

# 基于体感检测器件的悬浮真三维显示力触觉交互

李炜<sup>1,2</sup>, 李海峰<sup>1,2\*</sup>, 徐良<sup>1,2</sup>, 西瞳<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027;

<sup>2</sup>浙江大学光电科学与工程学院, 浙江 杭州 310027

**摘要** 三维(3D)显示以其自然直观的方式受到广泛关注。提出一种基于悬浮真三维显示系统的指套式力触觉交互方法。通过 Leap Motion 提取指尖坐标,利用双目相机实现光场显示区域和交互区域的坐标转换;判断手与显示区域的位置关系,传递信号使指套振动,从而完成力触觉交互。结果表明,利用所提方法可以完成光场显示区域和交互区域的坐标转换,转换精度在 5 mm 以内。当用户与三维显示模型交互时,有效和实时的力触觉交互有助于增强真实的感官体验。

**关键词** 机器视觉; 三维交互; 指套式; 力触觉交互; 实时交互

中图分类号 TP391

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.0915004

## Suspended Three-Dimensional Display Haptic Interaction Based on Leap Motion

Li Wei<sup>1,2</sup>, Li Haifeng<sup>1,2\*</sup>, Xu Liang<sup>1,2</sup>, Xi Tong<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China;

<sup>2</sup>College of Optical Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China

**Abstract** Three-dimensional (3D) display has gained wide attention for its natural and intuitive performance. Herein, we proposed a finger sleeve haptic interaction method based on a suspended 3D display system. The fingertip coordinates were extracted by Leap Motion and a binocular camera was used to assist the coordinate transformation between light field display area and interaction area. Then, the position relation between the hand and display area was examined and the signal was transmitted to vibrate the finger sleeve, thus the haptic interaction was finally realized. The results show that the proposed method can be used to complete the coordinate transformation between light field display area and interaction area with a transformation precision of within 5 mm. Furthermore, when the user interacts with a 3D display system, the effective and real-time haptic interaction enhances their real sensory experiences.

**Key words** machine vision; three-dimensional interaction; finger sleeve; haptic interaction; real-time interaction

**OCIS codes** 150.6910; 230.5160; 040.1490

## 1 引 言

人机视觉交互正朝着更加自然和直观的方向发展,例如从多点触摸到手势,从二维(2D)到三维(3D)。将 3D 显示和触觉反馈相结合,可以与 3D 空间中的投影图像进行直接交互,从而使交互更轻松、更有趣。触觉交互作为带有反馈的新型双向交互方式,能够将传统的人机交互系统转变成闭环系统,从而大大提高交互过程的准确性和真实感。

近年来,随着三维显示的发展,特别是光场三维

显示技术的发展,显示与手的交互也不断发展起来。Su 等<sup>[1]</sup>提出了基于 360° 三维悬浮显示的手势交互方式,该方式将悬浮光场校准为物理尺寸并捕获用户手势,使用户可以进行精确手势控制。Yamaguchi 等<sup>[2]</sup>实现了基于光场显示的三维显示交互式触摸界面,该设备通过彩色图像传感器检测指尖散射光,进而检测用户的触摸,解决了复杂的显示场景与手指的配准问题。这两种方法均缺乏交互中的触觉体验。Monnai 等<sup>[3]</sup>提出了一种基于声辐射压力与悬浮虚拟屏幕的触觉交互方式,利用超声相

收稿日期: 2019-12-11; 修回日期: 2020-01-17; 录用日期: 2020-02-10

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB1002905)

\* E-mail: lihaifeng@zju.edu.cn

控阵列换能器将聚焦超声传递到指尖上,使其在与浮动图像一致的位置和时间产生机械力,但是该方法只能进行小范围的二维屏幕交互。目前尽管有很多关于触觉交互方面的研究<sup>[4-7]</sup>,但基于桌面式 360°扫描光场显示场景的力触觉交互鲜有报道。

本文提出一种基于体感检测器件(Leap Motion)的悬浮光场显示触觉交互方法。该方法通过 Leap Motion 探测手指坐标,通过双目相机实现光场显示区域和检测装置之间的坐标转换,转换精度在 5 mm 以内,通过振动模块达到高精度力触觉交互的目的。

## 2 交互装置与工作原理

### 2.1 交互系统

360°悬浮光场三维显示系统包括高速投影仪和水平放置的光场屏幕,如图 1 所示<sup>[8]</sup>。高速投影仪位于屏幕中心上方,以高帧速率在光场屏幕上投影图像。光场屏幕是圆形反射类定向散射屏,可以在垂直方向上散射入射光并在水平面上快速旋转,屏幕旋转一周更新 600 个图像,可重建 360°水平光场。扫描光场在水平方向上可以产生具有水平视差的不同视图。观看者可以在不同的位置看到三维场景。

为了完成力触觉交互,需要对手部位置信息进行提取,计算机通过分析场景表面与手指位置之间的关系,进行手指是否触碰到虚拟场景的判断。由于光场显示坐标系与检测器件检测的坐标系不一致,需要对两个坐标系进行转换,当判断手指触碰到虚拟显示场景时,计算机驱动硬件指套振动,完成力触觉交互。故交互过程由两部分组成,分别为 Leap Motion、指套模块。Leap Motion<sup>[9]</sup>是一种利用内置双摄像头,基于双目成像原理重建出手部三维空间运动信息的体感设备,可以提取手部位置信息。指套模块由蓝牙接收模块、电源模块、微控制器及电动马达四部分组成,可在接收蓝牙信号后驱使指尖位置的电动马达振动,使手指有振动感觉。图 1 是 360°悬浮光场三维显示系统的触觉交互装置示意图,为扩大交互区域,Leap Motion 被倾斜放置并连接计算机,计算机实时获取手部指尖的位置信息,并对显示模型数据与 Leap Motion 检测数据进行匹配和判断。计算机内设有蓝牙发射模块,通过蓝牙发射模块对指套发出指令,从而控制指套振动。

图 2 是力触觉交互流程图。通过手指信息读取、坐标转换、接触检测、蓝牙传送、硬件驱动等步骤实现手指与模型力触觉的交互。Leap Motion 探测

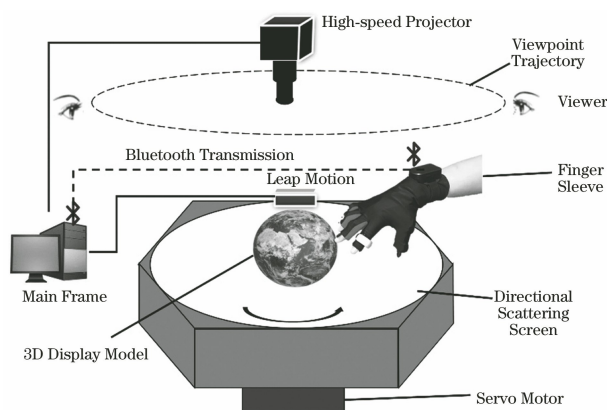


图 1 360°悬浮光场三维显示系统的触觉交互装置示意图<sup>[8]</sup>

Fig. 1 Schematic of haptic interaction device of 360° suspended light field 3D display system<sup>[8]</sup>

得到的手指坐标是基于自身的坐标系,无法直接得到该坐标与显示的三维模型之间的坐标关系,因此需要将 Leap Motion 的坐标转换到显示空间,才能进行接触与否的判断。将手指坐标转换到显示空间后,与显示空间的模型坐标进行接触检测,若判断为相互接触,则通过蓝牙传送制动信号,驱动电动马达振动;若判断为不相互接触,则继续对下一帧的手指坐标进行检测。

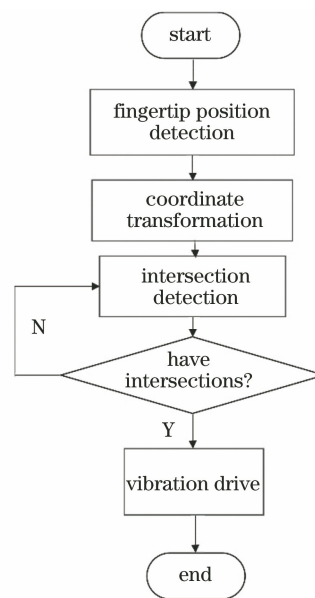


图 2 力触觉交互系统流程图

Fig. 2 Flowchart of haptic interaction system

### 2.2 光场显示和交互区域坐标转换

为了精确得到 Leap Motion 坐标系和显示空间坐标系之间的转换关系,引入双目相机和 3D 打印的实体模型,用双目相机和 Leap Motion 同时测量实体模型,得到双目相机和 Leap Motion 之间的转换关系,然后用双目相机测量由显示系统显示的三

维模型,最终得到 Leap Motion 和显示空间之间的转换关系。

首先标定双目相机的内参,根据张正友标定法<sup>[10]</sup>对打印的棋盘格进行标定,得到摄像机内参矩阵和畸变系数。根据得到的内参矩阵和畸变系数,标定左右相机各自相对于光场显示坐标系的位姿。由三维显示系统在光场屏幕平面内投影一个棋盘格模型,以棋盘格中间角点为坐标系原点  $Q$ 。将图 3 中  $Q$ - $xyz$  坐标系作为光场显示坐标系,其中  $z$  轴与光场屏幕平面垂直。用双目相机分别拍摄棋盘格图片并将其作为标定图像,提取标定图像的角点坐标,通过直尺测量实际投影的棋盘格大小,得到图片角点对应的光场显示坐标系的坐标。根据已得到的内参矩阵和畸变系数,利用 EPNP 算法<sup>[11]</sup>得到相机相对于每个标定图像平面的外参数旋转向量和平移矩阵。由两个相机的内、外参矩阵可得到两个相机各自的投影矩阵  $P_l, P_r$ 。

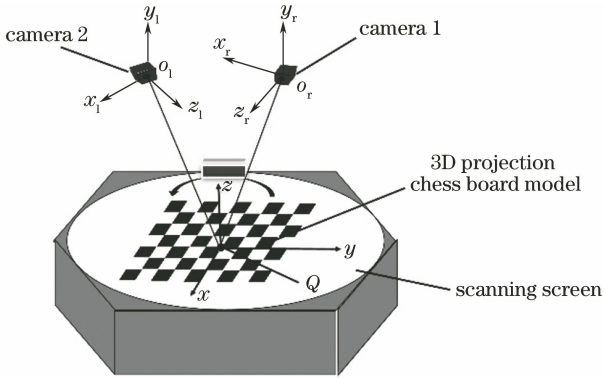


图 3 双目相机标定光场显示区域示意图

Fig. 3 Schematic of light field display area calibrated by binocular camera

利用线性三角形法<sup>[12]</sup>,使用双目相机检测实体模型坐标方法如下。如图 4 所示,假设实体模型在光场显示坐标中的三维坐标为  $Q_i (i=1, 2, \dots, n)$ ,在实际情况下,Leap Motion 能稳定识别手指状物体的尖端坐标,实体模型中有 5 个顶点,则  $n=5$ 。手动标记使  $Q_i$  投影在左右两个相机图像中,坐标分别为  $q_{il}$  和  $q_{ir}$ :

$$q_{il} = P_l Q_i, q_{ir} = P_r Q_i. \quad (1)$$

对(1)式两边同时进行叉乘计算,可得

$$q_{il} \times (P_l Q_i) = 0, q_{ir} \times (P_r Q_i) = 0. \quad (2)$$

将(2)式进一步展开,可以得到

$$\begin{cases} (x_{il} P_l^3 - P_l^1) Q_i = 0 \\ (y_{il} P_l^3 - P_l^2) Q_i = 0 \\ (x_{ir} P_r^3 - y_{ir} P_r^1) Q_i = 0 \end{cases}, \quad (3)$$

$$\begin{cases} (x_{ir} P_r^3 - P_r^1) Q_i = 0 \\ (y_{ir} P_r^3 - P_r^2) Q_i = 0 \\ (x_{ir} P_r^3 - y_{ir} P_r^1) Q_i = 0 \end{cases}, \quad (4)$$

式中:  $P_l^j$  和  $P_r^j$  表示左右相机第  $j$  行投影矩阵,  $j=1, 2, 3$ ;  $x_{il}$  和  $y_{il}$  为  $q_{il}$  的横纵坐标,  $x_{ir}$  和  $y_{ir}$  为  $q_{ir}$  的横纵坐标。由(3)、(4)式可得

$$\begin{bmatrix} x_{il} P_l^3 - P_l^1 \\ y_{il} P_l^3 - P_l^2 \\ x_{ir} P_r^3 - P_r^1 \\ y_{ir} P_r^3 - P_r^2 \end{bmatrix} Q_i = 0. \quad (5)$$

此时问题转换为求解最小二乘问题,使用奇异值分解求得  $Q_i$  的最优解。

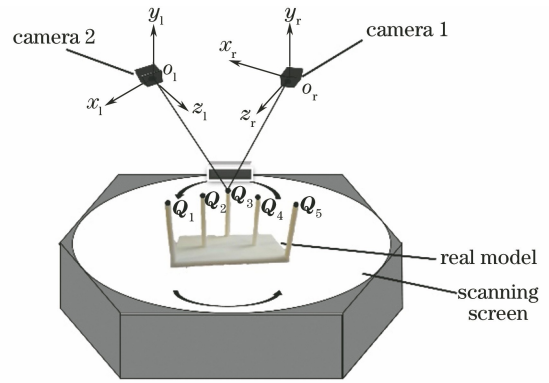


图 4 三维重建装置示意图

Fig. 4 Schematic of device for 3D reconstruction

用 Leap Motion 同时检测到相对于 Leap Motion 测量系统的 5 个顶点坐标  $Q'_i$ 。对于同一模型上的同一点,存在变换参数旋转矩阵  $R$  和平移向量  $t$ ,即

$$\forall i, Q_i = R Q'_i + t. \quad (6)$$

根据迭代最近点法<sup>[13]</sup>,利用最小二乘法计算

$$E = \sum_{i=1}^n | (R Q'_i + t) - Q_i |^2. \quad (7)$$

求得使(7)中误差  $E$  最小时的旋转矩阵  $R$  和平移向量  $t$  的最优解,从而得到 Leap Motion 测量坐标系与光场显示坐标系的转换关系矩阵。

### 2.3 相交检测

将佩戴有指套的手指伸入显示区域,通过 Leap Motion 检测到手指位置信息,并将位置信息转换成世界坐标,将得到的手指坐标与模型进行接触检测,判断手指坐标与模型表面是否发生接触。为了减少非接触部分的检测效率,过滤距离模型较远的非接触情况,首先采用 AABB 式包围盒对碰撞检测区域进行划分,如图 5 所示,如果手指坐标点与包围盒无相交则返回,有相交则继续检测。

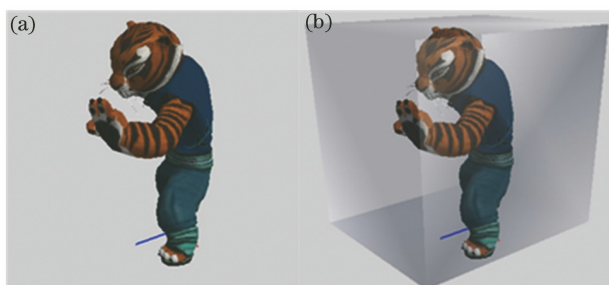


图 5 包围盒检测。(a)原模型;(b)AABB 式包围盒  
Fig. 5 Bounding box detection. (a) Original model;  
(b) AABB-type bounding box

由于需要给手指振动范围一定的缓冲空间,将原本的指尖看作为以手指顶点为中心,半径为 5 mm 的立方体。立方体接触模型表面时,在模型表面 1 cm 的范围内有振感,从而保证了振动的体

表 1 双目相机的标定结果

Table 1 Calibration results of binocular camera

Parameter	Left camera	Right camera
Intrinsic matrix	$\begin{bmatrix} 834.65 & 0 & 300.45 \\ 0 & 835.27 & 224.28 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 871.30 & 0 & 348.13 \\ 0 & 868.94 & 263.03 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
Distortion coefficient matrix	$[-0.35200, 0.49000, 0.00128, 0.00368, 0]$	$[-0.283200, 0.009758, -0.000680, 0.002780, 0]$
Rotation matrix	$[1.2570, 2.4920, -0.6271]$	$[2.502, 1.145, -0.298]$
Translation matrix	$[-58.48, -42.18, 867.06]$	$[-185.900, 52.138, 816.390]$

具体误差测量步骤如下,投影一个与图 6 实体模型相同的光场显示模型。显示模型体积为 200 mm×100 mm×100 mm。投影模型的 5 个顶点在显示空间内的坐标从左至右分别为(100, -100, 100)、(50, -50, 100)、(0, 0, 100)、(50, 50, 100)、(100, 100, 100)。先粗调实体模型,直至把投影模型完全挡住;再细调三轴测量装置,直至 Leap Motion 实时测量出的 5 个顶点坐标最大化地靠近投影模型的顶点坐标。此时将该三轴平移台位置设置为起始坐标,即光场显示坐标系的原点;然后移动三轴平移台,改变实体模型在显示空间中的坐标位置,得到实际空间坐标  $\mathbf{d}$ ,其中  $d_x, d_y, d_z$  分别为  $x, y, z$  方向上的分量,同时用 Leap Motion 检测模型在显示空间中的坐标  $\mathbf{d}'$ ,其中  $d'_x, d'_y, d'_z$  分别为  $x, y, z$  方向上的分量,将两个坐标之间的差值作为检测误差,如图 7 所示。

每隔 5 mm 进行 1 次测量,对于每一次测量,反复测量 10 次取平均作为 1 次测量结果。由图 7 可见,交互范围内的误差均在 5 mm 以内。

验感和时效性。为了保证三维模型的观看效果,一般投影模型的三角面片边长比 5 mm 小很多,所以当立方体碰触模型时,一定会有顶点在立方体内部。遍历模型所有顶点,对顶点和立方体进行相交检测,当有模型顶点在立方体内时,判断为手指触碰到了模型,进而给指套发出指令,启动其振动模式。

### 3 实验结果

棋盘格标定的相机内外参结果如表 1 所示,根据得到的内外参,经过多次测量可以得到 Leap Motion 测量坐标与显示中心坐标系之间的转换关系。根据实体模型的实际位置和测量位置的误差值可以判断转换结果的好坏。

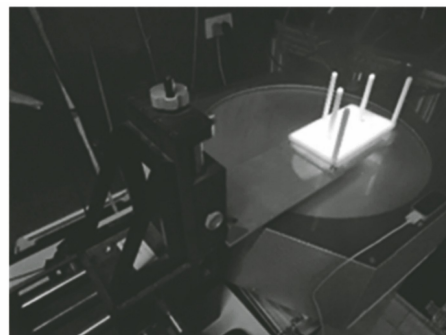


图 6 测量装置

Fig. 6 Measuring device

为了直观地显示实际应用时的接触情况,将红色指示灯连到指尖电动马达的两端,以实时监测其振动变化,结果如图 8 所示。图 8(a)中 A、B、C 表示三种手指高度,分别为高于模型、在模型表面、在模型内部三种状态。手指与模型表面碰触时,指尖红色指示灯亮。图 8(a)、(b)分别代表同一状态的左右视图,在手指触摸模型与否两种状态时,对应指示灯的亮暗表征了振动与否的状态,实现了手指与



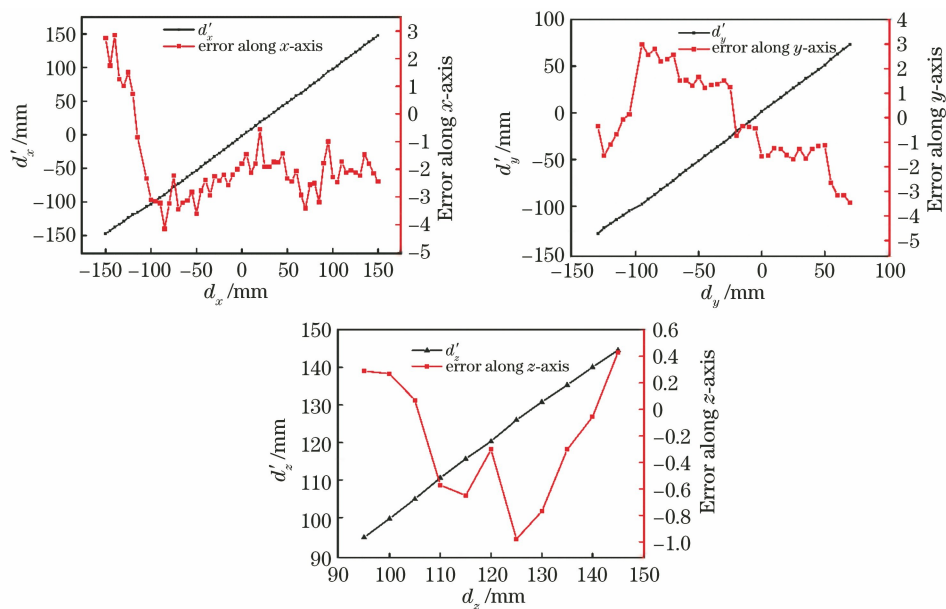


图 7  $d$  与  $d'$  的比较

Fig. 7 Comparison between  $d$  and  $d'$

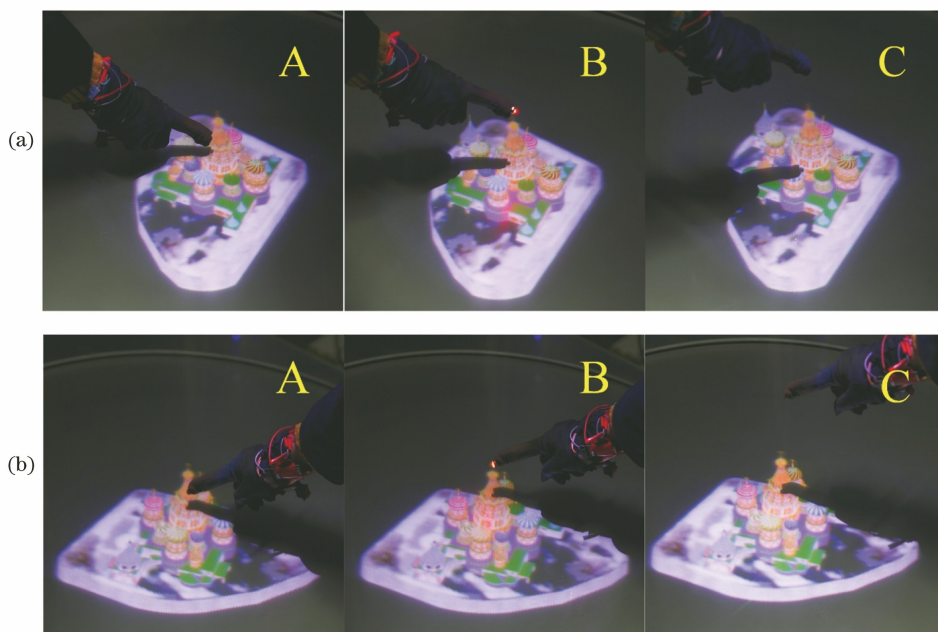


图 8 指示灯状态。(a)左视图;(b)右视图

Fig. 8 Status of indicator. (a) Left view; (b) right view

三维模型的精确触觉交互。将误差允许范围设定为 5 mm 时,进行 100 次触摸测量,投影实体模型对应的三维显示模型的振动准确率为 95%,实现了 5 mm 误差下的流畅交互。

## 4 结 论

提出基于悬浮真三维显示系统的指套式力触觉交互方法,完成了探入式的力触觉交互。在交互过程中,通过 Leap Motion 提取指尖坐标,借用

双目相机和 3D 打印实体,辅助完成了空间坐标系的标定和空间坐标系的测量并进行了坐标转换。经过误差检验,设计的交互系统的坐标转换精度在 5 mm 以内,实现了高精度力触觉交互。进行接触检测后,通过蓝牙传递信号使指套振动,从而完成整个力触觉交互的流程。光场显示区域和交互区域的坐标转换为更多的有关三维显示的手势交互提供了可能性。

## 参 考 文 献

- [1] Su C, Peng Y F, Zhong Q, et al. Towards VR and AR enhancement: light field display with mid-air interaction [C]//SIGGRAPH ASIA 2016 Virtual Reality Meets Physical Reality: Modelling and Simulating Virtual Humans and Environments, December 5, 2016, Venetian Macao, Macao. New York: ACM, 2016.
- [2] Yamaguchi M. Full-parallax holographic light-field 3-D displays and interactive 3-D touch [J]. Proceedings of the IEEE, 2017, 105(5): 947-959.
- [3] Monnai Y, Hasegawa K, Fujiwara M, et al. HaptoMime: mid-air haptic interaction with a floating virtual screen [C]//Proceedings of the 27th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology, Honolulu, Hawaii. New York: ACM, 2014: 663-667.
- [4] Magnenat-Thalmann N, Bonanni U. Haptic sensing of virtual textiles [M]//Grunwald V. Human haptic perception: basics and applications. Basel: Birkhäuser, 2008: 513-523.
- [5] Dima M, Hurcombe L, Wright M. Touching the past: haptic augmented reality for museum artefacts [M]//Shumaker R, Lackey S. Virtual, augmented and mixed reality. Applications of virtual and augmented reality. Lecture notes in computer science. Cham: Springer, 2014, 8526: 3-14.
- [6] Yu Y Q, Song A G, Chen D P, et al. Fingertip haptic rendering system for touch screen image perception [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(6): 1523-1530.
- [7] Wu J, Han X, Yang H N. An improved 3D shape haptic rendering algorithm for finger mounted vibrotactile device [J]. Journal of Southeast University(English Edition), 2018, 34(3): 317-322. 吴涓, 韩啸, 杨怀宁. 一种基于指套式振动反馈装置的三维形状触觉再现改进算法 [J]. 东南大学学报(英文版), 2018, 34(3): 317-322.
- [8] Xia X X, Liu X, Li H F, et al. A 360-degree floating 3D display based on light field regeneration [J]. Optics Express, 2013, 21(9): 11237.
- [9] LEAP Motion. Documentation [EB/OL]. [2019-12-10]. <https://developer.leapmotion.com/documentation>.
- [10] Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [11] Moreno-Noguer F, Lepetit V, Fua P. Accurate non-iterative  $O(n)$  solution to the PnP problem [C]//2007 IEEE 11th International Conference on Computer Vision, October 14-21, 2007, Rio de Janeiro, Brazil. New York: IEEE, 2007: 9885065.
- [12] Hartley R, Zisserman A. Multiple view geometry in computer vision [M]. 2th ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.
- [13] Besl P J, McKay N D. A method for registration of 3-D shapes [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14(2): 239-256.