

基于机器人运动控制的空间增强现实方法^①

魏 毅^② * **** 蒙 遥^{**} 朱登明^③ ** **

(* 武夷学院数学与计算机学院 武夷山 354300)

(** 太仓中科信息技术研究院 太仓 215400)

(*** 中国科学院计算技术研究所, 前瞻研究实验室 北京 100190)

(**** 认知计算与智能信息处理福建省高校重点实验室 武夷山 354300)

摘 要 针对投影图像与投影板运动之间不匹配的问题,研究了基于机器人运动控制的空间增强现实方法。首先,建立机器人和投影板的几何模型,并使投影板几何模型能在机器人模型末端的牵引下运动。其次,应用逆向运动学技术,根据设计的投影板运动轨迹计算机器人关节的运动轨迹,提出一种机器人同步控制方法,使投影板在机器人牵引下的运动轨迹与设计的运动轨迹一致。最后,根据投影板的运动轨迹设计图像内容,并用投影仪将图像投射到运动的投影板上。在由两台机器人、两块投影板和一台投影仪组成的系统上进行了实验,实验结果表明,提出的方法能根据设计的投影板运动轨迹精确地控制投影板的运动,且投影图像与投影板运动之间的匹配程度很好。

关键词 空间增强现实, 机器人, 运动控制, 逆向运动学, 投影

0 引 言

空间增强现实是一种将计算机生成的图像投影到预先标定好的投影面上的技术^[1]。运用空间增强现实技术可将虚拟视觉元素叠加到真实环境中,从而营造出一种不同于真实物体表面纹理的虚拟纹理。投影面可以是静止的,例如建筑物外墙,也可是移动的,例如飞行球体的表面。目前,空间增强现实技术已在文化遗产展示^[2]、雕塑虚拟展示^[3]和虚拟对话^[4]等领域得到广泛应用。

Raskar^[5]首先提出空间增强现实的研究方向,并构建了原型系统“shader lamps”^[6]。该系统将图像投影在静止放置的建筑物模型表面,然后通过改变投影图像的内容来改变建筑物模型表面的颜色和纹理。针对投影面移动的情况,Bandyopadhyay 等^[7]

利用光学和磁性跟踪器设备来定位投影面的位置,并动态调整投影图像的内容,以维护投影图像与投影面运动之间的匹配关系。该方法的缺点是当投影面的位置快速变化时,存在明显的跟踪延迟,导致投影图像与投影面运动之间的匹配关系不准确。对于高速运动的投影面,Knibbe 等^[8]采用深度传感器探测投影面的位置,并利用 Kalman filtering 方法进行预测,以减小投影面位置跟踪的延迟时间。该方法对已知运动规律的投影面有效,例如空中飞行的乒乓球表面,但对随机运动的投影面无效。类似地,Zhou 等^[9]利用深度传感器、线性预测模型和 Extended Kalman filtering 对投影面进行定位跟踪。Miyafuji 等^[10]采用多台高速光学传感器跟踪移动投影面的位置,以减小在投影面位置发生速度突变时的跟踪误差。Okumura 等^[11]采用高速视觉传感器与灵活的光学系统对移动投影面进行跟踪。Ya-

① 国家自然科学基金(61173067, 61379085), 863 计划(2015AA016401)和武夷学院科技(YJ201607)资助项目。

② 男,1978 年生,博士,讲师;研究方向:虚拟现实;E-mail: wyqbits@sina.com

③ 通信作者,E-mail: mdzhu@ict.ac.cn

(收稿日期:2017-11-08)

po^[12]针对大尺度的空间环境,应用红外摄像机与投影表面上的反光标记跟踪投影面的位置。

上述方法使用传感器或光学定位装置跟踪投影面的位置,是一种被动式方法。考虑到传感器和光学定位装置内在的延迟性,以及计算投影面位置的时间开销,在被动式方法的框架下,要完全解决投影图像与投影板运动之间的匹配问题还需继续深入研究。

与现有的被动式方法不同,本文提出一种主动式方法。该方法通过控制机器人的运动,使安装在机器人末端的投影板按照指定的轨迹运动。另一方面,根据投影板的运动轨迹设计投影图像,并通过同步控制投影板的运动和投影仪的播放,使投影图像与投影板的运动之间形成准确的匹配关系。主动式方法的优点在于通过主动控制投影板的运动,使其更好地满足视觉特效师所需的展示要求。

1 方法概述

该方法包含运动模块和投影模块两部分(图1)。在运动模块中,首先建立机器人和投影板的3D几何模型,并将投影板模型与机器人模型绑定,使投影板模型能在机器人模型的末端牵引下运动。然后应用逆向运动学技术,根据设计的投影板运动轨迹反解机器人关节的运动轨迹,并在虚拟的3D环境中观察机器人、投影板和地面之间有无碰撞。最后,精确控制机器人的运动,使投影板在机器人牵引下的运动轨迹与输入的设计轨迹一致。在投影模块中,根据投影板的运动轨迹设计合适的投影图像,然后同步控制机器人与视频播放器,使投影图像准确匹配投影板的运动。

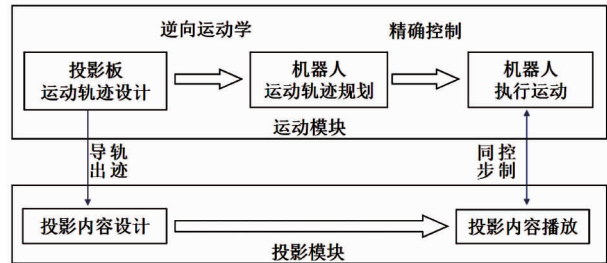


图1 方法的框架

2 建模

2.1 机器人与投影板的建模

在虚拟3D环境中建立机器人模型(图2)。机器人原型是德国KUKA公司生产的7自由度机器人,其中6个自由度是旋转自由度($A_1 \sim A_6$),1个自由度是整体平移自由度。在虚拟3D环境中设计2套直线导轨,并平行放置(图3)。每套导轨上放置1台机器人模型,型号分别是KR16和KR150。2块投影板模型分别固定在2台机器人模型的末端。为统一坐标系,将一套导轨的左侧终点设为世界坐标系的原点,机器人模型与投影板模型的运动数据都是相对于该世界坐标系的。

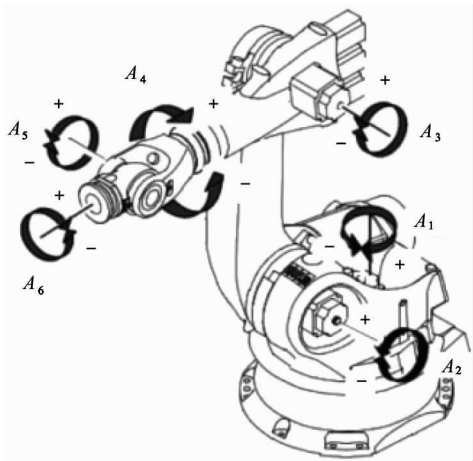


图2 机器人的运动自由度

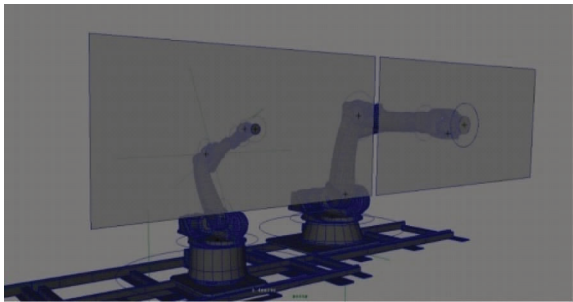


图3 机器人与投影板的3D模型

2.2 投影板的运动轨迹设计

投影板的运动轨迹定义为投影板的几何中心相对于世界坐标系的平移与旋转数据。平移数据用 $x(t)$ 、 $y(t)$ 、 $z(t)$ 表示,旋转数据用单位四元数 $Q(t)$

表示。

投影板运动轨迹的设计方法如下。基于图形化界面交互式地指定投影板在 n 个时间点 $t_1, t_2, \dots, t_n$ 上的平移数据 $\{x(t_1), \dots, x(t_n)\}, \{y(t_1), \dots, y(t_n)\}, \{z(t_1), \dots, z(t_n)\}$ 和旋转数据 $\{Q(t_1), Q(t_2), \dots, Q(t_n)\}$; 用三次 B 样条函数拟合平移轨迹 $x(t), y(t)$ 和 $z(t)$, 用 B 样条四元数^[13] 拟合旋转运动轨迹 $Q(t)$:

$$Q(t) = Q(t_1)^{\tilde{B}_{0,3}(t)} \prod_{i=1}^n \exp(\omega_i \tilde{B}_{i,3}(t)) \quad (1)$$

$$\omega_i = \log(Q(t_{i-1})^{-1} Q(t_i)) \quad (2)$$

$$\tilde{B}_{i,3}(t) = \sum_{j=i}^{i+3} B_{j,3}(t) \quad (3)$$

式中的 $\exp()$ 和 $\log()$ 为四元数的指数运算与对数运算, $B_{j,3}(t)$ 为三次 B 样条基函数。

2.3 机器人的运动轨迹规划

给定投影板的运动轨迹后,采用逆运动学方法求解机器人 7 个运动自由度的轨迹 $E(t), A_1(t) \sim A_6(t)$, 使得当机器人的 7 个自由度按照 $E(t), A_1(t) \sim A_6(t)$ 的数据运动时,投影板在机器人牵引下的运动轨迹与设计轨迹 $x(t), y(t), z(t), Q(t)$ 一致。 $E(t)$ 是机器人平移自由度的运动轨迹, $A_1(t) \sim A_6(t)$ 是机器人 6 个旋转自由度的运动轨迹。

采用以下优化模型求解机器人的运动轨迹:

$$\min_{E(t), A_1(t), \dots, A_6(t)} \|T(x(t), y(t), z(t), Q(t)) - FK(E(t), A_1(t), \dots, A_6(t))\| \quad (4)$$

$$\text{s. t} \quad \begin{aligned} E^{\min} &\leq E(t) \leq E^{\max} \\ A_k^{\min} &\leq A_k(t) \leq A_k^{\max} \quad k = 1, \dots, 6 \end{aligned} \quad (5)$$

$T(x(t), y(t), z(t), Q(t))$ 是 4×4 的齐次变换矩阵,表示投影板中心的平移与旋转。 $FK(E(t), A_1(t), \dots, A_6(t))$ 是前向运动学函数。该函数根据 $E(t), A_1(t), \dots, A_6(t)$ 计算机器人末端的平移与旋转。式(4)的含义是优化 $E(t), A_1(t), \dots, A_6(t)$, 使投影板中心与机器人末端在平移和旋转上的数值一致。式(5)描述机器人运动自由度对应的运动范围约束, $E^{\min}$ 和 $E^{\max}$ 是机器人平移运动范围的上下限, $A_k^{\min}$ 和 $A_k^{\max}$ 是机器人第 k 个旋转关节的运动范围上下限。本文使用数值优化软件包 SNOPT^[14] 求解以上优化模型。

3 控制

3.1 单台机器人的运动控制

采用客户/服务器模式,基于 TCP/IP 协议和机器人控制系统的底层 API 设计反馈式增量控制方法。服务器(系统的控制端)是上位机,客户端(机器人系统的控制柜)是下位机。控制流程如下(见图 4):

- (1)上位机监听下位机的连接请求;
- (2)下位机发送连接请求,获得上位机的连接应答后转步骤(3),否则重复步骤(2);
- (3)下位机读取机器人当前位置数据 $\{E, A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6\}$, 按照数据包格式封装后发送给上位机;

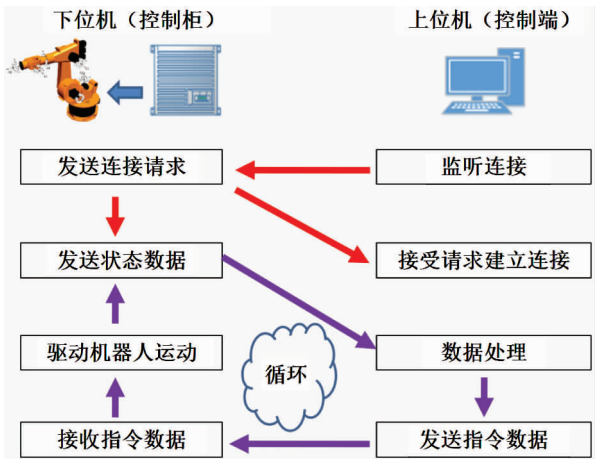


图 4 单台机器人的运动控制流程

- (4)上位机接收到下位机发送的数据包,根据给定的运动轨迹计算机器人运动自由度下一帧的位移增量 $\{\Delta E, \Delta A_1, \Delta A_2, \Delta A_3, \Delta A_4, \Delta A_5, \Delta A_6\}$, 按照指令格式封装后发送给下位机;
- (5)下位机接收到指令数据后,提取出机器人各自由度的位置增量数据,然后驱动机器人按给定的增量运动;
- (6)下位机检测通讯是否断开,如果没有断开,转步骤(3),否则转步骤(2)。

3.2 多台机器人与视频播放器的同步控制

考虑采用多台机器人同步控制多块投影板的需要,以及机器人运动与视频播放器播放的同步需求,本文构建了具有同步控制功能的局域网系统

(见图 5):

- (1)局域网系统以交换机为中心将控制端、机器人控制柜和视频播放主机组网;
- (2)编写具有同步向机器人控制柜和视频播放主机发送控制指令的控制组件,并在控制中心节点上运行该控制组件;
- (3)编写具有通过接受网络指令来控制视频播放的视频播放组件,并在视频播放主机上运行该播放组件。

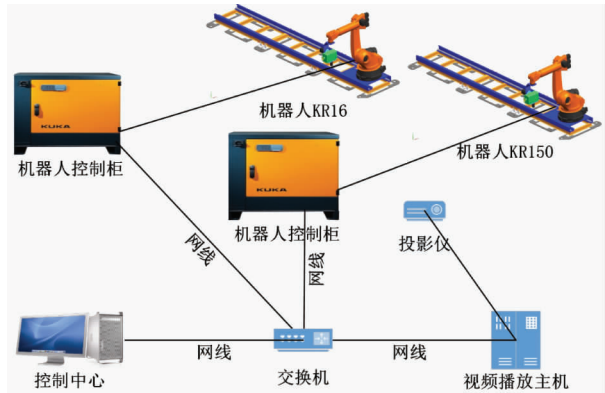


图 5 多台机器人和视频播放器的同步控制

4 投影内容生成

图 6 是投影仪与投影板相对位置关系的示意图。为使投影图像中的有效部分(有色彩的)准确投射到投影板上,且投射到投影板以外的部分是黑色,需要根据投影板在空间中的运动轨迹来设计投影图像的内容。方法如下:

- (1)在虚拟 3D 场景中创建投影仪的 3D 模型,

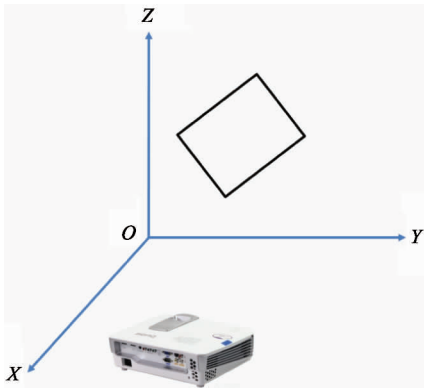


图 6 投影仪与投影板的相对位置关系

- 并按其在世界坐标系中的位置和朝向数据设置投影仪 3D 模型在虚拟 3D 场景的位置和朝向;
- (2)以投影仪模型的视点为中心,生成按照设计轨迹运动的投影板运动视频,视频画面中小方框表示投影板(图 7);
- (3)美工在小方框内设计投影图像,以使得投影时图像的有效部分(有色彩的)落在投影板内。

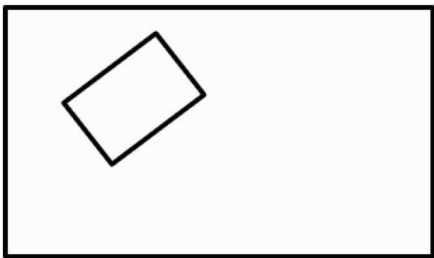


图 7 以投影仪模型的视点为中心生成的投影板画面

5 实验

5.1 机器人系统

机器人系统由 2 台德国 KUKA 公司生产的 7 自由度机器人组成,机器人的型号分别是 KR16 和 KR150。为这 2 台机器人分别配置了水平导轨,其中 KR16 配置的导轨长 5m, KR150 配置的导轨长 10m。两条水平导轨平行放置, KR16 放置在前, KR150 在放置后,二者底座中心之间的纵向间隔为 1.2m,世界坐标系的原点定义在 KR150 配套导轨的左侧终点。图 8 给出了机器人 6 个旋转自由度的运动范围,表 1 给出了机器人的尺寸参数。

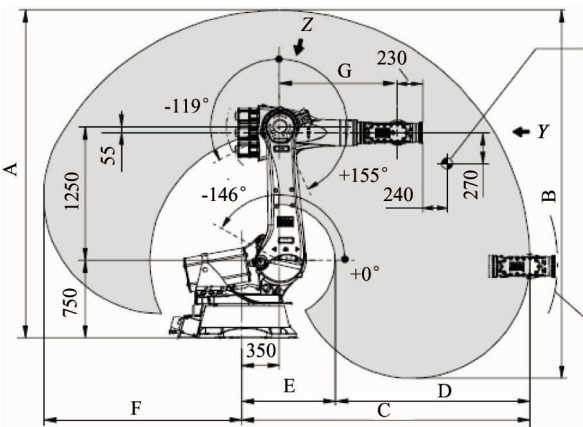


图 8 机器人关节的运动范围

表 1 机器人的尺寸参数(mm)

	A	B	C	D	E	F	G
KR16	2026	2412	1611	1081	530	1027	670
KR150	3500	4250	3100	2150	950	2187	1500

5.2 投影板

投影板由矩形金属框和白色幕布组成。在两个机器人的末端分别固定一个金属框,尺寸为 1.5m × 2.0m,金属框表面安装白色幕布(图 9)。

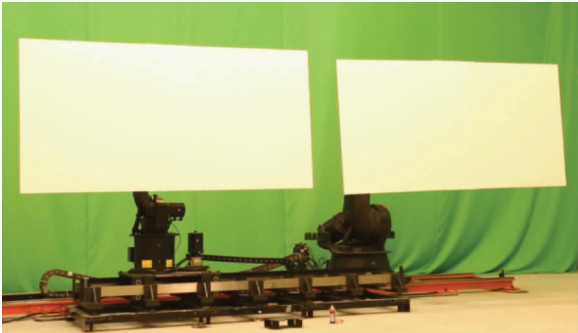


图 9 投影板全貌

5.3 投影内容的设计与空间增强现实的视觉效果

首先在 3D 虚拟场景中拖动投影板模型使其按照设想的轨迹运动,然后根据投影板模型中心的平移和旋转运动数据计算机器人的运动数据,同时根据投影板模型的运动轨迹设计投影图像。

在实验现场布置的摄像机记录了实验效果,视频已上传到优酷网站^[15,16]。录制视频^[15]时,现场环境灯被关闭,此时能清晰地看到增强现实的视觉效果。录制视频^[16]时,现场的环境灯被打开,此时能看清投影板的运动。

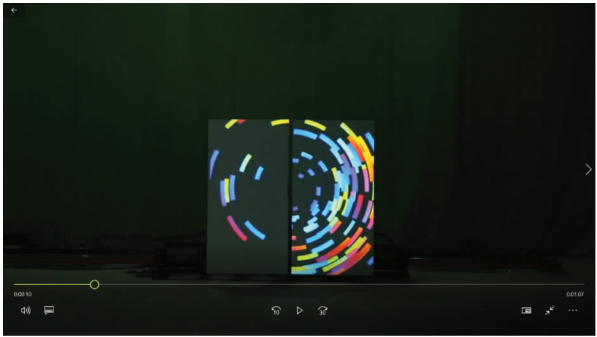
5.4 实验结果分析

(1)投影图像与投影板运动之间的匹配性分析

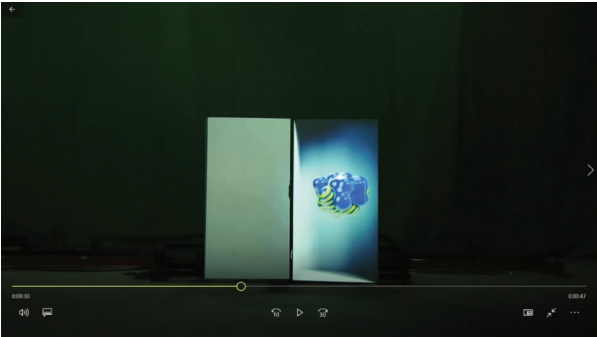
图 10 给出了视频^[16]在第 10s、30s、50s 和 64s 的截屏画面,从中可看出投影图像与投影板的运动是一致匹配的。

(2)匹配精度分析

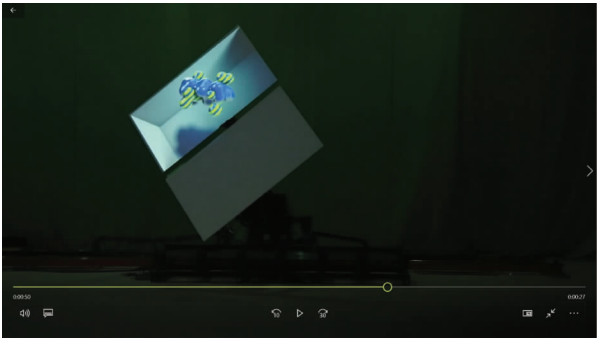
投影图像与投影板之间的匹配精度主要取决于以下几个因素:投影仪的播放延迟误差、通讯同步误差、机器人运动误差等。投影仪的播放延迟误差是指投影仪开始播放时刻和机器人开始运动时刻之间



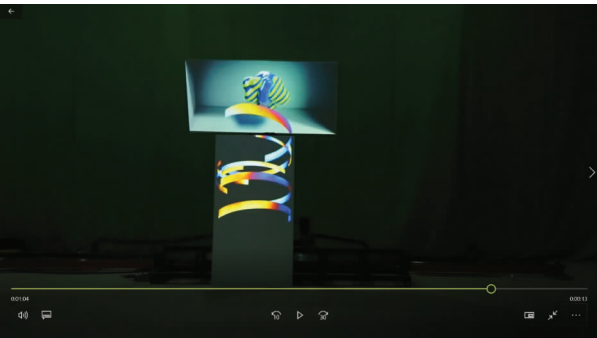
(a) 第 10s 截屏画面



(b) 第 30s 截屏画面



(c) 第 50s 截屏画面



(d) 第 64s 截屏画面

图 10 视频^[16]截屏画面

的误差;通讯同步误差是指上位机与下位机之间进行高频通讯时的误差;机器人运动误差是指由于机器人的机械特性以及通讯同步误差导致的机器人位置误差。

(3)投影仪的播放延迟误差

本文采用软同步方法控制投影仪播放和机器人运动的同步启动。实验中,投影仪同步误差的最大值为0.034s,平均误差值为0.012s。按照 30 帧/s 的播放速度计算,投影仪播放延迟误差导致的投影帧的最大同步误差小于 1 帧,平均误差为0.36帧。

(4)通讯同步误差分析

KUKA 机器人的嵌入式实时操作系统要求上位机和机器人(下位机)之间的通讯频率为 12ms/帧。在开发上位机控制程序时,本文按照此频率进行控制指令的计算和控制指令的通讯:一个通讯周期开始时,下位机向上位机发送数据包,上位机收到数据包后计算出控制指令并在 6ms 内将控制指令发送给下位机,以使机器人产生运动,从而将一个完整的通讯周期控制在 12ms 内。基于目前实验设备的性能,本文在实验中将机器人的旋转关节运动速度控制在 0.2 弧度/s 以内,平移关节的运动速度控制在 1m/s 以内。因此,由于通讯同步误差造成的机器人旋转关节运动误差小于0.002弧度,平移关节的运

动误差小于 12mm。

(5)机器人运动的误差分析

以 KR16 机器人的运动数据为分析对象,统计机器人 7 个运动自由度上的实际轨迹与设计轨迹之间的误差。在平移自由度上,最大误差值是3.2mm,平均误差值是 1.5mm。表 2 给出了机器人 6 个旋转自由度的最大运动误差和平均运动误差。误差最大的自由度是 A_6 轴,这是因为 A_6 轴处的电机功率相较于其它轴的电机功率更小,且机器人系统在 A_6 轴处的刚度也最小,因此当 A_6 轴带上负载运动时,其运动误差比其它轴的运动误差更大。

表 2 KR16 机器人旋转自由度的最大误差与平均误差(rad)

	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6
最大误差	0.004	0.023	0.017	0.012	0.025	0.103
平均误差	0.002	0.014	0.006	0.008	0.013	0.034

(6)投影板运动的误差分析

以 KR16 机器人上安装的投影板中心的运动数据为分析对象,统计投影板的实际轨迹与设计轨迹之间的误差。图 11 给出了投影板中心在 X、Y、Z 三个平移方向的理论轨迹和实际轨迹之间的差。X 方向的最大误差小于 6mm, Y 方向的最大误差小于 2mm, Z 方向的最大误差小于 4mm。

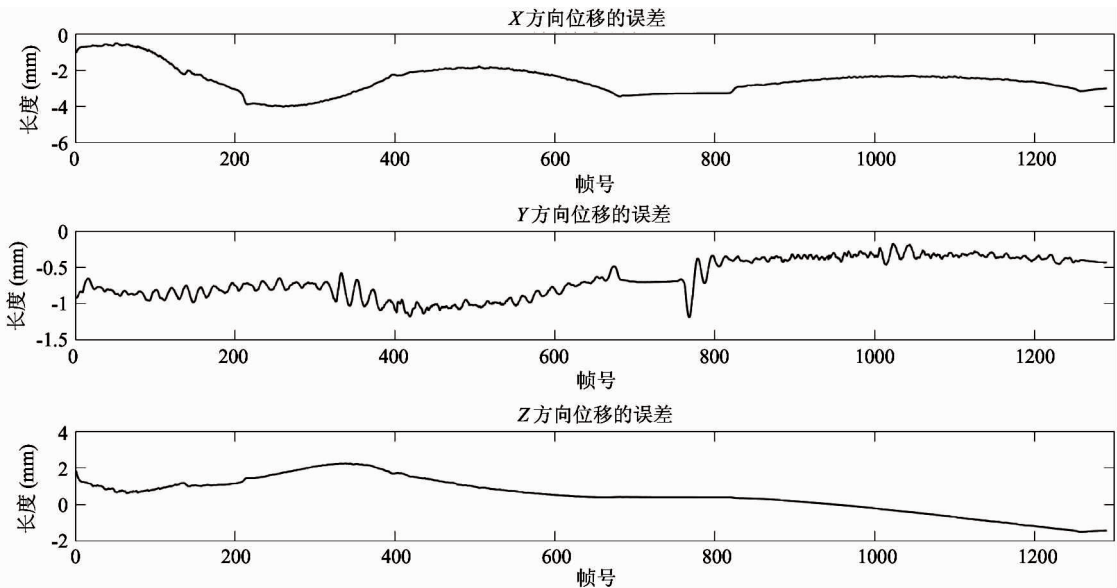


图 11 投影板的平移运动误差

采用如下方法计算旋转误差。假设设计旋转和实际旋转对应的单位四元数分别是 $\mathbf{Q}_D$ 和 $\mathbf{Q}_R$, 这两个旋转对应的角度误差 θ 为:

$$\theta = 2\arccos([\mathbf{Q}_D^{-1}\mathbf{Q}_R]_1) \tag{6}$$

其中, $[\]_1$ 表示取出单位四元数的第一个分量。

图 12 给出了投影板的设计旋转与实际旋转之间的角度误差, 最大的误差值小于 0.14 弧度。综合考虑投影板在旋转和平移上的运动误差, 可认为投影板的实际运动轨迹与设计的运动轨迹是重合的。

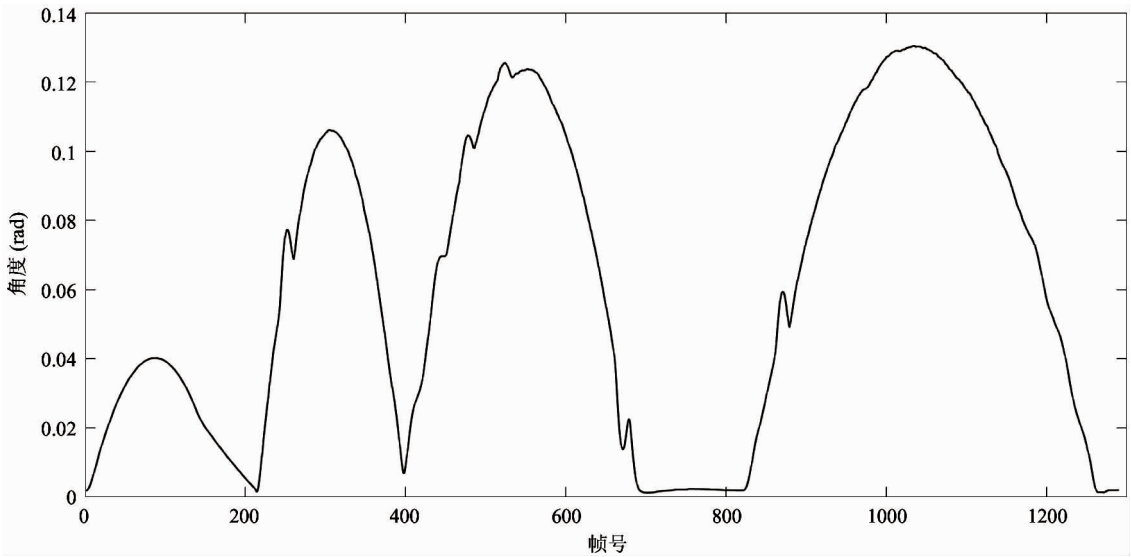


图 12 投影板的旋转运动误差

5.5 与现有增强现实方法的对比

现有的增强现实方法^[2-12]采用传感器或光学定位装置跟踪投影面的位置, 因此不能主动、精确地控制投影面的运动。本文方法通过机器人运动控制技术来精确地操控投影板, 使其按设计者的意图运动。这是本文方法与现有增强现实方法在原理上的不同。

评价增强现实方法效果的主要指标是平均投影误差。文献[8]给出的平均投影误差是7.47cm, 文献[9]的实验结果是当投影面的运动速度超过30cm/s时, 平均投影误差超过1.8cm。本文方法的实验结果是当投影板的运动速度不超过1m/s时, 平均投影误差小于1.5cm。

6 结 论

本文提出一种基于机器人运动控制的空间增强现实方法。该方法通过精确控制投影板的运动, 使其满足设计者的展示需求, 并保证投影图像与投影

板之间形成准确匹配的关系。该方法在两台机器人组成的系统上进行了实验, 实验结果表明该方法可以按照用户给定的设计轨迹精确地控制投影板的运动, 同时投射的图像与投影板之间的匹配效果很好, 相较于现有的被动式方法, 本文提出的主动式空间增强现实方法为用户提供了一种新颖、可行的空间增强现实展示方案。

本文后续工作将在以下几个方面展开: 增加对异构机器人的支持。本文使用2台串联结构的7自由度机器人进行了方法的验证, 但其它类型的机器人在原则也可以应用本文方法, 例如6轴高速并联机器人。该类型的机器人具有负载小、运行快的特性, 适用于快节奏的增强现实应用场合; 将机器人运行的直线轨道扩展为曲线轨道, 以适应在弧形舞台上的增强现实展示需求; 开发更好的交互式工具, 以降低投影内容制作的难度, 提升投影内容制作的效率。

致谢: 感谢上海幻维数码创意科技有限公司的王安工程师在投影图像制作方面给予的帮助。

参考文献

- [1] 周忠, 周颐, 肖江剑. 虚拟现实增强技术综述[J]. 中国科学: 信息科学, 2015, 45(2): 157-180
- [2] Ridet B, Reuter P, Laviolle J, et al. The revealing flash-light: interactive spatial augmented reality for detail exploration of cultural heritage artifacts[J]. *Journal on Computing and Cultural Heritage*, 2014, 7(2): 6:1-6:18
- [3] Siegl C, Colaianne M, Lange V, et al. Reality forge: interactive dynamic multi-projection mapping[C]. In: Proceedings of SIGGRAPH ASIA Emerging Technologies, Macau, China, 2016. 1-2
- [4] Bermanno A, Brüschweiler P, Grundhöfer A, et al. Augmenting physical avatars using projector-based illumination[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2013, 32(6): 189:1-189:10
- [5] Raskar R, Welch G, Fuchs H. Spatially augmented reality[C]. In: Proceedings of the 1st IEEE Workshop on Augmented Reality, San Francisco, USA, 1998. 11-20
- [6] Raskar R, Welch G, Low K L, et al. Shader lamps: animating real objects with image-based illumination[C]. In: Proceedings of the Eurographics Rendering Workshop, London, UK, 2001. 1-8
- [7] Bandyopadhyay D, Raskar R, Fuchs H. Dynamic shader lamps: painting on movable objects[C]. In: Proceedings of the IEEE and ACM International Symposium on Augmented Reality, New York, USA, 2001. 207-216
- [8] Knibbe J, Benko H, Wilson A D. Juggling the effects of latency: software approaches to minimizing latency in dynamic projector-camera systems[C]. In: Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software & Technology, Charlotte, USA, 2015. 93-94
- [9] Zhou Y, Xiao S J, Tang N, et al. Pmomo: projection mapping on movable 3D object[C]. In: Proceedings of the Conference on Human Factors in Computing Systems, San Jose, USA, 2016. 781-790
- [10] Miyafuji S, Sugasaki M, Koike H. Ballumiere: real-time tracking and spherical projection for high-speed moving balls[C]. In: Proceedings of the 2016 ACM on Interactive Surfaces and Spaces, Niagara Falls, Canada, 2016. 33-37
- [11] Okumura K, Oku H, Ishikawa M. Lumipen: projection-based mixed reality for dynamic objects[C]. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Multimedia and Expo, Chengdu, China, 2012. 699-704
- [12] Yap T C, Sheng Y, Nasman J, et al. Dynamic projection surfaces for immersive visualization[C]. In: Proceedings of the IEEE International Workshop on Projector-Camera Systems, San Francisco, USA, 2010. 1-8
- [13] Kim M J, Kim M S, Shin S Y. A general construction scheme for unit quaternion curves with simple high order derivatives[C]. In: Proceedings of the ACM SIGGRAPH, Los Angeles, USA, 1995. 369-376
- [14] Gill P E, Murray W, Saunders M A. SNOPT: an SQP algorithm for large-scale constrained optimization[J]. *SIAM Review*, 2005, 47(1), 99-131
- [15] 魏毅, 蒙遥, 朱登明. 基于机器人运动控制的空间增强现实方法演示-关闭环境灯[EB/OL]. http://v.youku.com/v_show/id_XMjk2NDE0NDE4OA.html?spm=a2hnp.8244740.0.0:优酷, 2017
- [16] 魏毅, 蒙遥, 朱登明. 基于机器人运动控制的空间增强现实方法演示-打开环境灯[EB/OL]. http://v.youku.com/v_show/id_XMjk2NDE0NjY0NA.html?spm=a2hnp.8244740.0.0:优酷, 2017

A method for spatially augmented reality based on motion control of robot

Wei Yi * ****, Meng Yao **, Zhu Dengming *** ****

(* School of Mathematics and Computer, Wuyi University, Wuyishan 354300)

(** Taicang Institute of Information Technology, Taicang 215400)

(*** Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

(**** Fujian Provincial Key Laboratory of Cognitive Computing and Intelligent Information Processing, Wuyishan 354300)

Abstract

Aiming at dealing with the problem of matching between the projected image and the movement of projection screen, this study focuses on the method for spatially augmented reality based on motion control of robot. Firstly, geometrical models of robot and projection screen are built, and the geometrical model of projection screen can be driven by the end-effector of robot's geometrical model. Secondly, according to the designed trajectory of projection screen, the trajectories of robot's joints are computed by the technology of inverse kinematics. A method of synchronous control of robot is proposed so that the trajectory of projection screen which is driven by the end-effector of robot can be in accordance with the designed trajectory. Lastly, the projected images are designed according to the trajectory of projection screen and are projected onto the moving projection screen by a projector. Experiments are performed on the system which is composed of two robots, two projection screens and a projector. The result shows that the proposed method can precisely control the motion of projection screen according to the designed trajectory and the accuracy of matching between the projected images and the movement projection screen is desired.

Key words: spatially augmented reality, robot, motion control, inverse kinematics, projection