

基于Open Inventor的六自由度并联机器人 虚拟同步运动研究*

王海涛¹, 郝矿荣^{1,2*}, 丁永生^{1,2}, 郭崇滨¹, 窦易文¹

(1. 东华大学 信息科学与技术学院, 上海 201620;

2. 数字化纺织服装技术教育部工程研究中心, 上海 201620)

摘要: 针对六自由度大载荷并联机器人的工作监控问题,以Open Inventor为开发平台,对并联机器人虚拟同步运动进行了研究。首先,用Pro/E进行了零部件建模,并导入Open Inventor开发环境,用VRML虚拟现实语言描述了各零部件的连接关系,搭建了虚拟机器人;然后,构建了由立体视觉和位置正解算法组成的复合检测系统,用以实时检测实体并联机器人的位姿;最后,将位姿信息传送到虚拟机器人,由Open Inventor借助其场景渲染能力,利用内置的引擎工具完成了虚拟机器人的同步运动。试验研究结果表明,该机器人虚拟运动逼真流畅,位姿检测精度能控制在0.05 mm内,位姿检测与计算带来的虚拟运动延迟能够控制在0.5 s内;系统不仅能够满足并联机器人一般监控的需要,还提供了一种可供参考的精确位姿检测方式。

关键词: Open Inventor; 并联机器人; 位姿复合检测; 虚拟同步运动

中图分类号: TP242; TH39 **文献标志码:** A

文章编号: 1001-4551(2012)06-0627-05

Research on virtual synchronous motion of 6-DOF parallel robot based on Open Inventor

WANG Hai-tao¹, HAO Kuang-rong^{1,2}, DING Yong-sheng^{1,2}, GUO Chong-bin¹, DOU Yi-wen¹

(1. College of Information Sciences and Technology, Donghua University, Shanghai 201620, China;

2. Engineering Research Center of Digitized Textile & Fashion Technology, Ministry of Education,
Shanghai 201620, China)

Abstract: Aiming at the monitoring of 6-DOF large load parallel robot, a virtual synchronous motion system of parallel robot was studied by using Open Inventor as developing platform. Firstly, accessory models were created using Pro/E, and imported into Open Inventor. The relation of accessory models was described through VRML language to build virtual robot. Then, composite measurement algorithm based on stereo vision and positional solution was designed to detect the position and orientation of parallel robot in real time. Finally, data of positioning and orientation was transmitted to virtual robot, the virtual synchronous motion was completed by Open Inventor with its effective rendering function and engine component. The experiment result shows that the virtual synchronous motion is fluent and realistic, the most error of position and orientation measured is less than 0.05 mm, the delay which caused by measurement and calculation of position and orientation is less than 0.5 s. The system is not only available to general monitoring of parallel, but also offers an effective method for high-precision measurement of position and orientation of parallel robot.

Key words: Open Inventor; parallel robot; composite measurement of position; virtual synchronous motion

收稿日期: 2011-12-23

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(61134009); 国家自然科学基金资助项目(60975059, 60775052); 国家ITER计划国内配套研究资助项目(2010GB108004); 教育部高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20090075110002); 上海市优秀学术带头人计划资助项目(11XD1400100); 上海市科学技术委员会重点基础研究资助项目(10JC1400200, 09JC1400900); 上海市科学技术委员会技术标准专项资助项目(10DZ0506500)

作者简介: 王海涛(1979-), 男, 山东潍坊人, 主要从事机器人控制、嵌入式系统方面的研究。E-mail: whaitao11@sohu.com

通信联系人: 郝矿荣, 女, 博士, 教授, 博士生导师。E-mail: krhao@dhu.edu.cn

0 引 言

六自由度大载荷并联机器人已经在空间对接机构、大型运动模拟器等领域获得应用。大载荷并联机器人工作的场合往往用肉眼不易直接观察,如太空、存在高速运动的运动模拟室等,需要它们的工作状态进行监控^[1]。如果能开发一套并联机器人的虚拟同步运动平台,会方便并联机器人的监控和运行操作。并联机器人在结构形式、运动学、碰撞检测、标定、控制等方面,仍有一些理论问题和关键技术尚未解决^[2],虚拟同步运动平台也可以用于上述领域,使得数学抽象变得直观,便于问题的分析和解决。

Open Inventor(以下简称 OIV)是一个应用广泛的面向对象和交互式三维图形软件开发包。本研究在 VC++6.0 中嵌入 SIM 公司的 Coin3D(OIV 开发包的一种),从而搭建起软件开发环境。

实现虚拟机器人同步运动的关键是实现实体机器人的位姿的精确动态检测。六自由度并联机器人的动平台有6个自由度,现有的激光系统、摄像机系统、超声波系统、经纬仪等检测方式存在灵活性、精度等方面的不足^[3]。

本研究用立体视觉和位置正解方法构建一个复合检测系统,以实现位姿的精确动态检测。将复合检测算法嵌入 OIV 的引擎工具,就可以由引擎驱动虚拟机器人的同步运动。该检测方法成本低,与普通的 CCD 检测方法价格相当,但是精度很高,可以达到 0.05 mm。本研究提出的方法已经在 RBT-6S02P 型六自由度并联机器人的虚拟同步运动中得到验证。

1 系统总体构架

并联机器人虚拟同步运动系统由:虚拟机器人数据库模块、场景渲染与控制模块、机器人位姿计算模块、动平台检测图像处理模块、时钟同步模块构成。5个模块的关系,也即运动仿真系统结构如图1所示。

动平台检测图像处理模块利用立体视觉检测方法计算并输出动平台的粗略位姿信息。动平台位姿计算引擎和支链位姿计算引擎利用数值算法,结合支链长度传感器测得的支链长度信息和动平台粗略位姿信息,在仿真步长内计算出动平台和各个支链的精确位姿。虚拟机器人数据库模块存储机器人模型的结构信息。OIV 结合机器人的精确位姿信息,对场景进行渲染和控制,从而准确模拟了并联机器人的运动状态。时钟同步模块提供时间基准。

在实现方式上,本研究采用基于以太网的分布式结构,不同的模块在不同的计算机上实现。这既便于

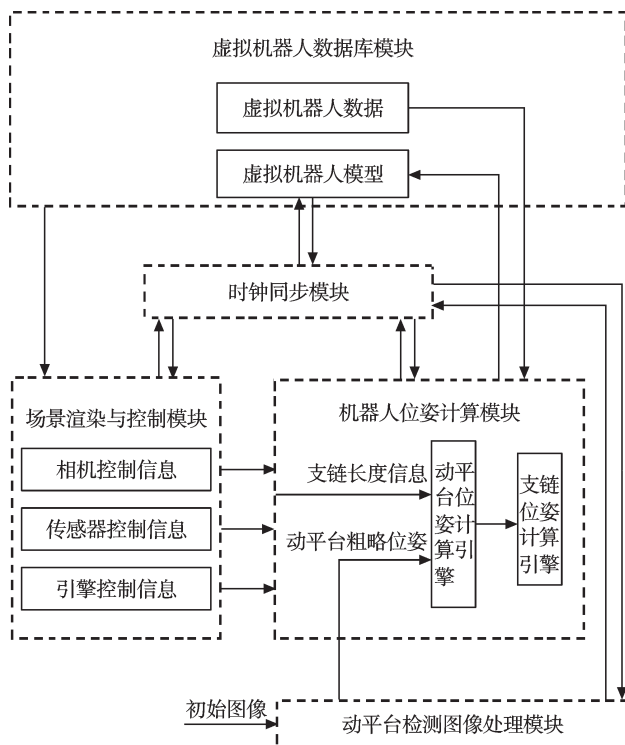


图1 并联机器人同步运动仿真系统结构图

实现远程遥控等操作,也有助于提高系统处理能力,增强实时性。该系统的时钟同步模块采用概率性时钟同步算法计算每个模块的时钟修正值^[4],用以保证每个模块逻辑时钟与时间基准的偏差在误差范围内。

2 虚拟机器人的搭建

对于机器人虚拟同步运动系统,可以选用的三维建模方式有很多,本研究选用具有 VRML 输出接口的三维造型软件 Pro/E 进行零部件建模这种方法效率高,容易掌握,可以建构复杂尺寸造型^[5]。

本研究根据苏州博实公司的 RBT-6S02P 型并联机器人的实际尺寸,忽略无关紧要的细节,用 Pro/E 分别构造出各个零部件的三维模型。零部件模型建好后,即可导出并保存为 WRL 格式的文件,该文件保存了零部件模型的数据。然后用 VRML 语言进行文件重组,描述各部件的连接关系^[6]。对 RBT-6S02P 型并联机器人,本研究按照六自由度并联机器人的经典 Stewart 平台结构,组织了8个分总成部件(1个动平台、1个静平台、6个支链)。

OIV 利用相应函数将上述各分总成部件文件导入虚拟机器人数据库模块,构成场景节点。节点组织结构是 OIV 进行实景渲染与控制的基础。

仿真系统的场景节点结构图如图2所示。场景节点全部建立在一个根节点 root 下面,主要包括机器人各组成部分的实体节点及运动描述节点(transform),还包括相机、灯光等属性节点^[7]。

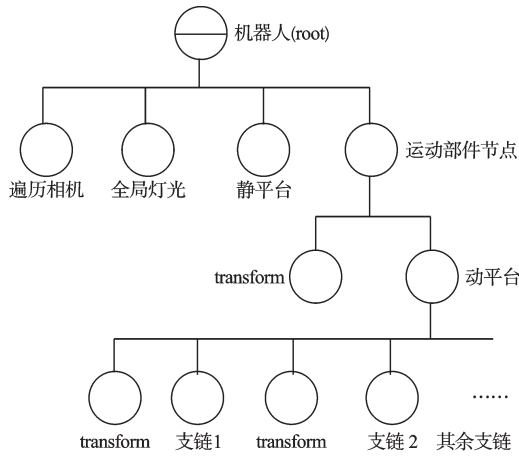


图2 场景节点组织结构图

3 基于立体视觉与位置正解的动平台位姿复合检测算法

虚拟运动系统需要能够实时采集动平台位姿信息以完成运动实时显示功能。动平台粗略位姿由动平台检测图像处理模块用基于立体视觉的动平台位姿检测算法获得,检测精度在2 mm左右^[8],在此不多赘述。同时,本研究在支链上安装相应传感器,以获得支链长度数据。机器人位姿计算模块根据动平台初始位姿和支链长度数据,按照下述过程计算出动平台和各个支链的精确位姿信息。

BT-6S02P型并联机器人的结构可以按照Stewart模型进行分析,其结构如图3所示。

如图3所示,本研究在静平台上建立坐标系

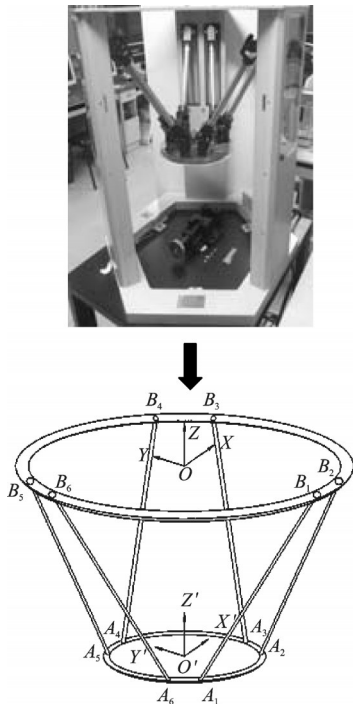


图3 RBT-6S02P并联机器人的Stewart平台结构

$O-XYZ$,其中, OX 垂直 B_2B_3 边, OZ 垂直静平台。在动平台上建立坐标系 $O'-X'Y'Z'$,其中, $O'X'$ 垂直 A_2A_3 边, $O'Z'$ 垂直动平台。动平台铰接点 $A_1\sim A_6$ 在坐标系 $O-XYZ$ 中的坐标用 $A_i(i=1,2,\dots,6)$ 表示;同样,静平台铰接点 $B_1\sim B_6$ 在坐标系 $O-XYZ$ 中的坐标为 B_i ;动平台 $A_1\sim A_6$ 铰接点在坐标系 $O'-X'Y'Z'$ 中的坐标为 C_i 。其中, A_i 与 B_i 为绝对坐标, C_i 为相对坐标。 A_i 、 B_i 、 C_i 的具体值如下:

$$\begin{cases} A_i = (x_{A_i} & y_{A_i} & z_{A_i})^T \\ B_i = (x_{B_i} & y_{B_i} & z_{B_i})^T \\ C_i = (x_{C_i} & y_{C_i} & z_{C_i})^T \end{cases} \quad (1)$$

假设某时刻,动平台图像处理模块输出的动平台初始粗略位姿参数为 $(x_p, y_p, z_p, \alpha, \beta, \gamma)$,其中, (x_p, y_p, z_p) 为动平台坐标原点 O' 在坐标系 $O-XYZ$ 中的坐标, (α, β, γ) 为动平台绕 OX , OY , OZ 轴的旋转角度。由于动平台为刚体,由 $(x_p, y_p, z_p, \alpha, \beta, \gamma)$,很容易求得 C_i 。令 A'_i 和 C'_i 是 A_i 、 C_i 的齐次坐标,则:

$$\begin{cases} A'_i = (x_{A_i} & y_{A_i} & z_{A_i} & 1)^T \\ C'_i = (x_{C_i} & y_{C_i} & z_{C_i} & 1)^T \end{cases} \quad (2)$$

且:

$$A'_i = R \cdot C'_i \quad (3)$$

其中:

$$R = \begin{bmatrix} \cos \alpha \cos \beta & -\sin \alpha \cos \beta & \sin \beta & x_p \\ \sin \alpha \cos \gamma + \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma & \cos \alpha \cos \gamma - \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma & -\cos \beta \sin \gamma & y_p \\ \sin \alpha \sin \gamma - \cos \alpha \sin \beta \cos \gamma & \cos \alpha \sin \gamma + \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma & \cos \beta \cos \gamma & z_p \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

本研究设6个支链的粗略长度为 $s_i(i=1,2,\dots,6)$,则:

$$s_i = \left[(x_{A_i} - x_{B_i})^2 + (y_{A_i} - y_{B_i})^2 + (z_{A_i} - z_{B_i})^2 \right]^{\frac{1}{2}} = f_i(x_p, y_p, z_p, \alpha, \beta, \gamma) \quad (4)$$

利用式(4)可以求得粗略支链长度 s_i 。令 $\dot{s}_i = ds_i/dt$,则 $\dot{s}_i$ 即为支链的伸长速度。

由式(4)得:

$$\begin{aligned} \dot{s}_i &= \frac{\partial f_i}{\partial x_p} \frac{\partial x_p}{\partial t} + \frac{\partial f_i}{\partial y_p} \frac{\partial y_p}{\partial t} + \frac{\partial f_i}{\partial z_p} \frac{\partial z_p}{\partial t} + \frac{\partial f_i}{\partial \alpha} \frac{\partial \alpha}{\partial t} + \frac{\partial f_i}{\partial \beta} \frac{\partial \beta}{\partial t} + \frac{\partial f_i}{\partial \gamma} \frac{\partial \gamma}{\partial t} = \\ &= \frac{\partial f_i}{\partial x_p} v_x + \frac{\partial f_i}{\partial y_p} v_y + \frac{\partial f_i}{\partial z_p} v_z + \frac{\partial f_i}{\partial \alpha} \omega_x + \frac{\partial f_i}{\partial \beta} \omega_y + \frac{\partial f_i}{\partial \gamma} \omega_z \end{aligned} \quad (5)$$

式中: v_x, v_y, v_z —动平台中心点的移动速度; $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ —动平台中心点的角速度。

由文献[9,10],可得:

$$\frac{\partial f_i}{\partial x_p} = \frac{(x_{A_i} - x_{B_i})}{s_i}; \quad \frac{\partial f_i}{\partial y_p} = \frac{(y_{A_i} - y_{B_i})}{s_i}; \quad \frac{\partial f_i}{\partial z_p} = \frac{(z_{A_i} - z_{B_i})}{s_i}$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial f_i}{\partial \alpha} &= \frac{(x_{A_i} - x_{B_i})}{s_i} \frac{\partial R}{\partial \alpha} C_i + \frac{(y_{A_i} - y_{B_i})}{s_i} \frac{\partial R}{\partial \alpha} C_i + \frac{(z_{A_i} - z_{B_i})}{s_i} \frac{\partial R}{\partial \alpha} C_i; \\ \frac{\partial f_i}{\partial \beta} &= \frac{(x_{A_i} - x_{B_i})}{s_i} \frac{\partial R}{\partial \beta} C_i + \frac{(y_{A_i} - y_{B_i})}{s_i} \frac{\partial R}{\partial \beta} C_i + \frac{(z_{A_i} - z_{B_i})}{s_i} \frac{\partial R}{\partial \beta} C_i; \\ \frac{\partial f_i}{\partial \gamma} &= \frac{(x_{A_i} - x_{B_i})}{s_i} \frac{\partial R}{\partial \gamma} C_i + \frac{(y_{A_i} - y_{B_i})}{s_i} \frac{\partial R}{\partial \gamma} C_i + \frac{(z_{A_i} - z_{B_i})}{s_i} \frac{\partial R}{\partial \gamma} C_i.\end{aligned}$$

进一步将 $\dot{s}_i$ 写成如下矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} \dot{s}_1 \\ \dot{s}_2 \\ \dot{s}_3 \\ \dot{s}_4 \\ \dot{s}_5 \\ \dot{s}_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1 & m_1 & n_1 & L_1 & M_1 & N_1 \\ l_2 & m_2 & n_2 & L_2 & M_2 & N_2 \\ l_3 & m_3 & n_3 & L_3 & M_3 & N_3 \\ l_4 & m_4 & n_4 & L_4 & M_4 & N_4 \\ l_5 & m_5 & n_5 & L_5 & M_5 & N_5 \\ l_6 & m_6 & n_6 & L_6 & M_6 & N_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \\ \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中:

$$l_i = \frac{x_{A_i} - x_{B_i}}{s_i}; m_i = \frac{y_{A_i} - y_{B_i}}{s_i}; n_i = \frac{z_{A_i} - z_{B_i}}{s_i};$$

$$L_i = \{l_i \quad m_i \quad n_i \quad 1\} \cdot \left(\frac{\partial R}{\partial \alpha} \right) \cdot C_i;$$

$$M_i = \{l_i \quad m_i \quad n_i \quad 1\} \cdot \left(\frac{\partial R}{\partial \beta} \right) \cdot C_i;$$

$$N_i = \{l_i \quad m_i \quad n_i \quad 1\} \cdot \left(\frac{\partial R}{\partial \gamma} \right) \cdot C_i.$$

假设:此时支链长度传感器测出的支链的真实长度为 $\dot{s}_i$, s_i 与 $\dot{s}_i$ 的差值计为 Δs_i 。

本研究将式(6)两边同时乘以 dt , 则有:

$$\begin{bmatrix} \Delta s_1 \\ \Delta s_2 \\ \Delta s_3 \\ \Delta s_4 \\ \Delta s_5 \\ \Delta s_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1 & m_1 & n_1 & L_1 & M_1 & N_1 \\ l_2 & m_2 & n_2 & L_2 & M_2 & N_2 \\ l_3 & m_3 & n_3 & L_3 & M_3 & N_3 \\ l_4 & m_4 & n_4 & L_4 & M_4 & N_4 \\ l_5 & m_5 & n_5 & L_5 & M_5 & N_5 \\ l_6 & m_6 & n_6 & L_6 & M_6 & N_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \\ \Delta \alpha \\ \Delta \beta \\ \Delta \gamma \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: $(\Delta x \quad \Delta y \quad \Delta z \quad \Delta \alpha \quad \Delta \beta \quad \Delta \gamma)^T$ — 位姿增量, Δs_i — 支链长度差值。

位姿初始粗略值加上位姿增量位姿变化为:

$$(x_p + \Delta x \quad y_p + \Delta y \quad z_p + \Delta z \quad \alpha + \Delta \alpha \quad \beta + \Delta \beta \quad \gamma + \Delta \gamma)$$

本研究迭代以上过程,直到 $\max|\Delta s_i|$ 小于设定的最小允许误差值 ε , 此时认为动平台的精确位姿已经求出。考虑到运动过程的连续性,该解一定是运动过程中的唯一可能解。

这样本研究就在立体视觉检测出的粗略位姿的基础上,得到了动平台精确位姿,动平台位姿确定后,并联机器人的位姿就确定了。

例如,本研究假设实际支链长为: $\dot{s}_1 = 122.35 \text{ mm}$, $\dot{s}_2 = 148.76 \text{ mm}$, $\dot{s}_3 = 105.69 \text{ mm}$, $\dot{s}_4 = 98.30 \text{ mm}$, $\dot{s}_5 = 189.00 \text{ mm}$, $\dot{s}_6 = 155.24 \text{ mm}$; 用立体视觉测得的粗

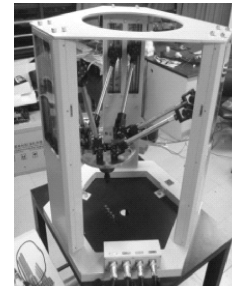
略位姿为: $(54.17 \text{ mm}, -79.96 \text{ mm}, 0.00 \text{ mm}, 5^\circ 29' \text{ min}, 2^\circ 13' \text{ min}, 15^\circ 8' \text{ min})$; 允许误差 $\max|\Delta s_i| = 0.03 \text{ mm}$, 则可求得精确位姿为: $(54.15 \text{ mm}, -79.99 \text{ mm}, 0.01 \text{ mm}, 5^\circ 27' \text{ min}, 2^\circ 13' \text{ min}, 15^\circ 7' \text{ min})$ 。精确位姿计算的精度随着 $\max|\Delta s_i|$ 的允许误差 ε 的减小而增加,要处理好计算精度与系统实时性的平衡。

本研究将位姿检测算法嵌入 OIV 的引擎工具,就可以由引擎工具按照精确位姿的检测结果驱动虚拟机器人的运动。

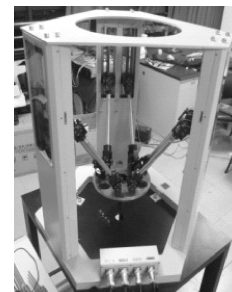
4 试验结果

试验主要设备如下: RBT-6S02P 型并联机器人为试验对象;分辨率为 768×565 的两台 CCD 摄像机对并联机器人同步摄像;立体视觉图像处理、位姿计算与虚拟运动的渲染和控制分别用一台 Pentium 双核 CPU(2.6 G)、4 G 内存的 PC。系统用以太网连接,借助 WinSock 工具完成系统通信,通讯周期为 200 ms,用 VC++ 编程搭建了虚拟同步运动的监控界面。

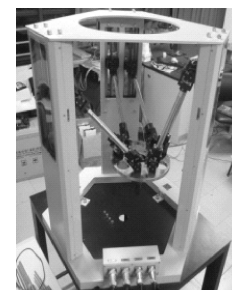
RBT-6S02P 六自由度并联机器人在 a, b, c 3 个时刻的运动位姿图如图 4 所示。相应时刻的虚拟同步运动



(a) a 时刻



(b) b 时刻



(c) c 时刻

图4 实体机器人的运动位姿

截图如图5所示^[9-12]。例如图5(a)是图4(a)的虚拟同步运动截图,在系统采用分布式结构,最大通讯距离为

1 000 m, $\max|\Delta s_i|$ 最大允许值为0.05 mm条件下,对应于 a, b, c 3个时刻的虚拟同步运动的跟踪效果如表1所示。

表1 实际位姿与虚拟同步运动位姿的比较

时刻	实际位姿	虚拟同步运动位姿	最大误差	延迟
a	(20,80,30,3°,0°,4°30')	(19.98,80.03,30.02,3°1',0°,4°31')	0.03,2	0.4
b	(0,0,50,0°,0°,0°)	(0,0,49.09,0°,0°,0°)	0.01,0	0.4
c	(50,-80,0,1°,3°,0°)	(50.03,-79.96,0.00,1°0',2°57',0°0')	0.04,3	0.4

$(x,y,z,\alpha,\beta,\gamma)$ 表示动平台的中心点位姿, x,y,z 的单位为 mm, α,β,γ 的单位为 min(分);最大误差的单位为 mm(逗号前数字)和 min(逗号后数字);延迟的单位为 s。

由表1可见,虚拟机器人较好地实现了与实体机器人的同步运动,位姿的最大误差为0.04 mm和2 min,延迟为0.4 s。延迟主要是由于位姿的复合检测算法造成的,如果改用FPGA等专用图像处理设备,可以减小延迟。

5 结束语

本研究以六自由度并联机器人的精确位姿检测为突破口,利用OIV和VC++搭建了一个六自由度并联机器人虚拟同步运动系统。

试验研究结果表明,本研究所提出的方法可行,机器人虚拟运动逼真流畅,位姿检测精度能控制在0.05 mm以内,位姿检测与计算带来的虚拟运动延迟能够控制在0.5 s以内。该系统能够满足并联机器人一般监控的要求,不仅能够为并联机器人的操作提供新手段,还为并联机器人的位姿检测提供了新思路。

参考文献(References):

[1] 于大泳. 六自由度运动模拟器精度分析及标定[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学机电学院,2006.

[2] 段广洪,李铁民. 并联机器人的起源和发展[J]. 世界制造技术与装备市场,2006,40(1):52-55.

[3] 张淑平. 基于视觉的并联机器人位姿检测方法研究[D]. 上海:东华大学信息科学与技术学院,2010.

[4] 唐茂庚,陈平,沈博. 仿真系统中的时钟同步算法[J]. 计算机工程,2009,35(18):37-39.

[5] 侯国柱,汤学华. 基于Open Inventor的机器人运动仿真技术研究[J]. 机械设计与制造,2010(6):161-162.

[6] 刘文杰,丁永生,郝矿荣. 基于VRML三维人体模型的控制与实现[J]. 计算机工程与应用,2008,33(8):86-88.

[7] 阎锋欣,侯增选. Open Inventor程序设计从入门到精通[M]. 北京:清华大学出版社,2007.

[8] ZUO Ai-qiu. Stereo vision guided control of a stewart platform [C]//Proceedings of the 2002 IEEE International Symposium on Intelligent Control. Vancouver, BC, Canada: IEEE,2002:125-130.

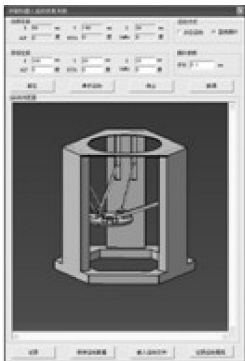
[9] 姜虹,贾嵘. 六自由度并联机器人位置正解的数值解法[J]. 上海交通大学学报,2000,34(3):351-354.

[10] 王炎欢,陈阿三,刘鑫茂. 直角坐标机器人控制系统的研制[J]. 轻工机械,2010,28(4):67-69.

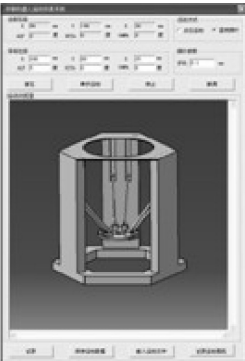
[11] 湛凡忠,王洪波,黄真. 并联6-SPS机器人的影响系数及其应用[J]. 机器人,1989,3(5):20-24.

[12] CRAIG J J. Introduction to Robotics: Mechanics and Control [M]. 3th ed. Beijing:Mechanical Industrial Press,2005.

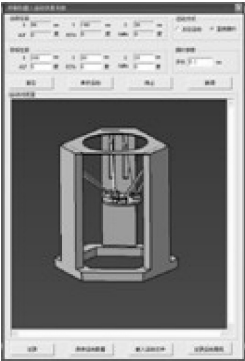
[编辑:张翔]



(a) a时刻



(b) b时刻



(c) c时刻

图5 虚拟同步运动截图