0.9937 & 0.4832 \\ -3.7465 \times 10^{-5} & -1.1804 \times 10^{-5} & 1.7505 \times 10^{-3} \end{bmatrix}. \quad (31)$$

用第3幅图像对上面的标定矩阵进行验证.即用标定后的矩阵 $\tilde{M}$ 乘以各特征点的3D坐标得到各点的名义2D坐标,再与实际相机所采集图像的特征提取结果进行对比,得到最大误差为0.4075个像素,可见标定结果令人满意.

#### 4.2 空间机器人目标捕获的半物理仿真

考虑图1所示的空间机器人系统,其质量特性见表1(各连杆坐标系及变量含义参见文献[8]).

初始时刻,目标相对于机械臂末端的位置 $P_0$ ,姿态 $\alpha_0$ 及机械臂的关节角 $\theta_0$ 分别为

$$P_0 = [39.23 \text{ mm}, 42.22 \text{ mm}, 300 \text{ mm}]^T, \quad (32)$$

$$\alpha_0 = [30^\circ, 0^\circ, 0^\circ]^T, \quad (33)$$

$$\theta_0 = [0^\circ, -149.12^\circ, 87.31^\circ, 0^\circ, 151.81^\circ, 0.00^\circ]^T. \quad (34)$$

目标运动的线速度和角速度分别为

$$\begin{cases} v_t = [5 \text{ mm/s}, 5 \text{ mm/s}, 5 \text{ mm/s}]^T, \\ \omega_t = [0.59 \text{ s}, 0.59 \text{ s}, 0.59 \text{ s}]^T. \end{cases} \quad (35)$$

采用基于位置的自主路径规划<sup>[17]</sup>方法对目标进行捕获,仿真实验结果如图5,图6所示.图5为捕获过程中目标相对于机械臂末端位姿的变化曲线,

当趋近于0时,表明目标进入机械手的捕获范围.图6为3D显示的结果(捕获时刻).

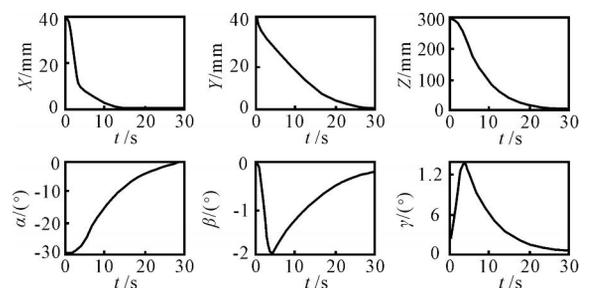


图5 目标捕获过程中的相对位姿变化

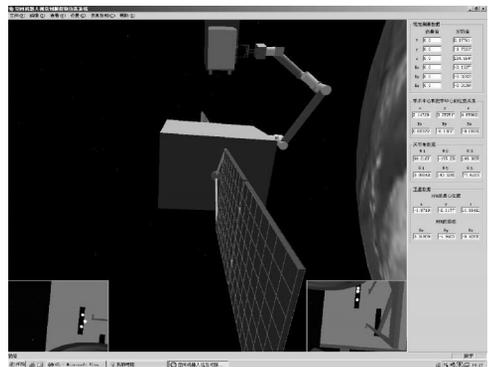


图6 空间机器人成功抓捕目标

## 5 结论

本文建立了空间机器人视觉伺服控制的半物理仿真实验系统,其基本依据为“投影等效”,即从“虚拟环境”中的3D点到真实相机像平面投影的等效变换.该等效投影模型的变换矩阵可通过文中的方法进行标定.采用半物理仿真实验,能在有限的实验室条件下实现关键算法的验证和评估,是一种经济有效且合理可行的方法,特别适合于一般高校、实验室及研究所使用.

本文方法除了可用于空间机器人视觉伺服控制的半物理仿真实验外,还可用于其他视觉测量相关

算法的半物理仿真实验,如航天器交会对接中的基于 RVD 相机的 GNC(导航、制导与控制)算法、固定/移动机器人的视觉伺服控制方法以及立体视觉测量算法等.只要标定出虚拟环境到真实相机的等效投影矩阵即可.

需要指出的是,虽然在推导过程中没有考虑成像设备(相机、投影仪)的镜头畸变,但将畸变代入相关方程后,便可容易得到相应的等效投影模型及标定方程.

### 参考文献(References)

- [1] Hirzinger G, Landzettel K, Brunner B, et al. DLR s robotics technologies for on-orbit servicing [J]. *Advanced Robotics*, 2004, 18(2): 139-174.
- [2] Landzettel K, Preusche C, Albuschaffer A, et al. Robotic on-orbit servicing — DLR s experience and perspective [C]. *IEEE/RSJ Int Conf on Intelligent Robots and Systems*. Beijing, 2006: 4587-4594.
- [3] Liang B, Li C, Xue L J, et al. A Chinese small intelligent space robotic system for on-orbit servicing [C]. *IEEE/RSJ Int Conf on Intelligent Robots and Systems*. Beijing, 2006: 4603-4607.
- [4] Yoshida K. Engineering test satellite VII flight experiments for space robot dynamics and control: Theories on laboratory test beds ten years ago, now in orbit[J]. *Int J of Robotics Research*, 2003, 22(5): 321-335.
- [5] Wilson J R. Satellite hopes ride on ORBITAL EXPRESS[J]. *Aerospace America*, 2007, 45(2): 30-35.
- [6] Inaba N, Oda M. Visual servoing of space robot for autonomous satellite capture [J]. *Trans of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences*, 2003, 153(46): 173-179.
- [7] Nagamatsu H, Kubota T, Nakatani I. Capture strategy for retrieval of a tumbling satellite by a space robotic manipulator [C]. *IEEE Conf on Robotic and Automation*. Minneapolis, 1996: 70-75.
- [8] 徐文福, 刘宇, 强文义, 等. 自由漂浮空间机器人的笛卡尔空间连续路径规划[J]. *控制与决策*, 2008, 23(3): 278-282.  
(Xu W F, Liu Y, Qiang W Y, et al. Study of cartesian continuous-path planning for free-floating space robot [J]. *Control and Decision*, 2008, 23(3): 278-282.)
- [9] 刘良栋. 卫星控制系统仿真技术[M]. 北京: 宇航出版社, 2003.  
(Liu L D. The simulation technology of satellite control system[M]. Beijing: Astronautics Publisher, 2003.)
- [10] 常同立, 丛大成, 叶正茂, 等. 空间对接动力学半物理仿真基本问题及解决方案研究[J]. *宇航学报*, 2008, 29(1): 53-58.  
(Chang T L, Cong D C, Ye Z M, et al. Research on fundamental problems and the solutions of HIL simulation for on-orbit docking dynamics [J]. *J of Astronautics*, 2008, 29(1): 53-58.)
- [11] 张正忠, 郝颖明, 董再励, 等. 基于 OpenGL 的交会对接仿真系统[J]. *吉林大学学报*, 2003, 21(5): 34-37.  
(Zhang Z Z, Hao Y M, Dong Z L, et al. Design and application of special carrier pose measurement semi-physical simulation system based on OpenGL [J]. *J of Jilin University*, 2003, 21(5): 34-37.)
- [12] Li C, Liang B, Xu W F. Autonomous trajectory planning of free-floating robot for capturing space target[C]. *IEEE/RSJ Int Conf on Intelligent Robots and Systems*. Beijing, 2006: 1008-1013.
- [13] 张瀚, 徐科军, 赵明, 等. 机器人视觉伺服控制半物理仿真系统的研制[J]. *系统仿真学报*, 2008, 20(1): 68-72.  
(Zhang H, Xu K J, Zhao M, et al. Development of semi-physical simulation system for vision servo control of robot[J]. *J of System Simulation*, 2008, 20(1): 68-72.)
- [14] Xu W F, Liu Y, Liang B, et al. Autonomous path planning and experiment study of free-floating space robot for target capturing [J]. *J of Intelligent and Robotic Systems*, 2008, 51(3): 303-331.
- [15] OpenGL Architecture Review Board, Shreiner D, Woo M, et al. OpenGL (R) programming guide: The official guide to learning openGL (R) [M]. 5th ed. New Jersey: Addison-Wesley Professional, 2005.
- [16] 韩立伟, 徐德, 谭民. 机器人无标定视觉中摄像机特性的逼近[J]. *控制与决策*, 2007, 22(1): 1-6.  
(Han L W, Xu D, Tan M. Approaching methods for camera characteristics in uncalibrated visual control system for robots[J]. *Control and Decision*, 2007, 22(1): 1-6.)
- [17] 徐文福. 空间机器人目标捕获的路径规划方法与实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.  
(Xu W F. Path planning and experiment study of space robot for target capturing [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007.)